

## B-11 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究

### (1) 生物圏の総合影響評価手法と脆弱性の評価

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 環境計画研究室

筑波大学 生物科学系

東邦大学 理学部

龍谷大学 経済学部

国土環境株式会社

原沢英夫・高橋潔・肱岡靖明

及川武久

丸田恵美子

増田啓子

糸井正夫・宮下良治・矢野達也

平成11～13年度合計予算額

50,202千円

(うち平成13年度予算額

15,403千円)

[要旨]各種生態系の影響・適応・脆弱性評価の基本となる各サブ研究課題に共通の気候シナリオを開発するとともに、自然生態系の脆弱性を包括的に評価する手法を検討した。

①共通の気候シナリオの開発： IPCCが推奨している気候シナリオについて現状気候の再現性、気候シナリオの影響研究への利用可能性について検討した。その結果、7つのうち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整備を進めたが、各サブ課題毎に必要な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をもとにした空間精度10kmの気候シナリオとした。

②包括的な自然生態系への影響評価手法の開発： IPCCが推奨している気候シナリオに基づいて作成した日本における気候シナリオを元に、自然生態系への影響を包括的に予測、評価するモデルを開発し、予測精度について実際の植生データをもとに比較検討した。その結果、日本の自然生態系への影響を包括的に評価しうるモデルを作成することが出来た。また、このモデルを適用することにより、日本の自然生態系の脆弱な地域を特定することができた。

③生物季節による温暖化の影響検出： この100年間に日本では、約1℃の気温上昇が観測された。とくに20世紀後半の気温上昇は人為的な温暖化によるが、こうした温暖化の影響がすでに脆弱な雪氷や自然生態系に現われていることが示されている。1950年代から継続的に観測されている生物季節データを活用して温暖化の影響を日本全国を対象としてマクロ的に捉える方法について検討した。その結果、日本では、この50年間に桜の開花が5日ほど早まっており、2002年春季に桜の開花が2週間ほど早くなったのは、温暖化と自然の変動性の両者の影響が相乗的に現われた結果と考えられる。桜などの生物季節データは温暖化影響の検出に有効であることがわかった。

[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、生物季節

#### 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が 2001 年 4 月に公表した気候変化の最新の知見をまとめた第三次評価報告書では、過去 100 年間に 0.6℃地球の平均気温が上昇しており、人類が何も温暖化の対策をとらないならば (IPCC の新しい排出量シナリオ SRES)、2100 年に地球の平均

気温が 1.4～5.8℃上昇し、海水面が 9～88 cm 上昇すると予測した。さらに IPCC はここ 50 年間の温暖化は人間活動、すなわち石油や石炭などの化石燃料の消費や土地利用の改変が原因であることを観測データや気候モデルにより確認した。温暖化がすでに始まっているならば、気候変化に対して脆弱な雪氷や自然生態系では影響が出ているはずであり、こうした温暖化の影響検出についても研究事例が世界各地で報告されている。温暖化の影響は 100 年で数℃気温が上昇するような平均的な現象として現れるとともに、気候の自然変動性 (variability) の変化としても現れ、さらに十分検証されてはいないが、異常気象の発生頻度や強度の変化となって現れると考えられる。このため、自然生態系への気候変化の影響を定量的に把握する方法を開発することが、将来の気候変化の影響を的確に検出し監視すること、また影響を最小限にとどめるための対策 (特に適応策) を立案、実施する場合に必須の情報となる。

本サブ課題では、気候変化の自然生態系への影響研究を進めるために、各サブ課題共通の情報として必要となる気候シナリオを開発するとともに、包括的に自然生態系への影響を予測し、評価する手法を検討することを目的としている。具体的には、①温暖化の影響、適応、脆弱性評価の一連のプロセスにおいて、前提条件となる気候シナリオを作成し、本研究全体の共通の前提条件として活用し、各種生態系への影響を相互比較できるようにすること、②そして、各種の生態系の影響を総括的に評価しえるような方法を考案して、各サブ研究課題から得られた知見と対したうえで、個別の生態系の視点ではなく、日本全体で総合的に評価しえる方法を開発して、適用することである。さらに、③生物季節データを用いて、ここ 50 年間の温暖化の影響が現われているかどうかについて検討を加えた。この際、気候変化－影響・適応との関係を脆弱性として把握する。

