

B-11 地球温暖化による高山・森林・農地生態系の影響、適応、脆弱性の評価に関する研究
(1) 自然、人工生態系の総合影響予測と適応策の総合評価に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

社会環境システム研究領域

筑波大学生物科学系

東京大学大学院

原沢英夫

福島武彦

大政謙次・清水庸

平成14～16年度合計予算額	38,646千円
(うち平成16年度予算額)	11,437千円)

[要旨] 本研究は、(1)生態系の影響評価のための気候シナリオの高度化、(2)自然生態系への影響評価手法の高度化、及び(3)生態系への影響低減のための適応策の検討を進めることを目的とするが、加えて気候シナリオなど得られた知見を本研究プロジェクト全体で共通情報として活用することも目的としている。(1)については、本研究プロジェクト開始当初は、IPCCのデータ配布センターが提供している気候モデルの将来予測の結果を主として利用したが、後に気象庁・気象研究所が開発した気候統一シナリオ(地域気候モデルによる日本域20kmの現状と将来気候値)が影響研究に利用できるようになった。この気候統一シナリオは、総合科学技術会議が推進する地球温暖化研究イニシャティブの一環として気象庁・気象研究所が、影響・リスク研究プログラムにおける利用を前提に開発、作成されたものであり、本研究プロジェクトでは、この気候統一シナリオも共通シナリオの一つとして利用を図ることとしたが、あわせて本シナリオのもつ特性も検討した。また積雪シナリオについては、日単位の気候データを用いることにより、積雪深だけではなく積雪開始や消雪時期などの積雪期間の予測が可能となる方法を考案した。(2)に関しては、温暖化の日本の自然・人工生態系への影響を植生帯の変化影響として捉え、予測するモデルを開発した。このモデルは既開発の生物地理モデル(BIOME3/Japanモデル)をもとに、生物地球化学的な要素を取り込んだ、より総合的な植生帯の変化を予測モデルである。(3)に関しては、温暖化の生態系への影響を低減する適応策については、利用できる方法が社会システムにおける適応策に比べると限定されるが、従来の自然保護や身近な自然を守る手法は適応策としても活用できることから、より広く知見を収集するとともに、本研究プロジェクトの各サブ課題で得られた適応の知見も含めて、検討した。

[キーワード] 脆弱性評価、気候シナリオ、総合化手法、生態系モデル、適応策

1. はじめに

IPCCの第三次評価報告書¹⁾、地球温暖化の日本への影響報告書²⁾によれば、すでに地球温暖化が進行していることから世界各地で温暖化の影響が顕在化しており、日本でもとくに気候の変化に脆弱な生態系に影響が現れていることが明らかになってきた。日本の生態系は非常に多様で北は寒帯林から南は亜熱帯林まで広がり、降水量が比較的多いことから、気温が植生分布の支配的要

因であり、温量指数などの指標によって、気候と植生分布の関係が研究されてきた。

温暖化の影響を巡る世界的な動向を勘案すると、影響予測の対象範囲が地球規模、大陸規模（アジアなど）から、国、さらに地域へと空間的により詳細に予測、評価していく傾向にあること、これを裏付けるためのより空間的に精度の高い地域気候シナリオの作成が盛んになってきたこと、さらに温暖化に対して脆弱な部門や地域が特定された後には、適応策を実施した場合の影響低減効果や、その実施可能性についての検討も行われるようになってきた。また、とくに開発途上国においては、影響がより深刻になることから、アジア太平洋地域における影響の全体像を明らかにする必要性も高まってきた。

こうした温暖化影響研究の進展を受けて、より地域的に詳細な影響予測を行うために、地域気候シナリオの開発、影響モデルの高度化、影響低減のために適応策の検討が研究課題として重要になってきた。

2. 研究目的

本研究は以下の3つの課題からなる。気候シナリオなど得られた知見は、他のサブ課題研究で共通に利用するために、データセットを作成して提供した。

（1）生態系の影響評価のための気候シナリオの高度化

本研究プロジェクトでは、IPCCの提供する7つの気候シナリオについて現状気候の再現性、影響研究への利用可能性について検討したが、4つの気候シナリオは現状を十分再現しており、アジア地域及びサブ地域レベルへ充分適用可能であるが、降水量などの予測値は変動が大きいことがわかった。日本における気候シナリオについてもダウンスケーリング手法を用いて整備を進めたが、本研究プロジェクトを構成する各サブ課題毎に必要とする空間精度や気象項目も異なるため、共通に利用する気候シナリオとしては、GCMをもとにしてダウンスケーリングした空間精度10kmの気候シナリオを利用した。

その後、IPCCの新しいシナリオ（SRESシナリオ）にもとづく気候予測の計算が進み、SRES排出シナリオによる気候シナリオが利用可能になったこと、また、地域気候モデルの開発が進み、日本においては20kmメッシュの現状と将来気候値が利用可能になってきた。後者については、地球温暖化研究イニシアティブの気候モデルプログラムと影響・リスク評価プログラムの協力研究の一環として、気象庁・気象研究所が影響予測のために地域気候シナリオの開発を進めていたが、2003年8月に初版が提供され、2004年9月に第二版が提供された。とくに第二版は夏季の西日本における降水量などに気候現状など第一版では問題のあった点が大いに改良されており、本プロジェクトの最終年度ではあったが、第二版を共通シナリオとして活用することとした。また、気候シナリオの関連して、積雪シナリオの作成を行い、積雪開始と消雪時期を予測が可能となった。

