

課題名	S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究 4. 統合システム解析による空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの開発
課題代表者名	山形 与志樹（独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター 主席研究員）
研究実施期間	平成19～23年度
累計予算額	423,885千円（うち23年度 89,585千円） 予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1) 社会経済シナリオのダウンスケール手法と土地利用変化シナリオの開発に関する研究（（独）国立環境研究所）
- (2) 温室効果ガスとエアロゾル等の排出の空間分布の推定に関する研究（（独）国立環境研究所）
- (3) 空間詳細シナリオの検証と国際研究ネットワークの構築に関する研究（（独）国立環境研究所）
- (4) 気候変動シナリオの解析による空間詳細シナリオの整合性評価に関する研究（（独）海洋研究開発機構）

I. 戦略課題S-5テーマ4の全体構成

本テーマでは、第1に、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書に向けて国際的に進められている研究動向に対応する形で、日本の「アジア太平洋統合評価モデル(Asia-Pacific Integrated Model:以降、AIMという)」により作成された社会経済シナリオのダウンスケーリングを行った。具体的には、サブテーマ(1)において、空間的な社会経済発展パターンをモデル化してグローバルシナリオを空間詳細化(ダウンスケール)する手法と、農林地間の転換をモデル化して空間詳細な土地利用変化シナリオを開発し、地球システムモデルや気候モデルが地表面の境界条件として用いる空間詳細な社会経済シナリオや土地利用変化シナリオを、緯度経度0.5°解像度で作成した。この空間詳細シナリオを用いて、サブテーマ(2)では、気候モデルに入力する温室効果ガス(GHG)・エアロゾル等の排出データを作成し、サブテーマ(3)で、都市・地域の研究者間の国際連携を強化する国際研究ネットワークを通じて、空間詳細シナリオの妥当性について国内外のテストサイトにおいて検証した。そして、サブテーマ(4)において、空間詳細シナリオを用いた火災・土地利用変化によるCO₂等の排出量の気候変動予測計算を実施し、気候変動影響との整合性について検討した。

第2に、サブテーマ(1)では、地域を限定して、より空間詳細な土地利用シナリオ、社会経済活動シナリオの開発を行った。このシナリオは、本課題テーマ3などの地域気候モデルの入力データとして提供し、地域気候の予測精度の向上に寄与するものとなった。

図1に示すように、以下の4サブテーマ体制を組んで実施したが、各サブテーマ間では、データの受け渡し等、密接に連携して研究を実施した。

II. 本研究により得られた科学的成果

全球を対象とした人口・GDP、エアロゾル排出、土地利用変化、GHG排出量の0.5°メッシュのシナリオである代表的濃度経路(RCP)シナリオについて、修正と検討を実施し、次期のIPCCで検討されているシナリオに対応する地理的な分布を持ったシナリオを構築した。この成果は、現在、世界中の研究グループが標準的に用いる4つのシナリオのうちの1つ(RCP6.0)として、新しい気候変動予測計算の前提条件に用いられており、温暖化予測の空間詳細化等の精度向上に貢献することができた。

また、土地利用変化起源のCO₂排出量の見積もりについて、統合評価モデルで計算された値と、テーマ4の空間的に詳細な生態系モデルで計算された値の間で大きな差(21世紀中の積算値で60PgC程度)があることが示された。たとえば、大気中温室効果ガス濃度安定化に必要な排出削減量は主に統合評価モデルにより見積もられてきているため、政策的に重要なこのような見積もりに、これまで十分に注意されてこなかった不確実性があることが示唆された。

III. 成果の環境政策への貢献

RCPはIPCC第5次評価報告書に向けたベンチマークシナリオであり、その空間詳細化と温暖化影響の評価を行う研究は、IPCCへの国際貢献として重要な意味を持つ。また、土地利用について空間詳細化をさらに進めた

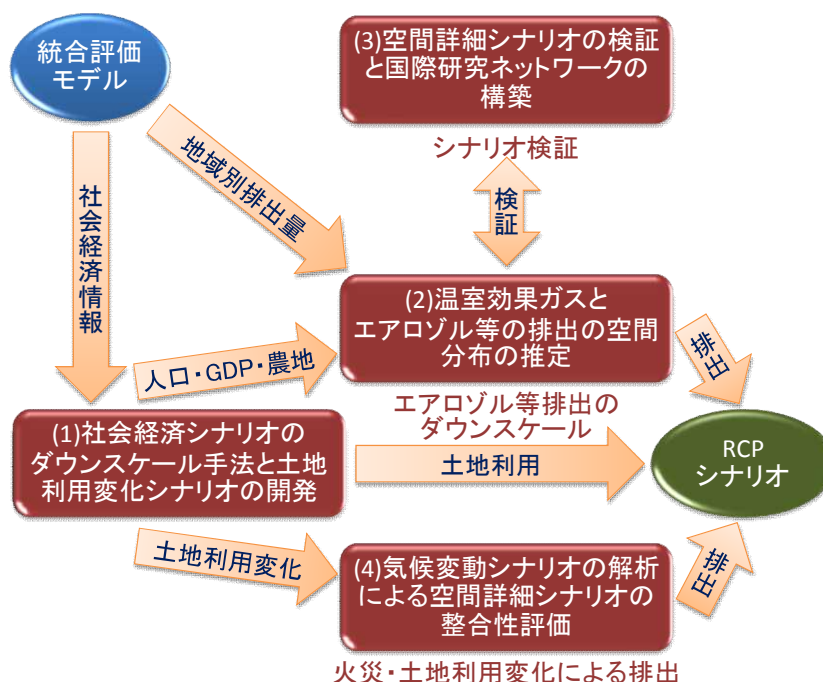


図1 テーマ4の全体構成

都市シナリオは新シナリオと連携を行うことで、テーマ3の都市気候モデルとの結果と併せて世界各地の都市における温暖化影響を評価する際に有用な情報となることが期待される。これらの研究により、将来の気候変動による影響を予測するために必要となる、空間詳細な土地利用シナリオに関する知見が得られ、より詳細な気候変動影響評価や適応策の検討に資することができた。

また、国際研究ネットワークを通じて収集したデータや情報は、グローバルな都市炭素収支計画を策定するという長期的な目標に役立つものであり、IPCC第5次評価報告書や全球エネルギー評価などの主要な国際評価に貢献している。

IV. 研究概要

1. はじめに(研究背景等)

IPCC第4次報告書では、気候変動予測に用いるシナリオは、多くのシナリオから代表的な数値を抽出したものであり、気候変動と社会変化に関連がないだけでなく、空間的にも、全世界を10数地域に分割したものであった。しかし、近年では、温暖化問題に対する適応と緩和の重要性が指摘されており、自然システムと社会システムを統合した解析が喫緊の課題となっている。また、エアロゾルの排出や土地利用変化は、その空間解像度に伴う不確実性が指摘されており、空間詳細なシナリオの必要性が唱えられている。

このような背景に対して、IPCC第5次評価報告書に向けて、新シナリオの作成に関する議論が行われている。そこでは従来の手法とは異なり、2100年以降に温室効果ガスが気候に与える影響の大きさを表す放射強制力を一定とする仮定の下で、地球システムモデル(以降、ESMという)による将来気候変動の予測を行い、その結果を利用して適応と緩和を考慮した社会・経済シナリオの作成を行うことが決定した。しかし、「2100年放射強制力一定」の仮定のみでは、ESMの入力データとしては不十分であり、必要最小限度のシナリオが必要となる。また、必要最小限のシナリオが多数存在すると、ESM間の相互比較に問題が生じる。そこで、「2100年放射強制力一定」の代表的なシナリオの作成を国際協調で行うことを決定した。しかし、最小限とはいえ社会・経済シナリオを作成するには膨大な作業が生じる。そこで、世界の統合評価モデル(Integrated Assessment Model: 以降、IAMという)のうち、既にピアレビューが行われた4モデルにより、パスが異なる放射強制力の最小限のシナリオを作成することとなった。このシナリオは代表的濃度経路(RCP, Representative Concentration Pathways)と呼び、自然起源を含む、GHGとエアロゾルの空間詳細な排出およびその変化、空間詳細な土地利用変化を作成する。しかし、既往のIAMではESMが必要とする空間解像度での出力は不可能である。そのため、IAMの結果をダウンスケールすることで、ESMが要求する解像度の排出および土地利用変化のシナリオを作成することが必要とされている。

本研究課題、本テーマでは、国際的な状況を鑑み、第1段階としてRCPに参加するAIMと協力し、RCPで必要とされる空間詳細排出シナリオおよび土地利用変化シナリオの作成を行う。次の段階として、自然システムと社会システムを統合した、新たなシナリオとその整合性の評価を行う。

2. 研究開発目的

本テーマでは、第1にRCPのシナリオとして、地球システムモデルや気候モデルが地表面の境界条件として用いる空間詳細な土地利用、土地利用変化シナリオと、GHG・エアロゾル等の排出シナリオの作成を行う。作成するシナリオの空間解像度は緯度経度0.5°であり、このような詳細なシナリオを用いることにより、気候変動予測の精度が向上する。第2に、地域を限定してより空間詳細な土地利用シナリオ、社会経済活動シナリオの開発を行う。このシナリオは、本課題テーマ3などの地域気候モデルの入力データとして用いられ、地域気候の予測精度の向上に寄与するものとなる。

(1) 社会経済シナリオのダウンスケール手法と土地利用変化シナリオの開発に関する研究

IPCCのRCPシナリオに対応した社会経済シナリオをダウンスケーリングし、空間詳細な人口・GDPおよび土地利用変化シナリオの作成を行う。土地利用変化シナリオは、都市、農地、牧草地、草原、森林、その他の区分であり、土地利用に付随する木材伐採量のシナリオと、温暖化対策として予想されるバイオマス作物のシナリオの作成も併せて行う。この手法を用いて、過去の人口・GDPの分布を作成し、検証すると共に、サブテーマ(2)へのデータ提供を行う。サブテーマ(4)と土地利用変化に与える温暖化影響の評価を行い、従来のシナリオとの差異を検討する。また、地域を限定した、より空間詳細な土地利用シナリオの作成においては、空間詳細土地利用変化モデルを構築し、テストサイトにおける分散・集中型の空間詳細シナリオの作成を実施し、本課題テーマ3へデータ提供を行う。

(2) 温室効果ガスとエアロゾル等の排出の空間分布の推定に関する研究

過去から将来まで整合的な空間詳細排出量シナリオの構築手法を確立する。IPCCのRCPシナリオに対応するために、サブテーマ(1)からのデータ提供を受け、産業革命前から気候安定化までの放射強制力が 6W/m^2 である排出シナリオの空間詳細化を行う。この空間詳細排出量データの構築手法の改善および精緻化を行うと共に、同データの不確実性の評価手法について検討する。さらに、過去の排出源情報や排出係数の推計値、人口・GDPなどの社会経済情報、土地利用変化などに関する各種情報をアップデートし、空間詳細排出量データベースの高度化に取り組む。

(3) 空間詳細シナリオの検証と国際研究ネットワークの構築に関する研究

国際研究ネットワークを通じて、アジアのメガシティにおける社会経済データの収集を行い、都市全体の総合的な発展メカニズムの分析と CO_2 排出量の将来予測を行う。日本国内の複数の小中規模都市を対象として、景観係数やコンパクトネス係数を考慮した都市形態と CO_2 排出量・エネルギー消費量との相関関係について分析する。さらに、国際研究ネットワークを通じて、世界各地の都市発展の空間情報を収集・分析し、シナリオ検証を実施する。また、テストサイトでの空間情報をダウンスケール計算への入力情報として整備し、空間詳細シナリオの不確実性の低減を図る。

(4) 気候変動シナリオの解析による空間詳細シナリオの整合性評価に関する研究

既存の気候変動予測シミュレーション結果等と空間詳細な陸域生態系モデルを用い、土地利用変化による炭素排出、自然植生火災によるエアロゾル排出評価手法を確立し、RCP6.0の社会経済シナリオにおける土地利用変化排出および火災排出に関する排出シナリオ作成を行う。これらRCP排出について、陸域生態系シミュレーションと社会経済モデルによる排出シナリオの相互比較を行う。土地利用シナリオ整合性評価手法の確立のため、陸域モデルへの作物モデル導入と農地生産性の評価手法の開発を行う。さらに、空間詳細シナリオを入力情報として地球システム統合モデルによる気候変動予測を行い、その結果と空間詳細シナリオとの整合性を検討する。気候変動影響を考慮した陸域生産性の評価を行い、サブテーマ(1)による土地利用変化シナリオ高度化への入力情報を与える。

3. 研究開発の方法

(1) 社会経済シナリオのダウンスケール手法と土地利用変化シナリオの開発に関する研究

本サブテーマでは、自然・社会システムを統合した解析により、IPCC第5次評価報告書に向けて作成されている、将来の大気中のGHG濃度を安定化させるRCPの空間詳細排出シナリオと土地利用変化シナリオを作成した。具体的には、国別の社会経済モデルから出力される人口、GDP等の情報や、牧草地、農地、都市などの土地利用変化を空間詳細化(ダウンスケール)する手法を新たに開発した。まず、地域ごとのRCPシナリオ作成を担当するアジア太平洋統合評価モデル(AIM)と協力し、AIMのモデルから出力される社会経済情報を0.5°メッシュ(50-100km程度の空間格子情報)へとダウンスケールした。次に、牧草地、農地、都市などの土地利用変化予測のダウンスケールにも取り組んだ。

このように、地球規模でシナリオをダウンスケールする一方で、地域を限定した空間詳細な土地利用変化のシナリオの開発も行った。東京都市圏を対象に、新たに開発した都市経済モデルを用いて土地・建物市場を考慮したシナリオを構築した。

(2) 温室効果ガスとエアロゾル等の排出の空間分布の推定に関する研究

気候モデルを用いて将来の気候変化を定量的に推定するためには、GHGやエアロゾル等の格子点化された排出量データが必要となる。このようなデータはこれまでに存在していたが、排出量の空間分布の経年変化が考慮されていないなど、様々な問題点のあることが知られていた。

一方で、IPCC第5次評価報告書に向けた次世代の気候変動予測シナリオの構築に関して、将来の放射強制力(GHG濃度等の変化により対流圏界面を通過する放射強度の変化量)を数種類に設定したRCPが国際的な研究枠組みの中で統合評価モデル(GHG削減と気候変動影響の回避を目指した地球温暖化対策評価のためのモデル)によって作成され、国際的な気候モデルコミュニティにおいては、複数のRCPシナリオに基づいた気候変動予測が実施されている。

本サブテーマでは、国や地域ごとの積算値で推計されたGHGやエアロゾル等の排出量データから空間詳細な排出量データを作成する手法を開発し、AIMが担当したRCP6.0シナリオ(産業革命以降の放射強制力が 6W/m^2 で安定化するシナリオ)に対応する格子点化された排出量データを作成した。格子点化に際しては、サブテーマ(1)で構築した人口、GDP、農地面積などの空間分布の経年変化データの中から、排出源ごとに適切な指標を採用している。

(3) 空間詳細シナリオの検証と国際研究ネットワークの構築に関する研究

地球規模および地域規模の空間詳細シナリオの検証や、GHG排出量と気候変動リスクに関するボトムアップ分析(地域別の推計結果の積み上げ)においては、都市や地域レベルでの調査や分析が重要である。このため、都市や地域に数多くのテストサイトを設けることが必要となる。

本サブテーマでは、特定の大都市を対象としたボトムアップ分析を実施し、また、科学者の連携を目的とする国際フォーラムの設置や、都市・地域の視点からの研究を促進するための国際研究ネットワークを構築した。

大都市の分析では、エネルギー需給、人口、経済および公共インフラに関する社会経済および社会活動のデータを収集した。そして、シナリオ検証の基礎とするために、例えば中国とタイの大都市における CO_2 排出量の分析など、アジアの一部のメガシティについてボトムアップ分析の手法を用いた量的な推計・分析を行った。また、リモートセンシング画像を利用して都市域の中に存在する建物等の特徴を明らかにし、人口密度を推定する方法を開発した。さらに、都市発展パターンと CO_2 排出量の相関関係を分析するために、空間メトリック法を使用して都市形態と CO_2 排出量を調べる手法を開発した。

(4) 気候変動シナリオの解析による空間詳細シナリオの整合性評価に関する研究

IPCC第5次評価報告書に向けた気候モデル実験が現在行われている。このうち長期シナリオ実験に用いられる将来シナリオとして、RCPが統合評価モデルグループによって作成された。統合評価モデルとは、社会経済モデルを用いてエネルギー需給、温室効果ガスの排出シナリオを作成し、簡易的な計算により大気中での蓄積、気候変化とその環境影響・社会経済へのフィードバックを統合化したものである。シナリオデータとして、人為的なGHGおよびエアロゾル排出とともに、空間的にメッシュ化された土地利用変化シナリオが作成されている。土地利用変化による CO_2 排出量は、化石燃料の使用による排出に次ぐ人為的な排出源となっている。また、自然植生を農耕地や牧草地に転換することにより、地表面の物理的な環境が変化し、気候に影響を与えることもわかりつつある。

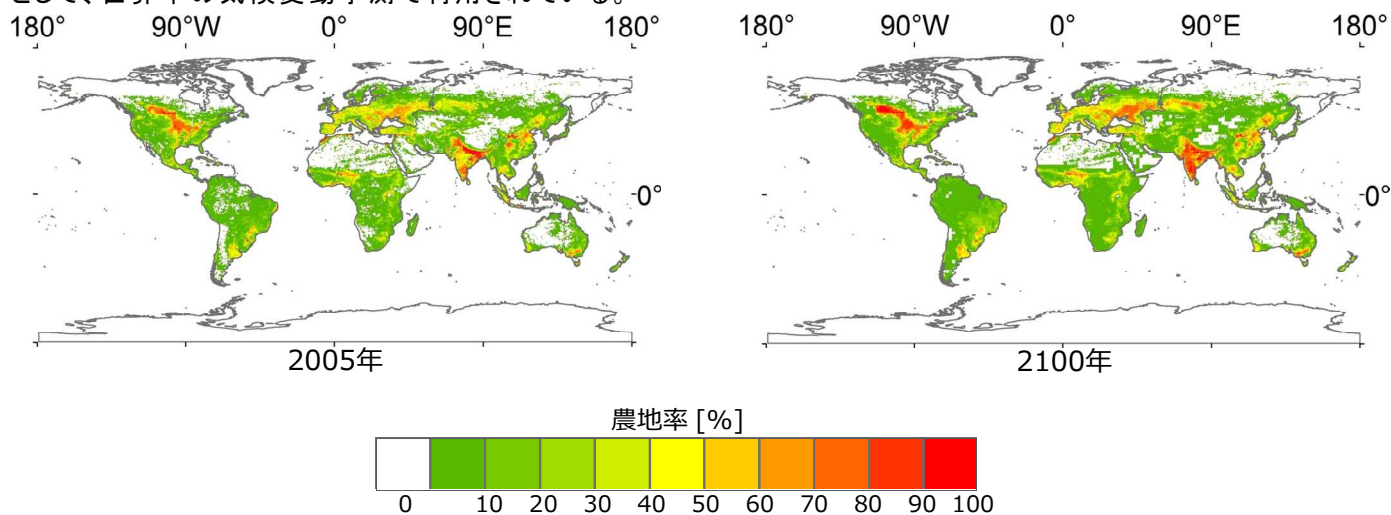
RCPシナリオの CO_2 データには、排出量とともに、これら排出データを簡易気候・炭素循環結合モデルによって計算した濃度シナリオも用意されている。地球システムモデルを用いた実験では、この CO_2 濃度を達成するために必要な、将来の許容可能な化石燃料起源 CO_2 排出量の逆推定を行うものがある。逆推定した許容排出量の評価には、土地利用変化 CO_2 排出シナリオの不確実性および空間詳細な土地利用変化データとの整合性を検討する必要がある。

本サブテーマでは、土地利用変化シナリオに従う場合、将来の土地利用変化起源の CO_2 排出がどのように変化するのか、植生の光合成と呼吸、土壌微生物による分解といった過程を通じた炭素の動きをシミュレートする陸域生態系モデルを利用して評価を行った。この陸域モデルを用いて、IPCC第5次評価報告書に向けて作成されている、大気中GHG濃度を安定化させる新シナリオ(RCP6.0)での森林火災によるブラックカーボン(すす)の排出量のシナリオ作成も行った。

4. 結果及び考察

(1) 社会経済シナリオのダウンスケール手法と土地利用変化シナリオの開発に関する研究

まず、地球全体での空間詳細化に関して、RCP6.0に対応して人口のダウンスケーリングを行った結果、都市部への人口集中が顕著にみられる。推計の参考にした国連人口統計の都市化率が何れの国でも上昇することが原因の1つとして挙げられる。また、空間詳細な土地利用変化シナリオの作成に関しては、図2のように、例えば農地の場合、空間分布が経済発展により変化することを示した。これらの結果は、次期のIPCCシナリオの1つとして、世界中の気候変動予測で利用されている。



※凡例の数字はメッシュ内に占める農地の割合

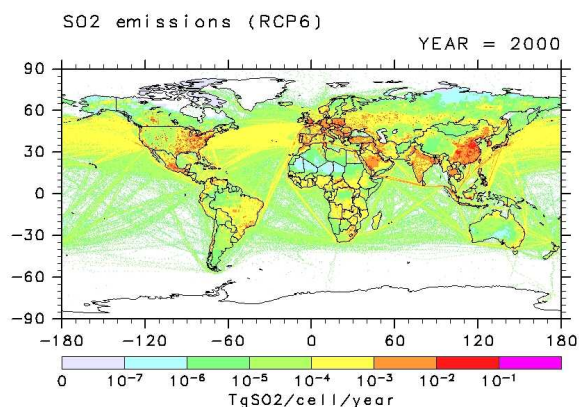
図2 地球全体の空間詳細土地利用変化シナリオ開発結果の一部(農地分布)
(2005年、2100年)

また、東京都市圏を対象に、より地域を限定し、新たに開発した都市経済モデルを用いて空間詳細な土地利用変化のシナリオの開発にも取り組んだ。ここでは、今後の社会経済変化を、人口の集約と分散の2つのタイプのシナリオとして描いた。この結果を用いて、住宅・オフィス・交通などの人間活動による排熱や、緑地率、建物密度を推定し、本課題テーマ3の都市気候モデル研究に提供し、将来の土地利用変化によるヒートアイランド効果が分析された。

(2) 温室効果ガスとエアロゾル等の排出の空間分布の推定に関する研究

図3はRCP6.0シナリオの2000年および2100年における二酸化硫黄(SO_2 : 硫酸エアロゾルの前駆物質)の年間積算排出量の空間分布を示している。 SO_2 など短寿命物質の排出量を空間詳細化することにより、地域的な気候変化の予測精度向上が見込まれる。RCP6.0シナリオでは、 SO_2 排出量が東欧を含む欧米やロシアでは急速に減少する一方で、アジアなどでは2050年頃まで微増した後に減少に転じるため、2100年の排出量は2000年の3分の1程度に留まっている。なお、このような将来の排出量変化はあくまでも統合評価モデルの想定に依存することに注意が必要である。また、排出量推計には様々な不確実性が伴うことにも留意しなければならない。将来の排出量はもちろんのこと、現在の排出量であっても、エネルギー消費などの活動量データの不完全性や活動量を排出量に換算する排出係数の不確実性、空間配分に用いる社会経済情報の不完全性など、様々な問題点を抱えている。将来の気候変化予測における不確実性の低減に資するためにも、現行の排出量推計手法に存在するこれらの不確実性要因について理解を深めることが重要である。

(a)



(b)

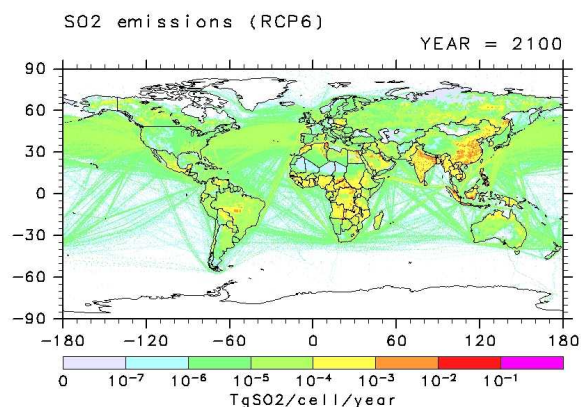


図3 RCP6シナリオの (a) 2000年、(b) 2100年におけるSO₂年間積算排出量の空間分布
単位はTgSO₂/mesh/year。(1Tg=100万トン)

(3)空間詳細シナリオの検証と国際研究ネットワークの構築に関する研究

国際研究ネットワークの構築に関しては、国際研究計画であるグローバルカーボンプロジェクト(GCP)との連携により、ウィーン、バンコク、名古屋、つくば、東京において国際ワークショップとシンポジウムを8回にわたり開催した。定期的にワークショップを開催し、各国の研究者を一堂に集めることは、都市と地域の研究のための研究結果やモデルの手法などを共有し、それらのモデルを今後どのように改善していくかを話し合うことに非常に役立つ。これらの会合は、国際応用システム分析研究所、ポツダム気候影響研究所、アジア工科大学院、名古屋大学、東京大学サステナビリティ学連携研究機構(IR3S)と共催したもので、このうち3つのシンポジウムには、都市の政策決定者や政策立案に関わるコミュニティを招き、研究と政策の連携を深める役割を果たした。また、ヨーロッパ、南北アメリカ、日本およびアジアの主要な研究者や研究機関で構成する「都市エネルギー・気候モデル化フォーラム」を設置し、国際連携を強化した。

また、世界の都市圏の環境と都市形態との分析を通じて、コンパクト性だけではなく、空間構造の多様なパターンを計測し、その特徴と気候変動対策(緩和・適応)との関係を、定量的な指標を用いて分析することが可能となった。特に、リモートセンシング画像による都市形態の計測結果から、CO₂排出量が都市形態と相関関係にあることも再確認された。収集したデータや情報はグローバルな都市炭素収支計画を策定するという長期的な目標に役立つものであり、IPCC第5次評価報告書や全球エネルギー評価などの主要な国際評価にも貢献している。

(4)気候変動シナリオの解析による空間詳細シナリオの整合性評価に関する研究

まず、将来シナリオとともに整備された過去の土地利用変化空間データを利用し、土地利用変化起源のCO₂排出量を推定する方法の妥当性を確認した(図4)。20世紀での土地利用変化による積算炭素排出量は126 Pg Cと計算され、これまでに推定された値と類似の値が得られた。

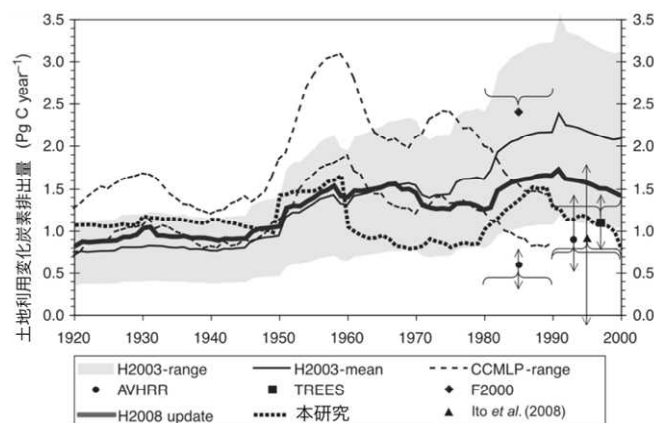


図4 過去における土地利用変化起源の炭素排出量

H2008 updateが標準的に用いられる推定値。

H2008 updateでは植物のCO₂施肥効果が評価されていないため、
20世紀末で過大排出になっているおそれがある。

このモデルを用い、RCPの4つの安定化シナリオそれぞれについて、2005年から2100年の土地利用変化による積算炭素排出量を計算すると、特にRCP2.6とRCP4.5において統合評価モデルによる排出シナリオと本研究との差が大きくみられた。RCP2.6では化石燃料からのCO₂排出量を大きく削減するため、バイオマスの燃焼によるエネルギーを利用しつつ、燃焼によって生じるCO₂を捕集し隔離することを仮定したシナリオとなっているため、農地が拡大していく。逆にRCP4.5では、森林に蓄積された炭素の価値を経済的に評価する政策シナリオにより、農地と牧草地を減らす土地利用シナリオになっている。これら森林植生の増減が炭素循環に与える影響に不確実性が大きいため、陸域生態系モデルを利用した本研究による見積とRCPの統合評価モデルによるものとの差が大きくなっている（RCP2.6では+53 Pg C、RCP4.5では-63 Pg Cの排出量差）。

また、RCP6.0での森林火災によるブラックカーボン（すす）の排出量のシナリオ作成を行った結果を図5に示す。この結果、火災排出において、大気CO₂濃度の上昇による陸域炭素蓄積量の変化を通した影響が大きくみられた。

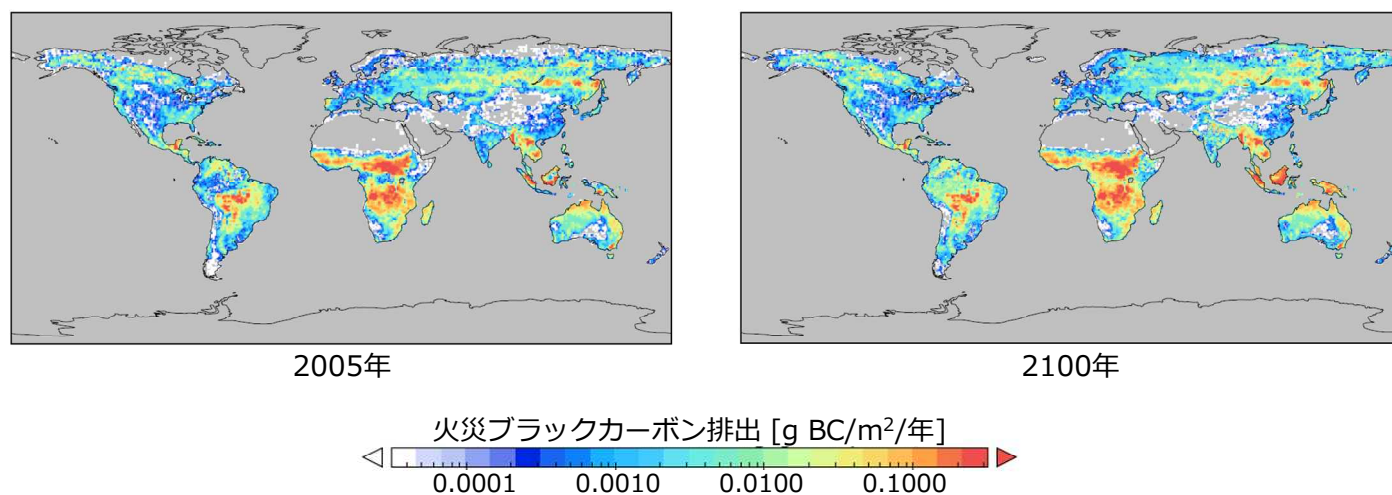


図5 RCP6.0シナリオの森林火災ブラックカーボン排出

土地利用変化起源の排出シナリオの不確実性を減らすため、今後詳細な気候と植生を結合したモデルによる解析を行い、シナリオ作成プロセスにフィードバックすることが重要であると考えられる。

5. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 木下嗣基, 山形与志樹, 岩男弘毅 (2008): 炭素クレジットが土地利用に与える影響の予測. 環境科学会誌, 21(1), 37-52.
- 2) Kinoshita, T., K. Inoue, K. Iwao, H. Kagemoto and Y. Yamagata (2008): A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS. *Applied Energy*, 86(1), 1-11, 1-8.
- 3) Kinoshita, T., E. Kato, K. Iwao and Y. Yamagata (2008): Investigating the rank-size relationship of urban areas using land cover maps. *Geophysical Research Letters*, 35.
- 4) Dhakal, S. (2009): Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy*, 37(11), 4208-4219.
- 5) Kinoshita, T., T. Ohki and Y. Yamagata (2009): Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan. *Applied Energy*, 87(9), 2923-2927, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.025.
- 6) Kawase, H., T. Nagashima, K. Sudo and T. Nozawa (2011): Future changes in tropospheric ozone under Representative Concentration Pathways (RCPs). *Geophysical Research Letters*, 38, L05801, doi:10.1029/2010GL046402.
- 7) 山形与志樹, 瀬谷創, 中道久美子 (2011): 土地利用モデルを用いた東京都市圏の土地利用シナリオ分析. 環境科学会誌, 24 (3), 169-179.
- 8) Kato, E., T. Kinoshita, A. Ito, M. Kawamiya and Y. Yamagata (2011): Evaluation of spatially explicit emission scenario of land-use change and biomass burning using a process-based biogeochemical model. *Journal of Land Use Science*, doi:10.1080/1747423X.2011.628705.
- 9) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari, E. Kato, P.R. Shukla, Y. Yamagata and M. Kainuma (2011): An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. *Climatic Change*, 109, 59-76.
- 10) Hajima, T., T. Ise, K. Tachiiri, E. Kato, S. Watanabe and M. Kawamiya (2012): Climate change, allowable emission, and earth system response to representative concentration pathway scenarios. *Journal of Meteorological Society Japan*, in press.

<査読付論文に準ずる成果発表> (「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可)

特に記載すべき事項はない

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Makido, Y., Y. Yamagata and S. Dhakal: Revealing Intra-Urban Features Using Optical and SAR images. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Boston, USA, March 2008.
- 2) 竹村俊彦, 野沢徹: 21世紀のエアロゾルの分布と放射強制力の予測. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年3月.
- 3) 磯崎勉, 野沢徹, 植田宏昭: プレモンスーン期の大気・地表面加熱におけるエアロゾルの寄与. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年3月.
- 4) 木下嗣基, 石渡佐和子, 山形与志樹: IPCC 新シナリオに向けたRepresentative Concentration Pathwaysの土地利用シナリオ. 環境科学会2008年会, 兵庫, 2008年9月.
- 5) Kato, E., A. Ito and M. Kawamiya: Modeling the global emissions from vegetation fire for the scenario data of integrated assessment model. American Geophysical Union (AGU) 2008 Fall Meeting, San Francisco, December 2008.
- 6) Yamagata Y. and T. Kinoshita: Geographic assessment of potential woody biomass use in Japan. International Conference on Applied Energy, Hong Kong, January 2009.
- 7) 瀬谷創, 堤盛人, 山形与志樹: 空間的な依存性と異質性を考慮した新古典派成長モデルによる我が国の地域間所得格差分析. 第39回土木計画学研究発表会・春大会、徳島, 2009年6月.
- 8) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari and E. Kato: Emission pathway for 6W/m². IAMC Meeting, Tsukuba, Japan, September 2009.
- 9) 瀬谷創, 堤盛人, 山形与志樹: 空間計量経済モデルを用いた地域所得収束仮説の検証. 第23回応用地域学会, 山形, 2009年12月.
- 10) Kato, E., M. Kawamiya, T. Kinoshita and A. Ito: Spatially explicit scenario of terrestrial emissions from biomass burning and net land-use change for the use of climate projection. American Geophysical

Union (AGU) 2009 Fall Meeting, San Francisco, December 2009.

- 11) 山形与志樹, 瀬谷創, 中道久美子: 東京都市圏の将来の土地利用と都市環境に関するシナリオ分析. 環境科学会2010年大会, 東京, 2010年9月.
- 12) 瀬谷創, 山形与志樹, 中道久美子: 広域都市圏における町丁目単位の土地利用モデルの構築に関する基礎的検討. 土木学会第42回土木計画学研究発表会, 甲府, 2010年11月.
- 13) Nakamichi, K., Y. Yamagata and H. Seya: Mapping of the CO₂ and anthropogenic heat emission under spatially explicit urban land use scenarios. American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.
- 14) Yamagata, Y., H. Bagan, H. Seya and K. Namamichi: Geographically explicit urban land use change scenarios for Mega cities: a case study in Tokyo. American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.
- 15) Kato, E. and M. Kawamiya: Analysis of consistency of global net land-use change carbon emission scenario using offline vegetation model and earth system model. American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.
- 16) 中道久美子, 山形与志樹: 都市圏に着目した家庭部門CO₂排出量の分布特性・要因把握に関する基礎分析, 第43回土木計画学研究発表会, つくば, 2011年5月.
- 17) Kato, E. and M. Kawamiya: Evaluating global carbon emission and climate response for the land-use change scenarios of RCPs. GEO-Carbon Conference: Carbon in a changing world, FAO, Rome, Italy, October 2011.
- 18) Dhakal S.: Urban energy use and CO₂ emissions: Current understandings and unresolved questions. Workshop on the Role of Human Settlements, Infrastructures, and Spatial Planning for Climate Change Mitigation, Oslo, Norway, November 2011.
- 19) Kato, E. and M. Kawamiya: Evaluating global land-use change scenario: carbon emission in RCP scenarios and its effects on climate response. American Geophysical Union (AGU) 2011 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2011.

6. 研究者略歴

課題代表者: 山形 与志樹

1961年生まれ、東京大学教養学部卒業、博士(学術)、現在、(独)国立環境研究所・地球環境研究センター・主席研究員

研究参画者

(1): 山形 与志樹 (同上)

(2): 野沢 徹

1968年生まれ、京都大学大学院理学研究科修了、博士(理学)、現在、(独)国立環境研究所・地球環境研究センター・気候モデリング・解析研究室室長

大原 利真

1954年生まれ、北海道大学大学院工学研究科修了、博士(工学)、現在、(独)国立環境研究所・地域環境研究センター・センター長

(3): ソバカル・ダカール

1970年生まれ、東京大学大学院工学系研究科修了、博士(学術)、現在、(独)国立環境研究所・地球環境研究センター・フェロー

(4): 河宮 未知生

1969年生まれ、東京大学大学院理学系研究科博士課程単位取得のうえ退学、博士(理学)、現在、(独)海洋研究開発機構・地球環境変動領域・地球温暖化予測研究プログラム・地球システム統合モデリング研究チーム・チームリーダー

S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

4. 統合システム解析による空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの開発

(1) 社会経済シナリオのダウンスケール手法と土地利用変化シナリオの開発に関する研究

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター

山形与志樹

<研究協力者>

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター

石渡佐和子（平成19～21年度）

松本健一（平成20～22年度）

中道久美子（平成21～23年度）・

横畠徳太（平成22～23年度）

瀬谷創（平成22～23年度）・・・

大気圏環境研究領域

石渡佐和子（平成22年度）

社会環境システム研究センター

甲斐沼美紀子・増井利彦

茨城大学農学部

木下嗣基

平成19～23年度累計予算額：163,509千円

（うち、平成23年度予算額：34,059千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書では、気候変動予測に用いるシナリオは、気候変動と社会変化に関連がないだけでなく、空間的にも、全世界を10数地域に分割したものであった。しかし、近年では、温暖化問題に対する適応と緩和の重要性や、空間解像度に伴う不確実性が指摘されており、自然システムと社会システムを統合した解析と、エアロゾルの排出や土地利用変化に関する空間詳細なシナリオの必要性が唱えられている。これらの背景を受けて、次期IPCC評価報告書に向けた代表的濃度経路(Representative Concentration Pathways:RCP)シナリオでは、空間詳細排出データを作成することが決められた。そのため、本サブテーマでは、全球を対象に、人口やGDPなどの社会経済シナリオおよび土地利用変化について、国レベルおよび50km程度の格子レベルに、シナリオの特徴を反映させたダウンスケール手法の開発に取り組んだ。さらに、土地利用・交通モデルを構築し、東京都市圏の空間詳細な土地利用変化シナリオを作成すると共に、緑被率、人工排熱、建物密度といった都市気候モデルへの重要な入力変数を算出した。まず、全球での空間詳細土地利用シナリオの作成では、社会経済情報と共に、牧草地、農地、都市などの土地利用変化予測を0.5°格子へとダウンスケールし、それらの結果をRCPシナリオの1つとして提出した。一方で、地域を限定したより高詳細な社会経済・土地利用変化シナリオの開発では、建物に関する情報を明示的に考慮することで、自然に将来の人工排熱パラメータが取得できることを示し、空間詳細な土地利用シナリオを構築した。これらのデータは、テーマ3へ提供し、将来のヒートアイランド効果が分析された。これらの研究により、将来の気候変動による影

響を予測するために必要となる、空間詳細な土地利用シナリオに関する知見が得られ、より詳細な気候変動影響評価や適応策の検討に資することができた。

〔キーワード〕 社会経済シナリオ、土地利用変化、ダウンスケール、応用都市経済モデル、RCP

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書では、気候変動予測に用いるシナリオは、多くのシナリオから代表的な数値を抽出したものであり、気候変動と社会変化に関連がないだけでなく、空間的にも、全世界を10数地域に分割したものであった。しかし、近年では、温暖化問題に対する適応と緩和の重要性が指摘されており、自然システムと社会システムを統合した解析が喫緊の課題となっている。また、エアロゾルの排出や土地利用変化は、その空間解像度に伴う不確実性が指摘されており、空間詳細なシナリオの必要性が唱えられている。

このような背景に対して、IPCC第5次評価報告書に向けて、新シナリオの作成に関する議論が行われている。そこでは従来の手法とは異なり、2100年の放射強制力を一定とする仮定の下で、地球システムモデル(ESM)による将来気候変動の予測を行い、その結果を利用して適応と緩和を考慮した社会・経済シナリオの作成を行うことが決定した。世界の統合評価モデル(Integrated Assessment Model: IAM)のうち、既にピアレビューが行われた4モデルにより、パスが異なる放射強制力の最小限のシナリオを作成することとなった。このシナリオは代表的濃度経路(Representative Concentration Pathways: RCP)と呼び、自然起源を含む、温室効果ガス(GHG)とエアロゾルの空間詳細な排出およびその変化、空間詳細な土地利用変化を作成する。しかし、既往のIAMではESMが必要とする空間解像度での出力は不可能である。そのため、IAMの結果をダウンスケールすることで、ESMが要求する解像度の排出および土地利用変化のシナリオを作成することが必要とされている。

本テーマでは、それらRCPにおける過去の排出データと将来排出シナリオの空間詳細化、および社会経済要因による排出を補完する形での土地利用変化と自然起源の排出の推定を担当する。本サブテーマでは、将来排出シナリオを空間詳細化するために、国レベルおよび100-50km程度の格子(メッシュ)レベルに、シナリオの特徴を反映するように土地利用をダウンスケールする新たな手法の開発に取り組む。2000年から2100年を対象とし、社会経済情報の中で重要性が高い人口・GDPの空間詳細ダウンスケールを行うとともに、土地被覆・土地利用のダウンスケールシナリオを開発する。具体的には、シナリオの特徴を反映した社会経済発展の空間パターンを推定するための空間経済モデルを開発し、グローバルな社会経済シナリオの国レベルおよびメッシュレベルへのダウンスケールを実施すると共に、これらダウンスケール化された社会経済シナリオと、土地被覆情報、地形、植物の純一次生産分布、農作物の反収(単位面積あたりの収量)の分布などを用いて、土地利用ダウンスケールを行う。

さらに、作成されたRCP空間詳細シナリオに対して、より高詳細な社会経済・土地利用シナリオの開発を行う。これはIPCC第5次評価報告書において、気候変動の影響及び適応研究が重要となるが、その推測を行うためには、ESMだけでなくより詳細な気候モデル(Regional Climate Model: 以降、RCMという)が必要となる。そこでRCPに準拠し、かつRCMに対応可能な社会経済・土地利用シナリオの作成を行う。具体的には、地域を限定した上で、土地利用・交通(Land Use Transport:

LUT) モデルを構築し、より詳細なダウンスケールとして、空間詳細な土地利用変化シナリオを作成すると共に、都市気候モデルへの重要な入力変数を算出する。このシナリオは本研究課題のテーマ3において使用される標準シナリオとなるものである。

2. 研究開発目的

これまでの気候変動シナリオ研究では、世界を10数地域に分割したグローバルな社会経済シナリオを用いた将来予測が実施されてきたが、本研究では、次世代の気候変動シナリオの構築に向けて、空間詳細な社会経済シナリオ・土地利用シナリオの開発を実施する。このために本サブテーマでは、下記について研究を実施する。

(1) 社会経済シナリオのダウンスケール

空間的な社会経済発展パターンをモデル化し、人口およびGDPシナリオについて、緯度経度0.5°の格子（メッシュ）レベルに空間詳細化（ダウンスケール）する手法の開発を行う。空間詳細化された社会経済シナリオは、将来の排出分布を予測するパラメータとして使用される。平成19年度に既往研究を踏襲したモデルを開発したが、平成20年度にはモデルの分析を行い、問題点等を修正することで、よりシナリオとしてふさわしいダウンスケール手法の開発を行った。この結果は、土地利用変化シナリオやサブテーマ（2）の入力情報として利用される。

(2) 全球空間詳細土地利用シナリオの開発

農林地間の転換をモデル化した、土地利用変化シナリオの開発を行う。21世紀には人口の増大、食生活の変化、バイオマス燃料の使用増加が予測される。一方、収量の増加は頭打ちになってきており、今後は農地面積の拡大が予想される。この土地利用変化は、社会・経済のみならず、気候にも影響を与えることが予想されるため、地球システムモデル(ESM)や統合評価モデル(IAM)に利用される。平成19年度は、農地と林地間の土地利用変化予測を行ったが、平成20年度はこれらに加えて、牧草地や都市など土地被覆・土地利用の7カテゴリについて変化予測を行いシナリオの作成を行った。平成21年度においては、バイオマス作物向け農地の分布シナリオの作成を中心として行うと共に、平成20年度までに開発したシナリオの問題点を改良した。このシナリオの作成には、統合評価モデルの1つであるアジア太平洋統合評価モデル(Asia Pacific Integrated Model : AIM)と連携をし、RCPに準拠した土地被覆・土地利用変化シナリオ(RCP6.0)となると同時に、サブテーマ（4）の入力情報として利用される。

(3) 日本全国市区町村単位での排出量の推計とマッピング

下記「（4）空間詳細シナリオの構築と都市気候モデル入力変数データの作成」において必要となる、関東地方を対象とした空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの分析におけるCO₂排出量の推計に向け、まず現状分析として、日本全国を対象にCO₂排出量を直接排出量・間接排出量の両面から市区町村単位で推計し、その結果を地理情報システム(GIS)を用いてマッピングすることで、その空間分布の比較分析を行う。この結果は、サブテーマ（2）の不確実性評価と比較を行うデータとして利用できる。

（４）空間詳細シナリオの構築と都市気候モデル入力変数データの作成

本モデル分析の目的は、空間詳細な土地利用の変化を空間経済モデルによって表現すること、空間経済モデルのシミュレーションを行うソフトウェアを開発すること、シミュレーションによるシナリオ分析を行うことである。平成21年度までに作成した空間経済モデルを高度化した、土地・建物市場同時均衡型のLUTモデルを構築し、東京都市圏の空間詳細な土地利用変化シナリオを作成すると共に、緑被率、人工排熱、建物密度といった都市気候モデルへの重要な入力変数を算出し、テーマ3へ最終データ提供を行う。

