課題名	S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究		
課題代表者名	三村信男（茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター）		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	1,026,536千円（うち21年度　204,519千円） ※予算額には、間接経費を含む。

研究体制

１：統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究
（環境省独立行政法人国立環境研究所）

２：影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

（１）：温暖化による水資源への影響予測に関する研究
（東北大学、農林水産省農村工学工学研究所、東京大学、国土交通省国土技術政策総合研究所）

（２）：健康面から見た温暖化の危険性水準情報の高度化に関する研究
（環境省独立行政法人国立環境研究所、筑波大学、国立感染症研究所）

（３）：アジア地域のコメ生産に対する温暖化影響の確率的リスク評価
（農林水産省独立行政法人農業環境技術研究所、筑波大学、農林水産省独立行政法人国際農林水産業研究センター）

（４）：温暖化の森林への影響と脆弱性の評価に関する研究
（農林水産省独立行政法人森林総合研究所）

（５）：沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究
（国土交通省国土技術政策総合研究所、茨城大学、九州大学）

（６）：地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデルの開発に関する研究
（東北大学、名城大学）

I. 戦略課題S-4の全体構成

平成17年度から開始された本研究プロジェクトは、第Ⅰ期3年（平成17年度から平成19年度）＋第Ⅱ期2年（平成20年度から平成21年度）の5年間にわたる戦略研究プロジェクトである。本プロジェクトでは、地域的にはわが国およびアジア地域を、時間的には2050年頃までに重点をおきつつ今世紀末までを対象として、以下の目標を実現するために統合的な研究を推進する。

１）主要な分野における温暖化影響に関して定量的で明確な知見を提供すること。

２）わが国への統合された影響と安定化濃度との関係を示すこと。

３）温暖化影響の視点から達成すべき気候安定化の水準を提案すること。

研究体制としては、わが国およびアジア地域の水資源(S-4-2(1))、森林(S-4-2(4))、農業(S-4-2(3))、沿岸域(S-4-2(5))、健康(S-4-2(2))といった主要分野における影響予測および経済評価(S-4-2(6))の手法を開発する。さらに、影響・リスクを総合的に解析するための統合評価モデル(S-4-1)を開発し、影響の大きさと地域分布、出現速度について定量的な検討を実施する（図１）。

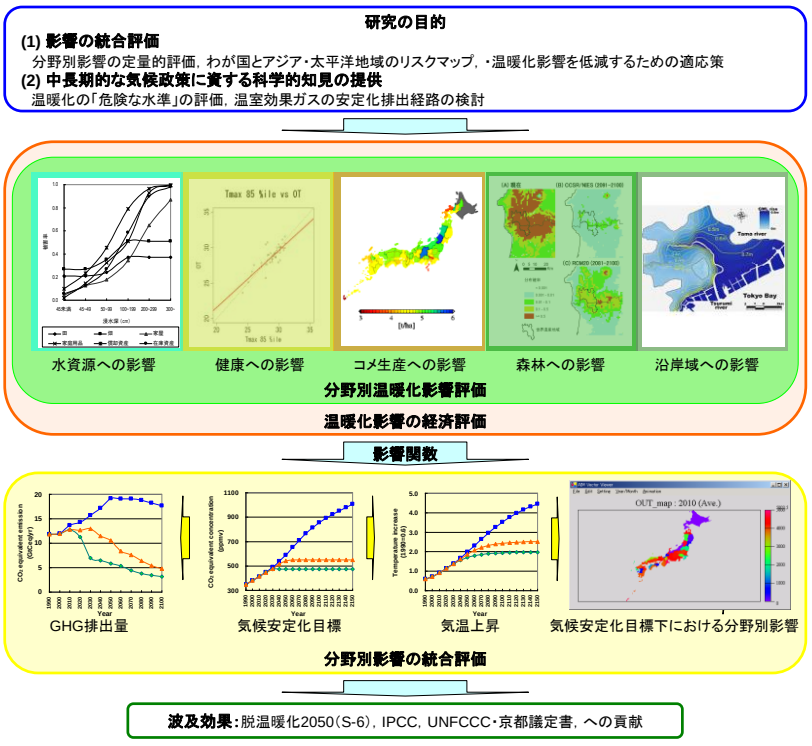


図１　研究プロジェクトの枠組み

Ⅱ.本研究により得られた科学的成果

プロジェクト全体の成果

・様々な分野・指標を対象として、日本全体およびアジアにおける新たな影響評価手法を開発したことで、気候シナリオを入力とした将来影響評価が可能となった。また、物理的影響と組み合わせて、分野別・指標別の経済影響を評価するための手法を開発した。さらに、気候安定化目標を達成するために必要な排出削減量ならびにその安定化目標下で生ずる温暖化の悪影響・リスクを統合的に解析・評価するための統合評価モデルを開発し、「影響関数」という手法により様々な分野別影響評価手法の知見を統合することに成功した。

・今世紀中頃（2050 年頃）までに重点をおきつつ今世紀末までを対象として、水資源、森林、農業、沿岸域、健康といった主要な分野における日本への温暖化影響予測及び経済評価を行い、さらに、統合評価モデルを用いた影響評価も加え、日本において生じる影響の大きさと地域分布、出現速度について定量的に検討した結果、分野ごとの影響量と増加速度は異なるものの、日本にも比較的低い気温上昇で厳しい影響が現れること、影響は地域毎に異なり、分野毎に特に脆弱な地域があることを明らかにした。これらの成果は、温暖化の危険な水準に関して、日本のみならず、世界的にも最先端の総合的な知見を提供するものである。

・複数分野（①洪水による氾濫面積及び被害コスト、②土砂災害による斜面崩壊発生確率及び被害コスト、③ブナ林の適域への影響及び被害コスト、④マツ枯れ危険域の拡大、⑤コメ収量への影響、⑥砂浜喪失面積の拡大及び被害コスト、⑦高潮浸水面積の拡大、被災人口及び被害コスト、⑧熱ストレス死亡リスク及び被害コスト）における影響を統合的に評価した結果、日本にも比較的低い気温上昇で厳しい影響が現れること、世界的に温室効果ガス排出量（以後、GHG）が大幅に削減された場合、我が国に対する被害も相当程度減少すると見込まれるが、温室効果ガス濃度を450ppmに安定化した場合でも一定の被害が生じることは避けられないことを明らかにしたことは、世界でも類を見ない貴重な成果である。ただし、本研究で見積もられた影響量および被害コストは、現状の社会経済システム（人口・土地利用・価値観）に基づく将来の気候変化による影響であることは留意しなくてはならない。

統合評価モデル開発

・長期目標の合意に関連した重要な論点について整理し、それをもとに長期目標への合意に資する温暖化影響研究の取り組みについて検討した。その結果、影響研究の知見を伝えるための工夫を行うこと、影響知見の総合化のためのツール開発やデータベース（DB）構築、適応を見込んだ影響評価の推進が、重要な今後の課題として示された。本研究で開発に取り組んでいる影響DBは上記課題への解決策の一つであり、温暖化影響および脆弱性への理解を深め、科学的および社会経済学的知見に基づいた気候安定化目標を設定するために非常に有効である。

・気候安定化レベルとその目標を達成するために必要なGHG排出削減量、同目標を達成したときに生ずる様々な分野の影響量を解析するための統合評価モデルAIM/Impact[Policy]を開発した。分野別影響評価結果から得られる知見（影響関数）を統合して、なりゆきシナリオと，GHG濃度が二酸化炭素等価濃度で450ppm、550ppm に安定化する２つのシナリオに対して，分野ごとの影響がどのように増加するかを検討した結果、低いGHG濃度で安定化させるほど悪影響が低減されるが，最も低いレベル（GHG濃度を450ppm）で安定化させるシナリオにおいても，なんら対策を講じない場合には悪影響を被る可能性があることが明らかとなった。

・詳細な影響評価モデルによる将来推計結果の比較を通じて影響関数による簡易化の妥当性を評価し、政策ツール開発における簡易化の標準的手順を提案することによって、従来になかった新しい影響評価を可能としたことは学術的にも貴重な成果である。

水資源影響評価

・GHG安定濃度と水災害の被害の関係を初めて明らかにした。また、発現年と被害額の関係も明らかにした。

・温暖化による水稲への影響と灌漑用水の適応策が示された。

・温暖化による都市河川の水質への影響が明らかになった。

・農業用水及び都市用水の取排水、地下水流動等流域内の水収支を明らかにするとともに、魚類の産卵床、景観等河川環境保全のために必要な維持流量にも配慮する流域内水収支評価モデルを構築した。

・グローバル並びに地域的に水ストレスの高い流域の住民人口比が、社会経済的なデータとGCMの出力結果を用いて、気温の関数として見積もられた。全球、地域スケールの水資源について、気候シナリオを用いた評価が可能になった。

健康影響評価

・健康影響の経済評価は、保健は専門であるものの、経済についてはそれほど詳しくない研究者が多かったため、学術雑誌にも経済学的に誤った研究が掲載されていた。この研究では、経済学の研究を専門とする近藤が加わって計算を行ったことで、世界的に認められる研究となった。このことで、我々のDALYs計算法が、世界保健機関（WHO）の進めている気候変化によるGlobal Burden of Disease Projectにおいて採用されることとなった。

・気温と死亡率との関連がV字型であることは古くから知られていた。しかしながら、そのV字型の死亡率が最低になる気温、すなわち至適気温が概ね日最高気温の85パーセンタイル値で推定できるという法則は本研究で初めて明らかになった。しかも、この法則は日本のみでなく、韓国、中国、台湾という発展レベル、文化の大きく異なる地域においても認められることから、更に広い地域でも成り立つことが期待される。この解析に対する評価は高く、世界保健機関(WHO)における気候変化による全球の疾病負荷推定プロジェクトにおいて、本田、近藤が選ばれ、気温の直接影響の計算を担当することとなった。また、本田は、このような貢献により、国際的な環境疫学の学会であるInternational Society for Environmental Epidemiologyの2010年学術総会において国際アドバイザリボードに選出された。

・政令市の救急搬送熱中症患者の解析により、日最高気温と熱中症患者発生率との間に明瞭な温度・影響関係を見いだした。また、将来推計の基礎となる、熱中症患者発生数に関しても、補完的に実施した病院調査により、救急搬送以外の患者を推計することが可能となった。

・消防庁が実施した熱中症患者全国調査結果との比較により、大都市（政令市）だけでなく中小市町村の熱中症発生の実態が明らかになり、日本全国を対象とした地球温暖化に伴う将来リスク推計が可能となった。

・温暖化による気象変化により、地域ごとに将来の詳細なオゾン濃度マップを推計する手法を確立した。しかし、この手法が適用できる地域は限られており、将来的には数値モデルによる推計が可能になるものと期待される。また、このマップから得られたオゾン濃度増加分に対応する死亡リスクの評価法も確立した。これについても、国内の疫学研究やオゾンの死亡リスクに関する閾値の研究が進展すれば、さらに正確な推計が可能になることが期待される。

・安定してヒトスジシマカの定着が認められる年平均気温は11～12℃以上であるが、北緯38～41°の範囲でこの条件を満たす地域の面積が急激に増加し、2031～2050年までに全面積の約60%を占め、2100年には90%以上となる。また、コガタアカイエカの活動範囲がとくに北日本で拡大し、日本脳炎ウイルスの活動自体も盛んになる可能性があることを示した。

・地球温暖化とマラリアの流行拡大について、今後、３℃平均気温が上昇すると、九州や四国の一部も温度条件からみたコガタハマダラカの生息可能地域に入るが、熱帯熱マラリアが日本に侵入・定着して再流行を起こすには、種々の条件が重なる必要がありその可能性は低い。

農業影響評価

・既存の作物生育・収量予測モデルではできなかった気象環境の変動に伴うコメ収量の年々変動を再現するモデルPRYSBIを開発した。これにより、平均的な気候変化影響だけでなく、農業生産に重要な異常気象などによる年々変動の影響を評価することが可能となった。

・モデルPRYSBIにIPCC AR4で使用された複数の気候変化シナリオを入力することにより、気候変化シナリオにおける不確実性ならびに影響評価モデルに含まれる不確実性を同時に考慮した気候変化リスク評価結果は、これまでにないオリジナルなものである。

・世界の有数の輸出用コメ生産地域であるベトナムメコンデルタにおける水資源、水質ならびに水稲栽培の状況を環境データから推計する初めての統合モデルシステムを作成した。これにより、対象地域のコメ生産に関わる要因の相互関係と環境変動の影響の解析が可能となった。

・中国におけるコメ生産量の変動予測について、マルチアンサンブル手法を用いて気温上昇段階（1℃～3℃）ごとに出現確率分布を求めて収量変動予測を行った。本手法はこれまで例が無く、不確実性の評価に利用価値が高いと考えられる。東アジアのコメ生産に関して、マクロ気候学的視点からの変動予測に貢献することが期待される。

・作物の収量を気温と降水量の関数として、国・地域間および気温と降水量間の相関を考慮してシミュレーションを行い、気候変動の影響を分析することが可能な確率的世界食料モデルは他に例を見ない。また、生産動向等の予測としての社会経済シナリオ別の分析結果は、アンサンブル推計を除いてこれまでにないものである。

・メコンデルタでの水管理の観点からの水理モデルはこれまでにも開発されているが、季節洪水および塩水遡上の両現象の影響を同時に扱える水理モデルは無かった。気候変化がメコンデルタにおける農業生産へ及ぼす影響を定量的に評価するために、本モデルを独自に開発することにより、

農業生産性モデルとの結合が可能となり環境応答機構の解明や影響評価への利用価値は高い。

森林影響評価

・空間分布予測モデルの手法の発達により、野生動植物の潜在生育域の予測が欧米を中心に行われている。この手法は、温暖化影響を広域で推定するのに適している。しかし、東アジアでは、この分野の研究は少なく、発展が必要であったが、日本では、我々のチームが中心になって取り組み、ブナ林、ササ類、ハイマツ、針葉樹10種についての成果を発表した。いずれの種においても、温暖化に伴い生育地がどのように変化するかを予測し、脆弱な種や地域、及び持続的な生育地（逃避地）を特定した。

・分布予測モデルの基盤データとなる植物分布データベースの構築を行った。その一つである植物社会学ルルベデータベースは、過去の植生調査区の資料を全国スケールで電子化したもので、これにより多種について分布予測モデルを作ることが可能となった。これまでの欧米における植物種の潜在生育域の予測では、植物分布図や森林調査資料に基づく植物分布データを利用する20～50kmの空間解像度の解析が主流であるが、我々は、日本の急峻な地形に適合させるため1km空間解像度で精度の高い予測を行っている。

・亜高山針葉樹の更新初期の段階に積雪が大きく影響することを見いだすとともに、多くの山地湿原において顕著な縮小傾向を明らかにし、積雪の変動が植生変化に与える影響を従来よりも詳細に示した。また、衛星による実際の積雪分布データを用いて地域的な特性を考慮した１kmメッシュの積雪分布データを作成し、温暖化時の日本列島の積雪環境を予測できた。

沿岸域影響評価

・高潮浸水：①全球レベルでは、防護の有無によって、水没面積と影響人口は大きく異なることを示した。また、浸水被害額は、大局的には浸水影響人口と国毎の一人当たりGDPの積に比例すると仮定して、被害額を推定したところ、防護なしの被害は年間12-21 億ドル（世界のGDPの0.40-0.48%)と見積もられ、適応策として防護措置をとることによって被害は年間6-8 億ドル（世界のGDPの0.17-0.19%)に減少すると見積もられた。②日本を対象として、温暖化の進行に伴い高潮による浸水の被害は緩やかな曲線で増加することが分かった。

・河川洪水と河川堤防の安定性：①解析した全ての流域で将来的に総氾濫水量、浸水面積が増加した。②河川水害については、気候変動に伴う河川氾濫の推計から、直接的な経済損失とおよび間接的な経済損失を示した。直接的な影響のみならず、産業部門間や地域間の波及効果を分析したことに本研究の意義がある。③日本の代表的な河川堤防を構成する土質試料に対する侵食実験結果から、河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性と適応策マップが得られた。この成果は、地盤工学分野において過去に例はなく、貴重な研究成果であり、河川堤防や高水敷・河岸に関する工学的政策において大きく寄与できるものと考えられる。

・気候変動に伴う地下水位上昇と巨大地震との複合的な災害の評価手法と災害によってもたらされる経済的損失の評価手法を提案し、東京湾沿岸域へ適用した。その結果、液状化危険度と災害損失額は沿岸域だけなく、内陸部にも拡大することが明らかになった。

・地震と豪雨との複合影響を考慮した斜面災害リスクの評価手法及び広範囲における斜面崩壊ハザードマップ・経済損失分布マップ・リスクマップの作成手法を確立した。

影響の経済評価

・S-4の各サブテーマにおける個別分野の経済評価に対して、評価手法の考え方と適切な手法の提案を行うことにより、S-4全体の経済評価が理論的整合性を保って行われるようになった。

・マクロモデル構築の妥当な方向性を示すために、現実を反映するような時間選好率の値と効用関数形のあり方を提示できた。次に、社会的割引率に関して感度分析を実施し、本研究で採用しているマクロ経済モデルが地球環境政策のシミュレーション分析に有用であり、かつ地域的な政策評価にも利用可能であることを明らかにした。さらに、日本を個別地域とした修正RICEモデルを開発し、気候安定化政策シナリオを意思決定基準に基づいた評価や費用便益分析の観点から評価することで、全球だけでなく地域ごとに費用対効果の高い政策オプションの優先順位を示すことが可能となった。特に、地域ごとの費用便益評価が算出可能であるということの科学的意義は高い。

・政策オプションを検討するために、既存研究における貨幣評価原単位に関するレビューを行い、現在得られている値を整理することが出来た。次に、本研究で提案した評価手法を用いることにより、地球温暖化対策としての「熱中症防止」、「ブナ林保全」、「マツ林保全」、「砂浜保全」、「干潟保全」の費用対効果を検討する際に必要となる基礎資料の提供を目的として、CVM（仮想市

場評価法）およびTCM（旅行費用法）によりこれらに関する貨幣評価原単位を推計した。これら貨幣評価原単位の推計により、これまで諸外国における温暖化影響の経済評価結果を為替レートによって日本円に換算していた貨幣評価原単位に対して、日本独自の原単位を得ることができた。特に、温暖化影響の経済評価に関する研究蓄積が少ないという日本の現状において、日本独自の貨幣評価原単位を算出したことの科学的意義は高い。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献

・環境省の中央環境審議会地球環境部会「気候変動に関する国際戦略専門委員会」における「気候変動問題に関する今後の国際的な対応について（長期目標をめぐって）第２次中間報告」において、本研究成果を提供した。

・本プロジェクトの研究参画者が、IPCC第2作業部会第4次評価報告書の第2章LA（代表執筆者）、第10章CLA（統括執筆責任者）・LA、第16章CLA、第17章LAを務め、本研究プロジェクトの研究成果発信に務めた。

・東京都環境審議会環境政策部会環境都市作り調査会の委員として参加し、東京における地球温暖化の影響・適応について本研究プロジェクトの研究成果を活用した。

・地球環境局長諮問委員会として設置された「地球温暖化影響・適応研究委員会」に研究参画者４名が委員として参加し、さらに分野別ワーキンググループ（食料分野、水環境・水資源分野、自然生態系分野、防災・沿岸大都市分野、健康分野、国民生活・都市生活分野、途上国分野）に研究参画者がメンバーとして多数参加し、本研究プロジェクトの研究成果を活用して、報告書「気候変動への賢い適応」の取り纏めに貢献した。

・本研究で開発された影響関数とそれを組み込んだ統合評価モデルを用いて、安定化レベル別の影響の度合いを検討した研究成果は、地球温暖化問題に関する懇談会の中期目標検討委員会における検討課題の一つである「対策を講じない場合のコスト」に対して、気候安定化レベルに応じた我が国への影響および被害コストに関する総合的な知見科学的知見を提供し、GHGのより積極的な削減と適応策が必要であることを示した。

・文部科学省・気象庁・環境省が報告した「温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート：日本の気候変動とその影響」に、多数の研究参画者が専門家委員及び専門家として貢献し、本プロジェクトの研究成果が多数引用された。

・平成22年版環境・循環型社会・生物多様性白書に本プロジェクトの研究成果が引用された。

・環境大臣・副大臣・政務官へ本プロジェクトの研究成果を紹介した。

・研究参画者がIPCC「気候変動適応を促進するための極端現象及び災害のリスク管理」特別報告書代表執筆者（執筆期間2009～2011年；2011年公表予定）に選出されており、IPCCを通じた地球環境政策への貢献も見込まれる。

・熱関連の超過死亡（熱関連によって増加した死亡）の将来予測は気候変動に関する政府間パネルの第4次報告書に引用された。

・国立環境研究所ホームページ等を通じて、熱中症予防への啓発活動を積極的に行った。

・環境省：「熱中症保健指導マニュアル」検討会、ヒートアイランド対策検討会に研究参画者が専門家として貢献した。

・本研究成果である、政令市における毎日の熱中症患者発生数と日最高気温、日最高WBGT(湿球黒球温度)との関連性に関する結果が「ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討会報告（環境省）」、「熱中症保健指導マニュアル（環境省）」に引用された。

・国土交通省における融雪出水の検討会や宮城県の水循環審議会において、本研究成果である洪水被害解析結果が資料として利用された。

・紙（かみ）国会議員の地球温暖化が世界の食料需給に及ぼす影響に関する質問に対して、気候変動を考慮した世界食料モデルに、1998年から各年0.05%ずつ気温が上昇するとした簡易気候シナリオを想定した場合の各作物の供給量変化の計算結果を紹介した。

・農林水産技術会議事務局の局長が主催する「地球温暖化による影響評価・適応策の研究開発に関する検討会（第１回）」において、同モデルを用い、SRESのA2シナリオに基づいて気温と降水量が変化する場合の各国各作物の生産量変化について報告した。

・ベトナムの国家プロジェクトとして、気候変化がメコンデルタの農業に及ぼす影響評価がテーマの一つとなり、本モデルのコンセプトが引き継がれている。

・ブナ林分布への影響予測論文は、IPCC第4次評価報告書WG2(2007)に引用された。

・研究成果が、白神山地世界遺産地域の保護管理計画に温暖化の適応策を組み込む準備を始めるきっかけになった。

・研究参画者が、2008年10月26日から27日に香港で英・Stern Teamによって開催された「Regional

Economics of Climate Change Workshop」に参加し、世界の地球温暖化研究者らとの議論を行い、最新の知見の収集だけでなく、わが国の地球環境施策の広報等に勤めている。

・研究参画者が、2009年3月11日に学士会館で行われた「第1回温暖化リスク・メディアフォーラムーIPCC第5次報告書に向けた温暖化リスク研究ー」に参加し、地球環境政策への提言等の広報・普及に努めた。

IV.研究概要

１．序

気候変動枠組条約が掲げる地球温暖化防止のための究極的な目標は「地球の気候系に対し危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において、大気中のGHG濃度を安定させること」である。しかしながら、「安定化すべき濃度」に関する確固たる知見はまだ得られておらず、影響からみた危険な水準について科学的に明らかにすることが緊急課題となっている。近年、欧州各国で危険な影響を回避するための安定化濃度が提案され、影響出現経路や対策コストの比較などの研究が進められてきている。さらに、2007年に発表されたIPCC第４次評価報告書は、気候変動の影響と脆弱性の評価に基づいて、２～３℃の気温上昇によって世界規模で大きな経済的影響が生じることを指摘している。わが国にとっても、今後、京都議定書第1約束期間以降を見通した中長期的な政策立案のために、温暖化の危険な水準及び安定化濃度に関する科学的検討が緊急かつ重要な課題になっている。

２．研究目的

日本およびアジア・太平洋地域を対象にして、分野別の影響を定量的に把握し、影響を緩和するための適応策を検討する。さらに、これらの研究成果を統合した排出・影響予測統合評価モデルを開発することによって、温暖化影響の危険な水準と温室効果ガスの安定化排出経路に関する研究を実施する。それによって、分野別の温暖化影響に関して確固たる知見が集積されるとともに、わが国への統合された影響と安定化濃度との関係を示し、温暖化影響の視点から達成すべき気候安定化の水準を検討する。

３．研究の方法

・日本を主眼にしてアジア・太平洋地域における分野別の影響（水資源、健康、農業、生態系、沿岸域・防災）を定量的（物理的影響と経済影響）に予測可能なモデル・手法を開発し、リスクマップを作成する。

・日本およびアジア・太平洋地域を対象にして、温暖化影響を低減するための適応策のオプションを提案し、その効果を評価する。

・分野別研究成果を統合した排出・影響予測総合評価モデルを開発することによって、温暖化影響の危険な水準と温室効果ガスの安定化排出経路に関する研究を実施し、気候政策の検討にとって有用な知見を提供する。

・以上に基づいて、温暖化影響の視点から達成すべき気候安定化の水準を提案する。

４．結果及び考察

１：統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究

①「統合評価モデルを用いた温暖化の危険な水準および温暖化抑制目標に関する研究」

１）抑制目標検討のために、分野別の温暖化影響予測に関してIPCC第3次評価報告書とそれ以降の影響評価に関する新たな知見を整理した。また、適応策研究の役割を明らかにするために、適応・適応能力の概念整理、適応策を取り扱った研究の分類を行った。さらに、長期目標の合意に関する影響研究の役割を検討し、長期目標の合意形成を左右する５つの要素を明らかにした。

２）長期目標の判断に貢献することを目的として、複数の分野における既存の影響知見を格納した温暖化影響データベースを開発した。

３）統合評価モデルAIM/Impact[Policy]を用いて、日本を対象とし、なりゆきシナリオと2つのGHG濃度安定化シナリオ下における影響評価（①洪水による氾濫面積及び被害コスト、②土砂災害による斜面崩壊発生確率及び被害コスト、③ブナ林の適域への影響及び被害コスト、④マツ枯れ危険域の拡大、⑤コメ収量への影響、⑥砂浜喪失面積の拡大及び被害コスト、⑦高潮浸水面積の拡大、被災人口及び被害コスト、⑧熱ストレス死亡リスク及び被害コスト）を実施した。結果、いずれの指標においても、低いGHG濃度で安定化させるほど悪影響が低減されるが、最も低いレベル（GHG濃度を450ppm）で安定化させるシナリオにおいても、なんら対策を講じない場合には悪影響を被る可

能性があることが示された。この結果より、今後20年は追加的な緩和策の有無にかかわらず温暖化が進行すると予想されているが、世界全体の気候安定化レベルの違いによる影響の差異は、今世紀中程を過ぎると大きくなると見込まれる。したがって、気候を安定化させるための積極的な緩和策と共に、ある程度の悪影響が生じることに備えて、長期的な視点で適応策を検討・実施することが早急に必要であることが明らかとなった。

②「温暖化影響の全球プロセスモデルを用いた分野別影響関数（世界）の開発に関する研究」

１）S-4プロジェクトにおける日本域を対象とした地球温暖化による環境影響評価を支援するために、入手可能なすべての気候シナリオを、モデル、シナリオ別に収集・整理し、気候シナリオの高解像度化を行うとともに、国別・都道府県別の平均値を集計し、AIM/Impact[Policy]に実装した。

２）農作物の潜在生産性変化、水資源・水ストレス人口、熱ストレス超過死亡を評価するための影響関数を開発した。加えて、S-4-2(4)との連携し、温暖化によるブナ林への影響を国内各県について見積もるための影響関数を開発した。

２：影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２（１）：温暖化による水資源への影響予測に関する研究

①「温暖化各レベルに対応する水資源管理への総合影響評価」に関する研究

地球温暖化による水災害の評価として、将来気候について統合モデルを用いて温暖化効果ガスと洪水氾濫被害と斜面災害被害の関係について考察した。その結果、GHG濃度シナリオ450s（二酸化炭素換算濃度450ppm）、550s（二酸化炭素換算濃度550ppm）、BaU(なりゆきシナリオ)における全国の洪水氾濫面積は、今世紀中頃(～2050s)まではシナリオ間で大きな差が現れないが、今世紀末頃(～2090s)までにはシナリオによって氾濫面積に差が現れ、それぞれ最大で約1000km^2、約1100km^2、約1200km^{2}に達すると見込まれる。地域別では、時期は異なるものの甚大な被害が見込まれ、特に、関東・甲信越・北陸における氾濫面積の大幅な増加が見込まれる。全国の450s、550s、BaUにおける最大の斜面崩壊被害コストポテンシャルは、今世紀中頃(～2050s)まではシナリオ間で大きな差が現れず、約0.69兆円/年程度と見込まれるが、今世紀末頃(～2090s)までにはシナリオによって斜面崩壊被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、450sでは今世紀中頃までと余り変わらないが、550sでは最大約0.77兆円/年、BaUでは最大約0.94兆円/年に達すると見込まれる。

②「温暖化各レベルに対応する農業用水需給への影響と適応策」に関する研究

温暖化に伴う農業用水への影響予測と考えられる適応策を分析し、以下の結論を得た。

１）メッシュ気候値2000の日平均気温による計算の結果、平年値では、一部に、高温障害が生じているが、影響は小さい。+2℃シナリオでは、西日本を中心に、高温障害が発生する。

２）ヒストグラムの最大頻度を見ると、灌漑用パイプラインがゼロから3倍シナリオの偏差では、収量減少を5～10%抑える効果がある。灌漑用水量は20%程度減少させる効果が期待できる。

３）統計モデルは、波浪の被害は九州と東南海に集中する。この地域では、WASTで気温が１℃上がると年最大波高のMedianが3.3m増加し、海面上昇により大きな影響を与える。

４）20年に1回程度の気象変動に対しては、灌漑水田は非灌漑水田より脆弱である。日本の場合、経年的に灌漑が拡大するに従い、脆弱性が減少する。また、エネルギー面で持続可能な灌漑システムで、なおかつ、水質等の現在抱える課題を解決できる水田灌漑システムに、現在ある灌漑システムを再編することが必要である。これは、同時に、温暖化対策への適合策にもなっている。その場合のキーとなる技術は、SGと分散型貯留と思われる。

５）タイでは水資源量により乾期の水田面積を制限し、水田面積決定で総収量の期待値の増大と渇水リスクの増大の組み合わせのベストミックスが選択されれば、灌漑水田と非灌漑水田の脆弱性に差はなくなる。この仮説が正しければ、温暖化により、水資源が減少した場合には、水稲から陸稲といった渇水リスクが変化しないような作物の組み合わせが選択される。

③「地球温暖化にともなう都市水システムへの影響評価」に関する研究

これまでの研究で、水道水源となっている河川の水温とアンモニア性窒素とが高い逆相関を示すことが示された。今年度は、荒川流域の荒川本川並びに支川の水質データを用いて、水質変動の現状と、水質変動に影響を与える因子について考察した。特に、pHの上昇は、浄水場において凝集阻害を引き起こし、水質を悪化させるほか、薬品の注入量の増大を招くため、pHの変化に着目した。その結果、荒川下流の秋ヶ瀬取水堰において、年平均のpH及びアルカリ度は、過去40年間に上昇する傾向が見られた。荒川上流部の支川はpHが8以上と高いが、中でも横瀬川は9以上の高いpHであった。これらの支川は荒川本流のpHに影響を及ぼしているが、流下とともにpH は下るため、秋ヶ瀬取水堰での高pHは上流部の河川によるものではなく、中流部以下の支川や荒川本川内でのpH上昇が

考えられた。 特に、秋ヶ瀬取水堰において5月から6月にかけてpHとアルカリ度が上昇する原因としては、水温の上昇による藻類の増加が考えられた。秋ヶ瀬取水堰では一年を通して窒素やリンなどの影響塩濃度は高く、藻類の増殖制限因子にはなっていない。このため、水温が上昇する5月から6月にかけてpH、アルカリ度、溶存酸素濃度などの上昇を招いたものと考えられる。その一方で、藻類増殖が起こりにくい1月から3月にかけてpHが上昇する場合もあり、今後は、藻類増殖以外の可能性についても検討が必要である。

④「温暖化各レベルに対応する水資源マネジメントの政策オプション」に関する研究

大量の農水等の取水がある一方で、河川環境保全への要請も強い筑後川をモデル河川として、流域内水収支評価モデルを構築すべく、筑後川に利水を依存している農業用水及び都市用水の取排水、地下水流動等流域内の水収支を明らかにするとともに、魚類の産卵床、景観等河川環境保全のために必要な維持流量にも配慮するモデルを作成した。さらに、渇水時において各利水者の水需給を調整する際の一助となるよう、筑後川、他水系、地下水等の水源の節水率を調整するための水需給把握システムの構築を試みた。

⑤「温暖化各レベルに対応する洪水リスクの増減評価」に関する研究

グローバル並びに地域的に水ストレスの高い流域にすむ人口比が、社会経済的なデータとGCMの出力結果を用いて、気温の関数として見積もられた。本研究成果は、既存の知見と異なり、流出だけでなく社会経済的指標（灌漑面積、工業用水の増加、人口そのものの増加）を用いた水アセスメントを実施すると、気候変動による水リスクへの影響は大きくない。むしろ人口増加など社会経済の変化が大きく影響を与えることを示した。

２（２）：健康面から見た温暖化の危険性水準情報の高度化に関する研究

①「適応策を考慮した温暖化の健康リスクの定量化・経済指標化とマッピングに関する研究(DALYs)」

１）熱関連の超過死亡によるDALYs（障害調整生存年）：気温５℃上昇時の年令階級別・死因別の超過DALYsを年令階級別に推計した結果、4疾患合計では、65歳以上33,963、15～64歳33,588、0～14歳15,537の順であり、それぞれの死因でみると、0～14歳、15～64歳では呼吸器系疾患、外傷が多く、65歳以上では呼吸器系疾患とともに循環器系疾患が多くなった。一方、現状に対する超過DALYsの割合でみると、４疾患合計で、0～14歳が4.9%で最も大きく、ついて65歳以上2.2%、15～64歳1.1%であった。死因別にみると、0～14歳では消化器系疾患が最も大きく、15～64歳、65歳以上では呼吸器疾患が最も大きかった。また、男女間でも異なる傾向が見られた。

２）スギ花粉症の経済影響：気温の上昇に応じたスギ花粉症の経済的影響を推定したところ、2℃の上昇によって100億円に近い額のbudget impactがあることになった。

②「温暖化と死亡リスクに関する研究」

１）気温と死亡の関連に関する最適モデルの探索：気温と死亡率との関連がV字型であることは古くから知られていたが、そのV字型の死亡率が最低になる気温、すなわち至適気温が概ね日最高気温の85パーセンタイル値で推定できるという法則は本研究で初めて明らかになった。

２）熱ストレスによる超過死亡：わが国近傍の1990年代と2090年代の予測結果では、首都圏から東海地方にかけてと、中国の中心部に影響の大きな地域が存在することがわかった。

３）気温と総死亡の関連：寒冷の影響は、寒いほど死亡率が高くなるということではなく、何らかの季節的な要因、たとえばインフルエンザの流行などによって冬期の死亡率が高いということによる可能性も否定できない。温暖化の健康影響を評価するためには、この点に関して、更なる研究が必要となった。

４）自殺と気象要因の関連：気温が高いほど自殺死亡率が高いことが明らかとなった。このことから、多くの過去の研究に見られるような、a prioriに外因を死因からはずした非外因死亡によって気温の影響を評価することは問題であることが示唆される。

③「温暖化と熱中症・熱ストレスに関する研究」

１）温度・影響関数の構築：性別・年齢階級別の温度・影響関数を開発した。原則全国一律としたが、他都市と大きな違いの見られた沖縄県の20～64歳男性と札幌市の65歳以上男女については別関数とした。沖縄県の20～64歳男性については炎天下での屋外作業が、札幌市の65歳以上の高発生率についてはルームエアコン普及率の低さが関係しているのではないかと考えられる。なお、熱中症発症の温度指標としてはWBGTが有効であることが示されたが、現時点では将来予測に用いるのは不可能と判断した。

２）熱中症患者の将来予測： MIROCを適用し、将来（2031～2050年、2081～2100年）の熱中症患者数の推計を行った。2031-2050年、2081-2100年の熱中症患者発生率は、現状と類似のパターンを

示した。一方、現在との比較（対1981-2000年比）では、現在発生率の高い地域ほど増加率は低く、現在発生率の低い地域ほど増加率が高い結果となった。

④「温暖化に伴う大気汚染のリスクに関する研究」

１）オゾン濃度の将来予測と死亡リスクの推定：関東地域、東海地域、関西地域、瀬戸内地域、北九州地域について、2031年～2050年及び2081年～2100年の夏季（６月～８月）の気象パターン分類を行い、過去のオゾン濃度観測値との整合性を確認の上、現況（1981年～2000年）、2031年～2050年及び2081年～2100年のオゾン濃度分布図を作成し、県別の将来人口シナリオを用いて、推定死亡数を推計した。

２）オゾンのリスクに閾値を仮定した場合の健康リスクの推定：５地域（11都府県）について、閾値がないと仮定した場合と、閾値が20ppb(TL20)、40ppb(TL40)、60ppb(TL60)であると仮定した場合について、増加死亡数の推定を行った。閾値を60ppbとした場合には、増加死亡数が大きく低下する地域が多かったが。40ppb以下では、増加死亡数はほとんど減少しない地域が多かった。

⑤「節足動物媒介性感染症の発生に及ぼす地球温暖化の影響予測に関する研究」

１）デング熱およびチクングニヤ熱の媒介蚊と知られているヒトスジシマカの東北地方における分布域を詳細に検討し、分布確認地域と未確認地域における気象学的要因を解析し、分布可能な気象要因として年平均気温11℃以上の条件を明らかにした。さらに、MIROC(K1)モデルを利用して、将来の分布域を推計した。

２）日本脳炎ウイルスの活動を直接的に反映すると考えられるブタの日本脳炎抗体獲得状況の解析から、日本脳炎ウイルスの活動と夏期の平均気温、最高気温、最低気温と各年の最終検査日の日本脳炎ウイルス抗体陽性率には正の相関があり、日本脳炎ウイルスの活動は特に夏期の気温により影響を受けていることを明らかにした。

３）熱帯熱マラリアについて、わが国における再流行の可能性を検討した結果、熱帯熱マラリアが日本に侵入・定着して再流行を起こすには、他にも様々な条件が重なる必要があり、実際に再流行が起きる可能性は極めて低いと結論づけられた。

２（３）：アジア地域のコメ生産に対する温暖化影響の確率的リスク評価

①「気候変動によるコメ生産量変動の確率的評価手法の開発と評価に関する研究」

１）北海道・東北地域では、気温上昇（気候変化）に伴ってコメ収量は増加すると推計された。他の地域では収量はおおむね減少すると推計された。ただし、3℃付近までの気温上昇では、全国でコメ収量は現在と同程度かあるいはやや増加すると推計される。この収量増加は、おもに低温による収量低下（冷害）の発生確率が減少することに起因する。中部日本、西日本を中心として、平均収量の減少ならびに年々変動の増加の確率が大きくなると推計された。収量の年々変動が増幅される原因は、不稔過程の温度応答性によって説明される。特に東海から中部、関西にかけて、気候変化に伴って太平洋高気圧が強まり、その端がこの地域にかかることにより、夏期の高温傾向が強まることが気候モデルの総観場として見られる。これは近年にも見られる特徴であり、将来、これが当該地域での収量低下および変動の増幅のさらなる原因となる可能性がある。

２）メコンデルタにおける水稲栽培環境およびコメ収量の環境応答推計の統合モデルに、気候シナリオ(MIROC3.2hires A1B)をモデルに適用し、作付暦、収穫面積および収量の変化をシミュレートした。その結果、洪水年と少雨（塩水遡上）年にはそれぞれ上流部と沿岸部の収穫可能面積が大きく減少したが、同時にその他の地域では作付可能面積が増加する相反関係が見られた。また、空間分布は変動するもののデルタ全体の総収穫面積の減少は緩和されることが分かった。一方、気温上昇による収量への影響は敏感であり、その結果、2020 年代後半におけるベトナム・メコンデルタのコメ生産量を集計したところ現在よりも約 11%低下する可能性が示された。

②「中国におけるコメ生産量変動の確率的リスク評価に関する研究」

１）従来コメ生産が盛んな合肥（安徽省）に関して解析を行った。二酸化炭素濃度の上昇の効果を考慮しない場合には、コメ生産量は全球平均気温が1℃、2℃、3℃に増加すると、それぞれ65%、90%、98%となることが予測された。二酸化炭素濃度上昇の効果を考えた場合には、コメ収量は1℃、2℃、3℃に増大するに従い25%、40%、40%に減少すると考えられた。二酸化炭素濃度上昇を考慮しない場合と比較すると、生育期間はより短縮すると考えられた。

２）温暖化条件下で好適な影響が考えられる東北平原のハルビンを対象にした予備的解析を行った結果、1℃、2℃、3℃気温上昇の水準で、50%の確率でコメ収量がそれぞれ6.7%、21.2%、30.5%減少した。適した栽培方法を導入しなければさらに収量は低下する。また、栽培期間と灌漑が最適化される効果は昇温水準が大きいほど減少した。こうした場合の灌漑用水量はわずかに上昇することも示唆された。中国の主要栽培地域を対象に、コメ栽培期間の日平均気温偏差ΔT（℃）と収量偏

差ΔY（t/ha）の関係をもとに影響関数を求めた。その結果、$\Delta Y=3.76\Delta T-0.0806\Delta T^2$、を得た。

③「温暖化が世界の食料市場に及ぼす影響の予測と価格変動リスク評価に関する研究」

１）各作物の生産者価格について、2006～2010年までの平均のCVと、2026～2030年までの平均のCVを算出した。価格の変動は全ての国のすべての作物で拡大している。特に大豆は、主要生産国で20～25%変動係数が増加し、1～2%の増加に止まる他の作物に比べて非常に大きく変動が拡大する。

２）世界食料モデルによるシミュレーション結果は、いくつかの国あるいは地域の作物生産は、変動の増大を伴う気温上昇によって大きな影響を受けることを示している。これらの結果は、気象変数と需給に関するパラメータが不変という中期のモデルに基づいている。さらに正確な結果を得るためには、長期の予測を想定したモデルが必要である。

④「気候変化に伴う水資源の量と質の変動がメコンデルタのコメ生産に及ぼすリスク評価に関する研究」

１）使用した気候変化シナリオでは、洪水の水位と浸水面積に関して、基準年シナリオより「将来」シナリオの洪水がはるかに大きいことが分かった。上流の流量増加は洪水期間の長期化ももたらす。ここでは、コメ栽培を不可能にする浸水深度の閾値を0.5mとして洪水期間を計算した。また、1回のコメ栽培に必要な期間を平均110日と仮定した。「将来」シナリオにおけるコメ栽培期間の大幅な変化は、主として洪水期間の長期化によるものである。三期作が可能な地域の面積が31%から5%に減少する一方で、一期のみ作付け可能な地域の面積は21%から62%へ増加すると推定された。

２）SRES A1B気候変化予測に基づく「将来」シナリオを利用して、気候変化によって生ずると予想される海面上昇と上流部の流量変化がベトナム・メコンデルタにおける塩水遡上と洪水に及ぼす影響について調べた結果、ベトナム・メコンデルタ全面積の約67%が気候変化の影響を著しく受けると予想された。しかし、この評価は、一つの気候モデルのアウトプットに基づく単一のシナリオである。今後は複数のシナリオによる評価が必要である。

２（４）：温暖化の森林への影響と脆弱性の評価に関する研究

①「温暖化の森林植物への影響と脆弱性の評価に関する研究」

1)ブナ林：モデルに基づき分布予測を行った結果、ブナ林の適域の面積は、3次メッシュセル１つの面積を$1km^2$とすると、現在の気候下では$26,220km^2$であった。このうち、実際にブナ林である地域は56%であった。RCM20とMIROCシナリオによる将来予測では、適域全体の面積割合は、2031-50年にはRCM20とMIROCではそれぞれ86%と56%に、2081-2100年にはそれぞれ37%と21%に減少すると予測された。これらの適域のうち、ブナ林が実際に分布している地域だけを対象とすると、現在に比べて2031-50年にはRCM20とMIROCではそれぞれ47%と32%に、2081-2100年にはそれぞれ21%と4%に減少すると予測された。2081-2100年の適域の分布は、現在の気候に比べ本州太平洋側や西日本でほとんどなくなり、本州日本海側でも大きく縮小すると予測された。したがって、全国的に見ると本州太平洋側や西日本のブナ林が温暖化に対して脆弱と考えられる。白神山地世界遺産地域では、適域が現在の気候下では世界遺産地域の95%を占めるが、2031-50年にはRCM20で30%、MIROCで2%に減少し、2081-2100年にはRCM20で0.6%、MIROCでは消滅する。ブナの寿命は200～400年であり、温暖化によりブナ林がすぐに衰退する可能性は低い。ブナの老齢木の枯死後に高木種の交代が順調に進行するかについて、ブナ林の大きな変化や衰退が予測される地域を中心に監視していくことが重要である。

２）ササ類：温暖化に伴いチシマザサ節とチマキザサ節の潜在生育域は、それぞれ46.9%と32.1%に減少すると予測された。潜在生育域の減少が起こる原因は、チシマザサ節は積雪の減少、チマキザサ節は積雪の減少とWIの増加と考えられる。脆弱な地域は、チシマザサ節が北海道東部や東北地方北部及び本州日本海側の低地で、チマキザサ節が本州日本海側の低地及び本州太平洋側の低・中標高域である。脆弱な地域では、現在生育するササ類が衰退する可能性がある。

３）ハイマツ：分布域における現在の気候下での適域の面積は$7,867km^2$であった。2081-2100年には、RCM20で31%、MIROCで14%に適域が減少する。いずれの場合も、ハイマツが分布する山地の全てにおいて、適域の面積が縮小または消失することが予測された。特に東北地方では、RCM20で9%に、MIROCでは0%にそれぞれ縮小すると予測され、脆弱な地域といえる。東北地方から適域が消失することにより、適域は中部山岳地域と北海道に大きく二分され、ここが温暖化後の逃避地になる。

４）針葉樹10種：現在と将来の気候で亜寒帯樹種（オオシラビソ、シラビソ、コメツガ）、冷温帯樹種（ウラジロモミ）、稀少種（トガサワラ）の計5種は、適域や潜在生育域が全体的に減少するだけでなく、特定地域でほとんど消失することから脆弱であると推定された。温暖化後も適域が維持される地域(逃避地)は、オオシラビソ・シラビソ・ウラジロモミ・コメツガが中部山岳地域で

あった。トガサワラは、大きな逃避地がなくなってしまうので、温暖化に対してとくに脆弱であると考えられる。

②「温暖化に伴う積雪環境の変化が植生に与える影響予測に関する研究」

1）SPOT/VEGETATIONの旬データを用いて補正した積雪分布予測モデルから推定した将来の積雪水量分布データによると、本州付近の積雪水量は温暖化によって大きく減少する。MIROCシナリオによる平均気温の上昇は約4.7℃であり、積雪環境に対しては湿潤断熱源率で標高約800m程度の効果をもたらすこととなり、結果的に雨雪閾値付近で推移する低標高域の積雪環境はどのような計算手法を用いても激減することが明らかになった。

2）亜高山帯針葉樹のうち、太平洋側で卓越するコメツガやシラビソについては、地表（土壌上）で定着している高さ0.3～1.3mの稚樹の割合は、根雪期間が長い場所ほど低下する傾向が明瞭に認められた。オオシラビソでは同様の低下傾向は見られるが、コメツガやシラビソに比べて傾向は小さかった。積雪傾度に沿った針葉樹の分布の成立メカニズムとして、種子・実生・稚樹の更新初期段階における定着阻害が重要であることが明らかにされた。

3）奥只見の平ヶ岳頂上部の湿性草原を対象として、航空写真の年代別比較と植生の変化について調査を行った結果、42年間で28%の面積の縮小が確認された。この変化はチシマザサやハイマツの湿原への侵入によるもので、特に湿原－非湿原境界域でチシマザサの増加が認められた。同様の手法で尾瀬ヶ原や会津駒ヶ岳など、平ヶ岳周辺域の湿性草原についても近年の変化を調査した結果、多くの場所で植生の変化が認められ、とくに雪田草原型の湿原において顕著な縮小傾向が認められた。

4）マツ枯れへの影響評価：1～2℃の気温上昇によって、現在被害が及んでいない青森県の平野部にまで危険域が拡大すると予想される。また、気温上昇が2℃を超えると、岩手県内陸部のアカマツ林業地帯やマツタケ生産地に壊滅的な被害が及ぶことが懸念される。現在､秋田・青森県境域では、防除帯の設定など被害拡大防止のため施策がすでに始まっているが、今後、温暖化に伴いさらなる防除努力が必要となる。現在、マツ枯れの最前線から10km以内の範囲についてはとくに重点的な防除対策が取られており、現在の主要な対策域は海岸部と内陸平野部となっている。

2（5）：沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究

①「災害による経済的損失評価と適応策の経済性評価に必要な温暖化感度関数の提案」

1）三大湾奥部の低地において高潮による浸水の物理過程を表現する数値モデルを作成し、温暖化感度関数を作成した。

2）日本南岸地域における高潮浸水被害を予測するための温暖化感度関数を開発した。

3）脆弱な区間の堤防・護岸を改修し、その天端を一定水準以上に高めたときの日本南岸地域の高潮に対する浸水面積、浸水人口および浸水被害額を算定し、適応を考慮した場合の被害予測を可能とした。

②「海面上昇および台風襲来に伴う高潮と河川氾濫による沿岸域の浸水影響・リスクの定量評価と適応策の検討」

1）全国代表的河川流域を対象として､2000年と2100年洪水氾濫リスクの計算結果を比較すると、流域によって総氾濫水量や浸水面積の将来の増加率に差があることがわかった。遊水地による低減効果を定量的に評価することが可能となった。

2）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測評価手法を開発し、社会経済シナリオに基づく防護レベルの有無による影響人口・被害コストを定量的に評価し、海面上昇を考慮した防護基準を設けることで被害額を抑えることが可能になることを明らかにした。

3）河川流域における用地別の浸水面積と経済的影響の分析の結果、河川氾濫の経済被害は、単位面積当たりの直接被害、間接被害の相対的な大きさや及ぼす範囲が河川流域単位で異なることが明らかとなった。

③「温暖化に起因する海面上昇による沿岸域地盤変状予測と適応策」

1）日本各地より河川堤防や高水敷・河岸の構成材料と想定される土質材料を選定し、海面上昇に伴う河川汽水域の拡大を想定した室内実験を実施し、汽水域の拡大により堤防堤体内や高水敷・河岸内に海水成分が侵入した場合に生じる可能性のある事象を地域ごとに推察した。また、河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップを提案した。

2）1）の土質材料を用いて、地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加を想定して、室内実験を実施し、降雨浸透による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップを開発した。また、集中豪雨の頻度増加を想定した試験を実施し、その結果に基づいて、河川堤防や高水敷・河岸

の脆弱性評価と適応策マップ、さらに、新たに開発した侵食実験と侵食メカニズムに基づき求めた河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップを開発した。

④「異常気象を含む気候変動と巨大地震による複合的地盤災害評価と適応策」

１）海面上昇に伴う地下水位の上昇量予測とその広域影響評価手法を開発し、横浜・川崎の東京湾沿岸域を事例としてGIS表示した。

２）地下水位上昇量の計算結果に基づいて対象地域の地震時液状化危険度の算出法を開発した。

３）液状化による経済影響評価法を確立した。

４）地下水位上昇に伴う沿岸域の基礎構造物の脆弱性評価手法を開発した。

⑤「温暖化に起因する海面上昇と豪雨災害による海岸・河川沿岸域の経済的損失評価」

１）本研究で開発した斜面崩壊確率の評価手法を用いて、日本全域における豪雨による斜面災害ハザードマップを作成した。また、温暖化による日降水量100mm以上となる豪雨の年間出現日数の増加を考慮した斜面災害リスクの評価手法を開発し、斜面災害リスクの増加を評価した。

２）温暖化に起因する豪雨の頻度増加を考慮して、メッシュの最大勾配と平均勾配による斜面崩壊確率を用いた日本全域の斜面災害リスクを示した。

２（６）：地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデルの開発に関する研究

本サブテーマにおける各サブサブテーマに共通することは、S-4 の各サブテーマにおける個別分野（健康、生態、米生産、洪水、渇水、高潮、海岸の砂浜と干潟、地震時の液状化現象への影響）の経済評価に対して、評価手法の考え方と適切な手法の提案を行うことにより、S-4 全体の経済評価が理論的整合性を保って行われるようになったことである。

①「気候政策のマクロ的経済評価に関する研究」

日本を個別地域とした修正RICEモデルによる政策シミュレーション分析から、全球レベル及び地域レベルにおいて、費用便益分析の観点から効率的な気候安定化政策が異なることが提示されたことは、温暖化対策に関する政策評価分析において、全球の議論だけではなく地域的な特性、あるいは政策の地域的な効果等を考慮する必要があることを示している。

②「温暖化影響のミクロ的経済評価に関する研究」

温暖化影響の経済評価に関する研究蓄積が少ないという日本の現状において、地球温暖化対策としての「熱中症防止」、「ブナ林保全」、「マツ林保全」、「砂浜保全」、「干潟保全」に関する貨幣評価原単位をCVM（仮想市場評価法）およびTCM（旅行費用法）により推計したことは、他分野の経済評価においても大きな貢献が可能であることを示している。

５．研究者略歴

課題代表者　三村信男：1949年生まれ、東京大学工学部都市工学科卒業、工学博士
現在、茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター教授

テーマ１　肱岡靖明：1971年生まれ、東京大学大学院工学系研究科卒業、博士（工学）
現在、（独）国立環境研究所社会環境システム研究領域主任研究員

テーマ２（１）風間聡　：1966年生まれ、東北大学工学部卒業、博士（工学）
現在、東北大学大学院環境科学研究科准教授

テーマ２（２）田村憲治：1951年生まれ、東京大学大学院医学系研究科保健学博士課程修了、博士（保健学）現在、（独）国立環境研究所環境健康研究領域総合影響評価研究室　室長

テーマ２（３）横沢正幸：1959生まれ、東京工業大学理学部卒業、博士（学術）
現在、（独）農業環境技術研究所大気環境研究領域上席研究員

テーマ２（４）田中信行：1955年生まれ、東京大学農学研究科修士課程修了、農学博士
現在、（独）森林総合研究所主任研究員

テーマ２（５）安原一哉：1944年生まれ、九州大学工学部卒業、工学博士
現在、茨城大学工学部教授

テーマ２（６）林山泰久：1962年生まれ、東京工業大学大学院卒業、博士（工学）
現在、東北大学大学院経済学研究科教授

７．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1)査読付き論文

1) Hayashi,Y., Y.Ishigooka, M.Yokozawa, H.Toritani and F.Tao: Chinese Journal of Agrometeorology, 26, 7-23 (2005) “Use of Agro-climatic index for impact assessment under global warming on paddy rice cultivation in Japan”

2) Tanaka, N., Matsui, T., Shimada, K., Yagihashi, T. and Taoda, H.: Journal of Agricultural Meteorology, 60, 433-438 (2005) "Constructing vegetation databases useful for assessing impact of climate changes in Japan"
3) Matsui, T., Shimada, K., Yagihashi, T., Nakaya, T., Taoda, H. and Tanaka, N.: Journal of Agricultural Meteorology, 60, 439-444 (2005) "Assessing potential distribution of beech (Fagus crenata) in central Japan"
4) Yagihashi, T., Matsui, T., Nakaya, T., Taoda, H. and Tanaka, N.: Proceedings of Oak 2003, Japan: a Joint Meeting of IUFRO Working Groups, Genetics of Quercus & Improvement and Silviculture of Oaks, 45-58 (2005) "Climatic controls differentiating the distributions of Fagus crenata forests and Quercus mongolica var. grosseserrata forests in Japan"
5) 安原一哉, 村上哲, 鈴木久美子: 自然災害科学, 24(3), 214-221 (2005)「地下水位の上昇が構造物・基礎地盤に及ぼす影響とその評価」
6) S. Murakami, K. Yasuhara, N. Suzuki, W. Ni, and H. Komine: Proc. Int. Conf. Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation & Rehabilitation, 1, 571-576 (2005) "Vulnerability assessment to liquefaction hazard induced by rising sea-levels due to global warming"
7) H. Harasawa: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, 243-249 (2006) "Key Vulnerabilities and Critical Levels of Impacts in East & South East Asia"
8) Hijioka, Y., T. Masui, K. Takahashi, Y. Matsuoka, and H. Harasawa: Environmental Economics and Policy Studies, 7, 3, 331-345 (2006) "Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming"
9) 原沢英夫: 地球環境, 11(1), 121-127 (2006)「地球温暖化の危険なレベル」
10) 高橋潔: 地球環境, 11(1), 111-119 (2006)「温暖化が農業生産に及ぼす影響とその適応策」
11) Harasawa, H.: Global Environmental Research, 10, 2, 253-259 (2006) "A Consideration on Dangerous Level of Global Warming"
12) 肱岡靖明, 高橋潔, 久保田泉: 環境情報科学論文集, 20, 19-24 (2006)「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」
13) 久保田泉, 高橋潔, 肱岡靖明: 環境情報科学論文集, 20, 457-462 (2006)「政策決定支援のための適応研究に関する検討」
14) Takahashi, K.: Global Environmental Research, 10, 2, 243-252 (2006) "Impacts of Global Warming on Agricultural Production and Adaptation in Response"
15) Hijioka, Y., and K. Takahashi: Global Environmental Research, 10, 2, 261-270 (2006) "Integrated Assessment of Greenhouse Gas Stabilization Concentrations, Emission Pathways, and Impact Threshold Values for Control of Global Warming"
16) 肱岡靖明, 高橋潔: 地球環境, 11, 129-138 (2006)"地球温暖化抑制のための温室効果ガス安定化濃度・排出経路・影響閾値の統合評価"
17) 泉宏和, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 50, 421-426 (2006)「積雪水資源量評価における森林の影響について」
18) 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹: 水工学論文集, 50, 529-534 (2006)「Bucket型の陸面過程モデルをベースにした全球統合水資源モデルの開発」
19) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 50, 619-624 (2006)「降雨極値の再現期間を用いた斜面災害の発生確率」
20) 白岩淳一, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 50, 1063-1068 (2006)「気候変動による河川水温の影響」
21) S. Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto: Journal of Environmental Management, 80, 1, 25-35 (2006) "Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers"
22) Soichiro Machida, So Kazama and Masaki Sawamoto: Proc. 3th APHW Conference, CD-R, ST1-05-A29-261 (2006) "Development of a Distributed Flood Damage Model with Economic Evaluation"
23) S. Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto: Proc. 3th APHW Conference, CD-R, ST1-05-A28-033 (2006) "Effect of Climate Change on Coastal Fresh Groundwater Resources"
24) Seiki Kawagoe, So Kazama and Masaki Sawamoto: Proc. 3th APHW Conference, CD-R, ST1-05-A26-257 (2006) "Evaluation of Sediment Hazard Considering Precipitation in Seasonal Change"
25) Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto: Global Environmental Change, 16, 388-399 (2006) "Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources"
26) Yoshimura, K., S. Miyazaki, S. Kanae and T. Oki: Glob. Planet. Change, 51, 90-107 (2006) "Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes"
27) Oki, T. and S. Kanae: Science, 313, 5790, 1068-1072 (2006) "Global hydrological cycles and world water resources"
28) 秋本嗣美, 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 52, 571-576 (2006) 「土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価」
29) 津田良夫, 比嘉由紀子, 倉橋　弘, 林　利彦, 星野啓太, 駒形　修, 伊澤晴彦, 葛西真治, 佐々木年則, 冨田隆史, 沢辺京子, 二瓶直子, 小林睦生: Med. Entomol. Zool., 57, 75-82, (2006) 「都市部における疾病媒介蚊の発生状況調査―ドライアイストラップを用いた２年間の調査結果」
30) 大前比呂思, 遠藤卓郎, 長谷山路夫, 新妻淳, 飯塚信二, 津田良夫: Cli Parasitol, 17, 127-130 (2006)「検疫感染症としてのマラリアをどう捉えるか。」
31) Yukiko Higa, Keita Hoshino, Yoshio Tsuda and Mutsuo Kobayashi:　Med. Entomol. Zool, 57, 93-98, (2006) " Dry ice-trap and human bait collection of mosquitoes in the eastern part of Hokkaido, Japan"
32) F.Tao, M.Yokozawa, Y.Xu, Y.Hayashi and Z.Zhang: Agriculture and Forest Meteorology. 138, 82-92 (2006) "Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000"
33) T.Sakamoto, N.V.Nhan, H.Ohno, N.Ishitsuka, and M.Yokozawa: Remote Sensing of Environment 100, 1-16 (2006) "Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers"
34) T.Sakamoto, N.V.Nhan, H.Ohno, N.Ishitsuka, and M.Yokozawa: Remote Sensing of Environment, 100,1-16, (2006) "Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers"
35) T.Iizumi, ME.Hori, M.Yokozawa, H.Nakagawa, and Y.Hayashi, F.Kimura: SOLA, 2,156-159 (2006) "Impact of global warming on rice production in Japan based on five coupled atmosphere-ocean GCMs"
36) Tanaka, N., Matsui, T, Yagihashi, T and Taoda, H.: Global Environmental Research, 10(2), 151-160 (2006) "Climatic controls on natural forest distribution and predicting the impact of climate warming: Especially referring to buna (Fagus crenata) forests"
37) 田中信行, 松井哲哉, 八木橋勉, 垰田宏: 地球環境, 11, 11-20 (2006)「天然林の分布を規定する気候要因と温暖化の影響予測：とくにブナ林について」
38) 安原一哉: 土と基礎（地盤工学会誌）, 56(1), 5-8 (2006)「地盤工学から地盤環境工学、そして、持続可能地盤工学へ」
39) G. Chen, K. Zen, and S. Moriyama: Recent Development of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering in Asia, 269-274 (2006) "Risk Analysis of Slope Disasters in a Large Area Using GIS Platform"
40) T. Fujinami, G. Chen, K. Zen, and K. Kasama: Recent Development of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering in Asia, 435-440 (2006) "An Attempt to Estimate Economic Loss Caused by Typhoon Considering Global Warming"
41) 中嶌一憲, 林山泰久, 森杉壽芳: 環境システム研究全文審査部門論文, 34, 123-134 (2006)「地球温暖化問題におけるカタストロフ・リスクによる長期的影響：動学モデルの数値解析による均衡解の性質」
42) 大野栄治: 地球環境, 11, 1, 95-102 (2006) 「地球温暖化に伴う住環境変化の経済評価－コンジョイント分析によるアプローチー」
43) Ohno, E.: Global Environmental Research, 10, 2, 227-233 (2006) "Economic Evaluation of Residential Environment Change Associated with

Global Warming, Approached by Conjoint Analysis"
44) 増冨祐司, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明, 松岡譲: 水工学論文集, 51, 235-240 (2007)「季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価」
45) 花崎直太, 増冨祐司, 高橋潔, 肱岡靖明, 原沢英夫, 松岡譲: 環境システム研究論文集, 35, 367-374 (2007) 「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
46) 肱岡靖明, 高橋潔, 久保田泉: 環境情報科学論文集, 21, 423-428 (2007) 「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発 ー温暖化影響データベースー」
47) Takahashi, K., Honda, Y. and Emori, S.: Journal of Risk Research, 10, 339-354 (2007) "Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming"
48) Kainuma, M., Matsuoka, Y., Masui, T., Takahashi, K. and Hijioka, Y.: Cambridge University Press, 314-327 (2007) "Climate policy assessment using the Asia-Pacific Integrated Model, In Schlesinger, M., Kheshgi, H., Smith, J., De La Chesnaye, F. and Reilly, J.M. (Eds.), Human-Induce Climate Change, Ed.1"
49) 芳村圭, 岡澤毅, H.Kim, 瀬戸心太, 小岩祐樹, 沖大幹, 鼎信次郎: 水工学論文集, 50 (2007) 「気象庁メソ予報モデルGPVを用いた日本域河川流量予測システムの構築と検証」
50) 那須貴之, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 51, 361-366 (2007) 「地域別に見た気候変動に対する積雪水資源脆弱性」
51) 川越青樹, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 51, 367-372 (2007) 「融雪に起因する土砂災害のリスクモデル」.
52) 宮城昌和, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 51, 451-456 (2007) 「地下水涵養施設による塩水侵入制御」
53) Kondo M, Shono A, and Honda Y.: Global Environmental Research 11, 73-78 (2007) "Global warming, cedar pollinosis, and health care budget impact"
54) Takahashi K, Honda Y, and Emori S.: J Risk Res. 10(3), 339-354, (2007) "Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming"
55) Honda Y, Kabuto M, Ono M, and Uchiyama I.: Environmental Health and Preventive Medicine, 12, 209-216 (2007) "Determination of optimum daily maximum temperature using climate data"
56) 松井哲哉, 田中信行, 八木橋勉: 日本森林学会誌, 89(1), 7-13 (2007) 「世界遺産白神山地ブナ林の気候温暖化に伴う分布適域の変化予測」
57) Yagihashi, T., Matsui, T., Nakaya, T., Tanaka, N. and Taoda, H.: Plant Species Biology 22, 217-225 (2007) "Climatic determinants of the northern range limit of Fagus crenata forests in Japan"
58) 朝岡良浩, 小南裕志, 竹内由香里, 大丸裕武, 田中信行: 水文・水資源学会誌, 20, 519-529 (2007) 「衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性」
59) 安田正次, 大丸裕武, 沖津進: 地理学評論, 80, 842-856 (2007) 「オルソ化航空写真の年代間比較による山地湿原の植生変化の検出」
60) H. Komine: Proceedings of Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (VJ-MACIND07) (2007) "Changes of fundamental properties of riverbank material by sea-level rising due to Global Warming"
61) H. Komine: Proceedings of the 2nd Malaysia-Japan Symposium on Geohazard and Geoenvironmental Engineering (2007) "Vulnerability of riverbank materials by sea-level rising due to Global Warming in Japan"
62) Y. Uchida, H. Komine, K. Yasuhara, and S. Murakami: Proceedings of Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (VJ-MACIND07) (2007) "Soil water characteristic curve and one-dimensional deformation of riverbank soils in Japan"
63) K. Yasuhara, S. Murakami, N. Mimura, H. Komine, and J. Recio: J. Sustainability Science, 2(1), 13-26 (2007) "Influence of Global Warming on Coastal Infrastructural Instability"
64) K. Yasuhara, and J. Recio: Geotextiles and Geomenbranes, 10(1), 1-12 (2007) "Geosynthetic-wrap around revetments for shore protection"
65) K. Yasuhara, S. Murakami, and H. Komine: Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., 1-I, 211-214 (2007) "Settlement of foundations affected by groundwater level rise"
66) S. Murakami, and N. Suzuki: Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., 1-II, 941-946 (2007) "Vulnerability Assessment to Liquefaction Hazard Induced Sea-level Rise by Using Geo-information Database"
67) S. Murakami, and K. Yasuhara: Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., II, 328-335 (2007) "GIS-aided Assessment of Vulnerability to Seismic Geo-hazard Induced by Global Climate Change (Theme lecture's paper)"
68) 安原一哉, 村上哲, 小峯秀雄, 鈴木久美子, 柴田はるか: 第7回環境地盤工学シンポジウム論文集、地盤工学会, 237-242 (2007) 「気候変動に起因する複合的地盤災害への適応策」
69) G. Chen, K. Zen, and N. Kasuya: Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2, 927-930 (2007) "Risk Management of Slope Disaster Induced by Earthquake"
70) 陳光斉, 善功企: 斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集, 191-196 (2007)「不連続変形法DDAによる斜面崩壊の数値シミュレーション」
71) 入門大介, 陳光斉, 善功企, 笠間清伸: 斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集, 205-208 (2007) 「地理情報システムを用いた降雨に伴う斜面災害リスク評価に関する研究」
72) 粕谷悠紀, 陳光斉, 善功企, 笠間清伸: 斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集, 225-228 (2007) 「地震および降雨による斜面災害復旧へのリスクマネジメント技術に関する研究」
73) 周国雲, 陳光斉, 横矢直道, 北園芳人: 斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集, 229-234 (2007) 「GISによる斜面崩壊ハザードマップ作成の効率化の新提案と応用」
74) T. Nian, G. Chen, M. Luan, and Q.Yang: New Horizons in Earth Reinforcement, Edited by Otani, Miyata and Mukunoki, 401-405 (2007) "Numerical analysis of stability of slope reinforced with piles subjected to combined load"
75) D. Irikado, K. Zen, and G. Chen: New Frontiers in Chinese and Japanese Geotechniques, Edited by Y. Yao, H. Akagi, and G. Zhang, 207-212 (2007) "A Study on Evaluation of Landslide Risk Induced by Rainfall with Geographical Information System"
76) 粕谷悠紀, 善功企, 陳光斉, 笠間清伸: 土木学会地震工学論文集, 29, 996-1001 (2007)「地震による斜面災害復旧へのリスクマネジメントの適用」
77) 周国雲, 陳光斉, 北園芳人, 横矢直道: 土と基礎, 55(6)-593, 18-20 (2007)「GISと数量化理論を用いた土砂災害ハザードマップ作成技術の高度化手法の提案」
78) G. Chen: Proceedings of International Symposium on Computational Mechanics, 1093-1103 (2007) "A View on Manifold Method Comparing with Finite Element Method"
79) Yoshimoto, A. and Marus ak, R.: European Journal of Forest Research 126(2), 315-329 (2007) "Evaluation of Carbon Sequestration and Thinning Regimes within the Optimization Framework for Forest Stand Management"
80) Morisugi, H. and Leurent, F.: Routes/Roads, 336/337, 58-63 (2007) "Cost benefit analysis using benefit incidence table for a transport policy with pricing - the case of the London pricing scheme"
81) Kono, T., Morisugi, H. and Miyahara, F.: Annals of Regional Science, 41, 1, 145-170 (2007) "Congestion Deterioration and Transportation Project Evaluation"

82) 河野達仁, 宮原史, 森杉壽芳: 土木学会論文集D, 524-535 (2007) 「誘発交通による混雑悪化の可能性と公共投資のパラドックス」
83) 山田淳大, 大野栄治: 土木計画学研究・論文集, 24, 1, 149-156 (2007) 「年間WTPと生涯WTPの違いに基づく割引率の計測」
84) Yasuaki Hijioka, Yuzuru Matsuoka, Hiromi Nishimoto, Toshihiko Masui, and Mikiko Kainuma: Journal of Global Environment Engineering, 13, 97-108 (2008) "Global GHG Emission Scenarios under GHG Concentration Stabilization Targets"
85) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1007-1025 (2008) "An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing"
86) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1027-1037 (2008) "An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments"
87) 高橋潔, 松井哲哉, 肱岡靖明, 田中信行, 原沢英夫: 地球環境研究論文集, 16, 111-119 (2008)「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
88) 花崎直太, 増冨祐司, 高橋潔, 肱岡靖明: 地球環境研究論文集, 16, 1-8 (2008) 「全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較」
89) 増冨祐司, 高橋潔, 原沢英夫, 松岡譲: 地球環境研究論文集, 16, 121-130 (2008) 「気候変化の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稲生産量に及ぼす影響及びその適応策の評価」
90) 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 52, 433-438 (2008) 「降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価」
91) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 水工学論文集, 52, 463-468 (2008) 「日本列島を対象にした融雪に伴う土砂災害のリスク評価」
92) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 自然災害科学, 27(1), 69-83 (2008)「数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築」
93) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 土木学会地球環境研究論文集, 16, 27-35 (2008) 「将来気候モデルを用いた土砂崩壊リスク評価」
94) 多田智和, 土屋修一: 地球環境ム論文集, 16, 150-155 (2008) 「気候変動による降水特性変化がもたらす水需給バランスへの影響検討」
95) 川越清樹, 菊地裕, 風間聡, 滝沢智: 土木学会環境工学論文集, 45, 467-474 (2008) 「気候変動による主要河川の水質の影響評価」
96) So Kazama, Hirokazu Izumi, Priyantha Ranjan Sarukkalige, Takayuki Nasu, and Masaki Sawamoto: Hydrological Processes, 22(13), 2315-2324 (2008) "Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources"
97) Freddy Soria, So KAZAMA, and Masaki SAWAMOTO: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 24-28 (2008) "SENSITIVITY ANALYSIS OF DISTRIBUTED RAUNFALL-RUNOFF MODELS"
98) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, and Masaki SAWAMOTO: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 191-198 (2008) "SEASONAL CHANGE OF GROUNDWATER FLOW AND ITS EFFECT ON TEMPERETURE DISTRIBUTION IN SENDAI PLAIN"
99) Seiki KAWAGOE, So KAZAMA, and Masaki SAWAMOTO: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 1108-1117 (2008) "SLOPE HAZARD RISK DUE TO RAINFALL CONDITION"
100) Freddy Soria, So KAZAMA, and Masaki SAWAMOTO: Proceedings of the international conference on hydrogical changes and management from headwaters to the ocean-hydrochange2008, 203-208 (2008) "SENSITIVITY ANALYSIS TO EVALUATE THE EFFECT OF LANDUSE CHANGE ON DISCHARGE RATE"
101) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, and Masaki SAWAMOTO: Proceedings of the international conference on hydrogical changes and management from headwaters to the ocean-hydrochange2008, 203-208 (2008) "THE THERMAL EFFECT OF GROUNDWATER FLOW ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE SENDAI PLAIN"
102) 階堂武郎, 本田 靖, 鈴木幸子, 金森葉子, 石原英樹, 原沢秀夫, 前川泰子, 兜真徳: 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌, 18(1), 72-75 (2008) 「夏期に慢性閉塞性肺疾患の急性憎悪をきたしたと考えられる１症例」
103) Likhvar VN, and Honda Y.: J Health Sci, 54, 143-153 (2008) "Choice of Degree of Smoothing in Fitting Nonparametric Regression Models for Temperature-mortality Relation in Japan Based on a Priori Knowledge"
104) Kobayashi, M., Komagata O., and Nihei N.: J. Disast. Res, 3(2), 105-112 (2008) "Global warming and vector-borne infectious diseases"
105) Kobayashi, M., Kasai, S., Sawabe, K., and Tsuda, Y.: Global Environmental Research, 12, 27-33 (2008) "Distribution and ecology of potential vector mosquitoes of West Nile fever in Japan"
106) Kurane, I., Kotaki, A. and Takasaki, T.: Global Environmental Research, 12(1), 35-40 (2008) "Vector-borne infectious diseases and climate change"
107) T.Iizumi, M.Nishimori, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology (2008) "Combined Equations for Estimating Global Solar Radiation: Projection of Radiation Field over Japan under Global Warming Conditions by Statistical Downscaling"
108) T.Iizumi, M.Yokozawa, Y.Hayashi, and F.Kimura: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47, 2265-2278 (2008) "Climate Change Impact on Rice Insurance Payouts in Japan"
109) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 64, 167-176 (2008) "Sensitivity of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese Mekong delta-impacts on availability of irrigation water for rice cropping"
110) F.Tao, M.Yokozawa, Z.Zhang, Y.Hayashi, and Y.Ishigooka: International Journal of Remote Sensing, 29, 5461-5478 (2008) "Land surface phenology dynamics and climate variations in the North East China Transect (NECT), 1982-2000"
111) A.Kotera, T.Sakamoto, N.D.Khan, and M.Yokozawa: JARQ, 42, 267-274 (2008) "Regional consequences of seawater intrusion on rice productivity and land use in coastal area of the Mekong river Delta"
112) 津山幾太郎, 松井哲哉, 小川みふゆ, 小南裕志, 田中信行: GIS－理論と応用, 16, 11-25 (2008a)「本州東部におけるチシマザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価」
113) 津山幾太郎, 松井哲哉, 堀川真弘, 小南裕志, 田中信行: GIS－理論と応用, 16, 99-113 (2008b) 「日本におけるチマキザサ節の潜在分布域の予測と気候変化の影響評価」
114) 高橋潔, 松井哲哉, 肱岡靖明, 田中信行, 原沢英夫: 地球環境研究論文集, 16, 111-119 (2008)「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
115) 堀川真弘, 村上健太郎, 津山幾太郎, 大藪崇司, 松井哲哉, 森本幸裕, 田中信行: 日本緑化工学会誌, 34(1), 85-90 (2008) 「イヌケホシダの潜在分布域と気候変化シナリオに基づく分布変化の予測」
116) 杉田久志, 岩本宏二郎, 森澤猛, 齋藤智之, 壁谷大介, 岡本透, 酒井寿夫: 森林総合研究所研究報告, 7, 81-89 (2008) 「御嶽山における密なチマキザサ林床をもつ亜高山帯針葉樹林の構造と動態」
117) 鈴木武: 地球環境研究論文集, 16, 105-110 (2008) 「九州地方における地球温暖化による高潮浸水リスクの変化」
118) 鈴木武: 海洋開発論文集, 24, 453-458 (2008) 「高潮浸水シミュレーションによる三大湾奥部の浸水被害の感度解析」
119) 桑原祐史, 郡司美佳, 横木裕宗, 三村信男, 小柳武和: 地球環境研究論文集, 16, 79-86 (2008)「大規模河川下流域を対象とした海面上昇による氾濫リスク推定のための基礎的分析」
120) 横木裕宗, 戸村達也, 塙尚幸, 桑原祐史, 三村信男: 地球環境研究論文集, 16, 87-93 (2008) 「気候変動に伴う洪水・氾濫リスクの将来予測 －那珂川・久慈川流域における解析－」
121) H. Komine: Proceedings of 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters

(2008) "Adaptations and countermeasures for mitigating impacts due to global warming in geotechnical and geoenvironmental engineering"
122) T. Munegumi, H. Komine, K. Yasuhara, and S. Murakami: Proceedings of 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (2008) "Vulnerability evaluation of soil material simulated river bank material in torrential rainfall"
123) K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, and H. Shibata: Proc. International Conference on Foundations, 136, 1615-1624, Dandee, UK (2008) "Instability of foundations undergoing rise in groundwater level"
124) G. Chen: Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(12), 2395-2402 (2008) "Practical Techniques for Risk Analysis of Earthquake Induced Landslide"
125) G. Chen, K. Zen, and Y. Kasuya: Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(12), 2488-2493 (2008) "Practical Risk Assessment of Slope Disaster Induced by Earthquake"
126) T. Nian, G. Chen, M. Luan, Q. Yang, and D. Zheng: Canadian Geotechnical Journal, 45(8), 1092-1103 (2008) "Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in nonhomogeneous and anisotropic soils"
127) 中嶌一憲, 林山泰久, 森杉壽芳, 大野栄治: 環境システム研究論文集, 36, 69-78 (2008) 「「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用」
128) 森杉壽芳, 岡松明良, 河野達仁: 土木学会論文集D, 64, 3, 421-431 (2008) 「個人の防災投資行動の観察に基づく防災プロジェクトの便益計測の可能性」
129) 大野栄治, 佐尾博志: 環境システム研究論文集, 36, 333-341 (2008) 「CVMとTCMによる干潟の経済価値の計測」
130) 花崎直太, 増冨祐司, 肱岡靖明, 高橋潔: 水工学論文集, 53, 271-276 (2009) 「温暖化政策支援モデルにおける全球水ストレス人口推定モデルの開発と適用」
131) Masutomi, Y., Takahashi K., Harasawa, H., and Matsuoka, Y.: Agric. Ecosyst. And Environ, 131, 281-291 (2009) "Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models"
132) Matsui T., Takahashi K., Tanaka N., Hijioka Y., Horikawa M., Yagihashi T., and Harasawa H.:Appl.Veg.Sci., 12, 328-339 (2009) "Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech(Fagus crenata) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan"
133) 本田靖, 高橋潔: 地球環境, 14 (2), 257-262 (2009), 「熱ストレスの健康影響」
134) 松井哲哉, 田中信行, 八木橋勉, 小南裕志, 津山幾太郎, 高橋潔: 地球環境, 14 (2), 165-174 (2009)「温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価」
135) 肱岡靖明, 高橋潔, 花崎直太, 増冨祐司, 原沢英夫: 地球環境, 14 (2), 127-135 (2009) 「統合評価モデルを用いた日本を対象とした温暖化影響の総合評価」
136) Luminda GUNAWARDHANA, and So KAZAMA: JSCE Annual journal of hydraulic engineering, 53, 79-84 (2009) "SPATIAL DOWNSCALING OF GCM OUTPUT FOR ASSESSING THE IMPACTS ON GROUNDWATER TEMPERATURE IN THE SENDAI PLAIN"
137) 菊地慶太, 風間聡: 土木学会水工学論文集, 53, 409-414 (2009) 「GPSによる山岳域の積雪推定モデルの評価」
138) 秋本嗣美, 川越清樹, 風間聡: 土木学会水工学論文集, 53, 655-660 (2009) 「数値気候モデルを用いた土砂生産量予測」
139) 川越清樹, 風間聡, 肱岡靖明, 高橋潔: 土木学会水工学論文集, 53, 661-666 (2009) 「土砂崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用」
140) 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡, 森杉壽芳: 土木学会水工学論文集, 53, 847-852 (2009) 「気候モデルを利用した日本列島洪水リスク評価」
141) Luminda Niroshana Gunawardhana, and So Kazama: Journal of Hydrology, 377, 377-390 (2009) "Tidal effects on aquifer thermal regime: An analytical solution for coastal ecosystem management"
142) 風間聡, 佐藤歩, 川越清樹: 地球環境, 14(2), 135-142 (2009) 「温暖化による洪水氾濫とその適応策」
143) 川越清樹, 風間聡: 地球環境, 14(2), 143-152 (2009) 「温暖化に対する土砂災害の影響評価」
144) 滝口博文, 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡: 地球環境研究論文集, 17, 17-22 (2009) 「数値気候モデルの将来展望値を用いた日本の洪水被害予測」
145) 志田孝之, 風間聡, 山本潤: 地球環境研究論文集, 17, 23-28 (2009) 「気候変動による湖沼の水温躍層の変化」
146) Saeki Kawagoe, So Kazama, and Priyantha Ranjan Sarukkalige: Cold Regions Science and Technology, 58, 120-129 (2009) "Assessment of snowmelt triggered landslide hazard and risk in Japan"
147) So KAZAMA, Ayumu Sato, and Seiki Kawagoe: Sustainability Science, 4(1), 61-69 (2009) "Evaluating the cost of flood damage based on changes in extreme rainfall in Japan"
148) 丹治肇, 桐博英: COASTAL DYNAMICS 2009, Tokyo, 136, 1-11 (2009) "Influences of Global Climate to Peak Wave Height in Typhoon Seasons"
149) 丹治肇, 桐博英: Coasts, Marine Structures and Breakwater 2009, Edinburgh, IEC, 1-15 (2009) "Global Warming Influences on Tidal Wetland in Japan"
150) 丹治肇, 桐博英: International Society of Paddy and Water Environment Engineering, Bogor, GI,1-7 (2009.10) "Irrigation Effects on Vulnerability of Rice Yield in Thailand and Japan"
151) 小野雅司: 地球環境, 14(2), 263-270 (2009) 「地球温暖化と熱中症：光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク」
152) 倉根一郎: 地球環境, 14(2), 279-298 (2009) 「感染症への地球温暖化影響」
153) 田村憲治, 松本幸雄, 佐々木寛介, 椿貴博: 地球環境, 14(2), 271-277 (2009) 「地球温暖化と大気汚染：光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク」
154) 本田 靖, 高橋潔: 地球環境, 14, 257-262 (2009) 「熱ストレスの健康影響」
155) Honda Y, and Ono M.: Global Health Action 2009. DOI: 10.3402/gha.v2i0.2043 (2009) "Issues in health risk assessment of current and future heat extremes"
156) Kurane, I.: Journal of Health Science, 55(6), 865-869 (2009) "The emerging and forecasted effect of climate change on human health"
157) Nakagawa Y, Ueki M, Fueda K, Ohmae H, and Ishikawa H.: Trop Med & Hlth, 37(3), 97-107 (2009) "Risk assessment of re-emerging Plasmodium falciparum on Ishigaki Island using a stochastic model"
158) T.Iizumi, M.Yokozawa, and M.Nishimori: Agricultural and Forest Meteorology, 149, 333-348 (2009) "Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach"
159) M.Okada, T.Iizumi, M.Nishimori, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 97-109 (2009) "Mesh climate change data of Japan ver.2 for climate change impact assessments under IPCC SRES A1B and A2"
160) T.Iizumi, M.Yokozawa, and M.Nishimori: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 179-190 (2009) "Development of impact functions on regional paddy rice yield in Japan for integrated assessment models"
161) M.Okada, T.Iizumi, Y.Hayashi, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 327-337 (2009) "A climatological analysis on recent decreasing trend of rice quality in Japan"
162) 横沢正幸, 飯泉仁之直, 岡田将誌: 地球環境, 14, 199-206 (2009) 「気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価」
163) J.Furuya, and S.Kobayashi: Sustainability Science, 4(1), 71-79 (2009) "Impact of global warming on agricultural product markets: stochastic world food model analysis"
164) Horikawa, M., I. Tsuyama, T. Matsui, Y. Kominami, and N. Tanaka: Landscape Ecology, 24, 115-128 (2009) "Assessing the potential

impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (Pinus pumila)"
165) Matsui, T., K. Takahashi, N. Tanaka, Y. Hijioka, M. Horikawa, T. Yagihashi, and H. Harasawa: Applied Vegetation Science, 12, 328-339 (2009) "Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (Fagus crenata) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan"
166) 松井哲哉, 田中信行, 八木橋勉, 小南裕志, 津山幾太郎, 高橋潔: 地球環境, 14, 65-174 (2009)「温暖化にともなうブナ林の分布適域の変化予測と影響評価」
167) 田中信行, 中園悦子, 津山幾太郎, 松井哲哉: 地球環境,, 14(2), 153-164 (2009) 「温暖化の日本産針葉樹10種の潜在生育域への影響予測」
168) 中尾勝洋, 松井哲哉, 田中信行, 福嶋司: 森林立地学会誌, 森林立地 51(1), 27-37 (2009) 「日本における常緑カシ類2種の個体および優占林の分布を規定する気候条件」
169) 鈴木武: 地球環境, 14(2), 231-236 (2009) 「三大湾および西日本における地球温暖化による高潮被害の予測」
170) 鈴木武: 地球環境研究論文集, 17, 175-181 (2009) 「太平洋岸地域における地球温暖化による高潮浸水被害の予測」
171) 塙尚幸, 横木裕宗, 桑原祐史, 三村信男: 地球環境研究論文集, 17, 85-91 (2009) 「気候変動を考慮した全国主要河川下流域における洪水氾濫リスクの将来予測」
172) 横木裕宗, 桑原祐史, 塙尚幸, 郡司美佳, 戸村達也, 平山歩, 三村信男: 地球環境, 14(2), 237-246 (2009) 「気候変動に伴う我が国の大規模河川下流域の浸水氾濫リスクの将来予測」
173) 信岡尚道, 三村信男: 海岸工学論文集, 56, 371-375 (2009) 「熱帯低気圧による全球の高潮と沿岸脆弱性の推定」
174) 信岡尚道, 三村信男, 田村誠: 地球環境研究論文集, 14, 123-132 (2009) 「21世紀におけるアジア・オセアニア沿岸の基礎的脆弱性の推定」
175) H. Nobuoka, N. Mimura, and M. Tamura: 5th International Conference on Asian and Pacific Coast, 2, 194-200 (2009) "Asian and Oceanian Coastal-Risk Projection due to Sea-Level Rise and Population Growth"
176) 安原一哉, 小峯秀雄, 村上哲, 陳光斉, 三谷泰浩, 田村誠: 地球環境, 14(2), 247-256 (2009) 「温暖化による気候変動が地盤災害に及ぼす影響」
177) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: 地盤工学ジャーナル, 4(2), 185-195 (2009) 「温暖化に起因する海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸の土質材料に及ぼす影響の簡易評価」
178) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 内田佳子: 地盤工学会誌, 57(4), 22-25 (2009) 「各種土質材料の水分特性曲線に着目した集中豪雨による河川堤防や河岸の脆弱性簡易評価」
179) S. Murakami, and K. Yasuhara: In M. Hamza et al. (eds.): Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2727-2730 (2009) "Vulnerability assessment to liquefaction hazard induced global climate change by using geo-information database"
180) K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani: International Symposium on Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Sustainable Mitigation and Adaptation to Climate Change including Global Warming, Bangkok, Thailand, 11-23 (2009) "Effects of Climate Change on Geo-disasters in Coastal Zones"
181) 安原一哉: 地盤工学会誌, 57(4), 1-5 (2009) 「地球温暖化と複合地盤災害」
182) K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani: International Symposium on Geodisaster Prevention and Geoenvironment in Asia, JS-Fukuoka, 102-109 (2009) "Effects of Climate Change on Geo-Disasters in Coastal Zones"
183) S. Murakami, K. Yasuhara, H. Komine, and Y. Hasegawa: Proceedings of the International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, 188-193, Kyoto, Japan (2009) "Evaluation of Economic Damage on Liquefaction Hazard Induced by Global Climate Change in a Coastal Region"
184) H. Ogawa, S. Murakami, K. Yasuhara, and H. Komine: Proceedings of the International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, 216-219 (2009) "A representative soil profile modeling with consideration of spatial correlativity of soils"
185) 陳光斉, 善功企, 鄭路: 土木工学会地震工学論文集, 9, CD-ROM 4-0037 (2009) 「地震による斜面崩壊土石の高速・遠距離運動のメカニズムに関する研究」
186) Y. Hou, G. Chen, and C. Zhang: Proceedings of the 9th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Singapore, 227-236 (2009) "Extension of Distinct Element Method and Its Application in Fracture Analysis of Quasi-brittle Materials"
187) G. Chen, J. Sun, and K. Zen: Proceedings of International Joint Symposium on Geodisaster prevention and Geoenvironment in Asia, 76-83 (2009) "GIS-based Probabilistic Analysis of the Slope Safety Factor for Landslide Hazard Mapping Induced by Earthquake"
188) T. Nian, S. Wan, and G. Chen: Proceedings of International Joint Symposium on Geo-disaster prevention and Geoenvironment in Asia, 71-75 (2009) "2D and 3D Slope Stability Analysis Using Shear Strength Reduction Finite Element Method"
189) G. Chen, K. Zen, Z. Jiang, and Y. Jiang: Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering, 648-651 (2009) "Study on Mechanism of Long-distance Movement of Debris from Landslide Induced by Earthquake"
190) 三角真貴子, 善功企, 陳光斉, 笠間清伸: 降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム, 385-388 (2009)「GISを導入した降雨による斜面崩壊ハザードマップおよびリスクマップの評価に関する研究」
191) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲: 地球環境研究論文集, 17, 183-192 (2009) 「地球温暖化による熱中症死亡リスクの経済評価―CVMによるVSLの計測―」
192) 中嶌一憲, 林山泰久, 森杉壽芳: 地球環境, 14, 2, 299-307 (2009) 「地球温暖化のマクロ的経済評価の系譜と知見」
193) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲: 地球環境, 14, 2, 285-290 (2009)「干潟・ブナ林の生物多様性維持機能の経済評価: CVMによるアプローチ」
194) 大野栄治, 森杉壽芳, 林山泰久, 野原克仁: 地球環境, 14, 2, 291-297 (2009) 「地球温暖化による砂浜消失の経済評価：旅行費用法によるアプローチ」
195) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲, 佐尾博志: 環境システム研究論文集, 37, 283-290 (2009) 「CVMによるブナ林の経済価値の計測」
196) Luminda Gunawardhana, and So KAZAMA: Annual J. of Hydraulic Engineering, 54, 67-73 (2010) "Different skills of five GCMs abd their impacts on aquifer thermal regimes"
197) Nilupul K. Gunasekara, So KAZAMA, Dai Yamazaki, and Taikan Oki: Annual J. of Hydraulic Engineering, 54, 115-120 (2010) "Inequalities in water resources distributions and water related conflicts"
198) S. Kawagoe, S. Kazama, and P. R. Sarukkalige: Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 7, 725-766 (2010) "Probabilistic modelling of rainfall induced landslide hazard assessment"
199) 丹治肇, 小林慎太郎, 桐博英: 水文水資源学会誌, 23(1), 43-56 (2010) 「将来のエネルギー供給変化に対応した水田灌漑システムの展望」
200) ND.Khang, A.Kotera, T.Iizumi, T.Sakamoto, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 66, 11-21 (2010) "Variations in water resources in the Vietnamese Mekong Delta in response to climate change and their impacts on rice production"
201) T.Iizumi, K.Ishida, M.Yokozawa, and M.Nishimori: Agricultural Information Research, in press, (2010) "Potential predictability of local paddy rice yield variation using a crop model with local areal information"
202) 飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横沢正幸: 農業気象 in press (2010) 「統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門」

203) K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani: Journal of Global Environment Engineering, 15, 15-23 (2010) “Effects of climate change on geo-disasters in coastal zones”

（2）査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

1) Yoshimoto, A.: Scandinavian Forest Economics, Vol.41, pp.415-427(2006) "Carbon Pricing through Subsidy Payment for Thinning Activities in Japan"

課題名	S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 １．統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究		
課題代表者名	肱岡靖明（独立行政法人国立環境研究所社会環境システム研究領域）		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	183,184千円（うち21年度 42,659千円） ※予算額は、間接経費を含む。

研究体制

（１）統合評価モデルを用いた温暖化の危険な水準および温暖化抑制目標に関する研究
（独立行政法人国立環境研究所）
・温暖化抑制目標に関する既存知見の整理と、評価基準・評価手法の検討（独立行政法人国立環境研究所）（H17-19）
・統合評価モデルを用いた温暖化の危険な水準および安定化経路の評価に関する研究（独立行政法人国立環境研究所）（H17-19）
・気候変動に関するリスクマネージメント方法論の確立に関する研究（株式会社三菱総合研究所）（H19）

（２）温暖化影響の全球プロセスモデルを用いた分野別影響関数（世界）の開発に関する研究
（独立行政法人国立環境研究所）

I.戦略課題S-4-1の全体構成

本研究課題では、GHGの濃度安定化等の温暖化抑制目標とそれを実現するための経済効率的な排出経路、および同目標下での影響・リスクを総合的に解析・評価するための統合評価モデル開発を目的とする。開発にあたっては、関連分野の影響予測・経済評価研究および適応策研究から得られる温暖化影響関数を統合評価モデルに組み込むことにより、精緻かつ現実的な影響推計を比較的簡便に実行できるようにする。本統合評価モデルを用いて、種々の温暖化抑制目標を前提とした場合の、「危険な影響」が発生する可能性とその発生時期を提示することを目的としている。評価対象期間としては、今世紀中頃（2050年頃）までを重点におきつつ今世紀末までを取扱う。『危険な影響』を如何に決定すべきか、については、衡平性、予防原則、不確実性といった観点から、新たな方法論・概念の開発を試みる。本研究課題において統合評価モデルの一環として開発する「気候・社会経済シナリオデータベース」は、サブ課題２（１）～（６）の研究課題において共通シナリオとして利用される。また、サブ課題２（１）～（６）で行われる影響予測・経済評価研究の結果を温暖化影響関数としてとりまとめ、統合評価モデルに組み込むことなど、他のサブ課題と緊密な連携をとりつつ研究を進める（図１）。

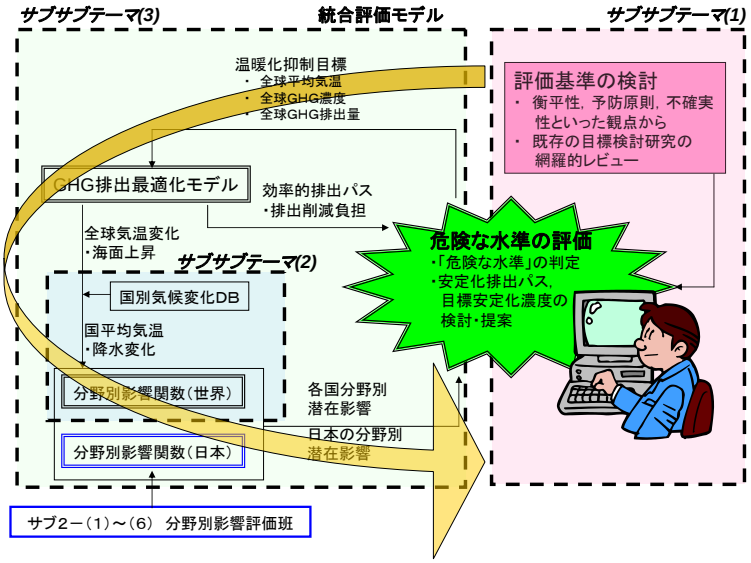


図１　サブテーマ１「統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究」における研究体制（サブサブテーマ１と３はH20年度から合併）

Ⅱ.本研究により得られた科学的成果

１）長期目標の合意に関連した重要な論点について整理し、それをもとに長期目標への合意に資する温暖化影響研究の取り組みについて検討した。その結果、影響研究の知見を伝えるための工夫を行うこと、影響知見の総合化のためのツール開発やデータベース構築、適応を見込んだ影響評価の推進が、重要な今後の課題として示された。本研究で開発に取り組んでいる影響DBは上記課題への解決策の一つであり、温暖化影響および脆弱性への理解を深め、科学的および社会経済学的知見に基づいた気候安定化目標を設定するために非常に有効である。

２）気候安定化目標を達成するために必要な排出削減量ならびにその安定化目標下で生ずる影響・リスクを統合的に解析・評価するための統合評価モデルを開発し、分野別影響評価結果から得られる知見（影響関数）を統合して、複数分野における影響を統合的に評価した。その結果、我が国にも比較的低い気温上昇で厳しい影響が現れること、世界的に温室効果ガス排出量が大幅に削減された場合、我が国に対する被害も相当程度減少すると見込まれるが、温室効果ガス濃度を450ppmに安定化した場合でも一定の被害が生じることは避けられないことを明らかにしたことは、世界でも類を見ない貴重な成果である。

３）影響関数が統合評価モデルAIM/Impact[Policy]に実装されることにより、政策検討の現場に対して科学的推計の詳細な手順や背景を逐一示すことは依然として困難であるが、温暖化影響の評価結果をより透明性を持って示すことが可能になる。また、これまで分野別に行われてきた温暖化影響評価がAIM/Impact[Policy]に集約されることで、分野間の影響の相互比較ができるようになった。さらに、長期的な気候安定化目標とそれに至る道筋を、温暖化の定量的影響を考慮しながら検討することが可能になった。統合評価モデルであるAIM/Impact[Policy]やそれに実装される影響関数では、政策検討の場面での実用性を高めるために手法の簡易化が本質的に重要であるが、本研究では、詳細な影響評価モデルによる将来推計結果の比較を通じて、影響関数による簡易化の妥当性について評価した。政策ツール開発における簡易化の標準的手順を、実践を通じて提案するものであり、従来になかった新しい影響評価を可能としたことで学術的にも貴重な成果である。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献

・環境省の中央環境審議会地球環境部会「気候変動に関する国際戦略専門委員会」における「気候変動問題に関する今後の国際的な対応について（長期目標をめぐって）第２次中間報告」において、本研究成果を提供した。

・IPCC第2作業部会第4次評価報告書の第10章アジアにおいて、研究参画者（原沢）がCLA（統括執筆責任者）を務め、本研究プロジェクトの研究成果を含めて日本への影響についてとりまとめた。また、同第17章適応において、研究参画者（高橋）がLA（代表執筆者）を務め、本研究プロジェクトの研究成果を含めて日本・アジアへの適応策についてとりまとめた。

・東京都環境審議会環境政策部会環境都市作り調査会の委員として参加し、東京における地球温暖化の影響・適応について本研究プロジェクトの研究成果を活用した。

・地球環境局長諮問委員会として設置された「地球温暖化影響・適応研究委員会」に研究参画者（原沢）が委員として参加し、さらに分野別ワーキンググループ（国民生活・都市生活、途上国）に研究参画者（肱岡、高橋）がメンバーとして参加し、本研究プロジェクトの研究成果を活用した。

・本研究で開発された影響関数とそれを組み込んだ統合評価モデルを用いて、安定化レベル別の影響の度合いを検討した研究成果は、地球温暖化問題に関する懇談会の中期目標検討委員会における検討課題の一つである「対策を講じない場合のコスト」に対して、気候安定化レベルに応じた我が国への影響および被害コストに関する総合的な知見科学的知見を提供し、温室効果ガスのより積極的な削減と適応策が必要であることを示した。

・文部科学省・気象庁・環境省が報告した「温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート：日本の気候変動とその影響」に専門家として貢献し、研究成果が多数引用された。

・平成22年版環境・循環型社会・生物多様性白書に研究成果が引用された。

・環境大臣・副大臣・政務官へ本プロジェクトの研究成果を紹介した。

・本研究の成果をふまえ、研究参画者（高橋）がIPCC「気候変動適応を促進するための極端現象及び災害のリスク管理」特別報告書代表執筆者（執筆期間2009～2011年；2011年公表予定）に選出されており、IPCCを通じた地球環境政策への貢献も見込まれる。

IV.研究概要

１．序

二酸化炭素濃度は、産業革命以前の約280ppmから2005年では約380ppmに達しており、1906～2005年の100年間に地球の平均気温の上昇は0.74℃と報告されている。これらは主に、大気中に排出された人間活動に起因する温室効果ガス(以後、GHG)が原因であるとほぼ断定されている。

地球上の様々な場所で、温暖化による影響が既に顕在化しており、今後、さらなる温暖化の進行により、自然生態系や生活環境、農業や水資源など様々な分野で甚大な影響を被ることが予測されている。また、気候システムを不安定にさせる熱塩循環の停止や非可逆的な海面上昇を引き起こす西南極氷床・グリーンランド氷床の融解、急激な温室効果ガスの放出を引き起こしうる永久凍土融解の可能性も懸念されている。地球温暖化を最小限に食い止めるためには、気候の安定化に努める必要がある。気候変動枠組み条約では、その究極的な目標として「地球の気候系に対し危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において、大気中の温室効果ガスの濃度を安定させること」を掲げているが、具体的にGHG濃度をどの程度に安定化させればよいのか、また、目標達成のためにどの程度、どのような経路（道筋）でGHG排出量を削減すればよいのかという明確な解は示されていない。EUでは“危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準”として、全球平均気温を産業革命前に比べて2℃上昇に抑えることを提案している。このような長期目標を達成するために、目指すべきGHG安定化濃度、GHG排出削減策(緩和策)やそのコスト、様々な分野における温暖化影響リスクに関する研究が進められてきている。

２．研究目的

（１）本研究では、衡平性、予防原則、不確実性などの観点から、温暖化抑制目標とその達成可能性を評価するための統合評価フレームワークを開発することを目的としている。具体的には、排出最適化モデル（各種の温暖化抑制目標を達成するための経済効率的排出経路とその帰結としての全球気温・海面上昇を推計するモデル）を開発するとともに、それをサブサブテーマ(2)から提供される影響評価関数（世界）、S-4-2(1)～(5)から提供される影響関数（日本）と連結し、統合評価モデルを開発することを目的としており、この統合評価モデルを利用することで、各種の温暖化抑制目標の下での影響の定量的推計を行う。

（２）統合評価モデルに影響評価モジュールを実装するために、全球・全国を対象とした農業、水資源、健康、生態系などの分野について、既開発の全球・全国規模の影響評価モデルの改良を行った後、気候パラメータ（気温・降水など）の段階的な変化を仮定した感度分析シミュレーションを総当たりで多数行い、そのシミュレーション結果を利用して、国別・県別の気候パラメータ変化を説明変数とする分野別影響関数（世界・日本）を開発する。影響関数を用いた影響評価手法は、S-4-2(1)～(5)で開発される推計精度の高い分野別影響関数（日本）と連携・相補し、様々な温暖化抑制目標下における影響の大きさの包括的な検討を可能にする。影響関数の開発を通じてS-4-2との連携を推進するとともに、S-4プロジェクトにおいて共通利用するための気候シナリオを日本の都道府県レベルで開発し、プロジェクト全体の研究推進をサポートする。

３．研究の方法

（１）統合評価モデルを用いた温暖化の危険な水準および温暖化抑制目標に関する研究

本研究では、温暖化抑制目標とその達成可能性を評価するための統合評価フレームワークの開発を検討するために、まず必要な知見と考え方を整理し、次に統合評価モデルを開発する。必要な知見と考え方の整理として、①温暖化抑制目標の根拠をより正確なものとするために温暖化影響の科学的知見を取り纏め、②抑制目標達成のための将来枠組み検討に不可欠な適応策研究の役割について整理し、③温暖化抑制のための長期目標合意における温暖化影響研究の役割を検討するために、目標合意に関連する重要な要素について整理し、④気候セキュリティへの対応を念頭に、気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の意味を、特にその期待効果の面から検討し、⑤①～④の研究結果を基に、長期目標への合意に資する影響研究知見の総合化を目的とした温暖化影響データベースを開発する。統合評価モデル開発にあたっては、大気中温室効果ガス濃度の上限値や全球平均気温上昇量の上限値といった気候安定化目標を設定・達成する場合に見込まれる、将来各時点の温室効果ガス排出経路、温室効果ガス濃度、気温上昇、分野別影響を統合的に評価することを目的とした統合評価モデル（AIM/Impact[Policy]）を開発・改良し、様々な気候安定化レベルにおいて、世界および日本への影響がどの程度軽減されるかについて総合的に検討する。

（２）温暖化影響の全球プロセスモデルを用いた分野別影響関数（世界）の開発に関する研究

本研究では、安定化濃度シナリオ下における国別温暖化影響評価を実施するにあたり、その研究設計に反映すべく、まず既存の温暖化影響評価の手法について整理する。また、S-4プロジェクトにおいて共通利用することを想定して、IPCC AR4で評価された気候モデル実験出力を利用して、日本の都道府県別の気候シナリオを開発する。さらに、S-4-1①で開発する統合評価モデルAIM/Impact[Policy]に実装するための「影響関数」を開発する。この影響関数とは、詳細な影響評価モデル（以後、詳細モデル）を用いて、気象条件を変化させた多数回のシミュレーションを行い、

気温や降水といった気象要素の変化に対する影響量の応答をデータベース化しておき、利用時は計算中の気象条件に最も近いものを読み取る仕組みである。本研究ではグローバルな分野別影響関数として、農作物の潜在生産性変化、水資源・水ストレス人口、熱ストレス超過死亡を評価するための影響関数を開発する。加えて、S-4-2(4)との連携し、温暖化によるブナ林への影響を国内各県について見積もるための影響関数を開発する。（本報告の「結果・考察」では、紙面の都合、水資源・水ストレス人口ならびにブナ林の影響関数開発についてのみ報告する。）基本的な影響関数の開発手順は①～⑤の通りである。①詳細モデルを用いて、現状の国別・県別の影響量を推計し、報告値と比較することで、モデルの妥当性についての検証を実施、②あるGCMの実験出力を元に作成した空間詳細な将来気候シナリオを詳細モデルの入力とし、温暖化影響の将来推計を実施、③感度実験的に詳細モデルを多数回ランすることで影響関数を作成、④手順②で用意した詳細モデルを用いた将来推計結果と影響関数を用いた将来推計結果の比較により、影響関数による詳細モデルの代替能力の評価を実施、⑤開発した影響関数の挙動・性質について考察する。

４．結果及び考察

（１）統合評価モデルを用いた温暖化の危険な水準および温暖化抑制目標に関する研究

１）抑制目標達成のための温暖化影響予測・適応策研究の役割の整理

分野別の温暖化影響予測に関しては、IPCC第3次評価報告書とそれ以降の影響評価に関する新たな知見を、①農業や食料安全保障、②水資源、③人間の健康、④海面上昇、⑤大規模事象、の5分野に関して整理した。また、適応策研究の役割を明らかにするために、①適応・適応能力の概念整理、②適応策を取り扱った研究の分類を行った。

長期目標の合意に関する影響研究の役割を検討した結果、長期目標の合意形成を左右する５つの要素、(a)長期目標と実現可能性、(b)避けるべき危険な気候変化、(c)温暖化影響の集計、(d)適応能力、(e)不確実性、が明らかとなった。長期目標の合意形成のために有望な新しい研究手法として、（i）シナリオ分析、（ii）影響の検出と原因推定、（iii）影響知見の統合化、(ⅳ)不確実性の確率密度分布での表現、が明らかとなった。

２）影響データベースの開発

長期目標の判断に貢献することを目的として、複数の分野における既存の影響知見を格納した温暖化影響データベース（以後、影響DB）を開発した。影響DBには、①異なる影響分野を全球平均気温上昇（以後、GMTI）などの共通軸で整理することで、統合的評価を可能とし、②膨大な影響知見を政策決定者が容易に確認でき、③シナリオや時間変化、GMTIによる影響の将来予測の幅を明示することができる、などの特徴がある。影響DBは既存の影響研究の知見を格納している。国内外の影響研究に関する文献を検索し、GMTIと共に様々な分野別影響（沿岸域、生態系、健康、食料、水資源）の格納に取り組んでいる。影響の知見は、文献中に記載されている図表から収集している。このとき、GMTIの値が記載されていない場合も多いが、その場合には、文中に記載されている使用した全球気候モデル（以後、GCM）の情報をもとに、GMTIの値を挿入して格納することが可能である。

３）統合評価モデル**AIM/Impact[Policy]**を用いた気候安定化シナリオ下における影響評価

a. 統合評価モデル“**AIM/Impact[Policy]**”の概要

1990年を基準として2100年までのGHG排出経路、GHG濃度、気温上昇と分野別影響を統合的に評価することを目的として、統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”の開発と拡張を行ってきた。AIM/Impact[Policy]は、政策目標として設定された気候安定化レベルや排出削減目標などに対して、影響を時系列で算定できる。そのため、このAIM/Impact[Policy]を使うことで、ある気候安定化目標の達成によって、許容し難い水準の深刻な温暖化影響を回避できるかどうかを検討することができる。なお、分野ごとの影響の現れ方を示す温暖化影響関数は分野別研究班がそれぞれの専門知識に基づいて構築したものである。 AIM/Impact[Policy]は大きく分けて、GHG排出予測モデル群と影響評価・適応モデルに分けられる。GHG排出予測パートに組み込まれているエネルギー・経済モデルを用いて、様々な制約条件下（全球平均GHG温室効果ガス濃度など）における地球全体のGHG排出の道筋を最適化計算により推定する。次に、影響評価・適応モデルでは、正規化気候変化データベースならびに分野別影響関数を用いて、地域別（世界モデルとして利用する場合は国別、日本モデルとして利用する場合は県別）の気候変化（気温や降雨量など）と分野別影響量が、時系列的に計算される。

影響関数とは、気温・降水量等の気候要素の変化に合わせてどのように影響が変化するかを示すものであり、実際には、（気候要素、影響）の対のデータを集めたデータベースである。その作成過程では、気候要素をある一定の刻み幅で変化させて多数回のシミュレーションを行い、影響要素モデルで推計される出力を地域別に平均して集計する。影響関数の利点は、地域別に気候シナリオ（気候変化の時系列）が与えられると、影響変化の時系列を迅速に計算可能であることである。これによって、いろいろな排出削減政策に対して影響量の検討が容易となる。一方、注意点は、①感

度解析で変化させた気候因子のみ考慮可能であること、②地域別に集計するため地域内の空間的差異が平均化されてしまうこと、などが挙げられる。S-4プロジェクトでは、分野別の影響研究班が分担して世界国別／日本県別の分野別影響関数を開発しており、そこで構築された影響関数が影響評価・適応モデルに実装されている。図２に“AIM/Impact[Policy]”を用いた影響評価の手順を示す。AIM/Impact[Policy]のエネルギー・経済モデルから全球平均気温変化シナリオが渡されると、まずはパターンスケーリングによって国別・県別の気候シナリオが作成される。パターンスケーリングとは、気候要素の空間分布をGCM実験の結果によって代表させる手法である。複数の排出シナリオの下での温暖化は簡易的な気温上昇推計モデルを用いて計算されるが、気候要素の空間分布までは計算されない。そのため、気候要素の空間分布を全球平均の気温変化量に応じてあらかじめ決めておけば、簡単に求めることができる。AIM/Impact[Policy]のパターンスケーリングでは、GCM実験結果により得られた気温変化・降水量変化パターンとして、正規化気候変化データベースが用いられる。その後、国別・県別の気候シナリオをそれぞれの国・地域について用意された分野別影響関数に入力することで、国・地域別の分野別影響が計算される。

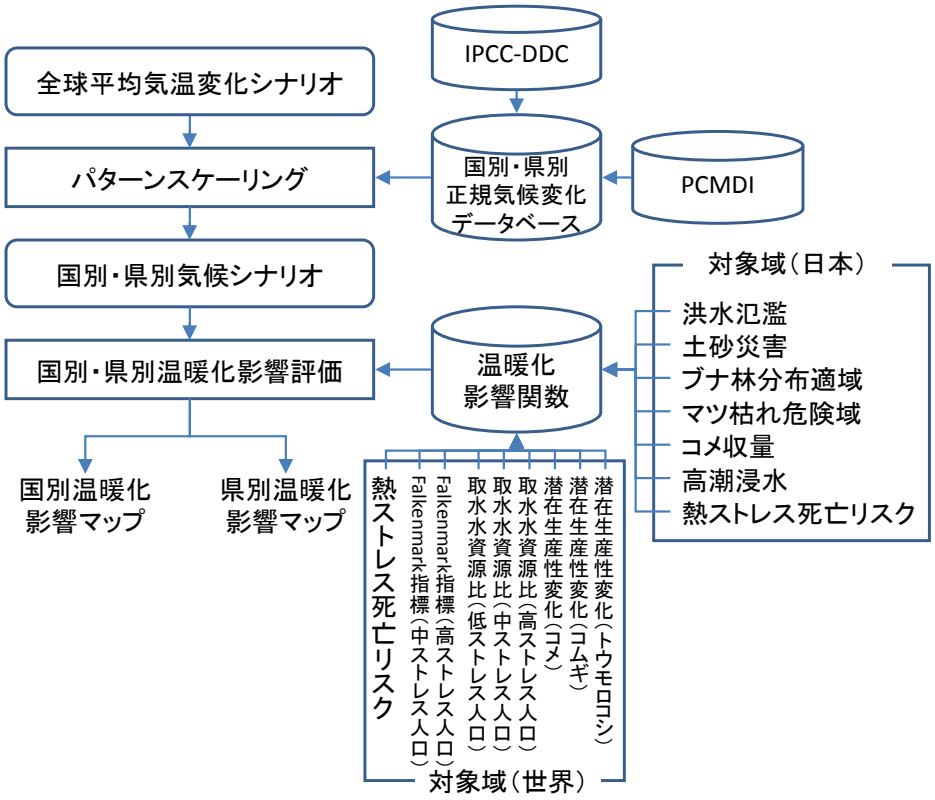


図２　世界多地域多部門影響評価・適応モデル（データベース型モデル）概念図

b.　安定化シナリオを用いた影響評価

次の条件に基づき、BaU（Business as Usual：なりゆき）シナリオと2つのGHG濃度安定化シナリオを設定した。BaUの排出シナリオはSRES B2の想定に基づいたものである。①平衡気候感度は3℃、②炭素フィードバック効果は考慮しない、③全球平均気温変化から地域別の気候シナリオ作成（パターンスケーリング）に使用したGCMはMIROC3.2-hires、④GHG濃度にはGHGおよびエアロゾルの冷却効果も含む。温暖化による影響は1981-2000年（基準年）からの増加分と仮定している。

①450sシナリオ：GHG濃度450ppm（二酸化炭素等価濃度、本分析による2100年時は約2.1℃上昇）安定化シナリオ。GHG濃度のオーバーシュート有り。平衡気温上昇が約2.1℃（産業革命前比）。

②550sシナリオ：GHG濃度550ppm（二酸化炭素等価濃度）安定化シナリオ。GHG濃度のオーバーシュート有り。平衡気温上昇が約2.9℃（産業革命前比、本分析による2100年時は約2.7℃上昇）

③BaUシナリオ：なりゆきシナリオ。気温上昇が2100年で約3.8℃（産業革命前比）。なお、1990年比の気温上昇量は産業革命前比－0.5℃で換算できる。

日本を対象とし、BaUおよび2つの安定化シナリオを用いて、①洪水による氾濫面積及び被害コスト、②土砂災害による斜面崩壊発生確率及び被害コスト、③ブナ林の適域への影響及び被害コスト、④マツ枯れ危険域の拡大、⑤コメ収量への影響、⑥砂浜喪失面積の拡大及び被害コスト、⑦高潮浸水面積の拡大、被災人口及び被害コスト、⑧熱ストレス死亡リスク及び被害コスト、の8つの指標について温暖化影響を定量的に評価した結果、いずれの指標においても、低いGHG濃度で安定化さ

せるほど悪影響が低減されるが、最も低いレベル（温室効果ガス濃度を450ppm）で安定化させるシナリオにおいても、なんら対策を講じない場合には悪影響を被る可能性があることが示された（表１、図３）。この結果より、今後20年は追加的な緩和策の有無にかかわらず温暖化が進行すると予想されているが、世界全体の気候安定化レベルの違いによる影響の差異は、今世紀中程を過ぎると大きくなると見込まれる。したがって、気候を安定化させるための積極的な緩和策と共に、ある程度の悪影響が生じることに備えて、長期的な視点で適応策を検討・実施することが早急に必要であることが明らかとなった。

表１　安定化レベル別の気候シナリオおよび影響（全国値）

気候シナリオ/影響分野		単位	2030s			2050s			2090s		
			450s	550s	BaU	450s	550s	BaU	450s	550s	BaU
	年平均気温変化(1990=0℃)	℃	0.9	0.9	1.0	1.3	1.6	1.7	1.6	2.3	3.2
	年平均降水量変化(1990=100%)	%	100	101	101	105	106	107	107	110	113
	海面上昇量(1990=0m)	m	0.06	0.07	0.07	0.10	0.11	0.12	0.15	0.19	0.24
洪水氾濫	洪水氾濫面積	1000km^2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.7	0.7	0.5	0.6	0.8
	浸水被害コストポテンシャル	兆円/年	1.3	1.3	1.3	4.4	4.7	4.9	5.1	6.1	8.3
土砂災害	斜面崩壊発生確率	%	3	3	3	3	4	4	4	5	6
	斜面崩壊被害コストポテンシャル	兆円/年	0.60	0.60	0.60	0.49	0.52	0.58	0.65	0.77	0.94
ブナ林	ブナ林の適域	%	79	77	77	72	65	61	64	50	32
	ブナ林の適域喪失被害コスト	億円/年	778	829	851	1034	1273	1381	1325	1811	2324
マツ枯れ	マツ枯れ危険域	%	15	16	16	22	26	28	27	37	51
コメ	コメ収量	t/ha	4.9	5.0	5.0	4.9	5.0	5.1	4.8	4.9	5.1
砂浜	砂浜喪失面積	%	13	13	13	19	21	23	29	37	47
	砂浜喪失被害コスト	億円/年	116	118	121	176	192	208	273	338	430
高潮	高潮浸水人口(西日本)	万人/年	12	12	12	19	20	21	32	37	44
	高潮浸水人口(三大湾)	万人/回	11	11	11	17	17	17	30	32	35
	高潮浸水面積(西日本)	km^2/年	60	60	61	92	97	102	155	176	207
	高潮浸水面積(三大湾)	km^2/回	24	24	24	37	38	39	63	67	72
	高潮浸水被害コスト(西日本)	兆円/年	2.0	2.0	2.0	3.1	3.3	3.5	5.4	6.2	7.4
	高潮浸水被害コスト(三大湾)	兆円/回	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	1.8	2.0	2.3
熱ストレス	熱ストレス死亡リスク	–	1.5	1.6	1.6	1.8	2.1	2.2	2.1	2.8	3.7
	熱ストレス(熱中症)死亡被害コスト	億円/年	243	265	274	373	480	529	501	775	1192

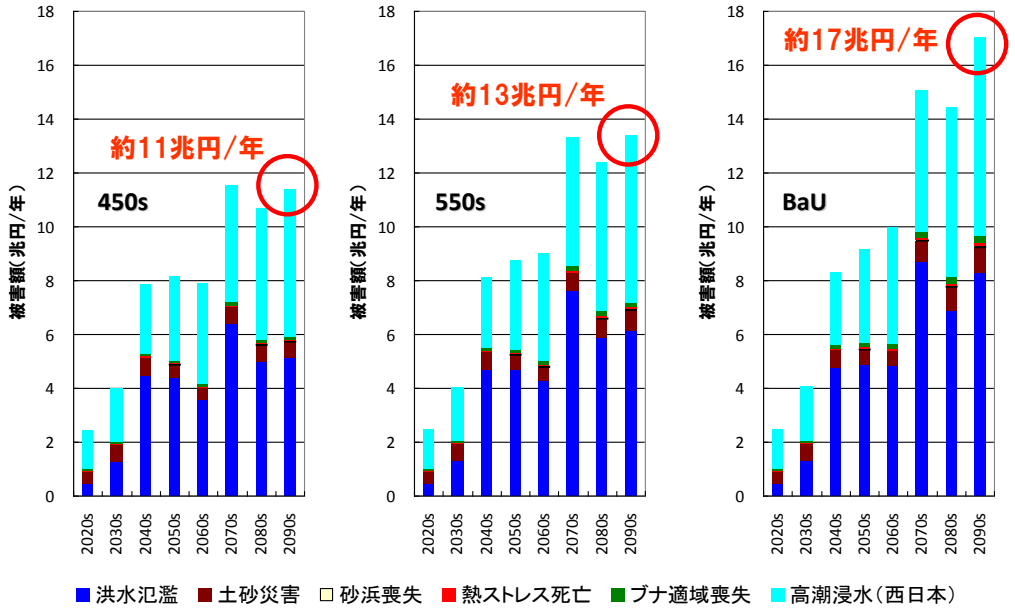


図３　シナリオ別・指標別の被害コスト（全国）

（２）温暖化影響の全球プロセスモデルを用いた分野別影響関数（世界）の開発に関する研究

１）気候シナリオの整備

地球温暖化による環境影響を予測・評価するためには、今後の温室効果ガスの排出見通し（排出シナリオ）に基づき、将来の気候はどの程度変化するのかについての見通し（気候シナリオ）が必要である。現在、世界の様々な研究機関が独自のモデルを用いて気候シナリオを提供している。これらの気候シナリオを、地球温暖化の環境影響の予測・評価に利用するに際して、それぞれの気候シナリオの特徴を体系的に把握することは非常に重要となる。

現在の気候モデルの多くは、全球がその予測対象領域となっている。特定の国や地域についての温暖化の影響評価を行なうに際し、現在の気候モデルの結果を利用するには、空間解像度が粗すぎるという問題が生じる。このため、オリジナルの気候モデル（気候シナリオ）の高解像度化が必要となる。本研究では、S-4プロジェクトにおける日本域を対象とした地球温暖化による環境影響評価を支援することが、目的の一つとなっている。そこで、入手可能な気候シナリオを、モデル、シナリオ別に収集・整理し、気候シナリオの高解像度化を行うとともに、国別・都道府県別の平均値を集計し、AIM/Impact[Policy]に実装した。

２）影響関数の開発と応用

本研究では、農作物の潜在生産性変化、水資源・水ストレス人口、熱ストレス超過死亡を評価するための影響関数を開発した。加えて、S-4-2(4)と連携し、温暖化によるブナ林への影響を国内各県について見積もるための影響関数を開発した。ここでは、水資源・水ストレス人口ならびにブナ林の影響関数開発について報告する。

a. グローバル水資源影響関数の開発

まず、現在の3時間単位の気象データについて、気温を全球・通年一律に-5℃から15℃まで1℃刻みで21通りに、降水を同じく-75%から+200%まで12通り変化させることにより、合わせて252通りの気象データを入力データとし、詳細モデルを利用して得られた国別流出量データを影響関数として、データベースとして保存した。さらに、影響関数が詳細モデルの代替になることを明らかにした。日本の水資源影響関数の例を図４に示す。気温の上昇（横軸の右向き）とともに水資源量が減少していき（色が濃くなり）、降水の減少（縦軸下向き）とともに水資源量が減少していく（色が濃くなる）ことが分かる。気温の上昇に対する水資源量の減少率と降水の減少による水資源量の減少率の関係は国毎に異なる。気温が現在値に対して3℃上昇した場合と降水量が25%減少した場合でそれぞれ国の水資源量がどれくらい減少するかを示したものが図５である。参考として、日本、インド、中国、ロシアをそれぞれJ、I、C、Rとしてプロットした。気温に対する感度はインド、中国、ロシアの順に、降水に対する感度はロシア、インド、中国の順に高くなる。以下に簡単にこの関係を説明しておく。ロシアの主な水資源量は冬期の降雪に由来するが、降雪が積雪として春まで維持されて、一気に融け出した場合、蒸発による損失が小さく、降水量の減少(25%)と水資源量の減少(37%)の乖離が小さい。しかし、気温が上昇し、積雪の融解がおきると、冬期にも蒸発による損失が発生し、急速に水資源量が減少する。インドの主な水資源量は雨期の降水であるが、雨期には流出が蒸発に卓越し、蒸発による損失が比較的小さい。これに対して中国では蒸発が流出に年間を通じて卓越し、蒸発の損失が大きい。

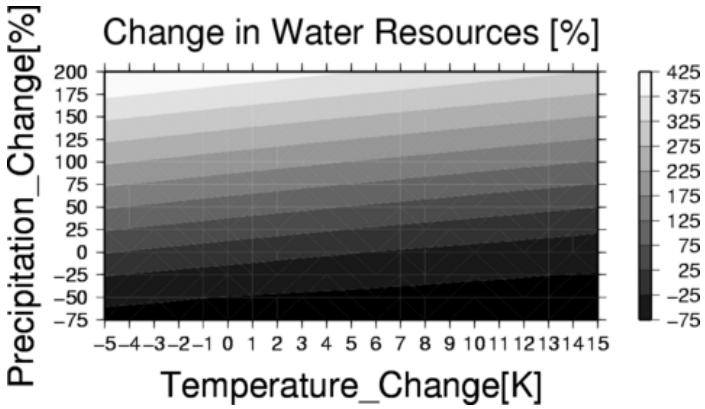


図４　日本の水資源量の感度

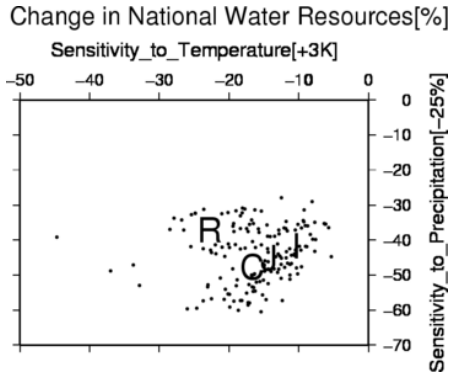


図５　国別の水資源量の感度。気温を+3℃、降水-25%の変化させた場合の水資源量変化割合を示す。

c. 水ストレス人口に関する影響関数の開発および影響評価

水資源量と共に各国の水ストレス人口に関する影響関数を開発した。GCMにHadCM3を，社会経済人口シナリオにSRES A1Bを利用した場合、詳細モデルと影響関数の結果を比較すると、気候変化が比較的小さい2020年代はもとより，大きくなる2050年代，2080年代においても，おおむね誤差が±20%以内に収まることが示された。

0.0℃、+2.0℃、+4.0℃の３種類の安定化レベルを検討した。0.0℃とは参照実験で、1980年代の気候が21世紀末まで続くという設定である。+2.0℃と+4.0℃は、21世紀末までの全球平均気温の上昇量（産業革命前を基準とする）の上限値である。結果、アフリカ北部と中近東において、安定化レベルの上昇とともに水ストレス人口が若干増加するという結果が得られた。これらの地域は現在も水が逼迫している地域であり、気候政策を決定する上で検討すべき要素となりうる。しかし、これ以外の地域では温暖化に伴う降水量・河川流量の増加のため、水ストレス人口が減少するという結果が得られた。これは指標の特性と限界によるものであり、さらなる検討の必要性が強く示唆された.

一人当たり水資源量を利用した水資源の影響評価は、AR4でも多数引用されており、有用な指標として広く認められている。しかし、河川流量には時間変動があり、平均年河川流量の増加は、必ずしも利用可能な水資源量の増加を保証しないことに注意が必要である。特に、気候変化は降雨の強度と頻度の変化をもたらすと予測されており、洪水や渇水の増大が懸念されているが、こうした負の影響も指標には反映されていない。また、長期的には水利用効率の変化等が期待でき、その場

合は1000m^3/person/yrを水ストレスの閾値として用いるのが不適切となりうることにも留意する必要がある。この他に本研究では、上流の取水による下流の河川流量の減少を考慮しなかったが、特に乾燥地や乾期においてこの効果は無視できない。最近、こうした問題を解消する「累積取水需要比」という指標が開発されている。この指標は、「取りたいときに，取りたい量の水が取れるか」を表すもので、河川流量の年々変動や季節変動を考慮した水資源評価を行うのに適している。しかし、非常に煩雑な計算が必要で、説明変数も増えるため、影響関数を作成するためには。今後多くの課題の克服が必要である。

d. ブナ林適域影響関数の開発と県別影響評価

影響関数による詳細モデル再現能の把握と再現能向上の検討、各県影響関数の特徴を整理した。得られた結果を①～③に示す。

①最新の複数の気候予測実験結果を基に、21世紀中の気温及び降水量の変化を日本域について県別年平均値で見たところ、今後100年間に年平均気温が6℃以上上昇したり年降水量が50%以上増減する可能性は低いことが分かった。この結果を受け、感度解析時の因子の上下限ならびに刻み幅を適切に設定した。

②気候変化による県別ブナ林適域面積率変化を簡易に推定するために、年平均気温変化及び年降水量変化率の2つを説明変数とする影響関数（図６）により、ブナ林分布確率をメッシュ別に推定する詳細モデルを代替する場合、影響関数では降水量変化の季節差を考慮出来ないことに起因した誤差が生ずることが分かった。ただし、年降水量変化率の代わりに夏季降水量変化率・冬季降水量変化率を用いて、年平均気温変化と併せて3説明変数とすることで、今後、影響関数による詳細モデル再現精度を高めうることが分かった。

③開発した影響関数に基づく考察により、北海道・群馬・長野では2℃程度の気温上昇ではブナ林適域面積率が減少しないことが分かった（表２）。しかしそれらの県でも、2℃を越す気温上昇では、降水量が増加しない限りは、ブナ林適域面積率は減少する。東北、北陸、山陰では、現時点でブナ林の分布適域が広く、気温上昇に応じてブナ林適域面積率は減少するものの、比較的多く分布適域が残存する。特に富山県は、5℃を超える気温上昇が生じてもブナ林適域面積率が数%残存すると見込まれる。一方、太平洋側の地域では、わずかな気温上昇でもブナ林適域面積率は減少すると予測された。

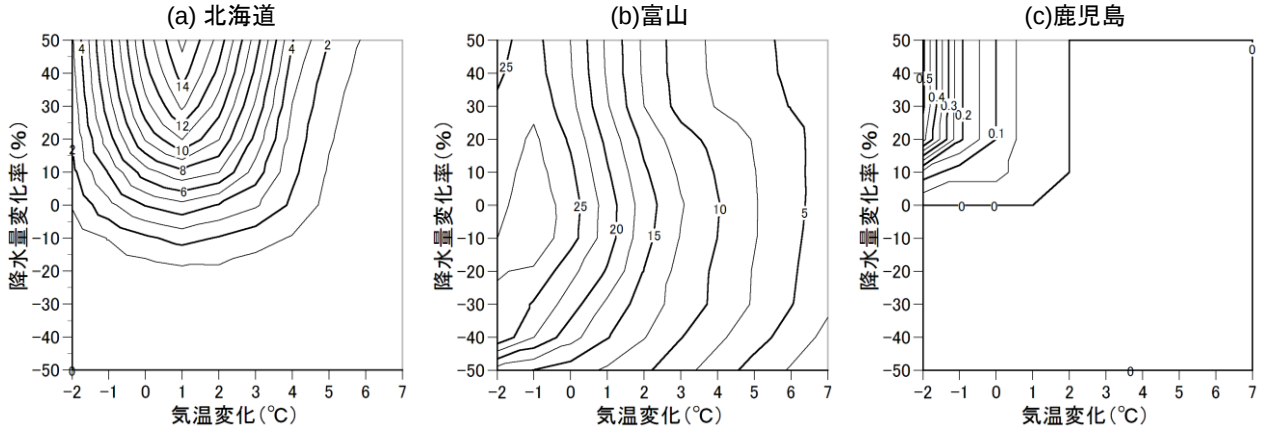


図６　県別ブナ林影響関数の等値線図の例　（(a)北海道、(b)富山県、(c)鹿児島県；等値線数値はブナ林適域面積率(%)）

表２　気温変化・降水量変化別の高ブナ林適域面積率県

気温変化＼降水量変化	-20%	-10%	0%	10%	20%
0℃	青森,秋田,山形,新潟,富山,石川,福井,岐阜	青森,秋田,山形,福島,新潟,富山,石川,福井,岐阜	青森,岩手,秋田,山形,福島,新潟,富山,石川,福井,岐阜	青森,岩手,秋田,山形,福島,新潟,富山,石川,福井,岐阜	青森,岩手,秋田,山形,福島,新潟,富山,石川,福井,長野,岐阜
1℃	山形,新潟,富山	秋田,山形,新潟,富山,岐阜	青森,岩手,秋田,山形,福島,新潟,富山,岐阜	青森,岩手,秋田,山形,福島,新潟,富山,福井,岐阜	北海道,青森,岩手,秋田,山形,福島,新潟,富山,福井,長野,岐阜
2℃	富山	山形,富山	山形,富山	山形,新潟,富山	山形,新潟,富山,岐阜
3℃	富山	富山	富山	富山	富山

５．研究者略歴

課題代表者：肱岡靖明

1971年生まれ、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻卒業、博士（工学）
現在、独立行政法人国立環境研究所社会環境システム研究領域主任研究員

主要参画研究者

（１）１）：肱岡靖明　（同上）

２）：原沢英夫
1954年生まれ、東京大学工学部都市工学科卒業、博士（工学）
現在、内閣府総合科学技術会議参事官

３）：亀山康子
1967年生まれ、東京大学教養学部卒業、博士（学術）
現在、独立行政法人国立環境研究所主任研究員

４）：久保田泉
1975年生まれ、学習院大学大学院法学研究科単位取得退学、博士（法学）
現在、独立行政法人国立環境研究所研究員

５）：増井利彦
1970年生まれ、大阪大学工学部卒業、博士（工学）
現在、独立行政法人国立環境研究所室長

６）：花崎直太
1978年生まれ、東京大学大学院工学系研究科卒業、博士（工学）
現在、独立行政法人国立環境研究所研究員

（２）：高橋　潔
1973年生まれ、京都大学工学部卒業、博士（工学）
現在、独立行政法人国立環境研究所主任研究員

７．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1)査読付き論文

1) H. Harasawa: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, pp. 243-249 (2006) “Key Vulnerabilities and Critical Levels of Impacts in East & South East Asia”
2) Hijioka, Y., T. Masui, K. Takahashi, Y. Matsuoka, and H. Harasawa : Environmental Economics and Policy Studies, Vol.7, No.3, pp.331-345, (2006) “Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming”
3) 原沢英夫：地球環境、11(1), 121-127 (2006) 「地球温暖化の危険なレベル」
4) 高橋潔：地球環境、11(1), 111-119 (2006) 「温暖化が農業生産に及ぼす影響とその適応策」
5) Harasawa, H.: Global Environmental Research, Vol.10, No.2, pp.253-259(2006) “A Consideration on Dangerous Level of Global Warming”
6) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集、20, 19-24(2006) 「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」
7) 久保田泉、高橋潔、肱岡靖明：環境情報科学論文集、20, 457-462 (2006) 「政策決定支援のための適応研究に関する検討」
8) Takahashi, K.：Global Environmental Research, Vol.10, No.2, pp.243-252 (2006) “Impacts of Global Warming on Agricultural Production and Adaptation in Response”
9) Hijioka, Y., and K. Takahashi：Global Environmental Research, Vol.10, No.2, pp.261-270(2006) “Integrated Assessment of Greenhouse Gas Stabilization Concentrations, Emission Pathways, and Impact Threshold Values for Control of Global Warming”
10) 肱岡靖明、高橋潔：地球環境、Vol.11, pp.129-138 (2006) 「地球温暖化抑制のための温室効果ガス安定化濃度・排出経路・影響閾値の統合評価」
11) 増冨祐司、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明、松岡譲：水工学論文集、第51巻, 235－240 (2007) 「季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価」
12) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：環境システム研究論文集、第35巻, pp367-374 (2007) 「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」

13) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集21, pp.423-428 (2007)
「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発 －温暖化影響データベース－」
14) Takahashi, K., Honda, Y. and Emori, S.: Journal of Risk Research, 10, 339-354(2007)
"Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming"
15) Kainuma, M., Matsuoka, Y., Masui, T., Takahashi, K. and Hijioka, Y.: In Schlesinger, M., Kheshgi, H., Smith, J., De La Chesnaye, F. and Reilly, J.M. (Eds.), Human-Induce Climate Change, Ed.1, Cambridge University Press, pp.314-327 (2007)
"Climate policy assessment using the Asia-Pacific Integrated Model"
16) Yasuaki Hijioka, Yuzuru Matsuoka, Hiromi Nishimoto, Toshihiko Masui, Mikiko Kainuma: Journal of Global Environment Engineering, Vol.13, pp.97-108 (2008)
"Global GHG Emission Scenarios under GHG Concentration Stabilization Targets"
17) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1007-1025 (2008)
"An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing"
18) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1027-1037(2008) "An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments"
19) 高橋潔、松井哲哉、肱岡靖明、田中信行、原沢英夫: 地球環境研究論文集、16, 111-119 (2008)
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
20) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明：地球環境研究論文集、16, 1-8 (2008)
「全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較」
21) 増冨祐司、高橋潔、原沢英夫、松岡譲：地球環境研究論文集、16. 121-130 (2008)
「気候変化の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稲生産量に及ぼす影響及びその適応策の評価」
22) 花崎直太、増冨祐司、肱岡靖明、高橋潔：水工学論文集, 53, 271-276 (2009)
「温暖化政策支援モデルにおける全球水ストレス人口推定モデルの開発と適用」
23) Masutomi, Y., Takahashi K., Harasawa, H., Matsuoka, Y.: Agric. Ecosyst. And Environ, 131,281-291(2009) "Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models"
24) T. Matsui, K. Takahashi, N. Tanaka, Y. Hijioka, M. Horikawa, T. Yagihashi, H. Harasawa : Appl.Veg.Sci., 12, 328-339 (2009)
"Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech(Fagus crenata) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan"
25) 本田靖、高橋潔：地球環境、14 (2), 257-262 (2009) 「熱ストレスの健康影響」
26) 松井哲哉、田中信行、八木橋勉、小南裕志、津山幾太郎、高橋潔：地球環境、14 (2), 165-174 (2009) 「温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価」
27) 肱岡靖明、高橋潔、花崎直太、増冨祐司、原沢英夫：地球環境、14 (2), 127-135 (2009)
「統合評価モデルを用いた日本を対象とした温暖化影響の総合評価」

(2)査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

１.統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究

（１）統合評価モデルを用いた温暖化の危険な水準および温暖化抑制目標に関する研究

※平成20年度より研究体制が再編されため、旧（１）温暖化抑制目標に関する既存知見の整理と、評価基準・評価手法の検討、旧（３）統合評価モデルを用いた温暖化の危険な水準および安定化経路の評価に関する研究、が統合された。

独立行政法人国立環境研究所

社会環境システム研究領域	統合評価研究室	肱岡靖明
社会環境システム研究領域	統合評価研究室	増井利彦
社会環境システム研究領域	統合評価研究室	花崎直太
地球環境研究センター	温暖化対策評価研究室	亀山康子
社会環境システム研究領域	環境経済・政策研究室	久保田泉

平成17～21年度合計予算額　76,918千円
（うち、平成21年度予算額　26,192千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］気候変動枠組条約では、その究極目標として「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させること」を挙げ、また「そのような水準は、生態系が気候変動に自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ、経済開発が持続可能な態様で進行できるような期間内に達成されるべきである」と示している。この目的を達成するためには、温暖化の科学的知見の集積と総合化を通じて目的達成に向けた方策の検討を行う必要がある。本研究では、安定化目標と目標達成のための緩和策、目標下における影響とリスク軽減のための適応策を評価するための統合評価モデルAIM/Impact[Policy]の開発・改良を行うと共に、サブサブテーマ(2)から提供される影響評価関数（世界）、S-4-2(1)～(5)から提供される影響関数（日本）の統合評価モデルへの実装し、安定化シナリオ下における影響評価を実施した。日本を対象とし、BaUおよび2つの安定化シナリオを用いて、①洪水による氾濫面積及び被害コスト、②土砂災害による斜面崩壊発生確率及び被害コスト、③ブナ林の適域への影響及び被害コスト、④マツ枯れ危険域の拡大、⑤コメ収量への影響、⑥砂浜喪失面積の拡大及び被害コスト、⑦高潮浸水面積の拡大、被災人口及び被害コスト、⑧熱ストレス死亡リスク及び被害コスト、の8つの指標について温暖化影響を定量的に評価した結果、いずれの指標においても、低いGHG濃度で安定化させるほど悪影響が低減されるが、最も低いレベル（温室効果ガス濃度を450ppm）で安定化させるシナリオにおいても、なんら対策を講じない場合には悪影響を被る可能性があることが示された。

［キーワード］地球温暖化、気候安定化シナリオ、温暖化影響評価、影響関数、統合評価モデル

１．はじめに

人間活動に起因する温室効果ガス（以後、GHG）排出量の増加によって、地球規模で気温が上昇し、気温上昇による影響が既に発現していると報告されている[1)]。今後さらに気温が上昇した場合、自然生態系や農業、水資源、人への健康など、様々な分野で深刻な影響が発生すると予測されており、温暖化対策の早急な実施が求められている[2,3)]。

気候変動枠組条約第2条[4)]では、同条約の究極目標として「地球の気候系に対し危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において、大気中のGHG濃度を安定させること」を掲げている。ここでは、具体的な安定化の水準について述べていない。温暖化をどのレベルで抑制するべきか、具体的な目標設定についても科学的知見に基づいた議論が望まれている。また、2005年2月16日に発効された京都議定書では、第一約束期間（2008年～2012年）において、先進国は1990年比で温室効果ガスを5.2%削減することが約束されている。しかしながら、GHGと気温上昇の関係を考慮すると、より大幅な排出削減努力を長期にわたり継続的に実施することが必要となる。

安定化目標を設定するためには、影響や気候変化、GHG排出量などの要素を統合して、それぞれの達成目標を一貫して決定することが必要である。これまで、要素間の不確実性が大きいとの理由で、それぞれの達成目標は個別に検討されることが多かったが、京都議定書も発効し、京都議定書第一約束期間後の長期的な温暖化抑制目標を検討するためには、すべての要素を統合して議論することが求められている。

２．研究目的

本研究では、衡平性、予防原則、不確実性などの観点から、温暖化抑制目標とその達成可能性を評価するための統合評価フレームワークを開発することを目的としている。具体的には、排出最適化モデル（各種の温暖化抑制目標を達成するための経済効率的排出経路とその帰結としての全球気温・海面上昇を推計するモデル）を開発するとともに、それをサブサブテーマ(2)から提供される影響評価関数（世界）、S-4-2(1)～(5)から提供される影響関数（日本）と連結し、統合評価モデルを開発することを目的としており、この統合評価モデルを利用することで、各種の温暖化抑制目標の下での影響の定量的推計を行う。

３．研究方法

本研究では、大気中温室効果ガス濃度の上限値や全球平均気温上昇量の上限値といった気候安定化目標を設定・達成する場合に見込まれる、将来各時点の温室効果ガス排出経路、温室効果ガス濃度、気温上昇、分野別影響を統合的に評価することを目的とした統合評価モデル（AIM/Impact[Policy]）を開発・改良し、様々な気候安定化レベルにおいて、世界および日本への影響がどの程度軽減されるかについて総合的に検討する。

４．結果・考察

（１）統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”の開発と改良

１）　統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”

温暖化影響総合予測プロジェクトでは、1990年を基準として2100年までのGHG排出経路、GHG濃度、気温上昇と分野別影響を統合的に評価することを目的として、統合評価モデル

“AIM/Impact[Policy]”の開発と拡張を行ってきた。AIM/Impact[Policy]は、政策目標として設定された気候安定化レベルや排出削減目標などに対して、影響を時系列で算定できる。そのため、このAIM/Impact[Policy]を使うことで、ある気候安定化目標の達成によって、許容し難い水準の深刻な温暖化影響を回避できるかどうかを検討することができる。なお、分野ごとの影響の現れ方を示す温暖化影響関数は分野別研究班がそれぞれの専門知識に基づいて構築したものである。

AIM/Impact[Policy]は大きく分けて、GHG排出予測モデル群と影響評価・適応モデルに分けられる（図１）。GHG排出予測パートに組み込まれているエネルギー・経済モデルを用いて、様々な制約条件下（全球平均GHG温室効果ガス濃度など）における地球全体のGHG排出の道筋を最適化計算により推定する。ここで示す最適化とは、将来の各時点における一人あたりの効用（消費）水準を割引率により現在価値換算し、人口により重み付けしたものの総和が、対象期間で最大化されることを意味する。さらに、エネルギー・経済モデルに実装されている簡易気候モデルにより、前述の様々な制約条件下における全球平均気温変化が算出され、影響評価・適応モデルの入力データとなる。次に、影響評価・適応モデルでは、 2)で説明する正規化気候変化データベースならびに分野別影響関数を用いて、地域別（世界モデルとして利用する場合は国別、日本モデルとして利用する場合は県別）の気候変化（気温や降雨量など）と分野別影響量が時系列で計算される。

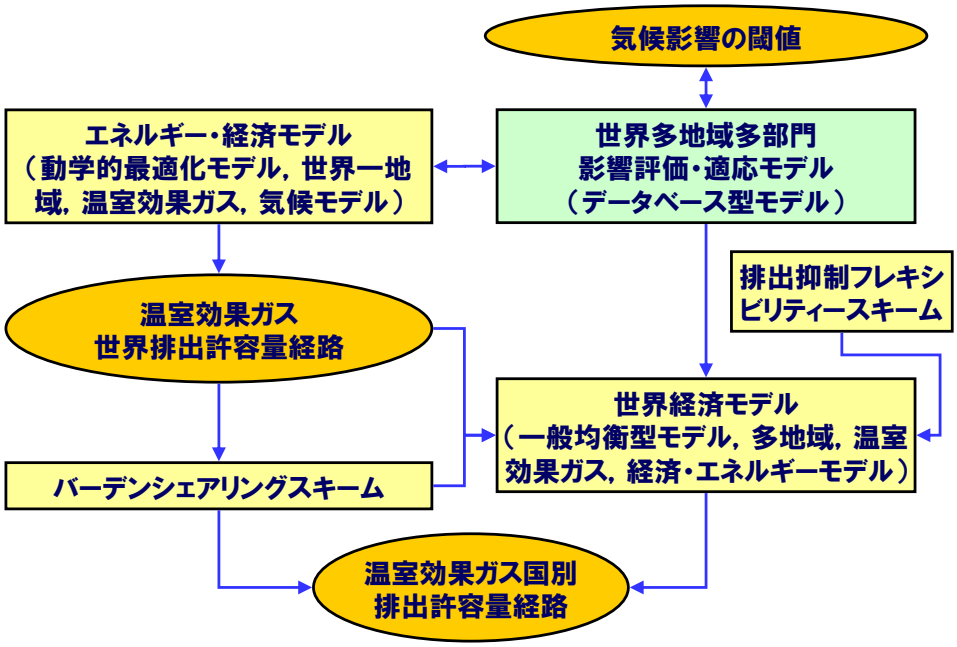


図１　AIM/Impact[Policy]のモデル構造図

２）　影響評価・適応モデル

AIM/Impact[Policy]の影響評価・適応モデルは、全球平均気温変化を入力条件として、地域別（国別もしくは県別）の気候変化と分野別温暖化影響を時系列的に予測する。温暖化による将来影響を予測する方法としては、空間を緯度経度方向に等間隔なマス目（メッシュ）に区切り、メッシュ毎に、気温、降水、土壌水分、その他様々な因子のデータを算定し、それを条件にして、物理的、化学的、生態学的プロセスを表すモデル（以後、影響要素モデル）で影響を推定する方法が用いられる場合が多い。このメッシュ別影響評価は、影響の空間分布を詳細に示せる点にメ

リットがあるが、その反面、空間解像度が高ければ高いほど、計算負荷が大きくなる。この問題を克服するために、影響評価・適応モデルでは、地域別の正規化気候変化データベースと分野別影響関数を事前に用意し、それらを用いて影響評価を行う工夫が施されている。

正規化気候変化データベースとは、地域毎の気候変数（気温・降水量・日射など）の将来変化量を世界平均の気候変化量との比で表したものである。それは、GCM（Global Climate Model：全球気候モデル）による気候予測を用いて、国別・県別に空間平均した気候変数の変化量を求め、同じ期間の全球平均気温変化で除して求める。これとエネルギー・経済モデルに実装された簡易気候モデルから渡される全球平均気温シナリオとを組み合わせれば、後述のパターンスケーリング手法を用いて、国別・県別の将来気候シナリオを生み出すことができる。

なお、オリジナルのGCMの数値実験結果は空間解像度が粗いため、まずGCM数値実験結果を空間水平方向2分30秒メッシュデータに単純空間内挿補間した後に、国別（都道府県別）の空間平均を推計している。これまで、IPCC-DDC（IPCC Data Distribution Centre）・PCMDI（Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison）で提供される計30のGCMと77のシナリオによるGCM実験結果を収集・整備し、正規化気候変化データベースに収録している。

影響関数とは、気温・降水量等の気候要素の変化に合わせてどのように影響が変化するかを示すものであり、実際には、（気候要素、影響）の対のデータを集めたデータベースである。その作成過程では、気候要素をある一定の刻み幅で変化させて多数回のシミュレーションを行い、影響要素モデルで推計される出力を地域別に平均して集計する。影響関数の利点は、地域別に気候シナリオ（気候変化の時系列）が与えられると、影響変化の時系列を迅速に計算可能であることである。これによって、いろいろな排出削減政策に対して影響量の検討が容易となる。一方、注意点は、①感度解析で変化させた気候因子のみ考慮可能であること、②地域別に集計するため地域内の空間的差異が平均化されてしまうこと、などが挙げられる。S-4プロジェクトでは、分野別の影響研究班が分担して世界国別／日本県別の分野別影響関数を開発しており、そこで構築された影響関数が影響評価・適応モデルに実装されている（表１）。

３）　影響評価の手順

図２に“AIM/Impact[Policy]”を用いた影響評価の手順を示す。AIM/Impact[Policy]のエネルギー・経済モデルから全球平均気温変化シナリオが渡されると、まずはパターンスケーリングによって国別・県別の気候シナリオが作成される。パターンスケーリングとは、気候要素の空間分布をGCM実験の結果によって代表させる手法である。複数の排出シナリオの下での温暖化は簡易的な気温上昇推計モデルを用いて計算されるが、気候要素の空間分布までは計算されない。そのため、気候要素の空間分布を全球平均の気温変化量に応じてあらかじめ決めておけば、簡単に求めることができる。AIM/Impact[Policy]のパターンスケーリングでは、GCM実験結果により得られた気温変化・降水量変化パターンとして、正規化気候変化データベースが用いられる。その後、国別・県別の気候シナリオをそれぞれの国・地域について用意された分野別影響関数に入力することで、国・地域別の分野別影響が計算される。

表1　AIM/Impact[Policy]に実装している影響関数と影響関数に用いる気候シナリオ

	影響分野	項目	単位	気候シナリオ	社会経済シナリオ
日本	農業	コメの収量	t/ha	暖候期（5、6、9、10月）平均気温変化、夏季（7、8月）平均降水量変化、夏季を除く暖候期（5-10月）積算日射量変化、CO_2濃度	—
		コメの出穂日	Day of Year		
	健康	熱ストレス死亡リスク（現在からの増加率）	%	年平均気温変化	—
	森林	ブナ分布適域（ブナ存在確率0.5以上の面積 ／ 全県面積）	面積率	年平均気温変化、冬期（12-3月）平均降水量変化、夏期（5-9月）平均降水量変化	—
		マツ枯れ危険域（危険域の割合の変化）	面積率	年平均気温変化	—
	沿岸域	高潮浸水人口	人	海水面上昇	
		高潮浸水面積	km^2	海水面上昇	
	水資源・災害	洪水氾濫（経済損失）	10億円	再現期間50年の降雨極値	—
		洪水氾濫（浸水面積）	km^2		
		洪水氾濫（平均浸水深）	m		
		土砂災害（発生確率）	%		
		土砂災害（経済損失）	10億円		
世界	農業	コメ（水稲）の収量	kg/ha	年平均気温変化、年平均降水量変化	—
		コムギの収量			
		トウモロコシの収量			
	健康	熱ストレス死亡リスク（現在からの増加率）	%	年平均気温変化	—
	水資源：インドは州別に、中国は省別に解析可能	Falkenmark指標：高ｽﾄﾚｽ人口（1,000m^3/yr/p未満），中ｽﾄﾚｽ人口(1,000-1700m^3/yr/p)	人	年平均気温変化、年平均降水量変化	人口
		取水水資源比：ｽﾄﾚｽ無し人口（-10%），低ｽﾄﾚｽ人口（10-20%），中ｽﾄﾚｽ人口（20-40%），高ｽﾄﾚｽ人口（40%-）	人	年平均気温変化、年平均降水量変化	人口、GDP

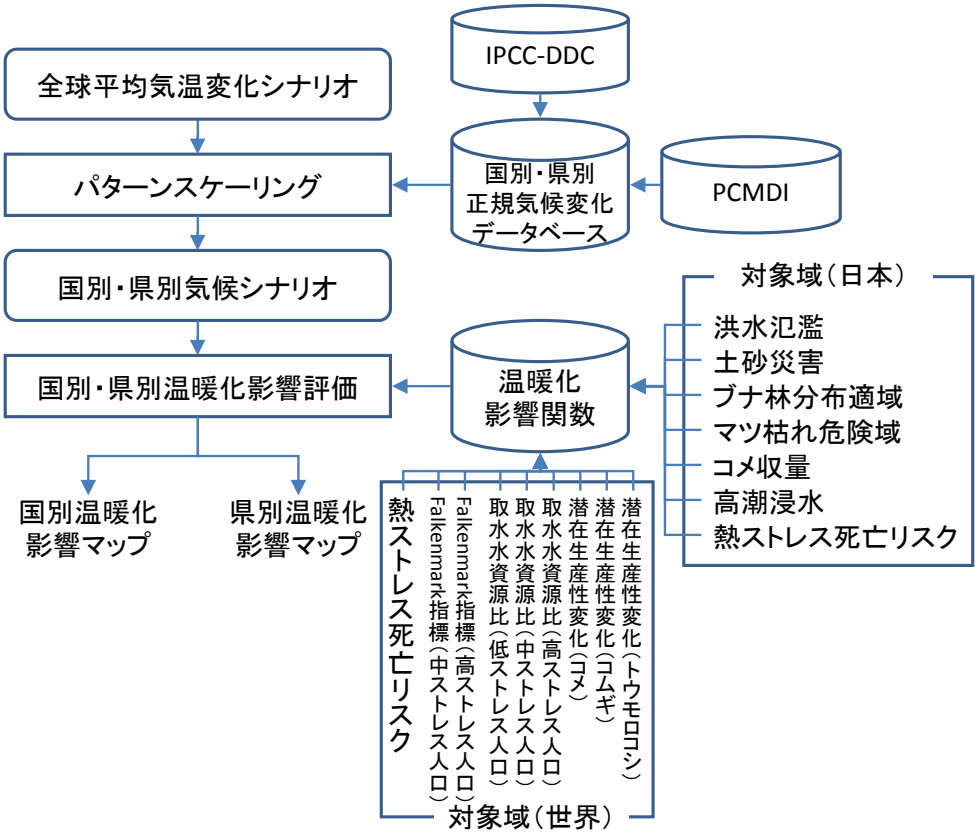


図２　世界多地域多部門影響評価・適応モデル（データベース型モデル）概念図

（２）統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”を用いた気候安定化シナリオ下における影響評価

１）　安定化シナリオの概要

統合評価モデル“AIM/Impact[Policy]”を用いて、次の条件に基づき、BaU（Business as Ususal：なりゆき）シナリオと2つのGHG濃度安定化シナリオを設定した。BaUの排出シナリオはSRES B2の想定に基づいたものである。①平衡気候感度は3℃、②炭素フィードバック効果は考慮しない、③全球平均気温変化から地域別の気候シナリオ作成（パターンスケーリング）に使用したGCMはMIROC3.2-hires、④GHG濃度にはGHGおよびエアロゾルの冷却効果も含む。

本研究では、温暖化による影響は1981-2000年（基準年）からの増加分と設定している。以下に、シナリオの概要を示す。

①450sシナリオ：GHG濃度450ppm（二酸化炭素等価濃度、本分析による2100年時は約2.1℃上昇）安定化シナリオ。GHG濃度のオーバーシュート有り。平衡気温上昇が約2.1℃（産業革命前比）。

②550sシナリオ：GHG濃度550ppm（二酸化炭素等価濃度）安定化シナリオ。GHG濃度のオーバーシュート有り。平衡気温上昇が約2.9℃（産業革命前比、本分析による2100年時は約2.7℃上昇）

③BaUシナリオ：なりゆきシナリオ。気温上昇が2100年で約3.8℃（産業革命前比）。なお、1990年比の気温上昇量は産業革命前比－0.5℃で換算できる。

２）　対象地域・年代

対象地域は、日本全体を以下のように区分した4地域とする。

北海道・東北：北海道、青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島

関東・甲信越・北陸：茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、東京、神奈川、新潟、富山、石川、福井、山梨、長野

東海・中部・近畿：岐阜、静岡、愛知、三重、滋賀、京都、大阪、兵庫、奈良、和歌山

中国・四国・九州：鳥取、島根、岡山、広島、山口、徳島、香川、愛媛、高知、福岡、佐賀、長崎、熊本、大分、宮崎、鹿児島、沖縄

ただし、洪水氾濫面積・被害額、コメ収量、ブナ林の適域・被害コスト、マツ枯れ危険域、高潮浸水人口・面積・被害額では沖縄県が検討範囲に含まれていない。

また、対象年代は以下のように設定した。

2020s：2011-2030年、2030s：2021-2040年、2040s：2031-2050年、2050s：2041-2060年、
2060s：2051-2070年、2070s：2061-2080年、2080s：2071-2090年、2090s：2081-2100年

３）　結果・考察

世界全体の目標となる気候安定化条件下において、日本を対象としBaUおよび2つの安定化シナリオを用いて、①洪水による氾濫面積及び被害コスト、②土砂災害による斜面崩壊発生確率及び被害コスト、③ブナ林の適域への影響及び被害コスト、④マツ枯れ危険域の拡大、⑤コメ収量への影響、⑥砂浜喪失面積の拡大及び被害コスト、⑦高潮浸水面積の拡大、被災人口及び被害コスト、⑧熱ストレス死亡リスク及び被害コスト、の8つの指標について温暖化影響を定量的に評価した結果、いずれの指標においても、低いGHG濃度で安定化させるほど悪影響が低減されるが、最も低いレベル（温室効果ガス濃度を450ppm）で安定化させるシナリオにおいても、なんら対策を講じない場合には悪影響を被る可能性があることが示された（表２）。この結果より、今後20年は

追加的な緩和策の有無にかかわらず温暖化が進行すると予想されているが、世界全体の気候安定化レベルの違いによる影響の差異は、今世紀中程を過ぎると大きくなると見込まれる。したがって、気候を安定化させるための積極的な緩和策と共に、ある程度の悪影響が生じることに備えて、長期的な視点で適応策を検討・実施することが早急に必要である。

表２　安定化レベル別の気候シナリオおよび影響（全国値）

気候シナリオ/影響分野		単位	2030s			2050s			2090s		
			450s	550s	BaU	450s	550s	BaU	450s	550s	BaU
	年平均気温変化（1990=0℃）	℃	0.9	0.9	1.0	1.3	1.6	1.7	1.6	2.3	3.2
	年平均降水量変化（1990=100%）	%	100	101	101	105	106	107	107	110	113
	海面上昇量（1990=0m）	m	0.06	0.07	0.07	0.10	0.11	0.12	0.15	0.19	0.24
洪水氾濫	洪水氾濫面積	1000km^2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.7	0.7	0.5	0.6	0.8
	浸水被害コストポテンシャル	兆円/年	1.3	1.3	1.3	4.4	4.7	4.9	5.1	6.1	8.3
土砂災害	斜面崩壊発生確率	%	3	3	3	3	4	4	4	5	6
	斜面崩壊被害コストポテンシャル	兆円/年	0.60	0.60	0.60	0.49	0.52	0.58	0.65	0.77	0.94
ブナ林	ブナ林の適域	%	79	77	77	72	65	61	64	50	32
	ブナ林の適域喪失被害コスト	億円/年	778	829	851	1034	1273	1381	1325	1811	2324
マツ枯れ	マツ枯れ危険域	%	15	16	16	22	26	28	27	37	51
コメ	コメ収量	t/ha	4.9	5.0	5.0	4.9	5.0	5.1	4.8	4.9	5.1
砂浜	砂浜喪失面積	%	13	13	13	19	21	23	29	37	47
	砂浜喪失被害コスト	億円/年	116	118	121	176	192	208	273	338	430
高潮	高潮浸水人口（西日本）	万人/年	12	12	12	19	20	21	32	37	44
	高潮浸水人口（三大湾）	万人/回	11	11	11	17	17	17	30	32	35
	高潮浸水面積（西日本）	km^2/年	60	60	61	92	97	102	155	176	207
	高潮浸水面積（三大湾）	km^2/回	24	24	24	37	38	39	63	67	72
	高潮浸水被害コスト（西日本）	兆円/年	2.0	2.0	2.0	3.1	3.3	3.5	5.4	6.2	7.4
	高潮浸水被害コスト（三大湾）	兆円/回	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	1.8	2.0	2.3
熱ストレス	熱ストレス死亡リスク	−	1.5	1.6	1.6	1.8	2.1	2.2	2.1	2.8	3.7
	熱ストレス（熱中症）死亡被害コスト	億円/年	243	265	274	373	480	529	501	775	1192

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究では、気候安定化目標を達成するために必要な排出削減量ならびにその安定化目標下で生ずる影響・リスクを統合的に解析・評価するための統合評価モデルを開発し、分野別影響評価結果から得られる知見（影響関数）を統合して、複数分野における影響を統合的に評価した。その成果は、我が国にも比較的低い気温上昇で厳しい影響が現れること、世界的に温室効果ガス排出量が大幅に削減された場合、我が国に対する被害も相当程度減少すると見込まれるが、温室効果ガス濃度を450ppmに安定化した場合でも一定の被害が生じることは避けられないことを世界で初めて明らかにしたことは、他に類を見ない貴重な成果である。

（２）地球環境政策への貢献

・地球環境局長諮問委員会として設置された「地球温暖化影響・適応研究委員会」の分野別ワーキンググループ（国民生活・都市生活）に研究参画者（肱岡）がメンバーとして参加し、本研究プロジェクトの研究成果を活用した。

・本研究で開発された影響関数とそれを組み込んだ統合評価モデルを用いて、安定化レベル別の影響の度合いを検討した研究成果は、地球温暖化問題に関する懇談会の中期目標検討委員会における検討課題の一つである「対策を講じない場合のコスト」に対して、気候安定化レベルに応じた我が国への影響および被害コストに関する総合的な科学的知見を提供し、温室効果ガスのより積極的な削減と適応策が必要であることを示した。

・研究成果は、多くの政策関連資料に引用されており、平成22年版環境・循環・生物多様性白書にも引用される予定である。

・文部科学省・気象庁・環境省が報告した「温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート：日本の気候変動とその影響」に専門家として貢献し、研究成果が多数引用された。

・環境大臣・副大臣・政務官へ本プロジェクトの研究成果を紹介した。

６．引用文献

1) Folland C.K., T.R. Karl, J.R. Christy, R.A. Clarke, G.V. Gruza, J. Jouzel, M.E. Mann, J. Oerlemans, M.J. Salinger and S-W. Wang (2001) Observed Climate Variability and Change, In: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Jonson, ed., “Climate Change 2001. The Scientific Basis”, pp. 99～181, Cambridge University Press, Cambridge

2) Hare, W. (2003) Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change - Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin, Germany.

3) Hitz, S. and J. Smith (2004) Estimating global impacts from climate change, *Global Environmental Change-Human And Policy Dimensions,* 14(3), 201-218.