（2）自然生態系への影響評価手法の高度化

日本における生態系の温暖化の影響を総括的に予測できるモデルを開発し、現状植生との比較など検証を行ったのちに、日本の気候シナリオに基づき、自然生態系への影響を予測、評価する。

（３）生態系への影響低減のための適応策の検討

適応策については、従来各分野において、例えば、生物、生態系、健康、生気象の分野で、それぞれ定義されて使われてきた。IPCCはこうした従来の適応の定義をしらべ、温暖化影響の一環として適応策を定義し、またいろいろな評価の視点を整理している。本研究では、生態系への影響を低減するための適応策について、内外の事例を調査して、可能な適応策の情報を一元的に収集し、高山生態系、森林生態系、農地生態系における適応策を検討する際の、基礎的情報とする。IPCCをはじめ内外の文献より適応策の考え方を整理するとともに、各サブ研究課題からえられた知見も含めて、自然生態系の適応策について検討した。

３．研究方法

（１）生態系の影響評価のための気候シナリオの高度化（地域気候シナリオと雪のシナリオ）

IPCCの提供しているSRES排出シナリオに基づく気候シナリオをデータベース化して、他のサブ課題グループに共通シナリオとして提供する。また、雪のシナリオについては、アメダスデータとGCMデータから日単位で、積雪深さを推測する方法を開発する。本プロジェクト期間中に提供された気象庁・気象研究所の開発して気候統一シナリオ（第一版：2003年版および第二版：2004年版）を入手し、共通シナリオとするとともに、その特性について検討する。

（２）生物物理－生物化学的植生モデルの開発

既開発の生物地理的なモデル(BIOME3/Japanモデル)をもとに、生物化学的な要因を考慮した生物物理－生物化学的植生モデル(BGGCモデル：Bio-GeoGraphical and geoChemical-vegetationモデル)を開発して、温暖化の影響を予測した。また、従来の植生影響を検討する際に多用されている筑後モデルとBIOME3/Japanモデルとの比較検討を行った。

（３）生態系への影響低減のための適応策の検討

適応策については、内外の研究事例や実施事例を広範に収集したうえで、とくにIPCCの第三次評価報告書や内外の研究事例を広範に収集したうえで、適応策の類型化を行った。適応策については、いくつかの評価軸があるが、とくに時間軸による分類、すなわち事後的適応か、予見的適応かに分かれる。生態系を対象とした場合には、動植物を対象としていることから、事後的適応に限定されるが、さらに各サブ課題の研究成果も含めて、自然生態系における適応策の検討を行った。

４．結果・考察

（１）生態系の影響評価のための気候シナリオの高度化

日本のように狭い国において、将来の気候変化の影響を予測解析するために一番問題となるのは、将来の気候予測値である。従来、狭い地域における将来気候値を得る方法としては、１）一般に200～300kmで結果が得られている気候モデル(GCM)の結果をダウンスケーリングすることによって地域・局所の20～50kmの気候値を得る場合と、２）GCMの結果をもとに、より狭い地域で詳細な気候モデルを実行して結果をえる地域気候モデルを用いる方法（ネスティングと呼ばれる）、さらに最近では３）全球を20～50kmの格子で計算することが地球シミュレータを使った研究が進められている。

- ・ IPCCの提供するGCMから気候シナリオを作成

本研究プロジェクトでは、研究開始当初利用可能であった、1) のGCMの将来気候予測結果をダウンスケリングして地域レベルの影響評価の使えるよう空間精度10km（二次メッシュ）の気候シナリオを用いた。現在、IPCCのデータ配付センター(Data Distribution Center)から提供されている気候予測結果は、表1に示したとおりである。いずれもIPCCの新しい排出シナリオ（SRESシナリオ）に基づいた気候予測値をもとにして作成、提供されている¹⁾。

表1 IPCC が提供している気候予測結果²⁾

研究機関名	略称	モデル名	SRES シナリオ				期間
Max Planck Institute für Meteorologie	MPIM	ECHAM4 /OPYC3		A2		B2	1990-2100
Hadley Centre for Climate Prediction and Research	HCCPR	HADCM3		A2		B2	1950-2099
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	CSIRO	CSIRO-Mk2	A1	A2	B1	B2	1961-2100
National Centre for Atmospheric Research	NCAR	NCAR-CSM		A2			2000-2099
		NCAR-PCM		A2		B2	A2:1980-2099 B2:2000-2099
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL	R30		A2		B2	1961 - 2100
Canadian Center for Climate Modeling and Analysis	CCCma	CGCM2		A2		B2	1900-2100
Center for Climate Research Studies (CCSR) / National Institute for Environmental Studies (NIES)	CCSR /NIES	CCSR/NIES AGCM + CCSR OGCM	A1 A1FI A1T	A2	B1	B2	1890 - 2100