３．研究開発方法

（１）社会経済シナリオのダウンスケール

１）人口シナリオ

人口のシナリオは2000年を起点に2300年まで作成を行う。2300年までの世界合計のシナリオは、RCP策定作業に参加している国際応用システム分析研究所(International Institute for Applied Systems Analysis：IIASA)により作成された経路に基本的に従うことが取り決められている。一方、国連(UN)では、国別人口の予測は複数ある。全世界を網羅したシナリオはUN Short rangeと呼ばれるものとUN Long rangeと呼ばれる2種類が存在する。UN Short rangeは、詳細なデータを用いて作成されたものだが、2050年までのシナリオである。UN Long rangeは2300年までのシナリオであるが、改訂作業の頻度がUN Short rangeよりも低く、現在公開されているものは、2050年までの人口シナリオにおいてもUN Short rangeとの乖離も見られる。また、予測も50年おきの人口である。本サブテーマでは、上記の3種類のデータを用いて2300年までの国別人口シナリオの作成を行う。

2050年までの国別人口シナリオは、UN Short rangeの中位シナリオをそのまま適用する。このシナリオは、IIASAの全世界経路とは若干のずれは生じているが、2050年までの短期間ではその差は大きくない。2050年から2300年までは、UN Short range中位シナリオ、UN Long rangeの中位シナリオと、IIASAの全世界シナリオを併用する。全世界の合計はIIASAシナリオと一致させ、国の配分はUN Long rangeを用いることで比較的容易に人口シナリオの作成が出来る。しかし、この方法では2050年の国別人口が、UN Short rangeとUN Long rangeで異なるため、2050年から2100年の人口変化は不自然な経路となる。そこで、2050年のデータとしては、UN Short rangeの値を用い、それ以降の人口の経路は、UN Long rangeの各国の人口増加率を用いて、UN Long rangeを修正する。また、UN Short rangeにはデータがあるが、UN Long rangeにはデータが無い国がいくつか存在する。そのような国は、UN Long rangeの全世界人口増加率を適用する。このようにして、UN Long rangeの中位シナリオを修正する。この修正されたUN Long rangeシナリオとIIASA全世界人口シナリオと一致するように、修正されたUN Long rangeシナリオに全世界一律の係数を乗じる。

このように作成された国別人口シナリオを緯度経度0.5°のメッシュ人口にダウンスケールを行う。平成19年度には、既往研究に準じた人口ダウンスケールを行った。平成20年度にその結果や手法の詳細な検討を行ったところ、いくつかの問題点が判明したため、修正を行った。RCPでは、0.5°メッシュ毎の土地利用や、エアロゾル排出シナリオを作成する。土地利用シナリオは0.5°メッシュ内での土地利用割合を作成する。既往研究の人口ダウンスケールシナリオでは、海を含むメッシュでは、海か陸を事前に決定する。この方法では、海岸付近の大都市を含むが半分は海

のようなメッシュは海となり人口は0となる。しかし、土地利用では「都市(Urban and Built-up area)」は、メッシュに占める割合を報告するため矛盾が生じる。人口ダウンスケールシナリオの作成では、 0.5° メッシュのうち、陸の割合が $1/144$ 以上の場合は、解析対象メッシュとする。このような方法では、既往研究の重力モデルを用いた都市人口シナリオ作成が不可能となる。そこで、重力モデルに変わって、ランクサイズルールの適用を行う。ランクサイズルールの適用を行うため、メッシュに占める都市部の割合を0から1までの指数とする。既往の方法では、この指数は0か1のいずれかをとる。また、既往の方法では、都市域の拡大は初期条件に大きく依存し、初期条件の設定も不確定要因が大きいものであった。本方法では、都市域の拡大も人口と同時に推定を行う手法を開発した。非都市部の人口については、重力モデルを適用するように変更した。

2) GDPシナリオ

国別GDPのシナリオは、国連環境計画(United Nations environment programme: UNEP)の地球環境概況4(Global Environment Outlook 4: GE04)で作成されたInternational Futures(IFs)国別シナリオと国際貿易分析プロジェクト(Global Trade Analysis Project: GTAP)データを用いる。RCPに用いる社会経済シナリオのGDPには2001年のGTAPデータを用いるため、基準年のGDPはGTAPのデータを用い、2010～2100年のGDPの推定はIFsのGDP増加率から推定を行う。ただし、GTAPの国・地域数は90程度であり、複数の国がまとまった地域のGDPは国レベルに分解する必要がある。そこで、まずGTAPの地域で、IFsにGDPデータが記載されている国(A群)と、記載されていない国(B群)に集計する。A群とB群のGDPは人口を指標として按分を行う。A群の国別人口はA群のGDPからIFsのGDP比率を用いて按分を行う。B群の国別人口はB群のGDPを人口比率を用いて按分を行う。

国から緯度経度 0.5° メッシュへのダウンスケールは、既往研究および平成19年度の方法と同一の手法を用いる。Grubler et al. (2007)¹⁾の手法に従って、別途計算を行った富裕層および貧困層の所得と、都市および農村のメッシュ人口を用いて、メッシュのGDPを計算した。この時、農村メッシュには、貧困層のみが含まれ、都市メッシュには20%が富裕層、80%が貧困層であると仮定した。ダウンスケールに必要となるUNの都市化率データと、富裕層の所得率は最新のデータに差し替えを行った。

(2) 全球空間詳細土地利用シナリオの開発

土地利用シナリオの分類カテゴリは、「都市(Urban and Built-up area)」、「農地(Cropland)」、「牧草地(Pasture)」、「伐採森林(harvest forest)」、「自然草地(Natural Grassland)」、「その他森林(Natural Forest)」、「その他(Other land)」の7種類で、メッシュ毎の被覆割合のシナリオを作成する。都市の2000年のデータには持続可能性と地球環境センターthe Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE)のデータを用いる。2010年から2100年の都市面積の拡大は、AIMにより作成された名目GDP、農業生産量、農地面積変化率、穀物価格のデータを用い、ランクサイズルールによって推定する。農地の推定は、ニューハンプシャー大学(NH大学)の2000年の全世界農地分布を基準データとし、AIMの全世界を24地域に分割した各地域の農地面積の変化率を用いて2100年までの農地分布を推定する。農地の分布には、現状の分布データ、斜度、穀物単収、名目GDP、穀物価格を用いる。賃金の上昇と共に、傾斜地の農地は減少し、相対的に穀物単収が低い土地が利用されることをモデルで表す。牧草地の推定も農地の推定と同様であるが、斜度の基準を農地よりも高めに設定する。伐採森林の分布は基準年のデータは存在しな

い。そこで、人口ポテンシャルの関数として、全森林に占める伐採森林を定義した。基準年における、伐採森林の国・地域のデータも存在しないため、統計データが存在する伐採量と、陸域生態系モデルの双方を用いて伐採森林の面積を定義した。2010年から2100年の伐採森林面積は、AIMによって算出された変化率を用いた。自然草地、その他森林、その他に関しては、都市、農地、牧草地、伐採森林の剰余分が該当する。その剰余分を、国土地理院によって作成された地球地図の土地被覆図を使用して、自然草地、その他森林、その他への按分を行った。このように、平成20年度には、全球緯度経度0.5°メッシュで2000年から2100年の都市、農地、牧草地、森林伐採面積等の土地利用シナリオの開発を行った。このシナリオはRCPに提供されるものであり、各メッシュの各土地利用タイプを割合で表しているという画期的なシナリオであった。

これらに加えて、平成21年度には、バイオ燃料として利用されるバイオマス作物栽培地域のシナリオの作成を行うことが、国際コミュニティで決定され、それに対応した。CGE(一般均衡モデル: Computational General Equilibrium) モデルによって全世界24地域に分割した地域ごとに、バイオマス作物の栽培面積に関する2100年までのシナリオを作成した。バイオマス作物の栽培地域の推定には、全球の糖料作物と油料作物の反収の分布を元にして、エタノール収率に変換したマップを用いて、各地域の収率が高い農地にてバイオマス作物の生産が行われると仮定した。

また、モデルの改良として、陸域生態モデルの結果を用いて、植物のCO₂施肥効果の影響を修正すると共に、2000年のベースとなるマップを用いて既往のマップを統合することでより高精度なものを作成した。

(3) 日本全国市区町村単位でのCO₂排出量の推計とマッピング

CO₂排出量は、温暖化対策の基礎であり、下記「(4) 空間詳細シナリオの構築と都市気候モデル入力変数データの作成」において、本研究課題のテーマ3へ気候モデル指標として提供した人工排熱量の算出データとしても応用できる。本分析では、このCO₂排出量に着目し、直接排出量と間接排出量に分けて推計を行った。ここで、「直接排出量」とは、エネルギー転換や製造、運輸等に伴う排出量を、排出場所に割り付けた値を、「間接排出量」とは、エネルギーや製造物等を使用するユーザー(企業や家庭、交通利用者等)に、それぞれの消費量に応じて割り付けた値を指すものと定義した。研究方法としては、積み上げ方式の推計方法をベースとして、市区町村あるいはメッシュ単位で、民生部門(家庭・業務)、産業部門、運輸部門という各セクターのCO₂排出量を算定する研究成果をGISを用いて統合し、エネルギー利用に伴う間接及び直接CO₂の排出量を全国市区町村単位で推計した。

まず、民生部門(家庭)のCO₂排出量については田中ら(2008)⁶⁾の手法を、民生部門(業務)のCO₂排出量については外岡ら(2008)⁷⁾の手法を、それぞれ応用して推計を行った。両部門ともに、各種統計を組み合わせてエネルギー源別・用途別のエネルギー消費量を推計しているが、このうちエネルギー源については、電力、都市ガス、LPG、灯油を対象としており、電力については直接排出量には含めず間接排出量にのみ含めることとした。次に、産業部門については、Nansai et al. (2004)²⁾の手法を応用し、日本全体の温室効果ガスインベントリデータと組み合わせて推計を行った。産業セクターの区分は、電気業、熱供給業、都市ガス製造業、農林業、水産業、鉱業、建設業、製造業、機械、廃棄物焼却であり、このうち電気業、熱供給業、都市ガス製造業については、間接排出量には含めず直接排出量にのみ含めることとした。最後に、運輸部門の中でも自動車に

については、交通量、走行量・平均速度、保有台数、車種・年式構成等を考慮して推計したCO₂排出量を、移動地域別に3次メッシュ単位で集計したKannari et al. (2007)³⁾の推計結果を直接排出量とし、車両の登録地となっている市区町村別に集計した米澤ら(2009)¹¹⁾の推計結果を間接排出量として活用した。さらに鉄道に関しては、事業者別の旅客鉄道CO₂排出量を路線別輸送量と駅別乗降客数を用いて市区町村へ分担した工藤ら(2005)⁵⁾の推計結果を、間接排出量として利用している。

(4) 空間詳細シナリオの構築と都市気候モデル入力変数データの作成

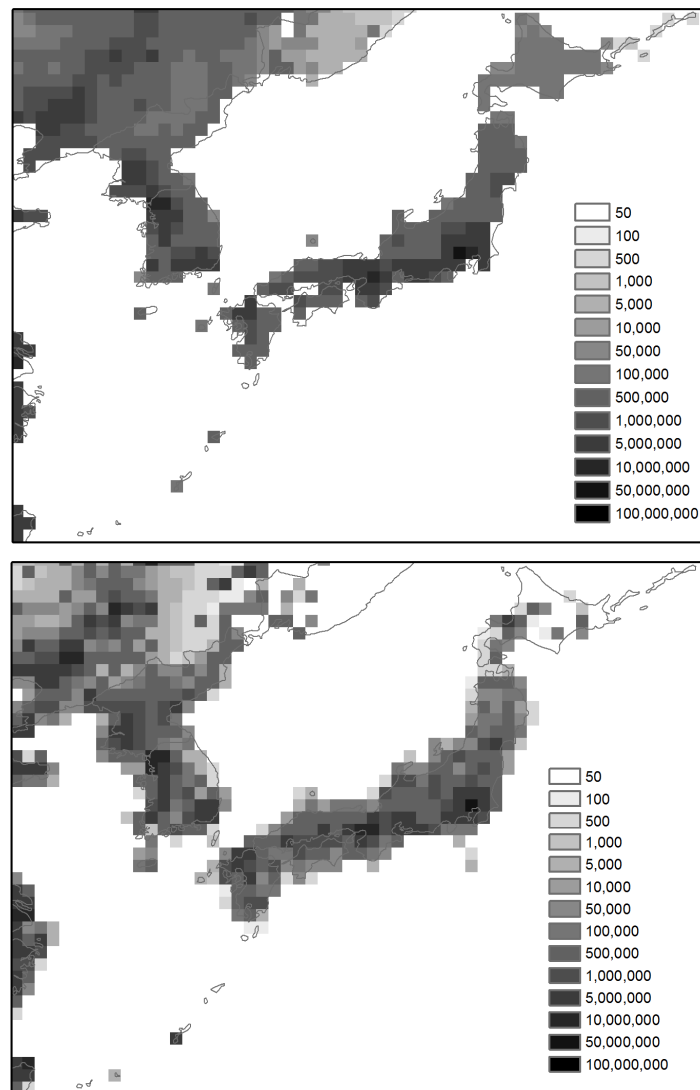
将来の土地利用シナリオについて検討する場合、世帯や企業の立地行動について分析する必要がある。ミクロ的な経済行動メカニズムを考慮して将来の土地利用シナリオを構築する代表的手法としては、LUTモデル(古谷, 2003⁹⁾; Wegener, 2004⁴⁾)が挙げられる。一方、従来からヒートアイランド分析などで利用されてきた都市気候モデル研究においては、将来気候を分析する際に人工排熱分布をはじめとする入力変数の多くは現状と同一と仮定されることが多かった。現在、将来の土地利用変化を一定と仮定せずに、緑被率、人工排熱、建物密度といった都市気候モデルへの重要な入力変数について、将来変化をシナリオとして与えることのできる、LUTモデルを活用した研究の必要性が認識されつつある。しかしながら、LUTモデルに関する既往研究の多くは、市区町村か同等程度のゾーンを対象としており、また1km×1km程度のミクロなゾーンを対象とした研究も、市区町村内といった比較的狭い領域を対象とした分析か、仮想データを用いたシミュレーション分析にとどまっている。

そこで、本研究では、空間経済モデルの高度化の内容として、都市気候モデルへの入力変数を算出するため、特に、1) 近年の気候モデルの空間詳細化、いわゆるダウンスケーリングの流れを考慮し、1km×1km程度のミクロな領域において、これらの入力変数を算出すること、2) 都市気候モデルで必要とされる変数は、人工排熱や天空率など、建物の高さに依存するものが多いため、建物市場を明示的にモデル化することに留意し、LUTモデルを構築する。具体的には、町丁目レベルでは初めての開発例となる、土地・建物市場同時均衡型LUTモデルの新たなフレームを導入しており、対象地域は東京都市圏の333市区町村に含まれる、22,368の町丁目単位(平均面積0.688 km²)である。本研究で構築したモデルのベースは、ミクロ経済学の理論と整合的な都市モデルであり、都市政策の評価ツールとして豊富な適用事例を持つ応用都市経済(Computable Urban Economic: CUE)モデル(山崎ほか, 2008)¹⁰⁾である。特に新たに大都市圏の町丁目レベルでの詳細な実データを用いてキャリブレーションを実施し、建物市場を明示的に均衡モデルに組み入れた世界的に見ても初めての試みである。

4. 結果及び考察

(1) 社会経済シナリオのダウンスケール

平成19年度に作成した既往の方法による人口分布と、平成20年度に開発した日本付近の人口分布の比較を図(1)-1に示す。上の図は平成19年度の結果で、下の図は平成20年度に開発したモデルの結果である。入力データを最新のものに変更したため、傾向は異なるが、海岸線付近が大きく異なることが分かる。例えば、旧モデルでは横浜を含むメッシュの人口は0であるが、新モデルでは大きな人口を有している。全世界に目を通すと、旧モデルで見られた、人口増加が著しいアフリカの国で、2050年に現在のニューヨークや上海、東京といった都市よりも規模の大きい

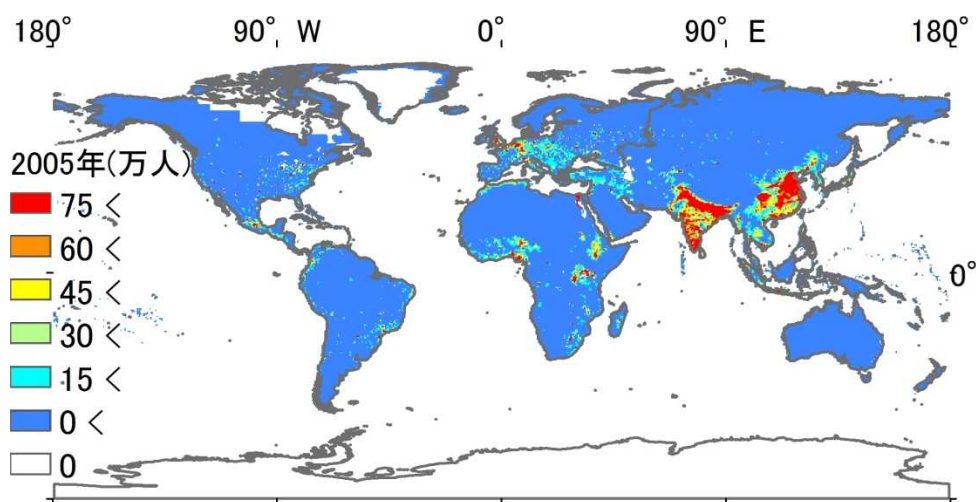


図(1)-1 2050年の日本付近人口分布。上図は旧モデルの結果、下図は新モデルの結果。凡例の数字はメッシュあたりの人口（人）を表している。

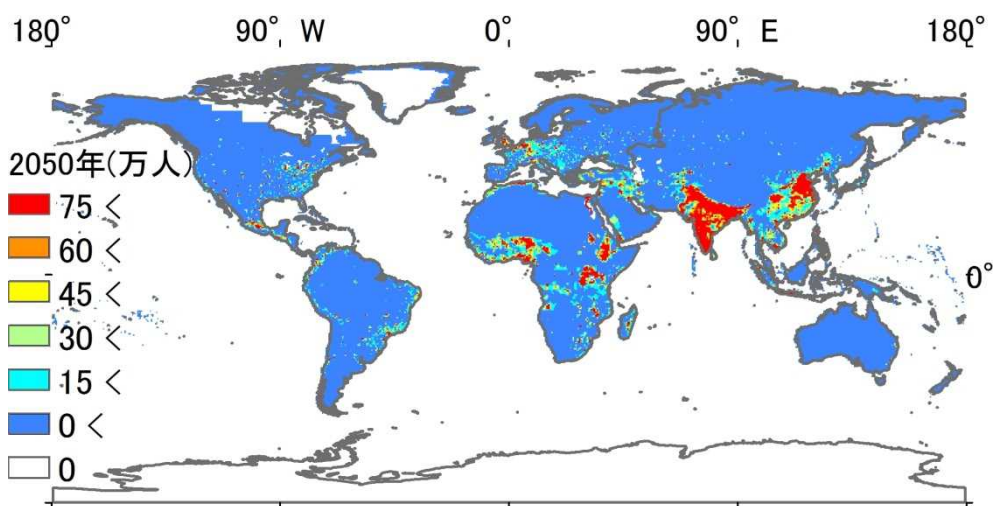
都市が形成されていた点が改善された。

まず、RCP6.0 に対応した人口のダウンスケーリング結果の一部（2005 年、2050 年、2100 年）を図(1)-2 に示す。2005 年と 2100 年の分布を比較すると、都市部への人口集中が顕著に見られる。これは推計の参考にした UN の都市化率が何れの国でも上昇することが原因の 1 つとして挙げられる。

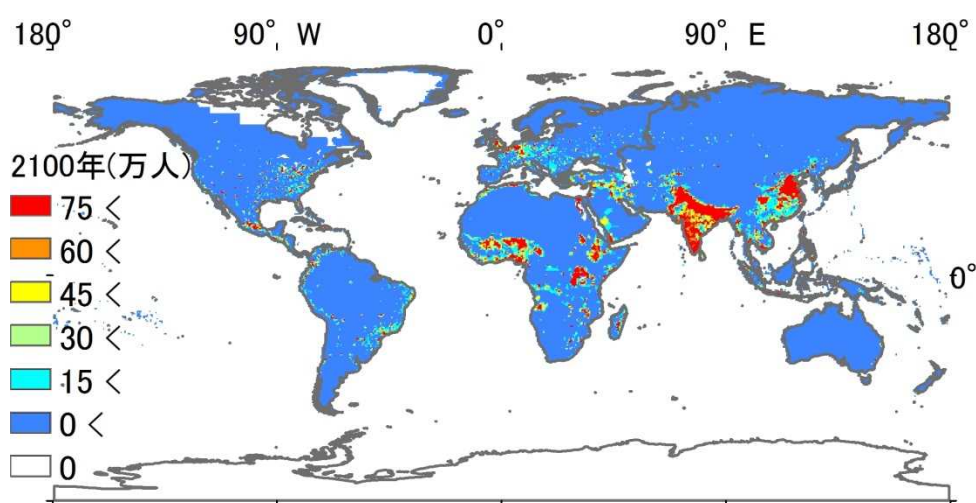
(a)2005年



(b)2050年

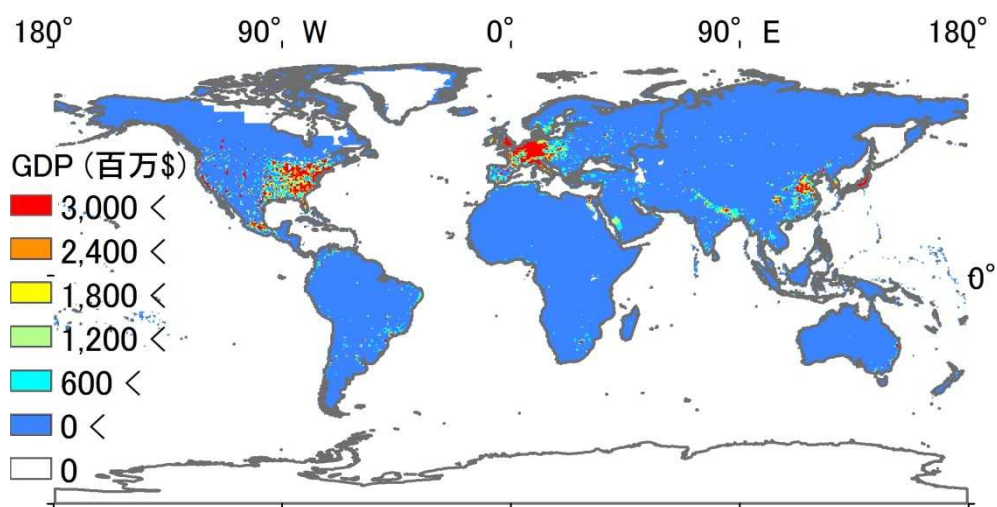


(c)2100年

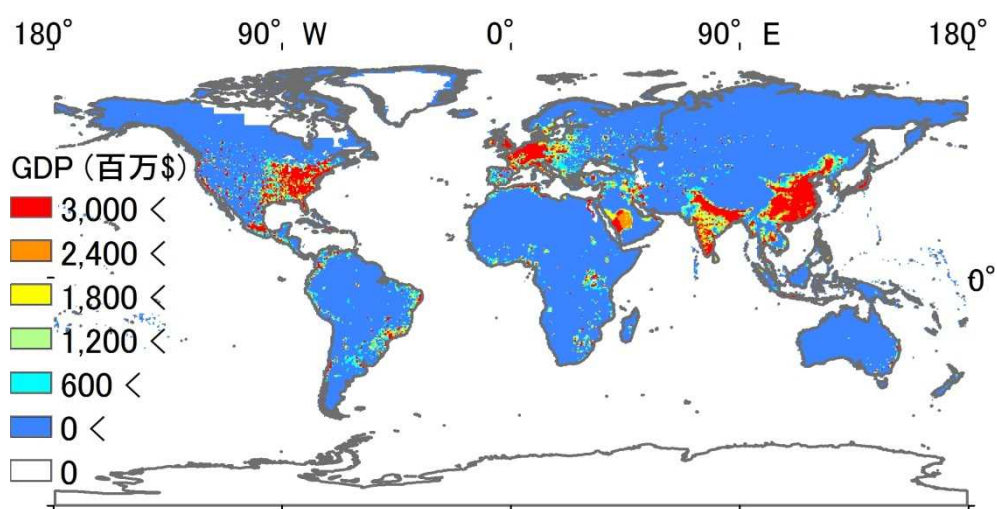


図(1)-2 人口のダウンスケーリング結果 (2005年、2050年、2100年)

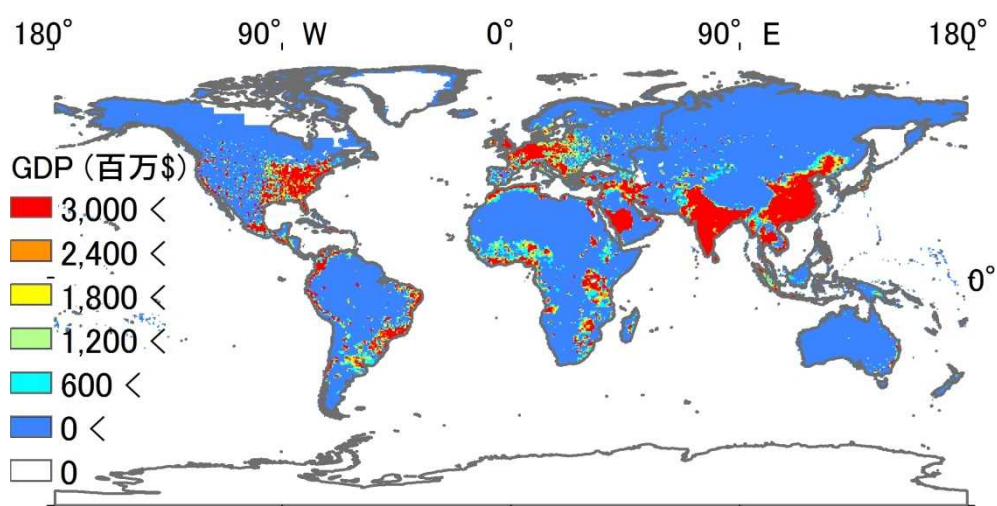
(a)2005年



(b)2050年



(c)2100年



図(1)-3 GDPのダウンスケーリング結果 (2005年、2050年、2100年)

次に、GDP のダウンスケーリング結果の一部（2005 年、2050 年、2100 年）を図(1)-3 に示す。メッシュ GDP は人口の影響を強く受けるが、人口と比べて、アジアや南アメリカの国々での GDP の増加が顕著であることがわかる。

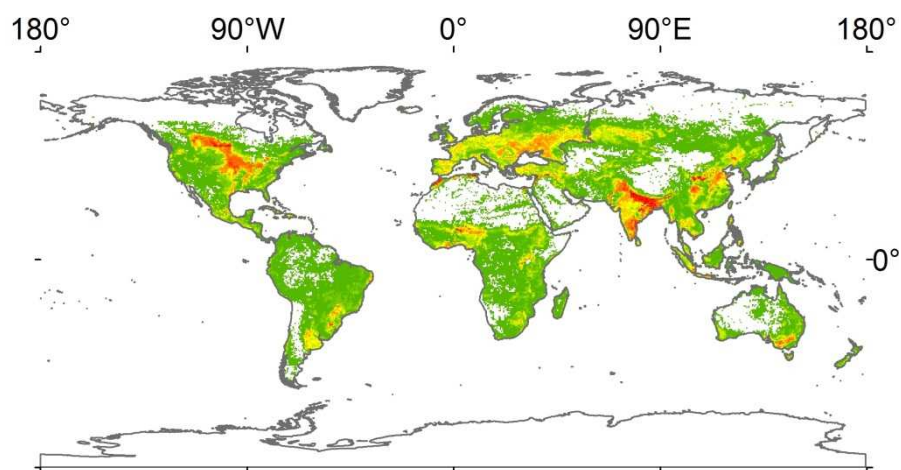
新モデルの結果は、旧モデルと比較して不自然な点は見られないなど、新モデルによって、人口・GDP シナリオは大きく改善された。

（２）全球空間詳細土地利用シナリオの開発

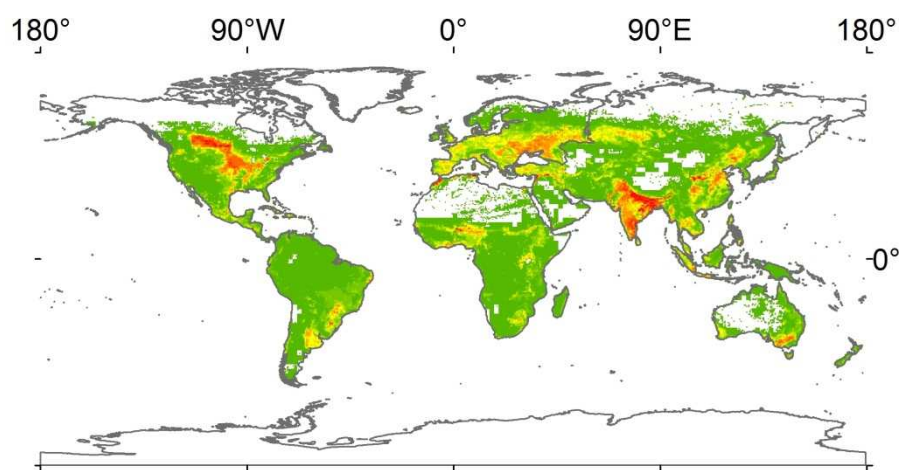
7項目の土地被覆・土地利用変化シナリオの作成を行ったが、ここではRCPシナリオの1つとして提出し、ハーモナイズされた結果のうち、2005年、2050年、2100年の分布図を示す。図(1)-4はcropland（農地）分布、図(1)-5はpasture（牧草地）分布、図(1)-6はprimary land（人為影響のない自然植生）分布、図(1)-7はsecondary land（人為影響のある自然植生）分布、図(1)-8はurban land（都市）分布を表したものである。

例えば、最も重要な農地については、ほとんどの地域で、農地面積は増加している。これは、食用に用いるだけでなく、バイオマスエネルギーとしての利用も拡大するため、単収の増加が需要に追いつかず農地面積が拡大するためである。多くの国で分布パターンは2000年と2100年で変わらないが、ロシアについては、シベリア南部地域が農地として利用が促進される。また中国は内陸部の農地面積は変化無し、もしくは減少の傾向が見られるが、海岸部と内陸部の中間（海岸から1000km以内）の地域で農地面積が増加することがわかる。

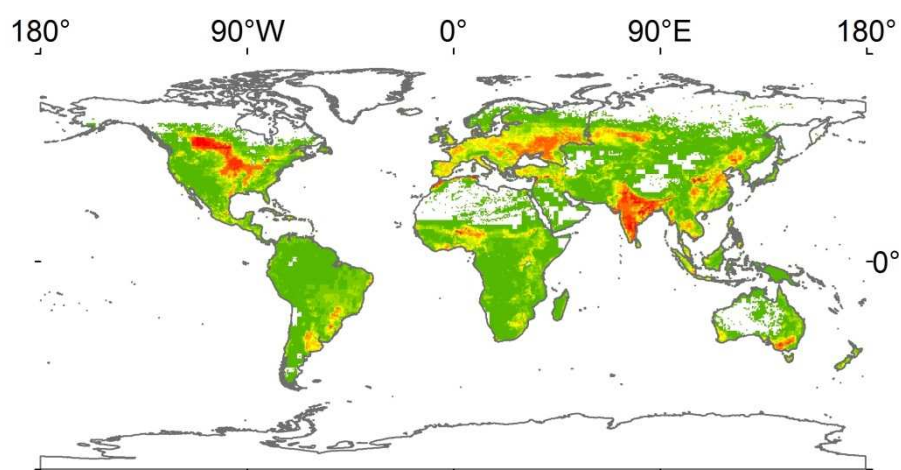
(a)2005年



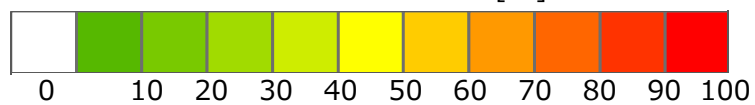
(b)2050年



(c)2100年

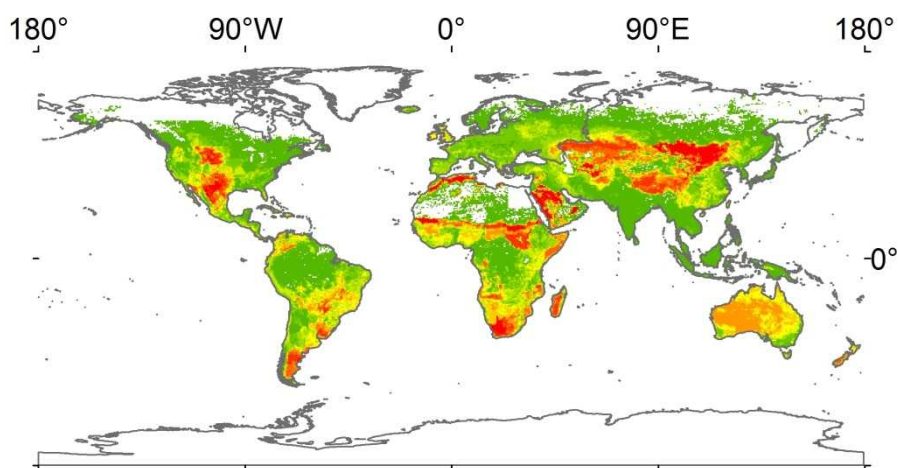


メッシュ内に占める割合[%]

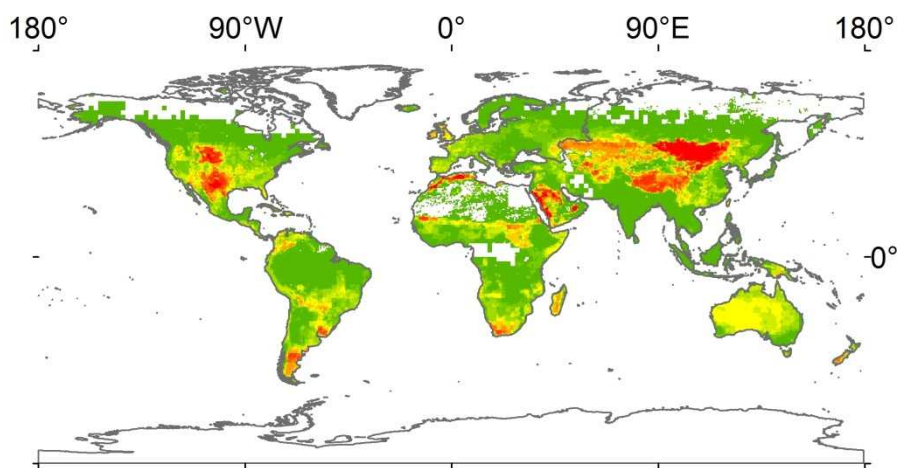


図(1)-4 空間詳細土地利用変化シナリオのcropland（農地）分布（2005年、2050年、2100年）

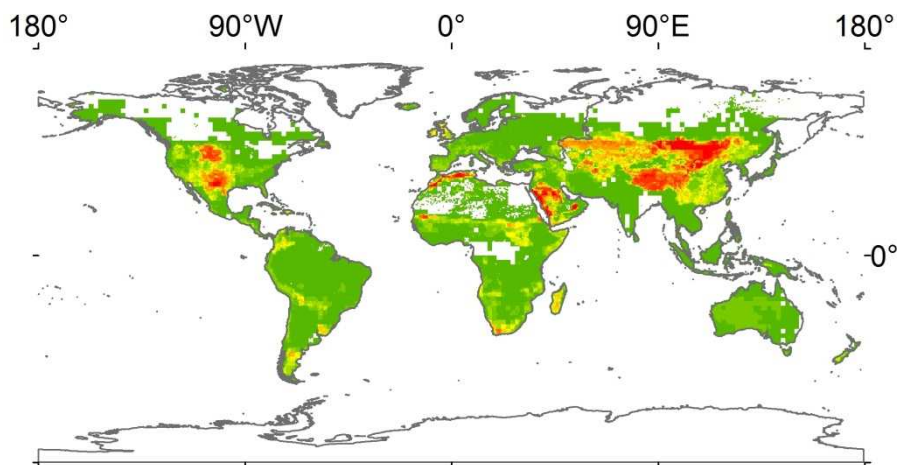
(a)2005年



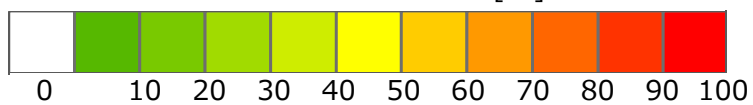
(b)2050年



(c)2100年

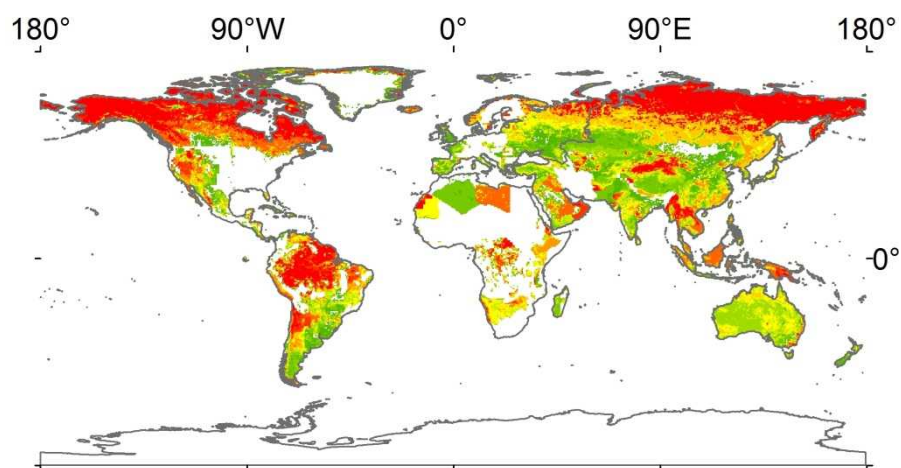


メッシュ内に占める割合[%]

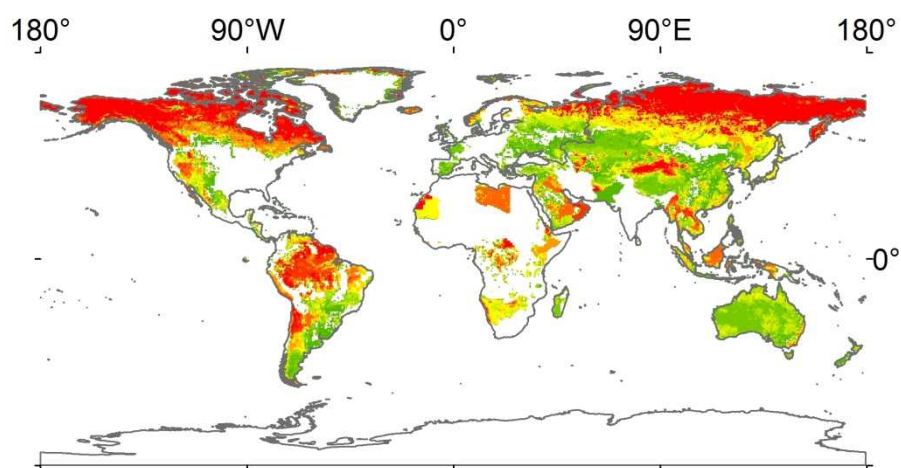


図(1)-5 空間詳細土地利用変化シナリオのpasture（牧草地）分布（2005年、2050年、2100年）

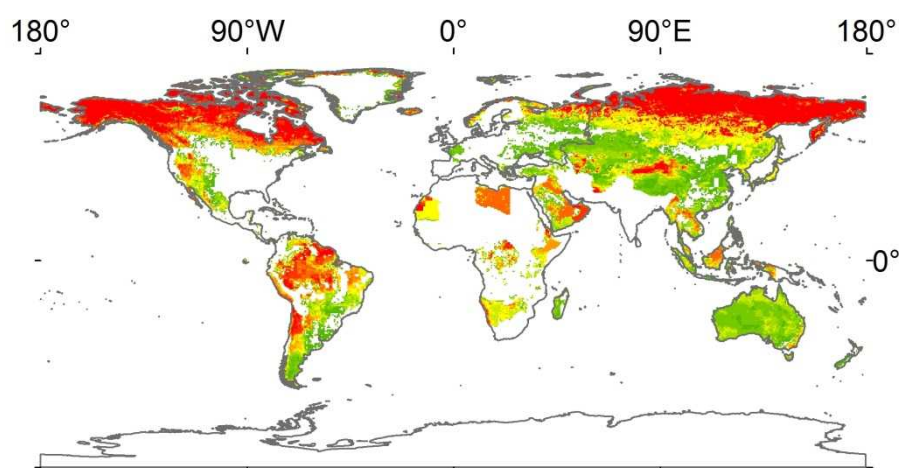
(a)2005年



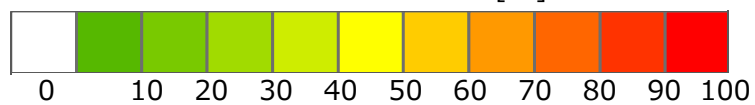
(b)2050年



(c)2100年

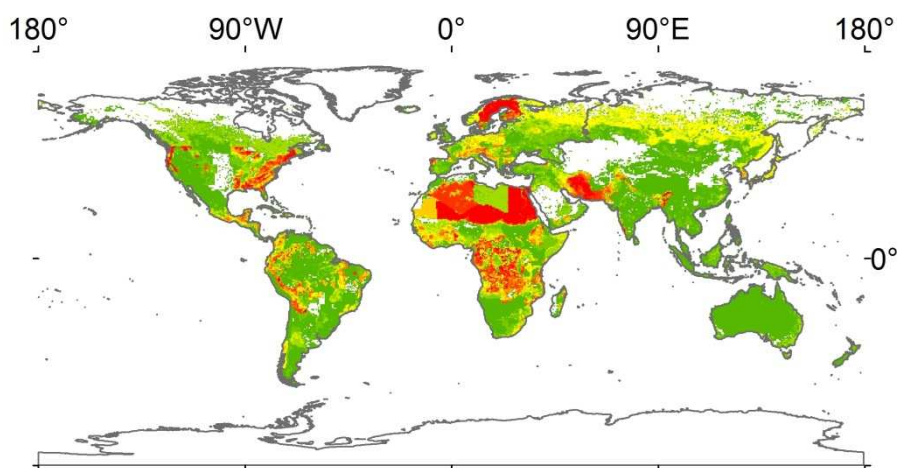


メッシュ内に占める割合[%]

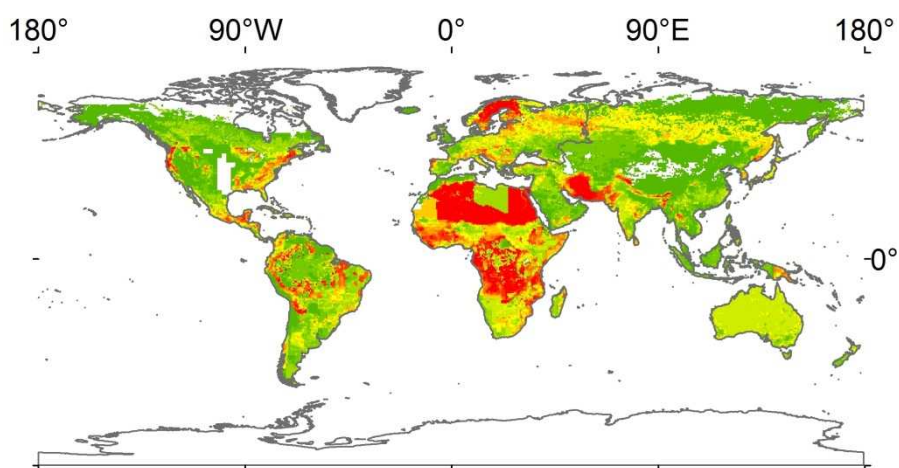


図(1)-6 空間詳細土地利用変化シナリオのprimary land（人為影響のない自然植生）分布
（2005年、2050年、2100年）

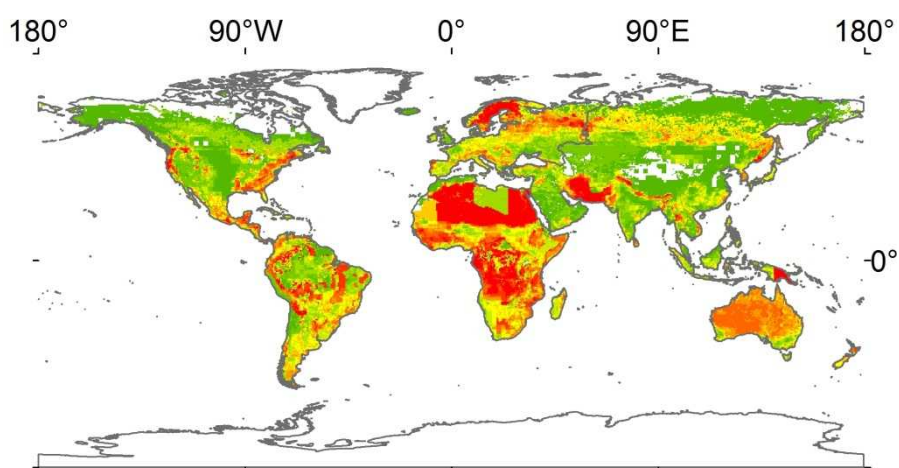
(a)2005年



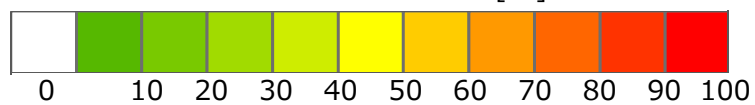
(b)2050年



(c)2100年

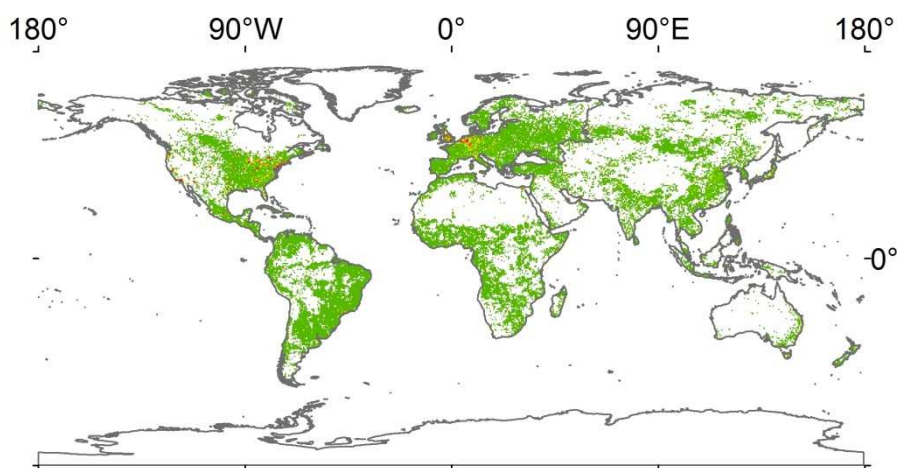


メッシュ内に占める割合[%]