4) United Nations (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, New York

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) H. Harasawa: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, 392pp. 243-249 (2006)
“Key Vulnerabilities and Critical Levels of Impacts in East & South East Asia”

2) Hijioka, Y., T. Masui, K. Takahashi, Y. Matsuoka, H. Harasawa : Environmental Economics and Policy Studies, Vol.7, No.3, pp.331-345, (2006) “Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming”

3) 原沢英夫：地球環境、11(1)、121-127 (2006)
「地球温暖化の危険なレベル」

4) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集、18、19-24(2006)
「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」

5) 久保田泉、高橋潔、肱岡靖明：環境情報科学論文集、18、457-462 (2006)
「政策決定支援のための適応研究に関する検討」

6) Harasawa, H.: Global Environmental Research, Vol.10, No.2, pp.253-259(2006)
“A Consideration on Dangerous Level of Global Warming”

7) Hijioka, Y., T. Masui, K. Takahashi, Y. Matsuoka, H. Harasawa： Environmental Economics and Policy Studies, Vol.7, No.3, pp.331-345(2006)
“Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming”
8) 増冨祐司、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明、松岡譲：水工学論文集、第51巻、235－241(2007)
「季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価」
9) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：環境システム研究論文集、第35巻、pp.367-374 (2007)
「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
10) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集21, pp.423-428 (2007)
「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発 －温暖化影響データベース－」
11) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：環境システム研究論文集、第35巻、pp.367-374 (2007)
「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
12) Yasuaki Hijioka, Yuzuru Matsuoka, Hiromi Nishimoto, Toshihiko Masui, Mikiko Kainuma: Journal of Global Environment Engineering, Vol.13, pp.97-108 (2008)
“Global GHG Emission Scenarios under GHG Concentration Stabilization Targets”
13) Kainuma, M., Matsuoka, Y., Masui, T., Takahashi, K. and Hijioka, Y.: In Schlesinger, M., Kheshgi, H., Smith, J., De La Chesnaye, F. and Reilly, J.M. (Eds.), Human-Induce Climate Change, Ed.1, Cambridge University Press, pp.314-327 (2007)
“Climate policy assessment using the Asia-Pacific Integrated Model”
14) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集21, pp.423-428 (2007)
「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発 －温暖化影響データベース－」
15) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1007-1025 (2008)
“An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing”
16) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1027-1037 (2008)
“An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments”
17) 高橋潔、松井哲哉、肱岡靖明、田中信行、原沢英夫：Global Environ.Eng.Res., 16, 111-119 (2008)
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
18) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明：地球環境研究論文集、16、1-8(2008)
「全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較」
19) 花崎直太、増冨祐司、肱岡靖明、高橋潔：水工学論文集、53、271-276 (2009)
「温暖化政策支援モデルにおける全球水ストレス人口推定モデルの開発と適用」
20) 肱岡靖明, 高橋潔, 花崎直太, 増冨祐司, 原沢英夫：地球環境、14(2)、127-135 (2009)

「統合評価モデルを用いた日本を対象とした温暖化影響の総合評価」

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) 原沢英夫：水資源学シンポジウム報告、月刊Potal、No.44、34（2005）
「地球温暖化の社会への影響」

2) 原沢英夫: 京都大学衛生工学シンポジウム, 19(3), 7-10（2005）
「地球環境問題の今後の展望～温暖化影響研究の視点から～」

3) 原沢英夫：国際問題、地理、50(8)、45-57（2005）
「地球温暖化の現象解明」

4) 原沢英夫：環境科学会誌、18(4)、391-402（2005）
「地球温暖化に係わるモデリング」

5) 原沢英夫：季刊環境研究、183、24-31（2005）
「地球温暖化の日本への影響」

6) 原沢英夫：アクチュアリージャーナル、Vol.16、No.57、53-67（2005）
パネルディスカッション報告「巨大自然災害が社会・経済に及ぼす影響と損害保険会社の影響」

7) 原沢英夫：気象事典、朝倉書店、757-767（2005）
「41.5 影響評価・対策」

8) 原沢英夫：小池勲夫編：地球温暖化はどこまで解明されたか　日本の科学者の貢献と今後の展望、地球温暖化研究イニシャティブ気候変動研究分野第二次報告書、143-149、丸善（2006）
「5.2 雪氷や自然生態系の影響」

9) 原沢英夫：小池勲夫編：地球温暖化はどこまで解明されたか―日本の科学者の貢献と今後の展望2006、地球温暖化研究イニシャティブ気候変動研究分野第二次報告書、143-149、丸善(2006)「5.6 市民生活への影響」

10) 高橋潔・久保田泉：季刊環境研究、183、102-110（2005）
「将来枠組みにおける適応策の位置づけ」

11) 久保田泉：小池勲夫編：地球温暖化はどこまで解明されたか―日本の科学者の貢献と今後の展望2006、地球温暖化研究イニシャティブ気候変動研究分野第二次報告書、202-209、丸善(2006)「6.4気候変動への適応策」

12) 肱岡靖明：季刊環境研究、183、67-76(2005).
「地球温暖化抑制のための温室効果ガス安定化レベルの検討」

13) 高橋潔、久保田泉：環境情報科学、35(3)、39-44(2006)
「温暖化の適応に関する研究およびその実施の促進をめざしてー温暖化影響のリスク評価・リスク管理の視点から」

14) 原沢英夫：月刊河川、726、48-51（2007）
「気候変動と生態系の変化」

15) 原沢英夫：村井俊治編著：人とわざわい上巻、281-330（2006）

「3.1 地球温暖化による災害」
16) 肱岡靖明： ESTRELA, No.164, pp.11-19 (2007)「気候安定化レベルと温室効果ガス削減目標」
17) 肱岡靖明：季刊　ひょうご経済, No.98, pp.16-23(2008)「気候安定化を目指して」
18) 西岡秀三編著：日刊工業新聞社, 195p, (2008.6) (分担執筆)
「日本低炭素社会のシナリオ－二酸化炭素70%削減の道筋」
19) 肱岡靖明：月刊下水道, Vol.31, No.8, pp.6-10 (2008.7)「地球温暖化は何が問題なのか」
20) 肱岡靖明：産業と環境, 第37巻, 7号, pp.22-26 (2008.7)「地球温暖化がもたらす日本への影響－最新の科学的知見から－」
21) 肱岡靖明：imidas e Library, 時事・トレンド解体新書 (2008.9.5)
「温暖化はどのような影響を与えのるか(1)」◆しのびよる将来への深刻な影響◆
22) 肱岡靖明：imidas e Library, 時事・トレンド解体新書, (2008.9.12)
「温暖化はどのような影響を与えのるか(2)」◆日本が受ける影響と急がれる対策◆
23) 肱岡靖明：公衆衛生, Vol.72, No.12, pp.(25)943-(27)947 (2008.12)
「温暖化のわが国への影響」
24) 肱岡靖明：グローバルネット, 第217号, pp.30-31(2008.12)
「地球温暖化が日本にもたらす影響～温暖化影響総合予測プロジェクト～」
25) 国立環境研究所地球環境研究センター：成山堂書店, 202p (2009.2) (分担執筆)
「ココが知りたい地球温暖化」
26) 肱岡靖明：NIRA政策レビュー、43 (2009) 「温室効果ガス削減目標と温暖化影響」
27) 高橋潔、肱岡靖明：全国環境研会誌、34(2)、9-15 (2009) 「地球温暖化影響研究の現状」

（２）口頭発表（学会）

1) 肱岡靖明、高橋潔、原沢英夫、久保田泉、増井利彦、亀山康子、花崎直太：第34回環境システム研究論文発表会講演集、13-18 (2006.10)
「長期目標設定に資する温暖化影響データベースの開発」
2) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：第20回環境研究発表会(2006.11)
「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」
3) 久保田泉、高橋潔、肱岡靖明：第20回環境研究発表会(2006.11)
「政策決定支援のための適応研究に関する検討」
4) 増冨祐司、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明、松岡譲：第51回水工学講演会(2007.3)
「季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価」
5) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：第35回研究論文発表会、東京、(2007.10)
「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
6) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：第21回環境研究発表会、東京(2007.11)
「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発－温暖化影響データベース」
7) Yasuaki Hijioka：The 13th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan (2008.2)
“Development of AIM/Impact[Policy]”

8) Hanasaki, N. Kanae, S., Oki, T. Masuda, K., Motoya, K., Shen, Y., Tanaka, K. and Shirakawa, N.：EGU General Assembly 2008, Wien, Austria (Apr/2008)
“An integrated model for the assessment of global water resources”
9) Y. Hijioka：IPCC-IR3S Science Symposium Expert Meeting, Sanjo Conference Hall, the University of Tokyo (18th April 2008)“Integrated assessment of climate change impacts for discussing GHG stabilization targets”
10) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明：土木学会第16回地球環境シンポジウム、岡山(2008.8)
「全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較」
11) 高橋潔、松井哲哉、肱岡靖明、田中信行、原沢英夫：土木学会第16回地球環境シンポジウム，岡山 (2008.8)
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
12) 川越清樹、風間聡、肱岡靖明、高橋潔：土木学会第53回水工学講演会，東京(2009.3)
「斜面崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用」
13) Hanasaki, N.：Climate Change and Water:Impact and Response, Seoul, Korea (Mar/2009)
“Development and application of an integrated global waterresources model - A modeling activity in NIES”
14) 花崎直太、増冨祐司、肱岡靖明、高橋潔：土木学会第53回水工学講演会、東京(2009.3)
「温暖化政策支援モデルにおける全球水ストレス人口推定モデルの開発と適用」
15) Hanasaki, N., Kanae, S. and Oki, T.：AGU Fall meeting 2009, San Francisco, USA (Dec/2009)
“Two Novel Applications of an Integrated Model for the Assessment of Global Water Resources”
16) Hanasaki, N., Kanae, S. and Oki, T：Eos Trans. AGU, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract H13D-1017 (Dec/2009)
“Two Novel Applications of an Integrated Model for the Assessment of Global Water Resources”

（３）出願特許
なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）
・環境省主催の地球環境研究総合推進費公開シンポジウム（2006年11月30日有楽町朝日ホール）に本課題と関係の深いテーマ「地球温暖化から未来をのぞく」が取り上げられ、以下の講演とパネルディスカッションを行った。
1) 肱岡靖明：環境省地球環境研究総合推進費公開シンポジウム（2006）「地球温暖化＋２℃」
・環境省主催の地球環境研究総合推進費公開シンポジウム（2008年10月30日ニッショーホール）に本課題と関係の深いテーマ「地球温暖化の日本での影響～現状と未来予測、その対策と賢い適応に向けて～」が取り上げられ、以下の講演とパネルディスカッションを行った。
2) 肱岡靖明：環境省地球環境研究総合推進費公開シンポジウム（2008） “本シンポジウムの目的と内容の紹介”

・推進費S-4主催による一般公開シンポジウム「地球温暖化『世界と日本への影響』－長期的な気候安定化レベルと影響リスクの見通し－」（2009年11月17日浜離宮朝日ホール）を開催した。さらに、前日11月16日には研究者ワークショップを東京大学山上会館にて開催した。

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－（環境省地球温暖化影響・適応研究委員会、2008.6）への執筆
2) 地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム）の公表（2008.5.29）をうけて、研究成果各種新聞・インターネット等で掲載された。
3) 地球温暖化「日本への影響」－長期的な気候安定化レベルと影響リスクの見通し－（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム）の公表（2009.5.29）をうけて、研究成果各種新聞・インターネット等で掲載された。

（６）その他

土木学会地球環境委員会　平成21年度地球環境論文賞，表彰論文：「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」（2009年9月）

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

１.統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究

旧（１）温暖化抑制目標に関する既存知見の整理と、評価基準・評価手法の検討

独立行政法人国立環境研究所
社会環境システム研究領域　原沢英夫
社会環境システム研究領域　地球環境研究センター　亀山康子
社会環境システム研究領域　環境経済研究室　久保田泉

平成17～19年度合計予算額　30,650千円
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］気候変動枠組条約では、その究極的目的として「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させること」を挙げ、また「そのような水準は、生態系が気候変動に自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ、経済開発が持続可能な態様で進行できるような期間内に達成されるべきである」と示している。この目的を達成するためには、温暖化の科学的知見の集積と総合化を通じて目的達成に向けた方策の検討を行う必要がある。本研究では、①温暖化抑制目標の根拠をより正確なものとするために温暖化影響の科学的知見を取り纏め、②抑制目標達成のための将来枠組み検討に不可欠な適応策研究の役割について整理し、③温暖化抑制のための長期目標合意における温暖化影響研究の役割を検討するために、目標合意に関連する重要な要素について整理し、④長期目標への合意に資する影響研究知見の総合化を目的とした温暖化影響データベースの開発に成功した。

［キーワード］温暖化、気候変動枠組み条約、温暖化影響、適応策、温暖化影響データベース

１．はじめに

1992年に採択された気候変動枠組条約[1)]は、その究極的目的として「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させること」を挙げ、また「そのような水準は、生態系が気候変動に自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ、経済開発が持続可能な態様で進行できるような期間内に達成されるべきである」と示した。

この目的を達成するためには、(1)温暖化現象を解明し、(2)現在顕在化しつつあり、また将来深刻化する影響を予測し、(3)温暖化の防止対策を立案・実施する、といった3つの側面を同時に考慮することが肝要であり、科学的知見の集積と総合化を通じて目的達成に向けた方策の検討が行われている。うち、温暖化の影響評価に関する研究が温暖化問題解決に向けて担う役割としては、次のようなものが挙げられる。

(1) 温暖化問題の重要さの程度を提示し、防止策をとる必要性に根拠を与える。

(2) 温暖化防止策を検討する上で、危険性の限界（閾値）や経済コストを含めた基礎データを提供する。
(3) 影響に対して最も脆弱な分野や地域を特定して、予防的に適応策を検討する。

問題解決のため、温暖化影響評価研究が担う役割は広がりつつある。従来からの温暖化影響評価研究の役割は、今後何の抑制策もとられず温暖化が進むと仮定した場合に、温暖化により悪影響を被る地域を検出し、問題の深刻さについて警鐘をならし、排出抑制対策の推進に根拠を与えることであった（役割(1)）。国ごとに温度差はあるものの、多くの国が温暖化抑制に真剣に取り組みつつある情勢から判断するに、役割(1)は達成されつつあるといえる。今後、評価手法やデータの改良を通じて影響評価の不確実性を狭めていくことにより、対策をとる必要性の根拠をより正確なものとしていくことが期待されている。

排出削減を行うには多大な努力が必要であり、経済に与える影響も大きい。排出削減にかかる費用と、排出削減により温暖化影響を軽減することによる便益を把握し、適切な排出削減を進めていく必要がある。そのためには、温暖化影響の物理的な影響のみならず、例えば経済コストといった生活・経済システムに及ぼす影響についても評価を行う必要がある。また、気候変動枠組条約の目的にある「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準」を把握するためには、どの程度の気候変化で各影響分野に許容しがたいレベルの影響があらわれるのかに関する知見が必要となる。具体的な排出削減に関する検討が進むにつれ、適切な排出削減計画のために必要なこれらの影響知見への要請が高まりつつある。

また、温暖化影響に対する適応策の評価も、影響評価研究の役割の一つである。適応策（adaptation）は、温室効果ガス濃度を安定化させ温暖化の進行を食い止めるための削減策（mitigation）とならぶ重要な温暖化対策であり、温暖化しつつある気候へ自然・社会システムを調節して対応することにより温暖化の悪影響を軽減するものである。温暖化が既に進行していること、削減策のみで温暖化問題を解決するには甚大な費用がかかると見込まれることから、温暖化に対して脆弱な地域に対して有効な適応策についての評価が行われる必要がある。

２．研究目的

本研究では、衡平性、予防原則、不確実性の観点から、温暖化抑制目標とその達成を補助する適応政策の評価基準・手法を検討することを目的とする。検討された評価基準・手法は、統合評価フレームワークの中で、統合評価モデルから得られる定量的影響推計に基づき、採用すべき温暖化抑制目標（安定化濃度）を判定するために用いる。

３．研究方法

本研究では、温暖化抑制目標とその達成可能性を評価するための統合評価フレームワークの開発を検討するために、まず必要な知見と考え方を整理する。必要な知見と考え方の整理として、①温暖化抑制目標の根拠をより正確なものとするために温暖化影響の科学的知見を取り纏め、②抑制目標達成のための将来枠組み検討に不可欠な適応策研究の役割について整理し、③温暖化抑制のための長期目標合意における温暖化影響研究の役割を検討するために、目標合意に関連する重要な要素について整理する。次に、①～③の研究結果を基に、長期目標への合意に資する影響研究知見の総合化を目的とした温暖化影響データベースを開発する。

４．結果・考察

（１）抑制目標達成のための温暖化影響予測の整理

分野別の温暖化影響予測に関しては、IPCC第3次評価報告書とそれ以降の影響評価に関する新たな知見を、①農業や食料安全保障、②水資源、③人間の健康、④海面上昇、⑤大規模事象、の5分野に関して整理した。その結果を、（４）で記す温暖化影響データベースに格納した。

（２）長期目標の合意に関する要素の整理

適応策研究の役割を明らかにするために、①適応・適応能力の概念整理、②適応策を取り扱った研究の分類を行った。

長期目標の合意に関する影響研究の役割を検討した結果、長期目標の合意形成を左右する５つの要素、(a)長期目標と実現可能性、(b)避けるべき危険な気候変化、(c)温暖化影響の集計、(d)適応能力、(e)不確実性、が明らかとなった。

地域別・分野別影響を網羅的にかつ精度良く見積もるための手法の開発・改良と、それらを用いた温暖化影響の評価が、影響研究の主たる役割である。加えて、長期目標関連要素についての影響研究の役割について検討した。(a)については、排出削減努力、影響の大きさ、適応にかかる費用と効果などを総合的に考慮する必要があり、そのための道具として統合評価モデルに対する期待は大きい。影響研究は統合評価モデルの中の影響量を推計する部分を担当し、そこに最新の知見を提供することになる。緻密な手法をもって影響を正確に見積もることは重要であるが、統合評価モデルにおいては評価手法ではなく、その結果と不確実性の大きさが端的に表現される必要がある。(b)と(c)については、価値判断材料として適切に機能するように、影響研究の知見を伝えるための工夫を行うことで、合意形成の可能性が高まる。(d)に関しては、適応能力の時間変化に関する社会科学的な研究と、生態学・農学・医学といった自然科学を基礎とする影響研究を融和させることで、より現実的に適応の効果を考慮することが可能となる。(e)については、確率密度関数での影響推計といった方法で、科学的知見の含意を政策決定者に対して伝える努力が必要である。

（３）　長期目標の合意形成のために有望な新しい研究手法

１）シナリオ分析

従来、多くの影響研究では、数パターンのGHG排出シナリオについて、それぞれを前提とした場合に予想される気候変化を気候シナリオとして用意し、それを影響評価モデルの入力条件として用いて、多様な将来像の帰結としてどのような影響が生ずるかを示してきた。しかしながら、４．（１）４）で述べたように、適応をどの程度見込めるかにより同じ気候変化量であっても影響被害量は全く異なるものとなる。適応能力の将来変化の可能性についても気候変化と同様にシナリオとして取り扱い影響評価を行うことができるが、両因子とも社会・経済・技術の将来発展との因果関係が強い。そのため、関連因子間の整合性を維持したシナリオを前提とした影響研究の結果は、より有用なものである。ただし、長期目標の検討材料として考えた場合には、評価結果だけではなく、その前提となったシナリオがどのようなものであるか、また多要素のシナリオ間の整合性をいかなる方法でとったか、といった点についての正確な情報が付随して政策決定者に対して提供される必要がある。

２）影響の検出と原因推定

（１） ５）で述べたように、長期目標の判断材料となる科学的知見の不確実性の大きさは、長期目標への合意の一つの鍵である。過去の観測に基づく既に発現しつつある影響を検出し、それが人為的なGHG排出に起因する気候変化によるものであるということを統計的に示す研究への注目が高まっている。検出された影響は、将来予測に比べて甚大な被害を示さなくとも、不確実性が非常に少ないことで、長期目標への合意を後押しする材料として期待できる。特に近年増加傾向が示唆される異常気象災害について、温暖化傾向との関わりを示すことの重要性は大きい。

３）影響知見の統合化

（１） ３）で触れたように、個別の分野・地域について把握された温暖化影響を根拠として長期目標への合意を目指すためには、なんらかの集計・総合化が必要である。例えば、IPCCの第3次評価報告書では、分野別の影響を、①特異で危機にさらされているシステム、②極端な気候現象、③悪影響の分布、④地球規模で集計した影響、⑤大規模で影響の大きい事象の5つの視点から整理し、全球平均気温の上昇に応じて各々の影響量を示した。また、Parryら[2)]は、横軸に全球平均気温を、縦軸に分野別（飢餓、沿岸洪水、マラリア、水資源）のリスク人口変化をとり、1つのグラフに4分野の影響を合わせて示した。長期目標の議論の活発化に伴い、全球平均気温もしくは地域気温の上昇と懸念される影響の対応を表の形式で示した報告が増えてきている[3, 4)]。気温変化と影響との対応を把握出来るようにするために、網羅的に気温変化と懸念される影響の報告例を収集してデータベース化して容易に図示することは効果的である。

４）不確実性の確率密度分布での表現

温暖化影響評価の不確実性には、①科学的知見の不足に起因するもの、②自然界の変動性・不確定性に起因するもの、③将来の社会選択に起因するもの、がある。深刻な影響を予見する知見であっても、その生起確率が非常に低い場合や、科学的裏づけが少ないことにより知見の信頼性が低い場合には、長期目標決定の際の考慮の優先順位は低く取り扱われる可能性がある。近年、気候変化ならびにその影響の予測結果に関する不確実性を、確率分布を用いて表すことが重要であるとの認識が高まりつつある。例えば、農作物の単位面積あたり収量の将来変化の場合、将来の気温や降水といった気候因子、土壌中栄養分、灌漑普及やその水利用効率改善、大気中CO2濃度増加による施肥効果、機械化・肥料投入といった投入量、品種改良による生産性向上、といった関連する様々な因子やモデルパラメータについてそれぞれ不確実性を確率分布で表現し、各々の確率分布を積み重ね、最終的に単位面積あたり収量の将来変化について一つの確率分布として示すことになる。確率分布を用いた影響予測結果の表現は、長期目標検討に対して有益な情報を提供し、また検討プロセスの透明性を高めると期待されているが、その実践は必ずしも容易ではなく、今後さらなる研究が必要である。

（４）影響データベースの開発

１）開発の目的・データ収集方法

影響研究の知見を統合化させることは、長期目標の合意形成判断に効果的である。IPCC第3次評価報告書後、多数の影響研究の知見が報告されてきている。そこで本研究では、長期目標の判断

に貢献することを目的として、複数の分野における既存の影響知見を格納した温暖化影響データベース（以後、影響DB）の開発に取り組んでいる。影響DBには、①異なる影響分野を全球平均気温上昇（以後、GMTI）などの共通軸で整理することで、統合的評価を可能とし、②膨大な影響知見を政策決定者が容易に確認でき、③シナリオや時間変化、GMTIによる影響の将来予測の幅を明示することができる、などの特徴がある。

２）格納データ

影響DBは既存の影響研究の知見を格納している。国内外の影響研究に関する文献を検索し、GMTIと共に様々な分野別影響（沿岸域、生態系、健康、食料、水資源）の格納に取り組んでいる。影響の知見は、文献中に記載されている図表から収集している。このとき、GMTIの値が記載されていない場合も多いが、その場合には、文中に記載されている使用した全球気候モデル（以後、GCM）の情報をもとに、GMTIの値を挿入して格納する。

国や地点の気温上昇値は、GMTIに変換する必要がある。影響DBはGCMの結果を用いて変換する機能を持つ。この機能では、国や地点の気温上昇とGMTIの関係はGCMの結果によって異なる事を考慮して、複数のGCM・シナリオ別の国別・地点別気温上昇とGMTIの関係を格納している。このとき、GCMの結果を空間平均することにより、国別・地域別気温上昇を作成している。これによって、一つの影響量を複数のGMTIにより表示することが可能となり、国・地域の平均気温上昇量とGMTIの関係の不確実性を表示することも可能となる。

３）影響データベース開発の政策的意義

ここで、影響DBの有する政策的意義についても言及しておく。一般に、政策の評価基準として、①政策によって得られる便益、②費用効果性、③衡平性、④制度の効率性、の4項目が挙げられる。長期目標を達成するための政策を設計するにあたり、影響DBがどのように貢献し得るかを考えてみると、たとえば、①については、抑制策に関する情報と、いかなる影響が予測され、抑制策によっていかなる影響が回避できたかに関する情報とが必要となる。また、③については、これまでは各国の排出削減負担配分を衡平にすることに焦点が当てられてきたが、影響を加味した制度設計も検討の余地があると考えられる。つまり、「影響をより多く受ける国は排出削減負担が減免される」、あるいは、「影響に対する適応措置への支援を多く実施した先進国は、その分だけ排出削減義務を免れる」といったことになる。その際にも、影響DBの提供する統合化された影響に関する情報は有益である。

さらに、近年、気候変動に関する国際交渉では、適応策が中心課題のひとつとなってきている。その前提となる気候変動の影響の統合的把握に対する政策決定者のニーズが高まっている。COP11（2005年11月-12月、モントリオール）では、各国が影響・脆弱性・適応への理解を深め、評価を改善し、科学的および社会経済学的知見に基づいた適応活動に関する意思決定を可能にすることを目指し、「気候変動の影響、並びに、気候変動に対する脆弱性及び適応に関する5か年作業計画」が採択された（COP11決定2）。影響DBはそのニーズに応えるものとなることが期待される。

４）機能

影響DBはマイクロソフト社製のソフトウエアACCESSを用いて開発されている。格納されている

それぞれのレコードには、地域区分、影響分野、単位、シナリオ、対象年、GMTI、引用文献、などの属性データが記録されている。図１に影響DBのフロントページを、図２において、異なる横軸単位による影響結果例を示す。

フロントページは、いくつかの条件からデータを絞り込み検索し、その結果を図示するものである。フロントページおける操作可能項目は図１に示すように10ありそれぞれの内容を以下に記す。

①Global/Region/Countryの選択：対象とする地域を選択する。ここでは、Global、Region、Countryの3つのカテゴリーが準備されている。

②Region/Countryの選択：①でRegionもしくはCountryを選択した場合、選択したRegionもしくはCountry に具体的な地域・国情報があればリストボックスに表示され、任意に選択可能である（複数選択可）。ただし、①においてGlobalを選んだ場合、Region/Country情報は格納されていないため″-″が表示される。

③Spotの選択：②で選択したCountryに国内の地点情報があればリストボックスに表示され、任意に選択可能である（複数選択可）。ただし、地点情報がない国を選択した場合″-″が表示される。

④Scenarioの選択：シナリオは2000年にIPCCにより「排出シナリオに関する特別報告書」として発表された定量的シナリオ（SRESシナリオ）から、A1、A1FI、A2、B1、B2、など複数を選ぶことが可能である。

⑤Fieldの選択：分野別影響は、Coastal Hazard、Ecosystem Loss、Health、Hunger、Water Shortageから複数選択可能である（今後拡充予定）。

⑥Sub Fieldの選択：⑤で選択された分野別影響は、それぞれさらに複数のサブ分野に区分されており、複数選択することができる。

⑦Unitの選択：図の縦軸に表示する単位を選択する。分野別影響は様々な単位で表されるが、影響DBでは可能な限り共通の単位を用いて、複数の影響分野を同時に比較することを目的としている。現在採用している単位は、リスク人口（population at risk（million））、基準年からの影響増加割合（%）、発症頻度（incidence/capita/year）の3つである（今後拡充予定）。選択した複数の影響が異なる単位を持つ場合、同じ単位を持つ影響項目のみ同時に表示可能である。

⑧GCMの選択：国や地点の気温上昇値をGMTIに変換する。複数のGCMを選択可能である。

⑨横軸の選択：横軸の項目を変化させて、複数の視点からデータを見ることが可能である。選択項目は、GMTI、Scenario、Yearの3項目である（図２）。

⑩参考文献の呼び出し：図が表示されると同時に、選択されたデータ一覧も表形式で表示される。選択されたデータに参考文献情報がPDF形式で格納されている場合には呼び出し可能であり、表示された影響の知見がどのように推計された結果であるか確認できるように工夫されている。

５）今後の改良点

今後の改良点を以下に記す。

a. 収録される影響に関する科学的知見の信頼度や確度については、情報元の論文PDFをデータ

ベースと同時収録して目標検討の際に判断材料とすることができるようにしている。しかしながら、政策決定者が多分野・他地域の影響量を包括的に把握して目標検討する際には、元論文全てに目を通すことは困難であるため、なんらかの方法により知見の不確実性についても表示する工夫が今後必要である。

b. 影響評価研究では、それぞれ異なる適応に関する前提条件を仮定して影響評価が行われている。どのような仮定に基づいた評価結果であるか、直感的に把握できるように表示する工夫必要である。

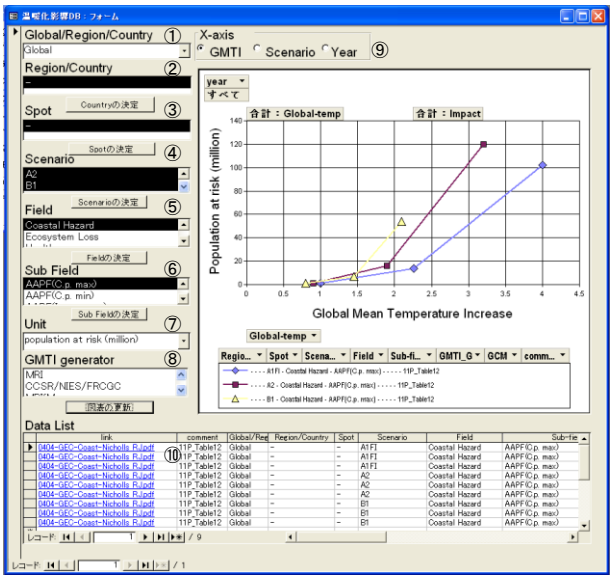


図１　影響データベースのフロントページ

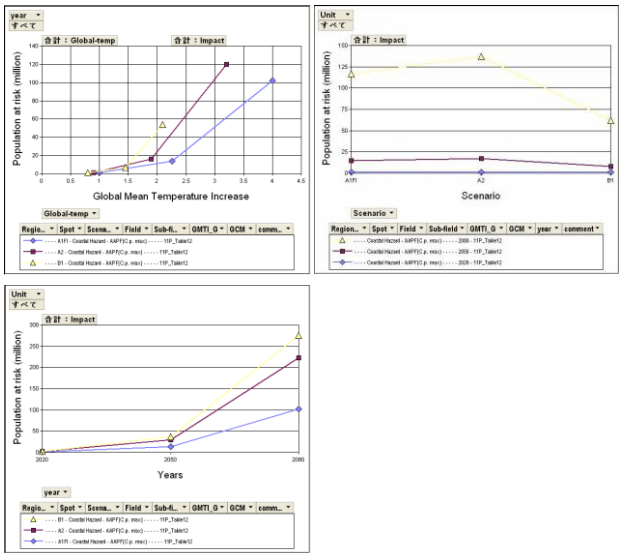


図２　異なる横軸単位による影響結果の図示例

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究では、長期目標の合意に関連した重要な論点について整理し、それをもとに長期目標への合意に資する温暖化影響研究の取り組みについて検討した。その結果、影響研究の知見を伝えるための工夫を行うこと、影響知見の総合化のためのツール開発やデータベース構築、適応を見込んだ影響評価の推進が、重要な今後の課題として示された。本研究で開発に取り組んでいる影響DBは上記課題への解決策の一つであり、温暖化影響および脆弱性への理解を深め、科学的および社会経済学的知見に基づいた気候安定化目標を設定するために非常に有効である。

（２）地球環境政策への貢献

環境省の中央環境審議会地球環境部会「気候変動に関する国際戦略専門委員会」における「気候変動問題に関する今後の国際的な対応について（長期目標をめぐって）第２次中間報告」において、本研究成果を提供した。また、IPCC第2作業部会第4次評価報告書の第10章アジアにおいて、本研究プロジェクトの研究成果を含めて日本への影響・適応についてとりまとめた。さらに、東京都環境審議会環境政策部会環境都市作り調査会の委員として参加し、東京における地球温暖化の影響・適応について本研究プロジェクトの研究成果を活用した。加えて、地球環境局長諮問委員会として設置された「地球温暖化影響・適応研究委員会」に研究参画者（原沢）が委員として

参加し、本研究プロジェクトの研究成果を活用した。

６．引用文献

1) United Nations (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, New York
2) Parry, M., N. Arnell, T. McMichael, R. Nicholls, P. Martens, S. Kovats, M. Livermore, C. Rosenzweig, A. Iglesias and G. Fischer (2001) Millions at risk: defining critical climate change threats and targets, Global Environmental Change, 11, 181-183.
3) Hare, W. (2003) Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change - Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveranderungen (WBGU), Berlin, Germany.
4) Hitz, S. and Smith, J. (2004) Estimating global impacts from climate change, Global Environmental Change-Human And Policy Dimensions, 14(3), 201-218.

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) H. Harasawa: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, 243-249 (2006) “Key Vulnerabilities and Critical Levels of Impacts in East & South East Asia”
2) Hijioka, Y., T. Masui, K. Takahashi, Y. Matsuoka, H. Harasawa：Environmental Economics and Policy Studies, 7, 3, 331-345, (2006) “Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming”
3) 原沢英夫：地球環境、11(1)、121-127 (2006) 「地球温暖化の危険なレベル」
4) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集、18、19-24(2006) 「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」
5) 久保田泉、高橋潔、肱岡靖明：環境情報科学論文集、18、457-462 (2006) 「政策決定支援のための適応研究に関する検討」
6) Harasawa, H.：Global Environmental Research, Vol.10, No.2, pp.253-259(2006) “A Consideration on Dangerous Level of Global Warming”
7) Hijioka, Y., T. Masui, K. Takahashi, Y. Matsuoka, H. Harasawa：Environmental Economics and Policy Studies, Vol.7, No.3, pp.331-345(2006) “Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming”

8) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集、18、19-24(2006)
「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」
9) 久保田泉、高橋潔、肱岡靖明：環境情報科学論文集、18、457-462（2006）
「政策決定支援のための適応研究に関する検討」
10) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：環境システム研究論文集、第35巻、pp367-374（2007）
「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
11) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集21，pp.423-428（2007）
「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発 －温暖化影響データベースー」
12) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：環境システム研究論文集、第35巻、pp367-374（2007）
「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
13) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集21，pp.423-428（2007）
「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発 －温暖化影響データベースー」
14) 高橋潔、松井哲哉、肱岡靖明、田中信行、原沢英夫：Global Environ.Eng.Res.，16，111-119(2008)
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」

〈査読付論文に準ずる成果発表〉
なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) 原沢英夫：水資源学シンポジウム報告、月刊Potal、No.44、34（2005).
「地球温暖化の社会への影響」
2) 原沢英夫: 京都大学衛生工学シンポジウム，19(3)，7-10（2005）
「地球環境問題の今後の展望～温暖化影響研究の視点から～」
3) 原沢英夫：国際問題、地理、50(8)、45-57（2005）
「地球温暖化の現象解明」
4) 原沢英夫：環境科学会誌、18(4)、391-402（2005）
「地球温暖化に係わるモデリング」
5) 原沢英夫：季刊環境研究、183、24-31（2005）
「地球温暖化の日本への影響」
6) 原沢英夫：アクチュアリージャーナル、Vol.16、No.57、53-67（2005）
パネルディスカッション報告「巨大自然災害が社会・経済に及ぼす影響と損害保険会社の影響」
7) 原沢英夫：気象事典，朝倉書店，757-767（2005）
「41.5 影響評価・対策」
8) 原沢英夫：小池勲夫編：地球温暖化はどこまで解明されたか―日本の科学者の貢献と今後の展

望2006、地球温暖化研究イニシャティブ気候変動研究分野第二次報告書、143-149、丸善（2006）
「5.2 雪氷や自然生態系の影響」
9) 原沢英夫：小池勲夫編：地球温暖化はどこまで解明されたか―日本の科学者の貢献と今後の展望2006、地球温暖化研究イニシャティブ気候変動研究分野第二次報告書、143-149、丸善（2006）
「5.6 市民生活への影響」
10) 高橋潔、久保田泉：季刊環境研究、183、102-110（2005）
「将来枠組みにおける適応策の位置づけ」
11) 久保田泉：小池勲夫編：地球温暖化はどこまで解明されたか　日本の科学者の貢献と今後の展望、地球温暖化研究イニシャティブ気候変動研究分野第二次報告書、202-209、丸善（2006）
「6.4気候変動への適応策」
12) 肱岡靖明：季刊環境研究、183、67-76(2005).
「地球温暖化抑制のための温室効果ガス安定化レベルの検討」
13) 高橋潔、久保田泉：環境情報科学、35(3)、39-44(2006)
「温暖化の適応に関する研究およびその実施の促進をめざして－温暖化影響のリスク評価・リスク管理の視点から」
14) 原沢英夫：月刊河川、726、48-51（2007）
「気候変動と生態系の変化」
15) 原沢英夫：村井俊治編著：人とわざわい上巻、281-330（2006）
「3.1 地球温暖化による災害」

（２）口頭発表（学会）

1)　肱岡靖明、高橋潔、原沢英夫、久保田泉、増井利彦、亀山康子、花崎直太：第34回環境システム研究論文発表会講演集、13-18（2006.10）
「長期目標設定に資する温暖化影響データベースの開発」

2)　肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：第20回環境研究発表会(2006.11)
「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」

3)　久保田泉、高橋潔、肱岡靖明：第20回環境研究発表会(2006.11)
「政策決定支援のための適応研究に関する検討」

4)　肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：第21回環境研究発表会、東京(2007.11)
「気候安定化レベル検討のための支援ツール開発－温暖化影響データベース」

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

１.統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究

（２）温暖化影響の全球プロセスモデルを用いた分野別影響関数（世界）の開発に関する研究

独立行政法人国立環境研究所
地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室　　高橋潔

〈研究協力機関〉　独立行政法人国立環境研究所　　花崎直太
埼玉県環境科学国際センター　　増冨祐司

平成17～21年度合計予算額　65,175千円
（うち、平成21年度予算額　16,467千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］温暖化抑制目標を設定して防止対策の立案・実施を行うには、温暖化現象を解明し、将来深刻化する影響を予測することが非常に重要である。本研究では、(1)温暖化の影響評価の方法論について整理し、(2)温暖化影響を予測・評価するために必要な気候シナリオを整備し、(3)全球を対象とした農業影響モデル・水資源影響モデル・健康影響（熱ストレス死亡リスク）モデルおよび全国を対象としたブナ林適域モデルを用いて温暖化影響関数を開発し、統合評価モデルAIM/Impact[Policy]に実装した。本研究課題において実施された気候シナリオの整備や影響関数の開発は、S-4プロジェクトのサブ課題間の連携を強化し、プロジェクト全体の研究推進の方向性を示し、研究推進を強力にサポートする役割を担うことができた。

［キーワード］地球温暖化、温暖化影響評価モデル、影響関数、気候シナリオ、統合評価モデル

１．はじめに

2007年、気候変動に関する政府間パネルの第４次評価報告書が公表され、温暖化を自然科学的な側面から評価する第１作業部会は、気候システムの温暖化には疑う余地がなく、様々な観測データから確認されていると報告している[1)]。また、20世紀半ば以降に観測された世界平均気温上昇は、人間活動による温室効果ガス（以後、GHG）増加による可能性が「かなり高い」と報告し、第３次評価報告書（TAR）の可能性が「高い」より、さらに踏み込んだ表現を用いている。温暖化による影響・適応・脆弱性の評価を行う第２作業部会は、「多くの物理・生物システムにおける変化が人為起源の温暖化と結びついていることを示すより多くの証拠が、TAR以降過去5年間に蓄積されてきており」、また「人為起源の温暖化が多くの物理・生物システムに対して識別可能な影響をすでに及ぼしている可能性が高い」と結論づけている[2)]。日本においても、様々な分野で既に影響が現れていると報告されている。このように、温暖化による影響は、世界のさまざまな場所で顕在化しており、今後、温暖化対策を行わなかった場合の将来被害はきわめて大きなものとな

ると予想され、具体的な目標を可能な限り早く世界全体で合意・共有し、目標達成に向かって世界全体で協調して努力していくことが今求められている。

２．研究目的

統合評価モデルに影響評価モジュールを実装するために、全球・全国を対象とした農業、水資源、健康、生態系などの分野について、既開発の全球・全国規模の影響評価モデルの改良を行った後、気候パラメータ（気温・降水など）の段階的な変化を仮定した感度分析シミュレーションを総当たりで多数行い、そのシミュレーション結果を利用して、国別・県別の気候パラメータ変化を説明変数とする分野別影響関数（世界・日本）を開発する。影響関数を用いた影響評価手法は、S-4-2(1)～(5)で開発される推計精度の高い分野別影響関数（日本）と連携・相補し、様々な温暖化抑制目標下における影響の大きさの包括的な検討を可能にする。影響関数の開発を通じてS-4-2との連携を推進するとともに、S-4プロジェクトにおいて共通利用するための気候シナリオを日本の都道府県レベルで開発し、プロジェクト全体の研究推進をサポートする。

３．研究方法

本研究では、安定化濃度シナリオ下における国別温暖化影響評価を実施するにあたり、その研究設計に反映すべく、まず既存の温暖化影響評価の手法について整理する。また、S-4プロジェクトにおいて共通利用することを想定して、IPCC AR4で評価された気候モデル実験出力を利用して、日本の都道府県別の気候シナリオを開発する。さらに、S-4-1①で開発する統合評価モデルAIM/Impact[Policy]（以後、AIP）に実装するための「影響関数」を開発する。この影響関数とは、詳細な影響評価モデル（以後、詳細モデル）を用いて、気象条件を変化させた多数回のシミュレーションを行い、気温や降水といった気象要素の変化に対する影響量の応答をデータベース化しておき、利用時は計算中の気象条件に最も近いものを読み取る仕組みである。本研究ではグローバルな分野別影響関数として、農作物の潜在生産性変化、水資源・水ストレス人口、熱ストレス超過死亡を評価するための影響関数を開発する。加えて、S-4-2(4)との連携し、温暖化によるブナ林への影響を国内各県について見積もるための影響関数を開発する。（本報告の「結果・考察」では、紙面の都合、水資源・水ストレス人口ならびにブナ林の影響関数開発についてのみ報告する。）基本的な影響関数の開発手順は①～⑤の通りである。①詳細モデルを用いて、現状の国別・県別の影響量を推計し、報告値と比較することで、モデルの妥当性についての検証を実施、②あるGCMの実験出力を元に作成した空間詳細な将来気候シナリオを詳細モデルの入力とし、温暖化影響の将来推計を実施、③感度実験的に詳細モデルを多数回ランすることで影響関数を作成、④手順②で用意した詳細モデルを用いた将来推計結果と影響関数を用いた将来推計結果の比較により、影響関数による詳細モデルの代替能力の評価を実施、⑤開発した影響関数の挙動・性質について考察する。

４．結果・考察

（１）　温暖化影響評価の手法の整理

１）　モデリング・その他の影響評価手法

温暖化影響の評価のための手法としては、実験アプローチ、相似性アプローチ、エキスパート

判断アプローチ、モデリングアプローチなどが挙げられる。温暖化影響評価の目的は、多様な将来の発展パターンや政策の下での影響を見積もり、その被害を軽減するための適応策を検討したり、また致命的な損害を回避するための気候緩和の程度を議論する材料を提供ことである。そのため、将来の多様な道筋を仮定し、その仮定の下での影響を網羅的に評価することが可能であるモデリングアプローチは、温暖化影響評価において重要な役割を果たす。モデリングアプローチには、気候因子と影響の間の統計的関係に基づく経験的統計モデル、気候と影響の間にある因果関係を物理法則や既知の理論に基づき表現するプロセスモデルや、一般・部分均衡モデル、投入産出モデルなどの経済モデル、またプロセスモデルや経済モデルを組み合わせて影響を包括的に評価する統合モデルなどがある。温暖化影響の将来予測の具体例の多くは、モデリングアプローチを用いて推計されたものである。

２）　シナリオ

温暖化影響評価においてモデリングアプローチを用いて行うためには、事前に将来に関する「シナリオ」を策定する必要がある。ここでいう「シナリオ」とは、内部整合性と合理性を保持した評価の前提条件であり、モデルアプローチではモデルシミュレーションの入力データとなる。将来シナリオには、気候シナリオの他に、人口・経済などの社会状況や、気候以外の自然環境変化に関するシナリオ等が含まれる。影響評価の出力結果が政策検討にとって有益なものであるためには、影響評価モデル自体の予測精度とともに、シミュレーションの前提とされるシナリオが現実に起こりうる将来像を適切に表現しているものであることが重要である。

３）　不確実性の取扱い方

温暖化影響評価の結果に基づいて、排出削減・適応といった対策について検討する場合、影響評価結果の不確実性に関する理解が必要となる。温暖化影響評価の不確実性には、(1)科学的知見の不足に起因するもの、(2)自然界の変動性・不確定性に起因するもの、(3)将来の社会選択に起因するもの、がある。深刻な影響を予見する知見であっても、その生起の確率が非常に低い場合や科学的裏づけが少ないことにより知見の信頼性が低い場合には、政策決定の際の考慮の優先順位は低く取り扱われるかもしれない。近年、気候変化ならびにその影響の予測結果に関する不確実性を、確率分布を用いて表すことが重要であるとの認識が高まりつつある。確率分布を用いた影響予測結果の表現は、政策検討に対して有益な情報を提供しうると期待されているが、その実践は必ずしも容易ではなく今後さらなる研究が必要である。

（２）　気候シナリオの整備

地球温暖化による環境影響を予測・評価するためには、今後の温室効果ガスの排出見通し（排出シナリオ）に基づき、将来の気候はどの程度変化するのかについての見通し（気候シナリオ）が必要である。現在、世界の様々な研究機関が独自のモデルを用いて気候シナリオを提供している。これらの気候シナリオを、地球温暖化の環境影響の予測・評価に利用するに際して、それぞれの気候シナリオの特徴を体系的に把握することは非常に重要となる。

現在の気候モデルの多くは、全球がその予測対象領域となっている。特定の国や地域についての温暖化の影響評価を行なうに際し、現在の気候モデルの結果を利用するには、空間解像度が粗すぎるという問題が生じる。このため、オリジナルの気候モデル（気候シナリオ）の高解像度化が必要となる。本研究では、S-4プロジェクトにおける日本域を対象とした地球温暖化による環境

影響評価を支援することが、目的の一つとなっている。そこで、入手可能な気候シナリオを、モデル、シナリオ別に収集・整理し（表１）、気候シナリオの高解像度化を行うとともに、国別・都道府県別の平均値を集計し、AIPに実装した。

表１　対象とした気候モデル・シナリオ

研究機関名	研究機関名略称	Country	モデル名	Scenario Runs				Time period*
Beijing Climate Center	BCC	China	BCC-CM1	20C3M			B1	20C3M: 1871-2003, A2: 1950-2100, B1: 1950-2100
Bjerknes Centre for Climate Research	BCCR	Norway	BCCR-BCM2.0	20C3M	A2		B1	20C3M: 1850-1999, A2: 2000-2099, B1: 2000-2099
National Center for Atmospheric Research	NCAR	USA	CCSM3	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1870-1999, A2: 2000-2099, A1B: 2000-2199, B1: 2000-2199
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	CCCMA	Canada	CGCM3.1(T47)	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1850-2000, A2: 2001-2100, A1B: 2001-2300, B1: 2001-2300
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	CCCMA	Canada	CGCM3.1(T63)	20C3M		A1B	B1	20C3M: 1850-2000, A1B: 2001-2300, B1: 2001-2260
Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques	CNRM	France	CNRM-CM3	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1860-1999, A2: 2000-2099, A1B: 2000-2209, B1: 2000-2299
CSIRO Atmospheric Research	CSIRO	Australia	CSIRO-Mk3.0	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1871-2000, A2: 2001-2100, A1B: 2001-2200, B1: 2001-2300
Max Planck Institute for Meteorology	ECHAM5	Germany	ECHAM5/MPI-OM	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1860-2100, A2: 2001-2100, A1B: 2001-2200, B1: 2001-2200
Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data group.	ECHO	Germany / Korea	ECHO-G	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1860-2000, A2: 2001-2100, A1B: 2001-2300, B1: 2001-2200
LASG / Institute of Atmospheric Physics	FGOALS	China	FGOALS-g1.0	20C3M		A1B	B1	20C3M: 1850-1999, A1B: 2000-2199, B1: 2000-2199
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL	USA	GFDL-CM2.0	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1861-2000, A2: 2001-2100, A1B: 2201-2300 B1: 2001-2300
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL	USA	GFDL-CM2.1	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1861-2000, A2: 2001-2100, A1B: 2001-2300 B1: 2001-2300
NASA / Goddard Institute for Space Studies	GISS	USA	GISS-AOM	20C3M		A1B	B1	20C3M: 1850-2000, A1B: 2001-2100, B1: 2001-2100
NASA / Goddard Institute for Space Studies	GISS	USA	GISS-EH	20C3M		A1B		20C3M: 1880-1999, A1B: 2000-2099
NASA / Goddard Institute for Space Studies	GISS	USA	GISS-ER	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1880-2003, A2: 2004-2100, A1B: 2004-2300, B1: 2004-2300
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	INGV	ITALY	INGV-SXG	20C3M		A1B		20C3M: 1870-2000, A1B: 2001-2100
Institute for Numerical Mathematics	INM	Russia	INM-CM3.0	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1871-2000, A2: 2001-2200, A1B: 2001-2200 B1: 2001-2200
Institut Pierre Simon Laplace	IPSL	France	IPSL-CM4	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1860-2000, A2: 2000-2100, A1B: 2000-2230 B1: 2000:2300
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	MIROC	Japan	MIROC3.2(hires)	20C3M		A1B	B1	20C3M: 1900-2000 A1B: 2001-2100 B1: 2001-2100
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	MIROC	Japan	MIROC3.2(medres)	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1850-2000 A2: 2001-2100 A1B: 2001-2300 B1: 2001-2300
Meteorological Research Institute	MRI	Japan	MRI-CGCM2.3.2	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1851-2000, A2: 2001-2100, A1B: 2001-2300 B1: 2001-2300
National Center for Atmospheric Research	NCAR	USA	PCM	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1890-1999, A2: 2000-2099, A1B:2000-2099(Oct), B1: 2200-2299

研究機関名	研究機関名略称	Country	モデル名	Scenario Runs				Time period*
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	UKMO	UK	UKMO-HadCM3	20C3M	A2	A1B	B1	20C3M: 1860-1999, A2: 2000-2099, A1B:2000-2199(Nov) B1: 2000-2199
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	UKMO	UK	UKMO-HadGEM1	20C3M	A2	A1B		20C3M: 1860-1999 A2: 2000-2099(Nov) A1B:2000-2099(Nov)

*Time periodは月別データでrun1の場合を示す。

（３） 水資源・水ストレス人口に関する影響関数の開発と応用

１） グローバル水資源影響関数の作成

まず、現在の3時間単位の気象データについて、気温を全球・通年一律に-5℃から15℃まで1℃刻みで21通りに、降水を同じく-75%から+200%まで12通り変化させることにより、合わせて252通りの気象データを入力データとし、詳細モデルを利用して得られた国別流出量データを影響関数として、データベースとして保存した。次にここで設定した、気温と降水の上下限の設定の妥当性を検討するため、将来の気候シナリオで、気温と降水が現在値に比べてどれくらい変化するのかを解析した。解析対象としたのは、排出量が最大になるSRES A2 シナリオにおける、IPCCの第4次評価報告書に気候シナリオを提供した18のGCMの気温変化と降水変化である。現在気候としては1981-90年の10年平均を利用した。全データの気温偏差は-1.9℃から+15.0℃まで、降水量の変化率は-99.9%から+4520%までであった。ただし降水量が+200%以上になるのは全43380ケース中わずか105ケースしかなく、無視できると考えた。よって、今回設定した範囲で詳細モデルの計算を行っておけば、AIPが参照するほぼ全ての気象条件を網羅するデータベースが構築できると考えられた。さらに、影響関数が詳細モデルの代替となりうるか否かを検討した。検討対象とするのはAIPでGCMにMIROCを、解析期間に2086-95年の平均を、気温偏差と降水変化率を計算する際の現在気候に1986-95年の平均をとった場合である。結果、詳細モデルによる2086-95年の国別の水資源量と影響関数を利用した場合とを比較すると、その差は概ね±20%の範囲内に収まり、影響関数は詳細モデルの代替になることが示された。ただし影響関数から得られた水資源量は詳細モデルのそれに比べて若干過小になる傾向が見られる。水資源量上位50ヶ国で20%以上の過大評価となったのはボリビアの1国のみで、20%以下の過小評価となったのはアメリカやインド、マダガスカル、モザンビーク、ベネズエラなど9ヶ国ある。この原因として考えられる理由はいくつかあるが、詳細モデルが気温偏差と降水変化率を月単位で変化させているのに対し影響関数は年単位で変化させていることが最も大きいと考えられ、今後、月別変化を取り込みについて更なる検討が必要となる。

２） グローバル水資源影響関数の考察

前節で得られた水資源影響関数の例として日本に関する結果を図１に示す。気温の上昇（横軸の右向き）とともに水資源量が減少していき（色が濃くなり）、降水の減少（縦軸下向き）とともに水資源量が減少していく（色が濃くなる）ことが分かる。気温の上昇に対する水資源量の減少率と降水の減少による水資源量の減少率の関係は国毎に異なる。気温が現在値に対して3℃上昇した場合と降水量が25%減少した場合でそれぞれ国の水資源量がどれくらい減少するかを示したものが図２である。参考として、日本、インド、中国、ロシアをそれぞれJ、I、C、Rとしてプロットした。気温に対する感度はインド、中国、ロシアの順に、降水に対する感度はロシア、インド、中国の順に高くなる。以下に簡単にこの関係を説明しておく。ロシアの主な水資源量は冬期

の降雪に由来するが、降雪が積雪として春まで維持されて、一気に融け出した場合、蒸発による損失が小さく、降水量の減少(25%)と水資源量の減少(37%)の乖離が小さい。しかし、気温が上昇し、積雪の融解がおきると、冬期にも蒸発による損失が発生し、急速に水資源量が減少する。インドの主な水資源量は雨期の降水であるが、雨期には流出が蒸発に卓越し、蒸発による損失が比較的小さい。これに対して中国では蒸発が流出に年間を通じて卓越し、蒸発の損失が大きい。

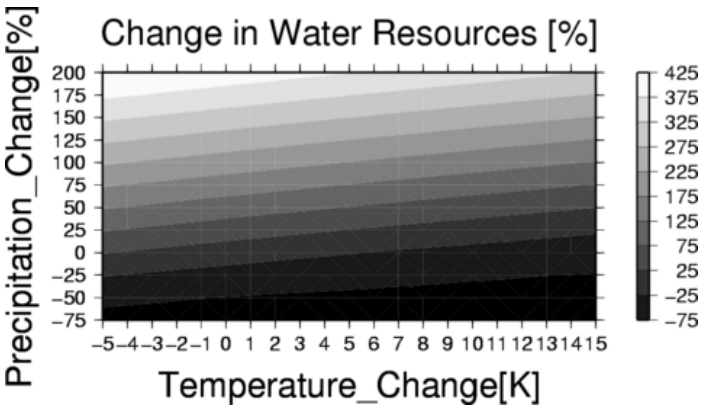


図１　日本の水資源量の感度

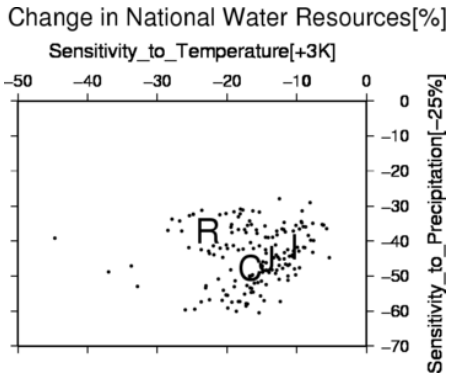


図２　国別の水資源量の感度。気温を+3℃、降水-25%の変化させた場合の水資源量変化割合を示す。

３）　水ストレス人口に関する影響関数の検証

水資源量と共に各国の水ストレス人口に関する影響関数を開発した。GCMにHadCM3を，社会経済人口シナリオにSRES A1Bを利用した場合、詳細モデルと影響関数の結果を比較すると、気候変化が比較的小さい2020年代はもとより，大きくなる2050年代，2080年代においても，おおむね誤差が±20%以内に収まることが示された。特に水ストレス人口が5000万人を超える主要国でも良好な対応が見られる。GCMにECHAM5を，社会経済人口シナリオにA2を利用した場合も同様の性能を示した。これら結果から，国別の水ストレス人口に関する影響関数は全球水資源モデルH07をよく代替できることが示された。さらに、AIPが推定する全球の水ストレス人口を，利用している社会経済人口シナリオがSRESに基づいているIPCC AR4に掲載された3つの論文と比較したところ、B1・A2シナリオ共に、現在から将来の4期間（1980年代、2020年代、2050年代、2080年代）を通じ、先行研究とよく一致することが明らかとなった。

４）　安定化レベルと水ストレス人口

ここでは、0.0℃、+2.0℃、+4.0℃の３種類の安定化レベルを検討する。0.0℃とは参照実験で、1980年代の気候が21世紀末まで続くという設定である。+2.0℃と+4.0℃は、21世紀末までの全球平均気温の上昇量（産業革命前を基準とする）の上限値である。21世紀中の全球平均気温上昇の経路はAIPによって計算される。陸上の全球平均気温の時系列を図３aに示す。パターンスケールに利用したのはGCMにHadCM3、社会経済人口シナリオにSRES A1Bを与えたときの将来の全球気候データである。この結果得られた陸上の全球平均降水量を図３bに示す。ちなみにAIPではCMIP3の任意のGCMに差し替えて計算を行うことが可能である。将来の人口はFIX、A1、A2の３種類について検討した。FIXとは参照実験で、1980年代の人口が21世紀末まで続くという設定である。A1、A2は

それぞれSRESによる21世紀の人口シナリオである。世界人口の時系列を図３cに示す。

計算期間は2000年から2100年までである。計算間隔は10年とし、気候データも10年平均値を利用した。AIPは国単位での出力が可能であるが、本研究では世界をアジア、FSU（旧ソビエト連邦）、ラテンアメリカ、アフリカ北部と中近東、OECD諸国、サブサハラアフリカの６つの地域に集計して解析を行った。

アフリカ北部と中近東、サブサハラアフリカ、全球について、水ストレス人口の時系列を示した（図４）。まず、いずれの地域においても、人口シナリオが水ストレス人口の主要な動向を決め、全球平均気温の安定化が副次的な変化しかもたらさないことが分かる。たとえばサブサハラアフリカにおける+4°C安定化の場合、2100年時点で、A2の人口シナリオは参照実験（安定化気温0.0°Cかつ人口FIX）より7.3億人水ストレス人口を上昇させているが、その時の0.0°Cと+4.0°Cの安定化レベルの差異は1.1億人である。次に各地域の安定化レベルと水ストレス人口の関係を検討する。アフリカ北部と中近東では、安定化レベルが上昇すると水ストレス人口が若干上昇することが分かる。これに対して、サブサハラアフリカでは逆の傾向を示す。全球で見ても、サブサハラアフリカと類似した傾向が見られた。ちなみに、これらの他の4つの地域では、アジアとOECDがサブサハラアフリカ型で、FSUとラテンアメリカでは安定化レベルによる差異が小さかった。

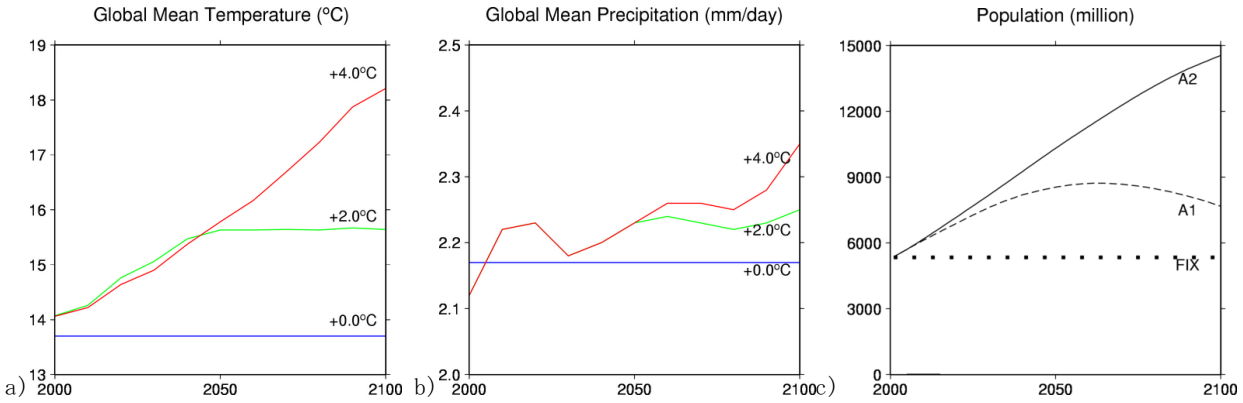


図３　安定化計算において利用したa)陸上の全球平均気温、b)陸上の全球平均降水量、c)全球人口シナリオ

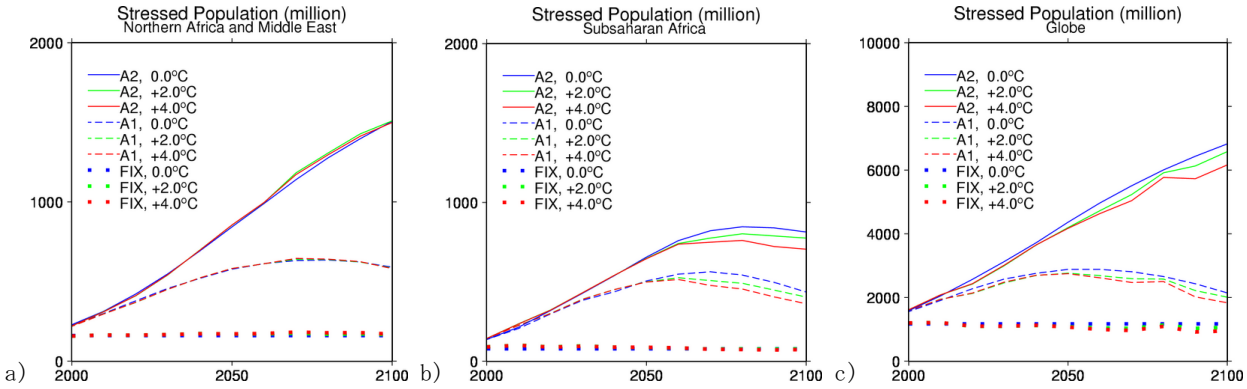


図４　21世紀中の水ストレス人口の時系列変化。a)アフリカ北部中近東、b)サブサハラアフリカ、c)全球

結果より、地域の水ストレス人口は人口シナリオに大きな影響を受けることが示された。本研

究では一人当たり水資源量が1000m^3/person/yrを下回る地域に住む人口を推計してきた。SRES A2の場合、21世紀末の世界人口は2000年の約3倍近くに増加する（図３c）。これに対し、安定化レベル+4.0°Cの降水量の増加は8%（図３b、全球の平均年河川流量の増加は14%）である。降水量も河川流量も地域偏在性が大きく、局所的に3倍以上になるところもあるが、平均的には変化率は人口より1-2桁小さい。このため、水ストレス人口の推計において、気候変化より人口の影響が卓越するのだと考えられる。水資源に関するグローバルな温暖化の影響評価において、人口の影響が卓越することは既にいくつかの文献でも指摘されている。また、アフリカ北部と中近東以外の地域において、安定化レベルが高いほど、水ストレス人口が小さくなるという結果が見られた。本研究では、平均年河川流量を水資源量とみなしている。このため、河川流量がほぼ全域で減少したアフリカ北部と中近東以外の地域では、一人当たり水資源量が増え、水ストレスが減ったということになる。ちなみに、南米の北東部などでは一人当たり水資源が豊富で、河川流量の減少が水ストレス人口の変化に結びつかなかった。今後は、河川流量には時間変動や上流の取水による下流の河川流量の減少を考慮していく必要があると考えられる。

（４）　ブナ林適域影響関数の開発と県別影響評価

１）影響関数による詳細モデル再現能の把握と再現能向上の方針検討

影響関数がどの程度詳細モデルを再現出来ているか、また影響関数と詳細モデルの間で差が生ずるならばその原因と改善の指針は何かを把握するため、表-2にまとめた7種類の方法で気候シナリオを作成し、その各々について詳細モデルを用いたブナ分布確率の計算ならびに県別集計によるブナ林適域面積率の計算を実施し、詳細モデルを用いたフルスペックの計算結果（月別・グリッド別ケース）と比較した。なお、GCMによる気候予測情報としては、現時点で最も空間解像度の高いCCSR/NIES/JAMSTECのMIROC高解像モデルによるA2シナリオでの基準期間（1981～1990年）から2081～2090年へ気候変化予測を用いた。

結果より、GCMから得られる月別の降水変化予測情報を年平均せずに用いる影響関数とすることで、影響関数の精度を高めることが可能であることがわかる。しかしながら、気温変化を年平均で-2℃～+7℃（1℃刻み）、降水量変化率も年平均で-50%～+10%（10%刻み）と仮定して影響関数を作成する場合でさえ、（10×11）回のモデルシミュレーションが必要である。さらに、例えば月別降水変化予測を年平均せずに用いるためには、影響関数の説明変数を年平均気温変化と年降水量変化率の2変数から年平均気温変化とm月降水量変化率（m=1, 2 ,,,12）の13変数に増やすことに相当し、そのためには、（10×11^{12}）回のシミュレーションが必要になる。そこで、中間的な取扱いとして、詳細モデルでは月別降水量が夏季降水量PRS（5月～9月）と冬季降水量PRW（12月～3月）として季節集計して用いられることを考慮して、追加的に「気温年平均・降水季節平均・県平均ケース」と「月別・グリッド別ケース」の一致度を調べた（図５(f)）。その結果、影響関数の説明変数を年平均気温変化と年降水量変化率の2変数から、年平均気温変化・夏季降水量変化率・冬季降水量変化率の3変数に増やすことで、詳細関数と影響関数の一致度が改善することが分かった。なお、そのためには（10×11×11）回のシミュレーションが必要になる。

気候予測情報には依然大きな不確実性があり、その気候予測情報とともに用いられる関数であることを考慮し、現時点では図５(a)で示した程度の誤差が生ずることを理解したうえで、年平均気温変化と年降水量変化率の2つを説明変数とする影響関数を作成・利用することを基本とし、将

来的に詳細モデル再現能の向上を目指す際には、降水変化の季節性を考慮した3変数化が効果的かつ効率的であることが分かった。

表２　気候シナリオの作成手法

ケース名称	気候シナリオの準備手法	気温変化の時間集計	降水量変化の時間集計	気温・降水の空間集計
月別・グリッド別ケース（詳細モデル相当）	GCMによる気候予測情報（気温変化量・降水量変化率）を月別・グリッド別に取り扱い、三次メッシュ気候値に上乗せして（気温の場合は足し合わせ、降水の場合は掛け合わせ）気候シナリオを作成。これが、詳細モデルを用いたフルスペックでの計算となる。	月別	月別	グリッド別
年平均・県平均ケース（影響関数相当）	GCMによる気候予測情報を年平均・県平均して取り扱い、三次メッシュ気候値に上乗せして気候シナリオを作成。気候変化量は、空間的に均一（県内全てのグリッドで同一）かつ時間的に均一（全ての月で同一）の想定となる。この方法で作成した気候シナリオを用いた詳細モデルでの計算は、影響関数を用いた計算と同じことになる。	年平均	年平均	県平均
月別・県平均ケース	GCMによる気候予測情報を月別に県平均して取り扱い、三次メッシュ気候値に上乗せして気候シナリオを作成。気候変化量は空間的に均一の想定となる。	月別	月別	県平均
年平均・グリッド別ケース	GCMによる気候予測情報をグリッド別に年平均して取り扱い、三次メッシュ気候値に上乗せして気候シナリオを作成。気候変化量は時間的に均一の想定となる。	年平均	年平均	グリッド別
気温年平均・降水月別・グリッド別ケース	GCMによる気候予測情報をグリッド別に気温変化のみ年平均して（降水量変化は月別に）取り扱い、三次メッシュ気候値に上乗せして気候シナリオを作成。気温変化量は時間的に均一の想定となる。	年平均	月別	グリッド別
気温月別・降水年平均・グリッド別ケース	GCMによる気候予測情報をグリッド別に降水量変化のみ年平均して（気温変化は月別に）取り扱い、三次メッシュ気候値に上乗せして気候シナリオを作成。降水量変化は時間的に均一の想定となる。	月別	年平均	グリッド別
気温年平均・降水季節平均・県平均ケース（3変数影響関数相当）	GCMによる気候予測情報を気温変化については年平均・県平均して取扱い、降水量変化については夏季平均（5月～9月）と冬季平均（12月～3月）に分けて県平均して取扱い、三次メッシュ気候値に上乗せして気候シナリオを作成。この方法で作成した気候シナリオを用いた詳細モデルでの計算は、年平均気温変化、夏季降水量変化率、冬季降水量変化率の3変数の影響関数を用いた計算と同じことになる。	年平均	夏季と冬季の季節平均	県平均

２）　各県影響関数の特徴整理

開発した影響関数をもとに、気温及び降水量が変化した場合の各県のブナ林適域面積率について考察する。図６(a)～(c)はそれぞれ、北海道、富山県、鹿児島県について作成した影響関数を、等値線図で示したものである。横軸が気温変化、縦軸が降水量変化率であり、現状では気温上昇0℃・降水量変化率0%であるから、その交点の等値線を読めばよい。等値線が縦長の場合は気温変化に対する感度が比較的大きく、横長の場合は降水量変化に対する感度が比較的大きいといえる。例えば北海道の場合はブナ林適域面積率は約5%とわかる。また気温上昇2℃・降水量20%増加の場合（+2℃、+20%の交点）、北海道のブナ林適域面積率が約10%に増加する（現状より5%増）と予測された。現状を示す気温変化0℃、降水量変化率0%の座標付近で等値線が横軸に沿って比較的なだらかな地域（気温変化に対する感受性が比較的低い地域）は北海道、群馬県、長野県であった。この3地域では、たとえ降水量が変化しない場合でも、気温が2℃程度上昇するとブナ林適域面積率は若干増加または現状維持すると予測された。しかし気温が2℃よりも上昇する場合には、降水量が増加しない限りは減少すると予測された。

日本海型気候の影響を受ける東北地方をはじめ、日本海側に沿った北陸から山陰地方にかけては、現在でもブナ林の分布面積が広いこともあり、モデルで予測された分布適域が比較的多く残存すると予測された。これらの地域では等値線が縦に長く走る傾向があり、降水量の増減よりも気温の上昇が分布適域面積の減少に強く影響する。その中で気温の上昇に最も鈍感なのは富山県のブナ林で、気温が現状より7℃上昇した場合でも降水量の増減とはあまり関係なくブナ林適域面積率は約2.5%から5%程度になると予測された。一方、太平洋型気候の影響を受けやすい太平洋

側の地域では、わずかな気温上昇でもブナ林適域面積率は減少すると予測された。特に東海地方以西の太平洋側地域では、約1℃の気温上昇でも分布適域が消滅する場合がある。しかし、気温上昇と同時に降水量も増加する場合は、分布適域の面積減少のペースは遅くなることが、等値線から読み取れる。

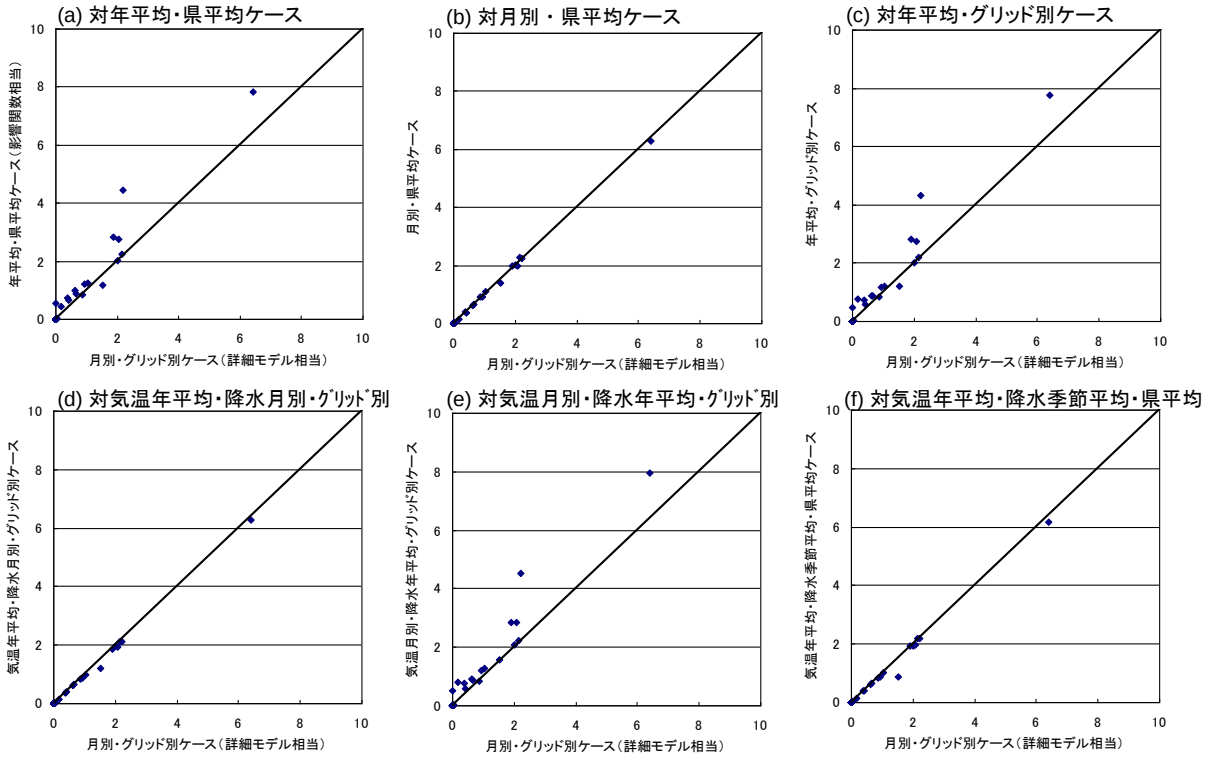


図５　県別集計したブナ林適域面積率(%)のケース間比較　（ケース名称については表１参照）
（影響関数による詳細モデル再現能の把握(a)と誤差原因の把握(b)～(f)）

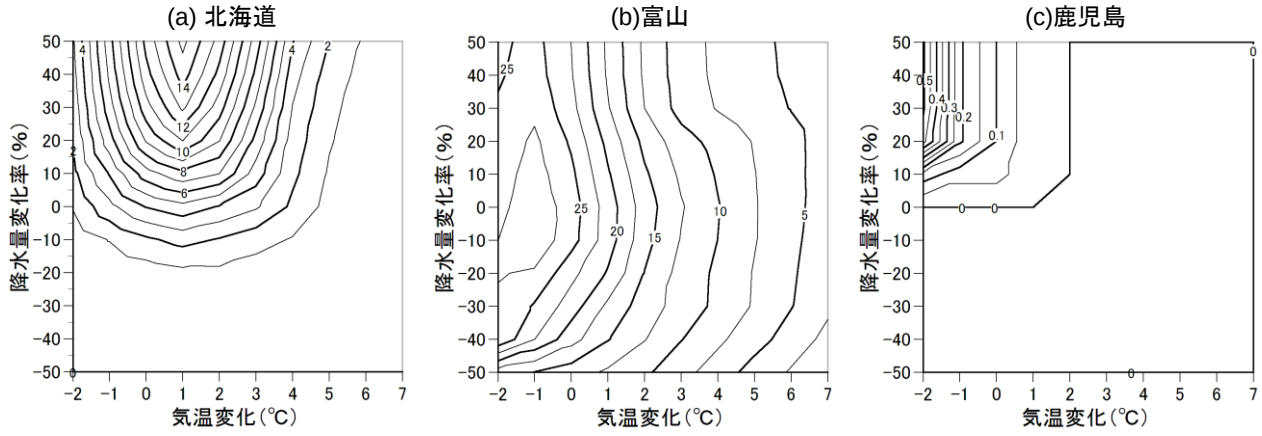


図６　県別ブナ林影響関数の等値線図の例　（(a)北海道、(b)富山県、(c)鹿児島県；等値線数値はブナ林適域面積率(%)）

３）　本研究で明らかにした点

a.　最新の複数の気候予測実験結果を基に、21世紀中の気温及び降水量の変化を日本域につい

て県別年平均値で見たところ、今後100年間に年平均気温が6℃以上上昇したり年降水量が50%以上増減する可能性は低いことが分かった。

b. 気候変化による県別ブナ林適域面積率変化を簡易に推定するために、年平均気温変化及び年降水量変化率の2つを説明変数とする影響関数により、ブナ林分布確率をメッシュ別に推定する詳細モデルを代替する場合、影響関数では降水量変化の季節差を考慮出来ないことに起因した誤差が生ずることが分かった。ただし、年降水量変化率の代わりに夏季降水量変化率・冬季降水量変化率を用いて、年平均気温変化と併せて3説明変数とすることで、今後、影響関数による詳細モデル再現精度を高めうることが分かった。

c. 開発した影響関数に基づく考察により、北海道・群馬・長野では2℃程度の気温上昇ではブナ林適域面積率が減少しないことが分かった。しかしそれらの県でも、2℃を越す気温上昇では、降水量が増加しない限りは、ブナ林適域面積率は減少する。東北、北陸、山陰では、現時点でブナ林の分布適域が広く、気温上昇に応じてブナ林適域面積率は減少するものの、比較的多く分布適域が残存する。特に富山県は、5℃を超える気温上昇が生じてもブナ林適域面積率が数%残存すると見込まれる。一方、太平洋側の地域では、わずかな気温上昇でもブナ林適域面積率は減少すると予測された。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

影響関数がAIPに実装されることにより、政策検討の現場に対して科学的推計の詳細な手順や背景を逐一示すことは依然として困難であるが、温暖化影響の評価結果をより透明性を持って示すことが可能になった。また、これまで分野別に行われてきた温暖化影響評価がAIPに集約されることで、分野間の影響の相互比較ができるようになった。さらに、長期的な気候安定化目標とそれに至る道筋を、温暖化の定量的影響を考慮しながら検討することが可能になった。統合評価モデルであるAIPやそれに実装される影響関数では、政策検討の場面での実用性を高めるために手法の簡易化が本質的に重要であるが、本研究では、詳細な影響評価モデルによる将来推計結果の比較を通じて、影響関数による簡易化の妥当性について評価した。政策ツール開発における簡易化の標準的手順を、実践を通じて提案するものであり、学術的にも貴重な成果である。

（２）地球環境政策への貢献

地球環境局長諮問委員会として設置された「地球温暖化影響・適応研究委員会」の分野別ワーキンググループ（途上国）に研究参画者（高橋）がメンバーとして参加し、本研究プロジェクトの研究成果を活用した。また、本研究で開発された影響関数とそれを組み込んだ統合評価モデルの研究成果は、中期目標検討において「温暖化対策を講じない場合の被害コスト」として、科学的知見を提供した。さらに、本研究の成果をふまえ、研究参画者（高橋）がIPCC「気候変動適応を促進するための極端現象及び災害のリスク管理」特別報告書代表執筆者（執筆期間2009～2011年；2011年公表予定）に選出されており、IPCCを通じた地球環境政策への貢献も見込まれる。

６．引用文献

1) IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis

(http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html)
2) IPCC (2007): Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability (http://www.ipcc-wg2.org/).

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

1) Hijioka, Y., T. Masui, K. Takahashi, Y. Matsuoka, and H. Harasawa：Environmental Economics and Policy Studies, Vol.7, No.3, pp.331-345 (2006) “Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming”
2) 高橋潔：地球環境、11(1), 111-119 (2006)「温暖化が農業生産に及ぼす影響とその適応策」
3) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：環境情報科学論文集、18, 19-24 (2006)
「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」
4) 久保田泉、高橋潔、肱岡靖明：環境情報科学論文集、18, 457-462 (2006)
「政策決定支援のための適応研究に関する検討」
5) Takahashi, K.：Global Environmental Research, Vol.10, No.2, pp.243-252 (2006)
“Impacts of Global Warming on Agricultural Production and Adaptation in Response”
6) 増冨祐司、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明、松岡譲：水工学論文集、第51巻、235－241 (2007)
「季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価」
7) 花崎直太、内海信幸、山田智子、沈彦俊、Magnus Bengtsson、大瀧雅寛、鼎信次郎、沖大幹：水工学論文集、第51巻、229-234 (2007)
「温暖化時の水資源影響評価のための全球統合水資源モデルの開発」
8) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：環境システム研究論文集、第35巻、pp367-374 (2007)
「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
9) Takahashi, K., Honda, Y. and Emori, S.：Journal of Risk Research, 10, 339-354(2007)
“Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming”
10) Kainuma, M., Matsuoka, Y., Masui, T., Takahashi, K. and Hijioka, Y.：In Schlesinger, M., Kheshgi, H., Smith, J., De La Chesnaye, F. and Reilly, J.M. (Eds.), Human-Induce Climate Change, Ed.1, Cambridge University Press, pp.314-327 (2007)
“Climate policy assessment using the Asia-Pacific Integrated Model”
11) 高橋潔、松井哲哉、肱岡靖明、田中信行、原沢英夫: Global Environ.Eng.Res., 16, 111-119 (2008) 「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
12) 増冨祐司、高橋潔、原沢英夫、松岡譲：地球環境研究論文集, 16, 121-130 (2008)
「気候変化の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稲生産量に及ぼす影響及びその適応策の評価」

13) Masutomi, Y., Takahashi K., Harasawa, H., Matsuoka, Y.: Agric. Ecosyst. Environ, 131,281-291(2009)
“Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration in process/parameter uncertainty in general circulation models”
14) Matsui T., Takahashi K., Tanaka N., Hijioka Y., Horikawa M., Yagihashi T., Harasawa H. : Appl.Veg.Sci., 12, 328-339 (2009)
“Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech(Fagus crenata) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan”
15) 本田靖, 高橋潔：地球環境, 14(2), 257-262 (2009)「熱ストレスの健康影響」
16) 松井哲哉, 田中信行, 八木橋勉, 小南裕志, 津山幾太郎, 高橋潔：地球環境、14(2), 165-174 (2009) 「温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価」
17) 肱岡靖明, 高橋潔, 花崎直太, 増冨祐司, 原沢英夫：地球環境, 14 (2), 127-135 (2009) 「統合評価モデルを用いた日本を対象とした温暖化影響の総合評価」

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) 高橋潔：季刊環境研究、183、59-66 (2005)
「温暖化の影響評価　－危険な人為的干渉の具体例に関する研究知見－」
2) 高橋潔、久保田泉：季刊環境研究、138、102-110 (2005)
「将来枠組における適応策の位置づけ」
3) 原沢英夫、高橋潔:高村ゆかり、亀山康子編:地球温暖化交渉の行方、大学図書、16-31 (2005)
「地球温暖化の影響」
4) 高橋潔：小池勲夫編：地球温暖化はどこまで解明されたか―日本の科学者の貢献と今後の展望2006、丸善株式会社、188-194 (2006)
「気候変動を抑制するための長期目標設定」
5) 高橋潔、久保田泉：環境情報科学、35(3)、39-44 (2006)
「温暖化の適応に関する研究およびその実施の促進をめざして－温暖化影響のリスク評価・リスク管理の視点から」
6) 花崎直太：河川、No.720、78-82 (2006)
「AGS/UTSC水環境勉強会の活動と第４回世界水フォーラムへの参加」
7) Adger, W.N., S. Agrawala, M.M.Q. Mirza, C. Conde, K. O’Brien, J. Pulhin, R. Pulwarty, B. Smit and K. Takahashi: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 717-743(2007)
“Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. Climate Change 2007”
8) 高橋潔：ESTRELA、No.164, pp.2-10 (2007)
「温暖化影響はどのようなものが懸念されているか」
9) 高橋潔：水文・水資源学会誌、21 (6), 480 (2008)

「温暖化影響・適応研究」の張り目

10) 高橋潔：水循環 貯留と浸透、71, 17-23 (2009)
「温暖化影響・適応評価研究における気候予測情報の利用－現状と今後の課題－」

11) 高橋潔：環境科学会誌、22 (1), 53-56(2009)
「気候変動により引き起こされる影響の予測と評価に関する研究」

12) 高橋潔：River Front、66, 21-24 (2009)
「温暖化影響予測研究の新展開」

13) 高橋潔, 肱岡靖明：全国環境研会誌、34(2), 9-15 (2009)
「地球温暖化影響研究の現状」

14) 宮崎真, 高橋潔, 沖大幹：水文・水資源学会誌, 23 (2), 157-170 (2010)
「IPCC第4次評価報告書第2作業部会による気候変動影響・適応・脆弱性に関する最新の科学的知見と今後の課題」

（２）口頭発表（学会）

1) 高橋潔：第９回日本生態学会公開講演会 (2006)
「危険な水準の温暖化」はいかにして回避することが可能か？

2) 高橋潔：気候影響・利用研究会シンポジウム「地球温暖化・適応策」(2006)
「適応研究の類型整理と課題検討」

3) Masutomi, Y. and Y.Matsuoka：Asia Oceania Geosciences Society 3rd Annual Meeting (2006)
“Development and Validation of Global Drainage Basin Database in Asia-Pacific Region (GDBD-AP)”

4) 増冨祐司、乾祐介、松岡譲：第14回地球環境シンポジウム(2006)
「世界流域データベースの開発」

5) 増冨祐司、乾祐介、高橋潔、松岡譲：水文・水資源学会 (2006)
「世界流域データベースの開発」

6) 花崎直太、鼎信次郎、沖大幹：水文・水資源学会2006年研究発表会 (2006)
「統合水資源モデルによる地球温暖化に伴う世界の水需給変化の推定」

7) 肱岡靖明、高橋潔、原沢英夫、久保田泉、増井利彦、亀山康子、花崎直太：第34回環境システム研究論文発表会講演集、13-18 (2006)
「長期目標設定に資する温暖化影響データベースの開発」

8) Masutomi, Y., and Y. Matsuoka：3rd APHW Conference (2006)
“Development and Validation of Global Drainage Basin Database in Asia-Pacific Region (GDBD-AP)”

9) 肱岡靖明、高橋潔、久保田泉：第20回環境研究発表会 (2006)
「統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価」

10) 久保田泉、高橋潔、肱岡靖明:第20回環境研究発表会 (2006)
「政策決定支援のための適応研究に関する検討」

11) Hanasaki, N., S. Kanae, and T. Oki：Hydrology delivering Earth System Science to

Society (2007)
"An integrated model for global water resources assessments: A perspective on sub-annual variation in renewable freshwater and water use"
12) 増冨祐司、花崎直太、高橋潔、肱岡靖明、松岡譲:第51回水工学講演会 (2007)
「季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価」
13) 花崎直太、内海信幸、山田智子、沈彦俊、Magnus Bengtsson、大瀧雅寛、鼎信次郎、沖大幹：第51回水工学講演会 (2007)
「温暖化時の水資源影響評価のための全球統合水資源モデルの開発」
14) Naota Hanasaki, Shinjiro Kanae and Taikan Oki: EGU General Assembly 2007, Wien (2007)
"A global water resources assessment under climate change: A perspective on sub-annual variation in water resources and water use"
15) 花崎直太、増冨祐司、高橋潔、肱岡靖明、原沢英夫、松岡譲：第35回研究論文発表会、東京(2007)「温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発」
16) Masutomi Y.：2nd. Climate Risk Assessment Workshop (2008)
"Risk Assessment of Climate Change for Crop Productivity in Asia"
17) Masutomi Y.: 13th. AIM International Workshop (2008)
"Risk Assessment of Climate Change for Crop Productivity in Asia"
18) Masutomi Y., Takahashi K., Harasawa H., Matsuoka Y.：ISAM2008 (2008)
"Impact Assessment of Climate Change for Crop Productivity in Asia Considering Uncertainties in Climate Modeling and Emission Scenarios"
19) Masutomi, Y., Takahashi K., Harasawa, H., Matsuoka, Y.: Food Security and Environmental Change, University of Oxford, UK (2-4 April 2008)
"Impact assessment of climate change for rice in Asia under uncertainties in future climate projection"
20) 増冨祐司、高橋潔、原沢英夫、松岡譲：土木学会第16回地球環境シンポジウム、岡山(2008)
「気候変化の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稲生産量に及ぼす影響及びその適応策の評価」
21) 高橋潔：気候変動将来推計情報の水文分野での利用促進シンポジウム，同予稿集，123 (2008)
「AR5へ向けた動向」
22) 高橋潔：日本地球惑星科学連合 2008年大会，同予稿集，U052-006 (2008)
「地球温暖化の影響リスクとその適応策(IPCC第4次評価報告書をふまえた今後の研究課題)」
23) Takahashi K. : Int.Workshop Integrated Responses Clim.Change (2008)
"Introduction to studies on climate change impacts in Japan"
24) 高橋潔、松井哲哉、肱岡靖明、田中信行、原沢英夫：土木学会第16回地球環境シンポジウム，岡山 (2008)
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
25) 川越清樹、風間聡、肱岡靖明、高橋潔：土木学会第53回水工学講演会，東京 (2009)「斜

面崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用」

26) Takahashi K.：IR3S/Tyndall Centre Joint Symposium, Norwich (2009)
“Integrated tool of climate change impact assessment for policy discussion of stabilization targets (AIM/Impact [Policy])”

27) Matsui T., Takahashi K., Tanaka N., Hijioka Y., Horikawa M., Yagihashi T., Harasawa H.： 10th Int.Congr.Ecol., Brisbane (2009)
“Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech(Fagus crenata) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan”

28) Hijioka Y., Takahashi K., Mimura N, Kazama S, Kawagoe S, Tanaka N, Matsui T., Daimaru H., Nakamura K., Yokozawa M., Iizumi T., Suzuki T., Honda Y., Ohno E., Morisugi H., Hanasaki N., Harasawa H.：The 4degrees and beyond conference, Oxford (2009)
“Implications of 4 degree C in Japan -- Quantitative analysis of sectoral impacts of climate change in Japan using an integrated assessment model, AIM/Impact[Policy] -- ”

29) Takahashi K.: Tyndall Lecture Series, Southampton (2009)
“Climate change impact assessment -An integration tool to aid policy discussion and stabilisation targets-”

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 日経産業新聞（2008年8月14日、「先端技術」掲載）
2) 気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－（環境省地球温暖化影響・適応研究委員会、2008.6）への執筆
3) 地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム）の公表をうけて、研究成果各種新聞・インターネット等で掲載された。
4) 地球温暖化「日本への影響」－長期的な気候安定化レベルと影響リスクの見通し－（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム）の公表をうけて、研究成果各種新聞・インターネット等で掲載された。

（６）その他

土木学会地球環境委員会　平成21年度地球環境論文賞，表彰論文：
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」（2009年9月）

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

１．統合評価モデルによる温暖化の危険な水準と安定化経路に関する研究

旧（４）気候変動に関するリスクマネージメント方法論の確立に関する研究

株式会社三菱総合研究所

先進ビジネス推進センター　環境フロンティア事業推進グループ　吉田直樹・坂尾知彦

環境･エネルギー研究本部　地球温暖化対策研究グループ　鬼頭孝通・葦津紗恵

資源システム研究グループ　伊藤綾子

平成19年度合計予算額　10,441千円

※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］環境負荷の増大に伴う気候変動リスクへの社会的関心の高まりのもと、IPCCなどによって示された研究成果をはじめとする科学的知見の蓄積が進展、さらには資源配分の効率性と公平性の両面において気候変動リスクをめぐる社会的な費用負担感が増大するなか、当該リスクの特性を考慮した「リスク」ベースの取組や意思決定が求められている。気候セキュリティへの対応を念頭に、気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の意味を、特にその期待効果の面から探ってみると、「気候変動起因リスク研究の統合化・総合化に向けたプラットフォームの形成」「気候変動起因リスク事象等の比較・評価フレームならびにツールの提供」「『科学』『社会』間のコミュニケーション・フレームならびにツールの提供」等を挙げることができる。気候変動問題はその特性が故に、そのリスクそのものの利害関係者間での理解・共有の促進、関係者間での相互調整と協働関係の形成に資する「リスクコミュニケーション」の意義は極めて大きい。具体的には、①気候変動リスクへの対策（緩和策・適応策）実施それ自体の必要性・重要性や優先順位づけに関する社会的合意の形成、②国民運動の促進・定着や企業のCSR行動の喚起など主に規範的・倫理的側面への働きかけを中心とした気候変動リスクへの対策（緩和策・適応策）実施に当たっての実効性の向上、③気候変動リスクの不確実性や予見不可能な事象発生への社会的対応力の強化、等への寄与が期待される。一方で、気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の具現化に向けた主な課題としては、「波及的影響領域や高温化シナリオ領域等の未想定領域の存在」「リスク影響対象（主体）の多様性」「多彩な研究領域の広範な主体の参画と研究データや研究成果等に関する情報共有・知見統合等の難しさ」「科学的不確実性の存在」「『リスク』ベース情報の取扱いに対するリテラシーの不十分さや仕組み・体制の未整備」「主に政策面や対策反映面でのマネジメントシステムの未整備」等を指摘し得る。

［キーワード］気候変動影響、リスクマネジメント、気候セキュリティ、不確実性、適応脆弱性

１．はじめに

気候変動枠組み条約における究極目標の達成への道筋において、科学的知識に関する認識、課題の共有化、それらを踏まえた研究の推進、強化等を進めつつ、気候変動リスクマネジメントの

仕組みの構築を図っていくことが重要である。こうした観点から、本研究では、既存関連文献等の収集、レビュー等とともに、推進費戦略研究課題における中核研究者から構成した「気候変動リスクフォーラム」の運営支援等を行い、これらを通じて得た知見等を踏まえ、気候変動がもたらす中長期的なリスクの評価、コミュニケーション等を含む、気候変動リスクマネージメントシステム構築の方向、課題等について検討、整理等を実施した。

２．研究目的

気候変動枠組み条約の究極目的とその達成の道筋に関しては、科学的知識に関する共通認識、および気候変動問題に関するリスクマネジメントの方法が重要である。特に、気候変動に関するリスクマネジメントの方法を確立するために、関連する推進費研究の中核的研究者からなるフォーラムにより、研究の知見を統合することが重要である。本研究は、気候変動がもたらす中長期的なリスクを評価する方法を既存の文献等をレビューするとともに、リスクを低減するための方法およびリスクコミュニケーションのあり方に関する研究を行う。

３．研究方法

（１）気候変動がもたらす中長期的なリスクを評価する方法に関する検討

IPCC第四次評価報告書など、気候変動とその中長期的なリスクを扱う研究論文・報告書等をレビューし、気候変動のもたらす中長期的なリスクの概念を整理するとともに、現状把握や将来予測など評価方法のあり方についての知見を整理する。

（２）リスクを低減するための方法およびリスクコミュニケーションのあり方

推進費の戦略研究課題の中核研究者からなる気候変動リスクに関するフォーラムの運営を行うとともに、（１）で得た知見も考慮して、リスクマネジメントにより被害を低減するための方法や、リスクコミュニケーションのあり方について整理する。

４．結果・考察

（１）気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の背景と狙い

１)気候安全保障に関わる議論[1-8)]

2007年に公表されたIPCC第４次評価報告書は、ここ100年の地球の平均気温は0.74℃上昇しており、すべての大陸とほとんどの海洋で、雪氷、生態系、人間社会に影響が顕在化していることを明らかにした。また、この25年の気温上昇速度をみると温暖化が加速傾向にあり、気候システムのフィードバックなどが要因として挙げられている。

すでに温暖化が進行しており、さらに今後温暖化が進行することによって、食料、水、沿岸、健康など種々の分野や地域で温暖化の影響が深刻化すると予測されている。加えて、温暖化によって引き起こされる様々な自然現象への影響が食料安全保障、水安全保障、エネルギー安全保障など人間の生存や活動の基礎を提供している環境資源や社会経済への影響を通じ、世界の平和を脅かすとの予測もあり、安全保障（security）の問題との認識も出てきている。

気候変動問題を安全保障(security)の問題としてとらえることは、1970年代から行われている。国家の安全保障としての食料問題を位置づけ、また1990年代には地球環境問題の人間社会的側面

研究プロジェクト（IHDP)が開始され、人間安全保障や環境安全保障が重要なテーマとなっていた。この流れについては、2000年以降はハーバード大学などが提唱し、進められてきた持続可能性科学（Sustainability Science）へとつながっている。また、2003年に出されたペンタゴンレポートでは、急激な気候変化を想定したシナリオ分析にもとづいて米国が安全保障を検討していること自体が話題となった[9]。

２)気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の必要性と狙い

気候変動問題をリスクとしてどう考え、すでに始まっている温暖化をどの程度までにとどめられれば適応可能なのか、リスクマネジメントの考え方を導入して検討を進める時期に来ている。

気候安全保障を検討する際には、これまで気候変動分野で主に取り組まれてきた影響評価、適応策研究に加え、①「4～5℃を超えるような気温上昇が起きた場合（従来の影響研究は4℃程度までの気候予測値にもとづいて行われてきた）」、②「気温上昇は2～3℃にとどまるが、直接的な影響に加えて、波及的、連鎖的な影響が発生する場合（気候変動と食料需給、などの研究はあったが、水、食料、健康など相互に関連し、気候変動からの波及が総合的なリスクとなる可能性もある）」について検討する必要がある（図１）。気候安全保障の観点からは、現状の影響・リスク評価でカバーできていない領域も含めた、気候変化の高いリスクシナリオの想定と影響評価、対応方針の構築及びそれらについての意思決定や合意形成の仕組みが重要となる。

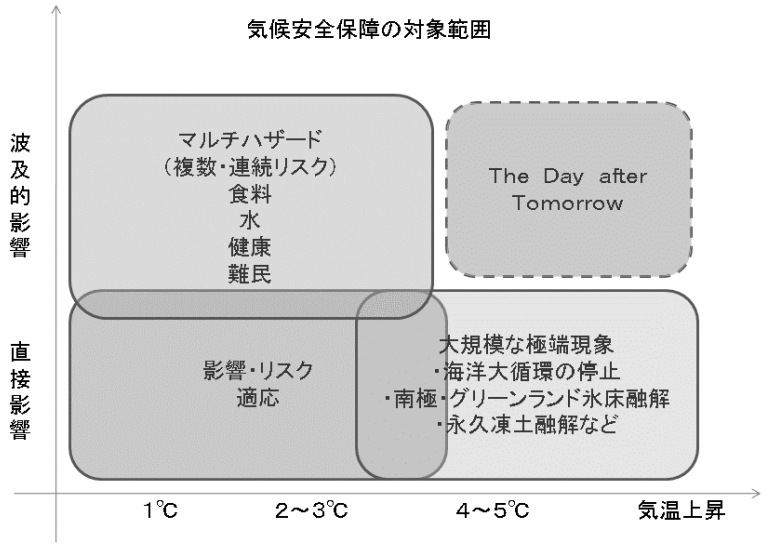


図１　気候安全保障の対象範囲

（２）リスクマネジメントから見た気候変動問題

１)一般的なリスクマネジメント手法と適用事例

a. 一般的なリスクマネジメントの定義

リスクマネジメントの一般的な定義は「組織（個人を含む）にとって起きて欲しくない事象（リスク）に対して、対応法を合理的に意思決定するための活動であり、その意思決定に基づき、検討された対応を実践すること」とされている。起きて欲しくないある事象が発生する前になんらかの対策を打つものを狭義のリスクマネジメントとし、何らかの危機発生後の活動を危機管理という。狭義のリスクマネジメントと危機管理をあわせたものを広義のリスクマネジメントという。

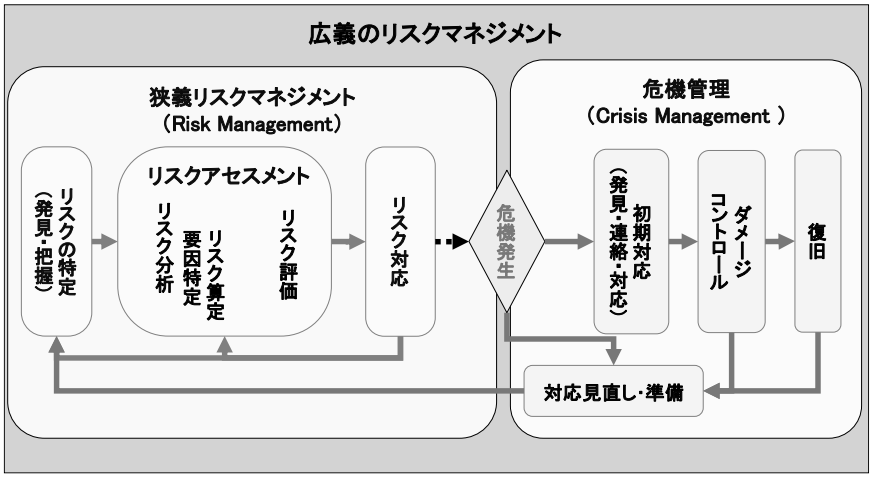


図２　リスクマネジメントの全体像

b. リスクマネジメントの全体像と手順

狭義のリスクマネジメントでは、①「どのようなリスクがあるかを特定（発見・把握）」、②「それらのリスクをアセスメント」し、これに基づき、③「リスクへの対応（回避・低減・移転・保有等）」を決める。リスクアセスメントとは、要因を特定し、リスクの大きさや確立を算定（リスク分析）し、何らかのリスクの基準に照らしてリスクの取扱い方針を決定（リスク評価）するという全体的なプロセスを指す（図２）。まず、リスク分析のフレームや検討範囲を明確にする必要があるため、原因と結果の関係性等、フレーム設定に必要な情報収集を行う。リスク算定においては、被害規模の考え方として、定量値の場合には被害額や被害人数（死傷者数、健康障害者数など）、定性値の場合には影響範囲や影響時間などが考えられる。また、リスクの指標として、個人リスクと集団リスクが採用されるケースが多い。個人リスクとは、ハザードを有する活動の周辺のある場所に存在する無対策な人の平均年間死亡確率であり、場所の関数として表される。集団リスクとは、例えば政策的な立場からリスクを捉える時によく使われる指標であり、ハザードを有する活動の周辺に存在するＮ以上人が死亡する年間確率であり、Ｎの関数である。リスク評価は、何らかの基準に照らして評価するプロセスである。リスク受容の可否の基準を決めるプロセスであり、社会的な基準・公的な基準・自社基準（企業の場合）等が考えられる。リスク評価ののち、基準に照らしてリスク対応方針を検討する。リスク対応の方法については、大きく分けて「リスク保有」、「リスク回避」、「リスク低減」、「リスク移転」の4つの概念がある。

２)気候変動リスクマネジメントに関する既往研究

a. IPCCにおける気候変動リスクマネジメントの取扱い

ｉIPCC 各作業部会（WG）におけるリスク分析・管理の取り扱われ方

IPCC第３次評価報告書（TAR）と第4次評価報告書（AR4）では、「risk」という用語を次のように使っている。

● 第1作業部会（WG1）：リスクという言葉はほとんど使われていなかったが、気候変化の予測では確率的な表現が使われる傾向がある[10)]。

● 第2作業部会（WG2）；リスク分析の土台となる、ハザードの生起確率を提供する立場にあり、今後生じ得る「悪影響」といった意味で「リスク」という言葉が多く使われている[11]。リスク管理・リスク分析といった用語も一部では使われており、「確率的表現を利用した影響評価」を「リスク分析」と呼ぶ場合もある。また、ステークホルダーの意見をもとに、ある閾値を決めて、それを超過する確率を算定して、対策を検討することを、「リスクベース・アプローチ」と呼んでいる。気候、影響、対策費用等に関する不確実性が大きい中で、リスク回避のための対策（主として適応策）を合理的に評価、意思決定、実践する枠組みとして「リスク管理フレームワーク」が紹介されている。

● 第3作業部会（WG3）；WG2と同様に「悪影響」という意味でリスクという言葉が多用されるが、同様に「リスク回避」のための対策として、PDCAに近いリスク管理フレームワークが紹介されている[12]。またリスク管理に近いものとして、「意思決定分析」（DFS：Decision Analytical Frameworks）が使われている。DFSの基本的考え方は、短期的な意思決定の分析は、長期的な気候変化の結果に関する分析と切り離して行うべきではない、ということである。気候の長期目標の評価と感度分析では、マルチシナリオシミュレーションが典型的なアプローチとなっている。気候変化被害の金銭的評価では、排出削減に係る費用と影響をすべて金銭的に評価するものがある。また、逆計算モデルとガードレール分析、不確実性下での意思決定の方法として、ヘッジング戦略と呼ばれるものもある。

ⅱ トップダウンアプローチとボトムアップアプローチ

トップダウンとボトムアップの大きく2つのアプローチがあり、これまでのIPCCではトップダウンアプローチの結果が重視されてきたが、実際の適応策、地域レベル、具体的な現場レベルの検討において、ボトムアップアプローチの重要性が指摘されている。

ⅲ 気候変動の影響、適応脆弱性評価

従来、気候変動の影響、適応評価のアプローチとしては、IPCCの気候変動の影響・適応ガイドラインに示されたように、将来の気候変化の影響リスクを予測して、適応策の立案評価という気候リスクに基づくアプローチを使ってきた。近年リスク分析、管理にもとづく新たなアプローチが提案されている（CCIAV）。新アプローチは、スコーピング、リスク特定、リスク分析、リスク評価、リスク処理の一連のプロセスからなる。

ⅳ リスク管理のフレームワーク

リスク管理のフレームワークも提案されている（図３、図４）。

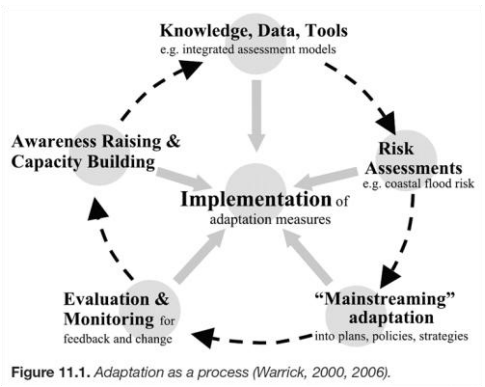


図３ リスク管理フレームワークの例（IPCC AR4）

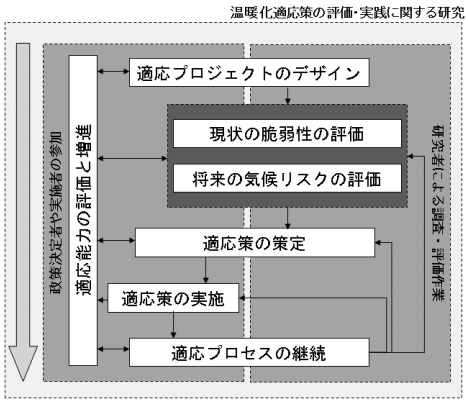


図４ UNDP/GEF の適応政策のフレームワーク

b. **既往の気候変動リスクマネジメント関連研究事例**

気候変動リスクマネジメントに関連する研究事例について、「『抑制策』『適応策』について、（技術的ではなく）社会科学的な観点からの対応方法に言及しており、『対応方法の提案』『対応方法の有効性・頑健性』『対応方法に関する問題提起』等について書かれているもの」という観点から抽出した。安全保障の分野からは、気候変動リスクの一部を他のリスクと共に評価する動きが出てきている。また、「リスクマネジメントの適用方法論についての提言、重要性、課題を示すもの」や、気候変動の影響が指摘されている農業、健康、自然災害分野における「当該分野におけるリスクマネジメントの重要性を指摘するもの」があり、リスクマネジメントの前段として「各分野におけるリスク研究のレビュー（リスクの特定・リスクアセスメント）」、「各分野における適応策の検討（リスク対応）」の研究が進められつつある。気候変動影響が指摘されている各分野の研究から言及されていることの多くは、リスクマネジメントの枠組みにおける「リスク分析のフレーム及び検討範囲の明確化」における課題を指摘している。

- フレーム;気温の平均値の変化ではなく、分散及び極端な場合に特に注目した分析が必要。緩和策、適応策、それぞれの実現に掛かる時間の違いを考慮したタイムスケールでの分析（とその活用）が必要。
- 検討範囲；直接的な自然への影響のみでなく、社会システムを通じた波及的な影響を考慮することが必要。適応策を有効に機能させるために巻き込むべき主体（ボトムアップアによる幅広い主体、途上国、科学と社会科学の連携、他のリスク学分野、等）、及び巻き込み方法の検討が必要。

この背景には、気候変動リスクの特性として①「『影響が表出するまでの時間・対策に掛けられる時間』が非常に長いリスク」、②「『何らかの形で影響を受け得る対象及び影響を与え得る主体』が全世界に広がっている」、③「気候変動のリスクにまだ『科学的に未解明の部分が残されている』」、④「社会の今後の変容による影響が重大である」の４点があると考えられる。

このため、世代を超え、国境や気候との関わり方の違いを越えたリスクマネジメントの実現可能性も視野に入れると、検討のフレームを一意に決めることが難しく、また、影響の大きい検討範囲を限定することが難しいということがある。この他、「リスク評価」における難しさとして、特に「社会システムを通じた複合的な影響」については他の要因との因果関係の強さで、純粋に気候変動の影響を現実から切り分けることができない点、「リスク対応」における多様な主体を巻き込む手段としてのリスクコミュニケーションの重要性、及び直接的に被害を受けた主体への補償など被害からの回復力を維持するための保険のあり方が重要なトピックとして挙がっている。

３)リスクマネジメントの観点からの気候変動リスクの特徴と捉え方

a. 気候変動リスクの全体像

気候変動のリスクの全体像を鳥瞰すると、次のように考えられる（図５）。まず、気候変動リスクは、人為起源の温室効果ガスによる温暖化をトリガーとして、主に、自然・生態システムと、健康・生活等に直接的な影響を及ぼし、また、自然・生態システムへの影響は、社会・経済システムへと影響を及ぼす。さらに、その影響は複合的な影響となって二次的・波及的な影響を及ぼすことが懸念されている。こうした社会・経済を含む影響が全体として健康・生活等の面で人に悪影響を及ぼす可能性が指摘されている。さらに、二次的・波及的な影響がさらに自然・生態シ

ステムに影響を及ぼすような経済構造を作る可能性や、全体の変化・影響が温暖化をさらに加速させるようなフィードバックがかかる可能性もある。

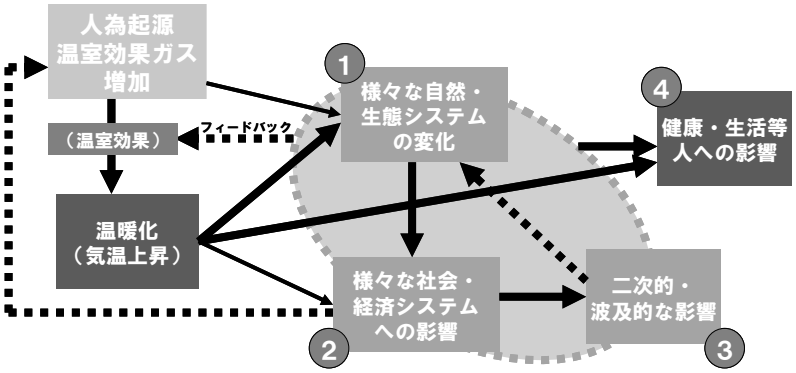


図５　気候変動リスクの全体像

① 様々な自然・生態システムの変化；最低気温の上昇、降雨量の平年量変化、熱波等の発生頻度増大、台風・集中豪雨等の頻度・強度増大、海水面の上昇　等

② 様々な社会・経済システムへの影響；疫病の流行による疾患・死亡脅威の増大、農業を機軸とする経済の困窮、水・食料の世界的な絶対量不足　等

③ 二次的・波及的な影響；各種リスク増大に対応する社会全体での負担増大、水・食料貿易構造の変化による経済摩擦、影響の地域格差を要因とする国際紛争の可能性　等

④ 健康・生活等人への影響；温度・湿度・降雨の変化に伴う生活環境の悪化、土砂災害や暴風雨によるインフラ破壊・怪我・死亡者数の増大、社会・経済システムの変化に伴う貧困や紛争の脅威　等

①は、緩和策以外のリスク対応ができない気候変動影響（リスク）、②は、社会で適応策を検討し得る気候変動リスク、③は、他の社会的な要因との関係でどの程度甚大なものとなるか推測の難しいリスクで、気候変動分野と他の分野との連携による解決が必要とされるリスク、④は、様々なものが含まれるが、特に、価値観や文化等の影響を受け、どの程度まで許容されるかが異なるリスクである。

b. リスクマネジメントの領域と気候変動リスク

リスクマネジメント手法は、様々な社会的リスクへの対応において、そのリスクの特性の違いにより、マネジメントの難しさの性質やそれを克服するための方策が異なる。また、同じリスクへの対処方法は、「科学的で客観的な知識」と「文化的・倫理的な判断」の組み合わせで成り立つため、必ずひとつの正解があるというものではない。

こうした観点から、池田[13)]では、リスクマネジメントの領域を「知識の不確かさの程度」と「リスク事象の結果に対する社会的受容の程度」という２つの軸で整理している。この２軸に当てはめると気候変動リスクは、「温暖化」という現象に関しては徐々に不確実性が低くなってきたものの、「結果として引き起こされる望ましくない事態」に関しては、非常に不確実性が高い。また、望ましくない結果の評価の受容性は極めて低く、また、立場、国家、世代によっても受容性が異なることが指摘されている。このため、気候変動リスクのマネジメントにおいては、不確実性の評価手法の発展に加え、リスクの協治へ向けた合意形成・社会的認識の共有化に向けたリス

クコミュニケーションの強化が重要となる。

c．他分野におけるリスクマネジメント手法と長期気候変動政策決定

現在の長期気候変動政策決定の手順では、適応策をリスクへの対応策ではなく、危険なレベルの同定の中で扱い、リスク対応策は、「温室効果ガスをいつまでにどれだけ減らすべきか」に限定している。気候変動政策の目標は、気候変動によるマイナスの影響（リスク）をなんらかの方策・政策の実施により、「必要なレベル」まで軽減することにある。

ⅰ防災・減災と緩和・適応

考え方の似たリスクマネジメントとしては、巨大な自然災害への対応における「防災」と「減災」の考え方に基づく「設計外力」という考え方を挙げることができる。一般に、作用する自然外力が大きくなるほど被害は大きくなるため、ある程度の大きさまでは、堤防、橋や河川構造、建築等の構造物で被害抑止を図り、超過外力に対しては被害の軽減で対応する。ハード防災対策中心で対応する自然外力の大きさを「設計外力」とする。（緩和策が防災、適応策が減災、温室効果ガス削減量が設計外力に当たる。）

ⅱ閾値と危険なレベル

化学物質等の健康への影響等のリスクについては、閾値のある場合とない場合で、異なるリスク評価の手法を取っている。こうした考え方は、気候変動リスクのうち、気候システムを不安定にする熱塩循環の停止、不可逆的な海面上昇を引き起こす西南極氷床・グリーンランド氷床の融解、急激な温室効果ガスの放出を引き起こす永久凍土の融解など、ある一定の枠を超えた気温上昇によって発現する影響への対応の考え方に応用できる可能性がある。

ⅲマネジメント対象としての気候変動リスクの特性

一般的なリスクマネジメント手法、適用分野との比較において、気候変動問題の特徴を挙げると、「『影響が表出するまでの時間・対策に掛けられる時間』が非常に長いリスク」、「『何らかの形で影響を受け得る対象及び影響を与え得る主体』が全世界に広がっている」、「気候変動のリスクにまだ『科学的に未解明の部分が残されている』」、「社会の今後の変容による影響が重大である」などの点がある。

このため、「見えていない(要素・規模・影響地域等)・実感しにくい（潜在的進行等）リスク」、「空間的（国際間）、時間的（世代間）広がりの中で多様な主体が関係」、「被害・加害の関係性が複雑で、実効ある緩和策には様々な主体の関与・努力も必要」といったリスクマネジメント手法の適用を難しくする要素を持っている。一般的に行われているリスクマネジメントは、科学的知見が十分に得られることを前提として、リスクを詳細に分析、把握したうえで効果が最大になりように合理的な対策を施すもので、意思決定分析のアプローチによっている。これに対し、科学的知見の不足などの不確実性があることを認めた上で予防的に動くものは、予防原則に基づいたマネジメントと呼ばれその重要性が指摘されはじめている。気候変動問題の他、低周波電磁界や遺伝子組換え食品のように、不確実性が高く、かつ深刻な事態が想定される場合には、予防原則に基づいたマネジメントにおいて社会的な決断を行う必要があると考えられている。

（３）気候変動リスクマネジメントシステム構築に向けて

１)気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の基本的な方向－期待効果と課題

a. リスクマネジメント手法適用の基本的な考え方ならびに期待効果

気候セキュリティへの対応を念頭に、気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の意味を、特にその期待効果の面から探ってみると、例えば、次に示すような諸点を指摘し得る。

ⅰ気候変動起因リスク研究の統合化・総合化に向けたプラットフォームの形成

基本変動問題へのリスクマネジメント手法の適用によって、第一に、基本変動に起因する多様なリスク研究の統合化・総合化に向けたプラットフォームの形成が期待される。

気候変動問題における「リスクマネジメント」の定義（マネジメントの実施主体、目的、リスク分析のフレームや、検討範囲等）、計測指標等を明確化し、共有した上で、研究の成果をそうした指標等で表現していく必要がある。このため、様々な研究分野、研究主体によって提出された成果を理解し、「成果の統合」を行うことも、ひとつの研究領域として認知し、高い評価を与えていく雰囲気を醸成し、仕組みを形成していくことも重要である。

ⅱ気候変動起因リスク事象等の比較・評価フレームならびにツールの提供

第二に、気候変動に起因する各種リスク事象を比較・評価する上での基本フレームが提供され、その具体的ツールになり得ることが期待される。

ⅲ「科学」「社会」間のコミュニケーション・フレームならびツールの提供

第三に、社会全体での「リスク」への適切な対応という観点から、政策決定者はもとより、産業界や多くの市民等を巻き込んだ、いわゆる「科学」と「社会」との間のコミュニケーションを図っていく上での基本フレームが提供され、その具体的ツールになり得ることが期待される。

２)リスクコミュニケーションの重要性と取組の方向性

今日的な生活スタイルの定着と環境負荷の増大に伴う気候変動リスクへの社会的関心の高まりのもと、IPCCの成果報告をはじめとする科学的知見の蓄積が進展し、さらに、資源配分の効率性と公平性の両面において気候変動リスクをめぐる社会的な費用負担感が増大するなか、当該リスクの特性を考慮した「リスク」ベースの取組や意思決定が求められる。

昨今、ある一定の制度化のもとでの「統治（government）」に替わって、多様かつ分散した利害関係者が、多様な組織や関係性（ネットワーク）を通じて、それぞれの自律性を十分に保ちつつも調整、すなわち「協治（governance）」を行って、社会的なリスクに対応していくというマネジメントの方向性についても概念提起がなされてきている。こうした観点から、特に、科学的知見の不確実性、影響の潜在的進行、影響に関る利害関係者の空間的時間的広がりと複雑性等の特徴を有する気候変動問題では、当該リスクそのものの本質的特性に関する利害関係者間での理解・共有の促進とともに、関係者間での相互調整と協働関係の形成に資する「リスクコミュニケーション」の意義は極めて大きいと言える。気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用を図っていく上で、リスクコミュニケーションについて、①気候変動リスクへの対策（緩和策・適応策）実施それ自体の必要性・重要性や優先順位づけに関する社会的合意の形成、②国民運動の促進・定着や企業のCSR行動の喚起など主に規範的・倫理的側面への働きかけを中心とした気候変動リスクへの対策（緩和策・適応策）実施に当たっての実効性の向上、③気候変動リスクの不確実性や予見不可能な事象発生への社会的対応力の強化、などといった諸点への寄与が期待される。

３)リスクマネジメント手法適用の具現化に向けた課題

前述のような期待効果を実現するにあたり、気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用の具現化に向けた主な課題としては、次に示す諸点を指摘し得る。

a. リスク特定・シナリオ記述の観点からの諸課題

気候変動問題へのリスクマネジメント手法適用について考えていく上で、例えば、食料・水・健康・難民など複数・連続リスク事象（マルチハザード）による波及的影響領域や、海洋大循環の停止、南極・グリーンランド氷床の融解、永久凍土の融解など大規模な極端現象が考えられる高温化シナリオ領域等の未想定領域が存在しており、これらに対する取扱いが問われる。適切、実効的なリスクマネジメントシステムの構築のためには、「波及的影響領域」、「高温化シナリオ」領域におけるリスクの把握は欠かせないプロセスである。リスクマネジメントシステム適用の重要な目的の一つである、社会合意の形成の観点からも、多くのステークホルダーの関心の高いリスクの把握は非常に重要性が高い。気候変動問題へのリスクマネジメント手法の具体的適用に当たっては、例えば、国家それ自身をはじめ、経済社会、都市、市民生活、生態系など、リスクの影響対象（影響主体）として多様なものが考えられ、このような多様性を前提としたリスクの特定ならびに適切なシナリオ記述の面での難しさが想定される。

b. リスク評価の観点からの諸課題

気候変動に起因する様々なリスクに関わる多彩な研究領域と広範な主体の参画が必要であり、これらの研究データや成果研究等に関する効率的な情報共有、適切な知見統合等の面での難しさが想定される。気候変動、温暖化によって生ずる可能性のある事象は、既に、それらの事象における専門的な研究が進展している領域もある。気候変動に特有の影響等以外の問題について、関係する研究コミュニティとの連携、コミュニケーション強化を図っていくことも、影響・リスク研究、リスクマネジメントシステム構築にとって重要である。また、時間的・空間的広がりを有する気候変動問題の取り扱いそれ自体に内在する科学的不確実性を前提とした上でのリスク評価の実施に難しさが想定される。気候変動研究は、極めて社会への影響の大きい研究領域である。したがって、研究成果が社会合意の形成、政策決定に直接、間接に多大な影響を及ぼし得ることが想定される。一方で、研究対象の特性等から、多岐、多様な不確実性等の残存、保有を回避し難い面を持つ。しかし気候変動問題に対する（社会の）方針、戦略の構築、そして合意形成のために、科学が担っている役割は極めて大きく、従来のサイエンスコミュニティ内の価値観を超え、気候変動問題の解決に向けての新たな価値軸を創造、構築していくことも、重要な課題と思われる。

c. マネジメントシステム構築の観点からの諸課題

気候変動問題へのリスクマネジメントの効果的な実現に向け、取組に関与する主体には「リスク」ベースの情報を取り扱うための十分な素養が求められる。適切に情報を取り扱う仕組みや体制の整備、とりわけ政策・対策へ科学的知見を反映する仕組みの整備が重要と考えられる。

リスクマネジメントは、それが組織等におけるシステムとして構築されることで、はじめてその機能が具体化、発揮される。我が国、そして世界における意思決定、合意形成の仕組みとして気候変動リスクマネジメントシステムを組み込み、構築する必要がある。様々なアプローチ（研究コミュニティからの積極的な情報発信や特に大きな被害を受けることが想定される主体の代弁

等）により、その具体化、実現に貢献していくことも重要な課題である。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

気候変動がもたらす中長期的なリスクを評価する方法を検討するために、現状把握や将来予測など評価方法のあり方についての知見を整理し、リスクマネジメントにより被害を低減するための方法や、リスクコミュニケーションのあり方について整理したことにより、温暖化影響評価研究の今後の在り方に対して重要な示唆を与えることが出来た。

（２）地球環境政策への貢献

気候変動がもたらす中長期的なリスクの評価、コミュニケーション等を含む、気候変動リスクマネージメントシステム構築の方向、課題等についての検討・整理は、地球環境政策においてリスクをどのように捉えるべきかについて有用な示唆を与えうる。

６．引用文献

1) Campbell, K.M. et al. (2007) The Age of Consequences: The Foreign Policy and National Security Implications of Global Climate Change, 119pp.
2) Center for Naval Analysis(CNA) (2007) Climate Change Poses Serious Threat To U.S. National Security.
3) Center for Strategic and International Studies (CSIS) and Center for a New American Security (CNAS) (2007) The Age of Consequences: The Foreign Policy and National Security Implications for Global Climate Change, 119pp.
4) Evan Mills, et al. (2005) Insurance in a Climate of Change, Science
5) Foley, J.A. (2005) Tipping points in the Tundra, Science, 310, 627-628.
6) German Advisory Council on Global Change (WBGU) (2007) Climate change as a Security Risk.
7) IISD (2007) Strategic Survey 2007, Routledge, 420pp.
8) International Institute for Strategic Studies(IISS) (2007) Strategic Survey 2007 The Annual Review of World Affairs,Routledge, 420pp.
9) Schwartz, P. and D. Randall (2003) An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security, 22p.
10) IPCC (2007a) Climate Change 2007 The Natural Science Basis.
11) IPCC (2007b) Climate Change 2007 Impacts, Adaptation and Vulnerability.
12) IPCC (2007c) Climate Change 2007 Mitigation Options.
13) 池田三郎 (2006) リスク社会と計画行政－技術・環境リスクの社会的なガバナンスに向けて, 計画行政, 27(3), 3-11

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文(査読あり)＞

なし

＜その他誌上発表(査読なし)＞

なし

(２)口頭発表(学会)

なし

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの

なし)

（５）マスコミなどへの公表・報道等

なし

（６）その他

なし

課題名	S-4 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 ２－１　温暖化による水資源への影響予測に関する研究		
課題代表者名	風間聡（東北大学 大学院工学研究科）		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	168,679千円（うち21年度 31,789千円） ※予算額は、間接経費を含む。

研究体制

（１）温暖化各レベルに対応する水資源管理への総合影響評価に関する研究（東北大学大学院工学研究科）

（２）温暖化各レベルに対応する農業水需給への影響と適応策に関する研究（独立行政法人　農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究所）

（３）地球温暖化にともなう都市水システムへの影響評価に関する研究（東京大学大学院工学系研究科）

（４）温暖化各レベルに対応する水資源マネジメントの政策オプションに関する研究（国土交通省国土技術政策総合研究所）

（５）温暖化各レベルに対応する洪水リスクの増減評価に関する研究（東京大学生産技術研究所）

Ⅰ.戦略課題S-4-2(1)の全体構成

温暖化に対する水資源の影響評価を農業用水、都市用水（＝生活用水＋工業用水）、水災害（渇水、洪水）、可能水資源量に分けて評価した。それぞれの入力変数として、温暖化に伴う水循環の変化、人口の増減、開発の度合、経済構造の変化、造水技術の進歩等を考え、各評価を包括し、水需給量と経済性から総合評価を行った。その結果を踏まえ、適応政策を議論し、個々や全体の成果を他のプロジェクト課題と情報交換しながらクロスカッティングしつつ研究を行った（図1）。

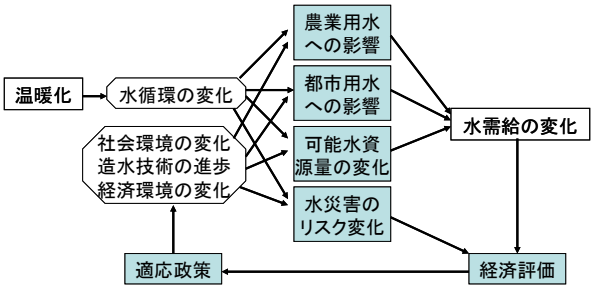


図1　各サブグループの構成

Ⅱ.本研究により得られた科学的成果

本研究成果によって様々な科学的知見を得た。それらをまとめると以下の通りである。1)温室効果ガスの安定濃度と水災害の被害の関係を初めて明らかにした。また、発現年と被害額の関係も明らかにした。2)温暖化による水稲への影響と灌漑用水の適応策が示された。3)温暖化による都市河川の水質への影響が明らかになった。4)農業用水及び都市用水の取排水、地下水流動等流域内の水収支を明らかにするとともに、魚類の産卵床、景観等河川環境保全のために必要な維持流量にも配慮する流域内水収支評価モデルを構築した。5)グローバル並びに地域的に水ストレスの高い流域の住民人口比が、社会経済的なデータとGCMの出力結果を用いて、気温の関数として見積もられた。全球、地域スケールの水資源についてGCMを用いた将来の評価が可能になった。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献

水資源分野において地球環境政策への貢献を様々な局面で行った。主なものをあげると以下の通りである。1)国土交通省における融雪出水の検討会や宮城県の水循環審議会において、本研究成果である洪水被害解析結果が資料として利用された。2)「地球温暖化「日本の影響」-最新の科学的知見-」の執筆、環境省地球温暖化影響・適応研究委員会水環境・水資源分野に貢献。3)地球温暖化などによる異常気象発生時の農業用水供給に関する問題点を整理し、事前に備えるような対策を提

言した。4)地球温暖化による気温上昇が水源水質や生態環境に与える問題に対して事前に備えるような対策を提言することができる成果を出した。5)気候変動時の流域水マネジメント渇水時における各利水者の水需給を調整する際の一助となるよう、他水系と地下水等の水源の節水率を調整するための水需給把握システムを構築した。6)将来の気候変動による地球規模の水資源問題を地域毎に議論することが可能となった。

IV.研究概要

１．序

世界各国で多発する既往最大の渇水や洪水は、気候変動が原因と疑われている。気候モデルによって温暖化と渇水や洪水の関係も一部明らかにされつつある。人間の生存、健康で文化的な生活、十分な食料供給、健全な生態系維持等に水資源は不可欠であり、温暖化が水資源に与える影響の包括的かつ総合的な評価および適応策の提示が求められている。

水資源問題は、生態系維持や水質に伴う健康、食料等の多くの領域に影響するため、温暖化問題の中心的な役割を担う。これらの影響を定量的に総合モデル化することにより、予期せぬ現象に対しても柔軟に対応できることになるので、その重要性は高い位置にある。温暖化政策を実行するには住民の支持が必要である。総合定量評価モデルによって作成された各種の評価マップは、政策の効果に対する住民の理解を平易にする。また、適応策重点地域を特定できる。これらは、温暖化政策を滞りなく遂行するにあたり、重要な成果であると言える。

２．研究目的

気候モデルによって温暖化による水循環の変化はある程度予測がついている。先のIPCC4次レポートでは水資源に与える影響が記述された。しかし、それらは直接的な影響について多く言及し、副次的な影響については、定量的に評価されてはいない。特に適応政策による水資源耐久性の議論は、科学的に評価されていない。そこで、本建久では水資源の大部分を占める農業用水と都市用水（＝生活用水＋工業用水）に分けて、温暖化の副次的な影響を含めた定量総合評価を行う。

水資源への影響は、温度上昇に対して一価関数では表現できず、地域によっても大きく変動する。将来予測において、人口増や開発等の社会環境の変化、貯留施設の新設や再利用、造水等の技術の進展、あるいは防災への投資や保険料の変化等の経済変化は、温暖化による水循環の変化と並んで市民生活へ大きい影響をもつ。政策は、こうした変化をある程度導くことが可能であり、適応策の一部にもなりうる。従来の温暖化による水資源の評価では、こうした政策による適応策を無視しており、正しい水資源評価が十分行われていなかった。本研究は政策の効果も定量評価することを目的とする。

３．研究の方法

（１）温暖化各レベルに対応する水資源管理への総合影響評価に関する研究

洪水氾濫計算には、土地利用毎の粗度係数を一部水深で与え、氾濫流の伝播現象を最も詳細に再現する2次元不等流モデルを採用している。標高、土地利用の数値地理情報を用い、これらはすべて1km×1kmの解像度のグリッドセルデータである。洪水氾濫による被害コストポテンシャルは、氾濫シミュレーションから得られる氾濫水深と浸水期間を分布情報として取り出し、国土数値情報に格納されている15の土地利用分類に従い、治水経済調査マニュアルの「直接被害の対象資産」を参考に、土地利用ごとの計算手順に従って算定した。

土砂災害によるリスク評価は、斜面崩壊の素因、誘因である地形、地質、そして降雨量を含む水文的な条件を用いた多重ロジスティック回帰分析から構成された斜面崩壊発生確率モデルを用いる。降雨量を含む水文的な条件の利用により、気候変動に応じた動的な発生確率を導くことができ、時空間的な発生確率分布の作成も可能である。水文条件である動水勾配は、国土数値情報の表層土壌と斜面傾斜度を用いて擬似二次元化した斜面に日降雨量を入力し、飽和不飽和浸透解析を行うことで求め、降雨発生後の最大傾斜を示す浸潤線から発生確率に用いる動水勾配を得た。経済損失額は、「経済損失額」=「経済価値(経済原単位)」×「規模(面積)」×「斜面崩壊発生確率」をグリッドセル毎に計算した。国土数値情報の土地利用データを用いてグリッドセルあたりの「市街地」、「田」、「畑地」、「森林」の面積を求め、各土地利用の経済原単位を当てはめることで経済損失額を求めた。

（２）温暖化各レベルに対応する農業水需給への影響と適応策に関する研究

日照時間は変化しないと仮定し、生育期間の変化は、積算温度だけで表現できると仮定する。2000

年の国土数値情報の３次元メッシュの気温の月単位の平年値をスプラインで補完して、日気温の平年値を作成した。この気温データを使って、平年値の生育カレンダーを元に、田植～出穂間と出穂～刈取間の積算気温を算出した。次に温度シナリオを変化させて、出穂と刈取日を計算して求めた作物カレンダーで、昨年度と同じ手法で、高温障害の影響を推定した。

また、水田はパイプライン化により夏季の高温障害の抑制効果が期待できる。１地点での評価試算は既に行っているが、ここでは、県別推定を行う。水田面積をパイプライン化したものと、パイプライン化しないものに分け、パイプライン化した部分については、気温の影響を-0.9度減らして評価する。日用水量は、開水路を20mm、パイプラインを13mmとし、積算灌漑推量の比を取る。

水稲の脆弱性評価では、過去の波浪データを扱う上で、次の作業仮説を立てた。①温暖化の指標の高い年のデータには温暖化の影響が多く含まれ、低いデータには影響が少ない。②海岸（波浪観測点）には、温暖化の影響を受けやすい地点と受けにくい地点がある。温暖化の影響を受けやすい地点は、台風の影響を受けやすい。解析手順は以下の通り。①各年のデータを温度指標順に並べ替える。②観測点を台風の影響を受けやすい順に並べ替える。③台風の影響を受けやすい観測点を抽出する。④抽出した観測点に対して、複数の温度指標を対比し、説明力の高い温度指標を抽出する。⑤温度変化が波浪に与える影響を関数化する。

日本の水田は90%以上が灌漑されていると思われ、非灌漑水田の統計データはないため、将来シナリオの検討では灌漑の有無(with/without)を条件とした分析はできない。一方、戦後の灌漑事業を見ると、水が不足がちな地域にダムによる補給水量を増加させる、あるいは地盤沈下対策で、井戸から河川水に転換するなどの傾向が見られる。したがって、量的に見れば、灌漑が拡大する過程と見なせよう。そこで、時系列的に、水稲生産の脆弱性を評価する。日本の1958-2003年の水田反収データを使った。このデータを(1958-1978)、(1963-1983)、(1968-1988)、(1973-1993)、(1978-1998)、(1982-2003)の６つのグループに編集し、各グループの変動係数を計算した。その結果、県×変動係数６個のマトリックスを得た。他方、水稲生産統計で、灌漑水田と天水田が分かれている国もある。この場合には、より明確に、灌漑の有無に伴う脆弱性の評価が可能である。ここでは、タイの水田統計を使って、灌漑の有無に伴う脆弱性の差を変動係数で検討する。エネルギー制約の条件を整理し、エネルギー制約の与える影響と、水田灌漑システムの課題を整理し、考え得る解決策を検討する。

（３）地球温暖化にともなう都市水システムへの影響評価に関する研究

荒川の水質の月間変動について、以下のことが明らかとなった。荒川上流部ではpHが高く、流下に伴ってpHが低下する傾向がみられる。pHは荒川本流では、一年を通じてほぼ変わらない地点と、5月と6月に上昇する地点がある。前者は、中津川合流地点、御成橋、開閉橋などであり、横瀬川の合流地点の上流と、武蔵導水路合流地点から入間川が合流する地点の間である。後者は、親鼻橋、正喜橋、久下橋、及び治水橋と秋ヶ瀬取水堰などであり、横瀬川の合流地点から武蔵導水路の合流地点の間、並びに入間川の合流地点から下流である。荒川支流でも、荒川本川と同様、上流の支川ほどpHが高く、中流から下流に従って、pHは低くなった。荒川支流では、5月と6月に加えて、1月から3月の間にpHが上昇する地点があった（横瀬川の原谷橋、赤平川の赤平橋）。また、市野川と入間川は中流域ながら5月と6月のpH が高く、荒川合流後の治水橋でのpH上昇の原因となっていると考えられた。一方、利根川は、一年を通じてpHが7.5程度に安定していた。さらに、和田吉野川吉見橋では、4月と5月を除いて、pH7.5で安定していた。

（４）温暖化各レベルに対応する水資源マネジメントの政策オプションに関する研究

筑後川の瀬ノ下地点流量は荒瀬地点流量や各種利水の取排水量を基に表した。当該区間では、農業用水水利権が慣行水利権を含めて合計21件、流量にして48.9m^3/s存在するが、その大部分を占めるのが、大石堰、山田堰、恵利堰である。堰地点における取水量から下流の農地にて利水基準年に計画上必要とされる粗用水量を控除して利水量を求めた。なお、床島用水については計画の余水排水量は無く、山田用水については慣行水利であり計画がないことから余水排水量については０m^3/sとして設定している。還元率は、近年における渇水年（H6,H14,H15,H17）とH20年の同時流量観測値のうち、降雨の影響が小さく、安定している時期のデータ及びH21年に本研究で実施した流量観測値のデータを用いて、残流域全体における消費量と取水量の関係から算定した。

当該区間における筑後川の地下水位から当該区間沿川における地下水の流動状況を推定できる。浅層地下水の流動する砂層のボーリングデータの粒径が0.1～0.25mmで小粒径側からの積算分布19%であることから、ほぼ20%であると見なし、20%粒径（D20）と飽和透水係数の関係（クレーガーの表）により透水係数を$k=1.40\times10^{-2}$cm/sと推定した。筑後川中流部沿川での平均的な地下水位横断勾配Ｉは、地下水位観測所と河川水位の関係から、各段面の平均で1/300程度と推定した。当該

区間における平均的な砂層厚（10m）、河川延長から、当該区間における地下水の河川への流入量は、0.26m^3/sと推定した。都市用水については、当該区間において、７箇所、合計6.41m^3/sの水利権が存在し、年・期別に若干の取水量変化が見られるものの、概ね一定の取水が行われている。ここでは、都市用水について、平均取水量（合計4.52m^3/s）で取水され、排水については、下水道排水地点等において、400ﾘｯﾄﾙ/人・日の排水が行われるものと仮定し、４箇所計0.46m^3/sの排水が行われるものと設定した。当該区間においては、主要支川として、左岸隈ノ上川、巨瀬川、高良川、右岸佐田川、小石原川、宝満川のほか、残留域からの流入が存在する。

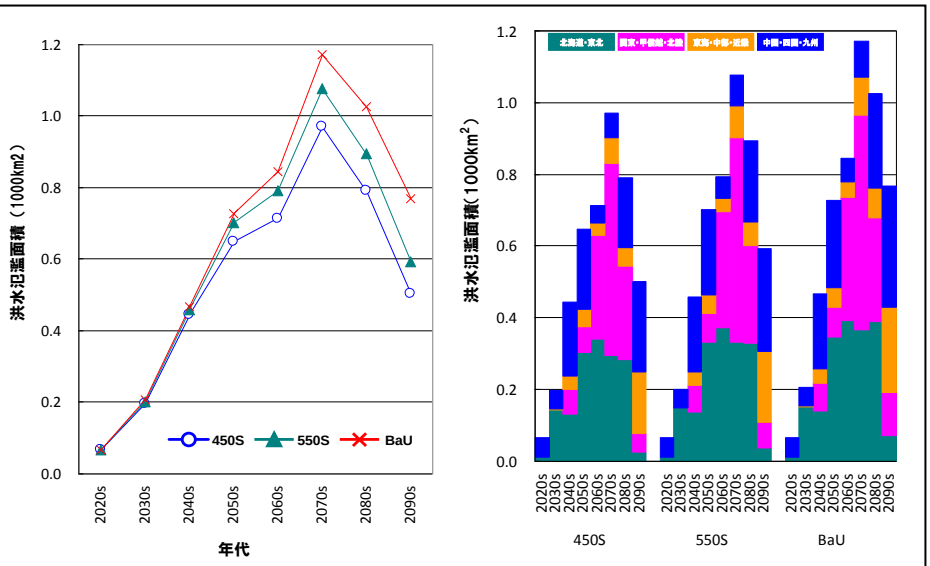


図2　左：1981-2000年を基準（ゼロ）とした場合の洪水氾濫面積（全国平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における浸水面積を試算し，20年間の平均値を表示 。右：1981-2000年を基準（ゼロ）とした場合の洪水氾濫面積（地域平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における浸水面積を試算し，20年間の平均値を表示

（５）温暖化各レベルに対応する洪水リスクの増減評価に関する研究

本研究では、IPCCの最新の温暖化シナリオ（SRES：A1B、A2、B1シナリオ）に基づいて、2つの水ストレス指標を用いた将来の水資源アセスメントを行う。ここで使用する水ストレス指標は、一人あたりの水資源量（Q/Capita）と水資源量に対する水需要費（DIA/Q、DIA:水取水量（domestic, industrial and agricultural water））である。すでにShen et al.（2008）によって算出された時間軸による水資源アセスメントを活用した。

将来水資源量の推計には、IPCC第4次報告書で採用された大循環モデルのうちアメリカ、ヨーロッパ、日本の6機関のモデル（現在気候：GWSP2、将来気候：[アメリカ]NASA/Goddard Institute for SpaceとNational Center for Atmospheric Research、[ヨーロッパ] Max-Planck-InstituteとHadley Center for Climate Prediction、[日本]CCSR/NIESとMRI）が、各温暖化シナリオ（A1B、A2、B1シナリオ）に基づいて算出した流出高の将来予測それぞれを、全球河川流路網モデルTRIP（Total Runoff Integrating Pathways）に入力して得られた1度グリッドの河川流量データを用いた。水需要量の推計は、Shen et al.（2008）によって推定された値を活用した。

以上の推計値に基づいて、水ストレスの計算を河川流域ごとに行った。河川河口部の年流量を河川流域人口で割ったものをその河川流域の一人当たり水資源量とし、河川流域内の取水量を河川河口部の年流量で割ったものをその河川流域の水資源量に対する水需要比とした。

これらの結果を、時間軸の推定から温度軸の推定に置換するため、以下のような手順を行った。各大循環モデルによる時間軸に対応した昇温量を、全球において算出した。それに基づいて、時間軸で算定されている水ストレス人口を線形補間によって算出し、予測される昇温量に対応した水ストレス指標を推定した。

４．結果及び考察

（１）温暖化各レベルに対応する水資源管理への総合影響評価

地球温暖化による水災害の評価として、将来気候について統合モデルを用いて温暖化効果ガスと洪水氾濫被害と斜面災害被害の関係について考察した。その結果、温室効果ガス濃度シナリオ450s、550s、BaUにおける全国の洪水氾濫面積は、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れないが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって氾濫面積に差が現れ、それぞれ最大で約1000km^2、約1100km^2、約1200km^{2}に達すると見込まれる（図2）。地域別では、時期は異なるものの甚大な被害が見込まれ、特に、関東・甲信越・北陸における氾濫面積の大幅な増加が見込ま

れる。全国の450s、550s、BaUにおける最大の斜面崩壊被害コストポテンシャルは、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れず、約0.69兆円/年程度と見込まれるが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって斜面崩壊被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、450sでは今世紀中頃までと余り変わらないが、550sでは最大約0.77兆円/年、BaUでは最大約0.94兆円/年に

達すると見込まれる。

（２）温暖化各レベルに対応する農業水需給への影響と適応策

温暖化に伴う農業用水への影響予測と考えられる適応策を分析し、以下の結論を得た。1)メッシュデータによる水稲高温障害の予測：メッシュ気候値2000の日平均気温による計算の結果、平年値では、一部に、高温障害が生じているが、影響は小さい。+2℃シナリオでは、西日本を中心に、高温障害が発生する。以上は、都道府県毎に1点の平均気温を使った解析と同じ傾向を示している。2)水田パイプライン化の影響：ヒストグラムの最大頻度を見ると、パイプラインがゼロから3倍シナリオの偏差では、収量減少を5～10%抑える効果がある。灌漑用水量は20%程度減少させる効果が期待できる。3)水稲栽培の脆弱性の評価：統計モデルによる波浪の被害は九州と東南海に集中する。この地域では、WAST(Mean monthly Worldwide Temperature bias of Augusts and September, 8月と9月の世界月平均気温偏差)で気温が１度上がると年最大波高のMedianが3.3m増加し、海面上昇により大きな影響を与える。4)将来シナリオに関連する灌漑が水稲生産の脆弱性に与える影響：20年に1回程度の気象変動に対しては、灌漑水田は非灌漑水田より脆弱である。日本の場合、経年的に灌漑域が拡大するに従い、脆弱性が減少する。また、エネルギー面で持続可能な灌漑システムで、なおかつ、水質等の現在抱える課題を解決できる水田灌漑システムに、現在ある灌漑システムを再編することが必要である。これは、同時に、温暖化対策への適合策にもなっている。その場合のキーとなる技術は、分散型貯留と思われる。5）タイでは水資源量により乾期の水田面積を制限し、水田面積決定で総収量の期待値の増大と渇水リスクの増大の組み合わせのベストミックスが選択されれば、灌漑水田と非灌漑水田の脆弱性に差はなくなる。この仮説が正しければ、温暖化により、水資源が減少した場合には、水稲から陸稲といった渇水リスクが変化しないような作物の組み合わせが選択される（図3）。

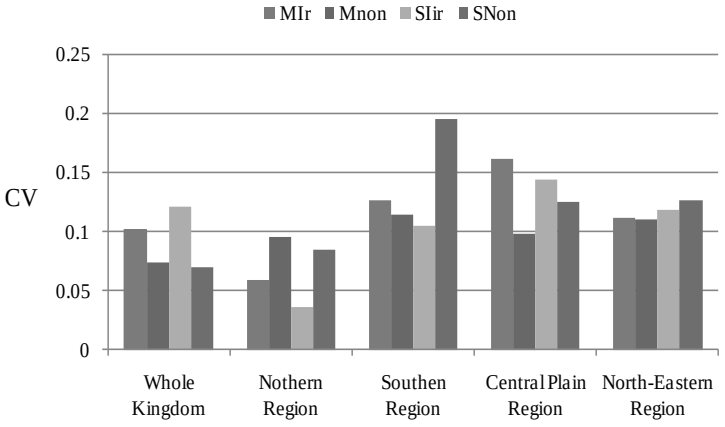


図3 タイの水稲反収の変動係数 （MI:雨期灌漑，MNon:雨期

（３）地球温暖化にともなう都市水システムへの影響評価

これまでの研究で、水道水源となっている河川の水温とアンモニア性窒素とが高い逆相関を示すことが示された。今年度は、荒川流域の荒川本川並びに支川の水質データを用いて、水質変動の現状と、水質変動に影響を与える因子について考察した。特に、pHの上昇は、浄水場において凝集阻害を引き起こし、水質を悪化させるほか、薬品の注入量の増大を招くため、pHの変化に着目した。その結果、荒川下流の秋ヶ瀬取水堰において、年平均のpH及びアルカリ度は、過去40年間に上昇する傾向が見られた。荒川上流部の支川はpHが8以上と高いが、中でも横瀬川は9以上の極めて高いpHであった。これらの支川は荒川本流のpHに影響を及ぼしているが、流下とともにpH は下るため、秋ヶ瀬取水堰での高pHは上流部の河川によるものではなく、中流部以下の支川や荒川本川内でのpH上昇が考えられた。 特に、秋ヶ瀬取水堰において5月から6月にかけてpHとアルカリ度が上昇する原因としては、水温の上昇による藻類の増加が考えられた。秋ヶ瀬取水堰では一年を通して窒素やリンなどの影響塩濃度は高く、藻類の増殖制限因子にはなっていない。このため、水温が上昇する5月から6月にかけてpH、アルカリ度、溶存酸素濃度などの上昇を招いたものと考えられる。その一方で、藻類増殖が起こりにくい1月から3月にかけてpHが上昇する場合もあり、今後は、藻類増殖以外の可能性についても検討が必要である。

（４）温暖化各レベルに対応する水資源マネジメントの政策オプション

日本の年降水量は、年毎の変動幅が広がる傾向があり、かつて観測したことのない著しい少雨となる年も発生している。さらに、今後予想される地球温暖化に伴う気候変動によって、渇水被害が拡大する恐れも想定されるが、これらの現象に適切に対応するためには、節水の普及や安定的な水資源の供給はもちろんのこと、流水の適切な管理を行うことが重要である。しかし、全国的に見ても取排水を含めた表流水及び地下水の流動を含む流域内の水収支の把握については、必ずしも十分な精度で管理が行われていない状況である。このため、大量の農水等の取水がある一方で、河川環境保全への要請も強い筑後川をモデル河川として、流域内水収支評価モデルを構築すべく、筑後川に利水を依存している農業用水及び都市用水の取排水、地下水流動等流域内の水収支を明らかにするとともに、魚類の産卵床、景観等河川環境保全のために必要な維持流量にも配慮するモデルを作成した（図4）。さらに、渇水時において各利水者の水需給を調整する際の一助となるよう、筑後川、他水系、地下水等の水源の節水率を調整するための水需給把握システムの構築を試みた。

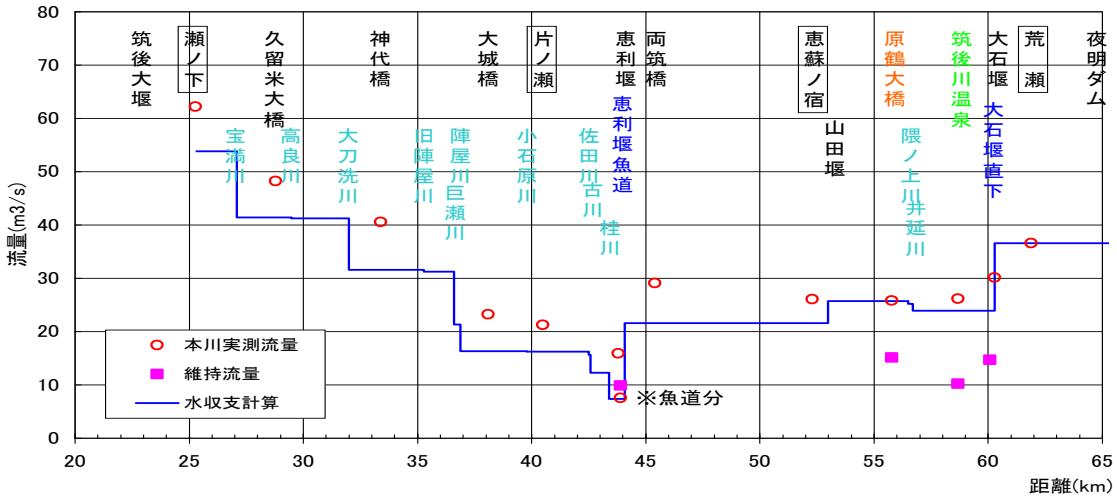


図4　荒瀬～瀬ノ下間の水収支（H21年9月14日）

（５）温暖化各レベルに対応する洪水リスクの増減評価

グローバル並びに地域的に水ストレスの高い流域にすむ人口比が、社会経済的なデータとGCMの出力結果を用いて、気温の関数として見積もられた。世界的にみると、シナリオA2では気温偏差が+1.5度まで急激に上昇する。シナリオA1Bでは、高水ストレス人口比はシナリオA2の場合より少ない。気温偏差が+1.5度を超えると、高水ストレス人口比の増加が緩やかになる。一方、シナリオB1での高水ストレス人口比は、気温偏差が+1.2度を超えると減少に転ずる。気候変動の影響を除去して、つまり流出を一定にして、高水ストレス人口比を見積もった結果によると、高水ストレス人口比は、気候変動の影響の有無にかかわらずあまり変わらない。

次に地域ごとの高水ストレス人口比を示した。特に高水ストレス人口比の高い地域について示す。中東と北アフリカは、現在とても高水ストレス人口比が高い領域である。ここでは、現在高水ストレス人口比は約70%であるが、全シナリオにおいて2050年代には約90%まで上昇する。アジアは、中東・北アフリカに次いで高水ストレス人口比の高い地域である。それでもなお、シナリオA2において、高水ストレス人口比は55%から80%に上昇する。他のシナリオでは約10%上昇する。このような地域による差に関する考察を今後進めていく。

2075年として推定した各GCM、各温暖化シナリオでの気候変動ありとなしとでのW/Qの高水ストレス人口比を示した。気候変動なしでも、高水ストレス人口比はほとんど差がなく、むしろ気候変動を考慮した値の方より大きい。Parry et al.（2001）は、気温偏差が+2度を超えると気候変動の水リスクへの影響は深刻なものになると指摘している。しかし、我々のアセスメントは彼らの指摘とは違う結果を導いた。流出だけでなく社会経済的指標（灌漑面積、工業用水の増加、人口そのものの増加）を用いた水アセスメントを実施すると、気候変動による水リスクへの影響は大きくない。むしろ人口増加など社会経済の変化が大きく影響を与えることを示した（図5）。

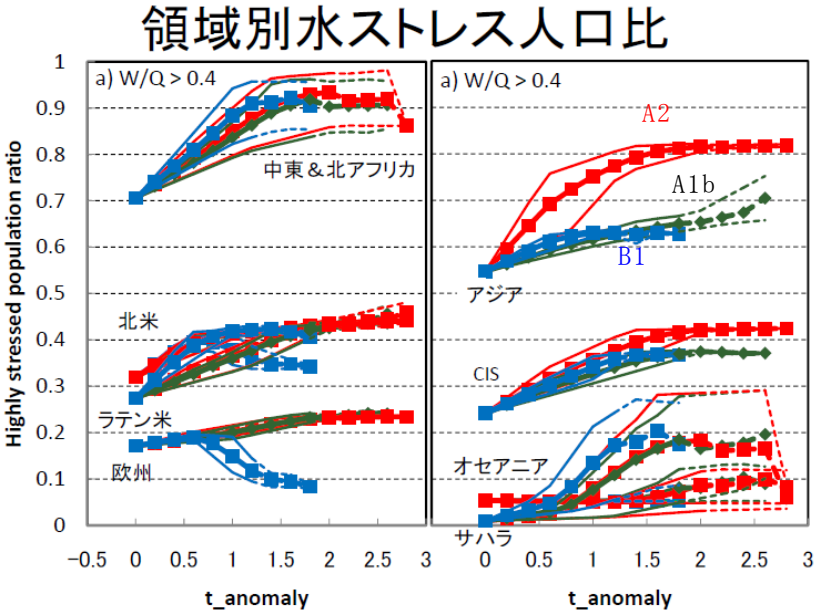


図5　温暖化シナリオにおける領域別の高水ストレス人口比

５．研究者略歴

課題代表者：風間聡

1966年生まれ、東北大学工学部卒業、博士（工学）、
現在東北大学大学院工学研究科准教授

主要参画研究者

（１）：風間聡（同上）

（２）：丹治肇

1954年生まれ、東京大学農学部卒業
現在、農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究所有明海研究チーム長

（３）：滝沢智

1955年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士
現在、東京大学大学院工学系研究科教授

（４）：三石真也

1960年生まれ、京都大学工学部卒業
現在、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部水資源研究室

（５）：沖大幹

1964年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)、
現在、東京大学生産技術研究所教授

６．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1)査読付き論文

1) 泉宏和，風間聡，沢本正樹，積雪水資源量評価における森林の影響について，水工学論文集，50，421-426，2006.
2) 花崎直太、鼎信次郎、沖大幹：Bucket型の陸面過程モデルをベースにした全球統合水資源モデルの開発，水工学論文集，50，529-534，2006
3) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，降雨極値の再現期間を用いた斜面災害の発生確率，水工学論文集，50，619-624，2006.

4) 白岩淳一，風間聡，沢本正樹，気候変動による河川水温の影響，水工学論文集，50，1063-1068，2006.
5) S. Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto, Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers, *Journal of Environmental Management*, Vol.80, Iss.1, pp.25-35, 2006.
6) Soichiro Machida, So Kazama and Masaki Sawamoto, Development of a Distributed Flood Damage Model with Economic Evaluation, *Proc. 3rd APHW Conference*, CD-ROM, ST1-05-A29-261, 2006.
7) S. Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto, Effect of Climate Change on Coastal Fresh Groundwater Resources, *Proc. 3rd APHW Conference*, CD-ROM, ST1-05-A28-033, 2006.
8) Seiki Kawagoe, So Kazama and Masaki Sawamoto, Evaluation of Sediment Hazard Considering Precipitation in Seasonal Change, *Proc. 3rd APHW Conference*, CD-ROM, ST1-05-A26-257, 2006.
9) Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto, Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources, *Global Environmental Change*, Vol.16, 388-399, 2006.
10) Kei Yoshimura, Shin Miyazaki, Shinjiro Kanae and Taikan Oki：Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes, Glob. Planet. Change, 51, 90-107, 2006.
11) Oki, T. and S. Kanae：Global hydrological cycles and world water resources, Science, 313, 5790,1068-1072, 2006.
12) 秋本嗣美，川越清樹，風間聡，沢本正樹，土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価，水工学論文集，52，571-576，2006.
13) 芳村圭、岡澤毅、H.Kim、瀬戸心太、小岩祐樹、沖大幹、鼎信次郎：気象庁メソ予報モデルGPVを用いた日本域河川流量予測システムの構築と検証，水工学論文集，50，2007.
14) 那須貴之，風間聡，沢本正樹，地域別に見た気候変動に対する積雪水資源脆弱性，水工学論文集，51，361-366，2007.
15) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，融雪に起因する土砂災害のリスクモデル，水工学論文集，51，367-372，2007.
16) 宮城昌和，風間聡，沢本正樹，地下水涵養施設による塩水侵入制御，水工学論文集，51，451-456，2007.
17) 佐藤歩，川越清樹，風間聡，沢本正樹，降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価，水工学論文集，52，433-438，2008.
18) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，日本列島を対象にした融雪に伴う土砂災害のリスク評価，水工学論文集，52，463-468，2008.
19) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，　数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築，自然災害科学，27(1)，69-83，2008.
20) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，将来気候モデルを用いた土砂崩壊リスク評価，土木学会地球環境研究論文集，16，27-35，2008.
21) 多田智和，土屋修一　気候変動による降水特性変化がもたらす水需給バランスへの影響検討，地球環境ム論文集，16，150-155. 2008.
22) 川越清樹，菊地裕，風間聡，滝沢智，気候変動による主要河川の水質の影響評価，土木学会環境工学論文集，45，467-474，2008.
23) So Kazama, Hirokazu Izumi, Priyantha Ranjan Sarukkalige, Takayuki Nasu, Masaki Sawamoto, Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources, Hydrological Processes, 22(13), 2315-2324, 2008.
24) Freddy Soria, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SENSITIVITY ANALYSIS OF DISTRIBUTED RAUNFALL-RUNOFF MODELS, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 24-28, 2008.
25) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SEASONAL CHANGE OF GROUNDWATER FLOW AND ITS EFFECT ON TEMPERETURE DISTRIBUTION IN SENDAI PLAIN, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 191-198, 2008.
26) Seiki KAWAGOE, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SLOPE HAZARD RISK DUE TO RAINFALL CONDITION, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 1108-1117, 2008.
27) Freddy Soria, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SENSITIVITY ANALYSIS TO EVALUATE THE EFFECT OF LANDUSE CHANGE ON DISCHARGE RATE, Proceedings of the international conference on hydrogical changes and management from headwaters to the ocean-hydrochange2008, 203-208, 2008.
28) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, THE THERMAL EFFECT OF GROUNDWATER FLOW ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE SENDAI PLAIN, Proceedings of the international conference on hydrogical changes and management from headwaters to the

ocean-hydrochange2008, 203-208, 2008.
29) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, SPATIAL DOWNSCALING OF GCM OUTPUT FOR ASSESSING THE IMPACTS ON GROUNDWATER TEMPERATURE IN THE SENDAI PLAIN, JSCE Annual journal of hydraulic engineering, 53, 79-84, 2009.
30) 菊地慶太, 風間聡, GPS による山岳域の積雪推定モデルの評価, 土木学会水工学論文集, 53, 409-414, 2009.
31) 秋本嗣美, 川越清樹, 風間聡, 数値気候モデルを用いた土砂生産量予測, 土木学会水工学論文集, 53, 655-660, 2009.
32) 川越清樹, 風間聡, 肱岡靖明, 高橋潔, 土砂崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用, 土木学会水工学論文集, 53, 661-666, 2009.
33) 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡, 森杉壽芳, 気候モデルを利用した日本列島洪水リスク評価, 土木学会水工学論文集, 53, 847-852, 2009.
34) Luminda Niroshana Gunawardhana, So Kazama, Tidal effects on aquifer thermal regime: An analytical solution for coastal ecosystem management, Journal of Hydrology, 377, 377-390, 2009.
35) 風間聡, 佐藤歩, 川越清樹, 温暖化による洪水氾濫とその適応策, 地球環境, 14(2), 135-142, 2009.
36) 川越清樹, 風間聡, 温暖化に対する土砂災害の影響評価, 地球環境, 14(2), 143-152, 2009.
37) 滝口博文, 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡, 数値気候モデルの将来展望値を用いた日本の洪水被害予測, 地球環境研究論文集, 17, 17-22, 2009.
38) 志田孝之, 風間聡, 山本潤, 気候変動による湖沼の水温躍層の変化, 地球環境研究論文集, 17, 23-28, 2009.
39) Saeki Kawagoe, So Kazama, and Priyantha Ranjan Sarukkalige, Assessment of snowmelt triggered landslide hazard and risk in Japan, Cold Regions Science and Technology, 58, 120-129, 2009.
40) So KAZAMA, Ayumu Sato, Seiki Kawagoe, Evaluating the cost of flood damage based on changes in extreme rainfall in Japan, Sustainability Science, 4(1), 61-69, 2009.
41) 丹治肇・桐博英：Influences of Global Climate to Peak Wave Height in Typhoon Seasons, COASTAL DYNAMICS 2009, Tokyo, 136, 1-11,2009.
42) 丹治肇・桐博英：Global Warming Influences on Tidal Wetland in Japan, Coasts, Marine Structures and Breakwater 2009, Edinburgh, IEC, 1-15,2009.
43) 丹治肇・桐博英：Irrigation Effects on Vulnerability of Rice Yield in Thailand and Japan, International Society of Paddy and Water Environment Engineering, Bogor, GI,1-7,2009.10
44) Luminda Gunawardhana, So KAZAMA, Different skills of five GCMs abd their impacts on aquifer thermal regimes, Annual J. of Hydraulic Engineering, Vol.54, pp.67-73, 2010.
45) Nilupul K. Gunasekara, So KAZAMA, Dai Yamazaki, Taikan Oki, Inequalities in water resources distributions and water related conflicts, Annual J. of Hydraulic Engineering, 54, 115-120, 2010.
46) S. Kawagoe, S. Kazama, and P. R. Sarukkalige, Probabilistic modelling of rainfall induced landslide hazard assessment, Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Vo.7, 725-766, 2010.
47) 丹治肇・小林慎太郎・桐博英：将来のエネルギー供給変化に対応した水田灌漑システムの展望, 水文水資源学会誌, 23(1),43-56, 2010.

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－１温暖化による水資源への影響予測に関する研究
（１）　温暖化各レベルに対応する水資源管理への総合影響評価に関する研究

東北大学大学院工学研究科
土木工学専攻　　風間聡

〈研究協力機関〉　福島大学共生システム理工学類　川越清樹

平成17～21年度合計予算額　44,123千円
（うち、平成21年度予算額　9,332千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］地球温暖化による水災害の評価として、将来気候について統合モデルを用いて温暖化効果ガスと洪水氾濫被害と斜面災害被害の関係について考察した。その結果、温室効果ガス濃度シナリオ450s、550s、BaUにおける全国の洪水氾濫面積は、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れないが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって氾濫面積に差が現れ、それぞれ最大で約1000km^2、約1100km^2、約1200km^{2}に達すると見込まれる。地域別では、時期は異なるものの甚大な被害が見込まれ、特に、関東・甲信越・北陸における氾濫面積の大幅な増加が見込まれる。全国の450s、550s、BaUにおける最大の斜面崩壊被害コストポテンシャルは、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れず、約0.69兆円/年程度と見込まれるが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって斜面崩壊被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、450sでは今世紀中頃までと余り変わらないが、550sでは最大約0.77兆円/年、BaUでは最大約0.94兆円/年に達すると見込まれる。

［キーワード］洪水被害、斜面災害、土砂生産、積雪水資源、水質悪化

１．はじめに

温暖化に伴う水資源評価として、気候変動による水災害マップの作成に取り組んだ。洪水氾濫による被害および被害額、斜面崩壊に関して発生確率および道路の被害額、また、斜面崩壊に伴う土砂生産量のマップを作成した。この計算をもとに将来気候モデルを利用して、将来の水災害被害額の変化を示した。また地域毎の影響の違いを求め、影響と適応策について考察した。

２．研究目的

降雨の変化による洪水形態変化がもたらす経済損失を推定、議論するため、数値地図情報を用

いて、浸水被害、斜面被害を求めた。

洪水浸水被害の推定にもとづいて温暖化の対策費用の算出をするために、日本全土において整備された再現期間の降雨極値を用い、本来、治水整備によって守られている分に対して、降雨極値の増加によって、新たに対応が必要となる増加分の定量化を行った。それと同時に、再現期間ごとに氾濫計算を行うことにより、降雨極値の増加率と浸水被害額の増加率との関係を明らかにした。

土砂災害に関する従来の研究は、豪雨状況と災害の関係から危険度を示す、個別現象の危険度評価モデルの構築、災害事例とその考察等が中心であり、危険度の空間分布を示すモデルが構築されていない。原因として、豪雨情報を取得できる観測所の不足が挙げられる。斜面災害の現象は天候条件に依存し、この条件は地形特性等で変化するため、広域に対し緻密にデータ取得する必要がある。そこで土砂災害の発生、非発生の実績に対する豪雨を含む水文条件、地質と地形条件を考慮した土砂災害リスクモデルの構築を試みた。

３．研究方法

（１） 洪水被害モデルの概要[1)]

洪水氾濫計算を行うために、水路を簡易的に数値地図上に表現し、土地利用毎の粗度係数を一部水深で与え、氾濫流の伝播現象を最も詳細に再現する2次元不等流モデルを採用している。堤防やポンプ場といった河川構造物を考慮しない河川に対して氾濫シミュレーションを行っている。また、流出域を定義せず、日本全体を氾濫原として据え、全域に氾濫モデルを適用した。氾濫水は標高の低い部分へと流れ込むため、河道に戻り排除される構造となっている。

氾濫計算には、標高、土地利用の数値地理情報を用いる。これらは、すべて1km×1kmの解像度のグリッドセルデータである。標高データは、国土数値情報のKS-META-G04-56Mデータに格納された1km^{2}の平均標高値を用いた。土地利用データは、国土数値情報のKS-META-L03-09Mデータに格納された1km^{2}の土地利用情報から、各グリッドセル内において、最も占める割合が多い土地利用をそのグリッドセルにおける土地利用と設定した。

洪水氾濫による被害コストポテンシャルは、①氾濫シミュレーションから得られる氾濫水深と浸水期間を分布情報として取り出し、②国土数値情報KS-META-L03-09Mデータに格納されている15の土地利用分類に従い、治水経済調査マニュアルの「直接被害の対象資産」を参考に、土地利用ごとの計算手順に従って算定した。具体的な被害を推計した土地利用は、田、畑地、建物用地、ゴルフ場、道路や港湾施設などの新幹公用地であり、森林、荒地、その他の用地、河川地及び湖沼、海浜、海水域では、浸水に伴う被害はないものと仮定した。原単位は作物統計や治水経済調査マニュアルに基づいている。

（２） 斜面災害被害モデルの概要[2)]

土砂災害によるリスク評価は、斜面崩壊の素因、誘因である地形、地質、そして降雨量を含む水文的な条件を用いた多重ロジスティック回帰分析から構成された斜面崩壊発生確率モデルを用いる。降雨量を含む水文的な条件の利用により、気候変動に応じた動的な発生確率を導くことができ、時空間的な発生確率分布の作成も可能である。斜面崩壊発生確率モデルに利用される説明変数は、地形条件の「起伏量」、水文的条件の「動水勾配」であり、これらを説明変数に地質毎に斜面崩壊発生確率モデルを構築した。地形条件である起伏量は、国土数値情報に格納された最

高標高と最低標高の差から求めた。起伏量は地形の複雑さを示す値として解釈されており、一般に、起伏量の大きな地域は地形開析が進みやすく、活発に地形発達する。

水文条件である動水勾配は、国土数値情報の表層土壌と斜面傾斜度を用いて擬似二次元化した斜面に日降雨量を入力し、飽和不飽和浸透解析を行うことで求め、降雨発生後の最大傾斜を示す浸潤線から発生確率に用いる動水勾配を得た。動水勾配は、単位距離あたりの地下水水頭の変化率であり、降雨量が多くなるほど急勾配を呈する。急な動水勾配は、土塊の有効応力を減少させるため、斜面は不安定化する。

対象とした地質は、国土数値情報に基づき、斜面崩壊を引き起こしやすい土砂および土砂化しやすい地質である未固結状態である崩積土、続成期間の短い半固結状態である新第三系堆積岩、古第三系堆積岩、造山鉱物にカオリナイトを含み粘土化しやすい花崗岩の4種類である。

経済損失額は、「経済損失額」=「経済価値(経済原単位)」×「規模(面積)」×「斜面崩壊発生確率」をグリッドセル毎に計算した。国土数値情報の土地利用データを用いてグリッドセルあたりの「市街地」、「田」、「畑地」、「森林」の面積を求め、各土地利用の経済原単位を当てはめることで経済損失額を求めた。

市街地の経済原単位は、急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアルに準拠した居住地域と事務所地域の経済単価を合算することで求めた。国土数値情報を基に市街化調整地域を居住地域、その他の市街地を事務所地域に設定した。田、畑地、森林の原単位は急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアルにも記載されているが、平成10年当時を基準としており、近年の価格変動により著しく経済価値が異なる可能性もあるため、近年の所得を基に現在価値に近似した値を求めた。田と畑地の経済原単位は、農林水産省統計データを基に平成12年から平成17年までの平均単位あたりの生産所得額を都道府県別に設定した。畑地は複数の作物が混在するため、畑作に属するいも類、野菜、果樹等を都道府県毎に統括し、各地域の畑作所得の特徴を導いた。森林の経済原単位は、山林素地及び山元立木価格調を基に平成12年から17年までの単位あたり林地生産価格を都道府県別に設定した。林地生産価格は用材林と薪炭林で分類されるが、数値地理情報上でこれらの分類は困難であるため、地球温暖化に伴う森林保護の動向を考慮し、森林管理の高まりにより良質な材木の生産が進む仮定を設け、単価の高い用材林を森林の経済原単位とした。

４．結果・考察

（１） 洪水氾濫面積

洪水氾濫面積の影響関数は、現状で50年に一回降るような雨（以後、再現期間50年降雨）を100%とした場合に、100%、150%、200%時の洪水氾濫面積を推計し開発された。気候変数は一年で最も大きな日降水量（以後、年別最大日降水量）を採用した。温暖化による将来影響は年別日最大降水量が再現期間50年降雨を越える場合に発生すると仮定している。これは、防護施設はモデル化されていないが、現在の防護レベルは再現期間50年降雨に対応しており、それより小さい降雨では被害が発生しないとの仮定に基づく。ただし、三大都市圏の防護レベルはそれよりも高く、現状で150年に一回降るような雨に対応していると仮定した。温暖化による被害面積は、将来の被害面積から、再現期間50年の降雨（三大都市圏では再現期間150年降雨）があった場合の氾濫面積を差し引いた面積と定義した。また、防護レベルは将来に渡って現状と変わらず一定と仮定している。

洪水氾濫は降雨強度と頻度の変化に大きく影響される。降雨シナリオは気温上昇に伴う単調増加傾向を示さないため、洪水氾濫面積も年代によって大きく変化する。また、本研究では降雨シナリオの時間的傾向だけではなく、空間的な傾向も考慮しており、地形的に平地の占める割合が大きい地域は浸水面積が拡大しやすいことが示される。

450s、550s、BaUにおける全国の洪水氾濫面積は、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れないが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって氾濫面積に差が現れ、豪雨頻度に従ってそれぞれ最大で約1000km^2、約1100km^2、約1200km^{2}に達すると見込まれる。地域別では、時期は異なるものの甚大な被害が見込まれ、特に、関東・甲信越・北陸における氾濫面積の大幅な増加が見込まれる（図1）。

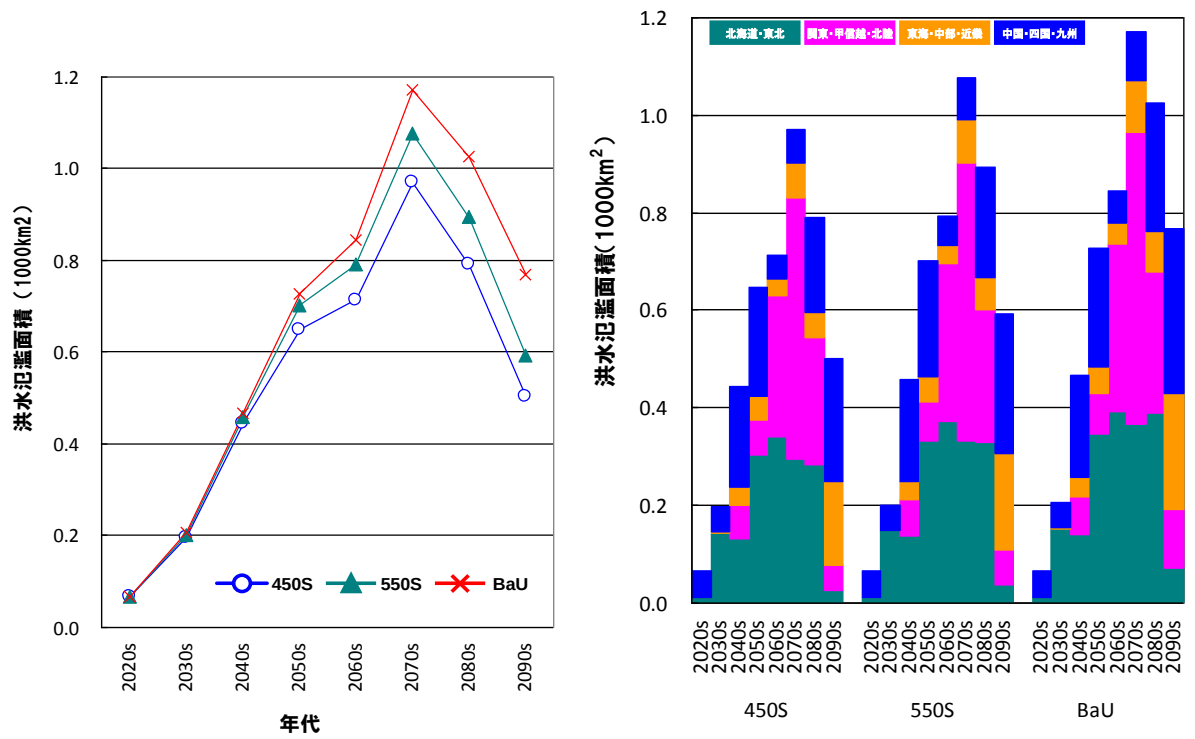


図1　左：1981-2000年を基準（ゼロ）とした場合の洪水氾濫面積（全国平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における浸水面積を試算し、20年間の平均値を表示 。右：1981-2000年を基準（ゼロ）とした場合の洪水氾濫面積（地域平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における浸水面積を試算し、20年間の平均値を表示

（２）　浸水被害コストポテンシャル

浸水被害コストポテンシャルの影響関数および気候変数は、洪水氾濫面積に関する影響関数と同様に開発され、被害も同様の考え方に基づき推計されている。また、被害による資産価値の低下は考慮しておらず、適応策も考慮していない。

洪水氾濫は降雨の強度と頻度の変化に大きく影響される。気温上昇と異なり、降雨シナリオは大きな変動を示すため、浸水被害コストも年代によって大きく変化する。

低いGHG濃度で安定化させるほど、浸水被害コストポテンシャルが低減されるが、最も低いレベルで安定化させる450Sシナリオにおいても浸水被害コストポテンシャルは温暖化に伴って増加す

ると見込まれる。

450s、550s、BaU(炭酸ガス排出シナリオ450ppm，550ppm，なりゆきシナリオ)における最大の浸水被害コストポテンシャルは、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れず、約5兆円/年弱に達すると見込まれるが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって浸水被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、それぞれ最大で約6.4兆円/年、約7.6兆円/年、約8.7兆円/年に達すると見込まれる。

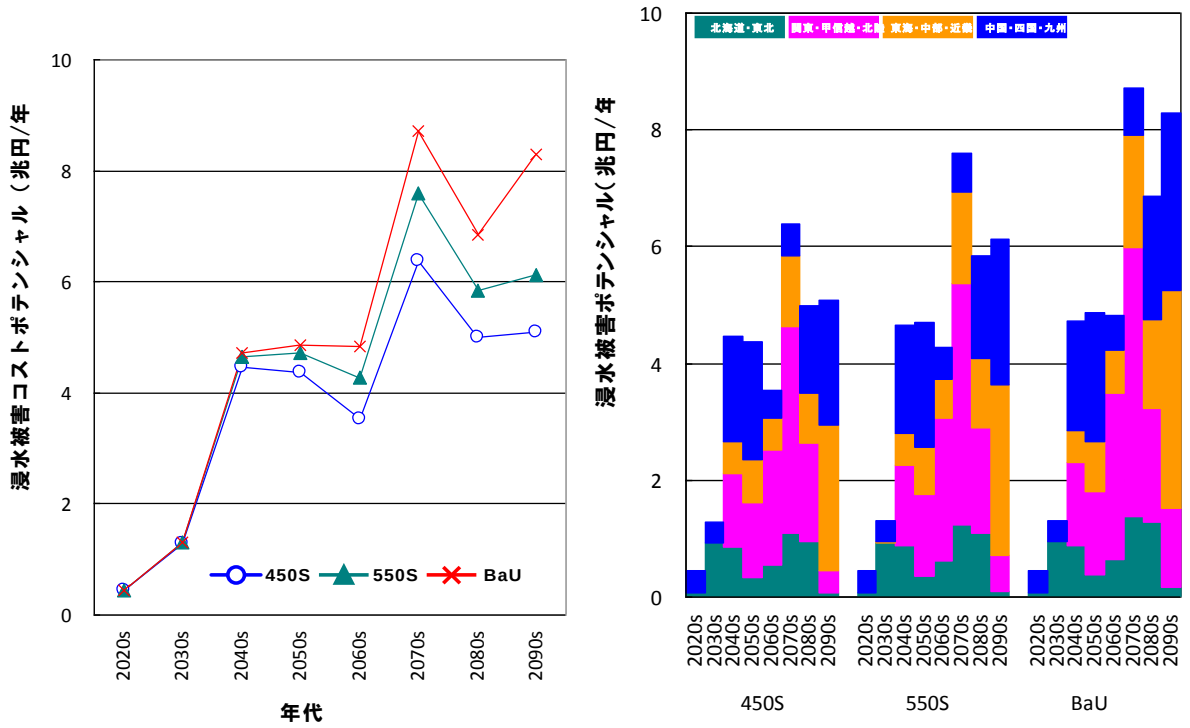


図2　左：1981-2000年を基準（ゼロ）とした場合の洪水氾濫面積（全国平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における浸水面積を試算し20年間の平均値を表示。右：1981-2000年を基準（ゼロ）とした場合の洪水氾濫面積（地域平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における浸水面積を試算し20年間の平均値を表示

地域別では、氾濫源に資産が集中している関東・甲信越・北陸と東海・中部・近畿の被害が大きく、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって最大の浸水被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、それぞれ約3.5兆円/年・約2.5兆円/年、約4.1兆円/年・約2.9兆円/年、約4.6兆円/年・約3.7兆円/年に達すると見込まれる。最も厳しい安定化レベル（450s）の場合でも被害が大幅に増加する可能性があり、緩和策と共に適応策の検討も重要である（図2）。

（３）　斜面崩壊リスク

斜面崩壊発生リスクに関する影響関数は、現状で50年に一回降るような雨（以後、再現期間50年降雨）を100%とした場合に、25%単位で75%～300%時の斜面崩壊発生確率に基づき開発された。影響関数に用いる気候変数は、一年で最も大きな日降水量（以後、年別日最大降水量）を採用した。温暖化による将来影響は年別日最大降水量が50mm/dayを越える場合に発生すると、全国一律

に仮定している。実際には場所によってリスクが発生する降雨強度は異なると考えられ、今後詳細な調査が必要である。

斜面崩壊発生リスクは洪水氾濫と同様に降雨強度と頻度の変化に大きく影響される。降雨シナリオは気温上昇に伴う単調増加傾向を示さないため、土砂災害被害も年代によって変化する。低いGHG濃度で安定化させるほど、斜面崩壊発生リスクが低減されるが、最も低いレベルで安定化させる450Sシナリオにおいては、リスクが一定程度で留まる可能性がある。450s、550s、BaUにおける全国の斜面崩壊発生リスク、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れないが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって斜面崩壊発生リスクに差が現れ、それぞれ最大で約4%、約5%、約6%に達すると見込まれる（図3）。

地域別では、北海道・東北地方は、シナリオに依らずおおよそ今世紀末に向かってリスクが増加し続け、関東・甲信越・北陸地方では、年代によってリスクが大きく変動する傾向が見られる。

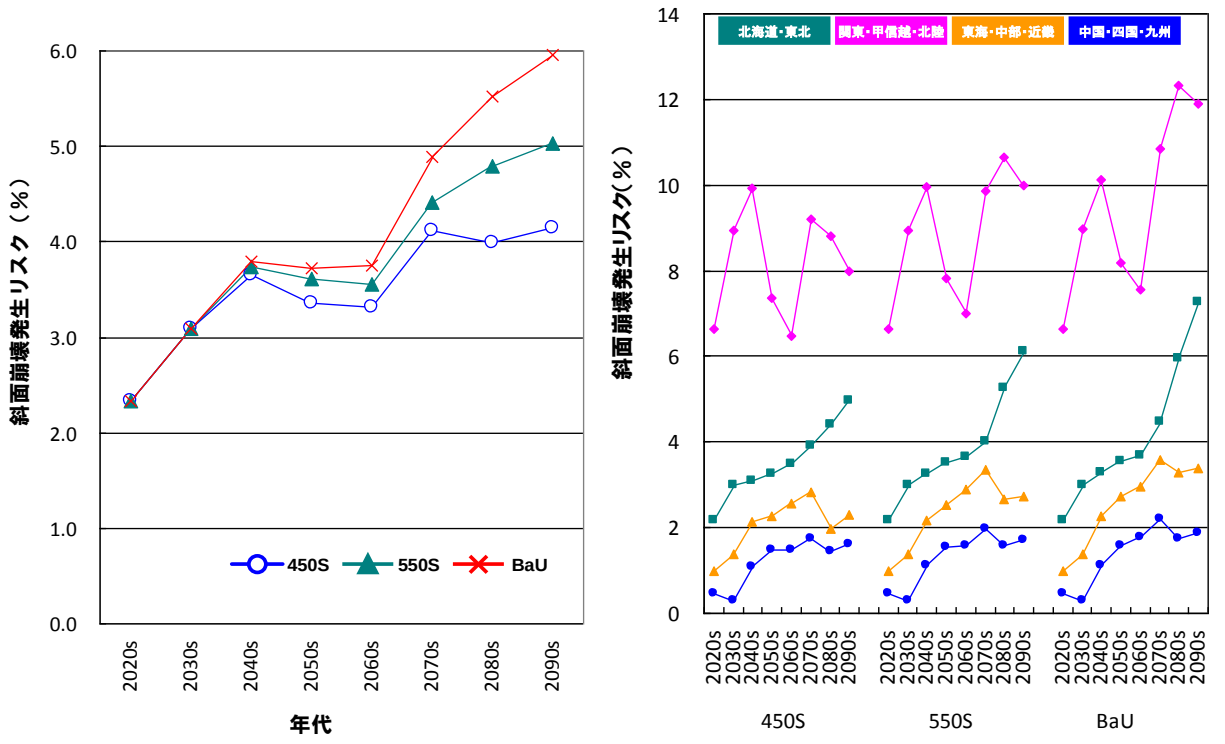


図3　左：1981-2000年を基準とした場合の斜面崩壊発生リスクの増分（全国平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量におけるリスクを試算し20年間の平均値を表示。右：1981-2000年を基準とした場合の斜面崩壊発生リスクの増分（地域別）。2100年まで毎年の年別日最大降水量におけるリスクを試算し20年間の平均値を表示

（4）　斜面崩壊被害コストポテンシャル

斜面崩壊による被害コストポテンシャルの影響関数および気候変数は、斜面崩壊発生リスクと同様であり、被害も同様の考え方に基づき推計されている。また、被害による資産価値の低下は考慮しておらず、適応策も考慮していない。

低いGHG濃度で安定化させるほど、斜面崩壊被害コストポテンシャルが低減されるが、最も低いレベルで安定化させる450sシナリオにおいても斜面崩壊被害コストポテンシャルは温暖化に伴っ

て増加すると見込まれる。

全国の450s、550s、BaUにおける最大の斜面崩壊被害コストポテンシャルは、今世紀中頃（～2050s）まではシナリオ間で大きな差が現れず、約0.69兆円/年程度と見込まれるが、今世紀末頃（～2090s）までにはシナリオによって斜面崩壊被害コストポテンシャルに大きな差が現れ、450sでは今世紀中頃までと余り変わらないが、550sでは最大約0.77兆円/年、BaUでは最大約0.94兆円/年に達すると見込まれる。

地域別では、特に、東海・中部・近畿地方の被害が将来に渡り大きいと見込まれる。北海道・東北、関東・甲信越・北陸地方は、温暖化の進行に伴い被害の増加が顕著であり、今世紀末頃（～2090s）までの斜面崩壊被害コストポテンシャルは、450s、550s、BaUにおける最大の斜面崩壊被害コストポテンシャルは、それぞれ、約0.14兆円/年・約0.09兆円/年、約0.17兆円/年・約0.10兆円/年、約0.22兆円/年・約0.13兆円/年に増加すると見込まれる。最大日降雨の時期と異なる理由は、降雨の空間分布が時系列データに反映されていないからである（図4）。

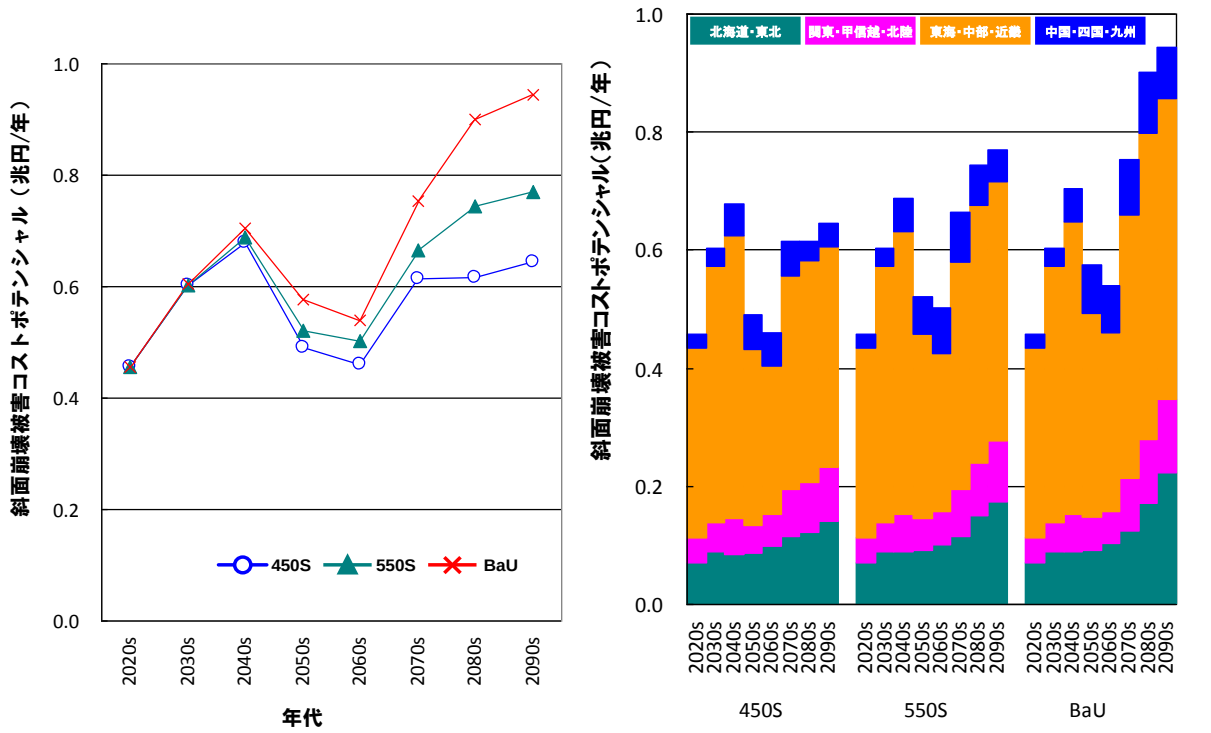


図4　左：1981-2000年を基準(ゼロ)とした場合の斜面崩壊による被害（全国平均）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における被害を試算し20年間の平均値を表示。右：1981-2000年を基準(ゼロ)とした場合の斜面崩壊による被害（地域別）。2100年まで毎年の年別日最大降水量における被害を試算し20年間の平均値を表示。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究成果によって温室効果ガスの安定濃度と水災害の被害の関係を初めて明らかにした．また、発現年と被害額の関係も明らかした．

（２）地球環境政策への貢献

国土交通省東北地方整備局における融雪出水の検討会や宮城県の水循環審議会において、本研究成果である洪水被害解析結果が資料として利用された。また、「地球温暖化「日本の影響」-最新の科学的知見-」の執筆、環境省地球温暖化影響・適応研究委員会水環境・水資源分野ワーキンググループ委員として活動した。

６．引用文献

1)風間聡，佐藤歩，川越清樹，温暖化による洪水氾濫とその適応策，地球環境，Vol.14，No.2，pp.135-142，(2009).