ここで、SRES シナリオの欄で示した記号は、表2に示した6つある SRES シナリオの違いを表している。各将来気候値を内挿法により、空間分解能 10km に補間し、各モデルの空間的解像度を統一したデータに加工するとともに、データベース化した。またデータを可視化することによって、影響評価に必要なデータを検索、利用できるようなシステム化を行った。図1は可視化した事例を示している。

表2 SRES シナリオ名と概要

シナリオ名	シナリオの概要
A1	高成長型社会シナリオ
A1B	バランス型
A1FI	化石燃料依存型
A1T	高度技術指向型
A2	多元化社会シナリオ
B1	循環型社会シナリオ
B2	地域共存型社会シナリオ

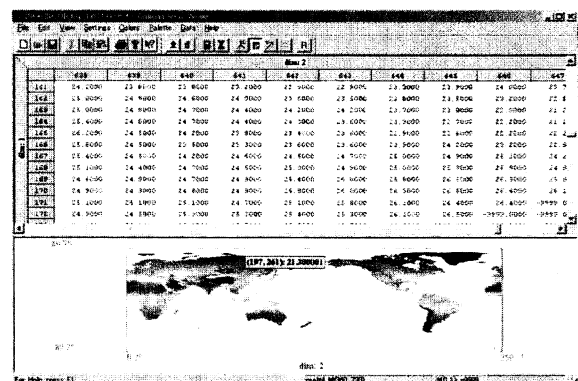


図1 気候シナリオの可視化の例

・気候統一シナリオ

本研究プロジェクトの途中段階で、気象庁・気象研究所が開発した地域気候モデルの将来気候予測値が影響研究で利用可能となった。この地域気候モデル(RCM20と呼ぶ)の概要は表3に示したとおりである。参考のために、2003年に提供された第一版と2004年に提供された第二版の内容等を示している。

第二版では、日本全域で、空間分解能20km、3時点の将来気候値、1980～2000年（現状気候再現値）、2031～2050年と2081～2100年（将来気候値）であることが特徴である。利用にあたっての留意点としては、1)各年の将来予測値は、気候モデル上の年であり、実際の年の結果とは一致しないこと、2)50年後・100年後の気候変化では、年々の変動や気候の周期変化などの影響も現れているため、必ずしも温暖化に伴うシグナルが現れているわけではないこと、3)温暖化の影響を解析する場合には、20年間のデータについての平均や偏差などの統計量を算定して利用することである。こうした点を考慮して、本研究プロジェクトでは、この3期間の将来気候値を平均値として用いることとした。

表3 気候統一シナリオ（2004年第二版）の特徴

項目	第一版の内容(2003年)	第二版の内容	備考
収録要素	地上気圧、海面更正気圧、1.5m 高度日気温(平均、最高、最低)、25m 高度日平均気温、比湿(1.5m、25m 高度)、日降水量、日降雪量(850hPa 気温-6℃)、湿数、10m・25m 風速(u・v 成分)、雲量(下層・中層・上層)	第一版に加えて下記の変数が追加された。 蒸発量、地中熱流量、潜熱、10m 比湿、流出量、顕熱、積雪量(水当量)、気温・湿数(300, 500, 850, 1000hPa)、風速東西成分(1.5m, 300, 500, 850, 1000hPa)、風速南北成分(1.5m, 300, 500, 850, 1000hPa)、ジオポテンシャル高度(100, 300, 500, 850hPa)	
期間	1981～2000、2081～2100 年の各年	1981～2000、2031～2050、2081～2100 年の各年	IPCC 地球温暖化第3 次評価報告書による SRES シナリオの A2 シナリオに準拠
投影座標系	ランベルト正角円錐図法	同左	
格子間隔	20km(各方向)、東西・南北ともに 103 格子	20km(各方向)、東西・南北ともに 109 格子	
緯・経度	140° E - 30° N, 60° N	同左	
提供	2003 年 8 月に提供開始	2004 年 9 月に提供開始	第二版については気象庁より 2005 年 5 月に地球温暖化予測情報第 6 巻として公表された。

図2は関東地方を切り出して、日最高気温について現状および将来予測を事例として地図化したものである。

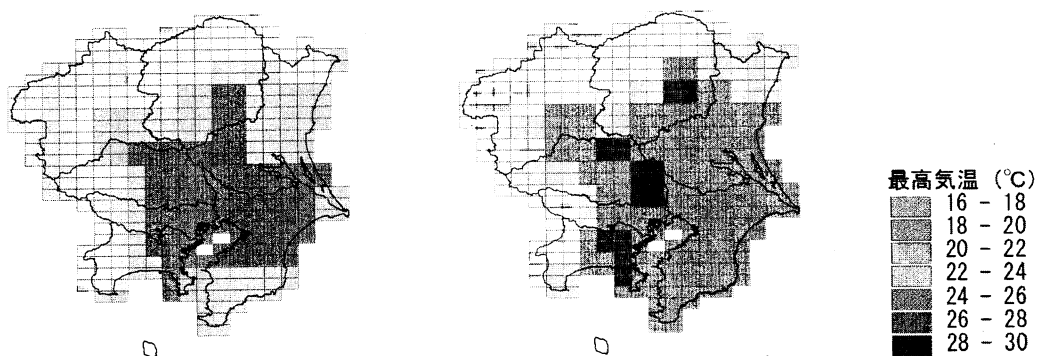


図2 関東地方の日最高気温の現状(1981～2000年平均及び将来予測値(2081～2100年平均))