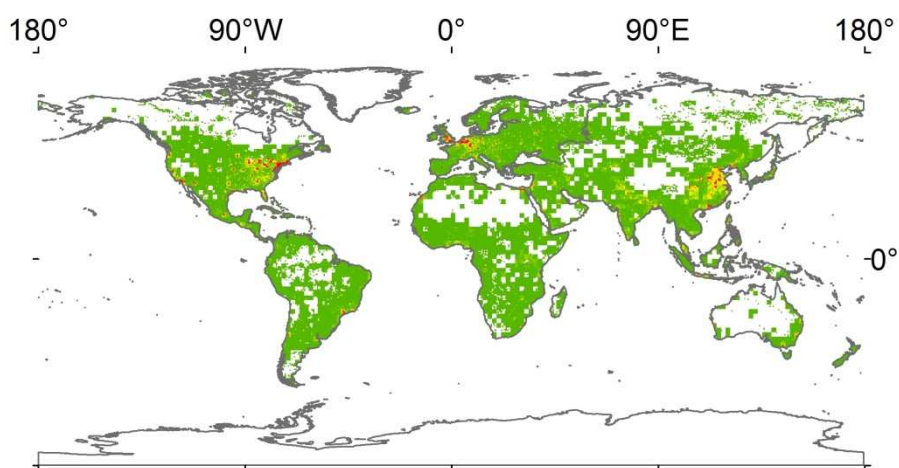


図(1)-7 空間詳細土地利用変化シナリオのsecondary land（人為影響のある自然植生）分布
（2005年、2050年、2100年）

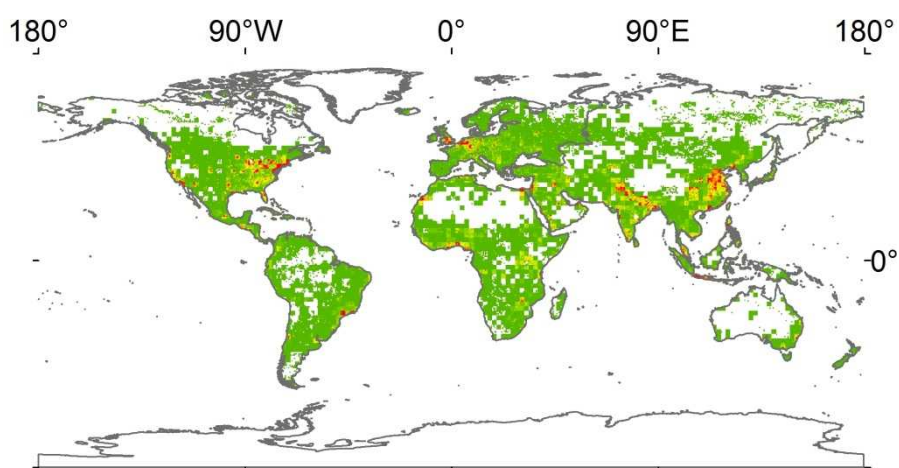
(a)2005年



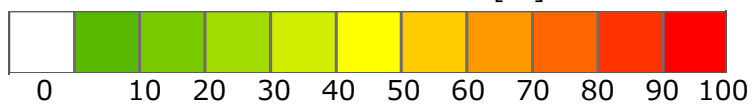
(b)2050年



(c)2100年

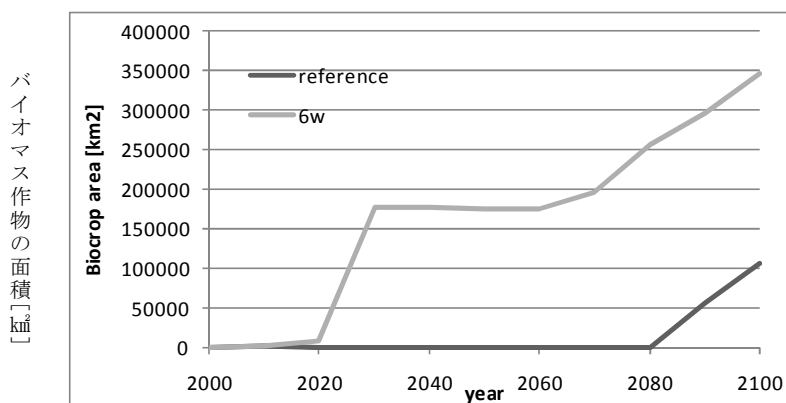


メッシュ内に占める割合[%]



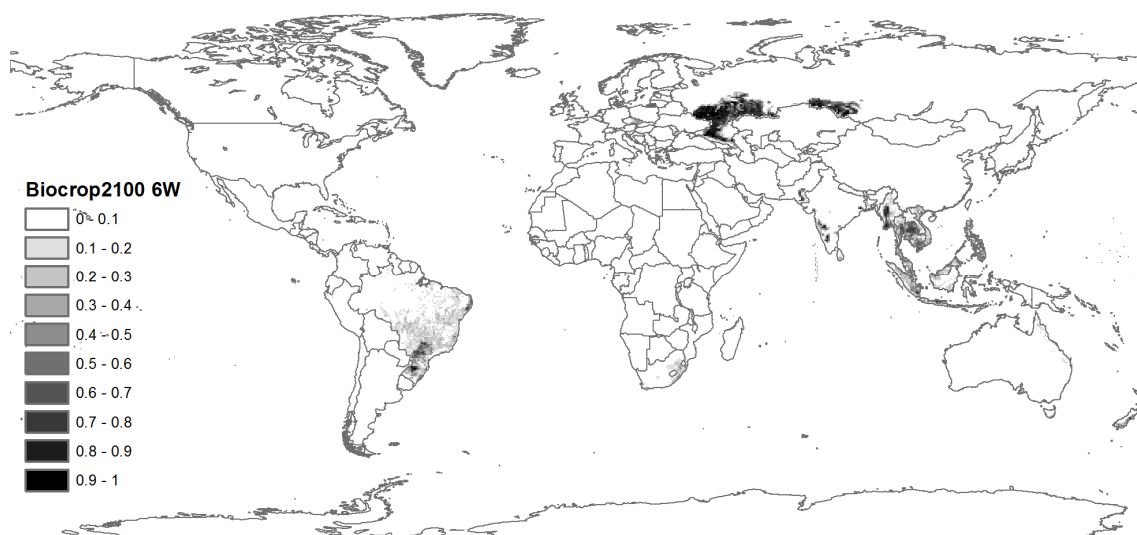
図(1)-8 空間詳細土地利用変化シナリオのurban land（都市）分布（2005年、2050年、2100年）

図(1)-9に2000年から2100年における全球バイオマス作物の生産面積の推移を示す。図中のreferenceとはRCPシナリオの放射強制力 $6.0\text{W}/\text{m}^2$ 安定化（RCP6.0）とは異なり、2100年頃に放射強制力を $6.0\text{W}/\text{m}^2$ への安定化をさせるための努力を行わないケースである。安定化シナリオでは、2030年頃からバイオマス作物の生産面積が増加している。これは安定化に必要なためであるが、2070年頃まではバイオマス作物の生産面積は増加しない。この原因は、全世界の人口増加と食生活の変化により、食糧需要の増加が2070年頃まで増加するためである。それ以降は食糧需要の圧力が下がるため2100年に向かってバイオマス作物の生産面積が増加する。



図(1)-9 2000年から2100年のバイオマス作物生産面積の推移

図(1)-10に $6.0\text{W}/\text{m}^2$ 安定化シナリオにおける2100年のバイオマス作物の生産分布を示す。ロシア南部においてバイオマス作物の作付けが増加するほかは、主に低緯度地帯での生産が増加する。しかし、熱帯雨林地域での生産が増えるとは限らず、南米ではアマゾンよりも南の地域での生産が増えると予想された。これは、バイオマス作物の反収が赤道直下では高くないことに起因している。



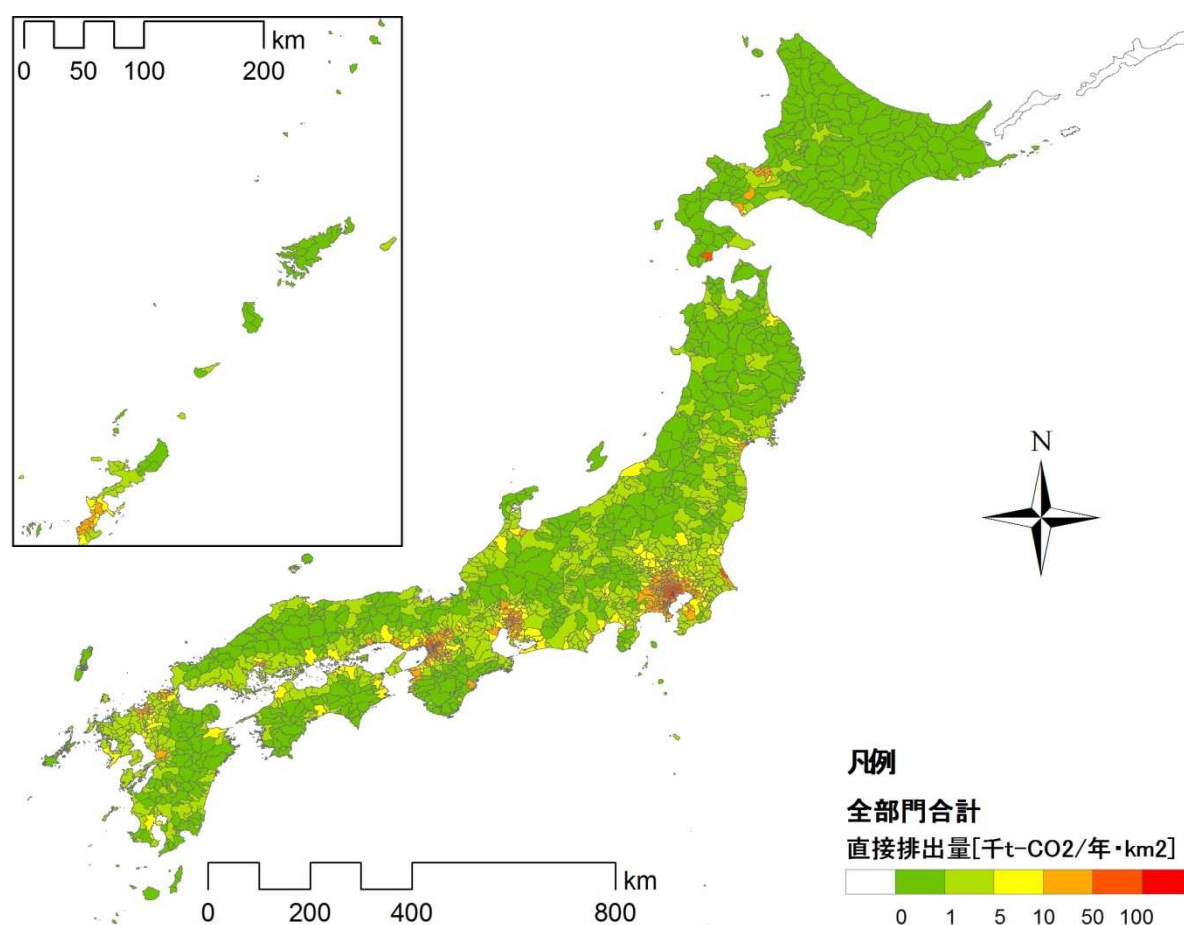
図(1)-10 2100年のバイオマス作物の生産分布

（３）日本全国市区町村単位でのCO₂排出量の推計とマッピング

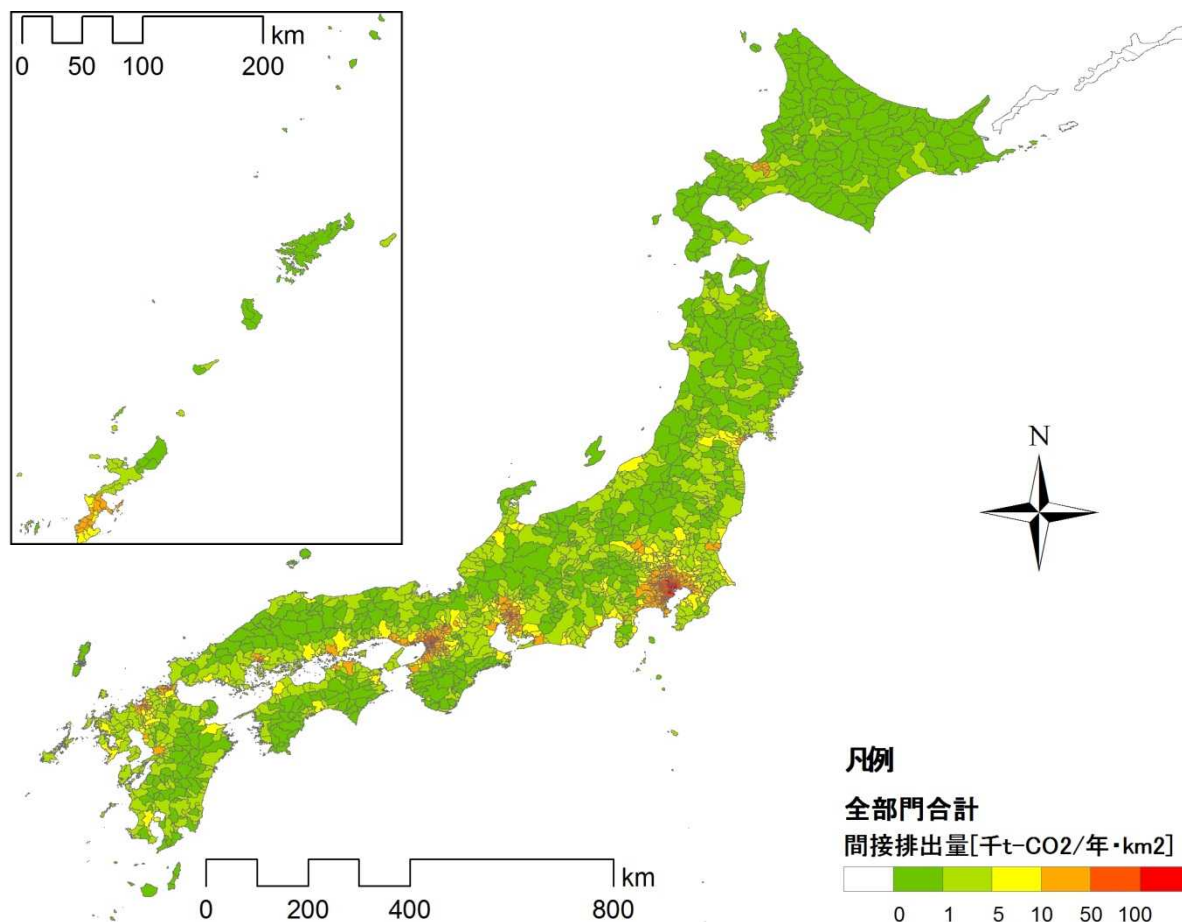
各部門で推計単位が異なることを考慮し、GISを用いて2008年4月時点の市区町村区画単位に統一し、全部門合計値を算出した排出量の結果を、図(1)-11及び図(1)-12に示す。これらの結果は、いずれも比較のため1km²当たりの値で算出している。

分析の結果、運輸部門の間接消費量や民生部門に関しては主に3大都市圏のような人口集積度の高い地域に集中して分布している一方、運輸部門の直接排出量や産業部門については国内の主要都市を結ぶ主要幹線道路沿いに分布している等、空間分布の傾向が大きく異なることが全部門の合計値での結果にも反映されていることが明らかになった。また、全部門の合計値については、直接排出量で見れば、特に電気業等のエネルギー転換部門で多くCO₂が排出されている一方で、間接排出量で見ると、そのエネルギーが都市部で利用されることによってCO₂が排出されている様子を、マッピングを行うことによって空間的に把握することが可能となった。

国レベルでの目標設定との対応を容易にするという点からは、エネルギーの生産者に排出を割り付ける直接排出量が便利である。しかし、排出責任の視点からは間接排出量でエネルギーの消費者の責任や対策を議論するアプローチも重要である。特に今後、コンパクトシティ等の政策や、中長期的な土地利用シナリオを用いて住宅、オフィス、交通システムの動態を分析して温暖化対策について検討する際には、本研究で開発されたシステムを用いて、対策効果を評価することが



図(1)-11 全部門からの直接排出量の分布（全国）



図(1)-12 全部門からの間接排出量の分布（全国）

有効となるものと期待される。

（４）空間詳細シナリオの構築と都市気候モデル入力変数データの作成

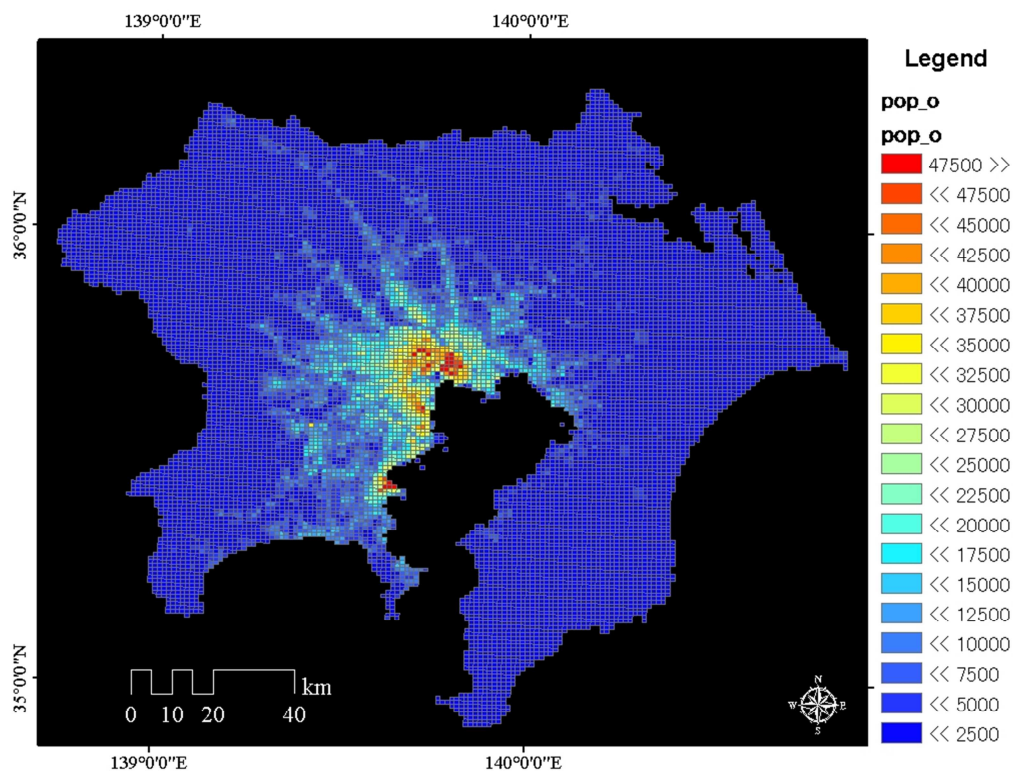
LUT モデルの構築と都市気候モデルへの入力変数の算出のために、対象地域である東京都市圏全域を対象に、町丁目単位で土地利用変化シナリオを作成した。特に都市気候モデル制作者からの要請が大きい、IPCC の上限・下限シナリオに対応するような、将来土地利用の最大限の空間分布の変動幅を示すシナリオを 2 つ設定した。具体的には、コンパクトシティ等の低炭素都市化を最大限に推し進めた『集約シナリオ』と、自動車依存により都市圏縁辺部への郊外化を最大限に推し進めた『分散シナリオ』の 2 つの土地利用変化シナリオを構築した。

3 つのシナリオにおける人口密度（人/km²）の変化を図(1)-13～15 に、建物密度（平方メートル：m²）の変化を図(1)-16～18 に示す。分析の結果、分散シナリオでは、都心部、鉄道駅付近で人口が減少し、人口が都市圏縁辺部に薄く広がっている空間分布の変化が示され、一方で、集約シナリオでは、都心部や鉄道駅付近の町丁目で局所的に人口が増加する都市の空間構造となることが示された。また、図(1)-19～21 に緑被率の分布を示す。この緑被率は、衛星画像 Landsat を部分空間法で土地被覆分類し、現状の畑、草地、田、森林の割合を算出した上で、土地利用モデルから求められる土地面積変化分をすべて森林に割り振って算出している。分散シナリオでは、森林

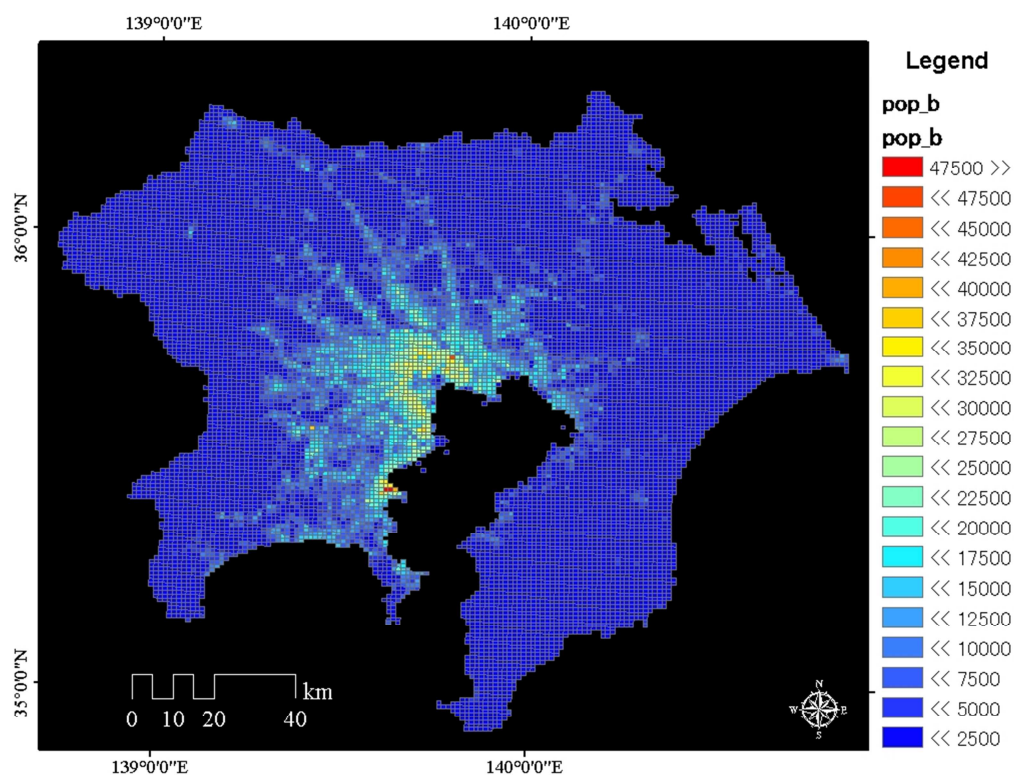
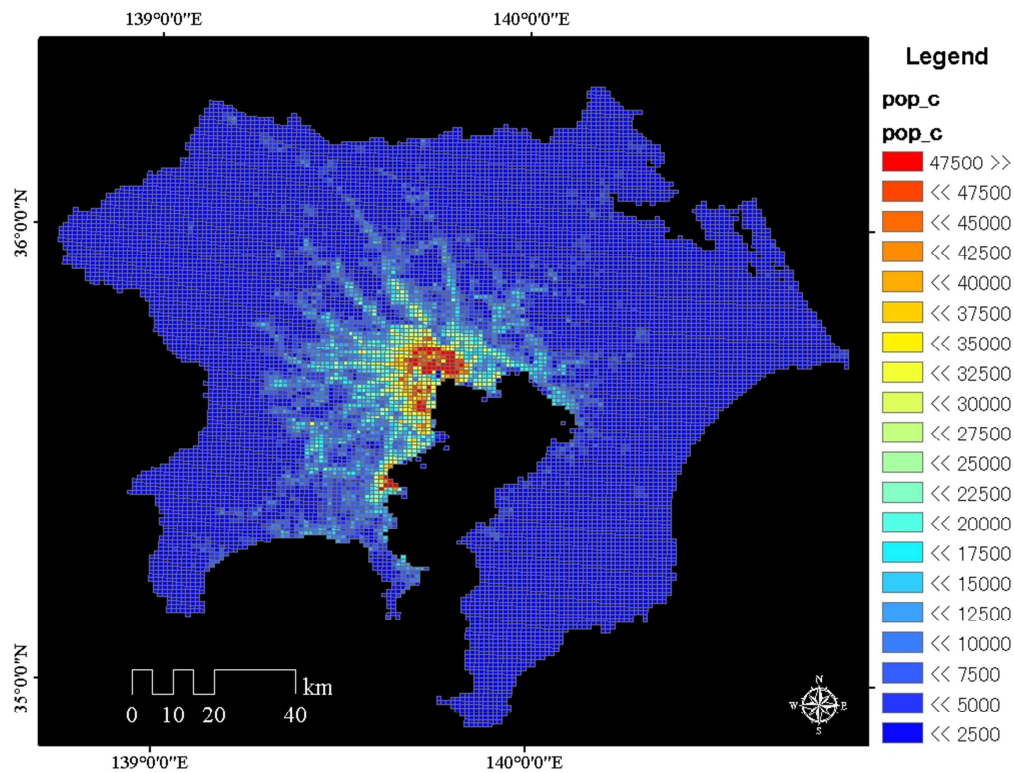
伐採、開発が進み、集約シナリオでは郊外で森林が回復していることが分かる。

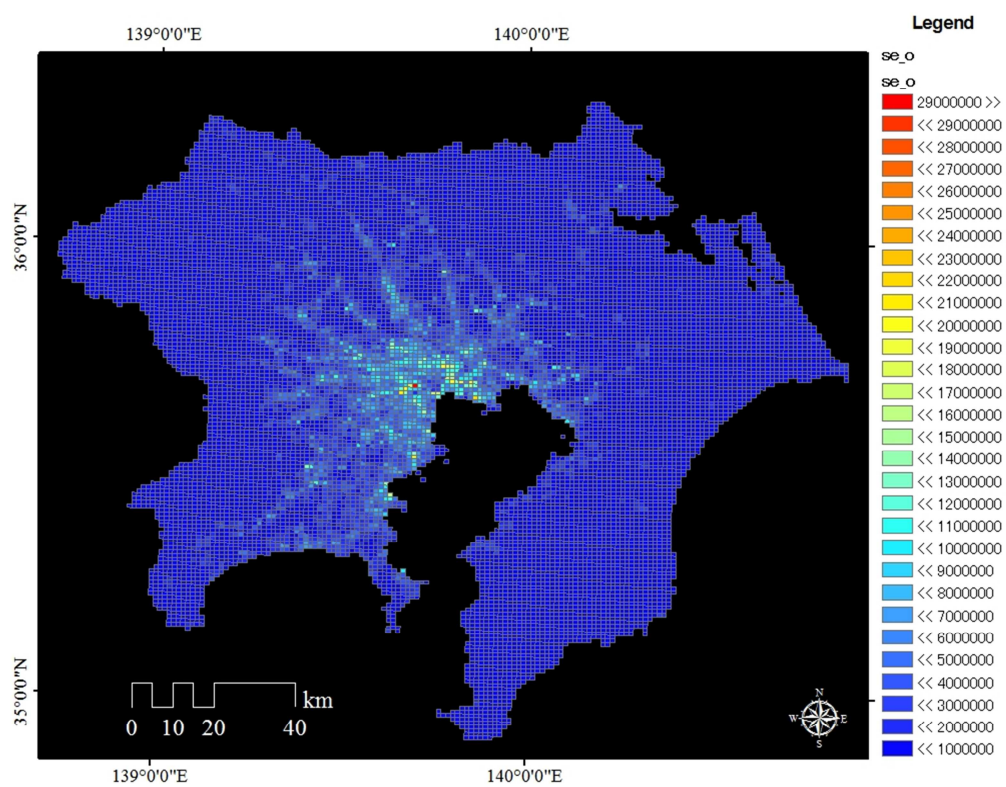
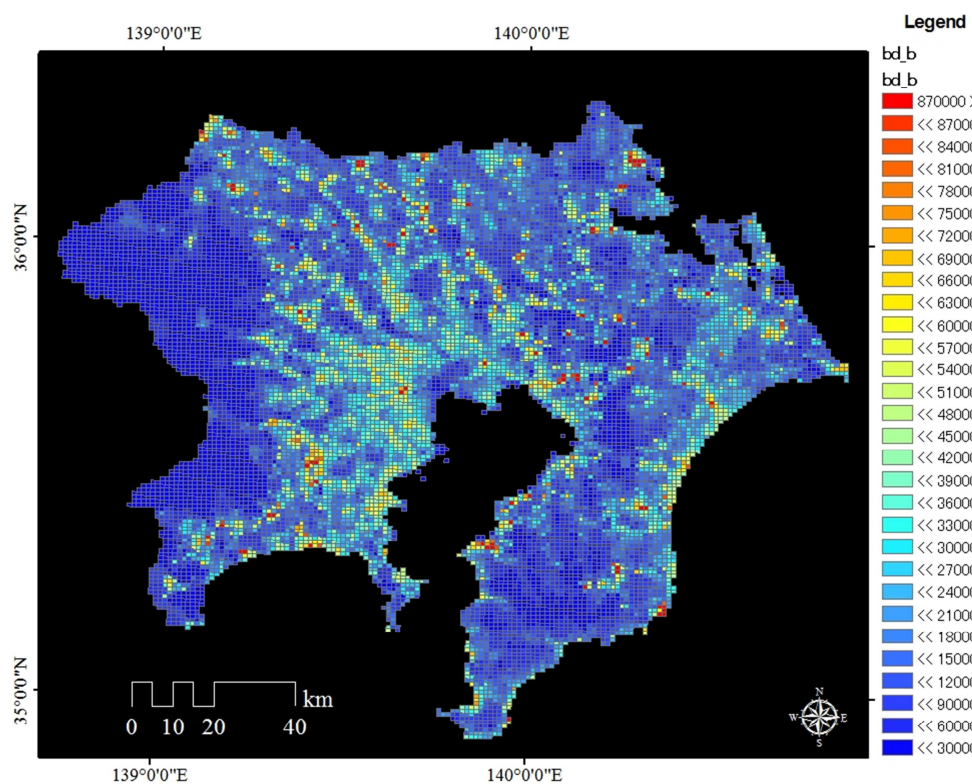
さらに、現在、都市気候モデルを用いて将来気候を分析する際には、人工排熱分布を始めとする入力変数の多くは現状と同一と仮定されることが多いのに対し、本研究では、建物売買の市場を明示的にモデル化することにより建物高さを算出する方法を提示し、人工排熱の算出に反映させることができた。図(1)-22～24は、深見ほか(2003)⁸⁾の排出量原単位（日平均値(W/m^2)）に、各シナリオ下の建物床面積を乗じ、メッシュ面積で割ることで 1km^2 メッシュあたりの人工排熱（顕熱）を算出、図示したものである。集約シナリオでは、都心部や鉄道駅の直近で建物需要量が増加し、人工排熱の値としても、図の分類上で最も上の階級（ $19\text{W}/\text{m}^2$ 以上）に分類されたメッシュが多く見られる一方、分散シナリオでは、当該階級はあまり見られず、低い階級のメッシュが広がっていることが分かる。

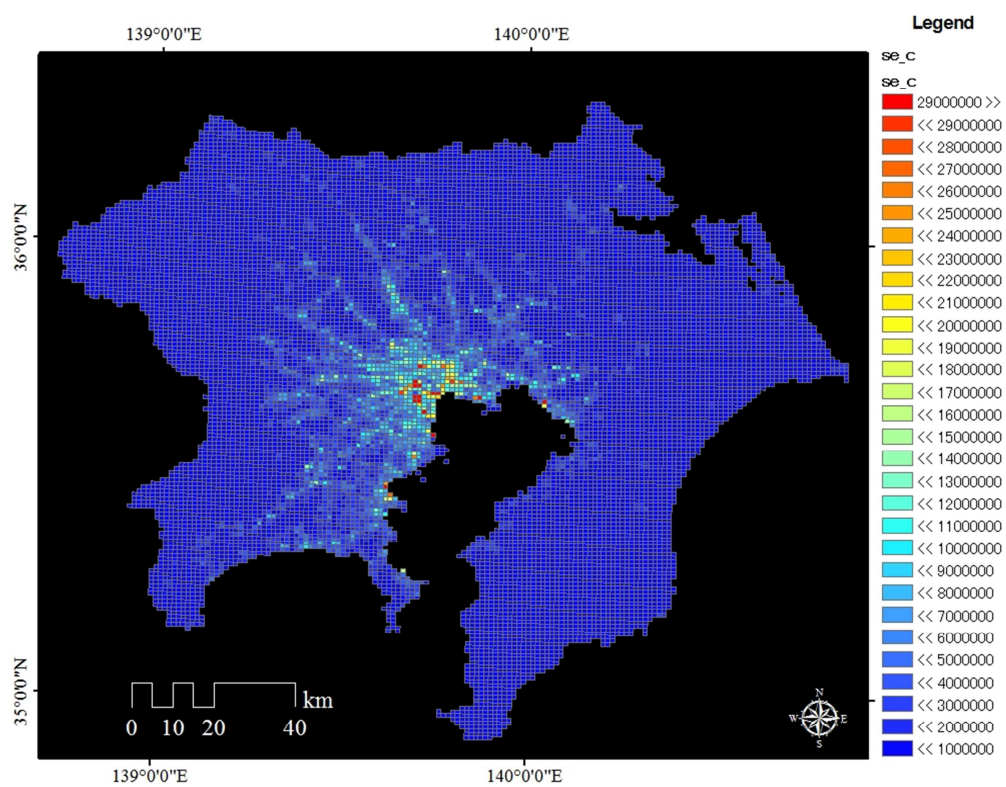
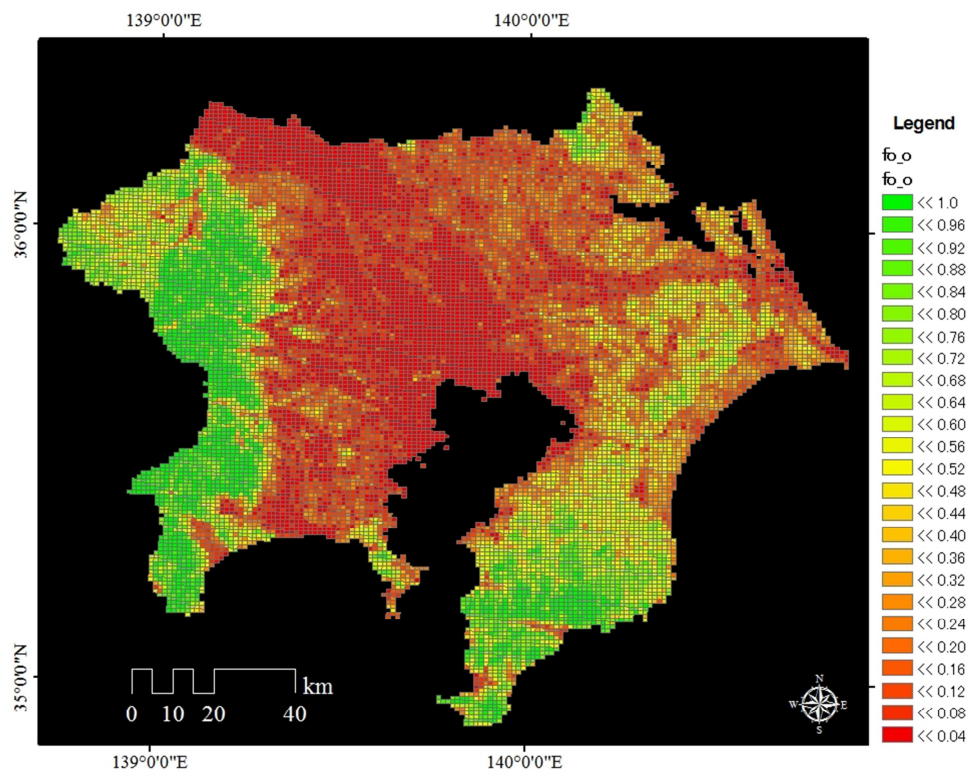
このように、建物に関する情報を明示的に考慮することで、自然に将来の人工排熱パラメータが取得できることを示し、空間詳細な土地利用シナリオを構築するモデルの開発に成功した。これらは、テーマ 3 へ最終データとして提供を行っており、現在、実際に使用を開始している。また、平成 21 年度に行った日本全体を対象とした市区町村別 CO_2 排出分布の推定の研究手法を活用し、本分析で示した東京都市圏を対象とした社会・経済シナリオに対応した排出分布も作成しており、サブテーマ（2）の検証データとしても用いることができる。



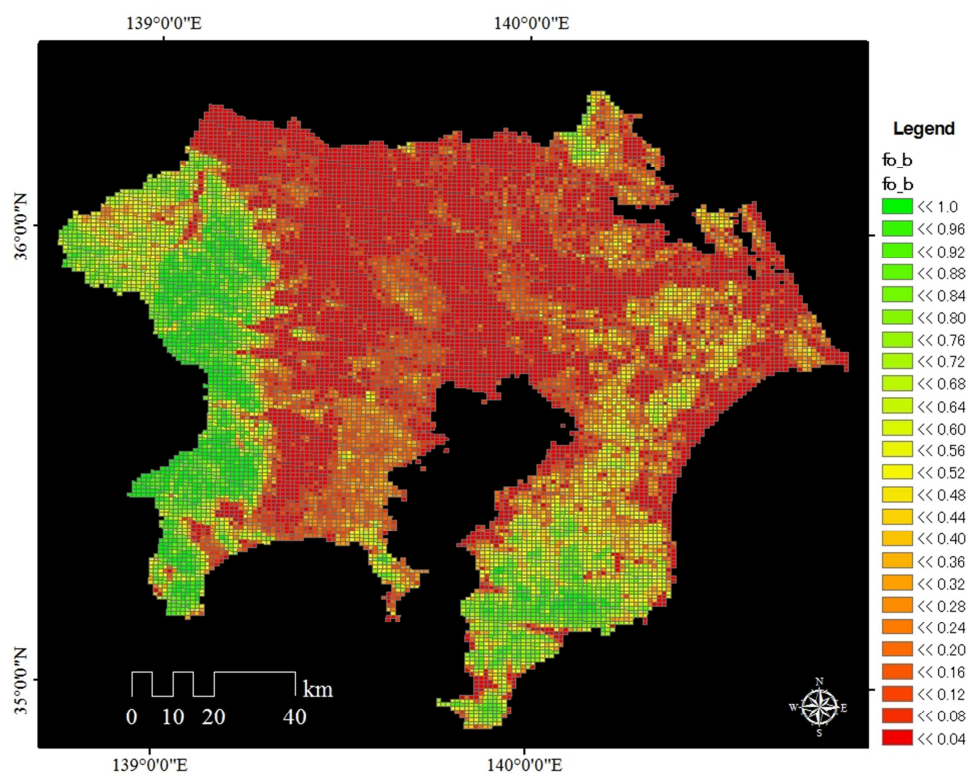
図(1)-13 人口密度分布（現状）[人/ km^2]

図(1)-14 人口密度分布（分散シナリオ）[人/km²]図(1)-15 人口密度分布（集約シナリオ）[人/km²]

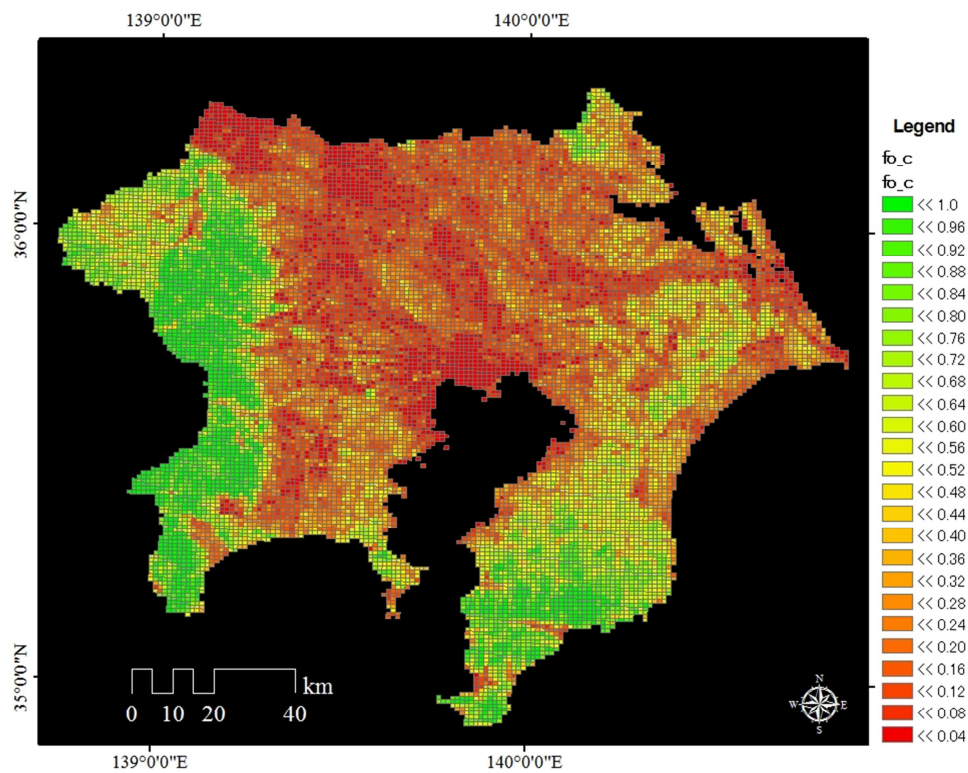
図(1)-16 建物密度分布（現状）[m²]図(1)-17 建物密度分布（分散シナリオ）[m²]

図(1)-18 建物密度分布（集約シナリオ）[m²]

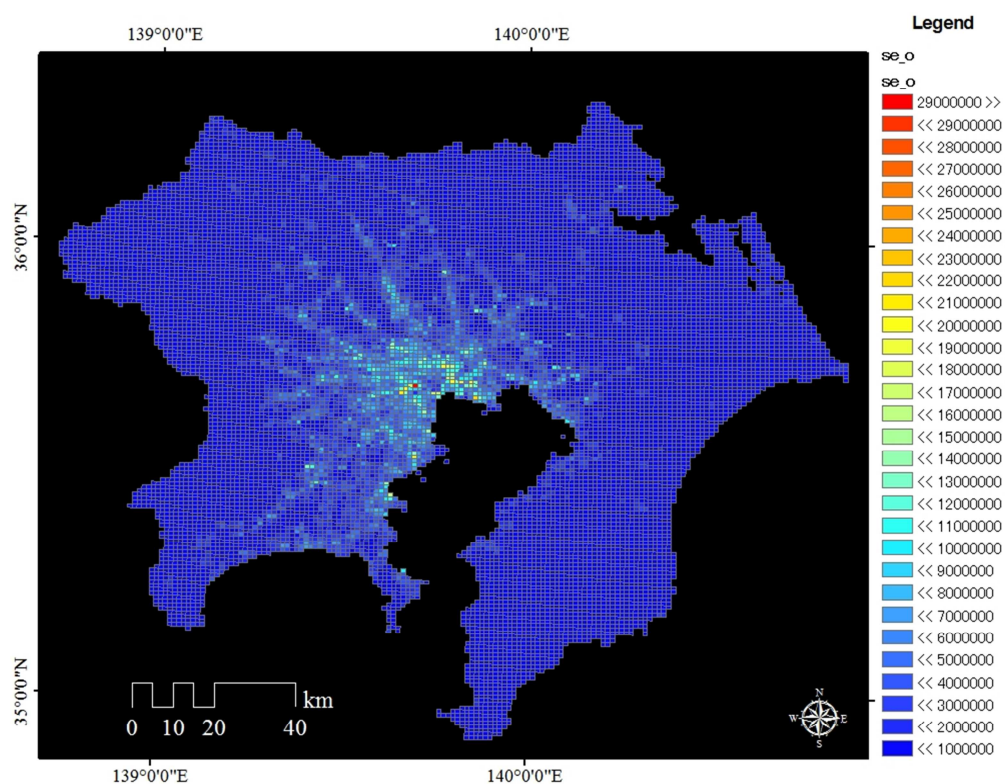
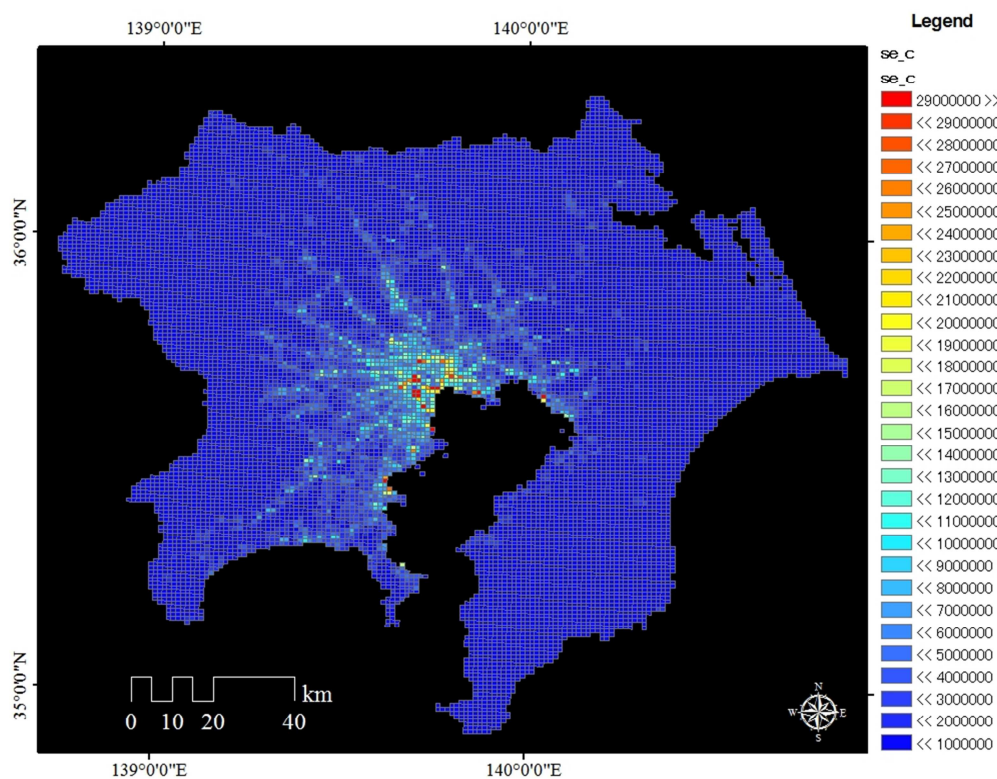
図(1)-19 緑被率分布（現状）

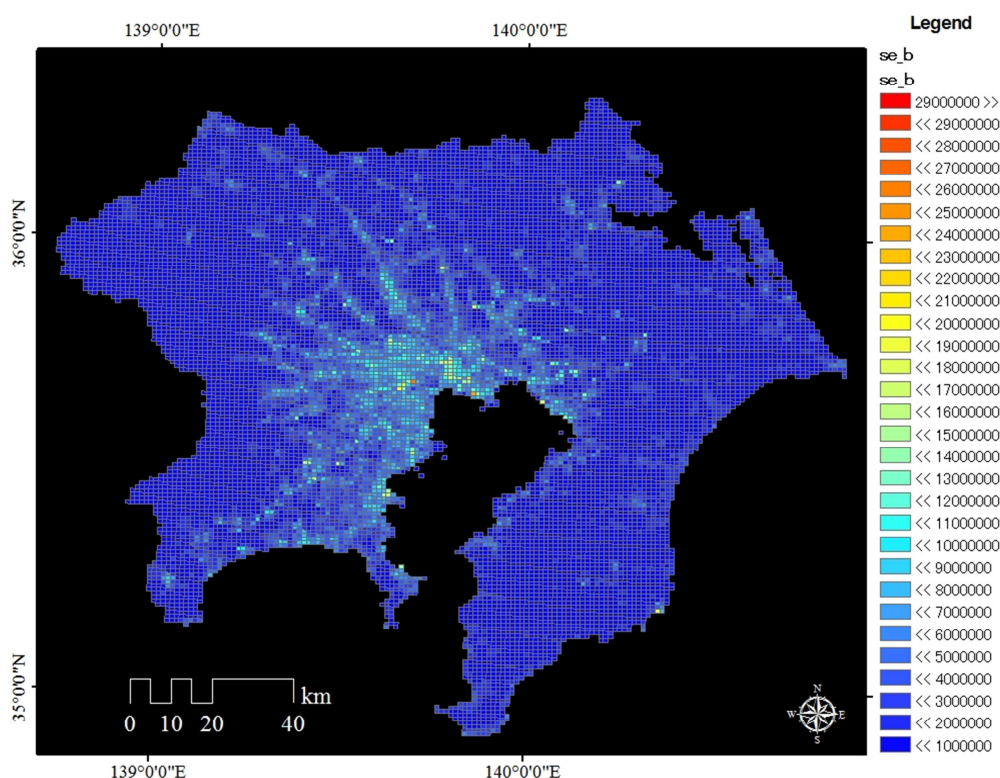


図(1)-20 緑被率分布（分散シナリオ）



図(1)-21 緑被率分布（集約シナリオ）

図(1)-22 建物人工排熱分布（顕熱W/m²、現状）図(1)-23 建物人工排熱分布（顕熱W/m²、集約シナリオ）



図(1)-24 建物人工排熱分布（顕熱 W/m^2 、分散シナリオ）

5. 本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本課題で作成した、全世界の人口・GDPの分布シナリオは、GHGやエアロゾルの排出の空間分布を作成するために用いられ、これによって気候モデルの精度の向上に役立つものである。また、緯度経度 0.5° の詳細な情報は気候変動だけでなく、大気汚染の将来予測研究にも有用な情報となった。土地利用の空間詳細なシナリオの作成に関しても、次期IPCCの土地利用分野シナリオの構築に参加し、世界的にも先駆的な空間詳細な土地利用変化シナリオを構築することに成功し、気候モデルの発展や、温暖化影響評価の高精度化に貢献することができた。

また、より地域を限定した空間詳細シナリオの構築では、本研究のLUTモデルでシミュレートされた出力を、都市気候モデルに入力することにより、都市の土地利用変化シナリオが将来の都市気候に与える影響について分析する新たな研究が可能となった。

（２）環境政策への貢献

IPCCがオーソライズし、第5次評価報告書に向けた将来予測の社会経済条件となる空間詳細であるRCP土地利用、土地被覆シナリオの作成を行った。この結果は、RCPの4つのシナリオでハーモナイズされ、その結果がNew Hampshire大学より公開されている (<http://luh.unh.edu/>)。本サブテーマで行った研究により、将来の気候変動による影響を予測するために必要となる、空間詳細な

土地利用シナリオに関する知見が得られ、より詳細な気候変動影響評価や適応策の検討に資することができた。

6. 国際共同研究等の状況

本課題の一部は、次期IPCC評価報告書に向けた次世代の気候変動予測シナリオ構築の第一段階である、代表的濃度シナリオ(RCP)作成の一端を担うものであり、IAMC(The Integrated Assessment Consortium)を通じて各国の関係者と、基準となる共通データやお互いの推計手法などについて情報交換を行った。また、土地利用モデルの開発に関連して、国際応用システム研究所との共同研究を実施した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 木下嗣基, 山形与志樹, 岩男弘毅 (2008): 炭素クレジットが土地利用に与える影響の予測. 環境科学会誌, 21(1), 37-52.
- 2) Kinoshita, T., K. Inoue, K. Iwao, H. Kagemoto and Y. Yamagata (2008): Spatial evaluation of forest biomass usage using GIS. Applied Energy, 86(1), 1-11, 1-8.
- 3) Kinoshita, T., E. Kato, K. Iwao and Y. Yamagata (2008): Investigating the rank-size relationship of urban areas using land cover maps. Geophysical Research Letters, 35.
- 4) Kinoshita, T., T. Ohki and Y. Yamagata (2009): Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan. Applied Energy, 87(9), 2923-2927.
- 5) 山形与志樹, 瀬谷創, 中道久美子 (2011): 土地利用モデルを用いた東京都市圏の土地利用シナリオ分析. 環境科学会誌, 24 (3) , 169-179.
- 6) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari, E. Kato, P.R. Shukla, Y. Yamagata and M. Kainuma (2011): An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. Climatic Change, 109, 59-76.