## 2. 温暖化の影響評価手法

### 2.1 温暖化の影響、適応、脆弱性

温暖化に代表される気候変化は自然生態系に影響を与えるが、その影響の程度は影響を受ける自然生態系 (一般に曝露単位、或いは曝露ユニットと呼ばれる) の気候変化などに対する感受性 (Sensitivity) と適応能力 (Adaptability or Adaptable Capacity) によって決まる。自然生態系に影響を与える気候変化などは、外力としてとらえることができるが、気候変化の他にも、人間活動などが自然生態系や生物種にとって外力となりうる。

図 1 は、気候変化などの外力と自然生態系や社会経済システムの感受性、適応能力との関係を簡単に示したものである。IPCC ではさらに、自然生態系のもつ特性として、回復可能性や頑健性を考慮している。外力の大きさと自然生態系がもつ感受性と適応能力の大小によって自然生態系の脆弱性 (vulnerability) が変化する。例えば、外力が一定でも、影響を受ける 2 つの自然生態系を考えた場合、気

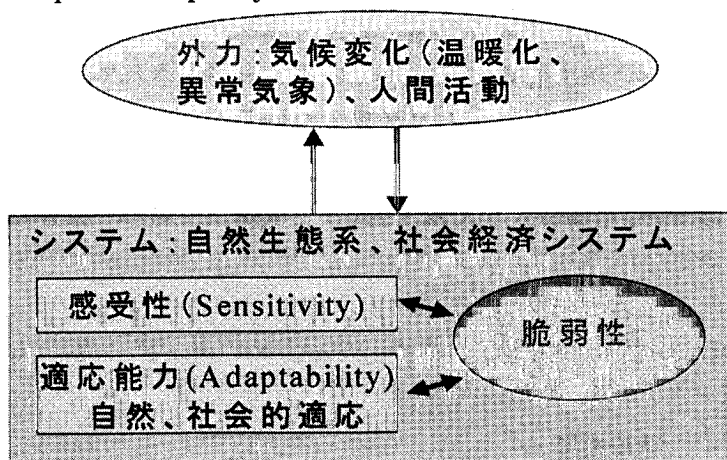


図 1 影響、適応、脆弱性評価

候変化、例えば高温に対して感受性が高い植生の方が脆弱性は高い。社会経済システムのように、インフラや制度などによって気候変化への適応能力が高められているのに比較して、自然生態系は、種々の動植物から構成されており、一般に脆弱であると考えられる。

気候変化の影響を評価し、適応能力を評価する一連の方法が IPCC によって示されている。IPCC は、1994 年に気候変動に関する影響・適応評価についての技術ガイドラインを特別報告書として出版している。ここで適応は温暖化しつつある気候に生態系や社会などのシステムが自然（自発的）に適応する場合や、あるいは意図的（政策的）に適応する（させる）ことにより、温暖化の影響や被害を最小限にとどめ、或いは上手く利用することによって便益を得ようとする対応策である。日本では温暖化対策としては、二酸化炭素などの温室効果ガスを緩和策（mitigation、削減策）がまずとりあげられるが、世界的には適応策と緩和策を併せて対応策としている。

また、適応策については気候変動枠組条約第 2 条でも取り上げられていることから、京都議定書でも温暖化の重要な政策・措置と位置づけている。適応が影響分野の一環としてとりあげられているのは、従来の気候変動や温暖化の影響については、例えば穀物栽培などでは、冷夏や猛暑により穀物生産が変化すると、翌年は気候に適応させる種々の対策がとられるなど影響との関連が緊密であることが挙げられる。

## 2. 2 温暖化の影響評価のフレーム

図-2 は、IPCC ガイドラインに示された影響・適応評価フレームワークと手順を拡張して示したものである。影響・適応評価においては、将来の気候条件として大気・海洋結合全球気候モデル（AOGCM と呼ばれるが、以下 GCM と略記）の計算結果（気候シナリオと呼ぶ）を入力として用い、種々の分野の影響評価モデルを用いて、将来の影響を予測する。影響が甚大な場合については、適応策を行った場合の被害軽減について物理的（例えば、穀物収量の変化）或いは経済的な効果（例えば被害額）を推定する。