・雪のシナリオ

温暖化の生態系への影響を予測、評価する場合、とくに日本では積雪による影響が大きいことがわかっている。また従来の気候シナリオは、そのデータ量の制約から月単位での積雪深などに限定されていた。そこで、日単位の積雪深および積雪期間に着目した予測方法を検討した。具体的には、GCMによる気候予測値を用いて、積雪環境予測が可能なモデルを構築するために、①気象庁が提供している AMeDAS データの降水量と気温を入力データとして、日単位の積雪深と積雪期間の推定を可能とするモデルを作成し、GCMの結果にもとづいた温暖化後の日本全体の日単位の積雪深・積雪期間を予測するものである。従来、GCMの月単位の値を用いていたために、積雪開始時期や積雪終了(融雪・消雪)時期の情報が得られなかったが、今回開発したモデルにより日単位での予測が可能となった。

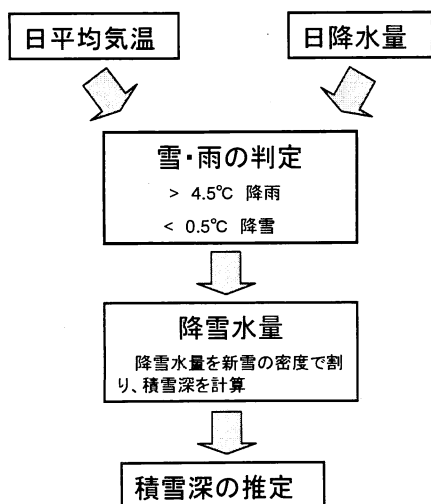


図3 積雪深の予測のフロー

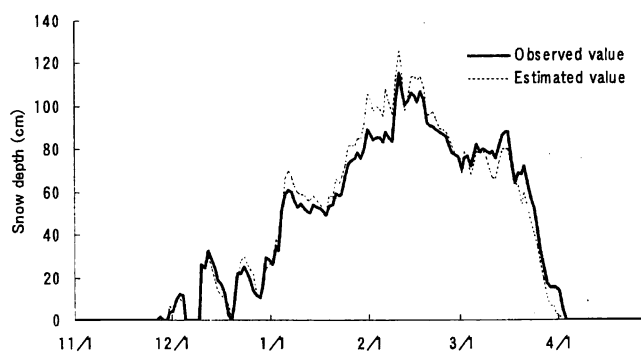


図4 積雪モデルの検証(北海道西部、美国)

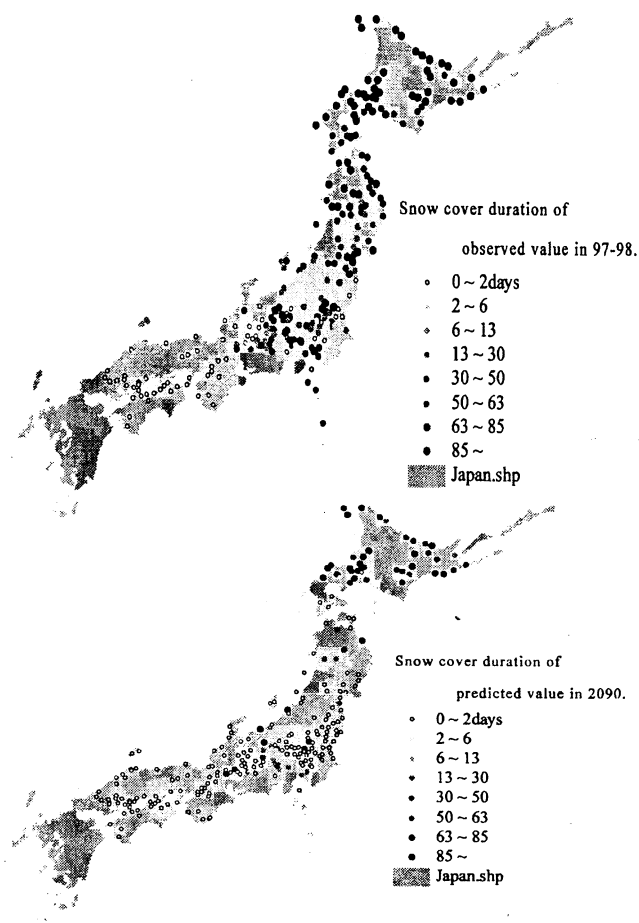


図5 積雪期間の予測（上：現状、下：将来予測）

図3がAMeDASを用いた積雪深予測のフローである。本方法を適用して適合度を調べて結果を図4に示した。積雪期間をほぼ再現できたと言える。本モデルを用いて、GCMの結果から1997～98年と、2090年における積雪期間を予測して示したのが図5である。積雪期間が大きく短縮されることが予測された。こうした積雪期間の短縮は、各地域の生態系に大きな影響をもたらすと考えられる。