2)川越清樹，風間聡，温暖化に対する土砂災害の影響評価，地球環境，Vol.14，No.2，pp.143-152，(2009).

７．国際共同研究等の状況

タイの斜面災害について、キングモンクット大学トンブリ校のChaiwat Ekkawatpanit博士と、沿岸地下水資源について、カーティン工科大学のPriyantha Ranjan博士と共同研究を行っており、共同観測、共同執筆、セミナーなどを行った。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 泉宏和，風間聡，沢本正樹，積雪水資源量評価における森林の影響について，水工学論文集，50,421-426(2006).

2) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，降雨極値の再現期間を用いた斜面災害の発生確率，水工学論文集，50，619-624(2006)

3) 白岩淳一，風間聡，沢本正樹，気候変動による河川水温の影響，水工学論文集，50，1063-1068(2006)

4) 秋本嗣美，川越清樹，風間聡，沢本正樹，土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価，水工学論文集，52，571-576(2006)

5) S. Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto, Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers, *Journal of Environmental Management*, Vol.80, Iss.1, pp.25-35, (2006)

6) Soichiro Machida, So Kazama and Masaki Sawamoto, Development of a Distributed Flood Damage Model with Economic Evaluation, *Proc. 3rd APHW Conference*, CD-ROM, ST1-05-A29-261, (2006)

7) S. Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto, Effect of Climate Change on Coastal Fresh Groundwater Resources, *Proc. 3rd APHW Conference*, CD-ROM, ST1-05-A28-033, (2006)

8) Seiki Kawagoe, So Kazama and Masaki Sawamoto, Evaluation of Sediment Hazard Considering Precipitation in Seasonal Change, *Proc. 3rd APHW Conference*, CD-ROM, ST1-05-A26-257, (2006)

9) Priyantha Ranjan, So Kazama and Masaki Sawamoto, Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources, *Global Environmental Change*, Vol.16, 388-399, (2006)

10) 那須貴之，風間聡，沢本正樹，地域別に見た気候変動に対する積雪水資源脆弱性，水工学論文集，第51巻，pp.361-366，(2007)

11) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，融雪に起因する土砂災害のリスクモデル，水工学論文集，第51巻，pp.367-372，(2007)
12) 宮城昌和，風間聡，沢本正樹，地下水涵養施設による塩水侵入制御，水工学論文集，第51巻，pp.451-456，(2007)
13) 佐藤歩，川越清樹，風間聡，沢本正樹，降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価，水工学論文集，52，433-438(2008)
14) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，日本列島を対象にした融雪に伴う土砂災害のリスク評価，水工学論文集，52，463-468(2008)
15) 川越清樹・風間聡・沢本正樹，　数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築，自然災害科学，Vol.27，Issue 1，69-83(2008).
16) 川越清樹・風間聡・沢本正樹，　将来気候モデルを用いた土砂崩壊リスク評価，土木学会地球環境研究論文集，16，27-35，(2008).
17) 川越清樹・菊地裕・風間聡・滝沢智，　気候変動による主要河川の水質の影響評価，土木学会環境工学論文集，45，467-474，(2008).
18) So Kazama, Hirokazu Izumi, Priyantha Ranjan Sarukkalige, Takayuki Nasu, Masaki Sawamoto, Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources, Hydrological Processes, 2007.Volume 22, Issue 13, 2315-2324 (2008).
19) Freddy Soria, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SENSITIVITY ANALYSIS OF DISTRIBUTED RAUNFALL-RUNOFF MODELS, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 24-28(2008)
20) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SEASONAL CHANGE OF GROUNDWATER FLOW AND ITS EFFECT ON TEMPERETURE DISTRIBUTION IN SENDAI PLAIN, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 191-198(2008).
21) Seiki KAWAGOE, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SLOPE HAZARD RISK DUE TO RAINFALL CONDITION, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 1108-1117(2008).
22) Freddy Soria, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, SENSITIVITY ANALYSIS TO EVALUATE THE EFFECT OF LANDUSE CHANGE ON DISCHARGE RATE, Proceedings of the international conference on hydrogical changes and management from headwaters to the ocean-hydrochange2008, 203-208(2008)
23) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, THE THERMAL EFFECT OF GROUNDWATER FLOW ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE SENDAI PLAIN, Proceedings of the international conference on hydrogical changes and management from headwaters to the ocean-hydrochange2008, 203-208(2008)
24) Luminda GUNAWARDHANA, So KAZAMA, SPATIAL DOWNSCALING OF GCM OUTPUT FOR ASSESSING THE IMPACTS ON GROUNDWATER TEMPERATURE IN THE SENDAI PLAIN, JSCE Annual journal of hydraulic engineering, 53, 79-84(2009)
25) 菊地慶太，風間聡，GPSによる山岳域の積雪推定モデルの評価，土木学会水工学論文集，53，409-414(2009).
26) 秋本嗣美，川越清樹，風間聡，数値気候モデルを用いた土砂生産量予測，土木学会水工学論

文集，53，655-660(2009).
27) 川越清樹，風間聡，肱岡靖明，高橋潔，土砂崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用，土木学会水工学論文集，53，661-666(2009).
28) 佐藤歩，川越清樹，風間聡，森杉壽芳，気候モデルを利用した日本列島洪水リスク評価，土木学会水工学論文集，53，847-852，(2009).
29) Luminda Niroshana Gunawardhana, So Kazama, Tidal effects on aquifer thermal regime: An analytical solution for coastal ecosystem management, Journal of Hydrology, Vol.377, No.3-4, pp.377-390, (2009)
30) 風間聡，佐藤歩，川越清樹，温暖化による洪水氾濫とその適応策，地球環境，14(2)，135-142，(2009)
31) 川越清樹，風間聡，温暖化に対する土砂災害の影響評価，地球環境，14(2)，pp.143-152，(2009)
32) 滝口博文，佐藤歩，川越清樹，風間聡，数値気候モデルの将来展望値を用いた日本の洪水被害予測，地球環境研究論文集，第17巻，pp.17-22，(2009)
33) 志田孝之，風間聡，山本潤，気候変動による湖沼の水温躍層の変化，地球環境研究論文集，第17巻，pp.23-28，(2009)
34) Saeki Kawagoe, So Kazama, and Priyantha Ranjan Sarukkalige, Assessment of snowmelt triggered landslide hazard and risk in Japan, Cold Regions Science and Technology, Vol.58, No.3, pp.120-129, (2009)
35) So KAZAMA, Ayumu Sato, Seiki Kawagoe, Evaluating the cost of flood damage based on changes in extreme rainfall in Japan, Sustainability Science, Vol.4, Iss.1, pp.61-69, (2009)
36) Luminda Gunawardhana, So KAZAMA, Different skills of five GCMs abd their impacts on aquifer thermal regimes, Annual J. of Hydraulic Engineering, Vol.54, pp.67-73, (2010)
37) Nilupul K. Gunasekara, So KAZAMA, Dai Yamazaki, Taikan Oki, Inequalities in water resources distributions and water related conflicts, Annual J. of Hydraulic Engineering, Vol.54, pp.115-120, 2010.
38) Seiki Kawagoe, So Kazama, and Priyantha Sarukkalige Ranjan, Probabilistic modelling of rainfall induced landslide hazard assessment, Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Vo.7, pp.725-766, (2010)

<その他誌上発表（査読なし）>

1) So Kazama, S. Machida, S. Kawagoe, M. Sawamoto, K. Yasuhara and H. Yokoki, Flood damage evaluation in Japan under climate change, Proceedings of the international symposium Mitigation and adaptation of climate-change-induced natural disasters, pp.171-180, 2007.9.
2) Seiki KAWAGOE, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO, Slope failure risk evaluation model due to climate change, hydro-change2008.CD-ROM, (2008).

（２）口頭発表（学会）

1) 川越清樹，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2006）
「融雪分布特性を考慮した土砂災害発生確率モデルの構築」

2) 泉宏和，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2006）
「森林の影響を考慮した積雪水資源量の評価」
3) 工藤真，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2006）
「世界の小島嶼の地下水資源評価」
4) 白岩淳一，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2006）
「水温を考慮した水生生物生息環境評価」
5) 町田宗一郎，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2006）
「全国洪水・渇水被害額評価のための基礎調査」
6) 川越 清樹 風間 聡 沢本 正樹：融雪を考慮した土砂災害発生確率の評価とその考察，土木学会，(2006)
7) 川越清樹，風間聡，沢本正樹，山地崩壊確率を用いた堆砂量予測，土木学会東北支部，(2007)
8) 町田宗一郎，川越清樹，風間聡，沢本正樹，数値地理情報と降雨極値データを利用した日本全国浸水被害額評価，土木学会東北支部，(2007)
9) 宮城昌和，S.PRIYANTHA Ranjan，沢本正樹，異なる気候地域における浸透施設の性能評価，土木学会東北支部，(2007)
10) Obadha Fidel Odeny，沢本正樹，風間聡，Prediction of the long-term change in precipitation in Kenya by use of GSMaP data，土木学会東北支部，(2007)
11) 那須貴之，川越清樹，沢本正樹，GCMを用いた全球積雪水資源量推定，土木学会東北支部，(2007)
12) 秋本嗣美，川越清樹，沢本正樹，降水変化に伴う土砂生産を考慮した上・中流域の異常濁質流出，土木学会東北支部，(2007)
13) 菊地慶太，川越清樹，沢本正樹，高精度GPSによる積雪深観測，土木学会東北支部，(2007)
14) 川越清樹，風間聡，沢本正樹：土木学会年次学術講演会（2007）
「積雪水当量分布データと数値地理情報を利用した日本列島全域の土砂崩壊発生確率評価」
15) 秋本嗣美，川越清樹，風間聡，沢本正樹：土木学会年次学術講演会（2007）
「ダム貯水池の水質とその流域の土砂崩壊に関する基礎研究」
16) 川越清樹，風間聡，沢本正樹：水文・水資源学会2007年度研究発表会（2007）
「ダム堆砂量と土砂崩壊発生確率による土砂生産量予測」
17) 町田宗一郎．川越清樹，風間聡，沢本正樹，横木裕宗，安原一哉：土木学会地球環境シンポジウム（2007）「地球温暖化に伴う全国の浸水被害評価」
18) So KAZAMA：Flood damage evaluation in Japan under climate change, The international symposium Mitigation and adaptation of climate-change-induced natural disasters, Hue, Vietnam, (2007).
19) So KAZAMA：Flood damage evaluation in Japan under climate change, The international symposium Mitigation and adaptation of climate-change-induced natural disasters, Hue, Vietnam, (2007).
20) 川越清樹，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2008）
「地球温暖化による土砂崩壊リスク変化」
21) 志田孝之，風間聡，沢本正樹，山本潤：土木学会東北支部（2008）
「MECモデルを用いた閉鎖性水域における水温変動の再現」
22) 菊地裕，川越清樹，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2008）
「豪雨と無降雨期間が河川水質に与える影響」
23) 菊地慶太，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2008）

「高精度GPSによる積雪深観測アルゴリズムの開発と検証」
24) 佐野雄大，那須貴之，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2008）
「平成18年豪雪と平成19年少雪を比較した雪の社会への影響評価」
25) 那須貴之，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2008）
「気候予測情報を用いた全球積雪水資源量解析」
26) 佐藤歩，川越清樹，風間聡，沢本正樹：土木学会東北支部（2008）
「気候モデルを用いた全国浸水被害額評価」
27) So KAZAMA：Flood damage evaluation in Japan under climate change, TIGS symposium 2008, Adaptation strategies for climate change, Honolulu, USA, (2008).
28) 川越清樹・風間聡，土砂崩壊に対する気候変動の影響評価，水文・水資源学会　2008 年度研究発表会，2008. 8.
29) 佐野雄大・菊地慶太・風間聡，平成 18 年豪雪と平成 19 年少雪を比較した雪の社会への影響評価，水文・水資源学会　2008 年度研究発表会，2008. 8.
30) 佐藤歩・川越清樹・風間 聡・沢本 正樹，降雨極値データを用いた全国浸水被害額評価，平成 20 年度土木学会全国大会　第 63 回年次学術講演会，2008.9.
31) 秋本嗣美・川越清樹・風間 聡・沢本 正樹，土砂崩壊と侵食を利用したダム堆砂量の推定手法，平成 20 年度土木学会全国大会　第 63 回年次学術講演会，2008.9.
32) 川越清樹・菊地裕・風間 聡，気候変動による河川水質の影響評価，平成 20 年度土木学会全国大会　第 63 回年次学術講演会，2008.9.
33) 志田孝之・風間 聡・山本潤，MEC モデルを用いた閉鎖性水域における水温変動の再現，平成 20 年度土木学会全国大会　第 63 回年次学術講演会，2008.9.
34) 菊地慶太・風間 聡， GPS を用いた積雪深観測アルゴリズム開発と検証，平成 20 年度土木学会全国大会　第 63 回年次学術講演会，2008.9.
35) 滝口博文・佐藤 歩・川越清樹， GCM を用いた日本全域における将来の洪水予測，平成 20 年度 土木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.
36) 川越清樹・風間 聡，数値気候モデルによる融雪の推定と土砂災害への影響評価，平成 20 年度 土木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.
37) Freddy SORIA・So KAZAMA, GLACIER RUNOFF MODELLING BY LINEAR RESERVOIRS, 平成 20 年度土木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.
38) Nilupul Gunasekara, So Kazama, Dai Yamazaki, Taikan OKI, Potentially available water resources distributions of earth under climate change and their implications for water resources management, 平成 20 年度 土木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.
39) 秋本嗣美・川越清樹・風間 聡，気候変動による将来土砂生産量変化予測，平成 20 年度 土木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.
40) 小野桂介・川越清樹・風間 聡，地球温暖化に伴うタイ北部の土砂災害リスク評価，平成 20 年度 土木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.
41) Luminda Gunawardhana, So Kazama, Site specific assessment of climate change impacts on graoundwater temperature, 平成 20 年度 土木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.
42) 佐藤　歩・川越清樹・風間 聡，気候モデルを利用した日本の洪水リスク評価，平成 20 年度 土

木学会東北支部技術研究発表会，2009.3.

43）佐野雄大，風間聡：土木学会年次学術講演会（2009）
「積雪が与える社会影響の定量化」

44）グナセカラ・ニルプル，風間聡，山崎大，沖大幹：土木学会年次学術講演会（2009）
「Gini river discharge unequal natural water distribution on climate change」

45）風間聡，小野桂介：土木学会東北支部（2010）
「候変動への水災害適応策の考察と問題点」

46）渡邉恵，小野桂介，川越清樹：土木学会東北支部（2010）
「タイ北部の斜面崩壊調査と解析」

47）川越清樹，小野桂介，風間聡：土木学会東北支部（2010）
「マルチ数値気候モデルによる流域の土砂生産に関する影響評価」

48）Hirofumi Takiguchi, Ayumu Sato, Seiki Kawagoe and So Kazama: 16th IAHR-APD
「Estimation of the future flood damages in Japan using GCMs and numerical geological data」

（３）出願特許　なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

1）第23回環境コロキウム，”The roles of catchment size and landscape organization in runoff timing, flow sources, and age”　（2006年2月9日，東北大学土木第一講義室，観客40名）

2）東北大学水環境国際ワークショップ、”Hydro environmental international workshop, Tohoku university”　（2008年3月21日、東北大学土木棟会議室、観客15名）

3）水環境システム学研究室セミナー，”Scarcity and water conflict in Thailand: Case study Mae Cheam River Basin, Northern Thailand”（2009年11月20日、東北大学土木棟講義室、観客30名）

（５）マスコミ等への公表・報道等

1）危険度増す洪水被害，茨城新聞，2008年3月18日.

2）Effect of climate change and land use change on saltwater intrusion, The encyclopedia of earth, 2007年4月11日.

3）「温暖化による日本の水災害の適応策研究」関連の内容で以下の講演会（機関）で基調または招待講演をおこなった。(以下講演会場所，東北建設コンサルタンツ協会、あいコープ宮城、東大生産技術研究所，IPCC-IR3S、東北電力、名古屋大学、筑波大学、ICHARM、RIC、WEPA、環境省、農水省、東北地方整備局)

4）豪州カーティン工科大学において Multi-objective Hydrological model」の題目でセミナーを行った。

5）豪州メルボルン大学において「Hydrological model applications」の題目でセミナーを行った。

6）アジア・パシフィック NPG ネイチャーにおいて「Impacts on Japan」でインタビュー記事が掲載された。

（６）その他

土木学会東北支部より技術開発賞を受けた。

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－１温暖化による水資源への影響予測に関する研究
（２）　温暖化各レベルに対応する農業水需給への影響と適応策に関する研究

独立行政法人　農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究所
河海工水理研究室　　丹治　肇

平成17～21年度合計予算額　25,730千円
（うち、平成21年度予算額　4,418千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］温暖化に伴うわが国の農業用水への影響予測と適応策を分析し、以下の結論を得た。
１）水稲の温暖化影響予測：メッシュ気候値2000の日平均気温による計算の結果、平年値では、一部に、高温障害が生じているが、影響は小さい。+2℃シナリオでは、西日本を中心に、高温障害が発生する。以上は、都道府県毎に1点の平均気温を使った解析と同じ傾向を示している。また、ヒストグラムの最大頻度を見ると、灌漑用パイプラインがゼロから3倍シナリオの偏差では、収量減少を5～10%抑える効果がある。灌漑用水量は20%程度減少させる効果が期待できる。
２）水稲栽培の脆弱性の評価　：統計モデルでは、波浪の被害は九州と東南海に集中する。この地域では、WAST(Mean monthly Worldwide Temperature bias of Augusts and September, 8月と9月の世界月平均気温偏差)で気温が１度上がると年最大波高のMedianが3.3m増加し、海面上昇により大きな影響を与える。
３）将来シナリオに関連する検討：20年に1回程度の気象変動に対しては、灌漑水田は非灌漑水田より脆弱である。日本の場合、経年的に灌漑が拡大するに従い、脆弱性が減少する。エネルギー面で持続可能な灌漑システムで、なおかつ、水質等の現在抱える課題を解決できる水田灌漑システムに、現在ある灌漑システムを再編することが必要である。これは、同時に、温暖化対策への適合策にもなっている。その場合のキーとなる技術は、SGと分散型貯留と思われる。

［キーワード］農業用水、脆弱性、波浪、水稲、対応策

１．はじめに

温暖化に伴う水稲への影響評価と適応策を、水資源と気温の観点から考察した。加えて水田のパイプライン化や水稲の脆弱性、将来シナリオに対する灌漑の影響を評価した。

２．研究目的

水稲の生育に対する温暖化の影響では、ア）高温による生育期間の変動、イ）出穂以降の高温障害による減収が今までに検討されている。過去の検討で落ちていた部分を補足する。田植え、出穂、刈取の期間推定について、田植～出穂間では、日照時間と積算温度が、出穂～刈取間では、

積算温度が主に影響している。今まで県毎に代表気温を設けて、県単位の解析を行ってきた。気温の代表性に問題があるので、ここでは、国土数値情報のメッシュ気候値の平年値データを用いた解析を行った。

また、水稲の脆弱性として、温暖化の水稲栽培への影響では、台風の増大による被害が課題である。ここでは、水田が海岸沿いの低平地に多く分布することから、高波の被害について検討する。海岸地域への温暖化の影響のうち海面上昇については、IPCCシナリオを中心とした予測が知られ、広く利用されている。一方、波浪（高波）や波浪に伴う堤防への波のせり上がりは、現在、物理モデルで検討が進められている。水稲の被災データから、温暖化の影響では、台風被害の評価に焦点を絞る。そこで、過去のデータを元に、沿岸域の波浪と台風と気温の関係の統計解析を試みる。

さらに、多くの温暖化影響では、天水栽培を対象に温暖化による干ばつの拡大を予測している。しかし、灌漑の評価は少ない。これは、灌漑が干ばつに対する適応策として機能しているため、灌漑について現状シナリオの設定が難しいためと思われる。次の２つの仮説が考えられる。

仮説１：灌漑は水供給が不安定な既存農地に水を供給し、気候変動に対する脆弱性が低下する。

仮説２：灌漑は、水不足で水稲を栽培できなかった地区での栽培を可能にするので、生産量は増えるが脆弱性は増大する。

この２つの仮説のうち、どちらが正しいのか検討する。

３．研究方法

（１） 水稲の温暖化影響予測

日照時間は変化しないと仮定し、生育期間の変化は、積算温度だけで表現できると仮定する。2000年の国土数値情報の３次メッシュの気温の月単位の平年値をスプラインで補完して、日気温の平年値を作成した。この気温データを使って、平年値の生育カレンダーを元に、田植～出穂間と出穂～刈取間の積算気温を算出した。次に温度シナリオを変化させて、出穂と刈取日を計算して求めた作物カレンダーで、昨年度と同じ手法で、高温障害の影響を推定した。

また、水田は灌漑用水のパイプライン化により夏季の高温障害の抑制効果が期待できる。１地点での評価試算は既に行っているが、ここでは、県別推定を行う。水田面積を、パイプライン化したものと、パイプライン化しないものに分け、パイプライン化した部分については気温の影響を-0.9度減らして評価する。日用水量は、開水路を20mm、パイプラインを13mmとし、積算灌漑推量の比を取る。

（２） 水稲の脆弱性評価

過去の波浪データを扱う上で、次の作業仮説を立てた。

①温暖化の指標の高い年のデータには温暖化の影響が多く含まれ、低いデータには影響が少ない。

②海岸（波浪観測点）には、温暖化の影響を受けやすい地点と受けにくい地点がある。温暖化の影響を受けやすい地点は、台風の影響を受けやすい。

手順は以下のとおりである。

①各年のデータを温度指標順に並べ替える。

②観測点を台風の影響を受けやすい順に並べ替える。

③台風の影響を受けやすい観測点を抽出する。

④抽出した観測点に対して、複数の温度指標を対比し、説明力の高い温度指標を抽出する。
⑤温度変化が波浪に与える影響を関数化する。

（３）　将来シナリオの検討

日本の水田は90%以上が灌漑されていると思われ、非灌漑水田の統計データはない。したがって、灌漑の有無(with/without)を条件とした分析はできない。一方、戦後の灌漑事業を見ると、水が不足がちな地域にダムによる補給水量を増加させる、あるいは地盤沈下対策で、井戸から河川水に転換する傾向が見られる。したがって、量的に見れば、灌漑が拡大する過程と見なせよう。そこで、時系列的に、水稲生産の脆弱性を評価する。日本の1958-2003年の水田反収データを使った。このデータを(1958-1978)、(1963-1983)、(1968-1988)、(1973-1993)、(1978-1998)、(1982-2003)の６つのグループに編集し、各グループの変動係数を計算した。その結果、県×変動係数６個のマトリックスを得た。

他方、水稲生産統計で、灌漑水田と天水田が分かれている国もある。この場合には、より明確に、灌漑の有無に伴う脆弱性の評価が可能である。ここでは、タイの水田統計を使って、灌漑の有無に伴う脆弱性の差を変動係数で検討する。

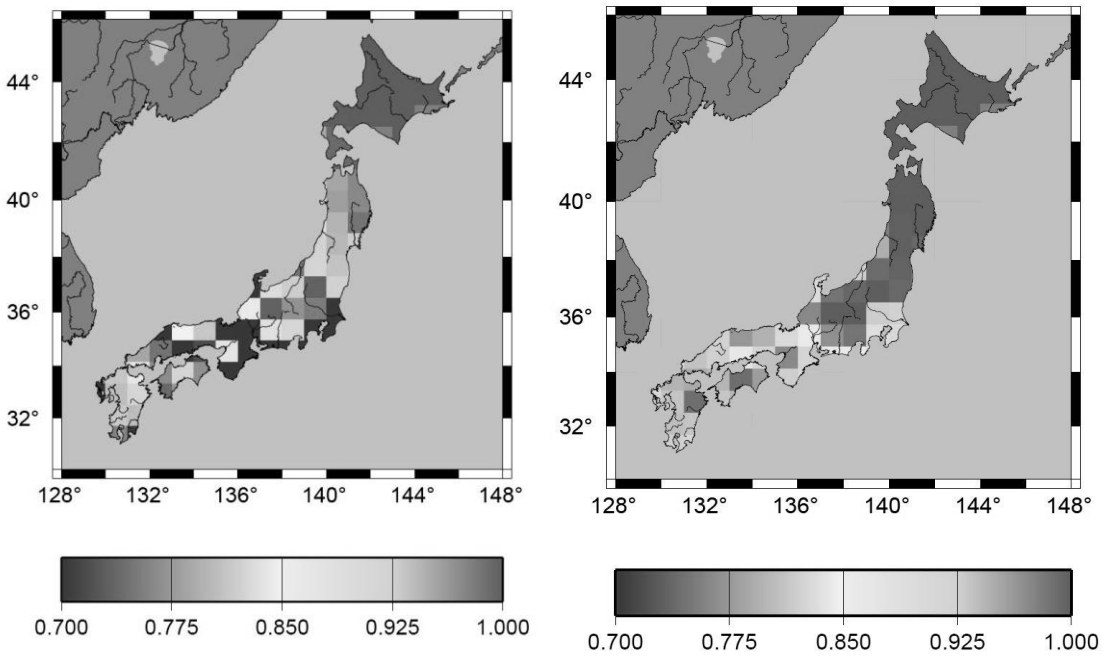
エネルギー制約の条件を整理し、エネルギー制約の与える影響を検討する。水田灌漑システムの課題を整理し、考え得る解決策を検討する。

４．結果・考察

（１）　水稲の温暖化影響予測

図-1に日平均気温による計算結果を1次メッシュで表示した。右の平年値では、一部に、高温障害による減収が生じているが、その影響は小さい。左の+2℃シナリオでは、西日本の色の濃い部分を中心に、高温障害が発生する。結果は、都道府県毎の解析と同じ傾向を示している。

全県の水田パイプライン化率のデータはないので、圃場整備率のデータで代用する。圃場整備率データは1975年、1993年、2006年が入手できた。福井県の2007年の水田パイプライン化率は16%である。福井県の1973年と2006年の圃場整備率の偏差は19%である。これから、1973年と2006年の圃場整備率の偏差をパイプライン率とみなすことにする。以下、2007年のパイプライン化率をx1、パイプラインがない場合をx0,3倍のパイプライン化率の場合をx3で表す。この表記では、”x0-x1”は、パイプラインがない状態から、2007年現在の普及率までの偏差を示す。”x1-x3”は、現在のパイプラインの普及率が３倍の場合の偏差を示す。”x0-x1”との各県の米生産量の相対比と水田灌漑用水量の相対比のレンジは10～20%であった。図-2に各県の米生産量の相対比のヒストグラムを示す。図-3に各県の水田用水量の相対比のヒストグラムを示す。図-2、図-3は、”x0-x3”の偏差に対して書かれている。ヒストグラムで最大頻度を見ると、パイプラインがゼロから3倍シナリオの偏差では、収量減少を5～10%抑える効果がある。灌漑用水量は20%程度減少させる。



図－１　水稲の高温障害予測　（左：+2℃シナリオ，右：2000年平年値）

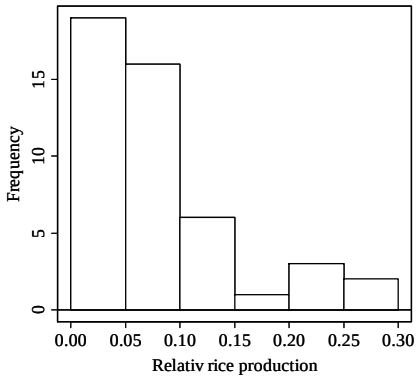


図-2 相対収量へのパイプラインの影響のヒストグラム

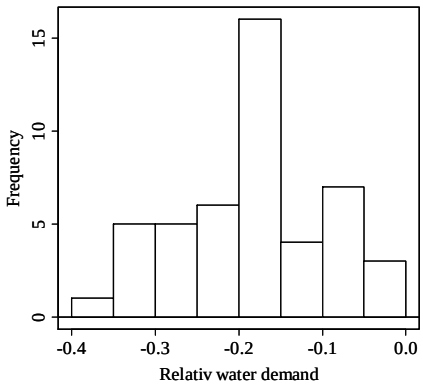


図-3 相対灌漑水量へのパイプラインの影響のヒストグラム

（２）　水稲の脆弱性評価

波浪データは、港湾技術研究所の1978～2004年のNOWPHAUSデータを使った。この中で42観測点の年最大波高を抽出した。地点毎に、年最大波高が発生した月を調べ、各月の最大波高発生確率を計算した。その結果、地点×月のマトリックスを得た。このマトリックスにクラスター分析を行ったところ、8、9月とその他の月が２グループに分かれた。これから、波浪観測地点は、8、9月の影響を受ける地点（恐らくは台風の影響を受けやすい地点）とその他の地点に２分することができる。そこで、8月と9月の最大波高の発生確率の和を、台風の影響指標と考え、この指標順に観測点を並べた。このうち値の大きい志布志湾から順に、小名浜までの14地点を抽出した。

次に、温度指標として、WAST(Mean monthly Worldwide Temperature bias of Augusts and September、 8月と9月の世界月平均気温偏差)、 SI(South Oscillation Index、 南方振動指数)、

NINOWST(Ocean surface temperature bias between 15N-EQ and 130E-150E、 赤道～北緯15度、東経130～150度の海表面温度指標)、NINO4(Ocean surface temperature bias between 5N-5S and 160E-150W、 南緯5度～北緯5度、東経130～150度の海表面温度指標)、 NGT(Mean annual temperature bias of the Northern Hemisphere、北半球の年平均気温偏差)、 JPTAS(Mean monthly temperature bias in August and September in Japan、日本の８、９月の月平均気温偏差)を選び、これらの値と年最大波高の間のSpearmanの順位相関係数を表-1に纏めた。これから、p-valueが小さく、ρが大きいのは、WASTとNGTであり、最大波高はこの２つの値と関係が強い。P-valueとρからは、WASTの相関が一番強い。以下、WASTと最大波高の関係をみる。

各地点の最大波高の代表値として、Mean(平均値)、Median(中央値)、 3rdQuantile(第３四分位値)、 Max(最大値)を取り上げた。表-2にMedianモデルの緒元を示す。モデルは次式で書ける。

$$Median = 5.202 + 3.3502 \times WAST + \varepsilon$$

これは、気温が１度上がると年最大波高のMedianが3.3m増加することを意味する。統計モデルは、波浪の被害は九州と東南海に集中し、海面上昇より大きな影響を与える。

表-1　気温指標に対するSpearmanの相関係数

Parameter	S	p-value	ρ
WAST	1002.0	0.000	0.694
SI	3846.2	0.385	-0.174
NINOWST	2951.6	0.623	0.099
NINO4	2244.7	0.110	0.315
NGT	1242.7	0.001	0.621
JPTAS	2523.9	0.249	0.230

表-2　選定回帰モデル

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)	Signif. level
Intercept	5.2020	0.1572	33.083	<2e-16	<0.001
X	3.3502	0.9143	3.664	0.00117	0.001

（３）　将来シナリオの検討

日本の各県の変動係数マトリックスをクラスター分析にかけ図-4の結果を得た。県は、変動係数が時間と共に減少する(CV decrease)場合と、増加する(CV increase)場合に分けられる。つまり、灌漑の増大により脆弱性が減少する場合が多いが、一部の県では、逆の結果となった。減少する県は、東北太平洋岸（青森、岩手、宮城、福島）、内陸（栃木、長野、奈良）、北九州周辺（愛媛、大分、福岡、佐賀、長崎、熊本）である。東北は、1994年の冷害の影響と思われる。

タイのデータは、MIr:雨期灌漑、MNon:雨期非灌漑、SIr:乾期灌漑、SNon:乾期非灌漑に分けられる。 図-5に、地域毎の変動係数を示す。

以上の結果から、灌漑の効果の仮説を次に再編する。

① 20年に1回程度の気象変動に対して、灌漑水田は非灌漑水田より脆弱である。これ以下の確率では、頑強である。これは、灌漑整備が概ね10年に一度程度の渇水を想定しているためである。

② 日本の場合、少数の例外流域を除けば、水田面積に対して、水源の確保が可能である。このため、経年的に灌漑が拡大するに従い、脆弱性が減少する。

③ タイでは水資源量により乾期の水田面積を制限する。水田面積決定で総収量の期待値の増大と

渇水リスクの増大の組み合わせのベストミックスが選択されれば、灌漑水田と非灌漑水田の脆弱性に差はなくなる。この仮説が正しければ、温暖化により、水資源が減少した場合には、水稲から陸稲といった渇水リスクが変化しないような作物の組み合わせが選択される。

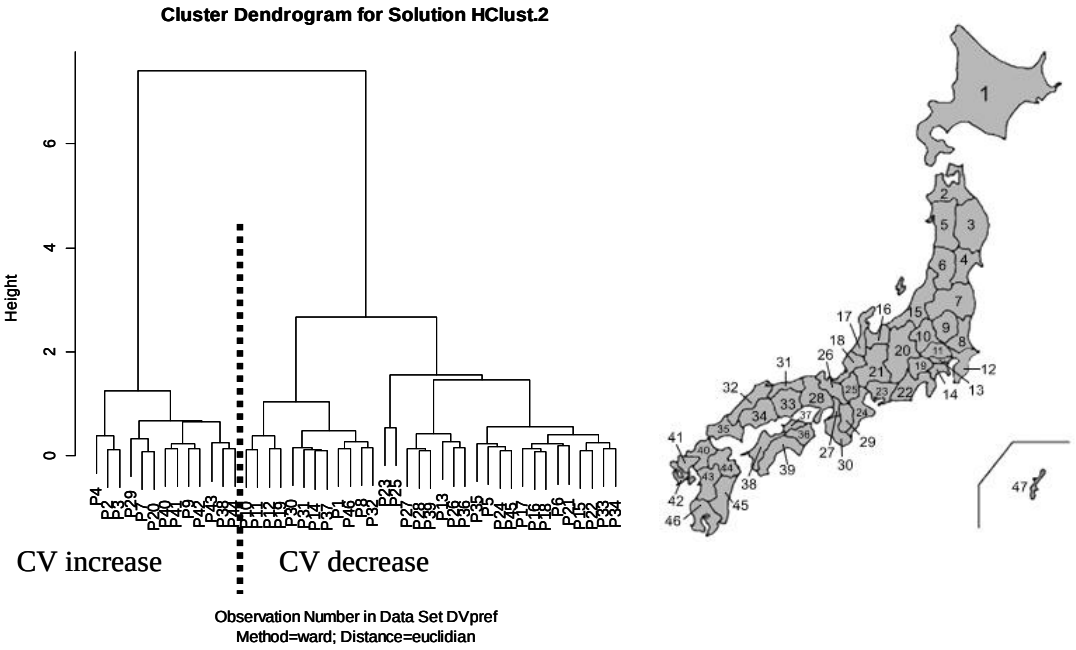


図-4 変動係数のクラスタリング

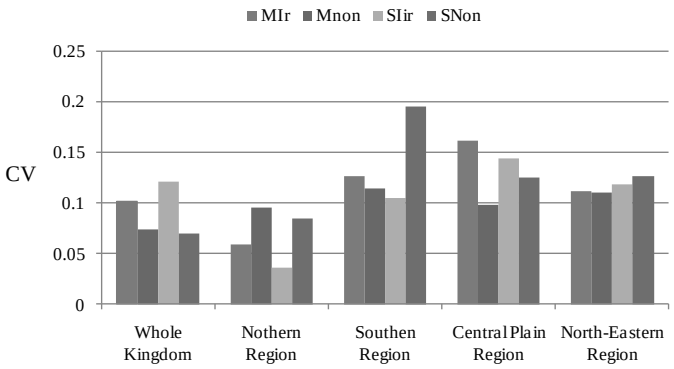


図-5 タイの水稲反収の変動係数
(MI:雨期灌漑, MNon:雨期非灌漑, SIr:乾期灌漑, SNon:乾期非灌漑)

自然エネルギーの単位を揃えた将来見通しがないので、資料を編集した。2030年予測比率で、最大の水力が11.5%であり、複数の自然エネルギーが共存する。ポテンシャルの余力は太陽光を除いて小さい。自然エネルギーは時間変動が大きく、発生源が広く分布しているため、送電システムを変えるスマートグリッド(SG)の検討が進められている。SGの制御は、分散型の多点供給、多点需要である。水管理にSGを使えば、分散型管理で労力の軽減が図れる。SGによる水管理は貯水システムと組み合わせることで、効果が期待できる。太陽光発電では、夜間電力の不足が問題になるが、図-6のような逆調整池システムを組み込めば改善が可能である[1)]。

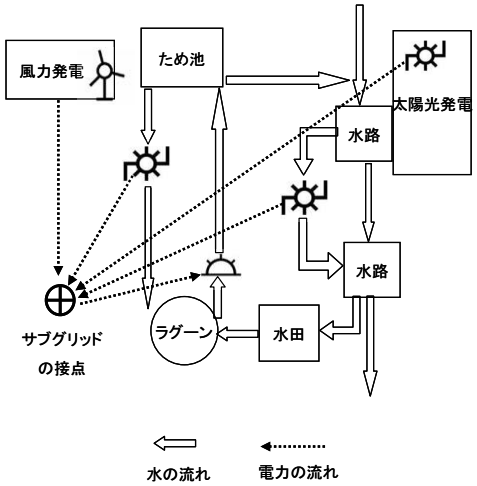


図-6　水田電池システムの概念図

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究成果によって温暖化による水稲への影響と灌漑用水の適応策が示された。

（２）地球環境政策への貢献

将来的に、地球温暖化などによる異常気象発生時の農業用水供給に関する問題点を整理し、事前に備えるような対策を提言することができる。

６．引用文献

1) 丹治肇，小林慎太郎，桐博英，将来のエネルギー供給変化に対応した水田灌漑システムの展望，水文水資源学会誌,23(1),43-56(2010)

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 丹治肇，桐博英，Influences of Global Climate to Peak Wave Height in Typhoon Seasons, COASTAL DYNAMICS 2009, Tokyo, No.136, 1-11(2009)

2) 丹治肇，桐博英，Global Warming Influences on Tidal Wetland in Japan, Coasts, Marine Structures and Breakwater 2009, Edinburgh, IEC, 1-15(2009)

3) 丹治肇，桐博英，Irrigation Effects on Vulnerability of Rice Yield in Thailand and Japan, International Society of Paddy and Water Environment Engineering, Bogor, GI,1-7(2009)

4) 丹治肇，小林慎太郎，桐博英，将来のエネルギー供給変化に対応した水田灌漑システムの展望，水文水資源学会誌，23(1),43-56(2010)

〈その他誌上発表（査読なし）〉
なし

（２）口頭発表（学会）
1) 丹治肇,桐博英,日本の農業用水の再編と温暖化予測,2007年水文･水資源学会研究発表会(2007)
2) 丹治肇，桐博英，中矢哲郎， Situation and Problems of Tidal Wetland in Japan in View of Global Warming, International Workshop on Sustainable Paddy Farming and Wetland, Changwon, ICID, 41-62(2008)
3) 丹治肇，桐博英，中矢哲郎，水田のラムサール湿地としての機能評価,第21回水文・水環境研究部会シンポジウム，37-44(2008)

（３）出願特許
なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）
なし

（５）マスコミ等への公表・報道等
なし

（６）その他
なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－１温暖化による水資源への影響予測に関する研究
（３）　地球温暖化による都市水システムへの影響評価に関する研究

東京大学　大学院工学研究科
都市工学専攻　　滝沢　智

平成17～21年度合計予算額　23,925千円
（うち、平成21年度予算額　4,104千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］これまでの研究で、水道水源となっている河川の水温とアンモニア性窒素とが高い逆相関を示すことが示された。今年度は、荒川流域の荒川本川並びに支川の水質データを用いて、水質変動の現状と、水質変動に影響を与える因子について考察した。特に、pHの上昇は、浄水場において凝集阻害を引き起こし水質を悪化させるほか、薬品の注入量の増大を招くため、pHの変化に着目した。

その結果、荒川下流の秋ヶ瀬取水堰において、年平均のpH及びアルカリ度は、過去40年間に上昇する傾向が見られた。荒川上流部の支川はpHが8以上と高いが、中でも横瀬川は9以上の極めて高いpHであった。これらの支川は荒川本流のpHに影響を及ぼしているが、流下とともにpH は下るため、秋ヶ瀬取水堰での高pHは上流部の河川によるものではなく、中流部以下の支川や荒川本川内でのpH上昇が考えられた。 特に、秋ヶ瀬取水堰において5月から6月にかけてpHとアルカリ度が上昇する原因としては、水温の上昇による藻類の増加が考えられた。秋ヶ瀬取水堰では一年を通して窒素やリンなどの影響塩濃度は高く、藻類の増殖制限因子にはなっていない。このため、水温が上昇する5月から6月にかけてpH、アルカリ度、溶存酸素濃度などの上昇を招いたものと考えられる。その一方で、藻類増殖が起こりにくい1月から3月にかけてpHが上昇する場合もあり、今後は、藻類増殖以外の可能性についても検討が必要である。

［キーワード］水道水源、河川水質、水質変動、pH、水温

１．はじめに

荒川流域は、東京都および埼玉県の約２千万人の人々の水源となる重要な流域である。高度成長期の都市開発と下水道整備などの遅れにより、荒川流域の水質が悪化したが、近年は下水道整備の推進により大幅な改善がみられている。これまでの研究で、水道水源となっている河川の水温とアンモニア性窒素とが高い逆相関を示すことが示された。今年度は、荒川流域の荒川本川並びに支川の水質データを用いて[1-3)]、水質変動の現状と、水質変動に影響を与える因子について考察した。特に、pHの上昇は、浄水場において凝集阻害を引き起こし、河川水中の濁度が除去しに

くくなるなど、水道水の水質を悪化の原因となる。また、pH調整のために薬品の注入量の増大を招く。そこで、本年は荒川流域におけるpHの変動原因について着目し、温暖化が引き起こす水質問題について検討を加えた。

２．研究目的

図1に荒川流域の水質測定点を示す。荒川上流では、荒川本流の中津川合流地点までと、赤平川がAA類型（BOD1mg/L以下）に指定されている。荒川の流下に伴い、久下橋までがA類型（BOD<2mg/L）、秋ヶ瀬取水堰までがB類型（BOD<3mg/L）、秋ヶ瀬取水堰以下がC類型（BOD<5mg/L）となっている。荒川中流域の右岸では、荒川の大きな支川である入間川がA類型であり、さらに入間川の支川のいくつかはB類型となっている。埼玉県南部の川越市などを流れる不老川は汚濁河川として知られており、E類型が指定されている。他にも埼玉県南部の所沢市や朝霞市を流れる河川は、荒川と平行して流れる新河岸川に接続し、新河岸川は秋ヶ瀬取水堰の下流で荒川（隅田川）に接続することで、東京・埼玉の水源である秋ヶ瀬取水堰での水質悪化を防止している。同様に、荒川左岸のさいたま市を流れる鴨川も秋ヶ瀬取水堰の直下で荒川に合流している。

埼玉県内の全河川水質観測地点の平均BODは年を追って減少してきており、水質の改善が進んでいることが明らかである。また、平成19年度の年平均BODが8.1-10.0mg/Lの河川は荒川流域にはなく、5.1-8.0mg/Lの河川は鴨川（上述）、3.1-5.0mg/Lの河川は不老川と市野川がある。鴨川と不老川は上記の理由で秋ヶ瀬取水堰地点での荒川河川水質に直接の影響はないが、市野川は武蔵水路と入間川の合流地点のちょうど中間の地点で荒川に合流しているため、荒川の水質に影響を与える。

ここでは、都市河川の水質変動を明らかにすることを目的とする。

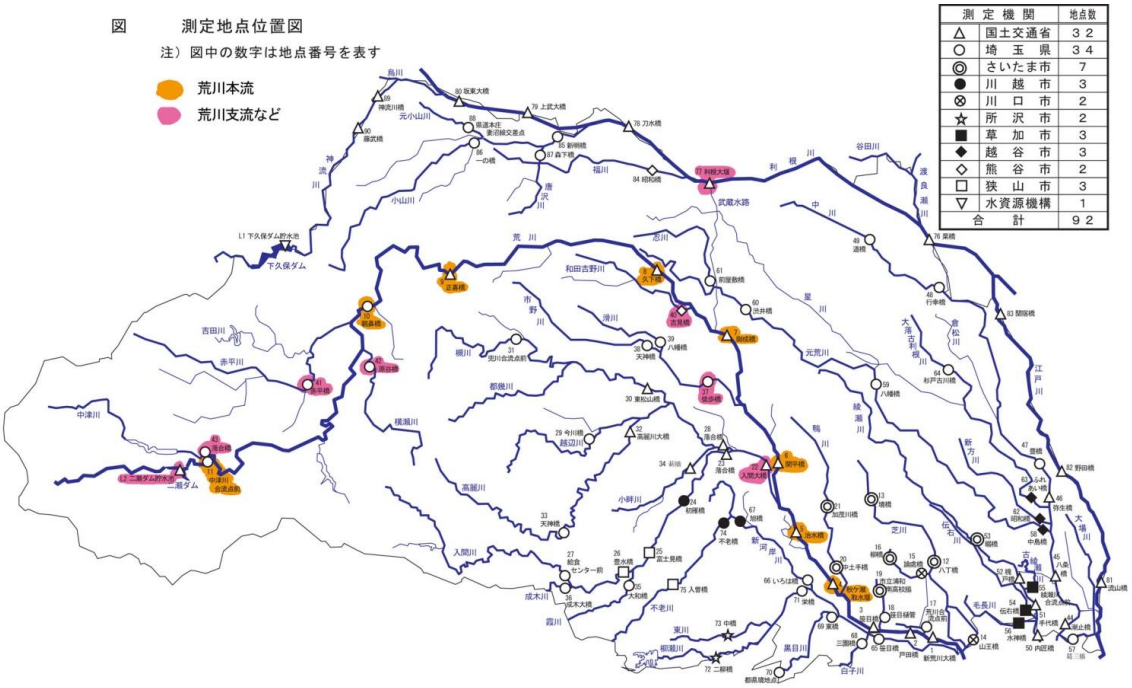


図1　荒川流域の水質測定地点及び解析に用いた地点（橙色：本川、桃色：支川）

３．研究方法

図2に荒川の水質の月間変動を示す。これらの図から荒川水質の月間変動について、以下のことが明らかとなった。

荒川上流部ではpHが高く、流下に伴ってpHが低下する傾向がみられる。pHは荒川本流では、一年を通じてほぼ変わらない地点と、5月と6月に上昇する地点がある。前者は、中津川合流地点、御成橋、開閉橋などであり、横瀬川の合流地点の上流と、武蔵導水路合流地点から入間川が合流する地点の間である。後者は、親鼻橋、正喜橋、久下橋、及び治水橋と秋ヶ瀬取水堰などであり、横瀬川の合流地点から武蔵導水路の合流地点の間、並びに入間川の合流地点から下流である。荒川支流でも、荒川本川と同様、上流の支川ほどpHが高く、中流から下流に従って、pHは低くなった。荒川支流では、5月と6月に加えて、1月から3月の間にpHが上昇する地点があった（横瀬川の原谷橋、赤平川の赤平橋）。また、市野川と入間川は中流域ながら5月と6月のpH が高く、荒川合流後の治水橋でのpH上昇の原因となっていると考えられた。一方、利根川は、一年を通じてpHが7.5程度に安定していた。さらに、和田吉野川吉見橋では、4月と5月を除いて、pH7.5で安定していた。

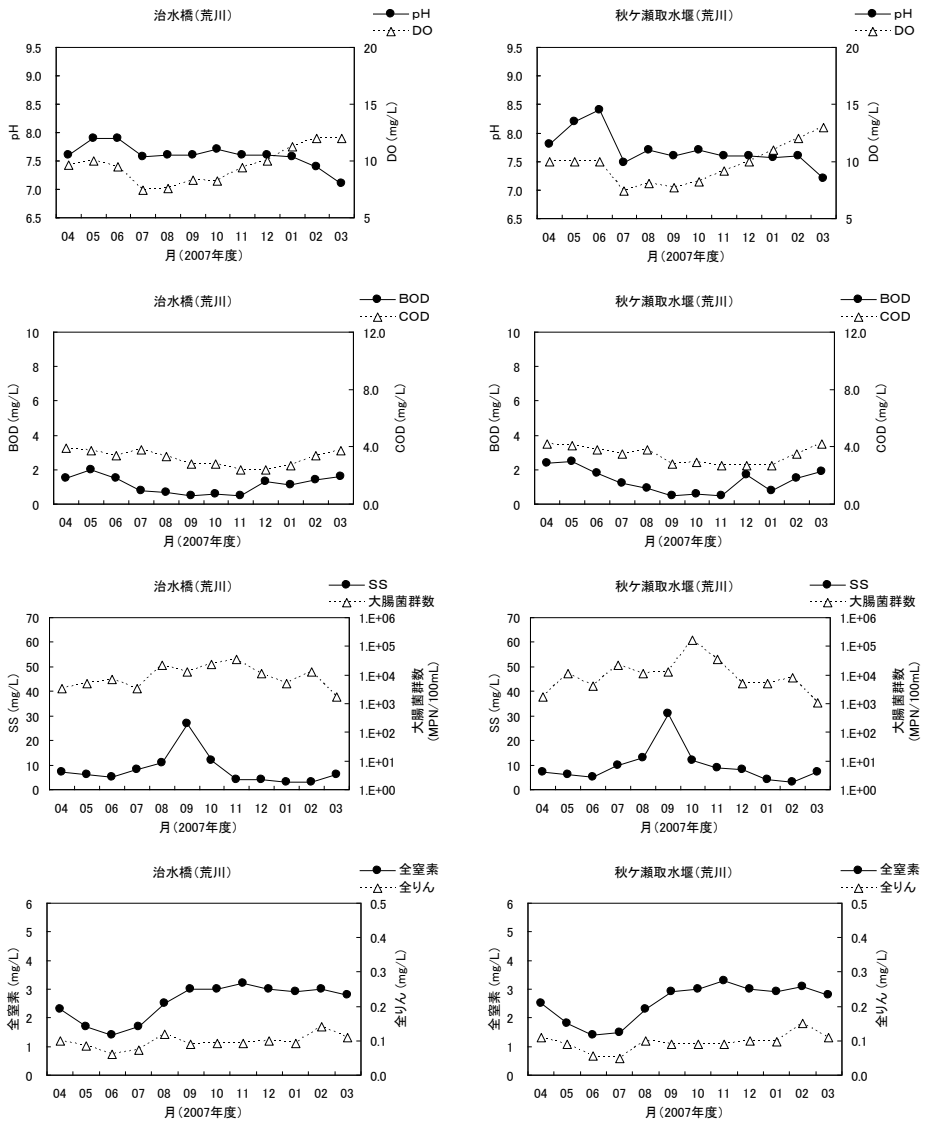


図２　荒川の水質月間変化（治水橋、秋ヶ瀬取水堰、2007年度）

４．結果・考察

5月と6月に季節的にpH が上昇するのは藻類の発生との関係が考えられる。藻類が発生しやすい地点では、荒川に堰が設けられていたり、農業用のため池などからの排水が流入したりすることが考えられる。その後、7月以降にpHが低下する理由は、農業用水の流入がpH上昇の原因であると考えると、7月以降には農業用水の流入が減少するためとも推定される。それ以外の理由として、藻類の増殖に適した水温、日射などの条件が5月から6月に整うということも考えられる。しかし、1月から3月にかけてpHが上昇する原因については、今後検討が必要である。

秋ヶ瀬取水堰での5月と6月のpH上昇は、荒川上流部のpH上昇によるものではなく、市野川と入間川など中流域の河川からの流入水の影響を受けているものと考えられる。また、5月と6月の秋ヶ瀬のpHはすぐ上流の治水橋のpHを上まわっていることから、秋ヶ瀬の取水堰でもpHの上昇が起きていることが考えられる。

秋ヶ瀬のpHは長期的に上昇する傾向が見られた。その原因としては、市野川や入間川などの支川の影響、秋ヶ瀬取水堰でのpH 上昇などが考えられるが、上流から中流にかけて、長期的なpHの上昇がみられたかどうかについて、さらに検討する必要がある。

荒川本川の全りん・全窒素は、流下につれて上昇する。正喜橋では全りん0.03mg/L、全窒素1.5mg/L程度、久下橋では全りん0.05mg/L程度、全窒素2.0mg/L程度、御成橋では、全りん0.1mg/l程度、全窒素0.2mg/L以上にまで上昇し、その下流の開平橋から秋ヶ瀬取水堰までも全りん・全窒素ともに徐々に上昇した。中下流域の支流では、市野川（徒歩橋）や入間川（入間大橋）から全りん0.3mg/L以上、全窒素5mg/L以上の高濃度のりんと窒素が荒川本川に流入している。これらの支流では、夏から秋（8月から10月を中心にその前後の月）にかけて濃度が低下し、逆に12月から5月ごろまで高濃度となる。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究成果によって温暖化による都市河川の一部の水質への影響が明らかになった。

（２）地球環境政策への貢献

将来的に、地球温暖化による気温上昇が水源水質や生態環境に与える性質は、国内だけでなく温帯の都市河川のどこにでも起きうる問題である。この問題に対して事前に備えるようなデータ集集を提言することができる。

６．引用文献

1）平成19年度公共用水域及び地下水の水質測定結果、埼玉県環境部水環境課発行
2）平成19年度公共用水域の水質測定結果について
http://www.pref.saitama.lg.jp/A09/BG00/kasen/h19/happyou_h19.htm
3）平成 20 年度公共用水域の水質測定結果について
http://www.pref.saitama.lg.jp/A09/BG00/kasen/h20/happyou_h20.htm

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) 川越清樹，菊池裕，風間聡，滝沢智，気候変動による主要河川の水質の影響評価、環境工学研究論文集、第45巻、pp.467-474(2008)

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

（２）口頭発表（学会）

1) 滝沢智、小熊久美子、伊藤くみ、村上道夫、地球温暖化に伴う水道原水水質の変化の推定方法に関する検討、日本水環境学会年次講演会（2009）

2) Satoshi Takizawa, Climate Change Impacts on Water Quality in Arakawa River Basin, International Seminar on Climate Change and Water: Impact and Response, Incheon, R. O. Korea, March 25th(2009)

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

埼玉県企業局、及び東京都水道局との荒川原水の水質に関して意見交換を通じて、将来の環境変動が水源水質に及ぼす影響についての考え方を広め、長期的な対応を模索している。

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－１　温暖化による水資源への影響予測に関する研究
（４）　温暖化各レベルに対応する水資源マネジメントの政策オプションに関する研究

国土交通省 国土技術政策総合研究所
河川研究部 水資源研究室　　三石　真也

平成17～21年度合計予算額　25,714千円
（うち、平成21年度予算額　4,410千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］近年、日本の年降水量は、年毎の変動幅が広がる傾向があり、かつて観測したことのない著しい少雨となる年も発生している。さらに、今後予想される地球温暖化に伴う気候変動によって、渇水被害が拡大する恐れも想定されるが、これらの現象に適切に対応するためには、節水の普及や安定的な水資源の供給はもちろんのこと、流水の適切な管理を行うことが重要である。しかし、全国的に見ても取排水を含めた表流水及び地下水の流動を含む流域内の水収支は必ずしも十分な精度で把握されていない状況である。このため、大量の農水等の取水がある一方で、河川環境保全への要請も強い筑後川をモデル河川として、流域内水収支評価モデルを構築すべく、筑後川に利水を依存している農業用水及び都市用水の取排水、地下水流動等流域内の水収支を明らかにするとともに、魚類の産卵床、景観等河川環境保全のために必要な維持流量にも配慮するモデルを作成した。さらに、渇水時において各利水者の水需給を調整する際の一助となるよう、筑後川、他水系、地下水等の水源の節水率を調整するための水需給把握システムの構築を試みた。

［キーワード］水道水源、河川水質、水質変動、pH、水温

１．はじめに

渇水時において河川環境と整合しつつ円滑な水利用を行うためには、緻密な流水管理を行う必要がある。このため、慣行水利権を含めた農業用水、都市河川の取排水、地下水等流域内水収支を明らかにし、筑後川の基準点である瀬ノ下の流量を上流荒瀬地点流量を基に予測することにより、流域の水循環を解明する低水管理シミュレータの構築を行った。さらに、将来発生するであろう渇水時において渇水対策を可能とする水需給把握システムの構築を検討した。

２．研究目的

筑後川の流水は、流域内の都市用水、農業用水のみならず、福岡地区、福岡県南地区、佐賀地区等、流域外にも広く利用されて地域の経済発展を支えている。荒瀬から瀬ノ下間の中流域では大石堰、山田堰、恵利堰（床島用水）の農水3大堰をはじめ、大規模な利水が見られ、瀬ノ下地点

周辺には、下流域の広域的な水利用の取水が集中しており、瀬ノ下地点を低水管理の基準地点としている。

筑後川における低水管理にあたっては、河川環境の保全や下流既得利水、水産業に影響を及ぼさないよう配慮し、瀬ノ下地点において40m^3/sを水資源開発の基準流量と設定し、ダムに不特定容量が確保されている10月１日から３月31日にあってはこれを確保するようダムからの補給が行われているが、ダム放流後に発生した降雨による残流域流入量の増大、農業用水の取排水量の増減等により瀬ノ下地点の流況は、40m^3/sを上回る状況も見られる。

荒瀬地点では両岸に低い台地が形成され、上流部で利用された発電用水を含めて、全ての流水が荒瀬地点において流下すると考えられる。ここでは、まず荒瀬地点流量を基に各堰の取排水量、地下水量を推計して瀬ノ下地点流量を算定する手法を開発することを目指した。

他方、これまで、筑後川においては、昭和53年、平成6年と約１年に及ぶ断水を経験し、社会経済に大きな影響を与えてきた。今後も、地球温暖化による極端現象が顕在化することが指摘されており、適正な水利用と低水管理が行われても、激甚な渇水に見舞われる可能性がある。このような断水を伴う厳しい節水を要する渇水が発生した場合、各利水者にどのような取水制限率をかけるかが大きな問題となる。筑後川に利水を依存する利水者は、流域内、流域外と地理的に区別できる他、筑後川以外に二級水系、地下水、海水淡水化などの水源を所有するか否か、また筑後川に水源を依存する割合も大小さまざまであるなど、その水源構造は多種多様であり、渇水時における耐性も大きく異なる。現実には、過去の渇水時においては、流域外の利水者に対して、より大きな取水制限が課せられるなど、自己水源の状況も踏まえつつ、流域内の利水や既得利水に配慮した取水制限が行われている。

以上の課題を踏まえ、ここでは、渇水時に利水者の渇水への耐性を考慮しつつ、節水率を設定することを可能とするべく、水需給把握システムの構築を行った。

３．研究方法

夜明～瀬ノ下間の残流域には、6つの主要支川が流入し、それぞれの流量観測所において、流況が把握されている（図－１）。この他、農業３堰による取水と還元水、地下水の流出、都市用水の取排水により水収支は構成されている。

以上を踏まえ、瀬ノ下地点流量は荒瀬地点流量や各種利水の取排水量を基に次のように表される。

還元率を用いて農業用水の収支を表すと、瀬ノ下流量予測式は次のとおりである

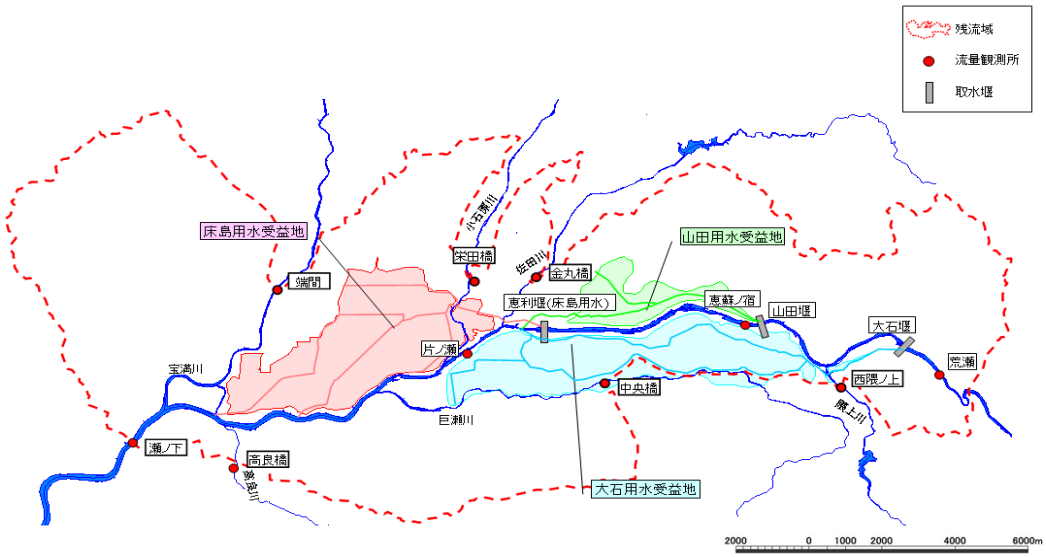
瀬ノ下流量=荒瀬流量+残流域流入量-都市用水量+都市排水量+地下水流入量-3堰取水量(X+Y+Z)
+3堰余水排水量(x+y+z)+還元率による還元量((X-x)×a+(Y-y)×b+(Z-z)×c)
-その他農水取水量+その他農水還元量

a,b,c:係数

当該区間では、農業用水水利権が慣行水利権を含めて合計21件、利水量が48.95 m^3/s存在するが、その大部分を占めるのが、大石堰、山田堰、恵利堰である。

大石堰では、取水直後に存在する田面高の高い水田へ導水する水位を確保するために配水管理用水量が必要なことから、取水量は実際に必要な農業用水の必要取水量に比べて大きく、相当の

水量が用水路の途中で河川に排水されている。この水量を表－１において、「余水排水量」として示しており、ここでは、堰地点における取水量から下流の農地にて利水基準年に計画上必要とされる粗用水量を控除して求めた。



図－１　夜明～瀬ノ下残流域と主要支川

なお、床島用水については余水排水量の計画は無く、山田用水については慣行水利であり計画がないことから余水排水量については０m^3/sとして設定している。

現実には、降雨等により有効雨量となった水量を控除した水量について水田への導水が行われるため、この「余水排水量」は、多くの誤差を含む水量であるが、現場においてその流量観測は行われていなく、その流量把握は今後の課題である。また、蒸発散量や地下水への浸透量を除く水量である還元量については、図－２に大石堰の例を示したように、実際に農地に導水された水量と河川や排水路に流出した水量を巨瀬川等の自流について、同時流量観測を行い、次式により還元率を算出した。

表－１　農業用水の収支（ 残流域409km2）

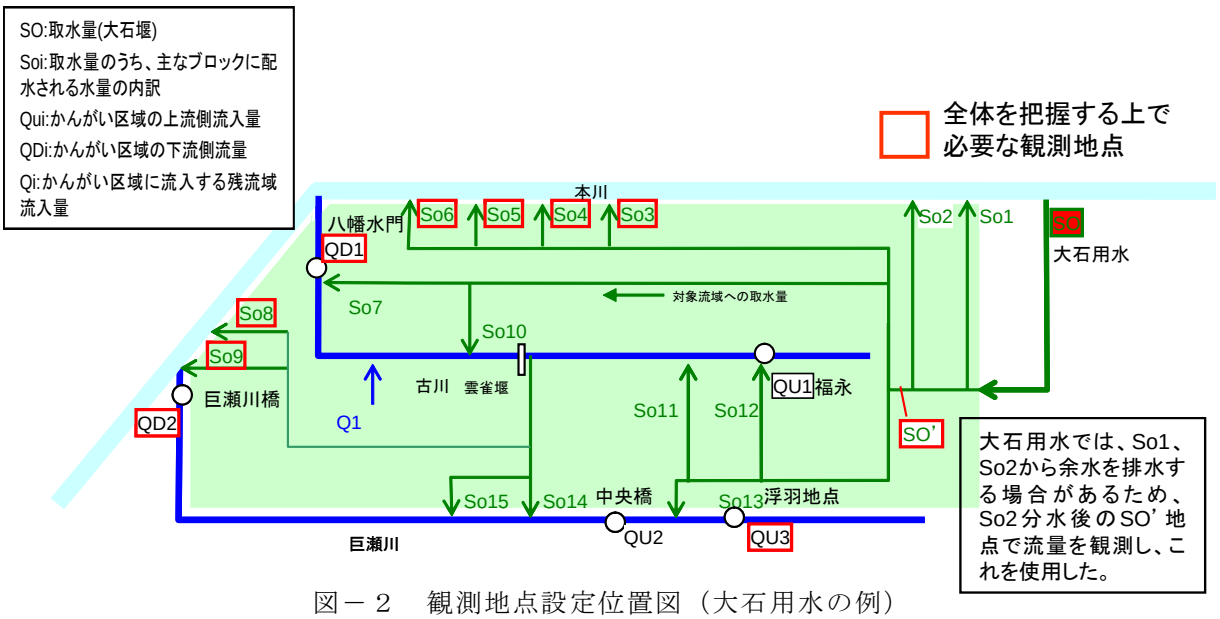
期別	大石用水 2000 ha				山田用水 664 ha				床島用水 2653 ha				その他 4800			合計 10117			流域外からの供給水量	還元量の考え方
	取水(X)	余水排水量(a)	還元率[%](x)	還元量(E)	取水(Y)	余水排水量(b)	還元率[%](y)	還元量(F)	取水(Z)	余水排水量(c)	還元率[%](z)	還元量(F)	取水(W)	余水排水量(d)	還元量(G)	取水	余水排水量	還元量		
活着期(6/14～6/30)	16.00	6.74	40	3.71	6.40	0.00	40	2.56	15.01	0.00	40	6.00	3.17	0.00	1.27	40.58	6.74	13.54	4.30	還元率を20～60%(2回分)の平均で40%とした。※1
分けつ(7/1～7/20)	16.00	2.44	75	10.17	6.40	0.00	75	4.80	14.90	0.00	75	11.18	3.14	0.00	2.36	40.44	2.44	28.50	7.81	還元率を70～80%(2回分)の平均で75%とした。※1
中干し期(7/21～7/31)	16.00	2.39	60	8.16	6.40	0.00	60	3.84	14.82	0.00	60	8.89	3.13	0.00	1.88	40.35	2.39	22.77	6.16	還元率を50～70%(2回分)の平均で60%とした。※1
幼穂･出穂期(8/1～9/10)	16.00	2.37	75	10.22	6.40	0.00	75	4.80	16.12	0.00	75	12.09	3.40	0.00	2.55	41.92	2.37	29.66	8.03	還元率を70～80%(4回分)の平均で75%とした。※1
登熟期(9/11～10/10)	16.00	3.99	70	8.41	6.40	0.00	90	5.76	15.15	0.00	90	13.64	3.20	0.00	2.88	40.75	3.99	30.68	8.20	還元率を、大石用水は70%、その他用水で約90% とし
非かんがい期(10/11～	6.54	6.50	60	0.02	3.00	0.00	60	1.80	8.89	0.00	60	5.33	1.88	0.00	1.13	20.30	6.50	8.28	1.68	還元率を60%とした。※3

※恵利堰では、計画上の余水排水量は設定されていない。山田堰は慣行水利のため、計画は不明である。

還元量＝(SO3＋SO4＋SO5＋SO6＋SO8＋SO9＋QD1＋QD2)－Q1－QU3

還元率＝還元量／SO'

還元率は、近年における渇水年（H6、H14、H15、H17）と H20 年の同時流量観測値のうち、降雨の影響が小さく、安定している時期のデータ及び H21 年に本研究で実施した流量観測値のデータを用いて、残流域全体における消費量と取水量の関係から算定した。還元率について、登熟期においては、還元率 90%と高い値を示す（表－１参照）が、現場では、刈り取りを控えて多くの水田では導水せず、乾燥化を図っており、大部分の流水が排水されているものと考えられる。



図－２　観測地点設定位置図（大石用水の例）

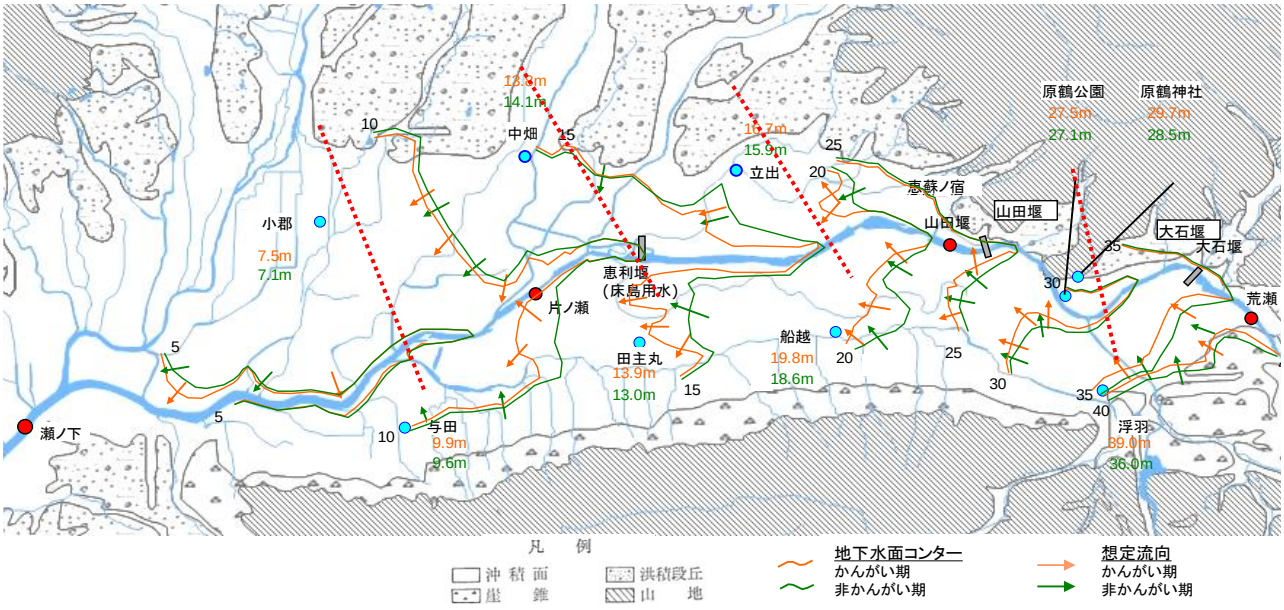
当該区間における筑後川は、北側の朝倉山塊と南側の耳納山地に挟まれた低地部を流下しており、山地から地下水が河川へ流入する構造をなしている。当該区間沿川においては、12箇所の浅層地下水観測が実施されている。これらの地下水位観測値は灌漑期において上昇し、非灌漑期において下降する傾向を示すが、河川水位よりは常に高く地下水が河川を涵養する構造となっている。これらの地下水位から当該区間沿川における地下水の流動状況は図－３のように推定できる。

浅層地下水の流動する砂層のボーリングデータの粒径が0.1～0.25mmで小粒径側からの積算分布19%であることから、ほぼ20%であると見なし、表－２に示す20%粒径（D20）と飽和透水係数の関係（クレーガーの表）により透水係数を$k=1.40\times10^{-2}$cm/sと推定した。筑後川中流部沿川での平均的な地下水位横断勾配Ｉは、地下水位観測所と河川水位の関係から、図－３に赤点線で示す各段面の平均で1/300程度と推定した。当該区間における平均的な砂層厚（10m）、河川延長から、当該区間における地下水の河川への流入量は、0.26m^3/sと推定した。

表－２ クレーガーの表

D20(mm)	k(cm/sec)	土質分類	D20(mm)	k(cm/sec)	土質分類
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘土	0.18	6.85×10^{-3}	
0.01	1.05×10^{-5}	細粒シルト	0.20	8.90×10^{-3}	微粒砂
0.02	4.00×10^{-5}		0.25	1.40×10^{-2}	
0.03	8.50×10^{-5}	粗粒シルト	0.30	2.20×10^{-2}	
0.04	1.75×10^{-4}		0.35	3.20×10^{-2}	
0.05	2.80×10^{-4}		0.40	4.50×10^{-2}	中粒砂
0.06	4.60×10^{-4}		0.45	5.80×10^{-2}	
0.07	6.50×10^{-4}		0.50	7.50×10^{-2}	
0.08	9.00×10^{-4}	極微粒砂	0.60	1.10×10^{-1}	
0.09	1.40×10^{-3}		0.70	1.60×10^{-1}	
0.10	1.75×10^{-3}		0.80	2.15×10^{-1}	粗粒砂
0.12	2.60×10^{-3}		0.90	2.80×10^{-1}	
0.14	3.80×10^{-3}	微粒砂	1.00	3.60×10^{-1}	
0.16	5.10×10^{-3}		2.00	1.80	細レキ

出典：掘削のポイント　土質工学会



図－３　地下水位平面分布図

都市用水については、当該区間において、７箇所、合計6.41m³/sの水利権が存在し、年・期別に若干の取水量変化が見られるものの概ね一定の取水が行われている。ここでは、都市用水について平均取水量（合計4.52m³/s）で取水され、排水については、下水道排水地点等において、400ﾘｯﾄﾙ/人・日の排水が行われるものと仮定し、４箇所計0.46m³/sの排水が行われるものと設定した。

当該区間においては、主要支川として、左岸隈ノ上川、巨瀬川、高良川、右岸佐田川、小石原川、宝満川のほか、残流域からの流入が存在する。これらの主要支川や残流域の流量について、図－１に示す観測地点の流量から流域面積比にて推定した。なお、２）に示した農業用水の排水が流入する隈ノ上川、古川、巨瀬川、桂川、佐田川、小石原川、陣屋川、大刀洗川については、これを別途加算した。

４．結果・考察

以上の分析を前提にH11～H20年の瀬ノ下地点流況の再現結果を図－４に示す。瀬ノ下地点の予測値と実績値は、概ね整合しているが、農業用水の大規模な取水が行われる７～９月について、予測値は、年によって実測値と乖離が見られることがあり、例えばH14年、17年においては、実測値と最大で5～10m³/s乖離している。瀬ノ下地点の予測値は、荒瀬地点流量から残流域流入量、都市用水取排水量、地下水流入量、農業用水取排水等の途中の複雑な過程を経た後に算出していることを考慮して、良く再現できていると言える。

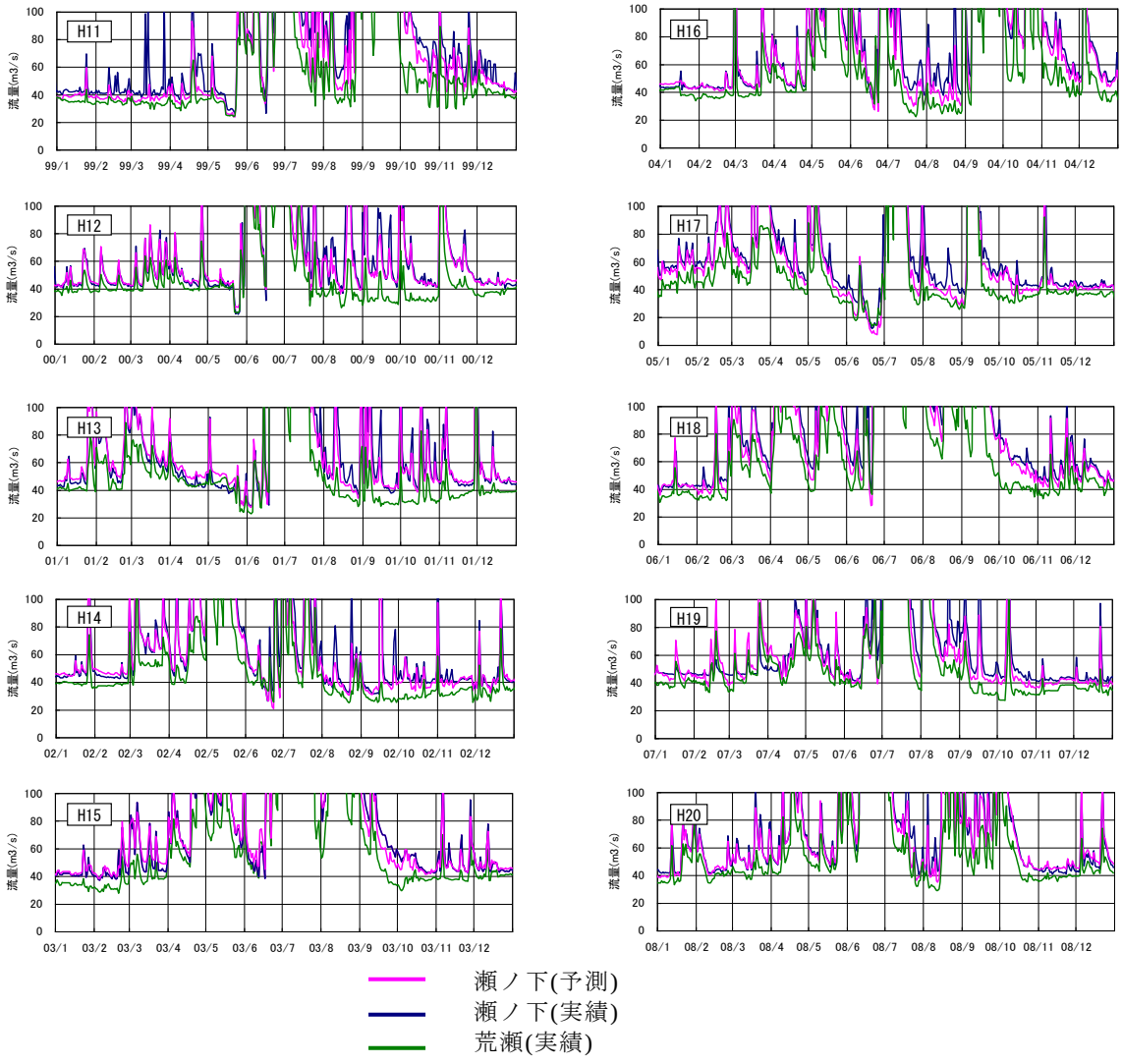
図－５に荒瀬～瀬ノ下間のH21年9月における水収支を縦断的に示すとおり、さらなる精度向上が必要であるが、各地点の正常流量を満足して流水が流下していることが理解できる。

今後、水収支モデルの精度向上を図る上で、着目すべき不確定要素としては、残流域流入量の他、余水排水量、農業用水の還元率が挙げられる。これは、降雨により農業用水の必要取水量が減少すること、当該区間の農水の配水管理用水が取水量に比して比較的大きいため、取水量の大小により還元率は大きく増減することによる。

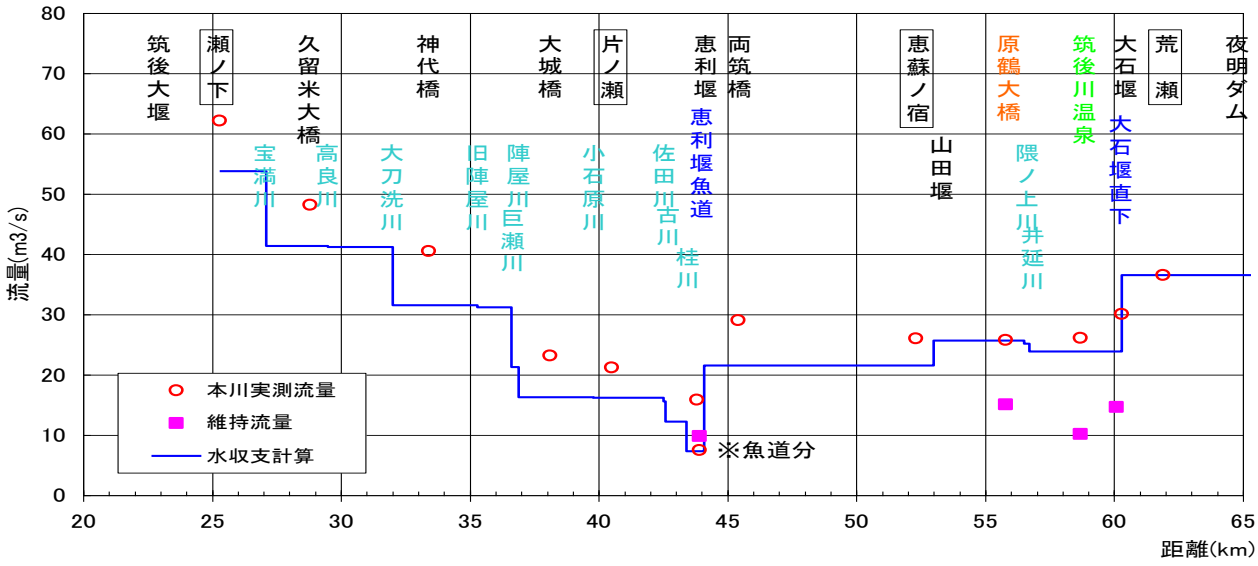
これまで、当該区間の水収支については、正確には把握できない状況にあったため、現場の低

水管理にあたっては、荒瀬地点～瀬ノ下地点間の農業用水の取水状況に大きな変化がないかを確認した上で、無降雨状態での流量の低減を考慮し瀬ノ下流量を推計し、ダム放流量を決定するなどしてきた。一方、河川環境の保全や下流既得利水、水産業等の保全に向けた瀬ノ下流量40m^3/s確保への期待は極めて強く、40m^3/sを下回らないようダム補給を行うため、降雨による残流域流量の増量や農業用水の取水量の減量操作によりダム操作後の流量が40m^3/sを上回る状況も発生してきた。

今後は、本水収支システムを活用しつつ、特に大規模農業用水の余水排水量をリアルタイムで計測するなどして、当該区間の水収支をより精度良く明らかにすることが期待される。また、現在では、利水の安定性を重視しつつ、低水管理が行われているが、当該区間には、大石堰直下59.6km地点には、アユの産卵床が存在し、58.7kmでは筑後川温泉の舟運地点として、55.8km地点では原鶴温泉街の借景として、良好な河川景観を確保することが求められるなど、河川維持流量を確保する必要性も高いことから、本システムを活用することにより、これらの河川環境の保全に向けて、より良好な河川管理が実施されることが期待される。



図－４　瀬ノ下流量の予測計算再現結果



図－５　荒瀬～瀬ノ下間の水収支（H21年9月14日）

表－３　筑後川渇水時取水率・節水率算定システム

日付	7/1	目標節水率	水道	20%
			工水	20%
			農水	20%

用途	利水者	S 計画供給能力(m3/s)					N 通常時供給能力比率(%)				R 取水率(%)				K 渇水時取水量(=S*N*R)(m3/s)					D 需要量 (m3/s)	E 節水率（%）
		S1 筑後川	S2 他水系	S3 地下水	S4 海水淡水化	ΣS 合計	N1 筑後川	N2 他水系	N3 地下水	N4 海水淡水化	R1 筑後川	R2 他水系	R3 地下水	R4 海水淡水化	K1 筑後川	K2 他水系	K3 地下水	K4 海水淡水化	ΣK 合計		
水道	A	3.08	7.57	1.55	0.58	12.77	100%	100%	53%	100%	47%	40%	40%	100%	1.46	3.03	0.33	0.58	5.40	6.94	22%
	B	2.46	0.35	0.38		3.19	100%	100%	60%		62%	40%	40%		1.53	0.14	0.09		1.77	2.33	24%
	C	0.32		0.07		0.39	100%		39%		56%		40%		0.18		0.01		0.19	0.24	20%
	D	1.18	0.98	0.09		2.25	100%	100%	73%		44%	40%	40%		0.52	0.39	0.03		0.94	1.18	20%
	その他	0.47				0.47	100%				43%				0.20				0.20	0.25	20%
	小計	7.52	8.90	2.08	0.58	19.07	100%	100%	55%	100%	52%	40%	40%	100%	3.90	3.56	0.46	0.58	8.50	10.94	22%
工水	E	1.25				1.25	100%				39%				0.49				0.49	0.61	20%
	F	0.17				0.17	100%				80%				0.14				0.14	0.17	20%
	その他	0.25				0.25	100%				80%				0.20				0.20	0.25	20%
	小計	1.67				1.67	100%				49%				0.83				0.83	1.03	20%
農水	G	7.21				7.21	100%				80%				5.77				5.77	7.21	20%
	H	3.50				3.50	100%				80%				2.80				2.80	3.50	20%
	I	16.00				16.00	100%				83%				13.32				13.32	16.65	20%
	J	6.40				6.40	100%				69%				4.40				4.40	5.50	20%
	K	18.20				18.20	100%				76%				13.85				13.85	17.31	20%
	L	12.12		2.10		14.22	100%		50%		77%		40%		9.28		0.42		9.70	12.12	20%
	M	28.08				28.08	100%				80%				22.46				22.46	28.08	20%
	その他	6.43				6.43	100%				80%				5.14				5.14	6.43	20%
	小計	97.94		2.10		100.04	100%		50%		79%		40%		77.02		0.42		77.44	96.80	20%
合計		107.12	8.90	4.18	0.58	120.78	100%	100%	52%	100%	76%	40%	40%	100%	81.75	3.56	0.88	0.58	86.76	108.77	20%

■パラメータ設定方法

	S:計画供給能力(m3/s)	N:通常時供給能力比率(%)	R:渇水時取水率(%)	K:渇水時取水量(m3/s)	D:需要量(m3/s)	E:節水率
項目の意味	取水計画上の水源別取水量	通常時の給水能力比率	渇水時に取水可能な量の通常時供給能力に対する比率	渇水時に取水可能な量	実態としての需要量	渇水時の利水者別の節水率
水道用水	事業計画における現況施設での計画一日最大取水量(河川においては水利権量)を用いる。(水道統計等)	・筑後川、他水系は、通常時に計画通りの供給能力があるため、100%と想定 ・地下水取水は、計画上は取水する想定でも、実績では取水量が小さい場合が少なくない。地下水位の低下、水質障害など、施設能力以外の条件によって取水出来ない場合も想定されるため、実績取水量に応じた比率を設定 ・海水淡水化は、100%を想定。	・筑後川は、目標節水率、需要量、K2～K4により算出 ・他水系、地下水は、その時々の渇水状況に応じて取水可能量は異なるため、取水制限率等に基づき設定。 (ここでは、大渇水時を想定し、40%と仮定)。 ・海水淡水化は、100%を想定。	=S×N×R で算出	市町の通常年の実績取水量を設定（水道統計等）	=Σ K/D で算出
工業用水	事業計画における計画供給量(河川においては水利権量)				河川以外の水源を有する場合には、給水実績を使用。(工業用水統計等)、その他の場合は通常年の実績取水量を使用。	
農業用水	水利権量とするが、事業計画で、地下水等の他水源への依存が大きい場合には、それを加える。				通常年の取水実績を基本とする。	

この水需給把握システムでは、表－３に示すように、筑後川に水源を依存する利水者全てを計上し、その水源を二級水系の自流及びダム、地下水、海水淡水化を含めて全て計上した。恒常的に地下水が低下し、十分な揚水が期待できない水源については、通常時供給能力比率を設定している。渇水時においては、二級水系においても取水制限が実施されることが多いため、その取水率を設定し、海水淡水化については、維持管理時を除いて100％の供給が可能と想定した。さらに利水者の実際の給水ベースでの節水率と現況の総需要量を設定すれば、筑後川の取水率が逆算される。また、表－３では、全利水者について節水率を一律20％に設定して、筑後川の取水率を求めた。これによれば、Ａのように他水源が豊富な利水者は、筑後川からの取水率を47％と厳しい取水制限をかけることが可能であり、Ｍのように水源を筑後川のみに依存する利水者に対しては、取水率80％と緩やかな取水制限となる。実際の渇水においては、渇水への耐力、受認限度を考慮しつつ、上水、工水、農水別に適切な節水率の設定が必要であるが、本システムの節水率を適切に設定することにより、筑後川の適切な取水率を求めることが可能である。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

利水を依存している農業用水及び都市用水の取排水、地下水流動等流域内の水収支を明らかにするとともに、魚類の産卵床、景観等河川環境保全のために必要な維持流量にも配慮する流域内水収支評価モデルを構築した。

（２）地球環境政策への貢献

本研究成果によって気候変動時の流域水マネジメント渇水時における各利水者の水需給を調整する際の一助となるよう、他水系と地下水等の水源の節水率を調整するための水需給把握システムを構築した。

６．引用文献

なし

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない.

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1）多田智和，土屋修一　気候変動による降水特性変化がもたらす水需給バランスへの影響検討，地球環境シンポジウム論文集，Vol.16，150-155(2008)

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

（２）口頭発表（学会）

1）土屋修一，服部敦　気候変動による降水量変化に対する河川流量の応答に関する考察，水文・

水資源学会　2008 年度研究発表会，2008．8.

2) 土屋修一，服部敦　気候変動によるダム流入量の変化に関する研究，平成 20 年度土木学会全国大会　第 63 回年次学術講演会，2008.9.

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－１　温暖化による水資源への影響予測に関する研究
（５）　温暖化各レベルに対応する洪水リスクの増減評価に関する研究

東京大学　生産技術研究所　　沖　大幹

平成17～21年度合計予算額　49,187千円
（うち、平成21年度予算額　9,525千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］グローバル並びに地域的に水ストレスの高い流域にすむ人口比が、社会経済的なデータとGCMの出力結果を用いて、気温の関数として見積もられた。世界的にみると、シナリオA2では気温偏差が+1.5度まで急激に上昇する。シナリオA1Bでは、高水ストレス人口比はシナリオA2の場合より少ない。気温偏差が+1.5度を超えると、高水ストレス人口比の増加の経度が緩やかになる。一方、シナリオB1での高水ストレス人口比は、気温偏差が+1.2度を超えると減少に転ずる。気候変動の影響を除去して、つまり流出を一定にして、高水ストレス人口比を見積もった結果によると、高水ストレス人口比は、気候変動の影響の有無にかかわらずあまり変わらない。

次に地域ごとの高水ストレス人口比を示した。特に高水ストレス人口比の高い地域について示す。中東と北アフリカは、現在とても高水ストレス人口比が高い領域である。ここでは、現在高水ストレス人口比は約70%であるが、全シナリオにおいて2050年代には約90%まで上昇する。アジアは、中東・北アフリカに次いで高水ストレス人口比の高い地域である。それでもなお、シナリオA2において、高水ストレス人口比は55%から80%に上昇する。他のシナリオでは約10%上昇する。このような地域による差に関する考察を今後進めていく。

2075年として推定した各GCM、各温暖化シナリオでの気候変動ありとなしとのW/Qの高水ストレス人口比を示した。気候変動なしでも、高水ストレス人口比はほとんど差がなく、むしろ気候変動を考慮した値の方より大きい。Parry et al.（2001）は、気温偏差が+2度を超えると気候変動の水リスクへの影響は深刻なものになると指摘している。しかし、我々のアセスメントは彼らの指摘とは違う結果を導いた。流出だけでなく社会経済的指標（灌漑面積、工業用水の増加、人口そのものの増加）を用いた水アセスメントを実施すると、気候変動による水リスクへの影響は大きくない。むしろ人口増加など社会経済の変化が大きく影響を与えることを示した。

［キーワード］温暖化シナリオ、高水ストレス人口比、GCM、温暖化シナリオ、社会経済的指標

１．はじめに

人類にとって、地球上に存在する水のうち、利用することのできる水の大部分は、淡水資源である。そのうち地球で循環している再生可能な淡水資源（水資源賦存量）は、年約45,500km^{3}とい

われている（Oki and Kanae, 2006）。その一方で、我々人類が取水している淡水量は、約3,800km^3/yearと推計される（Oki and Kanae,2006, Oki and Sud, 1996）。この値だけをみれば、たいへん十分な淡水資源を我々人類は利用可能であると考えられるが、実際世界各地で水の需要に対して利用可能な淡水資源が不足しているという報告は、数多くなされている。上記のように実際世界の水資源賦存量は、取水量の実に10倍以上の量であるが、利用可能な水資源の空間分布は一様ではなく、地域に偏った分布を持ち、世界中のどの地域でも必要な取水量を確保できているとは限らない。つまり、我々が水資源アセスメントを行う際、高解像度のデータセットを用いた上で、地域区分をする必要がある。

統計データに基づく将来の取水量（2000、2010、2025年）は、Shiklomanov（2000）によって予測されている。一方、全球大循環モデル（Global Circulation Model: GCM）の進歩は、高解像度の気候データ並びに水文データを用いた将来の水資源アセスメントを可能とした（Vörösmarty et al., 2000; Alcamo et al., 2000; Oki et al., 2003）。Parry et al.（2001）において、CO_2を増加させたときの影響評価が行われ、水ストレスの高い人口は、全球気温が＋２℃を超えると急激に増加する結果を示した。さらに、地球温暖化の実態把握とその精度の高い予測、影響評価、対策の策定を行うことを目的として設立された気候変動に関する政府間パネル（The Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）が地球温暖化研究の基本情報としてまとめたSRES（Special Report on Emissions Scenarios, IPCC, 2000）に基づいた将来の水資源アセスメントも行われている（Arnel, 2004; Alcamo et al., 2006）。Shen et al.（2007）はこれまでに水需要を考慮した評価が行われていないSRESのA1B、B1シナリオを含めた3シナリオ（A1B、A2、B1）を対象に、6つのGCMモデル出力を用いて、水需要面を考慮した指標を含む二つの指標（1人当たり水資源賦存量、水資源賦存量に対する取水量）による評価を行った。さらに気候変化の影響を除き、人口や経済のみが変化した場合についての評価を行い気候変化がある場合の評価と比較した。需要面を考慮したアセスメントを多くのモデルで行うことによりモデル間のバイアスを除いた、より信頼性の高い将来の水資源アセスメントを行うことができた。また、気候変化の影響を分離して評価を行うことにより、気候変化が世界の水ストレス分布にどのような影響を与えているかを示すことができ、その結果はIPCC第4次報告書に引用された。

上述したSRESのシナリオ下の将来の水資源アセスメントは、時間軸による評価である。一方、地球温暖化に対する対策の策定を行うにあたって、温度軸による評価は策定者にとってより分かりやすい。IPCC第4次報告書では、影響評価が温度軸で示してあるのだが、水リスクについては温度軸による影響評価が示されなかった。上述したParry et al.（2001）では温度軸で影響評価を行っているが、SRESのシナリオを用いていない。適応策の策定を考える上で、温度軸を用いた影響評価が求められている。

２．研究目的

前述した背景より、本研究ではShen et al.（2008）で行われたSRESのシナリオを用いた水資源アセスメントから温度軸で推定し影響評価を行い、適応策の策定に資する指標を作成することを目的とした。具体的には、以下のとおりである。

・水の需要も考慮した温度軸による水資源アセスメントを、A1B、A2、B1の3つのSRESについて行う。また、多くのモデル出力を用いることで、水資源アセスメントの信頼性の向上を図る。

・気候変化が将来の水ストレス分布に与える影響を明らかにする。
・Parry et al.（2001）で示された結果を改良し、適応策の策定に資する図を示す。

３．研究方法

本研究では、IPCCの最新の温暖化シナリオ（SRES：A1B、A2、B1シナリオ）に基づいて、2つの水ストレス指標を用いた将来の水資源アセスメントを行う。ここで使用する水ストレス指標は、一人あたりの水資源量（Q/Capita）と水資源量に対する水需要費（DIA/Q）である。

将来水資源量の推計には、IPCC第4次報告書で採用された大循環モデルのうちアメリカ、ヨーロッパ、日本の6機関のモデル（現在気候：GWSP2、将来気候：[アメリカ]NASA/Goddard Institute for SpaceとNational Center for Atmospheric Research、[ヨーロッパ] Max-Planck-InstituteとHadley Center for Climate Prediction、[日本]CCSR/NIESとMRI）が、各温暖化シナリオ（A1B、A2、B1シナリオ）に基づいて算出した流出高の将来予測それぞれを、全球河川流路網モデルTRIP（Total Runoff Integrating Pathways）に入力して得られた1度グリッドの河川流量データを用いた。

水需要量の推計は、Shen et al.（2008）によって推定された値を活用した。

以上の推計値に基づいて、水ストレスの計算を河川流域ごとに行った。河川河口部の年流量を河川流域人口で割ったものをその河川流域の一人当たり水資源量とし、河川流域内の取水量を河川河口部の年流量で割ったものをその河川流域の水資源量に対する水需要比とした。

これらの結果を、時間軸の推定から温度軸の推定に置換するため、以下のような手順を行った。各大循環モデルによる時間軸に対応した昇温量を、全球において算出した。それに基づいて、時間軸で算定されている水ストレス人口を線形補間によって算出し、予測される昇温量に対応した水ストレス指標を推定した。

４．結果・考察

最初に、温暖化シナリオから推定されている将来予測された人口を温度軸に対応させた（図1）。温暖化シナリオによって大きく異なっているが、ここで留意すべきは、気温上昇によって人口が増減しているのではない点である。シナリオA2では人口は増え続ける一方、A1BとB1シナリオでは時間軸では同じ人口推移を示すが、温度軸の場合では昇温量がシナリオの違いに伴い異なるため、温度偏差方向に違いが生じている。

グローバル並びに地域的に水ストレスの高い流域にすむ人口比が、社会経済的なデータとGCMの出力結果を用いて、気温の関数として見積もられた。以下、結果を示す（図2）。

世界的にみると、シナリオA2でのW/Qの高水ストレス人口比は、気温偏差+1.5℃まで急激に増加する。それ以上の昇温においては増加しない。シナリオA1Bでは漸増するが、シナリオB1では気温偏差+1℃まで増加するが、それ以上は増加しない。一方、Q/cの高水ストレス人口比は、シナリオA2とB1での特性は指標W/Qとあまり変わらないが、シナリオA1Bでは気温偏差+1℃以上では高水ストレス人口比は増加しない。これらの気候変動の影響を除去して、つまり流出を一定にして、高水ストレス人口比を見積もった結果によると、高水ストレス人口比は、気候変動の影響の有無にかかわらずあまり変わらない。「人口増加の特性」と「高水ストレス人口比の増加の特性」とは、同じような傾向を示す。このことは、高水ストレス人口比の増加が、人口増加に大きく依存していることを示唆している。

次に地域ごとの高水ストレス人口比（W/Q）の結果と考察を示す（図3）。北米（領域1）における高水ストレス人口比は、現在32%である。シナリオA1B、A2において、+0.6℃までの気温偏差では、高水ストレス人口比は若干増加して約40%となる。一方、シナリオB1では、気温偏差が+1.0度を超えると高水ストレス人口比は減少に転じ、現在とほぼ同じ水準になる。ラテンアメリカ（領域2）では、高水ストレス人口比は約10～20%の増加となる。2020年代と2050年代では、シナリオB1における高水ストレス人口比は、他のシナリオによる高水ストレス人口比と比べて高い。ヨーロッパ（領域3）では、シナリオA1BとA2の間に違いはあまりない。2050～2080年にかけて、シナリオB1で高水ストレス人口比は減少する。中東と北アフリカ（領域4）は、現在とても高水ストレス人口比が高い領域である。ここでは、現在高水ストレス人口比は約70%であるが、全シナリオにおいて2050年代には約90%まで上昇する。サハラ縁辺部（領域5）では、すべてのシナリオにおいて、高水ストレス人口比が2050年代に比べて約5倍に上昇する。CIS（領域6）では、気温偏差が約+1.5度まで全シナリオにおいて、高水ストレス人口比が増加する。アジア（領域7）は、中東・北アフリカに次いで高水ストレス人口比の高い地域である。それでもなお、シナリオA2において、高水ストレス人口比は55%から80%に上昇する。他のシナリオでは約10%上昇する。現在、オセアニア（領域8）では、高水ストレス人口比はとても小さい。また、各シナリオにおいても気温偏差が+1.0度までは、高水ストレス人口比は変化しない。気温偏差が+1.5度を超えると、シナリオA1BとA2で高水ストレス人口比は約2倍になる。A1Bで2080年代の後期には若干増加する傾向があるが、これは北米とアジア域に見られているもので、この地域での水需要の増加に対する対策が必要となろう。このような地域による差に関する考察を今後進めていく。

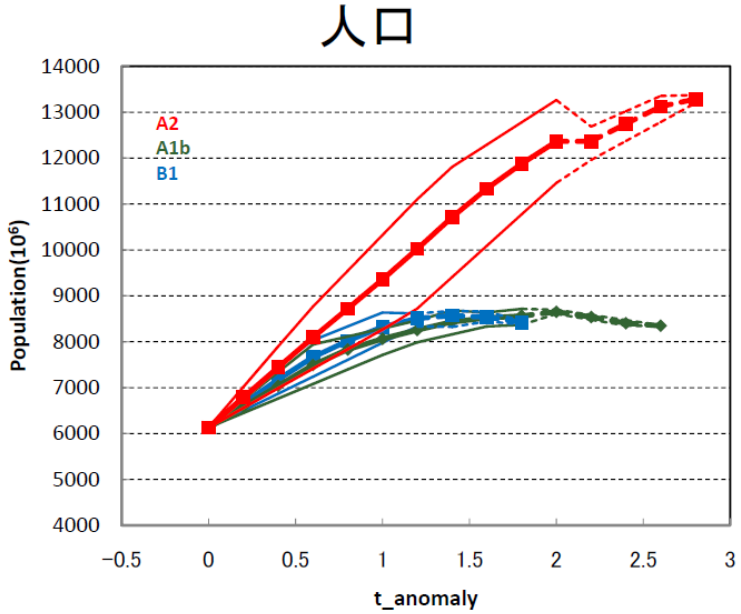


図１：温暖化シナリオ（A2、A1B、B1）における人口の推移。

2075年として推定した各GCM、各温暖化シナリオでの気候変動ありとなしとのW/Qの高水ストレス人口比を示した（図4）。気候変動なしでも、高水ストレス人口比はほとんど差がなく、むしろ気候変動を考慮した値の方より大きい。Parry et al.（2001）は、気温偏差が+2度を超えると気候変動の水リスクへの影響は深刻なものになると指摘している。しかし、我々のアセスメントは

彼らの指摘とは違う結果を導いた。流出だけでなく社会経済的指標（灌漑面積、工業用水の増加、人口そのものの増加）を用いた水アセスメントを実施すると、気候変動による水リスクへの影響は大きくない。むしろ人口増加など社会経済の変化が大きく影響を与えることを示した。

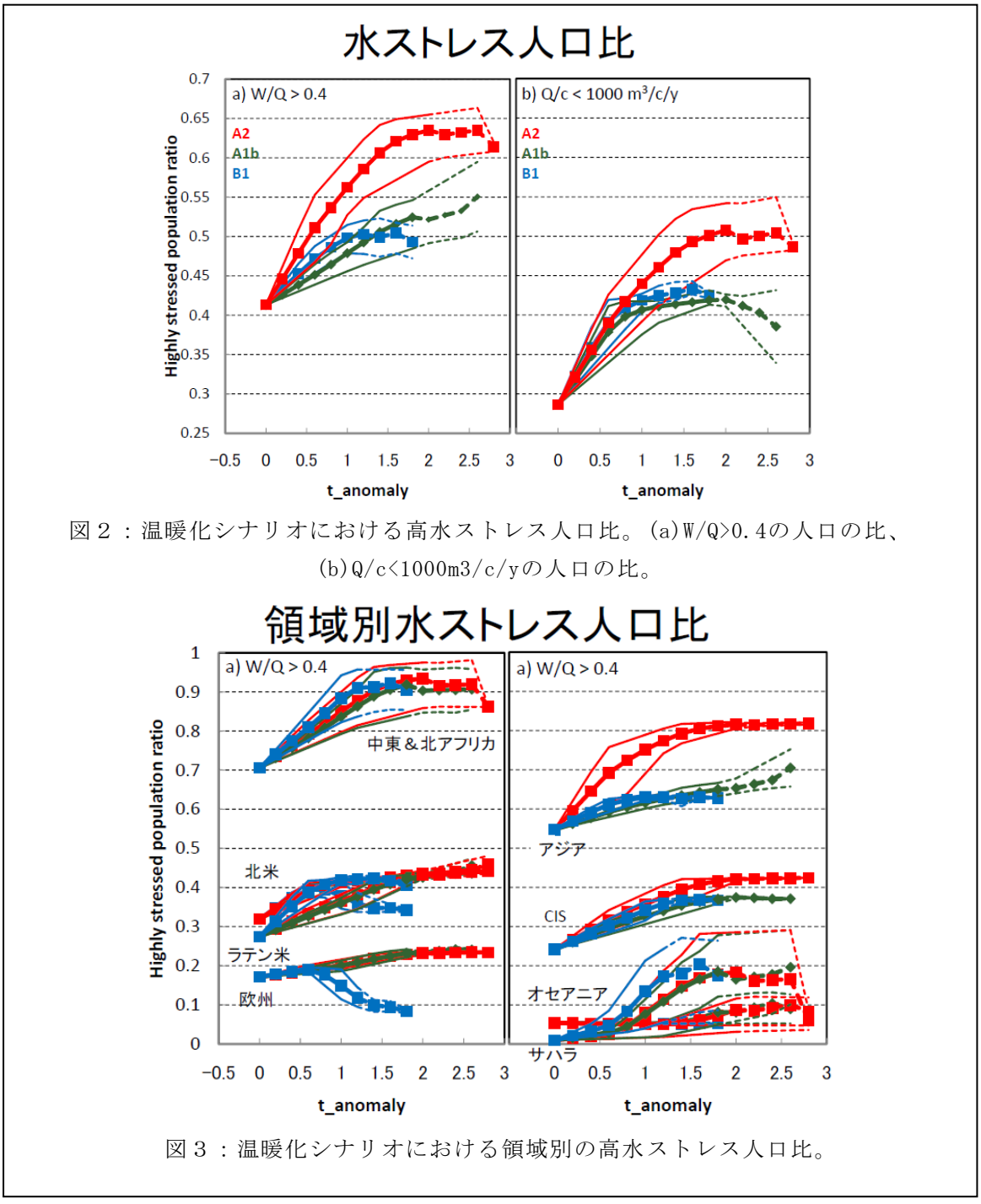


図２：温暖化シナリオにおける高水ストレス人口比。(a)W/Q>0.4の人口の比、(b)Q/c<1000m3/c/yの人口の比。

図３：温暖化シナリオにおける領域別の高水ストレス人口比。

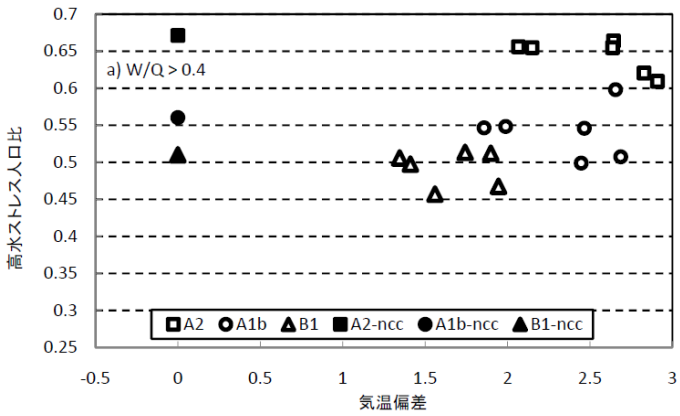


図４：温暖化シナリオにおける高水ストレス人口比。ncc：気候変動がない（流量の変化がない）としたときの高水ストレス人口比。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

グローバル並びに地域的に水ストレスの高い流域にすむ人口比が、社会経済的なデータとGCMの出力結果を用いて、気温の関数として見積もられた。全球、地域スケールの水資源を将来気候モデルを用いた評価が可能になった。

（２）地球環境政策への貢献

将来の気候変動による地球規模の水資源問題を地域毎に議論することが可能となった。

６．引用文献

1) T. Oki and Y.C. Sud, Design of total runoff integrating pathways (TRIP) - a global river channel network, Earth Interaction, 2, 1-37 (1998)

2) I.A. Shiklomanov, Appraisal and Assessment of World Water Resources, Water International, 25, 1, 11-32, (2000)

3) C.J. Vorosmarty, P. Green, J. Salisbury, R.B. Lammers, Vulnerability from Climate Change and Population Growth, In Global Water Resources (2000)

4) J. Alcamo, T. Henrichs, T. Rosch, World Water in 2025 Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century, Kassel world water series, 2 (2000)

5) A. O. Parry, A. J. Wood, E. Carlon, and A. Drzewiń ski, Universal Phase Boundary Shifts for Corner Wetting and Filling, Phys. Rev. Lett. 87, 196103(2001)

6) T. Oki, Y. Agata, S. Kanae, T. Saruhashi, K. Musiake, Global Water Resources Assessment under Climatic Change in 2050 using TRIP, IAHS Publ., 280, 124-133 (2003)

7) N.W. Arnell, Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios, Global Environmental Change, 14 (2004)

７．国際共同研究等の状況
特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況
（１）誌上発表
〈論文（査読あり）〉
1) 花崎直太，鼎信次郎，沖大幹，Bucket型の陸面過程モデルをベースにした全球統合水資源モデルの開発，水工学論文集，50，529-534(2006)
2) Kei Yoshimura, Shin Miyazaki, Shinjiro Kanae and Taikan Oki, Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes, Glob. Planet. Change, 51,90-107(2006)
3) Taikan Oki and Shinjiro Kanae, Global hydrological cycles and world water resources, Science, 313,5790,1068-1072(2006)
4) 芳村圭，岡澤毅，H. Kim，瀬戸心太，小岩祐樹，沖大幹，鼎信次郎，気象庁メソ予報モデルGPVを用いた日本域河川流量予測システムの構築と検証，水工学論文集,50,7(2007)
5) Nilupul Gunasekara, So Kazama, Dai Yamazaki, Taikan Oki, The Potentially available global water resources distribution under climate change, JSCE Annual journal of hydraulic engineering, 53, 13-18(2009)
6) Nilupul Gunasekara, So Kazama, Dai Yamazaki, Taikan Oki, Inequalities in water resources distributions and water related conflicts, Annual J. of Hydraulic Engineering, Vol.54, pp.115-120(2010)

〈その他誌上発表（査読なし）〉
なし

（２）口頭発表（学会）
1) 花崎直太、沖大幹、鼎信次郎：全球土壌水分プロジェクトを利用した全球日単位の流出グリッドデータの構築，水文・水資源学会2005年度研究発表会，2005.
2) 野原大輔、鬼頭昭雄、保坂征宏、上口賢治、沖大幹：温暖化に伴う河川の洪水・渇水頻度の評価，日本気象学会2005年秋季大会，2005.
3) 内海信幸、沈彦俊、沖大幹、花崎直太、鼎信次郎、川島博之：温暖化シナリオに基づいた将来のグローバルな水需給アセスメント，水文・水資源学会，2006.
4) Kiguchi, M., S. Kanae, and T. Oki：Seasonal property of climate change over Asian monsoon , XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2007, 2007.

（３）出願特許
なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

1)朝日新聞（2005年5月13日朝刊）　干ばつ・洪水　水の世紀末　地球温暖化で大河激変

2)讀賣新聞（2006年8月25日、Scienceに掲載されたGlobal Hydrological Cycles and World Water Resources、について、掲載タイトル「世界の水不足に悩む人、70年後は倍増40億人」）

3)日刊工業新聞（2006年8月25日、Scienceに掲載されたGlobal Hydrological Cycles and World Water Resources、について、掲載タイトル「世界の水資源需給予測」）

4)科学新聞（2006年9月1日、Scienceに掲載されたGlobal Hydrological Cycles and World Water Resources、について、掲載タイトル「「中国北部や米西部で危険」水問題でアセス」）

5)東京新聞（2006年9月12日、Scienceに掲載されたGlobal Hydrological Cycles and World Water Resources、について、掲載タイトル「脱・水ストレス」）

6)日本経済新聞（2006年12月3日、Scienceに掲載されたGlobal Hydrological Cycles and World Water Resources、について、掲載タイトル『かがくCafe』「水資源対応で2050年に明暗」）

（６）その他

平成21年水文・水資源学会論文賞。

課題名	S-4温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 ２－２健康面からみた温暖化の危険性水準情報の高度化に関する研究		
課題代表者名	独立行政法人国立環境研究所 環境健康研究領域　総合影響評価研究室　　田村憲治		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	212,467千円（うち21年度 41,699千円） ※予算額には、間接経費を含む。

研究体制

（１）適応策を考慮した温暖化の健康リスクの定量化・経済指標化とマッピングに関する研究（独立行政法人国立環境研究所、<研究協力機関>筑波大学）

（２）温暖化と死亡リスクに関する研究（筑波大学、<研究協力機関>大阪府立大学）

（３）温暖化と熱中症・熱ストレスに関する研究（独立行政法人国立環境研究所）

（４）温暖化に伴う大気汚染のリスクに関する研究（独立行政法人国立環境研究所、<研究協力機関>統計数理研究所）

（５）節足動物媒介性感染症の発生に及ぼす地球温暖化の影響予測に関する研究（国立感染症研究所、<研究協力機関>岡山大学）

Ⅰ．戦略課題S-4-2(2)の全体構成

図１はIPCCによる気候変動（温暖化）による健康リスクの概念図である。本研究課題では、この図に示される基本的枠組みに沿って、（２）から（５）の4つのサブサブテーマでの検討を踏まえ、（１）の「適応策を考慮した温暖化の健康リスクの定量化・経済指標化とマッピングに関する研究」に繋げていくものとする。

日本さらにはアジア地域における気候変動、特に温暖化に伴う健康リスクの評価と地域別の公衆衛生領域の適応能を温度感度関数として示し、地域別の危険水準を示すことを試みることとした。

第一段階は日本におけるリスク評価を目標とし、サブサブテーマごとに日本全体、主要都市圏、モデル地域、を対象とした研究からスタートし、最終的に日本全体（都道府県あるいは市町村レベル）のリスク評価へ統合化をはかる。

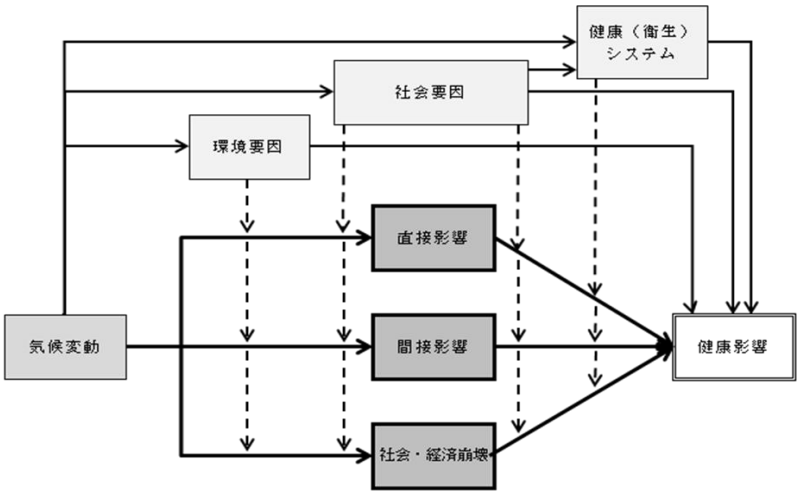


図１　IPCCの「気候変動と健康」との関連を示す概念図

Ⅱ．本研究により得られた科学的成果

１）健康影響の経済評価は、保健は専門であるものの経済についてはそれほど詳しくない研究者が多かったため、学術雑誌にも経済学的に誤った研究が掲載されているような状況であった。そのような点を改善すべく、この研究では、経済学の研究を専門とする近藤が加わって計算を行い、Budget

Impcat Assessmentなど、世界的に認められている方法を用いた研究となった。このことで、我々のDALYs計算法が、世界保健機関(WHO)の進めている気候変化によるGlobal Burden of Disease Projectにおいて採用されることとなった。平成21年3月に予備的な会合をコペンハーゲンで開き、そこに本田が参加してS-4での取り組みを説明し、5月にはジュネーブで感染症、直接影響、労働への影響などの専門家、将来予測の専門家、DALYsの専門家が集合してワークショップを行い成果を公表した。
2）気温と死亡率との関連がV字型であることは古くから知られていた。しかしながら、そのV字型の死亡率が最低になる気温、すなわち至適気温が概ね日最高気温の85パーセンタイル値で推定できるという法則は本研究で初めて明らかになった。しかも、この法則は日本のみでなく、韓国、中国、台湾という発展レベル、文化の大きく異なる地域においても認められることから、更に広い地域でも成り立つことが期待される。この解析に対する評価は高く、世界保健機関(WHO)における気候変化による全球の疾病負荷推定プロジェクトにおいて、本田、近藤が選ばれ、気温の直接影響の計算を担当することとなった。また、本田は、このような貢献により、国際的な環境疫学の学会であるInternational Society for Environmental Epidemiologyの2010年学術総会において国際アドバイザリボードに選出された。
3）政令市の救急搬送熱中症患者の解析により、日最高気温と熱中症患者発生率との間に明瞭な温度・影響関係を見いだした。また、将来推計の基礎となる、熱中症患者発生数に関しても、補完的に実施した病院調査により、救急搬送以外の患者を推計することが可能となった。
4）消防庁が実施した熱中症患者全国調査結果との比較により、大都市（政令市）だけでなく中小市町村の熱中症発生の実態が明らかになり、日本全国を対象とした地球温暖化に伴う将来リスク推計が可能となった。
5）温暖化による気象変化により、地域ごとに将来の詳細な光化学オキシダント（Ox）濃度マップを推計する手法を確立した。しかし、この手法が適用できる地域は限られており、将来的には数値モデルによる推計が可能になるものと期待される。また、Oxのほとんどがオゾン（O_3）であることから、このマップから得られたO_3濃度増加分に対応する死亡リスクの評価法も確立した。これについても、国内の疫学研究やO_3の死亡リスクに関する閾値の研究が進展すれば、さらに正確な推計が可能になることが期待される。
6）安定してヒトスジシマカの定着が認められる年平均気温は11～12℃以上であるが、北緯38～41°の範囲でこの条件を満たす地域の面積が急激に増加し、2031～2050年までに全面積の約60%を占め、2100年には90%以上となる。また、コガタアカイエカの活動範囲がとくに北日本で拡大し、日本脳炎ウイルスの活動自体も盛んになる可能性があることを示した。
7） 地球温暖化とマラリアの流行拡大について、今後、平均気温が３℃上昇すると、九州や四国の一部も温度条件からみたコガタハマダラカの生息可能地域に入るが、熱帯熱マラリアが日本に侵入・定着して再流行を起こすには、種々の条件が重なる必要がありその可能性は低い。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献
1）WHOの取り組みに参加することとなったが、この取り組みはかなり高い確率でIPCCの第5次報告書に取り入れられることになる。第4次報告書の段階では、直接の熱による超過死亡は方法論的に困難なために計算できなかったものが今回は取り入れられることになったことで、地球環境政策に大きな影響を与えるものと思われる。
2）熱関連の超過死亡の将来予測は、気候変動に関する政府間パネルの第4次報告書に引用された。また、上記のWHOプロジェクトの結果は、同第5次報告書を念頭に行われているものであり、そこへの貢献も期待されている。
3）国立環境研究所ホームページ等を通じて、熱中症予防への啓発活動を積極的に行った。
4）環境省：「熱中症保健指導マニュアル」検討会（小野）、ヒートアイランド対策検討会（小野）に参画した。
5）本研究成果である、政令市における毎日の熱中症患者発生数と日最高気温、日最高WBGT温度との関連性に関する結果が「ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討会報告（環境省）」、「熱中症保健指導マニュアル（環境省）」に引用された。
6）温暖化による気象変化により、地域によって違いは見られるものの多くの地域においてO_3濃度が増加することが確認された。他方、温暖化の影響は2100年においても増加分は10ppb以下であり、現在大陸からの移流によって増加していると推定されるO_3濃度の増加分に比べれば小さいことから、大気汚染対策も並行して行うことが地球環境政策上、重要であることが確認された。
7）デング熱、チクングニヤ熱、ウエストナイル熱等の流行する可能性のあるリスク地域が今後明かに広がることが示され、継続した調査が必要である。
8）温暖化により日本脳炎ウイルスの活動が増加し、その範囲も拡大が予想されることから、ワクチン等の適切な適応策が重要である。

IV.研究概要

１．序

健康インパクト研究分野では、気候変動として、長期的な気温上昇傾向のみならず、関連が示唆される異常気象の増加傾向も含めた評価予測が求められている。また、地域別にそれぞれの予測評価モデルを開発し、それぞれの適応策の開発が必要との認識が高まっている。さらには、異なる影響指標の統合化の試みも行われている。こうした要請に対して最新の状況を考慮しながら将来の温暖化、気象変動による健康リスクを明らかにすることが求められている。

２．研究目的

本サブ課題では、温暖化の進行、およびそれによる将来の気象変化が健康面に及ぼす研究を多面的に展開する。

まず、温暖化の直接的な影響として、気温と死亡率の関連について、大気汚染の疫学で用いられている手法を応用し、最適な手法、最適な平滑化パラメタを確定し、そこで確定した手法を用いて気温と死亡率の関連に及ぼす気候要因を明らかにすることとした。気象将来予測・シナリオを用いて、全球の熱関連死亡の影響予測地図を作成すること、総死亡と気温の関連に関して、寒冷影響の再評価を行い、さらに、自殺と気象要因の関連評価を行った（サブサブ課題（２））。

次に夏季の熱中症に注目し、患者発生状況と日最高気温等の温熱指標との関連性を明らかにするとともに、温度・影響関数を確立することとした。これらの温度・影響関数に基づき、温暖化シナリオにそった将来のリスクを評価した（サブサブ課題（３））。

次に、温暖化による副次的な影響として、0x濃度への影響を検討した。日本国内の大都市を中心とした地域を対象として、過去の気象条件と0x濃度との関係を分類し、将来の気象条件予測に基づいて、0xが高濃度となる条件の日数（発生頻度）を推定することによって気象変動によるオゾン濃度の増加分を推定し、それに伴う健康リスク評価を行った（サブサブ課題（４））。

さらに、地球温暖化や異常気象現象の節足動物媒介性感染症に及ぼす影響を明らかにし、現象の経済評価も考慮し適応策の検討を行なった。具体的には、（１）デング熱およびチクングニヤ熱の媒介蚊であるヒトスジシマカに関し、分布域が地球温暖化によってどのように拡大するかを明かにした。また、媒介蚊の生息密度が疾病疫学に重要な要因であるため、各地域で成虫密度を評価し、突発した流行時における防除対象地域の選定および優先性に関する基礎的なデータを提供することとし、九州、四国、本州南部において、ネッタイシマカの分布域拡大が起こる可能性をMIROC(K1)モデルで解析することとした。（２）地球温暖化等の気候変動が、日本脳炎ウイルスの活動に及ぼす影響を明らかにし、蚊媒介性ウイルス感染症であるデング熱がわが国で流行した場合の疾病負担を推定することとした。（３）地球温暖化等の気候変動がマラリアの流行に及ぼす影響を明らかにする。特に、温暖化による影響をより受けやすいと思われる熱帯熱マラリアについて温暖化にともなうわが国での再流行の可能性を明らかにすることとした（サブサブ課題（５））。

最後に、温暖化の健康リスクについて、気温の直接影響によるDALYsを用いて、WHOの進めるGlobal Burden of Disease Projectに協力できるような被害の定量化を提案すること、及び疾病の経済評価に関する探索を行うこと（サブサブ課題（１））が本研究の目的である。

３．研究の方法

（１）適応策を考慮した温暖化の健康リスクの定量化・経済指標化とマッピング

１） 熱関連の超過死亡によるDALYs（障害調整生存年）

S-4-2(2)-2)のグループによって開発された影響関数を用い、1995年の日最高気温の場合と、各日それぞれ1995年より5℃上昇した場合の熱ストレスによる死亡数増加を計算した。そのデータを用い、(i) 国の疾病負担(national burden of disease)は1995年と2002年で同様である、(ii) 死亡数とDALYsは比例する、(iii) 人口構造は変化しない、という3つの仮定の下にDALYsを計算した。

まず（至適気温）OTからOT+5まで、OT+5以上の2つの区分について相対リスクを求める方針で計算した。65歳未満では気温での超過死亡が非常に小さいため、超過死亡は65歳以上のみに存在すると仮定した。

なお、OT未満で、寒冷による超過死亡を考慮しないと気候変化による正味の影響がわからないが、S-4-2(2)-2)で検討されているように、季節による影響はあるものの、寒いほど死亡率が高くなるという関係は認められなかったため、OT未満の死亡数をOTにおける死亡数と同一と仮定した。

２） 他の健康影響による経済影響

スギ花粉症の重症度は飛散するスギ花粉の量に比例し、夏が暑いほど多くの花粉が作られるというモデルを作成し、health care budget impactを求めた。

（２）温暖化と死亡リスクに関する研究

１）気象と死亡との関連を検討する資料としては、1972年から1995年までの死亡小票データ、人口データ、各都道府県庁所在地の気象データを用いた。死亡率は、日別に都道府県毎の死亡数を人口で除することによって求め、その日の都道府県庁所在地の日最高気温に対応させた。

２）ノンパラメトリック回帰の手法として、平滑化スプライン（=smoothing spline, SS）と局所重み付き線形回帰（=loess, LS）の2つについて、熱ストレスに脆弱な集団である65歳以上を対象に男女別に死亡率を検討した。

３）発展途上国でも得られるデータを用いた全球の将来予測を目的として、上記の研究で確立したSSを用いた解析を行った。都道府県別に日別の総死亡率とい死亡の関連を求め、日最低気温、日平均気温、日最高気温のパーセンタイルからその至適気温を探索した。

４）至適気温(OT)から気温が上昇した場合に、至適気温近傍ではそれほど死亡率の上昇が大きくないが、至適気温を5℃前後離れると、死亡率の上昇率が大きくなったことから、OTからOT+5℃、OT+5℃以上という2つのカテゴリに分け、各々の死亡率をOTにおける死亡率で除して相対リスクを求めた。なお、わが国での平均死亡率と至適気温における死亡率との比は1:0.89であった。

上記85パーセンタイル仮説を用い、地域メッシュ毎の人口、年間の総死亡率、予測された気象データから、将来の熱ストレスによる超過死亡リスクマップを作成した。

寒冷の効果が、かぜやインフルエンザを介して死亡に至るというメカニズムから、効果が数日～数週に及ぶという可能性が指摘されており、distributed lag nonlinear model(dlnm)による解析で寒冷の遅延効果が長いことが挙げられている。そこで、ベースラインとしてポアソン分布に従う乱数、季節の効果として1月末から2月にかけて死亡率の高い期間を設けて、上記dlnmによる解析を行った。最後に自殺と気象要因の関連を調べた。

（３）温暖化と熱中症・熱ストレスに関する研究

１）東京都および政令市における救急搬送熱中症患者データに基づいて、性別・年齢階級別温度・影響関数を決定し、得られた温度･影響関数を用いて、2050年、2100年の熱中症患者予測を行った。

２）熱中症患者発生率は男女、年齢階級により大きく異なることから、性別、年齢階級（0～19歳、20～64歳、65歳以上）別に温度・影響関数を策定した。原則、全地域・全年次一律の温度・影響関数としたが、他地域と著しく異なる熱中症発生パターンを示した沖縄県20-64歳男性、札幌市65歳以上については、独自の温度・影響関数を用いた。得られた温度・影響関数を用いて、熱中症患者の将来予測(MIROC)を行った。

（４）温暖化に伴う大気汚染のリスクに関する研究

１）将来の気象予測については、気象庁の作成した地域気候モデルRCM20を用いて2031～50年および2081年～2100年の夏季（６月～８月）の気象パターンの出現状況を予想し、その気象条件ごとに発生するOx濃度（各日の１時間平均濃度の最高値）を、既存のOx濃度測定データが得られる地域（関東地域、東海地域、関西地域など）を対象に、過去の光化学スモッグ発生モデル（気温、湿度、風向、風速）から当てはめ、現況の再現性を確認した上で将来のOx濃度分布を推定した。

２）健康リスク推計には、既存の人口推計法に準拠し、「脱温暖化2050研究プロジェクト」（国立環境研究所）で設定した２つの社会シナリオに基づいて推計した2100年までの地域別将来人口推計値と、2000年時点の人口を当てはめた推計で行った。算定された将来の推定人口は都道府県単位で

あるため、都道府県内の人口分布は現況と変化しないものと仮定して、3次メッシュ（1km×1km）毎に按分した。
３）光化学汚染による健康リスクとしては、多くの疫学研究が蓄積されてきた死亡リスクの増加を対象とした。将来のオゾン濃度変化(ΔOx)に伴う死亡率の増加割合(ΔRR)は、ΔRR=exp(β×ΔOx)-1で表現できる。このΔRRを算定している既存研究は、国内にはないが欧米には多数存在し、それらの結果を統合して評価している文献をもとに、夏季の高齢者の相対リスクRR(65歳以上)1.0134　として、死亡リスクを計算した。さらに、オゾン濃度の増加による死亡リスクを将来人口に掛け合わせることにより、温暖化に伴うOx濃度増加による増加死亡リスクを推定した。オゾンの健康影響については、環境基準濃度レベル（60ppb）以上では閾値が認められないと言う見解をEPAが示しているが、それ以下の低濃度については、結論は得られていない。そこで、オゾンの影響について、閾値を考慮した場合についても検討した。

（５）節足動物媒介性感染症の発生に及ぼす地球温暖化の影響予測に関する研究
１）デング熱、チクングニヤ熱等の重要な蚊媒介性ウイルス感染症のベクターであるヒトスジシマカの分布域を調査した。また、MIROC(K1)による将来気象条件下における分布の予測を行った。
２）気象データとブタの日本脳炎ウイルス抗体陽性率の時間的関係を検討した。
３）過去の熱帯熱マラリア流行を数理モデル化し、ランダムにシミュレーションを1000回行い、流行パターンを検討した。

４．結果及び考察
（１）適応策を考慮した温暖化の健康リスクの定量化・経済指標化とマッピング
１）熱関連の超過死亡によるDALYs（障害調整生存年）
東京における総死亡、循環器疾患死亡、呼吸器疾患死亡と日最高気温との関連を見たところ、女の呼吸器疾患については、OTがはっきりしないので、熱ストレスによる超過死亡はないと考えた。また、男の呼吸器疾患では、OT+3℃における回帰直線を引くと、OT+3℃における期待死亡数が既にOTにおける死亡数を下回ってしまったので、回帰直線上で死亡数がOTにおける死亡数と等しくなる日最高気温30.4℃未満では超過死亡無し（死亡数はOTにおける死亡数と同一）、それ以上では回帰直線に従って死亡数がきまるとした。
表１にOT及び区分毎の死亡数推定直線を示す。傾きは循環器疾患、呼吸器疾患に比べて総死亡で大きいが、これは日別死亡数が総死亡で大きいためである。

表１　死因別のOTおよび区分ごとの死亡数推定のための直線

	OT	OT< <=OT+3	OT+3<
総死亡、男	28.5	y=57.6+0.32x	y=14.0+1.7x
総死亡、女	29.2	y=65.1+0.02x	y=-8.3+2.3x
循環器疾患、男	28.9	y=19.0+0.09x	y=0.18+0.68x
循環器疾患、女	29.9	y=15.5+0.40x	y=7.1+0.66x

	OT	OT< <30.4	30.4<
呼吸器疾患、男	26.4	y=3.4	y=0.058+0.11x
呼吸器疾患、女		-	

この直線を用いて求めたDALYsを表２に示す。

表２　5℃上昇した場合のDALYsの差（性・死因別）（東京都、1990年-1995年）

	男	女
総死亡	100,332	107,456
循環器疾患	27,647	20,914
呼吸器疾患	7,774	-

交通事故（road traffic accidents）のDALYsが65,719であるから，この表の循環器疾患はその1/3程度となっている。
気温５℃上昇時の年令階級別・死因別の超過DALYsを図２に示した。年令階級別にみると、4疾患合計では、65歳以上33,963、15～64歳33,588、0～14歳15,537の順であり、それぞれの死因でみると、0～14歳、15～64歳では呼吸器系疾患、外傷が多く、65歳以上では呼吸器系疾患とともに循環器系疾患が多くなった。一方、現状に対する超過DALYｓの割合でみると、４疾患合計で、0～14歳が4.9%で最も大きく、ついて65歳以上2.2%、15～64歳1.1%であった。死因別にみると、0～14歳では消化

器系疾患が最も大きく、15～64歳、65歳以上では呼吸器疾患が最も大きかった。また、男女間でも異なる傾向が見られた。

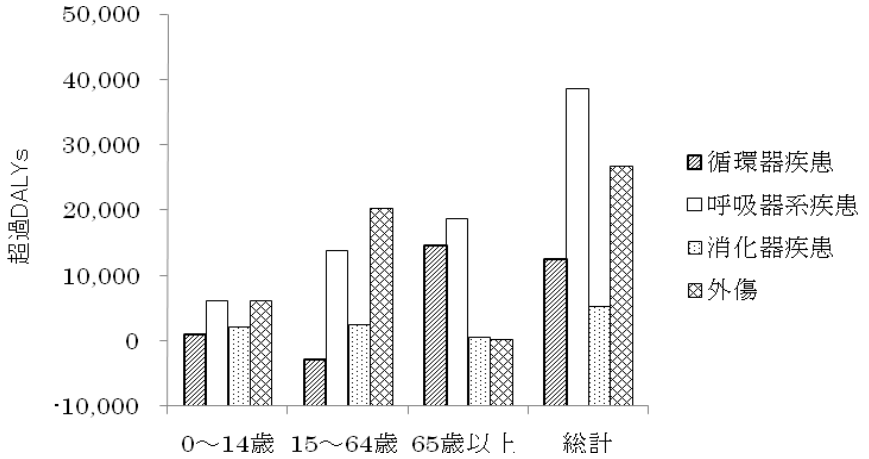


図２　年令階級別・死因別超過DALYs

２）スギ花粉症の経済影響

気温の上昇に応じたスギ花粉症の経済的影響を推定したところ、2℃の上昇によって100億円に近い額のbudget impactがあることになった。

（２）温暖化と死亡リスクに関する研究

１）気温と死亡の関連に関する最適モデルの探索

最初に、65歳以上の性別解析においては、SSで妥当なOTが求められるのに、LSではOTがはっきりしない例が多く見られた。これは、LSが外れ値の影響を受けにくい性質を持っているため、本来はOTが存在するはずであっても、より直線に近い曲線を描き、OTが形成されないものと考えられた。このことから、SSの方が今回のような解析には適していることが明らかとなった。

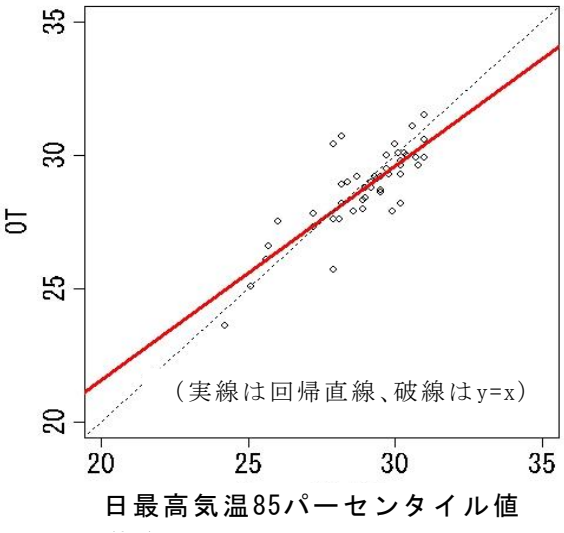


図３　日最高気温85パーセンタイル値と至適気

性・年齢に分類せずにSSで求めたOTと気候要因との関連では、日平均気温、日最低気温とも、どのパーセンタイルでも沖縄県が右に外れたが、日最高気温の85パーセンタイル値は、図３に見られるように、非常にOTに近い値を示し、気象データからOTを推測できることが確認できた。このことは、全球の将来予測に非常に有用である。なぜなら、日別の死亡数を多くの国から得ることはほとんど不可能であるため、OTの計算ができないのであるが、そのOTを気象データから精度良く推測できれば、その値と下に述べる相対リスクの予測値を用いて、年間の死亡率から超過死亡の計算が可能になるからである。

相対リスクは、変動が大きいものの、全国平均ではOT-OT+5℃の区分で1.02、OT+5℃以上で1.10となった。やはり、高気温側で相対リスクが大きくなっていた。

２）熱ストレスによる超過死亡の将来予測地図の作成

わが国近傍の1990年代と2090年代の予測結果では、首都圏から東海地方にかけてと、中国の中心部に影響の大きな地域が存在することがわかった。

３）気温と総死亡の関連

年次のみを制御した場合には、あたかも至適気温以下では寒いほど死亡数が多いように見えるのに対し、年次と季節を制御した場合には、寒冷による影響が全く消失していた。寒冷な季節には死亡率が高いが、その季節の中では、寒ければ寒いほど死亡数が多くなるというわけではない、との解釈も可能であり，今後更なる検討が必要であると考えられる。

シミュレーションを用いた結果については、寒冷の影響を全く想定しないモデルにおいて、単純な気温と死亡の関連を観察すると、見かけ上気温が低いほど死亡率が高いという関連が認められ、更にあたかも寒冷の影響が長く続くかに見える結果を得ることができた。

冬期の影響はまったく見かけ上のものであると断定はできないものの、この結果から「寒冷の影響が長く続き、distributed nonlinear modelで長い遅延効果が認められる」とは限らないことが示された。以上の結果から、寒冷の影響は、寒いほど死亡率が高くなるということではなく、何らかの季節的な要因、たとえばインフルエンザの流行などによって冬期の死亡率が高いということによる可能性も否定できない。温暖化の健康影響を評価するためには、この点に関して、更なる研究が必要となった。

４）自殺と気象要因の関連

気温が高いほど自殺死亡率が高いことが明らかとなった。このことから、多くの過去の研究に見られるような、a prioriに外因を死因からはずした非外因死亡によって気温の影響を評価することは問題であることが示唆される。

（３）温暖化と熱中症・熱ストレスに関する研究

１）温度・影響関数の構築

地域別に日最高気温別の患者発生率を比較すると、発生率には若干の地域差が見られたが、いずれも類似の熱中症発生パターンを示した。これらのデータを用いて、性別・年齢階級別の温度・影響関数を決定した。温度・影響関数の決定にあたっては、多くの都市のデータが利用可能な2005年～2009年（新潟市、静岡市、浜松市は2007年～2009年）のデータを用いた。

図４、図５に性別・年齢階級別の温度・影響関数を示した（0～19歳は省略）。温度・影響関数は原則全国一律としたが、他都市と大きな違いの見られた沖縄県の20～64歳男性と札幌市の65歳以上男女については別関数とした。沖縄県の20～64歳男性については炎天下での屋外作業が、札幌市の65歳以上の高発生率についてはルームエアコン普及率の低さが関係しているのではないかと考えられる。

なお、熱中症発症の温度指標としてはWBGT（湿球黒球温度）が有効であることが示されたが、現時点では将来予測に用いるのは不可能と判断した。

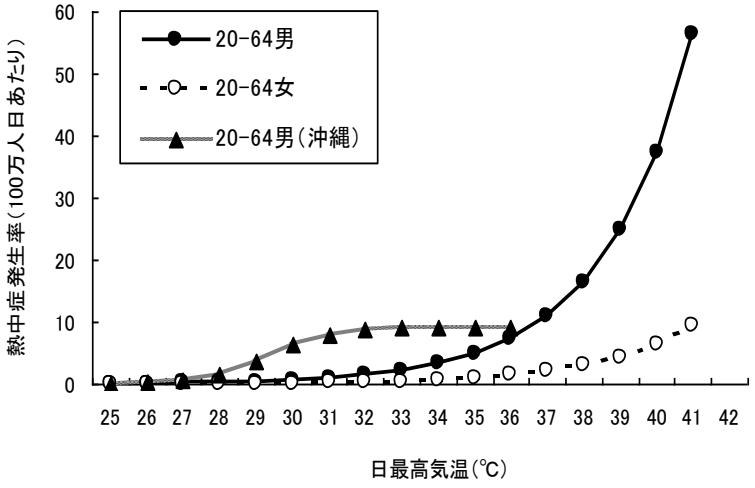


図４　日最高気温別熱中症患者発生率（20～64歳）

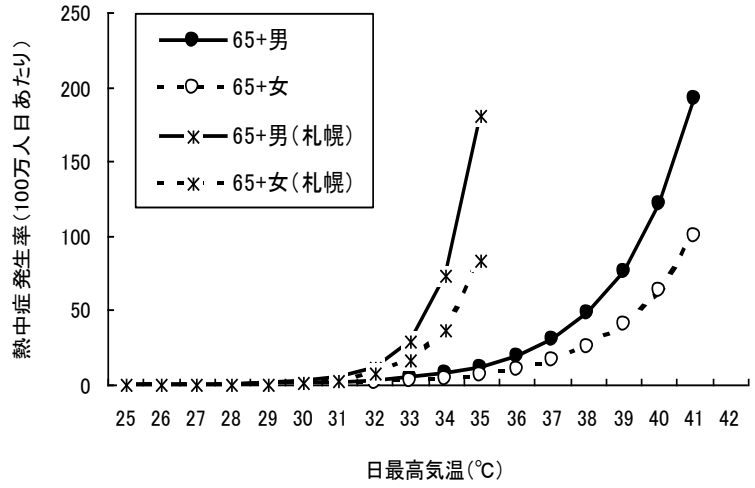


図５　日最高気温別熱中症患者発生率（65歳以上）

２）熱中症患者の将来予測

性別・年齢階級別の温度・影響関数を用い、MIROCによる将来（2031～2050年、2081～2100年）気候予測のもとで予想される熱中症患者数の推計を行った。推計は都道府県単位で行うこととし、MIROCによる将来（2031～2050年、2081～2100年）気候予測は、3次メッシュデータから都道府県平均を求めたものを用いた。なお、人口に関しては、現状（2005年国勢調査）のままとした。図６には、2031～2050年、2081～2100年の熱中症患者数（対1981-2000年比）を示した。

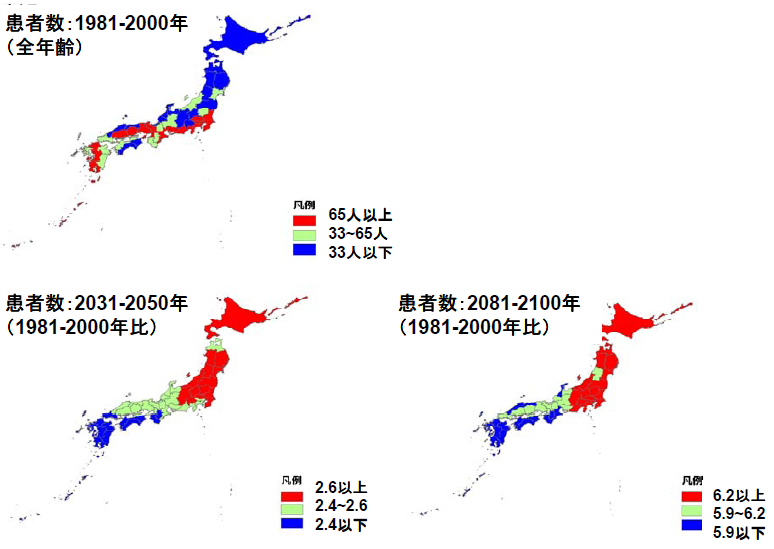


図6　熱中症患者の将来予測(1981-2000年比)

2031-2050年、2081-2100年の熱中症患者発生率は、現状と類似のパターンを示した。一方、現在との比較（対1981-2000年比）では、現在発生率の高い地域ほど増加率は低く、現在発生率の低い地域ほど増加率が高い結果となった。また増加率は、発生率以上に地域差が明瞭で、北海道、東北、関東で大きく、四国、九州・沖縄で小さい結果となった。具体的な増加率について見ると、北海道、沖縄県を除く地域では、2031-2050年は1981-2000年に比べて2.21～2.78倍、2081-2100年は

5.12～6.61倍であった。しかしながら北海道と沖縄県は異なる様相を示した。北海道では、2031-2050年3.62倍、2081-2100年17.10倍（対1980-2000年比）と他地域に比べて増加率が大きく、逆に沖縄県では、2031-2050年1.47倍、2081-2100年2.01倍（対1980-2000年比）と他地域に比べて増加率が小さい結果となった。北海道、沖縄については他地域と異なる温度・影響関数を使用したこともその一因と考えられる。

（４）温暖化に伴う大気汚染のリスクに関する研究

１）オゾン濃度の将来予測

本研究の最初の４年間で、関東地域（茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県）、東海地域（愛知県）、関西地域（大阪府）、瀬戸内地域（岡山県、香川県）、北九州地域（福岡県）について、2031年～2050年及び2081年～2100年の夏季（６月～８月）の気象パターン分類を行い、過去のオゾン濃度観測値との整合性を確認の上、現況（1981年～2000年）、2031年～2050年及び2081年～2100年のオゾン濃度分布図を作成した。現況で高濃度の発生している埼玉県、群馬県の一部では、将来においてもその地域が高濃度になる傾向は変わらなかった。増加の大きいところは2031～2050年では栃木県であったが、2081年～2100年では埼玉県と東京西部の一部で最も高濃度の＋10ppbとなった。関西地域では大阪府内の南部で比較的高濃度の地域があり、将来も高濃度が予測されたが、濃度が増加する地域は広範囲で、そのレベルは最高でも6ppb程度であった。その他の地域では、関東、関西地域より濃度の増加傾向は小さかった。

２）死亡リスクの推定

表３に、これまで推計した全ての都府県について、シナリオAに基づく県別の将来人口と推定死亡数およびオゾン濃度変化による20年間の夏季（６月～８月）における累計増加死亡数を示す。シナリオの違いにより県別の将来人口推定値に違いがある（シナリオAの方が都市部に人口が集中する）ため、オゾン濃度変化による増加死亡数にもこれに対応した差が生じている。

2031～2050年の千葉県では100人以上の減少、神奈川県ではほとんど変化がないという推定結果となった。2081～2100年では、いずれのシナリオにおいても対象としたほとんどの都府県でも死亡数は増加したが、福岡県で減少し、香川県でごくわずかに減少するという結果になった。また、全増加死亡に占める65歳以上の割合は、いずれの都道府県、シナリオにおいても95%以上となっていた。

日本の総人口は2008年から減少を初め、2050年では9500万人前後、2100年では約4800万人程度になると推定されているが、死亡リスクが高い65歳以上の人口は増加を続け、2050年時点では2000年時点より多くなり、2100年ではわずかに2000年を下回る程度であるためであるため、人口を2000年に固定した場合のリスク人口数は将来人口推定値を用いた場合と大きな開きがなかった。

表３ 都府県別の将来人口と増加死亡数(人口シナリオA)

都道府県別増加死亡数(人口シナリオA:65歳未満) 単位:人

シナリオA・65歳未満	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	2,487,487	1,660,974	1,650,131	6,041,263	5,073,633	10,111,138	7,285,924	6,023,471	7,486,116	1,556,661	808,005	4129063
2031-2050年人口	1,389,000	996,500	960,000	3,926,500	3,190,750	7,371,750	5,145,250	4,336,000	4,982,250	944,981	448,059	2,907,750
2081-2100年人口	588,500	453,750	433,250	2,033,000	1,591,000	4,405,750	3,007,750	2,502,000	2,800,000	456,812	188,874	1,659,500
2031-2050年非事故推定死亡数*	9,738	7,179	6,635	26,840	21,717	53,081	33,720	28,348	38,306	6,328	3,137	20,173
2081-2100年非事故推定死亡数*	4,126	3,269	2,994	13,897	10,829	31,724	19,712	16,357	21,528	3,059	1,322	11,513
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	3	9	17	39	-1	47	2	39	97	8	1	0
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	11	9	10	55	21	121	47	20	41	2	0	-11

都道府県別増加死亡数(人口シナリオA:65歳以上) 単位:人

シナリオA・65歳以上	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	495,795	344,749	366,447	892,088	836,227	1,905,657	1,167,557	1,019,999	1,317,333	393,736	214,224	869946
2031-2050年人口	803,000	548,750	550,750	2,175,750	1,891,250	3,535,000	2,594,750	2,196,250	2,646,750	508,043	261,544	1,450,500
2081-2100年人口	403,250	294,500	288,500	1,325,750	1,095,500	2,373,250	1,710,500	1,515,750	1,754,750	288943	129572	989,500
2031-2050年非事故推定死亡数*	*124,751*	*83,993*	*83,545*	*310,777*	*270,671*	*517,411*	*359,136*	*322,034*	*395,898*	77,418	40,782	218,134
2081-2100年非事故推定死亡数*	*62,647*	*45,077*	*43,764*	*189,366*	*156,785*	*347,368*	*236,748*	*222,253*	*262,474*	44,030	20,204	148,806
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	***74***	***205***	***450***	***955***	***-111***	***938***	***-3***	***883***	***2,018***	206	26	-28
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	***333***	***258***	***300***	***1,556***	***565***	***2,711***	***1,094***	***546***	***1,023***	53	-7	-299

*Ox濃度に変化がないものと仮定した場合(20年間の夏季累計)

**20年間の夏季(6-8月)の累計

３）オゾンのリスクに閾値を仮定した場合の健康リスクの推定

これまで詳細に検討してきた５地域（11都府県）について、閾値がないと仮定した場合と、閾値

が20ppb(TL20)、40ppb(TL40)、60ppb(TL60)であると仮定した場合について、増加死亡数の推定を行った。閾値を60ppbとした場合には、増加死亡数が大きく低下する地域が多かったが。40ppb以下では、増加死亡数がほとんど減少しない地域が多かった。

（５）節足動物媒介性感染症の発生に及ぼす地球温暖化の影響予測に関する研究

１）ヒトスジシマカの分布は、現在東北地方が北限である。盛岡、宮古、釜石では数年に１度の頻度でヒトスジシマカが確認されたが、現在のところ、定着していない。一方、秋田県の日本海側では青森県境に近い八峰町（八森町）では2006年から連続して限られた地域でヒトスジシマカが確認されており、日本海側の分布北限となっている。ヒトスジシマカの分布は年平均気温が10.8℃以上の地域で拡大しており、このような気候条件が必要であると推察される。

安定してヒトスジシマカの定着が認められる年平均気温は11～12℃以上であるが、北緯38～41°の範囲でこの条件を満たす地域の面積が急激に増加し、2031～2050年までに全面積の約60%を占め、2100年には90%以上となった。このことは、デング熱およびチクングニヤ熱の流行する可能性のあるリスク地域が広がることを示している。

２）MIROC(K1)を利用した将来予測では、2035年には、津軽平野の全域、青森市周辺、八戸市にヒトスジシマカが定着する可能性が示され、2100年には東北地方全域の平地および北海道の南部および札幌周辺の平地に同蚊が分布域を広げることが明らかとなった。ネッタイシマカに関しては、2100年にはネッタイシマカが分布可能な地域が九州南部から東西の海岸線、高知県、紀伊半島の南部、静岡県、神奈川県、千葉県南部と広範囲に拡大すると推察された。

日本脳炎ウイルス抗体陽性率は、ほとんどの年度において、夏期の平均気温、最高気温、最低気温と各年の最終検査日の日本脳炎ウイルス抗体陽性率には正の相関がみられた。この結果から、日本脳炎ウイルスの活動と夏季の温度には相関があることを示している。また、ブタの抗体陽性率は抗体検査日から20日－60日前の平均気温、日最高気温、日最低気温と相関が見られた。日本脳炎ウイルスの活動は特に夏季の気温により影響を受けていることから、地球温暖化が進行すればおそらくコガタアカイエカの活動範囲が特に日本北部において拡大し、活動自体も盛んになる可能性がある。

３）熱帯熱マラリア流行シミュレーションの結果、1950年代八重山群島で報告された小規模なマラリア流行のパターンとほぼ一致した。今後想定される幾つかの条件を別個に設定し、各々の場合について同様にシミュレーションを行ったところ、熱帯熱マラリアに感染した旅行者が短期間滞在した場合は、その季節に関わらず２次感染が生じる可能性は殆どないこと明らかとなった。また、居住者が熱帯熱マラリアに感染して帰国する場合は、冬季であれば２次感染の可能性は殆どないが、夏季にコガタハマダラカの生息地近くに感染者が居住し続けた場合、小規模な２次感染が続く可能性が否定できない。ただし、マラリアという診断が発症後短時日で適切に下されるようになれば、流行をおこすことなく１ヶ月あまりで２次感染の可能性も消失することが明らかとなった。

地球温暖化とマラリアの流行拡大について、今後、３℃平均気温が上昇すると、九州や四国の一部も温度条件からみたコガタハマダラカの生息可能地域に入るが、植生や土地利用状況からみると、短期間のうちに実際に生息できるようになる可能性は低い。また、コガタハマダラカの飛翔距離は限られているため、温度条件をクリアできたとしても、今後実際に島伝いにその生息範囲を拡大していく可能性も低い。降水量や気温の変化が進むと、今後しばらくの間はコガタハマダラカの幼虫密度が増加していく可能性が指摘される。しかしその場合でも、熱帯熱マラリアが日本に侵入・定着して再流行を起こすには、他の色々な条件が重なる必要があり、実際に再流行が起きる可能性は非常に低い。

５．研究者略歴

課題代表者：田村憲治
1951年生まれ、東京大学大学院医学系研究科保健学修士課程修了、博士（保健学）
現在、独立行政法人国立環境研究所環境健康研究領域総合影響評価研究室　室長

主要参画研究者
（１）本田　靖：1955年生まれ、東京大学医学部保健学科および医学科卒業、博士（医学）
東京大学医学部助手、国立公衆衛生院研究員、
アラバマ大学公衆衛生学大学院助手、国立環境研究所主任研究員、
現在、筑波大学大学院人間総合科学研究科　教授

（２）倉根一郎：1953年生まれ、東北大学医学部卒業、博士（医学）
米国マサチューセッツ大学医学部内科感染症免疫学部門准教授、
近畿大学医学部細菌学講座教授
現在、国立感染症研究所ウイルス第一部部長

６．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）
（１）査読付き論文

1) 津田良夫、比嘉由紀子、倉橋　弘、林　利彦、星野啓太、駒形　修、伊澤晴彦、葛西真治、佐々木年則、冨田隆史、沢辺京子、二瓶直子、小林睦生：都市部における疾病媒介蚊の発生状況調査―ドライアイストラップを用いた２年間の調査結果. Medical Entomology and Zoology, 57:75-82, 2006
2) 大前比呂思、遠藤卓郎、長谷山路夫、新妻淳、飯塚信二、津田良夫：検疫感染症としてのマラリアをどう捉えるか、Clinical Parasitology、17: 127-130、2006
3) Higa Y, Hoshino K, Tsuda Y & Kobayashi M: Dry ice-trap and human bait collection of mosquitoes in the eastern part of Hokkaido, Japan. Medical Entomology and Zoology, 57:93-98, 2006
4) Kondo M, Shono A, Honda Y: Global warming, cedar pollinosis, and health care budget impact. Global Environmental Research, 11: 73-78, 2007
5) Takahashi K, Honda Y, Emori S: Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming. Journal of Risk Research, 10(3): 339-354, 2007
6) Honda Y, Kabuto M, Ono M, Uchiyama I: Determination of optimum daily maximum temperature using climate data. Environmental Health and Preventive Medicine, 12: 209-216, 2007
7) Likhvar VN, Honda Y: Choice of Degree of Smoothing in Fitting Nonparametric Regression Models for Temperature-mortality Relation in Japan Based on a Priori Knowledge. Journal of Health Science, 54: 143-153, 2008
8) 階堂武郎、本田 靖、鈴木幸子、金森葉子、石原英樹、原沢秀夫、前川泰子、兜真徳：夏期に慢性閉塞性肺疾患の急性増悪をきたしたと考えられる１症例、日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌、18(1):72-75、2008
9) Kobayashi M, Komagata O, Nihei N: Global warming and vector-borne infectious diseases. Journal of Disaster Research, 3(2): 105-112, 2008
10) Kobayashi M, Kasai S, Sawabe K, Tsuda Y: Distribution and ecology of potential vector mosquitoes of West Nile fever in Japan. Global Environmental Research, 12:27-33, 2008
11) Kurane I, Kotaki A and Takasaki T: Vector-borne infectious diseases and climate change. Global Environmental Research, 12(1): 35-40, 2008
12) Honda Y, Ono M: Issues in health risk assessment of current and future heat extremes. Global Health Action, DOI: 10.3402/gha.v2i0.2043, 2009
13) 本田 靖、高橋潔：熱ストレスの健康影響、地球環境、14(2):257-262、2009
14) 小野雅司、地球温暖化と熱中症：光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク、地球環境、14 (2)、263-270、2009
15) 田村憲治、松本幸雄、佐々木寛介、椿貴博：地球温暖化と大気汚染：光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク、地球環境、14 (2)：271-277、2009
16) 倉根一郎：感染症への地球温暖化影響、地球環境、14(2): 279-298、2009
17) Kurane I: The emerging and forecasted effect of climate change on human health. Journal of Health Science, 55(6): 865-869, 2009
18) Nakagawa Y, Ueki M, Fueda K, Ohmae H, Ishikawa H: Risk assessment of re-emerging Plasmodium falciparum on Ishigaki Island using a stochastic model. Tropical Medicine and Health, 37(3): 97-107, 2009

(2)査読付論文に準ずる成果発表
なし

S-4 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２.影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－２健康面からみた温暖化の危険性水準情報の高度化に関する研究

（１）適応策を考慮した温暖化の健康リスクの定量化・経済指標化とマッピングに関する研究

独立行政法人国立環境研究所 環境健康研究領域　兜　真徳　（平成17年度）
小野雅司　（平成18年～20年度）
上田佳代　（平成21年度）

〈研究協力機関〉　筑波大学大学院　人間総合科学研究科　本田靖
筑波大学大学院　人間総合科学研究科　近藤正英

平成17～21年度合計予算額　18,291千円
（うち、平成21年度予算額　2,246千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］平成17-18年度における、障害調整生存年(disability-adjusted life years = DALYs)の基礎的検討および全死因についてのDALYsを用いた影響評価に続き，平成19年度には、死因別（循環器系疾患、呼吸器系疾患、消化器系疾患、外傷、４疾患計）DALYsを用いた影響評価を行った。また、温暖化によって増加する可能性のあるスギ花粉症に関するhealth care budget impactの評価を行い、2℃上昇で9億円のbudget impactという結果などを得た。平成20年度は、推定精度を上げるため、気温区分における平均的な相対リスクではなく、回帰直線を用いた相対リスク推定を用いてDALYsを計算した。具体的には以下のように作業した。東京都における1990-1995年の日別死亡率と日最高気温との関連を平滑化スプライン曲線の当てはめによって描き、そのグラフから至適気温（日別死亡率が最低となる日最高気温=OT）を求めた。次に、OT+3℃以上の区分に含まれる日のデータを用いて回帰直線を計算し、その直線に従ってOT+3℃以上での死亡が発生すると仮定した。ついでその回帰直線のOT+3℃における点と、上記の至適気温における点を結ぶ直線を計算し、その直線に従ってOTからOT+3℃までの死亡率が推定できるとした。これら2本の直線を用いて、1990年～1995年の実際の気温分布と、それから毎日5℃ずつ高い、温暖化した状態での死亡数から温暖化によるDALYsを計算した。それによると、男女の総死亡については、100,332と107,456、循環器疾患では27,647、20,914、呼吸器疾患では男が7,774、女は計算不能であった。平成21年度からは、WHOの進める、気候変化によるGlobal Burden of Disease Projectにおいて、本課題で進めてきたDALYsの計算を用いて将来予測を行うための作業を行っている。平成21年3月に予備的な会合をコペンハーゲンで開き、そこに本田が参加してS-4での取り組みを説明したことから、直接影響も含めることとなり、5月にはジュネーブで感染症、直接影響、労働への影響などの専門家、将来予測の専門家、DALYsの専門家が集合してワークショップを行った。

［キーワード］DALYs、熱ストレス、スギ花粉、回帰直線、主要死因

１．はじめに

健康関連の影響について、その経済評価を排除すべきとの意見もある一方、保健医療政策も経済活動の一部であることから、積極的に経済評価を取り入れるべきとの意見もある。WHOの立場は、とりあえず健康影響の大きさを死亡のみではなく、障害を持って生きるということの負荷をも取り入れた形の障害調整生存年（disability-adjusted life years = DALYs）によって疾病負担として評価する、というものであり、その考えが一般的になってきている。ここで、

DALYs＝YLL(若年死亡損失年 years of life lost)
＋YLD(障害損失年 years lived with disability)

と定義される。DALYs（障害調整生存年）は死亡で失った年数と、障害を持って生きたために失った価値を合計したものである。

また、S-4においては、異なるセクタでの影響の大きさを比較することを目的としている。一部批判はあるものの、DALYsをそのまま貨幣価値に換算することも可能[1)]であるため、本サブグループでもDALYsを用いた評価を試みることとした。

平成20年度までに、途上国にも適用可能な非常に単純なモデルによる計算をおこなった。すなわち47都道府県それぞれで高気温時の死亡数を求めるにあたり、日最高気温と死亡率との関連から、死亡数が最低となる日最高気温、すなわち至適気温（=OT）を求め、そのOTを越えた気温を二つの気温区分、OTからOT+5℃、OT+5℃以上に分けて、それぞれの区分における平均的な相対リスクから死亡数を求めた。ついで同様の方法で性・年齢階級・死因別の計算を行った。しかし、そのモデルについて、以下のような問題が指摘された。OTからOT+5℃、OT+5℃以上の二区分に分けて、それぞれの区分における死亡数を求めたが、区分における平均として死亡数を計算したため、OT+5℃以上といっても、実際にはOT+5℃に近い気温が多く、5℃上昇時のリスク推定としては過小評価している可能性が高い（図1参照）。

平成20年度は、以上の問題点を克服する一つの方法を取り入れて、再度計算を行った。

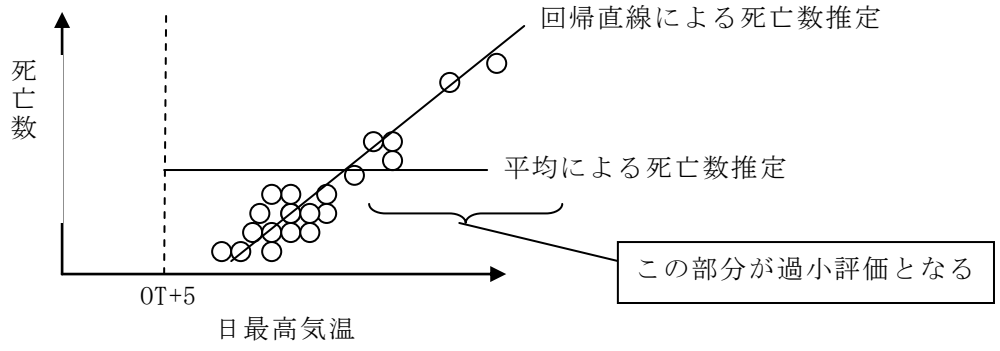


図1. 気温と死亡数との関連模式図

平成21年度は、WHOに貢献するため、更に問題点を洗い出すために解析を行った。
なお、疾病に関する経済評価に関しても可能性を探索し、スギ花粉に関する解析を行った。
計算には統計解析環境R2.92と、そのパッケージ、dlnmを用いた。

２．研究目的

WHOの進めるGlobal Burden of Disease Projectに協力できるような、気温の直接影響によるDALYs計算方法を提案することと、疾病の経済評価に関する探索を行うことが本研究の目的である。

３．研究方法

（１）熱関連の超過死亡によるDALYs

資料として、人口動態統計死亡データ（1990年～1995年、東京都）、同時期の日最高気温データ、WHOによって推計されたNational Burden of Disease in Japan 2002を用いた。

死亡と気温のデータから、S-4-2(2)-2)のグループによって開発された影響関数を用い、1995年の日最高気温の場合と、各日それぞれ1995年より5℃上昇した場合の熱ストレスによる死亡数増加を計算した。そのデータを用い、以下の3つの仮定の下にDALYsを計算した：(i) 国の疾病負担(national burden of disease)は1995年と2002年で同様である（死亡データが1995年までしか得られていないため、2002年に推計されたDALYsがそのまま1995年に適用可能であるとの仮説をおいた。）；(ii) 死亡数とDALYsは比例する；(iii) 人口構造は変化しない。

なお、計算は、性・年齢階級・死因別に分けた場合について行う。

上記のモデルについては、まずOTからOT+5まで、OT+5以上の2つの区分について相対リスクを求める方針で計算した。その問題点を克服するために用いた方法は以下である。

まず、65歳未満では65歳以上に比較して高気温での超過死亡が非常に小さいことが明らかなため、超過死亡は65歳以上のみに存在すると仮定した。65歳以上では、1990年から1995年の日最高気温と死亡数の関連を平滑化スプラインによって描き、その曲線から、OTの値とOTにおける死亡数を求めた。次に、OT+3℃以上の区分にある日のみを用いて、OT+3℃以上の区分で使用する回帰直線を求めた。この回帰直線を用いてOT+3℃における死亡数を求め、その点とOTにおける死亡数の点とを結ぶ直線でOTからOT+3℃までの気温区分における死亡数を推定することとした。

上記の2直線を用い、1990年から1995年までの気温の場合と、各日それぞれ1995年より5℃上昇した場合の熱ストレスによる死亡数を計算した。そのデータを用い、以下の3つの仮定の下にDALYsを計算した：(i) 国の疾病負担(national burden of disease)は1990年から1995年と2002年で同様である（死亡データが1995年までしか得られていないため、2002年に推計されたDALYsがそのまま1995年に適用可能であるとの仮説をおいた。）；（ⅱ）死亡数とDALYsは比例する；（ⅲ）人口構造は変化しない。このうち、人口構造が変化しないという仮定は、非現実的ではあるものの、1990年から1995年が、実際よりも毎日5℃ずつ高かったら超過死亡がどの程度増えるか、ということを知るために、仮定の一つとした。

なお、OT未満で、寒冷による超過死亡を考慮しないと、気候変化による正味の影響がわからない、との批判はあるが、S-4-2(2)-2)で検討されているように、季節による影響はあるものの、寒いほど死亡率が高くなる、という関係は認められないようであり、評価が困難なため、本年度はOT未満の死亡数をOTにおける死亡数と同一と仮定した。

更に、方法論的な問題点を洗い出す作業として以下の解析を行った。Armstrongは、セミパラメトリックに V字型の近似を行うにあたり、両端を越える部分については、直線を仮定するnatural cubic splineがよいと述べている[6)]。ここでは、natural cubic splineによって、年次については年あたりの自由度を1、気温については自由度4と8の2種類について、boundary knotsを5℃、35℃