<査読付論文に準ずる成果発表> (「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可。)

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

なし

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Kinoshita, T. and Y. Yamagata: Rank-size rule using a global land cover set. GEO-BENE workshop, Laxenburg, Austria, June 2007.
- 2) 木下嗣基, 山形与志樹: 経済モデルによる全世界土地利用変化予測. 環境科学会2007年会, 長崎, 2007年9月.
- 3) Kinoshita, T.: Global land-use model based on economical and terrestrial ecosystem

- modelling. 2nd workshop on Climate Risk Assessment, Yokohama, Japan, February 2008.
- 4) 木下嗣基, 石渡佐和子, 山形与志樹: IPCC 新シナリオに向けたRepresentative Concentration Pathways の土地利用シナリオ. 環境科学会2008年会, 兵庫, 2008年9月.
 - 5) Kinoshita, T., T. Ohki and Y. Yamagata: Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan. International Conference on Applied Energy, Hong Kong, January 2009.
 - 6) 瀬谷創, 堤盛人, 山形与志樹: 空間的な依存性と異質性を考慮した新古典派成長モデルによる我が国の地域間所得格差分析. 第39回土木計画学研究発表会・春大会, 徳島, 2009年6月.
 - 7) Tsutsumi, M., H. Seya and Y. Yamagata: Regional income convergence in Japan after the bubble economy. III World Conference of the Spatial Econometric Association, Barcelona, July 2009.
 - 8) Yamagata, Y.: 都市の炭素管理における空間詳細なシナリオ (Spatially Explicit Emission Scenario and Implications to City Carbon Management). 国際シンポジウム 都市とカーボンマネージメント: 科学と政策の連携強化に向けて, 東京, 2009年11月.
 - 9) 山形与志樹, 中道久美子: 我が国における全セクターを統合したCO₂排出量のマッピング: 直接・間接排出量の推計と分析. 第40回土木計画学研究発表会, 金沢, 2009年11月.
 - 10) 瀬谷創, 堤盛人, 山形与志樹: 空間計量経済モデルを用いた地域所得収束仮説の検証. 第23回応用地域学会, 山形, 2009年12月.
 - 11) Yamagata, Y.: IPCC (AR5)における空間詳細な土地利用システム. シンポジウム 食料安全保障と世界の超長期食料需給, 東京, 2010年3月.
 - 12) Nakamichi, K. and Y. Yamagata: Mapping of anthropogenic heat emission and CO₂ emission in Tokyo Metropolitan Area. International WS on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, Tsukuba, Japan, June 2010.
 - 13) Nakamichi, K. and Y. Yamagata: Evaluation of compact city on the CO₂ emission from residential and transportation. International Urban Planning and Environment Association (UPE) 9th International Symposium, Guang Zhou, China, August 2010.
 - 14) 中道久美子, 山形与志樹, 山崎清, 岩上一騎: 全国市区町村別CO₂排出量分布特性の面積カルトグラム手法による分析. 環境科学会2010年大会, 東京, 2010年9月.
 - 15) 山形与志樹, 瀬谷創, 中道久美子: 東京都市圏の将来の土地利用と都市環境に関するシナリオ分析. 環境科学会2010年大会, 東京, 2010年9月.
 - 16) 山形与志樹, 中道久美子, 瀬谷創: 土地モデルを用いた都市気候モデルへの入力変数の算出方法の検討. CRIS DAYS 2010, 柏, 2010年11月.
 - 17) 瀬谷創, 山形与志樹, 中道久美子: 広域都市圏における町丁目単位の土地利用モデルの構築に関する基礎的検討. 土木学会第42回土木計画学研究発表会, 甲府, 2010年11月.
 - 18) 中道久美子, 山形与志樹: 直接及び間接排出量に着目した全国市区町村別全部門CO₂の分布特性・要因把握の基礎分析. 土木学会第42回土木計画学研究発表会, 甲府, 2010年11月.
 - 19) Nakamichi, K., Y. Yamagata and H. Seya: Mapping of the CO₂ and anthropogenic heat emission under spatially explicit urban land use scenarios. American Geophysical Union

(AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.

- 20) Yamagata, Y., H. Bagan, H. Seya and K. Namamichi: Geographically explicit urban land use change scenarios for Mega cities: a case study in Tokyo. American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.
- 21) 中道久美子, 山形与志樹: 都市圏に着目した家庭部門CO₂排出量の分布特性・要因把握に関する基礎分析, 第43回土木計画学研究発表会, つくば, 2011年5月28-29日.

(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

8. 引用文献

- 1) Grubler A., B. O. Neill, K. Riahi, V. Chirkov, A. Goujon, P. Kolp, I. Prommer, S. Scherbov and E. Slentoe (2007): Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based SRES. Technological Forecasting and Social Change, 980-1029.
- 2) Nansai, K., N. Suzuki, K. Tanabe, S. Kobayashi and Y. Moriguchi (2004): Design of Georeference-Based Emission Activity Modeling System (G-BEAMS) for Japanese Emission Inventory Management. Online proceeding of 13th International Emission Inventory Conference, June, Florida, US, 1-11.
- 3) Kannari, A., Y. Tonooka, T. Baba and K. murano (2007): Development of multiple-species 1 km × 1 km resolution hourly basis emissions inventory for Japan. Atmospheric Environment, 41, 3428-3439.
- 4) Wegener, M. (2004): Overview of land use transport models. in Hensher, D.A., K.J. Button, K.E. Haynes, and P.R. Stopher, (Eds.), Handbook of transport geography and spatial systems, 127-146, Amsterdam.
- 5) 工藤祐揮, 松橋啓介, 上岡直見, 森口祐一 (2005): 市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計. 第33回環境システム研究論文発表会講演集, 263-268.
- 6) 田中昭雄, 久保隆太郎, 中上英俊, 石原修 (2008): 世帯属性を考慮した住宅用エネルギー消費原単位の推定と将来予測. 日本建築学会環境系論文集, 73(628), 823-830.
- 7) 外岡豊, 深澤大樹, 中口毅博, 馬場毅, 石田武志, 金本圭一朗 (2008): わが国民生部門の

CO₂排出削減シナリオ. CGERレポートI079-2008家庭・業務部門の温暖化対策, 独立行政法人国立環境研究所, 91-133.

- 8) 深見和彦・久保和幸・木内 豪・吉谷純一・末次忠司・河原能久・小林裕明・吉田 武・伊藤正秀・新田弘之・城戸 浩 (2003) ヒートアイランド軽減技術の評価手法に関する研究. 平成11 - 15 年ヒートアイランド現象軽減対策効果の定量化と費用便益評価に関する研究, <http://www.db.pwri.go.jp/pdf/D6422.pdf>.
- 9) 古谷知之 (2003): 土地利用モデルのレビュー. (財) 道路経済研究所, 総合的な交通政策・計画の分析評価手法とモデルの展開, 道経研シリーズ, A-107.
- 10) 山崎清, 上田孝行, 岩上一騎 (2008): 開発人口及び誘発・開発交通を考慮した東京湾アクアラインの料金値下げ効果の計測. 高速道路と自動車, 51(6), 20-32.
- 11) 米澤健一, 松橋啓介 (2009): 自治体規模の違いによる自家用乗用車のCO₂排出量変化の要因分析. 都市計画論文集, 44(3), 109-114.

S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

4. 統合システム解析による空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの開発

(2) 温室効果ガスとエアロゾル等の排出の空間分布の推定に関する研究

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室 野沢徹

地域環境研究センター

大原利眞

<研究協力者>

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター

長友利晴 (平成19～22年度)

石渡佐和子 (平成19～21年度)

甲斐沼美紀子・松本健一 (以上、平成20～22年度)

川瀬宏明・比気克幸 (以上、平成23年度)

大気圏環境研究領域 川瀬宏明 (平成21～22年度)・石渡佐和子 (平成22年度)

社会環境システム研究領域 増井利彦 (平成20～22年度)

茨城大学農学部

木下嗣基 (平成22年度)

平成19～23年度累計予算額：86,255千円

(うち、平成23年度予算額：16,055千円)

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 温室効果ガスや人為起源エアロゾルなどに起因する気候変化を定量的に推定するためには、過去から将来にわたる温室効果ガスやエアロゾル等の排出量の、空間的に詳細な経年変化を推定する必要がある。本サブテーマでは、一般に国や都市等の行政区域毎のデータとして推計されている温室効果ガスやエアロゾル等の排出量から、全球気候モデルに合うような格子点データを作成する手法を開発した。空間詳細化に際しては、本課題のサブテーマ(1)において推計された人口や農地面積などの社会経済的な変数の空間詳細分布を配分指標として採用している。この手法を国立環境研究所のアジア太平洋統合評価モデル(AIM)により推計された領域別、セクター別の将来排出量データに適用し、2100年までの空間詳細な排出量分布を推定した。得られた空間詳細排出量データは気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書作成に向けた新シナリオ(RCP)の一部として国内外の研究者に活用されている。また、従来は考慮されていなかった農業廃棄物の燃焼に伴う排出量の季節変化について、世界各地の作物栽培時期および作物栽培区域の情報をを用いて、空間詳細な農業廃棄物燃焼起源の月別排出量を推計した。一部に不自然な点は残るものの、概ね妥当な結果が得られた。さらに、既存の排出量データベースを比較解析することにより排出量推計の不確実性について調査・検討し、行政区域毎の排出量推計に関しては、緩和技術導入前後における排出係数の設定方法や緩和技術導入時期の想定の違いが大きく関与している可能性が高いことが分かった。また、空間詳細化に関しては無次元化した空間配分指標を元に配分指標の選定に起因する不確実性を調べた結果、空間配分指標の変更によって各格子

点の全体排出量に対する絶対値の幅は大きな影響を受けない可能性が高いことが分かった。

【キーワード】 エアロゾル、温室効果ガス、空間分布、ダウンスケール、RCP

1. はじめに

全球気候モデルを用いた将来の気候変化シナリオの推定には、温室効果ガス (GHG) やエアロゾル等の格子点化された排出量データが必要となる。このようなデータはこれまでもいくつか存在していたが、国毎もしくは領域毎の排出シナリオを、現在の人口分布を重みとして格子点化しているため、人口分布データが存在しない国や地域では将来の排出量も欠損となっている。また、将来の人口分布の変遷を予測したデータが存在していないため、排出量についても将来の空間分布の変化が全く考慮されていない、等の問題点も指摘されている。さらに、森林火災など土地利用変化関連の排出量データに関しては、過去に対しても空間分布の変化が考慮されていない。全球積算した排出量としては必ずしも大きくはないものの、農業廃棄物の燃焼にともなう排出量については、本来であれば農業活動の季節変化に応じて排出量も月別に変化するはずであるが、このような年単位以下の時間変化についてはほとんど考慮されていないのが現状である。これらの問題点を克服するためには、過去から将来までの社会経済活動や土地利用変化の空間的な変遷を考慮した、GHGやエアロゾル等の排出量データベースを構築する必要がある。

一方で、次期IPCC評価報告書に向けた次世代の気候変動予測シナリオの構築において、これまで相互の関係性の検討が不十分であった、自然システムと社会システムを統合して解析するアプローチが、国際的な長期気候変動予測研究の議論において重要視されている。統合的な解析枠組みの第一段階として、地球システム統合モデルに対する境界条件データとなる、将来の放射強制力 (GHG濃度などの変化により対流圏界面を通過する放射フラックスの変化量) を数種類に設定した代表的濃度排出シナリオ (Representative Concentration Pathway: RCP, Moss et al., 2010)¹⁾ が、統合評価モデル (Integrated Assessment Model: IAM) グループによって作成され、2009年12月に一般公開された。国立環境研究所のIAMグループもこのRCP作成に携わっており、同グループが作成する将来排出シナリオの空間詳細化、および社会経済要因による排出を補完する形での土地利用変化と自然起源の排出を推定する必要が生じた。

また、国際的な気候モデル相互比較プロジェクトにおいては、このRCPシナリオに基づいた気候変動予測が実施されている。得られた結果は、次期IPCC評価報告書の作成に際し、温暖化影響評価研究でも活用されるが、その際には、気候変動シナリオの不確実性に関する情報が不可欠である。排出シナリオも気候変動シナリオの不確実性をもたらす大きな要因の1つであるものの、その不確実性については、これまであまり検討されてきていないのが実情である。

2. 研究開発目的

以上のような背景を踏まえ、過去や将来の気候変化に及ぼす人間活動の影響の定量的な評価に資するべく、主に以下の3点を目的として本課題を実施した。

(1) GHGやエアロゾル等の空間詳細排出量データベースの構築

本研究では、国立環境研究所のIAM であるアジア太平洋統合評価モデル (Asia-Pacific

Integrated Model: AIM) が担当するRCP6.0シナリオ（産業革命前から2100年までの放射強制力が 6.0W/m^2 で安定化するシナリオ, Masui et al., 2011²⁾）作成の中で、AIMによる24地域の将来排出シナリオを、 0.5° グリッドに空間詳細化することを目的とする。空間詳細化に際しては、本課題のサブテーマ（１）において推計された人口、国民総生産（GDP）や農地面積などの社会経済的な変数の空間詳細分布（緯度 $0.5^\circ \times$ 経度 0.5° ）を配分指標として採用することにより、各種排出量の空間分布の経年変化を考慮した。構築した空間詳細排出量データは、RCP6.0シナリオとして国際研究グループに提供する。

（２）農業廃棄物の燃焼に伴う月別排出量データの構築

農業廃棄物の燃焼は、各国の農業活動や季節変化に伴い、排出量に変化するものであるが、既存の排出データには、これらの季節変動を考慮したものが少ない。農業廃棄物の燃焼に伴うエアロゾルの排出については、発生地点の空間情報と共に発生時期に関する季節変動が重要な情報となることから、本研究では、GHGやエアロゾル等の空間詳細排出量データの改良・精緻化を目的として、作物栽培時期情報と作物栽培区域の位置情報を加味した、農業廃棄物の残渣発生量を定量化する空間配分方法を開発し、農業廃棄物の燃焼に伴う月別排出量データを構築する。

（３）空間詳細な排出シナリオの不確実性要因の検討

空間詳細な排出データは、排出係数の更新やダウンスケールを行う際の配分指標の決め方によって結果が大きく異なり、不確実性に幅が出るものである。空間詳細排出シナリオの不確実性を考慮する上では、国・地域ごとの時系列排出量データそのものの不確実性に関する知見が不可欠である。また、空間配分指標については必ずしも明確な根拠を持って適用されているわけではなく、逆に明確な空間配分根拠を設定することも容易ではない。ここでは、代表的濃度経路(RCP)データを含む既存の排出量データベースを比較・検討することにより、時系列排出量データの不確実性をもたらす主要な要因や、空間配分指標の選定に起因する不確実性について新たな知見を得ることを目的とする。

３．研究開発方法

（１）GHGやエアロゾル等の空間詳細排出量データベースの構築

IAMにより推計されたセクター別、領域別の排出量データを、緯度 $0.5^\circ \times$ 経度 0.5° の格子点データに変換する方法の概念図を図(2)-1に示す。従来の研究では、IAMより推計された各種ガス、エアロゾル等の排出量を、過去のある特定の時期に対して推計された、人口、GDPなどの社会経済指標の空間分布データを配分指標として用いていたが、本研究課題では、サブテーマ（１）において、IAMにより推定された社会経済シナリオを、緯度 $0.5^\circ \times$ 経度 0.5° の格子点データにダウンスケーリングしたデータを空間配分指標に用いることで、温室効果ガスやエアロゾル等の排出量の空間的な分布の変化を表現する。IAMで取り扱うセクター別に空間配分指標を選択し、セクターおよび領域を変数とするマトリクスの各要素に対して格子点データを作成した上で、それらを足し合わせることで、全排出量の空間詳細分布データを作成する。また、将来の排出量分布が当該年の空間配分指標にのみ依存することで空間詳細な排出量分布が不自然に不連続となってしまう可能性を避けるため、過去の排出量分布の履歴情報も参照するよう、以下のような推計手法

を採用した。

$$E(x, y, t) = E(x, y, t-1) + \sum_r \sum_s \{e_{r,s}(t) - e_{r,s}(t-1)\} \times \frac{w_{r,s}(x, y, t)}{\iint w_{r,s}(x, y, t) dx dy}$$

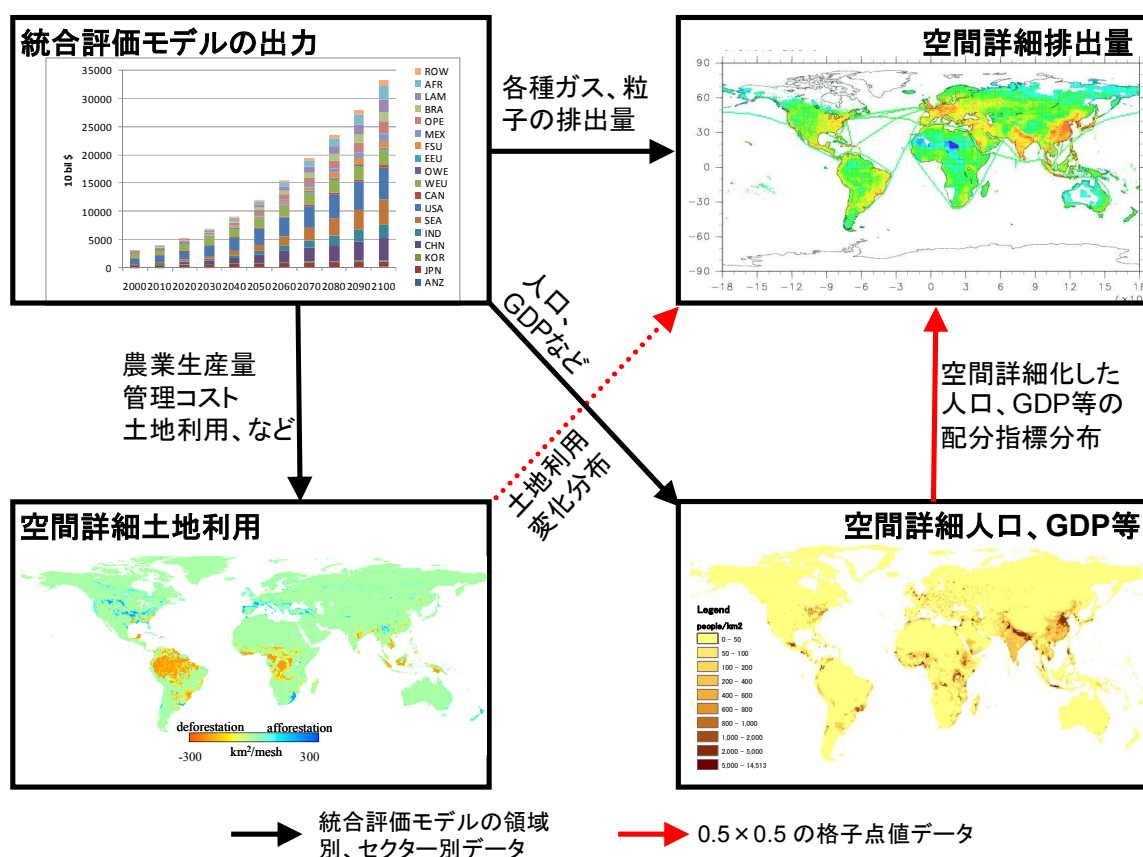
r : 領域、 s : セクター、 x : 経度、 y : 緯度、 t : 時間、

$E(x, y, t)$: 空間詳細化された排出量

$e_{r,s}(t)$: IAMにより推定された領域 r 、セクター s の排出量

 $w_{r,s}(x,y,t)$: 領域 r 、セクター s に対する空間配分指標

すなわち、ある年における排出量そのものを空間配分指標で推計するのではなく、前年からの変化を空間配分指標により分配し、それを前年の排出量分布に足し合わせる方策を採った（以下、本推計手法をケース1と呼ぶ）。ただし、空間詳細化した排出量が負の値を持つグリッドが存在した場合には、当該グリッドにおける排出量を0とし、リセットした負の排出量は、同じ領域に属する別の（正値を持つ）グリッドから分散させて差し引くこととした。



図(2)-1 温室効果ガス、エアロゾル、およびそれらの前駆物質等の空間詳細な排出量分布推定手法を示した模式図。

各セクターに適用する空間配分指標としては、表(2)-1に示すようなデータ（いずれもサブテ

ーマ（１）により推計されたもの）を用いた。なお、一部のセクターについては、適切と考えられる空間配分指標を用意することが困難であったため、上記方法とは若干異なる推計手法を用いた。例えば、国際船舶や航空機からの排出量に関しては、海上もしくは自由大気中での排出となるため、そもそも領域の概念が適用し難い。そのため、これらの排出量に関しては、基準年（ここでは2000年）の排出量に、IAMから推計された全球積算排出量の基準年比を掛け合わせることで求めることとした（ケース2と呼ぶ）。また、陸上交通や（畜産などを含む）農業からの排出量に関しては、領域の概念は適用可能であるものの、適切な空間配分指標（交通網や家畜頭数など）を将来にわたって推計することは困難であるため、各領域における基準年の排出量に、IAMから推計された当該領域積算排出量の基準年比を掛け合わせることで求めることとした（ケース3と呼ぶ）。なお、ケース2およびケース3については、グリッド排出量が負となることは考えられないため、これ以上の特別な措置は講じていない。

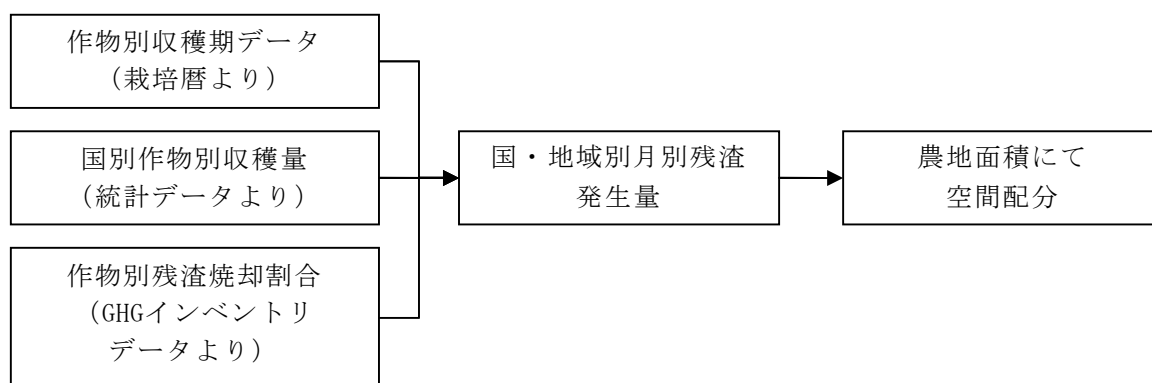
表(2)-1 各セクターに適用する空間配分指標および推計手法

	推計方法	適用対象セクター（配分指標）
ケース1	トレンド推計： 排出量の変化を人口、GDP等で比例配分する	・発電およびエネルギー生産（総人口） ・工業活動（GDP） ・溶剤利用（GDP） ・民生および業務活動（農村人口） ・廃棄物（総人口） ・農業残渣（農地面積）
ケース2	按分推計（全球一括）： 2000年の全球総排出量に対する比率で配分	・国際船舶 ・航空機
ケース3	按分推計（地域別）： 2000年の地域別排出量に対する比率で配分	・陸上交通（鉄道および道路） ・農業

（２）農業廃棄物の燃焼に伴う月別排出量データの構築

農業廃棄物の燃焼に伴う月別排出量データの改善・精緻化に際し、農業廃棄物の発生地点の空間情報および発生時期に関する季節変動が重要な情報となる。ここでは、農業廃棄物の残渣発生について、世界各地の作物栽培時期情報と作物栽培区域の位置情報を用い、全球0.5°グリッドの格子点毎の月別残渣発生量を定量化する空間配分方法を開発した。図(2)-2に農作物残渣焼却の季節特性を反映した空間配分指標の推計方法の概要図を示す。作物栽培時期情報としては、米国農務省の作物カレンダーをもとに作成した世界各地の農事暦情報を利用した（表(2)-2）。農業残渣の焼却は農事暦における収穫期と同じ時期に発生すると仮定した。農業残渣焼却の季節配分は収穫期の月数で単純に分配している。例えば、10月のひと月のみが収穫期の場合は、10月の作物残渣焼却発生率が「1」残りの月は「0」、10月、11月のふた月が収穫期の場合は10月、11月のそれぞれの作物残渣焼却発生率を「0.5」残りの月は「0」となる。作物栽培区域の位置情報としては、米国ニューハンプシャー大学において整備されている農作物種別データを用いた。このデータは、Monfreda et al. (2008)³⁾による175種の作物データを基に、C3 annual（穀物、野菜、根菜類など）、

C3 N-fixing（豆科作物）、C3 perennial（果樹）、C4-annual（トウモロコシ、サトウキビなど）の4種類の作物群が占める面積割合を全球0.5°グリッドの格子点データとして整備したものであるが、C3 N-fixing と C3 perennial については残渣焼却量が全体に比べて小さいと判断し、ここでは考慮していない。また、残渣焼却量は作物によって異なることから、加重係数を別途用意する。例えば、C3 annual には小麦と稲、穀物が含まれるが、それぞれ、IPCCガイドラインを参考に4.0、5.5、4.5と設定した。これらの情報をもとに、統合評価モデルとの親和性も考慮して世界を21の国・地域区分に分割し、C3 annual、C4 annual それぞれに対して月別配分係数を作成した。また、国連気候変動枠組条約(UNFCCC)の温室効果ガスインベントリに報告されている農作物残渣の焼却による排出量の状況を調査・検討して各国別の農作物残渣焼却による年間排出量を算定し、改良した月別配分係数を用いて全球0.5°グリッドの格子点毎の農作物残渣焼却による月別発生量データを作成した。



図(2)-2 農作物残渣焼却の季節特性を反映した空間配分指標推計手法の概要図

表(2)-2 主な地域における主要作物の栽培暦。元データが網羅的に整備されているわけではないため、作付けから収穫までの一連の情報が揃っていない場合もある。

夏作物													
地域	種類	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
欧州	てんさい	-	-	作付け	作付け	-	-	-	-	-	収穫	収穫	収穫
欧州	スペイン てんさい	収穫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
欧州	ドイツ てんさい	-	-	-	-	作付け	-	-	-	収穫	-	-	-
欧州	フランス てんさい	-	-	-	-	-	-	-	-	収穫	-	-	-
欧州	スペイン 綿	-	作付け	-	-	-	-	-	-	収穫	収穫	収穫	収穫
欧州	ギリシャ 綿	-	-	-	-	-	-	-	-	収穫	収穫	収穫	収穫
欧州	地中海 柑橘類	収穫	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	-	-	-	-
欧州	南部 小穀物	-	-	作付け	作付け	-	出穂	成熟	収穫	-	-	-	-
欧州	トウモロコシ	-	-	-	-	作付け	出穂	成熟	-	収穫	収穫	収穫	収穫
欧州	フランス トウモロコシ	-	-	-	-	-	-	綿糸抽出	成熟	-	-	-	-
欧州	ハンガリー トウモロコシ	-	-	-	-	-	-	綿糸抽出	成熟	-	-	-	-
欧州	イタリア トウモロコシ	-	-	作付け	作付け	-	-	-	-	-	-	-	-
欧州	南部 トウモロコシ	-	-	-	-	作付け	綿糸抽出	-	-	-	-	-	-
欧州	ひまわり	-	-	-	-	作付け	-	完熟	-	収穫	-	-	-
旧ソ連	西部 小穀物	-	-	-	作付け	生長	出穂	成熟	収穫	収穫	-	-	-
旧ソ連	東部 小穀物	-	-	-	作付け前	作付け	生長	出穂	成熟	収穫	-	-	-
旧ソ連	南部 トウモロコシ	-	-	-	-	作付け	生長	綿糸抽出	成熟	収穫	収穫	-	-
旧ソ連	南部 ひまわり	-	-	-	作付け	作付け	生長	完熟	成熟	成熟	収穫	-	-
旧ソ連	南部 てんさい	-	-	-	作付け	作付け	生長	成熟	成熟	成熟	収穫	-	-
旧ソ連	中央亜 綿	-	-	-	作付け	作付け	生長	開花	成熟	収穫	収穫	収穫	収穫(遅)
中国	サトウキビ	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	-	-	-	収穫	収穫
中国	早稲	-	-	作付け	作付け	出穂	成熟	収穫	-	-	-	-	-
中国	水稲	-	-	-	作付け	作付け	生長	出穂	成熟	収穫	収穫	-	-
中国	稲-晩植	-	-	-	-	-	-	作付け	生長	出穂	成熟	収穫	収穫
中国	トウモロコシ	-	-	-	作付け	作付け	開花	綿糸抽出	成熟	収穫	収穫	-	-
中国	大豆	-	-	-	作付け	作付け	開花	Podding	成熟	収穫	収穫	-	-
中国	綿	-	-	-	作付け	作付け	開花	開花	成熟	収穫	収穫	-	-
東南アジア	稲	-	-	-	-	作付け	作付け	出穂	成熟	成熟	成熟	-	-
東南アジア	トウモロコシ	-	-	-	-	作付け	作付け	綿糸抽出	成熟	収穫	収穫	-	-
南アジア	穀物	-	-	-	-	-	-	作付け	出穂	-	-	-	-
南アジア	綿	-	-	-	-	-	-	作付け	生長	開花	開花	収穫	-
南アジア	油料種子	-	-	-	-	-	-	作付け	生長	成熟	成熟	Boll stage	収穫
南アジア	稲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	収穫	収穫
北米	フロリダ サトウキビ	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	-	-	-	収穫	収穫
北米	フロリダ 綿	-	-	作付け	-	-	-	-	-	-	-	-	-
北米	カナダ 小穀物	-	-	-	作付け前	作付け	生長	出穂	成熟	収穫	-	-	-
北米	カナダ 菜種	-	-	-	作付け前	作付け	生長	開花	成熟	収穫	-	-	-
北米	カナダ トウモロコシ	-	-	-	-	作付け	生長	綿糸抽出	成熟	成熟	収穫	収穫	-
北米	米国 トウモロコシ	-	-	-	作付け	作付け	生長	綿糸抽出	成熟	成熟	収穫	収穫	-
北米	米国 ソルガム	-	-	-	-	作付け	生長	出穂	成熟	成熟	-	-	-
北米	米国 小穀物	-	-	-	作付け	作付け	出穂	成熟	収穫	収穫	-	-	-
北米	米国 綿	-	-	-	作付け	作付け	生長	成熟	成熟	成熟	収穫	収穫	収穫
北米	米国 大豆	-	-	-	-	-	作付け	成熟	成熟	成熟	収穫	収穫	-
夏作物													
地域	種類	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
メキシコ	サトウキビ	収穫	収穫	収穫	収穫	作付け	収穫	-	-	-	-	-	収穫
メキシコ	柑橘類	収穫	収穫	収穫	収穫	作付け	収穫	-	-	-	-	-	収穫
メキシコ	コーヒー	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	-	-	-	-	収穫
メキシコ	ソルガム	-	-	-	-	作付け	作付け	生長/交配	成熟	成熟	成熟	収穫	収穫
メキシコ	トウモロコシ	-	-	-	-	作付け	作付け	生長/交配	成熟	成熟	成熟	収穫	収穫
アルゼンチン	トウモロコシ	綿糸抽出	登熟	登熟	収穫	収穫	-	-	-	作付け	作付け	作付け	生長
アルゼンチン	綿	完熟	登熟	収穫	収穫	収穫	収穫	-	-	作付け	作付け	作付け	生長
アルゼンチン	大豆	作付け	開花	podding	登熟	収穫	収穫	-	-	-	-	-	作付け
ブラジル	大豆	開花	podding	登熟	収穫	収穫	-	-	-	-	作付け	作付け	作付け
ブラジル	綿	完熟	成熟	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	作付け	作付け	生長
ブラジル	柑橘類	-	-	-	-	収穫	-	-	収穫	収穫	収穫	収穫	-
ブラジル	トウモロコシ	-	-	-	-	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	-
ブラジル	コーヒー	-	-	-	-	-	収穫	収穫	収穫	成熟	成熟	成熟	-
ブラジル	サトウキビ	-	-	-	-	-	収穫	収穫	収穫	収穫	収穫	-	-
東アフリカ	穀物(minor)	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	-	-	作付け	-	開花
東アフリカ	Belg Grain	-	作付け	作付け	作付け	作付け	交配	収穫	-	-	-	-	-
東アフリカ	トウモロコシ	-	-	作付け	作付け	作付け	交配	交配	収穫	収穫	収穫	収穫	-
東アフリカ	ソルガム	-	-	作付け	作付け	作付け	交配	交配	収穫	収穫	収穫	-	-
東アフリカ	穀物	-	-	-	-	作付け	作付け	作付け	交配	交配	成熟	-	収穫
東アフリカ	小穀物	-	-	-	-	作付け	作付け	作付け	交配	交配	成熟	-	収穫
南アフリカ	トウモロコシ	綿糸抽出	登熟	登熟	収穫	収穫	-	-	-	-	作付け	作付け	生長
西アフリカ	粗穀物	セイシエル	-	-	作付け	作付け	作付け	作付け	開花	開花	収穫	-	-
西アフリカ	粗穀物	海岸	-	-	作付け	作付け	作付け	作付け	収穫	収穫	-	-	-
西アフリカ	稲	セイシエル	-	-	作付け	作付け	作付け	作付け	開花	-	収穫	収穫	-
西アフリカ	稲	海岸	-	-	作付け	作付け	作付け	収穫	収穫	作付け	生長	収穫	収穫
西アフリカ	ココア	-	-	-	開花	開花	-	-	-	-	収穫	-	-
西アフリカ	ソルガム	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	成熟	-
西アフリカ	トウモロコシ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	成熟	-
中東・エジプト	綿	-	-	作付け	作付け	作付け	作付け	生長	-	-	収穫	-	-
中東・エジプト	穀物	-	-	-	-	-	作付け	生長	-	-	-	-	-
中東・エジプト	油料種子	-	-	-	-	-	作付け	生長	-	-	-	-	-
豪州	綿	生長	交配	登熟	登熟/収穫	収穫	収穫	-	-	作付け	作付け	作付け	生長
豪州	ソルガム	作付け	交配	登熟	登熟/収穫	収穫	収穫	-	-	作付け	作付け	作付け	作付け
豪州	サトウキビ	収穫	-	-	-	-	-	収穫	収穫	収穫	収穫	収穫	収穫

冬作物

地域	種類	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
欧州	北部	穀物	休止	休止	休止	緑化							休止
欧州	南部	穀物											出穂
欧州	スペイン	穀物	準休止	緑化	出穂		成熟					作付け	
欧州	地中海	穀物					収穫						
欧州	イタリア	穀物				出穂						作付け	
欧州	フランス	穀物			緑化		出穂	成熟	収穫				
欧州	ハンガリー	穀物					成熟	収穫					
欧州	ルーマニア	穀物					出穂						
欧州	ポーランド	穀物					出穂						
欧州	英	穀物						成熟		作付け			
欧州	デンマーク	穀物								作付け			
欧州	ポーランド	穀物						成熟					
欧州		穀物							収穫		作付け		
欧州	英	菜種					開花	収穫	作付け				
欧州	ポーランド	菜種					開花	収穫	作付け	作付け			
欧州		菜種									作付け		
旧ソ連	北部	穀物	休止	休止	休止	休止	生長	出穂	登熟	作付け	生長	耐凍性強化	休止
旧ソ連	南部	穀物	休止	休止	緑化	緑化	出穂	登熟	収穫	作付け前	作付け	遅作付け	耐凍性強化
中国		穀物	休止	休止	作付け	出穂	登熟	収穫	-	-	作付け	生長	休止
南アジア		小麦	出穂期	登熟	登熟	登熟	-	-	-	-	作付け	生長	生長
北米	米国	穀物	休止	休止	作付け	作付け	出穂	登熟/収穫	収穫	-	作付け	生長	耐凍性強化
メキシコ		小麦	生長	出穂	出穂	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	生長
		野菜	収穫	収穫	収穫	収穫	収穫	-	-	-	-	-	収穫
アルゼンチン		小麦	収穫	-	-	-	-	作付け	生長	生長	出穂	成熟	成熟
ブラジル		小麦	-	-	-	作付け	作付け	生長	生長	出穂	成熟	収穫	収穫
北西アフリカ		穀物	生長	生長	出穂	出穂	収穫	収穫	-	-	-	作付け	作付け
南アフリカ		小麦			作付け	作付け	作付け	作付け	-	-	-	成熟	-
中東・エジプト	南部	小麦			出穂	出穂	収穫	収穫	-	収穫	作付け	作付け	-
北アフリカ	北部	小麦				緑化	出穂	収穫	-	収穫	作付け	作付け	-
豪州		小麦	収穫	-	-	-	作付け	作付け	生長	生長	出穂	成熟	収穫

(3) 空間詳細な排出シナリオの不確実性要因の検討

1) RCP の過去データの不確実性要因の検討

Lamarque et al. (2010)⁴⁾によると、RCP より提供された過去の空間詳細排出量データベース(以下、RCP-DB とよぶ)は、1850～2000 年を対象として、基準年(2000 年)排出量とそれに対する各年の排出量比率をそれぞれ設定した上で作成されている。図(2)-3に RCP-DB の排出量推計方法の概念図を、表(2)-3 に具体的な手順を示す。

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{地域A、ガスX、} \\ \text{排出源セクターYにおけ} \\ \text{るZ年の排出量} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{地域A、ガスX、} \\ \text{排出源セクターYにおけ} \\ \text{る基準年排出量} \end{array}} \times \boxed{\begin{array}{c} \text{地域A、ガスX、} \\ \text{排出源セクターYにおけ} \\ \text{るZ年の排出量比率(※)} \end{array}}$$

(※) 排出量比率には活動量や排出係数の変化が反映されている。

図(2)-3 RCP-DB における推計の考え方

表(2)-3 RCP-DB の作成手順

①	全球レベルまたは地域レベルのデータセットを組み合わせることによって、地域別・ガス別・排出源セクター別に基準年(2000 年)排出量を作成。
②	RETRO (Schultz and Rast, 2007) ⁵⁾ と EDGAR-HYDE (Van Aardenne et al., 2001) ⁶⁾ を組み合わせることによって、地域別・ガス別・排出源セクター別に基準年排出量に対する各年の排出量比率(排出量の時系列トレンド)を作成。
③	時系列トレンドを基準年排出量に適用することによって、地域別・ガス別・排出源セクター別に過去の排出量を推計。

CH₄、CO、NO_x、NMVOC（非メタン揮発性有機化合物）、NH₃に関する基準年排出量の作成にあたっては、公表または審査済みの地域レベルインベントリが優先的に用いられた。具体的には、欧州諸国を対象とする EMEP (Vestreng et al., 2006)⁷⁾、アジア域を対象とする REAS (Ohara et al., 2007)⁸⁾、北米を対象とする US-EPA の各インベントリである（こうしたデータセットは全球レベルのインベントリよりも実態が適切に反映されている）。また、地域レベルの情報が得られない場合は、EDGAR (Van Aardenne et al., 2005)⁹⁾のデータが使用された。一方、ブラックカーボン (BC)と有機炭素(OC)については Bond et al. (2007)¹⁰⁾と Junker and Lioussé (2008)¹¹⁾、SO₂については Smith et al. (2011)¹²⁾及び国連気候変動枠組条約(UNFCCC)インベントリ等が用いられた。

排出量の時系列トレンドは、技術情報が豊富に盛り込まれている RETRO (Schultz and Rast, 2007)と対象期間が長く幅広い排出源セクターが取扱われている EDGAR-HYDE (Van Aardenne et al., 2001)の情報を最大限活用しつつ、基準年排出量に対する各年の排出量比率を定義することにより推計した。期間毎の推計方法（使用されたデータセット）は表(2)-4の通りである。

表(2)-4 時系列トレンド作成にあたっての推計方法（期間別）

期間	推計方法（使用されたデータセット）
1850～1890 年	EDGAR-HYDE に基づき外挿（燃料消費量及び人口データに基づく）。
1890～1960 年	EDGAR-HYDE に基づき推計。
1960～1990 年	RETRO と EDGAR-HYDE の両方を組み合わせることにより推計。
1990～2000 年	RETRO に基づき推計。

※但し、1960 年と 1990 年については連続性を保つために補正作業を実施。

前述のとおり、①RCP-DB は複数のデータセットを組み合わせることによって推計が行われていること、②不確実性の検証にあたって比較対象となる DB が限られていること、③比較対象として有効な UNFCCC インベントリにも不確実性が含まれていること等を勘案すると、不確実性の定量化は決して容易ではない。一方で、RCP-DB の排出量データを UNFCCC インベントリ等と比較したところ、一部の国・地域の排出源セクターにおいて比較的大きな誤差が特定され、またその要因が類推されたことから、不確実性を評価する上での 1つの指標となると考えられる。そこで、本研究では、RCP-DB の不確実性を示す指標として、UNFCCC インベントリにおける各国の排出量との比較を行い、誤差の要因について整理を行った。

2) 過去の時系列排出量データの相互比較および不確実性要因の検討

国・地域ごとの時系列排出量データに存在する不確実性の要因分析に際しては、本来であれば、温室効果ガスや対流圏エアロゾル、大気化学物質など複数の物質に対して、また、工業プロセスや産業活動など複数のセクターに対して、詳細に調べなければならない。しかしながら、既存の排出量データベースに対して、活動量や排出係数などのデータを全球規模で網羅的に入手することは極めて困難であるため、近年（1980～2000年）のアジアにおける主要国を対象に、代表的な排出量データベースにおける主要なセクターにおける排出量を比較し、複数の排出量データベー