（2）生物物理－生物化学的植生モデルの開発

既に開発した生物地理的なモデル(BIOME3/Japanモデル)をもとに、生物化学的な要因を考慮した生物物理－生物化学的植生モデル(BGGCモデル：Bio-GeoGraphical and geoChemical – vegetationモデル)を開発して、従来の植生影響を検討する際に多用されている筑後モデルとBIOME3/Japanモデルとの比較検討を行った。

①植生分布を予測するモデルのレビュー

CO₂をはじめとする環境要因の植生分布や物質循環への影響について、モデルを用いた研究が盛んに行われている。環境予測に関する情報の需要は細分化されており、現象を方程式化することで現象を実際に計算機上で再現させるプロセスモデルの必要性が高まっている。

表4 植生モデルの類型と特徴・問題

植生モデルのタイプ	特徴	備考・モデル名（開発者、年）
統計モデル	入力と出力データを統計的に関連づける	プロセスを明示的に表現できない。温暖化などのように気候－植生の関連構造自体が変わると、外挿は一般に困難
数値（プロセス）モデル 1) 地球植生動態モデル (Dynamic Global Vegetation Model)	異なる植生間の相互作用プロセスや土壌などのプロセスを組み込んだモデルであり、気候変化と植生の動的な予測が可能である	植生間の相互作用など複雑な現象を単純化して考慮することの問題などがある。 IBIS (Foley et al., 1996)、Hybrid (Friend et al., 1997)、LPJ、SDGVM、VECODE (Vroevink et al., 1997)、TRIFFID
2) 生物地理モデル (Bio-geographical モデル)	気候と土壌の関数を用いて、どのタイプの生態系が潜在的に分布するかをシミュレートする	DOLY (Woodward et al., 1996)、MAPSS (Neilson, 1995)、BIOME3 (Haxeltine and Prentice, 1996)
3) 生物地球化学モデル (Bio-geochemical モデル)	あらかじめ与えられた生態系分布を条件として、生態系内における各種の生物化学物質のフラックスをシミュレートする	BIOME-BGC (Running, 1993) と TEM (Melillo, 1993)、CENTURY (Parton et al. 1993)

従来の研究では、統計モデルを用いて、入力と出力データの関連性を定義づけるものが多い（表4）。しかし、統計モデルは、モデル内におけるさまざまなプロセスを明示的に表現できないため、拡張性に乏しく、必要に応じてモデルを改変して、指標を算出することが難しいという問題を残している。

現在、地球温暖化による自然生態系への影響評価のために世界で使われている数値モデルは大きく2つに分けられる。地球植生動態モデル (Dynamic Global Vegetation Model) と、生物地理モデル (Bio-geographical model) と生物地球化学モデル (bio-geochemical model) である。生物地理モデルは主に、気候と土壌の関数を用いて、どのタイプの生態系が潜在的に分布するかをシミュレートする。生物地球化学モデルではあらかじめ与えられた生態系分布を条件として、生態系内における各種の生物化学物質のフラックスをシミュレートする。

本研究では、気候、土壌、植生の相互作用を考慮したプロセスモデルである Bio-GeoGraphical and geoChemical - vegetation model（以下、BGGC model）を開発した。具体的には、日本を対象として、陸上生態系を表す指標の一つでと考えられる純一次生産量（NPP、Net Primary Production）を、窒素および炭素の物質循環のモデル化を通して推定する。陸上生態系を対象とした温暖化影響評価モデルにおいて、窒素循環プロセスのモデル化は、将来的に、施肥を通じた陸上生態系の適応策へと繋がる可能性がある。

②モデルの構造

本モデル、BGGC model は、生物地理 (Bio-geographical) モデルと生物地球化学 (Bio-geochemical) モデルを統合したモデルである。生物地球化学モデルは、植生分布を前提条件として与え、炭素などの物質循環を推定するモデルであり、限られたサイトのみを対象とすることが多いが、本モデルでは、NPP をもとに、植生分布を推定する生物地理モデルとの統合により、面的な植生分布の推定と同時に、気候、土壌、植生の大気の相互作用を扱うことが可能になる。

本モデルでは、利用可能な水分量により制限された Leaf Area Index (LAI) および気孔コンダクタンスの下で、光合成によって空気中から炭素を取り込み、土壌中から窒素・水を取り込む。

次に、光合成生産物が枯死することで土壌に炭素および窒素が還元される。降雨によってもたらされた水分によって各元素の循環が土壌層間や植物との間で行われる。土壌中では同時に、炭素を取り込みながら有機物を分解することで CO_2 を排出し、窒素を植物が利用可能な状態に無機化する。土壌窒素濃度は、根粒菌による窒素固定、降雨による窒素降下、外部からの流入出によっても変化する。

③ NPP の推定

BGGC model の結果の指標として、NPP に着目している。植物は大気中の CO_2 を光合成を行うことによって有機物として同化する能力を持つ。 CO_2 の濃度増加が問題となっている現在、植生の二酸化炭素吸収能力を正確に評価することは重要な問題となっている。そこでモデルによって算出される NPP 推定結果の比較検討のために筑後モデル⁴⁾⁵⁾の結果、石神ら (2002)⁶⁾により日本を対象に改良された BIOME3 によって算出された NPP のデータを使用した。