## 2. 3 気候シナリオの検討

### (1) 気候シナリオ

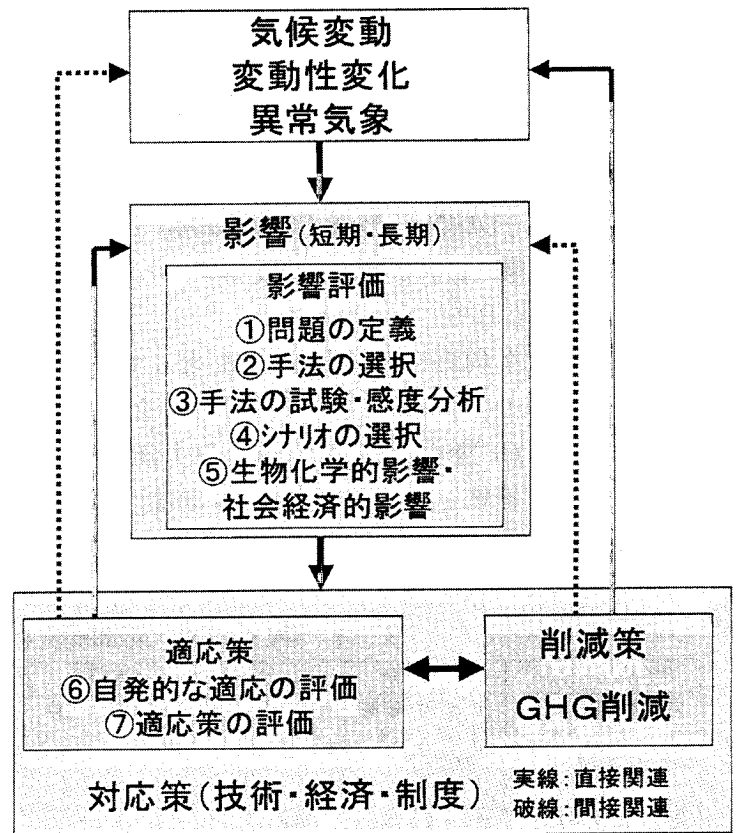


図-2 気候変動の影響・適応評価のフレームワーク  
(①～⑦はIPCCガイドラインの7ステップ)

影響評価の前提となる将来気候値（気候シナリオ）は、GCM の計算結果から得られる。しかし、従来 GCM の計算には多大な計算時間がかかることから、影響研究に最新の計算結果を利用できるのは、英国や米国などの一部の影響研究者に限られていた。IPCC は、GCM 研究と影響研究のリンクをはかるために、最新の GCM の計算結果を収集、蓄積して、提供するデータ提供センター（DDC：Data Distribution Center）を英国とドイツに開設した。今後はこのセンターで収集、提供される GCM 結果から得られた気候シナリオが影響評価に標準的に利用されると考えられる。

表－1 が現在利用可能な DDC で配布している GCM データの概要（提供機関、空間精度など）を比較したものである。7つの GCM は、それぞれの特徴があるため、影響研究を進めるに際しては、まず各 GCM の予測結果の特性を十分把握しておく必要がある。そこで、本研究の対象となるアジア地域とそのサブ地域（6 地域）について、7つの GCM の結果が、現状気候の要素（気温、降水量）を再現しているかを検討した。

表－1 IPCC DDC で配布提供している GCM 計算結果

	ECHAM4	HadCM2	CSIRO	CCCma	GFDL	NCAR	CCSR/NIES
研究機関(国)	ドイツ気候 研究センター (独)	ハドレイセンター (英)	CSIRO (豪)	カナダ気候モデ ル分析センター (カ ナダ)	地球流体力学 研究所 (米)	国立大気研 究センター (米)	東大気候システ ム研究センター/国 立環境研 (日)
AGCM 空間分解 能、層数	2.8°x2.8° L19	2.5°x 3.75° L19	3.2°x5.6° L9	3.7°x3.7° L10	4.5°x7.5° L9	4.5°x7.5° L9	5.6°x5.6° L20
OGCM 空間分 解能、層数	2.8°x2.8° L11	2.5°x 3.75° L20	3.2°x5.6° L21	1.8°x1.8° L29	4.5°x 3.75° L12	1°x1° L20	2.8°x2.8° L17
コントロール CO <sub>2</sub> 濃度	354 ppmv	323 ppmv	330 ppmv	295 ppmv	300 ppmv	330 ppmv	N.A.
CO <sub>2</sub> 濃度増加率	1% yr <sup>-1</sup>	1% yr <sup>-1</sup>	0.9% yr <sup>-1</sup>	1% yr <sup>-1</sup>	1% yr <sup>-1</sup>	1% yr <sup>-1</sup>	1% yr <sup>-1</sup>
計算期間 (年)	Cont : 240 GHG : 240 GHG+A : 240	Cont : 240 GHG : 240 GHG+A : 240	Cont : 219 GHG : 219 GHG+A : 219	Cont : 200 GHG : 200 GHG+A : 200	Cont : 1000 GHG : 100 GHG+A : 300	Cont : 136 GHG : 136 GHG+A : 136	Cont : 210 GHG : 210 GHG+A : 210
2xCO <sub>2</sub> 時の全球 気温上昇 (°C)	1.3	1.7	2.0	2.7	2.3	2.3 (est.)	N. A.
2 x CO <sub>2</sub> 平衡時 の感度 (°C)	2.6	2.5	4.3	3.5	3.7	4.6	N. A.