としてV字型を描いた。なお、相対リスクの基準は28℃とした。計算には統計解析環境R2.92と、そのパッケージdlnmを用いた。

（２）他の健康影響による経済影響

スギ花粉症の重症度は飛散するスギ花粉の量に比例するという文献[2]、スギ花粉の飛散量が夏の気温に左右され、夏が暑いほど多くの花粉が作られるという文献[3),4)]、スギ花粉症の経済影響に関する文献[5)]を入手した。これらからモデルを作成し、health care budget impactを求めた。Health care budget impactとは、予算などの資源（バジェット）使用の短期から中期の変化予測として定義されるものである。これは、保健医療政策立案者にとっては有用な情報となる。

４．結果・考察

（１）熱関連死亡によるDALYs

東京における総死亡、循環器疾患死亡、呼吸器疾患死亡と日最高気温との関連を図2に示す。なお、横軸を日最高気温(℃)、縦軸を死亡数とした。

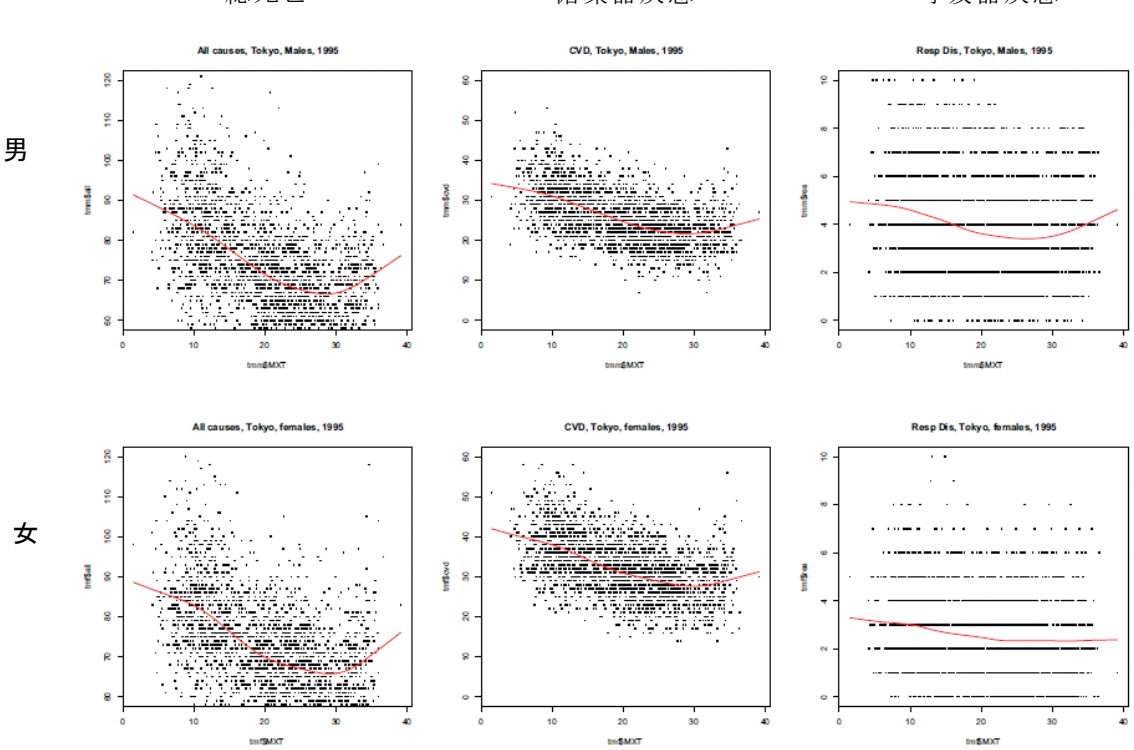


図2. 日最高気温と死亡数の関連（東京都、1990-1995年）

女の呼吸器疾患については、OTがはっきりしないので、熱ストレスによる超過死亡はないと考えた。また、男の呼吸器疾患では、OT+3℃における回帰直線を引くと、OT+3℃における期待死亡数が既にOTにおける死亡数を下回ってしまったので、回帰直線上で死亡数がOTにおける死亡数と等しくなる日最高気温30.4℃未満では超過死亡無し（死亡数はOTにおける死亡数と同一）、それ以上では回帰直線に従って死亡数がきまるとした。表1にOT及び区分毎の死亡数推定直線を示す。傾きは循環器疾患、呼吸器疾患に比べて総死亡で大きいが、これは日別死亡数が総死亡で大きいためである。表1の直線を用いて求めたDALYsを表2に示す。

表1. 死因別のOTおよび区分ごとの死亡数推定のための直線

	OT	OT< <=OT+3	OT+3<
総死亡、男	28.5	y=57.6+0.32x	y=14.0+1.7x
総死亡、女	29.2	y=65.1+0.02x	y=-8.3+2.3x
循環器疾患、男	28.9	y=19.0+0.09x	y=0.18+0.68x
循環器疾患、女	29.9	y=15.5+0.40x	y=7.1+0.66x

	OT	OT< <30.4	30.4<
呼吸器疾患、男	26.4	y=3.4	y=0.058+0.11x
呼吸器疾患、女		-	

表2.熱ストレスによるDALYs（東京都、1990年-1995年）と　5℃上昇した場合のDALYsとの差（性・死因別）

	男	女
総死亡	100,332	107,456
循環器疾患	27,647	20,914
呼吸器疾患	7,774	-

交通事故（road traffic accidents）のDALYsが65,719であるから、この表の循環器疾患はその1/3程度となっている。交通事故も、注意をする、飲酒をしないなどで改善する余地があるが、熱ストレスによる超過死亡は、基本的にエアコンなどによる緊急避難的対応でなくすことが可能であることを考えれば、十分な適応策をとるべきと考えられる。

気温５℃上昇時の年齢階級別・死因別の超過DALYsを図3に、現状に対する超過割合を図4に示した。年齢階級別にみると、4疾患合計では、65歳以上33,963、15～64歳33,588、0～14歳15,537の順であり、それぞれの死因でみると、0～14歳、15～64歳では呼吸器系疾患、外傷が多く、65歳以上では呼吸器系疾患とともに循環器系疾患が多くなった。一方、現状に対する超過DALYｓの割合でみると、４疾患合計で、0～14歳が4.9%で最も大きく、ついて65歳以上2.2%、15～64歳1.1%であった。死因別にみると、0～14歳では消化器系疾患が最も大きく、15～64歳、65歳以上では呼吸器疾患が最も大きかった。また、男女間でも異なる傾向が見られた。

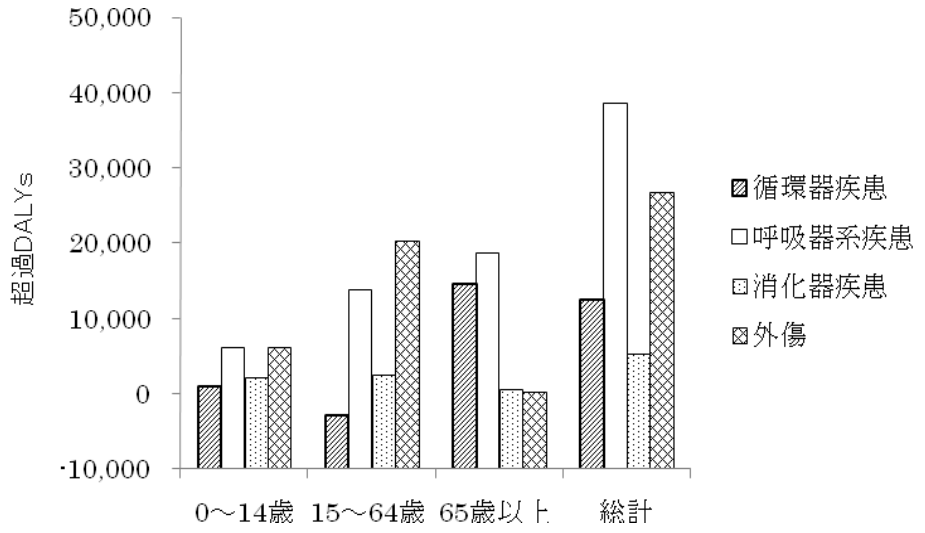


図3　年令階級別・死因別超過DALYs

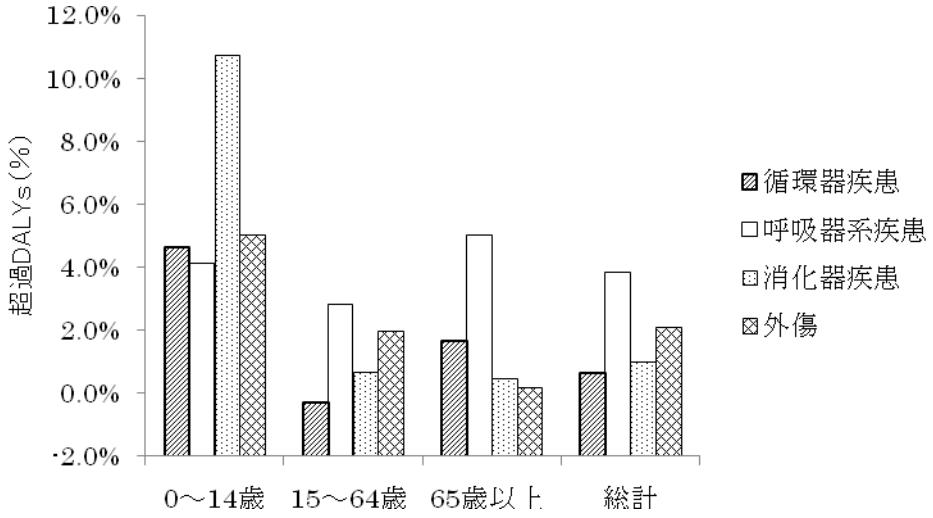


図4　年令階級別・死因別超過DALYs割合（%）

図5は自由度ごとのV字型を示している。自由度が4から8へと大きくなると、暑熱による相対リスクが上昇しており、40℃においては、28℃からそれぞれ15%、 28%の増加と、自由度によって評価が大きく異なっている。この理由の一つは、図6に見られるように35℃を越えるような気温を示す日が少なく、統計的に不安定なためと考えられる。この問題の解決のためには、何らかのプーリングが必要であるが、都道府県ごとのV字型を観察すると、至適気温が気候によって異なるため、プーリングを行うには、至適気温を基準として調整するなどの操作が必要であると考えられた。

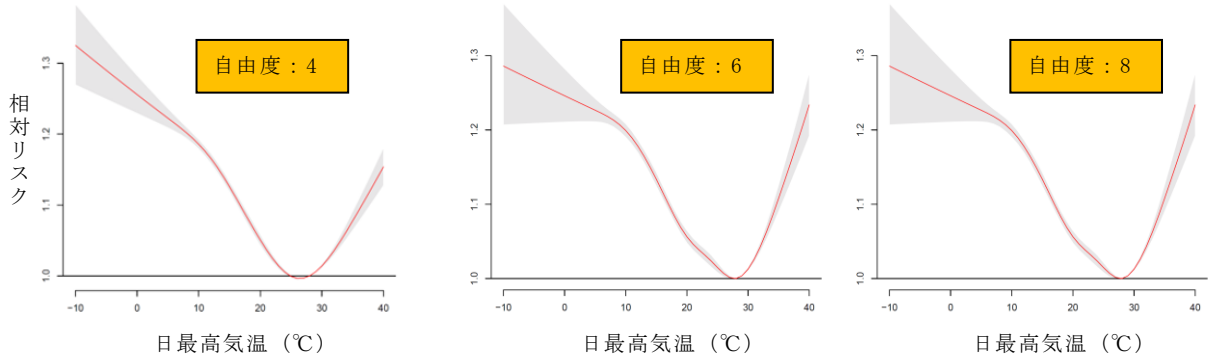


図5. 自由度による気温と死亡の関連の相違（東京都）

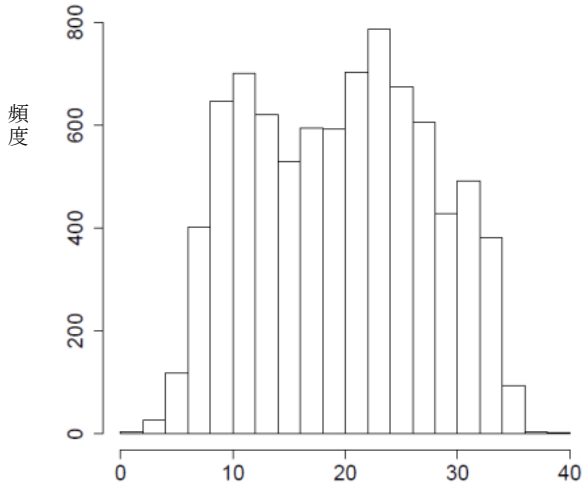


図6. 日最高気温の分布(東京都)

（２）スギ花粉症の経済影響

図7に温暖化を気温の上昇で表したレベル毎の影響を示す。2℃の上昇によって、100億円に近い額のbudget impactがあることになる。

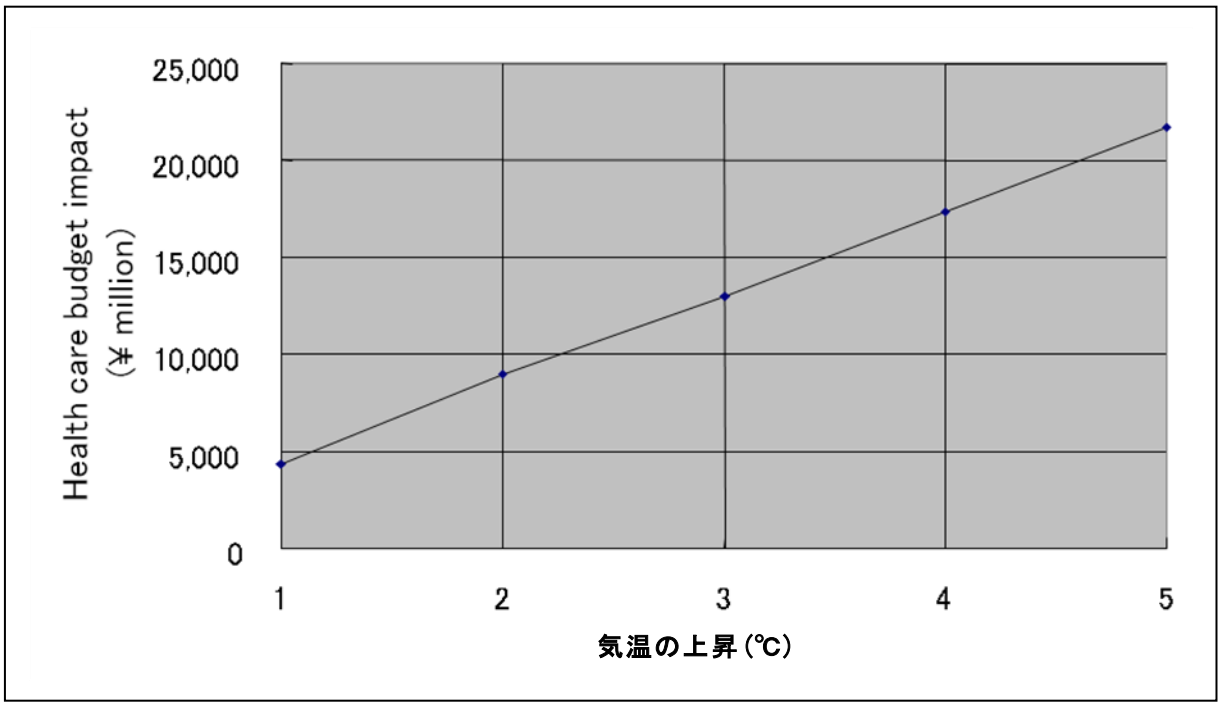


図7. 気温の上昇に応じたhealth budget impactの推定

もちろん、この推計の前提として、気温上昇とともに直線的に花粉飛散数が増加するという仮定をおいているが、ある程度以上温暖化が進むとスギ花粉はかえって減少することも考えられるため、この推計に関しては、スギ花粉飛散と気象条件の関連に関する研究の更なる発展によって不確実性を低くできるものと考えられる。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

健康影響の経済評価は、保健は専門であるものの、経済についてはそれほど詳しくない研究者が多かったため、学術雑誌にも経済学的に誤った研究が掲載されていた。この研究では、経済学の研究を専門とする近藤が加わって計算を行ったことで、世界的に認められる研究となった。このことで、我々のDALYs計算法が、世界保健機関(WHO)の進めている気候変化によるGlobal Burden of Disease Projectにおいて採用されることとなった。平成21年3月に予備的な会合をコペンハーゲンで開き、そこに本田が参加してS-4での取り組みを説明し、5月にはジュネーブで感染症、直接影響、労働への影響などの専門家、将来予測の専門家、DALYsの専門家が集合してワークショップを行った。

（２）地球環境政策への貢献

上述のように、WHOの取り組みに参加することとなったが、この取り組みはかなり高い確率でIPCCの第5次報告書に取り入れられることになる。第4次報告書の段階では、直接の熱による超過死亡は方法論的に困難なために計算できなかったものが今回は取り入れられることになったことで、地球環境政策に大きな影響を与えるものと思われる。

６．引用文献

１）EPA: The benefits and costs of the clean air act 1990 to 2010. EPA Report to Congress. EPA-410-R-99-001, Washington DC., 1999

２）馬場廣太郎: スギ花粉症修飾因子としての花粉飛散量、アレルギーの臨床、18(3)、170-174、1998

３）高橋裕一、川島茂人、相川勝悟: 空中スギ花粉濃度に及ぼす地球温暖化の影響―山形市とその周辺地域で得られた結果予測―、アレルギー、45(12)、1270-1276、1998

４）Namba et al.: Relationship between combined pollen count of Cryptomeria japonica and Cupressaceae and precipitation in July of the previous year、日本花粉学学会誌、46(2)、115-124、2000

５）川口 毅、星山 佳治、渡辺 由美: スギ花粉症の費用について、アレルギーの臨床、21(3)、178-182、2001

６）Armstrong B: Models for the Relationship between Ambient Temperature and Daily Mortality. Epidemiology,17: 624-631, 2006

７．国際共同研究等の状況

DALYsの最新知見に関して、世界保健機関において情報収集をするとともに、世界保健機関が進めている、気候変化によるGlobal Burden of Disease 2002年版の改訂作業に加わっている。このため、平成21年3月にはデンマークのコペンハーゲンで、5月にはスイスのジュネーブで行われた会議に出席した。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) Kondo M, Shono A, Honda Y: Global warming, cedar pollinosis, and health care budget impact. Global Environmental Research 11, 73-78, 2007

（２）口頭発表（学会）

1) 近藤正英，本田 靖: Climate change burden of disease in Japan: 2006 version. 第71回日本民族衛生学会総会，沖縄，2006.11

2) Kondo M, Honda Y: Climate change burden of disease focusing on selective causes of death in Japan. International Society for Environmental Epidemiology East Asia Conference, Jeju, Korea, 2008.04

3) 近藤正英，杉本和俊，本田 靖，小野雅司:地球温暖化の直接影響による疾病負荷．第74回日本民族衛生学会総会，京都，2009.11

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

S-4 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

（２）健康面からみた温暖化の危険性水準情報の高度化に関する研究

２）　温暖化と死亡リスクに関する研究

筑波大学大学院人間総合科学研究科　本田靖

〈研究協力機関〉　筑波大学大学院人間総合科学研究科　近藤正英
大阪府立大学看護学部　階堂武郎

平成17～21年度合計予算額　28,723千円
（うち、平成21年度予算額　6,664千円）
※予算額には、間接経費を含む

［要旨］H17年度、熱ストレスによる死亡リスクについて，ノンパラメトリック回帰のうち最適なモデルを決定し、その確定した手法を用いて死亡率が最低になる気温、すなわち至適気温を都道府県毎に求め、至適気温が日最高気温の80パーセンタイルとほぼ一致することを発見した。この法則を用い、わが国における熱ストレスによる超過死亡および至適気温との相対リスクを計算し、その結果を元にして、将来気候モデルと人口情報をもとに将来の超過死亡を予測するためのモデルを作成した。H18年度、上記モデルを用いた健康影響の全球将来予測地図作成した。また、循環器疾患、呼吸器疾患の至適気温は、85パーセンタイルではないまでも、それに近いパーセンタイルで推定できることを明らかにした。平成19年度は、1972年～1995年という長期に亘る解析においては、年次を制御した解析が必須であることを明らかにした。平成20,21年度は、まず第一に気温と総死亡に関する関連の再評価（月別解析、乱数を用いたシミュレーション）の結果、寒冷による超過死亡は必ずしも寒冷そのものの影響とはいえない（寒ければ寒いほど影響が強いというわけではない）ことを明らかにし、第二に自殺死亡も気温の影響を受ける可能性があることを明らかにした。

［キーワード］熱関連超過死亡、至適気温、全球将来予測地図、寒冷影響、自殺

１．はじめに

世界的に見ると、温暖化の影響としては低栄養、下痢性疾患、マラリアが大半を占める[1)]。しかし、わが国を含む先進国では、現在のところ、温暖化による影響としては、感染症よりも熱ストレスによる超過死亡が大きな問題と考えられている。たとえば、2003年のフランスにおける熱波による超過死亡は15,000にも及んだ[2)]。よって、この研究課題においては、熱ストレスによる超過

死亡を中心に、温暖化によってどのような影響を受けるかを推定するための研究を行う。

熱ストレスの評価は、高気温による超過死亡の形で研究されることが多く、わが国[3]以外にヨーロッパで[4]も米国でも[5]気温と死亡の関連がV字型、すなわちある気温（至適気温）で死亡率が最低になり、それより気温が高くても低くても死亡率は高くなることがわかっており、またその関係が気候によって異なり、寒冷な気候では至適気温が低く、温暖な気候では至適気温が高いことも上記文献に報告されていた。とはいえ、単純な長期間の平均的な気温が至適気温のレベルと非常によい相関を持っているわけではなく、どの指標を用いるのが至適気温を推定するのに最適化という点に関しては、世界的にも報告がなかった。

本研究では、南北に長く、気候と至適気温の関連を評価するのに好都合な、わが国の47都道府県別のデータを用いて、至適気温の推定に最適の指標を探索し、その指標を用いて将来の熱ストレスの全球影響予測を行った。

次に、温暖化が進むことにより、熱ストレスも増加するが、寒冷による影響は緩和されることも予想されることから、寒冷による影響に関する評価を行った。

また、従来は「事故を除く全死亡」という形で気温との関連が評価され、事故などを含む「外因」は気温と関係がないと考えられていたが、外因の一つである自殺が気温の影響を受けるとの報告がなされたため、わが国においても評価を行った。

２．研究目的

主な研究の目的を以下のように設定した。

(1) 大気汚染の疫学で用いられているノンパラメトリック回帰を、気温と死亡率の関連の研究に応用し、最適な手法、最適な平滑化パラメタを確定すること、また確定した手法を用いて気温と死亡率の関連に及ぼす気候要因を明らかにすること。

(2) 気象将来予測・シナリオを用いて、全球の熱関連死亡の影響予測地図を作成すること。

(3) 日本のみでなく、韓国、中国、台湾と共同研究を行い、モデルの検証を行うこと。

(4) 総死亡と気温の関連に関して、寒冷影響の再評価を行うことと、自殺と気象要因の関連評価を行うこと。

３．研究方法

資料としては、1972年（沖縄県のみ1973年）から1995年までの死亡小票データ（総統承158号）を厚生省より、人口データを総務省より、各都道府県庁所在地の気象データを気象庁より入手した。県庁に測候所のない埼玉県は熊谷市、滋賀県は彦根市の気象データで代用した。

死亡率は、日別に都道府県毎の死亡数を人口（正確には人口×1日の人日）で除することによって求め、その日の都道府県庁所在地の日最高気温に対応させた。

まず、ノンパラメトリック回帰の手法比較には、熱ストレスに脆弱な集団である65歳以上に限り、男女別に検討した。用いた手法は平滑化スプライン（=smoothing spline, SS）と局所重み付き線形回帰（=loess, LS）の2つで、なめらかさの指標は、凹凸の多い状態から最小値の近傍に極小値が存在しなくなった時点のものを最良と考えた。その理由は、気温と死亡率の関連がV字型を

示すからであり、また生物学的にもそのことが自然と考えられるからである。

次に、発展途上国でも得られるデータを用いた全球の将来予測を目的として、上記の研究で確定したSSを用いた解析を行った。すなわち、性・年齢で分割せず、総死亡率で日別の関連を都道府県別に求め、その至適気温を関連する気候要因を、日最低気温、日平均気温、日最高気温それぞれのパーセンタイルから探索した。この解析で、なめらかさの指標であるSSの自由度は6に固定した。

最後に、上記の結果と組み合わせて用いるための、相対リスクを計算した。経験上、至適気温から気温が上昇した場合に、至適気温近傍ではそれほど死亡率の上昇が大きくないが、至適気温を5℃前後離れると、死亡率の上昇率が大きくなることから、OTからOT+5℃、OT+5℃以上という2つのカテゴリに分け、おのおのにおける死亡率を、OTにおける死亡率で除して相対リスクを求めた。なお、わが国での平均死亡率と至適気温における死亡率との比は1:0.89であった。

詳しくはTakahashi (2007)[6]に譲るが、上記85パーセンタイル仮説を用い、地域メッシュ毎の人口、年間の総死亡率、予測された気象データから、将来の熱ストレスによる超過死亡リスクマップを作成した。

一般化加法モデルのmgcvパッケージ[7]によって、都道府県ごとに死亡数を、日最高気温と暦年それぞれの平滑化関数で推定した。この際、自由度を1年あたり1とすれば年次の制御、1年あたり4以上とすれば年次と季節の制御ができることになる。mgcvパッケージでは、平滑化関数の自由度を指定できるが、演算結果が必ずしも指定した値とはならないため、試行錯誤によって以下のように調整を行った。回は観察期間が24年であるから、年次制御のためには自由度を約24となるよう調整し、年次及び季節の制御のためには少なくともその4倍、96を越えるよう調整した。ついで、気温と死亡率の関連を月別に検討した。ここでは年次の制御のために、全期間の平均死亡率を求め、各年時の平均死亡率がそれに等しくなるような係数を求め、毎日の死亡率にその係数をかけた年次調整死亡率を計算した。この年次調整死亡率と日最高気温の関連を、平滑化スプラインによって回帰して、月別に検討した。

更に、寒冷の効果が、カゼやインフルエンザを介して死亡に至るというメカニズムから、効果が短期ではなく、数日～数週に及ぶという可能性が指摘されており、その証拠としてdistributed nonlinear model(dlnm)[8]による解析で寒冷の遅延効果が長いことが挙げられていた。これに対して、ベースラインとしてポアソン分布に従う乱数、季節の効果として1月末から2月にかけて死亡率の高い期間を設けて、上記dlnmによる解析を行った。

最後に自殺と気象要因の関連を調べた。死因としては、英国での報告[9]と比較可能にするため、自殺全体、暴力的な自殺、非暴力的な自殺を対象としたが、それ以外に、比較のために自殺/他殺の区別のつかないもの、他殺も解析した。モデルとしては、一般化線型モデル[10]を用いた。統計パッケージは、自殺の解析にSTATA10、それ以外にRを用いた。

４．結果・考察

（１）気温と死亡の関連に関する最適モデルの探索

最初に、65歳以上の性別解析においては、SSで妥当なOTが求められるのに、LSではOTがはっきりしない例が多く見られた。これは、LSが外れ値の影響を受けにくい性質を持っているため、本

来はOTが存在するはずであっても、より直線に近い曲線を描き、OTが形成されないものと考えられた。このことから、SSの方が今回のような解析には適していることが明らかとなった。

なお、上記の計算における滑らかさの指標であるが、SSで用いられる自由度（=df）は、描いたグラフの観察によって5から8程度までそれほどOTを変化させないことが明らかになった。よって、平滑化パラメタの選定に、それほど神経質になる必要はないものと考えられた。

次に、性・年齢に分類せずにSSで求めたOTと気候要因との関連では、日平均気温、日最低気温とも、どのパーセンタイルでも沖縄県が右に外れてしまった。ところが、日最高気温の85パーセンタイル値は、図１に見られるように、非常にOTに近い値を示し、気象データからOTを推測できることが確認できた。このことは、全球の将来予測に非常に有用である。なぜなら、日別の死亡数を多くの国から得ることはほとんど不可能であるため、OTの計算ができないのであるが、そのOTを気象データから精度良く推測できれば、その値と下に述べる相対リスクの予測値を用いて、年間の死亡率から超過死亡の計算が可能になるからである。なお、前サブサブテーマリーダーの兜の入手した中国の3都市、ハルピン、南京、広州のデータ、共同研究者から入手した韓国、台湾のデータも、図１の日本と大差なかった。日本とこれらの国・地域では、社会的・文化的に大きく異なるにもかかわらず同様の関係が認められたことから、この法則は日本のみでなく、中緯度地帯全体に適用できる可能性が高いものと考えられる。

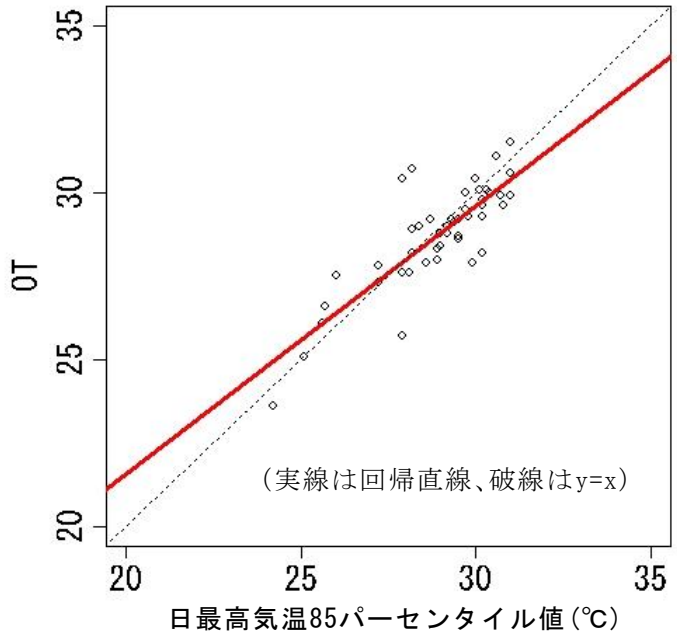


図1. 日最高気温85パーセンタイル値と至適気温の関連

相対リスクは、変動が大きいものの、全国平均ではOT-OT+5℃の区分で1.02、OT+5℃以上で1.10となった。やはり、高気温側で相対リスクが大きくなっていた。

（２）将来予測地図の作成

図2にわが国近傍の結果を示す。この例では、首都圏から東海地方にかけてと、中国の中心部に影響の大きな地域が存在することがわかる。

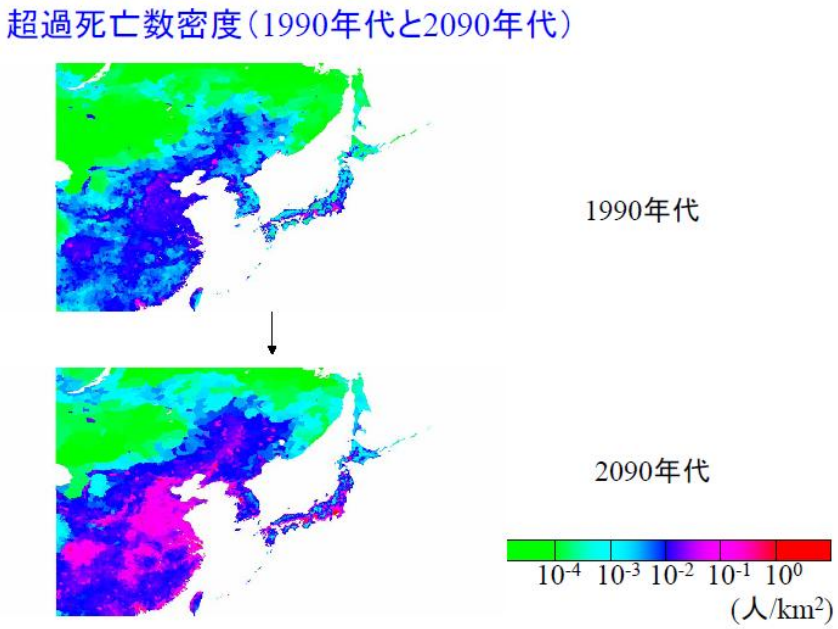


図2. 熱ストレスによる超過死亡の将来予測地図

（３）ノンパラメトリック回帰の滑らかさの指標決定

平滑化スプラインについては自由度を2から20まで0.1刻み、LOESSについてはスパンを0.1から1まで0.01刻みでグラフを描いた。図3に平滑化スプラインの例を示す。このように、自由度の選び方でV字型を示したり示さなかったりする。

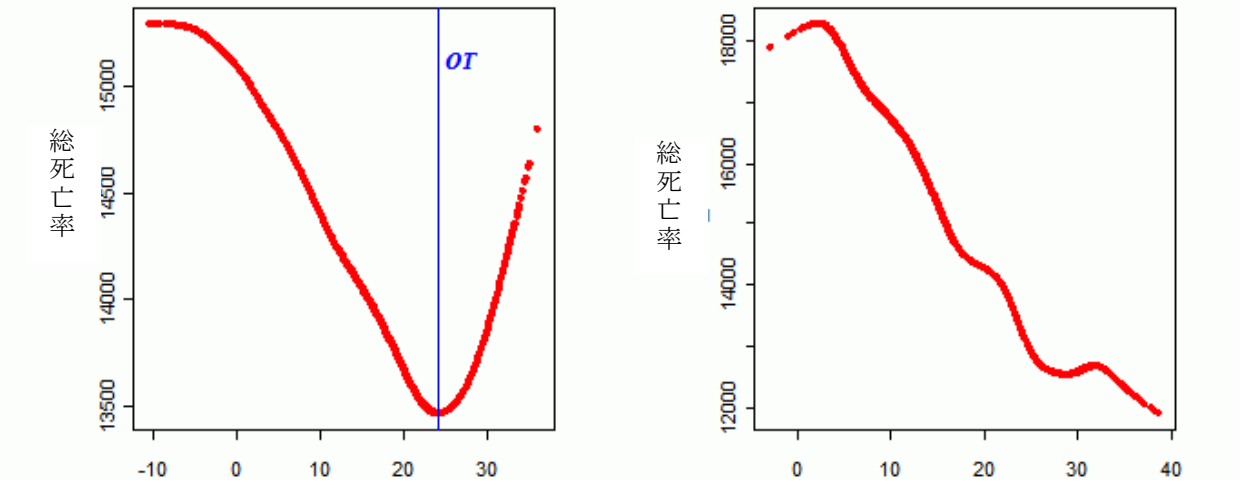


図3. 平滑化スプラインで描いた日最高気温と65+歳総死亡率の関連（1972-1994年）
左は自由度7の北海道、右は自由度11の広島県の例。（OT)は至適気温を示す。

都道府県の中には、このように広い範囲で検討しても、V字型を示さなかった県があった。その例を図4に示す。定義から、自由度2は直線回帰となっており、ここから自由度を大きくしていっても、V字型を示すことなく、直接多くの極大・極小値を持つかたちをとることがわかる。

平滑化スプラインで自由度を6から7.5にすると、全ての都道府県（ただし図2のようなV字型を取らない場合は除く）でV字型となり、その範囲の自由度でOTを求めた場合に、そのOTの範囲も0.3℃と、狭い範囲に収まった。この範囲の自由度であれば、どれをもちいても大きな差のないことが明らかとなった。

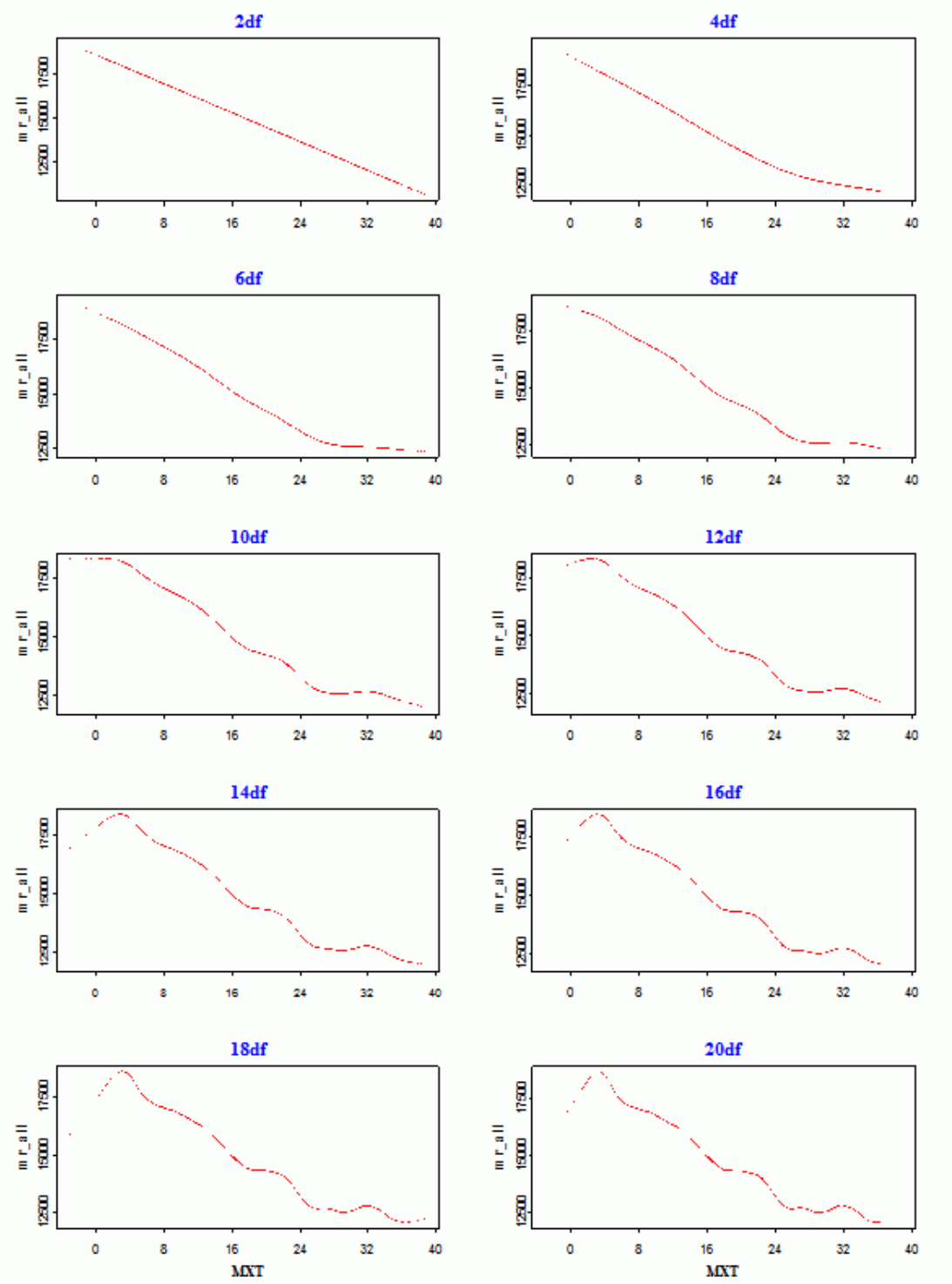


図4. 自由度(df)を変化させた時の日最高気温（横軸）と65+歳死亡率（縦軸）との関連（広島県、男、1972-1994年）

（４）気温と総死亡の関連

図5に兵庫県における一般化加法モデルによる結果を示す。ds$mxtは日最高気温を、ds$sasdateは1970年1月1日を1とした日ごとの数字を示しており、1972年から1995年までと対応する。

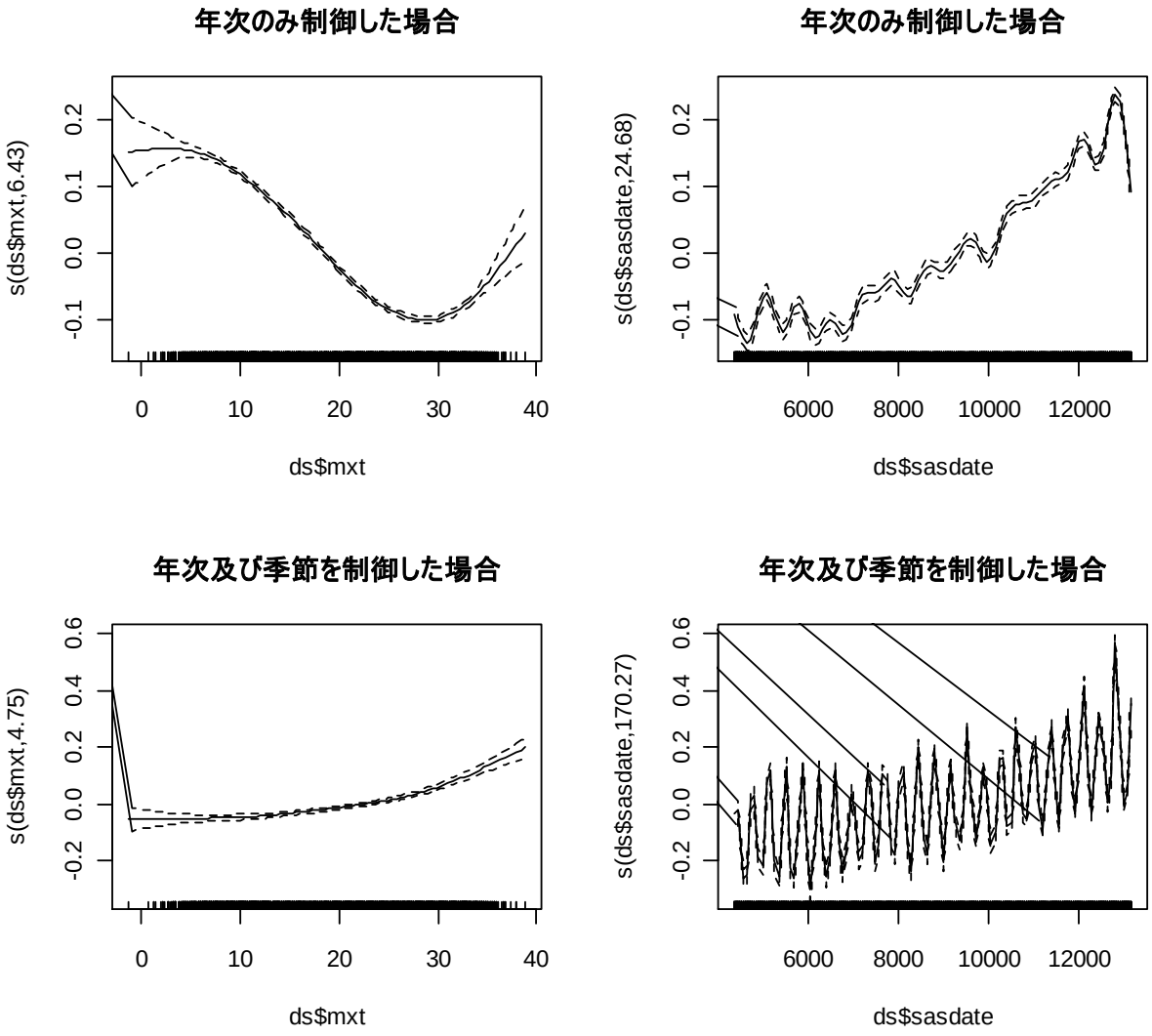


図5. 一般化加法モデルによる死亡数と年次/日最高気温との関連、兵庫県、1792年-1995年

上2枚のパネルは年次のみを制御した場合の関連を、下2枚のパネルは年次と季節を制御した場合を示している。上下で全く同じデータセットを用いており、データによる相違はないはずであるが、日最高気温と死亡数との関連は大きく異なっている。年次のみを制御した場合には、あたかも至適気温以下では寒いほど死亡数が多いように見えるのに対し、年次と季節を制御した場合には、左側のグラフから、寒冷による影響が全く消失している。

しかし、これは「寒冷」の影響が全くなくなったことを意味するわけではない。右側のグラフから明らかなように、年次のみの制御の場合に比べて、年次と季節を制御した場合には、各年次ごとに寒冷時のピークが存在する。すなわち、寒冷な季節には死亡率が高いが、その季節の中では、寒ければ寒いほど死亡数が多くなるというわけではない、と解釈すべきものと考えられる。

図6は、東京について気温と死亡率の関連を月別に観察したものである。

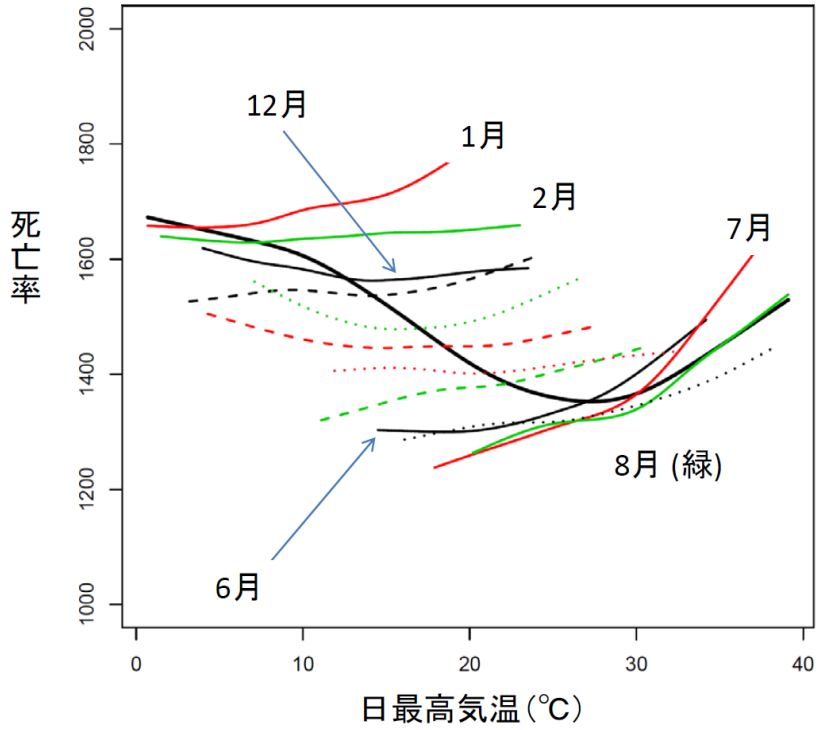


図6. 月別に見た日最高気温と死亡率の関連（東京、1972年から1995年）

このグラフから明らかなように、暑熱の影響は、月別に見ても熱いほど死亡率が高くなっているのに対し、寒冷の影響はむしろ月ごとにレベルが異なるものの、それぞれの月のみで検討すると、気温が低いほど死亡率が高いという傾向は認められない。他の46道府県の検討でも、冬期には気温と死亡率に一定の傾向は認められなかった。

シミュレーションを用いた結果については、図7に示すように、寒冷の影響を全く想定しないモデルにおいて、単純な気温と死亡の関連を観察すると、見かけ上気温が低いほど死亡率が高いという関連が認められ、更にあたかも寒冷の影響が長く続くかに見える結果を得ることができた。

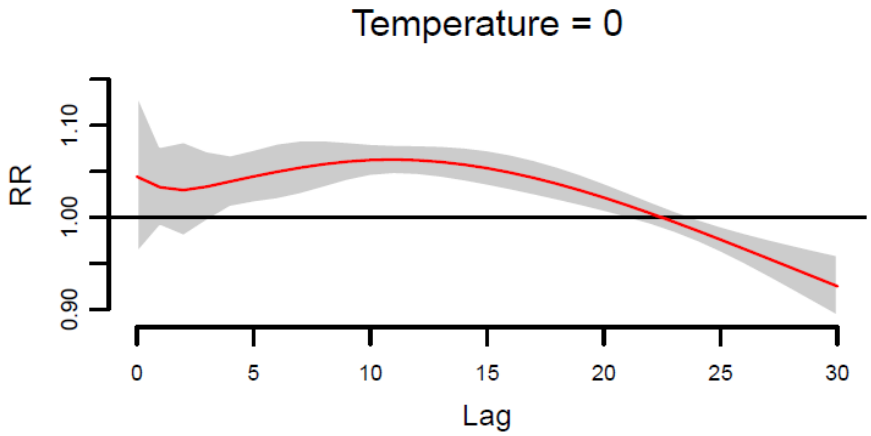


図7. シミュレーションデータを用いた日最高気温0℃における遅延効果の構造

もちろん、この結果によって、冬期の影響はまったく見かけ上のものであると断定はできないものの、少なくとも「寒冷の影響が長く続くから、distributed nonlinear modelで長い遅延効果が認められる」とは限らないことが示されたことの意義は大きいものと思われる。

以上から、やはり寒冷の影響は、寒いほど死亡率が高くなるということではなく、何らかの季節的な要因、たとえばインフルエンザの流行などによって冬期の死亡率が高いということであろうと推測される。温暖化の健康影響を評価するためには、この点に関して、更なる研究が必要となった。

（５）自殺と気象要因の関連

図８に自殺などの死亡と日最高気温の関連を示す。

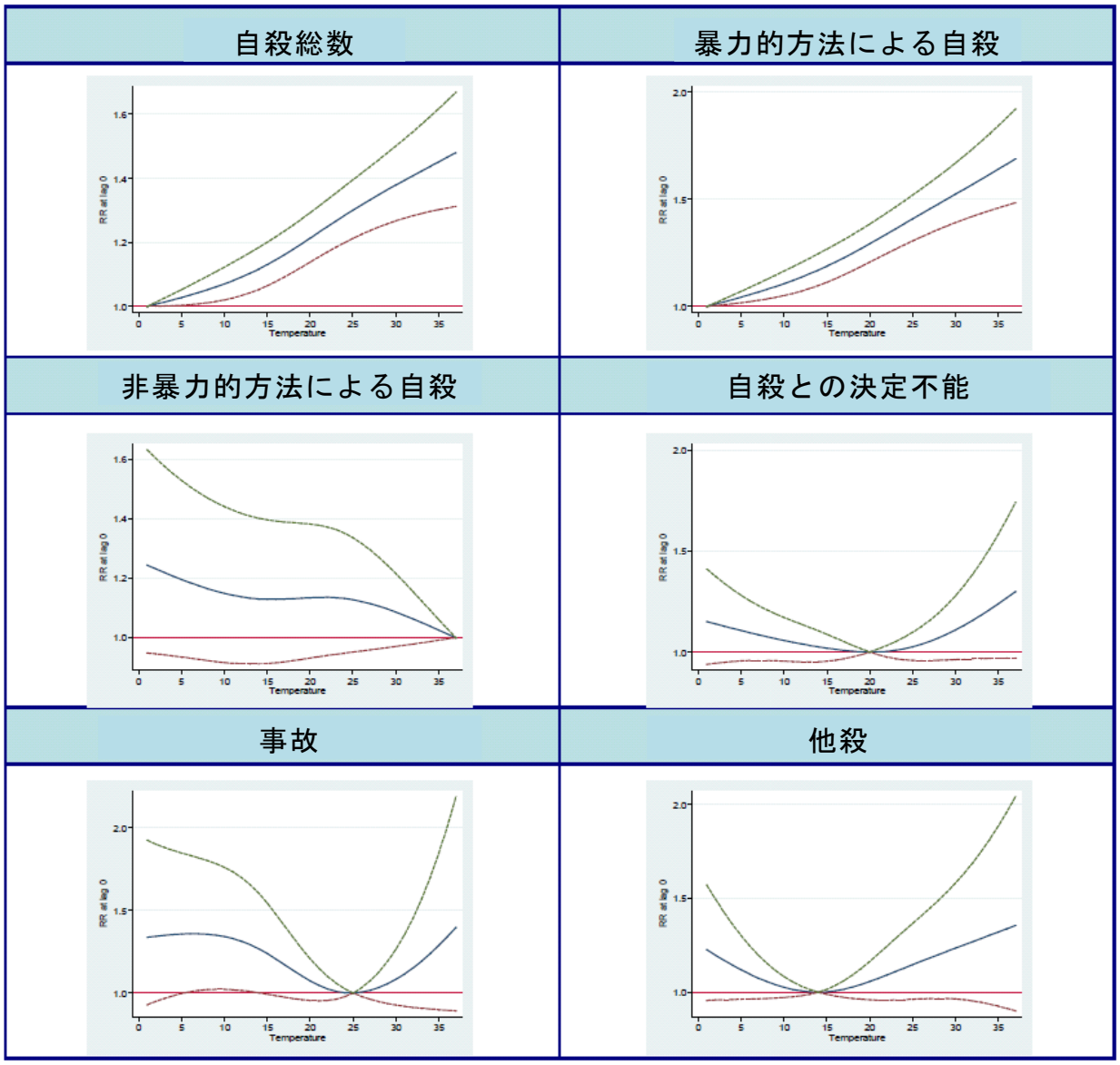


図8. 外因死と日最高気温との関連、関東地方（1972年-1995年）

全てのグラフで、縦軸は相対リスク、横軸は日最高気温である。このように、気温が高いほど自

殺死亡率が高いことが明らかとなった。これは関東の例であるが、他の地域でも同様の結果を得ている。また、同様の傾向は英国でも報告されている[3)]。このことから、多くの過去の研究に見られるような、a prioriに外因を死因からはずした非外因死亡によって気温の影響を評価することは問題であることが示唆される。

自殺の細分類と他の外因との類似性をみたところ、暴力的方法による自殺が多くの部分を占めることもあり、それが自殺全体の形を決定していることがわかる。非暴力的方法は、一定の傾向を持たない。自殺か事故かが不明のもの、事故、他殺はV字型のようにも見えるが、信頼区間が広いため、はっきりとしたことは言えない。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

気温と死亡率との関連がV字型であることは古くから知られていた。しかしながら、そのV字型の死亡率が最低になる気温、すなわち至適気温が概ね日最高気温の85パーセンタイル値で推定できるという法則は本研究で初めて明らかになった。しかも、この法則は日本のみでなく、韓国、中国、台湾という発展レベル、文化の大きく異なる地域においても認められることから、更に広い地域でも成り立つことが期待される。

この解析に対する評価は高く、世界保健機関(WHO)における気候変化による全球の疾病負荷推定プロジェクトにおいて、本田、近藤が選ばれ、気温の直接影響の計算を担当することとなった。また、本田は、このような貢献により、国際的な環境疫学の学会であるInternational Society for Environmental Epidemiologyの2010年学術総会において国際アドバイザリボードに選出された。

（２）地球環境政策への貢献

ここで行われた熱関連の超過死亡の将来予測は、気候変動に関する政府間パネルの第4次報告書に引用された。また、上記のWHOプロジェクトの結果は、同第5次報告書を念頭に行われているものであり、そこへの貢献も期待されている。

６．引用文献

1) McMichael AJ, Campbell-Lendrum D, Kovats SR, Edwards S, Wilkinson P, Wilson T, Nicholls R, Hales S, Tanser F, Sueur DL, Schlesinger M, Andronova N: Ch20. Global climate change. In Ezzati M, Lopez AD, Rodgers A, Murray CJL eds.: Comparative quantification of health risks. Global and Regional burden of disease attributable to selected major risk factors. WHO, Geneva, 2004

2) Fouillet A, Rey G, Laurent F, Pavillon G, Bellec S, Guihenneuc-Jouyaux C, Clavel J, Jougla E, Hémon D: Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. International Archives of Environental and Occupational Health.80:16-24, 2006

3) Honda Y, Ono M, Uchiyama I, Sasaki A: Shift of the short-term temperature-mortality relationship by a climate factor ― some evidence necessary to take account in estimating the health effect of the global warming. Journal of Risk Research, 1:209-220, 1998

4) Keatinge WR, Donaldson GC, Cordioli E, Martinelli M, Kunst AE, Mackenbach JP, Nayha S,

Vuori I: Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. British Medical Journal,321;670-673, 2000
5) Curriero FC, Heiner KS, Samet JM, Zeger SL, Strug L, Patz JA: Temperature and Mortality in 11 Cities of the Eastern United States. American Journal of Epidemiology,155:8087, 2002
6) Takahashi K, Honda Y, Emori S: Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming. Journal of Risk Research, 10(3): 339-354, 2007
7) Woods S: Generalized Additive Models: An Introduction with R. Chapman & Hall/CRC, 2006.
8) Armstrong B: Models for the relationship between ambient temperature and daily mortality. Epidemiology, 17: 624–631, 2006
9) Page LA, Hajat S, Kovats RS: Relationship between daily suicide counts and temperature in England and Wales. British Journal of Psychiatry, 191: 106-112, 2007.
10) Faraway JJ: Extending the Linear Model with R. Generalized Linear, Mixed Effects and Nonparametric Regression Models, Chapman & Hall/CRC, 2006

７．国際共同研究等の状況

同じ問題意識を持つ、韓国、台湾、中国の研究者とは気候変化と健康の関連に関する共同研究を続けている。その成果として下記誌上発表6(Chung et al.)が既に報告され、更に論文が増加することが期待されている。

なお、マレーシア、シンガポール、モンゴルの研究者も、上記の方法論などに関するワークショップやシンポジウムに参加しており、今後の政策・研究に寄与するものと期待されている。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) Takahashi K, Honda Y, Emori S: Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming. Journal of Risk Research, 10(3): 339-354, 2007
2) Honda Y, Kabuto M, Ono M, Uchiyama I: Determination of optimum daily maximum temperature using climate data. Environmental Health and Preventive Medicine, 12: 209-216, 2007
3) Likhvar VN, Honda Y: Choice of Degree of Smoothing in Fitting Nonparametric Regression Models for Temperature-mortality Relation in Japan Based on a Priori Knowledge. Journal of Health Science, 54; 143-153, 2008
4)階堂武郎，本田 靖，鈴木幸子，金森葉子，石原英樹，原沢秀夫，前川泰子，兜真徳．夏期に慢性閉塞性肺疾患の急性増悪をきたしたと考えられる１症例．日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌．18(1):72-75, 2008
5) Honda Y, Ono M: Issues in health risk assessment of current and future heat extremes. Global Health Action, DOI: 10.3402/gha.v2i0.2043, 2009
6)本田 靖，高橋潔．熱ストレスの健康影響．地球環境．14:257-262, 2009

〈査読付論文に準ずる成果発表〉（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) Honda Y: Impact of climate change on human health in Asia and Japan. Global Environmental Research 11:33-38, 2007.

2)本田 靖. 地球温暖化による健康への影響. 筑波大学環境報告書. 43-44, 2008年.

3)本田 靖. 気温と死亡リスク. 月刊保団連 975;24-27, 2008

（２）口頭発表（学会）

1) Honda Y: Observed Effect of Ambient Temperature on Human Health in Japan. Pacific Basin Consortium for Environmental and Health Sciences, 11th International Conference, Hawaii, 2005.09

2) Honda Y, Ono M, Kabuto M: Do we adapt to a new climate as the globe warms? International Conference on Environmental Epidemiology and Exposure, Paris, France, 2006.09

3) Kabuto M, Honda Y: Heat-related excess mortality in 3cities in China. International Conference on Environmental Epidemiology and Exposure, Paris, France, 2006.09

4) Honda Y: Impact of climate change on human health in Asia. Keynote speech at Symposium on impact evaluation of global warming and approach to risk analysis in East Asia, Taipei, Taiwan, 2006.11 (Invited speech).

5) Honda Y, Nakata Y, Ono M]: Climate and Relations between Cause-Specific Mortality Rates and Daily Temperature in Japan. International Society for Environmental Epidemiology, Mexico City, Mexico, 2007.09

6)本田 靖, 小野 雅司, 内山巌雄. わが国における日最高気温と総死亡率の関連に及ぼすインフルエンザの影響について. 第72回日本民族衛生学会総会, 高岡, 2007.11

7) Honda Y: Health impact of climate change in Japan. Symposium for climate change and health in Asia, Seoul, Korea, 2007.11 (Invited speech)

8)本田 靖：日本における気候変動の健康影響. In World Health Day 2008 Symposium: Challenges to Health Security from climate Change. WHO Kobe Centre, 神戸, 2008.04 (招待講演)

9) Honda Y, Ono M, Uchiyama I: Prefecture-specific heat-stress impact on mortality in Japan. International Society for Environmental Epidemiology East Asia Conference, Jeju, Korea, 2008.04

10) Honda Y, Likhvar VN, Wang Y, Sung F: Do Taiwan cities show similar pattern to Japanese Data? 18th International Congress of Biometeorology, Tokyo, Japan, 2008.09

11) Honda Y: Climate Change Impact on Human Mortality in Asia. Asia Pacific health ministerial conference on climate change, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.09 (Invited speech)

12) Honda Y: Health impact of global warming. Symposium on global climate change and health, Taipei, Taiwan, 2008.10 (Invited keynote speech)

13)本田 靖, Likhvar VN, 杉本和俊: 中国3都市における気温と死亡の関連. 第73回日本民族衛生学会総会, 横浜, 2008. 10

14) Honda Y: Climate change and health. The ASEM Seminar on Adaptation to Climate Change, Tokyo, Japan, 2008.10 (Invited speech)

15) Honda Y: Health risks of current and future heat extremes in East Asia. Scientific Congress on Climate Change: Global Risks, Challenges & Decisions, Copenhagen, Denmark, 2009.03

16)本田 靖, Likhvar VN, 杉本和俊: 大気汚染の短期影響評価モデルは気温の影響評価に転用できるか? 第79回日本衛生学会総会, 東京, 2009.03

17) Honda Y: Climate change and human health. International Symposium for 50th Anniversary, School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea, 2009.04(Invited speech)

18) Honda Y: Health impact of Climate change. Shanghai Forum 2009, Shanghai, China, 2009.05(Invited speech)

19) Honda Y, Likhvar V.N., Sugimoto K., Ono M.: "Cold" counts, but "how cold" may not. International Society of Environmental epidemiology, Dublin, Ireland, 2009.08

20)本田 靖, 近藤正英, 杉本和俊, 小野雅司: 気温と死亡の関連の地域による相違は適応なのか? 第74回日本民族衛生学会総会, 京都, 2009.11

21) Honda Y, Sugimoto K, Ueda K, Ono M: Possible problem with unknown factor in lag effect evaluation. 国際疫学会西太平洋地域学術会議兼第20回日本疫学会学術総会, 越谷, 2010. 01

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

1) Symposium on the impact of climate change（健康影響に関するもの。筑波大学で開催）2009.06

2) Professional meeting on Climate Change and Health in Asia（筑波大学にて開催）2009.06

（５）マスコミ等への公表・報道等

H17年、NHKスペシャル「気候大異変」で、この研究の一部が紹介された。

H19年、近未来の東京における温暖化の影響に関する番組で、解説を行った。

H20年、サステナ2008年第6号の特集、インタビュー記事「地球温暖化問題への取り組み」にて発言した。

（６）その他

なし

S-4 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２.影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

（２）健康面からみた温暖化の危険性水準情報の高度化に関する研究

３） 温暖化と熱中症・熱ストレスに関する研究

独立行政法人国立環境研究所

環境健康研究領域 総合影響評価研究室 小野雅司 （平成17年～20年度）

環境健康研究領域 環境疫学研究室 上田佳代 （平成21年度）

平成17～21年度合計予算額 42,318千円

（うち、平成21年度予算額 7,704千円）

※予算額には、間接経費を含む。

［要旨］本サブサブテーマでは、熱中症発生の閾値ならびにリスク要因の検討を行うとともに、温度・影響関数を策定し、熱中症患者の将来予測を行った。

熱中症患者発生率は男女、年齢階級により大きく異なることから、性別、年齢階級（0～19歳、20～64歳、65歳以上）別に温度・影響関数を策定した。また、熱中症患者発生率には相当の地域差、さらには年次による相違が見られたが、将来推計にあたっては全地域・全年次一律の温度・影響関数の構築が適当と判断した。ただし、他地域と著しく異なる熱中症発生パタンを示した地域・年齢（沖縄県20-64歳男性、札幌市65歳以上）については、独自の温度・影響関数を定めることとした。得られた温度・影響関数を用いて、熱中症患者の将来予測(MIROC)を行った。

2031-2050年、2081-2100年の熱中症患者発生率は、現状と変わらず九州、関西、愛知県、首都圏が高く、北海道、東北、中部・東海（愛知県を除く）が低い傾向が見られた。現状との比較（対1981-2000年比）では、増加率は北海道、東北、関東で大きく、四国、九州・沖縄で小さい結果となった。具体的な増加率について見ると、北海道、沖縄県を除いて、2031-2050年は1981-2000年に比べて2.2～2.8倍、2081-2100年は5.1～6.6倍で、地域差は比較的小さかった。北海道、沖縄県については独自の温度・影響関数を用いたこともあり、増加率が他地域と大きく異なった。

熱中症患者の将来予測にあたって、今後考慮すべき要因を以下にまとめる。

・本報告では温度指標として日最高気温を用いたが、湿度や輻射熱を考慮したWBGT温度の有効性が示された。今後WBGTに基づく熱中症患者予測が必要である。

・温度・影響関数の地域による相違、特に冷房装置の普及度の影響についての検討が必要である。

・熱中症患者発生だけでなく、熱中症による死亡についての検討が必要である。

・高齢者の発生率が高いことから、人口の高齢化を考慮した熱中症の将来予測が必要である。

［キーワード］熱中症、救急搬送、日最高気温、温度・影響関数、将来予測

１．はじめに

気温の上昇によって増加が予想される死亡や熱中症、睡眠障害などの直接的なインパクト、および、光化学スモッグ発生増加によるリスクの増大や、日本脳炎あるいは国内では現在流行していないものの潜在的なリスクが懸念されるデング熱、西ナイルウィルスなどの媒介性感染症による間接的なインパクトについて、リスクが増大するレベルすなわち閾値について検討を行うことが必要である。本サブサブテーマでは熱中症に焦点をあて、閾値ならびに温度・影響関数を明らかにするために、温度指標としてどのようなものが適当か、影響関数をどのように定義するのか、といった基礎的検討がまず必要となる。

これまで検討されてきた、日最高気温と熱中症患者発生数（救急搬送患者数）の関係を明らかにすることに加えて、その他の温度指標（日最高WBGT温度）の検討、救急搬送患者以外の熱中症患者把握、大都市（政令市）と中小都市における熱中症発生状況の比較、性別・年齢階級別の比較等の検討が必要となる。

２．研究目的

熱中症を対象に、患者発生状況と日最高気温等の温熱指標との関連性を明らかにするとともに、温度・影響関数を確立する。これらの温度・影響関数に基づき、温暖化シナリオにそった将来のリスクを評価する。

３．研究方法

（１）政令市消防局の協力で進めている救急車による搬送例を基礎情報として、熱中症患者発生状況と温度指標（日最高気温、日最高WBGT温度、等）の関係、地域や属性（性・年齢）による差異について検討し、温度・影響関数を確立する。

（２）救急搬送以外のケースを把握するため、病院を対象に熱中症患者実態調査を実施する。

（３）総務省消防庁が実施した全国（都道府県）における救急搬送熱中症患者統計をもとに、大都市（政令市）と中小都市の比較を行う。

（４）得られた温度･影響関数を用いて、2050年、2100年の熱中症患者予測を行う。

４．結果・考察

（１）温度・影響関数の構築

１）政令市における熱中症患者発生数

2007年度の東京都及び17政令市の救急搬送患者数（5月1日～9月30日、ただし札幌市、仙台市は7月1日～8月31日）を表１に示した。2007年度は、多くの都市で過去最高を記録し、合計で5,102名が熱中症で救急搬送された。性別では、男性が全体の2/3を占めており、年齢階級別にみると、男性では19～39歳、40～64歳、65歳以上が25.2%、28.0%、30.2%であったのに対し女性では65歳以上が53.9%と過半数を占めていた。0～6歳の幼児は、男児で0.8%、女児で1.6%と少ないが、その一因として救急車を利用せずに医療機関を受診する患者が多いのではないかとが考えられる。救急車を利用せずに、医療機関（病院＋診療所）を受診する患者が全熱中症患者のどの程度を占めるのか、確認が必要である。

表１　地区別・性別患者数

	男性	女性	総計
札幌市	60	35	95
仙台市	69	46	115
さいたま市	247	103	350
千葉市	103	61	164
東京都特別区	592	287	879
東京都下市町村	269	120	389
横浜市	309	89	398
川崎市	128	38	166
新潟市	73	46	119
静岡市	95	63	158
浜松市	77	38	115
名古屋市	162	69	231
京都市	250	157	407
大阪市	230	109	339
堺市・高石市	134	39	173
神戸市	183	79	262
広島市	182	85	267
北九州市	160	45	205
福岡市	207	63	270
総　数	3,530	1,572	5,102

表2に、2000年から2009年までの都市別（東京都及び17政令市、沖縄県、草津市）の救急搬送患者数を示した。埼玉県熊谷市、岐阜県多治見市で40.9℃の国内最高気温を記録した2007年度が最も多く（東京都及び政令市計5,102名）、次いで2008年（4,457名）であった。2009年は2,468名で2007年の半数以下となった。なお、沖縄県に関しては、県下23主要病院を受診した患者数を示した。

表2　都市別・年次別熱中症患者数（救急搬送数：人）

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009年
札幌市						29	68	95	39	19
仙台市			66	18	54	54	37	115	67	50
さいたま市						176	164	350	219	128
千葉市	59	74	104	56	114	115	178	164	167	97
東京23区	269	393	416	207	521	642	363	879	648	523
都下市町村	143	186	227	147	271	373	225	389	324	236
横浜市	92	212	190	131	221	253	226	398	346	170
川崎市	47	88	98	85	157	126	90	166	179	77
新潟市								119	95	49
静岡市								158	81	39
浜松市								115	134	67
名古屋市	85	140	134	100	101	119	163	231	268	110
京都市					199	252	211	407	379	182
大阪市			184	126	201	172	240	339	413	193
堺市・高石市						79	96	173	154	62
神戸市				114	134	140	176	262	253	131

広島市	39	112	79	69	182	145	180	267	213	113
北九州市				104	178	124	200	205	225	93
福岡市						136	280	270	253	129
政令市計	734	1,205	1,498	1,157	2,333	2,935	2,897	5,102	4,457	2,468
沖縄県								588	444	347
草津市					29	11	18	20	33	20
合計（全地区）								5,710	4,934	2,835

２）日最高気温と熱中症患者発生

図1に2007年の関東地方について、日最高気温別の熱中症患者発生率（100万人日あたり、男女・全年齢計）を地域別に示した。地域別に日最高気温別の患者発生率を比較すると、発生率には若干の地域差が見られたが、いずれも類似の熱中症発生パタンを示した。すなわち、日最高気温が28℃あたりから患者が発生し始め、30℃を超えると急激に増加する傾向が見られる。

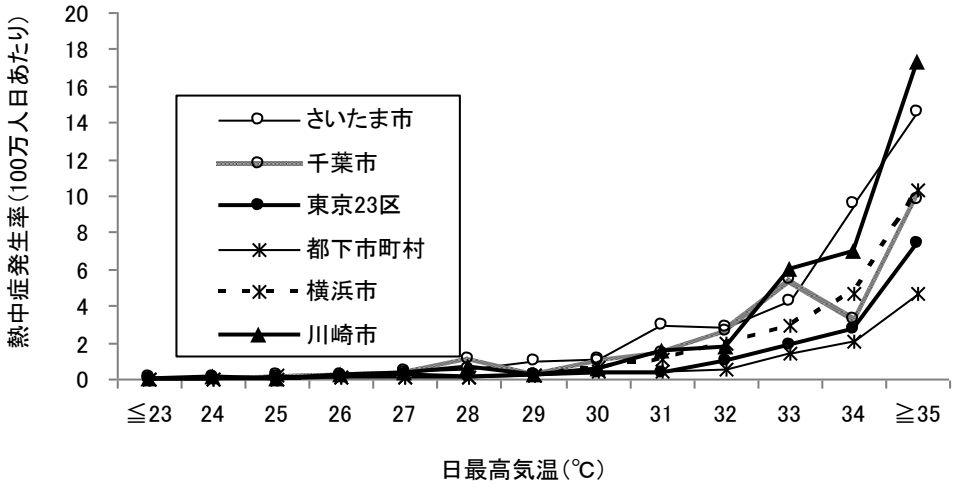


図1　日最高気温別熱中症患者発生率（2007年・関東）

３）温度・影響関数の決定

これらのデータを用いて、熱中症発生に関する温度・影響関数を決定した。温度・影響関数の決定にあたっては、多くの都市のデータが利用可能な2005年～2009年（新潟市、静岡市、浜松市は2007年～2009年）のデータを用いた。

図2-1～図2-3に性別・年齢階級別に日最高気温別の熱中症患者発生率に基づいて決定した温度・影響関数を示した。前述（図1）したように日最高気温別の患者発生率には若干の地域差がみられたが、同一都市における年次間の相違と同程度かそれよりも小さかったため原則全国一律とした。ただし、他都市と大きな違いの見られた沖縄県の20～64歳男性（図2-2）と札幌市の65歳以上男女（図2-3）については別関数とした。

沖縄県の20～64歳男性については、①28℃～35℃の発生率は他地域より高い、②31℃、32℃を超えると発生率がほぼ一定となる、といった特徴が見られた。①については、沖縄県の20～64歳男性患者の大半が屋外作業中に発症していることから、激しい労作により30℃前後でも他地域と比べて高い発生率を示したと考えられる。また、②に関しては、沖縄の気象条件によるものと考

えられる。沖縄地方では、夏季には日最高気温が高くなるにつれ相対湿度が減少することが気象データから示されている。そのため、気温が高くなるにもかかわらず体感温度はそれほど上昇せず、熱中症の発生が抑えられると考えられる。

一方、札幌市で65歳以上の熱中症発生率が高い原因としてはルームエアコン普及率の低さが関係しているのではないかと考えられる。高齢者（65歳以上）の半数近くが自宅（居室）で発症しており、ルームエアコンの適正な使用による居室の温度管理が大きく影響すると考えられる。札幌市（北海道）のルームエアコン普及率は総務省調べによれば20%前後、兜らの報告によれば40%と、他地域に比べて低く、屋外温度が30℃を超える場合、ルームエアコンを使用していない家屋の室内温度は相当に高い状態にあると考えられる。なお、ルームエアコンの普及率が高齢者の熱中症発生に影響している可能性を考えると、ルームエアコン普及率が北海道に次いで低い東北地方についても独自の温度・影響関数を構築することを考慮すべきであるが、今回使用した仙台市のデータでは札幌市ほどの違いは見られなかったため、標準（全国一律）の温度･影響関数を適用することとした。従って、仙台市を始め東北地方については、過少推計の可能性は残されている。

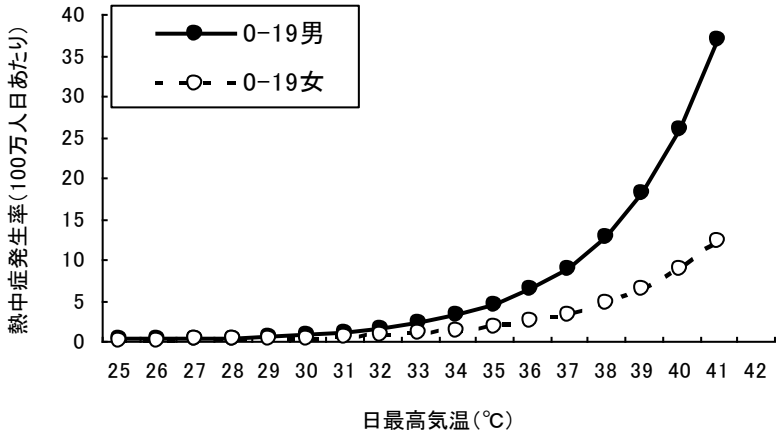


図2-1　日最高気温別熱中症患者発生率（0～9歳）

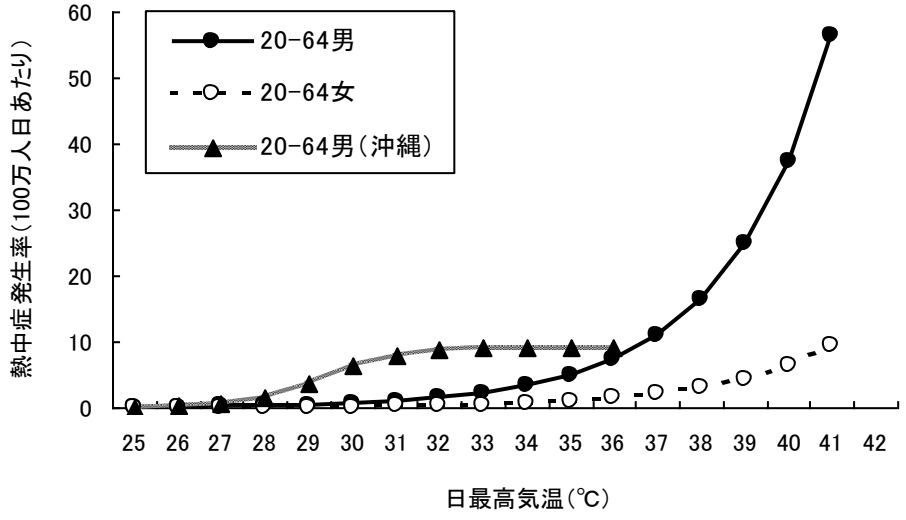


図2-2　日最高気温別熱中症患者発生率（20～64歳）

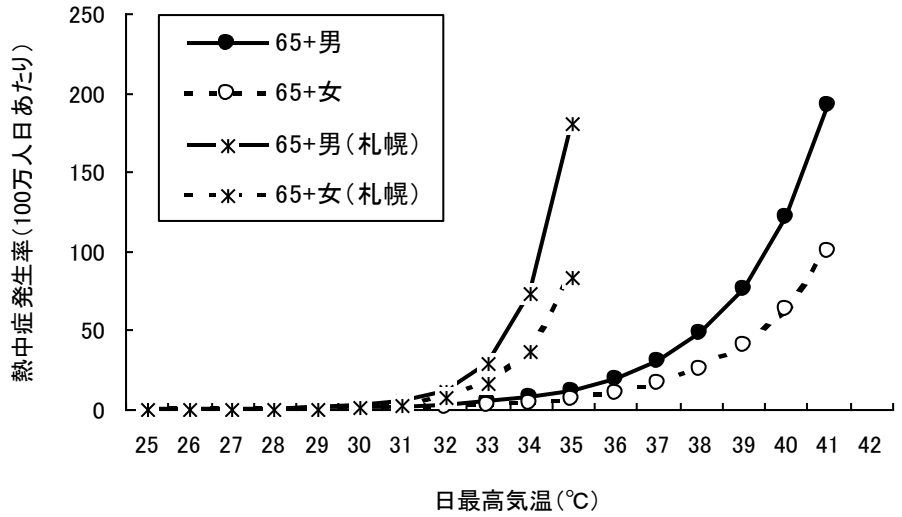


図2-3　日最高気温別熱中症患者発生率（65歳以上）

４）異なる温度指標による温度・熱中症患者発生率の関係

上述のとおり、日最高気温の上昇に伴い熱中症患者が増加することが示された。一方、熱中症等の熱ストレスに関しては、気温だけでなく湿度や輻射熱が影響することが知られている。そこで、これらを取り入れた代表的な温度指標であるWBGT温度について熱中症患者発生率との関係を検討した。

日最高WBGT温度が25℃を超えると熱中症患者の発生が増え始め、日最高WBGT温度の上昇に伴って熱中症患者数の急激な増加が認められた。各温度別の熱中症発生率は、日最高気温を用いた時よりも日最高WBGT温度を用いた時の方がより強い関連性を示した。

ただし、WBGT温度を求めるためには、正式には乾球温度に加えて湿球温度と黒球温度が必要となる（注参照）。また簡易に推計する場合においても、乾球温度に加えて相対湿度と日射量が必須である。現時点で、温暖化将来予測において相対湿度は検討されていないため、WBGT温度を熱中症患者発生の将来予測に用いることは困難と判断し、日最高気温のみを用いて推計した。

注）WBGT温度

WBGT 温度（湿球黒球温度）とは、人体の熱収支に影響の大きい湿度、輻射熱、気温の３つを取り入れた指標で、乾球温度、湿球温度、黒球温度の値を用い、下式により算出する。

屋外：WBGT ＝0.7×湿球温度＋0.2×黒球温度＋0.1×乾球温度

屋内：WBGT ＝0.7×湿球温度＋0.3×黒球温度

（２）熱中症患者の実態把握に関する病院調査

本研究で用いたデータは、沖縄県を除き、救急車により医療機関に搬送された熱中症患者であり、救急車を使わずに医療機関を受診（自力受診、家族による搬送、他）した患者は含まれていない。そこで、救急搬送患者以外の熱中症患者の実態を把握するための調査を2005年に実施した。政令13市内の全病院（精神科病院を除く2,041病院）を対象に質問票調査を行い、736病院より回答を得た。回答施設のうち、2004年度、2005年度に熱中症患者受入のあった259施設を対象に詳細

な二次調査を実施した。全市平均で、一次調査回収率は36.4%、一次調査回答施設における二次調査回収率は48.0%で、十分とはいえないものの傾向を把握するには十分と判断した。

全受診患者に占める救急搬送患者の割合は地域により異なっていた（33.3%～70.8%）。年齢階級別にみると、65歳以上では62.8%が救急車による搬送であるのに対し、0～12歳では救急搬送の割合は27.8%と少なく家族、関係者による搬送が多いことが推察された。これらの結果（年齢階級別の救急搬送者割合）から、救急車を利用しない患者を含む全熱中症患者数は全地区合計で救急搬送患者の2.2倍（1.5倍～3.5倍）と推定された。ちなみに、沖縄県で主要な病院を受診した熱中症患者数は、救急搬送された熱中症患者（消防庁統計）のほぼ2倍（2007年2.0倍、2008年1.9倍）で、病院調査結果を裏付けるものであった。なお、今回の病院調査では診療所（病床数20床未満）は対象に含まれておらず、軽症の患者で発生場所の近くの診療所を受診した患者などは含まれておらず、実際にはこれよりも多くの熱中症患者がいるものと考えられる。

（３）大都市（政令指定都市）と中小都市の比較

2007年、2008年に消防庁が全国都道府県を対象に熱中症患者調査を実施した[1)]。政令市のある都道府県について、政令市と政令市以外の市町村で熱中症患者発生率（政令市とその他市町村では年齢構成に違いがあると考えられるため、年齢調整を行った）の比較を行った。中小市町村の発生率が政令市より高い府県も一部みられたが、それほど大きな違いは見られなかった。そこで、政令市における救急搬送患者データから決定した温度・影響関数をその他の都道府県にも適用することとした。

（４）熱中症患者の将来予測

（１）３）で定義した性別・年齢階級別の温度・影響関数を用い、MIROCによる将来（2031～2050年、2081～2100年）気候予測のもとで予想される熱中症患者数の推計を行った。推計は都道府県単位で行うこととし、MIROCによる将来（2031～2050年、2081～2100年）気候予測は、3次メッシュデータから都道府県平均を求めたものを用いた。なお、人口に関しては、現状（2005年国勢調査）のままとした。図3-1には、熱中症患者数、図3-2には人口100万人あたり熱中症患者発生率、図3-3には、対1981-2000年比を示した。

2031-2050年、2081-2100年の熱中症患者発生率は、九州、関西、愛知県、首都圏が高く、北海道、東北、中部・東海（愛知県を除く）が低い傾向が見られた。上位1/3、中位1/3、下位1/3で分類してみると、それぞれに位置する都道府県は現在（1981-2000年）とほとんど変わらない。一方、現在との比較（対1981-2000年比）では、現在発生率の高い地域ほど増加率は低く、現在発生率の低い地域ほど増加率が高い結果となった。また増加率は、発生率以上に地域差が明瞭で、北海道、東北、関東で大きく、四国、九州・沖縄で小さい結果となった。具体的な増加率について見ると、北海道、沖縄県を除く地域では、2031-2050年は1981-2000年に比べて2.21～2.78倍、2081-2100年は5.12～6.61倍で、それほど大きな地域差は見られなかった。しかしながら北海道と沖縄県は異なる様相を示した。北海道では、2031-2050年3.62倍、2081-2100年17.10倍（対1980-2000年比）と他地域に比べて増加率が大きく、逆に沖縄県では、2031-2050年1.47倍、2081-2100年2.01倍（対1980-2000年比）と他地域に比べて増加率が小さい結果となった。北海道、沖縄について他地域とは異なる温度・影響関数を使用したこともその一因と考えられる。

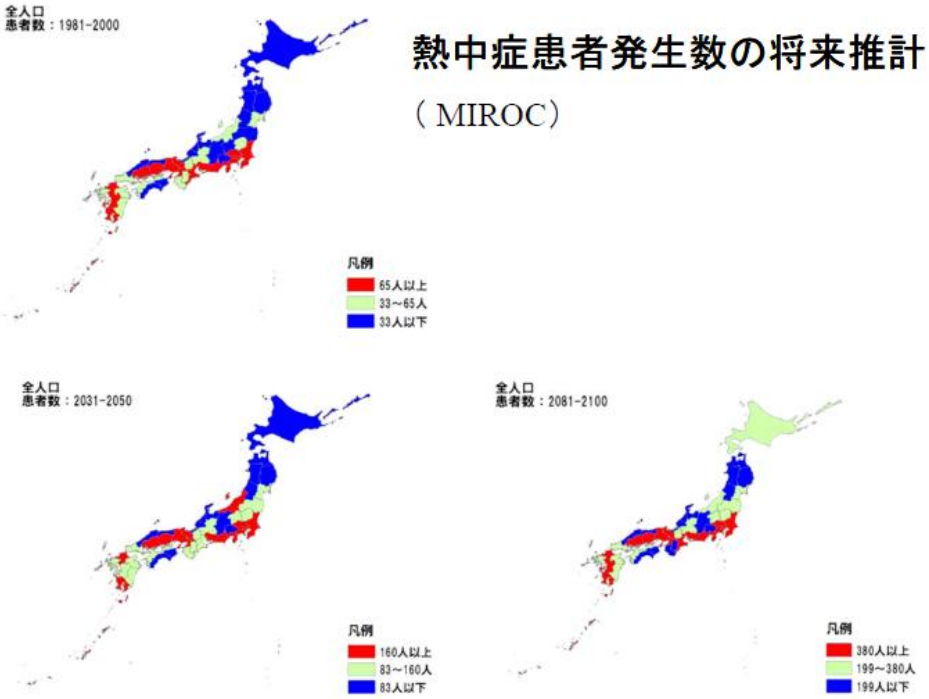


図3-1　熱中症患者の将来予測　熱中症患者数

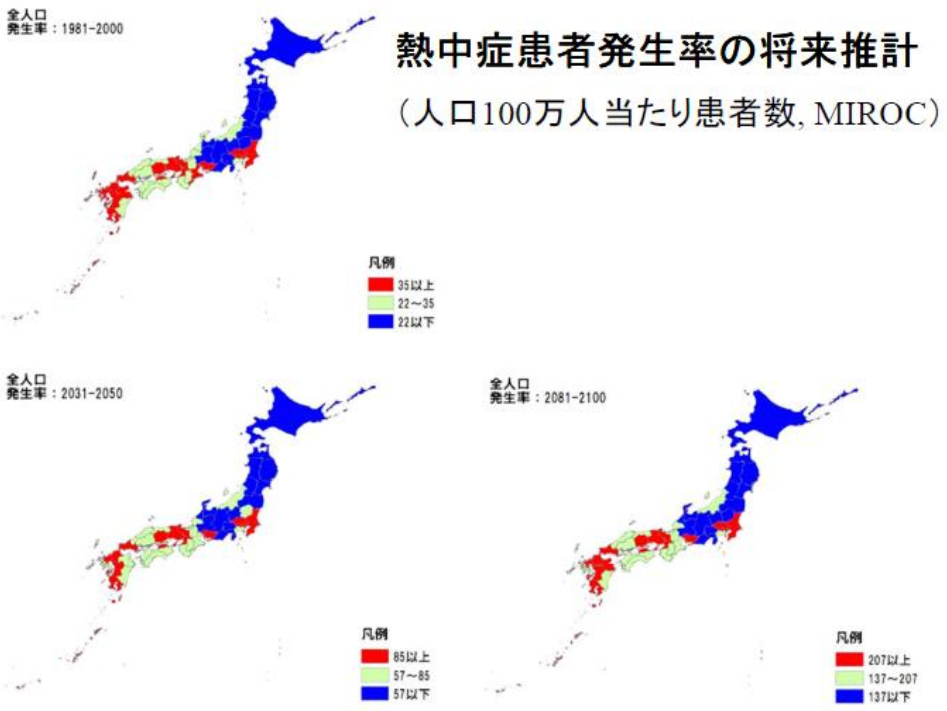


図3-2　熱中症患者の将来予測　熱中症患者発生率（人口100万人あたり）

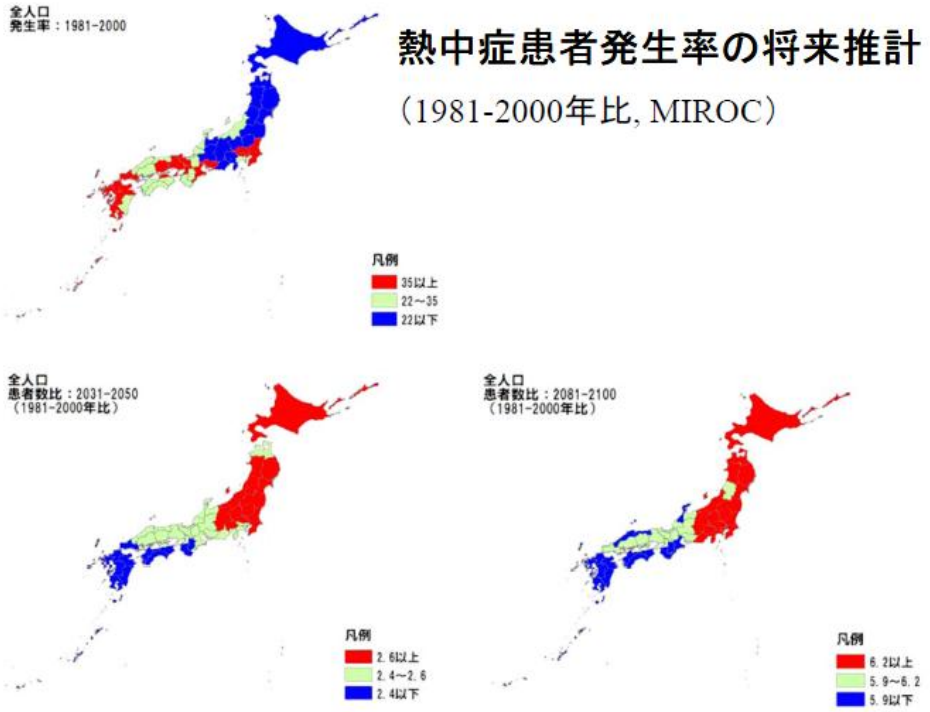


図3-3　熱中症患者の将来予測　1981-2000年比

（５）今後の課題

最後に、今後の課題をについて簡単に触れる。

・熱中症患者の将来予測にあたっては、一部の地域・年齢（北海道65歳以上、沖縄県20-64歳男）以外については全国一律に性別・年齢階級別の温度・影響関数を決定した。政令市及び沖縄県のみのデータを基にしたためであるが、さらなる検討が必要である。

・性別・年齢階級別に温度・影響関数を決定したが、特に、作業中、運動中の熱中症について独自の温度・影響関数の検討が必要である。

・適応策に関して、沖縄県で見られたような高温日の常在化の影響（作業の回避が困難）、北海道や東北地方など冷房設備の普及が遅れている地域への影響、などを明らかにする必要がある。

・日最高気温以外の温度指標（WBGT温度）に基づく温度・影響関数を用いた熱中症患者の将来予測について検討する必要がある。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

政令市の救急搬送熱中症患者の解析により、日最高気温と熱中症患者発生率との間に明瞭な温度・影響関係を見いだした。また、これらの温度・影響関係は地域、年次、年齢階級により異なることを明らかにした。また、将来推計の基礎となる、熱中症患者発生数に関しても、補完的に実施した病院調査により、救急搬送以外の患者を推計することが可能となった。

消防庁が実施した熱中症患者全国調査結果との比較により、大都市（政令市）だけでなく中小市町村の熱中症発生の実態が明らかになり、日本全国を対象とした地球温暖化に伴う将来リスク

推計が可能となった。

（２）地球環境政策への貢献

１）国立環境研究所ホームページ等を通じて、熱中症予防への啓発活動を積極的に行った。

２）環境省：「熱中症保健指導マニュアル」検討会（小野）、ヒートアイランド対策検討会（小野）に参画した。

３）本研究成果である、政令市における毎日の熱中症患者発生数と日最高気温、日最高WBGT温度との関連性に関する結果が「ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討会報告（環境省）」、「熱中症保健指導マニュアル（環境省）」に引用された。

６．引用文献

１）消防庁：熱中症患者統計
http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/2010/201020-3houdou.pdf

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１） 誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 小野雅司: 地球温暖化と熱中症：光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク、地球環境、14 (2)、263-270、2009

<その他誌上発表（査読なし）>

1) 小野雅司: 気候変動がもたらす健康問題－熱中症、月刊保団連、975号、28-31、2008

（２）口頭発表（学会）

1) Tonouchi M, Murayama K and Ono M: WBGT forecasts for preventing heat strokes in Japan, 86th Annual Meeting of American Meteorological Society, Atlanta, USA, 2006.02

2) Honda Y, Ono M, Kabuto M: Do we adapt to a new climate as the globe warms? International Conference on Environmental Epidemiology & Exposure, Paris, 2006.09

3)小野雅司、清水明、津田憲次：連続観測結果に基づくWBGT温度推定、第45回日本生気象学会大会、京都、2006.10

4)小野雅司：地球温暖化による健康影響、ISMシンポジウム『地球環境研究における統計学の貢献』－地球環境変動の不確実性への挑戦－、東京、2007.1

5)小野雅司：2007年夏の猛暑と熱中症、第78回日本衛生学会総会、熊本、2008.03

6)小野雅司：熱中症の発生・死亡と気象条件、国立環境研究所公開シンポジウム、東京・札幌、2008.06

7) ONO. M: Heat disorders in Japan, 2007 - From the results of ambulance transportation records-, 18th International Congress of Biometeorology, Tokyo, 2008.09

8)小野雅司：温暖化による健康影響－熱ストレスによるリスクと熱中症の増加－環境省地球環境研究総合推進費公開シンポジウム、東京、2008.10
9) ONO M: Current situation of the patients from heat disorders in the major cities in Japan, 89th Annual Meeting of American Meteorological Society, Phoenix, Arizona, USA. 2009.01

（３）出願特許
なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）
なし

（５）マスコミ等への公表・報道等
1)本研究成果の一部は、国立環境研究所ホームページで「熱中症患者速報」として一般へ広く公開されており、熱中症の多発する６月～８月には毎月数十万件のアクセスがあり、多くの市民に利用されている。特に、2007年8月は200万件近いアクセスがあった。
2)テレビ、新聞等多数（毎年数十件）の取材に協力した。

（６）その他
なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

（２）健康面からみた温暖化の危険性水準情報の高度化に関する研究

４）　温暖化に伴う大気汚染のリスクに関する研究

独立行政法人国立環境研究所

環境健康研究領域　　総合影響評価研究室　　田村憲治

〈研究協力機関〉　統計数理研究所リスク解析戦略研究センター

環境リスク研究グループ　　松本幸雄

平成17～21年度合計予算額　　22,985千円

（うち、平成21年度予算額　　4,444千円）

※予算額には、間接経費を含む。

［要旨］大都市における過去の気象パタンと光化学オキシダント濃度（0x）との関係を、将来の気象条件予測結果に適用し、0xが高濃度となる条件の日数（発生頻度）を推定することによって、将来の健康リスク評価を行った。

2031-50年及び2081-2100年における関東、東海、関西、瀬戸内、北九州地方における0x濃度分布推計を行った。次に、0xの主要な成分であるオゾン（0_3）濃度と日死亡の増加に関する疫学文献の検討結果から求めた増加死亡リスクを、２つの社会シナリオに基づいて独自に推計した2100年までの将来人口及び2000年時点の人口に当てはめ、それぞれの地域における増加死亡リスクを算定した。関東、関西、東海地方では、2031-50年及び2081-2100年の夏季には0x濃度が増加する傾向が強く、関東地方では最高10ppb程度、関西地方、東海地方では6ppb程度まで増加するという推定結果であったが、瀬戸内、北九州地方は将来の温暖化による気象変化があっても0x濃度増加はみられないという推定結果となった。0_3濃度増加による増加死亡リスクを計算した。関東、関西、東海地方では、2031～2050年では一部に死亡が増加しない県があったが、2081～2100年では９都府県すべてで死亡数は増加した。しかし、瀬戸内、北九州では0xの上昇がほとんど見られないことから、将来の２期間とも、死亡数がわずかに増加あるいは減少するという推定結果になった。また、東北地方などでは気象官署や過去の0x濃度測定局データが不足することから、本研究に用いた0x濃度推定手法が適用できないが、0x濃度が低い地域であるため将来的にも影響が小さいと推定され、死亡リスクの増加についてもリスクに閾値が存在すれば、リスクは小さくなると推定された。

［キーワード］光化学オキシダント、オゾン、健康影響、リスク、将来予測

１．はじめに

地球温暖化の進行に伴う気象条件の変化により、大気汚染物質の発生量は同じであっても地域

的な濃度が影響を受け、健康リスクを増加させることが懸念される。本課題では、大気汚染物質の中でも、特に温暖化に伴う気象変化で汚染濃度が増加し高濃度汚染の頻度が増加すると予測されるオゾン（O_3）濃度を対象として、光化学オキシダント（Ox）の将来における変化とこれによる健康リスクについて、日本国内の状況を推定するものである。

２．研究目的

日本国内の大都市を中心とした地域を対象として、過去の気象条件とOx濃度との関係を分類し、将来の気象条件予測に基づいて、Oxが高濃度となる条件の日数（発生頻度）を推定することによって気象変動によるオゾン濃度の増加分を推定し、それに伴う健康リスク評価を行うことを目的とする。

３．研究方法

既存のOx濃度測定データが得られる国内の人口集中地域（関東地域、東海地域、関西地域など）を対象に、過去の光化学スモッグ発生モデル（気温、湿度、風向、風速）を整理し、気象条件ごとにオゾン濃度を分類した。すなわち、Oxの前駆物質の濃度については2000年までの状況で固定しており、2001年以降の大陸からの移流による増加傾向については考慮していない。

将来の気象予測については、気象庁の作成した地域気候モデルRCM20を用いて2031～50年および2081年～2100年の夏季（6月～8月）の気象パタンの出現状況を予想し、その気象条件ごとに発生するOx濃度（各日の1時間平均濃度の最高値）を当てはめ、現況の再現性を確認した上で将来のOx濃度分布を推定した。

健康リスク推計には、既存の人口推計法に準拠し、「脱温暖化2050研究プロジェクト」（国立環境研究所）で設定した2つの社会シナリオに基づいて推計した2100年までの地域別将来人口推計値を用いたが、2000年時点の人口を当てはめた推計も行った。

光化学汚染による健康リスクとしては呼吸器系疾患への影響をはじめ様々な影響があるが、オゾン濃度当たりのリスクについて多くの疫学研究が蓄積されてきた死亡リスクの増加を対象とした。オゾン濃度の増加による死亡リスクを将来人口に掛け合わせることにより、温暖化に伴うOx濃度増加による増加死亡リスクを推定した。

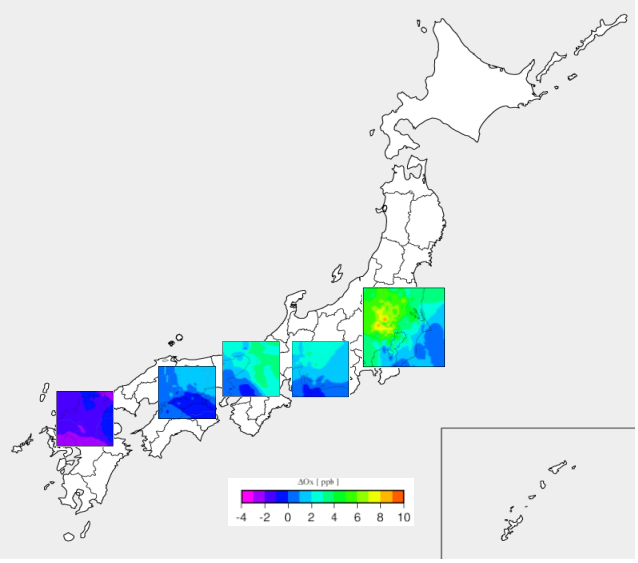


図1　詳細な推定の対象地域
（図は2081年～2100年の各地域における、現況と将来のOx濃度差(Δ Ox)）

４．結果・考察

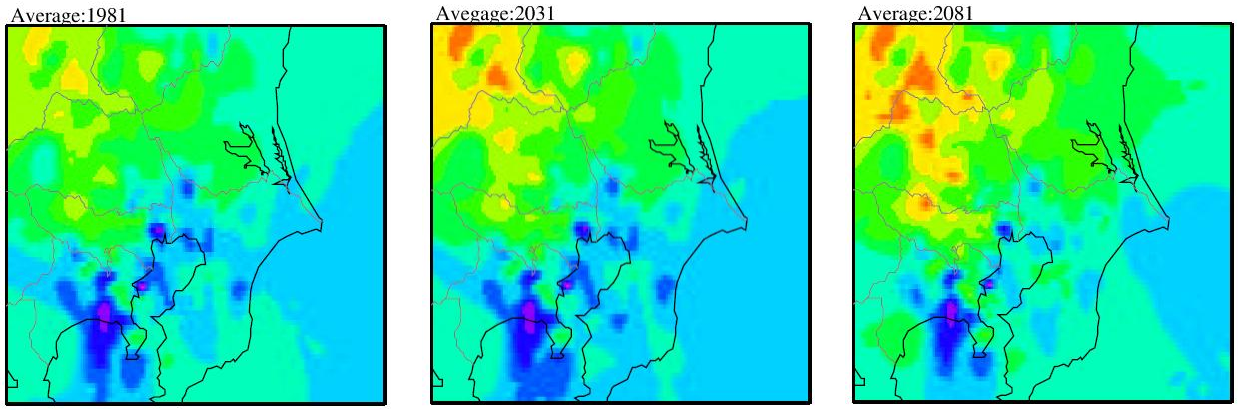
（１）オゾン濃度の将来予測

本研究の最初の4年間で、図1に示す関東地域（茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県）、東海地域（愛知県）、関西地域（大阪府）、瀬戸内地域（岡山県、香川県）、北九州地域（福岡県）について、RCM20を用いて2031年～2050年及び2081年～

2100年の夏季（6月～8月）の気象パタン分類を行い、過去のオゾン濃度観測値との整合性を確認の上、現況（1981年～2000年）、2031年～2050年及び2081年～2100年のオゾン濃度分布図を作成した。　以下に関東、関西地域を例にして推定結果を紹介する。図2は、関東、関西地域における1981～2000年の平均（現況）、2031～2050年、2081～2100年のオゾン濃度分布の推定結果である。図3は、現況のオゾン濃度と2031年～2050年および2081年～2100年の平均オゾン濃度（時間最高値）推定値との差（増加分）示した。

現況で高濃度の発生している埼玉県、群馬県の一部では、将来においてもその地域が高濃度になる傾向は変わらなかった。増加の大きいところは2031～2050年では栃木県であったが、2081年～2100年では埼玉県と東京西部の一部で最も高濃度の＋10ppbとなった。関西地域では大阪府内の南部で比較的高濃度の地域があり、将来も高濃度が予測されたが、濃度が増加する地域は広範囲で、そのレベルは最高でも6ppb程度であった。また、関西地域では、2081年～2100年の方が2031～2050年より増加傾向は小さい（2031～2050年平均より2081～2100年平均の方がオゾン濃度は低下する）という結果になった。

関東地域（左から現況（1981年～2000年平均）、2031年～2050年平均、2081年～2100年）



関西地域（左から現況（1981年～2000年平均）、2031年～2050年平均、2081年～2100年）

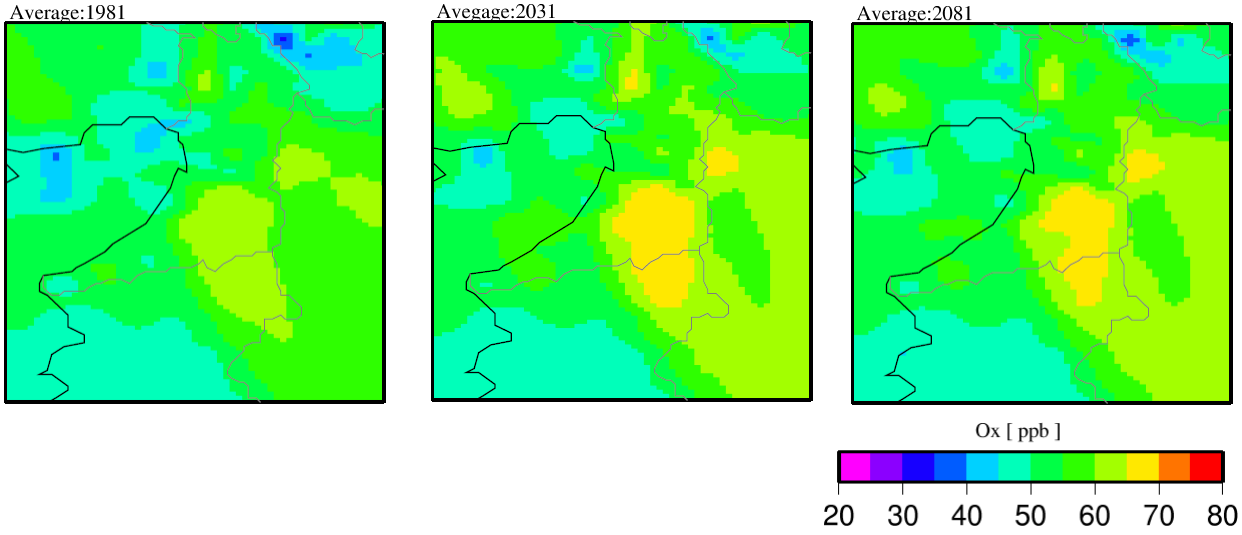


図2　オゾン濃度分布推定結果(夏季における時間最高濃度)

関東地方
左：1981～2000年と
　2031～2050年との差
右：1981～2000年と
　2081年～2100年との差

関西地方
左：1981～2000年と
　2031～50年との差
右：1981～2000年と
　2081年～2100年との差

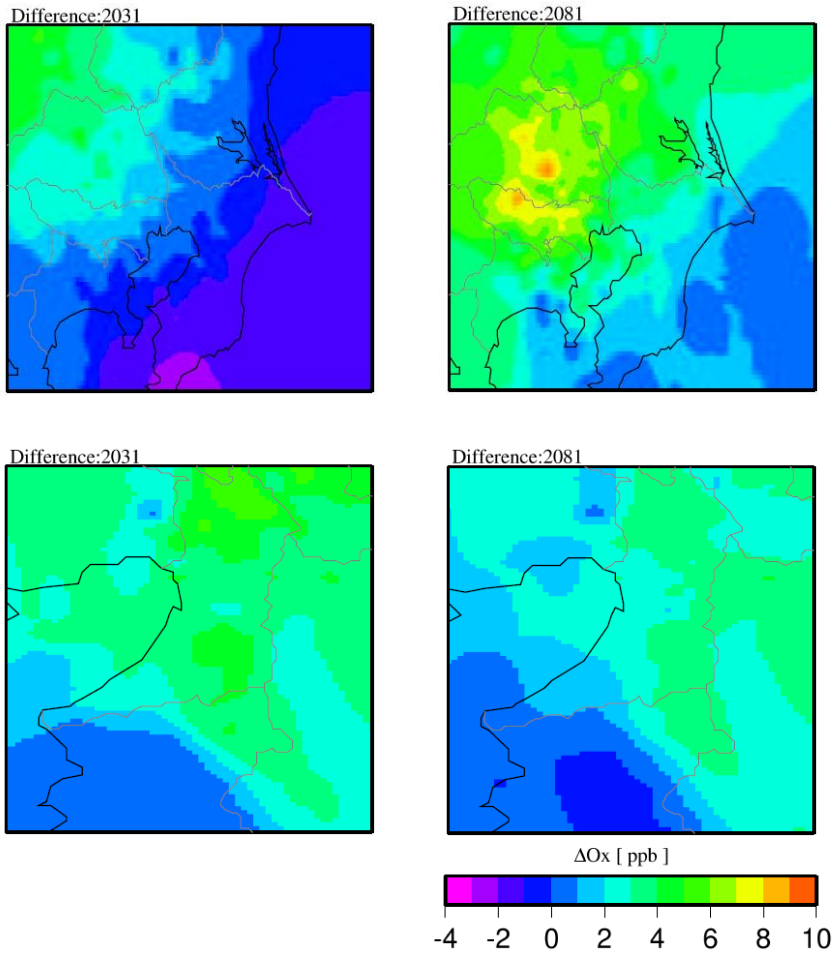


図3　現況（1981～2000年）と将来のオゾン濃度との差

（２）将来人口の推定

2050年までの将来人口は、「脱温暖化2050研究プロジェクト-国立環境研究所」で算定された人口データを利用した。この人口データは2つのシナリオに基づいて推計されており、将来人口推計の際の重要なファクターである出生率については、シナリオAでは国立社会保障・人口問題研究所による推計の低位ケース程度、シナリオBでは中位ケース程度を想定している。ここで算定された将来人口は、2000年を基準年として、5年ごとに2050年までの県別人口が算定されているため、2031年～2050年の人口は、2035年、2040年、2045年、2050年の人口の平均とした。

将来人口のうち、2081年～2100年については、2つのシナリオで設定された出生率、移動率といったパラメータは2050年以降変化がないものとして、同じ手法で2050年以降5年ごとに推計をおこない、2085年、2090年、2095年、2100年の人口の平均とした。

また、算定された人口は都道府県単位であるため、都道府県内の人口分布は現況と変化しないものと仮定して、3次メッシュ（1km×1km）毎に按分した。

例として、シナリオAに基づく東京都の将来人口推定値を図４に示す。現在1200万人を超える東京都の人口は、2031～2050年の平均では1090万人、2081～2100年では678万人と推定された。また、65歳以上の高齢者人口は現在の190万人（16%）からそれぞれ353万人（32%）、237万人（35%）と大きく増加していた。こうした検討を対象とした各県について行い、人口の分布図を作成した。

図5、図6に例として関東地域における現況の人口分布と将来人口推定結果を示す。

なお、他のサブ課題との整合性のため、人口を2000年次転移固定した場合のリスク推定結果も求めることとした。

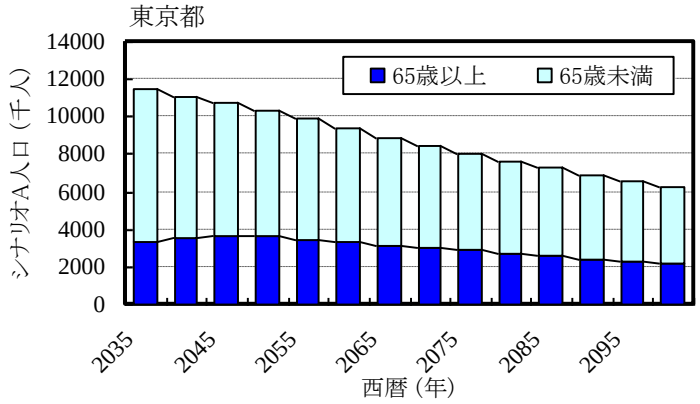


図4　シナリオAに基づく東京都の将来人口予測

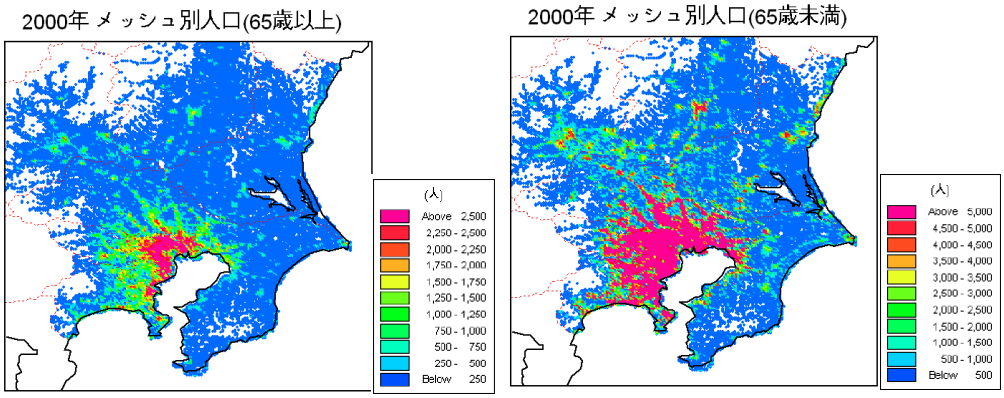


図5　関東地域の人口分布（国勢調査による３次メッシュ）

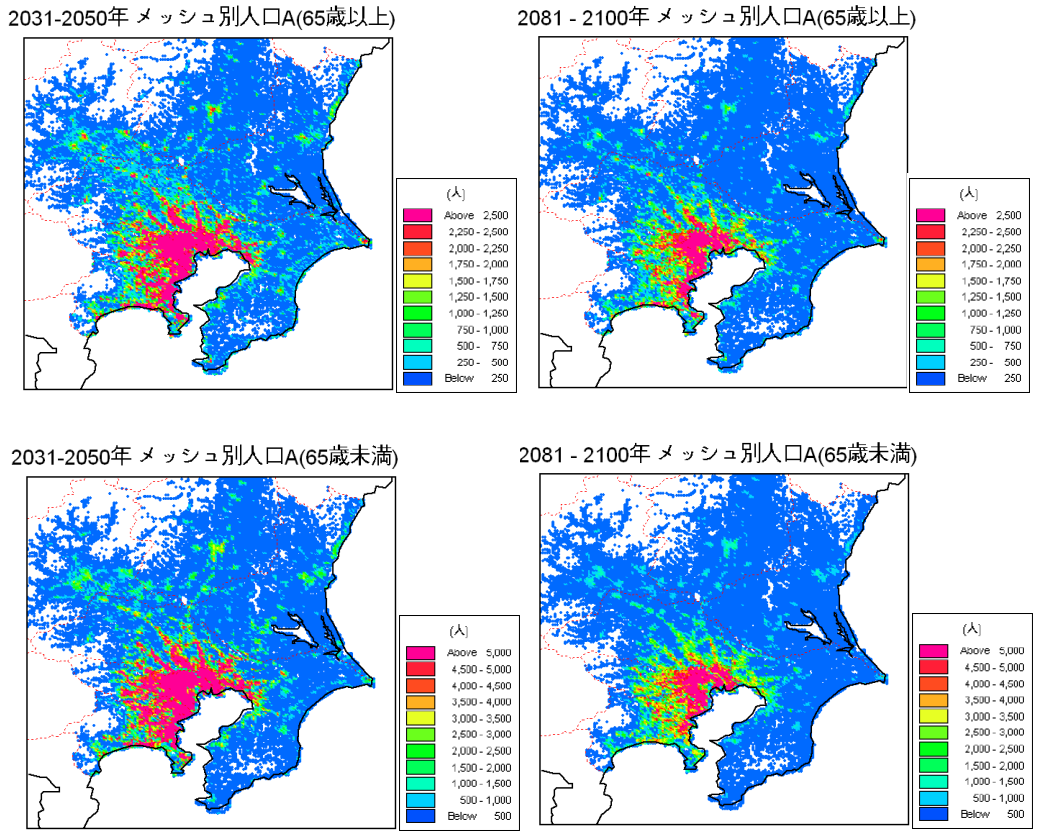


図6　シナリオAに基づく関東地域の将来推定人口マップ

（３）死亡リスクの推定

将来のオゾン濃度変化(Δ0x)に伴う死亡率の増加割合(ΔRR)は、次式で表現できる。

$$\Delta RR=\exp(\beta\times\Delta 0x)-1$$

このΔRRを算定している既存研究は、国内にはないが欧米には多数存在し、それらの結果を統合して評価している文献をもとにΔRRの値を整理した（表1）。

Bellらによると、通年では、日平均オゾン10ppbあたり全年齢のRR = 1.0087 に対して65歳以上ではRR = 1.0145　となることが報告されている。そこで、夏季の高齢者の相対リスクRR(65歳以上)を以下の通り推定した。通年のRRについては　65歳以上／全年齢＝ 1.0057　であるので、夏季についてもこの比(=f)を適用して、

RR（65歳以上）= RR(全年齢夏季)×f　=1.0077×1.0057 = 1.0134

として、死亡リスクを計算した。図７に２地域における将来のオゾン濃度増加による死亡リスクの増加割合の分布図を示す。

表１ 夏季を対象としたオゾンの相対リスクの整理(全年齢)

β （1時間最高濃度に換算）	1時間最高値10ppb当たりのΔRR（換算値）	出典
8.60×10^{-4} ※1	＋0.86 ％	Ito *et al.* [1]
5.96×10^{-4} ※2	＋0.60 ％	Bell *et al.* [2]
8.40×10^{-4}	＋0.84 ％	Levy *et al.* [3]

※1　日平均値：1時間最高値 ＝ 1：2 として換算

※2　日平均値：1時間最高値 ＝ 1：2.5　として換算

関東地方
左：現況に対する2031～2050年のRRの増加
右：現況に対する2081～2100年のRRの増加

関西地方
左：現況に対する2031～2050年のRRの増加
右：現況に対する2081～2100年のRRの増加

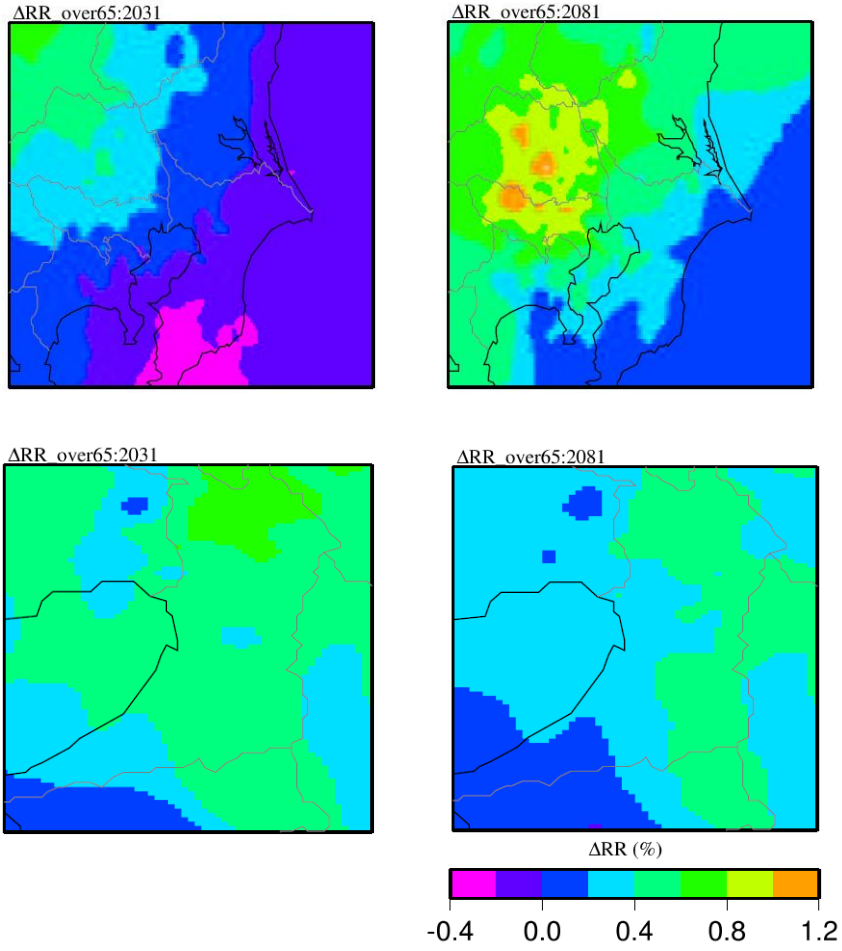


図7　オゾン濃度増加による65歳以上の死亡率の増加割合（ΔRR）の分布

図８に、例としてシナリオAに基づいた人口推定値を用いた関東地域における65歳以上の将来の増加死亡マップを示す。このようなマップを３地域について65歳未満、65歳以上に分け、シナリオAおよびBについてそれぞれ作成した。

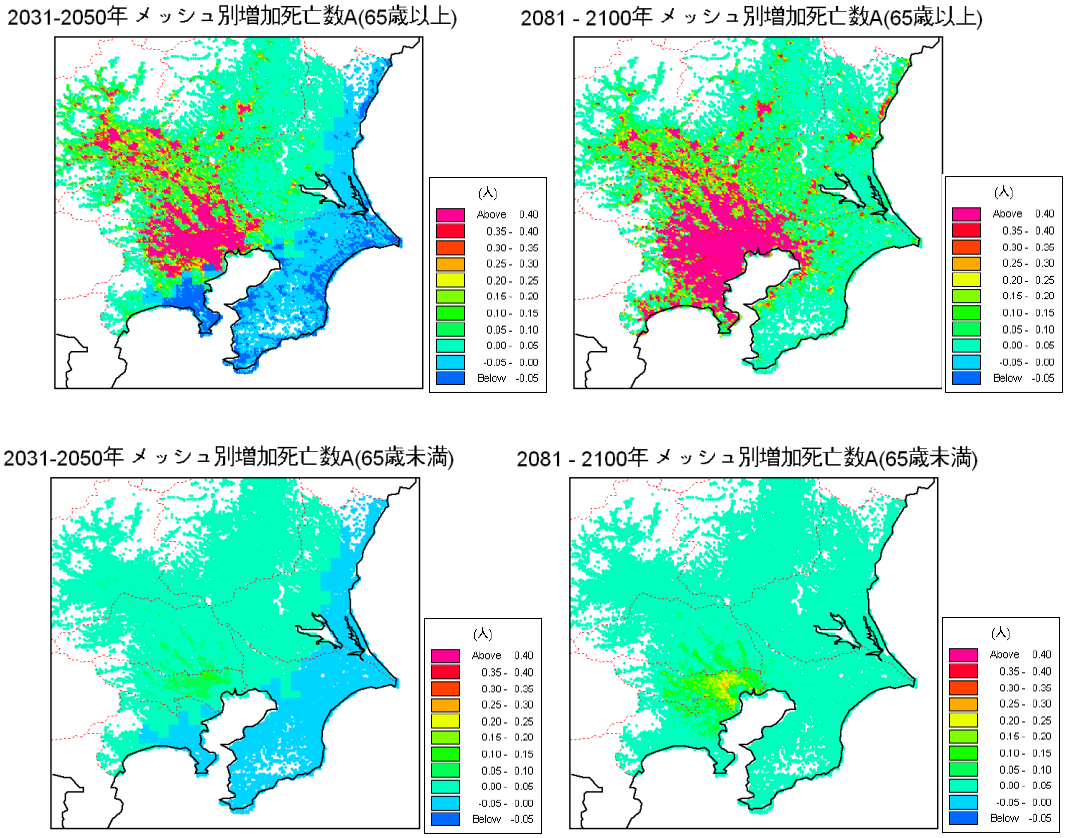


図8　シナリオAに基づく関東地域におけるメッシュ別増加死亡数

表2、表3に、これまで推計した全ての都府県について、2つのシナリオに基づく県別の将来人口と推定死亡数およびオゾン濃度変化による20年間の夏季（6月～8月）における累計増加死亡数を示す。シナリオの違いにより県別の将来人口推定値に違いがある（シナリオAの方が都市部に人口が集中する）ため、オゾン濃度変化による増加死亡数にもこれに対応した差が生じている。

2031～2050年の千葉県では100人以上の減少、神奈川県ではほとんど変化がないという推定結果となった。2081～2100年では、いずれのシナリオにおいても対象としたほとんどの都府県でも死亡数は増加したが、福岡県で減少し、香川県でごくわずかに減少するという結果になった。また、全増加死亡に占める65歳以上の割合は、いずれの都道府県、シナリオにおいても95%以上となっていた。

次に、人口を2000年の時点で固定した場合の推計値を表4に示す。日本の総人口は2007年末の12776万人をピークにして、2008年から減少を初め、2050年では9500万人前後、2100年では約4800万人程度になると推定されている。したがって、リスク人口を推計する際に用いる人口が現状より大幅に少なくなり、リスクの過小評価に繋がる可能性が懸念された。しかし、人口を2000年に固定した場合のリスク人口数には大きな開きがなかった。これは、死亡リスクが高い65歳以上の人口は今後しばらく増加を続け、2050年時点では2000年時点より多くなり、2100年ではわずかに2000年を下回る程度であるためである。

表２ 都府県別の将来人口と増加死亡数(人口シナリオA)

都道府県別増加死亡数(人口シナリオA:65歳未満) 単位:人

シナリオA・65歳未満	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	2,487,487	1,660,974	1,650,131	6,041,263	5,073,633	10,111,138	7,285,924	6,023,471	7,486,116	1,556,661	808,005	4129063
2031-2050年人口	1,389,000	996,500	960,000	3,926,500	3,190,750	7,371,750	5,145,250	4,336,000	4,982,250	944,981	448,059	2,907,750
2081-2100年人口	588,500	453,750	433,250	2,033,000	1,591,000	4,405,750	3,007,750	2,502,000	2,800,000	456,812	188,874	1,659,500
2031-2050年非事故推定死亡数*	9,738	7,179	6,635	26,840	21,717	53,081	33,720	28,348	38,306	6,328	3,137	20,173
2081-2100年非事故推定死亡数*	4,126	3,269	2,994	13,897	10,829	31,724	19,712	16,357	21,528	3,059	1,322	11,513
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	**3**	**9**	**17**	**39**	**-1**	**47**	**2**	**39**	**97**	**8**	**1**	**0**
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	**11**	**9**	**10**	**55**	**21**	**121**	**47**	**20**	**41**	**2**	**0**	**-11**

都道府県別増加死亡数(人口シナリオA:65歳以上) 単位:人

シナリオA・65歳以上	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	495,795	344,749	366,447	892,088	836,227	1,905,657	1,167,557	1,019,999	1,317,333	393,736	214,224	869946
2031-2050年人口	803,000	548,750	550,750	2,175,750	1,891,250	3,535,000	2,594,750	2,196,250	2,646,750	508,043	261,544	1,450,500
2081-2100年人口	403,250	294,500	288,500	1,325,750	1,095,500	2,373,250	1,710,500	1,515,750	1,754,750	288943	129572	989,500
2031-2050年非事故推定死亡数*	124,751	83,993	83,545	310,777	270,671	517,411	359,136	322,034	395,898	77,418	40,782	218,134
2081-2100年非事故推定死亡数*	62,647	45,077	43,764	189,366	156,785	347,368	236,748	222,253	262,474	44,030	20,204	148,806
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	**74**	**205**	**450**	**955**	**-111**	**938**	**-3**	**883**	**2,018**	**206**	**26**	**-28**
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	**333**	**258**	**300**	**1,556**	**565**	**2,711**	**1,094**	**546**	**1,023**	**53**	**-7**	**-299**

*Ox濃度に変化がないものと仮定した場合(20年間の夏季累計)

**20年間の夏季(6-8月)の累計

表３ 都府県別の将来人口と増加死亡数(人口シナリオB)

都道府県別増加死亡数(人口シナリオB:65歳未満) 単位:人

シナリオB・65歳未満	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	2,487,487	1,660,974	1,650,131	6,041,263	5,073,633	10,111,138	7,285,924	6,023,471	7,486,116	1,556,661	808,005	4129063
2031-2050年人口	1,639,000	1,118,000	1,109,750	4,017,250	3,216,250	6,402,500	5,003,500	4,410,500	4,785,250	1,113,179	534,663	2,947,500
2081-2100年人口	930,250	636,750	646,250	2,248,750	1,697,000	3,219,000	2,916,750	2,752,000	2,696,000	717,538	319,602	1,795,750
2031-2050年非事故推定死亡数*	11,491	8,055	7,670	27,461	21,891	46,102	32,791	28,835	36,792	7,454	3,743	20,449
2081-2100年非事故推定死亡数*	6,522	4,587	4,466	15,372	11,550	23,179	19,115	17,992	20,728	4,805	2,238	12,458
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	**3**	**10**	**20**	**40**	**-1**	**41**	**2**	**40**	**93**	**10**	**1**	**0**
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	**17**	**13**	**15**	**61**	**22**	**88**	**45**	**22**	**40**	**3**	**0**	**-12**

都道府県別増加死亡数(人口シナリオB:65歳以上) 単位:人

シナリオB・65歳以上	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	495,795	344,749	366,447	892,088	836,227	1,905,657	1,167,557	1,019,999	1,317,333	393,736	214,224	869946
2031-2050年人口	886,750	576,250	593,000	2,065,750	1,770,500	2,797,500	2,326,000	2,067,500	2,342,750	556,652	291,246	1,357,750
2081-2100年人口	546,500	354,750	368,250	1,246,000	989,750	1,431,750	1,392,500	1,403,500	1,415,500	356,883	165,458	903,500
2031-2050年非事故推定死亡数*	137,762	88,202	89,954	295,065	253,390	409,464	321,939	303,156	350,426	84,825	45,414	204,186
2081-2100年非事故推定死亡数*	84,902	54,299	55,861	177,974	141,651	209,562	192,734	205,794	211,729	54,383	25,800	135,873
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	**81**	**215**	**484**	**907**	**-104**	**742**	**-3**	**831**	**1,786**	**225**	**28**	**-26**
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	**451**	**311**	**383**	**1,462**	**511**	**1,635**	**890**	**505**	**825**	**66**	**-9**	**-273**

*Ox濃度に変化がないものと仮定した場合(20年間の夏季累計)

**20年間の夏季(6-8月)の累計

表４　都府県別の将来人口と増加死亡数(人口は 2000 年で固定)

都道府県別増加死亡数(人口固定:65歳未満)　　単位:人

シナリオN・65歳未満	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	2,487,487	1,660,974	1,650,131	6,041,263	5,073,633	10,111,138	7,285,924	1,019,999	1,317,333	393,736	214,224	869,946
2031-2050年非事故推定死亡数	17,456	11,960	11,452	41,337	34,629	73,061	47,963	150,109	197,065	60,008	33,424	131,116
2081-2100年非事故推定死亡数	17,456	11,960	11,452	41,337	34,629	73,061	47,963	150,109	197,065	60,008	33,424	131,116
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数	**5**	**14**	**30**	**60**	**-2**	**65**	**2**	**411**	**1,004**	**164**	**27**	**-17**
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数	**45**	**34**	**39**	**165**	**66**	**278**	**114**	**368**	**768**	**70**	**-9**	**-264**

都道府県別増加死亡数(人口固定:65歳以上)　　単位:人

シナリオN・65歳以上	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
2000年人口	495,795	344,749	366,447	892,088	836,227	1,905,657	1,167,557	6,023,471	7,486,116	1,556,661	808,005	4,129,063
2031-2050年非事故推定死亡数	77,036	52,758	55,808	127,240	120,003	280,672	162,142	39,729	57,569	10,427	5,661	28,748
2081-2100年非事故推定死亡数	77,036	52,758	55,808	127,240	120,003	280,672	162,142	39,729	57,569	10,427	5,661	28,748
2031-2050年Ox変化に伴う死亡数	**45**	**129**	**301**	**391**	**-49**	**509**	**-1**	**54**	**145**	**13**	**2**	**0**
2081-2100年Ox変化に伴う死亡数	**409**	**302**	**382**	**1,045**	**433**	**2,190**	**749**	**48**	**111**	**6**	**-1**	**-28**

*Ox濃度に変化がないものと仮定した場合(20年間の夏季累計)

**20年間の夏季(6-8月)の累計

（４）オゾンのリスクに閾値を仮定した場合の健康リスクの推定

オゾンの健康影響については、環境基準濃度レベル（60ppb）以上では閾値が認められないと言う見解をEPAが示している。それ以下の低濃度については、リスクが無くなる濃度が存在する(閾値が存在する)という見解[4)、5)]と、閾値は存在しないという見解が存在し、その結論は得られていない。これまでの我々の増加死亡推定には、後者の閾値が無いとして求めたものである。しかし、日本の東北地方、北海道地方などでは平均濃度が関東地方や関西地方に比べ低いことが分かっている。図９に北海道・東北地方と関東地方の都道県を例として、1991年～2000年における県別の日最高0x濃度の分布（累積日数の%）を示す。関東地方では40ppb以下が10%前後、60ppb以下が20～30%であるのに対し、北海道や東北地方では40ppb以下が15～50%、60ppb以下が55～90%になっており、60ppb以下に閾値がある場合には東北地方など死亡リスクの増加もかなり小さくなると推測される。

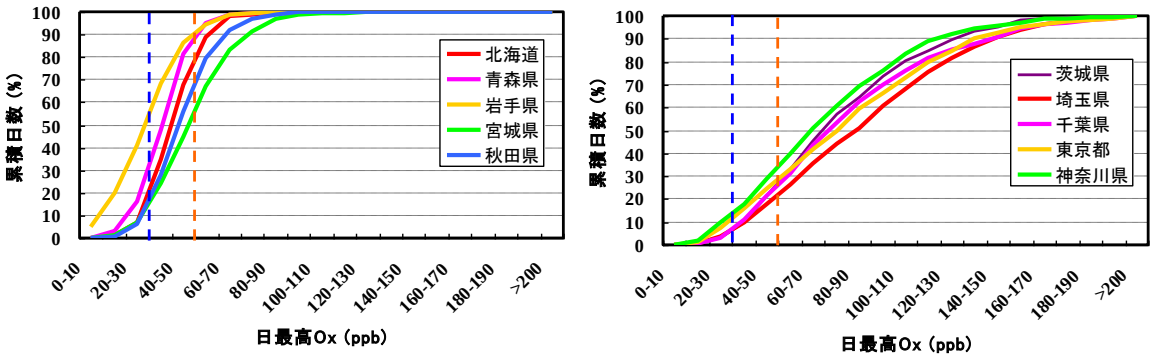


図９　1991年～2000年における県別の日最高0x濃度の分布（北海道・東北地方と関東地方の例）

そこで、これまで詳細に検討してきた５地域（11都府県）について、閾値がないと仮定した場合と、閾値が20ppb(TL20)、40ppb(TL40)、60ppb(TL60)であると仮定した場合について、それぞれ

健康リスク(増加死亡数)の推定を行った。なお、将来人口は2つの人口シナリオ(シナリオA、シナリオB)に基づく推計人口を用いた。例えば、閾値を40ppbとした場合のリスクの考え方は以下のとおりである。

① 現況40ppb以下→将来40ppb以下の場合

→増加死亡数は$\Delta 0_3$とみなして増加死亡数を算出(結果としては０)

② 現況40ppb以下→将来40ppb以上の場合(例: 現況 30ppb 将来 60ppb)

→閾値である40ppb以上の増分として、$\Delta 0_3$=60-40=20ppb とみなして増加死亡数を算出する。

③ 現況40ppb以上→将来40ppb以下の場合(例: 現況 60ppb 将来 30ppb)

→閾値である40ppb以下の減少分として、$\Delta 0_3$=40-60=－20ppb とみなして増加死亡数(マイナスの値となる)を算出する。

④ 現況40ppb以上→将来40ppb以上の場合(例: 現況 50ppb 将来 60ppb)

→$\Delta 0_3$は将来と現況の差分をそのまま採用し、($\Delta 0_3$=60-50=10ppb)、増加死亡数を算出する。

表５に閾値別の増加死亡数を推計した結果を示す。

表５ オゾンの死亡リスクに閾値を仮定した場合の都府県別増加死亡数（全年齢）

		閾値	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	愛知県	大阪府	岡山県	香川県	福岡県
シナリオA	2000年人口		2,983,282	2,005,723	2,016,578	6,933,351	5,909,860	12,016,795	8,453,481	7,043,470	8,803,449	1,950,397	1,022,229	4,999,009
	2031-2050年人口		2,195,883	1,545,060	1,515,262	6,115,311	5,091,934	10,925,191	7,753,989	6,544,619	7,643,242	1,453,024	709,603	4,366,997
	2081-2100年人口		1,004,378	757,510	729,959	3,398,059	2,719,302	6,869,608	4,780,853	4,067,934	4,613,393	745,755	318,446	2,682,938
	2031-2050年非事故推定死亡数*		134,571	91,063	90,271	337,673	292,587	570,593	392,944	350,710	434,303	83,746	43,919	238,456
	2081-2100年非事故推定死亡数*		66,887	48,494	46,855	203,458	167,888	379,825	256,807	238,795	284,459	47,089	21,526	160,647
	2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	なし	76	213	468	994	-113	985	-1	922	2,115	219	34	-28
		20ppb	76	213	468	994	-113	985	-1	922	2,115	219	34	-28
		40ppb	76	213	468	990	-110	955	26	822	2,115	219	31	14
		60ppb	4	26	402	243	0	40	0	4	405	54	0	0
	2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	なし	344	268	310	1,612	586	2,835	1,141	565	1,065	53	-6	-311
		20ppb	344	268	310	1,612	586	2,835	1,141	565	1,065	53	-6	-311
		40ppb	344	268	310	1,609	536	2,724	976	499	1,065	53	-4	-91
		60ppb	25	46	276	410	0	460	6	2	192	8	0	0
シナリオB	2000年人口		2,983,282	2,005,723	2,016,578	6,933,351	5,909,860	12,016,795	8,453,481	7,043,470	8,803,449	1,950,397	1,022,229	4,999,009
	2031-2050年人口		2,533,908	1,699,895	1,707,993	6,099,884	5,000,886	9,222,891	7,351,429	6,498,794	7,147,313	1,669,831	825,909	4,318,261
	2081-2100年人口		1,497,820	1,017,404	1,035,745	3,575,329	2,821,916	5,407,505	4,592,387	4,123,364	4,324,815	1,074,421	485,060	2,787,580
	2031-2050年非事故推定死亡数*		149,316	96,172	97,717	322,606	275,342	455,733	354,874	332,100	387,399	92,279	49,157	224,739
	2081-2100年非事故推定死亡数*		84,979	57,313	56,966	197,984	157,455	337,108	250,082	225,661	249,529	59,188	28,037	156,471
	2031-2050年Ox変化に伴う死亡数**	なし	85	224	505	947	-105	783	-1	871	1,879	241	38	-27
		20ppb	85	224	505	947	-105	783	-1	871	1,879	241	38	-27
		40ppb	85	224	505	943	-103	759	24	776	1,879	241	35	13
		60ppb	4	27	434	231	0	32	0	4	360	59	0	0
	2081-2100年Ox変化に伴う死亡数**	なし	432	314	374	1,560	547	2,537	1,112	532	930	67	-7	-302
		20ppb	432	314	374	1,560	547	2,537	1,112	532	930	66	-7	-302
		40ppb	432	314	374	1,558	499	2,437	951	469	930	66	-5	-88
		60ppb	31	54	333	397	0	411	6	2	168	10	0	0

*Ox濃度に変化がないものと仮定した場合(20年間の夏季累計)

**20年間の夏季(6-8月)の累計

関東地方については、現況濃度、将来濃度ともに50ppb前後の地域が多いため、閾値が40ppb以下では増加死亡数にほとんど差はない。一方で、閾値を60ppbとした場合には、増加死亡数が大きく低下する地域が多い。ただし群馬県については、将来濃度が60ppb以上となるエリアが多く、あまり差は見られない。関西(大阪府)については、現況濃度、将来濃度ともに50ppb前後の地域が多い(県南東部では将来濃度が60ppbを超えるが、人口が少ない)ため、閾値が0ppb、20ppb、40ppbでは、増加死亡数にほとんど差はない。一方で、閾値を60ppbとした場合には、増加死亡数が大きく低下する結果となった。

東海(愛知県)は、人口の多い名古屋市周辺については、現況濃度、将来濃度ともに40ppb前後、それ以外の地域は50ppb前後となっている一方で、60ppb以上となる地域はほとんど存在しない。

このため、閾値が0ppbと20ppbでは差がなく、40ppbでは、増加死亡数がやや減少、60ppbではほとんど0となった。

九州(福岡県)では、人口の多い福岡市周辺に着目した場合、2030年代のオゾン濃度は現況とほとんど差がいないため、閾値にかかわらず、非高齢者の増加死亡数は0に近い。高齢者については、閾値が0、20ppbではマイナスとなっているが、40ppbでは、プラスになっている。これは、30～40ppbの間で、将来濃度がわずかに減少するメッシュと、40ppb以上でわずかに増加するメッシュが混在し、前者の方が多いことが反映されたものと考えられる。2080年代については、現況よりもオゾン濃度がやや低下すると予測されるため、増加死亡数は基本的にはマイナスとなる。現況濃度、将来濃度ともに60ppbを超えるメッシュがないため、閾値を60ppbとした場合には、増加死亡数は0となる。

瀬戸内については、現況濃度と将来濃度の差がわずかであるため、非高齢者については、閾値にかかわらず、増加死亡数は少ない。岡山市周辺や高松市周辺の人口密集地は現況濃度、将来濃度ともに40～50ppbであるため、閾値が40ppbまでは増加死亡数に差はなく、閾値が60ppbの場合は、増加死亡数が激減する。

（５）日本全国の健康リスク推定法の検討

詳細なリスク推定を行った5地域で用いた、将来のオゾン濃度変化に伴う健康リスクを推定する手法では、①当該地域におけるオキシダント濃度測定データと、②地衡風を求めるための気象官署が適切に配置されていることが必要である。①については、日本国内のオキシダント測定局は大都市部に偏在しており、東北・北海道地域や山間部にはほとんど配置されていない。また、本調査のOx濃度解析期間である1991年～2000年に着目すると、注意報レベルの高濃度事例が発生するのは関東地方、東海地方、近畿地方、瀬戸内地域に限定されており、特に東北、北海道、北陸ではほとんど事例がなかった。本調査の手法は現況で高濃度事例が少ない場合には、将来も高濃度事例が発生することがないため、これらの地域においては、将来のOx濃度の変化による健康影響が非常に小さく算出されることが予想される。②については、これまで解析を行っていない北海道、東北・北陸地方では、地衡風を求めるための適切な三角形を形成する気象官署がなく、本研究で用いた手法による将来のオゾン濃度推定はできない。

そこで、将来のオキシダント濃度について、気温変化だけから推測可能であるかの検討を行った。まず、これまでに解析を行った12都府県について、それぞれ都府県内に１地点代表地点を決め、ここにおける1991年～2000年の夏季における日最高気温と日最高Ox濃度の関係を調べた。その結果、各地点ともに基本的には、Oxの高濃度は気温が高い日に発生していたが、気温が高い日でもOx濃度が低いケースも多数みられ、Oxが高濃度になる条件は気温が高いことだけでなく、地衡風などの他の要因も大きく寄与していることが確認された。

次に、これまでに解析を行った地域の代表5地点について、RCM20から予測された将来の気温変化(ΔT)と気象パタンの出現頻度の変化から予測した将来のオゾン濃度の変化(ΔO_3)との関係を図10に示す。各都市の結果は、2000年の気温、オゾン濃度を基準（0,0）として、2031～2050年の平均、2081～2100年の平均と繋がっている。この結果より、関東(東京)を除いては、ΔTが大きい方が、ΔO_3が小さくなっており、気温上昇だけではO_3濃度の上昇にはつながらないことが示唆された。

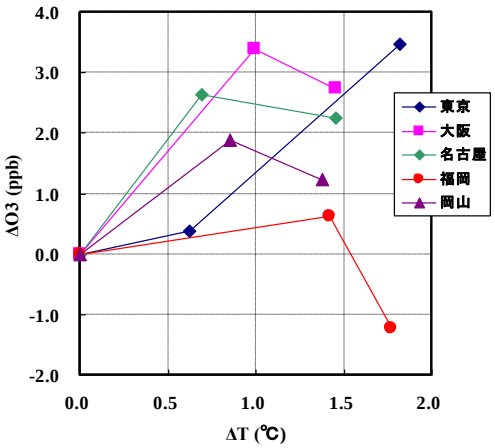


図10 将来の気温上昇（ΔT）とオゾン濃度増加（ΔO_3）の関係

これまでの検討結果から、気温変化だけから将来のOx濃度の変化を推定することは難しく、既に解析を実施した、関東地方、関西地方(大阪府)、東海地方(愛知県)、九州地方(福岡県)、瀬戸内地方(岡山県、香川県)以外の地域については、本手法により将来のオゾン濃度変化に伴う健康リスクを推定することは困難であると判断された。しかし、残された地域にはオゾン濃度の低い地域が多く、また人口密度も高くないことから、将来の温暖化による気象変化に伴うオゾン濃度の上昇と死亡リスクの増加に関する全国状況は、かなりの範囲で推定できたものと考える。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

温暖化による気象変化により、地域ごとに将来の詳細な濃度マップを推計する手法を確立した。しかし、この手法が適用できる地域は限られており、将来的には数値モデルによる推計が可能になるものと期待される。また、このマップから得られたオゾン濃度増加分に対応する死亡リスクの評価法も確立した。これについても、国内の疫学研究やオゾンの死亡リスクに関する閾値の研究が進展すれば、さらに正確な推計が可能になることが期待される。

（２）地球環境政策への貢献

温暖化による気象変化により、地域によって違いは見られるものの多くの地域において光化学反応起因のオゾン濃度が増加するため死亡リスクが増加することが確認された。他方、この温暖化の影響は2100年においてもオゾンの増加分は10ppb以下であり、現在大陸からの移流によって増加していると推定されるオゾン濃度の増加分に比べれば小さいことから、温暖化に伴う大気汚染変化の健康リスクへの対策にあたっては、越境大気汚染対策も並行して行うことが地球環境政策上、重要であることが確認された。この成果は環境省の「地球温暖化影響・適応研究委員会健康分野WG」（平成19年度）に委員として参画した田村を通じて政策検討に寄与し、同委員会報告書に取り入れられている。

６．引用文献

1) Ito K, De Leon SF, Lippmann M: Association between ozone and daily mortality analysis and meta-analysis, Epidemiology, 16 (4), 446-456, 2005

2) Bell ML, Dominici FD, Samet JM: A mata- analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study, Epidemiology, 16 (4), 436- 444, 2005
3) Levy JI, Chemerynski SM, Sarnat JA: Ozone exposure and mortality. An empiric Bayes metaregression analysis, Epidemiology, 16 (4), 458-468, 2005
4) Ren C, Williams GM, Morawska L, Mengersen K, Tong S: Ozone modifies associations between temperature and cardiovascular mortality: analysis of the NMMAPS data. Occupational and Environmental Medicine, 65, 255-60, 2008
5) Kim S, Lee J, Hong Y, Ahn K, Kim H: Determining the threshold effect of ozone on daily mortality: an analysis of ozone and mortality in Seoul, Korea, 1995- 1999, Environmental Research, 94, 113- 119, 2004

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 田村憲治、松本幸雄、佐々木寛介、椿貴博：地球温暖化と大気汚染：光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク、地球環境、14 (2)、271-277、2009

<査読付論文に準ずる成果発表>(社会科学系の課題のみ記載可)

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

1) 田村憲治：気候変動がもたらす健康問題－大気汚染、月刊保団連、975号、32-35、2008

（２）口頭発表

1) 松本幸雄、原沢英夫、椿貴博、佐々木寛介、田村憲治：温暖化にともなうオキシダント濃度の変化と健康影響の予測－東京、大阪周辺を例に－、第47回大気環境学会、東京、2006.09

2) 松本幸雄、原沢英夫、椿貴博、佐々木寛介、田村憲治：温暖化にともなうオキシダント濃度の変化と健康影響の予測－東京、大阪、愛知周辺－、第48回大気環境学会、岡山、2007.09

3) 松本幸雄、田村憲治、原沢英夫、佐々木寛介、椿貴博：温暖化にともなうオキシダント濃度の変化と健康影響の予測－春季データを含めた場合のオキシダント濃度予測の検討－、第49回大気環境学会、金沢、2008.09

4) 松本幸雄、田村憲治、原沢英夫、佐々木寛介、椿貴博：温暖化にともなうオキシダント濃度の変化と健康影響の予測－全国推計の試み、第50回大気環境学会、横浜、2009.09

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

1）毎日新聞（2006年10月14日、大阪版夕刊、15日、東京版朝刊）

（６）その他

なし

S-4　温暖化の危険な水準および温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２.影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

（２）健康面からみた温暖化の危険水準情報の高度化に関する研究

５）　節足動物媒介性感染症の発生に及ぼす地球温暖化の影響予測に関する研究

国立感染症研究所
ウイルス第一部　倉根一郎
昆虫医科学部　小林睦生
寄生動物部　大前比呂思
＜研究協力機関＞
国立感染症研究所
ウイルス第一部　高崎智彦・小滝　徹・柴崎謙一
昆虫医科学部　二瓶直子・駒形　修・斉藤一三・津田良夫
感染症情報センター　大日康史
岡山大学大学院・環境学研究科　石川洋文
岩手県環境保健研究センター
地球科学部　佐藤　卓・松本文雄・安部隆司

平成17～21年度合計予算額　100,150千円
（うち、平成21年度予算額　20,641千円
※予算額には、間接経費を含む。

［要旨］地球温暖化が節足動物媒介性感染症に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。具体的には、以下の３つの目的を持って研究を進めた。（１）デング熱等の媒介蚊であるヒトスジシマカに関し、分布域が地球温暖化によってどのように拡大するかを明かにする。（２）地球温暖化等の気候変動が、最も重要な2種類の蚊媒介性ウイルスある日本脳炎ウイルスの活動に及ぼす影響を明らかにする。（３）地球温暖化等の気候変動がマラリアの流行に及ぼす影響を明らかにする。デング熱およびチクングニヤ熱の媒介蚊と知られているヒトスジシマカの東北地方における分布域を詳細に検討し、分布確認地域と未確認地域における気象学的要因を解析し、分布可能な気象要因として年平均気温11℃以上の条件を明らかにした。また、デング熱およびチクングニヤ熱の流行する可能性のあるリスク地域がより広範に拡がったことが明らかとなった。蚊媒介ウイルス感染症である日本脳炎は現在日本においては比較的患者数の少ない感染症であるが、夏期日本のほぼ全域においてウイルスの活動が見られる。日本脳炎ウイルスの活動を直接的に反映すると考えられるブタの日本脳炎抗体獲得状況の解析から、日本脳炎ウイルスの活動と夏期の平均気温、最高気温、最低気温と各年の最終検査日の日本脳炎ウイルス抗体陽性率には正の相関がみられた。地球温暖化とマラリアの流行拡大については、平均気温が3℃上昇し年平均気温が20℃に達すると、九州や四国の一部も温度条件からみたコガタハマダラカの生息可能地域に入るが、植生や土地利

用状況からみて、短期間のうちに実際に生息できるようになる可能性は低い。さらに、コガタハマダラカの飛翔距離は限られているため、温度条件をクリアできたとしても、今後実際に島伝いにその生息範囲を拡大していく可能性は殆どない。また、熱帯熱マラリア感染者が八重山群島、石垣島に居住もしくは短期間滞在すると仮定しても、実際に再流行が起きる可能性は極めて低いと結論される。

［キーワード］　ヒトスジシマカ、節足動物媒介性ウイルス、日本脳炎、熱帯熱マラリア、コガタハマダラカ

１．　はじめに

地球温暖化や異常気象現象がヒトの感染症に対してどのように影響を及ぼすかについては種々のシナリオが述べられている。特に蚊等の節足動物により媒介される感染症の患者数の増加や分布域拡大が予測されている。しかし、このような予想、仮説の裏付けとなるデータは国内、国外においても十分に得られていないのが現状である。地球規模での温暖化や異常気象の感染症への影響評価は、まずこのような事実が実際におこりうるのかを確認するためのデータ収集から始めなければならない。さらに、その科学的データの詳細な解析の上に適応策の構築が求められる。

２．研究目的

地球温暖化や異常気象現象の節足動物媒介性感染症に及ぼす影響を明らかにし、さらに、現象の経済評価も考慮し適応策の検討を行なうことを目的とした。具体的には、（１）デング熱およびチクングニヤ熱の媒介蚊であるヒトスジシマカに関し、分布域が地球温暖化によってどのように拡大するかを明かにする。また、媒介蚊の生息密度が疾病疫学に重要な要因であるため、各地域で成虫密度を評価し、突発した流行時における防除対象地域の選定および優先性に関する基礎的なデータを提供する。九州、四国、本州南部において、ネッタイシマカの分布域拡大が起こる可能性をMIROC(K1)モデルで解析する。（２）地球温暖化等の気候変動が、日本脳炎ウイルスの活動に及ぼす影響を明らかにする。また、蚊媒介性ウイルス感染症であるデング熱がわが国で流行した場合の疾病負担を推定する。（３）地球温暖化等の気候変動がマラリアの流行に及ぼす影響を明らかにする。特に、温暖化による影響をより受けやすいと思われる熱帯熱マラリアについて温暖化にともなうわが国での再流行の可能性を明らかにする。

３．研究方法

（１）地球温暖化が感染症媒介蚊の分布に及ぼす影響

東北地方におけるヒトスジシマカの調査は、各都市の主に寺院に隣接する墓地内の花立て、手水鉢、空き地や路肩等に放置されている古タイヤ、缶、プラスチック容器、バケツ等から幼虫を採集し、研究所に持ち帰って飼育をし、成虫で種の同定を行った。今までに採集された幼虫の種類としては、ヒトスジシマカ、ヤマトヤブカ、ヤマダシマカ、トウゴウヤブカ、アカイエカ、フタクロチビカ、オオクロヤブカなどである。さらに、全球海洋大気結合モデルMIROCのうち最高解像度のK-1モデルを用いて、2000年の日本における1kmメッシュ気候値を基準に、2035年および2100年における年平均気温を1kmメッシュ（3次メッシュ）単位で予測した。この結果からArcView9.1

を用いて、安定して同蚊の定着が認められる地域を年平均気温11℃以上として図化した。2035年および2100年の予測メッシュ気候図を作成し、ヒトスジシマカの分布拡大を東北地方および北海道地方で予測した。

（２）地球温暖化の節足動物媒介ウイルス感染症に及ぼす影響

日本脳炎ウイルスの侵淫状況と気候要因の関連を明らかにするため日本脳炎ウイルスの活動状況と気候のパラメータを1983年－2003年において比較検討した。日本脳炎ウイルスの活動を表す指標として日本脳炎ウイルス増幅動物であるブタの日本脳炎抗体陽転率を用いた。データは厚生労働省感染症流行予測調査事業による夏期のブタ日本脳炎ウイルス抗体保有状況の結果を用いた。一方、気候要因としてこの間の夏期における各年の平均気温・最高気温・最低気温の平均値を求めデータとして用いた。北海道・青森県・秋田県・山形県・岩手県・宮城県・東京都・富山県・静岡県・三重県・広島県・島根県・高知県・熊本県・福岡県・長崎県（長崎市および佐世保市）の16都道県17ヶ所の豚屠殺場からもっとも近い気象データを使用した。

（３）地球温暖化のマラリア流行に関する影響

コガタハマダラカについては、2006、2007年度に、沖縄県以外の地域も含め、国内生息状況を調査した。また、気温・降水量変化とマラリア患者発生数の関連、気温・降水量変化とコガタハマダラカ幼虫密度の関連については、各々、八重山群島における1950年代、1990年代の資料を分析して、再流行のリスクを評価できる数理モデルを作成した。さらに、2008年度は、石垣島をモデル地域として、熱帯熱マラリアに罹患した居住者の帰国や旅行者の滞在を想定し、作成した数理モデルを用いて、幾つかの条件設定で季節別のシミュレーションを行った。2009年度は、アジア連携の可能性の一つとして、中国雲南省における1980年代、1990年代の気温・降水量変化とマラリア患者発生数をもとに、亜熱帯における三日熱マラリアも含むマラリア感染の数理モデルを作成し、実際の報告数と比較した。

４．結果・考察

（１）地球温暖化が感染症媒介蚊の分布に及ぼす影響

東北地方のヒトスジシマカの分布調査は、毎年8月下旬から9月中旬にかけて行っている。太平洋側では、秋田県、青森県、岩手県で幼虫調査を行った。ヒトスジシマカの分布域拡大は、人工的な容器、古タイヤなどに付着した卵や溜まり水の幼虫が、また、夏期に成虫が車両によって運ばれることによって起こると理解されている。東北地方の諸都市と関東地方の大都市との物流は、近年盛んに起こっていることが予想され、高い頻度でヒトスジシマカが新天地へ運搬される可能性が考えられる。しかし、その地域の気象条件、越冬卵を産下するタイミング、冬期の卵の生存等種々の原因により翌春まで生存できないことが予想される。2007年までのヒトスジシマカの分布確認都市を図1に示した。

2007年は宮古で初めて1コロニー確認されたが、翌年には同地点で全く確認が出来なかった。また、盛岡でも2003年に1コロニー確認されたが、翌年には確認出来なかった。2009年に6年ぶりに盛岡で1コロニーが住宅街の古タイヤから採集された。このように、盛岡、宮古、釜石では数年に1度の頻度でヒトスジシマカが確認されたが、現在のところ、定着していない。一方、秋田県の日

本海側では青森県境に近い八峰町（八森町）では2006年から連続して限られた地域でヒトスジシマカが確認されており、日本海側の分布北限となっている。なお、青森県の弘前、深浦、鰺ヶ沢、青森、八戸では今までに数回調査を行っているが、分布が確認されていない。今後の温暖化の状況によっては、上記の青森県内の地域に分布域が広がる可能性が考えられる。

一方、2000年に新たにヒトスジシマカの分布が確認された山形市では、それまで都市部で優占種であったヤマトヤブカ(*Ochlerotatus japonicus japonicus*)の採集コロニー数が顕著に減少する傾向が認められた。ヒトスジシマカが定着する前は、ヤマトヤブカのコロニー率が100% (18/18)であったが、2000年には58.6%(17/29)になり、2002年には17.9%(7/39)まで減少した。その後調査が行われていなかったが、2009年に7年ぶりに調査したところ、43%(37/86)と2002年よりは上昇していたが、やはりヒトスジシマカのコロニー率の方が高かった。これらの結果は、ヒトスジシマカとヤマトヤブカとの種間競争が起こっていることを意味していると考えられる。

我が国のヒトスジシマカの成虫密度を評価する目的で、捕虫網を用いて、一ヶ所に8分間留まって吸血飛来してきた蚊を捕集する8分間人囮法を検討した。その結果、公園によって捕集が相当異なること（平均捕集数で10倍以上）、同一公園でも採集地点によって大きく捕集数が異なることが明らかとなった。簡便な方法であることから、数カ所で捕集を試みて、その環境の成虫密度を評価出来ることが示唆された。2009年における岩手県での詳細な分布調査において、一関から花巻市までの国道4号線を中心とした地域に年平均気温が10.8℃以上の地域が拡大しているのが明らかとなった（図1）。また、人口密度が高くない分布限界地域において、ヒトスジシマカが確認されており、今後注意してこれらの地域での定着の確認を行う必要がある（図2）。MIROC(K1)を利用した将来予測では、2035年には、津軽平野の全域、青森市周辺、八戸市に同蚊が定着する可能性が示され、2100年には東北地方全域の平地および北海道の南部および札幌周辺の平地にヒトスジシマカが分布域を広げることが明らかとなった（図3）。 一連の調査から、デング熱およびチクングニヤ熱の流行する可能性のあるリスク地域が東北地方により広範に拡がっていることが強く示唆された。ネッタイシマカに関しては、2100年にはネッタイシマカが分布可能な地域が九州南部から東西の海岸線、高知県、紀伊半島の南部、静岡県、神奈川県、千葉県南部と広範囲に拡大すると推察さされた。

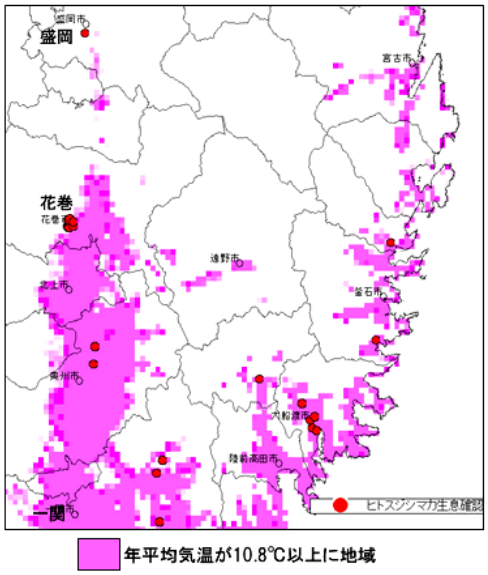


図1. 東北地方におけるヒトスジシマカ分布域の拡大

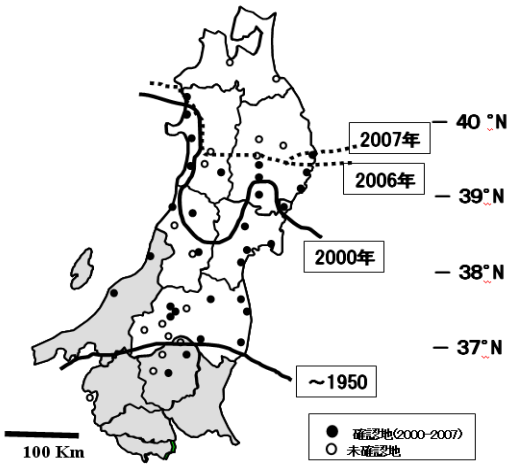


図２．岩手県におけるヒトスジシマカの分布(2009年)

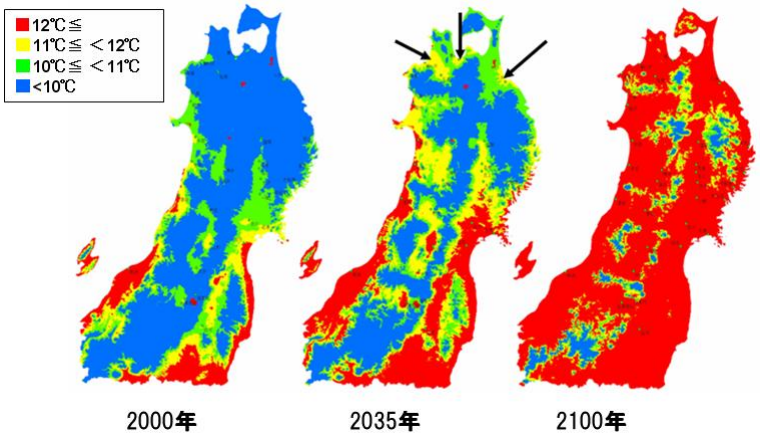


図3．MIROC（K1）による年平均気温の将来予測とヒトスジシマカの分布

（２）地球温暖化の節足動物媒介ウイルス感染症に及ぼす影響

節足動物媒介ウイルス感染症として日本脳炎に対する地球温暖化影響を検討した。日本脳炎は日本脳炎ウイルスの感染によって起こる急性脳炎であり、アジアにおけるウイルス性脳炎として

最も重要なものといえる。わが国においてはほとんどの国民が防御免疫を有していることから患者数は年間10人以下にとどまっている。日本脳炎ウイルスは自然界では蚊－ブタ－蚊の感染環で維持されている。日本においてはコガタアカイエカが主たる媒介蚊である。ヒトは終末宿主であり、感染したヒトを吸血した蚊が感染することはない。ヒトからヒトへの直接の感染もない。日本においてはほとんどの国民がワクチン接種あるいは自然感染による免疫を有しており、日本脳炎ウイルスの活動は日本脳炎患者数によって評価することはできない。ブタは高いウイルス血症をおこすことにより、吸血した多くの蚊を感染させる増幅動物でもある。日本においては、ブタは生後6ヶ月で食肉用に屠殺されるため、毎年初夏には日本脳炎ウイルスに抗体を有しないブタが存在する。従って、夏期におけるブタの日本脳炎抗体獲得は日本脳炎ウイルスの活動の非常に良い指標となる。厚生労働省感染症流行予測調査事業によって毎年5月－10月全国各県において夏期のブタ日本脳炎ウイルス抗体保有状況の調査が行われており、このデータはわが国における日本脳炎ウイルスの活動を示す最も良い指標といえる。1883年－2003年における全国全都道府県におけるブタの日本脳炎ウイルス抗体獲得状況（各年の最終検査日の日本脳炎ウイルス抗体陽性率）と、夏期における平均気温、最高気温、最低気温の年平均のデータを解析した。データは北海道・青森県・秋田県・山形県・岩手県・宮城県・東京都・富山県・静岡県・三重県・広島県・島根県・高知県・熊本県・福岡県・長崎県（長崎市および佐世保市）の16都道県17ヶ所の豚屠殺場からもっとも近い気象データを使用し、年ごとに解析した全県のデータを使用した。ほとんどの年度において、平均気温（図4）、最高気温（図5）、最低気温（図6）と各年の最終検査日の日本脳炎ウイルス抗体陽性率には正の相関がみられた。（図には1986年、1994年、2001年、の各年と1983－2003年総合のデータを示す）。この結果は、日本脳炎ウイルスの活動と夏期の温度には相関があることを示している。

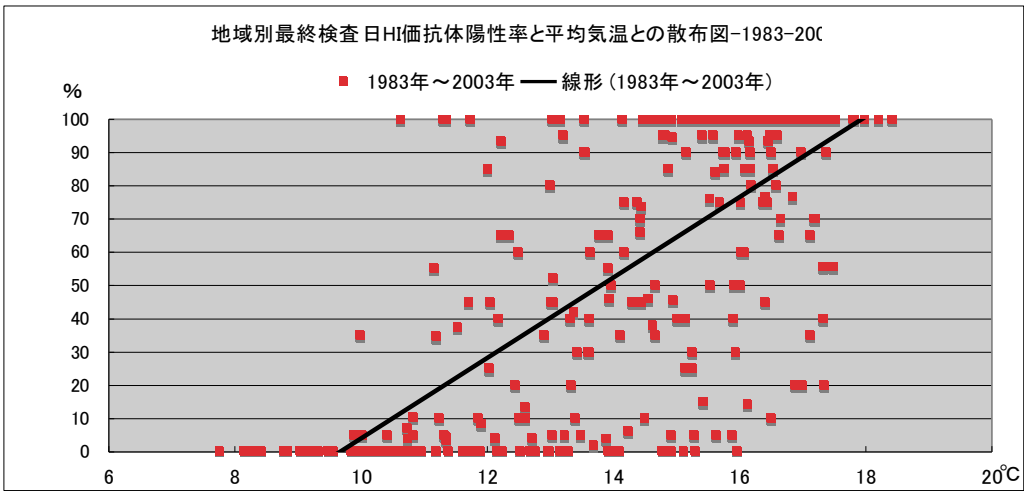


図4．ブタの日本脳炎ウイルス抗体陽性率と夏期の平均気温の関係

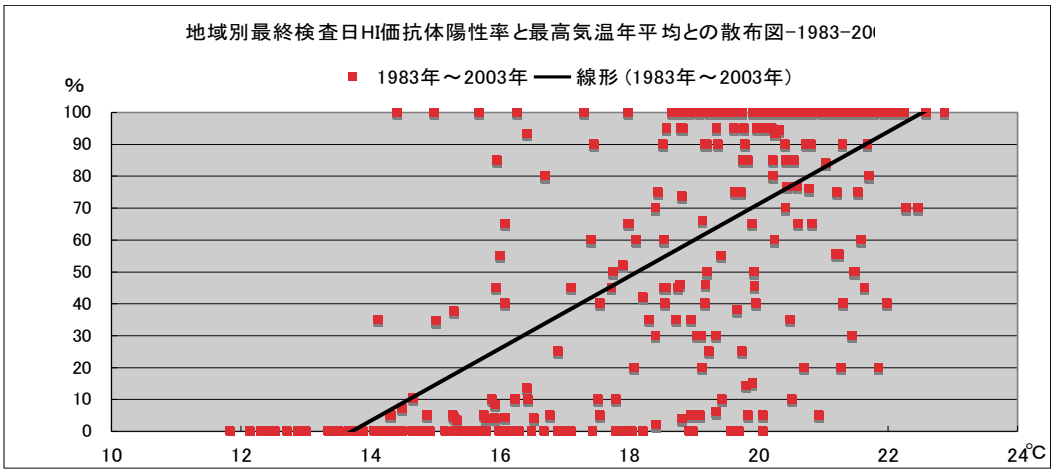


図5．ブタの日本脳炎ウイルス抗体陽性率と夏期の日最高気温の関係

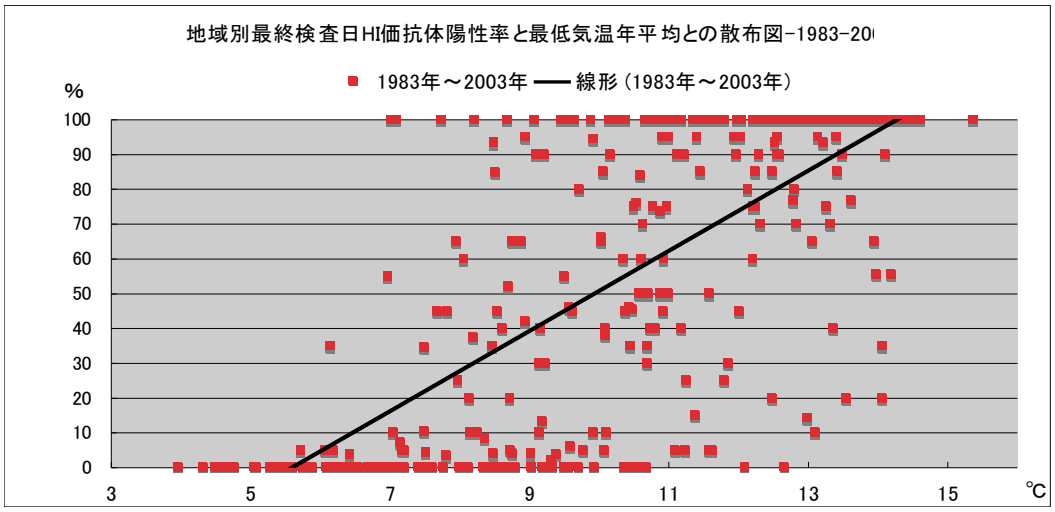


図6．ブタの日本脳炎ウイルス抗体陽性率と夏期の最低気温の関係

（３）温暖化がわが国におけるマラリア流行に及ぼす影響

日本国内では、未だ主要なものだけでも5種類のマラリア原虫媒介蚊が全国に生息するが、過去において八重山群島で熱帯熱マラリア原虫を媒介していたのは、コガタハマダラカと推察されている。温度条件だけからみると、近年の温暖化傾向に伴いその生息範囲は既に拡大している可能性が大きいが、2006年度の調査でも、以前の調査結果と同様、コガタハマダラカの生息域は八重山群島に限られていた。今後、3℃平均気温が上昇し年平均気温が20℃に達すると、九州や四国の一部も温度条件からみたコガタハマダラカの生息可能地域に入るが、植生や土地利用状況からみて、短期間のうちに実際に生息するようになる可能性は低い。石垣島での1993年、2006年の調査でも、コガタハマダラカ生息地は、島内に均等分布していたわけではなく、島の南部の山裾に限られていた。即ち、温度条件以外に、植生・土地利用状況や吸血源となるヒトや家畜の分布などの別の様々な条件も問題となり、実際にコガタハマダラカが生息できる範囲はさらに非常に限られる。また、コガタハマダラカの飛翔距離が、ほぼ2ｋｍ以下であることから、何らかの人為的条

件がなければ、現在、石垣島や西表島など八重山群島の一部にしか生息していないコガタハマダラカが、直接、海を渡って島伝いにその生息範囲を北に広げていく可能性は低い。1990年代、石垣島において観察された温度変化とハマダラカの幼虫密度を基礎データとした場合、最近の温暖化傾向が続けば、現生息地におけるコガタハマダラカの幼虫密度は、ここしばらく増加していく可能性が指摘される。ただ、温暖化がさらに進み、最低温度がマラリア原虫とハマダラカの最適発育である23－25℃を超える日が多くなると、温暖化に伴うコガタハマダラカ幼虫密度の変化は、かえって減少に転ずると思われる。

マラリア原虫保有者の再侵入に関して、今後わが国で心配されるのは輸入例からの蚊を介しての2次感染の拡大である。そこで、少数例からマラリアの感染拡大がみられた事例として、1951年10人の感染者から発生した石垣島、大浜村での熱帯熱マラリア流行を数理モデル化し、ランダムにシミュレーションを1000回行ったところ、結果は、1950年代八重山群島で報告された小規模なマラリア流行のパタンとほぼ一致した。さらに、今後想定される幾つかの条件を別個に設定し、各々の場合について同様にシミュレーションを行ったところ、熱帯熱マラリアに感染した旅行者が短期間滞在した場合は、その季節に関わらず2次感染が生じる可能性は殆どないこと明らかとなった。また、居住者が熱帯熱マラリアに感染して帰国する場合は、冬季であれば2次感染の可能性は殆どないが、夏期にコガタハマダラカの生息地近くに感染者が居住し続けた場合、小規模な２次感染が続く可能性が否定できない（図7）。ただし、マラリアという診断が発症後短時日で適切に下されるようになれば、流行をおこすことなく1ヶ月あまりで2次感染の可能性も消失することが明らかとなった（図8）。

また、中国の亜熱帯地域である雲南省における1980年代、1990年代のマラリア流行のデータ（気温、降水量変化とマラリア患者数変化）をもとに、亜熱帯・温帯におけるマラリア感染の数理モデルを作成し、実際の報告数と比較した。雲南省において報告されるマラリア患者数は、降水量の変化よりも平均気温の変化の影響を強く受け、その関係は三日熱マラリアでもみられた。

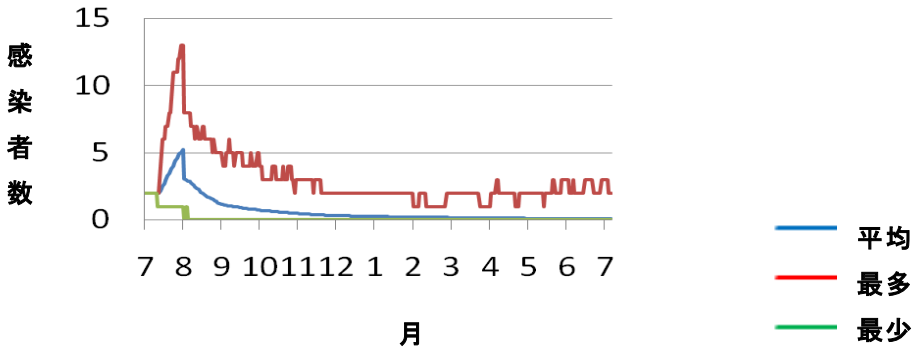


図7　日本における熱帯熱マラリアの侵入・再流行モデルの一例（石垣島のコガタハマダラカ生息地に2名の感染者が侵入し居住するケースを考える。診断までの期間は、発症後2週間で固定されている。　－試行回数1000回－ ）