ス間の差とその要因について検討した。なお、調査物質としては、気候変化シナリオにおける大きな不確実性要因の1つである対流圏エアロゾルを対象とした。

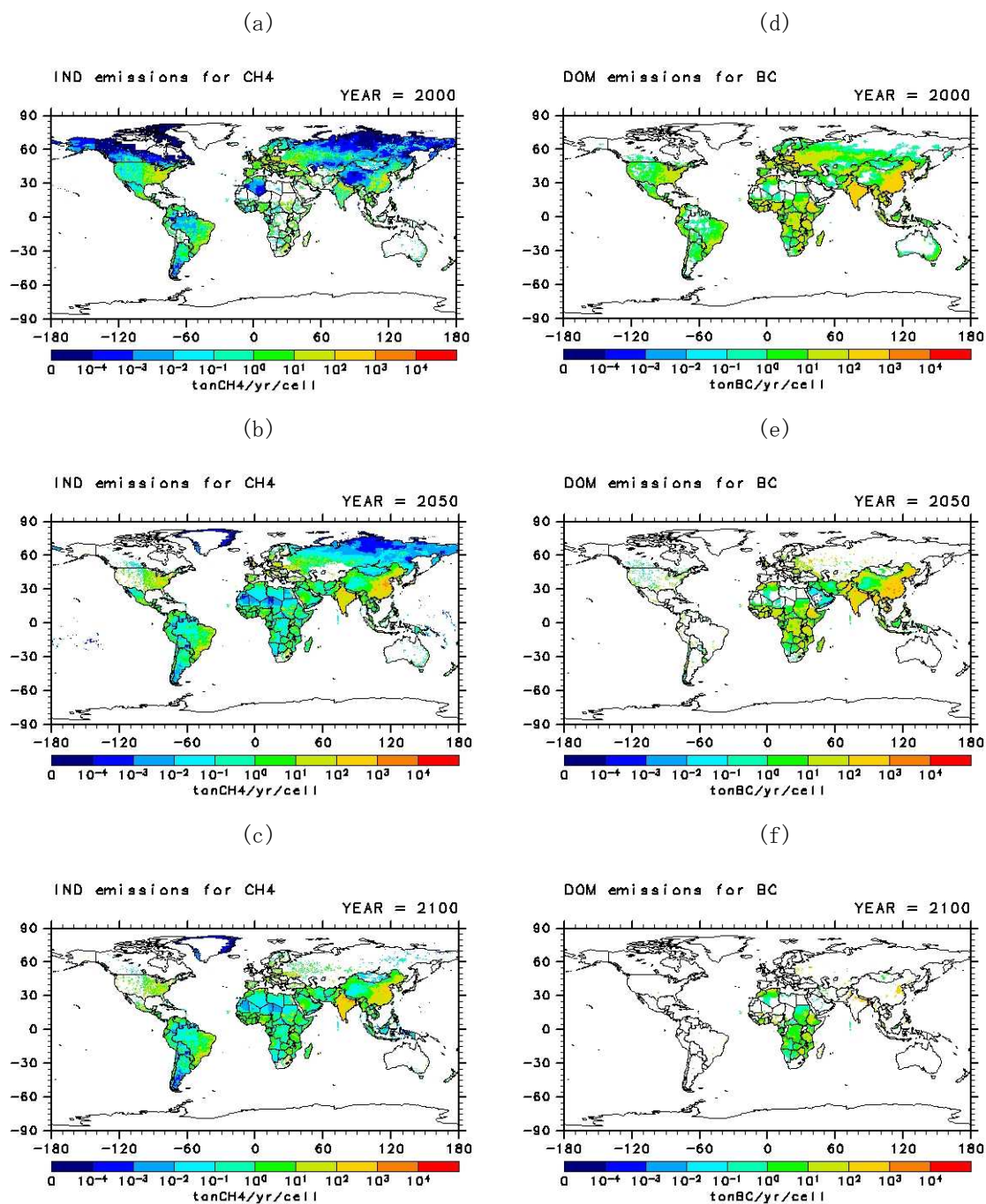
3) 空間配分指標の設定に起因する不確実性の検討

空間配分指標としては、人口、GDP、農地面積などが用いられているが、主要な空間配分指標としては、1990年および2000年における人口、GDPがもっとも広範に利用されている。このことから、1990年および2000年における人口、GDPの全球分布データを、それぞれのデータにおいて全球で最大となる数値が1となるように無次元化し、それらのデータから求めた各格子点における分散をズレ幅として分析した。

4. 結果及び考察

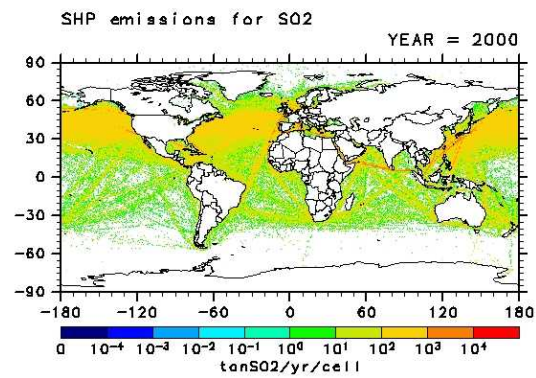
(1) GHGやエアロゾル等の空間詳細排出量データベースの構築

国立環境研究所の統合評価モデルAIMにより推計されたRCP6.0シナリオに対応する領域別、セクター別の排出量データから、本課題のサブテーマ（1）において推計された社会経済指標の空間詳細分布データを空間配分指標として、前節で述べた推計手法により2000年から2100年までの緯度 0.5° × 経度 0.5° の格子点データを推計した。図(2)-4は、ケース1の手法により推計したエネルギー集約型の工業活動による CH_4 排出量および民生・業務活動による BC 排出量の空間分布を示す。なお、2000年における空間詳細排出量データはRCPに向けて国際コミュニティより提供されたものであり、厳密には一致しないものの、EDGARのデータベースと著しく異なるものではない。また、空間配分指標として、エネルギー集約型の工業活動からの排出にはGDPを、民生・業務活動からの排出には農村人口を用いている。AIMの出力によれば、エネルギー集約型の工業活動による CH_4 排出量は、欧米などの先進国地域においては、将来的に排出量が減少する一方、中国やインドなどのアジア地域などでは、将来的に排出量が増加していくと推計されている。図(2)-4を見ても明らかに、このような変化が、空間詳細な格子点データでも表現されていることが分かる。民生・業務活動による黒色炭素排出量についても同様に、AIMでの推計に基づき、排出量が全球的に減少していくことが分かる。将来の排出量推計を当該年の空間配分指標のみに依存すると仮定した場合、特に直近の将来において排出量分布が著しく不連続となってしまう傾向が見られたが、将来の排出量推計値が過去（ここでは2000年）の排出量分布にも依存するように改良したことにより、空間分布においても図(2)-4に見られるような滑らかな経年変化を示すようになったと考えられる。ただし、AIMの推計次第ではあるが、推計した空間詳細排出量分布が不自然と思われる例も散見されたため、表(2)-1に示した各セクターに対する空間配分指標の妥当性も含め、今後もダウンスケーリング手法を改良する必要があると考えられる。参考までに、図(2)-5、図(2)-6には、それぞれケース2およびケース3の手法により推計した、国際船舶による SO_2 排出量（図(2)-5）、農業によるメタン排出量（図(2)-6左側）、陸上交通による NO_x 排出量（図(2)-6右側）を示す。細かい点の指摘までは割愛するが、基本的には意図したとおりの空間詳細排出量分布が推計されている。なお、このようにして作成されたRCP6.0シナリオに対応するガス別、セクター別の空間詳細排出量データは、IPCC第5次評価報告書作成に向けた代表的濃度シナリオの一部として公開され、世界各国の気候変動予測シミュレーションにも活用されている。

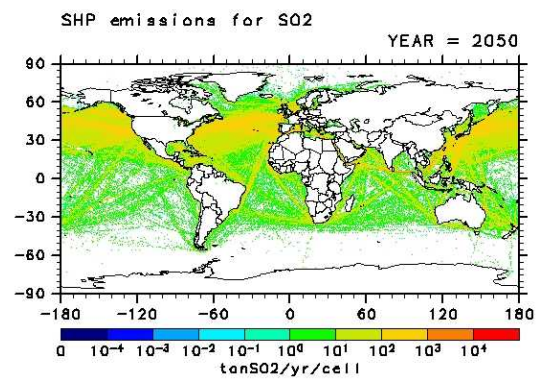


図(2)-4 ケース1の手法により推計した空間詳細排出量分布。左側 (a-c) はエネルギー集約型の工業活動によるCH₄排出量の空間分布、右側 (d-f) は民生および業務活動によるBC排出量の空間分布を示す。上段から、(a,d) 2000年、(b,e) 2050年、(c,f) 2100年の推計分布。単位は ton(CH₄ or BC)/yr/cell。見易さのため、排出量の対数で色分けしている。

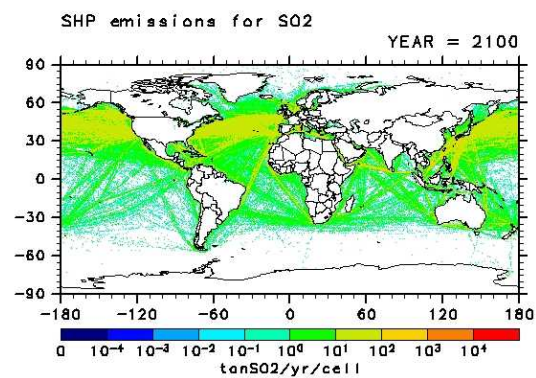
(a)



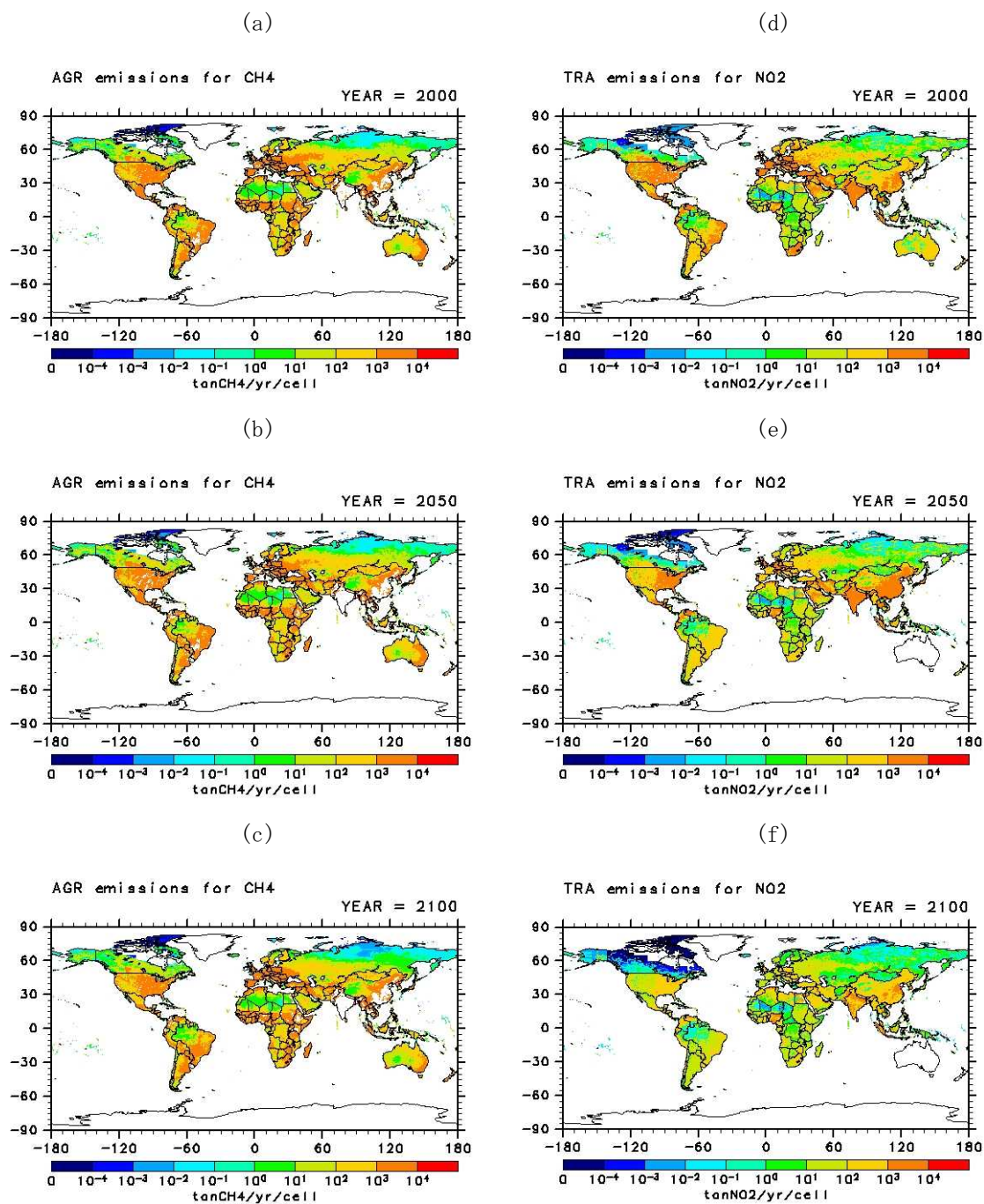
(b)



(c)



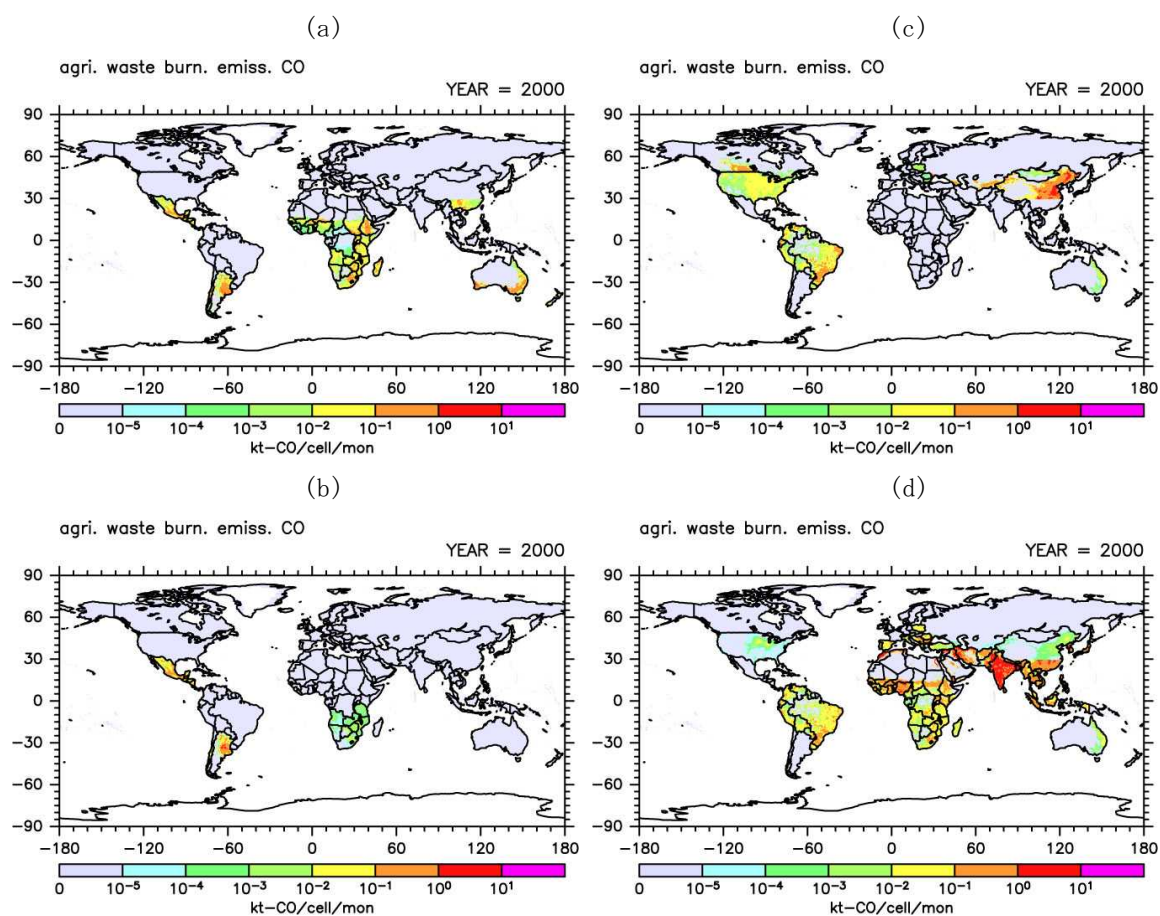
図(2)-5 ケース2の手法により推計した国際船舶によるSO₂排出量の空間分布。上段から、(a) 2000年、(b) 2050年、(c) 2100年の推計分布。単位は ton(SO₂)/yr/cell。見易さのため、排出量の対数で色分けしている。



図(2)-6 ケース3の手法により推計した空間詳細排出量分布。左側 (a-c) は農業による CH_4 排出量の空間分布、右側 (d-f) は陸上交通による NO_x 排出量の空間分布を示す。上段から、(a,d) 2000年、(b,e) 2050年、(c,f) 2100年の推計分布。単位は $\text{ton}(\text{CH}_4 \text{ or } \text{NO}_2)/\text{yr/cell}$ 。見易さのため、排出量の対数で色分けしている。

（２）農業廃棄物の燃焼に伴う月別排出量データの構築

2011年に報告された温室効果ガスインベントリにおける農作物残渣の焼却による排出量の状況を調査・検討した結果、先進国については同インベントリで報告されている数値を利用して、途上国については2006年版IPCCガイドラインに準じて、各国別の農作物残渣焼却による年間排出量を算定することとした。途上国の推計値のうち、特に排出量が多かった中国、インドについて気候変動枠組条約に提出された国別報告書の数値と比較した結果、大きな差異は見られなかった。得られた各国別排出量は、 0.5° グリッド毎の各国の面積データと同じく 0.5° グリッド毎の陸域農地面積割合データから、各国の農地が 0.5° グリッド毎に占める割合のデータを作成し、同データに従って各国の排出量を 0.5° グリッドに配分することにより、全球 0.5° グリッドに空間配分した。月別排出量への配分は、一部の地域において周辺地域との連続性等を考慮して改良した月別配分係数データを用いた。図(2)-7はこのようにして作成した2000年1, 4, 7, 10月における農作物残渣焼却によるCO排出量を示す。中国の揚子江付近にまだ不自然な境界線が見られるものの、概ね妥当な排出量分布が得られていると考えられる。一方で、今回の農作物残渣焼却による月別排出量推計においては、残渣焼却時期は収穫期と同一と仮定している、2期作・2毛作が反映できていない、気象要素が考慮されていない、などの問題点があり、これらの対応は今後の課題である。



図(2)-7 農業廃棄物の燃焼に伴うCOの月別排出量。(a) 2000年1月、(b) 2000年4月、(c) 2000年7月、(d) 2000年10月。単位は kt-CO/mon/cell。見易さのため、排出量の対数で色分けしている。

(3) 空間詳細な排出シナリオの不確実性要因の検討

1) RCP過去データの不確実性要因の検討

RCP-DBの不確実性を示す指標として、UNFCCCインベントリとの誤差を整理し、米国を事例に表(2)-5に結果を示す。

表(2)-5 RCP-DBとUNFCCCとの誤差

主要国	主な排出源セクター/ガス		RCP-DBとUNFCCCとの誤差[%]	
			1990年	2000年
米国	産業	SO ₂	6.5	0.3
	運輸	CO	19.6	2.6
		NMVOC	31.5	12.0
	民生	CH ₄	44.4	3.6
	溶剤使用	NMVOC	39.3	0.2
	農業	CH ₄	0.1	12.4
	廃棄物	CH ₄	21.8	6.0

表(2)-5に示した結果の不確実性について、その要因を2000年排出量の視点から整理を行った。Lamarque et al. (2010)によると、主要先進国の2000年排出量は各国が毎年提出しているUNFCCCインベントリを参照し設定しているとされている。しかし、実際にRCP-DBとUNFCCCインベントリを比較したところ、多くの国・地域、排出源セクターにおいて異なる値が示された。

値が異なる主な要因としては再計算の影響が挙げられる。再計算とは、UNFCCC インベントリの作成にあたって新規排出・吸収源の追加（推計対象の拡大）やデータの改善等に伴い、各国が必要に応じて毎年実施するものである。今回の分析では比較対象として最新の UNFCCC インベントリ（2009年に提出されたインベントリ）を用いたが、RCP-DBを作成するにあたって参照されたUNFCCC インベントリから値の更新が実施されており、したがって排出量の値に差が生じたと考えられる。

参考までに、米国が2005年以降に提出したUNFCCC インベントリの2000年排出量を例示する（表(2)-6）。いずれの国とも毎年再計算を実施しており、総排出量を前年と比較した場合、最大で約30%の差が発生している。

表(2)-6 再計算に伴う2000年排出量の変動（米国）（単位はGg-CO₂）

カテゴリー	2005年提出	2006年提出	2007年提出	2008年提出	2009年提出
エネルギー	5,985,342.12	5,994,287.86	6,069,217.43	6,067,772.65	6,059,934.22
工業プロセス	332,056.83	329,589.05	338,671.42	326,465.56	356,315.05
溶剤その他の製品の利用	4,766.04	4,766.04	4,766.04	4,879.50	4,879.50
農業	444,088.13	458,438.85	547,358.67	447,908.00	399,444.64
土地利用、土地利用変化及び林業	-816,072.54	-753,132.79	-735,366.26	-643,614.33	-684,459.12
廃棄物	180,587.83	188,846.89	165,867.08	155,593.98	154,606.92
合計	6,130,768.41	6,222,795.90	6,390,514.38	6,359,005.36	6,290,721.21

2）過去の時系列排出量データの相互比較および不確実性要因の検討

先進国、途上国などのバランスを考え、日本、中国、インドの3カ国を対象とした。また、対象物質としては、地域性が大きく、気候への影響も比較的大きいと思われるSO₂およびBCを、対象セクターとしては、排出規模の大きい産業分野を選択した。なお、調査に用いたデータベースは、RCPシナリオとUNFCCCインベントリ、アジア域を中心としたREASデータ（Ohara et al., 2007）である。共通した傾向として、排出量の経年変化はおおむね一致しているが、一部では大きな差異が認められた。その原因について、文献等をもとに考察した結果、排出係数の上限値（緩和技術導入前）および下限値（緩和技術導入後）の設定方法の違いや、緩和技術導入時期の想定の違いが大きく関与している可能性が高いことが分かった。また、排出量の絶対値については大きな差異が見られ、この傾向は特にBCエアロゾルで顕著であり、やはり排出係数や緩和技術に関する想定の違いが大きく影響していると考えられる。

3）空間配分指標の設定に起因する不確実性の検討

主要な空間配分指標として用いられる1990年および2000年における人口、GDPの全球分布データ

を、それぞれのデータにおいて全球で最大となる数値が1となるように無次元化し、それらのデータから求めた各格子点における分散をズレ幅として分析した結果を表(2)-7に示す。これより、各指標を用いた時の標準偏差が0.05以内に収まる格子点数が99%を超えることが分かった。個別の格子点においては、排出量の値が何倍にも変化する状況にもなり得るが、各格子点の全体排出量に対する絶対値の幅はそれほど変わらず、空間配分指標の変更によって大きな影響が出ない可能性が高いと推測される。

表(2)-7 4つの空間配分指標の無次元化平均値及び標準偏差集計結果（格子点数）

平均値		標準偏差	
0	8969	0	8969
0 ~ 0.05	58336	0 ~ 0.05	58447
0.05 ~ 0.1	460	0.05 ~ 0.1	374
0.1 ~ 0.15	68	0.1 ~ 0.15	62
0.15 ~ 0.2	19	0.15 ~ 0.2	9
0.2 ~ 0.25	9	0.2 ~ 0.25	4
0.25 ~ 0.3	2	0.25 ~ 0.3	2
0.3 ~ 0.35	1	0.3 ~ 0.35	0
0.35 ~ 0.4	2	0.35 ~ 0.4	0
0.4 ~ 0.45	1	0.4 ~ 0.45	1
0.45 ~ 0.5	1	0.45 ~ 0.5	0

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本課題において整備した温室効果ガスやエアロゾル、およびそれらの前駆物質等の空間詳細排出量の経年変化データベースは、気候モデルを用いた温暖化予測研究の重要な境界条件(入力データ)となる。将来の温暖化予測の不確実性に関しては、気候モデルにおける雲などの素過程の取り扱いに起因するものが盛んに議論されているが、境界条件についても、同等程度かそれ以上の不確実性が存在していると考えられる。その不確実性に関する知見を得ることは、将来の温暖化予測における不確実性の定量化（例えば、気温上昇や降水量変化に統計的な信頼区間の情報を付加することなど）、さらには不確実性の低減に関する新たな情報の提供に役立つと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

本サブテーマの一部は、IPCC第5次評価報告書作成に向けた代表的濃度シナリオ（RCP）の一端を担うものであり、本研究において空間詳細排出量データを作成した6W/m²のシナリオ(RCP6.0シナリオ)はインターネットを通じて広く国際的に公開され、気候モデルによる将来の気候変動予測シミュレーションにも活用されている。これらは、次世代の気候変動予測シナリオの構築を下支えしているという意味で、政策に貢献していると言える。

また、対流圏エアロゾルはその気候へのインパクトが比較的大きいにも関わらず、いまだ大きな不確実性が存在しており、温室効果ガスの増加に伴う将来の気候変化予測シナリオの構築にも少なからぬ影響を与えている。不確実性をもたらす大きな要因の1つである排出量を精緻化

し、新たな知見をもたらすことにより、今後の温暖化対策立案などに用いられる気候変動予測シナリオの定量化に貢献することが可能となる。

6. 国際共同研究等の状況

本課題の一部は、次期IPCC評価報告書に向けた次世代の気候変動予測シナリオ構築の第一段階である、代表的濃度シナリオ（RCP）作成の一端を担うものであり、各国の関係者と、基準となる共通データやお互いの推計手法などについて活発な議論や意見交換を行った。また、空間詳細排出量推計の不確実性に関しては、米国大気研究センター（NCAR）の研究者と頻繁に意見交換を行った。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari, E. Kato, P.R. Shukla, Y. Yamagata and M. Kainuma (2011): An emission pathway for stabilization at 6 Wm^{-2} radiative forcing. *Climatic Change*, 109, 59-76.
- 2) Kawase, H., T. Nagashima, K. Sudo, and T. Nozawa (2011): Future changes in tropospheric ozone under Representative Concentration Pathways (RCPs). *Geophys. Res. Lett.*, 38, L05801.

<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（学会等）

- 1) Nozawa, T.: Impact of carbonaceous aerosols on observationally constrained attributable warming and future prediction. 1st International Workshop on KAKUSHIN Program, Honolulu, USA, February 2008.
- 2) 竹村俊彦, 野沢徹: 21世紀のエアロゾルの分布と放射強制力の予測. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年3月.
- 3) 磯崎勉, 野沢徹, 植田宏昭: プレモンスーン期の大気・地表面加熱におけるエアロゾルの寄与. 日本気象学会2008年度秋季大会, 2008年3月.
- 4) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari and E. Kato: Emission pathway for 6 W/m^2 . IAMC Meeting, Tsukuba, Japan, September 2010.
- 5) 川瀬宏明, 永島達也, 須藤健悟, 野沢徹: RCPシナリオに基づいた対流圏オゾンの将来予測. 日本気象学会 2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.

(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) 成果の記者発表（2011年9月26日、筑波研究学園都市記者会配付）

(6) その他

なし

8. 引用文献

- 1) Moss, R.H., J.A. Edmonds, K. Hibbard, M. Manning, S.K. Rose, D. van Vuuren, T. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. Meehl, J. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. Stouffer, A. M. Thomson, J. Weyant and T. Wilbanks (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
- 2) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari, E. Kato, P.R. Shukla, Y. Yamagata and M. Kainuma (2011): An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. *Climatic Change*, 109, 59-76.
- 3) Monfreda, C., N. Ramankutty and J.A. Foley (2008): Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB1022.
- 4) Lamarque, J.-F., T.C. Bond, V. Eyring, C. Granier, A. Heil, Z. Klimont, D. Lee, C. Liousse, A. Mieville, B. Owen, M.G. Schultz, D. Shindell, S.J. Smith, E. Stehfest, J. van Aardenne, O.R. Cooper, M. Kainuma, N. Mahowald, J.R. McConnell, V. Naik, K. Riahi and D.P. van Vuuren (2010): Historical (1850-2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7017-7039.
- 5) Schultz, M. and S. Rast, eds. (2007): Emission datasets and methodologies for estimating emissions. RETRO Report D1-6.
- 6) Van Aardenne, J.A., F.J. Dentener, J.G.J. Olivier, C.G.M. Klein Goldewijk and J. Lelieveld Global Biogeochem (2001): A 1 x 1 degree resolution dataset of historical anthropogenic trace gas emissions for the period 1890-1990. *Cycles*, 15, 909-928.
- 7) Vestreng, V. et al. (2006): EMEP, Inventory Review 2006: Emission data reported to the LRTAP Convention and NEC Directive, Stage 1, 2 and 3 review, Evaluation of

inventories of HMs and POPs.

- 8) Ohara, T., H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, X. Yan and T. Hayasaka (2007): An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4419–4444.
- 9) Van Aardenne, J. A., F. Dentener, J.G.J. Olivier, and J.A.H.W. Peters (2005): The EDGAR 3.2 Fast Track 2000 dataset (32FT2000), available at <http://www.mnp.nl/edgar/model/v32ft2000edgar/docv32ft20>.
- 10) Bond, T.C., E. Bhardwaj, R. Dong, R. Jogani, S. Jung, C. Roden, D.G. Streets and N.M. Trautmann (2007): Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000..*Global Biogeochem. Cycles*, 21, GB2018.
- 11) Junker, C. and C. Lioussé (2008): A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860–1997. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1–13.
- 12) Smith S.J., J.A. van Aardenne, Z. Klimont, R. Andres, A. Volke and S.D. Arias (2011): Historical Sulfur Dioxide Emissions: 1850–2005. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1101–1116.

S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

4. 統合システム解析による空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの開発

(3) 空間詳細シナリオの検証と国際研究ネットワークの構築に関する研究

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター GCPつくば国際オフィス フェロー ソバカル・ダカール

<研究協力者>

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター 牧戸泰代(平成19～22年度)・アニル・ラウト(平成19年度)・

ラビニア・ポルツキ(平成20～22年度)・

スタカル・イエドラ(平成22年度)

トゥラキット・バンディット大学 アムナド・フダングシルブ

平成19～23年度累計予算額：90,155千円

(うち、平成23年度予算額：17,955千円)

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 都市域は気候変動シナリオの妥当性を検証するのに適している。都市域は地球の陸地の約2.2%にすぎないが、地球全体の一次エネルギー需要のおよそ3分の2を占め、国内総生産(GDP)の大部分を生み出し、エネルギーに関連したCO₂の約70%を排出している。これまでのボトムアップ方式によって都市エネルギーや炭素について調査した研究は、主として輸送・住宅・商業・工業・廃棄物などの個別分野に分割されている。このため、都市研究を統合し、都市域に関する更なる研究を可能にして研究成果を拡大することで、気候変動シナリオが検証できるような研究体制を構築することが重要である。都市域のトップダウン分析とボトムアップ方式の(場所に基づく)評価が一層必要であり、都市データベースの整備や統合が求められている。これらの背景を受けて、本サブテーマでは都市の社会経済・エネルギーおよびCO₂排出に関する新たなボトムアップ分析を行い、中国・タイ・インドならびに日本の都市域における気候変動シナリオの検証に役立てることを目指した。同時に、このプロジェクトを推進するために世界中の著名な学識経験者を含む国際的な研究ネットワークを構築し、国際的なモデル化フォーラムを立ち上げた。研究成果は、都市域やエネルギーおよび排出に関して、IPCCやグローバル・エネルギー評価(Global Energy Assessment)など、既存のグローバルな統合機関や国際評価にも貢献した。

【キーワード】 研究ネットワーク、都市域、シナリオ検証、炭素管理

1. はじめに

都市域は地球の陸地の約2.2%を占める。地球の総人口と都市域の人口は2005年には65億人と31億6千万人であったが、2030年までにそれぞれ82億人と49億人に増加すると予想されている。将来のグローバルな人口増加は殆ど全てが都市人口の増加によるものであり、このため、都市域は都

市人口や関連するインフラおよび経済などの社会的変動要因を通じて重要な役割を果たすと考えられる。予測によると、都市人口は2030年までに18億人増加し、2050年までに32億人増加する。

都市域は気候変動シナリオの妥当性を検証するのに適しているが、都市レベルで得られる情報は限られているのが現状である。本サブテーマでは、大都市および都市の発展について研究を行い、また、同時に国際的な研究ネットワークを構築・推進し、ケーススタディーを充実させ、様々な状況におけるシナリオの検証に役立つ情報の収集を可能にする。都市域は世界の一次エネルギー需要の約3分の2を占め、エネルギー関連のCO₂のおよそ70%を排出している。北京・東京・バンコクなどの大都市は、経済的・社会的な変動要因やエネルギーおよび炭素排出状況ならびにアジアにおけるその規模と発展のスピードを考慮すると、気候変動シナリオの検証を進めるのに十分な規模である。しかし、都市やシステムとしての都市域に関する知識は限られており、従来の研究は主としてセクター別に行われている。しかも、ボトムアップ型の都市エネルギーと炭素排出に関する研究は、輸送・住宅・商業・工業・廃棄物など、個別分野に分割されている。従って、都市域の研究を充実させて本研究の成果を拡大できるような研究体制を構築することが重要であり、本サブテーマでは、都市域の社会経済・エネルギーおよびCO₂排出を分析するとともに、国際的な研究ネットワークを構築して本プロジェクトの全体目標の達成を目指す。

2. 研究開発目的

本サブテーマの主な目的は以下の通りである。

- (1) 都市の社会経済・エネルギーおよび CO₂ 排出に関する新たなボトムアップ方式の検討を開始し、シナリオを検証する。
- (2) 著名な学者や研究機関が参加しているグローバル・カーボン・プロジェクトや世界中の科学プログラムと協力して国際的な研究ネットワークを構築し、都市域やエネルギーおよび CO₂ 排出に関して、IPCC やグローバル・エネルギー評価など既存のグローバルな統合機関や国際評価に貢献する。

本サブテーマにおける研究において以下の事柄を検討する。

- (1) エネルギー消費および CO₂ 排出量の評価と、CO₂ が発生するプロセスと関連する経路の相互依存性を分析する。研究対象とした主要都市は、中国・インドおよびタイの数都市である。
- (2) 世界中の 46 都市から排出される CO₂ を分析する。
- (3) 世界のメガシティのデータ収集を通じて都市炭素収支(urban carbon budget)の構築と歴史的データを含む都市共通の特徴をデータベース化する。
- (4) 都市の物理的な特徴と社会経済的な特徴および炭素排出量の関係を調べ、空間的な分析に基づく新しい方法論を開発することによって都市の炭素排出の地域的な影響を明らかにする。分析したのは、日本の中規模ならびに小規模の 50 都市である。

3. 研究開発方法

中国に関しては、第一に、直接および代理変数に基づく算定方法(Dhaka¹⁾参照)を使った2006年における中国全体の都市エネルギー消費と排出量の評価(これまでで初めて実施)、第二に、

北京・上海・天津および重慶の1985年から2006年までのエネルギーとCO₂の歴史的動向評価。これにはエネルギー統計・活動およびエミッション係数に基づくインベントリー法と算定法ならびに因数分解法(Dhaka¹⁾参照)による促進要素分析を用いた。そして第三に、シナリオに基づく技術経済的ボトムアップ方式システム・モデル(Li et al., 2010²⁾参照)により、上海環境科学アカデミーと共同で2025年までの上海のエネルギーと炭素プロファイルの将来シナリオ検討を行った。タイについては、LEAP(ストックホルム環境研究所が開発したLong Range Energy Alternate Planning Model)に基づくシナリオのモデル化を行い、社会経済学的データ・セクターごとの活動および技術データならびにバンコクの2つの行政地域の2050年までの主要な外因性変数を用いた。行政地域の一番目はバンコク都心部(BMA)、二番目は(BMAと隣接する5つの周辺地方を加えた)バンコク首都圏(BMR)である。同様に、バンコク以外のタイの5つの都市についても、GDPとエネルギー消費量に基づくトップダウン方式の統合法を用いてCO₂排出量を評価した。インドについては、インディラ・ガンディー開発研究所と共同で、都市の活動データと排出係数に基づいてセクターごとに都市エネルギーとCO₂を評価する方法を開発した。また、輸送・住宅および商業セクターのエネルギー消費とCO₂排出を評価して分析した。家庭のエネルギー消費パターンは都市部と田舎で異なっており、燃料の「清浄度」がそれぞれの炭素負荷を決定している。本サブテーマで開発されたモデルは、GDP・インフラおよび空間的なつながりの変数をインプットとするボトムアップ型のシステム・モデルである。

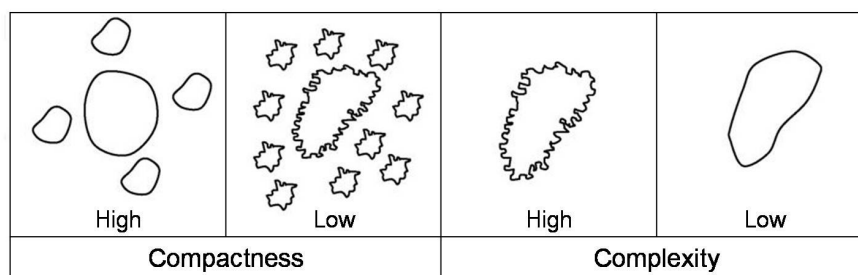
また、トロント大学、コロラド大学デンバー校およびマンチェスター大学の研究者たちと共に、様々な研究結果を調べて世界44都市の温室効果ガス排出量を分析した。温室効果ガスを都市域に帰着させる方法論を見直し、先進国と途上国を含む44の都市域に対して温室効果ガスの基準排出量を提示した。

本サブテーマは、世界の都市データを収集して都市炭素予算を構築し、歴史的データを含む都市の共通の特徴のデータベースを構築することをも目指している。データ収集の仕方はあまり体系立っておらず、ごく僅かな変数に集中した。また、入手可能な情報を吟味するにとどまり、それ以上の検討は行わなかったが、都市レベルでのデータ不足は依然として研究の主な障害であり、データ入手の努力は必要で、本サブテーマにおけるデータ収集は研究者たちから高く評価されるであろう。また、本サブテーマで構築された研究ネットワークは今後も活用されるであろう。データを調査・収集した都市は次の通りである：バンコク・東京・ソウル・リオデジャネイロ・サンパウロ・北京・上海・天津・重慶・ムンバイ・デリー・ニューヨークシティー・マイアミ・フィラデルフィア・サンフランシスコおよびシカゴ。データには、現在の基本的な人口統計・経済・エネルギーおよびインフラに関する情報が含まれる。このデータ収集経験は、系統的なデータベースを構築する上で役立つであろう。

日本の中規模および小規模の50都市における都市形態影響分析については、景観生態学で一般的に使われている景観指標という空間指標を定量的な基準として用い、都市形態の特徴づけを行った。また、様々な空間指標を調べて都市形態を特徴づける新たな方法を考案した。用いた指標は、都市における居住地の形と断片、都市居住地の密度・不規則性や粗さ、居住地の単一円状の集中度合い、および人口密度に関するものである。日本では、市町村レベルでのCO₂排出量を過去の研究から全国的に入手することができる。このデータを使って、セクター間の、つまり家庭・輸送および商業部門のCO₂排出量の間の関係を示す統計モデルと、日本の都市の都市形態を特徴づ

ける社会経済学のおよび空間的変数を提示した。本サブテーマで用いた手法には幾つかの段階がある。第1段階は、分析すべき都市を選ぶことである。社会経済的な特徴が類似した都市を選んで、人口規模・経済構造・収入および都市の位置が大きく異なるような都市形態を示す都市は除外した。第2段階は、都市の全体およびセクター別のCO₂排出量データを収集することである。第3段階は、リモートセンシング法を用いて都市域を衛星画像から区別して都市居住地の物理的特徴を考慮し、都市形態の空間的な指標を開発することである。第4段階は、都市形態指標を定量化し、CO₂排出量との相関関係を分析することである。この研究では、リモートセンシング画像-1999年、2000年、2001年および2002年の空間解像度30mで1、2、3、4、5、7の6種類の帯域のランドサット画像に基づいて都市域を区別した。

さらに、以前に開発した空間指標を吟味し、都市形態を表す新しい方法も提示した(図(3)-1)。新しい方法とは、都市中心から都市居住地への人口密度勾配(都市が中心地に中核を持つ傾向がある日本では有効)および人口密度を示すものである。コンパクト性指数(CI、表(3)-1参照)が大きいと、居住区の「形」に規則的な傾向があり、「居住地パッチ」の数が少ない。このように、CIが高いということは、分散度合いが低く、より規則的な都市居住地であることを示している。最大居住地分布のコンパクト性指数(CILP、表(3)-1参照)は、最大居住地の全体的な形状を表し、通常は都市中心部である。都市の複雑性は、居住区周辺の粗さで特徴付けられる。面積加重平均形状指数(AWMSI、表(3)-1参照)は、居住地が不規則な周辺形状であるか、あるいは都市居住地が複雑であることを示している。ここで、規則的な居住地形状は円形に近いことを表し、不規則な居住地形状は角ばっていたり内部領域が少ないことを示す。面積加重平均パッチフラクタル次元(AWMPFD、表(3)-1参照)は形状の凸凹を表し、その値は周辺が単純な場合は1に近づき、より複雑な周辺形状の場合は2に近づく。これらの都市形態指数は、Interactive Data Language (IDL)ソフトウェアで書かれたカスタムコードを使って計算した。



図(3)-1 空間指標の図解

表(3)-1 空間指標

指標	省略形	計算式
コンパクト性	コンパクト性指数	CI
		$CI = \frac{\sum_i P_i / p_i}{N^2} = \frac{\sum_i 2\pi\sqrt{a_i / \pi} / p_i}{N^2}$
	最大パッチのコンパクト性指数	CILP
		$CILP = \frac{2\pi\sqrt{a/\pi}}{p}$
複雑性	面積加重平均形状指数	AWMSI
		$AWMSI = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{0.25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$
	面積加重平均パッチフラクタル次元	AWMPFD
		$AWMPFD = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$

上記の式の説明は以下の通りである：

CI： a_i と p_i はパッチ i の面積と周長、 p_i は面積 a_i の円の周長で N はパッチの総数であるCILP：
 a と p は最大パッチの面積と周長であるAWMSI およびAWMPFD： p_{ij} はパッチ ij の周長、 a_{ij} はパッチ ij の面積 (i はパッチ種番、 j はパッチの数)

本研究で開発した指数は、都市中心から各1km円環領域内の都市域のパーセンテージに基づいている。円環領域、都市の境界で切り取られ、最も外側のは中心から15kmであった。各円環領域内の都市域のパーセンテージを計算した。都市域の減少率は、回帰直線の傾きの逆数(回帰係数とも呼ばれる)を用いて定量化した。この減少率は、都市居住地の単心性形態におけるコンパクト性(または広がり)の指標と考えられる。これは、都市が中心のビジネス街からどの程度遠くまで広がっているか、また都市中心からの様々な距離における密度を示している。この指標が大きいほど、都市はよりコンパクトで単心性が高く、値が小さいほど都市の広がりが大きい。この指標をバッファー・コンパクト性指数(BCI)と名付けた(式(3)-1)。

$$BCI = - \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{(式(3)-1)}$$

ここで x は円環領域半径、 y は円環領域内の都市域のパーセンテージである。

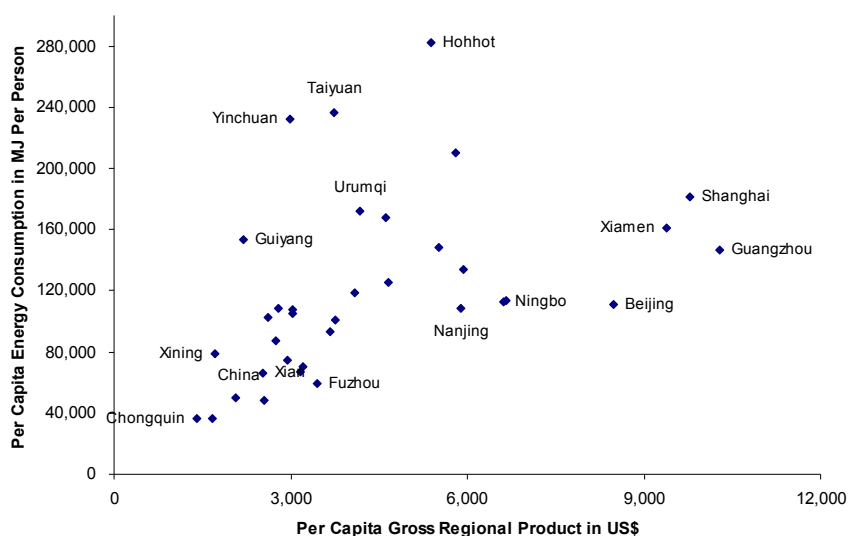
国際的な研究ネットワークを構築するために、このプロジェクトでは国際的な主要な研究者や研究機関と連絡を取り合い、一連のワークショップやシンポジウムを開催した。特に、グローバル・カーボン・プロジェクトの都市域炭素管理イニシャティブ (Urban and Regional Carbon Management Initiative) と緊密に協力した。アプローチは 次の通りである。

- (1) 科学的なネットワーク化のために一連のワークショップとシンポジウムを開催する。
- (2) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 5 次評価報告書 (AR5) のために必要となる知識を詳しく調べて貢献する。
- (3) 都市を中心にした幾つかの国際評価と統合のイニシャティブを支援して貢献する。
- (4) 主要な世界的研究イニシャティブに従事する。

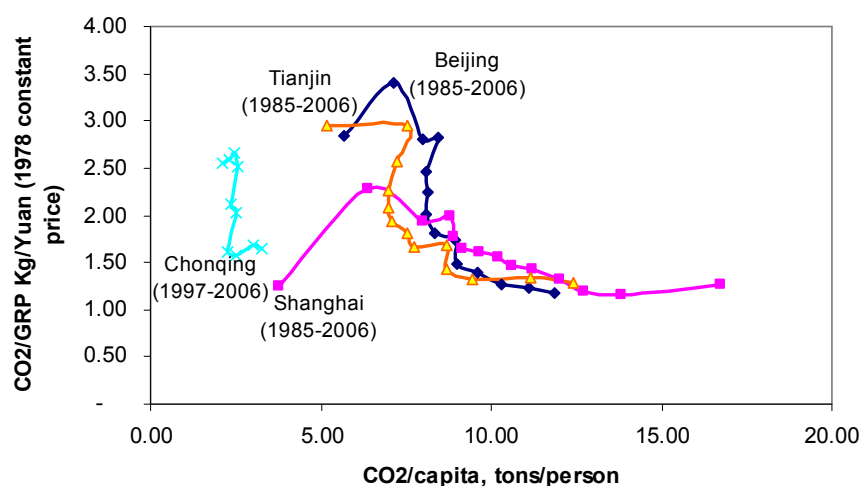
4. 結果及び考察

(1) 結果

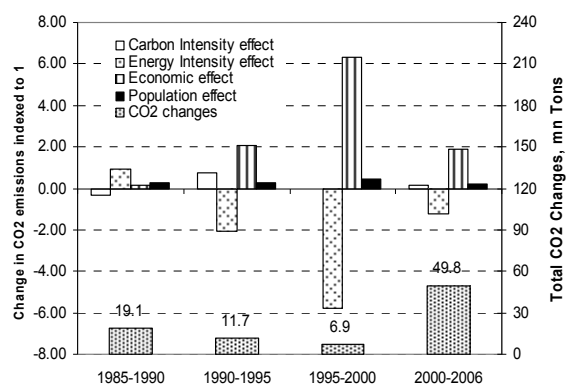
中国は世界のGDPの5%を占め、購買力平価では14.5% (WE0, 2007⁵⁾) である。同国の2005年の一次エネルギー需要は17億4200万石油換算トン (1,742 Mtoe) で、世界の一次エネルギー需要の15%であった。2005年に中国の都市化率は40%、都市人口は5億3100万人で、世界の都市人口の17%であった (UN, 2007⁶⁾)。国連の予測によると、中国の都市化は急速に進み、2030年には60%、都市人口は8億8000万人に達する。本サブテーマの調査では、中国のエネルギー消費には都市化が寄与しており、国のエネルギーおよび炭素プロファイルを決定する上で都市化が重要であることが示された。また、高度に都市化が進んで経済的にも最重要な35都市を評価分析して、中間スケールでのエネルギー消費とCO₂排出に関して都市域に内部的なダイナミクスがあることも示した。さらに、都市のエネルギー消費とCO₂排出に歴史的な変化があることも明らかにして、北京・上海・天津および重慶の詳細な分析によって中間スケールにおける都市域のエネルギー消費とCO₂排出の促進要因を例示した (図(3)-2、3、4)。この3段階分析、すなわち国レベル、中間レベルおよびミクロレベルでの分析によって、中国におけるエネルギー効率や気候変動の緩和などの主要政策がいかに重要であるかが明らかになった。