筑後モデルは植生の NPP とバイオマス量を評価する目的で、世界各地の森林の純一次生産力に関する資料および気候データ（日射量、降水量）を解析し導き出された経験モデルである。植物の光合成と蒸散による炭酸ガスと水蒸気の流れの理論的考察をもとに、年間純放射量と放射乾燥度をパラメータとした経験式により作成されており、日本全域の NPP を乾物重で $380 \times 10^6 \text{ t/年}$ と推定している。このモデルを用いて、日本の気候データによって計算された国内の純一次生産力は、森林の年間生産力の分布と高い相関を示している。出力された潜在自然植生分布図を図 6 に示した。この出力結果は日本の潜在自然植生分布の特徴を捉えたものとなっている。

④モデルの精度

NPP の精度を評価するために誤差の分析を行った。誤差は、筑後モデルの値を 100%とし、その値からの差が何%あるのかを各グリッド（377420 メッシュ）について調べた。BGGC model では筑後モデルに対して平均 101.4%、誤差の絶対値の平均が 5.63%であった。BIOME3 では筑後モデルに対して平均 109.8%、誤差の絶対値の平均が 11.31%であった。

積雪地帯における誤差を改善するために、積雪・融雪モデルを組み込み、さらに、全国一律となっている土壌条件について、土壌テクスチャのメッシュデータを用いる。その上で群落内のガス拡散モデルを組み込むことにより植生ダイナミクスをより確からしく表現できる可能性があることがわかった。また、土壌中の窒素濃度とリンクしたことにより将来的に施肥を通じて林業や農業への応用も考えられる。

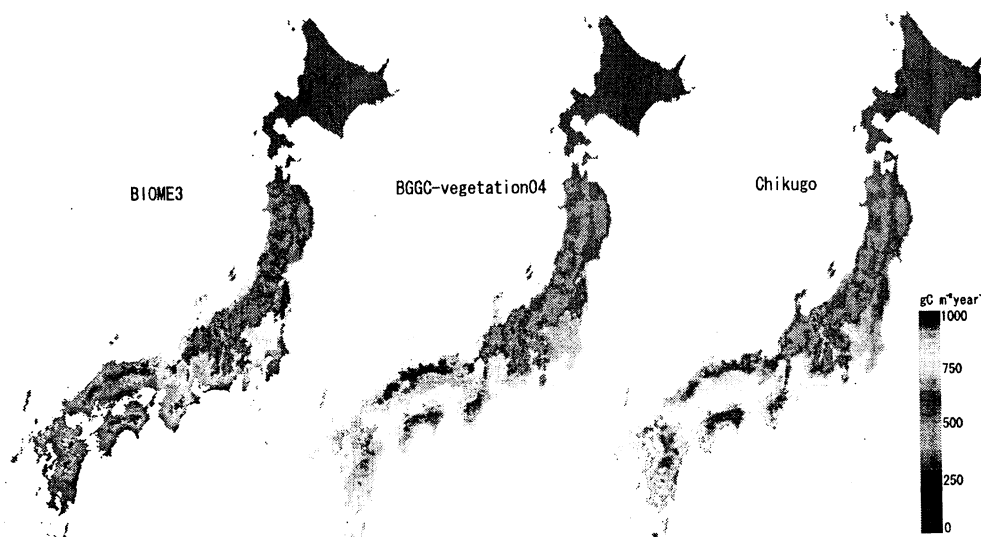


図6 植生モデルによる予測値の比較

(3) 生態系への影響低減のための適応策の検討

①適応の分類

温暖化問題の解決するための対策には、1) 温暖化の原因となっているCO₂など温室効果ガスの削減策(緩和策、Mitigation)と2) すでに進行している温暖化の結果、顕在化している影響を低減する適応策(Adaptation)がある。とくに後者の適応策が、気候変動枠組み条約、京都議定書における国際的な温暖化防止の議論の中で重要性を増してきた。ひとつには、気温上昇や温暖化と関連あると考えられる異常気象の多発により、先進国、途上国に多大な被害が発生していることから、途上国など経済力が乏しく、影響を軽減するために諸対策をとれないので、国際的に適応策を進めるための仕組みや基金が必要になってきた点が挙げられる。IPCCも適応策については影響研究を中心に検討を進めている。

適応策については、いくつかの分類軸があるが、影響が現れてからの適応(事後的適応)と影響がでる前の適応(予見的適応)に分けることができる⁷⁾⁸⁾。影響を受ける対象が、生態系の場合には、事後的な適応が中心となるが、社会経済システムなど人間社会の場合には、両方の適応が可能となる。このため生態系の適応策については、限られたものにならざるを得ないことが指摘しうる。生態系の適応策を検討する場合には、長期にわたって徐々に進む生物の進化や遺伝適応については、扱わない。これは、現在温暖化の問題となっているのは、せいぜいここ50~100年の間に生じる気候の変化を対象としていることが挙げられる。表5は、IPCCの第三次評価報告書に示された適応の事例であり、予見的、事後的な適応の観点から分類した事例となっている。