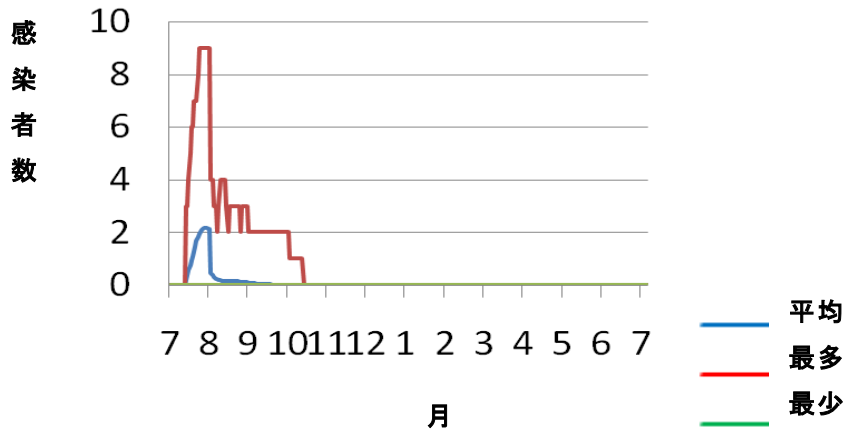


図8　日本における熱帯熱マラリアの侵入・再流行モデルの一例（ 図4を基礎に、石垣島のコガタハマダラカ生息地に2名の感染者が侵入し居住するケースを考える。診断までの期間は、次第に短縮していくとする。　－試行回数1000回－ ）

５．本研究より得られた成果

（１）科学的意義

2000年から新たにヒトスジシマカの分布が確認された都市は、山形、酒田、本荘、秋田、能代、八峰、新庄、横手、一関、水沢、花巻、盛岡、気仙沼、釜石、宮古である。しかし、翌年の再調査で幼虫が確認できず、定着していないと判断された都市は、盛岡、釜石、宮古の3市である。MIROC(K1)を利用した将来予測では、年平均気温の上昇によって分布域が拡大する可能性が強く示唆された。2005年からインド洋島嶼国、インド等で大きな流行が報告されたチクングニヤ熱は、ネッタイシマカよりヒトスジシマカがより重要な媒介蚊であり、2007年の北東イタリアでの小さな村での流行にも関わっている。我が国のヒトスジシマカは青森県以南の低地の多くの都市に分布が確認されており、地域によっては成虫密度が高い。実際、都市部の成虫密度を評価した仕事が存在しないことから、8分間人囮法を開発し、種々の公園等で調査を試みた。発生密度が相当高い公園も認められ、平常時からの防除対策の必要性が強く示唆された。

蚊媒介ウイルス感染症である日本脳炎は現在日本においては比較的患者数の少ない感染症であるが、夏期、日本のほぼ全域においてウイルスの活動が見られる。日本脳炎ウイルスの活動を直接的に反映すると考えられるブタの日本脳炎抗体獲得状況の解析から、日本脳炎ウイルスの活動は特に夏期の気温により影響を受けていることが明らかとなった。このことは、地球温暖化が進行すればおそらくコガタアカイエカの活動範囲が広くなり、活動自体も盛んになる可能性があること、さらに、ワクチン接種等の適切な対応策をとらなければ、患者の増加も予想されることを示唆している。

熱帯熱マラリアの媒介蚊であるコガタハマダラカは、現在八重山群島に生息しているが、温暖化に伴ってその生息範囲が拡大する傾向はみられない。しかし、このまま温暖化が進み降水量も変化すれば、現在の生息地において、しばらくの間幼虫生息密度が増加していく可能性はある。しかしその場合でも、熱帯熱マラリアに関する適切な診断と治療がなされれば、国内での媒介蚊を介した２次感染の拡大や再流行がおきる可能性は殆どないと推測された。

現在わが国のマラリアは、輸入例だけに限られており、1961年以降、媒介蚊を介した確実な2次感染例の報告はない。コガタハマダラカが生息する石垣島には国際空港もあるので、熱帯熱マラリアの防疫を目指す媒介蚊の監視は今後も継続する必要はある。しかしその場合でも、熱帯熱マラリアが日本に侵入、定着して再流行を起こすには、かなり色々な条件が重なる必要があり、その可能性は非常に低い。また、アジア連携の可能性の1つとして、中国雲南省における1980年代、1990年代の気温・降水量の変化とマラリア患者数の変化をもとに、亜熱帯・温帯におけるマラリア感染の基礎的な数理モデルを作成した。亜熱帯・温帯地方において報告されるマラリア患者数は、降水量の変化よりも平均気温の変化の影響を強く受け、その相関は三日熱マラリアでもみられることが明らかとなった。

（２）地球環境政策への貢献

地球温暖化の結果として、わが国における蚊の分布地域が拡大し、デング熱、チクングニヤ熱等の感染症のリスクを有する地域が拡大する可能性が示唆される。本結果を基に、環境省地球温暖化影響・適応研究委員会等において行政が行なうべき適応策、例えば、サーベイランスの充実、啓発活動、媒介蚊対策、人材育成等に関し提言を行なった。

６．引用文献

なし

７．国際共同研究等の状況

1)中国における温暖化と三日熱マラリアの再流行について検討するため、中国CDC、国立寄生虫症研究所との間で共同研究の準備が進んでいる。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜誌上発表（査読あり）＞

1)津田良夫、比嘉由紀子、倉橋　弘、林　利彦、星野啓太、駒形　修、伊澤晴彦、葛西真治、佐々木年則、冨田隆史、沢辺京子、二瓶直子、小林睦生：都市部における疾病媒介蚊の発生状況調査―ドライアイストラップを用いた２年間の調査結果、Medical Entomolgy and Zoology. 57:75-82, 2006

2)大前比呂思、遠藤卓郎、長谷山路夫、新妻淳、飯塚信二、津田良夫: 検疫感染症としてのマラリアをどう捉えるか、Clinical Parasitology, 17:127-130, 2006

3) Higa Y, Hoshino K, Tsuda Y Kobayashi M: Dry ice-trap and human bait collection of mosquitoes in the eastern part of Hokkaido, Japan. Medical Entomolgy and Zoology 57:93-98, 2006

4) Kobayashi M, Komagata O, Nihei N: Global warming and vector-borne infectious diseases. Journal of Disaster Research, 3(2):105-112, 2008

5) Kobayashi M, Kasai S, Sawabe K, Tsuda Y: Distribution and ecology of potential vector mosquitoes of West Nile fever in Japan. Global Environmental Research, 12:27-33, 2008

6) Kurane I, Kotaki A, Takasaki T: Vector-borne infectious diseases and climate change. Global Environmental Research, 12(1): 35-40, 2008
7) Kurane I: The emerging and forecasted effect of climate change on human health. Journal of Health Science, 55(6): 865-869, 2009
8)倉根一郎：感染症への地球温暖化影響. 地球環境14(2): 279-298, 2009
9) Nakagawa Y, Ueki M, Fueda K, Ohmae H, Ishikawa H: Risk assessment of re-emerging Plasmodium falciparum on Ishigaki Island using a stochastic model". Tropical Medicine Health, 37(3): 97-107, 2009

＜その他の誌上発表（査読なし）＞

なし

（２）口頭発表（学会）

1)中川祐希、尾藤伴行、隣恵理子　植木 優夫、笛田 薫、大前比呂思、石川洋文：石垣島を対象とした熱帯熱マラリア侵入に関する数理解析、第77回日本寄生虫学会、2008
2)尾藤伴行、中川祐希、植木優夫、笛田薫、大前比呂思、石川洋文：三日熱マラリア本邦侵入に対する流行の危険度予測―富山県氷見市を対象として、第49回日本熱帯医学会、2008
3)尾藤伴行、福原一磨、杉本晃一、笛田薫、大前比呂思、石川洋文：海外のマラリア感染蚊による空港周辺地域の感染危険度予測の試み―成田空港及び那覇空港を対象として、第50回日本熱帯医学会、2009
4) Ohmae H, Ishikawa H, Fueda T, Ono M, Tnag L, Gu Z: Basic analysis to estimate relationship between climate change and emerging of vivax malaria, The 2nd international conference on vivax malaria in Asia and Pacific area. Shanghai, China, 2010
5) Sawabe K, Tsuda Y, Ohmae H: Current distribution and molecular identification of anopheline mosquitoes in Japan, The 2nd international conference on vivax malaria in Asia and Pacific area. Shanghai, China, 2010

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

1)小林睦生：「地球温暖化に伴う社会的影響―節足動物媒介性感染症から考える―」
　第５１回全国環境衛生大会　平成19年10月17日（札幌市）
2)小林睦生：「媒介昆虫の分布拡大と温暖化について」
　気象研究所セミナー　平成19年12月5日（つくば市）
3)小林睦生：「地球温暖化と感染症・媒介昆虫」
　横浜市感染症対策研修会　平成20年1月31日（横浜市）

（５）マスコミ等の公表・報道等

1)読売新聞（平成18年1月27日：全国版）「異変最前線　熱帯ウイルス日本へ侵入」
2)朝日新聞（平成18年4月21日：全国版）「海外から侵入　春あちこちに；害虫モゾモゾご用心」

3)北海道新聞（平成19年9月4日、）「今日の話題：温暖化と感染症」
4)東奥新聞（平成19年9月15日）「デング熱媒介蚊：2035年本県にも生息」
5)日本経済新聞（平成19年9月15日：全国版）「熱病媒介蚊、北海道へ：今世紀末、温暖化の影響」
6)読売新聞（平成19年11月25日：全国版）　「感染症　国境なき拡大：チクングニヤ熱かを媒介に感染」
7)朝日新聞（平成20年1月1日：全国版）「怒る天　人に牙：温暖化の脅威急加速」
8)中日新聞（平成20年1月6日）「感染症流行脅威潜む：温暖化“運び屋”も北上」
9)産経新聞（平成20年4月8日）「ウイルス運び屋：列島を北上」
10)日本経済新聞（平成20年9月19日：全国版）「温暖化と健康リスク　熱帯の感染症年々北上」
11)化学と工業（平成20年10月号、日本化学会）「衰えぬ脅威　マラリアに我々はどう立ち向かうか」
12)日本経済新聞（平成21年9月14日）全国版「蚊が媒介（チクングニヤ熱）　ウイルスの国内侵入を警戒」
13)日本経済新聞（平成22年2月21日）全国版「ネーチャー・クライシス　変わる都市の生態系：冬の地下街で人を刺す」

（５）シンポジウム、セミナーの開催
1)環境省の地球温暖化影響に関する一般公開シンポジウム（平成１８年１１月３０日）において「地球温暖化と感染症」について講演した（倉根）。

課題名	S-4温暖化の危険な水準および温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 2-3 アジア地域のコメ生産に対する温暖化影響の確率的リスク評価		
課題代表者名	横沢正幸（独立行政法人農業環境技術研究所大気環境研究領域）		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	79,107千円（うち21年度 14,855千円） ※予算額は、間接経費を含む。

研究体制

（１）気候変動によるコメ生産量変動の確率的評価手法の開発と評価に関する研究
（独立行政法人農業環境技術研究所）

（２）中国におけるコメ生産量変動の確率的リスク評価に関する研究
（国立大学法人筑波大学）

（３）温暖化が世界の食料市場に及ぼす影響の予測と価格変動リスク評価に関する研究
（独立行政法人国際農林水産業研究センター）

（４）気候変化に伴う水資源の量と質の変動がメコンデルタのコメ生産に及ぼすリスク評価に関する研究（ＥＦフェロー、19～20年度）

I.戦略課題 S-4-2(3)の全体構成

本サブテーマは3つのサブサブテーマから構成されるが、19年ならびに20年度の2年間にはエコフロンティア課題が加わった。

研究目的は、わが国ならびに世界の主要コメ生産国である中国・東北部、ベトナム・メコンデルタを対象として、環境変動と生産量変動との関係に関する確率的リスク評価手法を開発し、影響評価を行うとともに、コメ市場価格の変動を通じての経済評価もあわせて行うことである。

サブサブテーマ１）、２）および４）では、それぞれ地域別の気象変動に伴うコメ生産量変動の推計モデルを作成し、予測を行う。それらの結果はサブサブテーマ３）の世界食料需給モデルに導入し、生産量変動に連動する国際コメ市場価格の変動に基づいた経済的評価に利用する。

Ⅱ.本研究により得られた科学的成果

1) 本研究で開発されたモデルPRYSBIは、既存の作物生育・収量予測モデルではできなかった気象環境の変動に伴うコメ収量の年々変動を再現する。これにより、平均的な気候変化影響だけでなく、農業生産に重要な異常気象などによる年々変動の影響を評価することが可能となった。
2) モデルPRYSBIにIPCC AR4で使用された複数の気候変化シナリオを入力することによって得られた、気候変化シナリオにおける不確実性ならびに影響評価モデルに含まれる不確実性を同時に考慮した気候変化リスク評価結果は、これまでにないオリジナルなものである。
3) 世界の有数の輸出用コメ生産地域であるベトナムメコンデルタにおける水資源、水質ならびに水稲栽培の状況を環境データから推計する初めての統合モデルシステムを作成した。これにより、対象地域のコメ生産に関わる要因の相互関係と環境変動の影響の解析が可能となった。
4) 中国におけるコメ生産量の変動予測について、マルチアンサンブル手法を用いて気温上昇段階（1℃～3℃）ごとに出現確率分布を求めて収量変動予測を行った。本手法はこれまで例が無く、不確実性の評価に利用価値が高いと考えられる。予測結果として、中国の主要コメ生産地域では、適応策として最適な栽培期間を選択する選択肢は大きな効果が期待できないこと、特に、現在生産量が多い華中以南では負の影響が避けられないことが示された。また、東北平原では春の干ばつによる水不足の危険性があることを示した。東アジアのコメ生産に関して、マクロ気候学的視点からの変動予測に貢献することが期待される。
5) 作物の収量を気温と降水量の関数として、国・地域間および気温と降水量間の相関を考慮してシミュレーションを行う。気候変動の影響分析が可能な確率的世界食料モデルは他に例を見ない。また、生産動向等の予測としての社会経済シナリオ別の分析結果は、アンサンブル推計を除いてこれまでにないものである。
6) メコンデルタでの水管理の観点からの水理モデルはこれまでにも開発されているが、季節洪水および塩水遡上の両現象の影響を同時に扱える水理モデルは無かった。気候変化がメコンデルタにおける農業生産へ及ぼす影響を定量的に評価するために、本モデルを独自に開発することにより、農業生産性モデルとの結合が可能となり、環境応答機構の解明や影響評価への利用価値は高い。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献

1) 環境省地球温暖化影響・適応委員会の報告書「気候変動への賢い適応」に、本研究の成果である、わが国のコメ収量変動の県別評価結果が引用された。
2) 東アジアの食料生産変動予測について重要である、気候変化が中国の主要コメ生産地域へ及ぼす影響に関する基盤的な情報を提供した。
3) 紙（かみ）国会議員の地球温暖化が世界の食料需給に及ぼす影響に関する質問に対して、気候変動を考慮した世界食料モデルにに、1998年から各年0.05%づつ気温が上昇するとした簡易気候シナリオを想定した場合の各作物の供給量変化の計算結果を紹介した。
4) 農林水産技術会議事務局の局長が主催する「地球温暖化による影響評価・適応策の研究開発に関する検討会（第１回）」において、ここで使用した世界食糧需給モデルを用い、IPCC第4次報告書で仮定された温室効果ガス排出シナリオ（SRES）のうちA2シナリオに基づいて気温と降水量が変化する場合の各国各作物の生産量変化について報告した。
5) ベトナムの国家プロジェクトとして、気候変化がメコンデルタの農業に及ぼす影響評価がテーマの一つとなり、本モデルのコンセプトが引き継がれている。

IV.研究概要

１．序

地球温暖化を引き起こす大気中の二酸化炭素濃度の上昇は植物の光合成速度を増加させることから、ある適度な環境条件下では、バイオマスと同程度に作物の収量も増加させる効果（施肥効果）を持つと考えられる。実際、IPCC AR4は中緯度、高緯度地域における影響は熱帯などの低緯度地域に比べて比較的小さいと指摘しており、現在に比べて2～3℃程度の気温上昇であれば、温暖化および施肥効果によって中高緯度地域における農業生産性はむしろ向上すると予測している。しかし、IPCC AR4は影響がおよぶ時期、地域およびその変動の程度などについては触れていない。わが国および東南アジアの主食であるコメの安定的生産を将来にわたり確保するためには、気候変動によるコメ生産への影響について諸過程を考慮した詳細な評価および解析を行う必要がある。

２．研究目的

本研究は、わが国ならびに世界の主要コメ生産国である中国・東北部、ベトナム・メコンデルタを対象として、環境変動と生産量変動との関係に関する確率的リスク評価手法を開発し、影響評価を行うとともに、コメ市場価格の変動を通じての経済評価もあわせて行うことを目的とする。

サブサブテーマ１）、２）および４）で開発される地域別の気象変動に伴うコメ生産量変動の予測結果をサブサブテーマ３）の世界食料需給モデルに導入することにより、生産量変動に連動する国際コメ市場価格の変動に基づいた経済的評価に活用される。本研究で明らかにする具体的目標は以下のとおりである。

1) わが国のコメ収量変動と環境変動との関係を広域スケールで記述する機構的モデルを構築し、過去の統計資料などに基づいた検証を行う。その後、複数の気候変化シナリオに基づく影響の空間分布を確率的に示す。さらに、適応策による影響の緩和効果についての定量的評価を行うとともに、入力変数を絞った影響関数を作成し、世界食料需給モデルならびに総括班の統合モデルへ提供する。
2) 中国・東北部およびベトナム・メコンデルタにおけるコメ生産地域の生産変動について、将来の気候変動、異常気象の発生確率を基にリスク評価を行うために、地域性を考慮したコメ収量に対する環境応答の機構的モデルを統計データおよび現地調査結果に基づいて構築し、複数の気候変化シナリオに基づいて影響評価を行う。各地域における影響緩和の適応策を解析するとともに影響関数を提示し、世界食糧需給モデルならびに総括班の統合モデルへ提供する。
3) 既存の世界食料需給モデルを改良して、異常気象といった気候の年変動の影響を確率的に取り入れるようにするとともに、上の1) および2) で開発された各国のコメの収量関数（環境変動に対するコメ収量変動の応答を記述する）を組み込む。複数の気候変化シナリオに基づいて環境変動に伴う世界のコメ需給関係の変動リスクを経済的に評価する。

３．研究の方法

（１）気候変動によるコメ生産量変動の確率的評価手法の開発と評価に関する研究

統計資料、土地利用分布ならびに気象メッシュデータを用いて、わが国のコメ収量を県別で推定するモデル（PRYSBI: Process-based Regional rice Yield Simulator with Bayesian Inference）を作成した。モデルは収量の年々変動を再現し、かつモデルに内在する不確実性も考慮できる。こ

のPRYSBIを利用してコメ収量の地域別気候変化影響を解析するために、日本付近の将来の気候変化を表すデータセット（気候変化メッシュデータVer.2）を利用した。使用した気候変化予測データは７モデルによる合計9シナリオ、温室効果ガス排出シナリオはSRES A1BおよびA2の2つである。1981年～2000年、2046年～2065年、2081年～2100年の3期間における日別のデータを利用した。

ベトナム・メコンデルタにおける灌漑水の水理過程と水稲生育・コメ収量推計のモデルを組み合わせた統合モデルを作成した。作付暦は水田の水条件から生育可能期間と播種可能期間を判定し、そこにイネの生育や水田作業期間の配置を考慮することで決定される。水田水収支の推定では降雨や蒸発散量等に加え、灌漑排水等の水管理による影響が考慮される。灌漑排水の量や時期はイネ生育段階ごとに応じた水田水条件から判定した。ただし水路の塩分濃度が高い期間の灌漑や洪水期における高水位時の排水は行えないとした。水路塩分濃度と洪水の推定は水理モデルRiCAS（EFF課題４）で開発）で行った。メコンデルタ全域をカバーするために、ベトナム領内のデルタ地域を721区に分割した小水域ごとに行った。将来気候シナリオ(MIROC3.2hires A1B)をモデルに適用し、作付暦、収穫面積および収量の変化をシミュレートした

（２）中国におけるコメ生産量変動の確率的リスク評価に関する研究

不確実性を規定するためにマルチモデルアンサンブル法を用いて中国における水稲収量への影響を明らかにする。4つのSRES温室効果ガス排出シナリオ（A1FI、A2、B2およびB1）と5つのGCMの組み合わせによる20ケースの気候変化シナリオの結果を利用した。水稲モデルにはCERES-Rice（Ver.4.0）を利用し、このモデルを基準となる気候条件と将来予測条件に適用した。100年後の気温上昇幅が1、2、3℃となる場合を条件とし、それぞれの環境状況下で発生する収量変動の確率的予測を行った。

（３）温暖化が世界の食料市場に及ぼす影響の予測と価格変動リスク評価に関する研究

国際農林水産業研究センターの世界食料モデル(IFPSIM)は、単収、作付面積、輸出、輸入、在庫、価格連結の各関数から構成され、14の品目と32の国・地域を対象としている。対象とする作物は、小麦、トウモロコシ、他粗粒穀物、コメ、大豆であり、他粗粒穀物は、大麦、ライ麦、オート麦、キビ、ソルガムを含む。世界食料モデルにおいて、気温と降水量は外生変数であり、これらの変動が世界の農産物市場に与える影響を評価する。

気候変動影響のシミュレーションの基準年は1998年とし、2030年までを予測期間とした。推計の仮定は、1)栽培暦に変更はない；2)栽培地域は移動しない；3)単収は気象変化の影響を直接受ける；4)気温と降水量は、SRESのA2シナリオ（HadCM3）に従って変化する；5)すべてのパラメータは変化しない、とした。

（４）気候変化に伴う水資源の量と質の変動がメコンデルタのコメ生産に及ぼすリスク評価に関する研究

気候変化による海面上昇が引き起こす塩水遡上がベトナム・メコンデルタのコメ生産へ及ぼす影響について、水理モデル（MIKE 11）を利用して評価を行った。排出シナリオSRES B2に基づく気候変化状況を想定し、2030年代半ばならびに2090年代半ばにおける12月から翌年6月までの期間の流量と海水侵入の程度を推定した。

また、メコン河の流量変化が引き起こす塩水遡上ならびに洪水の影響を同時に評価する水理モデル（RiCAS）を新たに開発した。そのモデルが現在（1998～2006年）の状況を再現できることを確認した後に、将来（2090年代）の気候変化シナリオを入力して影響を調べた。将来の気候変化シナリオは、デルタ内の気温、降水量、日射量のほかに、海面の上昇度、およびデルタ上流部におけるメコン河の流量変化として与えた。ここで使用したシナリオはSRES A1Bの排出シナリオに基づいて、JMA- AGCMを利用して導出されたものである。

４．結果及び考察

（１）気候変動によるコメ生産量変動の確率的評価手法の開発と評価に関する研究

北海道・東北地域では、気温上昇（気候変化）に伴ってコメ収量は増加すると推計された。他の地域では収量はおおむね減少すると推計された。ただし、3℃付近までの気温上昇では、全国でコメ収量は現在と同程度かあるいはやや増加すると推計される。この収量増加は、おもに低温による収量低下（冷害）の発生確率が減少することに起因する。

図1はモデルPRYSBIを気候変化シナリオならびにモデルパラメータを変化させて行った850回のシミュレーション（17の気候変化シナリオ（2つのGHG排出シナリオを含む）×50のパラメータセット（モデルPRYSBIに含まれる13個のパラメータの値の組を事後分布から抽出した））結果を確率的

に表現したものである。図より、中部日本、西日本を中心として、平均収量の減少ならびに年々変動の増加の確率が大きくなると推計された。

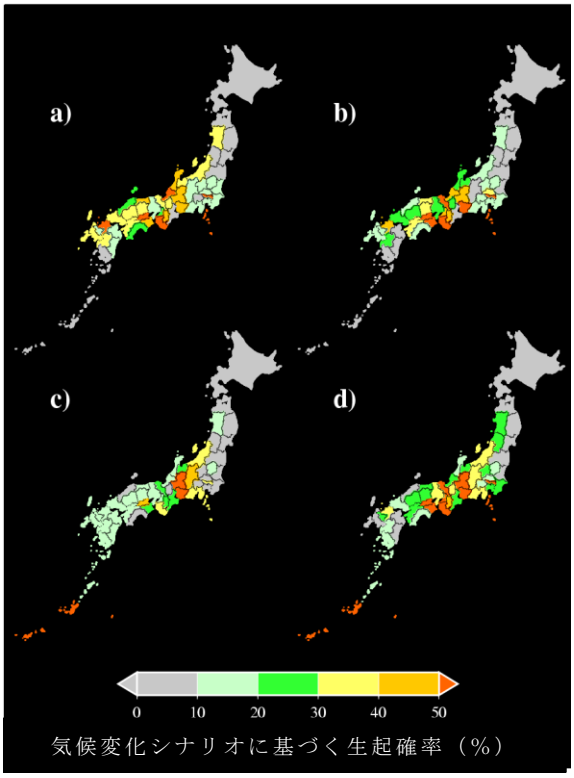
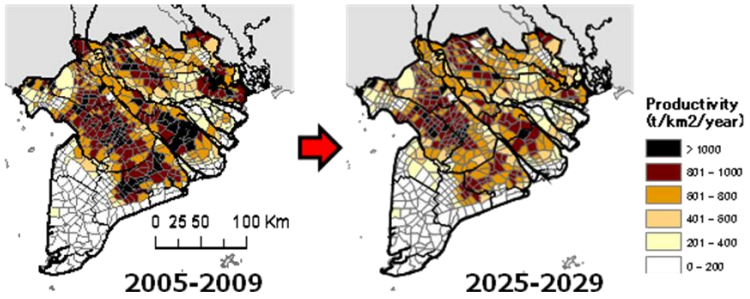


図1. 気候変化がわが国のコメ収量に及ぼす影響の確率的評価
a) 2050年代（2045-2065）の平均収量が1990年代（1981-2000）に比べて減少する確率の空間分布
b) 2090年代（2081-2100）の平均収量が1990年代（1981-2000）に比べて減少する確率の空間分布
c) 2050年代（2045-2065）の収量変動（標準偏差）が1990年代（1981-2000）に比べて増加する確率の空間分布
d) 2090年代（2081-2100）の収量変動（標準偏差）が1990年代（1981-2000）に比べて増加する確率の空間分布

収量の年々変動が増幅される原因は、不稔過程の温度応答性によって説明される。開花期における平均日最高気温が33℃以上になると高温による登熟障害が発生し、収量が急激に（指数関数的に）低下する。すなわち、開花時期の気温が高温側へシフトすることにより、たとえ気温の変動幅が現在と同じ程度であっても、高温不稔発生のしきい値付近での気温変動は、非線形応答性により増幅された収量変動として出力される。特に東海から中部、関西にかけて、気候変化に伴って太平洋高気圧が強まり、その端がこの地域にかかることにより、夏季の高温傾向が強まることが気候モデルの総観場として見られる。これは近年にも見られる特徴であり、将来、これが当該地域での収量低下および変動の増幅のさらなる原因となる可能性がある。

メコンデルタにおける水稲栽培環境およびコメ収量の環境応答推計の統合モデルに、気候シナリオ(MIROC3.2hires A1B)をモデルに適用し、作付暦、収穫面積および収量の変化をシミュレートした。その結果、洪水年と少雨（塩水遡上）年にはそれぞれ上流部と沿岸部の収穫可能面積が大きく減少したが、同時にその他の地域では作付可能面積が増加する相反関係が見られた。また、空間分布は変動するもののデルタ全体の総収穫面積の減少は緩和されることが分かった（図2）。一方、気温上昇による収量への影響は敏感であり、その結果、2020年代後半におけるベトナム・メコンデルタのコメ生産量を集計したところ現在よりも約11%低下する可能性が示された。



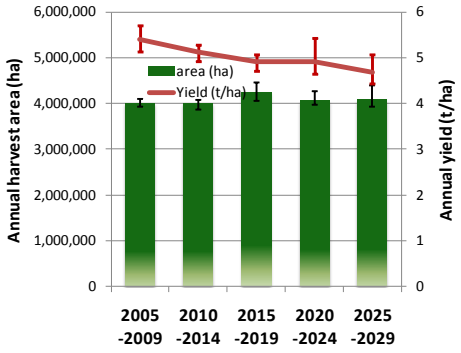


図2. メコンデルタにおける年間コメ生産の変化
上図は生産性の空間分布の変化を表す。生産性は、2期作または3期作を行っている場所では、すべての作期の生産量を面積で割った値として定義した。下図は年間合計の収穫面積と収量の変化。メコンデルタにおいて1年間に水稲栽培が可能な面積ならびにそのとき得られる収量を示す。

（２）中国におけるコメ生産量変動の確率的リスク評価に関する研究
従来コメ生産が盛んな合肥（安徽省）の解析を行った。結果を図3に示す。二酸化炭素濃度の上昇の効果を考慮しない場合には、コメ生産量はGMTが1℃、2℃、3℃の時、それぞれ65%、90%、98%となることが予測された。二酸化炭素濃度上昇の効果を考えた場合には、コメ収量はGMTが1℃、2℃、3℃になるに従い25%、40%、40%に減少すると考えられた。二酸化炭素濃度上昇を考慮しない場合と比較すると、生育期間はより短縮すると考えられた。

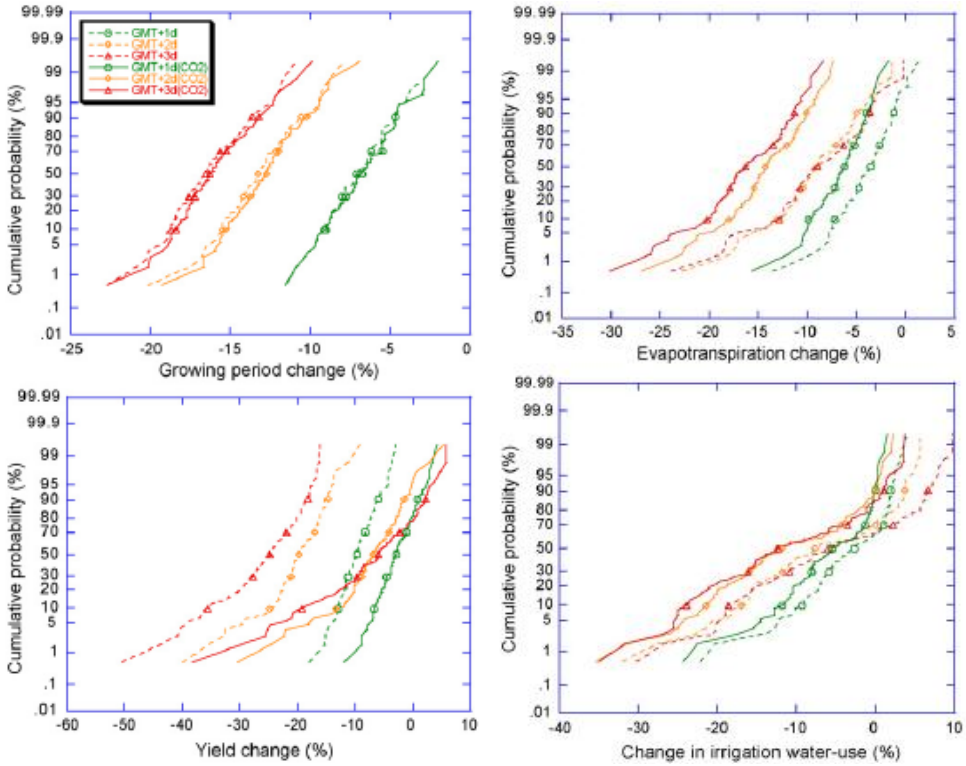


図3. 全球気温（GMT）の上昇水準が1℃、2℃、3℃であった場合における各要素の積算確率分布
地点はHefei、各図は、左上：生育期間、左下：収量、右上：蒸発散量、右下：灌漑水量を表す。GMT＋１D、GMT+2D、GMT+3Dは大気CO_2濃度上昇の効果を考慮しない場合、（CO_2）は大気CO2上昇の効果を考慮した場合を示している。

また、温暖化条件下で好適な影響が考えられる東北平原のハルビンを対象にした予備的解析を行った結果、1℃、2℃、3℃気温上昇の水準で、50%の確率でコメ収量がそれぞれ6.7%、21.2%、30.5%減少した。適した栽培方法を導入しなければ、さらに収量は低下する。また、栽培期間と灌漑が最適化される効果は昇温水準が大きいほど減少した。こうした場合の灌漑用水量はわずかに上昇することも示唆された。中国では1980年代以降、全国の水稲栽培面積が減少傾向にある一方で、東北平原一帯では著しく増大（約2倍）した。なかでも、黒龍江省における栽培面積拡大が著しく、将来

において負の影響が増すと考えられた。中国の主要栽培地域を対象に、コメ栽培期間の日平均気温偏差ΔT（℃）と収量偏差ΔY（t/ha）の関係をもとに影響関数を求めた。その結果、$\Delta Y = 3.76\Delta T - 0.0806\Delta T^2$、を得た。

（３）温暖化が世界の食料市場に及ぼす影響の予測と価格変動リスク評価に関する研究

下表には主要生産国における各作物の生産者価格について、年々変動のふれの度合いを変動係数（CV）で表して、2026年から2030年までの平均のCVを示した。価格の変動は、全ての国のすべての作物で拡大している。特に大豆は、主要生産国で20%から25%変動係数が増加し、1%から2%の増加に止まる他の作物に比べて非常に大きく変動が拡大する。大豆の過去20年間の革新的な育種技術の進展が、シミュレーションにおける価格に対する大きな反応を導いたと考えられる。相対的に価格変動の小さな小麦と他粗粒穀物を栽培する農家の気候変動に対するリスクは、小さいと言えるだろう。

コメの価格のCVはインドを除いて小さい。しかしながら、モデルの基準年である1998年において、コメの輸出量の生産量に占める比率は6.7%であり、それが20%を超える小麦や大豆に比べると極めて小さい。コメは、生産量の変動が小さいが、貿易量が小さい。そのため、コメの栽培農家は、潜在的に大きな価格変動リスクに直面していると言えよう。

表　主要作物の国内生産者価格の変動係数の変化

小麦		
国・地域	変動係数 (%)	
	2006-10	2026-30
アメリカ	3.413	4.511
ＥＵ	2.632	3.570
旧ソ連	3.443	4.546
インド	3.235	4.301
中国	2.825	3.808

トウモロコシ		
国・地域	変動係数 (%)	
	2006-10	2026-30
アメリカ	8.565	10.385
ＥＵ	4.686	5.997
東欧	9.435	11.306
ブラジル	11.794	13.700
中国	6.430	8.029

他粗粒穀物		
国・地域	変動係数 (%)	
	2006-10	2026-30
アメリカ	2.842	3.988
ＥＵ	1.536	2.254
ｵｰｽﾄﾗﾘｱ	1.837	2.667
東欧	3.974	5.370
旧ソ連	3.974	5.370

コメ		
国・地域	変動係数 (%)	
	2006-10	2026-30
アメリカ	1.327	1.925
インド	9.676	10.182
ｲﾝﾄﾞﾈｼｱ	0.367	0.407
中国	0.035	0.001
他極東	1.497	2.148

大豆		
国・地域	変動係数 (%)	
	2006-10	2026-30
アメリカ	15.049	35.609
ブラジル	20.085	45.106
ｱﾙｾﾞﾝﾁﾝ	18.476	42.178
インド	11.543	28.372
中国	8.667	22.005

世界食料モデルによるシミュレーション結果は、いくつかの国あるいは地域の作物生産は、変動の増大を伴う気温上昇によって大きな影響を受けることを示している。とくにアメリカ、ＥＵ、南アジア諸国での作物生産は、地球温暖化の影響を大きく受けるだろう。しかし、世界の合計では、大豆以外それほど大きな影響を受けないと推計している。大豆の生産量は、リーダー国であるアメリカにおいて、単収が価格に対して極めて弾力的に変化することにより、大きく変動する。

これらの結果は、気象変数と需給に関するパラメータが不変という中期のモデルに基づいている。さらに正確な結果を得るためには、長期の予測を想定したモデルが必要である。

（４）気候変化に伴う水資源の量と質の変動がメコンデルタのコメ生産に及ぼすリスク評価に関する研究

使用した気候変化シナリオでは、洪水の水位と浸水面積に関して、基準年シナリオより「将来」シナリオの洪水がはるかに大きいことが分かった。上流の流量増加は洪水期間の長期化ももたらす。ここでは、コメ栽培を不可能にする浸水深度のしきい値を0.5 mとして洪水期間を計算した。また、Khang et al.（2008）の手法と同様に、1回のコメ栽培に必要な期間を平均110日と仮定した。図4に示した「将来」シナリオにおけるコメ栽培期間の大幅な変化は、主として洪水期間の長期化によるものである。三期作が可能な地域の面積が31%から5%に減少する一方で、一期のみ作付け可能な地域の面積は21%から62%へ増加すると推定される。

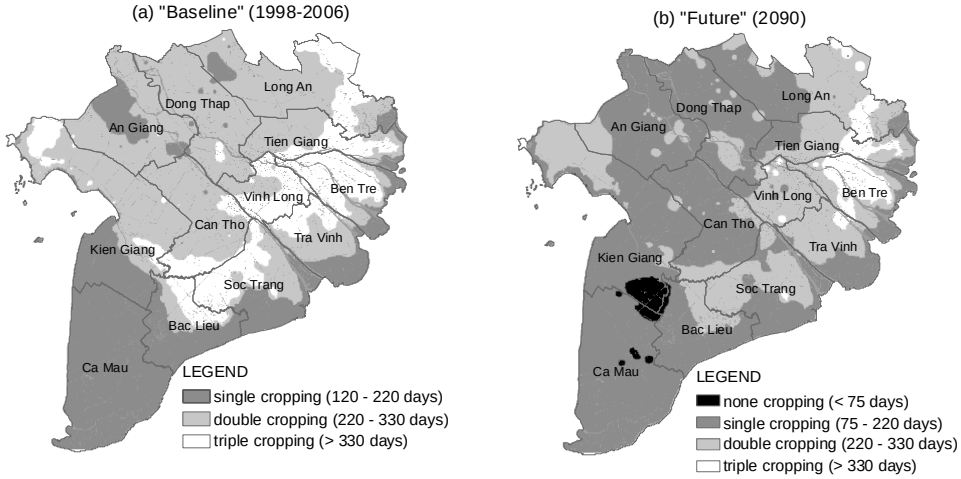


図4.「基準年」（1998～2006年）シナリオと「将来」（2090年）シナリオにおける
塩水遡上と洪水に対応して可能と考えられるコメ栽培の空間分布

SRES A1B気候変化予測に基づく「将来」シナリオを利用して、気候変化によって生ずると予想される海面上昇と上流部の流量変化がベトナム・メコンデルタにおける塩水遡上と洪水に及ぼす影響について調べた結果、ベトナム・メコンデルタ全面積の約67%が気候変化の影響を著しく受けると予想された。しかし、この評価は、一つの気候モデルのアウトプットに基づく単一のシナリオである。今後は複数のシナリオによる評価が必要である。

５．研究者略歴

課題代表者：横沢正幸
1959生まれ、東京工業大学大学院修士課程修了、博士（学術）
現在、農業環境技術研究所大気環境研究領域上席研究員

主要参画研究者
（１）①横沢正幸（同上）
②西森基貴：1966生まれ、筑波大学大学院博士課程修了、博士（理学）
現在、農業環境技術研究所大気環境研究領域主任研究員
③小寺昭彦：1972年生まれ、京都大学大学院博士課程修了、博士（農学）
現在、神戸大学大学院ポストドクター

（２）林　陽生：1948年生まれ、横浜国立大学教育学部卒業、理学博士
現在、国立大学法人筑波大学生命環境科学研究科教授

（３）①古家　淳：1961年生まれ、ミズーリ大学大学院博士課程修了、Ph.D
現在，国際農林水産業研究センター国際開発領域プロジェクトリーダー
②小林慎太郎：1974年生まれ、筑波大学大学院博士課程修了、博士（学術）
現在、国際農林水産業研究センター国際開発領域研究員

（４）Ngyuen Duy Khang：1974年生まれ、埼玉大学大学院博士課程修了、博士（工学）
現在、Sothern Institute for Water Resources Research, Vietnam, Researcher

６．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1)査読付き論文

1) Y.Hayashi, Y.Ishigooka, M.Yokozawa, H.Toritani and F.Tao : Chinese Journal of Agrometeorology, 26, 7-23 (2005)
"Use of Agro-climatic index for impact assessment under global warming on paddy rice cultivation in Japan"
2) F.Tao, M.Yokozawa, Y.Xu, Y.Hayashi and Z.Zhang : Agriculture and Forest Meteorology. 138, 82-92 (2006)

"Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000"
3) T.Sakamoto, N.V.Nhan, H.Ohno, N.Ishitsuka, and M.Yokozawa: Remote Sensing of Environment 100, 1-16 (2006)
"Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers"
4) T.Sakamoto, N.V.Nhan, H.Ohno, N.Ishitsuka, and M.Yokozawa : Remote Sensing of Environment, 100,1-16, (2006)
"Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers"
5) T.Iizumi, M.E.Hori, M.Yokozawa, H.Nakagawa, Y.Hayashi, F.Kimura : SOLA, 2,156-159, (2006)
"Impact of global warming on rice production in Japan based on five coupled atmosphere-ocean GCMs"
6) T.Iizumi, M.Nishimori, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology (2008)
"Combined Equations for Estimating Global Solar Radiation: Projection of Radiation Field over Japan under Global Warming Conditions by Statistical Downscaling"
7) T.Iizumi, M.Yokozawa, Y.Hayashi, and F.Kimura: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47, 2265-2278 (2008)
"Climate Change Impact on Rice Insurance Payouts in Japan"
8) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 64, 167-176 (2008)
"Sensitivity of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese Mekong delta-impacts on availability of irrigation water for rice cropping"
9) F.Tao, M.Yokozawa, Z.Zhang, Y.Hayashi, Y.Ishigooka: International Journal of Remote Sensing, 29, 5461-5478 (2008)
"Land surface phenology dynamics and climate variations in the North East China Transect (NECT), 1982-2000"
10) A.Kotera, T.Sakamoto, N.D.Khan, and M.Yokozawa: JARQ, 42, 267-274 (2008)
"Regional consequences of seawater intrusion on rice productivity and land use in coastal area of the Mekong river Delta"
11) T.Iizumi, M.Yokozawa, and M.Nishimori: Agricultural and Forest Meteorology, 149, 333-348 (2009)
"Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach"
12) M.Okada, T.Iizumi, M.Nishimori, and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 97-109 (2009)
"Mesh climate change data of Japan ver.2 for climate change impact assessments under IPCC SRES A1B and A2"
13) T.Iizumi, M.Yokozawa, M.Nishimori: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 179-190 (2009)
"Development of impact functions on regional paddy rice yield in Japan for integrated assessment models"
14) M.Okada, T.Iizumi, Y.Hayashi, M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 327-337 (2009)
"A climatological analysis on recent decreasing trend of rice quality in Japan"
15) 横沢正幸, 飯泉仁之直, 岡田将誌 : 地球環境 14, 199-206 (2009)
「気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価」
16) J.Furuya and S.Kobayashi : Sustainability Science .4(1), 71-79 (2009)
"Impact of global warming on agricultural product markets: stochastic world food model analysis"
17) N.D.Khang, A.Kotera, T.Iizumi, T.Sakamoto, M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 66, 11-21 (2010)
"Variations in water resources in the Vietnamese Mekong Delta in response to climate change and their impacts on rice production"

18) T.Iizumi, K.Ishida, M.Yokozawa, M.Nishimori: Agricultural Information Research, in press, (2010)
"Potential predictability of local paddy rice yield variation using a crop model with local areal information"
19) 飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横沢正幸：農業気象 in press (2010)
「統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門」

(2)査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）
なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－３　アジア地域のコメ生産に対する温暖化影響の確率的リスク評価

（１）気候変動によるコメ生産量変動の確率的評価手法の開発と評価に関する研究

独立行政法人農業環境技術研究所　大気環境研究領域　　横沢正幸・西森基貴

＜研究協力機関＞

独立行政法人農業環境技術研究所　大気環境研究領域　　小寺昭彦・飯泉仁之直

国立大学法人筑波大学大学院　　生命環境科学研究科　　岡田将誌

平成17～21年度合計予算額　36,897千円

（うち、平成21年度予算額　　6,931千円）

※予算額には、間接経費を含む。

［要旨］気象環境の変動によってもたらされるわが国の県別コメ収量の年々変動を高精度で推計するモデルを開発した。そのモデルと複数の気候変化シナリオを利用して、2050年代および2090年代における平均収量ならびに年々変動の大きさが1990年代に比べてどこでどのくらい変化するか評価した。全国を４つの地域に分けて、気候変化の指標を用いてその見通しを示すとともに、県別にも平均収量の減少と変動の増大が起きる確率の空間分布を図示した。また、移植日の移動と高温耐性品種の導入による適応策の効果もシミュレーションによって評価した。その結果、3℃程度の気温上昇までは、全国平均のコメ収量は現在と同程度かあるいはやや増加するが、それ以上になると北海道・東北地域を除いてコメ収量は減少すると推計された。しかし、収量の年々変動はすべての地域で、気温上昇(気候変化)とともに増大する傾向が見られた。影響は中部日本を中心として高温による減収と年々変動の増大が推計された。

世界の主要コメ輸出国であるベトナム・メコンデルタにおけるコメ生産変動を評価するために、メコン河の流量変化と海面水位の変化を境界条件とし、降水、気温、日射環境を入力とするコメ生産性推計統合モデルを作成した。衛星データをベースとしてモデルの検証を行った後、気候変化シナリオを入力して、当該地域のコメ生産性の時空間変化を評価した。その結果、海面上昇は塩水遡上に影響するが、予測されている海面上昇量の範囲においてはその影響は小さく、むしろメコン河の流量変動が及ぼす影響が遙かに大きいことが分かった。気候変化(MIROC3.2hires A1B)によると、洪水年と少雨（塩水遡上）年にはそれぞれ上流部と沿岸部の収穫可能面積が大きく減少したが、同時にその他の地域では作付可能面積が増加する相反関係が見られた。一方、気温上昇による収量への影響は敏感であり、2020年代後半におけるベトナム・メコンデルタのコメ生産量を集計したところ現在よりも約11%低下する可能性が示された。

［キーワード］広域推定、年々変動、確率評価、脆弱性指標、水資源変動

１．はじめに

地球規模の環境変化に対する作物の応答は、特定の地域だけではなく世界の農業生産を変化させると懸念されている。一般に、地球温暖化を引き起こす大気中の二酸化炭素濃度（大気CO_2）の上昇は植物の光合成速度を増加させることから、適度な環境条件下では、大気CO_2の上昇は、バイオマスと同程度に作物の収量も増加させる効果を持つと考えられる。実際、IPCC AR4は中緯度、高緯度地域における影響は熱帯などの低緯度地域に比べて比較的小さいと指摘しており、現在に比べて２～３℃程度の気温上昇であれば、温暖化による好影響を受けて中高緯度地域における農業生産性はむしろ向上すると予測している。しかし、IPCC AR4は影響がおよぶ時期、地域およびその程度の詳細については触れていない。とりわけ、わが国の主食であるコメについては、出穂後の開花・受粉時期に高温に遭遇すると稔実歩合が低下し（高温不稔）、収量は激減する可能性が指摘されているが、そのような詳細な過程を考慮した影響の見通しは示されていない。このことから、わが国および東南アジアの主食であるコメの安定的生産を将来に渡って確保するためには、気候変動によるコメ生産への影響を詳細な諸過程を考慮した評価・解析を行う必要がある。

２．研究目的

本課題は、わが国と世界の主要コメ輸出国であるベトナムを対象として、温暖化とそれに付随する異常気象環境の出現頻度に基づいて、コメの生産および供給に関する安定性の観点から危険な温暖化水準ならびに気象変動の幅について影響評価を行うことを目的とする。その結果は、サブサブテーマ２）で対象とする中国におけるコメ生産量変動の予測結果とあわせて、サブサブテーマ３）の世界食料需給モデルに導入することにより、生産量変動に連動する国際コメ市場価格の変動に基づいた経済的影響評価に利用される。

３．研究方法

（１）わが国のコメ生産に対する温暖化影響の確率的評価

コメ収量の環境応答を広域で推計し、かつ適応策を定量的に勘案するためには機構的なモデルが必要である。本研究では、気象環境条件から県平均コメ収量の年々変動を記述する広域コメ収量推定モデル[1)]（PRYSBI: Process-based Regional rice Yield Simulator with Bayesian Inference）を作成した。既存の作物生育・収量予測モデルは圃場スケールを対象とした研究に用いられ、モデルパラメータは品種単位、地域単位で決定されている。そのため、モデルの駆動には品種、栽培管理などの詳細な情報が必要であり、日本全国を広域的に評価するには適していない。ここでは、代表的なコメ収量推計モデルであるSIMRIW[2)]をベースとして、生育や収量の年次変動、地域間差異の違いを反映させ、かつ広域スケールの適用を行うために、モデルパラメータを確率変数として都道府県単位で推定を行った。具体的なモデル作成手順は以下のとおりである。

- 国土数値情報（1km×1kmグリッド）を用いて対象県における水田分布を抽出する。
- アメダスメッシュ気象データ[3)]を利用して、上で抽出した水田グリッドにおける平均の気象要素（日別の最高・最低気温および日射量）を計算する。大気中二酸化炭素濃度は時間変化するが地域分布は無いものとする。
- 対象期間を1979～2003年の25年間として、上で作成した県平均気象要素をモデルに入力して、全国の都道府県別農林統計に基づく平均移植日、出穂日、収穫日および収量の時系列データと比較しながら、ベイズ推定を用いたモデルパラメータの推定を行った。ただし、パラメータの

推定は対象期間内の奇数年のデータを用いて行い、偶数年も含めてモデルの検証を行った。

モデルPRYSBIは、県の平均ではあるが過去の品種特性、収量変化の実際を統計的に反映し、かつ作物の環境応答の機構を取り込んでいる。また、ベイズ推定で得られたモデルに含まれるパラメータの事後分布に基づいて、パラメータ値の組を変化させて計算したパラメータ摂動アンサンブル[1)]の平均を取ることにより、収量の年々変動を定量的に記述することが可能である。

最終的な確率的影響評価は、複数の気候変化シナリオによる不確実性およびパラメータ摂動アンサンブルによる不確実性の同時確率分布として表現することにより行うことができる。

（２）ベトナムにおけるコメ生産量変動の解析

ベトナムの輸出用コメの主要生産地域であるメコンデルタでは、コメ生産を制限する環境条件はメコン河の流量変化ならびに海面上昇による「塩水遡上」と「洪水」である。それらの環境変化がコメ生産に及ぼす影響は、直接的に収量だけではなく、作付期間または作付回数の減少として大きく現れる。塩水遡上あるいは洪水と降雨の季節パターンは、水稲栽培における水利用可能期間、すなわち栽培可能期間を決定する。ある地域の栽培可能期間（日数）が、水稲が生育しコメ収穫までに要する日数に対して十分な余裕期間（マージン）を持つならば、水利用可能期間の変動に対して頑強であるが、栽培可能期間をぎりぎりまで利用して栽培せざるを得ないようなマージンの小さい地域は、環境変動によるわずかな栽培可能期間の短縮でも栽培不可能となる脆弱な地域と考えられる。このマージン期間をコメ生産の脆弱性指標SMC（Safe Margin for Cropping）として定式化[4)]し、それをメコンデルタの水理過程のモデルと組み合わせた統合モデルを作成した。

統合モデルの概要は次の通りである。作付暦は水田の水条件から生育可能期間と播種可能期間を判定し、そこにイネの生育や水田作業期間の配置を考慮することで決定される。水田水収支の推定では降雨や蒸発散量等に加え、灌漑排水等の水管理による影響が考慮される。灌漑排水の量や時期はイネ生育段階ごとに応じた水田水条件から判定した。ただし水路の塩分濃度が高い期間の灌漑や洪水期における高水位時の排水は行えないとした。水路塩分濃度と洪水の推定は水理モデルRiCAS（EFF課題４）で開発[5)]）で推計を行った。メコンデルタ全域をカバーするために、ベトナム領内のデルタ地域を721 区に分割した小水域ごとに行った。

４．結果・考察

（１）気候変化によるわが国のコメ生産への影響

はじめにモデルPRYSBIによるコメ収量推定値の精度を定量化するために、全国を北海道・東北、関東・甲信越・北陸、東海・中部・近畿、中国・四国・九州の4つのブロックに分けて、収量の年次変動を統計値と比較した。パラメータ摂動アンサンブルの平均を用いることによって、収量の年々変動はよく再現され、全国平均で出穂日は3日以内、収量は0.2t/ha以下の精度で推定できることが示された。

次にPRYSBIを利用してコメ収量の地域別気候変化影響を解析するために、日本付近の将来の気候変化を表すデータセット[6)]（気候変化メッシュデータVer.2）を利用した。使用した気候変化予測データは７モデルによる合計９シナリオ、温室効果ガス排出シナリオはSRES A1BおよびA2の2つである。1981年～2000年、2046年～2065年、2081年～2100年の3期間における日別のデータを利用した。

図1は気候変化が地域平均コメ収量へ及ぼす影響を生育期間（5月～10月）の平均気温の上昇度に対して示したものである。ここでは、温室効果ガスの排出シナリオも含めて、複数の気候変化シナリオを利用しており、気候変化の仕方にばらつきがあるために、現在（1981年～2000年の平均気温）からの気温変化分を指標として、その影響を表現している。各気候変化シナリオをPRYSBIに入力し、1981年～2000年、2046年～2065年、2081年～2100年の年々の地域平均コメ収量を推計し、各3期間の20年平均値および変動係数と生育期間平均気温との関係をプロットしたものである。排出シナリオが2ケース、気候モデルが9ケース、推計期間が2期間（2046年～2065年、2081年～2100年）であるから全部で36ケースの推計結果がプロットされている。横軸は生育期間平均気温だけを示しているが、日別の気温、日射の変動が含まれている。この推計は、栽培管理などの仮定は現行のままであるとした場合である。図より北海道・東北地域（NJ）では、気温上昇（気候変化）に伴ってコメ収量は増加すると推計された。他の地域では収量はおおむね減少すると推計された。ただし、3℃付近までの気温上昇では、全国でコメ収量は現在と同程度かあるいはやや増加すると推計される。この収量増加は、おもに低温による収量低下（冷害）の発生確率が減少することに起因する。

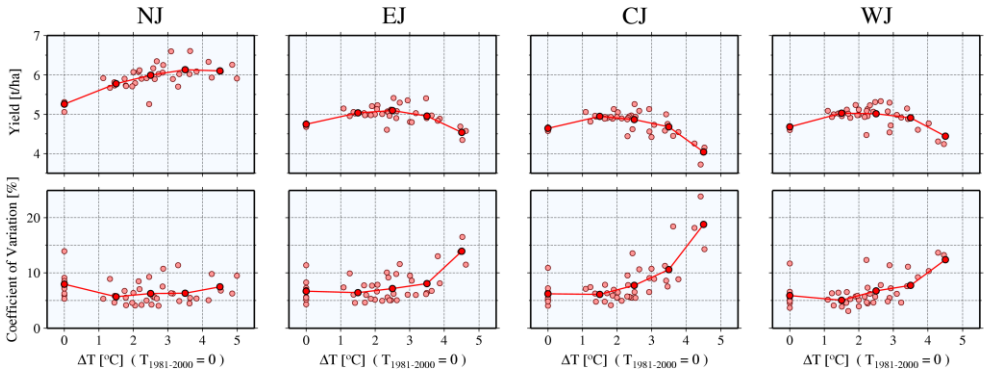


図1. 暖候期（5月から10月）平均気温の上昇度に対する地域平均収量と変動係数の変化
気候変化シナリオ34ケースについての広域コメ収量予測モデルによる推計結果をプロットした。実線はそれらの平均値を表す。気温の上昇度は暖候期平均気温の1981年～2000年における平均値に対する上昇度として示している。図の略号はNJ：北海道・東北、EJ：関東・甲信越・北陸、CJ：東海・中部・近畿、WJ：中国・四国・九州の4つの地域を表す。

図2はモデルPRYSBIを気候変化シナリオならびにモデルパラメータを変化させて行った850回のシミュレーション（17の気候変化シナリオ（2つのGHG排出シナリオを含む）×50のパラメータセット（モデルPRYSBIに含まれる13個のパラメータの値の組を事後分布から抽出した））結果を確率的に表現したものである。図より、中部日本、西日本を中心として、平均収量の減少ならびに年々変動の増加の確率が大きくなると推計された。

収量の年々変動が増幅される原因は、不稔過程の温度応答性によって説明される。開花期における平均日最高気温が33℃以上になると高温による登熟障害が発生し、収量が急激に（指数関数的に）低下する。すなわち、開花時期の気温が高温側へシフトすることにより、たとえ気温の変動幅が現在と同じ程度であっても、高温不稔発生のしきい値付近での気温変動は、非線形応答性により増幅された収量変動として出力される。特に東海から中部、関西にかけて、気候変化に伴

って太平洋高気圧が強まり、その端がこの地域にかかることにより、夏季の高温傾向が強まることが気候モデルの総観場として見られる。これは近年にも見られる特徴であり、将来、これが当該地域での収量低下および変動の増幅のさらなる原因となる可能性がある。

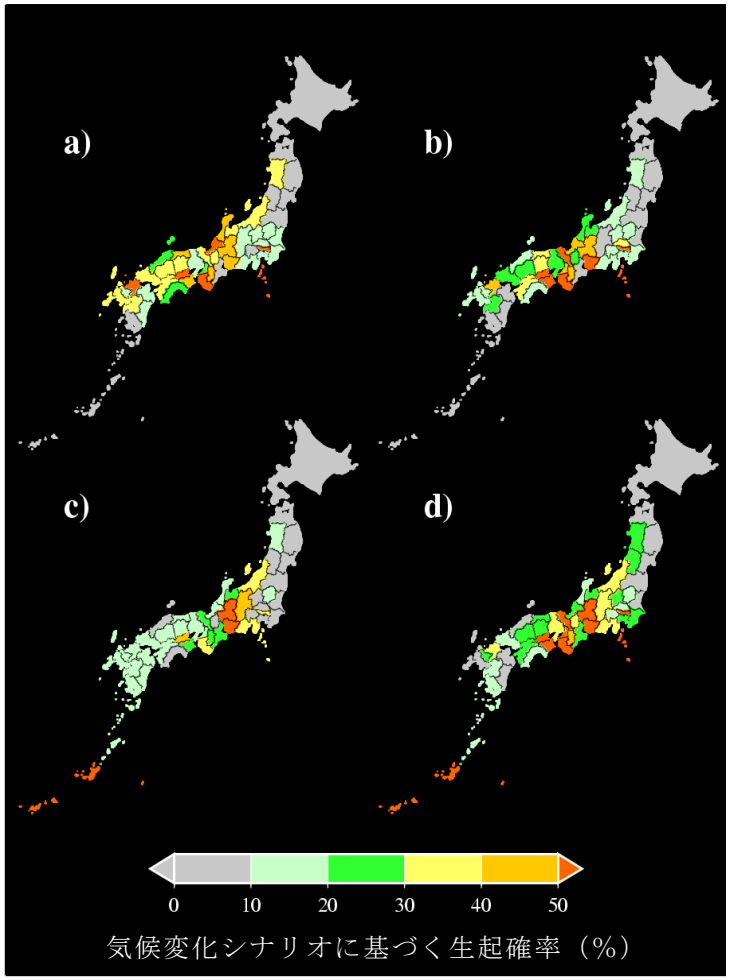


図2. 気候変化がわが国のコメ収量に及ぼす影響の確率的評価
a) 2050年代（2045-2065）の平均収量が1990年代（1981-2000）に比べて減少する確率の空間分布、b) 2090年代（2081-2100）の平均収量が1990年代（1981-2000）に比べて減少する確率の空間分布、c) 2050年代（2045-2065）の収量変動（標準偏差）が1990年代（1981-2000）に比べて増加する確率の空間分布、d) 2090年代（2081-2100）の収量変動（標準偏差）が1990年代（1981-2000）に比べて増加する確率の空間分布

適応策についてもモデルに基づいて解析した。本研究で考慮した適応策は、移植日の移動（田植えの時期をずらして稲の生育、生長にとって重要な時期の高温などの影響を避ける）および高温耐性品種を導入した場合の２つである。移植日移動のシミュレーションは、各県における現行の移植日と比べて、−21，−14，−7，+7，+14，+21日移動させた計算を行い、気候変化による最終収量の影響が最も小さい場合を選択するとした。ただし、すべての場合で現在より収量が減少する際には、その減少幅が最も小さい場合をとることにした。高温耐性品種の導入シミュレーションは、高温不稔応答モデルのパラメータを変化させることにより行った。その結果、北・東日本

では移植日の移動、西・南日本では高温耐性品種の導入が最も効果的であることがシミュレーション結果から示唆された。

（２）気候変化によるメコンデルタのコメ生産への影響

１）水稲作付・水理過程統合モデルの検証

統合モデルによる環境条件からの作付暦の推定に関する検証は、衛星画像（MODIS 8-day composite）の解析から得られた植生指数（EVI）の時間変化および出穂日の判別結果[7]と、モデルから推定された葉面積指数LAIの時間変化および出穂日を比較することで行った。年々の環境変動に伴う作付暦の変動が広域でもよく再現され、2002～2006年における出穂日のモデル推定値と衛星画像判別値との差（RMSE）はデルタ上流域（3地点）、中流部（3地点）、沿岸域（4地点）においてそれぞれ、17.6, 11.2, 13.0日であった。

２）気候変化による影響評価

GCMでは海面上昇量の全球平均値は2090年代で32.7cm（MIROC3.2hires A1B)と予測されているが地域間差は大きく、同年代のメコンデルタ沿岸沖では4.5cmとなる。海面上昇は塩水遡上に影響するものの、予測されている海面上昇量の範囲においてはその影響は小さく、むしろメコン河の流量変動が及ぼす影響が遙かに大きいことが分かった。海面上昇量を予測よりも大きく52cmと仮定したシミュレーションにおいてもこの傾向は変わらなかった。

次に過去および将来気候シナリオ(MIROC3.2hires A1B)をモデルに適用し、作付暦、収穫面積および収量の変化をシミュレートしたところ、洪水年と少雨（塩水遡上）年にはそれぞれ上流部と沿岸部の収穫可能面積が大きく減少したが、同時にその他の地域では作付可能面積が増加する相反関係が見られ、その結果、空間分布は変動するもののデルタ全体の総収穫面積の減少は緩和されることが分かった（図3）。一方、気温上昇による収量への影響は敏感であり、その結果、2020年代後半におけるベトナム・メコンデルタのコメ生産量を集計したところ現在よりも約11％低下する可能性が示された（図4）。

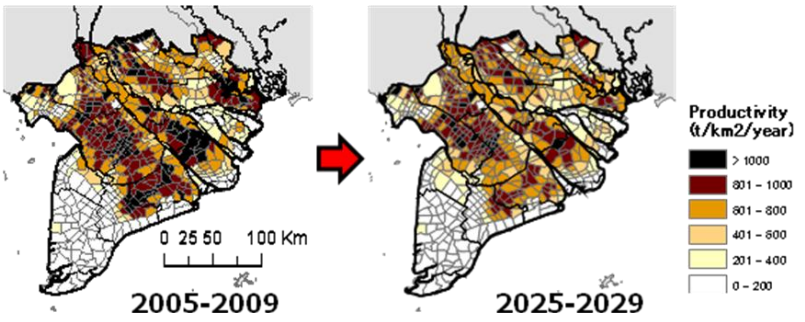


図3. メコンデルタにおける年間コメ生産性分布の変化

2期作または3期作を行っている場所は、すべての作期の生産量を面積で割った値を示した。

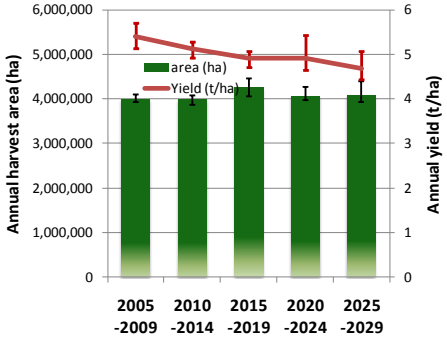


図4. 年間の収穫面積と収量の変化

メコンデルタにおいて1年間に水稲栽培が可能な面積ならびにそのとき得られる収量を示す。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究で開発されたモデルPRYSBIは、既存の作物生育・収量予測モデルではできなかった気象環境の変動に伴うコメ収量の年々変動を再現する。これにより、平均的な気候変化影響だけでなく、農業生産に重要な異常気象などによる年々変動の影響を評価することが可能となった。

世界の有数の輸出用コメ生産地域であるベトナムメコンデルタにおける水資源、水質ならびに水稲栽培の状況を環境データから推計する初めての統合モデルシステムを作成した。これにより、対象地域のコメ生産に関わる要因の相互関係と環境変動の影響の解析が可能となった。

（２）地球環境政策への貢献

環境省地球温暖化影響・適応委員会の報告書「気候変動への賢い適応」に、本研究の成果である、わが国のコメ収量変動の県別評価結果が引用された。

６．引用文献

1) T.Iizumi, M.Yokozawa and M.Nishimori: Agricultural and Forest Meteorology, 149, 333-348 (2009)
"Parameter estimation and uncertainty analysis of a largescale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach"

2) T.Horie, H.Nakagawa, HGS. Centeno and M.Kropff: "The rice crop simulation model SIMRIW and its testing", In: Modeling the impact of climate change on rice in Asia [Matthews, R. B. et al. (eds.)]. CAB International, Oxon, 51-66 (1995)

3) 清野 豁：農業気象, 48, 379-383 (1993)
「アメダスデータのメッシュ化について」

4) A.Kotera, T.Sakamoto, N.D.Khan and M.Yokozawa: JARQ, 42, 267-274 (2008)
"Regional consequences of seawater intrusion on rice productivity and land use in coastal area of the Mekong river Delta"

5) N.D.Khang, A.Kotera, T.Iizumi, T.Sakamoto and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 66, 11-21 (2010)
"Variations in water resources in the Vietnamese Mekong Delta in response to climate

change and their impacts on rice production″

6) M.Okada, T.Iizumi, M.Nishimori and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 97-109 (2009)
″Mesh climate change data of Japan Ver.2 for climate change impact assessments under IPCC SRES A1B and A2″

7) T.Sakamoto, NV.Nhan, H.Ohono, N.Ishitsuka and M.Yokozawa: Remote Sensing of Environment, 100, 1-16 (2006)
″Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers″

７．国際共同研究等の状況

「塩水灌漑がイネの生育と収量に及ぼす影響」

カウンターパート：Nguyen The Cuong

組織名：Cuu Long Delta Rice Research Institute, Can Tho, Vietnam

連携状況：メコンデルタ水路および水田圃場における水位、塩分濃度、Ｐｈ、気象環境などの現地観測を共同で行った。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) T.Sakamoto, N.V.Nhan, H.Ohno, N.Ishitsuka and M.Yokozawa: Remote Sensing of Environment, 100, 1-16 (2006)
″Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers″

2) T.Sakamoto, N.V.Nhan, H.Ohno, N.Ishitsuka and M.Yokozawa：Remote Sensing of Environment, 100,1-16, (2006)
″Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers″

3) T.Iizumi, ME.Hori, M.Yokozawa, H.Nakagawa, Y.Hayashi and F.Kimura：SOLA, 2,156-159, (2006)
″Impact of global warming on rice production in Japan based on five coupled atmosphere-ocean GCMs″

4) T.Iizumi, M.Nishimori and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 64, 9-23, (2008)
“Combined Equations for Estimating Global Solar Radiation: Projection of Radiation Field over Japan under Global Warming Conditions by Statistical Downscaling”

5) T.Iizumi, M.Yokozawa, Y.Hayashi and F.Kimura: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47, 2265-2278 (2008)
″Climate Change Impact on Rice Insurance Payouts in Japan″

6) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 64, 167-176 (2008)
″Sensitivity of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese Mekong delta-impacts on availability of irrigation water for rice cropping″

7) F.Tao, M.Yokozawa, Z.Zhang, Y.Hayashi and Y.Ishigooka: International Journal of Remote Sensing, 29, 5461-5478 (2008)
″Land surface phenology dynamics and climate variations in the North East China Transect (NECT), 1982-2000″

8) A.Kotera, T.Sakamoto, N.D.Khan and M.Yokozawa: JARQ, 42, 267-274 (2008)
″Regional consequences of seawater intrusion on rice productivity and land use in coastal area of the Mekong river Delta″

9) T.Iizumi, M.Yokozawa and M.Nishimori: Agricultural and Forest Meteorology, 149, 333-348 (2009)
″Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach″

10) M.Okada, T.Iizumi, M.Nishimori and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 97-109 (2009)
″Mesh climate change data of Japan ver.2 for climate change impact assessments under IPCC SRES A1B and A2″

11) T.Iizumi, M.Yokozawa and M.Nishimori: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 179-190 (2009)
″Development of impact functions on regional paddy rice yield in Japan for integrated assessment models″

12) M.Okada, T.Iizumi, Y.Hayashi and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 327-337 (2009)
″A climatological analysis on recent decreasing trend of rice quality in Japan″

13) 横沢正幸, 飯泉仁之直, 岡田将誌：地球環境 14, 199-206 (2009)
「気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価」

14) N.D.Khang, A.Kotera, T.Iizumi, T.Sakamoto and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 66, 11-21 (2010)
″Variations in water resources in the Vietnamese Mekong Delta in response to climate change and their impacts on rice production″

15) T.Iizumi, K.Ishida, M.Yokozawa and M.Nishimori: Agricultural Information Research, 19, 36-42 (2010)
″Potential predictability of local paddy rice yield variation using a crop model with local areal information″

16) 飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横沢正幸：農業気象, 66, 131-143 (2010)
「統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門」

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) A.Kotera, T.Sakamoto, N.D.Khang and M.Yokozawa: Proceedings of CLRRI-IRRI International Conference "Better Rice, Better Environment and Better Life", 49-58 (2007)
"Salinity intrusion affecting rice production in the coastal area of the Mekong Delta"
2) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2008), (2007)
"Sensitivity of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese Mekong Delta – Impacts on potential irrigation water"
3) 横沢正幸、陶福禄、飯泉仁之直：国際農林業協力 (2007)
「気候変動が農業へ及ぼす影響-日本と中国への影響を中心として-」
4) 横沢正幸：土木学会誌、93、24-25 (2008)
「気候変動により食料供給はどう変わるのか？」
5) 横沢正幸: 食べもの文化-安全なお米を食べ続けたい、芽ばえ社(396増刊号)、83-95 (2008)
「地球温暖化　コメ作りへの影響と対応策」
6) 横沢正幸：週刊農林、2058、16-17、2059、4-5 (2009)
「気候変化と農業生産」

（２）口頭発表（学会）

1) 横沢正幸、飯泉仁之直、坂本利弘、小寺昭彦：農業環境工学合同大会 (2005)
「県別コメ収量の推定モデル」
2) T.Sakamoto, A.Kotera, N.Ishitsuka, H.Ohno, N.V.Nguyen and M.Yokozawa: The 26th Asian Conference on Remote Sensing (2005)
"Application of wavelet analysis to the multi-temporal MODIS data for detecting the rice phenology"
3) 小寺昭彦、坂本利弘、横沢正幸：日本熱帯農業学会第99回講演会 (2006)
「ベトナム紅河デルタにおける水稲栽培時期の空間的把握」
4) A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa：International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences 2006 (2006)
"Detecting spatial pattern of rice cropping schedules using time-series satellite images in the Red River Delta, Vietnam."
5) 飯泉 仁之直、横沢正幸、林陽生、木村富士男：日本農業気象学会春季大会 (2007)
「温暖化による水稲保険金額の変化」
6) 飯泉仁之直、横沢正幸、西森基貴：農業環境工学関連学会2007年合同大会 (2007)
「マルコフ連鎖モンテカルロ法による広域水稲収量モデルのパラメータ推定」
7) 飯泉仁之直、西森基貴、横沢正幸：日本気象学会2007年度秋季大会(2007)
「温暖化による日射環境変化推定に用いる統計的ダウンスケーリング手法の構築」
8) 小寺昭彦、坂本利弘、横沢正幸：日本熱帯農業学会第100回講演会 (2007)
「ベトナム・メコンデルタにおける塩水遡上が水稲生産に及ぼしている影響」

9) 坂本利弘、小寺昭彦、大野宏之、横沢正幸：システム農学会2007年度　春季シンポジウム・一般研究発表会（2007）
「MODIS時系列解析によるメコンデルタ洪水の時空間変動特性把握」
10) 飯泉仁之直、西森基貴、横沢正幸：日本農業気象学会2008年度全国大会（2008）
「気候モデルバイアスに対する影響評価モデルの感度分析」
11) 岡田将誌、飯泉仁之直、西森基貴、横沢正幸：日本農業気象学会2008年度全国大会（2008）
「気候変化が日本へ及ぼす影響：SRES排出シナリオに基づく気候変化メッシュデータ」
12) 岡田将誌、飯泉仁之直、林陽生、横沢正幸：日本農業気象学会・中国四国支部会(2008)
「気象要因が広域スケールでの一等米比率変動に及ぼす影響」
13) 小寺昭彦、グエン-ズイ-カン、坂本利弘、横沢正幸：熱帯農業研究（2008）
「ベトナム・メコンデルタの塩水遡上による水稲生産の脆弱性」
14) 坂本利弘、Cao V Phung、小寺昭彦、Nguyen D Khang、横沢正幸：システム農学会（2008）
「MODIS時系列データを用いたメコンデルタにおけるファーミングシステムの変化把握」
15) M.Yokozawa, T.Iizumi, M.Nishimori, Y.Hijioka, K.Takahashi and H.Harasawa: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2008) (2008)
“Assessing climate change impacts on rice production in Japan under stabilization levels of atmospheric GHG concentration”
16) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2008) (2008)
“Sensitivity of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese Mekong Delta - Impacts on potential irrigation water”
17) T.Iizumi, M.Nishimori, M.Yokozawa, A.Kotera and N.D.Khang: AGU Fall Meeting (2008)
“Estimation of daily global solar radiation in Vietnamese Mekong Delta area: A combinational application of statistical downscaling method and Bayesian inference”
18) 小寺昭彦、グエン・ズイ・カン、坂本利弘、飯泉仁之直、横沢正幸：日本熱帯農業学会第105回講演会(2009)
「ベトナム・メコンデルタにおける水稲作付暦の広域推定と水資源環境の変動による影響」
19) 横沢正幸、小寺昭彦、Nguyen Duy Khang、坂本利弘、飯泉仁之直：日本農業気象学会2009年全国大会（2009）
「ベトナムメコンデルタにおける水資源環境変動による水稲生産の脆弱性」
20) M.Okada, T.Iizumi, Y.Hayashi and M.Yokozawa: International Symposium on Agricultural Meterology (ISAM2009) (2009)
“A statistical analysis on decreasing trend in rice quality under recent climate shifts”
21) M.Yokozawa, T.Iizumi, M.Nishimori, K.Takahashi, Y.Hijioka and H.Harasawa: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2009) (2009)
“Assessing climate change impacts on rice production in Japan under stabilization levels of atmospheric GHG concentration”

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

1) 横沢正幸（2006)「気候変動は農業にどのような影響を及ぼすのか」、環境省地球環境研究総合推進費一般公開シンポジウム「地球温暖化から未来をのぞく」、2006年11月30日、朝日ホール

2) 横沢正幸（2008）「農業影響-コメ収量変動の推計と適応-」、環境省地球環境研究総合推進費一般公開シンポジウム「地球温暖化の日本への影響-現状と将来予測、その対策と賢い適応に向けて-」，2008年10月30日、ニッショーホール

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 「日経エコロジー」（2007年５月16日）
2) 「三菱農機だより」（2007年７月31日）
3) 朝日新聞（2007年８月28日）
4) ＮＨＫ（つながるテレビ＠ヒューマン）（2007年８月30日）
5) 朝日新聞（2007年８月30日、九州版）
6) ＮＨＫ（クローズアップ現代）（2007年９月10日）
7) 朝日新聞（2007年９月28日、北海道版）
8) ＮＨＫ（首都圏ネットワーク）（2007年12月20日）
9) 西日本新聞（2008年１月23日）
10) アースワークス（「日経エコロジー」取材、2008年4月10日）
11) 赤旗日曜版（2008年6月3日）
12) NHK（2008年6月4日）
13) 日本農業新聞（2008年6月30日）
14) 日本農業新聞（2008年7月1日）
15) 日本経済新聞（2008年7月11日）
16) 朝日新聞（2008年7月15日）
17) 東京新聞（2008年7月15日）
18) 日本経済新聞（2008年8月27日）
19) 朝日小学生新聞（2008年9月3日）

（６）その他

なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－３アジア地域のコメ生産に対する温暖化影響の確率的リスク評価

（２）　中国におけるコメ生産量変動の確率的リスク評価に関する研究

国立大学法人筑波大学大学院 生命環境科学研究科持続環境学専攻　林　陽生

〈研究協力機関〉

国立大学法人筑波大学大学院　生命環境科学研究科 陶 福禄・岡田 将誌・沼田 良貴

平成17年～21年度合計予算額 25,517千円

うち、平成21年度予算額　　4,783千円）

※予算には、間接経費を含む。

［要旨］中華人民共和国を対象に、地球温暖化による気温上昇幅について1℃、2℃、3℃という3段階の水準を設定し、それぞれの水準の環境が実現される可能性を確率的に考慮してコメ生産量と水利用の変動について評価した。特に温暖化条件下で好適な影響が考えられる東北平原のハルビンを対象にした予備的解析を行った結果、1℃、2℃、3℃気温上昇の水準で、50%の確率でコメ収量がそれぞれ6.7%、21.2%、30.5%減少した。適した栽培方法を導入しなければ、さらに収量は低下する。また、栽培期間と灌漑が最適化される効果は昇温水準が大きいほど減少した。こうした場合の灌漑用水量はわずかに上昇することも示唆された。中国では1980年代以降、水稲栽培面積が減少傾向にある一方で、東北平原一帯では著しく増大（約２倍）した。なかでも、黒龍江省における栽培面積拡大が著しく、将来において負の影響が増すと考えられた。主要な生産地帯を7地域選択し詳細な検討を加えた。その結果、CO_2濃度上昇の効果を考慮しない場合には、1℃の気温上昇に対して50％の確率で水稲収量減少が起こり、この確率は3℃の上昇では75％に増大した。CO_2濃度上昇の効果が加わると、各地域の収量はいずれも50％の確率で、1℃の上昇で-6.7%～-6.8%、2℃の上昇で-14.6%～-13.2%、3℃の上昇で-17.4%～-25.7%の範囲で変化した。文献調査から、東北平原周辺で最も考慮すべき問題の一つは田植え時期の水不足による干ばつ被害であると考えられた。現地調査を行った結果、2月から6月の期間に干ばつの危険性が高く、農業用水の合理的な管理がコメ生産に重要な役割を果たすことが明らかになった。中国の主要栽培地域を対象に、コメ栽培期間の日平均気温偏差ΔT（℃）と収量偏差ΔY（t/ha）の関係をもとに影響関数を求めた。その結果、$\Delta Y = 3.76\Delta T - 0.0806\Delta T^2$、を得た。

［キーワード］影響評価、中国東北平原、水稲栽培、確率的予測、水資源

１．はじめに

アジアのコメ生産は世界の食糧生産と食糧市場にとって重要である。世界のコメの約90%以上がアジアで生産され消費されている。中国のコメ生産量は、国の穀物生産量の40%以上を占め、この

量は世界の約36%に相当する。コメ生産は、今後10年間に世界の食糧生産を維持するために生産量を伸ばす必要があると指摘されている。一方コメ生産は、地球温暖化の影響、極端な気象すなわち異常気象、水資源不足、農家の適応力の限界を超す環境変動などの影響を強く受けている（Tao et al.[1]，2006）。こうした研究を行うためには、将来の気候影響の不確実性を精度よく取り扱うことが重要であり、この視点に基づいて本研究を行うところに価値がある。また、気候変化の議論の複雑性や、国際的な施策への反映といった観点からも、不確実性の議論を含んだ注意深い考察が欠かせない（Pittock et al.[2]，2001；Mastrandrea and Schneider[3]，2004）。

２．研究目的

世界規模の気温上昇幅（GMT）について、１℃、２℃、３℃という3段階の水準を設定し、それぞれの水準の環境が実現される可能性を確率的に考慮し、中国のコメ生産量と水利用がどのように変わるかを評価する。中国における主要なコメ生産を研究対象とするが、特に温暖化条件下で好適な影響が考えられる東北平原について検討を加える。また中国全土を対象として、気温上昇がコメ収量へ及ぼす影響を影響関数の形式で示す。

３．研究方法

（１）研究対象地点

中国の主要なコメ生産地域を代表する７地点を選択して解析した。それらは、ハルビン(Harbin)、瀋陽（Shenyang）、北京（Beijing）、合肥（Hefei）、南昌（Nanchang）、長沙（Changsha）、広州（Guangshou）である。

（２）確率的評価の基準

不確実性を規定するためにマルチモデルアンサンブル法を用いる。4つのSRES温室効果ガス排出シナリオ（A1FI、A2、B2、B1）と5つのGCMの組み合わせによる合計20ケースの気候変化シナリオの結果を利用した。20ケースの予測結果の範囲は、2001年IPCC第3次評価報告書に示された温暖化幅のほぼ93%を占める。水稲モデルにはCERES-Rice（Ver.4.0）を利用し、このモデルを将来予測条件に適用した。影響を評価する場合は、100年後の気温上昇幅が1、2、3℃となる3種の場合を想定し、それらが発現する確率を求めて収量変動への影響を考察した。

（３）作物モデルと適応策

コメ収量予測には、CERES-Rice 4.0モデルを利用した。適応策を設定する場合としない場合を区別して実験を行った。本研究では適応策としては、最適な栽培期間、最適な灌漑用水量、最適な肥料投入量を考慮した。

（４）影響関数

中国でコメを栽培している代表的な省（16省）を対象に、栽培期間（月単位）の平均気温と収量との関係を明らかにするため、1950年～2000年（50年間）の水稲収量と気象データを収集した。前者は農業科学院のデータベースから、後者は中国気象局の統計年報から引用した。

４．結果・考察

（１）コメ生産量と水利用に関する確率的評価

１）華中

中国における最大のコメ生産地帯に位置するHefei（合肥、安徽省）における解析結果を図1に示す。大気CO_2濃度の上昇の効果を考慮しない場合には、コメ生産量はGMTが1℃、2℃、3℃に増加すると、それぞれ65%、90%、98%となることが予測される。生育期間はどのような条件でも100%の確率で減少すると考えられる。また、その減少程度は気温上昇の水準が高いほど顕著になる。

蒸発散量（ET）について50パーセンタイルの状態への変化をみると、GTMが1℃、2℃、3℃と上昇するに従い、それぞれ-1.5%、-7.4%、-12.6%の水準となり、減少する。これは灌漑水量の減少に対応しており、灌漑水量はそれぞれ0mm、-27mm、-32mmとなる。

二酸化炭素濃度上昇の効果を考えた場合には、コメ収量は1℃、2℃、3℃に増大するに従い25%、40%、40%に減少する。二酸化炭素濃度上昇を考慮しない場合と比較すると、生育期間は短縮する。これは、二酸化炭素濃度の上昇とともに気温が高まるためである。また、気孔が閉じることから、蒸発散量が減少し灌漑水量も減少する。

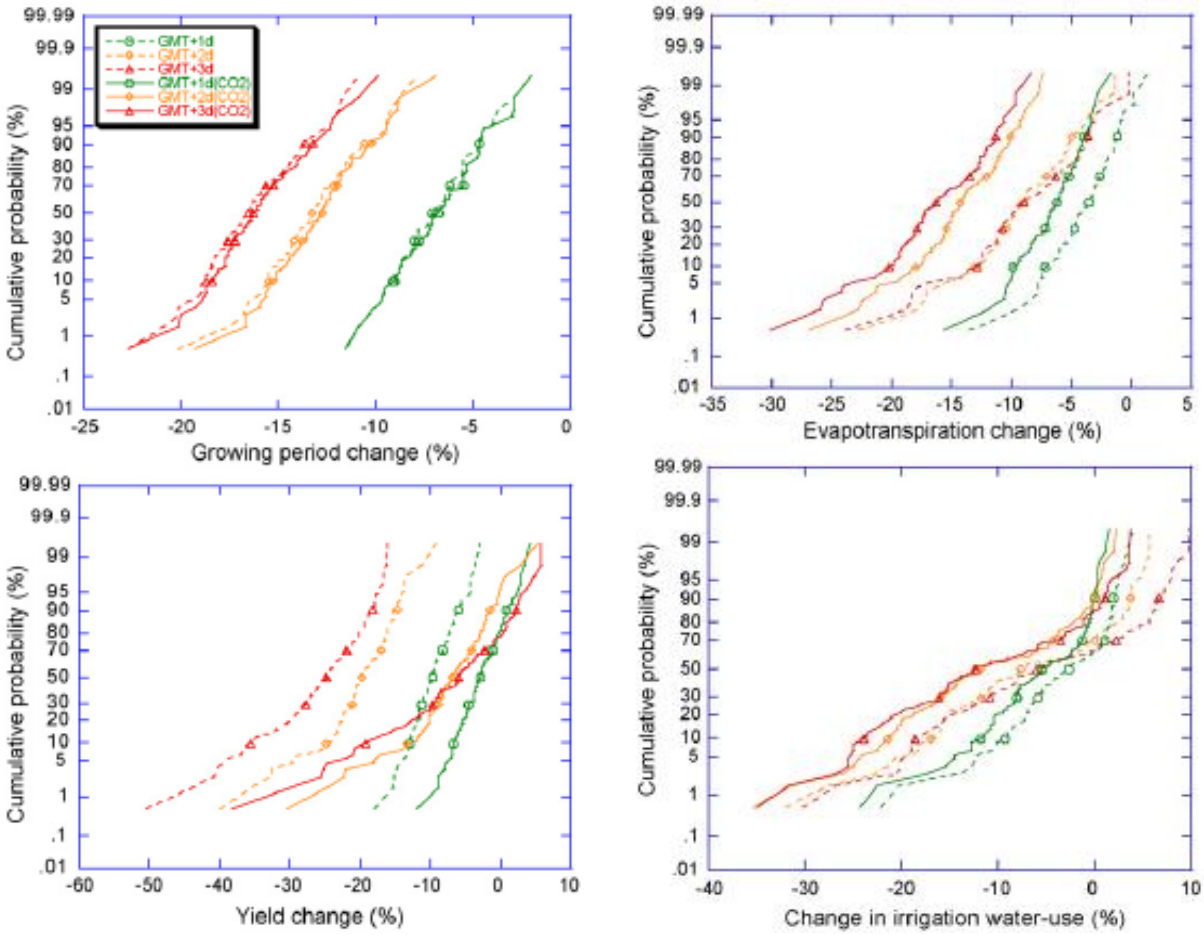


図1. 全球気温（GMT）の上昇水準が1℃、2℃、3℃であった場合における各要素の積算確率分布
地点はHefei、各図は、左上：生育期間、左下：収量、右上：蒸発散量、右下：灌漑水量を表す。
GMT＋１D、GMT+2D、GMT+3Dは大気CO_2濃度上昇の効果を考慮しない場合、（CO_2）は大気CO2上昇の効果を考慮した場合を示している。

２）東北平原

従来のコメ栽培地方と比較し、温暖化時により好適な栽培条件となるHarbin（ハルビン、黒龍

江省）を対象に幾つかの予備的解析を行った。この解析では、二酸化炭素濃度上昇による増収効果は考慮していない。条件として、1℃～3℃の3種類の気温上昇の水準ごとに、適した栽培方法を導入した場合とそうでない場合について、収量、生育期間、蒸発散量、灌漑水量（適した栽培方法を導入した場合のみ）のそれぞれの変化について解析した。温暖化条件下における適した栽培条件としては、灌漑、化学肥料、栽培期間の最適化を考慮した。

この結果、1℃、2℃、3℃気温上昇の水準で、50%の確率でコメ収量がそれぞれ6.7%、21.2%、30.5%減少した。適した栽培方法を導入しなければ、さらに収量は低下した。栽培期間と灌漑が最適化される効果は昇温水準が大きいほど減少した。こうした場合の灌漑用水量はわずかに上昇することが明らかになった。

（２）マクロ気候学的視点による将来のコメ生産

主要なコメ生産地が分布する16省について、最近50年間の栽培期間における日平均気温と収量偏差との関係を解析した。栽培期間の日平均気温と収量偏差の潜在的な関係は、収量偏差をΔY、日平均気温偏差をΔTとすると、$\Delta Y = 3.76\Delta T - 0.0806\Delta T^2$、で表すことができた。

嬌・許[4)]（2004）によると、中国において農村生産体制の改革が始まった1980年代以降は全国の水稲栽培面積が減少傾向にあり、1980年～2002年の23年間で約16.5%が減少した。地域別にみると、特に華南地方で減少（マイナス23.4%）が大きかった。一方、東北平原一帯では著しい増大（プラス92.5%）となった。なかでも、黒龍江省における栽培面積拡大が著しい。こうしたコメ生産地帯の変化傾向が今後も継続すると、将来の気候条件のもとで比較的負の影響が小さい東北平原のコメ生産もリスクを抱えていることが示された。

５．本研究による得られた成果

（１）科学的意義

中国におけるコメ生産量の変動予測の手法について、マルチアンサンブル手法を用いて気温上昇段階（1℃～3℃）ごとに出現確率分布を求めて収量変動予測を行った点である。こうした手法はこれまで例が無く、不確実性の評価に利用価値が高いと考えられる。予測結果として、中国の主要コメ生産地域では、適応策として最適な裁判期間を選択する選択肢は大きな効果が期待できないこと、特に、現在生産量が多い華中以南では負の影響が避けられないことを示した。また、東北平原では春の干ばつによる水不足の危険性があることを示した。東アジアのコメ生産に関して、マクロ気候学的視点からの変動予測に貢献することが期待される。

（２）地球環境政策への貢献

東アジアの食料生産変動予測について基盤的な情報を提供した。

６．引用文献

1) F.Tao, M.Yokozawa, Y.Xu, Y.Hayashi and Z.Zhang: Agricultural and Forest Meteorology, 138, 82-92 (2006)
"Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000"

2) AB.Pittock, RN.Jones and CD.Mitchell: Nature, 413, 249 (2001)
"Probabilities will help us plan for climate change"

3) MD.Mastrandrea and SH.Schneider: Science, 304, 571–574 (2004)

“Probabilistic integrated assessment of “dangerous” climate change”
4) 嬌 江、許 顕浜 編：黒龍江省稲米市場与生産中常見問題、黒龍江省科学技術出版社、1-16 (2004)「第１章　黒龍江省水稲商品性分析」

７．国際共同研究等の状況

黒龍江省における地球温暖化の農業影響、本推進費における海外調査、嬌江・黒龍江省農業科学院、中華人民共和国、中国東北地方の水稲収量データの収集、地球温暖化が東アジアの食料生産変動に及ぼす影響を予測する場合の現地データ収集を共同で行った。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) Y.Hayashi, Y.Ishigooka, M.Yokozawa, H.Toritani and F.Tao: Chinese Journal of Agrometeorology, 26, 7-23 (2005)
“Use of Agro-climatic index for impact assessment under global warming on paddy rice cultivation in Japan”
2) F.Tao, M.Yokozawa, Y.Xu, Y.Hayashi and Z.Zhang: Agriculture and Forest Meteorology, 138, 82-92 (2006)
“Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000”
3) F.Tao, Y.Hayashi, Z.Ahang, T.Sakamoto and M.Yokozawa: Agricultural and Forest Meteorology, 148, 94-110 (2008)
“Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment”

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) Y.Hayashi (ed.): Kaiyo Monthly, 155p (2006)
“Global warming – What is going on?”
2) J.Jiao, X.Xu, Y.Hayashi and F.Tao: Tsukuba Geo-environmental Sciences, 3, 23-31 (2007)
“Overview of the impact of climate warming on paddy rice production in Heilongjiang province, the north most of China”
3) Y.Hayashi: Framing Japan, 42, 10-16 (2008)
“Tendency of global warming and its impact on agriculture”
4) Y.Hayashi: In K.Minami ed., Agriculture-Environment-Medicine, Agromedicine Series 7, Kitasato Univ., 146-150 (2008)
“Assessment of global warming impacts on terrestrial ecosystems”
5) 林 陽生：北から南から、セントラル合同肥料の農業だより、11-15 (2008)
「地球温暖化が農林水産業へ及ぼす影響と対策に関する動向」
6) 林 陽生：今月の農業、化学工業日報社、52, 13-17 (2008)
「地球温暖化と農業／影響評価に関する研究の背景と適応策」
7) 林 陽生：農業普及、岩手県農業改良普及会、60, 30-35 (2008)

「地球温暖化と農業の関わり」

8) 林 陽生：技術と普及、全国改良普及職員協議会機関誌, 45, 11-15 (2008)
「地球温暖化の動向と農業への影響」

9) 陽 捷行編：地球温暖化-農と環境と健康に及ぼす影響評価とその対策・適応技術、養賢堂, 19-42 (2009)
「地球温暖化の影響および適応策の課題」（執筆担当：林　陽生）

10) 林 陽生：電気協会報、日本電気協会、14-18 (2009)
「地球温暖化が食料生産へ及ぼす影響」

11) Y.Hayashi : Global Environmental Research, 13, 63-68 (2009)
"Agro-climatological aspects of the global warming and its impact on paddy rice cultivation in East Asia"

（２）口頭発表（学会）

1) Y.Hayashi: Abstracts of Symposium on Impact Evaluation of Global Warming and Approach to Risk Analysis in East Asia, Taiwan National Univ., 12-13 (2006)
"Fluctuations in yield of paddy rice with ongoing climate variation in the eastern part of Asia"

2) F.Tao, Y.Hayashi and M.Yokozawa: 日本農業気象学会春季大会予稿集, 36 (2006)
"Coping with Climate Risk in China: Developing a Food Security Warning System Using Seasonal Climate Forecasts"

3) Y.Hayashi and H.Masuya: Proc. of 18th International Congress of Biometeorology, Tokyo, S-03 (2008)
"Reduction of paddy rice yield under a climate with high temperature and poor sunshine duration"

4) F.Tao, Y.Hayashi, M.Yokozawa and E.Lin: Proc. of 18th International Congress of Biometeorology, Tokyo, S-01 (2008)
"Climate change and agricultural production in China: Past and future"

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 茨城新聞（2007年6月20日、8頁）
2) 農業協同組合新聞（2007年4月30日、1頁）
3) 農業共済新聞（2008年1月1日、9頁）
4) 産経新聞（2008年1月9日、１頁）
5) カスミ広報誌ちゃーぶる（2008年5月）
6) 朝日中学生ウィークリー（2009年5月31日、全国版、11頁）
7) 地上（2009年3月号、JAグループ家の光協会）

（６）その他

1）洞爺湖サミットへの情報提供：地球温暖化-日本への影響（駐英国大使館，2008）

2）ナショナルジオグラフィック日本版への情報提供：食料危機（日経ナショナルジオグラフィック社,2008）

3）水稲収量予測図を地図帳および児童図書へ掲載：ジャーナリスティックな地図（帝国書院，2008）、地球温暖化時代を生きる（小峰書店，2009）

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．　影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－３　アジア地域のコメ生産に対する温暖化影響の確率的リスク評価
（３）　温暖化が世界の食料市場に及ぼす影響の予測と価格変動リスク評価に関する研究

独立行政法人国際農林水産業研究センター 国際開発領域　　古家 淳・小林慎太郎

〈研究協力機関〉　　独立行政法人農業環境技術研究所　大気環境研究領域　西森基貴

平成17～21年度合計予算額　12,487千円
（うち、平成21年度予算額　 2,342千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］地球温暖化による気候変動が農業生産に対して大きな影響を与えることが予想される。気候変動に関わる多くの研究者は、作物モデルを用いて面積あたりの生産量である単収あるいは収量の変化を分析している。ここでは、単収ではなく、世界の食料市場、すなわち作物の需要と供給を対象に、確率モデル化された世界食料モデルで分析した。その結果は、いくつかの主要生産国において、トウモロコシと大豆の生産量の変動が、温暖化によって拡大することを示している。気温と降水量の変化に単収が敏感に反応するために、価格変動のリスクが大きくなる国や地域では、作付けパターンの変更などの対処が必要になるだろう。

これまでの影響予測は、一つの社会経済シナリオであるA2のみに関して行った。しかしながら、人口やGDPなどは社会経済シナリオによって大きく異なり、シナリオ間で穀物生産量の比較を行う必要がある。IPCCの４つの社会経済シナリオの、A1B、A2、B1、B2についてそれぞれ生産量の動向を比較した。その結果、アメリカの大豆の生産量はシナリオによって大きく異なり、経済成長が小さく気温上昇の著しいA2シナリオでは、2030年の大豆生産量は2010年に比べて減少することが明らかとなった。気温と降水量がA2シナリオにしたがって変化すると仮定すると、それらが2006年と同水準にある状況と比較すると、我が国のトウモロコシ輸入量は、2030年において700万トン程度減少することも明らかとなった。

［キーワード］世界食料モデル、確率的分析、価格変動、社会経済シナリオ、輸入量変化

１．はじめに

近年、世界の穀物生産量の変動は、増大する傾向にある。その大きな要因の一つが、温暖化に伴う干ばつ、大雨、高温といった異常気象の発生である。このような食料生産システムに不安定化を引き起こす気候変動の程度とその危険性を地域、要因ごとに解析し、かつそれらを総合化して評価することは極めて重要である。H18年度は、世界各国の気象および農産物の生産量データを整え、単収関数を計測した。また、世界モデルの確率モデル化のための作業工程の確認と気象変数の各国間の相関分析を行った。H19年度は、農環研プロ「食料変動」において計測した各国・地

域の小麦、トウモロコシ、他粗粒穀物、コメ、大豆の開花期の気温と降水量を変数に含む単収関数のパラメータを用い、確率モデルに拡張したJIRCASの世界食料モデル[2)]に、Hadley Centerの計算したSRESのA2シナリオの予測結果を挿入し、各穀物の生産量と価格の変動を分析した。H20年度は、確率的な世界食料モデルを用いて、南アジア地域の生産の動向を詳細に分析した。H21年度は、IPCCの社会経済シナリオ別に地球温暖化が農産物市場に与える影響を分析した。

２．研究目的

本研究では、気温、降水量、日射量などの気象データを変数とする作物モデルをベースとする簡潔な収量予測モデルを作成し、そのパラメータを世界食料モデルに挿入して新たなモデルの開発を行う。この際に、アジア地域のコメに関しては、他の二つのサブテーマにおいて計測された単収関数のパラメータと基本データを用いる。さらに同モデルの確率モデル化を行い、気温等気象変数の変動が食料市場に及ぼす影響を分析し、プロジェクト全体の総合評価へつなげることを目的とする。

３．研究方法

（１）世界食料モデル

JIRCASの世界食料モデル(IFPSIM)は、単収、作付面積、輸出、輸入、在庫、価格連結の各関数から構成され、14の品目と32の国・地域を対象としている。対象とする作物は、小麦、トウモロコシ、他粗粒穀物、コメ、大豆であり、他粗粒穀物は、大麦、ライ麦、オート麦、キビ、ソルガムを含む。Furuya & Koyama[1)]は、気温と降水量を変数に含む単収関数を計測し、それをIFPSIMの単収関数と置き換えた。計測式は次のようなものである。

$$\ln YH_t = a + b_1 T + b_2 \ln TMP_t + b_3 \ln PRC_t \qquad (1)$$

ここで、YHは単収（収量）、Tはタイムトレンド、TMPとPRCは開花期の気温と降水量である。もし、単収が非定常であれば、次のような階差型の関数を計測した。

$$\mathrm{d}\ln YH_t = a + b_2 \mathrm{d}\ln TMP_t + b_3 \mathrm{d}\ln PRC_t \qquad (2)$$

ここで、$\mathrm{d}\ln YH_t = \ln YH_t - \ln YH_{t-1}$、$\mathrm{d}\ln TMP_t = \ln TMP_t - \ln TMP_{t-1}$、$\mathrm{d}\ln PRC_t = \ln PRC_t - \ln PRC_{t-1}$である。気温と降水量のパラメータ$b_2$と$b_3$のうち、有意水準10%以上の値を用い、他は0とした。

図1に、作物部門のリーダー国のフローチャートを示した。図から明らかなように、単収、面積、生産量、輸入量、輸出量、在庫量、需要量は内生変数であり、人口、国内総生産、気温、降水量は外生変数である。

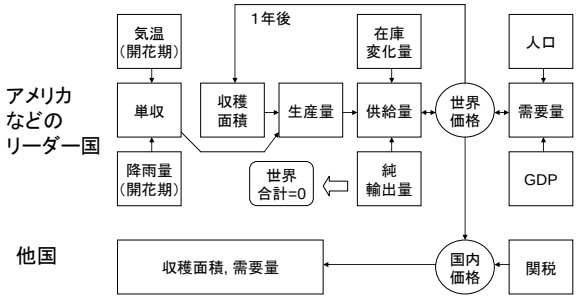


図1　世界食料モデルの作物部門のフローチャート

（２）確率モデル

世界食料モデルにおいて、気温と降水量は外生変数であり、これらの変動が世界の農産物市場に与える影響を評価するが、そのために、国・地域間の相関を考慮した気温と降水量のシミュレーション値の組を作成した。先ず、次のようなトレンドを変数とする線形関数を計測した。

$$TMP_{ijt} = a^T + b^T T \quad (3)$$

$$PRC_{ijt} = a^P + b^P T \quad (4)$$

ここで、サブスクリプトiは国あるいは地域の番号、jは作物の番号である。

得られた推定値と実測値の差である誤差を並べ替えて、経験分布の累積密度関数(CDF)を作成する。一方、国・地域について誤差の相関行列を作成し、そのCholesky分解と、独立に発生させた標準正規乱数から相関のある標準正規乱数を作成する。この乱数に対して、標準正規CDFの逆関数を適用して、相関のある一様標準乱数を作成し、さらにそれを経験分布CDFに挿入して相関のある経験分布に基づく乱数とする。最後にその値を推定値に加えて、気温と降水量のシミュレーション値とする。ここでは、150組作成するが、2001年以降のHadley centerのSRESのA2シナリオ予測値に関して(3)式と(4)式を計測し、推定値を作成して、それに得られた乱数を加えてシミュレーション値とする。このプログラムはRichardson[3)]のものを参考に作成した。図2にシミュレーション値作成に関するフローチャートを示す。

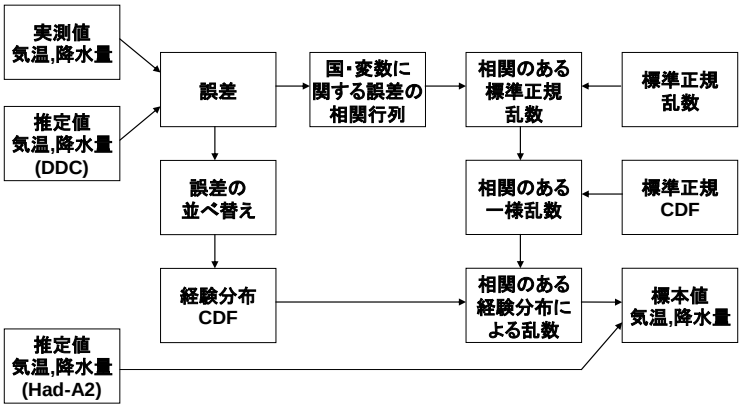


図2　気象変数のシミュレーション値作成のフローチャート

（３）データ

(1)式と(2)式の計測に用いたデータは、GHCN(Global Historical Climatology Network)の月次データであり、USDA[4)]の栽培暦から開花期の月を選択した。アメリカや中国のように面積の大きな国については、USDA[4)]の栽培地域の図を参考に対象地域を選択した。なお、「その他アフリカ地域」については、気象データと単収双方のデータが不足するため、計測を行わなかった。関数の計測期間は、国・地域によって若干異なり、1961年から2000年までの期間から選択した。

(3)式と(4)式の計測に用いたデータは、IPCCのDDC(Data Distribution Center)のものであり、GHCNの値を元に0.5度グリッドに変換したものである。表1に小麦の主要生産国についての気温と降水量の誤差に関する相関行列を示す。

表1　小麦の主要生産国についての気温と降水量の誤差に関する相関行列

		気温				降水量				
	国・地域	EU	旧ソ連	インド	中国	アメリカ	EU	旧ソ連	インド	中国
気温	アメリカ	-0.257	0.228	0.268	-0.031	-0.460	0.022	0.187	-0.063	0.110
	EU		0.014	0.216	0.286	-0.045	-0.412	-0.447	0.216	0.166
	旧ソ連			0.058	-0.122	0.152	0.009	-0.522	0.100	0.169
	インド				-0.035	-0.246	0.125	0.021	-0.115	0.052
	中国					-0.150	0.148	-0.053	-0.134	0.101
降水量	アメリカ						-0.017	-0.138	0.020	-0.138
	EU							0.212	-0.394	-0.047
	旧ソ連								-0.362	-0.092
	インド									-0.050

Hadley Centerは、SRES(Special Report on Emission Scenarios)のA2シナリオのグリッド単位のデータ(HadCM3-A2)を提供している。このA2シナリオは、それぞれの国が、貿易、労働力の移動、技術の移転を制限するというものであり、一人当たりGDPの成長は、2050年で7200ドルと伸び悩むが、世界人口は150億に達する。A2シナリオに基づく一つのシミュレーション結果を用いて(3)式と(4)式を計測する。150組の相関のあるランダムな誤差をこの推定値に加えて、A2シナリオに基づくシミュレーション値とする。図3は、アメリカにおける小麦、トウモロコシ、コメの各生産地域について1961年から2000年まではDDCによる実測値、2001年以降はHadCM3のA2シナリオの予測値を示している。

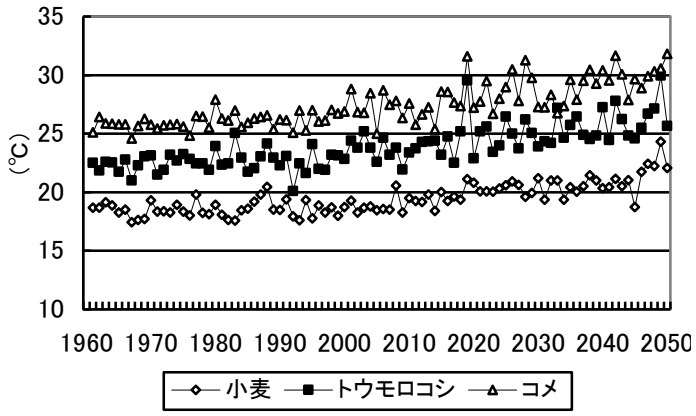


図3　アメリカの穀物生産地域における気温の推移

（４）シミュレーションの仮定

Furuya and Koyama[1)]の気温と降水量に関する単収のパラメータが、確率化された世界食料モデルに用いられる。その際に、有意水準が10%以下のものは0とした。それ以外の需要の価格弾力性等のパラメータに変更はない。シミュレーションの基準年は、1998年であり、2030年までを予測期間とした。

シミュレーションの仮定は、次の通りである。1)栽培暦に変更はない。2)栽培地域は移動しない。3)単収は気象変化の影響を直接受ける。4)気温と降水量は、SRESのA2シナリオに従って変化する。5)すべてのパラメータは変化しない。なお、シミュレーションに際して、アメリカとEUの

小麦、トウモロコシ、他粗粒穀物、コメ、および全ての国の大豆は、次に示す、価格に反応する単収関数を用いた。

$$\ln YH_t = a + 0.1\ln(PI_{t-1}/PI_{t-2}) + b_1 T + b_2 \ln TMP + b_3 \ln PRC \quad (5)$$

ここで、aは調整された切片、PIは補助金を含む価格、b_1、b_2、b_3はそれぞれタイムトレンド、気温、降水量のパラメータである。その他の単収関数は、(1)式に同じである。

（５）排出量シナリオとシナリオ別GDPと人口

IPCCのDDC(データ配布センター)は、社会経済シナリオのA1B、B1、A2、B2について、各国のGDPと人口を公表している。ここで、A1Bシナリオは、貿易自由化が進み、かつ高い経済成長が実現するというもので、さらに、エネルギー産業の技術開発が、化石燃料と太陽光発電などのクリーンエネルギーの両方でバランスをとりながら進行するというものである。2050年での全世界一人あたり所得は21,000ドル、人口は87億人となる。

A2シナリオは、それぞれの国が、独自の文化を保ち、貿易と労働移動を制限し、また、技術移転も制約するというものである。これらの制約の結果、経済の成長率は小さく、2050年において一人あたり所得は7200ドルに止まる一方、人口は110億人に到達する。

B1シナリオは、天然資源の消費が少なく、かつクリーンエネルギーの開発が進むものであり、経済成長率と人口増加率がA1シナリオに準ずるものである。B2シナリオは、クリーンエネルギーの開発が進むが、A2シナリオと同じく貿易、労働移動、技術移転が制限されるものであり、2050年での一人あたり所得は12000ドル、人口は94億人となる。

図4と図5は、2100年までの全世界のGDP合計値と人口をシナリオ別に示したものである。世界食料モデルを用いたシミュレーションでは、国別のGDPと人口を32カ国・地域に集計して用いた。また、図6と図7には、我が国の排出シナリオ別のGDPと人口を示した。GDPは2050年においてA1とB1シナリオで8兆ドルとなるが、B2シナリオでは5兆ドルに止まる。一方、人口は、A1、B1、A2シナリオでは1億2300万人から1億2600万人程度と現在と同じ水準となるが、B1シナリオでは、1億950万人に減少する。

これらのシナリオの下で、気温や降水量がどのように変化するか、様々なシミュレーションが行われているが、ここではシナリオ別の予測値が公表されているハドレーセンターの値を我が国について見てみたい。図8と図9に稲の平均的な開花期である8月と9月の平均値を気温と降水量それぞれシナリオ別に示した。それぞれの予測値には変動が含まれているが、両図は、そのトレンドを示したものである。

気温は、2010年から2030年の20年間に、A1Bシナリオでは1.28℃、B1シナリオでは0.96℃、A2シナリオでは0.94℃、B2シナリオでは0.74℃上昇し、それぞれ、2010年の気温に対して5.75%、4.32%、4.23%、3.33%上昇する。最も気温が高く上昇するのは、経済成長率が高く化石燃料の使用を継続するA1Bシナリオであり、最も気温の上昇率が低いのは人口が減少傾向となるB2シナリオである。ただしアメリカなど他国では、気温の上昇率はA1BシナリオよりもA2シナリオで高い。

一方、降水量は、A1Bシナリオと他のシナリオで非常に異なる。前者では20年間に28.2mm増加し、2010年に対して14.7%の増加となるが、他のシナリオでは1%から2%の増加に止まる。我が国のみならず東南および東アジアでは、温暖化により降水量の増加が予想されている。

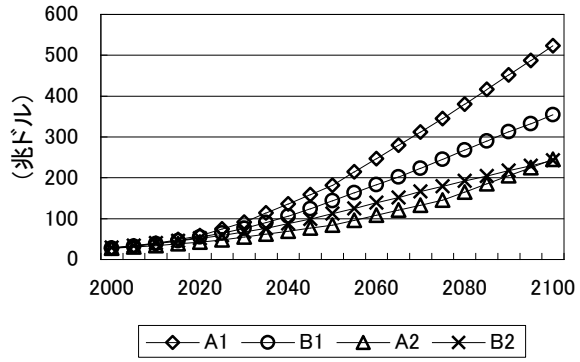


図4 全世界の排出シナリオ別GDP合計値
出所）IPCC DDC

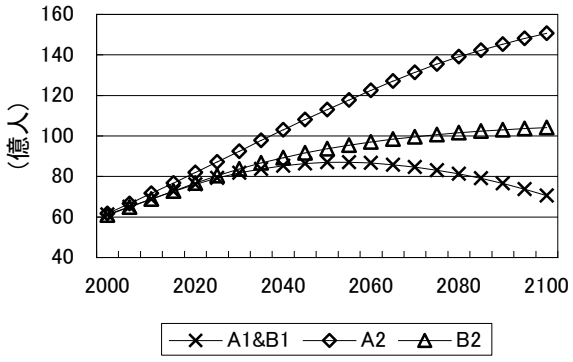


図5 全世界の排出シナリオ別人口
出所）IPCC DDC

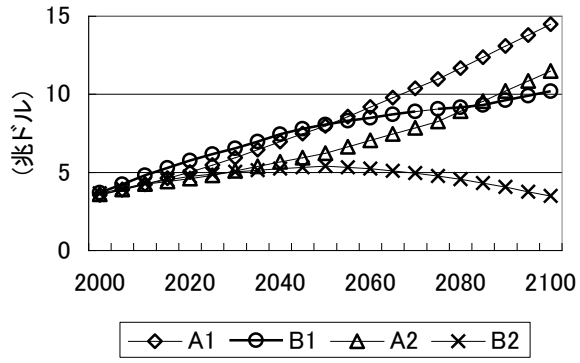


図6 我が国の排出シナリオ別GDP
出所）IPCC DDC

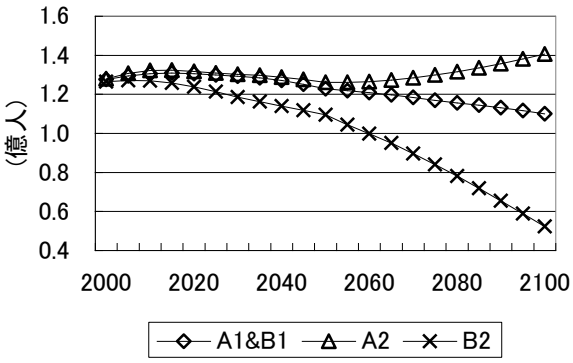


図7 我が国の排出シナリオ別人口
出所）IPCC DDC

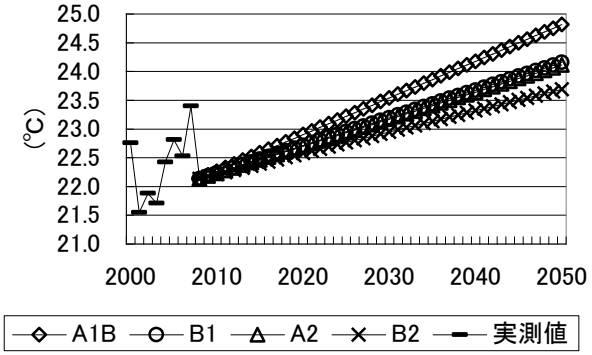


図8 我が国の稲の開花期の気温のトレンド
注）ハドレーセンターの8月と9月の予測値の全国平均から作成

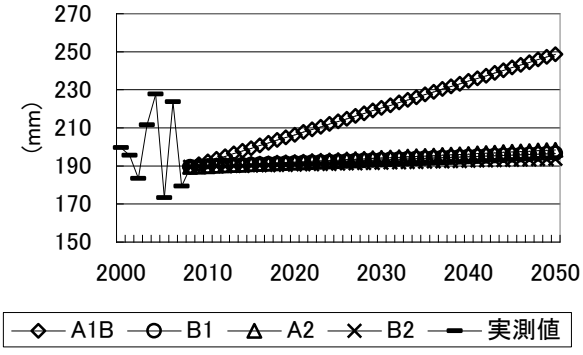


図9 我が国の開花期の降水量のトレンド
注）ハドレーセンターの8月と9月の予測値の全国平均から作成

４．結果・考察

（１）確率的世界食料モデルの分析結果

図10から図19に、主要生産国と全世界の５つの作物についての生産量の推移と変動を示した。これらの図には、10および90パーセンタイル、および任意に選択した一つのシミュレーション結果を示した。図10は、インドの小麦生産が、2006年から2030年までの期間において5400万トン増加することを示している。これは、単収と面積拡大の双方の結果である。変動係数(CV)の25年間

の平均値は、4.57%であり、図11に示す全世界の生産量のCVの1.65%に比べて大きい。

図12は、アメリカのトウモロコシ生産の推移を示している。25年間に7000万トン増加するが、単収の気温に関する弾力性が大きな負値であるためその変動は大きく、CVは8.12%である。全世界の生産量の変動は、図13から明らかなように、小麦、他粗粒穀物、コメよりも大きい。図14は、旧ソ連地域の他粗粒穀物の生産量の推移と変動を示している。ロシア共和国の生産量は、旧ソ連地域の６割を占める。また、同地域の大麦の生産量は他粗粒穀物の生産量の半分を占める。単収の気温に関する弾力性は-1.59と大きく、大麦生産が高温に弱いことを示している。CVは、2006年において8.31%、2030年において9.42%である。図15は他粗粒穀物の全世界の生産量の推移と変動を示している。生産量は、25年間に2億トン増加し、そのCVの平均値は2.63%である。

図16は、インドのコメ生産量の推移の変動を示している。同国のコメ生産量の変動は、他国のそれと比べて大きい。コメの単収の気温に関する弾力性は、東アジア地域で正値であるが、インドとアメリカでは大きな負値となっている。したがって気温上昇の影響は相殺し、全世界の生産量の変動は、図17に示すように小さなものとなっている。図18と図19は、アメリカと全世界の大豆生産量の推移と変動を示している。全世界の生産量の推移はアメリカのそれに追随している。CVは作物の中で最も大きく、2006年で6.50%、2030年で13.47%である。アメリカにおいて、単収の気温に関する弾力性は、負値であり、それが世界の市場に影響を与えている。この結果は、世界の大豆生産が気候変動に対して最も大きなリスクを負っていることを示している。

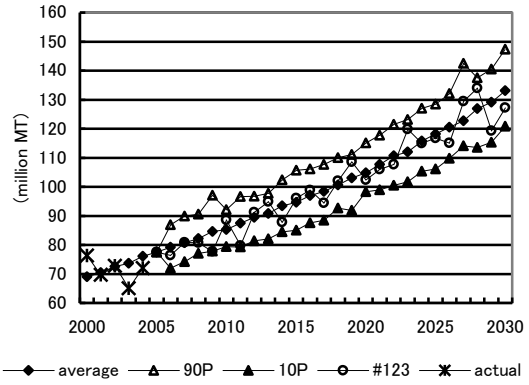


図10　インドにおける小麦生産

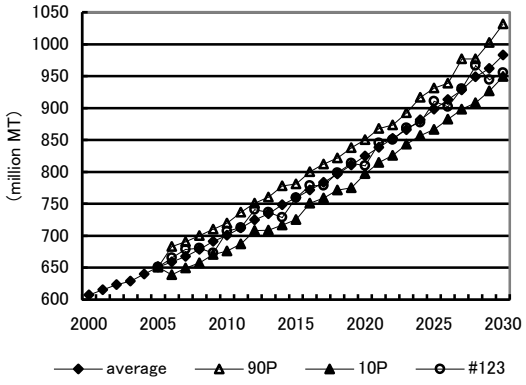


図11　全世界の小麦生産

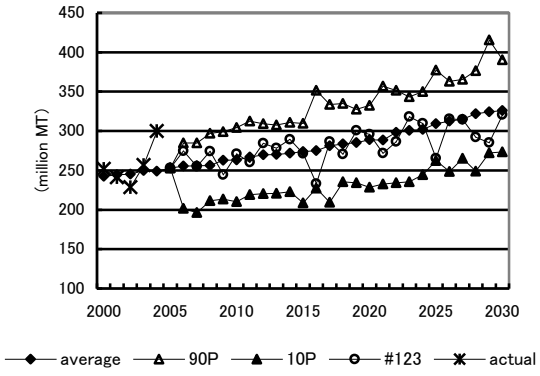


図12　アメリカのトウモロコシ生産

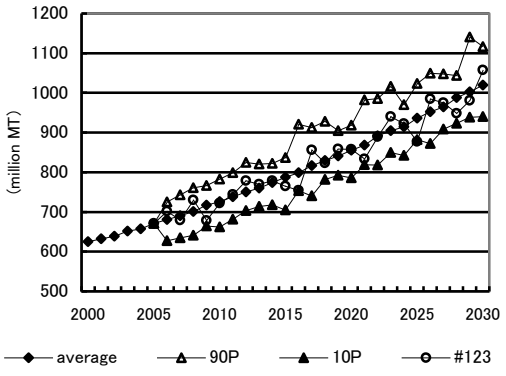


図13　全世界のトウモロコシ生産

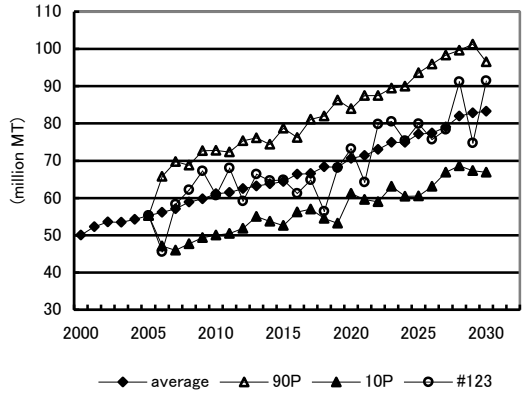


図14　旧ソ連の他粗粒穀物生産

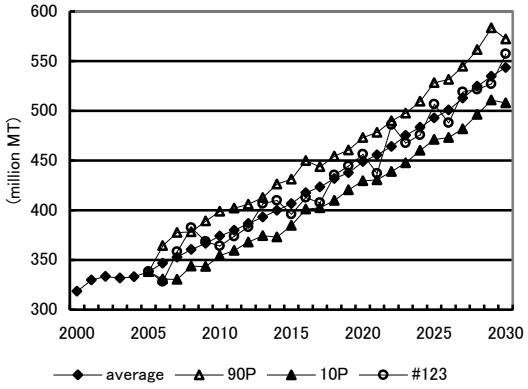


図15　全世界の他粗粒穀物生産

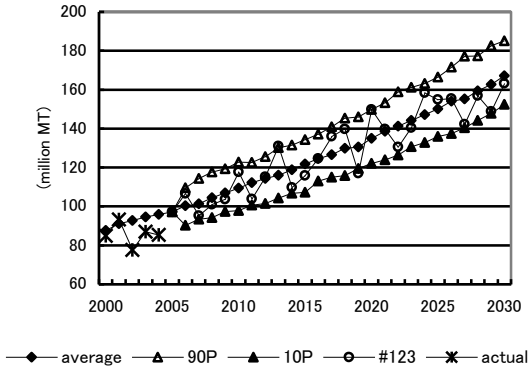


図16　インドのコメ生産

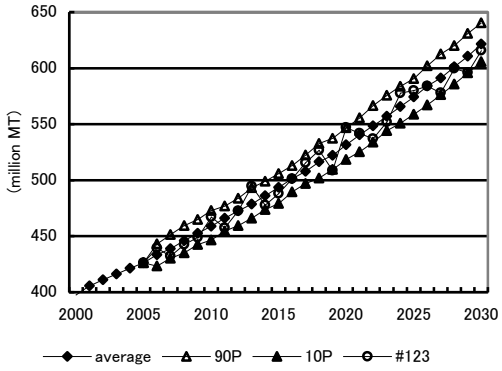


図17　全世界のコメ生産

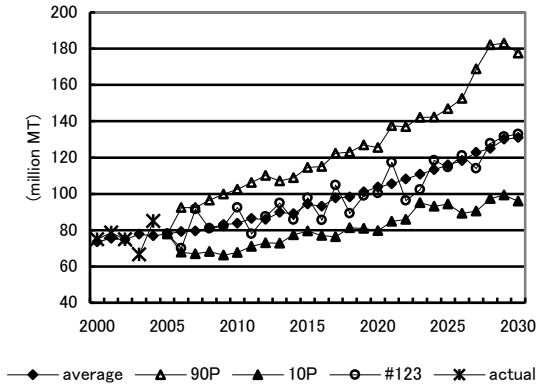


図18　アメリカの大豆生産

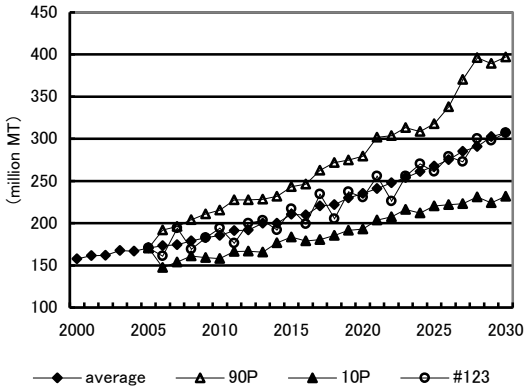


図19　全世界の大豆生産

最後に、作物の生産者価格の変動について検討したい。表2は主要生産国の2006年から2010年までの平均のCVと、2026年から2030年までの平均のCVを示している。価格の変動は、全ての国のすべての作物で拡大している。特に大豆は、主要生産国で20%から25%変動係数が増加し、1%から2%の増加に止まる他の作物に比べて非常に大きく変動が拡大する。大豆の過去20年間の革新的な育種技術の進展が、シミュレーションにおける価格に対する大きな反応を導いたと考えられる。相

対的に価格変動の小さな小麦と他粗粒穀物を栽培する農家の気候変動に対するリスクは、小さいと言えるだろう。

コメの価格のCVはインドを除いて小さい。しかしながら、モデルの基準年である1998年において、コメの輸出量の生産量に占める比率は6.7%であり、それが20%を超える小麦や大豆に比べると極めて小さい。コメは、生産量の変動が小さいが、貿易量が小さい。そのため、コメの栽培農家は、潜在的に大きな価格変動リスクに直面していると言えよう。

表2　国内価格の変動係数

小麦		
国・地域	変動係数（%）	
	2006-10	2026-30
アメリカ	3.413	4.511
ＥＵ	2.632	3.570
旧ソ連	3.443	4.546
インド	3.235	4.301
中国	2.825	3.808

トウモロコシ		
国・地域	変動係数（%）	
	2006-10	2026-30
アメリカ	8.565	10.385
ＥＵ	4.686	5.997
東欧	9.435	11.306
ブラジル	11.794	13.700
中国	6.430	8.029

他粗粒穀物		
国・地域	変動係数（%）	
	2006-10	2026-30
アメリカ	2.842	3.988
ＥＵ	1.536	2.254
ｵｰｽﾄﾗﾘｱ	1.837	2.667
東欧	3.974	5.370
旧ソ連	3.974	5.370

表2　国内価格の変動係数（つづき）

コメ		
国・地域	変動係数（%）	
	2006-10	2026-30
アメリカ	1.327	1.925
インド	9.676	10.182
ｲﾝﾄﾞﾈｼｱ	0.367	0.407
中国	0.035	0.001
他極東	1.497	2.148

大豆		
国・地域	変動係数（%）	
	2006-10	2026-30
アメリカ	15.049	35.609
ブラジル	20.085	45.106
ｱﾙｾﾞﾝﾁﾝ	18.476	42.178
インド	11.543	28.372
中国	8.667	22.005

世界食料モデルを用いたシミュレーション結果は、いくつかの国あるいは地域の作物生産は、変動の増大を伴う気温上昇によって大きな影響を受けることを示している。アメリカ、EU、南アジア諸国での作物生産は、地球温暖化の影響を大きく受けるだろう。確率モデル化された世界食料モデルのシミュレーションの結果は、気温と降水量の変動が市場に及ぼす影響が、作物によって極めて異なることを示し、世界の合計では、大豆以外それほど大きな影響を受けない。大豆の生産量は、リーダー国であるアメリカにおいて、単収が価格に対して極めて弾力的に変化することにより、大きく変動する。

これらの結果は、気象変数と需給に関するパラメータが不変という中期のモデルに基づいている。さらに正確な結果を得るためには、長期の予測を想定したモデルが必要である。ハドレーセンターのSRESのA2シナリオに基づく気象予測データを用いた場合、いくつかの国あるいは地域において、作物生産に顕著な変動が見られた。これらの高い価格変動が見込まれる地域では、水資源の確保、栽培方法の改良、複数の販売経路の確保などリスクの分散を図る必要がある。

（２）SRESシナリオ別分析結果

世界の穀物市場の動向を左右するアメリカにおける小麦、トウモロコシと大豆、および中国のコメの生産量の動向を見てみたい。なお、前節の確率モデルの分析では、GDPと人口の予測値を過去のそれぞれの増加率の趨勢値から計算したため、A2シナリオについてDDCの予測値を用いるこの節の結果と異なる。ここで、それぞれのシナリオの生産量の動向は、ハドレーセンターの気候予測値を用いて計算しているが、比較のために、東京大学気候システム研究センターのMIROCのA1Bシナリオの気候予測値を元に計算した生産量の動向をMA1Bとして示している。

図20は、アメリカの2030年までの小麦の生産量の動向を示している。なお、これらの結果は、実際の生産量の統計値の直近値である2007年の値の60%、その前年の2006年の値の40%の平均値にシフトさせている。小麦生産量は、A2、B2シナリオでは横ばいであるが、A1B、B1シナリオでは、2010年の5100万トンから2030年の5700万トンへ若干増加する。MIROCのA1B予測値の下では、HadCM3の値よりも大きく増加するが、それは、MIROCのA1Bシナリオでの気温上昇が大きく、他の国が気温上昇の影響を受けるのに対して、アメリカは気温上昇の影響を受けないために、このような小麦生産の増加が予測される。

図21はアメリカのトウモロコシの生産量の推移を示している。A1Bシナリオでは、HadCM3、MIROCともに2010年の3億2000万トンから2030年の4億トンへ増加する。一方、A2およびB2シナリオでは2030年において3億6000万トンの生産量に止まる。これは、A2、B2シナリオでは貿易が制限されるためにGDPの増加が低く、各国の飼料需要が抑えられるためである。

図22はアメリカの大豆の生産量の推移を示している。一目して分かるように、社会経済シナリオによりその動向は明らかに異なり、経済成長の著しいA1Bシナリオでは、HadCM3、MIROCともに2010年の8000万トン程度から2030年の1億1000万トンまで増加する。しかしながら、一方、経済成長率の小さいA2シナリオでは2030年まで生産量は横ばいである。アメリカでの大豆生産量は、2030年までに頭打ちとなるが、これは、気温上昇の影響と共に、ラテンアメリカ地域での生産量が人口増加や経済発展のために大きく増加するためである。アメリカの大豆に関わる産業は、温暖化により大きな影響を受けると考えられる。

図23は中国のコメ生産の動向を示している。気温上昇の影響はほとんど受けず、各シナリオのGDPと人口の伸びの違いに依存している。生産量がA1Bシナリオでは減少し、A2シナリオでは増加するが、これは、同国のコメの需要の所得弾力性が負であり、GDPの増加率が前者では大きく、後者では小さいためである。

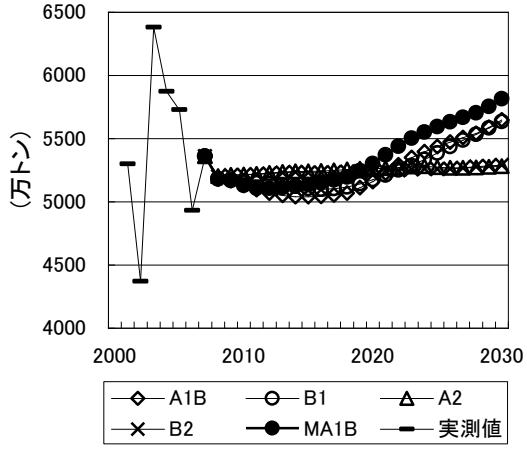


図20 アメリカにおける小麦生産

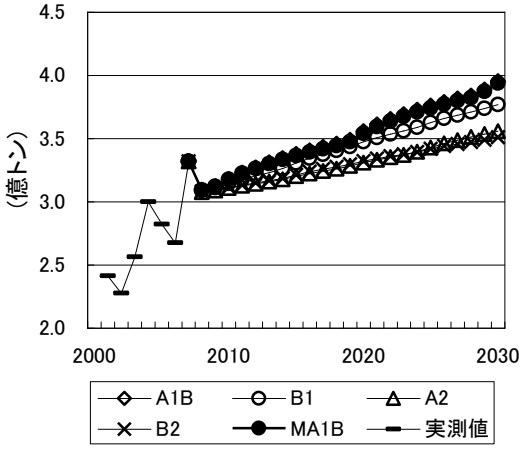


図21アメリカにおけるトウモロコシの生産量

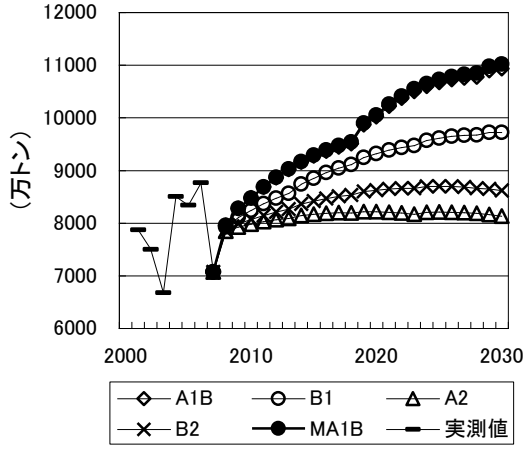


図22 アメリカにおける大豆の生産量

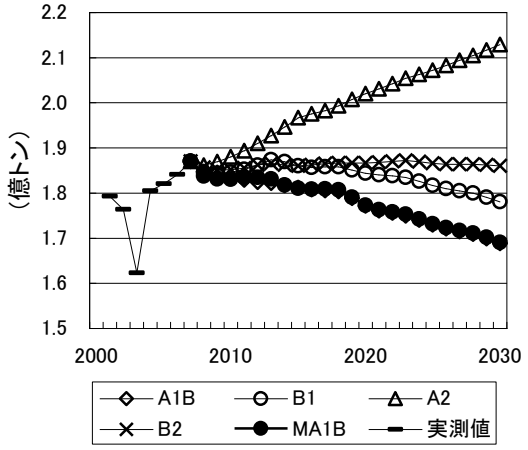


図23 中国におけるコメの生産量

我が国では、2007年において、穀類と豆類の国内消費のうち輸入量は77%を占める。また、コメ以外の穀類と豆類では、国内消費の97%を輸入に頼っている。温暖化が国内の生産に与える影響は、もちろん重要な検討事項であるが、海外の農産物生産に温暖化がどれだけ影響を与え、その結果我が国の食料の輸入にどれだけ影響を与えるのかを把握することは、今後の国民の生活を占う上できわめて重要である。

図24は、我が国のトウモロコシの輸入量を各シナリオ別に示したものである。ハドレーセンターの気候予測値では、A1Bシナリオでは変動しつつ2010年の1700万トンから2030年の2000万トンへ増加するが、B2シナリオでは1920万トン程度に止まる。A2あるいはB2のように貿易を制限するシナリオでは、A1やB1のように貿易自由化促進のシナリオに対して、2030年において50万トンから80万トン小さくなる。なお、2000年以降気温上昇がない場合に比べて、それぞれのシナリオでは2030年において40万トン程度輸入量が小さくなる。これはアメリカなど主要生産国の生産量減少の影響が我が国に及ぶことを示している。

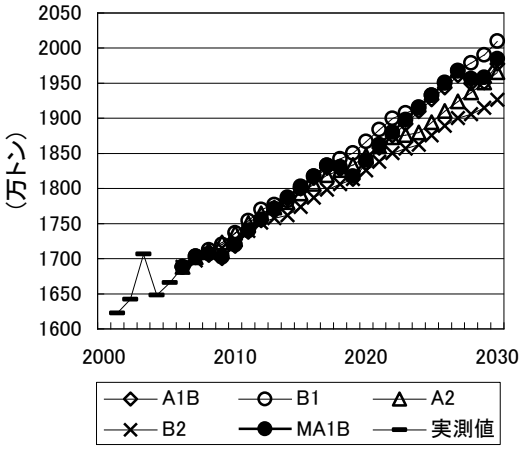


図24 我が国のトウモロコシ輸入量

５．本研究により得られた成果

（１） 科学的意義

気候変動による影響分析が可能な確率的世界食料モデルは他に類を見ない。ここでは、気温と降水量について、国・地域間および気温と降水量間の相関を考慮してシミュレーションを行っている。また、社会経済シナリオ別の生産動向等の予測は、アンサンブル推計を除いてこれまでにないものである。

（２）地球環境政策への貢献

2006年における紙（かみ）国会議員の地球温暖化が世界の食料需給に及ぼす影響に関する質問に対して、気候変動を考慮した世界食料モデルに、1998年から各年0.05%づつ気温が上昇するという簡易気候シナリオを想定した場合の各作物における供給量変化の計算結果を紹介した。また、農林水産技術会議事務局の局長が主催する「地球温暖化による影響評価・適応策の研究開発に関する検討会（第１回）」において、同モデルを用い、SRESのA2シナリオに基づいて気温と降水量が変化する場合の各国各作物の生産量変化について報告した。また、2008年にバングラデシュで開催された、FAO、WMO、UNDP、オハイオ州立大主催の南アジアでの気候変動と食料安全保障に関するシンポジウムにおいて、確率的世界食料モデルのシミュレーション結果を発表し、反響を得た。

６．引用文献

1) J.Furuya and S.Kobayashi: Sustainability Science, 4(1) 71-79 (2009)
″Impact of global warming on agricultural product markets: stochastic world food model analysis″
2) J.Furuya and O.Koyama: Japan Agricultural Research Quarterly, 39(2): 121-134 (2005)
″Impacts of Climatic Change in World Agricultural Product Markets: Estimation of Macro Yield Functions″
3) K.Oga and K.Yanagishima: International food and agricultural policy simulation model (user’s guide), JIRCAS Working Report (1) (1996),
4) U.S. Department of Agriculture (USDA): Major World Crop Areas and Climatic Profiles. Agricultural Handbook, 664, Washington D.C. (1994)

７．国際共同研究等の状況

ミズーリ大学食料農業政策研究所(MU-FAPRI)のセス・メイヤー(Seth D. Meyer) と共に、確率的世界食料モデルを開発した。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) J.Furuya and S.Kobayashi: Sustainability Science, 4, 71-79 (2009)
″Impact of global warming on agricultural product markets: stochastic world food model analysis″

<査読付論文に準ずる成果発表>

1) J.Furuya and S.Kobayashi: ″Adaptation and Mitigation Strategies for Climate Change″, Springer Verlag, (A.Sumi, K.Fukushi and A.Hiramatsu eds), 19-35 (2010)
″Impact of global warming on agricultural product markets: stochastic world food model analysis″

<その他誌上発表（査読なし）>

1) 古家淳：エコノミスト，85，92-95（2007）
「二酸化炭素排出削減の取り組みと食料生産の未来を追う（食料生産パート）」
2) 古家淳：人間会議，夏号，115-119（2008）
「地球温暖化は食料危機を招くのか？」
3) 古家淳：農業技術，63，19-23（2008）
「地球温暖化が世界の食料需給に及ぼす影響の計量モデル分析」
4) J.Furuya, S.Kobayashi, SD.Meyer: World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.57, 24-29 (http://www.waset.org/journals/waset/v57.php)(2009)
"Impacts of Global Warming on the World Food Market According to SRES Scenarios"
5) 古家淳：週刊農林，2064，6-9（2009）
「地球温暖化による世界の食料需給変化とその日本への影響」

（２）口頭発表（学会）

1) J.Furuya: NIAES International Symposium 2006, proceedings, pp 167-172 (2006)
"Impacts of Global Warming on Agricultural Product Market: World Food Model Analysis using HadCM3 Scenario A2"
2) J.Furuya: The 15th Asian Agricultural Symposium: Future Prospects of Asian Food and Agriculture, proceedings, pp XV-XXii (2007)
"Coexistence of New and Traditional Technologies of Rice Production and the Outlook Using Stochastic Supply and Demand Models in Indochina Peninsula Countries"
3) J.Furuya: TIGS Symposium 2008: Adaptation Strategies for Climate Change, proceedings, pp 26-27, Appendix (2008)
"Impacts of Global Warming on Supply and Demand of Agricultural Products: Stochastic World Food Model Analysis"
4) J.Furuya: International Symposium on Climate Change & Food Security in South Asia (2008)
"Modeling Economic Impacts of Climate Change on Agriculture and Food Supply and Demand"
5) J.Furuya: JIRCAS International Symposium 2009: Role of Social Sciences in International Agricultural Research and Development, proceeding, pp 13-16 (2009)
"Climate Change and Food Security in Developing Countries and Role of Social Science"

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 日経エコロジー（2009年7月号 No. 121 「どうなるどうする温暖化｜食糧生産」pp 77-79）

（６）その他

2007年から2008にかけて試作した我が国のコメ需給モデルは、農林水産省農林水産技術会議事務局並びに国際農林水産業研究センター研究戦略調査室における検討の結果を受けて、開発を中止した。

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－３　アジア地域のコメ生産に対する温暖化影響の確率的リスク評価
（４）気候変化に伴う水資源の量と質の変動がメコンデルタのコメ生産に及ぼすリスク評価に関する研究

＜ＥＦフェロー＞
独立行政法人農業環境技術研究所　大気環境研究領域　Nguyen Duy KHANG
＜受け入れ研究者＞
独立行政法人農業環境技術研究所　大気環境研究領域　横沢正幸

平成19～20年度合計予算額　4,206千円
（うち、平成21年度予算額　799千円）
※予算額には、間接経費を含む。

［要旨］気候変化による海面上昇が引き起こす塩水遡上がベトナム・メコンデルタのコメ生産へ及ぼす影響について、水理モデル（MIKE 11）を利用して評価を行った。排出シナリオSRES B2に基づく気候変化状況を想定し、2030年代半ばならびに2090年代半ばにおける12月から翌年6月までの期間の流量と海水侵入の程度を推定した。このシナリオでは、2030年代での海面上昇は20 cm、流量減少は15%、2090年代ではそれぞれ45 cm、29%と想定されている。シミュレーションの結果、水路における塩分濃度2.5 g/L以上の塩水遡上域は、主要河川においては、2030年代には約10 km、2090年代にはおよそ20 km上流へと拡大すると推計された。
また、気候変化に伴うメコン河の流量変化が引き起こす塩水遡上ならびに洪水の影響を同時に評価する水理モデルを新たに開発した。そのモデルが現在（1998～2006年）の状況を再現できることを確認した後に、将来（2090年代）の気候変化シナリオを入力して影響を調べた。将来の気候変化シナリオは、デルタ内の気温、降水量、日射量のほかに、海面の上昇度、およびデルタ上流部におけるメコン河の流量変化として与えた。ここで使用したシナリオはSRES A1Bの排出シナリオに基づいて、JMA- AGCMを利用して導出されたものである。その結果、気候変化に伴い洪水の規模とデルタの浸水範囲が拡大することにより、上流部におけるコメ作付け可能期間の変動が拡大すると推計された。3期作可能地域の面積は31％から5％に減少するとともに、1期のみ可能な地域の面積は21％から62％へ増加すると推計された。さらに、作付け可能期間の減少度を表す指標を用いて、気候変化によるコメ生産の脆弱性を面的に評価した結果、脆弱性が中程度以上の地域はデルタの面積の31％から36％に及ぶと推計された。

［キーワード］海面上昇、河川収量変化、塩水遡上、洪水、農業生産

１．はじめに

ベトナムのコメ輸出量はタイに続く世界第二位の規模であり、とりわけメコンデルタ（VMD）は

ベトナムのコメ輸出量の約９割を担う世界でも有数の穀倉地帯である。この地域のコメ生産は主要河川であるメコン河に依存し、上流域は雨季の洪水、中流域では乾季に露出する硫酸性土壌、そして下流域では乾季に発生する塩水遡上の影響を強く受けている。現在、このような水資源の季節変動に適応した農業が各地域で行われているが、それは気候変動に対して鋭敏に応答するシステムである。IPCC-AR4によると、21世紀にはメコン川流域一帯で雨季の降水量が増加し、地域によっては乾季ですら降水量が増加すると予想されており、その結果、最大水位が高く氾濫期間が長い大洪水の出現頻度が増すことが予想される。その上、海水面も上昇すると予想されることから、VMDの沿岸部では、より深刻な塩水遡上が生じると見られる。海面上昇はメコンデルタ上流部の氾濫原にも悪影響を及ぼすと予想される。

２．研究目的

本研究は、気候変化にともなって予想される海水面の上昇およびメコン川上流の流量変化がVMDの水資源の水理学的システムに対して及ぼす影響について調べる。はじめに、河川・水路システムにおける水資源量と水質（塩分濃度）の時間空間変化を記述する水理モデルを開発し、デルタ内の塩水遡上と洪水量、およびそれらの影響が及ぶ面積と期間がどのように変化するかを評価する。次に、シミュレーションによって水資源の変動に伴うコメ栽培の可能期間を推計し、それをもとに環境変動によるリスク評価を行う。また、本研究課題で開発したモデルは、サブサブテーマ２（３）１）において、水稲栽培可能条件とコメ生産性推計モデルと結合した統合モデルを構築し、気候変化シナリオに基づく気候変化がコメ生産へ及ぼす影響の評価に使用される。

３．研究方法

（１）海面上昇による塩水遡上が灌漑水の質に及ぼす影響

海面上昇による塩水遡上がVMDの水路における灌漑水の水質に及ぼす影響を評価するために、デンマーク水理環境研究所が開発した水理モデル（MIKE11）を利用した。計算に必要な流入境界条件は、メコン河本流の上流に位置するカンボジアのクラチエとプレックダムの測定データを利用した。一方、南シナ海とシャム湾の潮位と塩分濃度についての60ヵ所の観測データを下流境界として与え、ベトナム南部水資源研究所（SIWRR）で作成した地形、主要治水用水門の管理などのデータベースも利用した。モデルのキャリブレーションは、1998年における水理データおよび塩分濃度データを用いて行った。流量、水位の計算値と実測値が適合するように、河川、水路の初期水位、マニング係数の調整を行った。次に、河川と水路のセグメントの初期塩分濃度と拡散係数のパラメータを調整することで、移流拡散モジュールを決定した。観測点の数が限られているため、塩分データを水理モジュールの調整にも利用した。

環境変動による影響推計シミュレーションは、干ばつが最近数十年間で最も塩水遡上の被害が甚大であった1998年の状況[1)]を基準とした2つのシナリオの下で行った。シナリオ１は、海面は20 cm上昇し、上流の流量は15%減少する。シナリオ２は、海面は45 cm上昇し、流量は29%減少とした。IPCC SRES-B1に換算すれば、シナリオ１は2030年代半ば、シナリオ２は2090年代半ばに想定される。

（２）メコン河流量変化が引き起こす洪水および塩水遡上が灌漑水の量と質に及ぼす影響

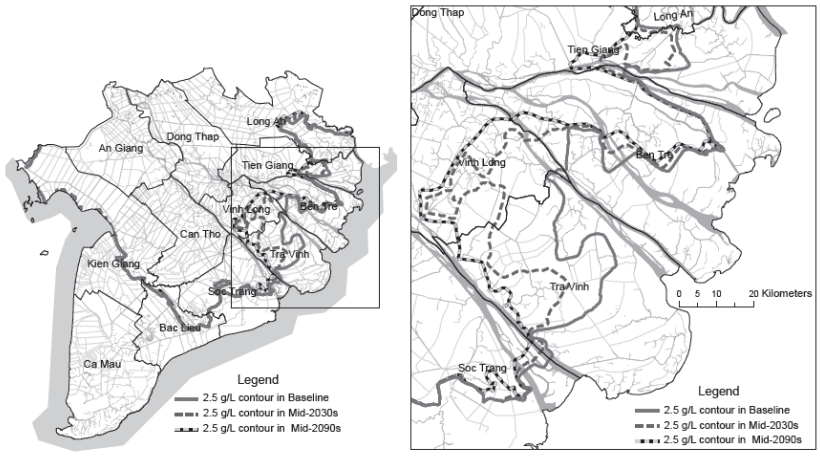
メコン河の水量変化による洪水ならびに塩水遡上の影響を同時に扱うために、水理モデルRiCAS（River and Channel network Analysis System 河川・水路網分析システム）を新たに開発した。RiCASモデルは、水量に関するSaint-Venant方程式と溶質輸送に関する移流拡散方程式が基本式である。モデルは2つのモジュールからなり、水流量が水理モジュールで計算され、その結果は移流拡散モジュールにおける溶質輸送シミュレーションの入力として用いられる。モデルスキームの妥当性を調べるために、解析解の存在する問題でシミュレーション結果を比較した。また、RiCASモデルの結果と（１）で使用したMIKE11モデとの解との比較も行った。

気候変化による影響を評価するために、２種類のシナリオ、即ち「基準年」（1998～2006年）と「将来」（2090年）におけるメコン川上流部での流量と海面上昇の状況を仮定した。「基準年」シナリオでは、メコン川上流の流量を1998～2006年の年平均流量とした。潮位と海水の塩分濃度は、2005年に観察されたデータを下流境界の値に内挿した。また、「将来」シナリオにおける上流の流量は、SRES A1Bの排出シナリオに基づいてJMA AGCMを用いたKiem et al.（2008）の水文モデルによる計算結果を用いた[2)]。これに対応して、IPCC-AR4に示されているA1Bシナリオで予測された海面上昇の状況も導入した。（１）とシナリオが異なるのは、本シミュレーションにはメコン河の流量変化データが必要であったためである。

４．結果・考察

（１）海面上昇による塩水遡上が灌漑水の質に及ぼす影響の評価

図1はMIKE11による、乾季と雨季との間である5月末（ヘートゥ作期の播種期）における海面上昇が引き起こす灌漑水への影響推計結果を示す。図より、南シナ海の沿海部、特にチャビン、ベンチェ、ティエンザンの各省とビンロン省東部で最も影響が大きいと推定された。表1は、影響を受ける面積を塩分の水準別に示している。表1には、2月末（ドンスアン作期の収穫期）の影響もあわせて示した。塩分濃度2.5g/lの塩淡境界面は、主要河道では基準年に比べて15～20km内陸に移動する。特にチャビン省の内陸部では2090年代半ばには最大35km移動すると推定された。



(a) View of entire delta　　(b) View of inset

図1. 基準年と各シナリオ条件における５月末の塩分濃度2.5g/lの等濃度線
(a) デルタ全体図、(b) 影響を受ける地域のクローズアップ

表1　基準年と各シナリオにおける塩分水準別の面積

塩分濃度 (g/l)	区分	海水浸入面積（100 万 ha）					
		基準年		2030 年代半ば		2090 年代半ば	
		2 月	5 月	2 月	5 月	2 月	5 月
0 － 2.5	塩分浸入がわずか	2.51	2.23	2.39	2.13	2.28	2.02
2.5 － 5	微量から中程度の塩分浸入	0.39	0.25	0.48	0.27	0.55	0.27
5 － 10	中程度から高度の塩分浸入	0.44	0.48	0.47	0.55	0.49	0.64
10 － 15	高度から高々度の塩分浸入	0.22	0.15	0.23	0.15	0.24	0.14
＞ 15	高々度の塩分浸入	0.40	0.87	0.41	0.87	0.41	0.89

（２）メコン河流量変化が引き起こす洪水および塩水遡上が灌漑水の量と質に及ぼす影響

１）洪水およびコメ栽培が可能な期間に対する影響

図2は、雨季における海面上昇とメコン川の流量増加の影響を合わせて描いている。洪水の水位と浸水面積に関して、基準年シナリオより「将来」シナリオの洪水がはるかに大きいことがわかる。図から、浸水深度0.5 m以上の面積はVMD全域で約23%増加し、著しく洪水の影響を受ける地域（浸水深度2 m以上の氾濫地域）は基準年ではデルタ全域の4%であるが「将来」シナリオでは25%にまで増加する。

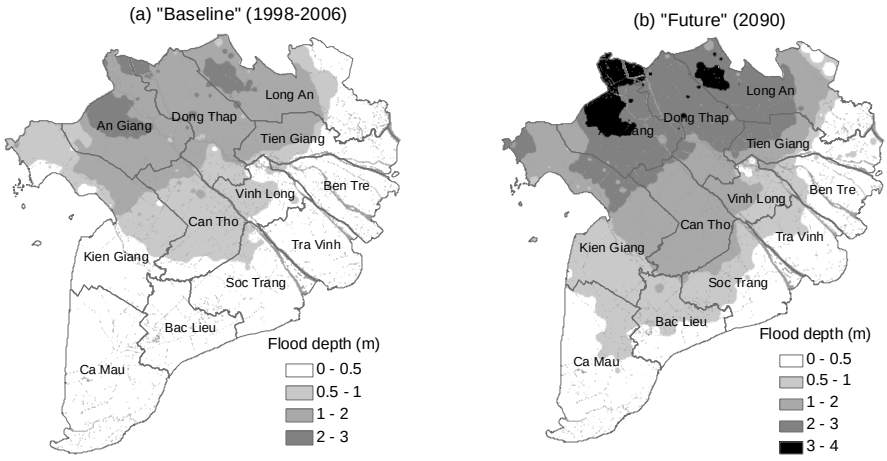


図2. 最大洪水時における浸水深度の空間分布

（「基準値」シナリオでは10月19日、「将来」シナリオでは9月21日の値）

海面上昇と上流の流量増加は洪水期間の長期化ももたらす。コメ栽培を不可能にする浸水深度の閾値を0.5 mとして洪水期間を計算した。これらの値と、以前の研究で得られた灌漑水として利用できる期間についての結果とを合わせて、コメ栽培が可能な期間の推定に用いた。

ここでは、Khang et al.（2008）の手法と同様に、1回のコメ栽培に必要な期間を平均110日とした[3)]。また、灌漑用水が入手できるかどうかのコメ栽培の可能期間に対する影響は小さいので、図3に示した「将来」シナリオにおけるコメ栽培期間の大幅な変化は、主として洪水期間の長期化によるものである。三期作が可能な地域の面積が31%から5%に減少する一方で、一期のみ作付け可能な地域の面積は21%から62%へ増加すると推定される。

SRES A1B気候変化予測に基づく「将来」シナリオを利用して、気候変化によって生ずると予想される海面上昇と上流部の流量変化がベトナム・メコンデルタにおける塩水遡上と洪水に及ぼす影響について調べた。その結果、ベトナム・メコンデルタ全面積の約67%が気候変化の影響を著しく受けると予想された。しかし、この評価は、一つの気候モデルのアウトプットに基づく単一のシナリオである。今後は複数のシナリオによる評価が必要である。

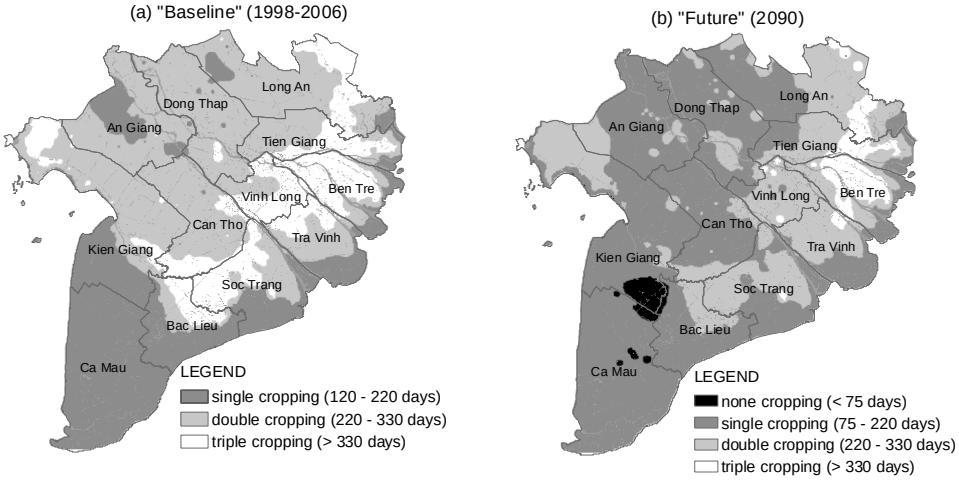


図3.「基準年」（1998～2006年）シナリオと「将来」（2090年）シナリオにおける塩水遡上と洪水に対応して可能と考えられるコメ栽培の空間分布

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

当該地域での水管理の観点からの水理モデルはこれまでにも開発されているが、季節洪水および塩水遡上の両現象の影響を同時に扱える水理モデルは無かった。気候変化がメコンデルタにおける農業生産へ及ぼす影響を定量的に評価するために、本モデルを独自に開発することにより、農業生産性モデルとの結合が可能となり、環境応答機構の解明や影響評価への利用価値は高い。

（２）地球環境政策への貢献

ベトナムの国家プロジェクトとして、気候変化がメコンデルタの農業に及ぼす影響評価がテーマの一つとなり、本モデルのコンセプトが引き継がれている。

６．引用文献

1) L.Sam: Salinity intrusion in the Mekong Delta, Agricultural Publishing, Hochiminh City, 387pp (in Vietnamese) (2006)

2) A.Kiem, H.Ishidaira, H.P.Hapuarachchi, M.C.Zho, Y.Hirabayashi and K.Takeuchi: Hydrological Processes, 22, 1382 - 1394 (2008).
"Future hydroclimatology of the Mekong River basin simulated using the highresolution Japan Meteorological Agency (JMA) AGCM"

3) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 64, 167-176 (2008)
"Sensitivisty of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese

Mekong Delta - Impacts on availability of irrigation water for rice cropping″

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa: Journal of Agricultural Meteorology, 64, 167-176 (2008)

"Sensitivity of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese Mekong delta-impacts on availability of irrigation water for rice cropping"

2) A.Kotera, T.Sakamoto, N.D.Khan, and M.Yokozawa: JARQ, 42, 267-274 (2008)

"Regional consequences of seawater intrusion on rice productivity and land use in coastal area of the Mekong river Delta"

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

（２）口頭発表（学会）

1) 坂本利弘、CV.Phung、小寺昭彦、N.D.Khang、横沢正幸：システム農学会（2008）

「MODIS時系列データを用いたメコンデルタにおけるファーミングシステムの変化把握」

2) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2008) (2008)

"Sensitivity of salinity intrusion to sea level rise and river flow change in Vietnamese Mekong Delta - Impacts on potential irrigation water"

3) 小寺昭彦、N.D.Khang、坂本利弘、飯泉仁之直、横沢正幸：日本熱帯農業学会第105回講演会(2009)

「ベトナム・メコンデルタにおける水稲作付暦の広域推定と水資源環境の変動による影響」

4)横沢正幸、小寺昭彦、ND.Khang、坂本利弘、飯泉仁之直：日本農業気象学会2009年全国大会（2009）

「ベトナムメコンデルタにおける水資源環境変動による水稲生産の脆弱性」

5) N.D.Khang, A.Kotera, T.Sakamoto and M.Yokozawa: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2009) (2009)

"Variations in water resources in the Vietnamese Mekong Delta in response to climate change and their impacts on rice production"

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

課題名	S-4温暖化の危険な水準および温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 ２－４ 温暖化の森林への影響と脆弱性の評価に関する研究		
課題代表者名	田中信行（独立行政法人 森林総合研究所 植物生態研究領域）		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	118,536千円（うち21年度 22,224千円） ※予算額は、間接経費を含む。

研究体制
（１）温暖化の森林植物への影響と脆弱性の評価に関する研究（独立行政法人森林総合研究所）
（２）高感受性生態系への温暖化影響の予測と検出に関する研究（独立行政法人森林総合研究所）

I.戦略課題S-4-2(4)の全体構成

本課題の目的は、温暖化の森林生態系への影響を量的に評価することにある(図1)。世界的に行われている影響評価の有力な方法として、分布予測モデルによる生育域予測がある。サブ課題１で分布予測モデルによる森林植物の影響評価を行う。一方、サブ課題２では、温暖化に対して特に感受性の高い森林生態系の部分について、温暖化影響の検出と予測を行う。日本の生態系に大きな影響を与える積雪条件はこれらの研究の基盤データであるが、山岳域での正確な予測データがなかったので、本課題の中で現状と将来の積雪予測を行った。２つのサブ課題名を下記に示す。

(1) 温暖化の森林植物への影響と脆弱性の評価に関する研究

分布予測モデルを植物種ごとにつくり、植物種の分布を規定する要因と閾値を明らかにする。温暖化による重要な植物種の生育域の変化を予測し、脆弱な種と地域を明らかにし、マップ化する。影響関数の事例を提示する。

(2) 高感受性生態系への温暖化影響の予測と検出に関する研究

プロジェクト前半は、温暖化に伴う積雪変化予測と、積雪変化が森林に与える影響評価を中心に研究を進めた。後半は、マツ枯れや山地湿原など温暖化にとくに感受性の高い生態系への温暖化影響の予測と検出を中心に研究を進めた。

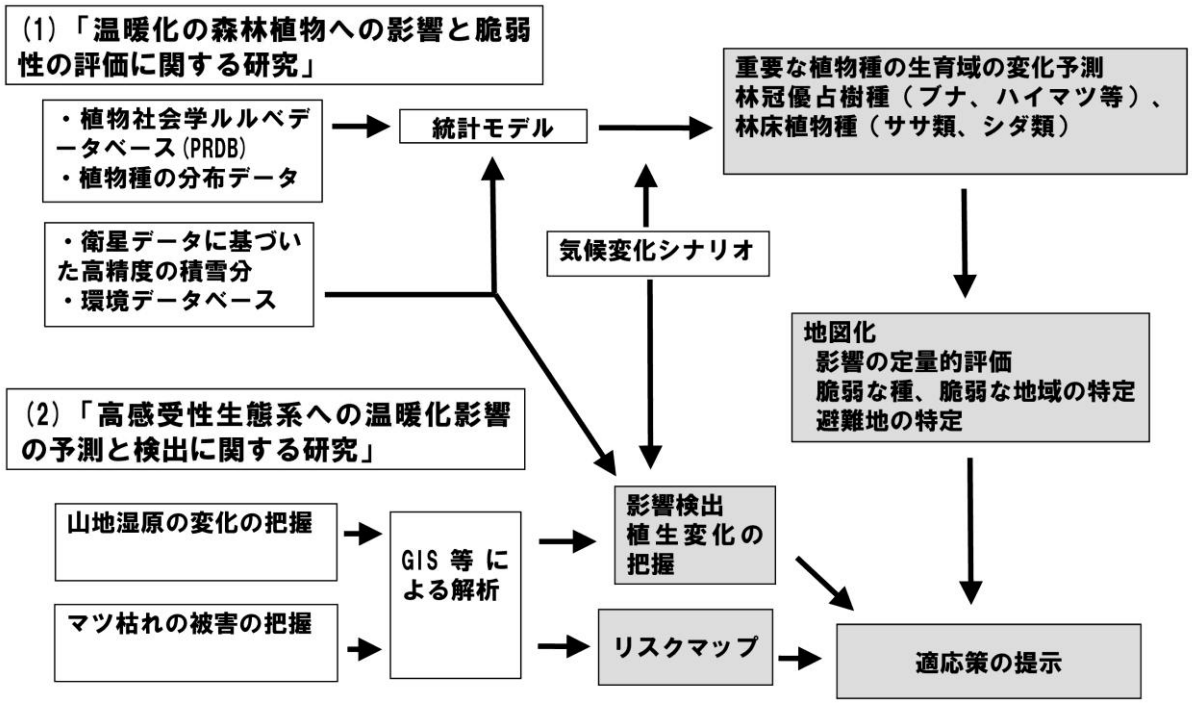


図1. S-4-2(4)課題の全体構成．2つのサブ課題があり、連携して研究を進めた．

Ⅱ.本研究により得られた科学的成果

日本の森林生態系への温暖化影響評価研究の成果を、21編の査読つき論文として発表した。主な成果は以下の通りである。

① 空間分布予測モデルの手法の発達により、野生動植物の潜在生育域の予測が欧米を中心に行われている。しかし、アジアでは、この分野の研究は少ない。日本では、我々のチームが中心になって取り組み、ブナ林、ササ類、ハイマツ、針葉樹10種についての成果を発表した。いずれの種においても、温暖化に伴い生育地がどのように変化するかを予測し、脆弱な種や地域、及び持続的な生育地（逃避地）を特定した。

プロジェクト期間中に、分布予測モデルの基盤データとなる植物分布データベースの構築を行った。その一つである植物社会学ルルベデータベース(PRDB)は、過去の植生調査区（ルルベ）の資料を全国スケールで電子化したもので、これにより多種について分布予測モデルを作ることが可能となった。欧州では、全域を覆うルルベデータベースはまだできていない。米国では、森林調査データが整備されているが、林床植物についてのデータは不十分であり、また、地続きのカナダやメキシコのデータが利用できる状態になっていない。これまでの欧米における植物種の潜在生育域の予測では、植物分布図や森林調査資料に基づく植物分布データを利用して20～50kmの空間解像度の解析が主流であるが、我々は、日本の急峻な地形に適合させるため1km空間解像度で精度の高い予測を行っている。

② 温暖化はわが国の積雪山地の植生に大きな影響を与えると考えられるが、その実態には不明の点が多く、将来の積雪環境についても、十分な解像度で信頼性のあるデータが整備されていなかった。本プロジェクトでは、亜高山針葉樹の更新初期の段階に積雪が大きく影響することを見いだすとともに、多くの山地湿原において顕著な縮小傾向を明らかにし、積雪の変動が植生変化に与える影響を従来よりも詳細に示した。また、衛星による実際の積雪分布データを用いて地域的な特性を考慮した１kmメッシュの積雪分布データを作成し、温暖化時の日本列島の積雪環境を予測した。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献

① ブナ林分布への影響予測論文は、IPCC第4次評価報告書WG2(2007)に引用された。ブナ林は日本の代表的な自然林である。温暖化の影響を受けやすいという予測結果は、マスコミ等で大きく報道されるなど、社会的なインパクトがあった。また、プロジェクト期間中にモデルを影響関数に変換することにより、多様な気候変化シナリオに基づくブナ林の適域の変化予測、白神山地世界遺産地域や都道府県別の影響予測などの予測の精密化を行った。これらの成果は、ブナ林を含む自然生態系の保全策の検討の際、温暖化影響を考慮する科学的根拠を与えた。たとえば、白神山地世界遺産地域の保護管理計画に温暖化の適応策を組み込む準備を始めるきっかけになった。

② ブナ林だけでなく、いくつかの重要な植物種について温暖化影響予測を行ったので、同様の社会的貢献が可能と考えられる。対象種がまだ少ないながら、この予測結果は、温暖化影響リスクを明示し、社会へ警鐘を鳴らしている。さらに、現在と将来の気候条件における潜在生育域が特定されたことにより、その予測結果を自然保護に活用できる。たとえば、温暖化により衰退や絶滅の危険性のある脆弱な植物種や群落とその生育域が特定できたので、適応的保全計画(適応策)の策定が可能となる。温暖化後も潜在生育域として残る地域は、逃避地として保全上重要な意味をもつ。また、温暖化影響の検出のためのモニタリング地を選定する際に参考になる。

③ 多くの山地湿原で縮小傾向が見られることは、温暖化が顕在化する時代の山岳地の環境保全を考える上で重要な問題を提起した。また、温暖化時の積雪環境に関する空間解像度の高い地理データが整備されたことは、山岳地の長期的な環境保全を考える上での貴重な基盤データとなる。

④ 気温上昇が2℃を越えると、マツ枯れの危険域が北東北地方の内陸まで拡大し、防除に要するコストもきわめて大きくなると予測された。これは、気温上昇が2℃以下の段階で、被害域と未被害域を分離する防除帯の設定など防除対策を充実させることが、被害域の北上を抑止して北日本のマツ林を保全するうえで重要であることを示唆する。

IV.研究概要

１．序

温暖化の危険な水準を示す森林生態系の指標として、種の生育が可能な地域(潜在生育域)の変化が有用である。生物の分布データとそれに対応する環境データを使った分布予測モデル解析により、温暖化後の種の潜在生育域の予測が1990年代以降海外で進んでいるが、日本では、この分野の研究はまだ少ない。植物種の分布を環境条件から予測するモデルを開発することにより、将来における潜在生育域が空間的に予測できる。現在と将来の潜在生育域と実際の分布を比較することにより、温暖化に対して脆弱な種と地域、温暖化後も持続的に生育が可能な地域（逃避地）を特定でき、自然生態系の適応策に役立てることができる。

わが国の生態系の中には、特定の外的環境の影響を受けて温暖化に対する感受性が極めて高いものがみられる。中部から北海道にかけての多雪山地に見られる植生は、積雪環境と密接に関わりながら成立しているため、温暖化による積雪環境の変化の影響を受けやすい。しかし、積雪の植生への影響メカニズムには未知の点が多い。温暖化時の積雪環境についても温暖化影響予測に利用可能な高分解能気候データが未整備であった。また、わが国の二次林の重要な要素で海岸平野から内陸の山地・丘陵地にかけて広く分布するマツ林も、気温上昇によるマツノザイセンチュウ病の拡大で衰退が加速することが懸念されており、早急に温暖化の影響を予測する必要がある。

２．研究目的

（１）　温暖化の森林植物への影響と脆弱性の評価に関する研究

全期間の目的は、重要な植物種について潜在生育域の予測を行い、現在と温暖化後の潜在生育域の地図を作成し、脆弱性の高い種と地域を特定することである。

1)　ブナ林

ブナ林においても新たな気候変化シナリオ（RCM20とMIROC）におけるブナ林適域の変化を、全国と地域別に予測することを目的とする。とくに、世界遺産地域である白神山地について、詳しく予測する。

2)　ササ類

ササ類は、日本の冷温帯における代表的な林床優占種で、他の植物の定着や更新の阻害要因となるほか、動物の生息場所や土壌保全の機能を果たすなど、森林生態系における生物間相互作用に大きな影響力を持つ「キーストーン種」である。温暖化は積雪量に大きな変化を与えるので、多雪地域に生育するチシマザサ節、チマキザサ節のササ類に大きな影響を与えると推定される。分布予測モデルを用いて、分布を規定する気候条件を解明し、温暖化による潜在生育域の変化を予測することを目的とする。

3)　ハイマツ

ハイマツは、マツ科マツ属の匍匐性の低木で、日本の高山帯の代表種である。ハイマツを対象とし、気候変数を用いた分布予測モデルを作成し、温暖化に対して脆弱な地域を明らかにすることを目的とする。

4)　針葉樹10種

亜熱帯・暖温帯から亜寒帯までの地域で異なる分布域をもつ針葉樹10種について、気候変数を用いた分布予測モデルを作成し、温暖化に対して脆弱な種と地域及び逃避地を明らかにすることを目的とする。

（２）高感受性生態系への温暖化影響の予測と検出に関する研究

1)　積雪の高精度予測

植生への影響予測に不可欠な山岳域の精度を向上させた高解像度の積雪分布予測モデルを開発することを目的とする。

2)　亜高山帯林への積雪影響評価

積雪環境が亜高山針葉樹林の更新過程に与える影響を明らかにすることを目的とする。

3)　山地湿原への影響検出

縮小が懸念されている山地湿原の過去の変化を検出し、温暖化との関連を検討することを目的とする。

4)　マツ枯れへの影響評価

温暖化によってマツノザイセンチュウ病のリスクが高い地域がどのように変化するのかについて予測を行うことを目的とする。

３．研究の方法

（１）温暖化の森林植物への影響と脆弱性の評価に関する研究

1) ブナ林

分布予測モデルとして、応答変数をブナ林の在・不在データ、説明変数を4気候変数と土地的な5環境変数とする統計モデルの１つである分類樹モデルを構築した。ブナ林の在・不在データは、ブナ林や他の自然植生の分布データで、第3回自然環境保全基礎調査による3次メッシュ植生データベース（MVDB）から抽出した。気候変数は、成長期の熱量の指標として暖かさの指数（WI）、冬期の低温の指標として最寒月の日最低気温の平均（TMC）、成長期の水分条件の指標として夏期（5～9月）降水量（PRS）、冬期の積雪や降雨の指標として冬期(12～3月)降水量（PRW）である。モデルに現在気候及び将来の気候変化シナリオ（RCM20、 MIROC）を組み込み、ブナ林の分布する確率を全国3次メッシュ（約1km^{2}のメッシュ）で算出した。

2) ササ類

ササ類の分布を気候変数から予測する分布予測モデルには、分類樹モデルを用いた。モデルの応答変数であるチシマザサ節とチマキザサ節の分布データは、PRDBから抽出した在・不在データである。説明変数とする5つの現在の気候変数は、WI、TMC、PRS、及び積雪量の指標として最大積雪水量（MSW）、冬期の水分条件の指標として冬期（11～4月）降雨量（WR）である。温暖化の影響予測に用いる気候変化シナリオにはRCM20の2081～2100年の平均値を用いた。ササ類の在・不在データと気候データから構築した分類樹モデルに、現在の気候と気候変化シナリオRCM20を組み込み、ササ類の潜在生育域の変化を予測した。

3) ハイマツ

分布予測モデルの応答変数に用いるハイマツの個体分布データは、PRDBから抽出した在・不在データである。一方、ハイマツの面的分布域のデータとして、日本産重要樹種の天然分布（林, 1954）データに基づき分布域を電子化した。5気候変数は、WI、TMC、PRS、MSW、WRである。このモデルに現在の気候と将来（2081-2100年）の2つの気候変化シナリオ（RCM20とMIROC）を組み込み、現在と将来のハイマツの適域を予測した。その際、現在分布しない山地には将来も移動しないと仮定して、ハイマツの実際の分布域内に限定して温暖化後の適域変化を予測した。