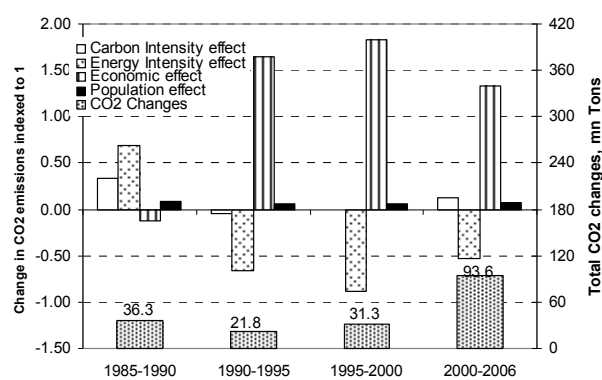
図(3)-2 中国の34都市における2006年の1人当たりの収入とエネルギー消費



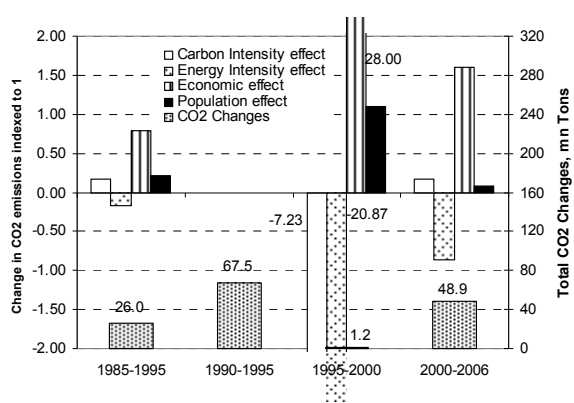
図(3)-3 一人あたりのCO₂排出量とGDPあたりのCO₂排出量の関係



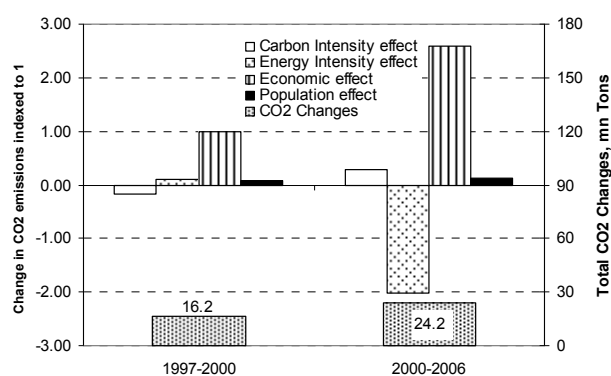
北京



上海



天津



重慶

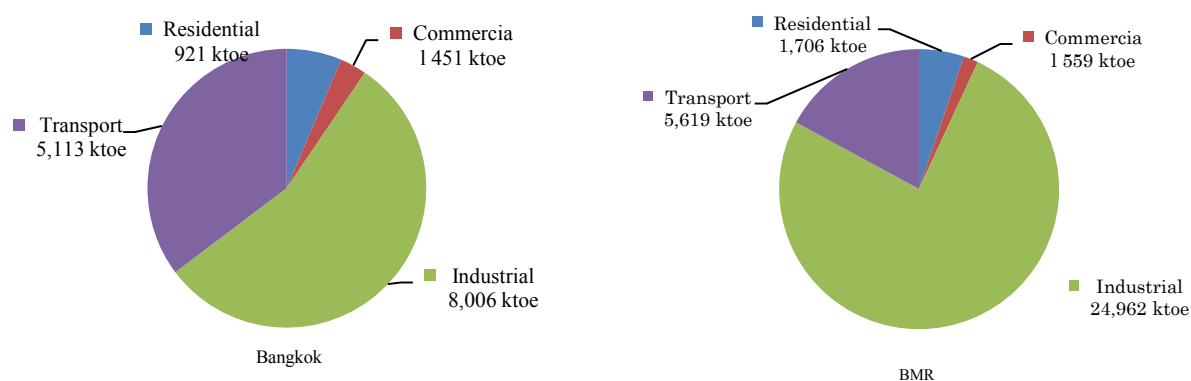
出典：Dhaka1, 2009¹⁾

図(3)-4 都市におけるCO₂排出の変化に寄与する要因

本サブテーマでは、2006年の中国全体の商業エネルギー消費とCO₂排出量の84%が都市によるものであると分析した。都市域の寄与率はこのように高く、都市と田舎の間の落差が大きくなった。1人当たりの商業エネルギー消費における都市と田舎の比率は6.8である。同様に、1人当たりの商業エネルギー消費における都市と国平均の比率は1.9である。バイオマス・廃棄物およびその他の再生可能などの非商業的エネルギー使用も考慮して、都市域が商業エネルギーだけを使用すると仮定すると、2006年における中国全体のエネルギー消費における都市部の寄与率は75%となる。高度に都市化の進んだ都市における1人当たりのエネルギー消費は上昇し、都市化の速度も速いので、今後数十年間に中国のエネルギー消費とCO₂排出がますます都市部によって決定されることは避けられない。従って、政府による包括的な国家戦略と指導が必要であり、都市開発とエネルギー効率を総合的に計画しなければならない。このことはとりわけ重要である。なぜなら、中国において個々の都市が主導する都市開発では、地域の社会経済的側面や環境面に配慮の足りないやり方が横行しており、エネルギー安定確保や気象変動の緩和に至っては殆ど考慮されていないからである。国家計画に述べられている地方の首都や都市を代表する中国の35都市について分析した結果によると、これらの都市が中国のエネルギーや経済活動に対して不釣り合いな影響を及ぼしていることが分かる。また、これらの高度に都市化が進んで経済的に重要な都市が、中国の人口のわずか18%しか占めていないにもかかわらず、2006年にはGDPの41%を占め、商業エネルギーの40%を消費し、CO₂排出の40%に達したことが示された。このことは、人口に占める大都市の割合は低いかもしれないが、大都市のエネルギー消費とCO₂の影響は途上国では不釣り合いなほどに大きいことを示している。この事実は、人口に占める割合は低いのに大都市が不当に注目されているという主張に対する反論でもある。本サブテーマでは、大都市が中国におけるエネルギー安定確保と気候変動緩和を改善するための主要なターゲットになり得ることを示した。これらの都市の間で、3段階のエネルギー経済の経緯を観察している。すなわち、高・低および中である。エネルギーを大量に消費する都市は主に中国の中央部と西部に位置しており、エネルギー消費型の産業を有していて、気候的にも寒冷的な地域である。エネルギー消費のより少ない都市は国の東部に位置している。これらの都市は海岸に近く、サービス産業が強く比較的温暖的な気候である。これは、エネルギー消費の多いこれらの地域が、よりすぐれた技術、更なる投資、および改善された都市エネルギーシステムおよびインフラに関して、大いに注目する価値があるという事実を強調している。中国の4つのメガシティ、すなわち北京・上海・天津および重慶を分析したところ、都市のエネルギー消費とCO₂排出に関して多くの興味深い事実が明らかになった。この分析は、エネルギー消費とCO₂排出が数倍に増加し、工業セクターが過去20年間に急速な経済成長に伴って最も増加が著しかったことを示している。また、中国の1人当たりの都市エネルギー消費が少ないことも示しているが、北京(11.9トン/登録者)、上海(16.7トン/登録者)および天津(12.4トン/登録者)などの主要都市では、CO₂排出量が東京(5.9トン/人、2003年)、大ロンドン(6.95トン/人、2003年)およびニューヨーク(7.1トン/人、2005年)などの先進諸国主要都市に比べて遥かに高い水準にあることも分かった。歴史的に、中国の都市エネルギーとCO₂排出に関しては、他にも大きな変化があった。第一に、工業セクターの割合が減少し、商業および輸送セクターが次第に上昇した。第二に、石炭(あるいは練炭やコークス)を直接燃焼させる割合が減り、電気や石油の割合が次第に増えている。第三に、クリーンな燃料、主として天然ガスの割合が上昇しているものの、クリーンな燃料への移行は多くの都市ではずっと遅れている。また、経済成長とエネルギー強度

(energy intensity)が、それぞれCO₂の排出を増加あるいは抑制する上で重要な役割を果たすことも示された。燃料シフトが果たす役割は名目上のものであるが、人口地理的な効果は上海や北京などの都市における排出増加に重要な役割を果たした。これらの大都市には登録されていない人口や浮動人口が多い。都市における1人当たりのCO₂排出量は長年の間に増加したが、経済活動の炭素強度(carbon intensity)はこの数10年間に劇的に増大した。残念ながら、この数年間にCO₂強度の改善は著しくスローダウンしたか、あるいは幾つかの都市ではマイナスになった。その理由は、第三セクターの伸びが弱まったことと、伝統的な石炭に基づく経済に依存しすぎたためである。

上海における気候変動シナリオの詳細な検討(Li et al., 2010²⁾)において、本サブテーマでは、上海における過去と現在のエネルギー消費およびCO₂排出を評価し、CO₂排出緩和のために計画されているエネルギー保存政策が将来的に採用された場合のメリットを評価した。1995年から2006年にかけて、上海ではエネルギー消費に伴うCO₂排出が急増し、1億9,000万トンから1億8,400万トンに膨れ上がった。エネルギー変換と工業からの排出が割合としては最大で、その次が輸送部門だった。2006年には、エネルギー変換・工業および輸送部門からのCO₂排出量は全体の排出量のそれぞれ43%、29%および18%であった。2006年の上海における1人当たりのCO₂排出量は世界平均(1人当たり4トン)および中国の国内平均(1人当たり3.65トン)より高かった。上海が行動を起こさなければ、2020年の上海のエネルギー需要は3億トン(炭素換算)に達する。2020年のエネルギー消費によるCO₂排出量は6億4,000万トンに増える。この増加はエネルギー安定確保・環境保護・CO₂緩和およびエネルギー保存にとって大変な負担となる。しかし、上海は既に計画と政策を実行に移しており、これらの計画は基本政策(BP)シナリオに反映されている。BPシナリオの下で、経済成長は緩やかになり、産業構造はさらに調整され、第三次産業が拡大されて、エネルギー消費の多いセクターは次第に消えて、近代的な製造業が開発され、エネルギー構造が最適化され、一次エネルギー源に使用される石炭の割合が減少し、天然ガスなどのクリーンエネルギーの割合が増える。その結果、エネルギー需要とCO₂排出量は何もしない場合のシナリオより低くなる。2020年に、BPシナリオにおける総エネルギー需要とCO₂排出量は、通常通りのシナリオ(Business-As-Usual: BAU)よりもそれぞれ48%および49%低くなる。このように、現在の政府の計画は、完全に実施されれば、上海におけるエネルギー需要の減少、空気の質の改善およびCO₂排出緩和に主要な役割を果たすであろう。これらの計画が完全に実施されない場合は、エネルギーとCO₂の削減量は少なくなる。本サブテーマのBPシナリオでは計画された政策だけが考慮され、可能性のある新しい政策は考慮されていない。しかし、現在計画されている計画がさらに強化されれば、上海から排出されるCO₂をさらに低減する可能性が増大する。例えば、再生可能エネルギーの割合を増やして2010年の0.5%という目標を上回ることができるであろう。第三次産業の割合を増して2020年に65%超にすることもできる。そしてエネルギー消費の多い産業の収束を加速することもできるであろう。

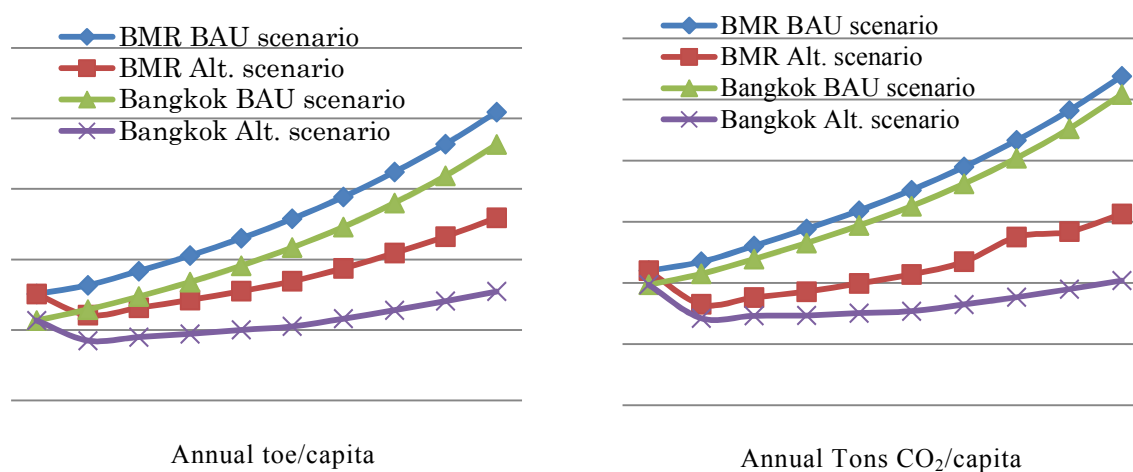


図(3)-5 2008年のバンコクとBMRにおけるセクター別の非集計エネルギー需要

バンコク(BMA)とバンコク首都圏(BMR)に対して、本サブテーマでは、トゥラキット・バンディット(Durakaji Pandit)大学と共同で排出を評価し、可能な将来エネルギー使用とエネルギー関連のCO₂排出対策を開拓する一連の政策介入を評価した(図(3)-5)。「もしこうなったら」という問いを基に異なる政策オプションを評価するために、4つのセクターにおいて2050年までのエネルギー需要とCO₂排出量を定量化した。4つのセクターとは、商業・工業・住宅および輸送部門である。タイでは、都市域における1人当たりのエネルギー消費は、都市域以外よりも大きい。バンコクやバンコク首都圏のような大都市や地域は、エネルギー需要が高いために国のCO₂排出に大きく寄与する。同様に、この研究では「スケール(規模)」の問題を強調し、解決のためには政治的境界よりも都市の集団化が重要であることを示している。エネルギー関連のCO₂排出量は2008年には6,152万トン(Mt-CO₂)と推定されるのに対し、BMRは118.8Mt-CO₂を排出する。主なCO₂排出源は、工業および輸送セクターである。発電の燃料ミックスも、CO₂排出の重要な要因である。BMRの全ての都市は国内の電力網から供給を受けており、天然ガスが大きな割合を占めている。1990年から2008年までの間、発電による平均CO₂排出量は0.63kg-CO₂/kWhであった。BMRにおける2005年の総CO₂排出量(生物起源以外)は107.66Mt-CO₂であり、バンコクのほぼ倍であった。これらの値は、表(3)-2に示したように2050年には386.14Mt-CO₂に増加する。本サブテーマでは、漸進的に実施できる24の対策を特定し(住宅セクターで7、商業セクターで7、工業セクターで4、輸送セクターで6)、実施した場合のA1tシナリオ(図(3)-6)でBMAとBMRにおけるCO₂低減効果を分析した(図(3)-6)。シナリオ分析の結果は、24の対策に関する全ての政策介入を同時に実施した場合、2010年、2020年、2030年、2040年および2050年のエネルギー節約のポテンシャルは、それぞれ9,085、14,645、22,294、30,946および43,149ktoeであることを示している。CO₂排出を避けた対応数値は、上記と同じ年にそれぞれ37.26、59.52、86.46、106.20および161.37Mt-CO₂である。この代替シナリオは、BMAとBMRにおけるエネルギー需要とCO₂排出をともにスローダウンする技術的な可能性を示している。

表(3)-2 BAUシナリオにおけるBMRのエネルギー消費とCO₂排出

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
エネルギー消費 (ktoe)						
バンコク/工業	7,326	8,493	11,414	15,340	20,616	27,706
バンコク/輸送	4,309	5,642	8,303	11,934	17,006	24,153
バンコク/住宅	788	983	1,287	1,505	1,724	1,942
バンコク/商業	432	464	537	609	680	759
5地方/工業	15,517	17,989	24,175	32,490	43,663	58,680
5地方/輸送	461	535	719	966	1,298	1,745
5地方/住宅	633	866	1,296	1,650	2,004	2,358
5地方/商業	104	111	127	143	159	178
合計	29,570	35,083	47,858	64,637	87,150	117,521
CO ₂ 排出量 (100 万トン)						
バンコク/工業	21.87	25.35	34.07	45.79	61.53	82.70
バンコク/輸送	26.74	30.96	40.10	52.01	68.62	92.16
バンコク/住宅	4.28	5.46	7.29	8.52	9.75	10.99
バンコク/商業	2.86	3.08	3.56	4.04	4.50	5.03
5地方/工業	46.31	53.69	72.16	96.97	130.33	175.15
5地方/輸送	1.47	1.71	2.29	3.08	4.14	5.57
5地方/住宅	3.44	4.81	7.33	9.34	11.34	13.35
5地方/商業	0.69	0.73	0.84	0.95	1.06	1.18
合計	107.66	125.79	167.64	220.70	291.27	386.13

図(3)-6 1人当たりのエネルギー（左図）とCO₂排出（右図）

インドに関する研究では、中国に比べて都市域の寄与が遥かに小さい可能性が示されている（インディラ・ガンディー開発研究所と共同）。国と都市レベルのデータに基づいて、幾つかの仮定をおいてスケーリング係数を設定することにより、都市域の輸送・住宅および商業のCO₂排出量を評価した（表(3)-3）。不確定性は評価する必要がある（情報が欠如している）ものの、インドにおける寄与を示す初期評価では、産業をどのように扱うかに応じて不確実性が変化する。もし全ての産業が都市域にあると仮定すると、予備的な評価では約46%という割合が示されている。しかし、

この分析では情報やデータが限られているので、将来的に改善が必要である。

表(3)-3 インドの総エネルギーとCO₂排出に対する都市の寄与(予備的分析)

2006						
セクター	総エネルギー消費 (百万石油換算トン)	都市の割合	地方の割合	総炭素 (百万トン, 炭素換算)	都市の割合	地方の割合
住宅セクター	174.384	38.529	135.855	89.724	35.302	54.197
輸送セクター	56.788	38.868	17.820	39.653	27.178	12.475
商業セクター	2.729	1.321	1.408	1.994	0.966	1.029
工業セクター	71.790	71.790	0.000	11.153	11.153	0.000
農業セクター	15.740	0.000	15.740	11.503	0.000	11.503
その他	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
合計	321.530	150.508	170.823	154.027	74.599	79.203
	%	46.81	53.13		48.43	51.42

中国・インドおよびタイにおける研究とは別に、トロント大学、デンバーのコロラド大学およびマンチェスター大学と共同で、世界44都市のCO₂排出をデータ収集して分析し、基準を提示した(Kennedy et al., 2011³⁾参照)。また、温室効果ガスを都市域に帰着させる方法論も分析した。さらに、全てが本質的にIPCC 指針の適合または単純化であり、世界資源研究所(WRI)/持続可能な開発のための世界経済人会議(WBCSD)のスコープ2と3の「クロスバウンダリー(超域)」排出を組み入れていることを確認した。以前の研究の分析により、方法論の違いがどこにあるかが示されている。都市で消費される材料・食品および燃料などに具体化されているスコープ3排出のいくつかは、ごく少数の研究でしか定量化されておらず、今後の研究に含めるべきである。また、以下の分野からの排出を含む場合と含まない場合について基準エミッションを提示した：工業プロセス；農業、林業およびその他の土地利用(AFOLU)、廃棄物および航空/海洋については不確実性が高い。。しばしば小さな違いはあるが、都市域に帰着できる温室効果ガスを定量化するための開かれたグローバルなプロトコルを提案する。表(3)-4に、ベンチマーキングの結果を示す。

表(3)-4 都市と首都圏の温室効果ガス排出量(単位は百万トン, CO₂換算)

照 (都市または首都圏 (定義は表(3)-1参照))	年	エネルギー (航空と海洋を除く)	航空	海洋	エネルギー	工業プロセス	農業・林業他(AFOLU)	廃棄物	(航空と海洋を除く) 合計	合計
アテネ	2005				35.72	4.38	0.45	1.02		41.57
バルセロナ	2006	3.68	2.67		6.35			0.39	4.07	6.74

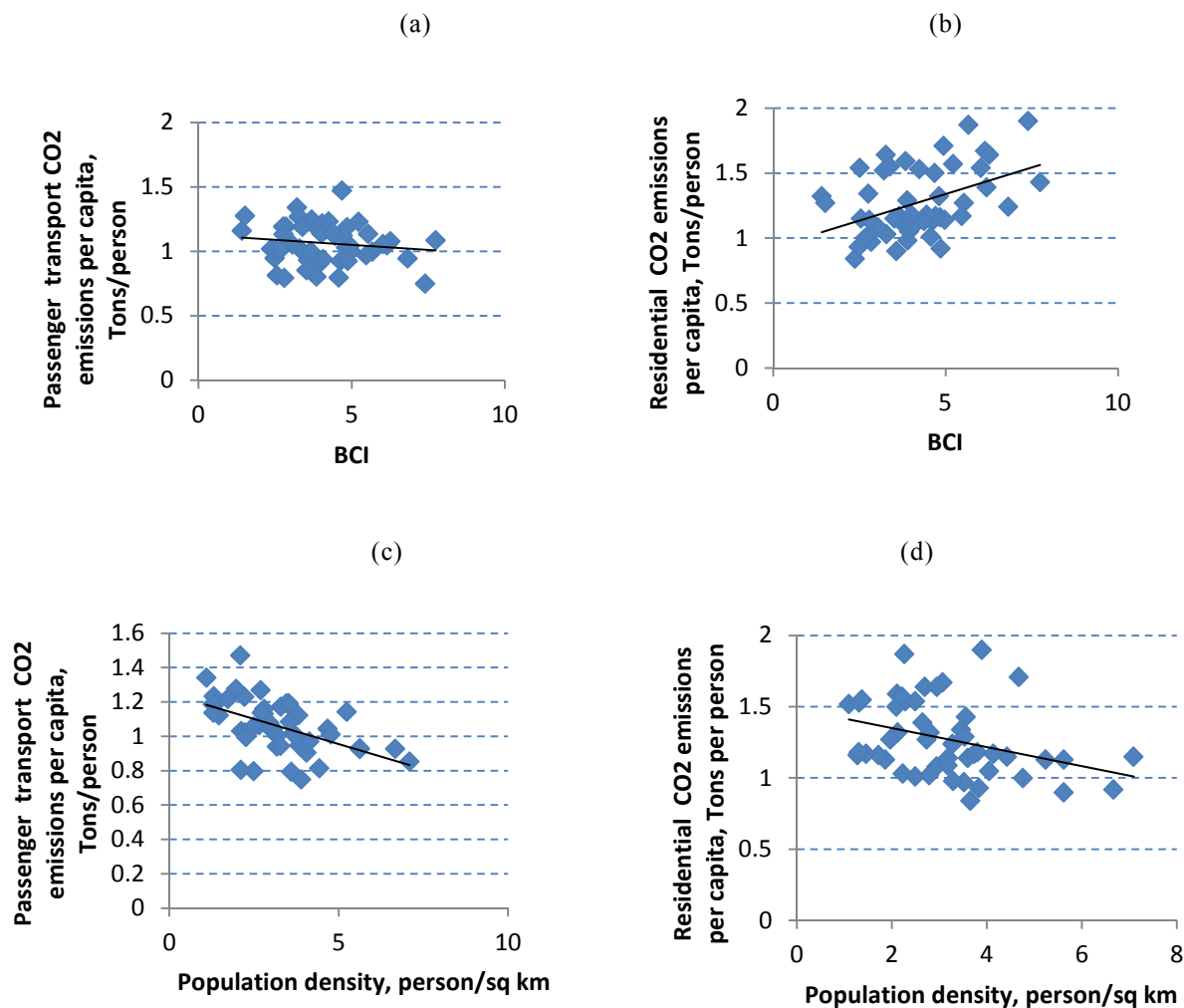
ボローニヤ	2005				8.93	0.07	0.72	0.25		9.97
ブリュッセル	2005				7.34	0.14	0.02	0.04		7.55
フランクフルト	2005				44.40	4.99	1.61	0.61		51.61
ジュネーブ	2005	2.45	0.74	0.00	3.19			0.16	2.61	3.35
グラスゴー	2004				13.77	0.25	0.72	0.56		15.30
ハンブルク	2005				33.96	2.82	4.46	0.28		41.52
ヘルシンキ	2005				6.70	0.17	0.03	0.04		6.94
ロンドン	2003	46.31	23.00	0.00	69.31	0.00	0.00	1.53	47.84	70.84
リュブリャナ	2005				4.31	0.07	0.19	0.20		4.77
マドリッド	2005				36.25	2.23	0.36	2.15		40.98
ナポリ	2005				10.66	0.87	0.49	0.46		12.49
オスロ	2005				3.35	0.11	0.06	0.11		3.63
パリ II	2005				47.01	3.53	6.91	2.20		59.64
ポルト	2005				11.14	0.07	0.38	0.56		12.14
プラハ	2005	9.33	1.06	0.00	10.39	0.51	0.00	0.13	9.97	11.03
ロッテルダム	2005				17.08	0.15	0.13	0.28		17.64
ストックホルム	2005				6.35	0.17	0.24	0.12		6.88
シュトゥットガルト	2005				40.89	0.36	0.87	0.43		42.57
トリノ	2005				17.60	2.51	1.47	0.28		21.86
ヴェネト	2005				39.55	3.29	3.28	1.18		47.29
オースティン	2005	10.37			10.37			0.11	10.48	
カルガリー	2003	15.94					-0.01	0.44	16.37	
デンバー	2005	10.11	0.86		10.97			0.11	10.22	11.08
ロサンゼルス	2000	83.36	17.83	16.10	117.29	2.10		4.65	90.11	124.04
ミネアポリス	2005	7.00			7.00			0.03	7.03	
ニューヨークシティー	2005	62.65	14.19	6.20	83.04			2.83	65.48	85.87

ポ ー ト ラ ンド	2005	8.37			8.37			0.10	8.47	
シアトル	2005	7.75			7.75			0.07	7.82	
トロント	2005	54.60	4.62	0.00	59.22	3.19		1.81	59.60	64.22
ワ シ ン ト ン DC	2000	10.31			10.31	0.01	-0.02	0.74		11.04
メ キ シ コ シティー	2000	31.68		0.00				3.59	35.27	
リ オ デ ジ ャネイロ	1998	5.78	0.86		6.64	0.24	0.27	4.96	11.25	12.11
サ ン パ ウ ロ	2000	9.57	0.94		10.51	0.01	0.00	3.70	13.28	14.22
バンコク	2005	42.61	10.85		53.46			6.98	49.59	60.44
北京	2006	146.9 3	7.15	0.00	154.0 9			4.92	151.8 5	159.0 0
デリー	2000	17.31						3.34	20.65	
コルカタ	2000	13.83						3.97	17.80	
上海	2006	197.0 7	8.55	5.00	210.6 2			1.36	198.4 3	211.9 8
天津	1998	116.4 3	0.41	1.23	118.0 8			1.17	117.6 0	119.2 5
ソウル	2006	42.03							42.03	
東京	2006	55.88			60.04	1.42		0.56	57.86	62.02
ケ ー プ タ ウン	2006	20.91	3.11	10.1 9	34.21			6.22	27.13	40.43

出典： Kennedy他，2011³⁾

本サブテーマの主要な作業の1つは、都市形態とCO₂の関係を評価することであった。本研究では都市形態を特徴付ける様々な方法論を調べて、低人口と中程度の人口の日本の50都市における衛星画像と社会経済的変数から導かれた空間指数で表される都市形態とCO₂排出の関係を調べた。都市形態を特徴付ける空間指数は、都市居住地のコンパクト性と複雑性に関するもので、都市居住地パッチの形状・密度・不規則性と凹凸の程度、および中心性または単一中心性の程度と都市の人口密度を考慮した。前に述べたように、このような分析のために新たな方法論的アプローチを開発した。その結果、CO₂排出と空間指標の間の相関が一般的に低いことが示された。ステップワイズ多重線形回帰分析の結果は、全てのセクターからのCO₂排出が幾つかの都市形態指数から予測されることを示している。住宅および乗客輸送(主に自動車)セクターからの1人当たりCO₂排出については、調整済決定係数の比較的高い値が観測される。その他のセクターに関しては、調整済決定係数の値は低く、BCI、CIおよびAWMPFDの変化で説明される、工業・商業および貨物輸送セクターからの1人当たりCO₂排出の変化パーセンテージが回帰モデルでは小さいことを意味している。都市形態がCO₂排出量に及ぼす影響が特に大きくなかったのは意外だが、幾つかの考えられる事実から説明できそうである。例えば、商業部門は常に都市の中心部に集中していること、商業部門の

活動規模が小さいこと等の事実である。分析では、都市居住地形状の規則性が高く都市居住地在コンパクトであれば(CIで表現される)、住宅のCO₂排出が低くなることを示しているが、都市の複雑性が住宅CO₂排出に及ぼす影響は無視できる。これに対して、分析では、BCIが高いと住宅セクターからの1人当たりCO₂排出が高くなることが示されており、単一中心円で密度の高い居住地の都市では1人当たりの住宅CO₂排出が高くなる可能性を示唆している。乗客輸送セクターからのCO₂排出については、本サブテーマの分析は、都市居住地の形状が規則的で居住密度が高いと1人当たりの排出が低いという一般的な見解を支持している。分析においては、単に人口密度を平均して都市形態を表すやり方とCIやBCIなどからの都市形態を空間的に決定することとの間に重要な区別を行っている。平均人口密度は、与えられた面積において高い人口集中が行き渡っていることを示すだけであり、輸送や住宅のCO₂排出にとって重要な居住パターンを考慮できない。分析の結果、人口密度が高いほうが一般的に排出低減には良いかもしれないが、都市内部の居住地を空間的にうまく構成して人口を配分すればCO₂に大きな影響があることが示された。前に述べたように、また、図(3)-7で強調されるように、密度が高すぎて単一円状に居住地が配置されていると、住宅からの排出が増加する可能性がある。



図(3)-7 BCIと人口密度によるセクターの1人当たりCO₂排出の散布図

表(3)-5 ステップワイズ多重線形回帰分析係数(N=50)

	係数	標準誤差	t 値	Pr(> t)	調整済決定係数
工業 CO ₂					0.1688
平均温度	0.05132	0.03083	1.665	0.102631	
AWMPFD	-6.5093	2.07711	-3.134	0.00297	**
商業 CO ₂					0.0410
CI	158.267	100.005	1.583	0.1202	
AWMPFD	-2.839	1.717	-1.654	0.1048	
住宅 CO ₂					0.6023
収入	-3.72E-04	1.36E-04	-2.728	0.00906	**
人口	6.29E-07	2.85E-07	2.204	0.03268	*
平均温度	-6.23E-02	9.76E-03	-6.383	8.42E-08	***
BCI	3.55E-02	2.33E-02	1.526	0.13393	
輸送 CO ₂					0.1838
CI	119.5697	72.2533	1.655	0.104615	
都市	1.0118	0.2804	3.608	0.000746	***
乗用車 CO ₂					0.4381
収入	1.99E-04	9.90E-05	2.006	0.05099	
人口	3.26E-07	2.01E-07	1.62	0.11247	
平均温度	-2.53E-02	7.00E-03	-3.619	0.00076	***
BCI	-5.11E-02	1.63E-02	-3.14	0.00302	**
都市	4.48E-01	1.04E-01	4.307	9.14E-05	***
貨物輸送 CO ₂					0.0505
CI	119.281	75.8287	1.573	0.12242	
都市	0.6016	0.2943	2.044	0.046578	*

***相関は0.001水準で有意(両側検定)

**相関は0.01水準で有意(両側検定)

*相関は0.05水準で有意(両側検定)

(2) 考察

都市域は気候変動シナリオの妥当性を検証するのに適している。しかし、都市のレベルで入手できる情報は限られている。本サブテーマでは、大都市と都市の発展について研究を行った。また、同時に研究ネットワークの構築も行い、より多くのケーススタディーと情報入手を可能にして広範囲のシナリオ検証の支援を目指した。

都市域は地球の陸地の約2.2%にすぎない。地球の総人口と都市域の人口は2005年には65億人と31億6千万人であったが、2030年までにそれぞれ82億人と49億人に増加すると予想されている。都市域は都市人口や関連するインフラおよび経済などの社会的変動要因を通じて炭素に関する議論で重要な役割を果たす。なぜなら、将来のグローバルな人口増加は殆ど全てが都市人口の増加によるものだからである。予測によると、都市人口は2030年までに18億人増加し、2050年までに32億人増加する。さらに、この都市人口増加の大部分は途上国で発生し、途上国では1人当たりの都

市エネルギー使用が収入の増加に伴って今後急激に増えると予想されるが、炭素排出の少ない燃料はゆっくりとしか普及しない。その結果、CO₂排出の影響が重大である。都市や炭素の問題に関しては、都市域における温室効果ガス(GHG)はこれまでの数十年に僅かしか研究されておらず、それも欧米におけるものに限られる。以前は気候変動に取り組んだ都市当局は僅かで、科学者たちも十分に知識を要求されなかったが、この5年間に、研究機関や政策機関は都市の温室効果ガスを重視するようになってきている。影響分析との関連で、トップダウン型のモデルによるダウンスケールの必要性も重視されるようになった。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、第5次評価報告書に向けてより積極的に都市の炭素緩和を検討する必要性を指摘しており、従って人間の居住と炭素緩和に関する新たな章(12章)が第3作業部会報告書に追加された。本サブテーマは、このIPCCの新しい方向を直接に学術的に支援するものである。同様に、都市の当局にとっても、長期的な都市炭素シナリオを開発して都市の発展の可能性を確認するためにも、より多くの科学的インプットが必要とされている現状から、本サブテーマによる成果は、シナリオ検証の必要性を超えて有用であると言える。

国際エネルギー機関(IEA)都市エネルギーモデルグループ(本サブテーマリーダーのDhakalも参加している)の最近の推定によると、都市域が2006年に世界の一次エネルギーおよび世界のエネルギー関連CO₂排出のそれぞれ67%と71%を占めている。都市域は、2030年までにCO₂排出の76%を占めるようになると予想されている。これは、2006年の19.8Gt CO₂という水準から正味11Gt CO₂増加するということである。これは、同時期の世界の総CO₂増加(12.6Gt CO₂)の87%である。同時期における都市部CO₂排出の増加分の89%は、経済協力開発機構(OECD)諸国に比べて1人当たりのCO₂排出量が遥かに少ないにもかかわらず、非OECD諸国の都市化によるものである。OECDの諸都市は2006年に世界の都市の排出の50%強を占めていたが、2030年までに33%に減少すると思われる。地域別には、中国・米国および欧州について実施された研究によって、2006年のエネルギー関連CO₂排出で見た場合に、都市がそれぞれ85%、80%および69%の寄与率であることが示されている。中国では、都市域が国内一次エネルギー需要の75%、そして国内商業エネルギー需要の85%を占めている(Dhakal, 2009¹⁾)。これらの研究は、都市人口および都市の範囲の定義に注意することが重要であることを示している。使用する定義に応じて、都市エネルギーと炭素評価結果は大きく異なる。IEAによる評価は、原理的には国連(UN)による都市人口の評価に対応している。しかし、国連自体が国によって大きく異なる各国の定義を受け入れていることに注意しなければならない。228カ国の間で、都市人口を割り当てる判定基準は大きく異なっている。83カ国は行政上の境界を使用しており、57カ国は人口の規模、1カ国は経済的な判定基準、4カ国は都市の特徴、そして48カ国はこれらの組み合わせを採用している。しかし、6カ国は国全体の人口を使用し、3カ国は国全体の人口がなく、25カ国は定義がなく、また1カ国は明確な定語を持たない(国連人口統計部の都市人口課に問い合わせた結果)。例えば、インドは住民5,000人未満の居住地を田舎の村と分類しているのに対して、エジプトは20,000人未満の居住地サイズを定義していない。スウェーデンは住民数が200人を超える居住地を都市と呼んでいる。他の研究では、グローバルに統合した形で国連による都市人口が、(多くのパラメータに基づいた)共通の標準的な定義を使った他の評価と類似していることを示しているが、地域と国の数字の間には大きな開きがある。ここで理解すべき重要な点は、都市の定義の閾値が低いと、世界の都市化レベルを、従って都市エネルギーと都市炭素の評価も大きく変動させる可能性があるということである。国別に見ると、米国は直接

の最終エネルギーの76%が「国勢調査の都市域」で消費され、59%が「都市化された地域」で、また17%が「都市クラスター」において消費されている(Parshall et al., 2010⁴⁾)。さらに、Parshall et al. (2010)⁴⁾とIEA評価(WE0, 2008⁷⁾)における米国の一次エネルギー需要に占める都市の割合は約4%程度(80%対76%)の差があり、電力のCO₂排出がどこに起因するかを考えている。すなわち、発電ポイントあるいは消費ポイントで見ている。エネルギーとCO₂の評価は、エネルギーの算定方法と温室効果ガス割り当ての原理によっても異なる。実際のグローバルな都市の寄与はもっと低いという議論もある。その理由は、都市域は他の地域の需要を満たすための生産ハブにすぎず、電力は都市域の外から供給され、都市域は通過交通(through-traffic)と通貨サービス(through-services)を提供しているというものである。

CO₂以外の温室効果ガスについては、都市域の寄与は依然として未知である。ある研究では、都市のCH₄排出がグローバルな人為起源のCH₄排出の7-15%を占めていると推定している。しかし、これはグローバルにCO₂とCH₄の間に類似の相関があると仮定して南カルフォルニアで行われた分析結果を地球に拡張したに過ぎない。それでも、都市域の温室効果ガス算定が完全ではないものの、都市のグローバルな温室効果ガス寄与率はエネルギー関連CO₂の場合の71%より遥かに低いといえよう。2000年から2009年までのエネルギー関連CO₂排出の割合はグローバルで平均88%である。残りの12%は都市域の寄与が少ないと思われる土地利用の変化によるものである。正確さとは程遠いが、本サブテーマではCH₄排出に占める都市の割合がより低いことを示している。繰り返すが、このような考察は、都市域のシステム境界線をどこにおくかによって異なる。例えば、温室効果ガスが生産側ではなく消費側に帰着されるならば、都市の寄与は遥かに大きくなるであろう。以前に議論した数字は、実質的に生産に基づくアプローチである。残念ながら、都市に関して消費ベースの研究は存在せず、民族国家に対してしか実施されていない。

都市のレベルでは、温室効果ガス排出の評価の大部分を行政上の境界について入手できる。これは、都市政府が作成した気候変動行動計画と研究文献の多くに当てはまる。これらの文献は、様々な程度で温室効果ガス発生源を取り扱っている。エネルギー使用によるCO₂だけを扱っている場合もあれば、CO₂以外の温室効果ガスを扱っている文献もある。都市集団(urban agglomeration)に対するCO₂評価は殆ど入手できないが、若干の文献では都市集団とCO₂の様子を高解像度のグローバルおよび地域化石燃料排出マップで示している。ブルッキングズ研究所(Brookings Institute)の最近の研究では、米国の100の大都市において輸送および住宅セクターのCO₂排出を評価してランク付けしている。本サブテーマの研究では、中国において、国の人口の18%を占める(中国国家計画で言及されている)35の最大級の主要都市が、国のエネルギー関連CO₂排出の40%であることを示した。米国では、国の輸送および住宅セクターの炭素排出の20%が10の大都市圏からのものである。タイでは、国の人口の9%を占めるバンコク市が2005年にはエネルギー消費に起因するCO₂排出の26%であった。東京は日本の人口の10%を占めているが、国の総温室効果ガスの4%しか排出しておらず、化石燃料燃焼による温室効果ガス排出の4.7%であった。既存の文献からは、大都市の役割は重要と思われ、人口に比べて排出の割合が不釣り合いに高い途上国では特に重要と考えられる。既存の研究では、都市の間で全体の排出と1人当たりの排出の規模が大きく異なることが指摘されている。(本サブテーマで扱っている)44都市の比較によると、このような違いは排出源の性質、都市経済の構造(製造業とサービス業のバランス)、地域の気候と地理、経済発展の段階、燃料ミックス、公共輸送の状況などに起因している。米国では、輸送及び住宅セクターについて

のみだが、2005年に100の大都市域で調べたところ、1人当たりの炭素排出はレキシントン(3.5トン)が最も高く、ホノルル(1.4トン)で最も低かった。大都市は上記の理由から、通常の途上国と先進国の実例と異なるようにも見える。このように、北京・上海・天津およびバンコクなどの途上国の都市における1人当たりのCO₂排出量は、東京・ニューヨークシティーおよび大ロンドンよりも高い。その結果、判定基準を作成してグローバルに都市間の温室効果ガスや温室効果ガス対策を比較するのは困難であることが多い。

都市ベースの研究では、温室効果ガスを計算するために多くの方法とデータを使用している。これには、販売データの組み合わせ(石油や電力など)、活動レベルの評価(平均活動レベルを調べるためのトリップ調査や家計調査)、地域情報から国情情報への展開、およびモデル化などが含まれる。航空・海洋・道路輸送の扱い方や都市の境界を越えて相互に影響しあうセクターが都市ごとに異なるために、複雑さが一層増している。方法論的に、既存の研究は互いに異なっており、(a) 測定したガス、(b) 対象にした排出源、(c) セクターの定義、(d) 測定の範囲、(e) 地球温暖化の可能性、および(f) IPCC インベントリー法に関して一貫性が見られない。しかし、IPCCの地域算定原理と対照的に、都市行動計画や研究文献では電力関連のCO₂排出を都市の炭素評価に割り当てている。最近の国際会議やワークショップでは、都市の温室効果ガス算定の範囲、プロトコルおよび方法を標準化する必要性が認められた。

本サブテーマでは、都市域の定義/システム境界は複雑な問題と見ており、(a)都市と都市でないことの違い、(b) どの活動に起因するCO₂排出が、消費ベースの帰属を含めて、都市域に帰着されるか、(c) 都市の行政上の境界と都市集団の対比を含む都市と都市域の区別に関する問題が、個別の都市を含む全てのレベルで常に見られる。さらに、都市の炭素排出に関するボトムアップ型の研究の多くは、都市の行政上の境界について提供されている。しかし、都市の行政上の境界は、より大きな都市集団の部分集合であることが多く、都市システムの小さな一部分だけを考えると都市の炭素排出について偏った見方になってしまう。例えば、バンコク市の場合、本サブテーマでは、産業が都市集団の外層にあり、中心のCBD(都市のビジネス地区)の経済構造、1人当たりの排出およびセクターごとの寄与が都市集団全体とは大きく異なっていることを示した。この都市集団は、バンコク都心部(行政上の境界)だけでなく周辺の5つの地方にまたがっているのである。都市の炭素排出研究におけるもう1つの重要なポイントは、統合したCO₂排出評価と複数のスケールにおける分析を重視することである。このような研究は、都市開発の流れと炭素排出に関する影響を特徴付けるのには役立つが、該当するケーススタディは、都市の取り扱いの程度という点では依然として限られている。これらの研究は重要かつ必要であり大きなサンプルサイズの必要性が増しているが、検討の範囲がますます不十分になっており、実質的に統合研究であるが、空間明示がなされておらず、都市内の高解像度CO₂マップ開発が重要な課題となっている。このようなマップにより、「大」都市におけるエミッションのホットスポットを明確に見られるようになり、様々な政策を支援する可能性を示すことができる。たとえば、東京の商業セクターにおけるCO₂緩和のためのキャップアンドトレードシステム、都市エネルギーシステムにおいて分散したエネルギー源を統合して最適化を進めること(エネルギー需要密度)、市町村機能単位(区など)の温室効果ガス緩和努力、および市町村行政/政体を含む都市集団全体における対話を開始して温室効果ガスを最適化することなどである。これまで、トップダウン型でグローバルにサンプルしたCO₂データを局部(都市域)に適用するのは現実的に難しかったので、ボトムアップ型のCO₂

マップを作成する必要がある。グローバルな規模では、最近、エネルギーとその利用(都市に限定しない)について、きめの細かいCO₂マップ改善の必要性が議論された。このためには、少数のケーススタディーではあまり役に立たず、限られたケーススタディーの規模を広げてグローバルなCO₂に反映させることはできない。しかし、ボトムアップの研究は、きめの細かい解像度でトップダウンのCO₂マップをスケールダウンする精度を向上させるキャリブレーション手段として有用である。同時に、もし、(a) より多くの都市CO₂サンプルが特に(行政上の境界に加えて)都市集団レベルで入手できれば、(b) 比較可能/標準化された都市炭素インベントリーが作成できれば、(c) 様々な都市トポロジーに対してスケールによらない少数のCO₂規則が作成できれば、きめの細かいCO₂マップを作成する上で大きな補足手段となるであろう。例えば、都市集団の順位規模分布およびCO₂パターンは、より多くのサンプルが入手できれば役立つであろう。

現在利用できるグローバルマップをファイングリッドレベルにダウンスケールしたCO₂の精度は、地域に使用するには問題がある。これらのマップは、衛星画像による夜間光強度・ポイントソースデータ・点光源データおよびその他のグローバルなデータベースを使用している。光の密度分布はエネルギーの指標として優れているとはいえない。なぜなら、センサーが高い強度レベルでは飽和し、同時に、光が少ない代わりにエネルギーは使用されている途上国のエネルギー使用を過小評価するからである。点光源については、発電所データが比較的優れているが、産業などの点光源データは不適當である。さらに、燃料ミックスにおける(同じ国の中の)地域差は、これらのダウンスケーリングでは過小評価されていることが多い。しかも、トップダウン型の評価は、地域の政策実施にはあまりにグリッドが粗すぎ、国と地域のパラメータの一般化やスケールが行われすぎている。人口密度や都市の範囲だけを拡大縮小するのは、代替指標として細かい解像度でCO₂を調べるには信頼性が低い。収入・ライフスタイル・エネルギーミックス・気候・インフラなどの都市間の特徴がCO₂に大きく影響する。トップダウン型の評価はブラックボックスのスナップショットを提供するだけであり、CO₂のセクター別構造・燃料ミックス・都市内および都市間の特徴・主要な促進要因などの、地域で必要な内部的なダイナミックスを記述することができない。トップダウン型が(電力や熱を生産地点に割り当てる)属地主義原理(territorial-principle)による算定を行っているのに対し、都市の炭素政策は電力に関連するCO₂を電力使用ポイントで算定する傾向がある。従って、都市域からのトップダウン分析と(場所に基づく)ボトムアップ評価がさらに必要で、よりすぐれた都市データベース、コミュニケーションおよび統合が求められている。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

都市形態とCO₂排出量またはエネルギー利用の関係の分析は、新しい方法を開発する研究であり、日本の国内外でのケーススタディー件数をさらに増やして精度を高めることによって、都市形態-CO₂排出量の関連の測定において広範な応用が可能となった。

(2) 環境政策への貢献

研究結果と研究ネットワークの構築は、この分野における知識水準をさらに押し広げた。本サブテーマで開発した評価や分析のアプローチや手段は、政策介入の検討に貢献し得る。

例えば、日本における都市形態とCO₂排出に関する研究は、中小規模の都市向けの政策を開発するための政治的議論に役立つ。というのも、このような努力が国、県および都市レベルで進行中だからである。研究の結果によると、収入が高く、人口が少なく、都市の密度が低い方が低CO₂排出にとって望ましい。都市形態が商業・工業および貨物輸送のCO₂排出には関連がなく、輸送及び住宅のCO₂排出に僅かしか関連していないという事実は、都市形態と全体のCO₂排出との関係が複雑であり、より詳細な吟味に値することを示しており、意思決定機関に対する明確なメッセージである。これらの結果はまた、都市形態の改善に向けた都市政策が中小都市の人口増加問題で考える必要があることを示しており、居住地の空間的な構成の改善を真剣に考慮して理解する必要がある、様々な居住地パターンの影響と様々なセクターの間のバランスを取ることが前提となる(例えば、本サブテーマは、密度が高すぎる居住区では1人当たりの住宅CO₂排出量を増加させる可能性があることを示した)。しかし、本論文の知見の一般化は慎重に行う必要があり、他の状況では当てはまらない可能性もある。同時に、他の多くの空間的な並びに非空間的な要因がより大きな影響を与えることもあり得る。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマの重要な点の1つは、国際研究ネットワークを構築して国際協力を促進することである。都市分析をめぐって暫定的に「都市エネルギーと炭素のモデル化フォーラム(Urban energy and carbon modeling forum)」と呼ばれる国際研究ネットワークを構築し、定評ある国際機関と協力して多くのワークショップやシンポジウムを開催し、世界中の関係者たちの参加を得て、本分野における検討を促進した。これらの活動には100名を超える研究者たちが参加し、都市の研究に関する学術誌に3つの特集を掲載するなどの共同成果や国際評価への貢献を果たした。本サブテーマで開発されたネットワークによって可能となった3つの雑誌の特集号は以下の通りである。

- (1) Ramaswami, A. and Dhakal S., eds. (2011): Pathways toward Low-carbon Cities: a US-China Focus. Carbon Management Journal, 2(4).
- (2) Dhakal, S. and Shrestha M., eds. (2010): Carbon Emissions and Carbon Management in Cities. Energy Policy Journal, 38(9)
- (3) Sustainable Urban System に関する特集号. Journal of Industrial Ecology (準備中)

さらに、本プロジェクトでは以下の国際ネットワークとも緊密に協力した。

- (1) グローバル・カーボン・プロジェクトの都市と地域における炭素管理(URCM)イニシアティブ(2007年-2011年)
- (2) 都市気候変動研究ネットワーク(UCCRN)、コロンビア大学およびニューヨーク私立大学(2008年-2011年)
- (3) グローバル・エネルギー評価の都市アセスメント(2008年-2011年)
- (4) 国際エネルギー機関の都市国際エネルギー・モデル化グループ(2007-2008年)
- (5) 世界銀行都市および気候変動活動(2011年)

さらに特筆すべきは、本サブテーマの成果と活動が、IPCC AR5 第12章の新しい章「人間居住・インフラおよび空間計画」のための知識、議論の基礎、および科学的インプットの必要性和一致していたことである。本サブテーマは、この分野におけるIPCCの活動を間接的に支援して、IPCC

の評価プロセスへより多くの研究成果を提供する協力をしてきた。しかし、IPCCは独立したプロセスである。都市の炭素排出の空間的な理解が重要な見方である。国際応用システム分析研究所 (IIASA) とともに2011年3月10日-11日に都市炭素のモデル化に関する方法論的側面に関するワークショップを開催し、この章に関連するテーマに携わっている研究者たちのネットワーク構築を目指し、可能な範囲においてIPCCプロセスへのインプットを提供するように努めた。さらに、カルカッタのIPCC専門家部会ならびに既にIPCCの専門家である本プロジェクトのメンバーたちとも協力し合った。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

< 論文 (査読あり) >

- 1) Dhakal, S. (2009): Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy*, 37(11), 4208-4219.