表5 適応策の類型化の例⁷⁾

		予見的適応	事後的適応
自然生態系			・ 成長期間の変化 ・ 生態系構成要素の変化 ・ 湿地の移動 ・ 動・植物の移動（高緯度、高地方向への移動）
社会経済システム	個人	・ 保険の購入 ・ 嵩上げた家屋の建設	・ 農耕法の変更 ・ 保険掛金の変更 ・ 空調設備の設置
	公共	・ 早期警報システム（洪水、熱波） ・ 新たな建築基準や設計標準 ・ 再配置のインセンティブ	・ 保証金、補助金 ・ 建築基準の施行 ・ 養浜

②生態系を対象とした適応策

生態系を対象とした適応策を文献や本プロジェクトのサブ課題の検討結果から表6のように整理した。適応のタイプと具体的な事例を取り上げた。

表6 生態系を対象とした適応策の例（文献7、8などから作成）

適応策のタイプ	適応策の概要
・ 自然保護区・保全区域を結ぶ通路・回廊 ・ 動植物の拡散・移動ルート確保	・ 断片化している保護区と保護区域を結びつける通路 ・ 生息地マトリックスの保全や整備 ・ 保護区および保全区域の配置や管理に温暖化影響を考慮 ・ 自然の移動通路の設置（例：南北方向に伸びる保護区を設置） ・ 鳥の渡りの中継地、繁殖地の保護・保全
・ 自然保護区の計画・設計・管理・運営	・ 緯度・高度に沿った環境条件の変化（地形、土壌など）を考慮した自然植生の維持 ・ 保護区の周囲に緩衝地帯を設置 ・ 生息地の断片化および道路建設を最小限に抑制 ・ 在来種個体群内および個体群間における遺伝子多様性の保全 ・ 生物多様性の「ホットスポット」の保護 ・ エコトーン（推移帯）の機能保全（遺伝子多様性の貯蔵域）
・ 動物の人工繁殖や移動 ・ 植物の自然生息域外での保全や移植	・ 絶滅危惧種やダメージを受けやすい種の生息域拡大（拡散力の乏しいもの、特殊性の高いもの、個体群の小さな種、生息範囲が限定的な固有種、生息限界域の個体群、遺伝子学的に数が少ないものがホット・スピーシーズ） ・ 人工飼育による繁殖や生息地の再生による特定種の保護 ・ 種の生態や行動に関する基礎的な研究の推進
・ 害虫の自然駆除作用、種子の拡散（野生生物による）	・ 土壌の安定化や害虫駆除などの目的で移入された種 ・ 天敵種の減少を補う殺虫剤・除草剤など農薬の適正利用 ・ 害虫駆除自体が他の害虫を招く場合がある。殺虫剤の使用は土壌汚染・水質汚濁を引き起こす可能性あり。
・ 総合的土地・水管理	・ 生態系や生物多様性の損失や持続不可能な利用をもたらす対策の排除 ・ 人間のニーズと保全・持続可能な利用の間のトレードオフを解消する方法の開発・確立 ・ 広域な土地や水管理プログラムの立案、土質・水質劣化をおさえる森林管理（造林など） ・ 侵入種の排除や駆除 ・ 地域住民による監視・モニタリング（病害、害虫、侵入種、生態系機能など悪影響の検出）

温暖化の影響を軽減する適応策の立案、実施にあたっては、その生態系に対して悪影響をもたらす場合があることも考慮しておくことが必要である。例えば、生物多様性に対して直接的（例：生息地の破壊）と間接的（例：新たな種の移入や管理様式の変更）な影響が挙げられる。

5. 本研究により得られた成果

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

(1) 温暖化の生態系への影響評価を行ううえで、従来問題となっていた将来気候予測値の空間精度が粗い点については、気候モデルや地域気候モデルの発展もあり、日本域について空間精度で20 kmの将来気候値（気候シナリオ）が利用できるようになった。本研究プロジェクト期間中に利用可能となった、日本域、空間精度で20kmの地域気候シナリオ（気象庁・気象研究所）は、日本への温暖化の影響を国レベルから都道府県レベルまで拡張することが可能となった。また、生態系影響を評価するためには雪の影響が重要であることから、降雪時期を予測するモデルを開発したが、日単位の気候データを用いることにより、積雪深だけではなく積雪開始や消雪時期などの積雪期間の予測が可能となった。この日単位の地域気候シナリオと雪の予測モデルを利用することによりきめ細かな影響の予測が可能となった。

(2) 既開発のBIOME3/Japanモデルをもとに、生物化学的な要因を考慮した生物物理－生物化学的植生モデル（BGCCモデル：Bio-GeoGraphical and geochemical – vegetation モデル）を開発して、従来の植生影響を検討する際に多用されている筑後モデルとBIOME3/Japanモデルとの比較検討を行った。その結果、BIOME3よりもNPPの予測精度があがったことがわかった。このモデルを用いて温暖化時の植生変化の予測を行った。

(3) 温暖化の影響が顕在化しつつある現在、発生する影響を緩和する適応策が重要性を増してきた。とくに生態系は温暖化の結果生じる気温上昇に脆弱であることから、生態系の適応策を立案、実施していくことが必要になってきた。しかし、利用できる適応策は社会システムにおける適応策に比べると限定されるのは確かであるが、従来の自然保護や身近な自然を守る手法は適応策としても活用できる。実際、高山生態系では、すでに影響が出始めているので、こうした適応策の検討が具体的事例を通じて、効果を評価することが可能になると考えられる。