4) 針葉樹10種

各樹種の分布データと現在の気候から算出した4つの気候変数(WI、TMC、PRS、PRW)を用いて、現在の分布を気候変数から予測する分類樹モデルを作成した。このモデルに将来（2081-2100年）の2つの気候変化シナリオ（RCM20とMIROC）を組み込み、現在と将来の針葉樹の潜在生育域を予測した。

（２）高感受性生態系への温暖化影響の予測と検出に関する研究

1) 積雪の高精度予測

現在の積雪分布のファクトデータを得るため、SPOT/VEGETATIONの1km解像度のデータを用いて、広域にわたる積雪の有無を判別するためのS3指標を10日間隔で計算して、1999～2005年の７年間にわたる3次メッシュの積雪期間分布データベースを整備した。これを用いて実際の山地積雪を再現できる融雪速度のパラメータ化を行い、3次メッシュ毎の積雪質量収支を計算して、現在とMIROCシナリオを想定した将来の積雪水量を予測した。

2) 亜高山帯林への積雪影響評価

2005年秋に亜高山針葉樹林で結実が豊作であった山域のうち、早池峰山、八幡平、富士山、金峰山、北八ヶ岳、志賀高原に調査地を設定して埋土種子や稚樹の状態、林床の状態、根雪期間の観察・観測を行った。

3) 山地湿原への影響検出

過去の年代別の空中写真からステレオオルソフォトを作成して、新潟・群馬県境付近の山地湿原の変動実態の解析を行うとともに、近年の積雪深の変動との関係について考察した。

4) マツ枯れへの影響評価

メッシュ気候値2000の気温データ（1971年～2000年の平均値）を元に、各メッシュセルについて月平均気温が1℃ずつ上昇した場合の気温環境を計算で求めた。さらに、MVDBに基づき自然条件下あるいは人為的な管理のもとで森林状態が維持され、かつ気温条件と構成樹種の条件から判断してマツ林となりうる場所を区分した（以下、潜在マツ林域）。この潜在マツ林域について温暖化時のマツ枯れの危険度をマップ化した。

４．結果及び考察

（１）温暖化の森林植物への影響と脆弱性の評価に関する研究

1)　ブナ林

モデルに基づき分布予測を行った結果、ブナ林の適域の面積は、3次メッシュセル1つの面積を1 km^{2}とすると、現在の気候下では26,220km^{2}であった（図2）。このうち、実際にブナ林である地域は56％にあたる14,579km^{2}であった。RCM20とMIROCシナリオによる将来予測では、適域全体の面積は、現在の26,220km^{2}から2031-2050年にはRCM20とMIROCではそれぞれ86%(22,637km^2)と56% (14,744 km^2)に、2081-2100年にはそれぞれ37%(9,618km^2)と21%(5,427km^2)に減少すると予測された。これらの適域のうち、ブナ林が実際に分布している地域だけを対象とすると、現在（14,579km^2）に比べて2031-2050年にはRCM20とMIROCではそれぞれ47%(6,821km^2)と32%(4,637km^2)に、2081-2100年にはそれぞれ21%(3,117km^2)と4%(544km^2)に減少すると予測された。2081-2100年の適域の分布は、現在の気候に比べ、本州太平洋側や西日本でほとんどなくなり、本州日本海側でも大きく縮小すると予測された。したがって、全国的に見ると、本州太平洋側や西日本のブナ林が温暖化に対して脆弱と考えられる。白神山地世界遺産地域では、適域が現在の気候下では世界遺産地域の95 %を占めるが、2031-2050年にはRCM20で30 %、MIROCで2 %に減少し、2081-2100年にはRCM20で0.6 %、MIROCでは消滅する（図2）。ブナの寿命は200年～400年であり、温暖化によりブナ林がすぐに衰退する可能性は低い。ブナの老齢木の枯死後に高木種の交代が順調に進行するかについて、ブナ林の大きな変化や衰退が予測される地域を中心に監視していくことが重要である。

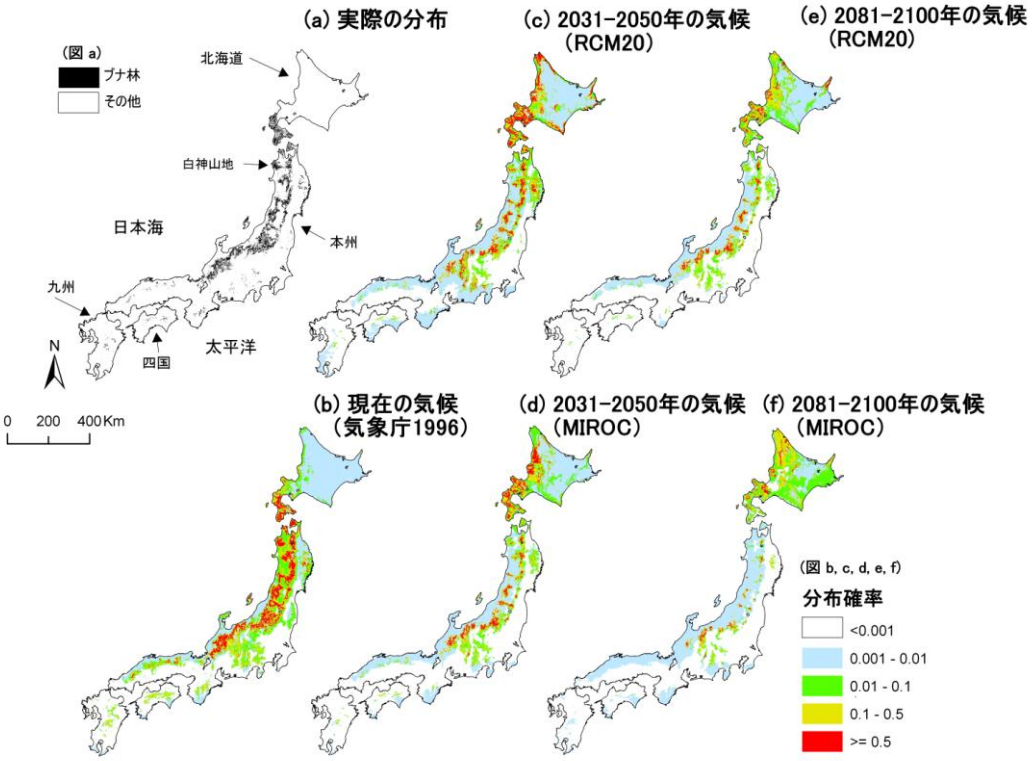


図2．ブナ林の実際の分布(a)、各気候条件において予測されたブナ林分布確率の分布(b～f)．ブナ林の適域は、分布確率0.5以上(赤色)の地域である．

2)　ササ類

温暖化に伴いチシマザサ節とチマキザサ節の潜在生育域は、それぞれ46.9%と32.1%に減少すると予測された。潜在生育域の減少が起こる原因は、チシマザサ節は積雪の減少、チマキザサ節は積雪の減少とWIの増加と考えられる。脆弱な地域は、チシマザサ節では北海道東部や東北地方北部及び本州日本海側の低地で、チマキザサ節では本州日本海側の低地及び本州太平洋側の低・中標高域である。これらの脆弱な地域では、現在生育するササ類が将来衰退する可能性がある。

3)　ハイマツ

ハイマツの分布域における現在の気候下での適域の面積は7,867km^{2}であった。2081-2100年には、RCM20で2,456km^2（31%）、MIROCで1,061km^2（14%）に適域が減少する。いずれの場合も、ハイマツが分布する山地の全てにおいて、適域の面積が縮小または消失することが予測された。特に東北地方では、RCM20で9%に、MIROCでは0%にそれぞれ縮小すると予測され、脆弱な地域といえる。東北地

方から適域が消失することにより、適域は中部山岳地域と北海道に大きく二分され、ここが温暖化後の逃避地になると考えられる。

4) 針葉樹10種

解析対象種10種のうち、亜寒帯性樹種（オオシラビソ、シラビソ、コメツガ）、冷温帯性樹種（ウラジロモミ）、稀少種（トガサワラ）の計5種は将来、適域や潜在生育域が全体的に減少するだけでなく、特定地域でほとんど消失することから脆弱であると推定された。温暖化後も適域が維持される地域(逃避地)は、オオシラビソ・シラビソ・ウラジロモミ・コメツガにとっては中部山岳地域であった。トガサワラは、広域な逃避地が消滅してしまうので、温暖化に対して特に脆弱であると考えられる。

（２）高感受性生態系への温暖化影響の予測と検出に関する研究

1) 積雪の高精度予測

SPOT/VEGETATIONの旬データを用いて補正した積雪分布予測モデルから推定した将来の積雪水量分布データによると、本州付近の積雪水量は温暖化によって大きく減少する。MIROCシナリオによる平均気温の上昇は約4.7℃であり、積雪環境に対しては湿潤断熱源率で標高約800m程度の効果をもたらすこととなり、結果的に雨雪閾値付近で推移する低標高域の積雪環境はどのような計算手法を用いても激減することが明らかになった。

2) 亜高山帯林への積雪影響評価

亜高山帯針葉樹のうち、太平洋側で卓越するコメツガやシラビソについては、地表（土壌上）で定着している高さ0.3～1.3mの稚樹の割合は、根雪期間が長い場所ほど低下する傾向が明瞭に認められた。オオシラビソでは同様の低下傾向は見られるが、コメツガやシラビソに比べて傾向は小さかった。積雪傾度に沿った針葉樹の分布の成立メカニズムとして、種子・実生・稚樹の更新初期段階における定着阻害が重要であることが明らかにされた。

3) 山地湿原への影響検出

奥只見の平ヶ岳頂上部の湿性草原を対象として、航空写真の年代別比較と植生の変化について調査を行った結果、42年間で28%の面積の縮小が確認された。この変化はチシマザサやハイマツの湿原への侵入によるもので、特に湿原－非湿原境界域でチシマザサの増加が認められた。同様の手法で尾瀬ヶ原や会津駒ヶ岳など、平ヶ岳周辺域の湿性草原についても近年の変化を調査した結果、多くの場所で植生の変化が認められ、とくに雪田草原型の湿原において顕著な縮小傾向が認められた。

4) マツ枯れへの影響評価

1～2℃の気温上昇によって、現在被害が及んでいない青森県の平野部にまで危険域が拡大すると予想される(図3)。また、気温上昇が2℃を超えると、岩手県内陸部のアカマツ林業地帯やマツタケ生産地に壊滅的な被害が及ぶことが懸念される。現在､秋田・青森県境域では、防除帯の設定など被害拡大防止のため施策がすでに始まっているが、今後、温暖化に伴いさらなる防除努力が必要となる。現在、マツ枯れの最前線から10km以内の範囲についてはとくに重点的な防除対策が取られており、現在の主要な対策域は海岸部と内陸平野部となっているが、温暖化によって対策域が内陸に拡大することが予想される。

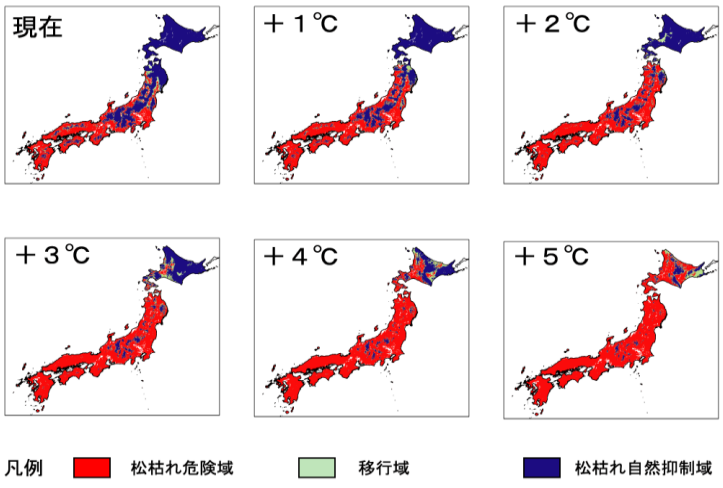


図3. 気温上昇によるマツ枯れ危険域の変化

５．研究者略歴

課題代表者：田中信行
1955年生まれ、東京大学農学研究科修士課程修了、農学博士、
森林総合研究所　主任研究員
研究参画者
（１）：　田中信行　（同上）
（２）１）：大丸裕武
1961年生まれ、北海道大学大学院環境科学研究科修士課程修了、農学博士
森林総合研究所　山地災害研究室長
２）：小南裕二
1965年生まれ、京都大学農学系研究科修士課程修了
森林総合研究所　関西支所　主任研究員
３）：杉田久志
1956年生まれ、東京大学農学研究科修士課程修了、農学博士
森林総合研究所　植生管理研究室長

６．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）
(1)査読付き論文
1) Tanaka, N., Matsui, T., Shimada, K., Yagihashi, T. and Taoda, H.: Journal of Agricultural Meteorology, 60, 433-438(2005)
“Constructing vegetation databases useful for assessing impact of climate changes in Japan”
2) Matsui, T., Shimada, K., Yagihashi, T., Nakaya, T., Taoda, H. and Tanaka, N. : Journal of Agricultural Meteorology, 60, 439-444 (2005)
“Assessing potential distribution of beech (Fagus crenata) in central Japan”
3) Yagihashi, T., Matsui, T., Nakaya, T., Taoda, H. and Tanaka, N.: Proceedings of Oak 2003, Japan: a Joint Meeting of IUFRO Working Groups, Genetics of Quercus & Improvement and Silviculture of Oaks), P.45-58(2005)
“Climatic controls differentiating the distributions of *Fagus crenata* forests and *Quercus mongolica* var. *grosseserrata* forests in Japan”
4) Tanaka, N., Matsui, T, Yagihashi, T and Taoda, H.: Global Environmental Research, 10(2), 151-160(2006)
“Climatic controls on natural forest distribution and predicting the impact of climate warming: Especially referring to buna (*Fagus crenata*) forests”
5) 田中信行，松井哲哉，八木橋勉，垰田宏：地球環境，11，11-20(2006)
「天然林の分布を規定する気候要因と温暖化の影響予測：とくにブナ林について」
6) 松井哲哉，田中信行，八木橋勉：日本森林学会誌，89(1)，7-13(2007)
「世界遺産白神山地ブナ林の気候温暖化に伴う分布適域の変化予測」
7) Yagihashi, T., Matsui, T., Nakaya, T., Tanaka, N. and Taoda, H.: Plant Species Biology 22, 217-225(2007)
“Climatic determinants of the northern range limit of *Fagus crenata* forests in Japan”
8) 朝岡良浩，小南裕志，竹内由香里，大丸裕武，田中信行：水文・水資源学会誌，20，519-529 (2007)
「衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性」
9) 安田正次，大丸裕武，沖津進：地理学評論，80，842-856(2007)
「オルソ化航空写真の年代間比較による山地湿原の植生変化の検出」
10) 津山幾太郎，松井哲哉，小川みふゆ，小南裕志，田中信行：GIS－理論と応用，16，11-25(2008a)
「本州東部におけるチシマザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価」
11) 津山幾太郎，松井哲哉，堀川真弘，小南裕志，田中信行：GIS－理論と応用，16，99-113 (2008b)
「日本におけるチマキザサ節の潜在分布域の予測と気候変化の影響評価」
12) 高橋潔，松井哲哉，肱岡靖明，田中信行，原沢英夫：地球環境研究論文集，16，111-119 (2008)
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
13) 堀川真弘，村上健太郎，津山幾太郎，大藪崇司，松井哲哉，森本幸裕，田中信行：日本緑化工学会誌，34(1)，85-90 (2008)
「イヌケホシダの潜在分布域と気候変化シナリオに基づく分布変化の予測」

14) 杉田久志，岩本宏二郎，森澤猛，齋藤智之，壁谷大介，岡本透，酒井寿夫：森林総合研究所研究報告，7，81-89(2008)
「御嶽山における密なチマキザサ林床をもつ亜高山帯針葉樹林の構造と動態」
15) Horikawa, M., I. Tsuyama, T. Matsui, Y. Kominami, and N. Tanaka：Landscape Ecology, 24, 115-128(2009)
"Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (Pinus pumila)"
16) Matsui, T., K. Takahashi, N. Tanaka, Y. Hijioka, M. Horikawa, T. Yagihashi, and H. Harasawa：Applied Vegetation Science, 12, 328-339(2009)
"Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (*Fagus crenata*) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan"
17) 松井哲哉，田中信行，八木橋勉，小南裕志，津山幾太郎，高橋潔：地球環境，14，165-174(2009)
「温暖化にともなうブナ林の分布適域の変化予測と影響評価」
18) 田中信行，中園悦子，津山幾太郎，松井哲哉：地球環境，14(2)，153-164(2009)
「温暖化の日本産針葉樹10種の潜在生育域への影響予測」
19) 中尾勝洋，松井哲哉，田中信行，福嶋司：森林立地学会誌，森林立地51(1)，27-37(2009)
「日本における常緑カシ類2種の個体および優占林の分布を規定する気候条件」

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）
なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－４温暖化の森林への影響と脆弱性の評価に関する研究

（１）温暖化の森林植物への影響と脆弱性の評価に関する研究

独立行政法人森林総合研究所

植物生態研究領域　田中信行

北海道支所　松井哲哉

関西支所　小南裕志(平成20～21年度)

〈研究協力機関〉

森林総合研究所　植物生態研究領域　津山幾太郎、中尾勝洋、比嘉基紀、中園悦子、堀川真弘

平成17～21年度合計予算額　65,817千円

（うち、平成21年度予算額　14,988千円）

※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］自然林への温暖化の影響を評価するために、気候変数から植物分布を予測する分布予測モデルを作り、ブナ林、ササ類、ハイマツ、針葉樹10種について生育が可能な地域(潜在生育域)の変化予測を行った。現在ブナ林が分布する地域における生育に適する地域（適域）の面積は、全国で、現在に比べて2031-2050年にはRCM20とMIROCシナリオで47%と32%に、2081-2100年には21%と4%にそれぞれ減少すると予測された。現在はほとんどが適域である白神山地世界遺産地域では、将来、夏期の高温のために適域が大幅に縮小すると予測された。北海道では適域が現在の分布北限を越えて北へ広がるが、ブナの移動速度が遅い上に、分断化された天然林の配置ではブナの移動は困難なので、温暖化のペースに追い付けないと推定される。多雪地域に分布するササ類のチシマザサ節とチマキザサ節の生育が可能な地域(潜在生育域)は、温暖化に伴いそれぞれ46.9%と32.1%に減少すると予測された。潜在生育域の減少が起こる原因は、チシマザサ節は積雪の減少、チマキザサ節は積雪の減少とWI（生育期の積算温度）の増加と考えられる。ハイマツの分布域における現在の気候下の適域は、2081-2100年には、RCM20で31%に、MIROCで14%に減少すると予測された。いずれの場合も、分布する山地の全てにおいて、適域の面積が縮小または消失することが予測された。特に東北地方は、RCM20で9%に、MIROCで0%にそれぞれ縮小すると予測され、脆弱な地域といえる。針葉樹10種のうち亜寒帯性樹種（オオシラビソ、シラビソ、コメツガ）、冷温帯性樹種（ウラジロモミ）、中間温帯性稀少種（トガサワラ）の計5種は、温暖化に伴い適域や潜在生育域が全体的に減少するだけでなく、特定地域でほとんど消失することから脆弱であると推定された。温暖化後も適域が維持される地域(逃避地)は、オオシラビソ・シラビソ・ウラジロモミ・コメツガが中部山岳地域であった。トガサワラには大きな逃避地がなくなってしまうので、とくに脆弱である。

［キーワード］分布予測モデル、適域、脆弱な種と地域、逃避地、森林植物

１．はじめに

温暖化の危険な水準を示す森林生態系の指標として、種の生育が可能な地域(潜在生育域)の変化が重要である。生物の分布データとそれに対応する環境データを使った分布予測モデル解析により、温暖化後の種の潜在生育域の予測が1990年代以降海外で進んでいる。たとえば、アメリカ合衆国東部では、現在と温暖化後における80樹種の潜在生育域の予測が行われている(Iverson and Prasad, 1998)。しかし、日本では、この分野の研究はまだ少ない。

現在の気候条件下で、植物種の分布を環境条件から予測するモデルを開発することにより、種の生育に適する潜在生育域が予測できる。このモデルに将来の気候条件を組み込むことにより、将来における潜在生育域が空間的に予測できる。現在と将来の潜在生育域と実際の分布を比較することにより、温暖化に対して脆弱な種と地域、温暖化後も持続的に生育が可能な地域（逃避地）を特定でき、自然生態系の適応策に役立てることができる。

我々は、これまでに、環境庁（現環境省）の第3回自然環境保全基礎調査による3次メッシュ植生データベース(MVDB)と、これに対応する気候・環境データを用いて分布予測モデルを作成することにより、ブナ林の成立に適する地域（適域）を現気候と将来の気候下で予測し、脆弱性地図を作成した(Matsui et al., 2004)。その後、SRES排出シナリオに基づく新しい気候変化シナリオが公表された。新気候変化シナリオに基づくブナ林への影響予測を、全国だけでなく地域ごとに行った。一方、多様な植物種の潜在生育域の予測を行うために全国の植生調査区(ルルベ）のデータを集積した植物社会学ルルベデータベース（PRDB）を構築している。このデータを用いて、ササ類やハイマツ、針葉樹10種の温暖化影響評価を行った。プロジェクトの最終年にあたり、この成果について報告する。

２．研究目的

全期間の目的は、重要な植物種について潜在生育域の予測を行い、現在と温暖化後の潜在生育域の地図を作成し、脆弱性の高い種と地域を特定することである。

（１）ブナ林

2004年以前のブナ林分布に関する温暖化影響予測研究は、IS92a排出シナリオを用いた適域の予測であった（Matsui et al., 2004）。その後、SRES排出シナリオに基づく気候変化シナリオであるRCM20やMIROCなどが公表された。そのため、ブナ林においても新たな気候変化シナリオ（RCM20とMIROC）におけるブナ林適域の変化を、全国と地域別に予測することを目的とする。とくに、世界遺産地域である白神山地について詳しく予測する。

（２）ササ類

ササ類は日本の冷温帯における代表的な林床優占種である。ササ類は、他の植物の定着や更新の阻害要因となるほか、動物の生息場所や土壌保全の機能を果たすなど、森林生態系における生物間相互作用に大きな影響力を持つ「キーストーン種」である。温暖化は積雪量に大きな変化を与えるので、多雪地域に生育するチシマザサ節、チマキザサ節のササ類に大きな影響を与えると推定される。分布予測モデルを用いて、分布を規定する気候条件を解明し、温暖化による潜在生育域の変化を予測することを目的とする。

（３）ハイマツ

ハイマツは、マツ科マツ属の匍匐性の低木で、日本の高山帯の代表種である。ユーラシア大陸北東部に広く分布し、日本では北は北海道から南は赤石山脈まで、西は白山までの山地の上部に分布し、森林限界より上の高山帯で優占する。高山帯・亜高山帯の植物は、寒冷な山地上部にのみ孤立して分布するので､温暖化に伴って移動することが難しく脆弱であると考えられる。そこで、日本の高山帯の優占樹種であるハイマツを対象とし、気候変数を用いた分布予測モデルを作成し、現在と温暖化後の生育域を比較することで、温暖化に対する脆弱な地域を明らかにすることを目的とする。

（４）針葉樹10種

日本には39種の針葉樹が分布する。亜熱帯・暖温帯から亜寒帯までの地域で異なる分布域をもつ針葉樹10種について、気候変数を用いた分布予測モデルを作成し、現在と温暖化後の生育域を比較することで、温暖化に対する脆弱な種と地域及び逃避地を明らかにすることを目的とする。

３．研究方法

（１） ブナ林

気候変化が日本のブナ林に及ぼす影響を評価するために、ブナ林の分布確率を環境要因から予測する分類樹モデル(Clark and Pregibon, 1992)を構築して分布に適する地域（適域）を予測した。モデルでは、目的変数をブナ林の実際の分布とし、ブナ林や他の天然林の分布データとして第3回自然環境保全基礎調査による3次メッシュ植生データベース（MVDB）を用いた。説明変数には4気候変数と土地的な5環境変数を用いた。気候変数は、成長期の熱量の指標として暖かさの指数（WI）、冬期の低温の指標として最寒月の日最低気温の平均（TMC）、成長期の水分条件の指標として夏期（5～9月）降水量（PRS）、冬期の積雪や降雨の指標として冬期(12～3月)降水量（PRW）である。環境変数は、地質、土壌、大地形、斜面方位と斜面傾斜度である(Matsui et al., 2004)。

以上のデータを用いて、統計モデルの１つである分類樹モデルを構築した。これにより、ブナ林の分布する確率が全国3次メッシュ（約1km^{2}のメッシュ）で算出可能となった。構築されたモデルの実際の分布に対する適合度を示すKappa係数を求めたところ、分布確率0.3～0.5でKappa係数が最大となったため、分布確率0.5以上の地域をブナ林の適域と定義した。将来の気候変化シナリオには、RCM20(気象庁, 2004)とMIROC(K-1 Model Developers, 2004)の２つのシナリオ（2031-2050年と2081-2100年）を用いた。年平均気温は、現在の気候（気象庁, 1996）と比較すると、2031-2050年のRCM20とMIROCではそれぞれ2.2℃と2.3℃の上昇、2081-2100年のRCM20とMIROCではそれぞれ2.8℃と4.4℃の上昇である。

（２）ササ類

ササ類の分布を気候変数から予測する分布予測モデルには、分類樹モデルを用いた。モデルの応答変数とするチシマザサ節とチマキザサ節の分布データは、PRDBから抽出した在・不在データである。チシマザサ節は在962地点・不在7,252地点、チマキザサ節は在798地点・不在7,416地点であった。説明変数とする5つの現在の気候変数は、暖かさの指数（WI）、最寒月の日最低気温の平均（TMC）、夏期降水量（PRS）、及び積雪量の指標として最大積雪水量（MSW）、温暖な地域における冬期の水分条件の指標として冬期（11～4月）降雨量（WR）で、3次メッシュ気候値（気象

庁，1996）から算出した。温暖化の影響予測に用いる気候変化シナリオにはRCM20の2081～2100年の平均値を用いた。ササ類の在・不在データと気候データから構築した分類樹モデルに、現在と温暖化後の3次メッシュ気候データを当てはめ、ササ類の潜在生育域の変化を予測した。潜在生育域の過大・過小な予測を防ぐため、分布確率≧0.01を潜在生育域（生育可能な地域）と定義し、分布確率＜0.01を非生育域（生育が不可能な地域）とした。潜在生育域は、ROC解析から求めた分布確率の閾値を基準に、適域（種の生育に適した地域）と辺縁域（あまり適さないが生育は可能な地域）に区分した。

（３） ハイマツ

温暖化のハイマツ分布への影響を評価するために、ハイマツの分布データと、現在の気候（気象庁，1996）から算出した5つの気候変数を用いて、ハイマツの分布を気候変数から予測する分類樹モデルを作成した。モデルの応答変数に用いるハイマツの分布データは、PRDBから抽出した在・不在データである。6,049植生調査地点中159地点にハイマツが出現した。一方、ハイマツの面的分布域のデータとして、日本産重要樹種の天然分布（林，1954）に基づき分布域を電子化した。本分布データでは、ハイマツを含む3次メッシュセルは8,417であった。5気候変数は、WI、TMC、PRS、最深積雪水量（MSW）と冬期降水量（WR）である。このモデルに現在の気候（気象庁，1996）と２つの気候変化シナリオ（2081-2100年）RCM20とMIROCを組み込んで、現在と将来のハイマツの適域を予測した。その際、富士山の高山帯など気候的には適していても実際にはハイマツの分布しない山地があるため、現在分布しない山地には今後移動することはないと仮定して、ハイマツの実際の分布域（林，1954）内に限定して温暖化後の適域を予測した。

（４）針葉樹10種

暖温帯から亜寒帯までの地域で異なる分布域をもつ針葉樹10種について、温暖化影響予測を行った。各樹種の分布データと現在の気候（気象庁，1996）から算出した4つの気候変数(WI、TMC、PRS、PRW)を用いて、分布を気候変数から予測する分類樹モデルを作成し、このモデルに現在の気候（気象庁，1996）と2つの気候変化シナリオ（2081-2100年）RCM20とMIROCを組み込んで、現在と将来の針葉樹の適域を予測した。

４．結果・考察

（１）ブナ林

1） 全国への影響

モデルに基づき分布予測を行った結果、ブナ林の適域の面積は、３次メッシュセル１つの面積を1km^{2}とすると、現在の気候下では26,220 km^{2}であった（図1）。このうち、実際にブナ林である地域は56％にあたる14,579 km^{2}であった。RCM20とMIROCシナリオによる将来予測では、適域全体の面積は、現在の26,220 km^{2}から2031-2050年にはRCM20とMIROCではそれぞれ86%(22,637 km^2)と56%(14,744 km^2)に、2081-2100年にはそれぞれ37%(9,618 km^2)と21%(5,427 km^2)に減少すると予測された（図1）。これらの適域のうち、ブナ林が実際に分布している地域だけを対象とすると、現在（14,579 km^2）に比べて2031-2050年にはRCM20とMIROCではそれぞれ47%(6,821 km^2)と32%(4,637 km^2)に、2081-2100年にはそれぞれ21%(3,117 km^2)と4%(544 km^2)に減少すると予測された（図1）。

2081-2100年の適域の分布は、現在の気候に比べ、本州太平洋側や西日本でほとんどなくなり、本州日本海側でも大きく縮小すると予測された（図1）。したがって、全国的に見ると、本州太平洋側や西日本のブナ林が温暖化に対して脆弱と考えられる。ブナの寿命は200年から400年であり、温暖化によりブナ林がすぐに衰退する可能性は低い。ブナの老齢木の枯死後に高木種の交代が順調に進行するかについて、ブナ林の大きな変化や衰退が予測される地域を中心に監視していくことが重要である。

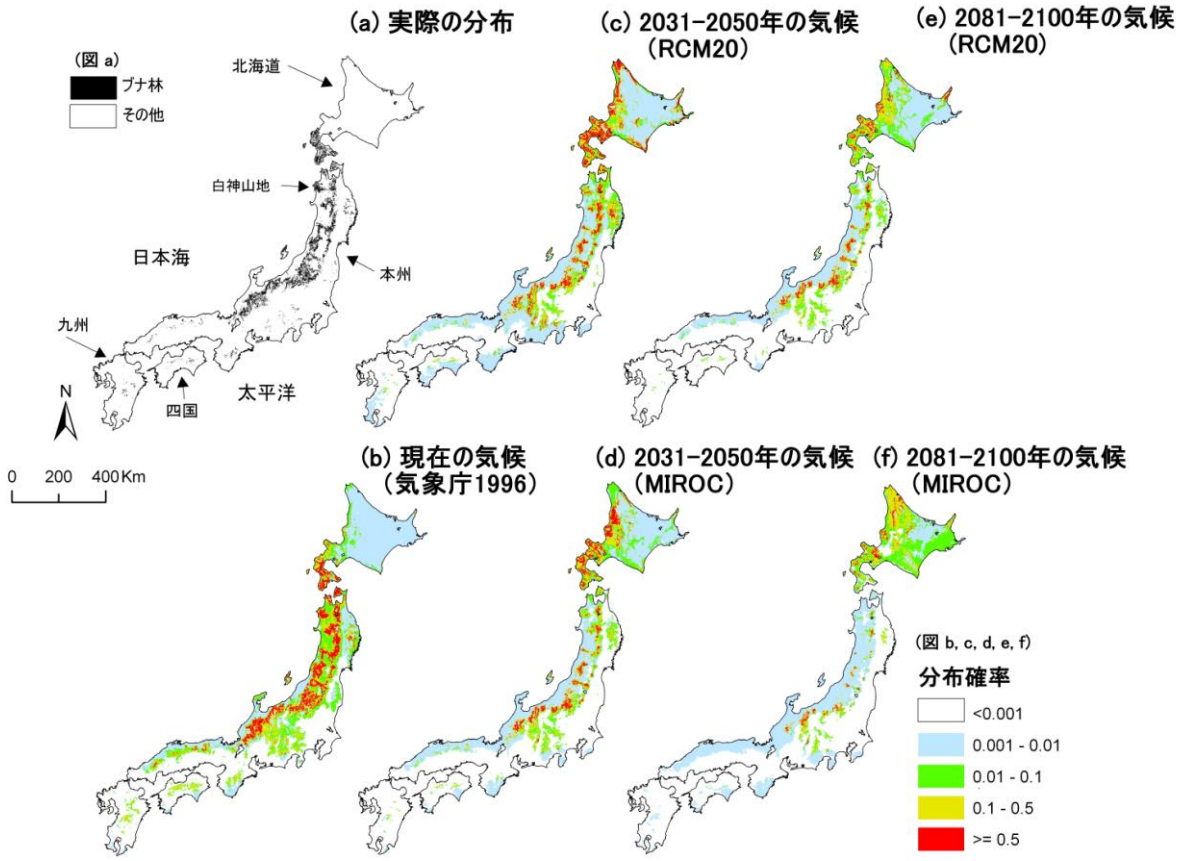


図1. ブナ林の実際の分布(a)，各気候条件において予測されたブナ林分布確率の分布(b～f)．
ブナ林の適域は、分布確率0.5以上(赤色)の地域である．

2)　白神山地世界遺産地域への影響

白神山地世界遺産地域では、適域が現在の気候下では世界遺産地域の95％を占めるが、2031-2050年にはRCM20で30％、MIROCで2％に減少し、2081-2100年にはRCM20で0.6％、MIROCでは消滅する（図1）。RCM20シナリオの2081-2100年には、白神岳（1,232 m）周辺の狭い地域が適域として残るだけとなる。施業管理計画図によると、約8割が林齢150から200年生であるので、2100年頃には多くのブナが壮齢期から老齢期を迎える。このため、将来は適域でなくなることを考慮すると、ブナ林下限域から、ブナ高木の枯死により発生する林冠ギャップの形成を契機として他樹種との競争によりブナが排除され、ブナの立木密度の低下が起こると考えられる。その場合、この地域の競合種としては、ミズナラ、コナラ、クリ、アカシデ、トチノキ、ケヤキ、ハリギリ、シナノキなどの落葉広葉樹種が考えられる。ただし、ブナ林の衰退が現在検出されているわけではない。モ

ニタリングを通して森林の変化を検出していくことが今後課題である。

3)　北海道への影響

現在の気候における適域の面積は3,348 km^{2}である。2081-2100年のMIROCシナリオでは3,297 km^{2}に減少するものの、それ以外は120%(4,062 km^2)～350%(11,716 km^2)に増加する（図1）。適域は、ブナ林の分布北限を越えて北東に拡大するが、2081-2100年には縮小に向かい断片化する。予測されている温暖化に伴う気候帯の水平移動速度は、花粉分析から推定された過去のブナ林の移動速度よりも速い。花粉分析の研究から推定される最終氷期以降のブナ林の推定北進速度は北海道で1.1～2.0 km/100年(五十嵐, 1994; 滝谷・荻原, 1997)である。RCM20とMIROCシナリオの将来の北海道における最寒月最低気温（TMC）の北進距離は、例えば-12.25℃の等温線を例とすると約10～50 km/100年である。ブナの移動速度を本州の推定値である23.3 km/100年(Tsukada, 1982)と仮定しても、温暖化に伴う等温線の移動に追いつけない可能性が高い。ブナがスムーズに移動するためには天然林が連続している必要があるが、現在の土地利用は人工林、農耕地、都市などが天然林を分断しているため、将来のブナの移動は阻害されると予想される。さらに将来は、適域面積は増加しても断片化するため、ブナの分布移動は一層困難となるだろう。

（２）ササ類

ササ類の分布は、これまで、主に最大積雪深（MSD）によって説明されてきた。しかし、本研究の結果、ササ類の分布はMSDだけでは説明されず、WIやPRSなどの他の気候要因との階層的な相互

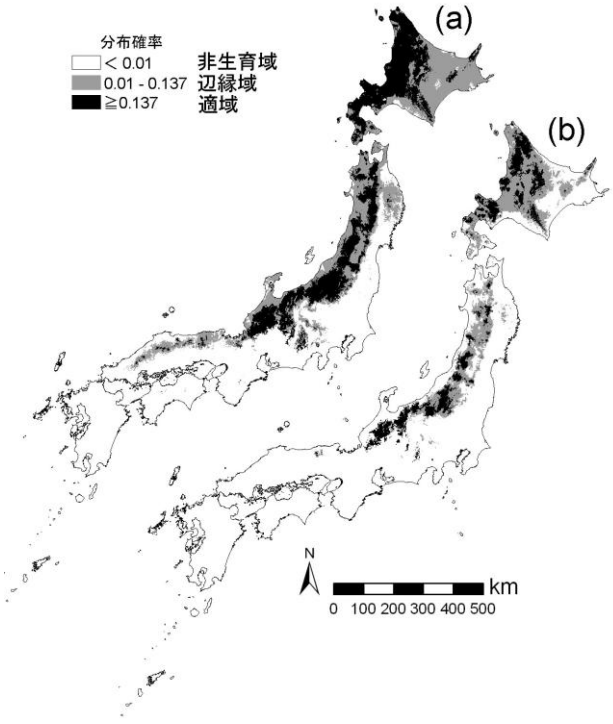


図2　(a)現在の気候と(b)RCM20(2081-2100)におけるチシマザサ節の潜在生育域の分布

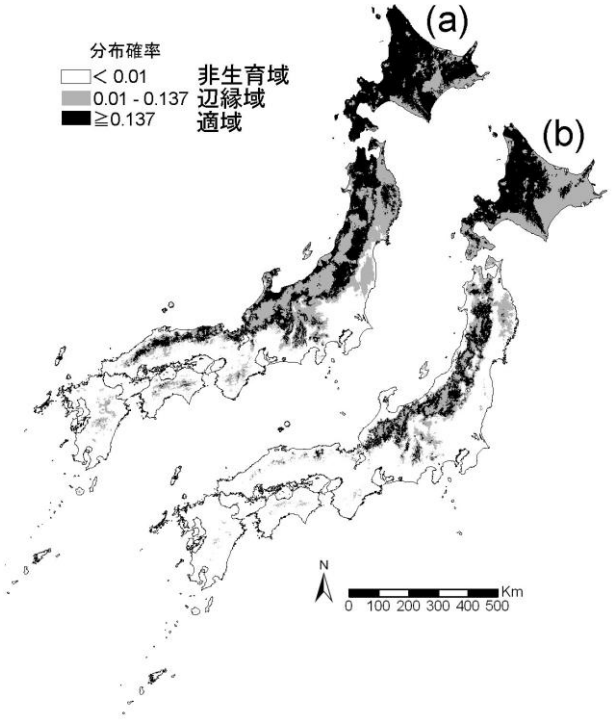


図3　(a)現在の気候と(b)RCM20(2081-2100)におけるチマキザサ節の潜在生育域の分布

作用によって規定されていることが明らかになった。チシマザサ節、チマキザサ節は主にMSWとWIによって分布が規定されていた。チシマザサ節の潜在生育域は、MSW≧97.7mmを満たす地域に分布

し、適域はMSW≧215.6mmかつWI≧30.7を満たす地域に分布した。チマキザサ節の潜在生育域は、MSW≧68.9mmか、MSW<68.9mmかつWI<92.6を満たす地域に分布し、適域はMSW≧131.6mmかつWI≧31.6を満たす地域に分布した。

温暖化に伴いチシマザサ節とチマキザサ節の潜在生育域は、それぞれ46.9%と32.1%に減少すると予測された(図2,3)。潜在生育域の減少が起こる原因は、チシマザサ節は積雪の減少、チマキザサ節は積雪の減少とWIの増加と考えられる。温暖化に対して脆弱な地域（潜在生育域から非生育域に変化する地域）と強靭な地域（適域が維持される地域）の場所を特定した。チシマザサ節が脆弱な地域は、北海道東部や東北地方北部、本州日本海側の低地で、強靭な地域は北海道から鳥取までの日本海側中・高標高域と予測された（図2）。チマキザサ節が脆弱な地域は、本州日本海側の低地や、本州太平洋側の低・中標高域で、強靭な地域は北海道から島根までの日本海側の山地と、太平洋側の高標高域と予測された(図3)。脆弱な地域では、現在生育するササ類が衰退する可能性がある。ササ類の衰退は、森林動態や生息する動物や植物の生存に大きな影響を与える。

（３）ハイマツ

モデルによりハイマツの分布確率を全国で予測した結果、分布確率が0.06以上の地域が実際の分布と最も良く一致したので、この地域を適域と定義した。また、0.01～0.06の地域を辺縁域と定義した。ハイマツの分布域における現在の気候下での適域の面積は7,867km^{2}であった。2081-2100年には、RCM20で2,456 km^2（31%）、MIROCで1,061 km^2（14%）に適域が減少する(図4)。いずれの場合も、分布する山地の全てにおいて、適域の面積が縮小または消失することが予測された。特

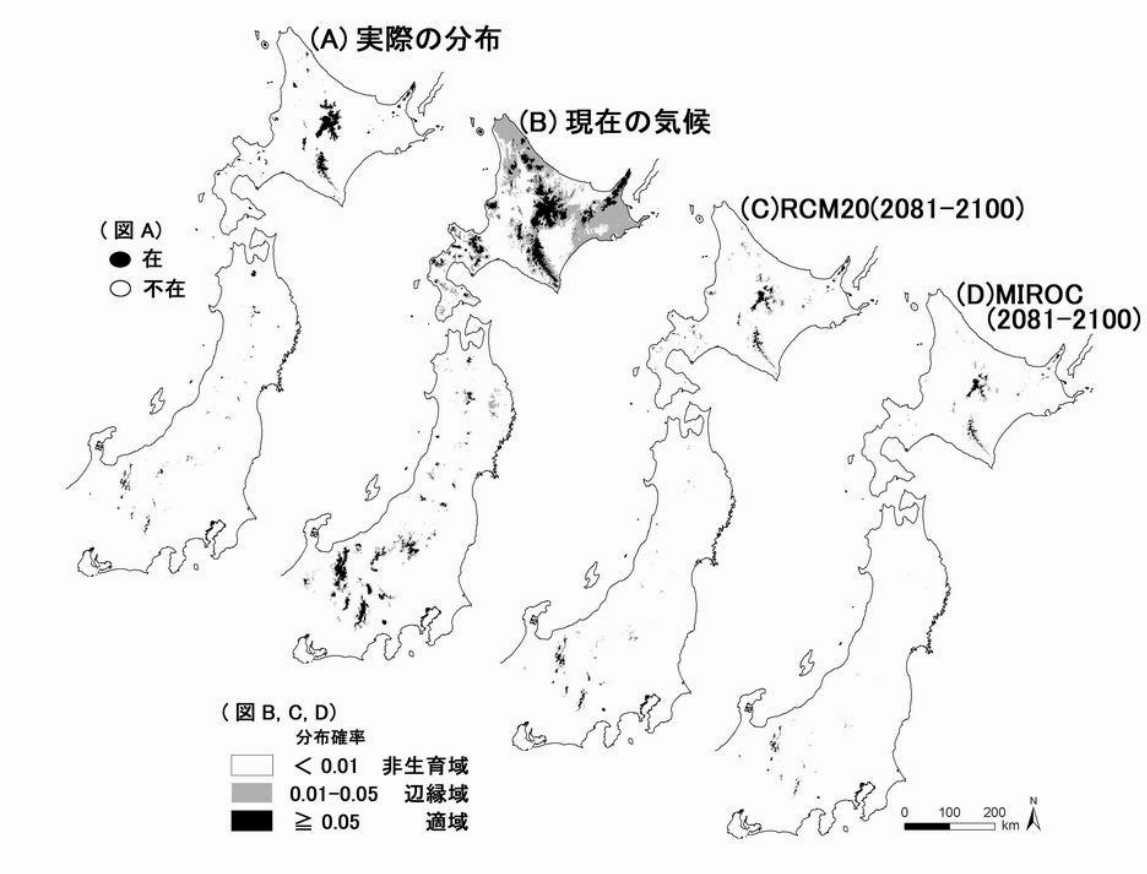


図4　(A)実際のハイマツの分布，(B) (C) (D)は各気候条件におけるハイマツの生育地タイプの分布予測．(Horikawa et al., 2009の図を改変)

に東北地方では、RCM20で9%に、MIROCでは0%にそれぞれ縮小すると予測され、脆弱な地域といえる。東北地方から適域が消失することにより、適域は中部山岳地域と北海道に大きく2分され、ここが温暖化後の逃避地になると考えられる。

（４）針葉樹10種

現在と将来の気候で予測された生育域を比較した結果、温暖化後の適域の面積は、本州以南で、亜寒帯（寒温帯）樹種（オオシラビソ・シラビソ・コメツガ）が0～20%に、冷温帯樹種（ウラジロモミ）が8～28%に、中間温帯樹種（モミ・ツガ・トガサワラ）が27～120%に、暖温帯樹種（イヌマキ・ナギ）が185～326%に変化すると予測された。また、北海道では、トドマツが18～52%に変化すると予測された。これは、樹木が新たな適域に完全に移動できると仮定した場合に利用できる土地面積を示している。樹木の移動は、温暖化による気候帯の移動よりも著しく遅い上に、自然林の分断化が移動を困難にしている。樹種が全く移動しないと仮定すると、温暖化後に樹種が利用できる適域の面積は、移動できると仮定した場合より小さくなることが多く、本州以南で、亜寒帯樹種が0～18%に、冷温帯樹種が2～18%に、中間温帯樹種が0～68%に、暖温帯樹種が86～100%に、北海道でトドマツが18～52%に変化すると予測された（表1）。現実には、上の2つの移動条件の間の変化が起こるだろう。

表1　樹種が移動しないと仮定した場合における温暖化に伴う針葉樹種10種の適域（SH)、潜在生育域（PH)の面積（2次メッシュセル数）の変化．トドマツは北海道のみ，他9種は本州以南のみを対象とする.2次メッシュセルとは約10km×10kmの区画で，3次メッシュセルが10個×10個集ったもの．（田中ら，2009）

樹種	現在の気候		RCM20		MIROC	
	SH	PH	SH	PH	SH	PH
トドマツ	822	930	426	488	148	165
オオシラビソ	148	148	22	22	5	5
シラビソ	32	267	3	31	0	30
ウラジロモミ	193	193	34	34	4	4
モミ	987	2,546	329	1,678	92	1,137
コメツガ	190	214	34	64	12	25
ツガ	419	1,301	285	397	217	365
トガサワラ	98	98	1	1	0	0
イヌマキ	1,188	1,596	1,188	1,188	1,188	1,188
ナギ	390	390	335	335	345	345

現在と将来の気候で10種のうち亜寒帯樹種（オオシラビソ、シラビソ、コメツガ）、冷温帯樹種（ウラジロモミ）、中間温帯稀少種（トガサワラ）の計5種は、適域や潜在生育域が全体的に減少するだけでなく、特定地域でほとんど消失することから脆弱であると推定された(表2)。温暖化後も適域が維持される地域(逃避地)は、オオシラビソ・シラビソ・ウラジロモミ・コメツガが中部山岳地域であった。トガサワラには温暖化後も中部地域に適域が維持されるが、実際の分布域（紀伊・四国）からは遠く離れているため逃避地にはならない。このためトガサワラには大きな逃避地がなくなってしまうので、温暖化に対してとくに脆弱であると考えられる。

表2 温暖化に対して脆弱な樹種と地域，及び逃避地（田中ら，2009）

樹種	脆弱な地域	逃避地
オオシラビソ	東北	中部
シラビソ	紀伊，四国	中部
ウラジロモミ	紀伊，四国	中部
コメツガ	紀伊，四国	中部
トガサワラ	紀伊，四国	なし

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

空間分布予測モデルの手法の発達により、野生動植物の潜在生育域の予測が欧米を中心に行われている。この手法は、温暖化影響を広域で推定するのに適している。東アジアでは、この分野の研究は少なく、今後の発展が必要である。日本では、我々のチームが中心になって取り組んでおり、ブナ林、ササ類、ハイマツ、針葉樹10種についての成果を発表した。

現在、前述のPRDBが全国スケールで構築されたので、多種について分布予測モデルを作る基盤ができた。PRDBは、全国のルルベ（植生調査区）資料を集積しており、日本産の維管束植物種の分布データを提供できる。欧州では、全域を覆うルルベデータベースはまだできていない。米国では、森林調査データが整備されているが、林床植物についてのデータは不十分であり、また、地続きのカナダやメキシコのデータが利用できる状態になっていない。欧米における植物種の潜在生育域の予測では、植物分布図や森林調査資料に基づく植物分布データを利用して20～50kmの空間解像度の解析が主流である。我々は、日本の急峻な地形に適合させるため高い空間解像度（1km）の解析を行っている点では、欧米より優れている。

（２）地球環境政策への貢献

ブナ林分布への影響予測論文は、IPCC第4次評価報告書WG2(2007)に引用された。分布予測モデルによる温暖化影響評価は、広域で長期間（50年～100年後など）の予測が行える点が長所である。PRDBに含まれる多種の植物分布データを活用することにより、多種について影響を予測し、温暖化影響リスクの事例を明示し、社会へ警鐘を鳴らすことができる。さらに、現在と将来の気候条件における潜在生育域が特定されることにより、その予測結果を自然保護に活用できる。たとえば、温暖化により衰退や絶滅の危険性のある脆弱な植物種や群落とその分布域が特定できるので、適応的保全計画(適応策)の策定が可能となる。温暖化後も潜在生育域として残る地域は、逃避地として保全上重要な意味をもつ。また、温暖化影響の検出のためのモニタリング地を選定する際に参考になる。

６．引用文献

1)Clark, L.A., D. Pregibon (1992) Tree-based models. In: J.M. Chambers, T.J. Hastie (eds.) Statistical Models in S, Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 377-419.

2)林弥栄 (1954) 日本産重要樹種の天然分布, 針葉樹, 第3報. 林業試験場報告, 75, 1-173.

3)五十嵐八枝子 (1994) 北上するブナ. 北海道の林木育種, 37, 1-7.

4)Iverson, L.R. and A.M. Prasad (1998) Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. Ecological Monographs, 68, 465-485.

5)気象庁 (1996) 気象庁観測平年値 (CD-ROM), (財)気象業務支援センター.

6)気象庁 (2004) 気候統一シナリオ第2版, 気象庁気候・海洋気象部・気候情報課.

7)K-1 Model Developers (2004) K-1 Coupled Model (MIROC) Description. In: H. Hasumi, S. Emori (eds.) K-1 Technical Report 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo, 34pp.

8)Matsui, T., T. Yagihashi, T. Nakaya, H. Taoda, S. Yoshinaga, H. Daimaru, N. Tanaka (2004)

Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. Journal of Vegetation Science, 15, 605-614.
9)滝谷美香,萩原法子 (1997) 西南北海道横津岳における最終氷期以降の植生変遷. 第四紀研究, 36, 17-234.
10)Tsukada, M. (1982) Late-Quaternary shift of *Fagus* distribution. Botanical Magazine Tokyo, 95, 203-217.

７．国際共同研究等の状況

日本学術振興会外国人特別研究員として平成21年度に６か月間、分布予測モデルの専門である米国人Dr. Erin E. Conliskを招聘し、分布予測の精度向上について共同研究を行った。台湾、中国、韓国の研究者と共同研究に向けて情報交換を行ってきた。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) Tanaka, N., Matsui, T., Shimada, K., Yagihashi, T. and Taoda, H.：Journal of Agricultural Meteorology, 60, 433-438(2005)
“Constructing vegetation databases useful for assessing impact of climate changes in Japan”
2) Matsui, T., Shimada, K., Yagihashi, T., Nakaya, T., Taoda, H. and Tanaka, N.: Journal of Agricultural Meteorology, 60, 439-444(2005)
“Assessing potential distribution of beech (*Fagus crenata*) in central Japan”
3) Yagihashi, T., Matsui, T., Nakaya, T., Taoda, H. and Tanaka, N.：Proceedings of Oak 2003, Japan: a joint meeting of IUFRO working groups, genetics of Quercus & improvement and silviculture of oaks), P.45-58(2005)
“Climatic controls differentiating the distributions of *Fagus crenata* forests and *Quercus mongolica* var. *grosseserrata* forests in Japan”
4) Tanaka, N., Matsui, T, Yagihashi, T and Taoda, H.：Global Environmental Research, 10(2), 151-160(2006)
“Climatic controls on natural forest distribution and predicting the impact of climate warming: Especially referring to buna (*Fagus crenata*) forests”
5) 田中信行, 松井哲哉, 八木橋勉, 垰田宏：地球環境, 11, 11-20(2006)
「天然林の分布を規定する気候要因と温暖化の影響予測：とくにブナ林について」
6) 松井哲哉, 田中信行, 八木橋勉：日本森林学会誌, 89(1), 7-13(2007)
「世界遺産白神山地ブナ林の気候温暖化に伴う分布適域の変化予測」
7) Yagihashi, T., Matsui, T., Nakaya, T., Tanaka, N. and Taoda, H.：Plant Species Biology 22: 217-225(2007)
“Climatic determinants of the northern range limit of *Fagus crenata* forests in Japan”
8) 津山幾太郎, 松井哲哉, 小川みふゆ, 小南裕志, 田中信行:GIS－理論と応用, 16, 11-25(2008a)

「本州東部におけるチシマザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価」
9) 津山幾太郎，松井哲哉，堀川真弘，小南裕志，田中信行：GIS－理論と応用，16，99-113（2008b）
「日本におけるチマキザサ節の潜在分布域の予測と気候変化の影響評価」
10) 高橋潔，松井哲哉，肱岡靖明，田中信行，原沢英夫：地球環境研究論文集，16，111-119(2008)
「温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発」
11) 堀川真弘，村上健太郎，津山幾太郎，大藪崇司，松井哲哉，森本幸裕，田中信行：日本緑化工学会誌，34(1)，85-90（2008）
「イヌケホシダの潜在分布域と気候変化シナリオに基づく分布変化の予測」
12) Horikawa, M., I. Tsuyama, T. Matsui, Y. Kominami, and N. Tanaka: Landscape Ecology, 24, 115-128(2009)
“Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*)”
13) Matsui, T., K. Takahashi, N. Tanaka, Y. Hijioka, M. Horikawa, T. Yagihashi, and H. Harasawa: Applied Vegetation Science, 12, 328-339(2009)
“Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (*Fagus crenata*) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan”
14) 松井哲哉，田中信行，八木橋勉，小南裕志，津山幾太郎，高橋潔：地球環境，14，165-174(2009)
「温暖化にともなうブナ林の分布適域の変化予測と影響評価」
15) 田中信行，中園悦子，津山幾太郎，松井哲哉：地球環境，14(2)，153-164(2009)
「温暖化の日本産針葉樹10種の潜在生育域への影響予測」
16) 中尾勝洋，松井哲哉，田中信行，福嶋司：森林立地学会誌，森林立地51(1)，27-37(2009)
「日本における常緑カシ類2種の個体および優占林の分布を規定する気候条件」

<その他誌上発表（査読なし）>
1) 松井哲哉，田中信行：福嶋司(編)，植生管理学，朝倉書店，東京．p.177-182（2005）
「地球温暖化の植生への影響（第5-5章)」
2) 松井哲哉，松本誠，宇都木玄，飛田博順，阿部真：北限地帯のブナ林観察会報告．北方林業，57，275-277(2005)
3) 小川みふゆ，松井哲哉，津山幾太郎，竹中明夫，垰田宏，島田和則，田中信行：田中信行（編），地球環境変動の森林への影響評価，第4号，平成16年度JST重点研究支援課題報告書，森林総合研究所 環境影響チーム，p.39-52(2005)
「東本州におけるウラジロモミ分布地の気候条件と温暖化影響予測」
4) 松井哲哉，田中信行，垰田宏，八木橋勉：森林総合研究所北海道支所研究レポート，No.89，1-4.(2006)
「温暖化による日本のブナ林への影響予測」
5) 田中信行，松井哲哉，垰田宏：研究の森から，森林総合研究所，No.144.(2006)
「地球温暖化によりブナ林の分布適域が大幅に減少する」
6) 中村俊彦，田中信行，津山幾太郎：生物多様性ちばニュースレター，No.6，p.1-3.(2007.7)
「気候変化にともなう日本列島の温量指数の変化と房総半島付近の植生変化の予測」

7) 松井哲哉，田中信行，八木橋勉：森林総合研究所，平成20年版研究成果選集，8-9(2008)
「地球温暖化により白神山地の気候はブナ林に適さなくなる」
8) 松井哲哉：農業日誌 平成21年，全国農林統計協会連合会，p.120-121(2008)
「白神山地のブナ林と温暖化」
9) 津山幾太郎，松井哲哉，小川みふゆ，小南裕志，田中信行：森林総合研究所 平成21年版研究成果選集，森林総合研究所，p.64-65 (2009)
「チシマザサの生育域を気候条件から予測する」
10) 田中信行：季刊森林総研第7号，p.5-7(2009.11)
「温暖化で危惧される自然林への影響」
11) 松井哲哉：森林大百科事典，朝倉書店，p.35-37(2009) 「温暖化」
12) 松井哲哉，小林誠，松本誠：北限域における寿都町小川の沢ブナ林合同調査会報告．北方林業，61:5-6(2009)
13) 松井哲哉：国際ブナフォーラム2008報告書，国際ブナフォーラム2008実行組織連合，北海道寿都郡黒松内町．p.29-32(2009)
「温暖化がブナ林に及ぼす影響の予測」
14) 河原孝行・渡邊定元・松井哲哉・高橋正義：分布図．日本樹木誌(一)，日本樹木誌編集委員会，日本林業調査会，p.725-760(2009)
15) 田中信行：地球環境研究センターニュース，国立環境研究所 19(12)：5-7. (2009.3)
「温暖化の森林生態系への影響に関する新しい知見：とくに白神山地世界遺産地域のブナ林への影響について」

（２）口頭発表（学会）

1) 田中信行，松井哲哉，島田和則，八木橋勉，垰田宏：第116回日本森林学会(2005) 「温暖化影響研究における植生データベースの活用」
2) 松井哲哉，八木橋勉，中谷友樹，垰田宏，吉永秀一郎，大丸裕武，田中信行 (2005) 「気候変化シナリオに基づくブナ林の分布可能域予測と脆弱性，感受性の評価．第52回日本生態学会」
3) 津山幾太郎，上條隆志，小川みふゆ，松井哲哉，福田廣一：第52回日本生態学会(2005)「本州中部・奥鬼怒地域における冷温帯性自然林の主要構成樹種およびササ植物の分布と積雪傾度の関係」
4) Matsui, T., Yagihashi, T., Nakaya, T., Taoda, H., Yoshinaga, S., Daimaru H. and Tanaka, N. Environment Workshop, Predictive Modelling of Species Distribution: New Tools for the XXI Century(2005) “Probability distributions and vulnerability in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan”
5) 松井哲哉，田中信行，八木橋勉：第117回日本森林学会大会講演要旨集CD-ROM，PG31(2006)「白神山地のブナ林の気候温暖化に伴う分布変化予測」
6) Tanaka, N.：Book of Abstracts, 2nd East Asian Federation of Ecological Societies (EAFES) International Congress, March 25-28, 2006, p.339 (2006) “Predicting potential habitats for plants under climate change in Japan”
7) Tanaka, N：Book of the Abstract, Symposium on Impact Evaluation of Global Warming and

Approach to Risk Analysis in East Asia (GWEA), Oct 31-Nov.2, 2006, Taipei, Taiwan. p.35, (2006) “Climatic controls on buna (*Fagus crenata*) forest distribution and predicting the impact of climate change”

8) Tanaka, N., Tsuyama, I., Matsui, T., Shimada, K. and Taoda, H.：Book of Abstract, 49th Annual Conference of the International Association for Vegetation Science, Palmerston North, New Zealand, 12-16 February 2007, p.74. (2007) “Constructing the Phytosociological Relevé Database (PRDB) for temporal and spatial assessment of plant species distribution”

9) 松井哲哉：第47回気候影響・利用研究会シンポジウム予稿集：地球温暖化による東アジアの気候変化の研究へ向けて，p.22-24. (2007) 「ブナ林の分布適域予測モデルの構築と温暖化影響予測」

10) Matsui, T., Nakao, K., Yagihashi, T., Nakaya, T., Tanaka, N., Ogawa, M., Tsuyama, I., Ogawa, Y.： Book of Abstracts, TIES 2007, 18th Annual Meeting of the International Environmetrics Society, Horová, I., Hrebicek, J. (eds.), Mikulov, Czeck Republic, p.82 (2007) “Effects of spatially redundant presence/absence vegetation data on the accuracy of predictive distribution models for 29 tree species in Japan”

11) Tanaka, N., Tsuyama, I., Matsui, T., Shimada, K. and Taoda, H.：Book of Abstract, 49th Annual Conference of the International Association for Vegetation Science, Palmerston North, New Zealand, 12-16 February 2007, p.74 (2007) “Constructing the Phytosociological Relevé Database (PRDB) for temporal and spatial assessment of plant species distribution”

12) Matsui, T., N. Tanaka, and T. Yagihashi. : Page 162 *in* International Association of Vegetation Science 49th Annual Conference. International Association of Vegetation Science, Palmerston North, New Zealand.(2007) “Predicting changes in suitable habitats for beech (*Fagus crenata* Blume) forests under climate warming in Shirakami Mountains World Natural Heritage Area, northern Japan”

13) Nakao, K., T. Matsui, N. Tanaka, and T. Hukusima.：Page 168 *in* International Association of Vegetation Science 49th Annual Conference. International Association of Vegetation Science, Palmerston North, New Zealand (2007). “Modeling the distributions of nine evergreen tree species in western Japan using a Phytosociological Releve Database (PRDB)”

14) 堀川真弘，村上健太郎，津山幾太郎，大藪崇司，松井哲哉，森本幸裕，田中信行：第39回日本緑化工学会大会，福岡（2008）「イヌケホシダの潜在分布域と気候変化シナリオに基づく分布変化の予測」

15) Tanaka, N., Nakazono, E., Tsuyama, I. and Matsui, T. : 51st Annual Symposium of the International Association for Vegetation Science, South Africa (2008) “Predicting changes in potential distributions of 27 coniferous species following climate change in Japan”

16) 津山幾太郎，松井哲哉，小川みふゆ，小南裕志，田中信行：日本生態学会第56回全国大会，盛

岡（2009）「本州東部におけるチシマザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価」
17) Hijioka, Y., Takahashi, K., Mimura, N., Kazama, S., Kawagoe, S. Tanaka, N., Matsui, T., Daimaru, H., Nakamura, K., Yokozawa, M., Izumi, T., Suzuki, T., Honda, Y., Ohno, E., Morisugi, H., Hanasaki, N. and Harasawa, H. ： 4 degrees & beyond, Oxford, UK. (2009) “Implications of 4+° C in Japan. -- Quantitative analysis of sectoral impacts of climate change in Japan using an integrated assessment model, AIM/Impact[Policy]”
18) Matsui, T., Takahashi, K., Tanaka, N., Hijioka, Y., Horikawa, M., Yagihashi, T. and Harasawa, H.: The 10th International Congress of Ecology Abstract (2009) “Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (*Fagus crenata*) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan”
19) Matsui, T., N. Tanaka, and T. Yagihashi: 国際生物多様性の日シンポジウム2009 ポスターセッション要旨集(2009) “Predicting changes in suitable habitats for beech (*Fagus crenata* Blume) forests under climate warming in Shirakami Mountains World Natural Heritage Area, northern Japan”
20) 松井哲哉，田中信行，八木橋勉：「北方圏の環境と文明」国際シンポジウム講演要旨集(2009)「温暖化がブナ林の分布に及ぼす影響の予測」
21) 松井哲哉，並川寛司，小林誠，紀藤典夫：日本生態学会第56回全国大会講演要旨:PA1-041 (2009)「ブナ分布北限最前線における孤立林の分布とその特徴」
22) 板谷明美，松井哲哉：第120回日本森林学会大会講演要旨集(2009)「北限ブナ分布の地形的特徴」
23) 田中信行，松井哲哉，津山幾太郎，小南裕志：日本気象学会春季大会（2009）「植物の分布を規定する気候要因の特定および気候変化に伴う生育地の移動予測」
24) 津山幾太郎，松井哲哉，堀川真弘，中尾勝洋，小南裕志，田中信行：日本生態学会第57回大会（2010）「チマキザサ節の分布を規定する気候要因の解明と温暖化の影響評価への応用」
25) 嶋崎仁哉，中園悦子，津山幾太郎，中尾勝洋，木島真志，田中信行，中静透：日本生態学会第57回大会（2010）「気候変化が八甲田山のオオシラビソ分布に与える影響評価―湿原周辺はレフュージアになり得るか？ 」

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催

1) 田中信行（2006.6.16）大気環境学会植物分科会講演会「地球温暖化と植物」において「地球温暖化の植物分布への影響予測」と題して講演.
2) 田中信行，松井哲哉（2007.12.19）. 第5回環境研究機関連絡会成果発表会「気候変動に立ち向かう：科学的知見､そして技術的対策へ」において「温暖化による森林の分布適域の変化予測」と題して発表.
3) 田中信行（2008.1.18）東京大学バイオーム研究会(第34回)において「天然林を規定する気候要因と温暖化の影響予測」と題して講演.

4) 田中信行（2008.10.30）平成20年度地球環境研究総合推進費公開シンポジウム「地球温暖化の日本への影響」～現状と将来予測，その対策と賢い適応へ向けて～において「森林影響－ブナ林の分布適域の減少，マツ枯れ地域の拡大－」と題して講演.
5) 田中信行（2009.10.14）平成21年度独立行政法人森林総合研究所公開講演会「温暖化時代を森林と生き抜く－森林の機能をどこまで生かせるか－」において「温暖化で危惧される自然林への影響」と題して講演.

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 河北新聞（2005.6.16，朝刊）温暖化のブナ林への影響に関する取材記事が掲載される.
2) 毎日新聞（2005.6.24，岩手版）温暖化のブナ林への影響に関する取材記事が掲載される.
3) 環境学習に役立つCD-ROM「解決！地球温暖化！」(2005.03.)企画・製作：環境省・駐日英国大使館、製作協力：毎日EVRシステム・水と緑の惑星保全機構. ブナ林の適域予測が引用される.
4) 地球温暖化ファクトシート"Message from the earth"（2005）企画製作：環境省地球環境局、編集製作：全国地球温暖化防止活動推進センター(JCCCA).
5) しんぶん赤旗（2006.3.19） 温暖化のブナ林への影響に関する記事が掲載。
6) 朝日放送「ここが変だぞ！？地球－迫りくる温暖化の恐怖－」（2006.5.3）で、温暖化のブナ林分布影響予測図が放映。
7) NHKラジオおはようもぎたてラジオ便「北海道森物語」(2006.5.3)で、「地球温暖化により減少するブナ林の分布適域」と題する話題について解説
8) NHK水戸地上デジタル放送（2006.9.28） ワイワイスタジオ，及びNHK首都圏ネットワーク（2006.10.17）温暖化の筑波山ブナ林への影響についてインタビューが放映.
9) 常陽新聞(2006.10.25)田中信行著「温暖化：筑波山のブナ林が消える？ふしぎを追って，225：研究室の扉を開く」が掲載.
10) 王子製紙季刊誌「森の響」40号（2006冬季）温暖化の森林への影響についてのインタビュー記事が掲載.
11) 青森テレビ(2007.2.24)「青森の！そこが知りたい」で「世界遺産のブナが消える？」についてインタビューが放映.
12) 日経エコロジー（2007.7.）温暖化の森林への影響について記事掲載，p.28-51.
13) 茨城新聞（2008.1.22，朝刊一面）にブナ林の衰退に関する記事掲載.
14) 産経新聞（2008.1.6，朝刊一面）に温暖化のブナ林への影響に関する記事掲載.
15) ABS秋田放送（2008.1）温暖化の白神山地ブナ林への影響に関する放映.
16) 新聞各紙（2008.5.30）「日本への影響」－最新の科学的知見－（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム）の記者発表をうけて，白神山地ブナ林，マツ枯れの研究成果が掲載.
17) 日経エコロジー(2008.8) ブナ林と温暖化影響に関する研究成果が紹介される.
18) 毎日新聞(2009.8.9，朝刊一面）選択の手引・’09衆院選・温室効果ガス削減のコラムで成果が引用される.

（６）その他

1) 平成21年度地球環境論文賞（土木学会地球環境委員会）を受賞(2009.9.12).

受賞論文：高橋潔，松井哲哉，肱岡靖明，田中信行，原沢英夫（2008）温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発．地球環境研究論文集，16，111-119.

2) 平成20年度森林・林業白書（2009.5)の中でブナ林の温暖化影響研究の成果が引用された.

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

（４）　温暖化の森林への影響と脆弱性の評価に関する研究

２）高感受性生態系への温暖化影響の予測と検出に関する研究

（平成17～19年のサブサブ課題「温暖化に伴う積雪環境の変化が植生に与える影響予測に関する研究」の内容を含む）

独立行政法人森林総合研究所

水土保全研究領域	山地災害研究室	大丸裕武
森林植生研究領域	植生管理研究室	杉田久志(平成17～19年)
東北支所		中村克典
関西支所		小南裕志(平成17～19年)

〈研究協力機関者〉　独立行政法人森林総合研究所 東北支所　市原　優

千葉大学　海洋バイオシステム研究センター　安田正次

電力中央研究所 環境科学研究所　朝岡良浩

平成17～21年度合計予算額　52,719千円

（うち、平成21年度予算額　7,236千円

※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］温暖化に対する感受性がとくに高いと思われる、積雪山地の植生とマツノザイセンチュウ病によるマツ枯れに対する温暖化影響について研究を行った。温暖化による積雪環境の変動が山地植生に与える影響を正確に予測するには空間解像度が高い気候予測データの整備が重要となる。そこで、衛星画像を検証データとして用い山岳域での精度を向上させた3次メッシュの積雪分布データを整備した。亜高山針葉樹の分布には積雪環境が大きく影響していると考えられているが、積雪環境の異なる山岳域で実生と稚樹の生存率を調査した結果、積雪環境は更新初期段階の個体の生存率に強く影響することが明らかになった。また、上越山地の湿原は過去約40年間に顕著に縮小していることが明らかになった。縮小傾向は雪田草原型の湿原で著しく近年の暖冬の卓越傾向が影響していることが推定された。マツ林はわが国の二次林の重要な構成要素であるが、温暖化によるマツノザイセンチュウ病の拡大によって衰退傾向が加速することが懸念されている。積算気温から温暖化によるマツ枯れ危険域の変動を予測した結果、気温上昇が2℃を越えるとマツ枯れリスクの高いエリアが急激に拡大することが示唆された。

［キーワード］　積雪山地、積雪分布、山地湿原、亜高山針葉樹、マツ枯れ

１．はじめに

わが国の植生の中には温暖化に対して極端に感受性が高い要素が存在する。植物地理学的な意味での植生帯の境界は、気温条件の変化による気候帯のシフトに呼応する形で変動すると考えられるが、一部の植生は特定の外的環境の変化を強く受けて急激に変動することが予想される。温暖化影響の顕在化が懸念される状況下において、このような感受性の高い植生に注目した温暖化影響評価はとくに重要な課題である。

中部から北海道にかけての山岳域を中心に見られる多雪環境に依存した植生は、温暖化による積雪環境の変化の影響を受けやすく、脆弱性が極めて高い性格を持つ。積雪が植生に与える影響のメカニズムについては不明の点が多いだけでなく、温暖化時の積雪環境についても十分な精度と空間解像度の予測データが整備されていない。

また、海岸から内陸の山地・丘陵地にかけて広く分布するマツ林も、気温上昇によるマツノザイセンチュウ病の拡大で衰退が加速することが懸念されている。本課題では温暖化に対する感受性がとくに高いと考えられる、多雪山地の植生とマツ林に注目して、温暖化の影響について予測を行う。

２．研究目的

（１）温暖化による積雪環境の変動予測

温暖化による積雪環境の変化は、わが国の山岳植生に大きな影響を与えると予測されるが、現在の気候モデルでは空間解像度が粗いために、山岳植生の分布の変動を詳細に予測することは困難であり、より空間解像度の高い積雪環境の変動予測データが必要とされている。しかし、山地積雪の分布には地域的な傾向が顕著にみられるため、現実の積雪分布データに適合するように積雪分布モデルを調整する必要がある。とくに山地の高標高域については気象観測データが極めて乏しいためモデルの調整が困難であったが、本課題ではSPOT/VEGETATIONによる積雪分布データをファクトデータとして用いて山岳域での精度向上を目指した。SPOT/VEGETATION から得られたS3指標の分布から、1999～2005年の7年間にわたる3次メッシュの積雪期間分布データベースを整備し、これを検証データとして用いて3次メッシュの空間解像度で現在の積雪分布を推定するとともに、温暖化時の積雪分布を予測した。

（２）亜高山帯性針葉樹の実生定着阻害に及ぼす積雪の影響予測

地球温暖化の影響で積雪環境が変化する場合には亜高山帯林の樹種構成に大きな変化が生ずる可能性があり、それを予測するためには積雪環境がそれぞれの樹種の更新過程に及ぼす影響とそのメカニズムを明らかにしておく必要がある。そこで、積雪環境が異なる複数の積雪山地において、針葉樹各樹種の実生や稚樹の死亡率を調べて、積雪環境の影響について考察した。

（３）温暖化が山地湿原に与える影響の検出と評価

多雪山地の植生の中でも、山地湿原はとくに温暖化に対する感受性が高く、一部の地域ではすでに温暖化の影響が現れていることが指摘されている。そこで、本課題では年代別空中写真を用いて本州中部の山地湿原の変動傾向を明らかにするとともに、とくに大きな変動がみられる湿原の立地環境の特性を明らかにした。

（４）温暖化がマツ枯れリスクの分布に与える影響の予測

マツノザイセンチュウ病によるマツ枯れの被害域は現在本州北部にまで及び、被害域の拡大防止が重要な問題となっている。気候の温暖化によってマツ枯れの危険域がさらに北上することが危惧されるが、マツ林は海岸部や内陸部の里山のように古くから人為影響を強く受けた場所に見られる二次林として成立している例が多いため、温暖化の影響を予測するには、温暖化時の気温条件だけでなく、現在の植生の分布を踏まえる必要がある。そこで本課題では、温暖化シナリオと、現在入手可能な植生分布に関するGISデータを用いて温暖化時のマツ枯れ危険域の予測を行った。

３．研究方法

（１）温暖化による積雪環境の変動予測

現在の積雪分布のファクトデータを得るため、SPOT/VEGETATIONの1km解像度のデータを用いて、広域にわたって積雪の有無を判別するためのS3指標を10日間隔で計算して、1999～2005年の7年間にわたる3次メッシュの積雪期間分布データベースを整備した（図1）。S3値が正の値を積雪があると判定し、消雪日を各セルについて算出した。S3指標から推定される消雪日を、アメダス観測ポイントの自動積雪深データで得られる消雪日データを用いて検証を行った。

衛星データから得られた積雪分布ファクトデータに適合するように、融雪係数を調整したうえで3次メッシュ毎の積雪質量収支を計算して積雪水量を推定した。メッシュ毎の気温、降水量は、3次メッシュの1kmの各格子点における時間気温、降水量を格子点から最も近い3点のアメダスポイントのデータを用いて、距離による加重平均をかけて計算した。降雪量の推定は標高と線形関係にあると仮定して推定した。降雨・降雪比と降雪補足率を用いて補正された観測点の降水量を任意画素の標高（elv）に相当する降水量に換算した。

$$PR = \left[1 + C_{SF}(elv - elv_{OBS})\right] \times PR_{OBS}$$

C_{SF}：降雪係数（mm/m）、elv：３次メッシュの標高、elv_{OBS}：観測点の標高（m）、PR_{OBS}:観測点の降水量（mm）

降雪係数は標高に対する降雪量の増加率を示し、本研究ではCSF =0.001mm/mとした。気温の推定値に関してはアメダスポイントの気温データに対して気温低減率を0.6℃/100mであると仮定して標高0m換算の気温を推定し、格子点の標高0m気温値を推定した後、数値地図による標高を用いて格子点の気温を推定した。

上式で求めた各メッシュの降水量（PR）について、気温による降水形態の判別法を用いて降雪水量（Pr）を推定するとともに、デグリーデー法を用いて融雪水量を計算して積雪水量（Hw）を推定した。

$Hw = Hw + Pr$　　$Ta < 0.5$　　(1)

$Hw = Hw + Pr - K \times Ta$　　$0.5 = < Ta < 4.5$　　(2)

$Hw = Hw - K \times Ta$　　$Ta > = 4.5$　　(3)

上の式で、*Pr*は雨と雪の降水形態を分離方法によって求めた気温に応じた降雪で供給される降水量であり、*Ta*は日平均気温、Kは融雪係数である。融雪係数（*K*）についてはSpot Vegetationの旬毎のデータから、S3指標(斉藤・山崎, 1999)を用いて、10日毎の積雪分布を推定し、積雪分布が再現出来るにようにメッシュ毎の融雪係数を推定した。

積雪の将来予測に関しては農業環境技術研究所によって提供されたMIROCシナリオの２次メッシュ推定値(2081-2100）を元に、気温については将来と現在の差分を、現在の気候値に加算する形で、降水量についてはモデル計算結果の将来と現在の比を現在の気候値に乗じる形で計算を行った。

（２）亜高山帯性針葉樹の実生定着阻害に及ぼす積雪の影響予測

2005年秋に亜高山針葉樹林で結実が豊作であった山域として、早池峰山（コメツガ・オオシラビソ林；草本・チシマザサ疎型林床；1220m）、八幡平（オオシラビソ林；チシマザサ密型林床；1210m）、富士山（コメツガ・シラビソ林；コケ密型林床；2060m）、金峰山（コメツガ・シラビソ・オオシラビソ林；コケ疎型林床；2060m）、北八ヶ岳麦草（コメツガ・オオシラビソ・シラビソ林；クマイザサ密型林床；2140m）、北八ヶ岳白駒（コメツガ・オオシラビソ・シラビソ林；コケ疎型林床；2130m）、志賀高原ひょうたん池（オオシラビソ・コメツガ林；チシマザサ密型林床；1780m）、志賀高原渋峠（オオシラビソ・シラビソ林；クマイザサ密型林床；2100m）に調査地を設定した。それぞれの調査地に0.12haのプロットを設置し、胸高(1.3m)以上の樹木について胸高直径を測定し、高さ0.3～1.3mの稚樹について高さと定着マイクロサイト(地表、根返りマウンド、根張り、倒木)を記録した。富士山、早池峰山、八幡平においては地表上に1㎡のコドラートをそれぞれ12個、30個、22個設置し、実生生残センサスを行った。また、それぞれの調査地にアルミニウム針金を用いた最深積雪深計や自記式温度計を設置して2005／2006年冬季の最深積雪深を測定するとともに、地表面と高さ2mの地物に自記式温度計（１時間インターバル）を設置して、根雪開始日と消雪日から根雪期間を求めた。観測は2004～2007年の４回行い各年の平均値を算出した。2006年の雪解け後の5～7月に、各調査地の落葉・腐植(LF層)に含まれる落下種子を採取し、樹種ごとに菌害による死亡率(菌害率)を求めた。また、菌害種子から見いだされたいくつかの菌について、コメツガ種子を用いて10℃、4℃、0℃、－3℃で接種試験を行った。

（３）温暖化が山地湿原に与える影響の検出と評価

年代別の空中写真を用いて、新潟・群馬県境付近の山地湿原の変化について検証を行った。対象地点をカバーする過去から現在までの空中写真から、湿原の外縁部が明確になる秋期・春期に撮影されたもののうち、積雪や雲などの影響がないものを用いた。これらの空中写真から、写真測量ソフトによってステレオオルソフォトを作成してGISソフトに取り込み、過去から現在までの湿原の範囲をデジタイズするとともに湿原面積の変化を算出した。写真測量に際しては、測量用GPSを用いて計測された高精度のGCP座標を用いることで、RMSエラーを0.5m程度とした。さらに、現地において湿原内外でコドラートおよびベルトトランセクトを設置して植生調査を行い、既存の文献の植生調査の結果と対照して種構成の変化を検証した。積雪環境の変化については、山地における積雪量の経年変化を各地の積雪深計測データを各関係機関から入手して経年変動を検討した。

（４）温暖化がマツ枯れリスクの分布に与える影響の予測

気象庁メッシュ気候値2000の気温データ（1971年～2000年の30年間の平均値）を元に、各メッシュセルについて月平均気温が1℃ずつ上昇した場合の気温環境を計算で求めた。さらに、3次メッシュ植生データ（環境省の第5回自然環境保全基礎調査植生調査による）を元に、現在、自然条件下あるいは人為的な管理のもとで森林状態が維持されている場所を、気温条件と構成樹種次第ではマツ枯れ域となりうる場所と見なして区分した（以下、潜在マツ林域）。この潜在マツ林域について、温暖化時のマツ枯れの危険度を求め、その結果をマップ化し、県別の影響関数を開発した。

マツ枯れ危険度は、竹谷ら(1975)によって提案されたMB指数という気候値を用いて評価した。MB指数は15℃をしきい値とする各月の平均気温の積算温度で、各月の平均気温のうち、15℃以上の月について、15℃を引いた値を合計して求められる。各地の被害実態との対応関係から、MB指数が22以上のエリアはマツ枯れの危険性が高い危険域（ゾーン3）に、19未満のエリアは気温によってマツ枯れの発現が抑制されている自然抑制域（ゾーン１）に、MB指数が19～22のエリアは両者の移行帯として自然抑制限界域（ゾーン2）に区分し（中村，2006）、現在と温暖化時の各３次メッシュのMB指数をもとに区分を行った。

４．結果・考察

（１）温暖化による積雪環境の変動予測

図2に本モデルによって計算した冬季降水量とメッシュ気候値による冬季降水量(いずれも月平均）を示した。これを見るとメッシュ気候値では標高分布による降水量の変動が明瞭ではなく、なんらかのスムージングが行われているか、降水係数の値が結果的に異なっている。

図3にはメッシュ気候値で規格化した気温、降水量を用いて各年のアメダスデータを再配分し、さらにその規格化された気象データに対してMIROCシナリオの現在値と将来値の差(気温)、比(降水量）を与えて算出した冬期間の月最大積雪水量の分布を示す。

MIROCシナリオによる平均気温の上昇は約4.7℃であり、積雪環境に対しては湿潤断熱減率で標高約800m程度の効果をもたらすこととなり、結果的に雨雪しきい値付近で推移する低標高域の積雪環境はどのような計算手法を用いても激減することになる。また高標高域であっても日本には積雪環境が継続可能なエリアが極端に限定されるために、5℃程度のリニアな気候変動は積雪環境を維持させる、いわゆる「冬季」を極端に減少させることになる。

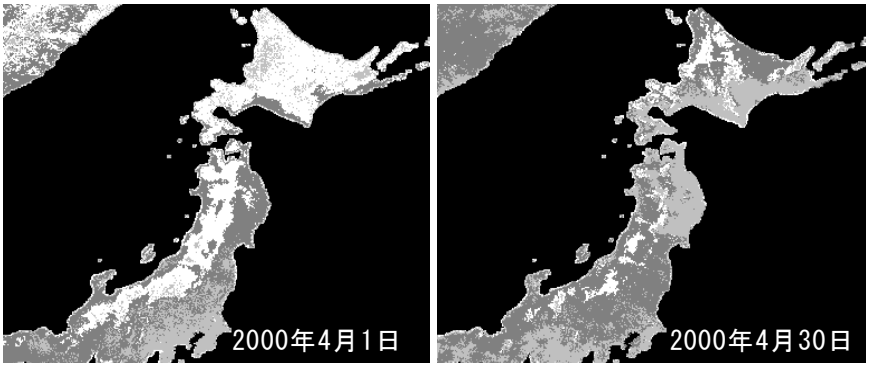


図1　SPOT/VEGETATIONから算出したS3指標による積雪分布データの一例

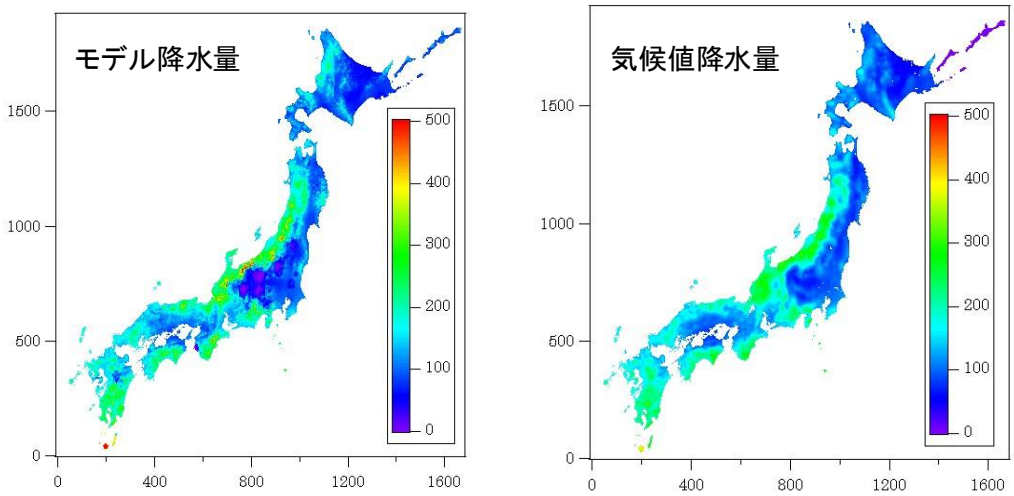


図2　モデル降水量と気候値，平均冬季降水量，現在

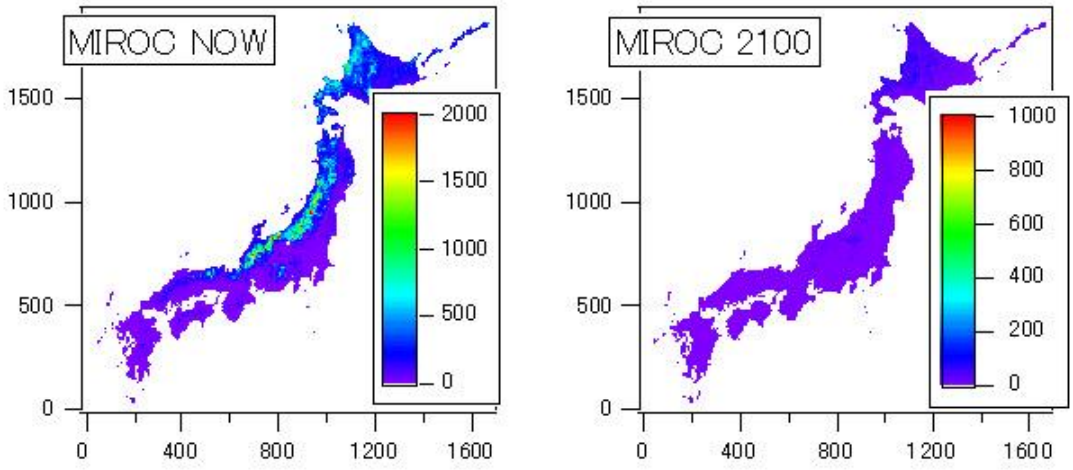


図3　メッシュ気候値で規格化した値による冬季最大積雪水量の現在値と2081-2100推定値

（２）亜高山帯性針葉樹の実生定着阻害に及ぼす積雪の影響予測

リター中に含まれる種子の菌害による死亡率の割合は、林分によるバラツキが大きく根雪期間との有意な相関性は認められなかった。コメツガやシラビソについては、高さ0.3～1.3mの稚樹のうち地表で定着しているものの割合は、根雪期間が長い場所ほど低下する傾向が明瞭に認められた（図4）。オオシラビソでも根雪期間の長期化による稚樹定着率の低下傾向が認められたが、コメツガやシラビソよりは不明瞭であった。キチャワンタケ（*Caloscypha fulgens*）と緑色未同定糸状菌についてコメツガ種子に対して接種試験を行ったところ、いずれも0℃以上の温度で病原性を示したが、-3℃ではわずかに、あるいはまったくみられなかった。

以上の結果から、積雪環境が針葉樹の分布に与える影響のメカニズムとして、種子・実生・稚樹の更新初期段階における定着阻害が重要であることが明らかにされた。そのなかでも発芽後数年以内の実生期における地表での定着阻害が最も重要であると考えられる。これらのことから、温暖化による積雪環境の変動は、とくに更新プロセスを通じて亜高山針葉樹に影響を与える可能性が推定された。

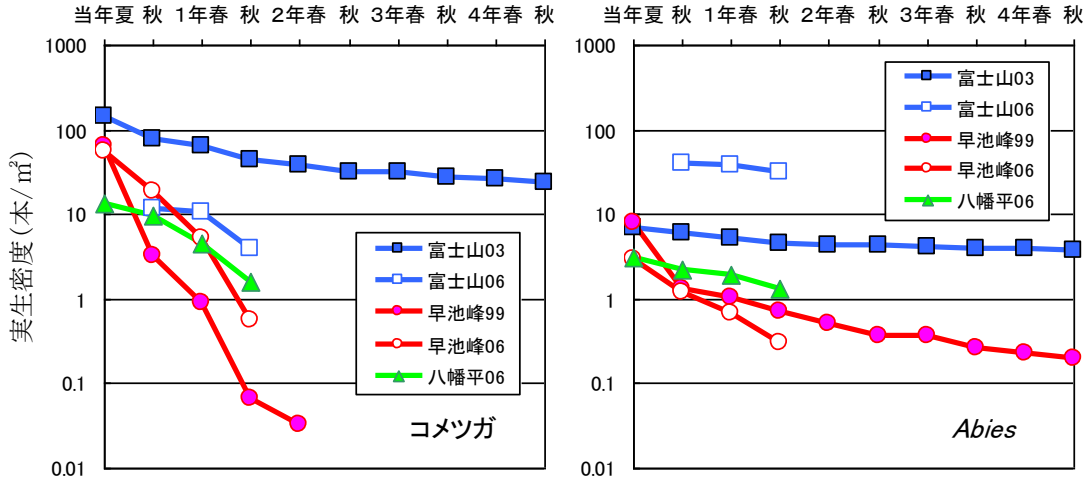


図4　地表における実生の消失過程

コメツガ実生の消失過程は富士山(根雪期間119日)では消失がきわめて緩やかで,高い密度を維持した．早池峰(179日)と八幡平(201日)では消失が急激で，前者では2年生時に全滅した．

（３）温暖化が山地湿原に与える影響の検出と評価

航空写真による湿性草原の植生変化の検出の有効性を確認するために、奥只見の平ヶ岳頂上部の湿性草原を対象として、航空写真の年代別比較と植生の変化について調査を行った。その結果、42年で28%の面積の縮小が確認された（図5）。この変化はチシマザサないしはハイマツの湿原への侵入（図6、7）によるもので、特に湿原-非湿原境界域でチシマザサの増加が認められた。チシマザサ群落が湿原へ侵入して時間が経過している場所では、オオシラビソやナナカマドが生育しており、徐々に森林化していた。

この手法によって平ヶ岳周辺域の湿性草原の近年の変化を調査した結果、多くの場所で植生の変化が認められた（表1）。そのうち、会津駒ヶ岳、平ヶ岳、栂池では変化が大きく、巻機山、尾瀬ヶ原、芳ヶ平では変化は小さかった。植生変化が大きい場所は、尾根や山頂など流入水がない立地で植生は主に雪田草原であった。

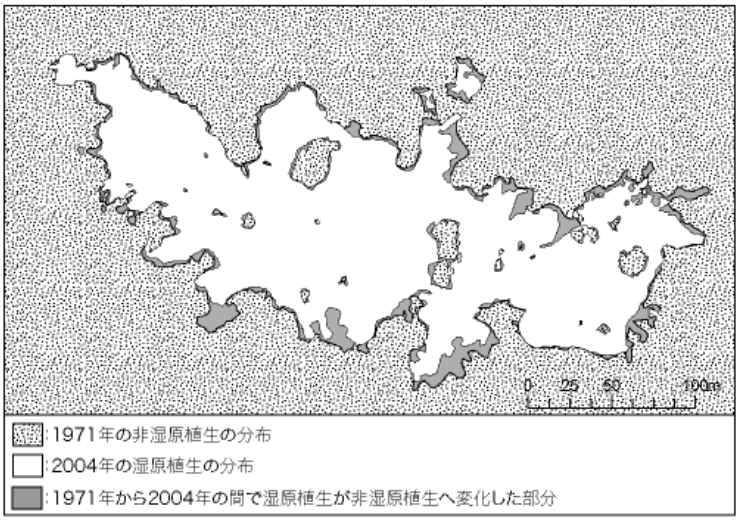


図5 平ヶ岳における湿性草原の縮小（安田ほか，2007）



図6 湿性草原に侵入するチシマザサ

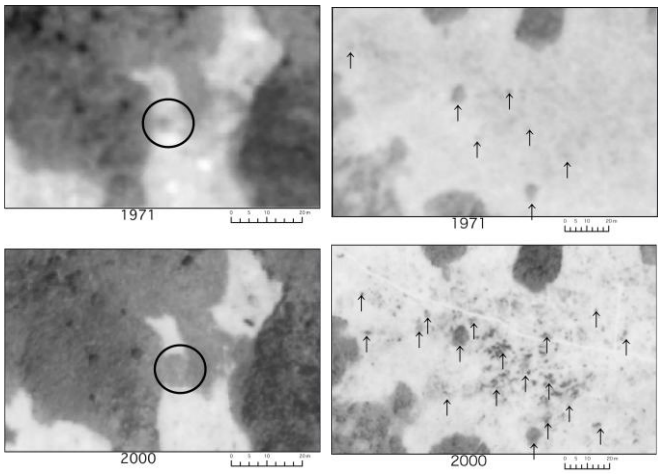


図７　湿原に見られるササ地の拡大（左）およびパッチ状のハイマツ群落（右図の↑）

表1　年代別空中写真から明らかにした越後山地周辺の主要な湿原の面積の変化傾向

名称	過去の面積(㎡)	現在の面積(㎡)	変化率(%)	航空写真撮影年代(間隔 年)	年面積変化量(㎡/y)	年変化率(%/y)	地形
会津駒ヶ岳	145,325	106,580	-26.7	1963→1999 (36)	1,076	-0.741	緩い尾根
尾瀬ヶ原	5,993,642	5,709,934	-4.7	1971→2005 (34)	8,344	-0.139	盆地
巻機山	418,305	383,752	-8.3	1971→2005 (34)	1,016	-0.243	緩い尾根
平ヶ岳	44,968	32,248	-28.3	1963→2005 (42)	303	-0.674	緩い尾根
芳ヶ平	102,034	89,787	-12.0	1965→2006 (41)	299	-0.293	盆地
妙高山	43,503	27,573	-36.6	1962→1994 (32)	498	-1.144	緩斜面
高谷地	49,301	33,655	-31.7	1962→1994 (32)	489	-0.992	緩斜面
黒谷地	179,031	156,480	-12.6	1962→1994 (32)	705	-0.394	緩斜面

（４）温暖化がマツ枯れリスクの分布に与える影響の予測

図8には現在と気温が1～5℃上昇した場合のマツ枯れリスクの分布を示した。1～2℃の気温上昇によって、現在被害が及んでいない青森県の平野部にまで危険域が拡大すると予想される。また、気温上昇が2℃を超えると、岩手県内陸部のアカマツ林業地帯やマツタケ生産地に壊滅的な被害が及ぶことが懸念される。現在、秋田・青森県境域では、防除帯の設定など被害拡大防止のため施策がすでに始まっているが、今後、温暖化に伴いさらなる防除努力が必要となる。現在、マツ枯れの最前線から10km以内の範囲についてはとくに重点的な防除対策が取られており、現在の主要な対策域は海岸部と内陸平野部となっている。気温上昇が2℃を越えると、地形的制約が急速に小さくなり、海岸部や平野部に加えて内陸の山間部が病害の拡大経路に含まれるようになる。このため、2℃以上の温暖化が起きた場合には、防除対策を必要とする地域が急激に拡大して防除対策コストがきわめて大きくなることが予想される。

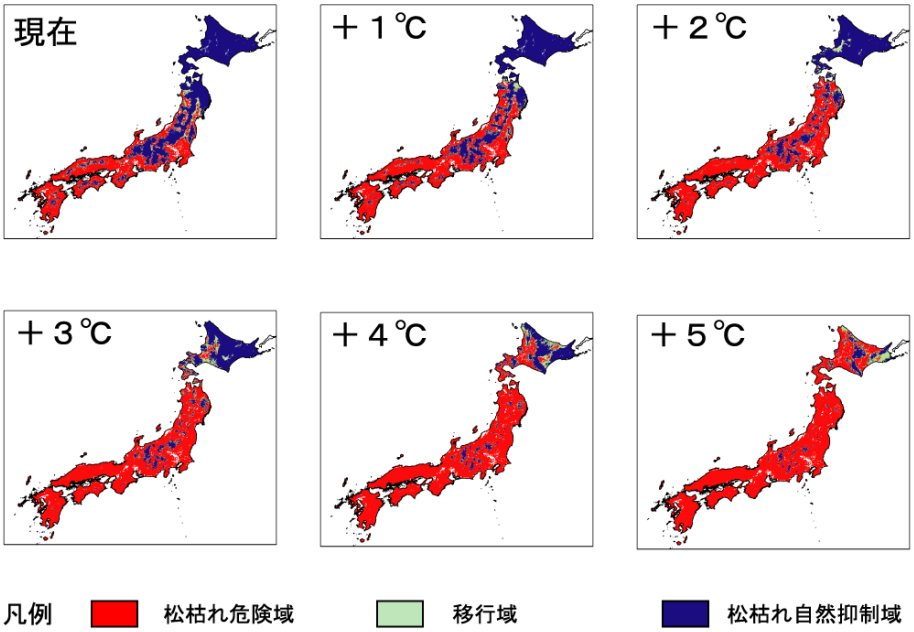


図8　気温上昇によるマツ枯れ危険域の変化

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

温暖化はわが国の積雪山地の植生に大きな影響を与えると考えられるが、将来の積雪環境については、十分な解像度で信頼性のあるデータが整備されていなかった。本課題では、衛星による実際の積雪分布データを用いて地域的な特性を考慮した1kmメッシュの積雪分布データを作成し、温暖化時の日本列島の積雪環境を詳細に明らかに出来た。

積雪が亜高山帯性針葉樹の分布に与える影響については不明の点が多かったが、本課題の研究によって、積雪環境がコメツガやシラビソの更新の初期段階で定着個体の割合に影響していることが明らかになった。このことから、高木層に顕著な変化が見られない場合でも、積雪環境の変動が更新過程を通じて長期的には亜高山針葉樹林の変化を起こす可能性が示唆され、気候が亜高山針葉樹に与える影響メカニズムを考える上で重要な知見を得た。

多雪山地に見られる山地湿原は、過去数十年間で縮小傾向を示しているものが多く、近年の暖冬化の影響が現れている可能性が指摘された。とくに、山地斜面に見られる雪田草原型の湿原は積雪深の減少の影響を受けやすく、温暖化に対する脆弱性が極めて高いと考えられた。気候変動に対する山地湿原の感受性の高さは従来から指摘されていたが、実際に山地湿原の縮小が起きていることを明らかにしたことは重要な科学的知見である。

（２）地球環境政策への貢献

温暖化時の積雪環境に関する空間解像度の高い地理データが整備されたことは、今後、温暖化が積雪山地の自然環境に与える影響を研究する上で重要な基盤データとなる。

多雪山地の湿原の多くがすでに縮小を始めており、雪田草原型の湿原において縮小傾向がとくに顕著であることは、今後、山岳地域の生態系の保全を考える上で重要な現状分析結果となる。

気温上昇が2℃を越えると、マツ枯れの危険域の拡大が加速し、防除に要するコストもきわめて大きくなることから、気温上昇が2℃以下の段階で防除対策を充実させることが、被害域の北上を抑止して、北日本のマツ林を保全する上できわめて重要な意味を持つことが明らかとなった。

６．引用文献

1)斎藤篤思，山崎剛（1999）積雪のある森林域における分光反射特性と植生・積雪指標．水文・水資源学会誌，12，28-38.
2)竹谷昭彦，奥田素男，細田隆治（1975）マツの激害型枯損木の発生環境：温量からの解析．日林誌，57，169-175
3)中村克典，野口絵美（2006）温量指数によるマツ材線虫病自然抑制域・自然抑制限界域の推定：MB指数のリニューアルを通して．第117回日本森林学会講演要旨集（CD-ROM）PF16.

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

1) 朝岡良浩，小南裕志，竹内由香里，大丸裕武，田中信行：水文・水資源学会誌，20，519-529（2007）
「衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性」

2) 安田正次，大丸裕武，沖津進：地理学評論，80，842-856（2007）
「オルソ化航空写真の年代間比較による山地湿原の植生変化の検出」

3) 杉田久志，岩本宏二郎，森澤猛，齋藤智之，壁谷大介，岡本透，酒井寿夫：森林総合研究所研究報告，7，81-89（2008）
「御嶽山における密なチマキザサ林床をもつ亜高山帯針葉樹林の構造と動態」

＜その他誌上発表（査読なし）＞

なし

（２）口頭発表（学会）

1) 市原優，杉田久志，升屋勇人，窪野高徳，小林元，飯田滋生：第118回日本森林学会大会（2007）
「天然林におけるトドマツ、エゾマツ、アカエゾマツの種子腐敗に関与する菌類」

2) 杉田久志，谷雅人、高橋利彦：第 52 回日本生態学会東北地区会大会（2007）
「早池峰山のコメツガ・オオシラビソ林の18年間の動態　―とくに稚樹の死亡と加入―」

3) 杉田久志，高橋利彦：第55回日本生態学会大会（2008）
「早池峰山のコメツガ・オオシラビソ林における種子の豊凶と実生の消長」

4) 安田正次，大丸裕武：日本地理学会発表要旨集，73，201（2008）
「航空写真を用いた山地湿原の面積変化の検出」

5) 安田正次，大丸裕武：日本地理学会発表要旨集，75，48（2009）

「東日本における湿性草原の植生変化」

6) 安田正次：日本地理学会発表要旨集，75，241（2009）
「十日町の積雪と日本海海面水温との関係」

7) Yasuda, M. and Daimaru, H.: 10th International Congress of Ecology (2009)
"Disappearance of peat-bogs in Japan, by climate change"

8) 安田正次，大丸裕武：日本地理学会発表要旨集，77，98（2010）
「奥利根・奥只見の湿原における植生変化の比較検討」

9) Yasuda, M. and Daimaru, H.: 10th International Congress of Ecology (2009)
"Disappearance of peat-bogs in Japan, by climate change"

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

1)産経新聞（科学面2008年9月10日、科学面「生きもの異変　温暖化の足音」（34）増えるシカ、荒れる尾瀬）

2)しんぶん赤旗（2008年11月16日、科学面「高山の湿原が縮小　積雪の減少で　千葉大などのグループが確認」）

課題名	S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 2-5　沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究		
課題代表者名	安原一哉（茨城大学工学部都市システム工学科）		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	219,062千円（うち21年度 42,192千円） ※予算額は、間接経費を含む。

研究体制

（１）災害による経済的損失評価と適応策の経済性評価に必要な温暖化感度関数の提案（国土技術政策総合研究所）

（２）海面上昇および台風襲来に伴う高潮と河川氾濫による沿岸域の浸水影響・リスクの定量評価と適応策の検討（茨城大学）

（３）温暖化に起因する海面上昇による沿岸域地盤変状予測と適応策（茨城大学）

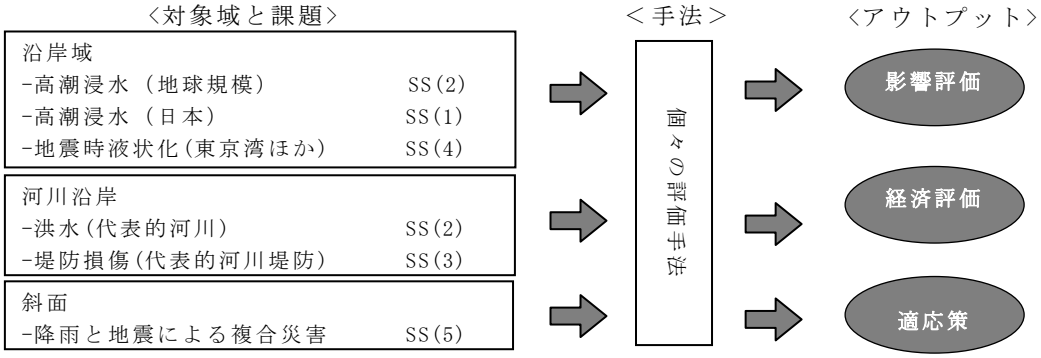
（４）異常気象を含む気候変動と巨大地震による複合的地盤災害評価と適応策（茨城大学）

（５）温暖化に起因する海面上昇と豪雨災害による海岸・河川沿岸域の経済的損失評価（九州大学）

（６）温暖化に起因する複合災害の適応策の評価と経済効果評価（茨城大学）

Ⅰ.戦略課題S-4-2-5の全体構成

気候変動による対象領域を海岸沿岸域、河川沿岸域および沿岸域近傍斜面にわけ、問題ごとの手法に基づいて複合的災害影響評価を行なった。ついで、災害に伴う経済的損失評価を行って温暖化感度関数を提案した。さらに、個々の課題に応じた適応策を整理しその評価を行った。



Ⅱ.本研究により得られた科学的成果

（１）高潮浸水については次の知見が得られた。：１）全球レベルでは、防護の有無によって、水没面積と影響人口は大きく異なることを示した。また、浸水被害額は、大局的には浸水影響人口と国毎の一人当たり GDP の積に比例すると仮定して、被害額を推定したところ、防護なしの被害は年間 12-21 億ドル（世界の GDP の 0.40-0.48%)と見積もられ、適応策として防護措置をとることによって被害は年間 6-8 億ドル（世界の GDP の 0.17-0.19%)に減少すると見積もられた。２）地球温暖化による我が国における沿岸域の浸水被害の予測の結果、温暖化の進行に伴い高潮による浸水の被害は緩やかな曲線で増加することが分かった。それは、高潮に対する対策が「ある水準までは様子を見、その水準に近づいたときに対策を講じる」のではなく、「どのような水準であっても状況に合わせて適切な対策を連続的にとっていくことが現実的である」可能性を示している。

（２）河川洪水と河川堤防の安定性については以下のことが明らかになった。１）解析した全ての流域で将来的に総氾濫水量、浸水面積が増加した。特に荒川と筑後川では、現在と将来の総氾濫水量比や浸水面積比が極端に大きくなった。また、遊水地設置により、ほぼ全ての流域で浸水面積が減少した。特に荒川、吉野川において遊水地の効果が高かった。しかし信濃川、淀川のような地盤高の低い地域は、浸水面積があまり低減されないことが分かった。２）河川水害については、気候変動に伴う河川氾濫の推計から、直接的な経済損失とおよび間接的な経済損失を示した。直接的な影響のみならず、産業部門間や地域間の波及効果を分析したことに本研究の意義がある。３）我が国の代表的な河川堤防を構成する土質試料に対する侵食実験結果から、河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性と適応策マップが得られた。この成果は、地盤工学分野において過去に例はなく、貴重な研究成果であり、河川堤防や高水敷・河岸に関する工学的政策において大きく寄与できるものと考えられる。

（３）気候変動による地下水位上昇と巨大地震による複合的な災害の評価手法と、災害によってもたらされる影響と経済的損失の評価手法を提案し、東京湾沿岸域へ適用した。その結果、液

状化危険度と災害損失額は沿岸域だけなく、内陸部にも拡大することが明らかになった。

（４）地震と豪雨との複合影響を考慮した斜面災害リスクの評価手法及び広範囲における斜面崩壊ハザードマップ・経済損失分布マップ・リスクマップの作成手法を確立した。これらを用いて、温暖化に伴う豪雨の年間出現日数の増加を考慮して、今後 30 年、50 年と 100 年を対象として、豪雨による日本全域の斜面災害リスクを定量的に評価した。さらに、地球温暖化が進んだ場合、どのように全国の斜面災害リスクが増加するかを検討した。このような精度の高いハザードマップとリスクマップに基づき、斜面防災に有効なリスクマネジメントを適用すれば、温暖化に起因する斜面災害適応策の提案に大きく寄与できることを示した。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献

（１）１）IPCC SRES シナリオに基づいて将来の経済成長や人口成長にそった全球的な沿岸域の影響予測を示し、また、適応策の導入によって大きく影響が削減できることを示した成果は、世界規模の影響を定量的に評価したもので、対策をとらない場合の被害コストや適応策の有効性に関する情報を、政策決定者に与えるものである。２）これまで温暖化による沿岸域の浸水被害の予測の結果、温暖化の進行に伴い高潮による浸水の被害額は緩やかな曲線で増加することが分かった。それは、高潮に対する対策が「ある水準までは様子を見、その水準に近づいたときに対策を講じる」というのではなく、「どのような水準であっても状況に合わせて適切な対策を連続的にとっていくことが合理的である」可能性を示している。この成果は直接地球環境政策へ反映させることができる。

（２）１）気候変動に伴う豪雨の増加に対する洪水氾濫対策として、流域における土地利用形態の変更などを行い、氾濫水を一時的に貯留できるバッファを設けることでかなりの程度氾濫域・水量を減少させることができる。これは、堤防による防御、ハザードマップや迅速な避難支援と並んで、有効な適応策となり得る。２）気候変動に伴う河川氾濫の経済被害は、単位面積当たりの直接被害、間接被害の相対的な大きさや及ぶ範囲が河川流域単位で異なる。したがって、河川氾濫に対する適応策を実施する際に、河川ごとにきめ細かく検討する必要性が示唆される。これらは地球環境政策へ反映することができる成果である。３）本研究の成果は、河川堤防や高水敷・河岸を想定し、(1)地球温暖化に伴い発生が予想される河川における汽水域の拡大と(2)地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加に対して、河川堤防やその周辺の高水敷・河岸に内在する脆弱性を実験的に調査し、日本全国レベルで脆弱性マップを提示するとともに、それに基づく適応策の提案を行ったところにある。これらの研究成果は、低炭素社会のための社会基盤整備として、河川堤防や高水敷・河岸の補強・対策を実施する際の優先順位を日本全国レベルで提示したものであり、地球環境政策へ直接貢献できるものと期待される。

（３）東京湾沿岸域において、気候変動の影響と巨大地震の複合影響が顕著に現われ経済的な大きな損失をもたらす可能性があるという結果は、東京湾沿岸域に限らず、人口やインフラが集中するわが国沿岸域全体の今後の整備のあり方に示唆を与えるものである。

（４）本研究で開発した斜面崩壊ハザードマップおよびリスクマップの作成手法を用いて、温暖化に起因する異常気象による斜面災害のリスクマップを全国規模で作成し、温暖化に起因する斜面災害を定量的に評価できる。また、得られた温暖化に起因する斜面災害リスクマップは、温暖化の適応策や斜面防災計画などの政策立案へ直接貢献できるものと期待される。

IV.研究概要

１．序

（１）大気中の温室効果ガスの安定化濃度の目標値を定めるためには、どれだけ温暖化が進行したときにどれだけの影響が出るかを予め把握しておくことが必要である。そのため、温暖化による海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率を説明変数として、説明変数が示す状態が出現した状態における高潮による浸水面積、浸水人口、被害額を出力する関数（温暖化感度関数）を求めた。

（２）日本全国の河川流域を対象とした洪水氾濫リスクを予測し、適応策を検討すること、および日本を含めたアジア太平洋域における高潮氾濫リスクを予測することを主な目的として、以下の 3 つのテーマを掲げて研究を行った。a)海面上昇に加えて、気候変動に伴う降水量の変化を考慮し、洪水氾濫リスクの解析を行った。次いで、遊水地による氾濫リスクの低減効果に焦点を当てる。b)将来の国別の経済成長と人口成長を想定し、その組み合わせによって防護レベルが異なるという防護シナリオを導入して沿岸影響予測を行う。さらに、将来発展の経路を IPCC SRES シナリオに従って 4 通り、また、防護を 2000 年レベルに固定、海面上昇に合わせた適応防護の 2 通りに仮定し、それらの比較を行った。c)温暖化に伴う河川流域の浸水により生じる経済被害に関しては、産業連関分析に基づき地域間や産業間の交易関係を考慮した推計を行った。

（３）海面上昇が生じると海水が河川を遡上することが予想され、河川下流域に位置していた汽水域が上流側に拡大し、重要な社会基盤施設の一つである河川堤防や高水敷・河岸に影響を及ぼすことが考えられる。また、地球温暖化に伴い異常降雨、異常少雨の地域が顕著に分かれ、大雨の発生する頻度が増加する可能性が高いとの評価が示されている。集中豪雨の発生件数の増加が予想される現在、河川堤防や高水敷・河岸にどのような脆弱性があるかを検討し、それに対応した適応策を提案する試みを行った。

（４）近年、気象災害の多発化傾向が顕著になっているとともに、極端現象と温暖化との因果関係の科学的確信度は未だ低いものの、最新の気候モデルによって今世紀中に台風の巨大化などが起こりうるという予測が示されている。さらに、日本は地震多発国であり、わが国における影響評価を現実的にするためには、従来ほとんど研究のない複合的災害の影響予測が不可欠である。こうした背景と問題意識に基づいて、防災・国土保全分野における複合的影響のための研究の高度化と適応策の提案を試みた。

（５）温暖化に起因する異常気象としては、台風の大型化や豪雨の増加などが考えられる。台風・豪雨は人間や社会資産に甚大な被害を齎す（直接経済損失）。また、豪雨は斜面崩壊の主な誘因となり、斜面災害による経済損失をもたらす（間接経済損失）。温暖化の影響を検討するために、これらの経済損失を予測し、適用策を提案する試みを行った。

２．研究目的

（１）まず、地球の温暖化によって引き起こされる高潮偏差の増大に応じてどの程度の浸水が起こるのかをシミュレートする数値モデルを作成する。次いで、そのモデルを使い、海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率の条件を様々に変化させて浸水予測を行い、その結果を整理することによって、海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率が与えられた場合に高潮による浸水面積、浸水人口、浸水被害額を出力する関数（温暖化感度関数）を作成する。

（２）a) 全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測：本研究では、全国の主要河川下流域（荒川、久慈川、那珂川、信濃川、天竜川、淀川、吉野川）において氾濫計算を行い、気候変動に伴う将来の河川氾濫リスク及び、遊水地を設置した場合の低減効果を明らかにすることを目的とした。そして、それらの結果から全国の主要河川下流域における氾濫リスクの遊水地による低減効果を示した。b) アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測：本研究では、これまで考慮されていなかった防護施設を沿岸影響予測に取り込むことを目的とした。使用する熱帯低気圧・人口データなどを最新のものに更新することによって、2100 年までのアジア・太平洋地域を含む世界の氾濫リスク（浸水域、影響人口、被害額）を把握することを試みた。その際、SRES シナリオに基づいた影響の度合いや社会発展を考慮することで、氾濫リスクを時系列で明らかにすることを目的とした。c)本研究は、気候変動に伴う河川氾濫に関して、河川流域単位での浸水面積とその経済被害に注目する。特に浸水による農地の生産性の減少という直接的な経済被害を算定し、それがもたらす間接的な被害に関しては産業連関分析手法を用いて地域間や産業間の交易関係を考慮した推計を行う。

（３）SS(3)では、1)地球温暖化に伴い予想される河川における汽水域の拡大と 2)地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加に対して、河川堤防やその周辺の高水敷・河岸に内在する脆弱性を実験的に調査し、日本全国レベルで脆弱性マップを提示するとともに、それに基づく適応策の提案を行うことを目的とする。

（４）SS(4)では、海面上昇と異常気象に起因する地下水位上昇に伴う沿岸域の基礎構造物の地震時脆弱性評価を行った。また、気候変動による地下水位上昇と地震による地盤の液状化による経済被害増加の算定を行い、気候変動と地震による複合災害がもたらす経済被害について明らかにすることを目指している。

（５）SS(5)は、(a)温暖化に起因する気候変動による斜面災害の経済的損失評価手法の開発と提案手法の妥当性の検証、(b)温暖化に起因する気候変動による経済的損失の評価、(c)適応策の経済的効果の検討などを目的としている。

３．研究の方法

（１）台風の来襲頻度の高い日本南岸地域（関東地方から九州地方）と低平地の面積が広く地形が複雑な三大湾（東京湾、伊勢湾および大阪湾）を対象として、地球温暖化による高潮の浸水被害を予測するため、海岸に防護施設が存在し、高潮が発生した場合に防護施設を越流して海水が陸域に浸入するという機構を組み込んだ浸水モデルを作成する。そのモデルを使って高潮によって浸水する陸域の面積、浸水する場所に居住する人口、浸水による被害額を見積もる。そうした見積もりを海面上昇量と台風強度もしくは高潮増大率の条件を様々に変えて行い、海面上昇量と台風強度もしくは高潮増大率を説明変数として、それらの条件に対応する高潮被害を示す指標を出力する関数（温暖化感度関数）を作成する。ついで、防護施設の天端を高める対策が全ての脆弱区間においてとられると仮定し、そのときの被害を作成した

高潮浸水モデルを使って推計する。

（２）a) 全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測：氾濫計算では、あらかじめ河川に破堤地点を設定し、水位がその地点の地盤高を超えた時に水が堤内に氾濫するようにした。破堤地点は、河川が蛇行しており、破堤による浸水被害が大きいと予想される地点とした。本研究は、荒川、久慈川、那珂川、信濃川、天竜川、吉野川、淀川、筑後川の計８河川を対象とした。これらの選定に際して、河川延長や流域面積を考慮するとともに、地域を代表する河川であること、下流域に都市が広がっていることなどを考慮した。

b) アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測：ここでは、防護施設を沿岸影響予測に取り込み、気候変動の進展と経済成長による防護能力の向上の相対的関係を考慮した影響予測を行うことを目的とした。使用する熱帯低気圧・人口データなどを最新のものに更新し、適応策を考慮することによって、2100 年までのアジア・太平洋地域を含む世界の氾濫リスクをより総合的に把握することを試みた。

c)河川流域の浸水面積とその土地利用形態の推計に基づき、農林業での直接的な経済損失を試算した。農業部門の直接的な損失額は、農地から得られると期待された農業生産額が浸水によって 100%減少すると想定した。そして、この農林業の直接的な経済損失から、産業連関分析によって産業部門間や地域間の波及効果を評価した。

（３）SS(3)では、①地球温暖化に伴い発生が予想される河川における汽水域の拡大と②地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加に対して、河川堤防やその周辺の高水敷・河岸に内在する脆弱性を実験的に調査し、日本全国レベルで脆弱性マップを提示するとともに、それに基づく適応策の提案を行った。

（４）SS(4)では、まず、海面上昇と気候変動に伴う地下水位上昇に伴う沿岸域の基礎地盤の地震時脆弱性評価をおこなった。次に、確立した手法を東京都東部の低地に適用するとともに、地震による液状化に伴う経済被害算出方法を提案し、妥当性を検討した。さらに、経済損失に着目した液状化対策対象領域の特定および対策選定手法を構築した。さらに、地下水位の上昇に伴う地盤の液状化を構造物の不安定化に対する適応策について、軽量構造物の浮上に対する適応策とともに重量構造物の沈下に対する適応策とその効果について実験的検討を行った。

（５）温暖化に起因する台風の大型化による経済損失の増加リスクを評価する方法を提案した。これを用いて、将来のリスクカーブを推定し、現在のリスクカーブと比べて経済損失の増加リスクを評価した。ついで、温暖化に起因する豪雨による斜面災害リスクを評価する方法を提案した。さらに、土砂災害リスク評価を全国に展開するために、地理情報システム（GIS）を用いて広域における土砂災害のリスクを表示した。

４．結果及び考察

（１）災害による経済的損失評価と適応策の経済性評価に必要な温暖化感度関数の提案

１）三大湾における高潮浸水被害の予測：三大湾奥部の低地において高潮による浸水の物理過程を表現する数値モデルを作成し、種々の条件で浸水を予測し（図 1）、温暖化感度関数を作成した。作成した高潮被害の温暖化感度関数では、現在の海岸堤防の設計で想定している台風強度（=1）を超えるあたりから被害が加速度的に大きくなっている。また、台風強度 1.3 までは伊勢湾の被害額が三大湾の中でもっとも大きく、それ以上では大阪湾の被害額が最も大きくなっている（図 2）。

２）日本南岸地域における高潮浸水被害の予測：作成した高潮被害の温暖化感度関数では、日本南岸地域では大きくみて三大湾、瀬戸内海、九州西部沿岸の地域が高潮浸水による被害リスクが高い地域であることが分かる(図 3)。そして、それら以外の地域でも、入り江や河口部に高潮

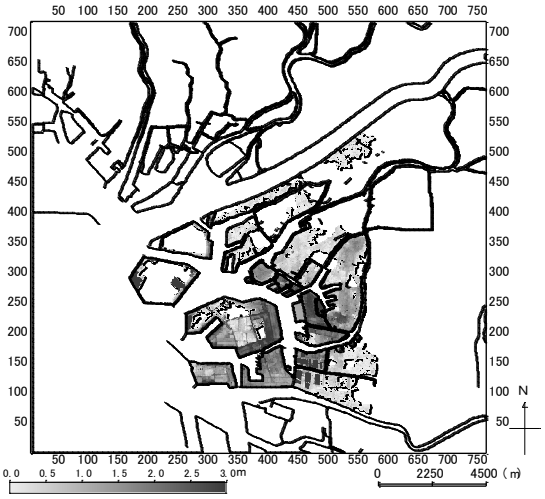


図 1　大阪湾における浸水のシミュレーション結果の例（鈴木による）

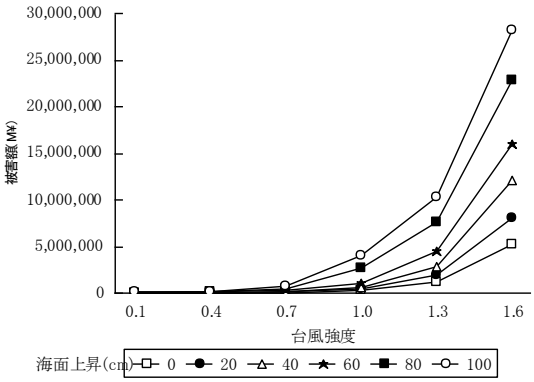


図 2　三大湾における海面上昇量に対する浸水被害額（鈴木による）

に対して脆弱な地域が散見される(図 3)。それらの地域での高潮への備えが重要であることがわかった。



図 3　日本南岸における浸水のシミュレーション結果の例（鈴木による）

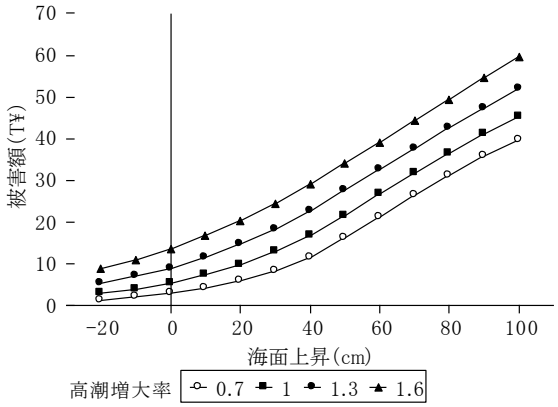


図 4　日本南岸における海面上昇量に対する浸水被害額（鈴木による）

3）適応を考慮した場合の被害の予測：脆弱な区間の堤防・護岸を改修し、その天端を一定水準以上に高めたときの日本南岸地域の高潮に対する浸水面積、浸水人口および浸水被害額を算定した（図 4）。脆弱な地区の堤防・護岸の天端を高めれば、それに応じて高潮の浸水リスクが減少することが分かった。また、再現期間 100 年が適応を考える際の一つの注目点になる可能性があると考えられる。

（2）海面上昇および台風襲来に伴う高潮と河川氾濫による沿岸域の浸水影響・リスクの定量評価と適応策の検討

1）全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測：i）2000 年と 2100 年の氾濫リスクの計算結果を比較すると、流域によって総氾濫水量や浸水面積の将来の増加率に差があることがわかった。久慈川、淀川、天竜川流域では、信濃川や筑後川と比較して、洪水流量比に大きな違いが見られなかった。荒川、筑後川流域では、洪水流量比に対して総氾濫水量比や最大浸水面積比が極端に増加している。これらの流域は、破堤地点に比べて、破堤地点付近の地盤高が低くなっており、一度破堤した水が再び河川に戻ることができにくい地形になっていることが要因として考えられる。また将来との洪水流量比が高いことも要因になっていると考えられる。**ii)遊水地による最大浸水面積の変化**：遊水地による低減効果を示すために、浸水面積の変化を調べた。**図 5** に遊水地の貯水体積による浸水面積の低減率を示す。**図 5** より、荒川、吉野川において貯水体積が小さいのに対して浸水面積の低減率が 10%以上もあり、他の河川に比べ遊水地の効果が高かったことがわかる。その結果、低減面積は氾濫域の地盤高や土地利用といった土地条件に大きく影響を受ける。那珂川のように氾濫域に地盤高の差がある場所だと、貯水体積が増えても浸水面積が変わらない場合がある。しかしその場合には、浸水面積は変わらないが、浸水水深が減っていることが確認できる。

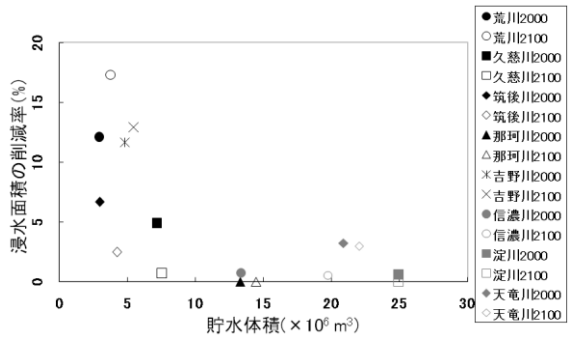


図 5　貯水体積と浸水面積の削減率

2）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測：i）水没面積と影響人口：アジアは、デルタのような低平地に人口が密集し、脆弱性の高い地域であると懸念されている。アジア

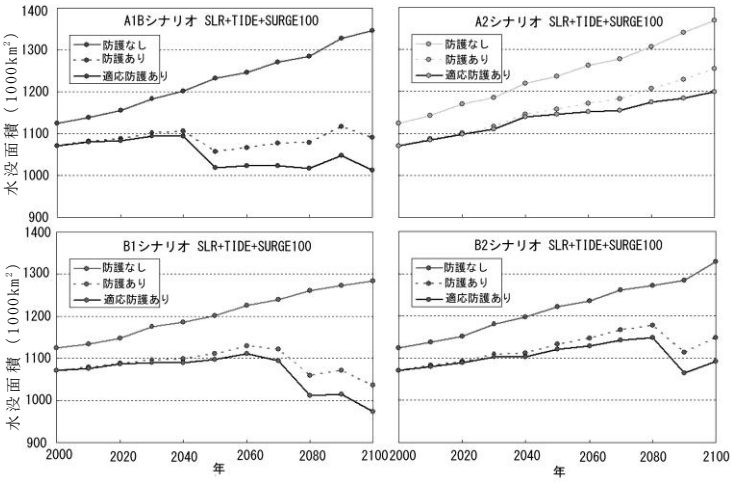


図 6　アジアの影響人口

の水没域は、2100 年に最大 50 万 km^{2}に達すると推定された。図 6 にアジアの影響人口を示した。影響人口が多い国は、中国やバングラデシュ、ベトナムである。影響人口は 2100 年に、最悪 5.4 億人に達することが分かった。2100 年の全球影響人口のうち、約 8 割がアジアの影響人口である。防護を考慮した結果によると、A2 では影響人口の減少が少ないのに対し、A1B や B1 ではそれぞれ 2030 年、2050 年以降、防護の効果が強く発揮される。将来的なアジアの途上国の経済成長が影響の抑制に効いていると考えられる。ii）被害コスト：図 7 に、A1B シナリオにおける防護ありと適応防護ありの場合の、全球被害額の推定結果を示す。被害額はシナリオ間で差があり、将来的に最も大きくなるシナリオが A1B である。海面上昇の進行の上に、再現期間 100 年の高潮が世界で同時に発生したとすると、2100 年で A1B では年間 2.1 兆 US$（GDP 比 0.40%）、A2 では年間 1.6 兆 US$（GDP 比 0.65%）、B1 では年間 1.1 兆 US$（GDP 比 0.31%）、B2 では年間 1.2 兆 US$（GDP 比 0.48%）となった。これに対し、適応防護の結果は、A1B では年間 0.8 兆 US$（GDP 比 0.19%）、A2 では年間 1 兆 US$（GDP 比 0.47%）、B1 では年間 0.6 兆 US$（GDP 比 0.17%）、B2 では年間 0.8 兆 US$（GDP 比 0.34%）となり、海面上昇を考慮した防護基準を設けることで被害額を抑えることが可能になる。

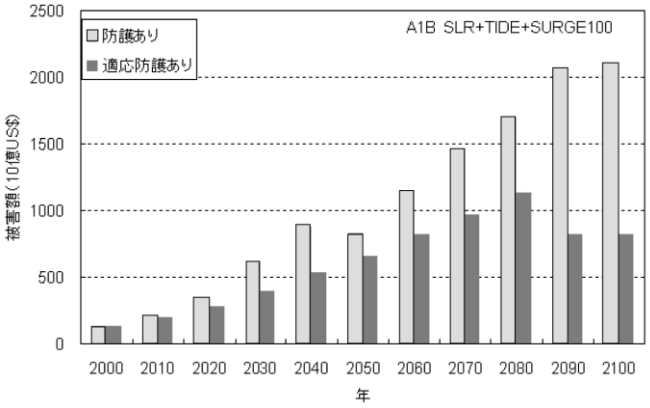


図 7　A1B シナリオにおける被害額

3）河川流域における用地別の浸水面積と経済的影響の分析の結果、河川氾濫の経済被害は、単位面積当たりの直接被害、間接被害の相対的な大きさや及ぼす範囲が河川流域単位で異なることが明らかとなった。以上の特徴を勘案すると、河川氾濫に対する適応策を実施する際に、河川ごとにきめ細かく検討する必要性が示唆される。

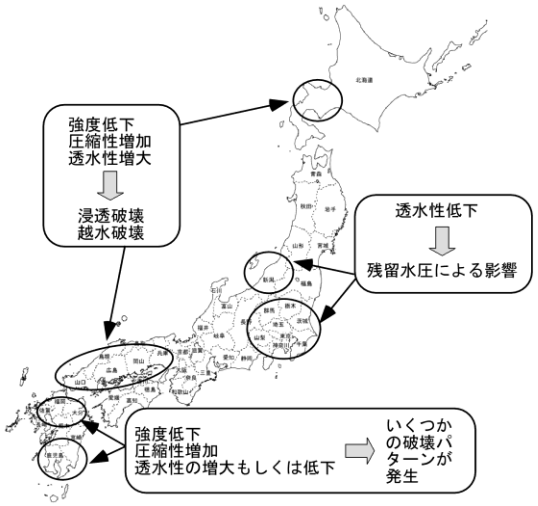


図 8　堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップ

（3）温暖化に起因する海面上昇による沿岸域地盤変状予測と適応策

1）日本各地より河川堤防や高水敷・河岸の構成材料と想定される土質材料を選定し、海面上昇に伴う河川汽水域の拡大を想定した室内実験を実施し、汽水域の拡大により堤防堤体内や高水敷・河岸内に海水成分が侵入した場合に生じる可能性のある事象を、各地域ごとに推察した。また、これらの結果を総括し、河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップを提案した（図 8 参照）。

2）日本各地より河川堤防や高水敷・河岸の構成材料と想定される土質材料を選定し、地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加を想定して、室内実験を実施した。図 9 は、一次元保水性実験結果に基づく降雨浸透による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップである。また、集中豪雨の頻度増加を想定した試験を実施し、その結果に基づいて、図 10 に示すような河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップが得られた。さらに、新たに開発した侵食実験と侵食メカニズムに基づき求めた河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップを示した。

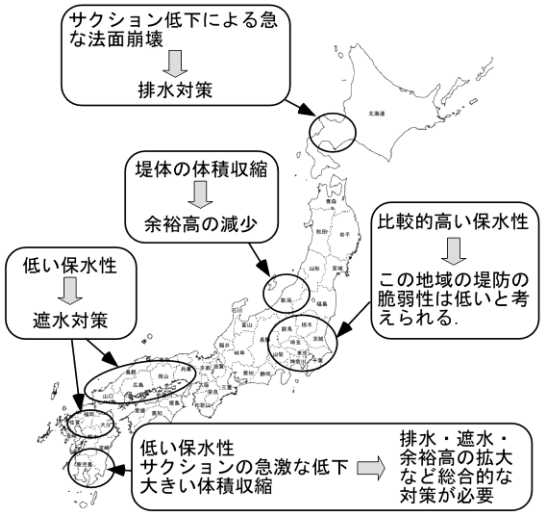


図 9　降雨浸透による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップ

（4）異常気象を含む気候変動と巨大地震による複合的地盤災害評価と適応策

1）海面上昇に伴う地下水位の上昇量予測とその広域影響評価手法を開発し、横浜・川崎の東京湾沿岸域を事例としてGIS表示した(図 11～14)。

2）地下水位上昇量の計算結果に基づいて対象地域の地震時液状化危険度の算出を行い、海面上昇前後の比較を行った。その結果、海岸線に近いほど、また、内陸では河川沿岸に近いほど液状化しやすいこと、海面上昇量が増加するに従って、液状化危険度の高い地域が拡大することが分かった。特に、海岸と河川沿岸付近では顕著な増加を示し、多摩川と鶴見川に挟まれた地域(低平地)における液状化の危険性が高いことが分かった。以上より、全国展開を図る際に、海面上昇に伴う沿岸域地盤の地震時脆弱性評価には、海岸部のみならず河川沿岸域も考慮すべき重要性を指摘した。



図 10　降雨浸透が繰返し頻発することによる河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップ

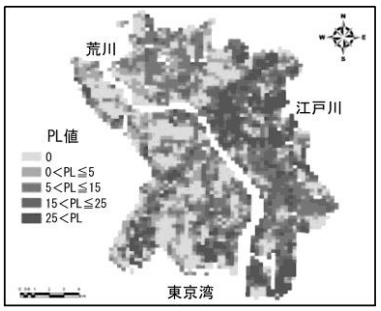


図 11 1990 年液状化ハザードマップ

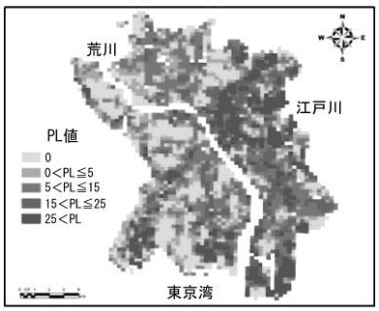


図 12 2100 年液状化ハザードマップ（海面上昇シナリオ）

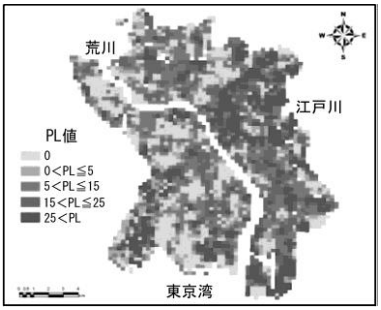


図 13　2100 年液状化ハザードマップ（降雨シナリオ）

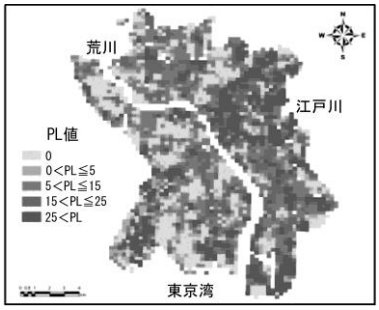


図 14　2100 年液状化ハザードマップ（降雨+海面上昇シナリオ）

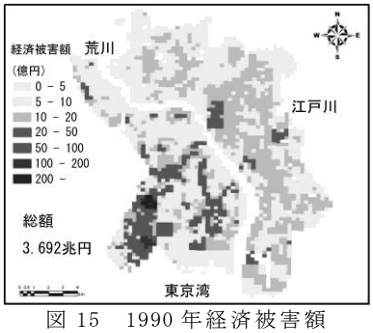


図 15　1990 年経済被害額（東京湾沿岸域）

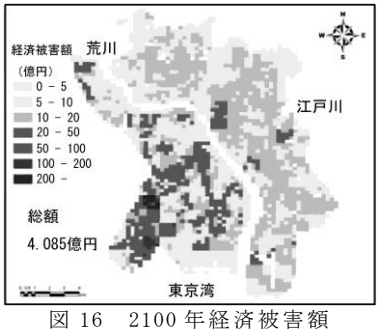


図 16　2100 年経済被害額（東京湾沿岸域、降雨+海面上昇シナリオ）

3）液状化による経済影響評価法を確立した。まず、液状化による経済影響評価フローを確立し、谷口らによる経済被害評価法を拡張して液状化に着目した地震災害における経済被害額算出式を提案し、川崎市湾沿岸域適用した。図 15～16 はその結果を示したものである。これより（i）東京都における 2100 年の経済被害額は、現状と比較し、海面上昇シナリオでは約 680 億円増加すること、(ii)一方、降雨シナリオでは約 3900 億円増加すること、(iii)このように、地下水位上昇では、 東京のような低平地では元々地下水位が高いため、気候変動の影響は沿岸域よりも内陸部で大きいこと、など重要な知見が得られた。以上のような方法によって、経済被害額をメッシュ単位で算出し、特に被害が大きくなると予想される地域を特定した。このような成果は、具体的な防災・減災計画策定に貢献できると考えられる。

4）地下水位上昇に伴う沿岸域の基礎構造物の脆弱性評価：1）まず、地下水位上昇に伴う沿岸域

の構造物基礎の平時における不安定性評価法を整理してデザインチャート化した。２）次に、地下水位上昇に伴う浮力を考慮できる評価法に展開し、基礎地盤の沈下とともに、建物を浮上させる基礎地盤の形状と地下水位上昇の限界値の算定法を提示した。３）さらに、構造物基礎の地下水位上昇に対する既設構造物の不安定性対策のうち、連続地中壁を想定した対策の効果に関する検討結果を示した。

（５）温暖化に起因する海面上昇と豪雨災害による海岸・河川沿岸域の経済的損失評価

本研究で開発した斜面崩壊確率の評価手法を用いて、日本全域における豪雨による斜面災害ハザードマップを作成した。また、温暖化により日降水量が 100mm 以上となる豪雨の年間出現日数の増加を考慮した斜面災害リスクの評価手法を開発し、斜面災害リスクの増加を評価した。結果は以下のとおりである。まず、豪雨の年間出現日数を考慮して、提案した斜面災害リスクの評価手法を用いた日本全域における斜面災害リスクマップを作成した。現在の降雨条件で、メッシュの最大勾配と平均勾配による斜面崩壊確率を用いた斜面災害リスクは、それぞれ図 17、図 18 のようになる。結果としては、リスクマップの分布傾向は、都市部の周辺部で突出している。太平洋、九州では年間豪雨の出現日数が多いので、斜面災害リスクが高いと考えられる。また、斜面災害メッシュの最大勾配を用いた場合、豪雨による日本全域の斜面災害リスクは 10.71 兆円/年であり、平均勾配を用いた場合、斜面災害リスクは 0.83 兆円/年となる。

温暖化に起因する豪雨の頻度増加を考慮して、メッシュの最大勾配と平均勾配による斜面崩壊確率を用いた日本全域の斜面災害リスクを示した。その結果、100 年後、地球温暖に伴う豪雨の頻度増加による斜面災害リスクは､約現在の降雨条件での斜面災害リスクの２倍になると考えられる(図 19)。また、最大勾配を用いた斜面災害リスクと平均勾配を用いた斜面災害リスクの差が大きい（図 17、18）ので、斜面災害リスクをもっと精度の高い評価を行うためには、小さメッシュで地形を表現することによって計算を実施する必要であると考えられる。

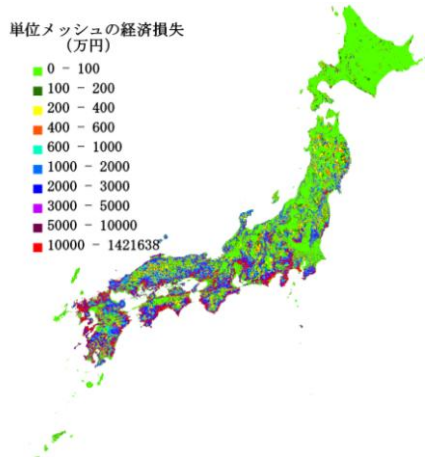


図 17　最大勾配による斜面災害リスクマップ

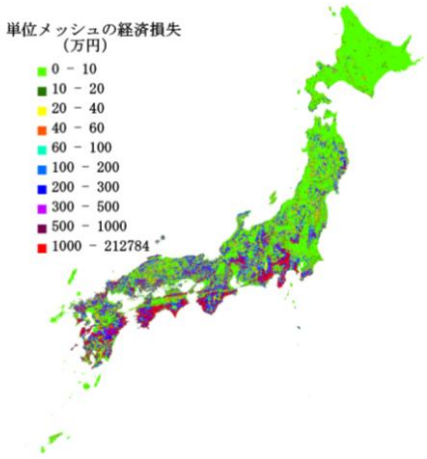


図 18　平均勾配による斜面災害リスクマップ

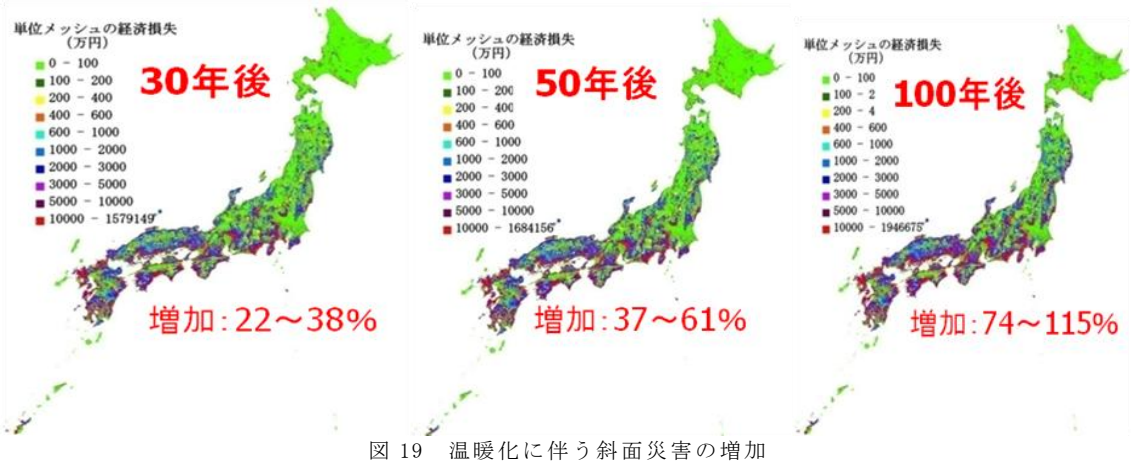


図 19　温暖化に伴う斜面災害の増加

５．研究者略歴

課題代表者：安原一哉

1944年生まれ、九州大学工学部卒業、工学博士、九州大学助手

現在、茨城大学工学部教授

研究参画者
（１）：安原一哉（同上）
（２）1) 鈴木　武
1961年生まれ、東北大学工学部卒業、博士（工学）
現在、国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室長
2) 横木裕宗
1965年生まれ、東京大学大学院修了、博士（工学）、東京大学助手
現在、茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター准教授
3) 小峯秀雄
1962生まれ、早稲田大学大学院修了、博士(工学)、電力中央研究所主任研究員
現在、茨城大学工学部教授
4) 外岡秀行
1977年生まれ、東京大学大学院修了、博士(学術)、東京大学助手
現在、茨城大学IT基盤センター准教授
5) 陳　光斉
1957年生まれ、東京大学大学院修了、理学博士、京都大学講師
現在、九州大学大学院准教授

６．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）
(1)査読付き論文
1) 安原一哉、村上哲、鈴木久美子：自然災害科学、24(3), 214-221 (2005)
「地下水位の上昇が構造物・基礎地盤に及ぼす影響とその評価」
2) S. Murakami, K. Yasuhara, N. Suzuki, W. Ni, and H. Komine：Proc. Int. Conf. Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation & Rehabilitation, 1, 571-576 (2005)
“Vulnerability assessment to liquefaction hazard induced by rising sea-levels due to global warming”
3) 安原一哉：土と基礎（地盤工学会誌）、56(1), 5-8 (2006)
「地盤工学から地盤環境工学、そして、持続可能地盤工学へ」
4) G. Chen, K. Zen, and S. Moriyama：Recent Development of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering in Asia, 269-274 (2006)
“Risk Analysis of Slope Disasters in a Large Area Using GIS Platform”
5) T. Fujinami, G. Chen, K. Zen, and K. Kasama：Recent Development of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering in Asia, 435-440 (2006)
“An Attempt to Estimate Economic Loss Caused by Typhoon Considering Global Warming”
6) H. Komine：Proceedings of Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (VJ-MACIND07) (2007)
“Changes of fundamental properties of riverbank material by sea-level rising due to Global Warming”
7) H. Komine：Proceedings of the 2nd Malaysia-Japan Symposium on Geohazard and Geoenvironmental Engineering (2007)
“Vulnerability of riverbank materials by sea-level rising due to Global Warming in Japan”
8) Y. Uchida, H. Komine, K. Yasuhara, and S. Murakami：Proceedings of Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (VJ-MACIND07)(2007)
“Soil water characteristic curve and one-dimensional deformation of riverbank soils in Japan”
9) K. Yasuhara, S. Murakami, N. Mimura, H. Komine, and J. Recio：J. Sustainability Science, 2(1), 13-26 (2007)
“Influence of Global Warming on Coastal Infrastructural Instability”
10) K. Yasuhara, and J. Recio：Geotextiles and Geomenbranes, 10(1), 1-12 (2007)
“Geosynthetic-wrap around revetments for shore protection”
11) K. Yasuhara, S. Murakami, and H. Komine：Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and

Founds. Eng., 1-I, 211-214 (2007)
“Settlement of foundations affected by groundwater level rise”
12)S. Murakami, and N. Suzuki：Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., 1-II, 941-946 (2007)
“Vulnerability Assessment to Liquefaction Hazard Induced Sea-level Rise by Using Geo-information Database”
13)S. Murakami, and K. Yasuhara：Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., II, 328-335 (2007)
“GIS-aided Assessment of Vulnerability to Seismic Geo-hazard Induced by Global Climate Change (Theme lecture’s paper)”
14)安原一哉、村上哲、小峯秀雄、鈴木久美子、柴田はるか：第7回環境地盤工学シンポジウム論文集、地盤工学会、237-242 (2007)
「気候変動に起因する複合的地盤災害への適応策」
15)G. Chen, K. Zen, and N. Kasuya：Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2, 927-930 (2007)
“Risk Management of Slope Disaster Induced by Earthquake”
16)陳光斉、善功企：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、191-196 (2007)
「不連続変形法DDAによる斜面崩壊の数値シミュレーション」
17)入門大介、陳光斉、善功企、笠間清伸：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、205-208 (2007)
「地理情報システムを用いた降雨に伴う斜面災害リスク評価に関する研究」
18)粕谷悠紀、陳光斉、善功企、笠間清伸：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、225-228 (2007)
「地震および降雨による斜面災害復旧へのリスクマネジメント技術に関する研究」
19)周国雲、陳光斉、横矢直道、北園芳人：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、229-234 (2007)
「GISによる斜面崩壊ハザードマップ作成の効率化の新提案と応用」
20)T. Nian, G. Chen, M. Luan, and Q.Yang：New Horizons in Earth Reinforcement, Edited by Otani, Miyata and Mukunoki, 401-405 (2007)
“Numerical analysis of stability of slope reinforced with piles subjected to combined load”
21)D. Irikado, K. Zen, and G. Chen：New Frontiers in Chinese and Japanese Geotechniques, Edited by Y. Yao, H. Akagi, and G. Zhang, 207-212 (2007)
“A Study on Evaluation of Landslide Risk Induced by Rainfall with Geographical Information System”
22)粕谷悠紀、善功企、陳光斉、笠間清伸：土木学会地震工学論文集, 29, 996-1001 (2007)
「地震による斜面災害復旧へのリスクマネジメントの適用」
23)周国雲、陳光斉、北園芳人、横矢直道：土と基礎、55(6)-593, 18-20 (2007)
「GISと数量化理論を用いた土砂災害ハザードマップ作成技術の高度化手法の提案」
24)G. Chen：Proceedings of International Symposium on Computational Mechanics, 1093-1103 (2007)
“A View on Manifold Method Comparing with Finite Element Method”
25)鈴木武：地球環境研究論文集、16, 105-110 (2008)
「九州地方における地球温暖化による高潮浸水リスクの変化」
26)鈴木武：海洋開発論文集、24, 453-458 (2008)
「高潮浸水シミュレーションによる三大湾奥部の浸水被害の感度解析」
27)桑原祐史、郡司美佳、横木裕宗、三村信男、小柳武和：地球環境研究論文集、16, 79-86 (2008)
「大規模河川下流域を対象とした海面上昇による氾濫リスク推定のための基礎的分析」
28)横木裕宗、戸村達也、塙尚幸、桑原祐史、三村信男：地球環境研究論文集、16, 87-93 (2008)
「気候変動に伴う洪水・氾濫リスクの将来予測　－那珂川・久慈川流域における解析－」
29)H. Komine：Proceedings of 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of

Climate-change-induced Natural Disasters (2008)
"Adaptations and countermeasures for mitigating impacts due to global warming in geotechnical and geoenvironmental engineering"
30) T. Munegumi, H. Komine, K. Yasuhara, and S. Murakami : Proceedings of 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (2008)
"Vulnerability evaluation of soil material simulated river bank material in torrential rainfall"
31) K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, and H. Shibata : Proc. International Conference on Foundations, 136, 1615-1624, Dandee, UK (2008)
"Instability of foundations undergoing rise in groundwater level"
32) G. Chen : Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(12), 2395-2402 (2008)
"Practical Techniques for Risk Analysis of Earthquake Induced Landslide"
33) G. Chen, K. Zen, and Y. Kasuya : Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(12), 2488-2493 (2008)
"Practical Risk Assessment of Slope Disaster Induced by Earthquake"
34) T. Nian, G. Chen, M. Luan, Q. Yang, and D. Zheng : Canadian Geotechnical Journal, 45(8), 1092-1103 (2008)
"Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in nonhomogeneous and anisotropic soils"
35) 鈴木武：地球環境、14(2), 231-236 (2009)
「三大湾および西日本における地球温暖化による高潮被害の予測」
36) 鈴木武：地球環境研究論文集、17, 175-181 (2009)
「太平洋岸地域における地球温暖化による高潮浸水被害の予測」
37) 塙尚幸、横木裕宗、桑原祐史、三村信男：地球環境研究論文集、17, 85-91 (2009)
「気候変動を考慮した全国主要河川下流域における洪水氾濫リスクの将来予測」
38) 横木裕宗、桑原祐史、塙尚幸、郡司美佳、戸村達也、平山歩、三村信男：地球環境、14(2), 237-246 (2009)
「気候変動に伴う我が国の大規模河川下流域の浸水氾濫リスクの将来予測」
39) 信岡尚道、三村信男：海岸工学論文集、56, 371-375 (2009)
「熱帯低気圧による全球の高潮と沿岸脆弱性の推定」
40) 信岡尚道、三村信男、田村誠：地球環境研究論文集、14, 123-132 (2009)
「21世紀におけるアジア・オセアニア沿岸の基礎的脆弱性の推定」
41) H. Nobuoka, N. Mimura, and M. Tamura : 5th International Conference on Asian and Pacific Coast, 2, 194-200 (2009)
"Asian and Oceanian Coastal-Risk Projection due to Sea-Level Rise and Population Growth"
42) 安原一哉、小峯秀雄、村上哲、陳光斉、三谷泰浩、田村誠：地球環境、14(2), 247-256 (2009)
「温暖化による気候変動が地盤災害に及ぼす影響」
43) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲：地盤工学ジャーナル、4(2), 185-195 (2009)
「温暖化に起因する海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸の土質材料に及ぼす影響の簡易評価」
44) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲、内田佳子：地盤工学会誌、57(4), 22-25 (2009)
「各種土質材料の水分特性曲線に着目した集中豪雨による河川堤防や河岸の脆弱性簡易評価」
45) S. Murakami, and K. Yasuhara : In M. Hamza et al. (eds.) : Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2727-2730 (2009)
"Vulnerability assessment to liquefaction hazard induced global climate change by using geo-information database"
46) K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani : International Symposium on Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Sustainable Mitigation and Adaptation to Climate Change including Global Warming, Bangkok,

Thailand, 11-23 (2009)
"Effects of Climate Change on Geo-disasters in Coastal Zones"

47)安原一哉：地盤工学会誌、57(4)別刷, 1-5 (2009)
「地球温暖化と複合地盤災害」

48)K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani : International Symposium on Geodisaster Prevention and Geoenvironment in Asia, JS-Fukuoka, 102-109 (2009)
"Effects of Climate Change on Geo-Disasters in Coastal Zones"

49)S. Murakami, K. Yasuhara, H. Komine, and Y. Hasegawa : Proceedings of the International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, 188-193, Kyoto, Japan (2009)
"Evaluation of Economic Damage on Liquefaction Hazard Induced by Global Climate Change in a Coastal Region"

50)H. Ogawa, S. Murakami, K. Yasuhara, H. Komine : Proceedings of the International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, 216-219 (2009)
"A representative soil profile modeling with consideration of spatial correlativity of soils"

51)陳光斉、善功企、鄭路：土木工学会地震工学論文集、9, CD-ROM 4-0037 (2009)
「地震による斜面崩壊土石の高速・遠距離運動のメカニズムに関する研究」

52)Y. Hou, G. Chen, and C. Zhang : Proceedings of the 9th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Singapore, 227-236 (2009)
"Extension of Distinct Element Method and Its Application in Fracture Analysis of Quasi-brittle Materials"

53)G. Chen, J. Sun, and K. Zen : Proceedings of International Joint Symposium on Geodisaster prevention and Geoenvironment in Asia, 76-83 (2009)
"GIS-based Probabilistic Analysis of the Slope Safety Factor for Landslide Hazard Mapping Induced by Earthquake"

54)T. Nian, S. Wan, and G. Chen : Proceedings of International Joint Symposium on Geo-disaster prevention and Geoenvironment in Asia, 71-75 (2009)
"2D and 3D Slope Stability Analysis Using Shear Strength Reduction Finite Element Method"

55)G. Chen, K. Zen, Z. Jiang, and Y. Jiang : Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering, 648-651 (2009)
"Study on Mechanism of Long-distance Movement of Debris from Landslide Induced by Earthquake"

56)三角真貴子、善功企、陳光斉、笠間清伸：降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム、385-388 (2009)
「GISを導入した降雨による斜面崩壊ハザードマップおよびリスクマップの評価に関する研究」

57)K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani : Journal of Global Environment Engineering, 15, 15-23 (2010)
"Effects of climate change on geo-disasters in coastal zones"

(2)査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）
なし

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－５.沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究

（１）災害による経済的損失評価と適応策の経済性評価に必要な温暖化感度関数の提案

国土交通省国土技術政策総合研究所
沿岸海洋研究部　沿岸防災研究室　鈴木武

〈研究協力機関〉　財団法人港湾空間高度化環境研究センター　細川恭史

平成17～21年度合計予算額　48,402千円
（うち、平成21年度予算額　8,548千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］温暖化の進行度合いの違いによって沿岸域被害がどれだけ変化するかの予測を与える関数（沿岸域被害の温暖化感度関数）を作成するため、高潮による沿岸域の浸水状況をシミュレートする数値モデルを作成し、そのモデルで入力条件を種々に変化させて浸水予測計算を行った。

地形、人口、海岸防護施設等のデータを収集しコンピュータ上にモデル空間を構築し、高潮による浸水の状況をシミュレートする数値モデルを作成した。浸水モデルは、被害規模からみて重要度が高いと考えられる三大湾（東京湾、伊勢湾および大阪湾）の奥部の低平地については詳細なモデルとし、日本南岸地域（関東地方から九州地方）を対象にするモデルは簡素な計算構造を持つモデルとした。作成した数値モデルを使って高潮による浸水の計算を繰り返し行い、三大湾奥部および日本南岸地域において、海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率が与えられた場合に高潮浸水の規模がどの程度になるかを出力する温暖化感度関数を作成した。

三大湾奥部および日本南岸地域における資産のデータを作成し、それら資産データを浸水シミュレーションの結果と重ね合わせることにより高潮被害額を推計した。様々な条件での計算結果を整理し、海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率を入力として高潮による被害額を出力する温暖化感度関数を作成した。得られた温暖化感度関数によれば、高潮による被害が海面の上昇や高潮の増大に対して直線的に増加する傾向がみられた。

日本南岸地域の浸水モデルを使い、防護施設の防護水準の下限値を様々に変化させた場合に対象地域の浸水面積、浸水人口および浸水被害額がどれだけになるかを計算した。その結果によると、防護施設の防護水準の下限値を変化させていった場合、再現期間 100 年の水準で再現期間に対する被害指標（浸水の面積、人口および被害額）を表す曲線の屈曲が相対的に大きい傾向が見られた。

［キーワード］海面上昇、台風大型化、高潮、浸水被害、温暖化感度関数

１．はじめに

日本は、海に面する市町村に人口の 46%、工業出荷額の 47%、商業販売額の 77%が集中するなど、沿岸域が社会・経済活動にとって重要な地域になっている[1)]。

温暖化が進行した場合、海水の膨張や陸上雪氷の融解等で海面が上昇する一方で、海水温の上昇等により台風が大型化する可能性が高いと予想されている。こうした変化によって沿岸域では高潮による浸水の危険性が高まると予想される[2)]。

沿岸域の浸水危険度を見積もる方法の一つとして、その潜在的被害規模である満潮位以下の土地の面積、人口、資産の集積を調べる方法がある。それらは過去に推計されており、わが国の場合、平均満潮位以下に土地が 861km^2、居住人口が 200 万人、資産が 54 兆円存在し、海面が 1m 上昇した場合には、それらの値はそれぞれ 2,339km^2、410 万人、109 兆円になると見積もられている[3)]。

大気中の温室効果ガスの安定化濃度の目標値を定めるためには、温暖化がかなり進んだ一つの状態を想定し、それを予測するだけでは不十分である。どれだけ温暖化が進行したときにどれだけの影響が出るかを予め把握しておくことが必要である。そのため、温暖化による海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率を説明変数として、説明変数が示す状態が出現した状態における高潮による浸水面積、浸水人口、被害額を出力する関数（温暖化感度関数）を求める必要がある。

２．研究目的

地球の温暖化によってもたらされる海面上昇と台風の大型化は、日本の沿岸部における高潮による浸水の危険性を増大させる。日本では沿岸部に多くの人口と資産が集まっているため、温室効果ガスの安定化濃度の目標を設定するにあたっては、温暖化による沿岸域の高潮の危険性の増大による影響を分析しておく必要がある。そうした分析を行うため、温暖化による海面の上昇や台風の大型化の度合に応じて、高潮による浸水面積、被害人口、浸水被害額がどの程度になるかを出力する関数を求めることが必要である。

温暖化による高潮の脅威の増大への備えを、はじめから終局の状況にあわせて行おうとするならば、当面の被害を軽減・防止するために短期間に巨大な投資を行わなければならず、社会として許容しがたい状況になる。温暖化は徐々に進行し、高潮による脅威も同様の速さで増大するため、温暖化の進行に合わせて対策を徐々に進めていくことが、社会の資金的負担を軽減し、実行可能性を高めることになる。そうした対策のシナリオを想定していく基礎とするためにも、温暖化の程度の違いによって高潮による浸水被害がどのように変化するのかを見積もることが必要である。

そのため、本研究では、地球の温暖化によって引き起こされる高潮偏差の増大に応じてどの程度の浸水が起こるのかをシミュレートする数値モデルを作成する。そして、そのモデルを使い、海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率の条件を様々に変化させて浸水予測を行い、その結果を整理することによって、海面上昇量と台風もしくは高潮の増大率が与えられた場合に高潮による浸水面積、浸水人口、浸水被害額を出力する関数（温暖化感度関数）を作成する。

３．研究方法

（１）高潮浸水予測と温暖化感度関数作成の体系

地球温暖化による高潮浸水の被害を見積もるため、温暖化によって海面下になる土地の面積、居住人口、資産の金額が被害ポテンシャルとして求められてきたが、その方法では浸水のメカニズムが考慮されていないため、現実に起こる被害との乖離が大きいし、どれだけの海面上昇で温暖化の影響が急速に増加するかなどを知ることができない。そのため、海岸には防護施設が存在し、高潮が発生した場合に防護施設を越流して海水が陸域に浸入するという機構を組み込んだ浸水モデルを作成する。そのモデルを使って高潮によって浸水する陸域の面積、浸水する場所に居住する人口、浸水による被害額を見積もる。そうした見積もりを海面上昇量と台風強度もしくは高潮増大率の条件を様々に変えて行い、海面上昇量と台風強度もしくは高潮増大率を説明変数として、それらの条件が生起した場合の高潮被害の程度を示す指標を出力する関数（温暖化感度関数）を作成する。

地球の温暖化による海面上昇の影響は全国各地に及ぶため、全国を対象として高潮被害を推計する必要があるが、ここでは台風の来襲頻度の高い日本南岸地域（関東地方から九州地方）を対象に推計を行う。また、人口や資産が多く集積し、低平地の面積が広く地形が複雑な三大湾（東京湾、伊勢湾および大阪湾）の奥部を他地域よりも精度の高いモデルとし、推定精度を高める。日本南岸地域を見積もるためには非常に多くの沿岸域で計算を行う必要があるため、日本南岸地域のモデルはシンプルな処理プロセスのモデルとする。

モデルを作成した地域の人口や経済指標のデータを収集し、それらから資産データを作成し、モデルから求められた浸水状況をもとに浸水面積、浸水人口および浸水被害額を求める。

（２）三大湾奥部の高潮浸水モデル

三大湾奥部の高潮浸水モデルは、地形と防護施設のデータをメッシュ情報として保有し、長波理論で海水の流動を表現するモデルである。与えられた海側境界での海面変動をもとに海水の流入・流動を計算し、流入した海水の水面変動を計算する。護岸等からの海水流入を本間の越流式[4),5)]で計算し、海水の遡上は岩崎・真野[6)]の方法で計算する。これらにより三大湾奥部の低平地における浸水状況を表現する数値モデルを作成する。

（３）日本南岸地域の高潮浸水モデル

日本南岸地域において高潮による浸水を予測するため、対象地域を多数の計算領域に分割し、分割された計算領域ごとに計算を行う。そのため、計算領域ごとに地形及び防護施設のデータを収集し整理し、護岸等の地点で海水の水面変動を与え、護岸等からの海水流入を本間の越流式[4),5)]で計算し、レベル湛水法によって浸水深を計算する数値モデルを作成する。

（４）浸水被害の推計

三大湾奥部および日本南岸地域における浸水シミュレーションから得られる浸水地域の面積を集計するとともに、人口、資産のデータを浸水シミュレーションの結果と重ね合わせることにより浸水被害を推計する。人口データは国勢調査の常住人口を使用する。資産データは、国勢調査の一般世帯数、農漁家世帯数、事業所・企業統計調査の事業所数、事業所従業員数を求め、それ

らに家屋評価額、家庭用品評価額、事業所資産評価額、農漁家資産評価額の原単位を乗じて求める。日本南岸地域モデルにおいてはその他に農地面積と生産額の原単位から農業生産額を求める。そして、浸水計算結果から被害率を求め、資産額および生産額に乗じて一般資産被害額を求める。一般資産被害額に公共土木施設比率、公益事業等比率を乗じて公共土木施設被害額、公益事業等被害額を求め、それらに一般資産被害額を加え高潮浸水による被害額とする[7)]。

それらをもとに予測した様々な条件での高潮浸水に対して浸水面積、浸水人口および浸水被害額を求め、海面上昇と高潮に関する条件が与えられた場合に高潮による浸水の被害がどの程度になるかを示す関数をグラフとして作成する。

（５）適応を考慮した場合の被害

地球の温暖化が進み、海面が上昇し、高潮偏差が大きくなれば、高潮による浸水対して何らかの対策がとられ、高潮浸水被害が低減することになると考えられる。そうした動きを考慮するため、防護施設を改良してその天端を高める対策が全ての脆弱区間においてとられると仮定したときの被害を推計する。

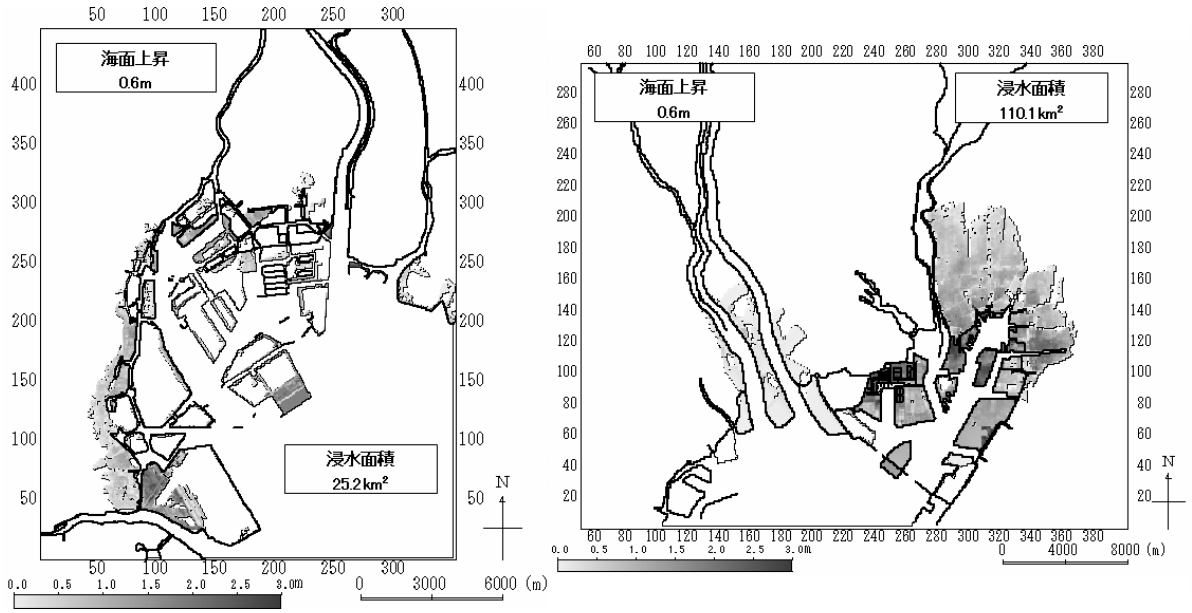
高潮偏差の再現期間を防護水準の指標とし、その指標に対応する高潮から防護できるように防護施設の天端高を高めると想定し、再現期間 50 年、100 年、150 年、200 年、300 年、500 年について計算を行う。海面上昇量は、IPCC 第 4 次評価報告書[2)]に示されている 100 年後の海面上昇量の幅 20cm～60cm をもとに 0cm、20cm、40cm、60cm とし、高潮増大率は 1.0 から 1.6 までとした。また、高潮増大率と海面上昇量が温暖化により並行して増大することを勘案し、海面上昇量と高潮増大率の組合せを計算用に設定する。設定した海面上昇量と高潮増大率の組合せのもとで防護水準を変化させて浸水被害を予測し、その結果を考察する。

４．結果・考察

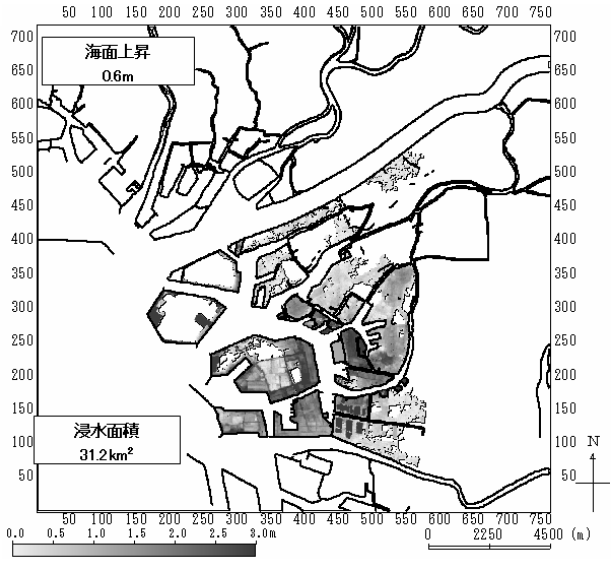
（１）三大湾奥部の高潮浸水

三大湾奥部の高潮浸水モデルを作成し、高潮による浸水の予測を行った。予測結果の一つとして、海面が 60cm 上昇し、防護施設の設計に使われている台風の強度を 1 としたとき、台風強度が 1.3 になった場合における三大湾の最大浸水深の分布を図 1 に示す。

東京湾奥部には東部の荒川や江戸川の周辺にゼロメートル地帯が広がるが、それらの低地を守る護岸や水門等の防護水準が比較的高いため、それらの地域に脆弱な地域はそれほど多く見られない。むしろ東京南部沿岸に高潮に脆弱な地域が多くみられる。伊勢湾奥部では、木曽三川周辺から名古屋港周辺にかけてゼロメートル地帯が幅広く分布するが、高潮に対して脆弱な地域は木曽三川河口沿いと名古屋港奥部周辺に限られる。その中でも浸水深が大きいと予想されるのは、比較的古くに開発された名古屋港の埋立地とその周辺の地域である。大阪湾奥部では、大阪の北部から中部にかけて臨海部の埋立地の背後にゼロメートル地帯が広がるが、堤防や水門の整備が進んでいるため、高潮に脆弱な地域はそれほど多くない。高潮に脆弱な地域が多くみられるのは、大阪港の中部から南部に広がる埋立地とその周辺である。



a. 東京湾　　b. 伊勢湾



c. 大阪湾

図 1　三大湾奥部における高潮による浸水深（海面上昇 60cm、台風強度 1.3）

（２）日本南岸地域の高潮浸水

日本南岸地域の高潮浸水モデルを作成し、高潮による浸水の予測を行った。予測結果の一つとして、海面が 60cm 上昇し、高潮偏差が現状の 1.3 倍になった場合の日本南岸地域における平均浸水位以下となる地区ごとの面積の地域分布を図 2 に示す。

この結果から、三大湾、瀬戸内海および九州北西部が高潮に対して脆弱であることが分かる。同時に、それら以外の地域でも入り江や河口部に高潮に対して脆弱な地域が散見される。中国・四国地方は瀬戸内海沿岸の全域に高潮に脆弱な地域が広く分布している。日本海沿岸および太平洋沿岸では、高潮が相対的に大きくないことおよび高波や津波を防ぐために高い堤防等を設置し

ている場合が多いことから、高潮による被害の危険性が低くなっている。九州地方は九州北西部、瀬戸内海沿岸に高潮に脆弱な地域が多い。これは主に堤防や護岸の整備水準が低い区間が断片的に存在することによって生じていると考えられる。高潮に対して脆弱な地域では地球温暖化を考慮した高潮対策の検討が重要と考えられる。さらに、日本南岸地域は他地域に比べて台風の来襲が多いため、短期の対策と長期の対策をうまく組み合わせて効果と効率の高い対策を実施していくことが求められる。



図 2　日本南岸地域における地区ごとの高潮浸水面積（海面上昇 60cm、高潮増大率 1.3）

（３）三大湾奥部における高潮浸水被害の温暖化感度

三大湾の高潮浸水モデルで多数の計算を行い、その結果を整理し海面上昇量と台風強度に対する高潮被害額を表すグラフを作成した（図 3～5）。グラフによれば、各湾ともに現在の計画台風を超えたあたりから被害が大きくなる。被害額は各湾の高潮防護水準と資産分布の影響を受けて傾向に差がみられ、台風強度 1.3 までは三つの湾の中で伊勢湾の被害額がもっとも大きく、台風強度 1.6 では大阪湾の被害額が最も大きくなる。東京湾は台風強度が 1.3 を超えると被害が急に拡大し、大阪湾は台風強度 1.0 のあたりから被害が加速度的に増加する。

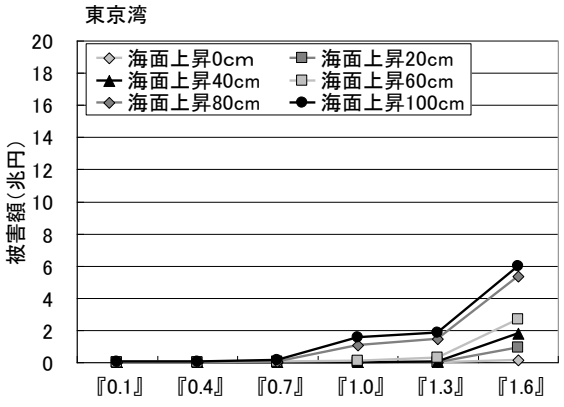


図3　東京湾の高潮浸水被害額

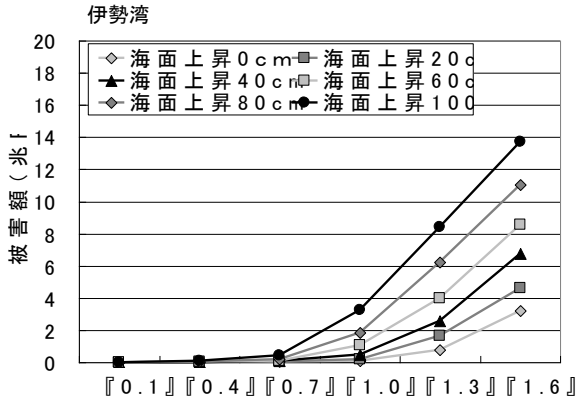


図4　伊勢湾の高潮浸水被害額

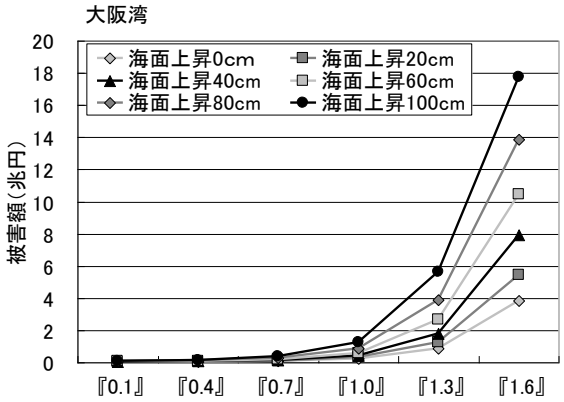


図 5　大阪湾の高潮浸水被害額

（４）日本南岸地域における高潮浸水被害の温暖化感度

日本南岸地域の高潮浸水モデルで多数の計算を行い、その結果を整理して海面上昇量と高潮増大率に対する浸水面積、浸水人口および浸水被害額を表すグラフを作成した（図 6～8）。グラフでは各被害指標ともに海面上昇が 20cm のあたりで被害の増加割合がやや急増する。それは、海面上昇 20cm が地球温暖化による高潮被害の増大に対する対策を考える際の一つの注目点になるということを意味しているが、海面上昇 20cm での被害の急増の程度は小さいものであり、全体的には海面の上昇や高潮の増大に対して被害がほぼ直線的に増加する。そのことは、高潮への対応は「ある危険な水準までは備えをあまりせず、それを超える危険性が高まった時点でしっかり行えばよい。」ということにはならず、「大きな被害を出さず、対策の実施主体の負担を大きくしないためには、温暖化の進行に合わせて適切な対策を徐々に講じていくことが合理的である。」ということを示唆している。