< 査読付論文に準ずる成果発表 > (「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可。)
なし

< その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) Dhakal, S. (2007): Climate change and cities: the making of a climate friendly future. *Urban Energy Transition*, 173-182.
- 2) Yedla, S. and S. Dhakal (2007): Transportation and environment in developing countries. *International Journal of Environment and Pollution*, 30, 1, 1-7.
- 3) Coulter, L., P. Canadell and S. Dhakal (2007): Carbon reductions and offsets. *Earth System Science Prtnership(ESSP) Report no.5*, 33.
- 4) Dhakal, S. and M. Betsill (2007): Challenges of urban and regional carbon management and the scientific response. *Local Environment*, 12, 5, 549-555.
- 5) Dhakal, S. (2008): Climate change and cities: the making of a climate friendly future. *Urban Energy Transition*, 173-182.
- 6) Dhakal, S. and A. Raut (2008): Towards a low-carbon society and its relevance to mountainous regions. *Asia Pacific Mountain Network (APMN) Bulletin*, 9, 1, 1-4.
- 7) Dhakal, S. (2008): Urban energy use and carbon emissions in China. *CGER Newsletter*, 19, 9, 17.
- 8) Dhakal, S. (2008): Creating an urban movement for sustainable living. *Global Asia*, 3, 3, 16-20.
- 9) Dhakal, S. (2008): Energy use in cities. *World Energy Outlook 2008*, 179-193.
- 10) Raut, A. and S. Dhakal (2008): Cities must now lead the climate change agenda: COP13 side event on carbon management in Cities. *CGER Newsletter*, 19, 1, 15.
- 11) Raut, A., S. Dhakal and Y. Makido (2008): International symposium on urban energy and carbon management: challenges for science and policy and international workshop on

urban energy and carbon modeling urban energy and climate modeling forum formed. CGER Newsletter, 19, 2, 2-4.

- 12) Dhakal, S., et al. (2009): Commissioned paper by the World Bank for the urban research symposium on cities and climate change. Marseille, 28-30 June 2009 – Greenhouse Gas Emission Baselines for Global Cities and Metropolitan Regions.
- 13) Dhakal, S., et al. (2009): CCICED policy research report 2009 – energy efficiency and urban development.
- 14) Dhakal, S., et al. (2009): Global environmental changes in South Asia: a regional perspective.
- 15) Li, L., C. Chen, S. Xie, C. Huang, Z. Cheng, H. Wang, H. Huang, J. Lu and S. Dhakal (2009): Energy demand and carbon emissions under different development scenarios for Shanghai, China. *Energy Policy*, 38(9), 4797-4807.
- 16) Christopher, K., A. Ramaswami, S. Carney and S. Dhakal (2009): Greenhouse gas emission baselines for global cities and metropolitan regions. Urban Research Symposium on Cities and Climate Change, Marseille, 28-30 June 2009
- 17) Dhakal, S. and M. Shrestha, eds. (2010): Carbon emissions and carbon management in cities. *Energy Policy Journal*, 38(9), 143p.
- 18) Dhakal, S. (2010): GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(4), 277-283.
- 19) Ramaswami, A. and S. Dhakal (2011): Low carbon policies in the USA and China: why cities play a critical role. *Carbon Management*, 2(4), 359-352.
- 20) Grubler, A., X. Bai, T. Buettner, S. Dhakal, D.J. Fisk, T. Ichinose, J. Keirstead, G. Sammer, D. Satterthwaite, N.B. Schulz, N. Shah, J. Steinberger and H. Weisz (2011): Urban energy systems. Gomez-Echeverri, L., T.B. Johansson, N. Nakicenovic and A. Patwardhan, eds., *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*.
- 21) Hammer, S.A., J. Keirstead, S. Dhakal, J. Mitchell, M. Colley, R. Connell, R. Gonzalez, M. Herve-Mignucci, L. Parshall, N. Schulz and M. Hyams (2011): Climate change and urban energy systems. Rosenzweig, C., W.D. Solecki, S.A. Hammer and S. Mehrotra, eds., *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, 83-109.
- 22) Zusman, E., A. Shrinivasan and S. Dhakal, eds. (2011): Low carbon transport in Asia: strategies for optimizing co-benefits.
- 23) Ramaswami, A. and S. Dhakal (2011): Low-carbon policies in the USA and China: why cities play a critical role. *Carbon Management Journal*, 2(4), 359-362.
- 24) Kennedy, C., A. Ramaswami, S. Carney and S. Dhakal (2011): Greenhouse gas emission baselines for global cities and metropolitan regions. Hoornweg, D., M. Freire, M.J. Lee, P. Bhada-Tata and B. Yuen eds., *Cities and Climate Change: Responding to an Urgent Agenda*, 15-54.
- 25) Zusman, E., A. Srinivasan and S. Dhakal (2011): Low carbon transport and co-benefits

in Asia: an overview. Zusman, E., A. Srinivasan and S. Dhakal, eds., Low Carbon Transport in Asia: Strategies for Optimizing Co-Benefits, 3-18.

- 26) Zusman, E., A. Srinivasan and S. Dhakal (2011): Low carbon transport and co-benefits in Asia: the way forward. Zusman, E., A. Srinivasan and S. Dhakal, eds., Low Carbon Transport in Asia: Strategies for Optimizing Co-Benefits, 244-259.
- 27) Dhakal, S., R. Zondervan and J.A. Puppim de Oliveira (2011): Carbon governance in Asia: bridging scales and disciplines. Our World 2.0.
- 28) Dhakal, S. and P. Canadell (2011): The regional carbon cycle assessment and processes initiative and progress. CGER Newsletter, 22, 5, 8-9.
- 29) Dhakal, S. (2011): Urban energy and carbon modeling in rapidly urbanizing world. CGER Newsletter, 22, 2, 8-10.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Dhakal, S.: Urban transport and environment in Kathmandu Valley - local air pollution control and its synergy with global carbon concerns. Emerging Issues on Research and Development, Kathmandu, Nepal, April 2007.
- 2) Dhakal, S.: Global Carbon Project. Asia Energy Environment Modeling Forum 3rd Annual Workshop, Beijing, China, May 2007.
- 3) Dhakal, S.: Urban transport and environment in Kathmandu Valley - Local air pollution control and its synergy with global carbon concerns. Asia Energy Environment Modeling Forum 3rd Annual Workshop, Beijing, China, May 2007.
- 4) Dhakal, S.: Urban carbon management initiative. Achieving a Low Carbon Society, London, UK, June 2007.
- 5) Dhakal, S.: Urban energy use and carbon emissions in East Asian mega-cities. Achieving a Low Carbon Society, London, UK, June 2007.
- 6) Dhakal, S.: Policy models for climate friendly city in Asia. Business Models and Financial Frameworks to Scale up Responses to Climate Change, Clean Energy and Sustainable Development, Seoul, Korea, July 2007.
- 7) Dhakal, S.: Streamlining climate concerns in transport sector with special reference to Asia. 17th Asia-Pacific Seminar on Climate Change, Bangkok, Thailand, August 2007.
- 8) Dhakal, S.: Global carbon project: urban and regional carbon management. 7th Annual Scientific Steering Committee Meeting of the Global Carbon Project, Kruger NP, South Africa, August 2007.
- 9) Dhakal, S. and P. Canadell: GCP carbon neutral initiative. 7th Annual Scientific Steering Committee Meeting of the Global Carbon Project, Kruger NP, South Africa, August 2007.
- 10) Dhakal, S.: Controlling air pollution: energy and greenhouse gas linkages in Kathmandu Valley's transportation system. 1st NEA-JC Seminar on Current and Future Technology, Osaka, Japan, October 2007.

- 11) Dhakal, S. : Urban carbon management challenges and scientific response. International Workshop on Integrating Climatic Change Mitigation in Urban Development, Nagoya, Japan, December 2007.
- 12) Dhakal, S. : Streamlining climate concerns in urban transport sector with special reference to Asia. International Forum on Integrating Climate Change Mitigation in Urban Development in Asian Cities, Nagoya, Japan, December 2007.
- 13) Dhakal, S. : Global Carbon Project: overview of activity. UNFCCC COP13 Official Side-Event: Vulnerability, Resilience and Adaptation, Bali, Indonesia, December 2007.
- 14) Dhakal, S. : Importance of urban carbon management in the context of global carbon management. UNFCCC COP13 Side-Event: Carbon Management in Cities: Gaps in Policy Discussions and Scientific Understanding, Bali, Indonesia, December 2007.
- 15) Dhakal, S. : Importance of urban carbon management and prevailing gaps in scientific understanding and policy discussions. International Symposium on Urban Energy and Carbon Management: Challenges for Science and Policy, Klong Luang, Thailand, February 2008.
- 16) Dhakal, S. : Urban and regional carbon management initiative of Global Carbon Project. International Workshop on Urban Energy and Carbon Modeling, Klong Luang, Thailand, February 2008.
- 17) Dhakal, S. : Low carbon cities and behavioral change. 日英共同研究プロジェクト「低炭素社会の実現に向けた脱温暖化2050プロジェクト」第3回国際ワークショップ・シンポジウム, Tokyo, Japan, February 2008.
- 18) Dhakal, S. : Global Carbon Project activity highlights 2006-2007. 13th Joint Inter-Governmental Meeting/Scientific Planning Group Meeting of the Asia-Pacific Network for Global Change Research, Kobe, Japan, March 2008.
- 19) Dhakal, S. : Urban energy use and carbon emissions in China and its cities. Better Air Quality 2008, Bangkok, Thailand, April 2008.
- 20) Dhakal, S. : Assessing barriers to climate co-benefits in transportation in developing Asia- framework. IGES Better Air Quality Meeting Pre-Event, Climate-Friendly Transportation Strategies in Asia: Overcoming Obstacles to Co-benefits, Bangkok, Thailand, April 2008.
- 21) Dhakal, S. : Opportunities and obstacles for co-benefits in transportation policies in developing Asia. The US - Japan Workshop on the Co-Benefits of Climate Actions, Bangkok, Thailand, April 2008.
- 22) Dhakal, S. : Understanding global carbon budget - An imperative for mitigating climate change and human sustainability. 39th Annual Meeting of Union of Chemistry-Related Societies in Chubu Area, Nagoya, Japan, June 2008.
- 23) Dhakal, S. : Urban energy use and urban sustainability from the climate change perspectives. KRIHS and RIHN Joint International Symposium on Urban Sustainability in Asia: Urban Planning, Environment and Transportation, Seoul, South Korea, June

2008.

- 24) Dhakal, S., P. Lankao, M. Raupach and P. Canadell: Urbanization pathways in a carbon-climate constrained world. 7th Scientific Steering Committee meeting of the Global Carbon Project, Piracicaba, Brazil, July 2008.
- 25) Dhakal, S.: China urban and city energy/carbon. 7th Scientific Steering Committee meeting of the Global Carbon Project, Piracicaba, Brazil, July 2008.
- 26) Makido, Y., Y. Yamagata and S. Dhakal: Revealing intra-urban features using optical and SAR images. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Boston, USA, July 2008.
- 27) Dhakal, S.: Role of cities in global carbon emissions and their management. Brown Bag Lunch Seminar, Washington D.C., USA, September 2008.
- 28) Dhakal, S.: Urban transformation and carbon footprint of mega-cities in Japan and China. ConAccount 2008 – Urban metabolism: measuring the ecological city, Prague, Czech Republic, September 2008.
- 29) Dhakal, S.: Urban energy use and CO₂ emission from cities of China. International Workshop on Towards Low Carbon Cities: Understanding and Analyzing Urban Energy and Carbon, Nagoya, Japan, February 2009.
- 30) Dhakal, S. and A. Phdungsilp: Modeling 2050 energy and CO₂ scenario for Bangkok. International Workshop on Towards Low Carbon Cities: Understanding and Analyzing Urban Energy and Carbon, Nagoya, Japan, February 2009.
- 31) Dhakal, S.: Urban and regional carbon management initiative of Global Carbon Project. International Symposium on Realizing Low Carbon Cities: Bridging Science and Policy, Nagoya, Japan, February 2009.
- 32) Dhakal, S.: Major trends in urbanization and urban environment. Asia's Future: Critical Thinking for a Changing Environment, Bangkok, Thailand, March 2009.
- 33) Dhakal, S.: Understanding global carbon budget – an imperative for mitigation and adaptation to the climate change. APMN/ICIMOD Brown Bag Seminar, Lalitpur, Nepal, April 2009.
- 34) Dhakal, S.: Our role for future low carbon society in Asia. ICLEI World Congress, Edmonton, Canada, June 2009.
- 35) Dhakal, S.: URCM activities in 2008-9. 8th Scientific Steering Committee Meeting of the Global Carbon Project, Beijing, China, June 2009.
- 36) Dhakal, S.: Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. Global Carbon Project Workshop, Beijing, China, June 2009.
- 37) Dhakal, S., et al.: A protocol for city based GHG emission indices. 5th Urban Research Symposium on Cities and Climate Change: Responding to an Urgent Agenda, Marseille, France, June 2009.
- 38) Dhakal, S., et al.: Urban GHG accounting. World Bank Workshop, Washington D.C., USA, September 2009.

- 39) Dhakal, S. : Global carbon budget and challenges for making low carbon society- why Asia matters?. International Symposium on Challenge 25 Beyond Borders?: Promoting a Low Carbon Society, Kobe, Japan, January 2010.
- 40) Dhakal, S. : Low carbon cities: flexing the urbanization-energy-carbon nexus. UNU-IAS Seminar Series on Low Carbon Cities: Flexing the Urbanization-Energy-Carbon Nexus, Yokohama, Japan, February 2010.
- 41) Dhakal, S. : Energy and transport considerations for low carbon cities. Panel Meeting: Consensus Panel on Low Carbon, Pretoria, South Africa, October 2010.
- 42) Dhakal, S. : Global CO₂ source-sink dynamics and Hindu Kush Himalayan region. ICIMOD Authors' Workshop on the HKH regional Climate Change, Kathmandu, Nepal, August 2011.
- 43) Dhakal, S. : Urban CO₂ emissions: current understandings and unresolved questions. Tyndall Center Annual Assembly, New Castle, UK, September 2011.
- 44) Dhakal, S. : Cities and carbon mitigation: needs for consumption perspectives. LCS-RNet 3rd Annual Meeting, Paris, France, October 2011.
- 45) Dhakal, S. : Urban energy use and CO₂ emissions: current understandings and unresolved questions. Workshop on the Role of Human Settlements, Infrastructures, and Spatial Planning for Climate Change Mitigation, Oslo, Norway, October 2011.
- 46) Dhakal, S. : Role of cities and urban energy in climate policy. ISAP 2011: Third International Forum for Sustainable Asia and the Pacific, Tokyo, Japan, December 2011.
- 47) Dhakal, S. : Cities GHG emissions, inventorying and comparisons: needs for going beyond the current approaches. Pathways towards a low carbon city, Durban, South Africa, December 2011.
- 48) Dhakal, S. : Best practices for energy saving and CO₂ reduction within a city-level framework. The CGP-SSRC Policy Forum Public Symposium, Tokyo, Japan, February 2012.
- 49) Dhakal, S. : Creating sustainable cities: in a rapidly urbanizing world. Plant Under Pressure, London, UK, March 2012.

(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) Asia Energy Environment Modeling Forum 3rd Annual Workshop (2007年5月30-31日, Beijing University, China)
- 2) UNFCCC COP13 Side-Event: Carbon Management in Cities: Gaps in Policy Discussions and Scientific Understanding (2007年12月6日, Grand Hyatt Hotel, Indonesia, 参加者100名)
- 3) International Symposium on Urban Energy and Carbon Management: Challenges for Science and Policy (2008年2月4日, AIT Center, Thailand, 参加者45名)
- 4) International Workshop on Urban Energy and Carbon Modeling (2008年2月5-6日, AIT Center,

Thailand, 参加者35名)

- 5) International Symposium “Realizing Low Carbon Cities: Bridging Science and Policy” (2008年2月16日, メルパルク名古屋, 日本, 参加者200名)
- 6) International Workshop “Towards Low Carbon Cities: Understanding and Analyzing Urban Energy and Carbon” (2008年2月17日-18日, 名古屋大学, 日本, 参加者80名)
- 7) 国際シンポジウム「都市とカーボンマネージメント: 科学と政策の連携強化に向けて」(2009年11月16日, 東京国際フォーラム, 日本, 参加者150名)
- 8) International Workshop on Urban Energy and Carbon Modeling in Rapidly Urbanizing World (2011年3月10日-11日, IIASA, Austria, 参加者20名)
- 9) International Workshop on Water-Energy-Carbon nexus: Drivers, footprints, and implications (2012年3月1日-2日, 東京ガーデンパレス, 日本, 参加者30名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) Malaysia' s New Straight Times (2008年2月24日、マレーシア(日曜版)、日本における環境問題全般について)
- 2) The Nation (2008年2月5日、タイ、前述(4)-3のシンポジウムについて)
- 3) 成果の記者発表 (2009年11月18日、筑波研究学園都市記者会・環境省記者クラブに配布)
- 4) 成果の記者発表 (2010年11月18日、筑波研究学園都市記者会・環境省記者クラブに配布)
- 5) 成果の記者発表 (2011年12月1日、筑波研究学園都市記者会・環境省記者クラブに配布)

(6) その他

なし

8. 引用文献

- 1) Dhakal, S. (2009): Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. Energy Policy, 37, 4208-4219.
- 2) Li, L., C. Chen, S. Xie, C. Huang, Z. Cheng, H. Wang, H. Huang, J. Lu and S. Dhakal (2010) Energy demand and carbon emissions under different development scenarios for Shanghai, China. Energy Policy, 38(9), 4797-4807.
- 3) Kennedy C., A. Ramaswami, S. Carney and S. Dhakal (2011) Greenhouse gas emission baselines for global cities and metropolitan regions. Cities and Climate Change An Urgent Agenda, The world Bank.
- 4) Parshall L., K. Gurney, S. Hammer, D. Mendoza, Y. Zhou and S. Geethakumar (2010) Modeling energy consumption and CO2 emissions at the urban scale: methodological challenges and insights from the united states. Energy Policy, 38(9), 4765-4782.
- 5) World Energy Outlook 2007 (2007) International Energy Agency.
- 6) World Urbanization Prospects: The 2007 Revision (2007) United Nations Population, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs.
- 7) World Energy Outlook 2008 (2008) International Energy Agency.

S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

4. 統合システム解析による空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの開発

(4) 気候変動シナリオの解析による空間詳細シナリオの整合性評価に関する研究

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 地球温暖化予測研究プログラム

地球システム統合モデリング研究チーム

河宮未知生

<研究協力者>

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域

地球温暖化予測研究プログラム

加藤悦史・石原浩二

平成19年度～23年度累計予算額：83,966千円

(うち、平成23年度予算額：21,516千円)

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 第5期結合モデル国際比較プロジェクト(CMIP5)実験の駆動データとして用いられる代表的濃度経路(Reference Concentration Pathways:RCPs)のうち、RCP6シナリオにおける植生火災によるエアロゾル排出および土地利用変化による炭素排出シナリオを作成し、アジア太平洋統合評価モデル(Asia-Pacific Integrated Model:AIM)のデータとして提出した。モデルによる植生火災排出推定および土地利用変化排出推定について、衛星由来の火災面積を用いた排出推定とブックキーピング法による過去土地利用変化排出推定を利用して検証を行った。また、すべてのRCPsシナリオについて、空間詳細土地利用変化シナリオと土地利用変化起源の炭素排出シナリオの間の整合性評価を行った。RCP2.6は、負の化石燃料排出達成に向けバイオマス作物生産による炭素の貯留と関連した農地増加シナリオとなっているが、陸域生態系モデルVISITを用いた正味の土地利用変化炭素排出推定を行ったところ、標準的な排出シナリオで想定された以上に間接的な土地利用変化由来の排出の増加を引き起こすことが明らかになった。一方、RCP4.5とRCP6.0では、耕作地と放牧地が二次的な自然植生へ転換することによって、CO₂吸収量が増加する結果が得られたが、この吸収量に関してCO₂施肥効果が大きな影響を持つことが明らかになった。また、RCPsシナリオ以降の新土地利用シナリオの開発に向けて、VISITおよび地球システムモデルMIROC-ESMによる温暖化の効果を含めた土地利用変化による炭素排出への影響を評価した。さらに、土地利用変化シナリオによる気候への影響を、MIROC-ESMを用い生物地球物理学的要因と生物地球化学的要因に切り分け評価した。新土地利用シナリオ開発に向けた取り組みとして、温暖化の効果を含めた作物生産性変化の評価手法の検討を行った。温暖化予測実験データ公開サーバー環境移行に伴い、国際的なデータ配布を担う公開サーバーでのユーティリティ関連ソフトウェアを移植した。

【キーワード】 土地利用変化シナリオ、土地利用変化炭素排出、Representative Concentration Pathways (RCPs)、植生火災、地球システムモデル

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書(IPCC AR5)に向けた次世代の気候変動予測シナリオの構築が急務となっている。国際的な長期気候変動予測研究の議論において、これまで十分には取り扱われてこなかった自然システムと社会システムを統合して解析するアプローチが重要視されている。IPCC AR5に向けた統合的な気候変動シナリオ解析枠組みとして、パラレルアプローチに従った研究が進みつつある(Moss et al. 2010)⁶⁾。パラレルアプローチの第一段階として、気候モデルへの入力データとなる、将来の安定化時放射強制力を4種類に設定した排出・濃度・土地利用変化に関する代表的濃度経路(Representative Concentration Pathways: RCPs)シナリオの構築が、統合評価モデル(Integrated Assessment Models: IAMs)グループによって進められ、平成21年度にデータ公開がなされた。それに引き続き、RCPs濃度・排出シナリオに基づく温暖化予測実験がなされ、第5期結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5: CMIP5)のデータアーカイブに、世界各気候研究機関による気候モデルグループによる計算結果が提出されている。同時に、新たな社会経済シナリオと叙述的なストーリーラインの作成および緩和・適応に向けた影響評価研究による統合的な気候変動シナリオの統合化が現在進みつつある。

本研究課題における本サブ課題では、このIPCC AR5でのパラレルアプローチに準ずる形で、新シナリオ統合化に向けたシナリオの整合性解析に先立ち、初めに気候モデルへの入力に向けた空間詳細な排出シナリオ開発を行った。具体的には、アジア太平洋結合評価モデル(Asia-Pacific Integrated Model: AIM)が作成するRCP6シナリオの排出シナリオの中で、社会・経済モデルによる排出を補完する形で、土地利用変化およびCO₂濃度パスと統合的な、陸域生態系からの空間詳細な排出シナリオの構築を進めることとした。この陸域排出シナリオ作成において、過去から将来にわたり統合的な排出データの作成を行うため、陸域生態系モデルによる植生火災排出と土地利用変化排出の推定に関するモデルの高度化と、過去排出推定の検証が必要となる。

RCPsシナリオはパラレルアプローチ初期における気候モデルへの入力シナリオという性質上、放射強制力の安定化に注目した簡易な前提をおいたシナリオであり、シナリオのCO₂濃度は簡易気候・炭素循環モデルによって推定されたものである。CMIP5実験のうち地球システムモデル(Earth System Model: ESM)を用いたRCPs実験では、この簡易モデルによって計算されたCO₂濃度シナリオに基づき、安定化のために将来の許容可能なCO₂排出量を推定する設定となっている。このため、濃度計算に使われた化石燃料由来と土地利用変化由来の炭素排出に関して、統合的な排出であるかどうか各シナリオにおける許容排出量の評価において大きな影響を持つ。よって、本研究においてRCPsシナリオにおける空間詳細な土地利用変化と土地利用変化による炭素排出についての整合性評価を行うこととした。

また、土地利用変化は、陸域のCO₂排出と吸収の変化を通して炭素循環への影響を及ぼすだけでなく、陸面の変化によりアルベド、潜熱顕熱の変化を通じた物理的な要因によっても気候へ影響を及ぼす。過去の土地利用変化に対し、生物地球物理学的要因と生物地球化学的要因に切りわけられるため、簡易な地球システムモデル(Earth System Models of Intermediate Complexity: EMICs)やESMによる研究が近年進みつつあるが、将来の気候変動への緩和を考慮したシナリオの開発にむけても、空間詳細な土地利用変化シナリオを通じた気候への影響を評価する必要がある。

さらに、CMIP5実験による温暖化予測データの公開に関し、国際規約に基づいたデータ公開サー

バーの利用に向けた整備が喫緊の課題となっている。

2. 研究開発目的

(1) RCPsデータベースに向けた、人為土地利用変化による炭素排出および植生火災によるエアロゾル排出シナリオ作成

本研究では、AIMによるRCP6.0シナリオ作成の中で、社会・経済活動による産業由来の人為起源排出を補完する形で、土地利用変化および植生火災を原因とするセクターの排出シナリオを作成することを目的とした。排出推定において、過去および現在の土地利用変化に由来する正味の炭素排出、植生火災によるエアロゾル排出について、陸域生態系モデルの高度化を行うことにより、衛星観測および他のモデル推定と整合的な排出推定および検証をめざす。このモデルを利用し、RCP6.0社会・経済シナリオによるCO₂排出シナリオと土地利用シナリオに沿った過去から将来にわたる整合的な排出推定と、それら排出量の感度分析を行う。

(2) RCPsシナリオにおける土地利用変化シナリオと土地利用変化に由来する炭素排出シナリオの整合性評価

RCPシナリオでは、CMIP5実験の入力データとして温室効果ガス(GHG)およびエアロゾルの排出・濃度データと共に、空間詳細な土地利用変化シナリオデータが提供されている。濃度駆動のCMIP5実験では、統合評価モデルによって作成された化石燃料起源CO₂排出シナリオと土地利用変化CO₂排出シナリオに基づいたCO₂濃度が駆動データとして利用される。しかし、ESMによる排出駆動のCMIP5実験では、空間詳細な土地利用変化シナリオデータを利用し、モデル内部で計算した土地利用変化CO₂排出と化石燃料起源CO₂排出に従った気候変動予測を行う。そのため、ESMによるシナリオ実験の結果を解釈するには、土地利用変化による排出を適切に評価する必要がある。本研究では、陸域生態系モデルを用い、RCPs土地利用変化シナリオデータとCO₂濃度データを用いた場合の植生からの土地利用変化排出を算出し、統合評価モデルによる排出シナリオの整合性を評価することを目的とした。また、CMIP5によるシナリオ実験だけでは、ESMによる土地利用変化由来の排出を評価することは不可能なため、地球システムモデルMIROC-ESMのRCPs実験に対し追加実験を行い、炭素循環-気候フィードバックを含んだ空間詳細な土地利用変化シナリオによる土地利用変化由来のCO₂排出を評価することを目的とした。

(3) MIROC-ESMによる、土地利用変化シナリオによる気候への影響評価

RCPsシナリオでの空間詳細な土地利用変化シナリオの評価のため、地球システム統合モデルを利用し、土地利用変化による炭素循環の変化を通じた生物地球化学的要因による気候への影響と、陸面過程の変化を通じた生物地球物理学的要因による気候への影響評価を行い、将来の気候変動の緩和に向けた土地利用変化シナリオの検討を行う。

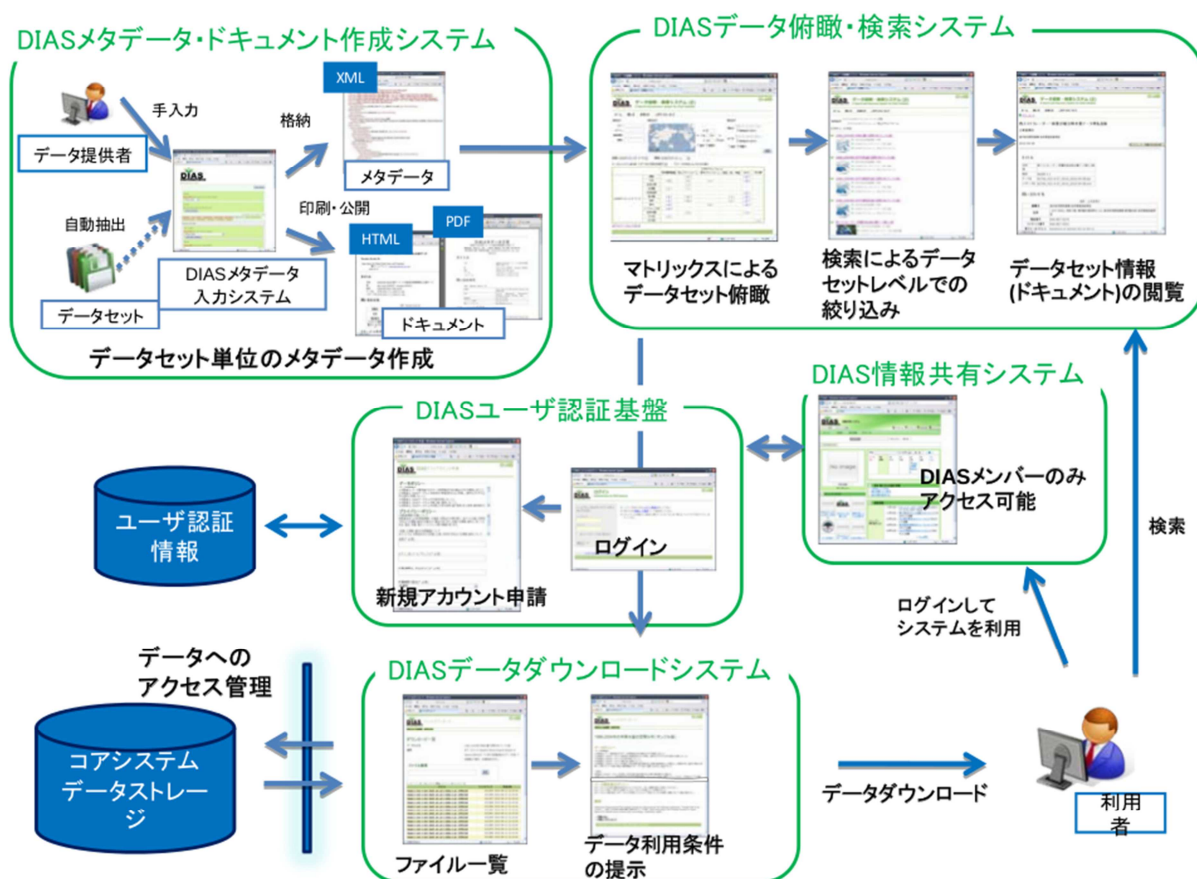
(4) 気候変動影響を考慮した陸域生産性評価の手法開発に向けた検討

RCPsシナリオは、気候変動の影響を考慮しない簡易な前提をおいたシナリオであり、IPCC AR5における最終的な気候シナリオに向けた整合的な新土地利用シナリオ作成が求められる。本研究において、気候変動影響を考慮した農業生産性の評価を行い、土地利用変化シナリオ高度化への

入力情報を提供するための手法を検討する。

(5) 温暖化予測データの利用環境整備とデータサポート

温暖化予測データはCMIP5および気候・予報メタデータ規約 (Climate and Forecast Metadata Convention:CF-1.4) にて定義されている国際標準仕様のメタデータで管理されている。国内研究機関の温暖化予測データは21世紀気候変動予測革新プログラム(革新プログラム)から提供され、データ統合・解析システム(DIAS)で配信・管理される。DIASでは温暖化予測データだけでなく様々な手段で得られた観測データや再解析データなど、図(4)-1に示すような観測から利用までの一体連携を支援するシステムの開発を行っており、多様なデータの管理を行うためISO19115を拡張した独自仕様のメタデータによるデータ管理システムの開発が進められている。様々なデータの統合・解析に適したDIAS仕様のメタデータを作成するため、CMIP5/CF仕様のメタデータをDIAS仕様のメタデータへ変換するためのメタデータコンバーターを作成する。同時に、革新プログラムより提供される温暖化予測データのDIAS向けのメタデータを作成する。また、CMIP5での国際的に共通なデータ配信システムとDIAS独自のデータ統合・解析システムを同時に運用しているDIASの特性を生かして、DIASでの温暖化予測データ利用者に向け、国際的に共通のデータ利用サービスに付したデータ利用環境を提供する。



図(4)-1 観測から利用までの一体連携を支援するメタデータ管理システムの概要

3. 研究開発方法

(1) RCPsデータベースに向けた、人為土地利用変化によるCO₂排出および植生火災によるエアロゾル排出シナリオ作成

本研究における排出推定ツールとして、陸域生態系生物地球化学モデルVegetation Integrative Simulation Tool (VISIT)を用いた。このモデルはプロセスベースモデルであり、100年スケールでの陸域炭素収支を見積もることが可能である。また特徴として、光合成と呼吸による大気とのCO₂の交換を推定するだけでなく、土地利用変化、植生火災、植生による揮発性有機化合物(VOC)・メタン排出、土壌炭素エロージョンなど、主要要素以外の炭素収支を個々のコンポーネントの導入により推定可能としている。

モデルによる植生火災排出推定において、Thonicke et al. (2001)¹³⁾の方法による土壌水分と燃焼可能な植生由来の燃料量からグリッドごとの火災確率および火災期間を推定するスキームを用い火災面積推定を行った。また、人為的な植生火災発生として、熱帯、亜熱帯域の土地利用変化、および移動耕作による火災発生を導入した。モデル内において、RCPs土地利用変化データによる1次・2次植生から農地・牧草地への転換地での火災発生、および、潜在的に移動耕作がなされている地域における農地面積における回転率15年での火災発生を仮定し、植生火災焼失量を求めた。燃料の燃焼完全性(combustion completeness)と排出係数については、RCPsの基準年データ作成に用いられた値(Lamarque et al. 2010⁴⁾)をパラメータとして使用した。

VISITの火災コンポーネントによる排出として、CO₂・CO・CH₄・NMHC(非メタン炭化水素)・OC(有機炭素)・BC(ブラックカーボン)等のRCPsで求められる温室効果ガスと各エアロゾル排出量を、1ヶ月ごと、空間分解能30分のグリッドで計算した。また、これら推定値を、衛星観測に基づく火災排出推定データベースGFEDv2(Randerson et al. 2007⁹⁾)と比較検討することにより、モデル内の火災発生確率から面積推定に関する地域化パラメータの改善を行った。

この火災モジュールを用い、2006-2100年でのRCP6社会・経済シナリオに従った植生火災による排出シナリオ作成を行った。排出シナリオ作成実験として、1901-2000年の過去再現実験に引き続き、RCP6のCO₂濃度シナリオと空間詳細な土地利用変化シナリオを駆動データとして用い、2001年から2100年のオフライン実験を行った。RCPsシナリオは気候変動シナリオ構築の第1段階として温暖化の効果を入れない簡易なシナリオであるため、2001年以降の気候条件として1990年代の気候値を用いた。また、植生のCO₂施肥効果を通した間接効果を避けるために、火災発生確率に対する土壌水分の変動影響に関して、CO₂施肥効果による土壌水分変動を考慮しない実験設定とした。このRCP6.0シナリオ作成実験と共に、AIMによるRCP6.0シナリオの参照シナリオとして作成されたなりゆき(BAU)シナリオの実験、またCO₂濃度に対する植生火災排出の影響をみるため、CO₂施肥効果を考慮しない実験およびCO₂施肥効果による火災発生確率に対する間接効果を含む実験を追加で行った。

土地利用変化による正味のCO₂排出推定に関しても、シナリオ作成に先立ち、過去1901-2000年における本研究に用いたモデルによる推定での再現性の検証を行った。過去土地利用変化データとして、RCPsシナリオ作成プロセスにおいて構築されたニューハンプシャー大学による空間解像度0.5°の過去土地利用データ(Hurt et al. 2009²⁾)を用いた。VISITモデルグリッド内において、1次植生、2次植生、農地、牧草地、都市と分類された土地利用データおよび土地利用間の遷移データを用い、土地利用変化にともなう植生伐採によるCO₂の排出量、農地・牧草地の放棄による植生

再成長を通じたCO₂の吸収量を計算した。RCP6土地利用変化由来CO₂排出シナリオ作成においては、過去土地利用排出推定実験で検証を行ったモデルを利用し、植生火災排出推定実験と同様にVISITを用いた2006-2100年でのオフライン実験による推定を行った。空間詳細な土地利用変化データとして、RCP6社会・経済モデルによる広域な地域別土地利用割合データを本研究課題サブテーマ(1)がダウンスケーリングし遷移情報を付加したものを利用した。また、RCP6シナリオ作成と並行して、AIMによるBAUレファレンス土地利用・CO₂濃度シナリオを利用した場合での、土地利用変化由来のCO₂排出推定も同時に行った。これら陸域生態系排出シナリオを、AIMの社会・経済モデルへ戻すことにより、最終的なRCP6シナリオ作成を行い、RCPsデータベースに提出した(Masui et al. 2011⁵⁾)。

(2) RCPsシナリオにおける土地利用変化シナリオと土地利用変化に由来するCO₂排出シナリオの整合性評価

土地利用シナリオデータとして、IAMs間の違いをハーモナイズしたRCPs土地利用変化データ(Hurt et al. 2009²⁾)を利用した。このデータは空間解像度0.5°グリッドで、1次土地、2次土地、農地、牧草地、都市の区分でグリッド内の土地利用割合およびそれらの土地利用の間の遷移を、過去データに引き続き、統合評価モデルによる各RCPsシナリオの2005年から2100年までの変化について整備したデータである。本研究で検証を行った陸域生態系モデルVISITを用い、各RCPsシナリオでの2006年から2100年までの土地利用変化による正味のCO₂排出を推定した。また、CO₂施肥効果が土地利用変化排出に及ぼす影響を評価するため、各シナリオについてCO₂濃度を2001年のレベルに固定した実験を追加実験として行った。さらに、土地利用変化排出に対する温暖化影響の評価のため、MIROC-ESMによるRCPs濃度駆動実験と、排出駆動実験の温暖化予測結果を利用したVISITによりオフライン実験を行った。VISIT温暖化オフライン実験の気候フォーシングとして、MIROC-ESM濃度駆動による各RCPsシナリオ実験での、T42ガウス格子の月別地上2m気温、降水量、地上2m相対比湿、下向き短波放射予測結果を水平解像度0.5°グリッドに内挿したものを利用した。同時に、MIROC-ESMにおいて、各RCPs実験に対応する土地利用を2005年に固定した実験を行い、これら実験間の陸域炭素フラックスの差を求めることにより、土地利用変化由来のCO₂排出量を求めた。MIROC-ESMの土地利用固定実験設定として、濃度駆動実験とともに排出駆動実験によるCO₂濃度予測結果を用いた実験も実施した。

(3) MIROC-ESMによる、土地利用変化シナリオによる気候への影響評価

土地利用変化シナリオによる気候への影響を、生物地球物理学的要因と生物地球化学的要因に分離するため、MIROC-ESMによるCMIP5排出駆動RCPs実験に対応する、土地利用を2005年に固定した実験を行った。実験設定として、CO₂濃度をRCPs排出駆動実験の予測結果を利用した実験(L1A)とともに、化石燃料由来のCO₂排出シナリオとモデル内での過去土地利用に由来するCO₂排出によってモデル内でCO₂濃度を計算する設定による実験(L1B)の2タイプの実験設定で行った。また、CMIP5でのRCPsシナリオ排出駆動実験はRCP8.5でのみ設定されているため、RCP8.5以外でのシナリオについても、MIROC-ESMを用い排出駆動実験(L1C)を行った。L1CとL1Aの気候応答を比較することにより、土地利用変化による気候への生物地球物理学的要因の影響評価が可能となる。また、L1AとL1Bの気候応答を比較することにより、土地利用変化によるCO₂排出変化を通じた気候への影響(生

物地球化学的要因)を評価することが可能となる。

(4) 気候変動影響を考慮した陸域生産性評価の手法開発に向けた検討

RCPs以降の平行アプローチ対応に向け、土地利用モデルに農地生産性の変化を再入力し、気候変動と整合的な新土地利用シナリオを作成することを最終目的として、気候変動予測結果を考慮した農地生産性の変化見積りを行う手法開発の検討を行った。農地における作物収量変動予測モデルのベースとして、土壌・水循環モデルSoil and Water Assessment Tool (SWAT)を用い、モデルからの作物コンポーネントの分離、およびモデル内の気候データの取扱いに関する手法の整備を行った。

SWATモデルのコード上から作物生産性に関与する部分のみを抽出するため、コールグラフを作成したのち作物コンポーネントの分離作業を行った。また、土地利用モデルへの入力条件として陸域全体に渡る気候変動による生産性変化の評価が必要であるため、入力条件である気候データについて、作物モデルと陸域生態系モデルVISIT間で整合性のあるデータを取り扱うための変更を行った。SWATは流域および圃場レベルで計算を行うモデルのため、全球0.5°空間解像度のグリッドを単位として作物コンポーネントを内部に組み込むルーチンを実装した。同時に、SWATモデル内での気象データの扱いを全球に拡張するため、SWAT I/Oシステムに1°グリッド水平解像度かつ1日時間解像度のダイレクトアクセスバイナリファイルの読み込み機能を追加実装した。また、CO₂濃度変化による作物成長の影響を評価するため、年ごとのCO₂濃度データの読み込みコードを追加した。

開発を行ったモデルの動作テストとして、RCPsシナリオを用いたCMIP5温暖化予測データ整備を行ったのち、単収推定実験を実施した。実験設定として、MIROC-ESMの濃度駆動RCP6実験による日別気候データ(地上2m日最大気温、地上2m日最小気温、日降水量、地上2m相対比湿、下向き短波放射、地上10m風速)と、シナリオのCO₂濃度変化を入力条件とし、2006年から2100年までのイネの単収を評価する全球シミュレーションを行った。