注：Cont: Control, GHG: Greenhouse Gas, GHG+A: GHG+ Aerosol

## (2) GCM 計算結果の現状気候の再現性

7つの AOGCM の漸増数値実験によって得られた計算結果を用いた。結果の一部を図-3に示した。図-3は、アジア地域のうち、東アジア地域について年間の気温変動と降水量変動をプロットしたものである。図中の実線が観測された値である。この図から、7つの GCM の結果から GCM によって特徴があることがわかる。他の地域についても同様な解析を行った結果、本研究の対象地域であるアジア大陸では、HadCM2、ECHAM4、CSIRO、CCSR/NIES モデルが観測された現在気候の再現性を十分有していた。しかし、AOGCM の多くは地域レベルの現在気候の再現性について限界があり、モデルの空間的分解能を上げること、物理過程の取り扱いを改良することが必要であることが、指摘しうる。

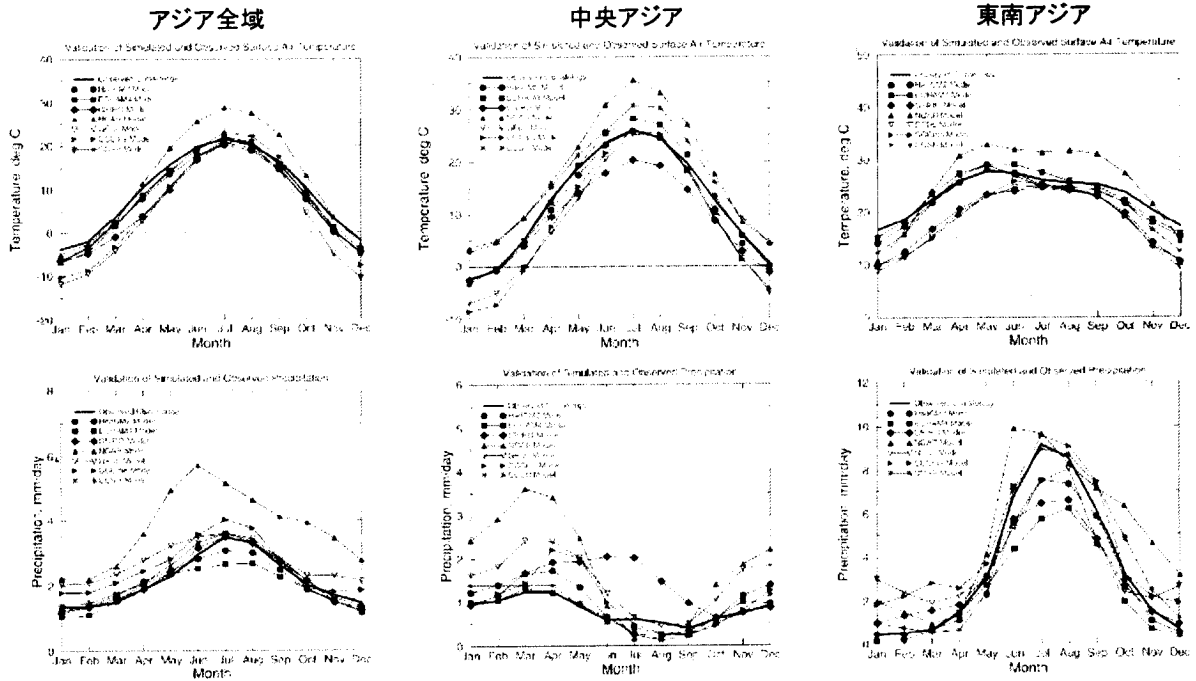


図-3 7つのGCMによる気温、降水量の予測値（全域、中央、東南アジア）

### (3) 将来気候シナリオの作成と解析

現状気候を十分再現している4つのGCMによる漸増実験の出力にもとづきアジア大陸の将来時点の気候応答を調べた。これらの4つのGCMは、温室効果ガスや硫酸エアロゾルの将来の排出量を考慮している。GCMから、アジア地域とその6つの小地域の脆弱性評価を実施するための将来気候シナリオを求めた。その結果、概して、アジア地域で予測される気温上昇は2050年代(2040~2069)と2080年代(2070~2099)の両期間で北半球の冬季が夏季に比べて高いこと、地表面気温の上昇は、全季節について北方アジアで最も顕著であること、がわかった。これらの4つのGCMはアジア地域のほぼ全域で水文循環が強まり、年降水量の増加を予測している。モデル間の降水量の差は、アジア大陸全体で平均しても相当大きく、とくに北半球の冬季で顕著であり、現在利用しうるGCMの予測結果のうち降水量については信頼性に限界があることが指摘できる。こうした気候シナリオの特徴については、温暖化の影響評価を進めるに際してまず留意する点である。

### (4) 日本の将来気候シナリオ

IPCCで収集、配布しているGCMデータは空間精度(分解能)が表-1に示したように緯度経度で数度であり、日本のような狭隘な国について将来気候の影響を評価するためには、工夫が必要である。現在のところ、こうした地域レベルの気候シナリオを得る方法としては、1)GCMの結果を境界条件として地域気候モデル(RCM: Regional Climate Model)により、20~50km程度の空間精度で地域気候を求める方法(一般にネスティングと呼ばれる)、2)GCMの計算結果を統計的に補間して地域気候に落とす方法(統計的ダウンスケーリング)、3)類似の気候条件