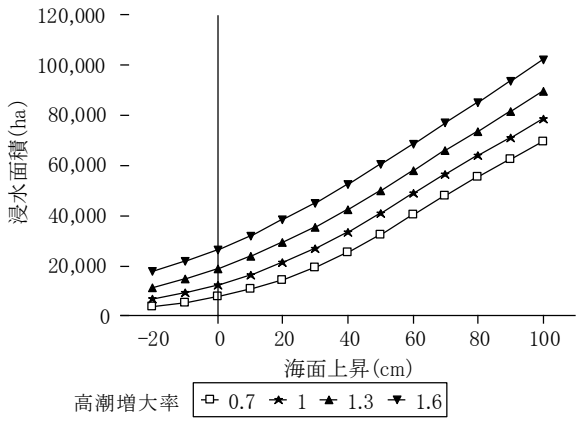


図6　日本南岸の高潮浸水面積

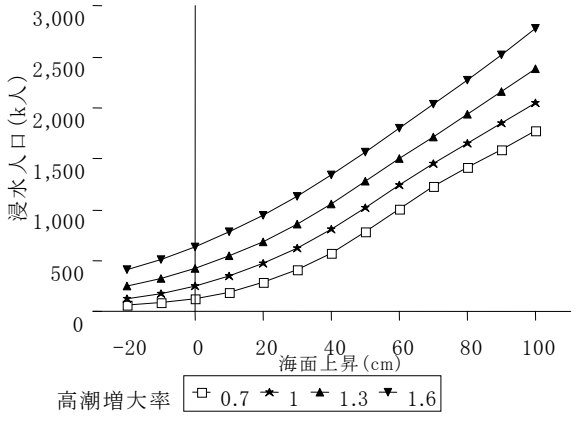


図7　日本南岸の高潮浸水人口

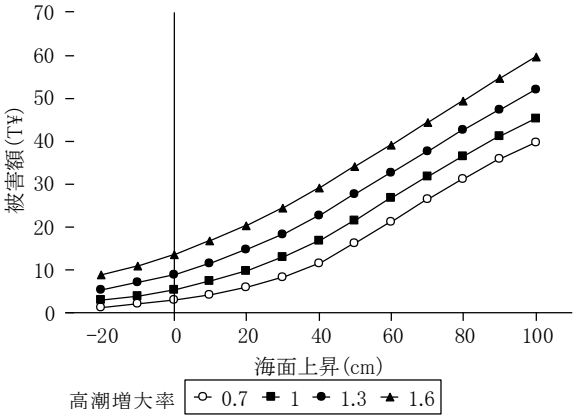


図８　日本南岸における高潮浸水被害額

（５）適応を考慮した場合の被害

脆弱な区間の堤防・護岸を改修し、その天端を一定水準以上に高めたときの日本南岸地域の高潮浸水に対する浸水面積、浸水人口および浸水被害額を図 9～11 に示す。脆弱な地区の堤防・護岸の天端を高めれば、それに応じて高潮の浸水リスクが減少することが分かる。高潮リスクの削減割合は、両対数のグラフでみるとほぼ直線となるが、再現期間 100 年の水準までの低下がやや大きい。

堤防・護岸のパラペットをリプレースして天端を増高する対策を対象に工事費用を計算した。この計算では、再現期間 100 年の高潮を防御できない区間を工事対象とし、既設構造と新設構造を RC、既設パラペット高を 1m としてパラペットの増し高を最大で 0.5m としている。大規模な増高を制限しているのは、工事費の見積を単純化するために基礎や本体の改良をしない場合を想定しているためである。

求められた工事費用は日本南岸地域で 1400 億円であった。その額は、先に求めた被害低減額と一対一に対応する値ではないし、算出値の不確実性がかなり高いものである。しかし数値のオーダーからみて、求められた工事費用は被害低減額よりも小さいとみることできる。

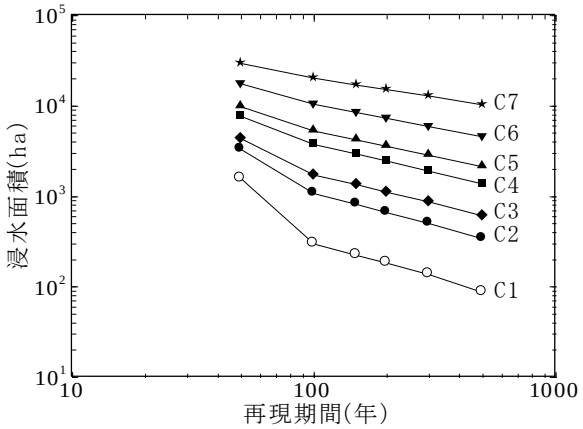


図9　日本南岸地域の高潮浸水面積

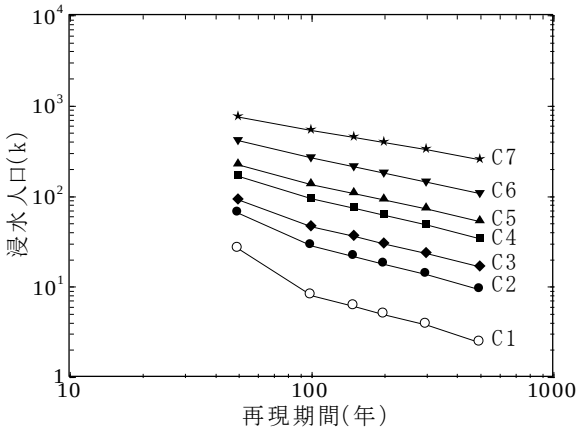


図10　日本南岸地域の高潮浸水人口

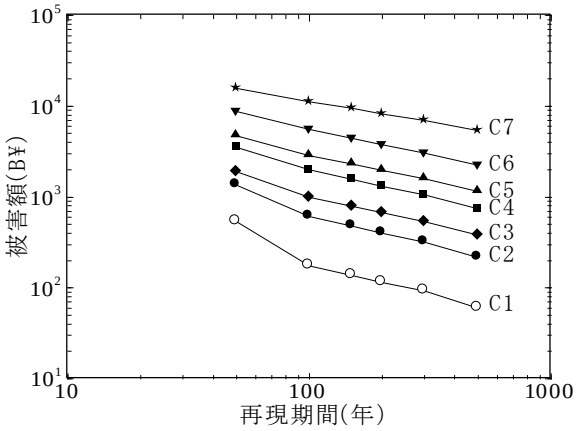


図11　日本南岸地域における高潮浸水被害額

表1　海面上昇計算条件

Case	海面上昇量	高潮増大率
C1	0	1
C2	20	1.1
C3	20	1.2
C4	40	1.2
C5	40	1.3
C6	60	1.3
C7	60	1.6

注）海面上昇量の単位はcmである。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

これまでの地球温暖化による沿岸域の浸水被害の予測は、温暖化によって海面が上昇した場合、海面下になる地域がどれだけあるか、そしてそこにどれだけの人口が居住し、どれだけの資産が存在するかという形でなされてきた。日本では人口や資産が集積する地域を護岸・堤防等を構築して高潮から防御しているため、従来の浸水危険性の見積もりは現実からの乖離が大きいと言わざるを得ない。また、温室効果ガスの安定化濃度の目標を定めるためには、どれだけの温暖化によってどれだけ危険性が高まるのか、特にどのレベルの温暖化で危険性が急速に増大するのかを知ることが重要である。従来の方法では危険性が緩やかな曲線で増加することになるため、危険性が急増する温暖化のレベルを見出すことはできない。それに対して今回の手法では海岸の防護施設をモデルに組み込んでいるため、温暖化による高潮の危険性が急増する温暖化のレベルを検知することができる。ここに科学的な意義がある。

しかし、そうした検討をしてもなお、温暖化による高潮浸水の危険性は緩やかな曲線で増加することが分かった。このことは、高潮に対する対策が「ある水準までは様子を見、その水準に近づいたときに対策を講じる」というのではなく、「どのような水準であっても状況に合わせて適切な対策を連続的にとっていくことが合理的である」可能性を示している。

（２）地球環境政策への貢献

上述のように、地球温暖化による浸水被害の予測に関する従来の方法では、危険性が急速に増加する温暖化のレベルを検知することができない。それに対して今回用いた手法は海岸の防護施設をモデルに組み込んでいるため、温暖化による高潮の危険性が急増する温暖化のレベルを検知することができる。しかし、今回の解析ではそうした検討をしてもなお、高潮浸水の危険性の温暖化による増加が緩やかな曲線となることが分かった。このことは、高潮に対する対策が「ある水準までは様子を見ておいて、その水準に近づいたときに対策を講じる」というのではなく、「どのような水準であっても状況に合わせて適切な対策を連続的にとっていくことが合理的である」可能性を示している。

上記の知見を踏まえると、高潮浸水に対する緩和策として、護岸や堤防を改修しそれらの天端

を増高する対策を考えることができる。そうした対策を実施する場合、護岸や堤防の天端をある再現期間に来襲する高潮の水準にするとするならば、高潮の浸水被害は再現期間に対して累乗で減少することが分かった。なかでも、再現期間 100 年までは若干速いペースで被害が減少するため、再現期間 100 年が適応を考える際の一つの注目点になる可能性があると考えられる。このことは今後の地球環境政策立案へ貢献できる知見と考えられる。

６．引用文献

1) 原沢英夫、西岡秀三（編）：古今書院（2003）
「地球温暖化と日本 第3次報告 -自然・人への影響予測-」
2) IPCC: The IPCC Working Group 1 4th Assessment Report Summary for Policymakers (2007)
3) 松井貞二郎、立石英機、磯部雅彦、渡辺晃、三村信男、柴崎亮介:海岸工学論文集、39,1031-1035 (1992)
「海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測」
4) 本間仁：土木学会誌、26, 6, 635-645（1940）
「低溢流堰堤の流量係数」
5) 本間仁：土木学会誌、26, 9, 849-862（1940）
「低溢流堰堤の流量係数」
6) 岩崎敏夫、真野明：海岸工学講演会論文集、26, 70-74（1979）
「オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算」
7) 農林水産省、国土交通省：海岸事業の費用便益分析指針（改訂版）（2004）

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) 鈴木武：地球環境研究論文集、16, 105-110（2008）
「九州地方における地球温暖化による高潮浸水リスクの変化」
2) 鈴木武：海洋開発論文集、24, 453-458（2008）
「高潮浸水シミュレーションによる三大湾奥部の浸水被害の感度解析」
3) 鈴木武：地球環境、14(2), 231-236（2009）
「三大湾および西日本における地球温暖化による高潮被害の予測」
4) 鈴木武：地球環境研究論文集、17, 175-181（2009）
「太平洋岸地域における地球温暖化による高潮浸水被害の予測」

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) 鈴木武：第15回地球環境シンポジウム講演論文集、167-170（2007）
「三大湾奥部における温暖化による高潮浸水領域の変化の予測」

2) 鈴木武：第35回環境システム研究論文発表会講演集、251-256（2007）
「四国を対象とした温暖化による高潮浸水領域の変化の見積」

（２）口頭発表（学会）

1) T. Suzuki：Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (2007)
“Estimate of Storm Surge Inundation Areas due to Global Warming along Major Bays in Japan”
2) T. Suzuki：Techno-Ocean 2008 / 20th Ocean Engineering Symposium (2008)
“Toward Estimating Coastal Inundation Risk Increased by Climate Change”
3) 鈴木武：沿岸域の管理・利用・開発と国土計画に関する日中シンポジウム（2009）
「日本の沿岸域管理と国土計画」

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

Ｓ－４　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－５.沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究
（２）海面上昇および台風襲来に伴う高潮と河川氾濫による沿岸域の浸水影響・リスクの定量評価と適応策の検討

茨城大学
広域水圏環境科学教育研究センター　横木裕宗

〈研究協力機関〉　茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター 三村信男
茨城大学工学部都市システム工学科　桑原祐史
茨城大学工学部都市システム工学科　信岡尚道
地球変動適応科学研究機関　田村誠
茨城大学大学院理工学研究科　丸山陽佑

平成17～21年度合計予算額　39,901千円
（うち、平成21年度予算額　7,209千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］本研究では、日本全国の河川流域を対象とした高潮・洪水氾濫リスクを予測し、適応策を検討すること、および日本を含めたアジア太平洋域における高潮氾濫リスクを予測することを主な目的とした。洪水氾濫浸水予測では、気候変動による洪水氾濫リスクの変化を予測することを目的とし、将来流量および将来の氾濫域の推定方法を示し、全国の主要河川に対して適用した。その結果、2100年頃にはほぼ全国の河川下流域で降水量が増加することが分かった。また、応答関数法を用いた洪水流量の予測でも洪水リスクの増加が認められた。しかし一方で、氾濫域面積で見ると増加量は河川によって大きく異なり、流量の増加が直接氾濫域の増加には結びつかず、河川流域の地形の違いの影響が大きいことがわかった。さらに、遊水地を設置することである程度の氾濫面積や浸水深を低減させることができたが、その効果は流域の地形に大きく影響を受けることが分かった。また、河川氾濫による経済損失評価に関しては、農地の浸水に基づく直接的な経済被害を算定したのち、産業連関分析手法により地域間や産業間の交易関係を考慮した間接被害の推計を行った。分析の結果、浸水による経済的被害は、単位面積当たりの直接被害、間接被害の相対的な大きさに及ぼす範囲が河川単位で異なることから、浸水に対する適応策を河川ごとにきめ細かく検討する必要性が示唆された。一方、アジア・太平洋の高潮氾濫浸水予測では、これまで考慮されていなかった防護施設を沿岸影響予測に取り込むことを目的とした。使用する熱帯低気圧・人口データなどを最新のものに更新することによって、2100年までのアジア・太平洋地域を含む世界の氾濫リスクをより現実的に把握することを試みた。その結果、影響人口を比較してみると、 B1シナリオにおいて影響人口が最も少なく、A2シナリオの場合に影響人口が最も大きいこと、また、その差は2050年で約2/3であり、2100年では約1/2になり、沿岸影響の大きさ

は、社会経済発展経路によることが明らかになった。

［キーワード］気候変動、海面上昇、浸水氾濫被害、護岸シナリオ、経済影響

１．はじめに

本研究では、日本全国の河川流域を対象とした洪水氾濫リスクを予測し、適応策を検討すること、および日本を含めたアジア太平洋域における高潮氾濫リスクを予測することを主な目的として、以下の２つのテーマを掲げて研究を行った。

（１）全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測と経済損失評価

近年、気候変動に伴う異常気象の発生が世界中で問題となっている。IPCC の第 4 次評価報告書では、今後も気温や海面は上昇すると示された（IPCC、2007）[10)]。また今後、大雨の頻度の増加や熱帯性低気圧の強大化の可能性が高いという予測が示された。このような現象は、河川流量を増加させ、洪水を引き起こす恐れがある。また、日本には急峻な河川が多く、下流域には大都市が存在することが多い。そのため洪水氾濫リスクを予測することには大変意義がある。平成 20 年度は、海面上昇に加えて、気候変動に伴う降水量の変化を考慮し、洪水氾濫リスクの解析を行った。平成 21 年度は、遊水地による氾濫リスクの低減効果に焦点を当てた。温暖化に伴う河川流域の浸水により生じる経済被害に関して、産業連関分析に基づき地域間や産業間の交易関係を考慮した推計を行った。

（２）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測

従来の沿岸影響の予測は、現在の人口を仮定し、また護岸対策を無視した「潜在的影響」の予測がほとんどであった。それに対して、本研究では、将来の国別の経済成長と人口成長を想定し、その組み合わせによって防護レベルが異なるという防護シナリオを導入して沿岸影響予測を行った。さらに、将来発展の経路を IPCC SRES シナリオに従って 4 通り、また、防護を 2000 年レベルに固定、海面上昇に合わせた適応防護の 2 通りに仮定し、それらの比較を行った。

２．研究目的

（１）全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測

本研究では、全国の主要河川下流域（荒川、久慈川、那珂川、信濃川、天竜川、淀川、吉野川）において氾濫計算を行い、気候変動に伴う将来の河川氾濫リスク及び、遊水地を設置した場合の低減効果を明らかにすることを目的とした。そして、それらの結果から全国の主要河川下流域における氾濫リスクの遊水地による低減効果を示した。さらに、河川流域単位での河川氾濫とその経済被害を推計した。ここでは、土地をより直接的な生産要素として利用する農林業に注目し、地理情報システム（Geographic Information System: GIS）手法により浸水による農地の生産性の減少という直接的な経済被害を算定し、それがもたらす間接的な被害に関しては産業連関分析手法を用いて地域間や産業間の交易関係を考慮した推計を行った。

（２）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測

本研究では、これまで考慮されていなかった防護施設を沿岸影響予測に取り込むことを目的とした。使用する熱帯低気圧・人口データなどを最新のものに更新することによって、2100 年まで

のアジア・太平洋地域を含む世界の氾濫リスク（浸水域、影響人口、被害額）を把握することを試みた。その際、SRES シナリオに基づいた影響の度合いや社会発展を考慮することで、氾濫リスクを時系列で明らかにすることを目指した。

３．研究方法

（１）全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測

１）数値計算方法[2, 3, 5, 6)]

洪水氾濫解析には、2 次元不定流モデルを用いた。基礎方程式は連続式及び x、y 方向の運動方程式からなる。数値計算には差分法（時間差分間隔 1.0s）を用い、変数の配置には staggered 格子を、計算の進め方は Leap frog 法を用いた。なお、河道内も氾濫域と同じ計算を行った。計算対象領域を 50m×50m のメッシュで表現し、それぞれのメッシュで不透過、農用地など 12 種類の格子情報とそれに対する粗度係数を与え、水の流れを制御した。氾濫の先端条件として閾値法（閾値水深 1mm）を用いた。また、地盤高が急変する地点では、段落ち及び遡上の近似式を用いた[5)]。氾濫計算では、あらかじめ河川に破堤地点を設定し、水位がその地点の地盤高を超えた時に水が堤内に氾濫するようにした。破堤地点は、河川が蛇行しており、破堤による浸水被害が大きいと予想される地点とした。

遊水地は、周辺の地盤高より低く下げることで表現した。また、遊水地に接する氾濫域の格子を不透過格子にし、遊水地と他の格子との水の移動を制限した。遊水地には、破堤方法と同様に、河川の水位が遊水地の入り口の地点の地盤高を超えた時に水が流れ込むようにした。遊水地の規模は流域面積を基準とした。また、設置場所は国土交通省の基準（国土交通省河川砂防技術基準）および事例[4)]に基づいて、土地利用分類で農用地、森林、荒地になっており、地盤高が低く、平地になっている地点で、破堤地点に近い地点にした。

２）解析条件

本研究は、荒川、久慈川、那珂川、信濃川、天竜川、吉野川、淀川、筑後川の計 8 河川を対象とした。これらの選定に際して、河川延長や流域面積を考慮するとともに、地域を代表する河川であること、下流域に都市が広がっていることなどを考慮した。

河道内の境界条件は、まず上流端に観測所における流量、下流端に水深を与え、定常状態の流量フラックスと水深を計算した。氾濫計算では上流端における境界条件には、2000 年（観測値）及び気候統一シナリオより塙（2009）[6)]が求めた 2100 年における最大流量を利用した。その流量を表 1 に示す。洪水流量は、計算開始から 1 日後にピークが現われるように三角関数で与え、2 日後には平常流量に戻り、そのままの流量で 3 日後までの計算を行った。下流端での河口の水位は 2000 年では T.P. +0.00m、2100 年では IPCC（2007）[10)]をもとに+0.59m とした。ま

表 1　観測値及び将来における洪水流量（塙 2009）

流域名	年	最大洪水流量(m^3/s)
荒川	2000	5512
	2100	6701
久慈川	2000	1708
	2100	1851
筑後川	2000	3667
	2100	5092
那珂川	2000	2825
	2100	3600
吉野川	2000	6220
	2100	6617
信濃川	2000	6047
	2100	9173
淀川	2000	7096
	2100	8736
天竜川	2000	5435
	2100	5933

た、土地利用条件や堤防高などの将来変化は考慮に入れなかった。現状の地盤高のままでの氾濫域が、流量および海面水位の変化によりどのような変化が生じるかを比較した。

（２）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測

本研究では、防護施設を沿岸影響予測に取り込み、気候変動の進展と経済成長による防護能力の向上の相対的関係を考慮した影響予測を行うことを目的とした。使用する熱帯低気圧・人口データなどを最新のものに更新し、適応策を考慮することによって、2100 年までのアジア・太平洋地域を含む世界の氾濫リスクをより総合的に把握することを試みた。

１）外力設定

外力としては、海面上昇、潮汐偏差、台風による高潮偏差の 3 つを足し合わせた。評価の対象は、IPCC SRES シナリオで規定されている 4 つの将来社会とし、それに対応する海面上昇の値を IPCC（2007）[10]に基づいて与えた。

高潮の推定では、まず、台風のデータは NOAA と Joint Typhoon Warning Center が公表している 1949～2008 年に発生した台風のトラックデータを用いた。高潮偏差の計算は気圧低下による海面の吸い上げと、風による吹き寄せを足し合わせて計算した。台風域内の気圧分布は Myers の式で与え、風速は気圧傾度風と場の風をベクトル合成して与えた。また、これまでの研究では、吹送距離の設定において湾内や風向を考慮しておらず、吹送距離が非現実的に長くなる結果、吹き寄せ量が大きく計算される地点があった。そのため本研究では地形から取りうる最大の吹送距離を与えるように改良を加えた。上記の 1949 年から 2008 年までに発生した 4000 例の台風を用いて緯度経度 1 分の海岸線毎に年最大高潮偏差の計算を行い、得られた年最大高潮偏差を母集団として、極値統計解析を行い高潮偏差の出現確率分布を推定した。

２）防護シナリオ

防護シナリオとは、対象メッシュの人口密度と一人当たり GDP の組み合わせによって、どの程度の水位（満潮位と高潮偏差の和）まで防護されるかを判定するものである。本研究では、下記の 3 つの防護シナリオを用いた。

①固定防護シナリオ（2000 年）

②将来の経済成長・人口増加に伴って変化する防護シナリオ（2000 年防護レベル）

③将来の経済成長・人口増加及び海面上昇に伴って変化する防護シナリオ（適応防護シナリオ）

防護水準を区別するための経済レベルは、1999 年 OECD の DAC（開発援助委員会）援助リストの分類に基づいて、世界の国を低収入国（800 ドル以下）と中低収入国（801-2,999 ドル）・中高収入国（3,000-9,999 ドル）・高収入国（10,000-19,999 ドル）・超高収入国（20,000 ドル以上）の 5 つに分類した。また、人口密度に基づいて、以下のように都市の規模を分類した。大都市（5000 人以上）、中都市（1,000-4,999 人）、小都市（100-999 人）、人口が少ない地域（0-99 人）である。この組み合せによって想定した②の防護シナリオを表 2 に、③の適応防護シナリオを表 3 に示す。

防護シナリオを適用する際に必要となる一人当たり GDP と人口密度及びこれらの将来の成長率は、まず 2000 年を基準年としてそのデータを用意し、将来の成長率を与えて経済や人口の予測を行った。

表 2　防護シナリオの基準（表中の数字は洪水レベルの再現期間(年)）

		人口密度（人/km²）			
		<=99	100-999	1000-4999	>=5000
一人当たりGDP（US$）	<=800	-	-	-	-
	801-2999	-	-	-	1
	3000-9999	-	-	1	10
	10000-19999	-	1	10	100
	>=20000	-	10	100	1000

表 3　適応防護シナリオの基準（表中の数字は洪水レベルの再現期間(年)）

		人口密度（人/km²）			
		<=99	100-999	1000-4999	>=5000
一人当たりGDP（US$）	<=800	-	-	-	-
	801-2999	-	-	-	SLR+1
	3000-9999	-	-	SLR+1	SLR+10
	10000-19999	-	SLR+1	SLR+10	SLR+100
	>=20000	-	SLR+10	SLR+100	SLR+1000

(SLR= Sea-level Rise)

３）浸水地域の計算

護岸は海岸線に沿って作られるものを想定しているが、それだけでは、護岸が設置海岸の背後地に、周囲の護岸なし海岸から浸水する。そのため、防護される海岸の背後の地域全体の標高を高くする方法で浸水地域を算定した。

４）被害額の算定

気候変動の影響による損失は、Stern Review によると、洪水や熱波などの極端現象による被害額は GDP の 0.5～1%に達するとされている。また水没に対する防護コストに関して Nicholls ら（2006）[9]では特に影響の大きい 15 カ国に対して試算を行い、GDP の 1%に満たないことを示している。気候変動の影響と経済的損失に関する情報は多くの不確実性が伴うものの、定量的な試算は被害額と適応コスト共に将来の適応策実施の戦略や時期を検討するうえで IPCC（2007）[10]でも将来的な研究の必要性が議論されている。そこで本研究では、浸水シミュレーションの結果を用いて、水没による沿岸域の被害額の算定方法を開発し、評価を行った。

本研究の地域区分は緯度経度 1 分メッシュであるため、それに合わせた簡略化した手法が必要となる。そこで、浸水被害額は、大局的には浸水影響人口と国毎の一人当たり GDP の積に比例すると仮定した。全球の総被害額の算定には次式を用いた。

$$DC = \alpha \times \sum_{i=1}^{N} \left\{ pGDP_i \times POP_{risk,i} \right\} \quad (1)$$

ここにDCは被害額、αは浸水地域内の経済活動の総量と被害額との比率を表す係数、Nは国の数、$pGDP_i$はi国の一人当たり GDP、$POP_{risk,i}$はi国の影響人口である。

式（1）における係数αは、2000 年の実際に発生した事例の被害額と、2000 年の防護ありの影響人口の計算結果から決定した。CRED の取りまとめる Disaster Database から 1995 年から 2005 年の間に発生した洪水・高潮の被害額の平均を算定し、その値 478 億ドルを 2000 年の被害額とした。2000 年の国別の影響人口は、再現期間毎（1 年、10 年、100 年、1000 年）の確率分布から、2000 年における国別影響人口の期待値を算定した。2000 年の全球の期待影響人口は 7138 万人であった。式（1）に基づいて求めた係数αは、$\alpha = 0.3068$である。

河川氾濫の経済評価については、図 1 に分析手法の概要を示した。ここでは IPCC（2007）[10]が予測する今世紀末の最大海面上昇（59cm）を想定した上で、潮位と高潮を考慮した潜在的な浸水リスクをもつ流域面積を推計した。計測の方法として、各メッシュの海面高さと地形効果のみを入力データとして浸水領域を探索するレベル湛水法を用いた。

次に、河川流域の浸水面積とその土地利用形態の推計に基づき、農林業での直接的な経済損失を試算した。本研究は、桑原他（2008）[8]が分析対象とした全国主要 10 河川のうち、利根川、信濃川、吉野川、筑後川の 4 河川流域における河川氾濫による農業部門の生産性減少とその間接影響を推計した（図 2）。この 4 河川を対象とした理由は、これらの流域が 10 河川の中で最も農地面積が大きいためである。農業部門の直接的な損失額は、農地から得られると期待された農業生産額が浸水によって 100%減少すると想定した。具体的には農業センサスから、より小さな地域区分で各種農産物価格と農産物別の農地面積を把握し、単位面積当り生産額（100 万円/ha）を地域別・農地形態別に導出した。この地域別・農地形態別の単位面積当り生産額を用いて、GIS 分析により推計した農地の浸水面積を農業生産の損失額に変換した。

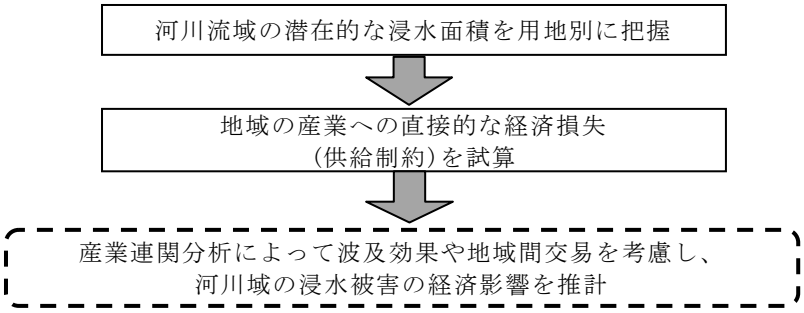


図 1　研究概要

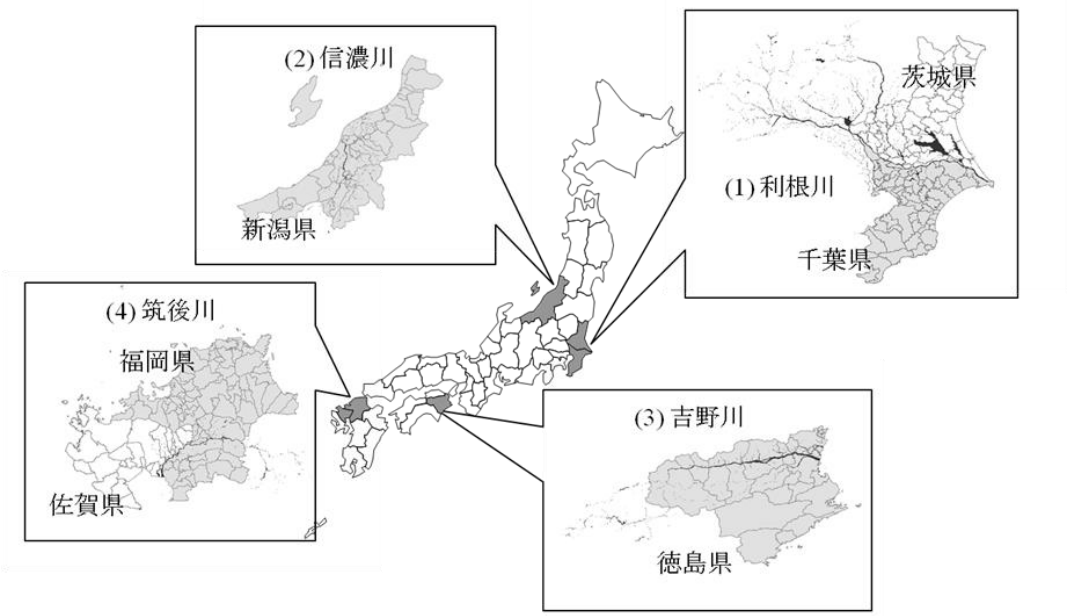


図 2　分析対象とする河川流域と浸水域が含まれる都道府県

そして、この農林業の直接的な経済損失から、産業連関分析によって産業部門間や地域間の波及効果を評価した。浸水がもたらす直接的な経済被害は農地の土地生産性や工場の生産能力の低下などが考えられる。それゆえ、浸水被害の波及効果を分析するためには、浸水によって直接被害を受ける特定産業の生産損失を外生的に取り扱う方がより望ましい。その際には、Tiebout（1969）[11]や Miller and Blair （1985）[12]などにより考案された特定産業の生産額を外生化した産業連関分析が適用可能である。当手法に基づき、各自治体が発行する 2000 年都道府県産業連関表から、都道府県単位で浸水面積を含む地域とそうでない地域に区分した地域間産業連関表を構築して推計に用いた（表 4）。例えば、信濃川の浸水域は新潟県内のみなので「新潟県-その他全国」からなる 2 地域間表を作成したのに対して、利根川の浸水域は千葉県と茨城県に跨るため、「千葉県-茨城県-その他全国」からなる 3 地域間表を作成した。この地域間産業連関表をノンサーベイ手法で作成する際には、地域間交易（移出、移入）をいかに推計するかが重要となる。2 地域間表については片田他（1992）[7]と同様に県とその他全国を区別するときに県の移出がその他全国の移入となる（その逆も成立）という関係に注目して、地域間交易の推計を行っている。一方、3 地域間表については、まず 2 県間の交易を LQ（location quotient）法により推計した上で 2 県間とその他全国の交易を片田他（1992）[7]と同様の方法で導出した。なお、本研究の経済損失の推計は利用可能なデータの制約から、今世紀末の海面上昇に対して 2000 年産業連関表を用いるなど、現在の経済構造を前提に分析を行っている。

表 4　地域間産業連関表のイメージ

		中間需要		国内最終需要		輸出	輸入	生産額
		浸水地域	その他全国	浸水地域	その他全国			
中間投入	浸水地域	$\mathbf{X}^{AA}$	$\mathbf{X}^{AB}$	$\mathbf{f}^{AA}$	$\mathbf{f}^{AB}$	$\mathbf{E}^{A}$	$-\mathbf{M}^{A}$	$\mathbf{X}^{A}$
	その他全国	$\mathbf{X}^{BA}$	$\mathbf{X}^{BB}$	$\mathbf{f}^{BA}$	$\mathbf{f}^{BB}$	$\mathbf{E}^{B}$	$-\mathbf{M}^{B}$	$\mathbf{X}^{B}$
付加価値		$\mathbf{V}^{A}$	$\mathbf{V}^{B}$					
生産額		$\mathbf{X}^{A}$	$\mathbf{X}^{B}$					

４．結果・考察

（１）全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測

１）現在と将来の氾濫リスクの比較

現在と将来の氾濫リスクを比較するために、2000 年と 2100 年の氾濫リスクを調べた。表 5 に現在と将来の洪水流量比、総氾濫水量比、浸水面積比を示した。それぞれの比は 2100 年の値が 2000 年の値に比べ、何倍になっているかを表している。洪水流量とは上流端で与えた流量のことであり、総氾濫水量とは、氾濫域に流出した水の総量のことである。

2000 年と 2100 年の計算結果を比較すると、流域によって総氾濫水量や浸水面積の将来の増加率に差があることがわかった。表 5 より久慈川、淀川、天竜川流域では、信濃川や筑後川と比較して、洪水流量比に大きな違いが見られなかった。これらの流域で浸水面積がほとんど増加しなかったのは、洪水流量の増加量が少なかったため、氾濫水量の増加量も少なかったことが主な原因だと考えられる。また、これらの流域の破堤地点が破堤地点付近の地盤高と比べて、同じ程度の地盤高だったために、氾濫流が河川に戻りやすくなったと考えられる。

一方、荒川では総氾濫水量が 10.23 倍、浸水面積が 5.04 倍、筑後川では総氾濫水量が 18.87 倍、浸水面積が 4.24 倍になっており、荒川、筑後川流域では、洪水流量比に対して総氾濫水量比や最大浸水面積比が極端に増加している。これらの流域は、破堤地点に比べて、破堤地点付近の地盤高が低くなっており、一度破堤した水が再び河川に戻ることができにくい地形になっていることが要因として考えられる。また将来との洪水流量比が高いことも要因になっていると考えられる。

表 5　現在と将来の比

	洪水流量比	総氾濫水量比	浸水面積比
荒川	1.22	10.23	5.04
久慈川	1.08	1.61	1.01
筑後川	1.39	18.87	4.24
那珂川	1.27	1.85	1.18
吉野川	1.06	1.87	1.48
信濃川	1.52	2.60	1.40
淀川	1.23	1.24	1.06
天竜川	1.09	1.12	1.03

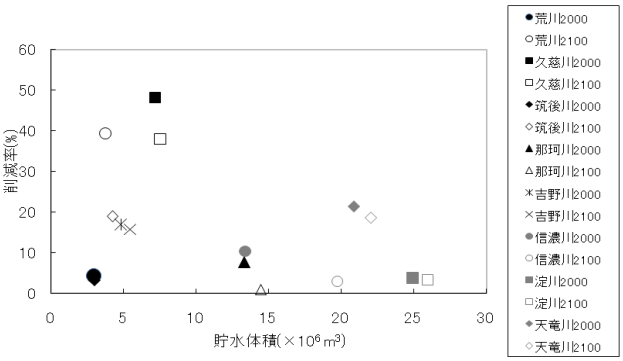


図 3　貯水体積と総氾濫水量の低減率

表 6　遊水地による総氾濫水量の変化

流域名	年	遊水地による総氾濫水量の低減量(m^3)	遊水地による総氾濫水量の低減率(%)
荒川	2000	5.45×10^4	4.27
	2100	5.14×10^6	39.37
久慈川	2000	1.46×10^6	48.16
	2100	1.86×10^6	37.92
筑後川	2000	3.84×10^4	3.18
	2100	4.32×10^6	18.91
那珂川	2000	1.57×10^6	7.65
	2100	3.10×10^5	0.81
吉野川	2000	1.62×10^5	16.89
	2100	2.81×10^5	15.69
信濃川	2000	6.28×10^6	10.29
	2100	4.59×10^6	2.89
淀川	2000	1.84×10^7	3.69
	2100	2.02×10^7	3.26
天竜川	2000	6.97×10^7	21.34
	2100	6.81×10^7	18.60

２）遊水地による総氾濫水量の変化

遊水地による低減効果を示すために、総氾濫水量の変化を調べた。図 3 に遊水地の貯水体積による総氾濫水量の低減率、表 6 に遊水地による総氾濫水量の変化を示す。貯水体積とは遊水地に流入した総水量のことである。図 3 より、総氾濫水量の低減率が荒川 2100 年では 39.37%、久慈川 2000 年では 48.16%、久慈川 2100 年では 37.92%となっており、貯水体積が小さいのに総氾濫水量の低減率が大きいことが確認できた。これは、久慈川の総氾濫水量が小さいために、少しの流量カットでも低減率が大きくなるためであると考えられる。また荒川 2100 年の場合は、遊水地により浸水面積も 4.5km^2 も減っていることから、将来においての遊水地の効果が高いと考えられる。しかし、那珂川、信濃川、淀川は貯水体積が大きいにもかかわらず、低減率が 3%程度と小さくなっている。信濃川、淀川については、地盤高が低い地域になっているので、流量を減らしても氾濫しやすい土地条件のため、氾濫水量があまり変わらなかったこと、総氾濫水量が大きいために、低減量が多くても低減率が小さくなってしまったことの 2 つが要因だと考えられる。那珂川については、遊水地による低減面積も小さいことから、土地条件的に遊水地の効果が小さい地域と考えられる。

３）遊水地による最大浸水面積の変化

次に、遊水地による低減効果を示すために、浸水面積の変化を調べた。図 4 に遊水地の貯水体積による浸水面積の低減率、表 7 に遊水地による浸水面積の変化を示す。図 4 より、荒川、吉野川において貯水体積が小さいのに対して浸水面積の低減率が 10%以上もあり、他の河川に比べ遊水地の効果が高かったことがわかる。久慈川や筑後川は 2000 年の貯水面積に対して低減率は高いが、2100 年になると低減率が半分以下なっている。つまり、久慈川や筑後川の場合、今回設置した遊水地の大きさだと 2000 年には効果が高いが、2100 年になると効果が低くなっている。また、信濃川、淀川は貯水面積に対して低減率が 0.5%程度とかなり小さくなっている。これは、河川の氾濫域が地盤高の低い地域になっているので、流量を減らしても氾濫しやすい土地条件のため、氾濫水量があまり変わらず、浸水面積の低減率が小さくなったものと考えられる。

低減面積は氾濫域の地盤高や土地利用といった土地条件に大きく影響を受ける。那珂川のように氾濫域に地盤高の差がある場所だと、貯水体積が増えても浸水面積が変わら

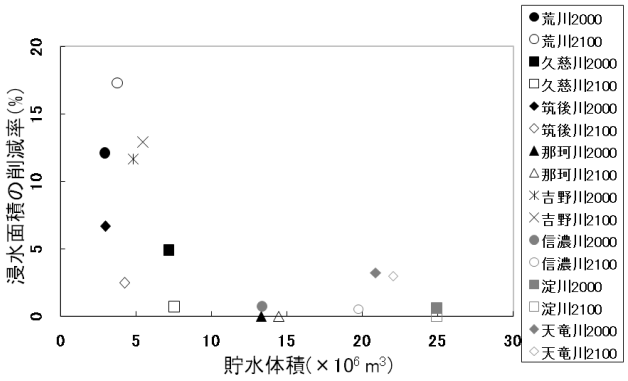


図 4　貯水体積と浸水面積の削減率

表 7　遊水地による浸水面積の変化

流域名	年	遊水地による浸水面積の低減量(km^2)	遊水地による浸水面積の低減率(%)
荒川	2000	0.63	12.12
	2100	4.57	17.30
久慈川	2000	0.54	4.90
	2100	0.08	0.72
筑後川	2000	0.88	6.67
	2100	1.40	2.50
那珂川	2000	0.00	0.00
	2100	0.00	0.00
吉野川	2000	1.58	11.65
	2100	2.62	12.93
信濃川	2000	0.61	0.74
	2100	0.61	0.53
淀川	2000	0.58	0.59
	2100	0.00	0.00
天竜川	2000	2.66	3.22
	2100	2.54	2.98

ない場合がある。しかしその場合には、浸水面積は変わらないが、浸水水深が減っていることが確認できる。

次に、表 8 に河川流域における用地別の浸水面積、経済影響の評価として表 9 に直接被害と間接被害の産業間・地域間の内訳、図 5 に各河川流域における間接被害の構成を示す。農地の単位面積当りの直接的な損失額は、その流域の農地形態と生産性により 101～282 万円/ha の違いがある。表 9 および図 5 より、直接・間接を合わせた総合的な経済被害は、本研究の対象とした 4 河川間で直接被害の 1.66～1.76 倍程度であり、地域間･産業間で波及する間接的な影響は決して無視できない規模になることが分かる。さらに間接被害は農業が属する第 1 次産業よりも、第 2、第 3 次産業で生じる割合がはるかに大きいこと、間接被害がその他地域（対象河川の浸水面積を含まない都道府県）で発生する割合は 4 河川で 42.7～58.1%の差があることも確認できる。

分析の結果、河川氾濫の経済被害は、単位面積当たりの直接被害、間接被害の相対的な大きさや及ぶ範囲が河川流域単位で異なることが明らかとなった。以上の特徴を勘案すると、河川氾濫に対する適応策を実施する際には、河川ごとにきめ細かく検討することの必要性が示唆される。

表 8　河川流域における用地別の浸水面積

(km^2)

	(1)　利根川	(2)　信濃川	(3)　吉野川	(4)　筑後川
田	181.7	21.19	41.34	196.69
その他農地	4.59	1.92	9.28	2.47
農地合計	186.29	23.11	50.62	199.16
その他浸水域	272.79	48.36	56.63	86.96
合計	459.08	71.47	107.25	286.12
流域面積[1)]	16842 (1)	11900 (3)	3750 (13)	2863 (21)
全長 (km)	322 (2)	367 (1)	194 (17)	143(21)

桑原他（2008）[8)]に基づき作成。括弧内は日本国内の順位。

1）国土交通省河川局「河川管理統計」、「流量年表」より。

表 9　直接被害と間接被害の産業間・地域間の内訳

(100万円)

	(1) 利根川			(2) 信濃川			(3) 吉野川			(4) 筑後川		
	浸水地域	その他地域	合計	浸水地域	その他地域	合計	浸水地域	その他地域	合計	浸水地域	その他地域	合計
農業	22225 (100)	271 (1.2)	22497 (101.2)	4050 (100)	42 (1.0)	4091 (101.0)	14260 (100)	153 (1.1)	14413 (101.1)	20173 (100)	216 (1.1)	20389 (101.1)
その他の第1次産業	916 (4.1)	103 (0.5)	1019 (4.6)	306 (7.6)	19 (0.5)	325 (8.0)	879 (6.2)	59 (0.4)	938 (6.6)	1156 (5.7)	122 (0.6)	1277 (6.3)
第2次産業	2218 (10.0)	5142 (23.1)	7360 (33.1)	356 (8.8)	758 (18.7)	1114 (27.5)	968 (6.8)	3524 (24.7)	4491 (31.5)	2214 (11.0)	4400 (21.8)	6614 (32.8)
第3次産業	4302 (19.4)	3366 (15.1)	7668 (34.5)	737 (18.2)	457 (11.3)	1194 (29.5)	2630 (18.4)	2461 (17.3)	5091 (35.7)	5454 (27.0)	1840 (9.1)	7294 (36.2)
合計	29662 (133.5)	8882 (40.0)	38544 (173.4)	5449 (134.5)	1275 (31.5)	6724 (166.0)	18737 (131.4)	6197 (43.5)	24934 (174.9)	28997 (143.7)	6578 (32.6)	35575 (176.3)

注)表中のカッコ内の数値は直接的被害額を100とした場合の各被害額を示す。

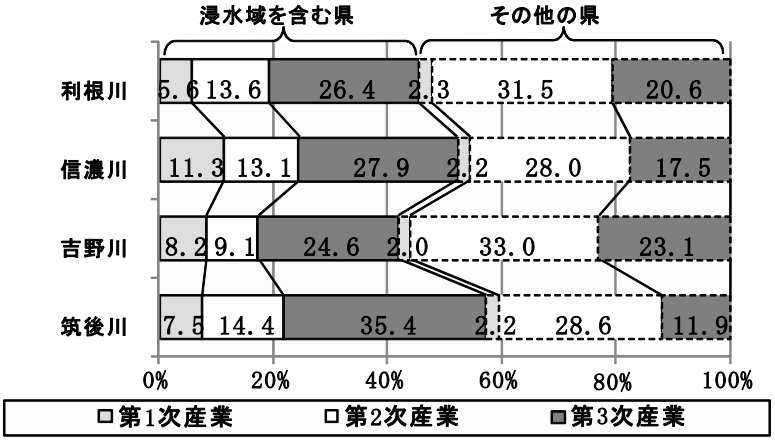


図５　河川流域における間接被害の構成の違い

（２）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測

１）水没面積と影響人口

図６に全球の水没面積を示す。水没面積は年々増加し、最悪の場合、2100 年には防護なしで 137 万 km^2（全球総面積の 0.93%）に及ぶことが分かった。防護を考慮した場合は、SRES シナリオ毎に影響の現れ方に変化があった。防護ありと適応防護ありの結果を比較すると、防護基準に海面上昇を考慮することで水没が減少することをいずれのシナリオも示している。特に A1B シナリオや B1 シナリオでは防護の効果が強くみられ、2100 年時点では防護ありで 20%、適応防護ありで 25%の影響の減少が見られた。

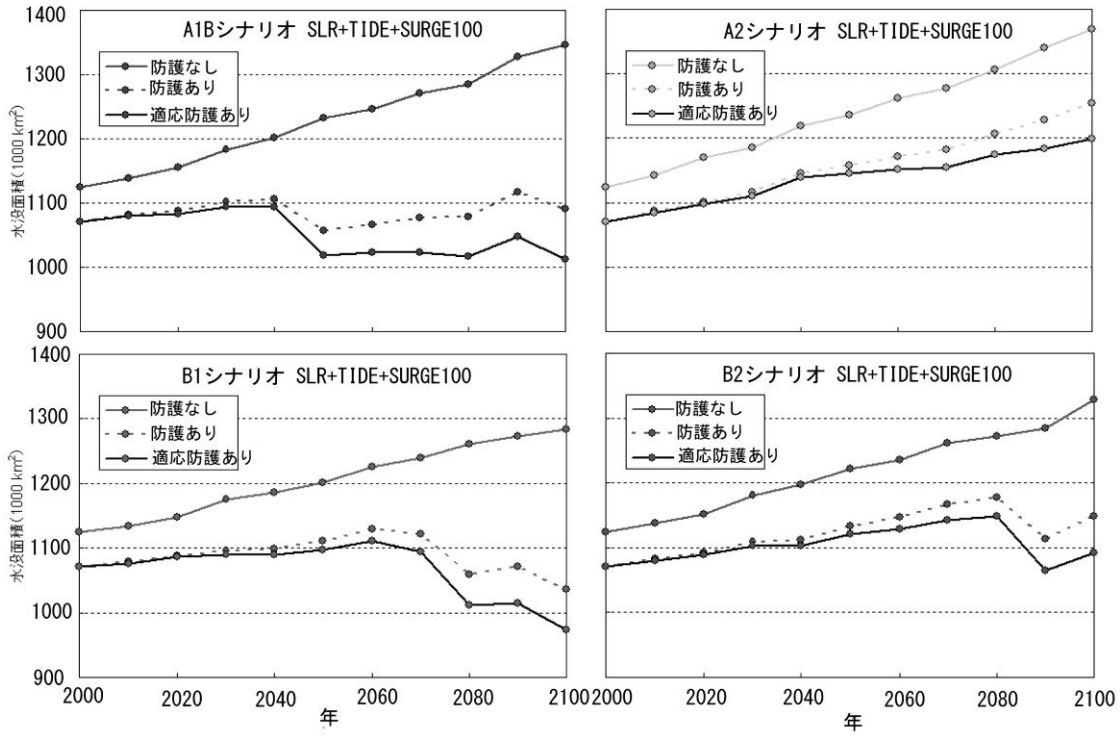


図６　全球の水没面積

図 7 に全球の影響人口を示す。水没面積は全球の 1%にも満たないにもかかわらず、影響人口は 2100 年で最悪の場合、6.7 億人に達することが分かった。影響人口は将来発展シナリオに強く左右されるため、A2 シナリオで最も大きくなった。また、防護による水没面積の減少によって影響人口も減少し、2100 年時点の A1B、B1 では、防護ありで 70%、適応防護ありで 80%の影響の減少が見られた。以上の結果から、経済力の発展シナリオの違いが影響人口を左右するといえる。

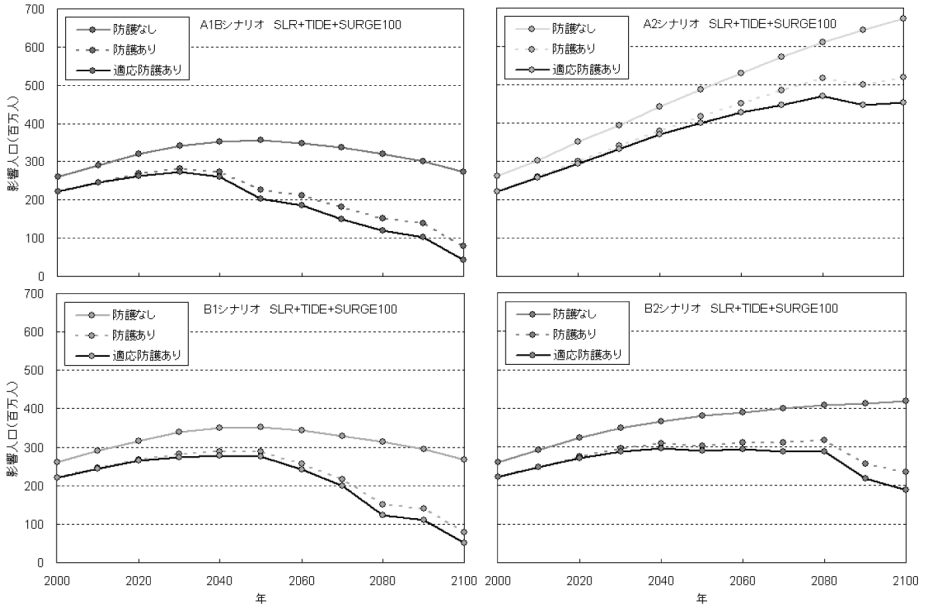


図 7　全球の影響人口

アジアは、デルタのような低平な土地に人口が密集し、脆弱性の高い地域であると懸念されている。アジアの水没域は、2100 年に最大 50 万 km^2 に達すると推定された。図 8 にアジアの影響人口を示した。影響人口が多い国は、中国やバングラデシュ、ベトナムである。影響人口は 2100 年に、最悪 5.4 億人に達することが分かった。2100 年の全球影響人口のうち、約 8 割がアジアの影響人口である。防護を考慮した結果によると、A2 では影響人口の減少が少ないのに対し、A1B や B1 ではそれぞれ 2030 年、2050 年以降、防護の効果が強く発揮される。将来的なアジアの途上国の経済成長が影響の抑制に効いていると考えられる。

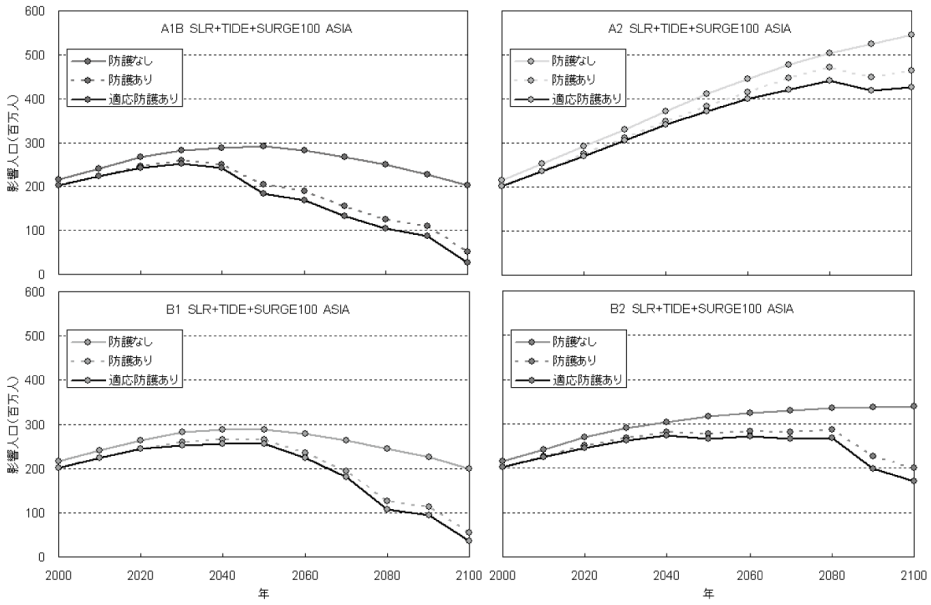


図 8　アジアの影響人口

図 9 にオセアニアの影響人口を示す。2100 年に最悪の場合で、水没面積は 16 万 km^2 で、影響人口は 656 万人である。防護なしと防護ありの影響人口の結果を比較すると大きな差はないものの、海面上昇に適応した適応防護ありの結果ははるかに影響人口が少ないことが分かる。オセアニアでは海面上昇を考慮した防護基準の導入により、被害を大幅に減らせる可能性がある。

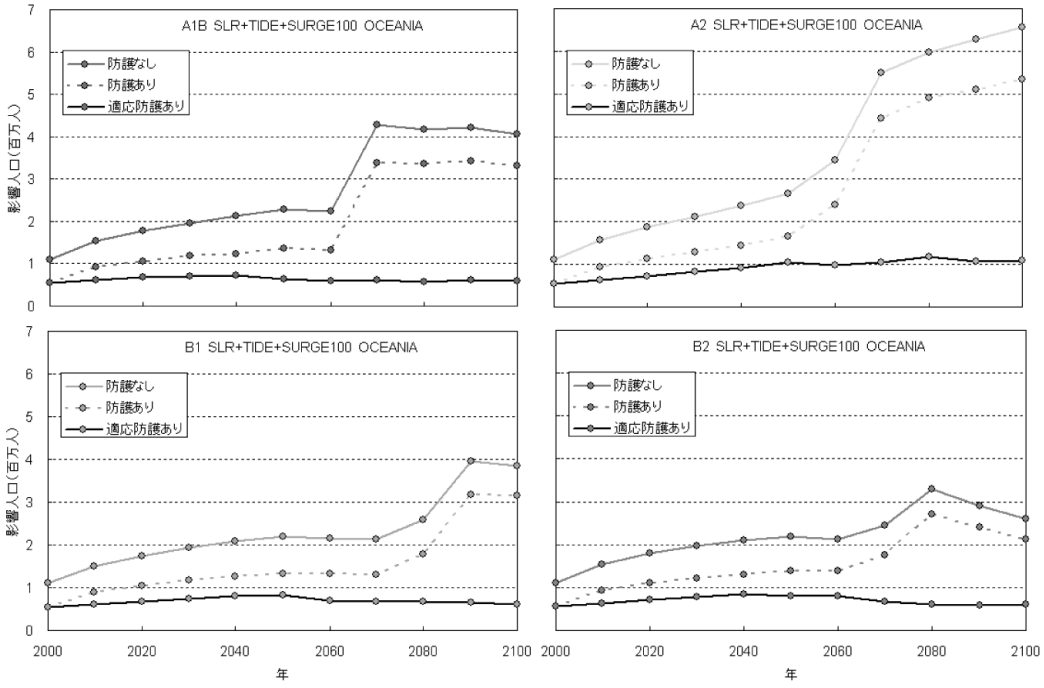


図 9　オセアニアの影響人口

２）被害コスト

図 10 に、A1B シナリオにおける防護ありと適応防護ありの場合の、全球被害額の推定結果を示す。被害額はシナリオ間で差があり、将来的に最も大きくなるシナリオが A1B である。海面上昇の進行の上に、再現期間 100 年の高潮が世界で同時に発生したとすると、2100 年で A1B では年間 2.1 兆 US$（GDP 比 0.40%）、A2 では年間 1.6 兆 US$（GDP 比 0.65%）、B1 では年間 1.1 兆 US$（GDP 比 0.31%）、B2 では年間 1.2 兆 US$(GDP 比 0.48%)となった。これに対し、適応防護の結果は、A1B では年間 0.8 兆 US$（GDP 比 0.19%）、A2 では年間 1 兆 US$（GDP 比 0.47%）、B1 では年間 0.6 兆 US$（GDP 比 0.17%）、B2 では年間 0.8 兆 US$（GDP 比 0.34%）となり、海面上昇を考慮した防護基準を設けることで被害額を抑えることが可能になる。

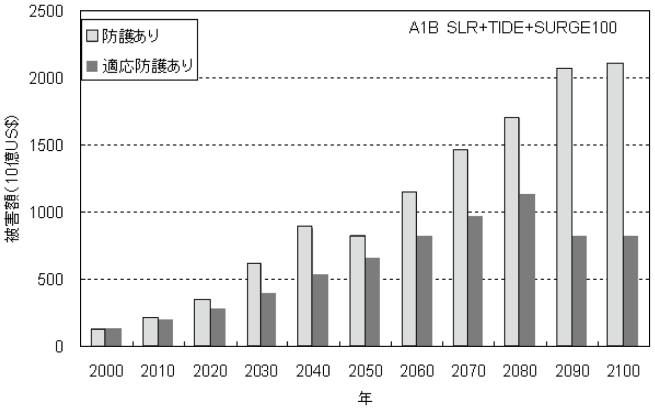


図 10　A1B シナリオにおける被害額

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

１）全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測

今回解析した全ての流域で将来的に総氾濫水量、浸水面積が増加した。特に荒川と筑後川では、現在と将来の総氾濫水量比や浸水面積比が極端に大きくなった。また、遊水地設置により、ほぼ全ての流域で浸水面積が減少した。特に荒川、吉野川において遊水地の効果が高かった。しかし信濃川、淀川のような地盤高の低い地域は、浸水面積があまり低減されないことが分かった。一方、気候変動に伴う河川氾濫の推計においては、直接的な経済損失とおよび間接的な経済損失を示したが、直接的な影響のみならず、産業部門間や地域間の波及効果を分析したことに意義がある。

２）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測

従来の沿岸影響の予測は、現在の人口を仮定し、また護岸対策を無視した「潜在的影響」の予測がほとんどであった。それに対して、本研究では、将来の国別の経済成長と人口成長を想定し、その組み合わせによって防護レベルが異なるという防護シナリオを導入して沿岸影響予測を行ったことが最大の科学的意義である。さらに、将来発展の経路を IPCC SRES シナリオに従って仮定し、それらの比較も行った。また、浸水被害額は、大局的には浸水影響人口と国毎の一人当たり GDP の積に比例すると仮定して、被害額の予測方法を開発した。これらの結果、気候変動の進展と経済成長や人口成長、さらに適応策の導入を総合的に考慮して、沿岸影響を予測・評価することが可能となった。

（２）地球環境政策への貢献

１）全国代表的河川流域を対象とした洪水氾濫浸水予測

気候変動に伴う豪雨の増加が予測されている中で、洪水氾濫対策は非常に重要である。堤防の整備もさることながら、流域における土地利用形態の変更などを行い、氾濫水を一時的に貯留できるバッファを設けることでかなりの程度氾濫域・水量を減少させることができる。これは、堤防による防御、ハザードマップや迅速な避難支援と並んで、有効な適応策となり得る。また、気候変動に伴う河川氾濫の経済被害は、単位面積当たりの直接被害、間接被害の相対的な大きさや及ぶ範囲が河川流域単位で異なることが明らかとなった。したがって、河川氾濫に対する適応策を実施する際には、河川ごとにきめ細かく検討することの必要性が示唆される。

２）アジア・太平洋を対象とした高潮氾濫浸水予測

IPCC SRES シナリオに基づく影響を示し､将来の経済成長や人口成長にそった影響予測を示した。また、適応策の導入によってどの程度影響が削減できるかも示した。世界的な被害額では、再現期間 100 年の高潮が世界で同時に発生したとすると、2100 年で年間 2.1 兆 US$（GDP 比 0.40%）～1.2 兆 US$（GDP 比 0.48%）に及ぶことを示した。これに対して、適応防護を行うと、年間 0.8 兆 US$（GDP 比 0.19%）～0.6 兆 US$（GDP 比 0.17%）に被害額を抑えることができる。本研究は、世界規模の影響を定量的に評価したもので、国際交渉や政策決定に対して有用な情報を与えると考えられる。

６．引用文献

1) 丸山陽佑：茨城大学大学院修士論文（2010)「気候変動と経済成長を考慮した沿岸域の地球規模脆弱性評価」
2) 宮崎博史：茨城大学工学部卒業論文（2010)「全国主要河川下流域における氾濫リスクの将来変化と遊水地による低減効果の数値計算」
3) 北山貴大：茨城大学卒業論文（2009)「遊水地による河川洪水・氾濫リスクの低減効果－気候変動を考慮した那珂川・久慈川流域における解析－」
4) 日本河川協会：山海堂（2005)
「国土交通省河川砂防技術基準」
5) 中川一：水工学における計算機利用の講習会講義集、43-50（1999)「氾濫流の解析」
6) 塙尚幸：茨城大学修士論文　(2009)「気候変動を考慮した全国主要河川下流域における洪水氾濫リスクの将来予測」
7) 片田敏孝、森杉壽芳、宮城俊彦、石川良文：土木学会論文集、488/IV-23, 87-92 (1994)「地域内産業連関表分析における「はね返り需要」の計測方法」
8) 桑原祐史、郡司美佳、横木裕宗、三村信男、小柳武和：地球環境研究論文集、16, 79-86 (2008)「大規模河川下流域を対象とした海面上昇による氾濫リスク推定のための基礎的分析」
9) Nicholls R. J., Tol R.S.J. : Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 364 (1841), 1073-1095 (2006) “Impacts and responses to sea-level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century”
10) IPCC : Cambridge University Press, London (2007) “Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC”
11) C. Tiebout : Review of Economics and Statistics, 51(3), 334-340 (1969) “An Empirical Regional Input-Output Projection Model: The State of Washington 1980”

12)R. Miller, and P. Blair：Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1985)“Input-output Analysis: Foundation and Extensions”

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) 桑原祐史、郡司美佳、横木裕宗、三村信男、小柳武和：地球環境研究論文集、16, 79-86 (2008)「大規模河川下流域を対象とした海面上昇による氾濫リスク推定のための基礎的分析」
2) 横木裕宗、戸村達也、塙尚幸、桑原祐史、三村信男：地球環境研究論文集、16, 87-93 (2008)「気候変動に伴う洪水・氾濫リスクの将来予測　－那珂川・久慈川流域における解析－」
3) 塙尚幸、横木裕宗、桑原祐史、三村信男：地球環境研究論文集、17, 85-91 (2009)「気候変動を考慮した全国主要河川下流域における洪水氾濫リスクの将来予測」
4) 横木裕宗、桑原祐史、塙尚幸、郡司美佳、戸村達也、平山歩、三村信男：地球環境、14(2), 237-246 (2009)「気候変動に伴う我が国の大規模河川下流域の浸水氾濫リスクの将来予測」
5) 信岡尚道、三村信男：海岸工学論文集、56, 371-375 (2009)「熱帯低気圧による全球の高潮と沿岸脆弱性の推定」
6) 信岡尚道、三村信男、田村誠：地球環境研究論文集、17, 123-132 (2009)「21世紀におけるアジア・オセアニア沿岸の基礎的脆弱性の推定」
7) H. Nobuoka, N. Mimura, and M. Tamura：5th International Conference on Asian and Pacific Coast, 2, 194-200 (2009)“Asian and Oceanian Coastal-Risk Projection due to Sea-Level Rise and Population Growth”
8) 安原一哉、小峯秀雄、村上哲、陳光斉、三谷泰浩、田村誠：地球環境、14(2), 247-256 (2009)「温暖化による気候変動が地盤災害に及ぼす影響」

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

（２）口頭発表（学会）

1) R. Hasegawa, M. Tamura, Y. Kuwahara, H. Yokoki, and N. Mimura：17th International Input-output Conference, Sao Paulo, Brazil (2009)
“An Input-output Analysis for Economic Losses of Flood Caused by Global Warming: A Case Study of Japan at the River Basin Level”
2) 長谷川良二、田村誠、桑原祐史、横木裕宗、三村信男：環境経済・政策学会2009年大会、千葉大学 (2009)「日本の河川下流域における地球温暖化に伴う浸水被害の経済評価」

〈シンポジウム等〉

1) M. Tamura：2nd Vietnam-Japan Symposium on Climate Change and the Sustainability, Hanoi, Vietnam (2008)“Socio-economic Conditions and Capacity of Adaptation toward the Climate Change”
2) R. Hasegawa, M. Tamura, Y. Kuwahara, H. Yokoki, and N. Mimura：Sustainability Transition：International Research Initiatives towards Resource-circulating Societies, Osaka University (2009)“An Economic Analysis of Floods Caused by Global Warming: A Case Study of Japanese River Basin”
3) M. Tamura：Informal Meeting: Level of Long-Term Stabilization of Global Warming and Climate Change Risks, Tokyo (2009)“Coastal Hazards Induced by Climate Change: An Assessment of Impacts, Risks, and Adaptation Strategies”

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

Ｓ－４　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－５.沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究
（３）温暖化に起因する海面上昇による沿岸域地盤変状予測と適応策

茨城大学
工学部　都市システム工学科　　小峯秀雄・安原一哉

〈研究協力機関〉　茨城大学工学部都市システム工学科　村上哲

平成17～21年度合計予算　　35,675千円
（うち、平成21年度予算額　 6,249千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］本研究では、(1)河川において、地球温暖化に伴い発生が予想される汽水域の拡大と(2)地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加に対して、河川堤防やその周辺の高水敷・河岸に内在する脆弱性を実験的に調査し、日本全国レベルで脆弱性マップを提示するとともに、それに基づく適応策の提案を行うことを目的とした。日本全国から河川堤防や高水敷・河岸の構成材料を想定し、各地域の代表的な土質材料を選定し、日本各地から河川堤防や高水敷・河岸を想定し選定した数種類の土質試料に対し、陸水／海水環境下における液性限界・塑性限界試験や定ひずみ速度圧密試験、土の保水性実験、不飽和三軸圧縮実験、新たに開発した侵食実験の観点から河川堤防や高水敷・河岸に対する保水性、沈下特性、侵食特性に関する脆弱性評価と適応策マップを提示した。

［キーワード］地球温暖化、異常気象、河川堤防、保水性、侵食性

１．はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第 4 次報告書第 1 部作業部会報告書において、21 世紀末には気温が最大 6.4℃上昇すると報告されている [1)]。その上昇速度は過去 1000 年間において最も著しい。また上記の気温上昇に伴う海面の上昇は世界平均で今後 100 年間に、59 cm と予測されている [1)~3)]。このような海面上昇が生じると海水が河川を遡上することが予想され、図 1 に示すように河川下流域に位置していた汽水域が上流側に拡大し、重要な社会基盤施設の一つである河川堤防や高水敷・河岸に影響を及ぼすことが考えられる。

また、地球温暖化に伴い異常降雨、異常少雨の地域が顕著に分かれ、大雨の発生する頻度が増加する可能性が高いとの評価が示されている [2)]。実際、日本において集中豪雨の発生件数は増加しており（図 2 参照）、2000 年の東海豪雨、2004 年の福井豪雨などに見られるように、集中豪雨により大きな被害が生じた。特に、2000 年の東海豪雨では、河川堤防の決壊により人口の集中している低平地に被害が集中した [4)]。集中豪雨の発生件数の増加が予想される現在、河川堤防や高水

敷・河岸にどのような脆弱性があるかを検討し、それに対応した適応策を考えることが必要とされている。

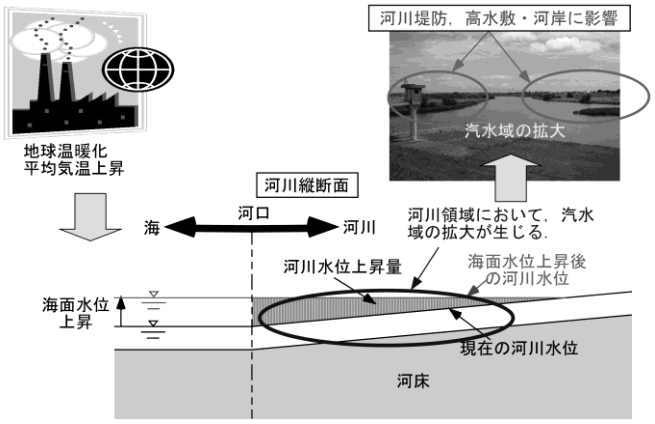


図１　地球温暖化／海面上昇による河川における汽水域の拡大と河川堤防や高水敷･河岸への影響

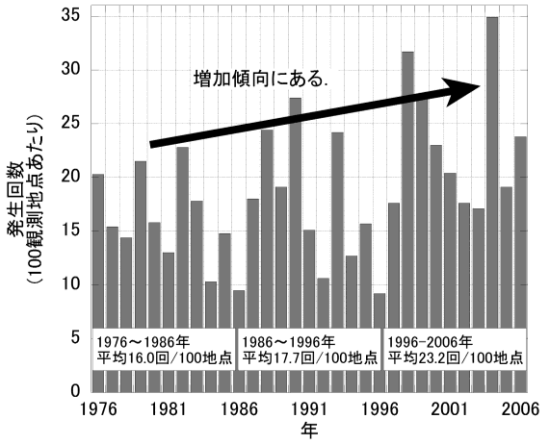


図２　時間雨量 50mm/h 以上の発生回数

２．研究目的

本研究では、(1)地球温暖化に伴い発生が予想される汽水域の拡大と(2)地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加に対して、河川堤防やその周辺の高水敷・河岸に内在する脆弱性を実験的に調査し、日本全国レベルで脆弱性マップを提示するとともに、それに基づく適応策の提案を行うことを目的とする。

３．研究方法

日本全国から河川堤防や高水敷・河岸の構成材料を想定し、各地域の代表的な土質材料を選定し、後述の室内実験に供した。図 3 は本研究で使用した土質材料の採取地域を示したものである。研究目的の(1)および(2)に対してそれぞれ、以下の方法により研究を実施した。

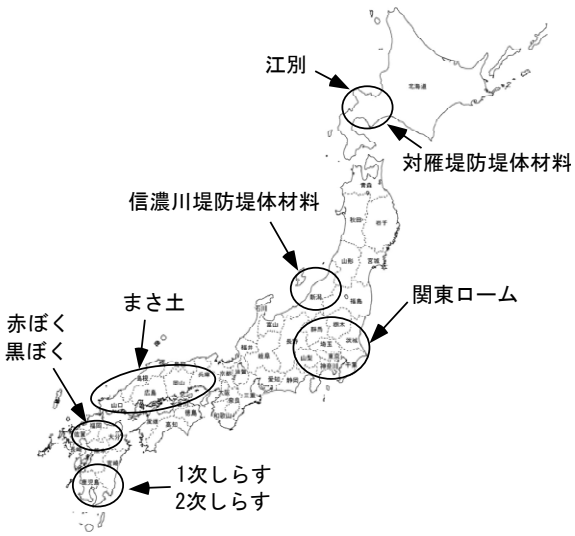


図3　本研究で使用した土質材料の採取地域

（１）地球温暖化に伴い発生が予想される汽水域の拡大による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策提案

陸水を想定した蒸留水および海水を想定した人工海水を用いて実施した「液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205:1999）」[4)]（図 4 参照）と、同様に蒸留水と人工海水環境下において一次元圧密特性を調査する「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法（JIS A 1227:2000）」[4)]（図 5 参照）により、図 3 に採取地域を示した各土質材料の保水能力を簡易評価するとともに、各土質材料の圧縮性と圧密係数を算出し沈下特性や透水係数の推定を行い、それらに基づき河川堤防堤体や高水敷・河岸の変状予測を行った。



図 4　液性限界・塑性限界試験の様子

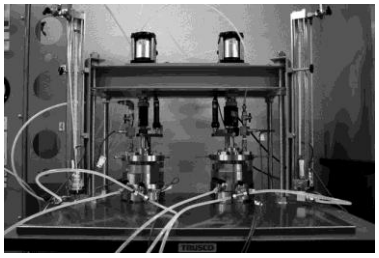


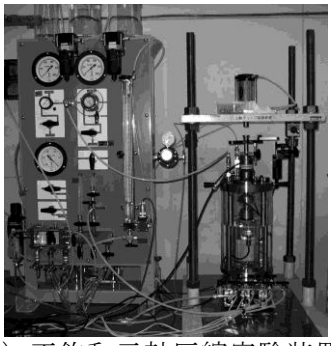
図 5　SUS316L 製定ひずみ速度圧密試験装置

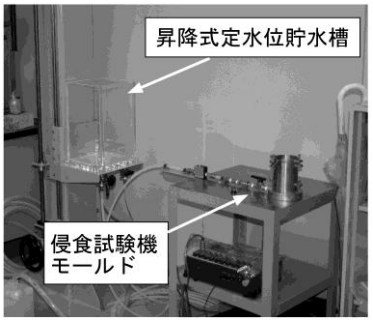
（２）地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策提案

降雨による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性を評価する上では、これらを構成する土質材料の降雨浸透や河川水流速に対する耐性を評価する必要がある。本研究では、これらの土質材料の保水性、浸水に伴う沈下・変形特性および侵食特性の観点から脆弱性の評価を行った。

以上の調査で使用した実験装置は、図 6 に示す 3 種類の装置である。







a)新たに開発した侵食実験装置　b）不飽和三軸圧縮実験装置　c）一次元保水性実験装置

図 6　降雨による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価のための実験装置群

４．結果・考察

（１）地球温暖化に伴い発生が予想される汽水域の拡大による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策提案の結果・考察

日本各地より河川堤防や高水敷・河岸の構成材料と想定される土質材料を選定し、海面上昇に伴う河川汽水域の拡大を想定した液性限界・塑性限界試験および定ひずみ速度圧密試験を実施し、これらの結果から、各土質材料の液性限界・塑性限界、圧縮指数、体積圧縮係数、圧密係数および透水係数について、蒸留水および人工海水のそれぞれの環境での各値を測定し、汽水域の拡大により堤防堤体内や高水敷・河岸内に海水成分が侵入した場合に生じる可能性のある事象を、各地域ごとに推察した。また、これらの結果を総括し、河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップを提案した（図 7 参照）。

（２）地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策提案の結果・考察

日本各地より河川堤防や高水敷・河岸の構成材料と想定される土質材料を選定し、地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加を想定して、一次元保水性実験、不飽和三軸圧縮実験および侵食実験を実施した。図 8 は、一次元保水性実験結果に基づく降雨浸透による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップを示す。また、集中豪雨の頻度増加を想定して、繰り返し一次元保水性実験および不飽和三軸圧縮試験を実施し、その結果に基づく、降雨浸透が繰り返し頻発することによる河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップを図 9 に示す。

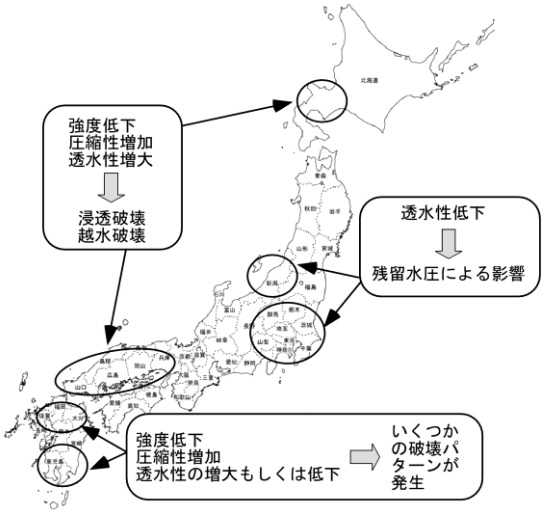


図 7　河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップ

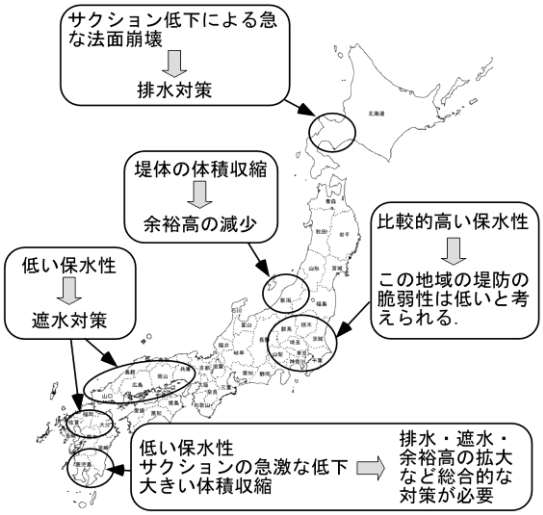


図 8　一次元保水性実験結果に基づく降雨浸透による河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップ



図 9　繰り返し一次元保水性実験および不飽和三軸圧縮試験の結果に基づく、降雨浸透が繰り返し頻発することによる河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップ

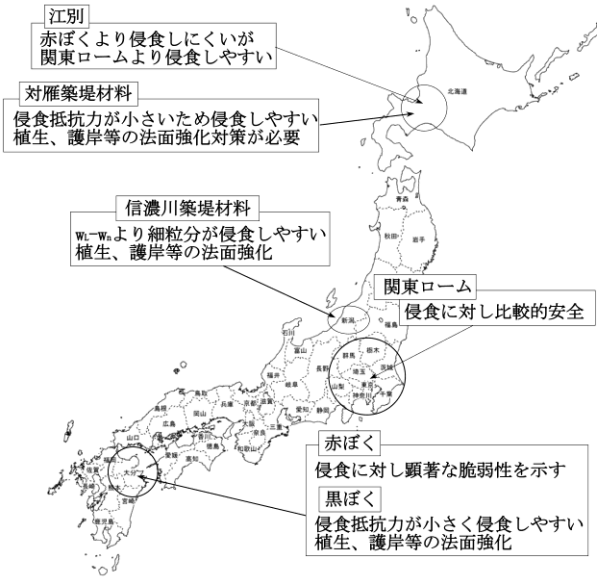


図 10　土質材料の侵食メカニズムに基づく河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップ

さらに、図 6 に示す新たに開発した侵食実験と侵食メカニズムに基づき求めた河川堤防や高水敷・河岸の脆弱性評価と適応策マップを図 10 に示した。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

日本各地から河川堤防や高水敷・河岸を想定し選定した数種類の土質試料に対し、陸水／海水環境下における液性限界・塑性限界試験や定ひずみ速度圧密試験、土の保水性実験、不飽和三軸圧縮実験、新たに開発した侵食実験を行い、その結果に基づいて河川堤防や高水敷・河岸に対する保水性、沈下特性、侵食特性に関する脆弱性評価と適応策マップを提示した。この種の研究は地盤工学分野において過去に例はなく、貴重な研究成果と言える。これらの成果は、河川堤防や高水敷・河岸に関する工学的政策において大きく寄与できるものと考えられる。なお、これらの研究成果は、地盤工学ジャーナルや地盤工学会誌、地球環境や Journal of Global Environmental Engineering において、審査付き学術論文として公表しているとともに、土木学会や地盤工学会の年次学術講演会において数多くの口頭発表を積極的に実施して、成果の広報・普及に鋭意努めた。

（２）地球環境政策への貢献

本研究の成果は、河川堤防や高水敷・河岸を想定し、(1)地球温暖化に伴い発生が予想される河川の汽水域拡大と(2)地球温暖化に伴う集中豪雨の発生頻度の増加に対して、河川堤防やその周辺の高水敷・河岸に内在する脆弱性を実験的に調査し、日本全国レベルで脆弱性マップを提示するとともに、それに基づく適応策の提案を行った。これらの研究成果は、地球温暖化が及ぼす社会基盤への影響を定量的に評価したものであり、低炭素社会のための社会基盤整備として、河川堤防や高水敷・河岸の補強・対策を実施する際の優先順位を日本全国レベルで提示したものであることから、地球環境政策へ直接貢献できるものと期待される。なお、前述の通り、審査付き学術論文として、地盤工学ジャーナルや地盤工学会誌、地球環境や Journal of Global Environmental Engineering において成果報告した。また、関連学会において、研究成果の公表も予定されている（後述、８．研究成果の発表状況（２）口頭発表（学会）参照）。

６．引用文献

1) IPCC：(2007)
“Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers”
2) 気象庁：気候変動監視レポート (2006)
http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/index.html (2006/11/7現在)
3) 三木博史：平成17年度土木研究所講演会講演集、65-82 (2005)
「最近の水害の特徴と河川堤防の質的整備の課題」
4) 地盤工学会：(2000)
「土質試験の方法と解説―第一回改訂版―」

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) H. Komine：Proceedings of Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (VJ-MACIND07) (2007)
“Changes of fundamental properties of riverbank material by sea-level rising due to Global Warming”
2) H. Komine：Proceedings of the 2nd Malaysia-Japan Symposium on Geohazard and Geoenvironmental Engineering (2007)
“Vulnerability of riverbank materials by sea-level rising due to Global Warming in Japan”
3) Y. Uchida, H. Komine, K. Yasuhara, and S. Murakami：Proceedings of Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (VJ-MACIND07)(2007)
“Soil water characteristic curve and one-dimensional deformation of riverbank soils in Japan”
4) H. Komine：Proceedings of 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (2008)
“Adaptations and countermeasures for mitigating impacts due to global warming in geotechnical and geoenvironmental engineering”
5) T. Munegumi, H. Komine, K. Yasuhara, and S. Murakami：Proceedings of 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters (2008)
“Vulnerability evaluation of soil material simulated river bank material in torrential rainfall”
6) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲：地盤工学ジャーナル、4(2), 185-195 (2009)
「温暖化に起因する海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸の土質材料に及ぼす影響の簡易評価」
7) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲、内田佳子：地盤工学会誌、57(4), 22-25 (2009)
「各種土質材料の水分特性曲線に着目した集中豪雨による河川堤防や河岸の脆弱性簡易評価」
8) 安原一哉、小峯秀雄、村上哲、陳光斉、三谷泰浩、田村誠：地球環境、14(2), 247-256 (2009)
「温暖化による気候変動が地盤災害に及ぼす影響」
9) K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani：Journal of Global Environmental Engineering, 15, 15-23 (2010)
“Effect of climate change on geo-disasters in coastal zone”

（２）口頭発表（学会）

1) 篠田光貴、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：Geo-Kanto2005（地盤工学会関東支部研究発表会）(2005)
「異常気象・地球温暖化に起因する河川堤防変状および沿岸域地盤変状予測と適応策」
2) 工藤竜太、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：第3回地盤工学会関東支部研究発表会 (2006)
「塑性指数の観点からの堤防提体材料の豪雨時脆弱性の簡易評価」
3) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲、篠田光貴：土木学会第34回関東支部技術研究発表会 (2007)
「液性限界・塑性限界の観点からの温暖化／海面上昇による河川堤防堤体材料に及ぼす影響の簡易評価」
4) 内田佳子、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、工藤竜太：第34回地盤工学研究発表会 (2007)
「河川堤防を想定した堤体地盤材料の排水過程における一次元変形特性」
5) 内田佳子、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、工藤竜太：第61回土木学会年次学術講演会 (2007)
「河川堤防築堤材を想定した様々な地盤材料の水分特性曲線の比較」

6) 胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、内田佳子：Geo-Kanto2007（第4回地盤工学会関東支部研究発表会）(2007)
「土の保水性試験による集中豪雨時の河川堤防の脆弱性評価」
7) 胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、内田佳子：土木学会第35回関東支部技術研究発表会（2008）
「河川堤防材料を用いた保水性試験による集中豪雨時の体積変形評価」
8) 胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、内田佳子：第43回地盤工学研究発表会（2008）
「河川堤防堤体材料としての関東ローム・しらすの水分特性曲線および一次元変形特性の比較」
9) 胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：第63回土木学会年次学術講演会（2008）
「河川堤防堤体材料としての火山灰質粘性土の水分特性曲線および一次元変形特性の比較」
10)谷口雄太、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、胸組智光：Geo-Kanto2008（第5回地盤工学会関東支部研究発表会）(2008)
「土粒子の密度，土の粒度，自然含水比，液性限界による河川堤防提体材料の侵食特性の推察」
11)胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：第44回地盤工学研究発表会（2009）
「河川堤防堤体材料と想定した一次しらすにおける保水性試験の吸水過程と排水過程による違い」
12)谷口雄太、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、胸組智光：第44回地盤工学研究発表会（2009）
「河川堤防堤体材料における侵食現象の簡易評価法と脆弱性評価」
13)胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：土木学会第64回年次学術講演会（2009）
「吸水および排水過程での保水性試験に基づく各地域における河川堤防堤体材料の脆弱性の比較」
14)谷口雄太、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：土木学会第64回年次学術講演会（2009）
「新たな侵食試験の開発と河川堤防堤体材料を想定した土質材料の侵食メカニズムに関する一考察」
15)小峯秀雄、安原一哉、村上哲：第45回地盤工学研究発表会（2010）
「一次元圧密特性の観点からの地球温暖化／海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料に及ぼす影響の簡易評価」
16)胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：第45回地盤工学研究発表会（2010）
「河川堤防への降雨浸水、排水の繰返しを想定した保水性試験による水分特性曲線および一次元変形特性」
17)胸組智光、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：土木学会第65回年次学術講演会（2010）
「不飽和三軸試験装置を用いた保水性試験による関東ロームの水分特性曲線および三次元変形特性」
18)谷口雄太、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：土木学会第65回年次学術講演会（2010）
「土の粒度特性に着目した河川汽水域拡大を想定した堤防堤体材料の侵食性評価」

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

Ｓ－４　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－５.沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究
（４）異常気象を含む気候変動と巨大地震による複合的地盤災害評価と適応策（茨城大学）

茨城大学
工学部　都市システム工学科　　安原一哉
工学部　情報工学科　　外岡秀行

〈研究協力機関〉　茨城大学工学部都市システム工学科　　村上哲

平成17～21年度合計予算額　46,507千円
（うち、平成21年度予算額　11,636千円）
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］地球温暖化は様々な影響を及ぼすことが懸念されている。生活圏においては沿岸域の社会基盤施設が最も温暖化に敏感に影響を受ける。とりわけ、ここでは、これらのうち、海面上昇と気候変動の影響によって引き起こされる地下水位の上昇をうけた後に併せて地震に襲われた沿岸域の基礎構造物と基礎地盤の液状化とそれによってもたらされる被害とその経済的損失評価法の妥当性に焦点を当てて検討を行った。その結果、従来の算定法による経済的損失は過少評価になることが判明したので、その算定方法の改良を行い新しい算定方法を提案した。次いで、新しい算定方法による経済的損失を算出し、複合的災害に対する気候変動の影響と経済的損失について明らかにした。加えて、これらの災害に対する適応策のメニューを提示した。

［キーワード］地下水位上昇、複合災害、液状化、経済評価、適応策

１．はじめに

近年、気象災害の多発化傾向が顕著になっている。わが国では台風の来襲時期の早期化・長期化、上陸数増加、集中豪雨と河川の氾濫など観測史上最高といった極端現象が発生している。世界的にも、大きな災害が頻発しており、温暖化による気象災害の激化に関する懸念が高まっている。また、極端現象と温暖化との因果関係の科学的確信度は未だ低いものの、最新の気候モデルによって今世紀中に台風の巨大化などが起こりうるという予測が示されている。さらに、日本は地震多発国であり、気候変動との複合作用によって斜面崩壊や土石流、河川堤防の損壊、沿岸地盤の液状化などが拡大する可能性が大きく、新潟県中越地震では現実にそうした事態が発生した。わが国における影響評価を現実的にするためには、従来ほとんど研究のない複合的災害の影響予測が不可欠である。こうした背景と問題意識に基づいて、防災・国土保全分野における影響を対象とする研究の高度化と適応策の提案を試みた。

２．研究目的

H17 年度は、海面上昇に伴う地下水位上昇に伴う沿岸域の基礎構造物の地震時脆弱性評価を行った。まず、海面上昇に伴う地下水位の上昇量予測とその広域影響評価手法を開発し、横浜・川崎の東京湾沿岸域への適用を行った。この結果を踏まえ、H18 年度は、海面上昇の影響だけでなく、降雨の影響を考慮できる手法へと高度化を図り、異常気象を含む気候変動と巨大地震による複合的地盤災害評価に資する解析手法の開発とその適用を実施した。さらに H19 年度は、液状化危険度に対する気候変動の影響評価を行そのために必要な地盤情報 DB を利用した広域地盤モデルの作成手法を開発した。ここで構築した地盤モデル作成手法を用いることによって、電子化された地盤情報（北海道地盤情報 DB）を利用して北海道石狩平野における液状化危険度に対する気候変動の影響評価を行った。H20 年度は、上記の手法を東京都東部沿岸域に適用するとともに、気候変動による地下水位上昇と地震による地盤の液状化による経済被害増加の算定を試み、その有効性と問題点を把握した。最後に H21 年度では、液状化による経済被害の算出方法を改善し、気候変動による地下水位上昇と地震による地盤の液状化による経済被害増加の算定を行い、気候変動と地震による複合災害がもたらす経済被害について明らかにした。

３．研究方法

H17 年度は、海面上昇に伴う地下水位上昇に対する沿岸域の基礎構造物の地震時脆弱性を評価した：海面上昇に伴う地下水位の上昇量予測とその広域影響評価手法を開発し、横浜・川崎の東京湾沿岸域への適用を行った。具体的には、1）独自に開発した手法により、二次元定常浸透流れの数値解析を行って海面上昇に伴う地下水位の上昇量を評価し、また 2）液状化の危険度に着目した広域影響を評価した。

H18 年度は、海面上昇の影響だけでなく、降雨の影響を考慮できる手法へと高度化を図り、異常気象を含む気候変動と巨大地震による複合的地盤災害評価に資する解析手法の開発とその適用を行った。具体的には、まず 1)気候変動を考慮できる広域地下水流動解析手法を提案した。この手法は、降雨による地盤への浸透を考慮した非定常解析手法へ高度化されたものである。また 2）気候変動シナリオに基づく地下水位変動の予測結果を用い、H17 年度と同様な液状化危険度の評価手法を適用して、東京湾沿岸域地盤の脆弱性を評価した。特に、海面上昇、降雨および、それらが複合的に作用する場合の危険度の評価結果を比較することによって、気候変動シナリオの影響について明らかにした。

研究担当者らは、液状化危険度に対する気候変動の影響評価を行なうために必要な地盤情報 DB を利用した広域地盤モデルの作成手法を提案した。さらに、地盤情報データベースを利用し、粒度分布に着目した地盤構造推定手法を提案した。これらの手法を用いることで、気候変動に起因する液状化危険度の変化をシステマティックに推定できる手法へ拡張した。平成 19 年度は、特に、上記の手法を北海道石狩平野へ適用し、その有効性を確かめた。

H20 年度は、H19 年度に確立した手法を東京都東部の低地に適用するとともに、地震による液状化に伴う経済被害算出方法を提案し、事例計算を行ってその方法の妥当性を検証した。具体的には、地下水位の上昇に影響を与えると考えられる要因として、（i）海面上昇と（ii）集中豪雨の 2 つを取り上げ、まず、それぞれが地震時の液状化にどのような影響を与えるかを計算し、地理情報システムを使って結果を電子地図化した。ついで、これら、2 つの要因が同時に起きた場合につ

いても同じ方法によって表示した。

H21 年度は、H20 年度に提案した経済被害額算出方法の妥当性を検討し、新たな経済被害額算出手法と、経済損失に着目した液状化対策対象領域の特定および対策選定手法を構築した。そのために、まず、液状化による経済被害算出方法の検証と高度化を行った。H20 年度に構築した液状化による経済被害算定法について、1995 年兵庫県南部地震による神戸市における経済被害と比較することによって、その適用性と問題点を把握した。次に、従来の算定方法の問題点を解決するために、1995 年兵庫県南部地震における経済被害事例を表現できるようにパラメータを再設定することで、新しい液状化による経済被害算出方法を提案する。そして、東京都東部沿岸、川崎・横浜沿岸域における気候変動に起因する液状化による経済被害額についての H20 年度の見積もりを、新しい方法により算定しなおした。以上を総合して、沿岸域平野部における、気候変動に起因した地下水位上昇による地盤の不安定化の広域評価フローの確立、さらに、地震力が付与する広域地盤地震災害の評価フローの確立を行うと共に、これらを代表的な日本沿岸域の平野部に適用し、複合的地盤災害に対する影響指標値を定量的に算出した。また、これらの計算結果に基づいて、地下水位上昇に起因する地盤災害を低減させるための適応策メニューを構築した。

４．結果・考察

H17 年度では、まず、（1）海面上昇に伴う地下水位の上昇量予測とその広域影響評価手法を開発し、横浜・川崎の東京湾沿岸域を事例として GIS 表示した（図 1）。（2）地下水位上昇に伴う沿岸域の基礎地盤の地震時脆弱性評価：地下水位上昇量の計算結果に基づいて対象地域の地震時液状化危険度の算出を行い、海面上昇前後の比較を行った（図 2）。その結果、海岸線に近いほど、また、内陸では河川沿岸に近いほど液状化しやすいこと、海面上昇量が増加するに従って、液状化危険度の高い地域が拡大することが分かった。特に、海岸と河川沿岸付近では顕著な増加を示し、多摩川と鶴見川に挟まれた地域（低平地）における液状化の危険性が高いことが分かった。以上より、全国展開を図る際に、海面上昇に伴う沿岸域地盤の地震時脆弱性評価には、海岸部のみならず河川沿岸域も考慮すべき重要性を指摘した。

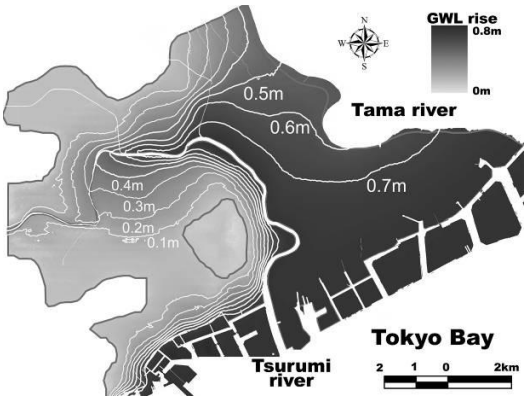
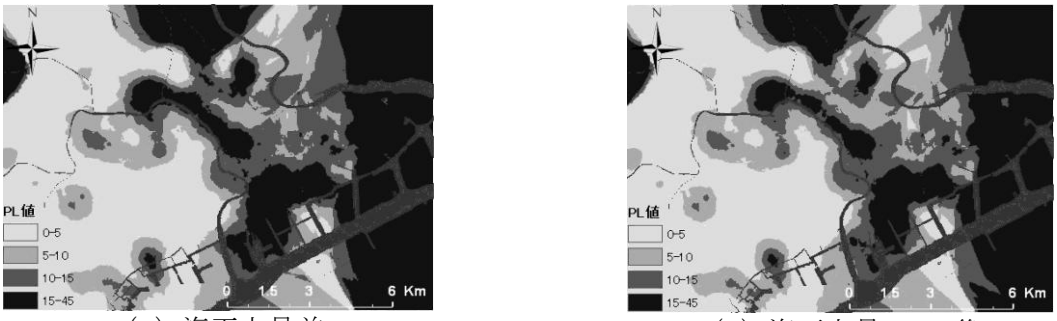


図 1　海面上昇（SLR＝0.8m）による地下水位上昇の事例（川崎市）



（a）海面上昇前　　（b）海面上昇 0.8m 後

図 2　海面上昇前後の液状化ハザードの比較

H18 年度では、気候変動を考慮できる広域地下水流動解析手法の提案し、気候変動シナリオに基づく東京湾沿岸域地盤の脆弱性評価を行った。得られた結果と考察は以下のとおりである。

図 3 は 2100 年で海面上昇量 0.88m の定常と非定常での解析結果を地下水位上昇量で示している。対象地域では、ほぼ変化がない。これは、1 日の海面上昇量が小さいため、定常状態になりやすいこと、対象地域は透水性が良いためであると考えられる。図 4、図 5 は 1990 年の地下水位を基準とし、各シナリオにおける 2100 年の地下水位から 1990 年の地下水位を引き、その差を地下水位上昇量として表した。図 3 より、海面上昇シナリオにおける地下水位上昇量は、海面上昇の影響を受け、沿岸域で大きく、内陸部では小さい。さらに、河川で潮汐の影響を受ける場所では地下水位上昇量が大きい。図 4 の降雨シナリオでは、降雨量を全領域に与えているため、内陸部の地下水位上昇量が大きい。しかし、沿岸域では地下水位上昇量が小さい。さらに、地域的に地下水位上昇している。これは、その場所の透水係数に依存するためと考えられる。図 5 で示した降雨と海面上昇シナリオにおける地下水位上昇量は、海面上昇により、沿岸域で大きく、さらに、内陸部では降雨の影響を受けて上昇していることが分かる。

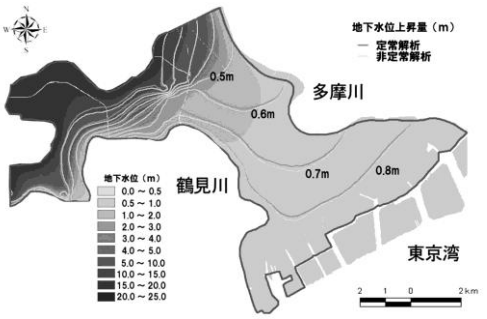


図 3　海面上昇シナリオによる地下水位上昇量

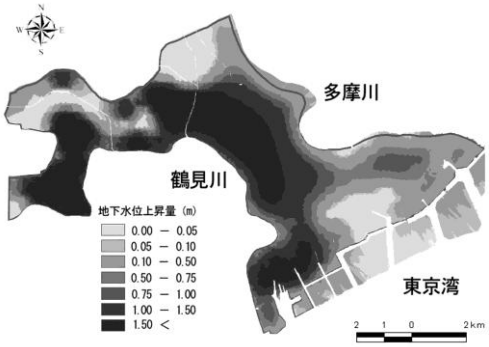


図 4　降雨シナリオによる地下水位上昇量

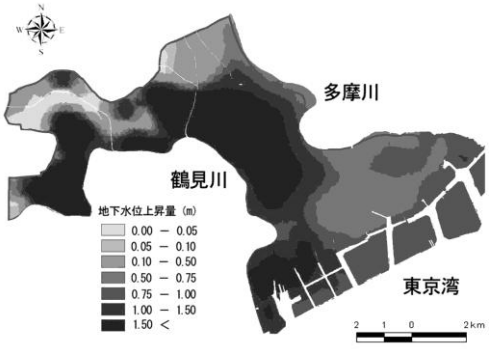


図 5　降雨＋海面上昇シナリオによる地下水位上昇量

各シナリオにおける地下水位の解析結果を用いて液状化危険度評価を行い、液状化ハザードマップを作成した。図 6 は現状（1990 年）での液状化ハザードマップである。対象地域の沿岸域は液状化危険度が高いことがわかる。しかし、上流側では液状化危険度が小さい。図 7 より、海面上昇シナリオでは、沿岸域の地下水位の上昇量が大きいため、沿岸域の液状化危険度が増大している。さらに、潮汐の影響を受ける河川沿岸域でも液状化危険度が増大している。

図 8 の降雨シナリオでは、内陸部の地下水位が上昇しているため、内陸部で、液状化危険度が増大している。しかし、地下水位上昇量に比べて液状化危険度が小さい要因は、降雨量は透水係数が低い場所で地下水位が高くなるが、透水係数が低い場所では粘性土が主体となるため、液状化しにくい地盤であるためであると考える。図 9 は降雨と海面上昇シナリオにおける地下水位を

用いているため、沿岸域、内陸部ともに、液状化危険度が増大している。

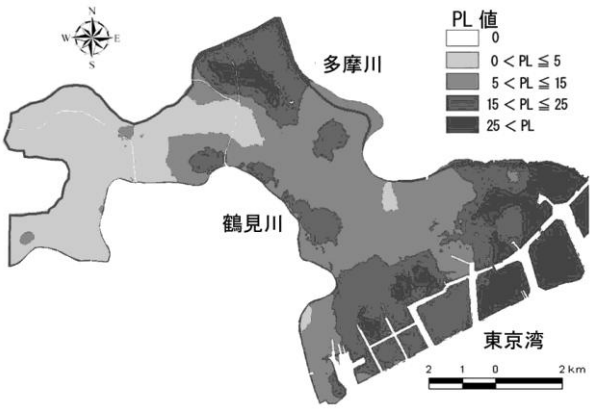


図 6　1990 年液状化ハザードマップ

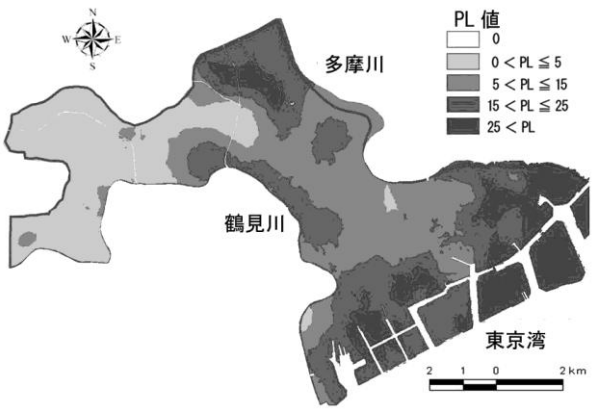


図 7　海面上昇シナリオにおける 2100 年液状化ハザードマップ

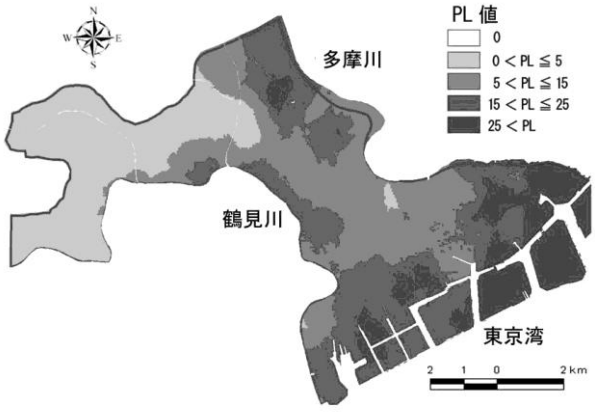


図 8　降雨シナリオにおける 2100 年液状化ハザードマップ

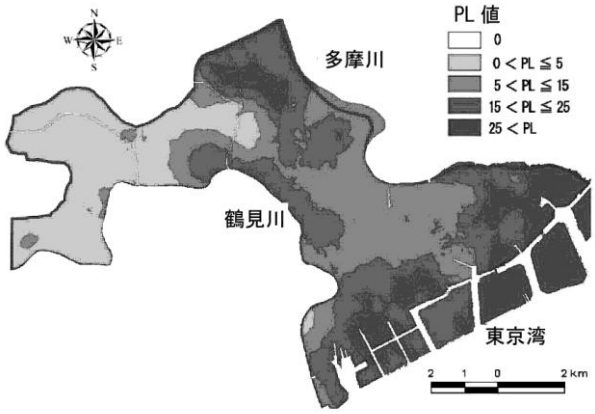


図 9　降雨＋海面上昇シナリオにおける 2100 年液状化ハザードマップ

対象地域の有限要素メッシュごとに、次式で示す液状化危険度を評価する P_L 値 [1)] を算出し、液状化危険度がどの位増大しているか把握する。これにより、各シナリオにおける対象地域の脆弱性評価を行った。

$$P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz = \sum_{i=1}^{20} F(z)w(z)\Delta z \qquad (1)$$

定式における関数F(z) と w(z) は次式で定義されている。

$$F(z) = 1 - F_L \quad (F_L<1.0)$$
$$F(z) = 0 \quad (F_L>1.0)$$
$$w(z) = 10.0 - 0.5z$$

また、F_Lは以下で定義される液状化指数である。

$$F_L = \frac{R}{L} \qquad (2)$$

ここで、R：液状化抵抗せん断応力比、L：液状化を引き起こすせん断応力比である。

表 1 に各シナリオにおける P_L 値の要素数について現状を基準とて割合で示す。これより、$0<P_L \leqq 5$ で海面上昇や降雨シナリオでの要素数があまり変化していないことがわかる。これは、上流側では、液状化危険度の変化があまりないためである。しかし、$15<P_L \leqq 25$ では、現状を基準として、降雨シナリオでは 1.09、海面上昇シナリオでは 1.11、降雨と海面上昇シナリオでは 1.06 と増大している。$25<P_L$ では、降雨シナリオでは 1.14、海面上昇シナリオでは 1.27、降雨と海面上昇シナリオでは 1.42 と増大している。以上より、数値を比較することにより、脆弱性評価を行った。降雨シナリオ、海面上昇シナリオ、降雨と海面上昇シナリオの順で対象地域がより脆弱化することがわかった。

表 1　各シナリオにおける P_L 値の要素数の割合

PL値	現状	降雨	海面上昇	降雨+海面上昇
$0<P_L \leqq 5$	1	1.03	0.98	0.93
$5<P_L \leqq 15$	1	0.98	0.95	0.87
$15<P_L \leqq 25$	1	1.09	1.11	1.06
$25<P_L$	1	1.14	1.27	1.42

H19 年度では、地盤構造モデルの構築手法、N 値の空間分布推定法を提案し、北海道石狩平野における気候変動に起因する液状化危険度の影響評価を行った。得られた結果について以下に示す。

（1）地盤構造モデルの構築手法

粒度に着目した地盤構造推定手法を提案し、北海道石狩平野へ適用した。この手法では、広域的な地盤構造を把握するために対象地域を 250m に分割し、その中心点における 1m 深度ごとの地盤構造を推定できるものである。まず、北海道地盤情報 DB-03 内のボーリングデータにおける各土質名称から粒度組成を決定した。次に、推定地点の標高を数値地図 50m メッシュ（標高）から取得し、IDW 法を用いて 1m 深度ごとの粒度組成を同一深度のデータから推定した。結果の一部を図 10 に示す。広域の地盤構造を視覚的に把握するために、礫質土、砂質土、粘性土、有機質土、火山灰質粘性土、火山灰質土、表土・盛土、岩の 8 種類において色づけを行った。また、周辺にボーリングデータが存在しないために補間できていない地点が存在する。その地点に関しては、地盤モデルを用いて推定するなどの新しい手法が必要となる。それにより、シームレスな地盤モデルが作成でき、広域的な液状化危険度判定に必要なデータを取得できると考える。

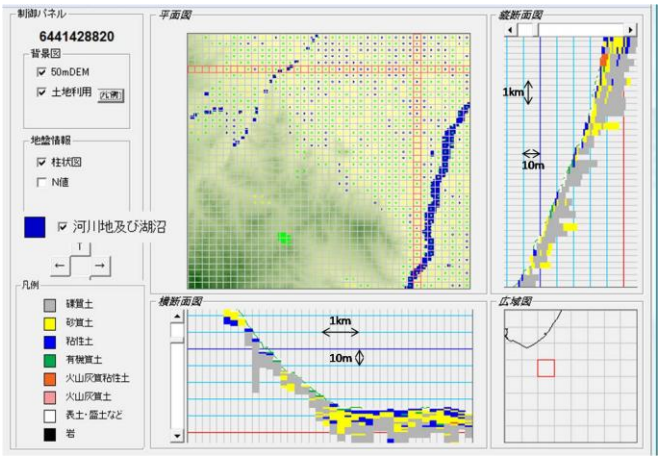


図 10　札幌市中心部付近の地盤モデルの表示例

（2）N値の空間分布推定法

上述した地盤構造モデル作成手法により、液状化危険度判定に必要なデータを得ることができるが、N 値（地盤の支持力を示すインデックス）の空間分布を把握することはできない。そこで地盤情報 DB を用いた N 値の空間分布推定手法を提案した。そのために、ボーリングデータの土質ごとのデータセットを作成し、鉛直 1m 深度ごとの N 値の平均値から鉛直トレンドを表現する式（トレンドモデル）を算出した。さらに、トレンドモデルと実測値の差異を各土質の標準偏差で除した値を用いることにより、地域性を考慮した推定手法へ拡張した。この手法による N 値の推定には土質名称が必要であるが、2.1 で提案した地盤構造モデリング手法により得られた土質を用いることで、N 値を推定することができる。これらの手法を用いることで、液状化危険度判定に必要な地盤物性値を求めることができる。



図 11　推定データ地点と対象地域

図 12 は、図 11 に示した北海道石狩平野における 2 つの観測点における N 値の推定値と実測値を比較したものである。参考のため鉛直トレンドモデルにおける推定結果も示している。この図より、本手法の有効性が確認できる。

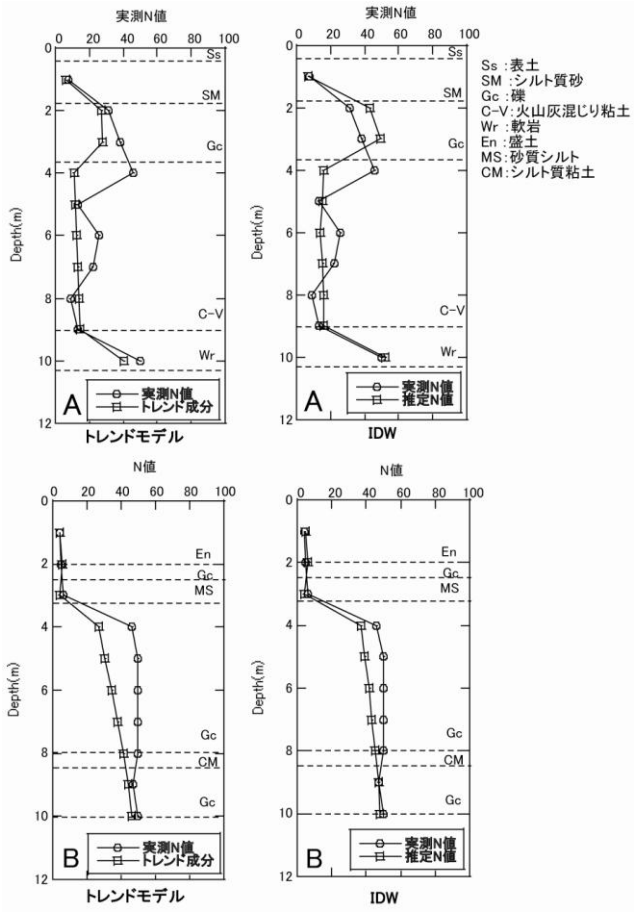


図 12　推定値と実測値

以上の 2 つの手法を組み合わせた地盤モデル作成手法のフローを図 13 に示す。

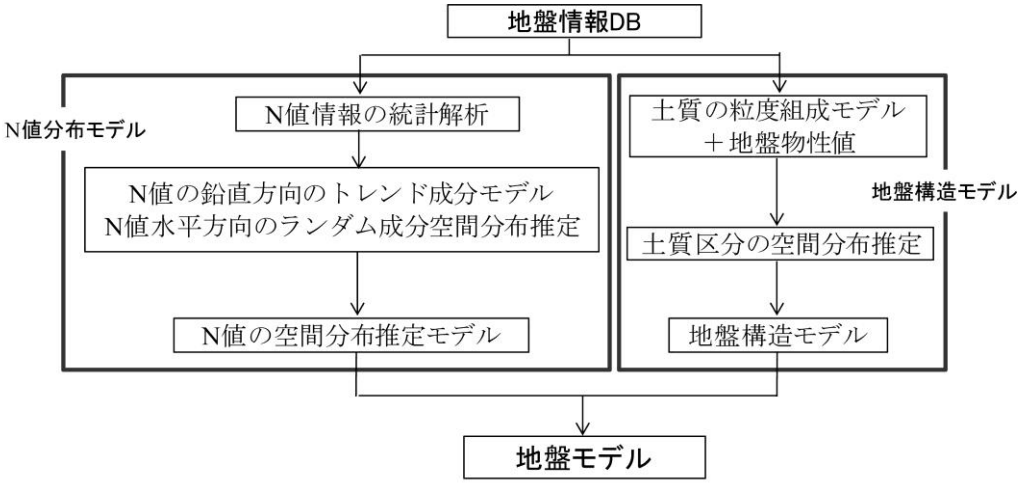


図 13　地盤モデル作成手法

(3) 北海道石狩平野における気候変動に起因する液状化危険度の影響評価

上述した地盤モデル構築手法を北海道石狩平野に適用した。用いた情報は、北海道地盤情報データベース Ver.2003（以下、北海道地盤情報 DB-03）である。これにより北海道石狩平野の地盤モデルを作成した。次に、H18 年度に確立した広域地下水流動解析手法を当該地域に適用し、その結果を用いて液状化危険度を算出した。その結果を図 14、15 に示す。当該地域における降雨変化は小さいことから 2100 年における液状化危険度の増加は小さく、気候変動の影響が極めて小さい地域であることが分かった。

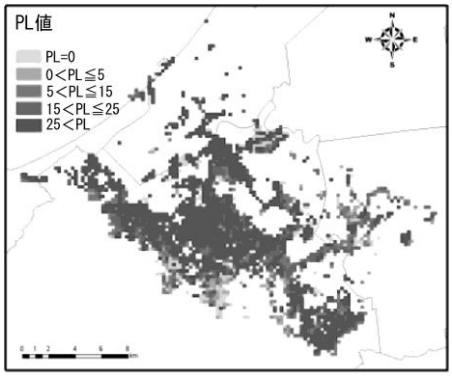


図 14　1990 年液状化ハザードマップ

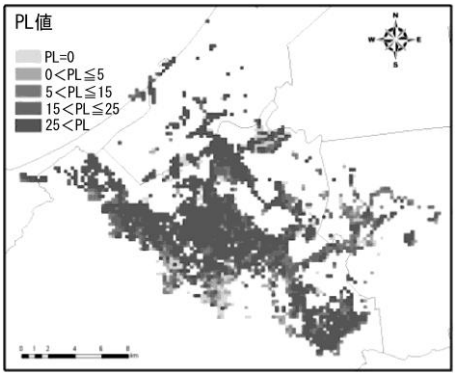


図 15　2100 年液状化ハザードマップ
（降雨+海面上昇シナリオ）

H20 年度は、(1) 液状化による経済影響評価法の確立および、(2) 適応策メニューの提案を検討した。各得られた結果と考察は以下のとおりである。

(1) 液状化による経済影響評価法の確立

1) 気候変動による地下水位の上昇が液状化に及ぼす影響を検討した結果、気候変動に起因する地盤の液状化に対する影響は、地域性があることがわかった。その原因の1つは地下水位上昇であり、

特に、気候変動シナリオの降雨の値に直接影響を受ける。また、将来予測として想定している2100年における降雨量が増加している地域は影響を受けやすいと考えられる。

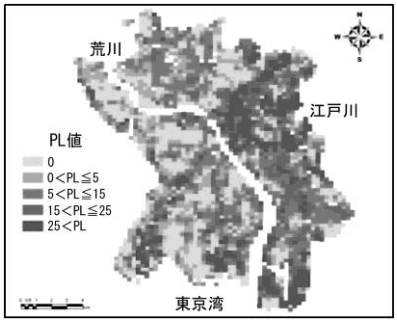


図 16 1990 年液状化ハザードマップ

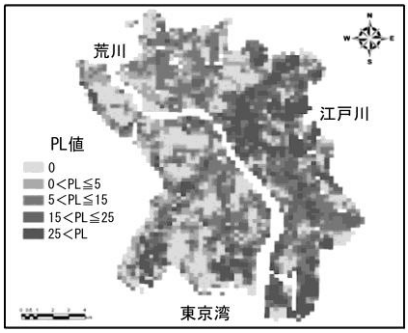


図 17 2100 年液状化ハザードマップ
（海面上昇シナリオ）

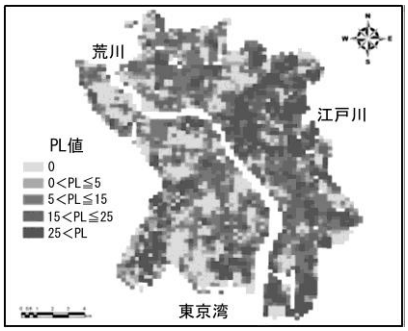


図 18　2100 年液状化ハザードマップ
（降雨シナリオ）

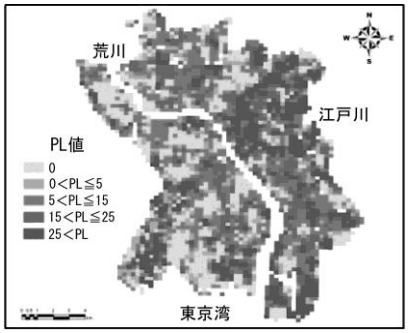


図 19　2100 年液状化ハザードマップ
（降雨+海面上昇シナリオ）

2）これらの結果を視覚的に表示するために、広域地盤モデルを利用して、気候変動を考慮した将来の地下水位の予測および液状化ハザードマップを作成した。図16～19は東京湾沿岸域における液状化ハザードマップを示したものである。これによると、東京の低平地では現状でも液状化危険度が高く、液状化危険度は内陸側で増大することがわかった。

3）液状化による経済影響評価フローを確立し、谷口ら[2)]による経済被害評価法を拡張して液状化に着目した地震災害における経済被害額算出式を提案し、川崎市湾沿岸域と石狩平野へ適用した。図20～23はその結果を示したものである。これより、川崎市沿岸域の方が石狩平野より、液状化危険度の変化が大きく、経済影響も大きくなった。また、（i）東京都における2100年の経済被害額は、現状と比較し、海面上昇シナリオでは約680億円増加すること、（ii）一方、降雨シナリオでは約3900億円増加する。このように、地下水位上昇では、（iii） 東京のような低平地では元々地下水位が高いため、気候変動の影響は沿岸域よりも内陸部で大きいなど、重要な知見が得られた。

4） 以上のような方法によって、経済被害額をメッシュ単位で算出し、特に被害が大きくなると予想される地域を特定した。これにより、具体的な防災・減災計画策定に貢献できると考えられる。

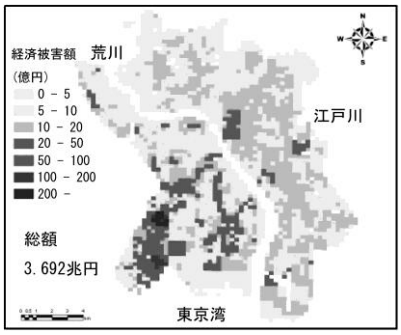


図 20　1990 年経済被害額
（東京湾沿岸域）

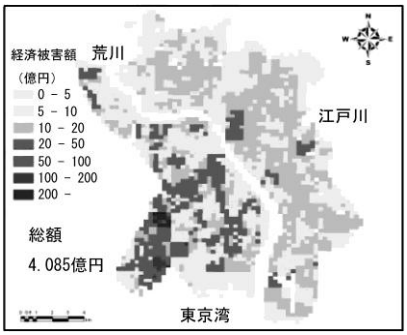


図 21　2100 年経済被害額
（東京湾沿岸域、降雨+海面上昇シナリオ）

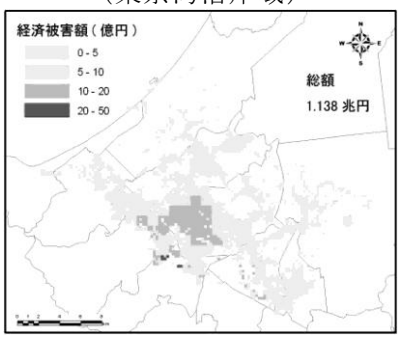


図 22　1990 年経済被害額（石狩平野）

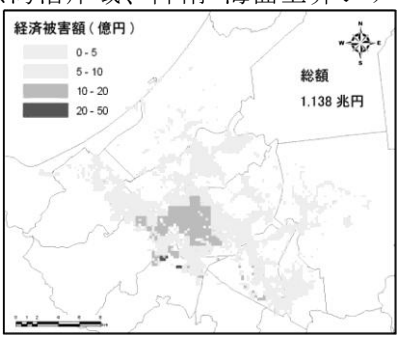


図 23　2100 年経済被害額
（石狩平野、降雨+海面上昇シナリオ）

H21 年度は、H20 年度に提案した手法を適用し、算出結果と実際に報告された経済被害額を比較・検討をすることで問題点の把握を行った。比較対象とした地震事例は、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震である。液状化の程度による被害の変化を考慮した経済被害額算出式を以下に示す。この算出式は過去の地震事例の被害額と民力総合指数の関係[2)]から、液状化により被害が拡大すると考え、液状化の程度による被害の変動を考慮する補正値を与えた算出式である。

$$Ye = 0.0653 \times H \times Se \qquad (1.0 \le H \le 3.63) \qquad (3)$$

Se:民力総合指数　*H*:液状化による補正値

まず、経済被害額算出に用いる神戸市の民力総合指数の算出に関しては、既往の研究と同様に総務省統計局 e-stat により公開されている国勢調査人口（1km メッシュ）を用い、各メッシュの人口に応じて比例配分によりメッシュ単位の民力総合指数を算出した。次に液状化による補正値 H を決定するための地盤液状化指数 PL 値を算出する。ここで、「神戸 JIBANKUN」に収録されている兵庫県南部地震における墳砂跡図を利用し、墳砂が確認されたメッシュは完全に液状化したと仮定することで補正値 *H* を決定した。最後に、民力総合指数と補正値 *H* を用いて液状化による経済被害額の算出を簡易的に行った。その結果、経済被害は総額約 3.2 兆円となった。しかし、兵庫県南部地震における実際の経済被害額は約 7 兆円と報告され、算出結果と大きな差がある。これに関して、提案した算出式が対象地域の全メッシュが液状化した場合に経済被害額が約 7 兆円と算出される算出式となっていることから、経済被害額を算出すると実際の被害額よりも過少に算出されたと考えられる。この関係から、実際に報告された経済被害額を考慮すると液状化による

補正値は $H=11.32$ と算出される。以上より、経済被害額算出式を高度化するため兵庫県神戸市における液状化ハザードマップを作成し、同手法を適用することで、液状化による補正値の検討を行った。

「神戸 JIBANKUN」に収録されているボーリングデータおよび各データに収録されている地下水位をもとに、地盤モデルを作成し、液状化危険度評価を行った。図 24 に作成した地盤モデル、図 25 に液状化危険度評価結果を示す。以後、図 25 に示す液状化危険度評価結果を利用して液状化による経済被害額の算出を行った（図 26）。

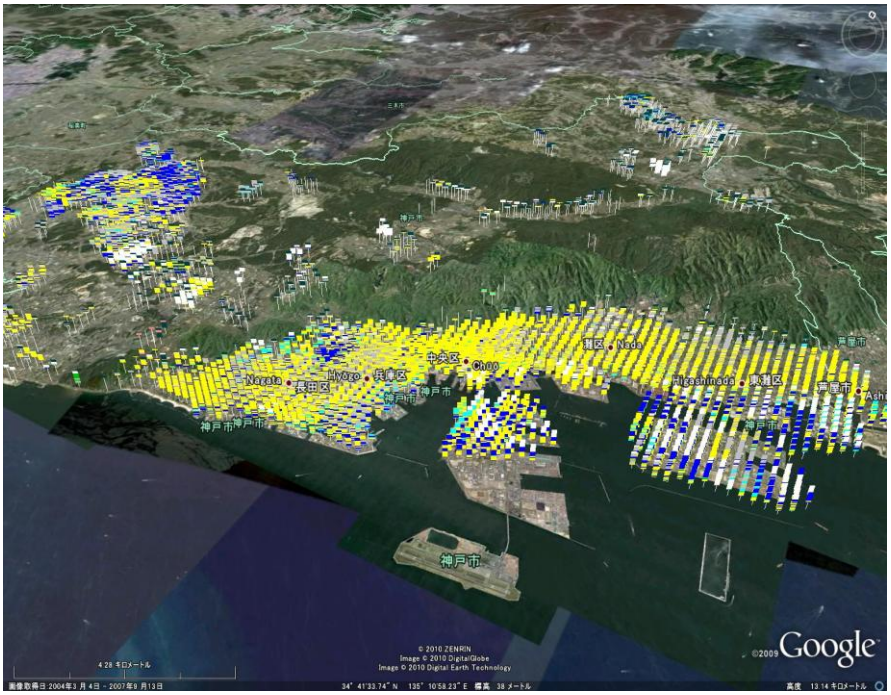


図 24　作成した神戸市地盤モデルの表示例

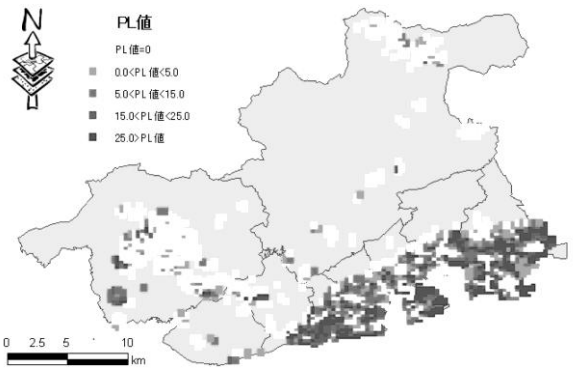


図 25　液状化ハザードマップ

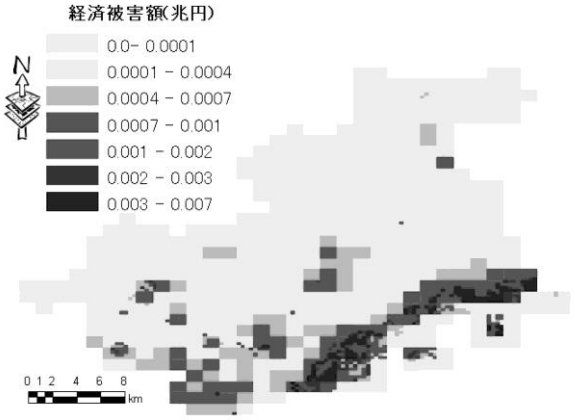


図 26　従来の算定方法による経済被害算定結果

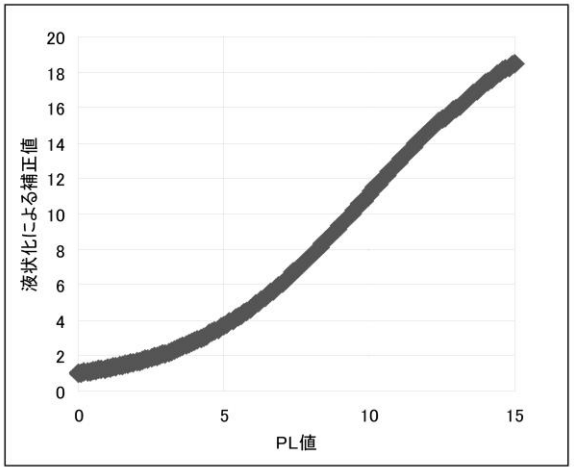


図 27　液状化による補正値 H_E

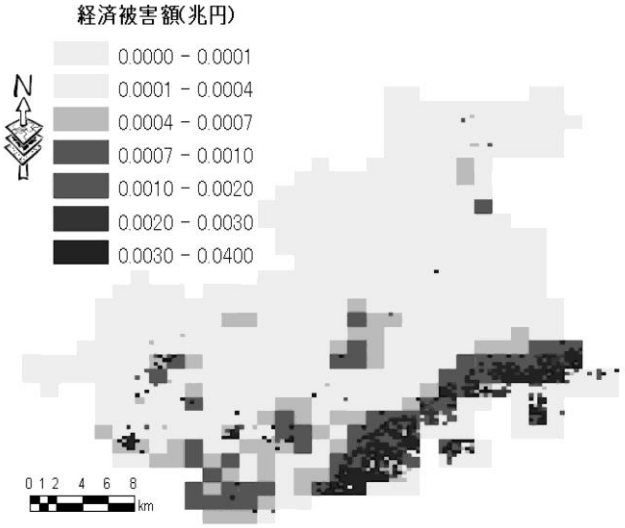


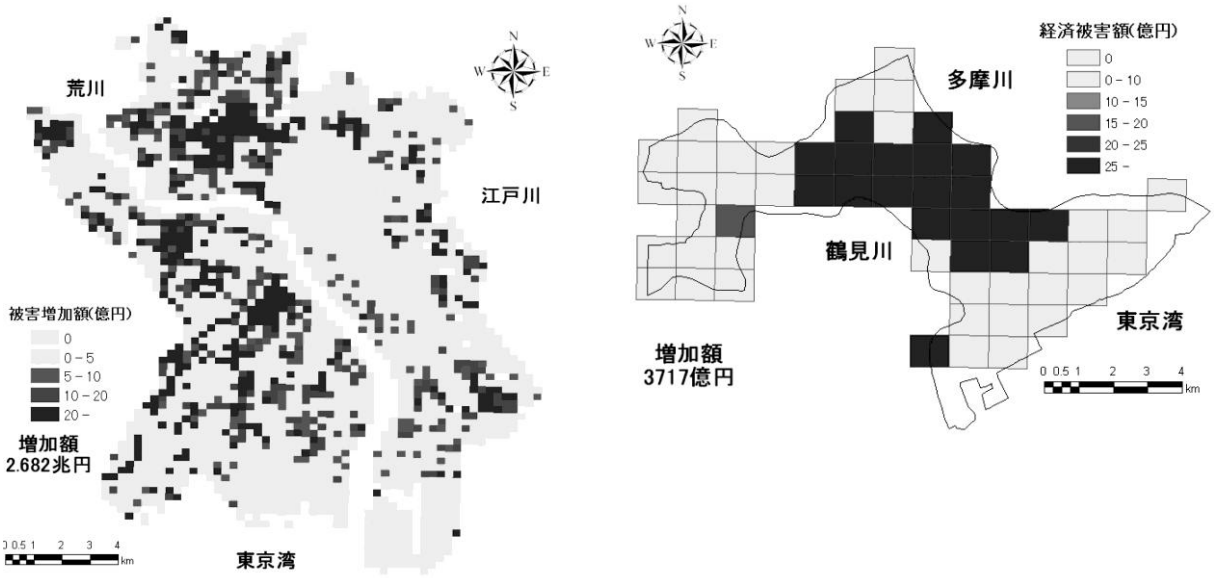
図 28　新しい算定方法による経済被害算定結果

ここで、ボーリングデータの不足から地盤モデルを作成することができなかった内陸部に関しては、花崗岩が表層付近まで分布しているため液状化による影響は無いと仮定し、補正値 $H=1$ として被害額を算出した 。液状化ハザードマップにおいて PL 値が高いところは、経済被害額も高く算出されている。しかし、経済被害総額は約 2.71 兆円となり、前項に示したように過少に算出されることが分かる。そこで、全てのメッシュにおいて液状化が発生しない場合（液状化による補正値 $H=1$）の経済被害額を算出する。その算出結果と、実際の兵庫県南部地震による経済被害額の関係から新たな補正値 H_E を算出する。液状化が発生せず地震だけによる被害額として約 2 兆円が算出され、実際の兵庫県南部地震の経済被害額として約 7 兆円が報告されている。この関係から約 5 兆円の経済被害の増加額を考慮するための、PL 値によって図 27 のように変化する新たな補正値 H_e を決定した。これより、経済被害額は過少に算出されることなく経済被害総額として約 7 兆円（図 28）が算出され、より正確に液状化を考慮した経済被害額の算出が可能となり、液状化対策法の選定に有効となったと考える。下記に新たな経済被害額算出式を示す。

$$Yp = 0.0653 \times Se \times He \qquad (1.0 \le He \le 18.44) \qquad (3)$$

Se：民力総合指数　　H_E：液状化による補正値

H20 年度に見積もった東京都東部沿岸、川崎・横浜沿岸域における気候変動に起因する液状化による経済被害額について、新しい液状化による経済被害算出方法により算定しなおした。その結果、2100 年における降雨・海面上昇のシナリオと現状とを比較した結果、東京都東部沿岸においてはおよそ 2.7 兆円の被害額の増加（図 29 参照）となった。このことから、降雨および海面上昇による地下水位上昇がもたらす液状化危険度の増加は、甚大な被害をもたらすことが分かり、東京都低地部においては適応策を講じることが必要であることを示唆することができた。



(a)　東京都東部　　(b) 川崎・横浜沿岸域

図 29　気候変動に伴う液状化による経済被害額増加の分布

地球温暖化によって引き起こされる自然災害についても、他の分野における影響と同様に、それぞれ該当するサイトの事情に応じて対応・適応していくという考え方が必要である。そのために少し広い領域（少なくともアジア全体）で協力し合うことが望まれる。したがって、災害後の復旧や被災者のケアをも視野に入れた適応策を考えていくことも重要である。

地球環境分野における適応策は、避難、順応、防護に分けて考えることが提案されている[3),4)]。表 2 はこれらの考え方に基づいて複合災害に対してまとめたものである。

なお、ここでは、SS③および SS⑤の成果も踏まえてまとめられている。

表 2　地盤災害に対する適応策の例

	適応策		
	防護	順応	撤退
河川氾濫	・堤防の嵩上げ ・遮水工 ・早期警戒システム・避難体制	・ハザードマップ ・土地利用形態の変更 ・危険地域での厳しい規制 ・災害保険	・都市計画・土地利用計画による開発抑制 ・危険の高い地域からの移住 ・移住のための公的補助金
液状化	・地下水位監視 ・地下水位低下/盛土 ・連続地中壁 ・エネルギー節約型地盤改良・地盤補強	・ハザードマップ ・土地利用形態の変更 ・危険地域での厳しい規制 ・災害保険	・都市計画・土地利用計画による開発抑制 ・危険の高い地域からの移住 ・移住のための公的補助金
斜面崩壊	・抑止杭 ・早期警戒システム・避難体制 ・エネルギー節約型地盤改良・地盤補強	・ハザードマップ ・リスクマップ ・危険地域での厳しい規制 ・災害保険	・土地利用計画による開発抑制 ・危険の高い地域からの移住 ・移住のための公的補助金

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

温暖化に起因する海面上昇と集中降雨によって地下水位の上昇している地盤が、大きな地震によって液状化するために生ずる経済的損失を評価する方法を提案してその事例を示した。特に、気候変動による地下水位上昇と巨大地震による複合的な災害の評価手法と災害によってもたらされる経済的損失の評価手法を提案し、東京湾沿岸域へ適用した。その結果、液状化危険度と災害損失額は沿岸域だけなく、内陸部にも拡大することが明らかにした。このような事例紹介はこの分野では過去にほとんど研究が見られない。また、地震時の液状化に伴う地下構造物の変状に対する具体的な対応策の有効性を詳細に示した例は少ない。したがって、このことはいずれも科学的に新しく、有意な知見であると考えられる。

（２）地球環境政策への貢献

ここで提案した、温暖化に起因する事象と温暖化に起因しない大きな地震とが同時に生起することによって起こりうることが懸念される液状化がもたらす経済的損失を評価する方法を他の地域にも広く適用することは、具体的な適応策の策定をする上で有用であり、また、適応策の経済的効果を評価する上で有益と考えられる。

６．引用文献

1）社団法人日本道路協会：
「道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説」、228（1996）
2）谷口仁士ら ： 総合都市研究、東京都立大学、61，167-181（1996）
「地震災害が地域に及ぼす経済的影響 -直接被害額推定法の提案-」
3）環境省 ： 地球環境研究総合推進費　戦略的研究開発プロジェクト Ｓ－4 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究、温暖化影響総合予測プロジェクトチーム（国立環境研究所他）、49-64（2008）
「地球温暖化「日本への影響」-最新の科学的知見」
4）原沢英夫・西岡秀三（編）：原沢英夫・一ノ瀬俊明・高橋潔・中口毅博、地球温暖化と日本-自然・人への影響予測第3次報告、古今書院、(2003)
「第10章　適応、脆弱性評価」

７．国際共同研究等の状況

H17 年度と 18 年度は、成果のアジアへの展開を念頭において、タイとベトナムにおける以下の 3 機関と温暖化に伴う異常気象による災害の予測と適応策に関する共同研究の準備を行なった。具体的には、2005 年 11 月にハノイ（ベトナム）とバンコック（タイ）へ、2006 年 3 月には、フエ（Hue、ベトナム）へ出かけていき、打合せと実情調査（海岸と河川沿岸域）を行なった。

1）Geotechnical Research Center, Asian Institute of Technology, Professor & Director Deness Bergado, Bangkok, Thailand
2）Vietnam National University Hanoi, Professor Mai Trong Nhuan (Vice President で、Head of Geotechnics & Geoenvironment), Hanoi, Vietnam.
3）Department of Geosience, Hue University of Sciences, Professor Tran Ngoc Nam, (Dean of Geology), Hue, Vietnam

次いで、H19 年度は、(1)前年度の継続の一環として 2006 年 10 月から 2007 年 3 月まで、Hanoi

University of Science の Dr. Do Minh Duc を茨城大学へ招聘して適応策に関する具体的な研究の推進の方法について議論した。これ等の成果に基づいて、2007 年 9 月には、フエにおいて、“気候変動に伴う自然災害とその適応策”に関する国際シンポジウムを開催した。(2)Asian Institute of Technology の Deness Bergado 教授とアジアにおける地盤災害に及ぼす気候変動の影響に関する共同研究を進めるために、2007 年 8 月に茨城大学へ招聘して情報交換を行った。

H20 年度は、複合的地盤災害について、ベトナム（Dr. Do Mingh Duc, ハノイ科学技術大学）、タイ（Professor Deness Bergado, アジア工科大学）との連携による国際共同研究を始めることを議論した。

H21 年度には、2009 年 9 月にホーチミン市（ベトナム）における気候変動の影響調査を行った。それを踏まえて、2009 年 10 月に水戸において、自然災害に及ぼす気候変動の影響に関する国際ワークショップを開催した。また、2010 年 2 月には、日立において、「気候変動が自然災害に及ぼす影響とその適応」に関する国際フォーラムを開催し、タイや韓国などアジア諸国とも連携の必要のあることを確認した。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 安原一哉、村上哲、鈴木久美子：自然災害科学、24(3), 214-221 (2005)
「地下水位の上昇が構造物・基礎地盤に及ぼす影響とその評価」

2) S. Murakami, K. Yasuhara, N. Suzuki, W. Ni, and H. Komine : Proc. Int. Conf. Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation & Rehabilitation, 1, 571-576 (2005)
“Vulnerability assessment to liquefaction hazard induced by rising sea-levels due to global warming”

3) 安原一哉：土と基礎（地盤工学会誌）、56(1), 5-8 (2006)
「地盤工学から地盤環境工学、そして、持続可能地盤工学へ」

4) K. Yasuhara, S. Murakami, N. Mimura, H. Komine, and J. Recio : J. Sustainability Science, 2(1) 13-26 (2007)
“Influence of Global Warming on Coastal Infrastructural Instability”

5) K. Yasuhara, and J. Recio : Geotextiles and Geomenbranes, 10(1), 1-12 (2007)
“Geosynthetic-wrap around revetments for shore protection”

6) K. Yasuhara, S. Murakami, and H. Komine : Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., 1-I, 211-214 (2007)
“Settlement of foundations affected by groundwater level rise”

7) S. Murakami, and N. Suzuki : Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., 1-II, 941-946 (2007)
“Vulnerability Assessment to Liquefaction Hazard Induced Sea-level Rise by Using Geo-information Database”

8) S. Murakami, and K. Yasuhara : Proc. 13th Asian Reg. Conf. Soil Mech. and Founds. Eng., II, 328-335 (2007)
“GIS-aided Assessment of Vulnerability to Seismic Geo-hazard Induced by Global Climate Change (Theme lecture’s paper)”

9) 安原一哉、村上哲、小峯秀雄、鈴木久美子、柴田はるか：第7回環境地盤工学シンポジウム論文集、地盤工学会、237-242 (2007)
「気候変動に起因する複合的地盤災害への適応策」
10)K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, and H. Shibata：Proc. International Conference on Foundations, 136, 1615-1624, Dandee, UK (2008)
“Instability of foundations undergoing rise in groundwater level”
11)安原一哉、小峯秀雄、村上哲、陳光斉、三谷泰浩、田村誠：地球環境、14(2), 247-256 (2009)
「温暖化による気候変動が地盤災害に及ぼす影響」
12)S. Murakami, and K. Yasuhara：In M. Hamza et al. (eds.)：Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2727-2730 (2009)
“Vulnerability assessment to liquefaction hazard induced global climate change by using geo-information database”
13)K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani：International Symposium on Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Sustainable Mitigation and Adaptation to Climate Change including Global Warming, Bangkok, Thailand, 11-23 (2009)
“Effects of Climate Change on Geo-disasters in Coastal Zones”
14)安原一哉：地盤工学会誌、57(4)別刷, 1-5 (2009)
「地球温暖化と複合地盤災害」
15)K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani：International Symposium on Geodisaster Prevention and Geoenvironment in Asia, JS-Fukuoka, 102-109 (2009)
“Effects of Climate Change on Geo-Disasters in Coastal Zones”
16)S. Murakami, K. Yasuhara, H. Komine, and Y. Hasegawa：Proceedings of the International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, 188-193 (2009)
“Evaluation of Economic Damage on Liquefaction Hazard Induced by Global Climate Change in a Coastal Region”
17)H. Ogawa, S. Murakami, K. Yasuhara, H. Komine：Proceedings of the International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, 216-219 (2009)
“A representative soil profile modeling with consideration of spatial correlativity of soils”
18)K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani：Journal of Global Environment Engineering, 15, 15-23 (2010)
“Effects of climate change on geo-disasters in coastal zones”

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

（２）口頭発表（学会）

〈口頭発表〉

1) 鈴木希美、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：第40回地盤工学研究発表会発表講演集（地盤工学会）（2005）
「沿岸域における不圧地下水位変動予測のための地盤構成3次元可視化」
2) 鈴木希美、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：第41回地盤工学研究発表会発表講演集（地盤工学会）（2006）
「地盤情報を用いた不圧地下水位広域予測手法とその適用」
3) 長谷川慶彦、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：Geo-Kanto2006（第3回地盤工学会関東支部研究発表会）講演概要集（地盤工学会関東支部）（2006）
「液状化現象予測のための地盤構造推定に用いる空間補間法の比較」
4) 鈴木希美、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：Geo-Kanto2006（第3回地盤工学会関東支部研究発表会）講演概要集（地盤工学会関東支部）（2006）
「降雨を考慮した沿岸域地盤の広域地下水流動予測」
5) 長谷川慶彦、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：第42回地盤工学研究発表会講演概要集（地盤工学会）（2007）
「地盤情報DBを利用した地盤構造モデリング」
6) 猪狩淳、村上哲、安原一哉、小峯秀雄、長谷川慶彦：第4回地盤工学会関東支部発表会発表講演集（地盤工学会関東支部）（2007）
「地盤情報データベースにおけるN値の異常値の検定方法,」
7) 長谷川慶彦、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：第35回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集（土木学会関東支部）（2008）
「地形区分に着目した地盤情報DBを用いる地盤構造推定に関する検討」
8) 猪狩淳、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：第35回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集（土木学会関東支部）（2008）
「ショーブネ判断基準を用いたN値データ異常値の検出」
9) 小川寛久、村上哲、長谷川慶彦、安原一哉、小峯秀雄：第5回地盤工学会関東支部研究発表会発表講演集（地盤工学会関東支部）（2008）
「IDWによる地盤構造推定手法を用いた地盤情報の空間相関性評価」
10)長谷川慶彦、村上哲、猪狩淳、安原一哉、小峯秀雄：第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集（地盤工学会）（2008）
「地盤情報DBを利用する広域地盤モデルの作成 -その1:地盤構造モデリング-」
11)猪狩淳、村上哲、長谷川慶彦、安原一哉、小峯秀雄：第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集（地盤工学会）（2008）
「地盤情報DBを利用する広域地盤モデルの作成 -その2 N値の空間分布推定-」
12)西脇一樹、安原一哉、小峯秀雄、村上哲:第8回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、381-384（2009）
「地下水位の上昇履歴を受けた砂地盤基礎構造物の地震時変状と対策」
13)武井洋大、安原一哉、鈴木久美子、村上　哲、小峯秀雄：第8回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、385-388（2009）
「海面上昇を考慮した地盤沈下地帯における浸水危険度評価」
14)西脇一樹、安原一哉、小峯秀雄、村上哲：第44回地盤工学研究発表会発表論文集（2009）
「地下水位上昇に伴う既設構造物の地震時浮上対応策」
15)長谷川慶彦、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：第44回地盤工学研究発表会発表論文集（2009）
「広域地盤モデルを用いた沿岸域の液状化による経済被害評価」
16)小川寛久、村上哲、安原一哉、小峯秀雄、長谷川慶彦：第44回地盤工学研究発表会発表論文集（2009）
「土質の空間相関性を考慮した地盤モデル作成手法」

17)小川寛久、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：土木学会第64回年次学術講演会（2009）
「東京都東部におけるN値空間分布推定手法の適用」
18)安原一哉、村上　哲、小峯秀雄：土木学会第64回年次学術講演会（2009）
「地球温暖化に起因する気候変動がもたらす複合地盤災害と適応策」
19)西脇一樹、安原一哉、小峯秀雄、村上哲：土木学会第64回年次学術講演会（2009）
「地下水位上昇に伴う既設構造物の地震時沈下対応策」
20)海老根裕希、村上哲、安原一哉、小峯秀雄：第6回地盤工学会関東支部発表会（Geo-Kanto2009）(2009)
「兵庫県南部地震における液状化と経済被害に関する考察」

（３）出願特許
なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）
2010 年 2 月に茨城大学工学部において、IR3S の後援の下に、「気候変動が自然災害に及ぼす影響とその適応」に関する国際フォーラム（International Forum on ″Effects of Climate Change on Natural Disasters and Their Adaptation″）を主催した。

（５）マスコミ等への公表・報道等
１）研究成果がNHK“ニュース10”で紹介された。（2005年11月1日）
２）朝日新聞夕刊“防ぎきれぬ複合災害” において温暖化による複合災害のコメントが掲載された。（2009年2月20日）

（６）その他
なし

Ｓ－４　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２．影響予測の高度化及び経済評価に関する研究
２－５．沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究
（５）温暖化に起因する海面上昇と豪雨災害による海岸・河川沿岸域の経済的損失評価

九州大学 大学院　工学研究院　　陳　光斉

〈研究協力機関〉　九州大学 大学院　工学研究院　　三谷泰浩

平成17～21年度合計予算額　46,598千円
（うち、平成21年度予算額　8,550千円）
※予算額は、間接経費を含む。

[要旨]H17年度～H19年度にかけて、（1）台風の強さによる経済損失を推定するモデルを確立し、モデル地域において温暖化による台風リスクの増加を推定した。（2）豪雨と地震との複合影響を考慮した斜面災害リスクの評価手法を開発し、2005年福岡県西方沖地震による志賀島の崩壊斜面に適用した。（3）広域における斜面崩壊確率の評価手法を開発し、福岡県における降雨による斜面災害ハザードマップとリスクマップを作成した。（4）九州地方地盤情報データを活用し、3082本のボーリングデータによる福岡県の地盤地質を細分類し、貫入試験のN値から地盤強度の粘着力と摩擦角を推定して、より精度の高いハザードマップを作成した。（5）提案したリスクマップの作成における改良および精度検証に関する研究を行った。以上の研究成果を踏まえて、H20年では、（1）本研究で提案した「斜面災害リスクマップの作成手法」による全国の斜面災害リスクマップを作成するために、経済損失の推定に必要な主な資産データを整備した。（2）全国の43の都道府県における豪雨による斜面災害ハザードマップを作成した。（3）メッシュサイズの影響を検討するために、北九州市において1kmメッシュと100mメッシュを用いて、ハザードマップとリスクマップを作成し、過去の崩壊データおよび急傾斜地崩壊危険箇地カルテによる精度検証を行った。詳細な防災計画を検討するために、100mメッシュによる計算が必要ということが分かった。H21年では、（1）温暖化に伴う豪雨頻度の増加による斜面災害リスクの増加を推定するために、全国のアメダスにおける観測された日降水量データを活用し、地域気候モデルで予測された今後豪雨の変化データに基づいて、現段階、今後30年、50年と100年の日本全域における日降水量100mm以上となる豪雨の異常気候マップを作成した。（2）温暖化に起因する豪雨の年間出現頻度の増加を考慮して、日本全域における豪雨による斜面災害リスクマップを作成し、斜面災害リスクの増加を定量的に評価した。

[キーワード]土砂災害、ハザード、リスク評価、GIS、経済損失

１．はじめに

温暖化に起因する異常気象としては、台風の大型化や豪雨の増加などが考えられる。台風・豪

雨は人間や社会資産に甚大な被害をもたらす（直接経済損失）。また、豪雨は斜面崩壊の主な誘因となり、斜面災害による経済損失をもたらす（間接経済損失）。温暖化の影響を検討するために、これらの経済損失を予測し、適用策を提案することは地球環境政策上非常に重要である。

２．研究目的

本研究は、（1）温暖化に起因する気候変動による経済的損失評価手法の開発と提案手法の妥当性の検証、（2）温暖化に起因する気候変動による経済的損失の評価、および、（3）適応策の検討を目的としている。

３．研究方法

（１）温暖化に起因する台風の大型化による経済損失の増加リスクを評価する方法

1）過去のデータを用いて、台風の大きさ（強さ）と経済損失率（損失額／資産額）の相関性を分析し、台風の大きさによる経済損失の推定モデルを確立する。2）台風の大きさの統計特性を同定し、モンテカルロ・シミュレーションによる台風のリスクカーブの作成手法を確立する。温暖化に起因する台風大型化を想定し、将来の台風のリスクカーブを推定し、今のリスクカーブと比べて経済損失の増加リスクを評価する。

（２）温暖化に起因する豪雨による斜面災害リスクを評価する方法

斜面災害リスクを評価する手法は、評価の対象範囲によって、局部範囲の手法と広域的な手法がある。局部範囲の手法では、対象斜面において豪雨と地震との複合影響を考慮した斜面災害リスクを図１に示す手順で解析する。1）斜面崩壊の誘因外力の発生年超過確率を示すハザード曲線を作成する。2）斜面安定解析とモンテカルロ・シミュレーションを行い、全てのより誘因外力強度による斜面崩壊確率を推定し、フラジリティー曲線を作成する。3）斜面崩壊が発生する場合、崩壊規模による被害損失を推定する。4）ハザード曲線、フラジリティー曲線および被害損失を総合し、リスク曲線を作成する。リスク曲線と両軸で囲まれている面積は誘因外力による斜面災害リスクとなる。

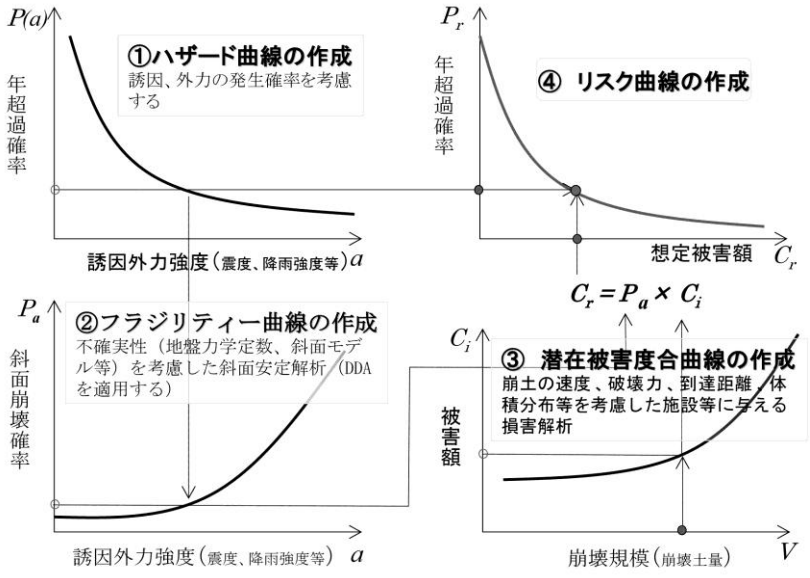


図１　個別な斜面において斜面災害リスク曲線の作成手順

一方、土砂災害リスク評価を全国に展開できるようにするために、地理情報システム（GIS）を用いて広域における土砂災害のリスクを以下の手順で評価する（広域的な手法）。（1）4 次メッシュにおける降雨による斜面崩壊確率の推定手法を確立し、斜面崩壊のハザードマップを作成する。（2）4 次メッシュにおける資産分布の推定手法を確立し、資産に基づく斜面崩壊による経済損失を評価する。（3）4 次メッシュにおける斜面災害リスクを計算する。

４．結果・考察

（１）温暖化に起因する台風の大型化による経済損失の増加リスク

宮崎県において、平成 7～14 年の期間の 27 個と平成 17 年台風 14 号のデータ[1)]に基づき、宮崎市、延岡市、日南市の 3 つの都市における台風災害リスクを計算した。一例として、宮崎市の台風リスクカーブを図 2 に示す。また、温暖化に起因する台風の大型化として、風速の平均値を 7.5%増加、雨量の平均値を 25%増加と仮定し、温暖化の影響を推定した（表 1）。その結果、3 市併せて、現在の台風被害は年平均 22.9 億円であるが、将来、温暖化の影響で、台風の大型化による経済損失は、年平均 37.4 億円となり、毎年約 14.5 億円を増加するとの予測結果となった。

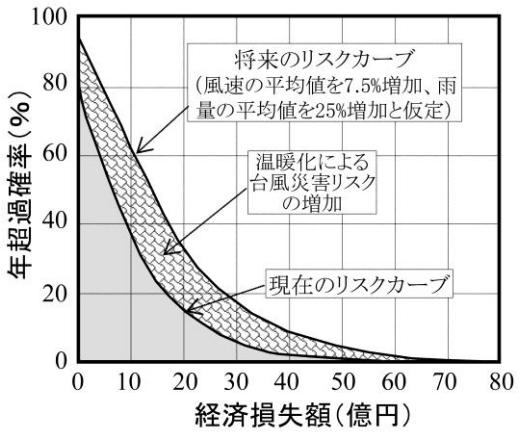


図 2　宮崎市における台風災害リスクカーブ

表 1　台風災害による年間経済損失期待値および温暖化によるその損失増加リスク

台風による経済損失		宮崎市	延岡市	日南市
年間経済損失期待値（億円）	現在	10.0	6.5	6.4
	将来	16.9	10.2	10.3
	増加	6.9	3.7	3.9

（２）温暖化に起因する豪雨による斜面災害リスクの評価に関する結果・考察

１）豪雨と地震との複合影響を考慮した斜面災害リスクの評価手法の開発と適用

豪雨と地震との複合影響を考慮した斜面災害リスクの評価手法を開発し、2005 年福岡県西方沖地震による志賀島の崩壊斜面に適用し、復旧対策計画に有効な対策案をリスクマネジメント理論で提言することができた。地震による崩壊斜面は、上部に変形量の大きい陥没地形が形成されたため、将来の地震や豪雨によって大規模な斜面崩壊が発生する可能性が懸念されている。潜在的な崩壊斜面の規模においては、図 3 に示す三つのケースが考えられている。対策費用は、想定した崩壊規模によって数億円から数十億円まで大いに異なる。最大規模の斜面崩壊（ケース C）を対象とした対策を採る場合、斜面復旧対策費は、数十億円という莫大な費用が必要である。一方、崩壊規模が過小に予想される場合（ケース A）、補強工事が不十分で将来は大きな被害をもたらす恐れがある。しかし、地盤情報のばらつきや不確実性が存在するので、斜面崩壊の規模を確実に推定することは大変難しい。そこで、本研究では、より合理的な復旧対策工を実施するために、

開発した斜面災害リスクの評価手法を適用した。3 ケースにおいて、地震と豪雨との複合影響を考慮した斜面災害リスクを評価した（図 4）。また、想定したケースに応じる対策を実施する場合、残存リスクと総費用を評価し（図 5）、ケース C に応じた対策は効果があまりよくない、ケース B に応じた対策はケース A と同じ効果であった。また、対策効率を評価し（図 6）、ケース A に応じた対策は一番効率が良いことがわかった。したがって、復旧計画に主にケース A の表層小規模崩壊を想定した補強対策、また、局所にケース B の中層中規模崩壊を考慮した補強対策を取ったほうが最適であると判断できる。本研究の結果は、福岡市の復旧計画に参考された。

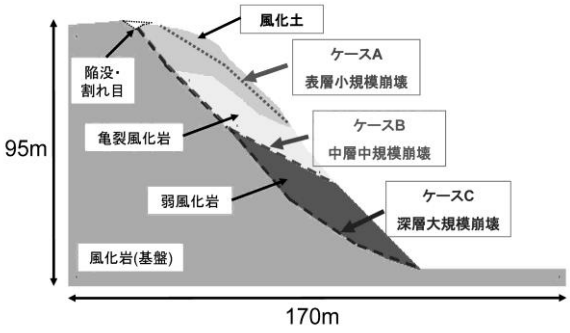


図 3　斜面断面モデル

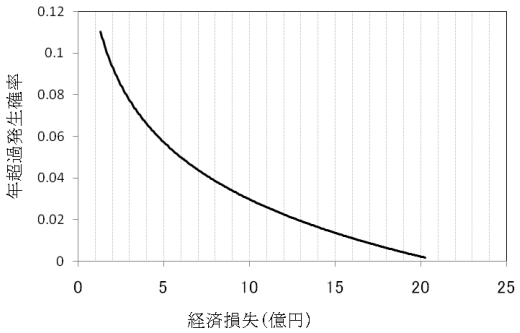


図 4　斜面災害リスク曲線

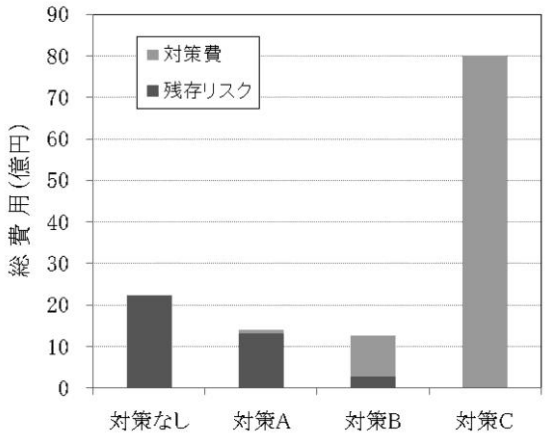


図 5　各ケースを想定した対策効果

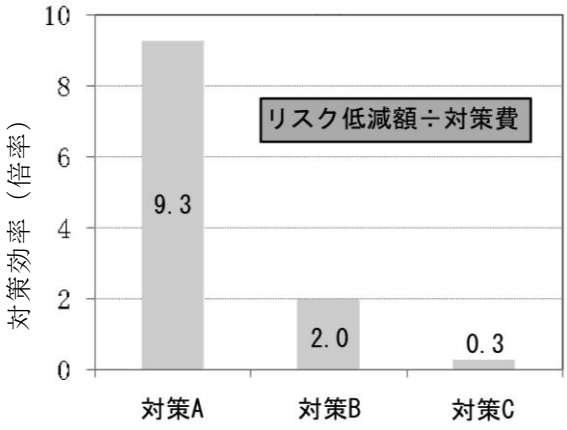


図 6　各ケースを想定した対策効率

２）広範囲における斜面災害ハザードマップおよびリスクマップの作成手法の開発および適用

本研究で開発した斜面崩壊確率の評価手法と斜面災害による経済損失の評価手法を GIS プラットフォームに適用し、斜面災害に関するハザードマップ、経済損失分布図とリスクマップを効率的に作成するツールを開発した。また、ハザードマップとリスクマップの精度を高めるために、地盤強度の確率分布を同定し、メッシュサイズの影響や過去崩壊データによるマップの精度を検証した。精度の高いハザードマップとリスクマップに基づき、斜面防災に有効なリスクマネジメントの適用により、温暖化に起因する斜面災害対策などの適応策において大きく寄与できるものと考えられる。

広範囲における斜面災害リスクマップは GIS のメッシュで作成する。各メッシュでリスクが次式による計算される。

リスク R＝斜面崩壊発生確率 P ×斜面崩壊による経済損失 C

斜面崩壊確率の計算には、斜面安定解析に次式を用いる。

$$F_s = \frac{c + \{(1-m)\gamma + m\gamma'\}H\cos\theta\tan\phi}{\{(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}\}H\sin\theta} \quad (1)$$

ここで、c：粘着力、ϕ：内部摩擦角、θ：メッシュの斜面平均勾配、γ：単位体積重量、γ'：水中単位体積重量、γ_{sat}：飽和単位体積重量、H：崩壊深、H_w：地下水位深さ、m：浸水割合（$=H_w/H$）である。これらの変数はすべてばらつきを有する確率変数として、地盤の種類による確率分布形状と変動係数を与える 50000 回のモンテカルロ・シミュレーションを行うことで、崩壊確率を算出した。したがって、地盤強度定数、崩壊土層厚、地下水などの情報を正確に同定する必要がある。これにおいて、本研究では、以下の成果が得られた。

a）地盤強度図の整備

地盤情報データベースや既存の測定データを活用し、必要に応じて直接現場測定を行い、精度の高い地盤強度を同定することができた[2)]。一部は図 7 に示されている。

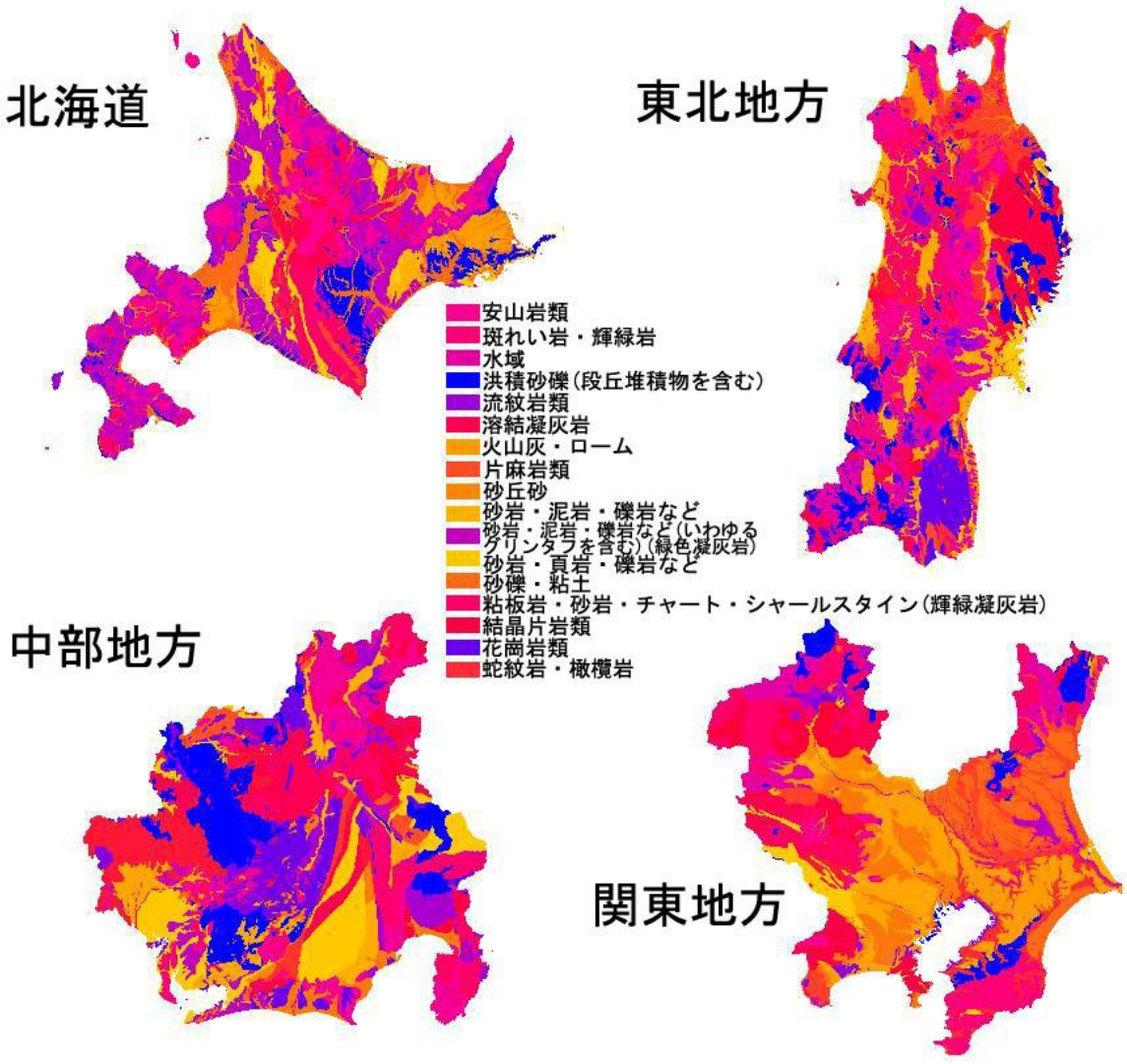


図 7　地盤強度分布図

b）崩壊土層厚の推定

173 地点での簡易貫入試験（図 8）の結果を分析し（図 9）、斜面崩壊土層厚は斜面勾配に依存することが明らかになり、崩壊土層厚と斜面勾配との関係式が得られた。

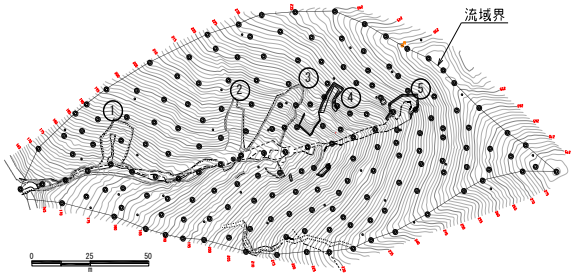


図 8　簡易貫入試験箇所（黒丸）

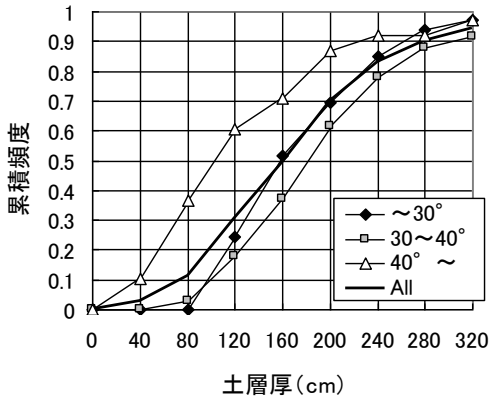


図 9　勾配毎の土層厚分布

斜面崩壊確率の推定には、土層厚は斜面勾配によって区分することとし、勾配により 3 分類(30°以下、30～40°、40°以上）し、角度ごとに土層厚の平均値（それぞれ 144、164、104cm）を用いた。

c）降雨による地下水の推定

斜面崩壊の誘因として降雨ハザードは 10 年、30 年、50 年および 100 年の再現周期で取り入れ、動水勾配による浸水割合の計算手法を確立した。また、降雨と地下水の実測値を用いて、降雨による地下水位の上昇シミュレーションを行い、降雨と地下水位の関係式が得られた。

経済損失は次式による推定される [3)]。

$$\text{経済損失 } C = \Sigma(\text{資産 } S_i \times \text{損失率 } K_i) \qquad (2)$$

資産には以下のものを含めている。①家屋資産 S_1、②家庭用品資産 S_2、③農漁家償却資産 S_3、④農漁家在庫資産 S_4、⑤事業所償却資産 S_5、⑥事業所在庫資産 S_6、⑦道路資産 S_7、⑧鉄道資産 S_8、⑨公益事業施設資産 S_9。これにおいて、本研究では、以下の成果が得られた。

d）全国における各種資産マップの完成

全国 47 の都道府県の 3370 の市区町村において以下のマップを整備した。①家屋資産 S_1 マップ、②家庭用品資産 S_2 マップ、③農漁家償却資産 S_3 マップ、④農漁家在庫資産 S_4 マップ、⑤事業所償却資産 S_5 マップ、⑥事業所在庫資産 S_6 マップ、⑦道路資産 S_7 マップ、⑧鉄道資産 S_8 マップ、⑨公益事業施設資産 S_9 マップ。

e）被害率の同定

大分県内の 3 つの鉄道路線（延べ 347km）において、過去 19 年間に発生した 1102 件の災害データを用いて、斜面災害発生した場合、鉄道資産の損害率を同定した（図 10）。

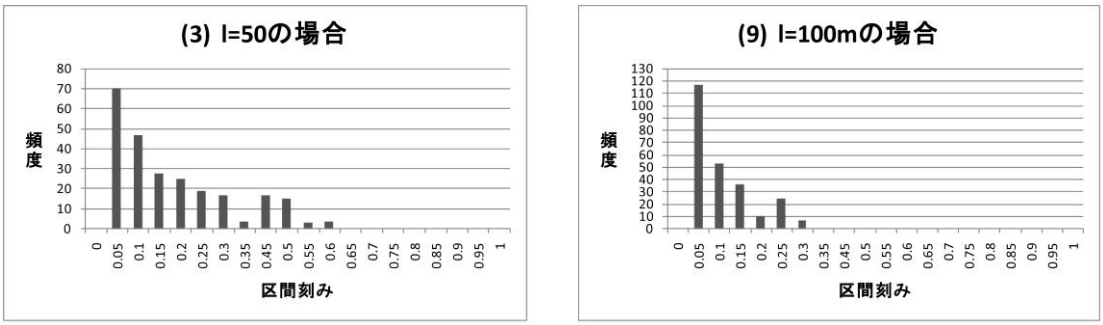


図 10　斜面災害による鉄道資産の損害率（1 は平均斜面崩壊幅）

f）ハザード・リスクマップにおける精度の確認

本研究で提案した斜面災害ハザードおよびリスクマップの精度を以下の方法で検証し、その信頼性を確かめた。

・急傾斜地崩壊危険箇所データによる検証

福岡県北九州市をモデル地域とした。「土砂災害防止法」による指定された急傾斜地崩壊危険箇所をマップに示し（図 11、12）に黒色メッシュ）、本研究で提案した手法で作成したハザードマップ（図 11）およびリスクマップ（図 12）との比較を行った。結果としては、ハザードマップに崩壊確率の高いメッシュは急傾斜地崩壊危険箇所を含めており、無人の山間部で高い崩壊確率を有するメッシュは急傾斜地崩壊危険箇所として指定されていないことが分かった。それは、人が住んでいない場所は「土砂災害防止法」の対象外となっていることが原因である。

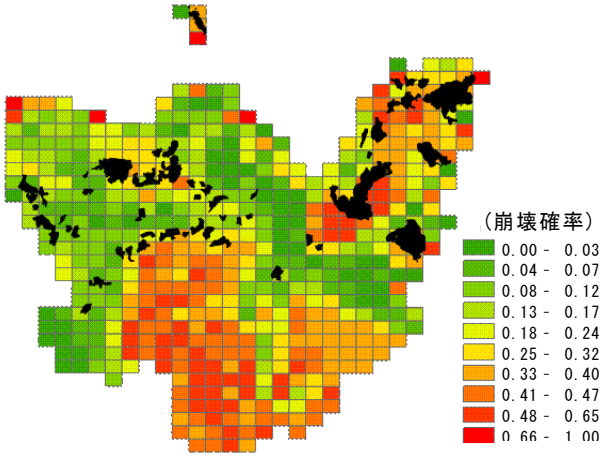


図 11　ハザードマップ(1km メッシュ)

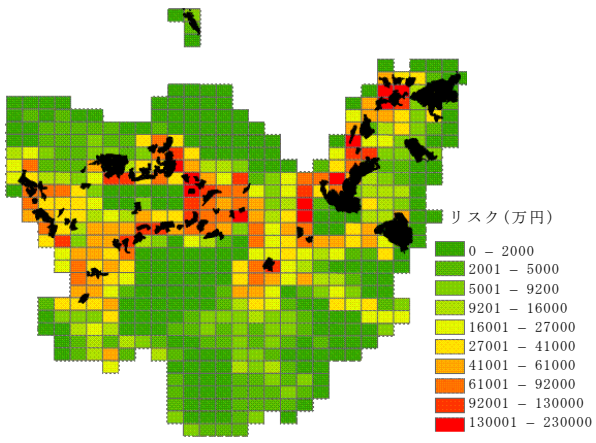


図 12 リスクマップ(1km メッシュ)