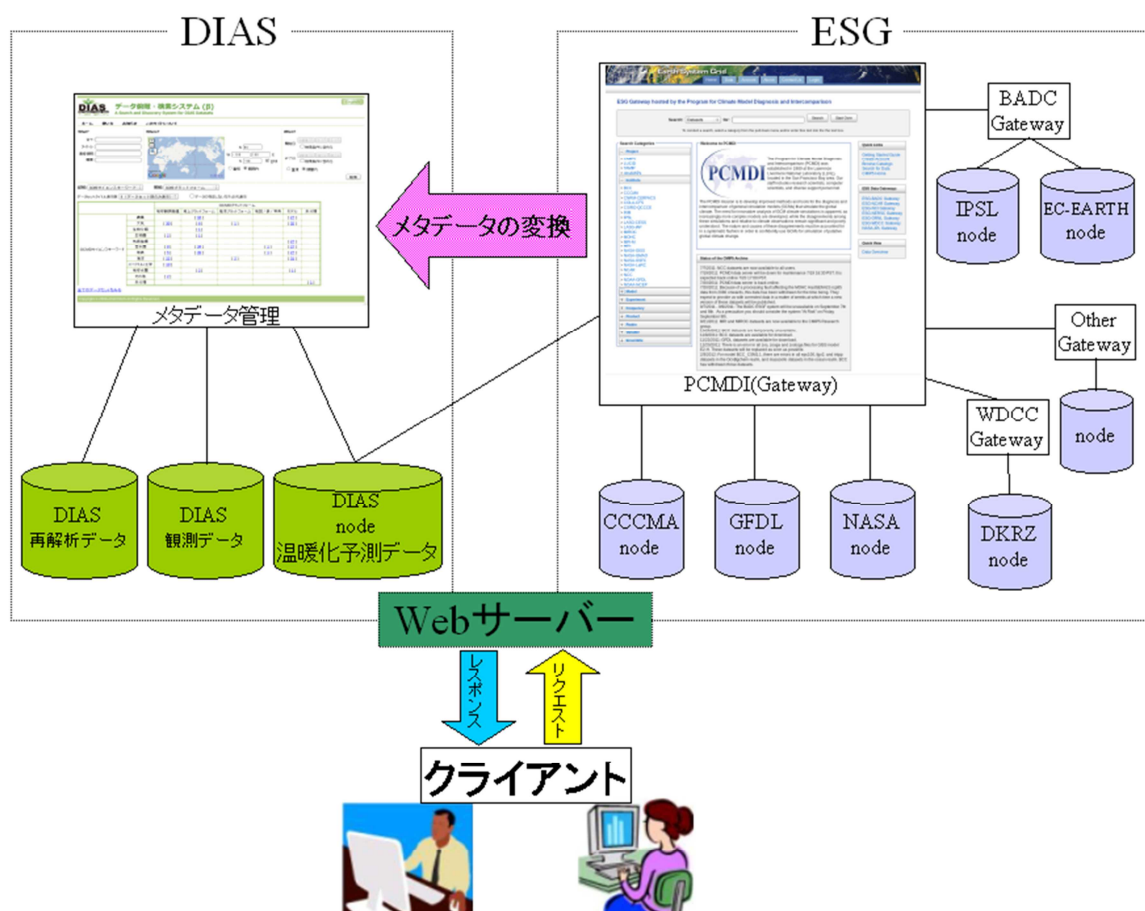
(5) 温暖化予測データの利用環境整備とデータサポート

1) メタデータコンバーターとDIASメタデータの作成

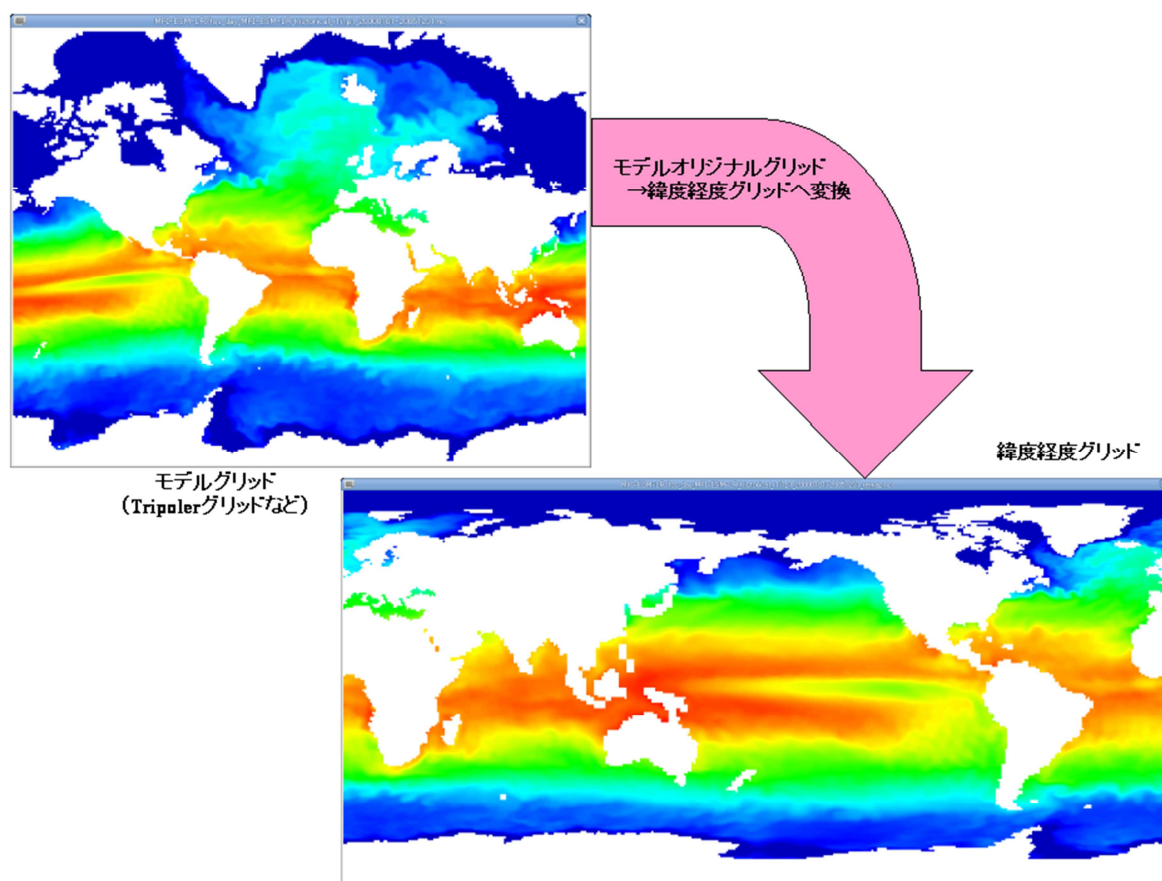
各国の研究機関で開発されている大気海洋結合モデルによる温暖化予測データの配信は、Earth System Grid Federation (ESGF)で開発されている分散共有型のデータ配布システムであるEarth System Grid (ESG)によって各国のデータ利用者に提供される。国内研究機関から提供される温暖化予測データは、CMIP5/CFで定義されたメタデータ仕様に基づいてClimate Model Output Rewriter Version 2 (CMOR2)を用いてCMIP5共通仕様のnetCDF形式のデータファイルとして作成され、DIASで運用されているESGの分散サーバー(ESG node)からClimate Data Analysis ToolのPCMDIのGatewayサーバーを通じて全世界の利用者へ配信されている。図(4)-2に示すようにDIASではESGと平行して独自のデータ統合・解析システムを開発しており、ESGとDIAS双方でのデータ管理を補完するためESGでデータ管理に用いられているCMIP5/CF仕様のメタデータをDIAS仕様のメタデータへ変換するためのメタデータコンバーターを作成し、国内研究機関から提供される温暖化予測データのDIASメタデータを作成する。

2) DIAS利用者向けデータ利用付加サービス

DIASでの温暖化予測データ利用者に向け、ESGで提供される国際的に共通のデータ利用サービスとは独立した独自のデータ利用サービスを提供する。ESGより配信される温暖化予測データはCMIP5/CFの仕様によりモデルの計算に使われているオリジナルのグリッドにてデータ配信することが求められている。国内外の研究機関で温暖化予測実験に用いられる大気海洋結合モデルの海洋モデルでは、計算リソースの効率的利用などを目的にTripolerグリッドやbipolerグリッドなどの非緯度経度グリッドで計算され、CMIP5/CF仕様に基づきモデルグリッド定義のままESGを通じデータが配信される場合がある。そこでLos Alamos National Laboratoryにて開発されているSpherical Coordinate Remapping and Interpolation Package (SCRIP)を用いたモデルグリッド変換ツールをDIASへインストールし、非緯度経度グリッドデータを観測データなどとの比較解析が容易な緯度経度グリッドデータへ変換できるようにすることで温暖化予測データ解析時の利便性を向上させる（図(4)-3）。また、CMIP5/CFでは、各研究機関の大気海洋結合モデル間のデータ相互比較を目的としているため、提供される変数や時間間隔が決められている。地球システム統合モデルのモデル出力データでは、統合システム解析による空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの開発や温暖化予測データに基づいた影響評価研究を支援するためCMIP5/CFで規定されていないデータも出力しており、CMIP5/CFで規定されていないデータをDIASの利用者に対して別途提供し、影響評価分野などCMIP5以外のデータ利用者の研究支援をおこなう。



図(4)-2 ESGとDIASにおけるデータ利用環境とメタデータコンバーター



図(4)-3 温暖化予測データの簡易可視化とグリッド変換

4. 結果及び考察

(1) RCPsデータベースに向けた、人為土地利用変化によるCO₂排出および植生火災によるエアロゾル排出シナリオ作成

GFEDv2データが利用可能な年に対応する過去気象データを用いたVISITによるシミュレーション(1997-2000年平均)において、全球植生火災面積は $3.64 \pm 0.08 (10^6 \text{ km}^2, \text{mean} \pm 1\text{SD})$ 、CO₂ 排出は $8623 \pm 612 (\text{Tg CO}_2)$ 、BC排出は $3.05 \pm 0.24 (\text{Tg BC})$ と推定された。GFEDv2ではそれぞれの値が $3.52 \pm 0.16 (10^6 \text{ km}^2)$ 、 $9482 \pm 1930 (\text{Tg CO}_2)$ 、 $3.08 \pm 0.75 (\text{Tg BC})$ と推定されており、VISIT火災モデルへの人為火災の導入と地域パラメタライズを行ったことにより、衛星観測による火災面積および排出推定の誤差の幅において火災排出量を再現することが可能となった。

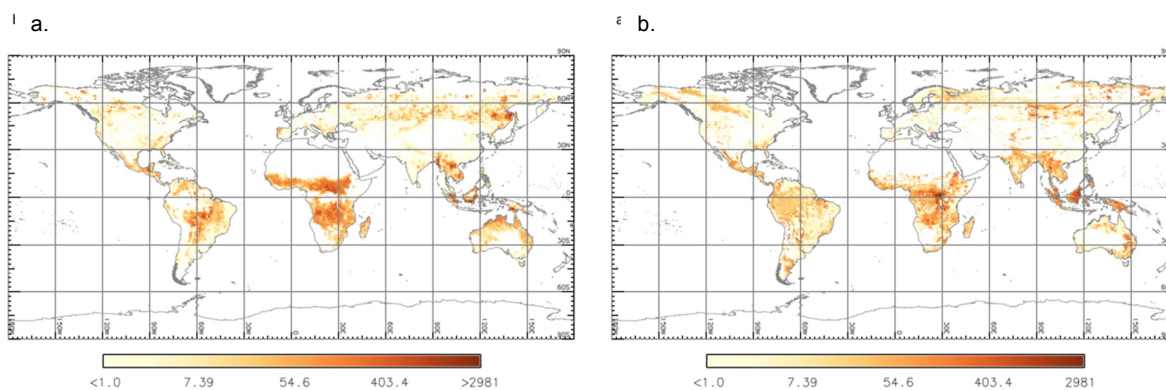
全球火災BC排出推定に関して、本モデルによる過去気象データによる1901年から2000年のシミュレーション結果10年平均推定値、Mouillot et al. (2006)⁷⁾に基づく1900年から1990年までの10年平均推定値の最大値と最小値、RCPsによる1900-2000年の10年平均値(Lamarque et al. 2010⁴⁾)、RETROデータベース(Schultz et al. 2008¹⁰⁾)による1960-1990年の10年平均値、および1997-2006年のGFEDv2での年推定値を図(4)-4に示した。RCP過去火災排出データは、最新の研究による火災履歴データ(Mouillot et al. 2006⁷⁾, Schultz et al. 2008¹⁰⁾)、および衛星観測にもとづくGFEDv2の結果から作成されている。20世紀における植生火災排出の傾向として、RCP過去火災履歴データ、VISITモデル推定とも、1980年以降に小程度の増加が見られるが、全体を通して急激な排出量の増

減はなかったことが示された(図(4)-4)。



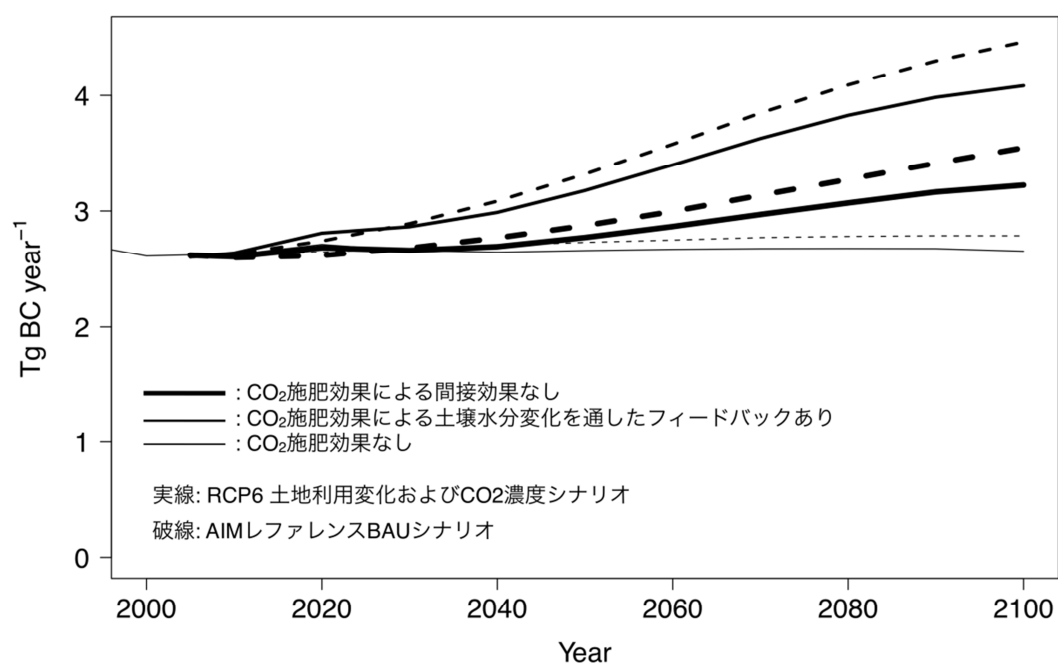
図(4)-4 全球火災BC排出推定値。太実線が本研究による推定値。白丸による点線がRCPs作成グループによる過去排出推定値(Lamarque et al. 2010⁴⁾)。黒丸による細実線がRETROデータによる推定値(Schultz et al. 2008¹⁰⁾)。破線がMouillot et al. 2006⁷⁾による火災炭素排出量の最大値と最小値にもとづきBC排出量を推定した値。白三角による細実線がGFEDv2(Randerson et al. 2007⁹⁾)による推定値。

次に、GFEDv2における1997年から2000年までの火災排出空間分布と本研究によるBC排出推定を示す(図(4)-5a, b)。熱帯域での人為火災とGFEDv2推定と同様の全球を14地域に分けたパラメタリゼーションを利用することによって、空間的な排出推定を改善した。



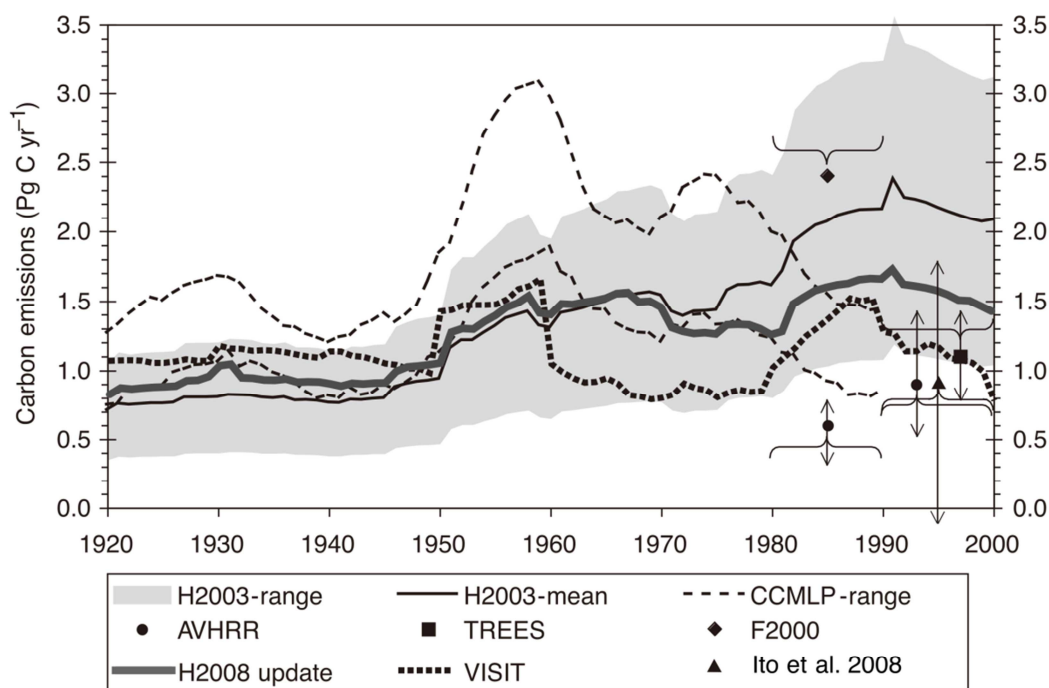
図(4)-5 a: GFEDv2による1997-2000年平均BC排出($\text{mg BC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)空間分布。b: 本研究による同年平均BC排出推定。

RCP6シナリオ計算において、全球での年火災BC排出量は2100年において3.2 Tg BC yr⁻¹まで上昇した(図(4)-6)。2100年における内訳として、草地における火災排出は1.7 Tg BC yr⁻¹と、2005年から0.2 Tg BC yr⁻¹増加した。また森林火災については、2100年において1.5 Tg BC yr⁻¹と、2005年排出量に比べ、約0.4 Tg BC yr⁻¹上昇し、森林域における火災の増加を示した。火災に関するCO₂施肥効果に関しては、土壌水分の変化を通じた間接的な効果により、より火災発生量が増加する可能性が明らかになった。



図(4)-6 RCP6シナリオ作成実験における2006-2100年平均BC排出推定

図(4)-7に、本モデルによる20世紀土地利用変化による正味CO₂フラックス推定を示す。同時に比較対象として、Ramankutty et al. (2007)⁸⁾、Ito et al. (2008)³⁾およびHoughton (2008)¹⁾によってまとめられた、異なった推定方法による土地利用変化起源CO₂排出推定の幅を示す。本研究での1901-2000年における全球平均推定値として1.11 Pg C yr⁻¹の正味土地利用変化CO₂排出が見積もられた。この値は、Houghton (2008)¹⁾による排出推定1.16 Pg C yr⁻¹と整合する推定値である。また、これまでの研究により、1960年以降の排出量推定値に関し大きな不確実性があると考えられるが、本研究による1990年代の排出は1.15 Pg C yr⁻¹と推定され、最新の研究による推定値と同等の見積りを得た(Strassmann et al. 2008¹²⁾、Ito et al. 2008³⁾、Shevliakova et al. 2009¹¹⁾)。この結果は、Houghton (2008)¹⁾によるブックキーピング法による推定値が、20世紀後半の施肥効果の影響を考慮していないために過大になっている可能性を示している(Ito et al. 2008³⁾)。



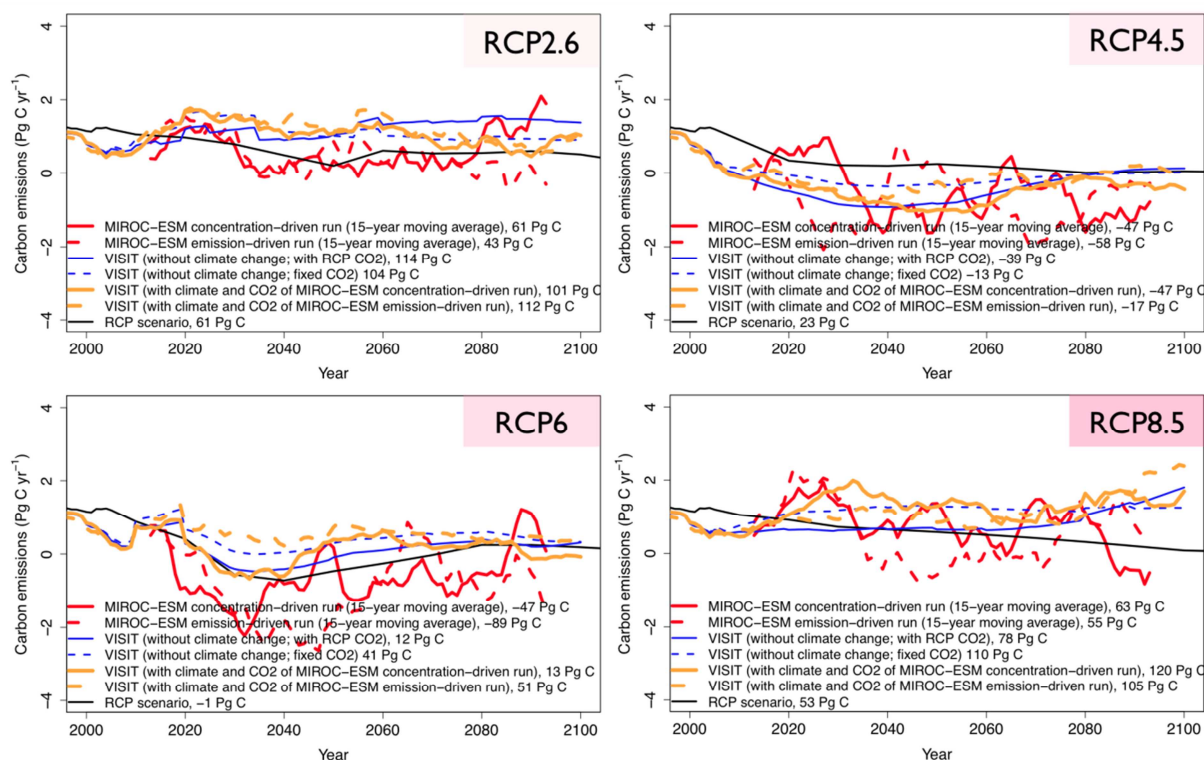
図(4)-7 さまざまなモデル・推定方法を用いた1920-2000年における過去土地利用変化による正味CO₂排出推定(Pg C year⁻¹)。太破線が本研究によるVISITを利用した排出推定値。

また、このモデルを用いて作成したRCP6シナリオでの土地利用変化CO₂排出は、20世紀後半の耕作放棄地による再成長の影響により、2000年から2020年ほどの間に大きく排出量が低下することがわかった。RCP6土地利用シナリオでは2020年から2030年、および2080年から2090年にわたり、牧草地の減少と2次植生の増加が同時に起こるため、これら土地利用変化がその後の土地利用変化によるCO₂吸収をさらに引き起こしている。このため、2100年での全球土地利用CO₂排出は0.18 Pg C yr⁻¹と2000年に比べ8割弱減少することがわかった。これら陸域からの植生火災起源エアロゾル排出および土地利用変化CO₂排出の結果はRCP6シナリオの一部として<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/>において平成21年度に公開となっている。

(2) RCPsシナリオにおける土地利用変化シナリオと土地利用変化に由来する炭素排出シナリオの整合性評価

VISITを用いたRCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5各シナリオのCO₂濃度と土地利用変化データを入力した気候変動を考慮しない排出推定において、2006-2100年の土地利用変化による積算炭素排出量は、それぞれ114 Pg C, -58 Pg C, 12 Pg C, 78 Pg Cであった。この値は、統合評価モデルによるRCPs標準の土地利用変化排出と比べ、それぞれ53 Pg C, -62 Pg C, 13 Pg C, 25 Pg Cの違いを示し、特にRCP2.6, RCP4.5において統合評価モデルによるシナリオとの乖離が見られた。また、その他の実験設定における各RCPsシナリオでの土地利用変化による年あたり炭素排出推定値と2006-2100年積算値も同様に図(4)-8に示す。VISITによるCO₂施肥効果に関する実験結果では、

RCP2.6以外のシナリオにおいてCO₂施肥効果により排出量が減少することがわかった。また、温暖化による排出への影響はシナリオごとに異なるが、RCP8.5で温暖化により排出が42Pg C増えることを除き、影響は小さいことが明らかになった。MIROC-ESMによる土地利用変化実験においては、RCP4.5とRCP6において、統合評価モデルの推定値に比べ大きく吸収する結果を示した。また、VISITによる温暖化を考慮した実験との比較では、MIROC-ESMはどのシナリオについてもより吸収側の結果を示した。MIROC-ESMにおいて土地利用変化により吸収量の結果を示した理由として、MIROC-ESMの植生モデルSEIB-DGVMの動的植生システムによって、木本植物が土地利用変化により分布を変えたことが挙げられる。

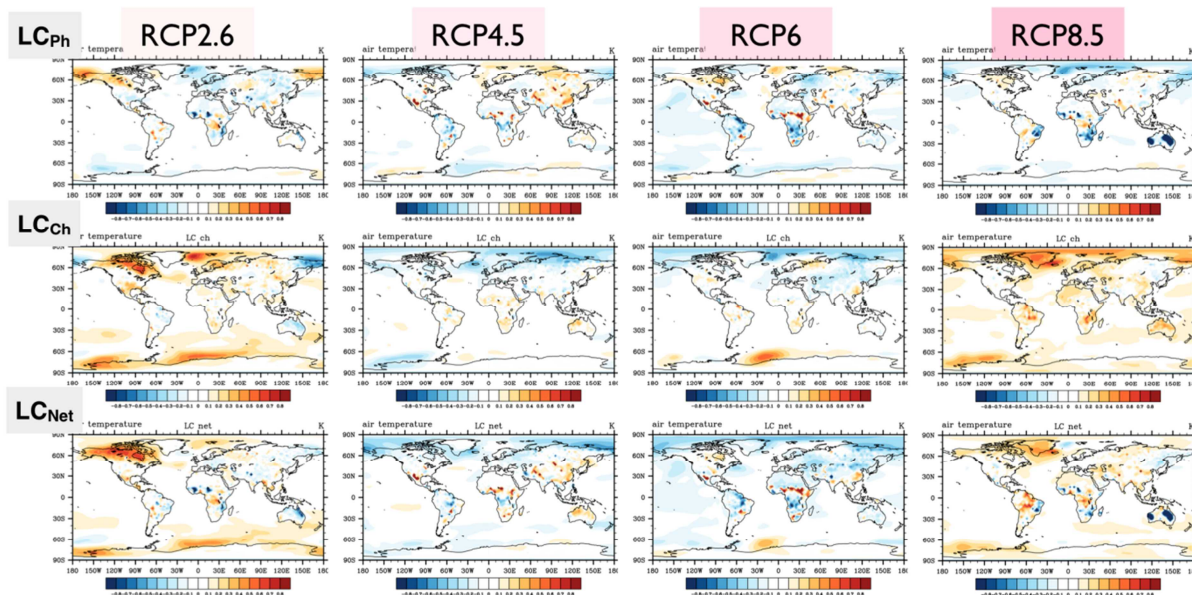


図(4)-8 各実験および統合評価モデルによるRCPsシナリオにおける年間土地利用変化由来の炭素排出推定と2006-2100年積算排出量。赤線はMIROC-ESMによる気候変化の影響を含む推定、オレンジ線はVISITによる気候変化の影響を含む推定を示す。それぞれ点線がMIROC-ESM排出駆動実験、実線がMIROC-ESM濃度駆動実験の気候とCO₂濃度による実験を示す。青線は気候変化の影響を含まないVISITによる推定を示し、実線がRCPによるCO₂濃度、点線が2000年のCO₂濃度固定実験を示す。黒線はRCPによる土地利用変化排出シナリオ。

RCP2.6シナリオは最も放射強制力が小さいシナリオであるため、化石燃料由来のCO₂排出を減らすためにバイオエネルギーを利用したCO₂貯留(bio-energy with carbon capture and storage: BECCS)を利用した炭素削減シナリオとなっており、2005-2100年で160 Pg CのBECCSを行うシナリオである。本研究によって、RCP2.6の農地拡大とともにBECCSを意図した自然植生からバイオマス作物への土地利用変化により、間接的な炭素排出がシナリオの想定以上に増加する可能性が示された。また、RCP4.5シナリオは炭素税政策による農地、牧草地とも減少するシナリオとなっており、植生回復による炭素排出に対する緩和の効果がシナリオの想定以上に存在することを示した。

(3) MIROC-ESMによる、土地利用変化シナリオによる気候への影響評価

図(4)-9に、MIROC-ESM排出駆動の各RCPsシナリオ実験における、土地利用変化シナリオによる地上2m気温への影響を示す。2006-2100年平均でみた、各RCPsシナリオの土地利用変化による生物地球物理学的要因を通した全球平均地表2m気温への影響は、RCP2.6、RCP4.5、RCP6、RCP8.5においてそれぞれ -0.03°C 、 -0.01°C 、 -0.06°C 、 -0.05°C であり、RCP4.5を除き有意な差を示した。生物地球化学的要因を通した影響については、各シナリオにおいてそれぞれ $+0.07^{\circ}\text{C}$ 、 -0.01°C 、 -0.02°C 、 $+0.10^{\circ}\text{C}$ であり、RCP2.6とRCP8.5において有意な差を示した。これら両要因を足した正味の土地利用変化影響はそれぞれ $+0.04^{\circ}\text{C}$ 、 -0.02°C 、 -0.08°C 、 $+0.05^{\circ}\text{C}$ であり、RCP4.5を除き有意な差を示した。これらの結果により、RCP2.6とRCP8.5のような農地・牧草地が拡大するシナリオにおいては、生物地球物理学的要因を通した低温化よりも、土地利用変化による CO_2 排出増を通した高温化が勝ることが明らかになった。また、植生回復が進むRCP6では、土地利用変化による生物地球物理学的要因を通した気温への影響は非常に複雑な空間分布を持つが、アフリカ南部および南アメリカ中低緯度における農地・牧草地の放棄による自然植生の増加により、地域的に大きな低温化の可能性も明らかになった。また、 CO_2 吸収を通した全球での低温化もみられ、効率的な土地利用変化シナリオにより、将来の温暖化の地域的および全球での緩和の可能性も示した。



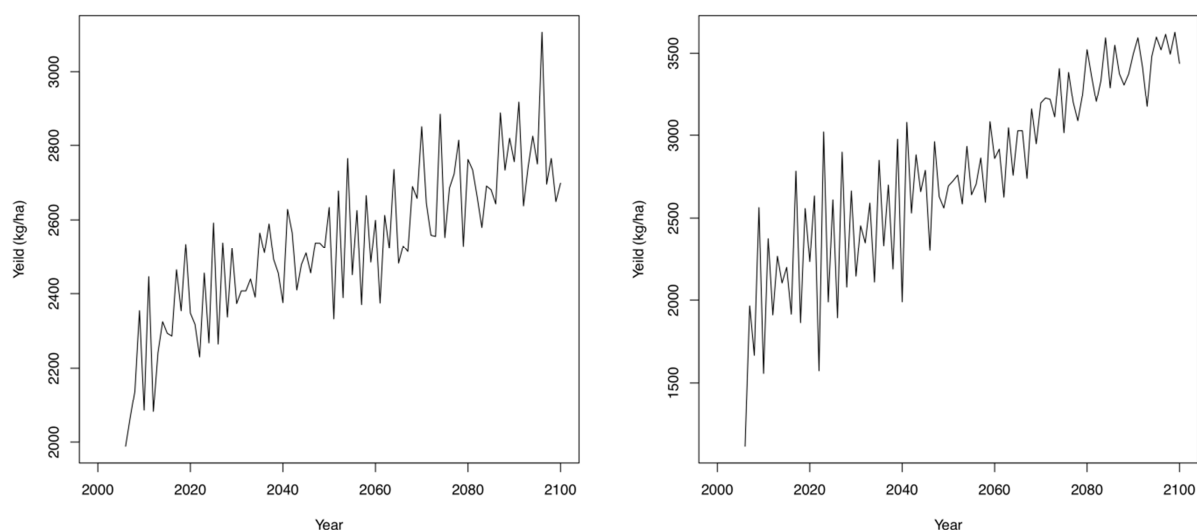
図(4)-9 2006-2100年平均での各RCPs土地利用変化による地表2m気温の応答。上段の LC_{Ph} が生物地球物理学的要因の影響、中段の LC_{Ch} が生物地球化学的要因の影響、下段 LC_{Net} が正味の影響を示す。カラーバーのスケールは -0.8°C から 0.8°C の範囲を示す。

(4) 気候変動影響を考慮した陸域生産性評価の手法開発に向けた検討

本研究によって、SWATコードの全球計算に向けた拡張とともに、作物生産性評価において温暖化時の気候データの利用を可能とした。また、モデルのテスト環境として、MIROC-ESMによる濃度駆動RCP6シナリオ下での温暖化予測データ整備を行った。整備をしたデータは日別の最高気温、最低気温、降水量、相対比湿、地表面下向き短波放射、地表10m風速であり、これらをT42ガウス格

子から1° データへ内挿しバイナリデータを作成した。MIROC-ESMの濃度駆動RCP6実験の気候出力とCO₂濃度シナリオを与えた稲の生産性評価実験において、2086-2095年の全球平均での作物生産性は、2006-2015年平均に対し1.3倍に増加した。北半球の緯度帯別に見ると、北緯30° から北緯60° 帯では1.74倍(図(4)-10右)、赤道から北緯30° 帯では1.26倍(図(4)-10左)となり、中緯度から高緯度にかけての生産性増加が、RCP6における気候変動によってもたらされることが明らかになった。

本研究により、将来の気候変動予測実験の結果を利用し、プロセスベースモデルによる作物生産性の空間的な評価手法の開発を行った。これまでの統合評価モデルでは、過去統計情報を用いた仮定に基づいた作物生産性を利用し、将来土地利用シナリオの作成を行ってきたが、今後、気候変動を考慮した収量の変化を取り入れることが可能となった。ただし、本研究での作物生産性の評価は、肥料投入量については現在の値に固定して評価を行うなど、いぜん簡易な前提が含まれており、今後の研究において、社会・経済的な要因による農業技術・肥料・灌漑の変化を取り入れた評価を行うことが必要である。



図(4)-10 SWATモデルによる、MIROC-ESM濃度駆動RCP6実験での気候変動予測結果を利用した、イネの収量予測。左：北緯0-30° 平均、右：北緯30-60° 平均。

(5) 温暖化予測データの利用環境整備とデータサポート

メタデータコンバーターを用い、地球システム統合モデル(MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM)や高解像度大気海洋結合モデル(MIROC4h)による21世紀予測シナリオ実験や20世紀再現シナリオ実験などから出力されたCMIP5/CFメタデータから、40万件あまりのDIASメタデータを作成した。CMIP5/CF規定外データを影響評価分野の研究者向けにDIASを通じ500GBあまり提供した。非緯度経度グリッドデータを解析の容易な緯度経度データへ変換するための環境整備を行った。温暖化予測データの簡易可視化ツールをインストールしてグリッド変換前後のデータ確認などを行えるようにした(図(4)-3)。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでの統合評価モデルにおいて重要視されていなかった、詳細な陸域生態系プロセスを導入した陸域排出シナリオを作成し、RCP6データとして国際的な気候変動予測研究コミュニティに対しシナリオ提供をおこなった。RCPs土地利用変化排出シナリオの整合性評価を行い、地球システムモデルを用いた研究における、バイオエネルギー利用によるCO₂回収貯留(CCS)を通じた土地利用変化影響の重要性を提唱した。気候変化に対する土地利用変化影響の評価を行うことにより、生物地球物理学的要因と生物地球化学的要因のシナリオごとの重要性の違いを示した。

(2) 環境政策への貢献

RCP2.6におけるバイオエネルギーを利用したCCSといった農地拡大シナリオやRCP4.5における政策的な森林拡大などによる陸域炭素循環への影響の評価、土地利用変化シナリオによる将来気候へ影響評価を行い、将来の持続可能な土地利用のあり方についての政策決定に向けた科学的知見を蓄積した。

6. 国際共同研究等の状況

国際的な陸域モデル研究グループであるILAMB会議において、地球システムモデル研究における土地利用変化感度実験の重要性を発表し、その後のLUCID-CMIP5相互比較実験において、日本のモデルチームからの貢献を行った。この結果については、ドイツMax Planck Institute for Meteorology (MPI-M)のVictor Brovkin氏らと共同で、Planet Under Pressure 2012会議において発表を行った。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari, E. Kato, P. R. Shukla, Y. Yamagata and Mikiko Kainuma (2011): An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. *Climatic Change*, 109, 59-76.
- 2) Kato, E. T. Kinoshita, A. Ito, M. Kawamiya and Y. Yamagata (2011): Evaluation of spatially explicit emission scenario of land-use change and biomass burning using a process-based biogeochemical model. *Journal of Land Use Science*, doi:10.1080/1747423X.2011.628705.
- 3) Hajima, T., T. Ise, K. Tachiiri, E. Kato, S. Watanabe, M. Kawamiya (2012): Climate change, allowable emission, and earth system response to representative concentration pathway scenarios. *Journal of Meteorological Society Japan*, 90, 417-434.

<査読付論文に準ずる成果発表> (「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可。)

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Kato, E., M. Kawamiya, T. Kinoshita, and A. Ito (2011): Development of spatially explicit emission scenario from land-use change and biomass burning for the input data of climate projection. *Procedia Environmental Science*, 6, 146-152.

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 加藤悦史：土地利用変化・森林火災が陸域炭素循環に与える影響のモデリング．第3回気象庁・地球環境フロンティア研究センター研究懇談会，2008年1月．
- 2) Kato, E. : Global estimate of emissions from vegetation fire for IAM scenario and ESM. 2nd workshop on Climate Risk Assessment, February 2008.
- 3) Kawamiya, M. : A survey on climate research in Japan and its future . 1st International Workshop on KAKUSHIN Program, February -March 2008.
- 4) Kato, E. : Modelling the impact of wildland fire on global terrestrial carbon emissions. 1st International Workshop on KAKUSHIN Program, February -March 2008.
- 5) Kato, E., A. Ito, and M. Kawamiya: Modeling the global emissions from vegetation fire for the scenario data of integrated assessment model. AGU 2008 Fall Meeting, San Francisco, December 2008.
- 6) Kato, E. : Modeling the Global Vegetation Fire Emissions for the Scenario Data of Integrated Assessment Model. 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, Yokohama, February 2009.
- 7) Kato, E., A. Ito, and M. Kawamiya: Global mapping of terrestrial emissions from biomass burning and land-use change for the use of climate projection. 8th International Carbon Dioxide Conference, Jena, Germany, September 2009.
- 8) Kato, E., M. Kawamiya, T. Kinoshita, and A. Ito: Spatially explicit scenario of terrestrial emissions from biomass burning and net land-use change for the use of climate projection. AGU 2009 Fall Meeting, San Francisco, December 2009.
- 9) 加藤悦史：予測モデルで利用される、土地利用シナリオ、土地利用変化排出推定プロトコルについて．第57回日本生態学会，東京，2010年3月．
- 10) Kato, E., M. Kawamiya, A. Ito, and T. Kinoshita: Development of spatially explicit emission scenario from land-use change and biomass burning for the input data of climate projection. Analysis, Integration and Modeling of the Earth System (AIMES) Open Science Conference, "Earth System Science 2010: Global Change, Climate and People", Edinburgh, UK, May 2010.
- 11) 加藤悦史：予測モデルで利用される、土地利用シナリオ、土地利用変化排出推定プロトコルについて．日本気象学会 2010 年度秋季大会「第9回統合的陸域圏研究連絡会」，京都，2010年10月．
- 12) Kato, E., and M. Kawamiya: Analysis of consistency of global net land-use change carbon emission scenario using offline vegetation model and earth system model. American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.

- 13) Kato, E.: Evaluating land use change simulations for AR5. International Land Model Benchmarking (ILAMB) Project Meeting, Irvine, USA, January 2011.
- 14) Kato, E., and M. Kawamiya: Evaluation of future net land-use change carbon emission scenario using offline vegetation model and earth system model. The 13th international specialist meeting on the next generation models of climate change and sustainability for advanced high performance computing facilities, Honolulu, USA, March 2011.
- 15) Kato, E., and M. Kawamiya: Evaluating global land-use change carbon emission in RCP scenarios. 3rd iLEAPS International Science Conference, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 18-23 September 2011.
- 16) Kato, E., and M. Kawamiya: Evaluating global carbon emission and climate response for the land-use change scenarios of RCPs. GEO-Carbon Conference: Carbon in a changing world, FAO, Rome, 24-26 October 2011.
- 17) 加藤悦史、河宮未知生: RCP土地利用変化シナリオによる土地利用変化炭素排出と気候への影響. 日本気象学会 2011年度秋季大会、名古屋、2011年11月.
- 18) Kato, E., and M. Kawamiya: Evaluating global land-use change scenario: carbon emission in RCP scenarios and its effects on climate response. AGU 2011 Fall Meeting, San Francisco, December 2011.
- 19) Kato, E.: Evaluating global land-use change scenario: Carbon emission in RCP scenarios and its effects on climate response. International workshop on climate change projection and high performance computing climate, 2012, Maui, USA, March 2012.
- 20) Kato, E., and M. Kawamiya: Evaluating global carbon emission and climate response for the land-use change scenarios of Representative Concentration Pathways (RCPs). Planet Under Pressure 2012, London, March 2012.
- 21) Brovkin, V., L. Boysen, V. Arora, E. Kato, and V. Gayler: Effect of land use changes on climate in CMIP5 projections. Planet Under Pressure 2012, London, March 2012.

(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

8. 引用文献

- 1) Houghton, R.A. (2008): Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850-2005, TRENDS: A Compendium of Data on Global Change, Oak Ridge, TN: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- 2) Hurtt, G., L.P. Chini, S. Frolking, R. Betts, J. Feddema, G. Fischer, K. Klein Goldewijk, K. Hibbard, A. Janetos, C. Jones, G. Kindermann, T. Kinoshita, K. Riahi, E. Shevliakova, S. Smith, E. Stehfest, A. Thomson, P. Thornton, D.P. van Vuuren, and P.Y. Wang (2009): Harmonisation of Global Land-Use Scenarios for the Period 1500-2100 for IPCC-AR5. iLEAPS Newsletter, 7, 6-8.
- 3) Ito, A., J.E. Penner, M.J. Prather, C.P. de Campos, R.A. Houghton, T. Kato, A.K. Jain, X. Yang, G.C. Hurtt, S. Frolking, M.G. Fearon, L.P. Chini, A. Wang, and D.T. Price (2008): Can We Reconcile Differences in Estimates of Carbon Fluxes from Land-Use Change and Forestry for the 1990s? Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 3291-3310.
- 4) Lamarque, J.-F., T.C. Bond, V. Eyering, C. Granier, A. Heil, Z. Klimont, D. Lee, C. Liousse, A. Mieville, B. Owen, M.G. Schultz, D. Shindell, S. Smith, E. Stehfest, J. van Aardenne, O.R. Cooper, M. Kainuma, N. Mahowald, J.R. McConnell, V. Naik, K. Riahi, and D.P. van Vuuren (2010): Historical (1850-2000) Gridded Anthropogenic and Biomass Burning Emissions of Reactive Gases and Aerosols: Methodology and Application. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 7017-7039, doi:10.5194/acp-10-7017-2010.
- 5) Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari, E. Kato, P.R. Shukla, Y. Yamagata, and M. Kainuma (2011): An Emission Pathway for Stabilization at 6 Wm⁻² Radiative Forcing. Climate Change, Special Issue, doi:10.1007/s10584-011-0150-5.
- 6) Moss, R., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F.B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thomson, J.P. Weyant, and T.J. Wilbanks (2010): The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. Nature, 463, 747-756.
- 7) Mouillot, F., A. Narasimha, Y. Balkanski, J.-F. Lamarque, and C. Field (2006): Global Carbon Emissions from Biomass Burning in the 20th Century. Geophysical Research Letters, 33, L01801, doi:10.1029/2005GL024707.
- 8) Ramankutty, N., H.K. Gibbs, F. Achard, R. Defries, J.A. Foley, and R.A. Houghton (2007): Challenges to Estimating Carbon Emissions from Tropical Deforestation. Global Change Biology, 13, 51-66.
- 9) Randerson, J.T., G.R. van der Werf, G.L. Giglio, J. Collatz, and P.S. Kasibhatla (2007): Global Fire Emissions Database, Version 2 (GFEDv2.1), Data Set. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, <http://daac.ornl.gov/>, doi:10.3334/ORNLDAAAC/849.
- 10) Schultz, M.G., A. Heil, J.J. Hoelzemann, A. Spessa, K. Thonicke, J.G. Goldammer, A.C.

- Held, J.M.C. Pereira, and M. van het Bolscher (2008): Global Wildland Fire Emissions from 1960 to 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB2002, doi:10.1029/2007GB003031.
- 11) Shevliakova, E., S.W. Pacala, S. Malyshev, G.C. Hurtt, P.C.D. Milly, J.P. Caspersen, L.T. Sentman, J.P. Fisk, C. Wirth, and C. Crevoisier (2009): Carbon Cycling Under 300 Years of Land Use Change: Importance of the Secondary Vegetation Sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, doi:10.1029/2007GB003176.
 - 12) Strassmann, K.M., F. Joos, and G. Fischer (2008): Simulating Effects of Land Use Changes on Carbon Fluxes: Past Contributions to Atmospheric CO₂ Increases and Future Commitments Due to Losses of Terrestrial Sink Capacity. *Tellus B*, 60, 583–603.
 - 13) Thonicke, K., S. Venevsky, S. Sitch, and W. Cramer (2001): The Role of Fire Disturbance for Global Vegetation Dynamics: Coupling Fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology and Biogeography*, 10, 661–677.

S-5 Integrated Research on Climate Change Scenarios to Increase Public Awareness and Contribute to the Policy Process

4. Spatially Explicit Emissions and Land-use Change Scenarios through Integrated System Analysis

Principal Investigator: Yoshiki YAMAGATA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN
Tel: +81-29-850-2545 / Fax: +81-29-850-2960
E-mail: yamagata@nies.go.jp

Cooperated by: Japan Agency for Marine-earth Science and Technology (JAMSTEC)

[Abstract]

Key Words: Spatially explicit scenario, RCPs, Emissions, Land use change, Social economic model

Detailed spatial interactions between climate change predictions and socioeconomic changes have yet to be analyzed in IPCC Fourth Assessment Reports. So far, socioeconomic scenarios that divide the world into different political units have been used for prediction. However, future consideration of sustainable low-carbon society will require the use of climate prediction models of greater spatial resolution to analyze global warming mitigation and adaptation for specific land uses. In Theme 4, we have sought to develop geographically explicit LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) scenarios.

Sub-theme 1: We have developed a new method for downscaling population, GDP, changes in land use (pasture land, cropland, cities, etc.) generated by country-specific socioeconomic models to a 0.5° mesh. Our findings are being used to predict climate change worldwide as one of the Representative Concentration Pathways (RCPs) to be set forth in the IPCC Fifth Assessment Report. We also developed spatially explicit land-use change scenarios specific to certain localities, the Tokyo Metropolitan Area. These scenarios are used in the field of urban climate model research to analyze heat-island effects.

Sub-theme 2: We developed a new method to estimate spatial distribution of GHGs and aerosols sources. The emissions data for each sector and region estimated by the Asia-Pacific Integrated Model were converted into a 0.5° mesh, using the socioeconomic data created in sub-theme 1 as spatially explicit indicators. We also investigated uncertainties in the estimation of gridded emission data.

Sub-theme 3: We collected geographically delineated data on socioeconomic

activity, carried out bottom-up analyses of urban GHG emissions, developed methods for estimating urban growth and population density through using remote-sensing images, and analyzed the relationship between urban compactness and CO₂ emissions. We also built an international network of researchers in cooperation with the Global Carbon Project.

Sub-theme 4: We used a land-use change scenarios corresponding to RCPs to analyze changes in CO₂ emissions caused by future changes in land use (reductions in forest cover, etc.). We also analyzed these scenarios to estimate cumulative carbon emissions derived from land-use changes. Our results point to the need to combine land-use change scenarios with terrestrial ecosystem and climate models and consider mitigation and adaptation scenarios that take into account carbon-cycle feedbacks, including global warming impacts.

We conducted research on land-use change scenarios that include a geographical distribution perspective, and we made our findings available to researchers involved in global and regional climate change prediction and impact assessment.