今後の研究課題としては、以下の点が挙げられる。

- ・地域気候シナリオを活用した、地域レベルの影響評価モデルの高度化と応用
- ・生態系の適応策の標準化と適応策の効果の計測手法の開発と応用
- ・日本の生態系や動植物の影響に対して脆弱な地域（ホットスポット）の特定と適応策の具体的検討

6. 引用文献

- 1) 気象庁, 2004: 気候統一シナリオ第二版資料.
- 2) IPCC, 2003: Future climate in world region: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios, 83pp.
- 3) IPCC, 2001: Climate Change and Biodiversity, IPCC Technical Paper V, 77pp.
- 4) Uchijima, Z. and Seino, H., 1985: Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation (1) Chikugo Model for evaluating net primary productivity. Journal

of Agricultural Metrology, 40 (4), 343-352.

- 5) 清野 豁・内嶋善兵衛, 1985: 自然植生の純一次生産力の農業気候学的評価 (2) 日本における純生産量の評価. 農業気象, 41 (2), 139-144.
- 6) 石神靖弘, 2000: Biogeography Modelを用いた日本における潜在的な植生分布の温暖化影響予測. 東京大学大学院農学生命科学研究科 修士論文.
- 7) IPCC, 2001: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. The contribution of the Working Group II to the IPCC, 1034pp.
- 8) 環境省, 2001:地球温暖化の日本への影響2001報告書.

7. 国際共同研究等の状況

IPCCは、第四次評価報告書の作成を開始したが、本サブ研究課題の研究参加者が影響、適応、脆弱性を扱う第二作業部会報告書の執筆者として選考された（10章アジアおよび17章適応策の責任執筆者）。執筆活動を通じて、本研究プロジェクト及び日本の影響研究の成果を積極的に第四次評価報告書に反映させることができると考えられる。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学術誌（査読あり）>

- ① Ozaki, N., T. Fukushima, H. Harasawa, T. Kojiri, K. Kawashima and M. Ono: Hydrological Processes, 17, 2837-2853 (2003)
“Statistical analyses on the effect of air temperature fluctuations on river water quality”
- ② Nogami, H., S. Machida, R. Kumano, and H. Harasawa: Jour. Global Environment Engineering, 10, 53-63 (2004)
“Study on the impacts of global warming on river flows throughout Japan”

<学術誌（査読なし）>

- ① 吉野正敏・原沢英夫: 気候影響・利用研究会会報, 22, 13-22 (2003)
「Adaptation, Adaptability, Adjustment, Acclimatization, Acclimation などの定義 対応する日本語について----アンケートの結果から----」
- ② 原沢英夫・西岡秀三 (編著): 地球温暖化と日本人・自然への影響評価 第三次報告書, 古今書院, 385-406 (2003).
「10 章 適応、脆弱性評価 (原沢英夫)」
- ③ 吉野正敏・福岡義隆編: 環境気候学, 東京大学出版会, 77-88 (2003)
「3. 1 地球温暖化の影響問題 (執筆担当: 原沢英夫)」
- ④ 大政謙次・原沢英夫・(財) 遺伝学普及会編: 遺伝別冊 No. 17 地球温暖化 世界の動向から対策技術まで, 6-16 (2003)
「地球温暖化問題における国際的な動き (執筆担当: 原沢英夫)」
- ⑤ 総合科学技術会議環境担当議員・内閣府政策統括官 (科学技術政策担当) 共編、総合科学技術会議・地球温暖化研究イニシャティブ・気候変動分野報告書, 地球温暖化研究の最前

線－環境の世紀の知と技術 2002－, 71-81 (2003)

「3-1 地球規模の影響（執筆担当者：原沢英夫）」

- ⑥ AESTO ニュース, No. 4, 2004 Spring, P2 (2004)

「温暖化のわが国に与える影響の評価について（執筆担当：原沢英夫）」

- ⑦ 土木学会環境工学公式・モデル・数値集, 546-560 (2004)

「1.4 温暖化の影響（執筆担当者：高橋潔・原沢英夫）」

- ⑧ Ichikawa, A. eds., Global Warming □ The Research Challenges A Report of Japan's Global Warming Initiative, Springer, 85-100 (2004)

“3.1 Impacts and risks of global warming (Hideo Harasawa)”

(2) 口頭発表（学会）

- ① H. Harasawa: International symposium on the stabilization of greenhouse gases, Hadley Centre, Met Office, Exeter, UK, 1-3 February 2005

“Key vulnerabilities and Critical Levels of Impacts in East and South East Asia”

(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

- ①環境省地球環境研究総合推進費一般公開シンポジウム「温暖化は社会基盤、市民生活、生態系にどのような影響を与えるか、適応・対策は？」（2003年11月25日、於 JA ホール、東京）

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

総合科学技術会議の進める地球温暖化研究イニシャティブがとりまとめた気候変動分野報告書（平成15年3月）において、研究成果が引用された。