一方、リスクマップに高いリスクが示されているメッシュと急傾斜地崩壊危険箇所の分布が一致していることが認められた。

・過去の斜面災害のデータによる検証

北九州市で 1989 年から 2005 年の 17 年間に発生した斜面崩壊箇所と 100m メッシュで作成されたハザードマップ（図 13）による崩壊確率の関係を検証し、崩壊確率が高い地区で斜面崩壊が多

く発生していることがわかった（図 14）。また、崩壊確率 0.1%以上のメッシュで、過去の斜面崩壊の 98.5%が発生していることが分かった。

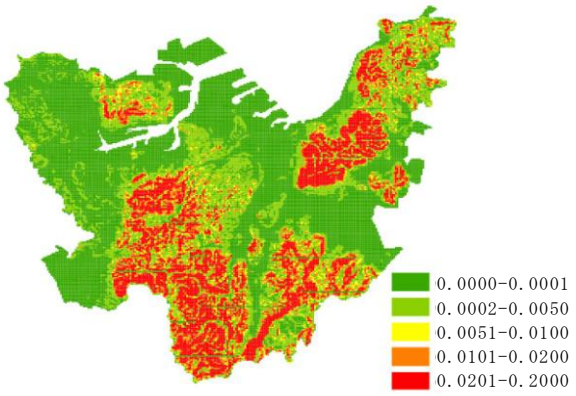


図 13　ハザードマップ(100m メッシュ)

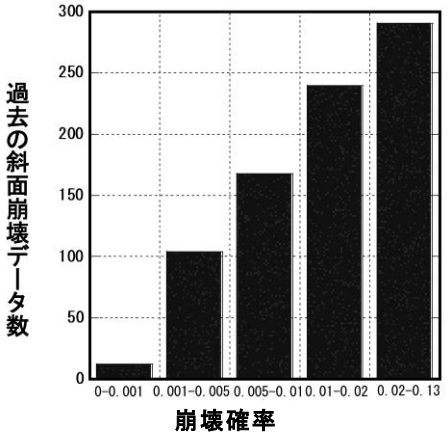


図 14　崩壊確率と崩壊箇所との関係

g）温暖化による斜面災害リスク増加の推定

上述の成果を取り入れ、福岡県におけるハザード・リスクマップを再作成した。また、再現期間 10 年の最大降雨による斜面災害リスクをいま現在の状況とし、再現期間 50 年の最大降雨による斜面災害リスクを温暖化の影響を受けた 2050 年のリスクレベルとした温暖化による斜面災害リスクの増加が推定された（図 15）。結果としては、福岡県における斜面リスク増加額は 254.3 億円/年となり、70.6%の増加となった。

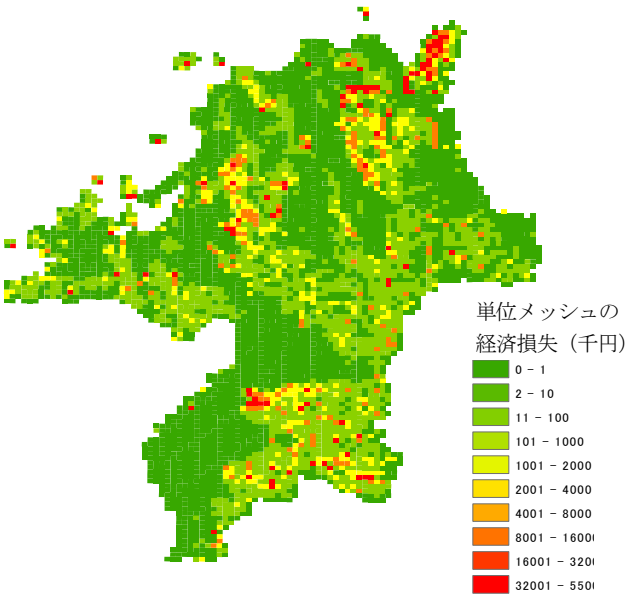


図 15　温暖化による福岡県における斜面災害リスクマップ

h）温暖化による豪雨頻度の増加に伴う日本全域斜面災害リスク増加の推定

本研究で開発した斜面崩壊確率の評価手法を用いて、日本全域における豪雨による斜面災害ハ

ザードマップを作成した。また、温暖化による日降水量 100mm 以上となる豪雨の年間出現日数の増加を考慮した斜面災害リスクの評価手法を開発し、斜面災害リスクの増加を評価した。

・斜面災害リスクの推定

豪雨の年間出現日数を考慮した斜面災害リスクを以下のプロセスで評価する。1)提案した斜面崩壊確率モデルを用いて、豪雨による斜面崩壊確率 p を求める。2)全国のアメダスで観測した日降水量データと今後豪雨の年間出現日数の変化傾向に基づいて、今後 30 年、50 年、100 年の各都道府県における豪雨年間出現日数 n を推定し、斜面崩壊回数を二項分布であると仮定した斜面崩壊 k 回の確率 p_k を式（3）で求める。3)斜面崩壊 k 回の経済損失は斜面崩壊 1 回の経済損失 C_i の k 倍になると仮定し、メッシュごとに斜面崩壊による斜面災害リスクが式（4）による計算される。

$$p_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \quad (3)$$

$$R = \sum_{k=1}^{n} C_n^k p^k (1-p)^{n-k} k C_i \quad (4)$$

・豪雨による斜面災害ハザードマップ

日本全域をモデル地域として、本研究で提案した手法で作成した豪雨による斜面災害ハザードマップを図 16 に示す。結果としては、低平地の多い 3 大都市圏を中心に、斜面崩壊危険度が低く、崩壊確率が 0.1 以下となる。また、危険地域は都市の周辺まで分布し、山岳地では 0.5 以上の高い崩壊確率を示す。

・現階段各都道府県における豪雨年間日数

各都道府県における地域気象観測所（アメダス）で観測した日降水量 100mm 以上となる豪雨の発生日数を年ごとに集計し、年間日数の平年値を求めて、現階段の日本全域の異常気候マップを図 17 に示す。図に示したように、太平洋沿岸、九州では日降水量 100mm 以上となる豪雨の年間出現日数が多く、年間 2 日以上となり、北海道、東北地方、日本海側では豪雨の年間出現日数が少なく、数年に 1 日程度の頻度となる。

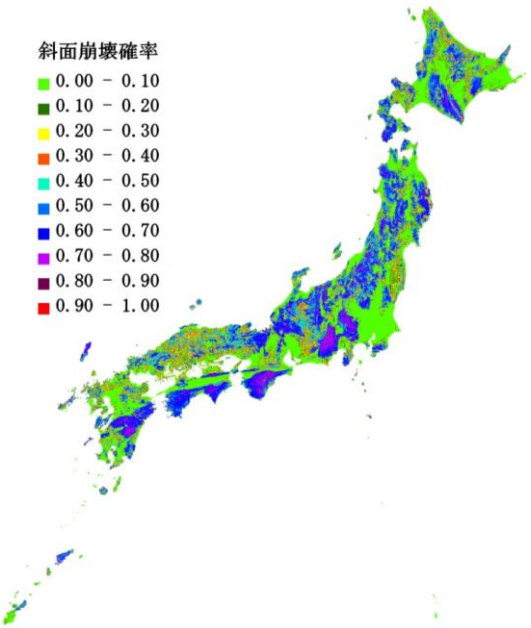


図 16　ハザードマップ

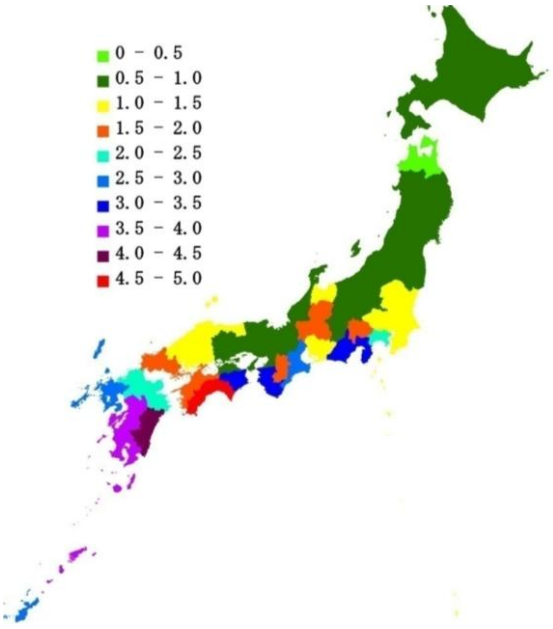


図 17　日降水量 100mm 以上となる日の年間出現日数

・温暖化による豪雨の年間出現日数の変化

降水量の長期的な変化傾向をみるため、過去 31 年間の気象庁の 51 観測点における日降水量 100mm 以上となる豪雨の年間出現日数を平均して解析し、30 年余りの豪雨の長期的な変化傾向を求めた（図 18 と表 2）。また、気象異常レポート[4),5)]によると、地域気候モデル[6)]を用いて、予測された約 100 年後日降水量 100mm 以上となる日の年間出現日数は、太平洋側と北海道の一部地域を除く、多くの地域で 1 日以上の増加と予測される。

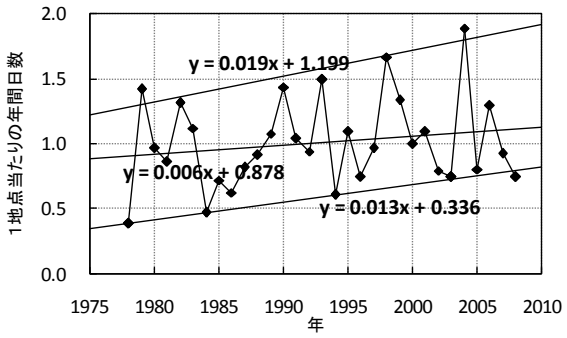


図 18　日降水量 100mm 以上の年間日数の経年変化

表 2 日降水量 100mm 以上の年間日数の変化傾向

日降水量100mm以上の年間日数（1978-2008年）		
変化傾向	＋0.06 日／10 年	すべて年
	＋0.19 日／10 年	豪雨数の多い年
	＋0.13 日／10 年	豪雨数の少ない年

・豪雨の頻度増加による斜面災害リスクの増加

豪雨の年間出現日数を考慮して、提案した斜面災害リスクの評価手法を用いた日本全域における斜面災害リスクマップを作成した。現在の降雨条件で、メッシュの最大勾配と平均勾配による斜面崩壊確率を用いた斜面災害リスクは、それぞれ図 19、図 20 のようになる。結果としては、リスクマップの分布傾向は、都市部の周辺部で突出している。太平洋、九州では年間豪雨の出現日数が多いので、斜面災害リスクが高いと考えられる。また、斜面災害メッシュの最大勾配を用いた場合、豪雨による日本全域の斜面災害リスクは 10.71 兆円/年であり、平均勾配を用いた場合、斜面災害リスクは 0.83 兆円/年となる。

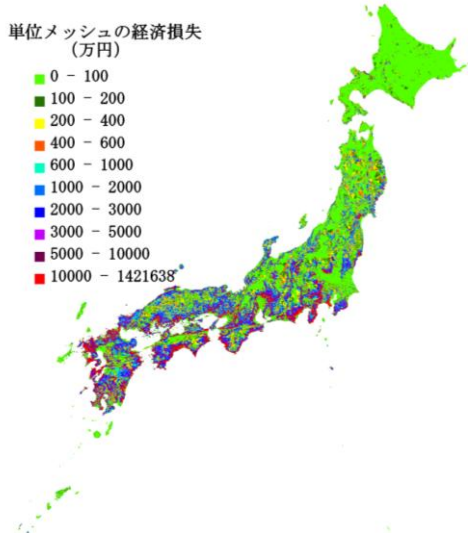


図 19　最大勾配で斜面災害リスクマップ

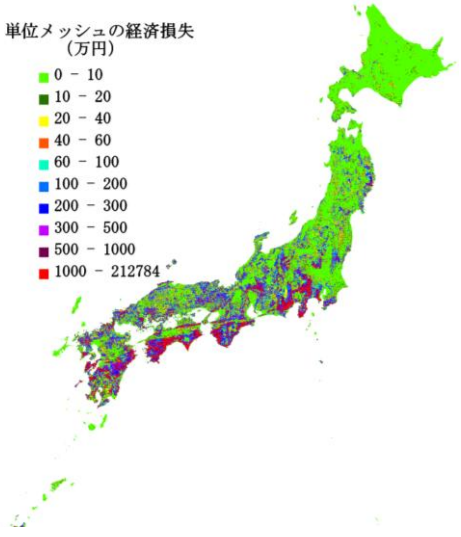


図 20　平均勾配で斜面災害リスクマップ

温暖化に起因する豪雨の頻度増加を考慮して、メッシュの最大勾配と平均勾配による斜面崩壊確率を用いた日本全域の斜面災害リスクは、それぞれ表 3、表 4 に示した。100 年の後、地球温暖に伴う豪雨の頻度増加による斜面災害リスクは、約現在の降雨条件での斜面災害リスクの 2 倍になる。また、最大勾配を用いた斜面災害リスクと平均勾配を用いた斜面災害リスクの差が大きいので、斜面災害リスクをもっと精確的に評価するために、小さメッシュで地形を表現することによる計算が必要であると考えられる。

表 3 最大勾配による斜面崩壊確率を用いた斜面災害リスク

	豪雨変化傾向（＋0.13 日/10 年）			豪雨変化傾向（＋0.19 日/10 年）		
	今後 30 年 2040 年	今後 50 年 2060 年	今後 100 年 2110 年	今後 30 年 2040 年	今後 50 年 2060 年	今後 100 年 2110 年
リスク（億円）	13,090	14,690	18,660	14,730	17,260	23,070
リスク増加額（億円）	2,380	3,980	7,950	4,020	6,550	12,360
リスク増加率（%）	22.2	37.2	74.2	37.5	61.1	115.4

表 4 平均勾配による斜面崩壊確率を用いた斜面災害リスク

	豪雨変化傾向（＋0.13 日/10 年）			豪雨変化傾向（＋0.19 日/10 年）		
	今後 30 年 2040 年	今後 50 年 2060 年	今後 100 年 2110 年	今後 30 年 2040 年	今後 50 年 2060 年	今後 100 年 2110 年
リスク（億円）	1,000	1,120	1,420	1,140	1,310	1,740
リスク増加額（億円）	170	290	580	310	480	910
リスク増加率（%）	20.5	34.9	69.9	37.3	57.8	109.6

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

１）地震と豪雨との複合影響を考慮した斜面災害リスクの評価手法を初めて確立した。特に、新しい斜面崩壊確率の評価手法を開発した。斜面崩壊は多くの素因と誘因に支配されるが、既存の手法はいずれも一部の崩壊要因しか考慮されていない。本研究では、まず、数量化Ⅱ類の手法と力学の手法をさらに改良し、二つ手法のメリットを最大限に利用した新しい斜面崩壊確率の統合的な評価手法を開発した。これらの研究成果は、斜面防災にリスクマネジメント手法を取り入れることができ、防災効果の向上に大きく寄与できるものと考えられる。

２）広範囲における斜面崩壊ハザードマップ・経済損失分布マップ・リスクマップの作成手法を確立した。本研究で開発した斜面崩壊確率の評価手法と斜面災害による経済損失の評価

手法をGISプラットフォームに適用し、斜面災害に関するハザードマップ、経済損失分布図とリスクマップを効率的に作成するツールを開発した。また、ハザードマップとリスクマップの精度を高めるために、地盤強度の確率分布を同定し、メッシュサイズの影響を調べ、また過去崩壊データによってマップの精度を検証した。ここで開発された精度の高いハザードマップとリスクマップに基づいた、斜面防災に有効なリスクマネジメントの適用により、温暖化に起因する斜面災害対策などの適応策において大きく寄与できるものと考えられる。

3）斜面の崩壊確率の推定精度を改良した。斜面の崩壊確率の推定精度を向上するために、地盤強度や崩壊土層厚などが正確に把握されなければならない。そのために、本研究では、GISによる崩壊土層厚の自動判定手法を確立した。また、九州地方地盤情報データを利用し、地盤強度の同定手法を開発した。

4）降雨と地下水や土壌雨量との関係を調べた。降雨を誘因とする斜面崩壊確率の推定には、降雨と地下水や土壌雨量との関係が明らかにされていなければならない。本研究はこの両者の関係解明に有用な基礎的な成果が提供された。

5）温暖化に伴う豪雨の年間出現日数の増加を考慮して、今後30年、50年と100年を対象として、豪雨による日本全域の斜面災害リスクを定量的に評価した。さらに、地球温暖化が進んだ場合、どのように全国斜面災害リスクが増加するかを示した。

（2）地球環境政策への貢献

1）全国における資産マップを整備した。日本における温暖化に起因する斜面災害リスクを評価するために、資産分布マップが欠かせないものである。また、整備した資産マップは温暖化に起因する他の形態のリスク（例えば、水害リスク）評価にも利用できる。

2）本研究で開発した斜面崩壊ハザードマップおよびリスクマップの作成手法を用いて、全国における温暖化に起因する異常気象による斜面災害のリスクマップを作成し、温暖化に起因する斜面災害を定量的に評価した。また、得られた温暖化に起因する斜面災害リスクマップに基づき、温暖化の適応策や斜面防災計画や政策への提言などに直接貢献するものと期待される。

6．引用文献

1）宮崎県：平成7年-平成14年、宮崎県災異誌第31号-38号
「災害の記録」

2）土木学会岩盤力学委員会編：113-115（1999）
「岩盤斜面の調査と対策」

3）国土交通省河川局：(2000)
「治水経済調査マニュアル」（案）

4）気象庁：(2005)
「異常気象レポート2005（近年における世界の異常気象と気候変動）」

5）気象庁：(2009)
「気候変動監視レポート2008（世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について）」

6) JCCA：全国地球温暖化防止センター、地球温暖化の原因と予測、JCCAのHP
http://www.jccca.org/find/ondanka/pamph/page2.html

７．国際共同研究等の状況

なし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) G. Chen, K. Zen, and S. Moriyama：Recent Development of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering in Asia, 269-274 (2006)
“Risk Analysis of Slope Disasters in a Large Area Using GIS Platform”
2) T. Fujinami, G. Chen, K. Zen, and K. Kasama：Recent Development of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering in Asia, 435-440 (2006)
“An Attempt to Estimate Economic Loss Caused by Typhoon Considering Global Warming”
3) G. Chen, K. Zen, and N. Kasuya：Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2, 927-930 (2007)
“Risk Management of Slope Disaster Induced by Earthquake”
4) 陳光斉、善功企：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、191-196 (2007)
「不連続変形法DDAによる斜面崩壊の数値シミュレーション」
5) 入門大介、陳光斉、善功企、笠間清伸：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、205-208 (2007)
「地理情報システムを用いた降雨に伴う斜面災害リスク評価に関する研究」
6) 粕谷悠紀、陳光斉、善功企、笠間清伸：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、225-228 (2007)
「地震および降雨による斜面災害復旧へのリスクマネジメント技術に関する研究」
7) 周国雲、陳光斉、横矢直道、北園芳人：斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム論文集、229-234 (2007)
「GISによる斜面崩壊ハザードマップ作成の効率化の新提案と応用」
8) T. Nian, G. Chen, M. Luan, and Q.Yang：New Horizons in Earth Reinforcement, Edited by Otani, Miyata and Mukunoki, 401-405 (2007)
“Numerical analysis of stability of slope reinforced with piles subjected to combined load”
9) D. Irikado, K. Zen, and G. Chen：New Frontiers in Chinese and Japanese Geotechniques, Edited by Y. Yao, H. Akagi, and G. Zhang, 207-212 (2007)
“A Study on Evaluation of Landslide Risk Induced by Rainfall with Geographical Information System”
10)粕谷悠紀、善功企、陳光斉、笠間清伸：土木学会地震工学論文集, 29, 996-1001 (2007)
「地震による斜面災害復旧へのリスクマネジメントの適用」
11)周国雲、陳光斉、北園芳人、横矢直道：土と基礎、55(6)-593, 18-20 (2007)
「GISと数量化理論を用いた土砂災害ハザードマップ作成技術の高度化手法の提案」
12)G. Chen：Proceedings of International Symposium on Computational Mechanics, 1093-1103 (2007)
“A View on Manifold Method Comparing with Finite Element Method”

13)G. Chen：Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(12), 2395-2402 (2008)
“Practical Techniques for Risk Analysis of Earthquake Induced Landslide”
14)G. Chen, K. Zen, and Y. Kasuya：Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(12), 2488-2493 (2008)
“Practical Risk Assessment of Slope Disaster Induced by Earthquake”
15)T. Nian, G. Chen, M. Luan, Q. Yang, and D. Zheng：Canadian Geotechnical Journal, 45(8), 1092-1103 (2008)
“Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in nonhomogeneous and anisotropic soils”
16)陳光斉、善功企、鄭路：土木工学会地震工学論文集、9, CD-ROM 4-0037 (2009)
「地震による斜面崩壊土石の高速・遠距離運動のメカニズムに関する研究」
17)Y. Hou, G. Chen, and C. Zhang：Proceedings of the 9th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Singapore, 227-236 (2009)
“Extension of Distinct Element Method and Its Application in Fracture Analysis of Quasi-brittle Materials”
18)G. Chen, J. Sun, and K. Zen：Proceedings of International Joint Symposium on Geodisaster prevention and Geoenvironment in Asia, 76-83 (2009)
“GIS-based Probabilistic Analysis of the Slope Safety Factor for Landslide Hazard Mapping Induced by Earthquake”
19)T. Nian, S. Wan, and G. Chen：Proceedings of International Joint Symposium on Geodisaster prevention and Geoenvironment in Asia, 71-75 (2009)
“2D and 3D Slope Stability Analysis Using Shear Strength Reduction Finite Element Method”
20)K. Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani：Proceedings of International Joint Symposium on Geodisaster prevention and Geoenvironment in Asia, 102-109 (2009)
“Effects of Climate Change on Geo-Disasters in Coastal Zones”
21)G. Chen, K. Zen, Z. Jiang, and Y. Jiang：Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering, 648-651 (2009)
“Study on Mechanism of Long-distance Movement of Debris from Landslide Induced by Earthquake”
22)三角真貴子、善功企、陳光斉、笠間清伸：降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム、385-388 (2009)
「GISを導入した降雨による斜面崩壊ハザードマップおよびリスクマップの評価に関する研究」
23)K.Yasuhara, H. Komine, S. Murakami, G. Chen, and Y. Mitani：Journal of Global Enviroment Engineering, 15, 15-23 (2010)
“Effects of climate change on geo-disasters in coastal zones”

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) 藤浪武志、善功企、陳光斉：自然災害研究協議会西部地区部会報研究論文集、30, 17-20 (2006)
「九州地方における台風による経済損失の統計的考察」
2) 森山崇、善功企、陳光斉：自然災害研究協議会西部地区部会報研究論文集、30, 123-126 (2006)
「GISによる広域的な斜面災害リスクの評価について」
3) 入門大介、善功企、陳光斉：自然災害研究協議会西部地区部会報研究論文集、31, 77-80 (2007)
「地理情報システムを用いた降雨に伴う斜面災害リスク評価に関する研究」

4) G. Chen, K. Zen, and D. Irikado：Proceedings of international Symposium on Mitigation and Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters, 203-212 (2007)
“Estimation of economic loss from climate-change-induced natural disasters using GIS Platform”
5) 陳光斉、善功企：土木学会地震工学論文集（報告）、29, 1485-1493 (2007)
「2005年福岡県西方沖地震による志賀島の斜面災害と復旧対策」
6) 深江良輔、善功企、陳光斉、笠間清伸、伊藤旭：自然災害研究協議会西部地区部会報第31号研究論文集、85-88 (2007)
「鉄道路線における災害発生に関するリスク分析」
7) 藤浪武志、善功企、陳光斉、笠間清伸：自然災害研究協議会西部地区部会報第31号研究論文集、73-76 (2007)
「数量化Ⅱ類を用いた広域的な斜面災害手法に関する一考察」
8) 入門大介、善功企、陳光斉、笠間清伸：自然災害研究協議会西部地区部会報第31号研究論文集、77-80 (2007)
「地理情報システムを用いた降雨に伴う斜面災害リスク評価に関する研究」
9) 粕谷悠紀、善功企、陳光斉、笠間清伸：自然災害研究協議会西部地区部会報第31号研究論文集、109-112 (2007)
「降雨を考慮した地震による斜面災害の復旧におけるリスク分析」
10)伊藤旭、善功企、陳光斉、笠間清伸：自然災害研究協議会西部地区部会報第31号研究論文集、81-84 (2007)
「鉄道路線における気象と災害被害額に関する統計分析」
11)G. Chen, and K. Zen：Proceedings of the 2nd International Symposium on Climate Change and the Sustainability (invited paper), 27-35 (2008)
“Application of Risk Management to Slope Disaster Prevention”
12)M. Misumi, K. Zen, G. Chen, and K. Kasama：Proceedings of the 2nd International Symposium on Climate Change and the Sustainability (2008)
“Accuracy Evaluation of Slope Disaster Risk Map at Kita-Kyushu City Using Geographical Information System”
13)陳光斉：公明 (2008)
「斜面防災に有効なリスクマネジメント」
14)三角真貴子、善功企、陳光斉、笠間清伸、入門大介：自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集、32, 69-72 (2008)
「地理情報システムを用いた斜面災害リスクマップの精度評価」
15)粕谷悠紀、善功企、陳光斉、笠間清伸：自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集、32, 33-36 (2008)
「地震および降雨を誘因とした斜面災害のリスク分析による一考察」
16)入門大介、善功企、陳光斉、笠間清伸：自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集、32, 65-68 (2008)
「地理情報システムを用いた降雨に伴う広域的斜面災害リスク評価」
17)G. Chen, and K. Zen：Proceedings of the Second China-Japan Science Forum, 199-200 (2009)
“Study on Mechanism of High Speed & Long-distance Movement of the Debris Induced by Earthquake”

（２）口頭発表（学会）

1) C. Wang, T. Esaki, Y. Mitani, M. Xie, and C. Qiu：The 3rd International Workshop on Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan (2005)

“GIS-Based Two-Dimensional Numerical Simulation of Debris Flow and Hazard Assessment”

2) T. Esaki, P. B. Thapa, Y. Mitani, and M. Xie：The 2005 East Asia Joint Symposium on Rock Engineering, Fukuoka, Japan (2005)
“GIS Based Multivariate Prediction Modeling of Landslide Hazard in the Mountainous Terrain of Central Nepal”

3) C. Qiu, T. Esaki, M. Xie, Y. Mitani, and C. Wang：The 2005 ESRI International User Conference, Fukuoka, Japan (2005)
“A GIS System Development for Evaluating 3D Slope Stability”

4) G. Chen：The 7th World Congress on Computational Mechanics, Los Angeles, USA (2006)
“Risk Analysis of Earthquake Reduced Landslide With DDA”

5) G. Chen：The 7th World Congress on Computational Mechanics, Los Angeles, USA (2006)
“Bearing capacity of man-made sandy beach with a cave by MM simulation”

6) C. Qiu, T. Esaki, M. Xie, Y. Mitani, and C. Wang：The 4th Asian Rock Mechanics Symposium, ISRM International Symposium, Singapore (2006)
“New Implementation Approach for Three-dimensional Slope Stability Analysis Using Geographical Information System”

7) I. Djamaluddin, T. Esaki, and Y. Mitani：The 4th Asian Rock Mechanics Symposium, ISRM International Symposium, Singapore (2006)
“GIS System Development for Surface Subsidence Prediction due to Complex Tabular Extractions”

8)T. Esaki, I. Djamaluddin, Y. Mitani, X. Zhao：The 4th Asian Rock Mechanics Symposium, ISRM International Symposium, Singapore (2006)
“Development of GIS-based Evaluation Support System for Environmental Protection against Coal Mining Subsidence”

9) G. Chen：Panelist’s remarks in the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Kolkata, India, (2007)
“Application of risk theory to natural disaster mitigation”

10)陳光斉：熊本県砂防ボランティア協会講習会招待講演、熊本市 (2009)
「斜面災害の実用的なリスクマネジメント技術」

11)陳光斉：地盤改良関係に従事する技術者のための技術力向上を目的とした講演会招待講演、東京都 (2009)
「2008年中国四川大地震に関する調査研究報告」

12)陳光斉：福岡県西方沖地震から5年 九州の自然災害を考える災害調査報告会＆市民フォーラム、福岡市 (2010)
「衛星・航空写真を使った広域被害評価の現状」

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

朝日新聞（2008 年 6 月 19 日、“温暖化被害　現実味”）

Ｓ－４ 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
２－５．沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究
（６）温暖化に起因する複合災害の適応策の評価と経済効果評価

茨城大学　地球変動適応科学研究機関　田村誠

平成19年度合計予算額　1,979千円
※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］本研究では、第一に沿岸域を中心する地域を対象に気候変動の影響と複合災害の関係の整理を行ったのち、該当する地域における適応策の総合メニューを提示した。総合的な適応策の実施には、技術的な対策だけでなく、社会・経済的な対応が求められる。すなわち、こうした気候変動の外力に対する抵抗力（適応能力）を高めることが重要である。第二に、潜在的な適応能力を把握するため、日本における都道府県別の人間開発指数（Human Development Index：HDI）を計測した。HDIは適応能力を構成する代表的な指標の一つであり、ここではその代理指標とみなした。その結果、都道府県別のHDIの差は比較的軽微であるが、一人当たり所得と寿命が主な決定要因となることが明らかとなった。このように、適応能力は社会によって異なり、その分布は社会・経済プロセスが決定要因となる。具体的な適応策の影響評価に向けては、今後、技術水準や情報インフラ・能力などを採り入れた分析や地域を限定した分析や行う必要がある。

［キーワード］気候変動、複合災害、適応策、総合メニュー、適応能力

１．はじめに

本サブグループ（S-4(5)）では沿岸域における気候変動に伴う複合災害の影響、リスクの定量評価を行っている。本 SS⑥は、本サブグループの研究対象となる沿岸域を中心とした気候変動への適応策を整理し、これらの望ましい実施に向けた社会・経済的な評価を検討した。

２．研究目的

本研究の目的は、第一に沿岸域を中心とした地域を対象に気候変動の影響と災害の関係を整理することである。第二に適応策の総合メニューを提示し、望ましい適応策の実施に向けた社会・経済的な評価を検討することである。

３．研究方法

（１）適応策の総合メニュー

沿岸域における災害に対する適応策の総合メニューを提示するために、はじめに、沿岸域における気候変動の外力と災害の関係性を把握した。次に、これらの関係性に基づき適切な適応策を提案、整理した。

（２）適応能力の検討

気候変動への脆弱性を軽減するには、海面上昇、降雨変化などの外力に対する抵抗力（適応能力）を高めることが一つの方法である。適応能力は外力や感度とともに脆弱性の構成要素であり、何らかの環境の変化に適応する自然システムや社会システムの能力を指す。これは、人的資源、科学技術、情報へのアクセス能力、社会制度・インフラ、コミュニティのリスク管理能力、財政力などに反映される（図 1）。地域および国レベルの気候変動の影響を踏まえた適応能力の強化は、資源利用への圧力の低下や環境リスク管理の向上などを通じて脆弱性を軽減し、持続可能な発展を促すものである。

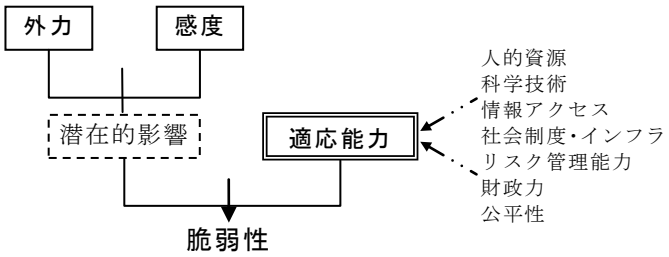


図 1　適応能力(Yohe and Tol[3]より作成)

本研究は、潜在的な適応能力を把握するために都道府県別の人間開発指数（Human Development Index: HDI）を計測する。HDI は、ゴールポストとよばれる先験的に設定された（社会基盤整備を含む広義の）開発目標とその達成度を数値化した指標であり、適応能力の代理指標としてしばしば用いられる（UNDP[2]）。このゴールポストに基づく寿命指数、教育水準指数、所得指数の算術平均から HDI は求められる。

$$\mathrm{HDI}=(1/3)\times(\text{Life expectancy index}+\text{Education index}+\text{GDP index}) \qquad (1)$$

データには、平成 12 年都道府県別生命表（厚生労働省）、平成 13 年度学校基本調査（文部科学省）、平成 12 年度県内総生産（内閣府経済社会総合研究所）、平成 12 年国勢調査第一次基本集計結果（総務省統計局）などの各種統計を利用した。

４．結果・考察

（１）適応策の総合メニュー

図 2 は、地球温暖化に起因する気候変動の外力と主に沿岸域における災害との関係を示している。ここでは、沿岸部、平野部、山間部に分けて気候変動の外力と災害の相互関係を図示している。海面上昇、台風、降雨変化などの外力が沿岸域における災害へ影響を及ぼす。地震は、気候変動とは独立した自然現象であるが、気候変動による降雨変化や海面上昇と重なることで斜面崩壊、液状化現象などへの複合災害を引き起こす可能性がある。

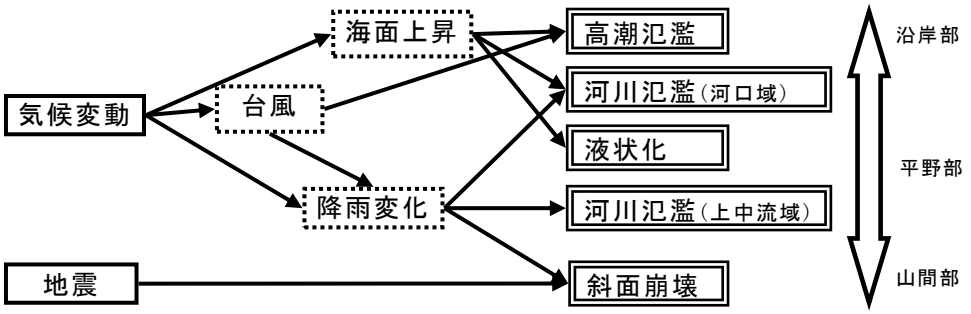


図２　気候変動の外力と災害の関係

沿岸域における自然災害への適応策を表１にまとめた。適応策は、撤退、順応、防護に大別される（三村[1]）。これは、堤防の嵩上げ、水門などの技術的な対策から、移住、災害保険など社会的な対策に至るまで多岐にわたる。

表１　沿岸域における適応策

	適応策		
	撤退	順応	防護
高潮氾濫	海岸近隣地域での開発の回避 都市計画・土地利用計画による開発抑制 危険の高い海岸からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ 土地利用形態の変更 マングローブなどの沿岸生態系の防護 危険地域での厳しい規制 災害保険	堤防の嵩上げ 海岸植生 大型水門 早期警戒システム・避難体制
河川氾濫	都市計画・土地利用計画による開発抑制 危険の高い地域からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ 土地利用形態の変更 危険地域での厳しい規制 災害保険	堤防の嵩上げ 遮水工 早期警戒システム・避難体制
液状化	都市計画・土地利用計画による開発抑制 危険の高い地域からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ 土地利用形態の変更 危険地域での厳しい規制 災害保険	地下水位監視 地下水位低下/盛土 地盤改良・地盤補強
斜面崩壊	土地利用計画による開発抑制 危険の高い地域からの移住 移住のための公的補助金	ハザードマップ リスクマップ 危険地域での厳しい規制 災害保険	抑止杭 早期警戒システム・避難体制

（２）適応能力の計測

図３は、2000 年における日本の HDI を示している。日本の都道府県別の違いは比較的軽微であるが、東京、愛知、滋賀などが上位となる一方、青森、沖縄、長崎が下位となった。これは、主に一人当たり所得と寿命が左右しているものと考えられる。

HDI は適応能力を構成する代表的な指標の一つであり、ここでは予備的検討としてその代理指標とみなした。このように、適応能力は社会によって異なり、その分布は社会・経済プロセスが決定要因となることが明らかとなった。具体的な適応策の実施や影響評価に向けては、今後、技術水準や情報インフラ・能力などを採り入れた分析や地域を限定した分析や行う必要があるだろう。

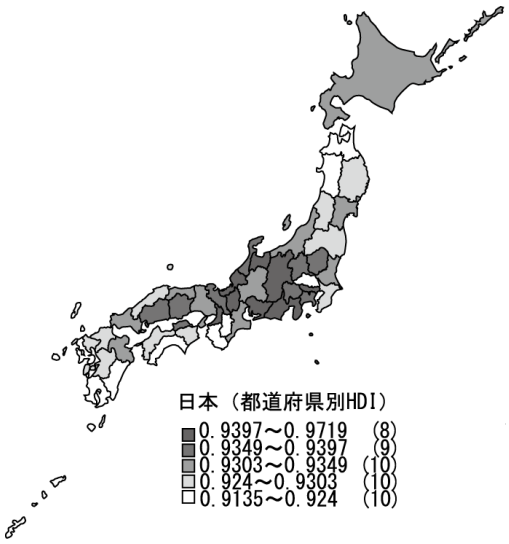


図 3 都道府県別の人間開発指数（田村による）

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究では、沿岸域における気候変動に対する災害とその適応策を整理した。近年、地球温暖化政策と、開発政策、防災政策など既存の政策とを一体として捉えようとする考え方の重要性が指摘されている。災害と気候変動の影響およびその適応策の関係性を整理することは、総合的な対策の実施に向けて有用である。

次に、日本における都道府県別の適応能力を推計した。その結果、やや粗い計算であるものの、本研究を通じて適応策の実施に向けて重要となる、社会・経済的な適応能力の地域特性を考察することができた。

（２）地球環境政策への貢献

適応策の実施に向けては、社会・経済的な適応能力の地域による違いを考慮することが重要である。本 SS⑥では、都道府県別の適応能力を試験的に推計し、その地域特性を把握することができた。今後、シンポジウムや学会等での研究報告を通じて、成果の広報、普及に努めることによって、地球環境政策へ貢献できるものと考えられる。

６．引用文献

1) 三村信男：地球環境、11(1), 103-110 (2006)
「地球温暖化対策における適応策の位置づけと課題」
2) UNDP：Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World (2007)
Human Development Report 2007/2008
3) G. Yohe, and R. S. J. Tol：Global Environmental Change, 12(1), 25-40 (2002)
“Indicators for Social and Economic Coping. Capacity: Moving towards a Working Definition of Adaptive Capacity”

７．国際共同研究等の状況

本サブグループでは、アジアへの研究成果の展開を念頭において、ベトナムの Hanoi University of Science と地球温暖化に伴う異常気象による災害の予測と適応策に関する共同研究を行っている。これらの成果に基づいて、2007 年 9 月にはベトナム・フエにおいて、“気候変動に伴う災害とその適応策”と題した国際シンポジウムを開催している。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

なし

（２）口頭発表（学会）

なし

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

（６）その他

なし

課題名	S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 2－6 地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデルの開発に関する研究		
課題代表者名	林山泰久（国立大学法人　東北大学大学院経済学研究科）		
研究期間	平成17－21年度	合計予算額	45,501千円（うち21年度 9,101千円） ※予算額は、間接経費を含む。

研究体制

（１）気候政策のマクロ的経済評価に関する研究（東北大学大学院経済学研究科）

※H17年度～H19年度まで下記サブサブテーマを含む

１）政策シミュレーションとその評価に関する研究（東北大学大学院情報科学研究科）

２）環境・経済評価モデルの開発に関する研究（東北大学大学院経済学研究科）

３）資源・経済評価モデルの開発に関する研究（東北大学大学院環境科学研究科）

（２）温暖化影響のミクロ的経済評価に関する研究（名城大学都市情報学部）

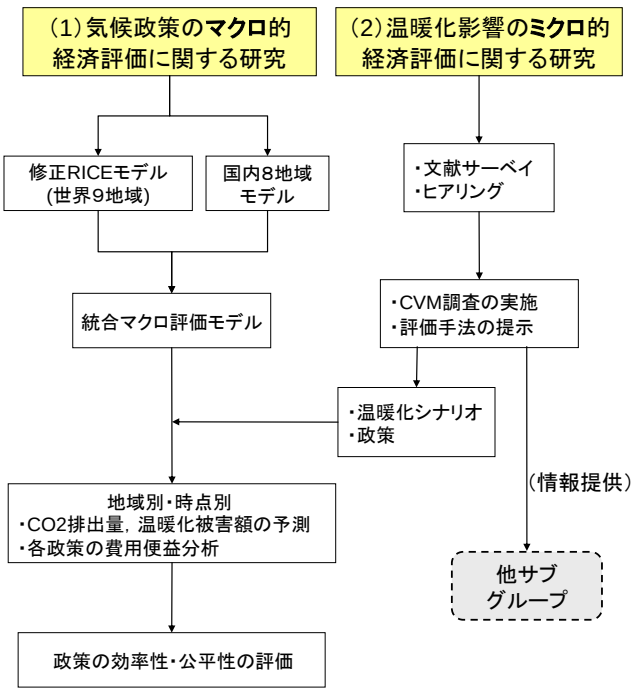
※H17年度～H19年度まで下記サブサブテーマを含む

４）国内ミクロモデルの開発に関する研究（名城大学都市情報学部）

I.戦略課題S-4-2-6の全体構成

地球温暖化問題の政策分析においては、温室効果ガス(以下、GHGと略す)排出とそれが経済活動に及ぼす影響を明示的に考慮したシステムが必要であることは言うまでもない。戦略研究プロジェクトの「地球温暖化の影響の危険な水準および安定化濃度の科学的検討を行うために、統合的な研究アプローチを行う」という主目的に対して、本研究課題では「他の研究領域から提供される共通の気候シナリオや共通の影響評価指標をインプットとして、GHG排出とそれを含む環境や資源および経済活動に及ぼす影響を考慮した世界地域別のマクロ的経済評価および国内の個別影響を把握するためにミクロ的経済評価を行うことを目標とする。

元来、地球温暖化問題を解決する政策として緩和措置と適応措置が議論されてきた。特に、適応措置は緩和措置に比べて取り組みが遅れていたものの、その重要性に対する認識が高まっている。この理由は、GHG削減努力を最大限行ったとしても地球温暖化を完全に抑制することは不可能であるため、何らかの影響の発現は免れえず、特に、その影響は適応能力の小さい途上国で早い時期に顕在化する可能性があることが示され、途上国の適応能力を向上させるための取り組みが緊急課題であるということが多くの政策立案者に理解されるようになったことであろう。さらに、事前に計画的に適応措置を実施することにより、地球温暖化の影響が発現した後の事後対処的な適応措置のみを施す場合に比べて、影響被害額と適応対策費の総和を抑えることが可能な場合が生じることや、地球温暖化を予測した長期の計画的な適応措置が副次効果的に現在の異常気象災害のリスクを軽減する場合が多いであろうと認知されてきたことも、適応措置に注目が集まっ

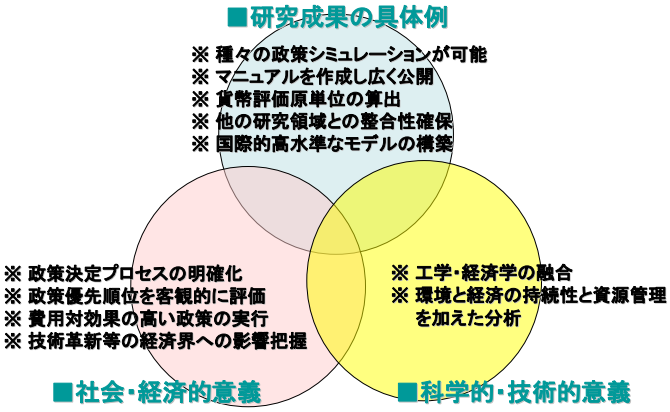


た要因である。したがって、GHG排出とそれを含む環境や資源および経済活動に及ぼす影響をマクロ的かつミクロ的に評価することは緊急課題である。

なお、本研究課題は、平成19年度に実施された中間評価における評価委員からのコメントを反映したため、平成17－19年度に作成した研究計画を変更する必要があったことに注意されたい。

Ⅱ.本研究により得られた科学的成果

サブテーマ（１）では、まず政策オプションを検討するために、既存研究における損害関数※1に関するレビューを行い、現在得られている値を整理することが出来た。また、現実を反映するようなマクロ経済成長モデルの時間選好率※2の値と限界効用弾性値※3との組み合わせのあり方を提示できた。これは、マクロモデルの構築に対して妥当な特定化の方向性を示したことになる。次に、社会的割引率に関して感度分析を行うことにより、本研究で採用しているマクロ経済モデルの構造が妥当であるか否かを検討している。これによって、本研究のマクロ経済モデルが地球環境政策のシミュレーション分析に有用であり、かつ地域的な政策評価にも利用可能であることが確認できる。さらに、日本を個別地域とした修正RICE※4モデルによるシミュレーション分析を用いて、いくつかの意思決定基準の概説を行っている。これによって、いくつかの気候安定化政策シナリオの意思決定基準に基づいた評価が可能であることが確認できる。また、意思決定基準に基づいた評価を行う際、費用便益分析の観点から評価を行うことにより、全球だけでなく地域ごとに費用対効果の高い政策オプションの優先順位を示すことが可能となっている。特に、地域ごとの費用便益評価が算出可能であるということの科学的意義は高い。



サブテーマ（２）では、まず政策オプションを検討するために、既存研究における貨幣評価原単位に関するレビューを行い、現在得られている値を整理することが出来た。次に、本研究で提案した評価手法を用いることにより、地球温暖化対策としての「熱中症防止」、「ブナ林保全」、「マツ林保全」、「砂浜保全」、「干潟保全」の費用対効果を検討する際に必要となる基礎資料の提供を目的として、CVM（仮想市場評価法）およびTCM（旅行費用法）によりこれらに関する貨幣評価原単位を推計した。これら貨幣評価原単位の推計により、これまで諸外国における温暖化影響の経済評価結果を為替レートによって日本円に換算していた貨幣評価原単位に対して、日本独自の原単位を得ることができた。特にこれらは、温暖化影響の経済評価に関する研究蓄積が少ないという日本の現状において、日本独自の貨幣評価原単位を算出したということであり、その科学的意義は高い。

※1: 損害関数は気候変動による経済的被害を表す関数であり、多くの既存研究において、気温水準の差もしくは気温変化の割合を変数とした関数形で表現される。

※2: 時間選好率とは、異時点間の効用に対するウェイト、つまり現在消費の追加的1単位に対する限界効用と将来消費の追加的1単位に対する限界効用との比率を意味する。例えば、時間選好率が大きい場合、将来消費に対して現在消費をより重視していることを表す。

※3: 限界効用弾性値(消費の限界効用の弾力性)とは、リスク回避の尺度、あるいは効用関数の曲率を表しており、効用関数が線形に近づくほど(限界効用が定数に近づくほど)、0に近づくことを意味している。

※4: ここでの修正RICEモデルとは、W.D.Nordhausにより開発されたRICEモデル(8地域)から日本を個別地域として分割したモデルである。

Ⅲ.成果の地球環境政策への貢献

本テーマは、地球環境政策オプション評価のための環境・資源・経済統合評価モデルの開発であり、そもそも地球環境政策へ貢献することを目的としている。政策シミュレーションを通じて費用対効果の高い政策オプションの優先順位を示す予定であり、地球環境政策への提言に大きく寄与することができる。また、各種温暖化影響の項目に関して経済評価（貨幣評価原単位の算出等）を行うことによって、他分野の経済評価において大きな貢献が可能である。

1） 地球環境に関係する個別分野における損害原単位に関して、第 1 に、既存研究の整理を行い、第 2 に、健康、干潟・砂浜、ブナ林・マツ林に関して日本における原単位並びに被害額の推定値を得た。第 3 に、防災分野（洪水、渇水、高潮、液状化）における経済評価のあり方を提示した。このことは、Stern Report や IPCC の報告書などの政策提言や経済評価が発表されたとき、その調査が採用している個別分野の損害額が従来の値と比較して著しく異なるものであるか否かを判断することが出来ることを示している。政策提案をする際にも、個別経済評価を必要とするものと思われるので、その損害値の妥当な信頼域を示すことが出来るようになる。

2） 本研究は、温暖化影響の貨幣評価原単位の作成を通じて、温暖化影響の経済評価を行うものである。この成果は、温暖化による環境水準の変化に関する経済評価のみならず、温暖化に対する「防止策」「緩和策」「適応策」などの温暖化対策による環境水準の変化に関する経済評価にも容易に応用することができる。そして、温暖化対策の有無比較による経済評価を通じて、温暖化対策の費用便益分析を行うことができる。したがって、本研究は経済効率的な温暖化対策の政策提言に貢献することができる。

3） 本研究は、日本を個別地域とした多地域動学的最適化モデルを用いて、社会的割引率の感度分析による時間選好率と限界効用弾性値の組み合わせに関する妥当性の検証、いくつかの意思決定基準を概説した上でそれら意思決定基準の全球及び日本の気候安定化政策への適用、および費用便益分析により各種提案されている政策シナリオの経済的評価を行うものである。本研究の分析結果から、妥当と考えられる社会的割引率、純粋時間選好率および限界効用弾性値が提示されたことは、温暖化対策に関する政策評価分析において、現在世代と将来世代との関係を考慮する上で 1 つの指針を与えることを示している。また、意思決定基準を適用したとしても、全球と地域とでは効率的な気候安定化政策が異なることが提示されたことは、温暖化対策に関する政策評価分析において、全球の議論だけではなく地域的な特性、あるいは政策の地域的な効果等を考慮する必要があることを示している。これらは、各地域の費用便益分析を行うことにより、全球レベルで合意され得る政策シナリオが地域的にどのような経済的影響を及ぼすか、あるいはそれが地域的に経済効率的であるか否かの判断基準として利用可能であることを示している。

4） 研究メンバーは、2008 年 5 月に発表された本戦略研究プロジェクトの中間成果発表である『地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－』の執筆に貢献している。

5） 研究メンバーが分担執筆した「森地茂、金本良嗣編『道路投資の便益評価』東洋経済新報社、2008」において、本研究成果を踏まえた数値や知見を引用し、地球温暖化分野だけでなく、土木計画学の分野においても地球温暖化問題の深刻さやその経済評価の重要性を示している。

6） 研究メンバーは、2008 年 10 月 26 日から 27 日に香港で英・Stern Team によって開催された「Regional Economics of Climate Change Workshop」に参加し、世界の地球温暖化研究者らとの議論を行い、最新の知見の収集だけでなく、わが国の地球環境施策の広報等に勤めている。

7） 研究メンバーは、2009 年 3 月 11 日に学士会館で行われた「第 1 回温暖化リスク・メディアフォーラム－IPCC 第 5 次報告書に向けた温暖化リスク研究－」に参加し、地球環境政策への提言等の広報・普及に努めている。

8） 研究メンバーが参画している「外部効果の計測手法に関する研究会(国土交通省道路局)」、世界道路会議道路経済学専門委員会、公共事業評価委員会(国土交通省、宮城県、岩手県)、IPCC 報告のレビューなどにおいて、本研究成果を踏まえた数値を提示し、国土政策のあり方に寄与する予定である。また、今後、様々な地球環境シンポジウムにおいて、本研究の成果の広報・普及に努めるものである。

IV.研究概要

1．序

本研究は、気候政策のマクロ的経済評価と温暖化影響のミクロ的経済評価に大別される。前者に関しては、温室効果ガスの排出とそれが経済活動に及ぼす影響を考慮したシステムが必要であり、また、地球環境問題の経済評価を行う際には、理論的、かつ比較的規模の小さいシステム構造を有する統合モデルを構築する必要がある。本研究が提案している環境・資源総合評価モデルは、理論的、かつ、比較的規模の小さいシステム構造を有することから操作性に長けており、他研究領域から提供される共通の気候シナリオや共通の影響評価指標をインプットとすることから、そのシミュレーションのプロセスにおいて透明性を担保できるという長所を有する。後者に関しては、個別分野の温暖化影響の経済評価を行う方法論の提示とその妥当性を示すために必要である。

２．研究目的

本研究は、大別して2つに分かれる。第1は「気候政策のマクロ的経済評価に関する研究」であり、第2は「温暖化影響のミクロ的経済評価に関する研究」である。

前者の目的は、日本を個別地域として扱った多地域動的最適化型モデルを構築し、それを用いることによって、GHG排出とそれを含む環境および経済活動に及ぼす影響や、費用便益分析の観点から各種政策の効果をマクロ的に評価することである。一方、後者の目的は、国内の個別影響分野における経済評価の支援、評価方法の提示、原単位の提供を行うことである。また、個別分野における経済手法の支援に関して、洪水、高潮、土砂災害、渇水の各分野に対しては方法の提示、生態、健康に対してはCVMによる原単位の提供、砂浜と干潟の喪失に対してはTCMとCVMによりその価値と喪失の損害額の計算を行うことを目的とする。

３．研究の方法

※H20年度より、研究体制が（１）気候政策のマクロ的経済評価に関する研究と（２）温暖化影響のミクロ的経済評価に関する研究とに変更となったため、H17年度からH19年度の結果に関しては、対応し得る限り、新体制での研究結果に組み込んで説明を行う。

（１）気候政策のマクロ的経済評価に関する研究

温暖化による被害の経済評価に関する既存研究の整理

・既存研究における貨幣評価原単位および損害関数に関するレビューを行い、整理した。

経済評価における割引率の設定

・Stern Reportの発表と関連するコメントより、マクロモデルにおけるパラメータと効用関数形に関して、純粋時間選好率は3%～0.5%、限界効用弾性値は1～2、消費の成長率は、0.5～1.5%の間で、 割引率（資本の機会費用）の値が3～5%であるような組み合わせが妥当であることを明らかにした。
・平成17年度調査において構築したモデルにおける経済モデルを世界的に著名なDICEモデルのタイプに変更した。損害関数の効用関数からの削除というDICEモデルのタイプへの変更に関して、本研究で開発したモデルの性質は、ロバスト(頑健的)であることが判明した。

多地域動的最適化モデルによる気候安定化政策の費用便益分析

・日本を個別地域とした修正RICEモデルを用いて、純粋時間選好率および消費の限界効用弾性値の組み合わせによる社会的割引率の感度分析および各種提案されている政策の費用便益分析を行った。
  １）世界全体で費用便益比が1を超えるシナリオは最適化シナリオのみであるものの、日本やヨーロッパといった先進地域では、最適化シナリオ以外にも比較的緩い制約下においては費用便益比が1を越えること
  ２）日本では最適化シナリオ、CO_2濃度650 ppm 安定化シナリオ、3.0℃安定化シナリオでは費用便益比が1を超えるため、これらの政策シナリオは経済効率的であるものの、実現するために莫大な費用を要すること
・S-4の各テーマにおける個別分野（健康、生態、米生産、洪水、渇水、高潮、海岸の砂浜と干潟、地震時の液状化現象への影響）の経済評価に対して、その考え方と適切な評価手法の提示をおこなった。
・不確実性下における意思決定問題について論点整理を行った上で、多地域動学的最適化モデル(日本を個別地域とした修正RICEモデル)によるシミュレーション分析を用いて、費用便益分析の観点から気候変動安定化シナリオの選択に意思決定基準の適用を行った。
  １）全球規模では、いずれの意思決定基準を用いても、CO_2濃度650ppmシナリオが選択される結果となることが示された。
  ２）日本への適用を行った分析では、多くの意思決定基準においてCO_2濃度650ppmシナリオが選択されるものの、より悲観的な立場を重視する意思決定基準を用いた場合には、より厳しいCO_2濃度550ppmシナリオが選択される結果となることが示された。
・これまでの分析で用いてきた多地域動学的最適化モデル(日本を個別地域とした修正RICEモデル)において、不確実性の大きい被害関数のパラメータに関する感度分析を行うことを目的とし、感度分析による気候安定化シナリオの費用便益分析を行った。ここでは、気温変化による生産への被害が2倍、4倍になるケースを想定した。また、本研究で用いた気候安定化シナリオは、①現在のCO_2排出削減費用とCO_2排出削減による将来の便益が等しくなるようなパレート最適経路を導出する最適化シナリオ、②大気中のCO_2濃度を450ppmに安定化する450ppm安定化シナリオ、③大気中のCO_2濃度を550ppmに安定化する550ppm安定化シナリオ、④大気中のCO_2濃度を650ppmに安定化する650ppm安定化シナリオ、の4つのシナリオを想定した。

（２）温暖化影響のミクロ的経済評価に関する研究

個別分野に関する経済評価手法の提示

・S-4における個別分野（健康、生態、米生産、洪水、渇水、高潮、海岸の砂浜と干潟、地震時の液状化現象への影響）の経済評価に対して、評価手法の提案を行った。

１）洪水への影響の経済評価：適応策のコストと期待被災額の上昇分

２）渇水、高潮、液状化への影響の経済評価：上記洪水と同様な手法である

３）健康、(生態)、干潟への影響の経済評価：仮想市場評価法CVM

４）砂浜：旅行費用法TCM

分野別コントロール・トータルの算出

・温暖化影響の項目を16分野に分類して、それぞれの分野毎に個別評価と全体評価の整合性を管理することを目的として、そのコントロール・トータルを算出するためにコンジョイント分析の適用を試みた。その結果、限界支払意思額は、472円/月（安全性）、464円/月（保健性）、259円/月（利便性）、285円/月（快適性）であることがわかった。

砂浜・干潟・健康に関する貨幣評価原単位の算出

・温暖化影響の項目を「砂浜の消失」「生態系を育む干潟の破壊」「熱中症の患者数の増加」「熱中症による死亡者数の増加」に限定して、これらの貨幣評価原単位を求めるためにTCM（旅行費用法）およびCVM（仮想市場評価法）の適用を試みた。その結果、砂浜の貨幣評価原単位は8,456円/㎡、干潟の貨幣評価原単位は9,655円/㎡、熱中症に対する健康の貨幣評価原単位は50～280万円/年/人、熱中症に対する生命の貨幣評価原単位は9,356～48,400万円/年/人であることがわかった。

旅行費用法(TCM)による砂浜・干潟の経済的価値

・平成18年度に評価した「砂浜の価値」と「干潟の価値」を精査し、TCMを適用して再評価した。その結果、砂浜のレクリエーション価値は、砂浜利用一回あたりでは2,179円/回、日本全国では922億円/年（現在価値23,046億円）と評価された。また、砂浜の貨幣評価原単位は全国平均で12,058円/㎡であることがわかった。さらに、30cm、65cm、100cmの海面上昇によって消失する砂浜の価値は、それぞれ522億円/年（現在価値13,044億円）、753億円/年（同18,829億円）、832億円/年（同20,811億円）と推計された。一方、干潟のレクリエーション価値は、干潟利用一回あたりでは2,099円/回、日本全国では47億円/年（現在価値1,175億円）と評価された。また、干潟の貨幣評価原単位は、平成18年度にCVMで評価した生物多様性維持の価値と合わせて、全国平均で9,885円/㎡であることがわかった。

仮想評価法(CVM)による健康・生命・ブナ林の経済的価値

・平成18年度に評価した「健康の価値」と「生命の価値」を精査し、再評価するとともに、新たに「ブナ林の価値」を評価した。これらの評価にはCVMを適用した。その結果、熱中症患者数や熱中症死亡者数の増加による被害額を疾病リスクや死亡リスクの変化量の関数で表現することが可能となった。また、VSH（統計的健康価値）は93.7～104.9万円、VSL（統計的生命価値）は0.902～1.055億円と推計された。一方、ブナ林の衰退面積を説明変数とする被害費用関数を導出した。また、ブナ林の貨幣評価原単位は213～340円/m^2と推計された。

気候安定化シナリオによる被害コストの計測

・平成20年度に評価した「熱中症防止」と「ブナ林保全」の貨幣評価原単位を用いて、3つのGHG濃度安定化シナリオ（①450sシナリオ：GHG濃度450ppm安定化シナリオ、②550sシナリオ：GHG濃度550ppm安定化シナリオ、③BaUシナリオ：なりゆきシナリオ）における「熱中症」および「ブナ林」の被害コストを計測した。また、CVMを適用して、「マツ林の価値」と「砂浜の価値」を評価した。その結果、低いGHG濃度で安定化させるほど被害コストを低く押さえられることがわかった。また、マツ林と砂浜の貨幣評価原単位は、それぞれ171.0～314.9円/㎡および5,103～41,408円/㎡と推計された。

４．結果及び考察

平成21年度において、サブテーマ（1）では、修正RICEモデルを用いて感度分析による気候安定化シナリオの費用便益分析を行った。その結果、以下の知見を得た。

１）世界全体の費用便益比を見ると、現状シナリオにおける被害の大きさの場合、最適化シナリオのみ費用便益比(B/C)が1を超えるが、被害が大きくなるに従い、最適化シナリオ以外の気候安定化シナリオも効率的(B/C>1)となることが分かった。一方、各地域の費用便益比を見ると、世界全体の場合と同様に被害が大きくなるに従い、 最適化シナリオ以外の気候安定化シナリオでも効率的な地域が増える。さらに、被害の大きさが4倍の場合、日本やヨーロッパにおいては極めて厳しい制約である450ppm安定化シナリオさえ効率的となることが示された。

２）2020年における炭素税の価格は、いずれのシナリオにおいても被害が大きくなるほど高くな

ると考えられる。また、2020年に1990年比25%(2005年比約30%)のCO_2排出削減を達成するため、つまり本研究における450ppm安定化シナリオを達成するためには、被害の大きさによって15,000円/tCより高い炭素税が必要であることが分かった。

3）日本のCO_2排出量に関して、各安定化シナリオを達成するための排出経路は、気温変化による被害が変化したとしても、ほとんど変化はないと考えられる。しかしながら、費用便益分析の観点から、2020年までに1990年比25%(2005年比約30%)のCO_2排出削減目標を達成することは極めて厳しいものの、1990年比8%(2005年比15%)のCO_2排出削減目標の達成は最適化シナリオ、650ppm安定化シナリオ、550ppm安定化シナリオにおいては妥当であることが示された。

サブテーマ（２）では、「熱中症防止」「ブナ林保全」「マツ林保全」「砂浜保全」の貨幣評価原単位をCVM（仮想市場評価法）により推計した。その結果、以下の知見が得られた。

1）平成20年度に整理した「熱中症防止」および「ブナ林保全」の貨幣評価原単位を精査し、熱中症による死亡を防止することの便益は0.902～1.055億円/人、ブナ林を保全することの便益は213.0～339.6円/㎡であることを再確認した。そして、3つのGHG濃度安定化シナリオ(①450sシナリオ：GHG濃度450ppm安定化シナリオ、②550sシナリオ：GHG濃度550ppm安定化シナリオ、③BaUシナリオ：なりゆきシナリオ）における「熱中症」および「ブナ林」の被害コストを計測した。その結果、低いGHG濃度で安定化させるほど被害コストを低く押さえられることがわかった。また、各シナリオ(450s、550s、BaUシナリオ)における熱中症被害コストの全国平均は、今世紀中頃にはそれぞれ373億円/年、480億円/年、529億円/年、さらに今世紀末にはそれぞれ501億円/年、775億円/年、1,192億円/年に達すると見込まれることがわかった。一方、ブナ林被害コストの全国平均は、今世紀中頃にはそれぞれ1,034億円/年、1,273億円/年、1,381億円/年、さらに今世紀末にはそれぞれ1,325億円/年、1,811億円/年、2,324億円/年に達すると見込まれることがわかった。

2）「マツ林保全」および「砂浜保全」の貨幣評価原単位を推計するために、全国の成人男女を対象にして、インターネット利用のアンケート調査を実施した。本調査では1,187件の回答が得られた。アンケート票の質問内容は以下のとおりである。問１）地球温暖化の問題に対する関心度、問２）マツ林の各種機能（国土保全機能、保健休養機能、地域振興機能）に対する関心度、問３）マツ林の衰退に対する関心度、問４）マツ林の衰退を回避するための支払意思額、問５）砂浜の各種機能（レクリエーション機能、生物多様性維持機能、地域振興機能）に対する関心度、問６）砂浜の消失に対する関心度、問７）砂浜の消失を回避するための支払意思額。このデータを分析した結果、「マツ林保全」および「砂浜保全」の貨幣評価原単位は、それぞれ171.0～314.9円/㎡および5,103～41,408円/㎡と推計された。なお、砂浜については、平成21年度にTCM（旅行費用法）によりレクリエーション価値のみを推計し、12,058円/㎡という結果を得ている。今回の結果は「砂浜のレクリエーション機能・生物多様性維持機能・地域振興機能の価値の合計＝41,408円/㎡（100%の消失を回避するケース：平成21年度における推計時の設定）」であるので、平成21年度の結果と整合している。

最後に、研究期間を通じて、本研究で得られた成果をまとめる。第1に、本テーマにおける各サブテーマに共通することは、S-4の各テーマにおける個別分野（健康、生態、米生産、洪水、渇水、高潮、海岸の砂浜と干潟、地震時の液状化現象への影響）の経済評価に対して、評価手法の考え方と適切な手法の提案を行うことにより、S-4全体の経済評価が理論的整合性を保って行われるようになったことである。第2に、サブテーマ（１）では、日本を個別地域とした修正RICEモデルによる政策シミュレーション分析から、全球レベル及び地域レベルにおいて、費用便益分析の観点から効率的な気候安定化政策が異なることが提示されたことは、温暖化対策に関する政策評価分析において、全球の議論だけではなく地域的な特性、あるいは政策の地域的な効果等を考慮する必要があることを示している。第3に、サブテーマ（２）では、温暖化影響の経済評価に関する研究蓄積が少ないという日本の現状において、地球温暖化対策としての「熱中症防止」、「ブナ林保全」、「マツ林保全」、「砂浜保全」、「干潟保全」に関する貨幣評価原単位をCVM（仮想市場評価法）およびTCM（旅行費用法）により推計したことは、他分野の経済評価においても大きな貢献が可能であることを示している。

５．研究者略歴

課題代表者：林山泰久

1962年生まれ、東京工業大学大学院卒業、博士（工学）、現在、東北大学大学院経済学研究科教授

研究参画者

（１）１）：林山泰久　（同上）

２）：森杉壽芳

1943年生まれ、ペンシルバニア大学大学院卒業、工学博士、現在、東北大学大学院経済学研究科特任教授

３）：中嶌一憲

1975年生まれ、東北大学大学院単位取得退学、博士（経済学）、現在、東北大学大学院生命科学研究科助教

４）：吉本敦史

1961年生まれ、オレゴン州立大学大学院卒業、Ph.D.、現在、統計数理研究所数理・推論系教授

（２）１）：大野栄治

1960生まれ、岐阜大学大学院卒業、博士（工学）、現在、名城大学都市情報学部教授

２）：森杉雅史

1970生まれ、名古屋大学大学院卒業、博士（工学）、現在、名城大学都市情報学部准教授

６．成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1)査読付き論文

1) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳：地球温暖化問題におけるカタストロフ・リスクによる長期的影響：動学モデルの数値解析による均衡解の性質，環境システム研究全文審査部門論文，No.34，pp.123-134，(2006).
2) 大野栄治：地球温暖化に伴う住環境変化の経済評価－コンジョイント分析によるアプローチー，地球環境，Vol.11，No.1，pp.95-102，(2006).
Ohno, E.：Economic Evaluation of Residential Environment Change Associated with Global Warming, Approached by Conjoint Analysis , Global Environmental Research, Vol. 10, No.2, pp.227-233, (2006).
3) Yoshimoto, A. and Marus ak, R.：Evaluation of Carbon Sequestration and Thinning Regimes within the Optimization Framework for Forest Stand Management, European Journal of Forest Research 126(2), pp.315-329, (2007).
4) Morisugi, H. and Leurent, F.：Cost benefit analysis using benefit incidence table for a transport policy with pricing - the case of the London pricing scheme, Routes/Roads, No.336/337, pp.58-63, (2007).
5) Kono, T., Morisugi, H. and Miyahara, F.：Congestion Deterioration and Transportation Project Evaluation, Annals of Regional Science, Vol.41, No.1, pp.145-170, (2007).
6) 河野達仁，宮原史，森杉壽芳：誘発交通による混雑悪化の可能性と公共投資のパラドックス，土木学会論文集D，pp.524-535，(2007).
7) 山田淳大・大野栄治：年間WTPと生涯WTPの違いに基づく割引率の計測，土木計画学研究・論文集，Vol.24，No.1，pp.149-156，(2007).
8) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳，大野栄治：「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用，環境システム研究論文集，Vol.36，pp.69-78，(2008).
9) 森杉壽芳，岡松明良，河野達仁：個人の防災投資行動の観察に基づく防災プロジェクトの便益計測の可能性，土木学会論文集D，Vol.64，No.3，pp.421-431，(2008).
10) 大野栄治，佐尾博志：CVMとTCMによる干潟の経済価値の計測，環境システム研究論文集，No.36，pp.333-341，(2008).
11) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲：地球温暖化による熱中症死亡リスクの経済評価―CVMによるVSLの計測―，地球環境研究論文集，Vol.17，pp.183-192，(2009).
12) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳：地球温暖化のマクロ的経済評価の系譜と知見，地球環境，Vol.14，No.2，pp.299-307，(2009).
13) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲：干潟・ブナ林の生物多様性維持機能の経済評価:

CVMによるアプローチ，地球環境，Vol.14，No.2，pp.285-290，(2009).
14) 大野栄治，森杉壽芳，林山泰久，野原克仁：地球温暖化による砂浜消失の経済評価：旅行費用法によるアプローチ，地球環境，Vol.14，No.2，pp.291-297，(2009).
15) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲，佐尾博志：CVMによるブナ林の経済価値の計測，環境システム研究論文集Vol.37，pp.283-290，(2009).

(2)査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

1) Yoshimoto, A.：Carbon Pricing through Subsidy Payment for Thinning Activities in Japan，Scandinavian Forest Economics，Vol.41，pp.415-427，(2006).

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２.影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－６地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデルの開発に関する研究

（１）気候政策のマクロ的経済評価に関する研究（H20年度からH21年度）

旧１）政策シミュレーションとその評価に関する研究（平成17年度からH19年度）

※H20年度の研究体制再編に伴い、H20年度から(1)へ統合

東北大学

大学院経済学研究科　林山泰久

大学院経済学研究科　森杉壽芳

大学院生命科学研究科　中嶌一憲（平成20～21年度）

統計数理研究所

数理・推論系　吉本敦

平成17～21年度合計予算額　16,250千円

（うち、平成21年度予算額　5,201千円）

※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］本研究の目的は、日本を個別地域として扱った多地域動的最適化モデルを構築し、温室効果ガス排出が環境および経済活動に及ぼす影響について、費用便益分析の観点から気候安定化政策シナリオをマクロ経済的に評価することである。また、S-4全体で理論的整合性を保った経済評価を行うために、各サブテーマにおける個別分野の経済評価に対して、経済評価手法の整理及び評価手法の提案を行うことを目的とする。

まず、政策評価のための基礎的研究として、温暖化の被害評価に関する既存研究のレビューから、温暖化影響項目毎の貨幣評価原単位を整理した。また、割引率に関するレビューにより、現実を反映するようなマクロ経済成長モデルの割引率が3%から5%の範囲にあるような純粋時間選好率と限界効用弾性値の組み合わせが妥当であることが示された。さらに、個別分野の経済評価に対して、適切な経済評価手法の提案を行った。

次に、既存研究からの知見を踏まえて、多地域動学的最適化モデルを構築し、気候安定化政策シナリオの費用便益分析を行った。その結果、意思決定基準を用いて気候安定化シナリオの評価を行った場合、全球規模ではいずれの意思決定基準を用いても最も緩い政策シナリオが選択されるのに対して、日本ではより悲観的な立場を重視する意思決定基準が用いられることによって、より厳しい政策シナリオが選択される結果となることが示された。また、被害関数に関する感度分析からは、被害が大きくなるほど、日本や欧州ではより厳しい気候安定化シナリオさえも効率的になることが示された。

［キーワード］温暖化被害評価の分析手法、温暖化被害関数、市場的被害・非市場的被害、費用便益分析、多地域動学的最適化モデル

１．はじめに

元来、地球温暖化問題を解決する政策として緩和措置と適応措置が議論されてきた。特に、適応措置は緩和措置に比べて取り組みが遅れていたものの、その重要性に対する認識が高まっている。この理由は、温室効果ガス(以下、GHG)削減努力を最大限行ったとしても地球温暖化を完全に抑制することは不可能であるため、何らかの影響の発現は免れえず、特に、その影響は適応能力の小さい途上国で早い時期に顕在化する可能性があることが示され、途上国の適応能力を向上させるための取り組みが緊急課題であるということが多くの政策立案者に理解されるようになったことであろう。さらに、事前に計画的に適応措置を実施することにより、地球温暖化の影響が発現した後の事後対処的な適応措置のみを施す場合に比べて、影響被害額と適応対策費の総和を抑えることが可能な場合が生じることや、地球温暖化を予測した長期の計画的な適応措置が副次効果的に現在の異常気象災害のリスクを軽減する場合が多いであろうと認知されてきたことも、適応措置に注目が集まった要因である。例えば、地球温暖化の影響の一つとして、海面上昇による高波被害の増加が懸念される海岸地域の住宅地開発の是非という政策を考えた場合、海面上昇のことを考慮せずに開発し、将来に海面上昇による高波被害の増加に直面してからの防波堤等の建設による被害の軽減を図るという事後的な適応措置よりも、将来において予測される海面上昇を考慮して高波被害の増加が懸念される地域については開発の対象とはせず、より立地条件の好ましい地域を探すという事前計画的な適応の方が、総費用で見た場合に有利な場合があろう。また、同じ地域において開発する場合においても、将来の海面上昇による高波被害の増加を見越して、早期から防波堤建設を実施することで、現状における台風等により引き起こされる高波被害の頻度や規模も同時に軽減することが可能であり、適応措置の検討にあたってはその効果も含めて考える必要があろう。したがって、地球温暖化問題の政策分析において、GHG排出が環境や資源および経済活動に及ぼす影響についてマクロ的かつミクロ的な経済評価を行うことは緊急課題であると考えられる。それゆえ、本研究はGHG排出が経済活動に及ぼす影響を考慮したシステムを構築し、各種温暖化対策の効果の経済評価を行う。

なお、本研究課題は、平成19年度に実施された中間評価における審査員からのコメントを反映し、平成17－19年度に作成した研究計画を変更する必要があったことを付記する。

２．研究目的

本研究の目的は、戦略研究プロジェクト(S-4)の主目的である「地球温暖化の影響の危険な水準および安定化濃度の科学的検討を行うために、統合的な研究アプローチを行う」ということに対して、日本を個別地域として扱った多地域動的最適化モデルを構築し、それを用いることによって、GHG排出が環境および経済活動に及ぼす影響や、様々な温暖化対策の効果を、費用便益分析の観点からマクロ経済的に評価することである。本研究の目的は以下の3点に要約される。(1) 温暖化による被害の経済評価に関する既存研究の整理、(2) 経済評価における割引率の設定、(3) 多地域動的最適化モデルによる気候安定化政策の費用便益分析。

３．研究方法

（１）温暖化による被害の経済評価に関する既存研究の整理

近年、温暖化の危険な水準に関する議論に焦点が当てられているが、これまでの温暖化研究で

は、この問題に対して具体的な数値を議論してこなかった。具体的な数値を議論するためには、温暖化による被害を評価しなければならないが、既存研究においては温暖化による被害を推定するものの、この被害を評価するための分析手法や計測方法に関して多くの問題点を残している。また、温暖化影響の経済活動へのフィードバックを如何に設定するかによって、将来の結果や政策オプションの評価が異なるため、被害関数の定式化や温暖化影響項目毎の貨幣評価原単位の算出は重要な議論の焦点となる。そこで、本研究ではこれまでの温暖化被害の経済的評価に関する研究蓄積を整理することによって、その知見と論点を明らかにする。

（２）経済評価における割引率の設定

地球温暖化が超長期に渡る問題であることから、長期的な被害や費用を現在価値換算する場合に、如何なる割引率を設定するかということは極めて重要であると同時に多くの議論を引き起こす。一方、経済評価で用いられる割引率は、マクロ経済学における最適成長モデルの枠組みを用いることにより、純粋時間選好率、消費に関する限界効用弾性値、そして1人当たり消費の成長率の組み合わせから求めることができる。しかしながら、割引率の設定に関して客観的に認められ得る値が存在せず、未だ論争は続いている。例えば、Stern(2006)[1]によって発表されたStern Reviewでは、極めて小さな割引率が用いられたことから、Nordhaus(2007)[2]やTol(2006)[3]らがこれに対して反論したことが有名である。このように割引率の設定に関しては被害や費用の現在価値換算や温暖化対策の経済評価において極めて重要であるため、本研究では既存研究のレビューを通じて、現実を反映し得るような割引率の在り方を示すとともに、マクロ経済モデルの構築に際して妥当と考え得る特定化の方向性を示す。

（３）多地域動的最適化モデルによる気候安定化政策の費用便益分析

本研究では、サブサブテーマ（３）で構築した日本を個別地域として扱った修正RICEモデル(多地域動学的最適化モデル)を用いることにより、不確実性下での意思決定基準を用いた政策評価、被害関数の感度分析及び気候安定化シナリオの費用便益分析を行う。

４．結果・考察

（１）温暖化による被害の経済評価に関する既存研究の整理

本研究において、既存研究のレビューを通じて得られた知見を簡単に以下にまとめる。なお、温暖化の被害に関するレビューの詳細については、中嶌ら(2009)[4]を参照されたい。

① 対象とする温暖化の被害項目は、モデル毎に異なる。多くの既存研究がいくつかの被害項目、あるいは被害項目を集約化した形でしか扱っておらず、全ての被害項目を包括的に扱った既存研究はないと考えられる。

② これまでの多くの被害関数において、その形状は2次多項式であり、変数には産業革命や1990年水準からの気温変化の水準が用いられているが、気候変動への適応速度や被害からの回復を表現するために、変数に気温変化の割合を考慮する必要性が高まっている。

③ 温暖化に対する脆弱性は地域毎に大きく異なり、途上国は先進国よりも大きい被害を被る。緩やかな温暖化(2～3℃上昇まで)では地域的に正と負の影響が生じるが、急激な温暖化(3℃以上の上昇)では、ほとんど全ての地域で負の影響が生じると予想される。

温暖化の経済評価に関する課題としては、時間的・空間的解像度の粗さ、あるいは途上国の脆弱性に関する情報不足及び地域に関する情報不足、社会変化の全ての段階において行動的・技術的・制度的な調整が必要である適応策の問題、異なる影響項目ごとの水平的関連性の問題が未だ存在する。また、気候変動に対する社会経済の脆弱性や極端な気象(洪水、熱波・寒波、台風、カタストロフ等)に焦点が置かれ始めているものの、現在から将来に渡って変化する脆弱性のダイナミクスを表現したモデルは未だ開発されていない。

（２）経済評価における割引率の設定

経済評価で用いられる割引率の考え方を以下に示す。最適成長モデルの枠組みおいては、人口を1と基準化し、1人当たりの消費の成長率が一定となる定常状態において式(1)が成り立つことが知られている。

$$r^* = \rho + \alpha g^* \quad (1)$$

ここでr^*は定常状態における資本収益率(実質利子率)、ρは純粋時間選好率(PRTP:Pure Rate of Time Preference)、αは消費に関する限界効用の弾力性(Elasticity of Marginal Utility of Consumption)、g^*は定常状態における1人あたり消費の成長率をそれぞれ表す。この枠組みにおいて、Stern Review[1)]では、消費の成長率が1.3%という仮定の下、ρ=0.1%、α=1の組み合わせからr^*=1.4%という極めて小さい割引率が用いられた。この結果に対するNordhaus(2007)[2)]のコメントから、純粋時間選好率と限界効用の消費弾力性との組み合わせについて、以下の知見が得られた。

① マクロモデル構築において、純粋時間選好率としては、3%から1%に300年かけて減少させるケースと2%から0.5%に300年かけて減少させるケースの2ケースを想定すればよい。
② 限界効用弾性値については、資本の収益率の公式が合うように設定する必要があり、1～2の間で感度分析を行うことが妥当である。
③ 消費の成長率については、0.5～1.5%の間で感度分析を行うことが妥当である。
④ 以上の要素の組み合わせとして上記の公式を用いた割引率(資本の機会費用)の値が3～5%であるように選択を行う。
⑤ 死亡確率+1%、カタストロフィ+0.1%程度、次世代遺産-0.3%程度 を考慮する必要がある。このときには、純粋時間選好率に+0.8%を加えることになるが、死亡確率と次世代遺産がすでに考慮されている場合には、カタストロフィ+0.1%程度を加えることになる。

以上のように割引率の設定の問題において、PRTPや限界効用弾性値の値に関して客観的に認められ得る指標が存在せず、未だ論争が続いている。しかしながら、わが国を含めた多くの先進国が公共事業評価において4%前後の社会的割引率を用いていることや、IPCC(2007)[5)]において多くの温暖化研究で用いられる割引率は3%から10%の範囲内であり、特に多くの研究が低い範囲の値を採用している。また、英国では将来の不確実性を根拠に、30年以上先については時間逓減的に小さくなるような低い社会的割引率を用いることを推奨している。

（３）多地域動的最適化モデルによる気候安定化政策の費用便益分析

1）不確実性下における意思決定基準の政策評価への適用

本研究では、不確実性下における意思決定問題について論点整理を行った上で、費用便益分析の観点から気候安定化シナリオの選択に意思決定基準の適用を試みた。ここでは、意思決定基準

として、以下の4つの基準を想定した。なお、意思決定問題の論点及び意思決定基準に関する詳細は中嶌ら(2008)[6]を参照されたい。

ラプラス基準(Laplace Principle)

ラプラス基準とは、各シナリオが発生する確率を等確率と考え、期待値を最大にする代替案を選択するというものである。これは、シナリオの何れかが、他より大きい(あるいは、小さい)確率を有するという十分な理由が無いときには、全てのシナリオは同じ確率で発生するという仮定からなる(不十分理由の原則)。しかしながら、ラプラス基準は、意思決定者が勝手な確率分布を想定するという問題点を有している。

マキシミン(マックスミニ、ワルド)基準

マキシミン基準(Max-Min Principle)とは、最も悲観的な立場に立った基準であり、この場合には、シナリオは代替案の選択に対してその結果が最悪となるような状態となることを意味している。また、利得が負値(損害や被害)の場合には、最悪の中で最善の結果を求めるという意味で、ミニマックス(Min-Max)基準となる。逆に、最も楽観的な立場に立った基準としてマキシマックス(サベージ)基準(Max-Max Principle)がある。しかしながら、マキシミン基準およびマキシマックス基準は、各代替案に対して、たった一つの最悪値、あるいは、最良値しか考慮されないことが問題点である。

フルビッツ(ハービッツ)基準

フルビッツ基準(Hurwicz Principle)とは、楽観度を示すパラメータ $\theta(0 \le \theta \le 1)$ を用いて悲観的立場 $(\theta = 0)$ と楽観的立場 $(\theta = 1)$ にウェイトを付けた基準である。しかしながら、θ は恣意的に決定せざるを得ない、あるいは、その根拠が無いことが問題点である。

ミニマックス損失基準

ミニマックス損失基準(Min-Max Regret Principle)とは、もし、あるシナリオの状態が真(最も利得が高いシナリオ)であることを知っていれば選択した利得(得られる利得)を、知らなかったために別の選択をしたことによって生じる損失基準である。しかしながら、ミニマックス損失基準は、機会損失の値が他の代替案の利得に依存することから、新たな代替案を考慮すると代替案の優劣順序が変化することが問題点である。

上述した意思決定基準を用いて気候安定化シナリオの評価を行うことにより、本研究で得られた結果を以下にまとめる。なお、参考として表－1に日本における意思決定基準を示す。

① 全球規模では、いずれの意思決定基準を用いても、CO_2濃度650ppmシナリオが選択される結果となることが示された。

② 日本への適用を行った分析では、多くの意思決定基準においてCO_2濃度650ppmシナリオが選択されるものの、より悲観的な立場を重視する意思決定基準を用いた場合には、より厳しいCO_2濃度550ppmシナリオが選択される結果となることが示された。

表－1　日本における意思決定基準

	ラプラス	マキシミン		フルビッツ		ミニマックス
		Max(Min w_{ij})	Max(Max w_{ij})	α =0.3	α =0.01	
C350 case	0.139	0.032	0.249	0.097	0.034	2.951
C450 case	0.538	0.445	0.648	0.506	0.448	2.553
C550 case	1.193	1.087	1.302	1.151	1.089	1.899
C650 case	2.073	0.909	3.201	1.596	0.932	0.317

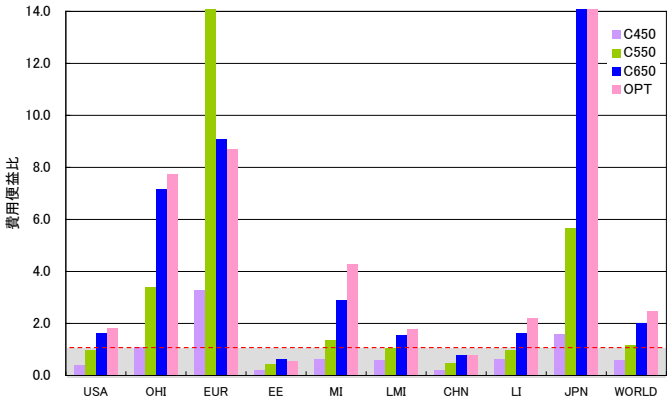
2) 被害関数に関する感度分析

本研究では、不確実性の大きい被害関数のパラメータに関する感度分析及び感度分析による気候安定化シナリオの費用便益分析を行った。ここでは、気温変化による生産への被害が2倍、4倍になるケースを想定した。以下に本研究で得られた結果を示す。なお、参考として図－1及び図－2は4倍被害時における各地域の費用便益比及び日本のCO_2排出量を示す。

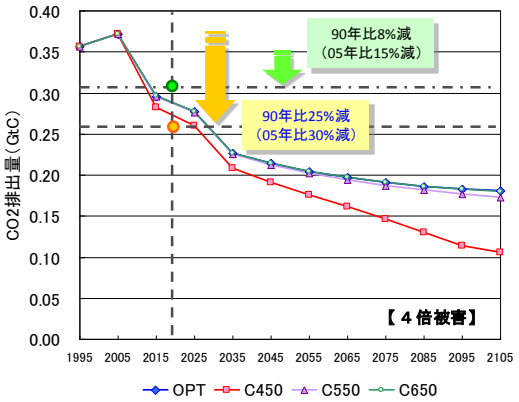
① 世界全体の費用便益比を見ると、現状シナリオにおける被害の大きさの場合、最適化シナリオのみ費用便益比(B/C)が1を超えるが、被害の大きさが大きくなるに従い、最適化シナリオ以外の気候安定化シナリオも効率的(B/C>1)となることが分かった。一方、各地域の費用便益比を見ると、世界全体の場合と同様に被害の大きさが大きくなるに従い、最適化シナリオ以外の気候安定化シナリオでも効率的な地域が増える。さらに、被害の大きさが4倍の場合、日本やヨーロッパにおいては極めて厳しい制約である450ppm安定化シナリオさえ効率的となることが示された。

② 2020年における炭素税の価格は、いずれのシナリオにおいても被害の大きさが大きくなるほど高くなると考えられる。また、2020年に1990年比25%(2005年比約30%)のCO_2排出削減を達成するためには、つまり本研究における450ppm安定化シナリオを達成するためには、被害の大きさによって15,000円/tCより高い炭素税が必要であることが分かった。

③ 日本のCO_2排出量に関して、各安定化シナリオを達成するための排出経路は、気温変化による被害が変化したとしても、ほとんど変化はないと考えられる。しかしながら、費用便益分析の観点から、2020年までに1990年比25%(2005年比約30%)のCO_2排出削減目標を達成することは極めて厳しいものの、1990年比8%(2005年比15%)のCO_2排出削減目標の達成は最適化シナリオ、650ppm安定化シナリオ、550ppm安定化シナリオにおいては妥当であることが示された。



図－1　4倍被害における各地域の費用便益比



図－2 4倍被害における日本のCO_2排出経路

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究では、まず政策オプションを検討するために、既存研究における損害関数に関するレビューを行い、現在得られている値を整理することが出来た。また、現実を反映するようなマクロ経済成長モデルの時間選好率の値と効用関数形のあり方を提示できた。これは、マクロモデルの構築に対して妥当な特定化の方向性を示したことになる。さらに、S-4の各テーマにおける個別分野の経済評価に対して、経済評価手法の整理及び評価手法の提案を行うことにより、S-4全体で理論的整合性を保った経済評価を行うことができるようになった。次に、日本を個別地域とした修正RICEモデルによるシミュレーション分析を用いて、いくつかの意思決定基準の概説を行っている。これによって、いくつかの気候安定化政策シナリオの意思決定基準に基づいた評価が可能であることが確認できる。また、費用便益分析の観点から評価を行うことにより、全球だけでなく地域ごとに費用対効果の高い政策オプションの優先順位を示すことが可能となっている。特に、地域ごとの費用便益評価が算出可能であるということの科学的意義は高い。

（２）地球環境政策への貢献

本研究は、地球環境政策オプション評価のための環境・資源・経済統合評価モデルの開発であり、地球環境政策へ貢献することを目的としている。政策シミュレーションを通じて費用対効果の高い政策オプションの優先順位を示すことにより、地球環境政策への提言に大きく寄与することができる。

① 地球環境が与える個別分野における損害原単位に関して、第1に、既存研究の整理を行った。第2に、防災分野（洪水、渇水、高潮、液状化）における経済評価のあり方を提示した。このことは、Stern Report やIPCCの報告書などの政策提言や経済評価が発表されたとき、その調査が採用している個別分野の損害額が従来の値と比較して著しく異なるものであるか否かを判断することが出来ることを示している。政策提案をする際にも、個別経済評価を必要とするものと思われるので、その損害値の妥当な信頼域を示すことが出来るようになる。

② 本研究は、温暖化対策の有無比較による経済評価を通じて、温暖化対策の費用便益分析を行うため、経済効率的な温暖化対策の政策提言に貢献することができる。

③研究メンバーは、2008年5月に発表された本戦略研究プロジェクトの中間成果発表である『地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－』、2009年5月に発表された『地球温暖化「日本への影響」-長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価-』そして2009年に特集号として発表された『地球環境、Vol.14、No.2、地球温暖化-日本における影響の統合評価』の執筆に貢献している。

④研究メンバーが分担執筆した「森地茂、金本良嗣編『道路投資の便益評価』東洋経済新報社、2008」において、本研究成果を踏まえた数値や知見を引用し、地球温暖化分野だけでなく土木計画学の分野においても地球温暖化問題の深刻さやその経済評価の重要性を示している。

⑤研究メンバーは、2009年3月11日に学士会館で行われた「第1回温暖化リスク・メディアフォーラム－IPCC第5次報告書に向けた温暖化リスク研究－」に参加し、地球環境政策への提言等の広報・普及に努めている。

⑥研究メンバーが参画している「外部効果の計測手法に関する研究会(国土交通省道路局)」、世界道路会議道路経済学専門委員会、公共事業評価委員会(国土交通省、宮城県、岩手県)、IPCC報告のレビューなどにおいて、本研究成果を踏まえた数値を提示し、国土政策のあり方に寄与する予定である。また、今後、様々な地球環境シンポジウムにおいて、本研究の成果の広報・普及に努めるものである。

６．引用文献

1) Stern, N.: The Economics of Climate Change : The Stern Review, Cambridge University Press, (2006).

2) Nordhaus, W.D.: A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change, Journal of Economic Literature, XLV, pp.686-702, (2007).

3) Tol, R.S.J.: The Stern Review of the Economics of Climate Change : A Comment, Energy & Environment 17(6), pp.977-981, (2006).

4) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳：地球温暖化のマクロ的経済評価の系譜と知見，地球環境，Vol.14, No.2, pp.299-307, (2009).

5) IPCC: Climate Change 2007 : Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, (2007).

6) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳，大野栄治：「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用，環境システム研究論文集，Vol.36, pp.69-78, (2008).

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) Morisugi, H. and Leurent, F. : Cost benefit analysis using benefit incidence table for a transport policy with pricing　- the case of the London pricing scheme, Routes/Roads,

No.336/337, pp.58-63, (2007).
2) Kono, T., Morisugi, H. and Miyahara, F. : Congestion Deterioration and Transportation Project Evaluation, Annals of Regional Science, Vol.41, No.1, pp.145-170, (2007).
3) 河野達仁, 宮原史, 森杉壽芳:誘発交通による混雑悪化の可能性と公共投資のパラドックス, 土木学会論文集D, pp.524-535, (2007).
4) 森杉壽芳, 岡松明良, 河野達仁：個人の防災投資行動の観察に基づく防災プロジェクトの便益計測の可能性, 土木学会論文集D, Vol.64, No.3, pp.421-431, (2008).
5) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲: 地球温暖化による熱中症死亡リスクの経済評価: CVMによるVSLの計測, 地球環境研究論文集, Vol.17, pp.183-192, (2009).
6) 中嶌一憲, 林山泰久, 森杉壽芳：地球温暖化のマクロ的経済評価の系譜と知見, 地球環境, Vol.14, No.2, pp.299-307, (2009).
7) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲：干潟・ブナ林の生物多様性維持機能の経済評価: CVMによるアプローチ, 地球環境, Vol.14, No.2, pp.285-290, (2009).
8) 大野栄治, 森杉壽芳, 林山泰久, 野原克仁：地球温暖化による砂浜消失の経済評価：旅行費用法によるアプローチ, 地球環境, Vol.14, No.2, pp.291-297, (2009).
9) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲, 佐尾博志：CVMによるブナ林の経済価値の計測, 環境システム研究論文集Vol.37, pp.283-290, (2009).

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

特に記載すべき事項はない。

〈その他誌上発表（査読なし）〉

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会）

1) 林山泰久, 菊池愛美, 中嶌一憲：途上国における環境クズネッツ曲線の成立可能性, 第17回地球環境シンポジウム, (2009).
2) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲：地球温暖化による熱中症死亡リスクの経済評価―CVMによるVSLの計測―, 第17回地球環境シンポジウム, (2009).
3) 中嶌一憲, 肱岡靖明：温暖化による日本の被害コストについて, 環境経済政策学会2009年大会, (2009).
4) 大野栄治, 林山泰久, 森杉壽芳, 中嶌一憲, 佐尾博志：CVMによるブナ林の経済価値の計測, 第37回環境システム研究論文発表会, (2009).

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２.影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－６地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデルの開発に関する研究

（１）気候政策のマクロ的経済評価に関する研究（H20年度からH21年度）

旧２)環境・経済評価モデルの開発に関する研究（H17年度からH19年度）

※H20年度の研究体制再編に伴い、H20年度から(1)へ統合

東北大学

大学院経済学研究科　林山泰久

大学院経済学研究科　秋田次郎

平成17～19年度合計予算額　9,750千円

※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］本研究の目的は、日本を個別地域として扱った多地域動的最適化モデルを構築し、温室効果ガス排出が環境および経済活動に及ぼす影響について、費用便益分析の観点から気候安定化政策シナリオをマクロ経済的に評価することである。

本研究では、既存研究からの知見を踏まえて、多地域動学的最適化モデルを構築し、純粋時間選好率および消費の限界効用弾性値の組み合わせによる社会的割引率の感度分析および気候安定化政策シナリオの費用便益分析を行った。その結果、社会的割引率が3%から4%となるような純粋時間選好率と限界効用弾性値の組合わせが妥当であることが示された。また、日本や欧州といった先進地域では、比較的緩い気候安定化シナリオは経済効率的であるのに対して、より厳しい政策シナリオを実現するためには莫大な費用を要することが示された。

［キーワード］費用便益分析、多地域動学的最適化モデル、社会的割引率、純粋時間選好率、感度分析

１．はじめに

2006年11月に発表されたStern (2006)[1)]によるStern Review以降、これに端を発した急進的な温暖化政策を主張する論調が見られる。Stern Reviewは、「緊急かつ急激な温室効果ガス(Greenhouse Gas、以下GHGと略す)削減」を提言しており、またわが国においても、2007年5月24日の安部晋三内閣総理大臣による演説の「世界全体の排出量削減のための長期戦略の提唱」において、『世界全体の排出量を現状から2050年までに半減という長期目標を世界共通目標として提案』ということが述べられている。しかしながら、「緊急かつ急激なGHG削減」を提言するStern Reviewに対して、温暖化分野の研究者から多くのコメントが発表されている。Nordhaus (2007a)[2)]、(2007b)[3)]は、Sternの主張する「緊急かつ急激なGHG削減」を、現実データに合わない低い時間選好率を設定したことが原因として批判している。Tol (2006)[4)]はStern Reviewが気候変動の影響を過大推計している点、気候変動の影響に関して悲観的な研究を選択的に引用している点、さらに低い割引

率を適用している点を批判している。また、国立環境研究所AIMチーム (2007)[5]は割引率の設定、温暖化影響の費用推定、温暖化対策の費用推定、早期対策の優位性の4つの論点からStern Reviewを検討している。Stern Reviewの「緊急かつ急激なGHG削減」という主張は、気候変動による被害や温暖化対策の費用を推定した結果に依存し、それらの結果は割引率の設定や温暖化に関する被害や費用の推定方法に大きく依存する。特に、温暖化問題のように超長期的影響を考慮しなければならない場合、異時点間の費用便益評価をいかに実施するかということが問題となる。将来の価値を全て同じ時点の価値に換算するために用いられる割引率が僅かに異なるだけでも、その評価が大きく異なるため、割引率の設定には慎重な検討が必要となる。

なお、本研究課題は、平成19年度に実施された中間評価における審査員からのコメントを反映し、平成17－19年度に作成した研究計画を変更する必要があったため、平成17－19年度の結果に関してのみ説明を行う。

２．研究目的

Stern Reviewに対するこれらのコメントの中でも、Nordhaus (2007b)[3]はDICE-2007 (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy)モデルを用いて、Stern Reviewと同様のシミュレーション分析を行っている。しかしながら、Stern Reviewで用いられた Hope (2002)[6]によるPAGE2002モデル、Nordhaus (2007b)[3]によるDICE-2007モデルともに全球レベルを対象としたものであり、全球平均気温や GHG濃度を安定化する目標を達成するために各地域がどの程度GHGを削減しなければならないか、あるいはそれらの目標は達成可能なのかということまで言及していない。そこで、本研究の目的は、Stern Review及びNordhaus(2007b)[3]を対象として、社会的割引率の設定の妥当性を検討した上で、気候安定化政策シナリオに対して全球のみならず各地域に関して費用便益分析を行うことである。

３．研究方法

まず、サブサブテーマ（１）による、温暖化被害の経済評価及び経済評価における割引率の設定に関する知見を踏まえて、多地域動的最適化モデルを構築する。本研究では、Nordhaus and Boyer(2000)[7]によって開発されたRICEモデルを基本として、日本を個別地域として扱った修正RICEモデルを用いる。RICEモデルはGHGのうち二酸化炭素(CO_2)の排出に焦点を当て、またCO_2の排出源である化石燃料を1つのエネルギー財に集約しているため、CO_2を排出するエネルギー財に関する詳細な分析は行うことができないものの、モデルの定式化やそのモデルプログラムが全て公開されているため、極めて透明性及び操作性が高いモデルと言うことができる。本研究では、米国(USA)、高所得地域(OHI)、欧州(EUR)、ロシア・東欧(EE)、中所得地域(MI)、中低所得地域(LMI)、低所得地域(LI)、中国(CHN)、日本(JPN)の9地域を対象とする。また、気温変化に伴う被害は各地域で異なるものとしている。気温変化による被害率を表す被害関数は全球平均気温の変化を変数とする2次多項式として表わされ、この気温変化による影響係数を生産関数に乗じることによって、生産量の減少として表現される。なお、本研究で用いたモデルの定式化やパラメータの値の詳細に関しては、Nordhaus and Boyer(2000)[7]及び中嶌ら(2008)[8]を参照されたい。

第2に、本研究のシミュレーション分析で用いられる政策シナリオは、気候安定化に焦点を当て

るため、以下のシナリオを想定する。また、これらのシナリオから適宜選択して政策シナリオとして用いる。

① 基準シナリオ(BASE)

本研究において基準となるシナリオであり、気候変動を緩和するための対策を一切講じないシナリオである。

② 最適政策シナリオ(OPT)

気候変動を緩和するための経済的効率的な対策を講じるシナリオである。これは現在のCO_2排出削減費用とCO_2排出削減による将来の便益が等しくなるようなパレート最適経路を導出する政策である。

③ CO_2濃度安定化シナリオ(Cxxx)

大気中のCO_2濃度を450ppm、550ppm、650ppmにそれぞれ安定化させるシナリオである。CO_2濃度換算にして450ppm程度の安定化は、約2.0℃の気温上昇を示唆している．また、550ppm安定化は産業革命前の水準の約2倍であり、1990年代前半にCline(1992)[9]、Nordhaus (1994)[10]、Fankhauser (1995)[11]を初めとして温暖化対策の経済評価を行った多くの研究で用いられたCO_2濃度倍増シナリオ(CO_2-doubling Scenario)に相当する．

④ 気温安定化シナリオ(TMPxx)

全球平均気温を2.0℃、2.5℃、3.0℃にそれぞれ安定化させるシナリオである。

第3に、本研究の費用便益分析で用いる費用、便益、および純便益を定義する。Nordhaus and Boyer (2000)[7]は費用便益分析を行っているものの、費用に関する定義が不明確であるため、本研究では純便益、便益、費用および費用便益比を再定義する。まず、純便益 NBはある代替案における消費の現在価値 PVC^{Alt}とBusiness-as-usual(以下、BaU)における消費の現在価値 PVC^{BaU} との差として、式(1)で定義する。

$$NB_{ij} = PVC_{ij}^{Alt} - PVC_{ij}^{BaU} \tag{1}$$

次に、代替案を実施することによる便益 B は、ある代替案における温暖化被害の現在価値 PVD^{Alt}とBaUにおける温暖化被害の現在価値 PVD^{BaU} との差として式(2)で定義し、式(1)と式(2)より費用 Cが求められる。なお、 PVD>0ならば被害、 PVD<0ならば便益であることに注意されたい。

$$B_{ij} = PVD_{ij}^{BaU} - PVD_{ij}^{Alt} \tag{2}$$

$$C_{ij} = B_{ij} - NB_{ij} \tag{3}$$

最後に、費用便益比は式(2)と式(3)から、式(4)として定義する。

$$w_{ij} = \frac{B_{ij}}{C_{ij}} \tag{4}$$

以上のように、本研究では日本を個別地域として扱った修正RICEモデル(多地域動学的最適化モデル)を用いることにより、割引率に関する感度分析、不確実性下での意思決定基準を用いた政策評価、被害関数の感度分析及び気候安定化シナリオの費用便益分析を行う。

４．結果・考察

本研究では、サブサブテーマ（１）で得られた知見を踏まえて、純粋時間選好率(PRTP)と消費の限界効用弾性値の組み合わせに関して感度分析を行った。ここでは、消費の成長率は1.3%と仮定し、PRTPと限界効用弾性値の組み合わせ (ρ,α) を変えた5つの最適政策ケース(OPT)を比較した。

RCB1 ケース：$(\rho,\alpha)=(3.0-1.39,1)$

RICE で用いられる標準的な組合わせ及び DICE2006 の RUN1 と同じ組合わせであり、限界効用弾性値が 1 であることから、効用関数は対数型効用関数

RCB2 ケース：$(\rho,\alpha)=(3.0-1.0,1)$

PRTP は 300 年かけて 3.0%から 1.0%へ減少し、限界効用弾性値は 1(効用関数は対数型効用関数)である組合わせ

RCB3 ケース：$(\rho,\alpha)=(2.0-0.5,1)$

PRTP は 300 年かけて 2.0%から 0.5%へ減少し、限界効用弾性値は 1(効用関数は対数型効用関数)である組合わせ

NORD ケース：$(\rho,\alpha)=(1.5-1.49,2)$

DICE2007 の RUN１と同じ組合わせであり、また限界効用弾性値が 2 であることから、効用関数が対数型効用関数ではない

STERN ケース：$(\rho,\alpha)=(0.1,1)$

Stern Review と同じ組合わせであり、効用関数は対数型効用関数

表－1は、Stern Review、DICE2006、DICE2007及び本研究の結果(RICE_CB)を示している。本研究では割引率の感度分析より以下の2つの結果を得た。

① RCB1ケースとRCB3ケースを比較すると、RCB1ケースの最適炭素価格、最適排出削減量ともにRCB3ケースの約半分であり、CO_2排出量にも差が見られるものの、気温変化はほとんど同様の経路を辿る。このことから、気候変動安定化政策の観点からは、限界効用弾性値が同じである場合、純粋時間選好率の選択は消費の成長率もしくは資本収益率に依存するため、Nordhaus(2007b)[3)]が主張するように現実データに合わない低い時間選好率を設定したSternの「緊急かつ急激なGHG削減」は、本結果からも支持し難いものと考えられる。

② 本節で想定したケースの中で、RCB1ケース、RCB2ケース、RCB3ケース、NORDケースは、先進国で公共投資の評価において用いられている割引率(3%～4%)とIPCC(2007)[12)]において純現在価値(Net Present Value)を求める際に用いられている割引率(5%)の範囲内に概ねある。つまり、結果に関して若干の差異はあるものの、求められる最適経路はどのケースにおいて同じ傾向を示すことが分かる。

また、RCB1ケースを用いて、政策シナリオに関する各地域の費用便益分析を行った(表－2参照)。その結果、以下のことが示された。

① 世界全体で費用便益比が1を超えるシナリオはOPTケースのみであるものの、日本やヨーロッパといった先進地域では、OPTケース以外にも比較的緩い制約下においては費用便益比が1を越えることが示された。

② 日本ではOPTケース、C650ケース、TMP30ケースでは費用便益比が1を超えるため、これらの政策シナリオは経済効率的であると考えられる。一方、より厳しい排出削減を課す政策に関しては、実現するために莫大な費用を要すると考えられる。

表－1　割引率に関する感度分析の結果

Model	Case	PRTP (%)	Elasticity	Discounting(a (%)	Optimal Carbon Price(b) ($/t-C)				Optimal Emission Reduction(c) (%)			
					2005	2015	2050	2100	2005	2015	2050	2100
Stern Review		0.1	1	1.4	311							
DICE2006												
	RUN1	3.0 - 1.39	1	2.69 - 4.3	17.1		84	270	6		14	25
	RUN2	0.1	1	1.4	159					50		
	RUN3	0.1	2.25	3.025	19.6							
DICE2007												
	RUN1	1.5	2	4.1		35	85	206		14	25	43
	RUN2	0.1	1	1.4		360				53		
	RUN3	0.1	3	4		36						
RICE_CB												
	RCB1	3.0 - 1.39	1	2.69 - 4.3	8.1	12.1	27.9	60.7	5.1	6.0	8.1	10.2
	RCB2	3.0 - 1.0	1	2.3 - 4.3	9.3	13.9	32.9	74.8	5.9	6.9	9.3	12.8
	RCB3	2.0 - 0.5	1	1.8 - 3.3	23.8	33.3	67.0	137.4	12.3	12.6	15.3	22.3
	STERN	0.1	1	1.4	149.1	181.1	255.4	368.8	48.4	47.4	45.1	45.5
	NORD	1.5 - 1.49	2	4.09 - 4.1	18.7	26.1	51.5	90.4	8.1	8.6	9.9	12.6

(a) The growth of per capita consumption and population growth are assumed to be 1.3% and 0.0%, respectively, per year.
(b) While DICE2007 uses 2005 U.S. dollars price, RICE_CB uses 1990 U.S. dollars price.
(c) Emissions reduction rate is relative to a baseline case in each model.

表－2　各地域における政策シナリオの費用便益分析

		USA	OHI	EUR	EE	MI	LMI	CHN	LI	JPN	WLD
OPT											
	Abatement Cost	61	6	19	39	37	113	53	179	6	513
	Environmental Benefit	68	23	220	16	95	144	42	319	26	954
	Net Economic Impact	7	17	202	-23	57	31	-11	140	20	440
	Benefit/Cost Ratio	1.12	3.98	11.70	0.41	2.53	1.27	0.79	1.79	4.66	1.86
C450											
	Cost	1893	265	692	1081	1550	2173	2382	4360	194	14590
	Benefit	258	90	818	62	398	607	178	1479	99	3989
	N.E.I	-1635	-175	126	-1019	-1151	-1566	-2204	-2881	-95	-10601
	B/C	0.14	0.34	1.18	0.06	0.26	0.28	0.07	0.34	0.51	0.27
C550											
	Cost	560	72	181	356	520	791	804	1721	51	5056
	Benefit	156	58	459	47	225	351	120	840	60	2317
	N.E.I	-404	-14	279	-309	-294	-440	-684	-881	9	-2739
	B/C	0.28	0.80	2.54	0.13	0.43	0.44	0.15	0.49	1.18	0.46
C650											
	Cost	180	20	52	113	167	292	227	640	15	1705
	Benefit	96	35	287	29	135	209	71	487	37	1385
	N.E.I	-84	15	234	-84	-32	-83	-156	-153	22	-321
	B/C	0.53	1.73	5.48	0.25	0.81	0.72	0.31	0.76	2.48	0.81
TMP20											
	Cost	2163	310	814	1206	1780	2395	2670	4830	231	16398
	Benefit	265	92	850	62	415	630	182	1543	102	4142
	N.E.I	-1898	-217	36	-1145	-1364	-1765	-2489	-3287	-129	-12257
	B/C	0.12	0.30	1.04	0.05	0.23	0.26	0.07	0.32	0.44	0.25
TMP25											
	Cost	974	133	340	594	880	1247	1354	2661	96	8278
	Benefit	195	71	586	55	289	446	145	1079	75	2941
	N.E.I	-779	-62	246	-538	-591	-801	-1208	-1582	-22	-5337
	B/C	0.20	0.53	1.73	0.09	0.33	0.36	0.11	0.41	0.78	0.36
TMP30											
	Cost	464	59	150	294	441	659	664	1461	43	4235
	Benefit	141	52	412	43	202	314	109	750	54	2077
	N.E.I	-323	-8	263	-251	-239	-345	-555	-711	11	-2158
	B/C	0.30	0.87	2.75	0.15	0.46	0.48	0.16	0.51	1.26	0.49

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

① 本研究では、社会的割引率に関して感度分析を行うことにより、本研究で採用しているマクロ経済モデルの構造が妥当であるか否かを検討している。これによって、本研究のマクロ経済モデルが地球環境政策のシミュレーション分析に有用であり、かつ地域的な政策評価にも利用可能であることが確認できる。また、費用便益分析の観点から評価を行うことにより、全球だけでなく地域ごとに費用対効果の高い政策オプションの優先順位を示すことが可能となっている。特に、地域ごとの費用便益評価が算出可能であるということの科学的意義は高い。

② 本研究の分析結果から、妥当と考えられる社会的割引率、純粋時間選好率および限界効用弾性値が提示されたことは、温暖化対策に関する政策評価分析において、現在世代と将来世代との関係を考慮する上で1つの指針を与えることを示している。また、全球と地域とでは効率的な気候安定化政策が異なることが提示されたことは、温暖化対策に関する政策評価分析において、全球の議論だけではなく地域的な特性、あるいは政策の地域的な効果等を考慮する必要があることを示している。これらは、各地域の費用便益分析を行うことにより、全球レベルで合意され得る政策シナリオが地域的にどのような経済的影響を及ぼすか、あるいはそれが地域的に経済効率的であるか否かの判断基準として利用可能であることを示している。

（２）地球環境政策への貢献

① 研究メンバーは、2008年5月に発表された本戦略研究プロジェクトの中間成果発表である『地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－』の執筆に貢献している。

② 研究メンバーが分担執筆した「森地茂、金本良嗣編『道路投資の便益評価』東洋経済新報社、2008」において、本研究成果を踏まえた数値や知見を引用し、地球温暖化分野だけでなく、土木計画学の分野においても地球温暖化問題の深刻さやその経済評価の重要性を示している。

③ 研究メンバーは、2008年10月26日から27日に香港で英・Stern Teamによって開催された「Regional Economics of Climate Change Workshop」に参加し、世界の地球温暖化研究者らとの議論を行い、最新の知見の収集だけでなく、わが国の地球環境施策の広報等に努めている。

④ 研究メンバーが参画している「外部効果の計測手法に関する研究会(国土交通省道路局)」、世界道路会議道路経済学専門委員会、公共事業評価委員会(国土交通省、宮城県、岩手県)、IPCC報告のレビューなどにおいて、本研究成果を踏まえた数値を提示し、国土政策のあり方に寄与する予定である。また、今後、様々な地球環境シンポジウムにおいて、本研究の成果の広報・普及に努めるものである。

６．引用文献

1) Stern, N.: The Economics of Climate Change: The Stern Review, Cambridge University Press, (2006).

2) Nordhaus, W.D.: Critical Assumptions in the Stern Review on Climate Change, Science,

Vol.317, pp.201-202, (2007a).
3) Nordhaus, W.D. : A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change, Journal of Economic Literature, XLV, pp.686-702, (2007b).
4) Tol, R.S.J. : The Stern Review of the Economics of Climate Change: A Comment, Energy & Environment 17(6), pp.977-981, (2006).
5) NIES AIM Team. : Comments on the Stern Review, National Institute for Environmental Studies, (2007).
http://www-iam.nies.go.jp/aim/stern/20070302_AIM_Comment_on_Stern_Review(ENG).pdf
6) Hope, C.W.: The Marginal Impact of CO2 from PAGE2002: An Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern, Integrated Assessment Journal, 6 (1), pp.19-56, (2006).
7) Nordhaus, W.D. and Boyer, J. : Warming the World: Economic Models of Global Warming, The MIT Press, (2000).
8) 中嶌一憲, 林山泰久, 森杉壽芳, 大野栄治：「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用, 環境システム研究論文集, Vol.36, pp.69-78, 2008.
9) Cline, W.R. : The Economics of Global Warming, Institute for International Economics, (1992).
10) Nordhaus,W.D. : Managing the Global Commons: Economics of Climate Change, The MIT Press, Cambridge, (1994).
11) Fankhauser, S. : Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse, Economic & Social Research Council, Earthscan, (1995).
12) IPCC: Climate Change 2007 : Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, (2007).

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) 中嶌一憲, 林山泰久, 森杉壽芳：地球温暖化問題におけるカタストロフ・リスクによる長期的影響：動学モデルの数値解析による均衡解の性質, 環境システム研究全文審査部門論文, No.34, pp.123-134, (2006).
2) 中嶌一憲, 林山泰久, 森杉壽芳, 大野栄治：「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用, 環境システム研究論文集, Vol.36, pp.69-78, (2008).

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

〈その他誌上発表（査読なし）〉

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会）

1) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳：カタストロフ・リスクを考慮した温暖化影響の危険な水準に関する考察，環境経済・政策学会2006年大会，(2006).
2) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳：地球温暖化問題におけるカタストロフ・リスクによる長期的影響：動学モデルの数値解析による均衡解の性質，第34回環境システム研究論文発表会，(2006).
3) 林山泰久，森杉壽芳，野原克仁：顕示選好データによるレクリエーション便益評価：家計生産関数アプローチ，応用地域学会第21回研究発表会，(2007).
4) 中嶌一憲，林山泰久：地球温暖化適応策としての社会資本整備に関する一考察，第35回土木計画学研究発表会(春大会)，(2007).
5) 林山泰久，森杉壽芳，野原克仁：顕示選好データによるレクリエーション便益評価：家計生産関数アプローチ，環境経済・政策学会2008年大会，(2008).
6) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳：温暖化被害を考慮したBaUシナリオに関する考察，環境経済・政策学会2008年大会，(2008).
7) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳，大野栄治：「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用，第36回環境システム研究論文発表会，(2008).
8) 林山泰久，野原克仁：滞在時間を考慮したレクリエーションサイトの便益評価：顕示選好法による環境評価理論，第36回環境システム研究論文発表会，(2008).

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

1) 林山泰久：豊かな生活と環境の共生：環境経済学と環境工学が考える現状と将来展望，東北大学サイエンスカフェ（2006年4月20日、仙台市メディアテーク、観客150名），(2006)．

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２.影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－６地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデルの開発に関する研究

（１）気候政策のマクロ的経済評価に関する研究（H20年度からH21年度）

旧３）資源・経済評価モデルの開発に関する研究（H17年度からH19年度）

※H20年度の研究体制再編に伴い、H20年度から(1)へ統合

東北大学

大学院環境科学研究科　　吉本　敦

平成17～19年度合計予算額　　3,900千円

※予算額は、間接経費を含む。

［要旨］本研究の目的は、丸太生産と木質バイオマスエネルギー生産を目的とする多目的森林管理のための動的最適化モデルを構築し、森林が果たす多面的な温室効果ガス削減効果を考慮した最適森林管理計画の経済分析を行うことである。

本研究で得た知見は次の通りである。1)木質バイオマスエネルギー生産からの純便益が少ないと丸太生産のみの管理になるが、純便益が80円（/A重油リットル）以上になると、丸太生産は行われず、すべての木材資源がバイオマスエネルギー生産に割り当てられる結果となった。2)木質バイオマスエネルギー生産の純便益が0から80円（/A重油リットル）へ増加するに伴い、炭素吸収貢献度も増加するが（4.6Ct/ha/yrから5.1Ct/ha/yrへと推移）、純便益が80円（/Ａ重油リットル）を超えると、丸太生産が行われなくなり、直接的な炭素吸収効果はなくなる。その結果、化石燃料代替のみの効果となり、炭素吸収貢献度は2.9Ct/ha/yrへと減少する結果となることが分かった。3)京都議定書第3条4項における管理された森林の取り扱いを鑑みると、森林資源による炭素吸収量を積算するには、間伐などと言った適切な管理行為が保証される必要があるので、丸太生産に伴う間伐と木質バイオマスエネルギー生産の両立を図ることが効果的な戦略になるものと考えられる。そのような効果的な戦略を促すには、木質バイオマスエネルギー生産の純便益を80円（/A重油リットル）前後に保つように政策的に調整する必要が出てくる。

［キーワード］地球温暖化防止、多目的森林管理、バイオマス・エネルギー、一般化多期間動的計画法アルゴリズム、経済分析

１．はじめに

地球温暖化防止に向けて、各国が、様々な方針で温室効果ガスの排出削減に取り組んでいる。国土の60%以上が森林で覆われる我が国においては、森林の利用による二酸化炭素の削減が期待されており、京都議定書において設定された削減目標（1990年を基準として6%の温室効果ガスの排出削減）の半分以上を森林の適正な管理を通して達成する方針である。

森林はその成長過程において、光合成、呼吸、腐敗などを通して植林から伐採に至る工程の中

で枝・葉・幹・根及び土壌を主な媒体として炭素の吸収あるいは排出を行っている。それぞれの媒体での吸収量あるいは排出量は樹種、齢級、成長環境などに大きく依存するが、総じて炭素の吸収量は排出量を上回る(Fujimori(2001)[1], Innes(2004)[2])。このように、森林は炭素吸収源としての役割を有し、森林から生産される木材の利用は吸収された炭素を長期に渡り固定する役割を担う。さらに近年注目されているのが、森林バイオマスの利用によりバイオエネルギーを化石燃料の代替として利用することで、二酸化炭素濃度を削減する役割である。森林資源の豊かな我が国において、森林の持つこれら多面的な温室効果ガス削減効果を考慮した森林管理計画の分析を行う事は、温室効果ガス削減目標を達成する上で重要な課題であると考えられる。

本研究では、従来の丸太木材生産に加えバイオマスエネルギー生産を考慮した多目的森林管理の経済分析を行い、バイオマスエネルギー使用が森林所有者の管理計画・行動に及ぼす影響と温室効果ガス削減効果を把握する事を試みた。ここでは、森林資源が持つ温室効果ガス削減効果に対する２つの役割を考慮する。１つは、丸太生産を通した森林そのものによる直接的な炭素吸収効果である。もう１つは、木質バイオマスエネルギーの化石燃料代替による間接的な炭素排出量の削減効果である。後者は、木質バイオマスエネルギーが炭素ゼロエミッションであることから、化石燃料の代替によることで、二酸化炭素濃度を削減する効果である。本研究では、最適化モデルから導出された解に対して、これらの効果を分析することにより、温室効果ガス削減に関わる政策制定に際して重要な情報を提供する。

なお、本研究課題は、平成19年度に実施された中間評価における審査員からのコメントを反映し、平成17－19年度に作成した研究計画を変更する必要があったことを付記する。

２．研究目的

これまでの動的計画法を用いた最適間伐戦略に関する研究は、丸太生産を通した森林そのものによる直接的な炭素吸収効果に焦点を当て、単一の管理目的（材木生産からの収益最大化と炭素吸収量最大化）を別々に分析・比較したもの（吉本ら(2004)[3]）か、多目的森林管理モデルとしてジョイント生産の分析をするが、バイオマスエネルギー生産からの収益と丸太木材生産からの収益最大化に焦点を当てたもの（Bjørnstad and Skonhoft(2002)[4]）であった。それゆえ、それらの研究においては、森林における多面的な温室効果ガス削減効果という観点から、丸太木材生産とバイオマスエネルギー生産のトレードオフを明らかにする最適な間伐戦略が分析されなかった。本研究では、一般化多期間動的計画法アルゴリズムを用いて多期間依存型林分経営最適化モデルの構築を行い、従来の丸太生産に加え、木質バイオマスエネルギー生産をも考慮できる多目的森林管理モデルを構築し、バイオマスエネルギー使用が最適管理戦略に与える影響を分析した。

３．研究方法

まず、九州地域のスギ林を対象に動的計画法による最適林分経営モデルを構築し、間伐補助金の炭素固定量への影響を分析した。分析の結果、炭素固定量への貢献はあまりないことが判明した。次に、福岡県星野村の村有林を調査対象として、伐採直前のスギ人工林における立木状態での炭素貯留量を基準に、植林から製材までの一連の木材生産工程に関する炭素収支分析を行った。そして、林分成長モデルにバイオマスエネルギー計算のコンポーネントを加え、両者を結合させて、動的計画モデルを構築した（図1）。

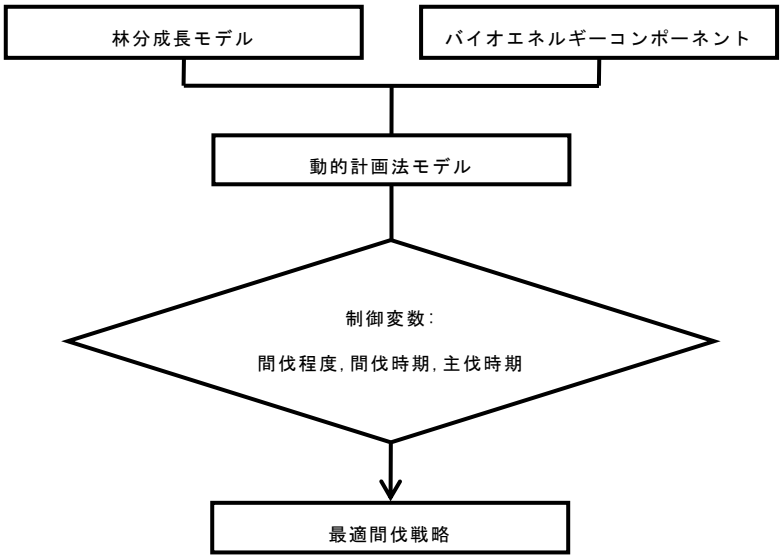


図１　モデルリングのフローチャート

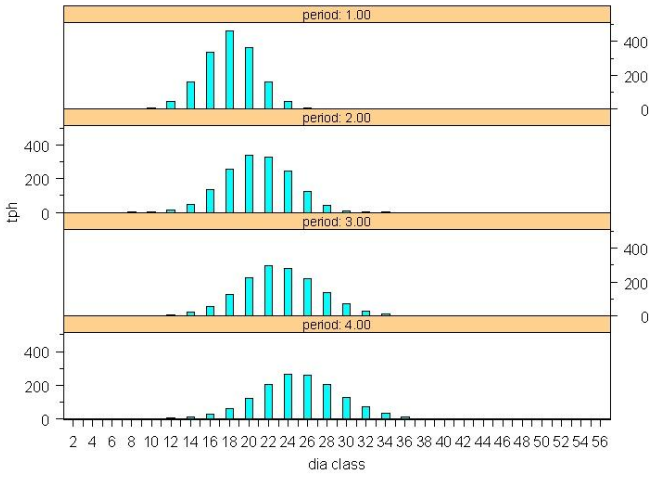


図2　直径分布の動的変化

本研究で使用した林分成長モデルは、偏微分方程式、式 (1)、により直径階分布 (図2) を予測し、間伐など管理の直径階分布成長への影響を考慮できるモデルである。管理が成長に及ぼす影響を考慮できる林分成長モデルを使用することで、間伐の多期間にわたる丸太材積量生産量およびバイオマスエネルギー生産量への影響を評価することが可能である。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{1}{2}\alpha(\tau, y)\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \beta(\tau, y)\frac{\partial \varphi}{\partial y} - \gamma(\tau, y)\varphi \qquad (1)$$

ただし、φ: 立木本数密度、τ: 樹齢、y: 直径。

生産関数へのバイオマスエネルギーの導入は、我が国でもっとも一般的に行われている方法を再現した。我が国では、バイオマスエネルギーの生産に利用されるのは、通常、小径木・枝・樹幹先端部などの部分である。よって、幹とエネルギーとして使用される部分は、同時に伐採される必要があり、丸太生産とバイオマス生産はジョイント生産の１つの形態を表しているといえる。

小径木は丸太材にするには小さすぎるので、すべての幹の部分がバイオエネルギーの生産に充てられる。一方、中・大径木については、丸太材に利用できる部分とバイオマス生産に充てられる部分とが存在する。温室効果ガス削減効果に関しては、小径木においては間接的効果であるエネルギー代替効果のみが炭素削減貢献度に貢献する。一方、中・大径木においては、直接的な炭素吸収効果と間接的なエネルギー代替効果の両者が炭素削減貢献度に貢献する。

解法には、間伐の長期的な影響を考慮できるMSPATHアルゴリズム（Yoshimoto *et.al*(1988)[5]）を用いた。MSPATHアルゴリズムは、間伐からの純収益とその間伐により達成される林分における伐採の和を最大化する間伐戦略を探索する。定式化すると、以下の通りとなる。

$$f^*_n = \max_{\{T_{n-i,n},i\}} \{ f_{n-i,n}(T_{n-i,n}) \} \tag{2}$$

$$f_{n-i,n}(T_{n-i,n}) = V_n^R(T_{n-i,n}) + V_n^T(T_{n-i,n}) - V^*_{n-i} + f^*_{n-i} \tag{3}$$

ここで、$(T_{n-i,n})$は第n期に至るすべての（n-i）期における間伐量、$V_n^R(T_{n-i,n})$は間伐$T_{n-i,n}$を実行した時の第n期における主伐収益（林分材積・丸太歩留率-伐採費）の現在価値、$V_n^T(T_{n-i,n})$は間伐$T_{n-i,n}$を実行した時の間伐収益の現在価値である。

本研究では、バイオマスエネルギー使用の最適間伐戦略への影響を調べるために、外性的に与えられた丸太歩留率とバイオマスエネルギー生産からの純収益に対して最適化を行った。丸太歩留率とバイオマスエネルギー生産からの純収益をそれぞれ一定の範囲内（丸太歩留率：0％－65％、20％ごと、純収益：0円-160円/リットル、20円ごと）で変化させて、その最適解を分析した。合計45の最適化が行われた。

分析は、富山県の小矢部市にある杉林に対して行った。試験地の林分初期状態は、表1及び図3に示された通りである。本研究では、全材積のうち丸太として利用されない部分、つまり、全材積×（１－歩留まり率）が、バイオマス燃料生産のため、チップの生産に充てられると考える。森林経営者は、丸太の市場価格とバイオ燃料生産のネット便益を比較考慮し、現在価値が最大となるように間伐強度および間伐時期を決定する。バイオ燃料への変換は、木材積１m^{3}に対して173.3リットルのバイオ燃料が生産されると仮定した。

丸太材積における炭素吸収量を分析するために、林分に蓄積される炭素量を次式で計算した。

$$Wc = \rho_0 \cdot V \cdot E \cdot C \tag{4}$$

ここで、Wcは炭素重量(tC)、r_0は容積密度(g/cm^3)、Vは幹材積(m^3)、Eは拡大係数、Cは炭素含有係数(gC/g)をそれぞれ表す。容積密度は、吉本ら(2004)[3]の研究により測定された数値(0.3373)を使用した。また、拡大係数、炭素含有係数については、針葉樹において一般に使用される数値(それぞれ、1.7、0.5)を用いた。一方、化石燃料の代替による二酸化炭素濃度を削減する効果は、木材積１m^{3}のバイオマスエネルギー生産に対して代替効果により、0.1327 tCの炭素削減が可能と仮定した。なお、本研究では、丸太による炭素吸収には、幹・枝・葉が使用されるが、バイオエネルギーに関しては、幹のみがバイオマスエネルギー生産に使用されると仮定する。

経済情報としては、利子率は1%とし、主伐費用及び間伐費用は過去の管理費用データを基にともに8,000円/m^{3}とした。木材価格は過去の市場データを基に、直径の大きさによるプレミアムを考慮し、図4のように設定した。解の探索に関しては、間伐の強度を間伐間隔5本として評価した（本研究では、下層間伐のみを考慮した）。最大計画期間を50年とし、期間隔5年で最適間伐戦略を探索した。

表1　カワイダニ杉林分の初期状態

樹齢	15
立木密度	2001/ha
平均直径　（標準偏差）	14.4 cm　（2cm）
平均樹高　（標準偏差）	9.4 m　（0.9m）
材積量	162.3 m^3/ha

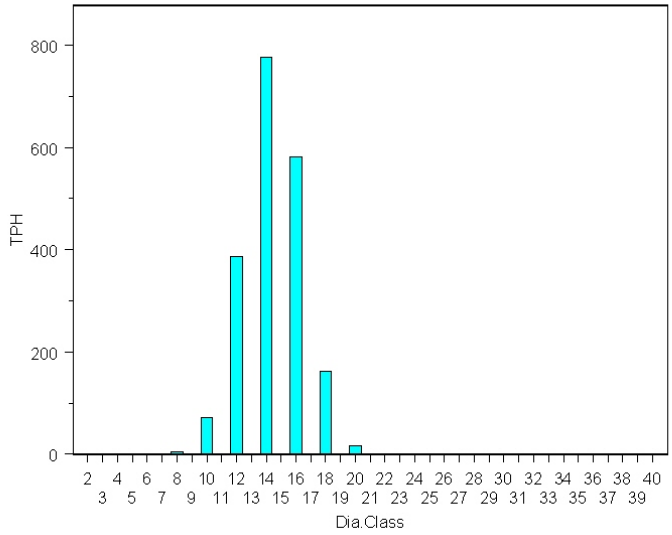


図3　富山県小矢部市における15年生カワイダニ杉林分の初期の直径階分布

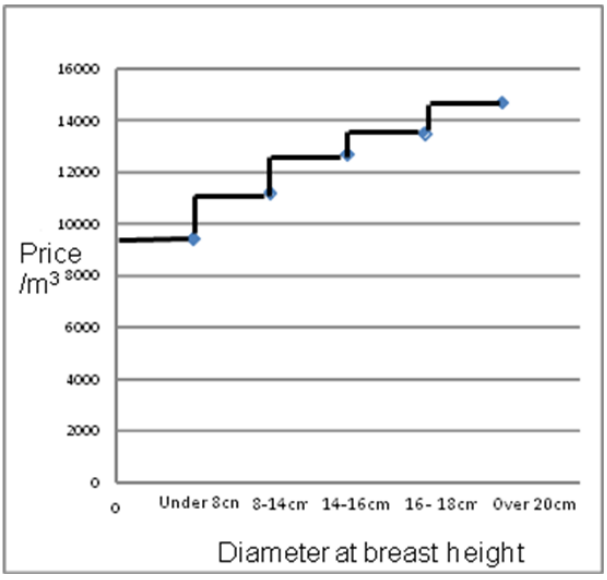


図4　直径の大きさによる木材価格プレミアム

4．結果・考察

（1）バイオマス代替エネルギーの経済価値と最適間伐戦略

木質バイオマスエネルギー生産からの純便益（利益－生産費用）がない場合、最適な森林管理

は丸太生産を中心としたものであり、成長初期から主伐期まで毎期において、40-480本(/ha)前後の間伐が施される結果となった（表2）。それに対し、純便益を考慮した場合、木質バイオマスエネルギー生産からの純便益の上昇に伴い、間伐強度及び頻度が減る結果となった。特に純便益が60円（/A重油リットル）以上になると、成長初期において強度の間伐（780本/ha）が施され主伐期における材積量の増加による木質バイオマスエネルギー生産の増大をもたらす結果となった。また、純便益が80円（/A重油リットル）以上になると、丸太生産は行われず、すべての木材資源がバイオマスエネルギー生産に割り当てられる結果となった。

（２）多面的な温室効果ガス削減効果の評価

まず、木質バイオマスエネルギー生産の純便益が0から80円（/A重油リットル）と増加するに伴い、炭素吸収貢献度は増加する結果となった（4.6Ct/ha/yrから5.1Ct/ha/yrへと推移）。更に純便益が80円（/A重油リットル）を超えると、丸太生産が行われなくなり、直接的な炭素吸収効果はなくなった。その結果、化石燃料代替のみの効果となり、その量は2.9Ct/ha/yrへと減少する結果となることが分かった。これらの結果は、木質バイオマスエネルギー生産の純便益の変化により最適な間伐計画が変化し、木質バイオマスエネルギーの原料となるチップ生産量が変化するためである。なお、ここでの代替効果は熱量換算により算出したものである（図5）。

表2　様々なバイオエネルギー純便益における間伐戦略

	バイオエネルギー純便益　円/A重油リットル				
計画期	0円	20円	40円	60円	80円
0期	475	475	535	780	780
1期	60	165	0	0	0
2期	60	0	190	0	0
3期	45	0	0	0	0
4期	45	115	0	0	0
5期	40	0	0	0	0
6期	355	0	635	0	0
7期	225	745	0	0	0

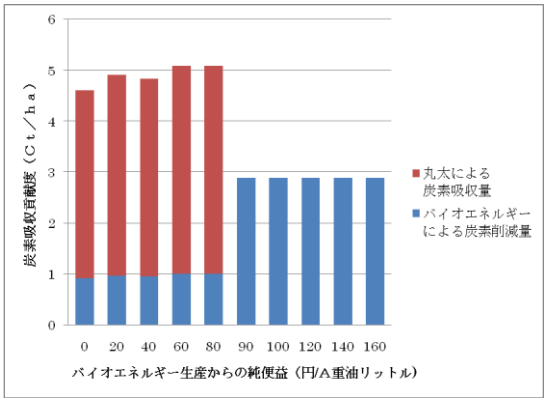


図5　炭素吸収貢献度とバイオエネルギー生産からの純便益の関係

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

バイオマスエネルギー生産の純便益の変化が管理体制を丸太生産中心からバイオマスエネル

ギー生産中心へと完全にシフトする可能性がある事を考えた場合、それぞれの管理による収益だけでなく、温室効果ガス削減効果の評価が必要不可欠であるため、本研究は、炭素吸収貢献度という指標で、多面的な温室効果ガス削減効果を評価することで、効率的に温室効果ガス削減を達成のための必要な情報を提供できるということの科学的意義は高い。

（２）地球環境政策への貢献

京都議定書第３条４項における管理された森林の取り扱いを鑑みると、森林資源による炭素吸収量を積算するには、間伐など適切な管理行為が保証される必要がある。それゆえ、温室効果ガス削減効果を評価した効率的な間伐戦略を分析することは重要な課題である。本研究の結果から、仮に木質バイオマスエネルギー生産の純便益が増加し、その結果、成長初期でのみ間伐が施された場合、一般的には“管理された森林”と見なされることは困難であるため、丸太生産に伴う間伐と木質バイオマスエネルギー生産の両立を図ることが効果的な戦略になるものと考えられる。そのような効果的な戦略を促すには、本研究の結果より、木質バイオマスエネルギー生産の純便益を80円（/A重油リットル）前後に保つように調整する必要性を政策提言として示すことができた。

６．引用文献

1) Fujimori, T.：Ecological and Silvicultural Strategies for Sustainable Forest Management, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp.398, (2001).

2) Innes, J.L.：Carbon Cycle, Encyclopedia of Forest Sciences (J. Burley, J. Evans and J.A. Youngquist eds), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp.139-144, (2004).

3) 吉本　敦, 柳原宏和, 能本美穂：最適林分経営による間伐計画最適化と炭素吸収量, 森林資源管理と数理モデル, vol.4, pp.71-91, (2004).

4) Bjørnstad, E. and Skonhoft, A.：Wood Fuel or Carbon Sink? Aspects of Forestry in the Climate Question, Environmental and Resource Economics 23, pp.447-465, (2002).

5) Yoshimoto, A. Paredes, V. and Brodie, J.D.：Efficient optimization of an individual tree growth model, the 1988 Symposium on System Analysis in Forest Resources (Kent,B.M. and L.S.Davis eds), USDA Forest Service, Colorado, General Technical Report, RM-161, pp.154-162, (1988).

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

1) Yoshimoto, A. and Maruš ák, R.：Evaluation of Carbon Sequestration and Thinning Regimes within the Optimization Framework for Forest Stand Management, European Journal of Forest Research 126(2), pp.315-329, (2007).

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

1) Yoshimoto, A.：Carbon Pricing through Subsidy Payment for Thinning Activities in Japan, Scandinavian Forest Economics, Vol.41, pp.415-427, (2006).

〈その他誌上発表（査読なし）〉

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会）

1) Yoshimoto, A.：A New Dynamic Programming Algorithm to Search for an Optimal Thinning Regime within Forest Stand Level Optimization, World Conference on Natural Resource Modeling, (2006).
2) 吉本敦，栁原宏和：Tree Growth Data Analysis and Economic Evaluation of Carbon Mitigation Through Forest Stand Management，高次元データ解析法の開発と評価に関する研究セミナー，(2006).
3) Yoshimoto, A. and Yukutake, K.：Threshold Price as Economic Indicator for Sustainable Forest Stand Management, Conference on Indicators for Sustainable Forest Management in Cultivated Forests, (2006).
4) Yanagihara, H., Ninomiya, Y. and Yoshimoto, A.： Analysis of Grouped Growth Patterns in Even-aged Sugi Forest Stand within the Framework of Mixture Model, Forest Resource Management and Mathematical Modeling, The 7th Symposium －FORMATH KOBE 2007 INTERNATIONAL－, (2007).
5) Yoshimoto, A.： Analysis on the Reverted Mean of Log Price Dynamics through Stochastic Modeling, The 7th Symposium －FORMATH KOBE 2007 INTERNATIONAL－, (2007).
6) 木島真志，吉本敦，嘉戸昭夫：シルブの森を使った間伐最適化モデルの構築，第119回日本森林学会大会，(2008).
7) 木島真志，吉本敦，嘉戸昭夫：富山県シルブの森成長モデルを用いた間伐手法・強度・時期の最適化，森林資源管理と数理モデル第八回シンポジウム，(2008).
8) Konoshima, M. and Yoshimoto, A.：An economic analysis of joint production of timber and bio-energy source through the optimal thinning regime by a dynamic programming model, CORS/Optimization Days 2008 joint conference, (2008).

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

S-4　温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究

２.影響予測の高度化及び経済評価に関する研究

２－６地球環境政策オプション評価のための環境・資源統合評価モデルの開発に関する研究

（４）国内ミクロモデルの開発に関する研究（H17年度からH19年度まで）

旧４）温暖化影響のミクロ的経済評価に関する研究（H20年度からH21年度まで）

※H20年度の研究体制再編に伴い、H20年度から(1)へ統合

名城大学

都市情報学部　大野栄治

都市情報学部　森杉雅史（平成20～21年度）

平成17～21年度合計予算額　15,601千円

（うち，平成21年度予算額　3,900千円）

※予算額は，間接経費を含む。

［要旨］

本研究では、地球温暖化対策としての「熱中症の防止」「砂浜の保全」「干潟の保全」「ブナ林の保全」「マツ林の保全」の費用対効果を検討する際に必要となる基礎資料の提供を目的として、CVM（仮想市場評価法）およびTCM（旅行費用法）により、それらの貨幣評価原単位を推計した。その結果、熱中症（生命）の貨幣評価原単位は0.902～1.055億円/人、砂浜の貨幣評価原単位は5,103～41,408円/㎡、干潟の貨幣評価原単位は9,885円/㎡、ブナ林の貨幣評価原単位213.0～339.6円/㎡、マツ林の貨幣評価原単位171.0～314.9円/㎡と推計された。

［キーワード］生命の価値、砂浜の価値、干潟の価値、ブナ林の価値、マツ林の価値

１．はじめに

地球温暖化対策としての政策オプションを検討する際、費用便益分析の観点を導入することにより、全球的・局地的な効率性・公平性を評価することが可能になる。しかし、日本では温暖化影響の経済評価に関する研究蓄積が少なく、費用便益分析を実施する際には諸外国における評価結果（貨幣評価原単位）を為替レートによって日本円に換算して用いることが多かった。そこで、本研究では日本独自の貨幣評価原単位を算出することが必要である。

２．研究目的

本研究では、地球温暖化対策としての「熱中症の防止」「砂浜の保全」「干潟の保全」「ブナ林の保全」「マツ林の保全」の費用対効果を検討する際に必要となる基礎資料の提供を目的として、CVM（仮想市場評価法）およびTCM（旅行費用法）により、それらの貨幣評価原単位を推計した。

３．研究方法

（１）個別分野における経済評価手法の提案

S-4全体で理論的整合性を保った経済評価を行うことの必要性から、S-4の各テーマにおける個別分野の経済評価に対して、経済評価手法の整理及び評価手法の提案を行う。対象とする個別分野は、健康、生態、米生産、洪水、渇水、高潮、海岸の砂浜と干潟、地震時の液状化現象の8つの影響である。

（２）TCM（旅行費用法）による評価

ここでは「砂浜のレクリエーション価値」の推計方法を例に解説する。

１）交通需要関数の定義

本研究では、砂浜における海水浴のレクリエーション価値を計測するために、市場行動に基づいた顕示選好データに基づくTCMを採用する。TCMの適用に際し、砂浜利用目的交通の需要関数を次式で定義する。

$$\ln(x_{ij}) = \alpha + \beta \cdot p_{ij} \qquad (1)$$

ただし、x_{ij}：地域$i-j$間の砂浜利用目的交通量、y_{ij}：地域$i-j$間のレジャー目的交通量、$i-j$：出発地－到着地（都道府県）、α, β：未知のパラメータをそれぞれ表している。なお、一般化交通費用については後述する。

このとき、潮干狩り目的交通需要関数は、次式で与えられる。

$$x_{ij} = \exp\left(\alpha + \beta \cdot p_{ij}\right) \qquad (2)$$

２）レクリエーション価値の評価モデル

TCMでは、レクリエーション価値は当該レクリエーション活動の代理市場としての交通市場における消費者余剰で定義される。したがって、砂浜における海水浴のレクリエーション価値は、式(2)で与えられる砂浜利用目的交通需要の消費者余剰CSで評価される。

$$CS = \sum_{ij} \int_{p_{ij}}^{\infty} x_{ij}\, dp_{ij} \qquad (3)$$

$$= \sum_{ij} \left[\frac{1}{\beta} \cdot \exp\left(\alpha + \beta \cdot p_{ij}\right) \right]_{p_{ij}}^{\infty} \qquad (4)$$

$$= \sum_{ij} \left(-\frac{1}{\beta} \cdot \exp\left(\alpha + \beta \cdot p_{ij}\right) \right) \qquad (5)$$

$$= -\frac{1}{\beta} \cdot \sum_{ij} x_{ij} \qquad (6)$$

ここで、式(4)から式(5)への展開において、$\beta < 0$という条件を適用した。

また、式(6)は交通市場全体の消費者余剰が総交通量の定数倍で表されることを示している。したがって、式(6)より砂浜利用一回あたりの消費者余剰csが次式で与えられる。

$$cs = \frac{CS}{\sum_{ij} x_{ij}} = -\frac{1}{\beta} \qquad (7)$$

ここで、式(7)は砂浜から近い人も遠い人も、砂浜利用回数の多い人も少ない人も、砂浜利用1回あたりの消費者余剰が一定であることを示している。このことは、砂浜利用のレクリエーション価値を集計する際、当該砂浜への訪問者数をカウントするだけでよく、訪問者がどこから来たかを特定する必要がないことを意味する。

３）データ収集

本研究では、砂浜における海水浴のレクリエーション価値を計測対象とするので、砂浜利用目的交通量および砂浜までの一般化交通費用（往復）のデータが必要である。しかし、これらのデータは未調査であるので、平成11年度道路交通センサスOD集計用マスターデータ[1)]および平成15年度海洋性レクリエーション施設年間利用客数（海水浴場）[2)]に基づいて作成した。

まず、平成11年度道路交通センサスOD調査の休日OD集計用データより、観光・行楽レジャー（日常生活圏外）のうちで遊園地・潮干狩り・写真・写生・飲食ドライブなどの体験を目的に持つトリップデータを抽出し、都道府県間OD表に集計した。今回、集計の対象としたトリップは、海に接する市区町村を目的地に持つトリップ（地域内々トリップおよび離島関連ODトリップを除く）とした。また、集計の対象とした車種は、自家用乗用車の個人使用車（世帯で保有する軽乗用車、乗用車、バス）とした。次に、上記の都道府県間交通量における目的地都道府県毎の出発地都道府県構成比は、砂浜利用目的交通量におけるそれと同じであると仮定した。

$$\frac{x_{ij}}{\sum_{i} X_{ij}} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i} Y_{ij}} \qquad (8)$$

ただし、$\sum X_{ij}$ ：地域 $i-j$ 間の砂浜利用目的交通量の合計値、$\sum Y_{ij}$ ：地域 $i-j$ 間のレジャー目的交通量の合計値。

ここで、式(8)における y_{ij} のデータは上記の都道府県間交通量で与えられ、また $\sum X_{ij}$ のデータは都道府県別の海洋性レクリエーション施設年間利用客数（海水浴場）で与えられる。したがって、砂浜利用目的交通量は、次式で求めた。

$$x_{ij} = \frac{\sum_{i} X_{ij}}{\sum_{i} Y_{ij}} \times y_{ij} \qquad (9)$$

一方、砂浜までの一般化交通費用（往復）は、次式で求めた。

$$p_{ij} = c_{ij} + w \cdot t_{ij} \qquad (10)$$

ただし、p_{ij} ：地域 $i-j$ 間の一般化交通費用、c_{ij} ：地域 $i-j$ 間の所要費用（道路距離＋有料道路料金）、t_{ij} ：地域 $i-j$ 間の所要時間、w ：時間価値。

ここで、これらのデータは、以下の条件設定に基づいて求めた。

条件１）乗車率：自家用乗用車1台につき平均2.5人とする。

条件２）道路網：全国一般都道府県道、一般国道、高速自動車国道、都市高速道路、その他有料道路および幅員5.5m以上の路線（平成11年度供用済み路線）を取り上げる。

条件３）有料道路料金：平成11年度における各路線の料金体系とする。

条件４）リンク速度：各リンクの法定速度とする。

条件５）時間価値：平成11年度道路行政（国土交通省）における乗用車時間評価値54.30円/分の4分の1とする。

条件６）その他：所要時間（片道）が6時間を超えるサンプルについては評価モデルのパラメータ推定から除外する。

（３）CVM（仮想市場評価法）による評価

ここでは「健康の価値」「生命の価値」「ブナ林の価値」の推計方法を例に解説する。

１）データ収集

(a)アンケート調査の実施

2008年5月中旬に全国の成人男女を対象にして、インターネット利用のアンケート調査を実施した。ここで、定量分析におけるインターネット調査には、オープン型、クローズ型、セミクローズ型の3タイプがあるが[3)]、今回の調査はクローズ型である。被験者はあらかじめインターネット調査会社に登録している一般人であるため、多様な個人属性を把握することができ、回収の予測が立てやすいというメリットがある。さらに、被験者に対して調査会社より謝金が支払われるため、当該分野について関心の低い人も回答する可能性が高く、郵送調査による回答集団（関心のある人のみの集団である恐れ）と母集団との乖離の問題は幾分解消されるのではないかと思われる。

本調査では1,193件の回答が得られた。ここで、最初の回答の受け付けから最後の回答の受け付けまでに要した時間は96時間00分であった。ちなみに、1,000件目の受け付けまでに要した時間は13時間20分であった。なお、回答者の地域分布と年齢分布が偏らないようにアンケート票を配信、回答を受信した。回答者の属性分布（性別・年齢・職業・年収）は以下のとおりである。

【性別】男性：50.1%，女性：49.9%

【年齢】20～29歳：18.6%，30～39歳：20.2%，40～49歳：20.2%，50～59歳：20.4%，60歳以上：20.6%

【職業】給与所得者：43.8%，自営業者：7.3%，自由業者：5.4%，主婦・主夫：25.6%，学生：4.9%，無職：11.0%，その他：2.1%

【年収】200万円未満：8.5%，200～399万円：20.7%，400～599万円：21.8%，600～799万円：14.1%，800～999万円：10.1%，1000万円以上：11.7%，未回答：13.1%

(b)アンケート調査の内容

アンケート調査の表題は『地球温暖化問題に関する意識調査』であり、アンケート票の質問内容は、以下のとおりである。

問１）地球温暖化の問題に対する関心度

問２）地球温暖化による熱中症の増加に対する関心度

問３）熱中症の患者数の増加を回避するための支払意思額（表-1を参照）

問４）熱中症による死亡者数の増加を回避するための支払意思額（表-2を参照）

問５）地球温暖化によるブナ林の衰退に対する関心度

問６）ブナ林の衰退を回避するための支払意思額（表-3を参照）

ここで、表-2に示す「熱中症の患者数の増加を回避するための支払意思額に関する質問」において、回避策が実施されない場合の疾病率Ｘとして、

ケース１）人口10万人あたり年間60人（全国で約7.7万人）

ケース２）人口10万人あたり年間90人（全国で約11.5万人）

ケース３）人口10万人あたり年間150人（全国で約19.2万人）

ケース４）人口10万人あたり年間300人（全国で約38.3万人）

の4ケースを設定した。一方、回避策が実施される場合の疾病率は、すべてのケースで現状維持（人口10万人あたり年間30人：全国で約3.8万人）を設定した。

表-3に示す「熱中症による死亡者数の増加を回避するための支払意思額に関する質問」において、回避策が実施されない場合の死亡率Yとして、

ケース１）人口10万人あたり年間0.6人（全国で約770人）

ケース２）人口10万人あたり年間0.9人（全国で約1,150人）

ケース３）人口10万人あたり年間1.5人（全国で約1,920人）

ケース４）人口10万人あたり年間3.0人（全国で約3,830人）

の4ケースを設定した。一方、回避策が実施される場合の死亡率は、すべてのケースで現状維持（人口10万人あたり年間0.3人：全国で約380人）を設定した。

表-3に示す「ブナ林の衰退を回避するための支払意思額に関する質問」において、回避策が実施されない場合の衰退率としてZ%として、

ケース１）全体の20%（その跡の高木林・低木林への移行は全体の10%ずつ）

ケース２）全体の40%（その跡の高木林・低木林への移行は全体の20%ずつ）

ケース３）全体の60%（その跡の高木林・低木林への移行は全体の30%ずつ）

ケース４）全体の100%（その跡の高木林・低木林への移行は全体の50%ずつ）

の4ケースを設定した。一方、回避策が実施される場合の衰退率は、すべてのケースで現状維持（0%）を設定した。

さらに、それぞれの回避策に対する提示金額は、1人あたり毎年100円、300円、500円、1,000円、3,000円、5,000円、10,000円、30,000円、50,000円の9種類とした。

表-1　熱中症の患者数の増加を回避するための支払意思額に関する質問

将来、地球温暖化によって「熱中症の患者数」が増加すると予想されています。そこで、地球温暖化による「熱中症の患者数」の増加を回避するため、全国民から負担金を徴収して対策に充てるという政策が提案されたと仮定してください。なお、負担金の徴収は地球温暖化による熱中症の被害を経済評価するために想定したものであり、実際に負担金を徴収しようとするものではありません。そして、

- この政策が実施されると、熱中症の患者数の割合は人口 10 万人あたり年間 30 人（全国で約 3.8 万人：現状維持）になる
- この政策が実施されないと、熱中症の患者数の割合は人口 10 万人あたり年間Ｘ人になる

と想定してください。

次の（１）～（９）には、上記の政策を実施するために必要な負担金の額が示されています。あなたは、（１）～（９）のそれぞれについて、政策の実施に賛成ですか、それとも反対ですか。あてはまるものを（それぞれ）１つ選び、番号を○で囲んでください。なお、この負担金は日本にお住まいの期間中に負担していただくものであり、その金額分だけあなたの購入できる別の商品やサービスが減ることを十分念頭においてお答えください。

（１）政策の負担金が1人あたり毎年100円の場合
　　1. 政策の実施に賛成　　2. 政策の実施に反対
（２）政策の負担金が1人あたり毎年300円の場合
　　1. 政策の実施に賛成　　2. 政策の実施に反対
（３）政策の負担金が1人あたり毎年500円の場合
　　1. 政策の実施に賛成　　2. 政策の実施に反対
（中略）
（９）政策の負担金が1人あたり毎年50,000円の場合
　　1. 政策の実施に賛成　　2. 政策の実施に反対
（以下、省略）

表-2　熱中症による死亡者数の増加を回避するための支払意思額に関する質問

将来、地球温暖化によって「熱中症の患者数」だけでなく「熱中症による死亡者数」も増加すると予想されています。そこで、地球温暖化による「熱中症による死亡者数」の増加を回避するため、全国民から負担金を徴収して対策に充てるという政策が提案されたと仮定してください。なお、負担金の徴収は地球温暖化による熱中症の被害を経済評価するために想定したものであり、実際に負担金を徴収しようとするものではありません。そして、

- この政策が実施されると、熱中症による死亡者数の割合は人口 10 万人あたり年間 0.3 人（全国で約 380 人：現状維持）になる
- この政策が実施されないと、熱中症による死亡者数の割合は人口 10 万人あたり年間Ｙ人になる

と想定してください。
（以下、同様）

表-3　ブナ林の衰退を回避するための支払意思額に関する質問

将来、地球温暖化によってブナ林が衰退して低木林やササ原に変化すると、その機能が著しく低下することが心配されます。そこで、地球温暖化によるブナ林の衰退を回避するため、全国民から負担金を徴収して対策に充てるという政策が提案されたと仮定してください。なお、負担金の徴収は地球温暖化によるブナ林の被害を経済評価するために想定したものであり、実際に負担金を徴収しようとするものではありません。そして、

- この政策が実施されると、日本中のブナ林（約 23,000km^2）が保全（現状維持）される
- この政策が実施されないと、日本中のブナ林（約 23,000km^2）のＺ％が衰退し、その跡の半分が高木林（全体のＺ/2%）、残りの半分が低木林（全体のＺ/2%）になる

と想定してください。
（以下、同様）

３）評価モデル

温暖化影響（熱中症患者数の増加、熱中症死亡者数の増加、ブナ林の衰退）を回避するための支払意思額を評価するために、個人の効用関数を式(11)および式(12)で定義する。これらの式は、温暖化影響を回避するための政策に対して賛成する場合の効用と反対する場合の効用の差を、個人の「温暖化影響に対する関心度」、「政策のダミー変数」または「政策によるリスクの減少量」、個人の「政策に対する負担金」の関数で表現しようとしたものである。

【モデル１】

$$\Delta V = a \cdot x + \sum_{k=2}^{4} b_k d_k + c \cdot \ln(p) \qquad (11)$$

【モデル２】

$$\Delta V = a \cdot x + b \cdot \ln(\Delta r) + c \cdot \ln(p) \qquad (12)$$

ただし、ΔV：温暖化影響に関する政策に対して賛成する場合の効用（V_{yes}）と反対する場合の効用（V_{no}）の差（$V_{yes} - V_{no}$）、x：温暖化影響に対する関心度（非常に関心がある：1.0、 かなり関心がある：0.75、普通に関心がある：0.5、 少し関心がある：0.25、全く関心がない：0.0）、d_k：政策ケースkのダミー変数（あり：1、なし：0）、Δr：政策によるリスクの減少量、p：政策に対する負担金［円/年］、a, b, b_k, c：未知のパラメータ。

式(11)および式(12)のパラメータは、温暖化影響に関する政策に対する賛成あるいは反対の選択行動（表-1、表-2、表-3）より推定される。この選択行動をランダム効用理論の枠組みで捉えると、各選択肢の理論的選択確率が与えられる。このとき与えられる種々の確率モデルのうち、もっとも操作性の高いロジットモデルを以下に示す[4)]。

$$P_{yes} = \frac{\exp(w \cdot V_{yes})}{\exp(w \cdot V_{yes}) + \exp(w \cdot V_{no})} = \frac{1}{1 + \exp(-w \cdot \Delta V)} \qquad (13)$$

$$P_{no} = 1 - P_{yes} \qquad (14)$$

ただし、P_{yes}, P_{no}：温暖化影響に関する政策に対する賛成・反対の理論的選択確率、w：ランダム効用の分散パラメータ（一般的に$w = 1$と仮定する）。

式(13)および式(14)の理論的選択確率を用いて選択結果集合の同時確率関数（尤度関数）を構築する。そして、アンケート調査結果のデータを適用し、最尤法により効用関数のパラメータを推定する。

本研究では、リスクの減少量に対する支払意思額を$P_{yes} = 0.5$となる負担金（支払意思額の中央値）で評価する。すなわち、支払意思額の中央値は式(11)および式(12)において$\Delta V = 0$のときに与えられる。

【モデル１】

$$WTP_{median} = \exp\left(-\frac{a \cdot x + \sum_{k=2}^{4} b_k d_k}{c} \right) \qquad (15)$$

【モデル２】

$$WTP_{median} = \exp\left(-\frac{a \cdot x + b \cdot \ln(\Delta r)}{c}\right) \quad (16)$$

ただし、WTP_{median}：支払意思額の中央値。

ここで、熱中症に対するVSH（統計的健康価値）およびVSL（統計的生命価値）は、上記の手順でリスクの減少量に対する支払意思額を計測した後、これをリスクの減少量で割ることによって求められる[5)]。

４．結果・考察

（１）個別分野における経済評価手法の提案

S-4の各テーマにおける個別分野（健康、生態、米生産、洪水、渇水、高潮、海岸の砂浜と干潟、地震時の液状化現象への影響）の経済評価に対して、評価手法の提案を行った。

1) 健康への影響：マラリヤと熱中症による死亡および疾病に係わる被害額については、仮想市場評価法CVMにより原単位を算出する。
2) 生体への影響：当初、南方系植生の300km北上による生態変化の結果について、第1に、市場での原料になるもの（薬草など）への損失額を算出し、第2に、CVMにより生態変化に及ぼす影響等の原単位を算出することを考えた。
3) 米生産への影響：消費者余剰と生産者余剰の和である総余剰あるいは等価的偏差により被害額を計算する。
4) 洪水への影響：洪水規模が50分の1以下の洪水を防ぐという政策が採用されているものと仮定する。この政策のもとで費用便益比B/Cの平均値が2.5であるとする（最近の河川事業のB/Cの平均値で想定しているが、白書に基づいて再度計算をしてみる必要がある）。このとき50分の1までの洪水に対する被害を軽減するときの年あたり期待被害額の2.5分の1を年あたりの対策費用と考えることができる。地球温暖化により50分の1の規模が大きくなる。最適な整備水準は、温暖化のない状況と同じで50分の1であるとし、B/Cも平均2.5であるとする。そうすると、温暖化によって大きくなった50分の1までの期待被害軽減額の2.5分の1が最適な適応水準に要する年あたり費用となる。このときの年あたり対策費用の差分を持って適応策のコスト増加分と考えればよい。また、50分の1を超える超過洪水の期待被災額の差分が温暖化による年あたりの被害額である。ゆえに、上記、適応策のコストと期待被災額の上昇分が、洪水対策部門における温暖化による年あたりの経済的被害額である。現在価値換算は、将来の被害額を現在時点で求めるものとする。
5) 渇水への影響、高潮への影響、地震時の液状化現象への影響：上述した洪水への影響と同様な手法である。
6) 海岸の砂浜と干潟への影響：砂浜の消失に係わる被害額については、利用価値（レクリエーション価値）の損失に限定し、旅行費用法TCMにより原単位を算出する。また、干潟の破壊に係わる被害額については、利用価値のみならず非利用価値（存在価値など）の損失も大きいと思われるので、仮想市場評価法CVMにより原単位を算出する。

また、経済評価の考え方として、その概要を以下にまとめた。温暖化によるさまざまな被害を、貨幣換算値（円/年）で表現することを経済評価という。経済評価では、さまざまな被害を受ける

経済主体が被る被害を避けるために支払ってもよいと考える支払い意志額（円/年）によって統一的整合的に金額換算を行う。支払い意志額によって金額換算された評価値を被害費用（円/年）という。この被害費用には、温暖化適応策の費用をその一部に含むが、温暖化緩和策の費用とは異なるものである。温暖化緩和策の便益は、ここでいう被害費用の減少額に等しい。ここで対象とする被害には、直接貨幣単位で計測されている被害（市場的影響）のみならず、直接貨幣単位で計測されていない被害（非市場的影響）の両者を含む。本研究で対象としている影響・被害には、市場的影響として、温暖化による洪水被害とその適応費用、地盤災害と適応費用、海面上昇による高潮被害とその適応費用、米作生産性への影響であり、一方、非市場的影響として、熱中症などの健康・生命への影響、生態系への影響、海面上昇による砂浜・干潟の減少を対象としている。貨幣換算するに当たって適用する概念は、経済主体が被る被害・損失を避けるために支払ってもよいと考える最低支払い意志額（毎年同じ金額を支払うものとして年あたりの金額所得で表示する）である。ここでいう経済主体は、家計、企業、政府からなり、個々の主体は、自分の利得を最大にするように行動するものとみなす。そして、被害のありなしにおける利得の差分が最低支払い意志額を表す。したがって、被害によって生じる利得の差分を推定することが必要になる。環境経済学・公共経済学・費用便益分析の分野で利得の差分を推定する方法が長年にわたって開発されてきた。最近では、公共事業の評価に当たり、費用便益分析が義務付けされ、マニュアルが整備されている。

（２）分野別コントロール・トータルの算出

温暖化影響の項目を4大項目×4小項目の16分野に分類して、それぞれの分野毎に個別評価と全体評価の整合性を管理することを目的として、そのコントロール・トータルを算出するためにコンジョイント分析の適用を試みた。その結果、4大項目の生活環境に対する家計の限界支払意思額は、472円/月（安全性）、464円/月（保健性）、259円/月（利便性）、285円/月（快適性）であることがわかった。これらの金額の意味は「10年後の生活環境水準が現在水準より1%向上することに対する世帯の便益」あるいは「10年後の生活環境水準が現在水準より1%低下することに対する世帯の被害額」と解釈される。さらに、16小項目の生活環境に対する家計の限界支払意思額についても算出したが、十分な統計的有意性を確保することができなかった。

（３）砂浜・干潟・健康に関する貨幣評価原単位の算出

温暖化影響の項目を「砂浜の消失」「生態系を育む干潟の破壊」「熱中症の患者数の増加」「熱中症による死亡者数の増加」に限定して、TCM（旅行費用法）およびCVM（仮想市場評価法）により、それらの貨幣評価原単位を推計した。まず、砂浜のレクリエーション価値は、砂浜利用一回あたりでは2,511円/回、日本全国では1,062億円/年（現在価値26,550億円）と推計された。日本の砂浜の総面積は314k㎡であることから、単位面積あたりの砂浜のレクリエーション価値は8,456円/㎡となる。これが砂浜の貨幣評価原単位である。

次に、干潟の生物多様性維持機能価値は、一人あたりの支払意思額では1,554円/年/人（現在価値38,850円/人）、日本全国では49,628億円と推計された。日本の干潟の総面積は514k㎡であることから、単位面積あたりの干潟の生物多様性維持機能価値は9,655円/㎡となる。これが干潟の貨幣評価原単位である。

さらに、熱中症に対する健康の貨幣評価原単位は50～280万円/年/人、熱中症に対する生命の貨

幣評価原単位は9,356～48,400万円/年/人と推計された。例えば、余命40年の人の場合、健康の貨幣評価原単位は1,030～5,760万円、生命の貨幣評価原単位は19.3～99.7億円となる。ここで、U.S.EPA(1999)は生命の価値として平均値630万ドル（63,000万円）を用いており、今回の評価結果には過大評価の可能性が懸念される。

（４）旅行費用法（TCM）による砂浜・干潟の経済的価値

平成18年度に評価した「砂浜の価値」と「干潟の価値」を精査し、TCM（旅行費用法）を適用して再評価した。まず、砂浜のレクリエーション価値は、砂浜利用一回あたりでは2,179円/回、日本全国では922億円/年（現在価値23,046億円）と推計された。都道府県別にみると、神奈川県：110.0億円/年（同2,751億円）、新潟県：87.0億円/年（同2,174億円）、沖縄県：78.7億円/年（同1,967億円）の順に多い。また、「砂浜の保全」の貨幣評価原単位は全国平均で12,058円/㎡と評価された。都道府県別にみると、大阪府：114,951円/m^2、神奈川県：82,354円/m^2、兵庫県：64,823円/m^2の順に大きい。さらに、30cm、65cm、100cmの海面上昇によって消失する砂浜の価値は、それぞれ522億円/年（現在価値13,044億円）、753億円/年（同18,829億円）、832億円/年（同20,811億円）と推計された。

次に、干潟のレクリエーション価値は、干潟利用一回あたりでは2,099円/回、日本全国では47億円/年（現在価値1,175億円）と推計された。都道府県別にみると、千葉県：12.6億円/年（同315.2億円）、愛知県：7.6億円/年（同189.5億円）、茨城県：6.9億円/年（同173.2億円）の順に多い。また、「干潟の保全」の貨幣評価原単位は、平成18年度にCVMで評価した生物多様性維持機能価値と合わせて、全国平均で9,885円/㎡と評価された。都道府県別にみると、大阪府：79,455円/m^2、静岡県：23,345円/m^2、兵庫県：19,963円/m^2の順に大きい。

（５）仮想評価法（CVM）による健康・生命・ブナ林の経済的価値

平成18年度に評価した「健康の価値」と「生命の価値」について、CVM（仮想市場評価法）による評価過程の一部に問題が見つかったために、再調査および再評価した。その結果、熱中症患者数や熱中症死亡者数の増加による被害額を疾病リスクや死亡リスクの変化量の関数で表現することが可能となった。また、VSH（統計的健康価値）は93.7～104.9万円、VSL（統計的生命価値）は0.902～1.055億円と推計された。

次に、「ブナ林の保全」の貨幣評価原単位を推計するために、CVM（仮想市場評価法）を適用した。その結果、ブナ林の衰退面積を説明変数とする被害費用関数を導出した。また、「ブナ林の保全」の貨幣評価原単位は213～340円/m^2と推計された。平成19年度に評価した「砂浜の価値」や「干潟の価値」と比較すると、ブナ林の価値はそれらの1/50～1/30程度である。

（６）気候安定化シナリオによる被害コストの計測

平成 20 年度に整理した「熱中症の防止」および「ブナ林の保全」の貨幣評価原単位を精査し、熱中症による死亡を防止することの便益は 0.902～1.055 億円/人、ブナ林を保全することの便益は 213.0～339.6 円/㎡であることを再確認した。これに基づき、3 つの GHG 濃度安定化シナリオ（①450s シナリオ：GHG 濃度 450ppm 安定化シナリオ、②550s シナリオ：GHG 濃度 550ppm 安定化シナリオ、③BaU シナリオ：なりゆきシナリオ）における「熱中症」および「ブナ林」の被害コストを

計算した。その結果、以下に示すように低い GHG 濃度で安定化させるほど被害コストを低く押さえられることがわかった。各シナリオ(450s、550s、BaU シナリオ)における熱中症被害コストの全国平均は、今世紀中頃にはそれぞれ 373 億円/年、480 億円/年、529 億円/年、さらに今世紀末にはそれぞれ 501 億円/年、775 億円/年、1,192 億円/年に達すると見込まれることがわかった。また、ブナ林被害コストの全国平均は、今世紀中頃にはそれぞれ 1,034 億円/年、1,273 億円/年、1,381 億円/年、さらに今世紀末にはそれぞれ 1,325 億円/年、1,811 億円/年、2,324 億円/年に達すると見込まれることがわかった。

次に、「マツ林の保全」および「砂浜の保全」の貨幣評価原単位を推計するために、CVM（仮想市場評価法）を適用した。その結果、「マツ林の保全」および「砂浜の保全」の貨幣評価原単位は、それぞれ 171.0～314.9 円/㎡および 5,103～41,408 円/㎡と推計された。なお、砂浜については、平成 21 年度に TCM（旅行費用法）によりレクリエーション価値のみを推計し、12,058 円/㎡という結果を得ている。今回の結果は「砂浜のレクリエーション機能・生物多様性維持機能・地域振興機能の価値の合計＝41,408 円/㎡（100%の消失を回避するケース：平成 21 年度における推計時の設定）」であるので、平成 21 年度の結果と整合している。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究では、地球温暖化対策としての「熱中症の防止」「砂浜の保全」「干潟の保全」「ブナ林の保全」「マツ林の保全」の費用対効果を検討する際に必要となる基礎資料の提供を目的として、CVM（仮想市場評価法）およびTCM（旅行費用法）により、それらの貨幣評価原単位を推計した。温暖化影響の経済評価に関する研究蓄積が少ないという日本の現状において、各分野における被害を金額で明示的に示すこと及び分野間での被害比較を行うことを可能にしたという観点から、日本独自の貨幣評価原単位を算出したことの科学的意義は高い。

（２）地球環境政策への貢献

本研究は、温暖化影響の貨幣評価原単位の作成を通じて、温暖化影響の経済評価を行ったものである。この成果は、温暖化による環境水準の変化に関する経済評価のみならず、温暖化に対する「防止策」「緩和策」「適応策」などの対策による環境水準の変化に関する経済評価にも容易に応用することができる。そして、温暖化対策の有無比較による経済評価を通じて、温暖化対策の費用便益分析を行うことができる。したがって、本研究は経済効率的な温暖化対策の政策提言に貢献することができる。

６．引用文献

1) 国土交通省：平成11年度道路交通センサスOD集計用マスターデータ，(2000)
2) 農林水産省：平成15年度海洋性レクリエーション施設年間利用客数（海水浴場），(2004)
3) (社)日本マーケティング協会：インターネット・マーケティングベーシックス，日経BP社，(2000)
4) 土木学会編：非集計行動モデルの理論と実際，丸善，(1995)
5) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲: 地球温暖化による熱中症死亡リスクの経済評価:

CVMによるVSLの計測，地球環境研究論文集，Vol.17，pp.183-192，(2009).

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

〈論文（査読あり）〉

1) 大野栄治：地球温暖化に伴う住環境変化の経済評価－コンジョイント分析によるアプローチー，地球環境，Vol.11，No.1，pp.95-102，(2006).
2) Ohno, E.：Economic Evaluation of Residential Environment Change Associated with Global Warming, Approached by Conjoint Analysis, Global Environmental Research, Vol.10, No.2, pp.227-233, (2006).
3) 山田淳大・大野栄治：年間WTPと生涯WTPの違いに基づく割引率の計測，土木計画学研究・論文集，Vol.24，No.1，pp.149-156，(2007).
4) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳，大野栄治：「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用，環境システム研究論文集，Vol.36，pp.69-78，(2008).
5) 大野栄治，佐尾博志:CVMとTCMによる干潟の経済価値の計測，環境システム研究論文集，No.36，pp.333-341，(2008).
6) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲：地球温暖化による熱中症死亡リスクの経済評価―CVMによるVSLの計測―，地球環境研究論文集，Vol.17，pp.183-192，(2009).
7) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲：干潟・ブナ林の生物多様性維持機能の経済評価:CVMによるアプローチ，地球環境，Vol.14，No.2，pp.285-290，(2009).
8) 大野栄治，森杉壽芳，林山泰久，野原克仁：地球温暖化による砂浜消失の経済評価：旅行費用法によるアプローチ，地球環境，Vol.14，No.2，pp.291-297，(2009).
9) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲，佐尾博志：CVMによるブナ林の経済価値の計測，環境システム研究論文集，Vol.37，pp.283-290，(2009).

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

特に記載すべき事項はない。

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) 大野栄治，山田淳大，大洞久佳：地球温暖化による住環境への非市場型影響の経済評価，環境システム研究論文発表会・講演集，No.34，pp.27-32，(2006).
2) 大野栄治，劉佳琦：地球温暖化による熱中症に対する統計的生命の価値の計測，環境システム研究論文発表会・講演集，No.35，pp.257-262，(2007).
3) 大野栄治，佐尾博志：海面上昇によって消失する砂浜のレクリエーション価値の計測，環境システム研究論文発表会・講演集，No.35，pp.263-268，(2007).

（２）口頭発表（学会）

1) 大野栄治，山田淳大，大洞久佳：地球温暖化による住環境への非市場型影響の経済評価，第34回環境システム研究論文発表会，(2006).

2) 大野栄治，劉佳琦：地球温暖化による熱中症に対する統計的生命の価値の計測，第35回環境システム研究論文発表会，(2007).
3) 大野栄治，佐尾博志：海面上昇によって消失する砂浜のレクリエーション価値の計測，第35回環境システム研究論文発表会，(2007).
4) 中嶌一憲，林山泰久，森杉壽芳，大野栄治：「温暖化の危険な水準」を検討する際の意思決定基準とその適用，第36回環境システム研究論文発表会，(2008).
5) 大野栄治，佐尾博志：CVMとTCMによる干潟の経済価値の計測，第36回環境システム研究論文発表会，(2008).
6) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲：地球温暖化による熱中症死亡リスクの経済評価―CVMによるVSLの計測―，第17回地球環境シンポジウム，(2009).
7) 大野栄治，林山泰久，森杉壽芳，中嶌一憲，佐尾博志：CVMによるブナ林の経済価値の計測，第37回環境システム研究論文発表会，(2009).

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム，セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。