をもつ他地域や同一場所では過去のある時点の気候条件などを再構成して用いる方法（類似気候法）などがある。地域気候モデルは現在開発中であり、一部予測結果が CD-ROM で配布されている状況であるが、影響研究にすぐに利用できるまでには至っていない。そこで、統計的なダウンスケーリングによる日本を対象とした気候シナリオを用いることとした。地域気候シナリオは、農業環境研究所が開発した 10km メッシュの現状気候値に、先述の IPCC データ提供センターが配布している GCM 及び気象研究所開発の GCM（CD-ROM で配布）の結果をオーバーレイしたものを作成した。空間的な精度は 10km となっている。時点は、10 年間の平均値をとり、2030 年代、2060 年代、2090 年代の 3 時点をとった。図-4 に CCSR/NIES モデルをもちいた気温の 2090 年代の気候シナリオの例を示した。

### （5）成果

本研究のサブ課題に、共通して用いる気候シナリオを作成した。IPCC が提供する GCM の結果をアジア地域とその 6 つのサブ地域に限定して解析した結果、7 つのうち 4 つの GCM の結果が十分現状気候を再現しており、本研究の対象地域であるアジア地域レベルでの影響評価では、前提となる気候シナリオとして十分であることがわかった。しかしながら、降水量などの予測結果のばらつきもあり、今後影響研究をより地域的に精緻なものにしていくためには、GCM の予測の精度をあげることが必要である。

地域レベルの気候シナリオとしては、従来、気温や降水量を任意量を設定する方法や、GCM の結果を空間的に粗くてもそのまま用いることがなされてきた。しかし、温暖化が進むにつれて、より狭い地域での影響評価の必要性が高まり、特に日本のように狭隘な地域の影響評価には、20～50km といった地域気候シナリオが必須である。地域気候シナリオの作成には、地域気候モデルを GCM と一緒に使うネスティングや、GCM の結果を標高などを考慮して統計的に求める方法（ダウンスケーリング）がある。本研究では、日本を対象とすることが中心であり、地域気候シナリオとして共通のものを使う必要があることから、農業環境技術研究所が開発した 10km メッシュに将来気候値作成手法を活用し、IPCC の提供する GCM と合成することのより、地域レベルの気候シナリオを作成した。

## 3. 包括的な自然生態系の予測モデルの開発と適用

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の気候変化の影響、適応、脆弱性を評価した第三次評価報告書（第二作業部会）では、温暖化がすでに始まっていること、とくに温暖化に対して脆弱な氷河や海氷などの物理プロセス、高山植物や希少生物などに既に影響が出ていると結論している。本研究プロジェクトでは、生物圏の脆弱性を評価することを目的としており、高山生態系、気候帯別の森林生態系、農地生態系の温暖化影響を脆弱性マップとして描くことを目的としている。本サブ課題では、各種生態系への影響を包括的に評価する際に利用される生態系モデルを構築し、温暖化の影響に対して全体的にみて、もっとも脆弱な地域を特定することを目的とした。

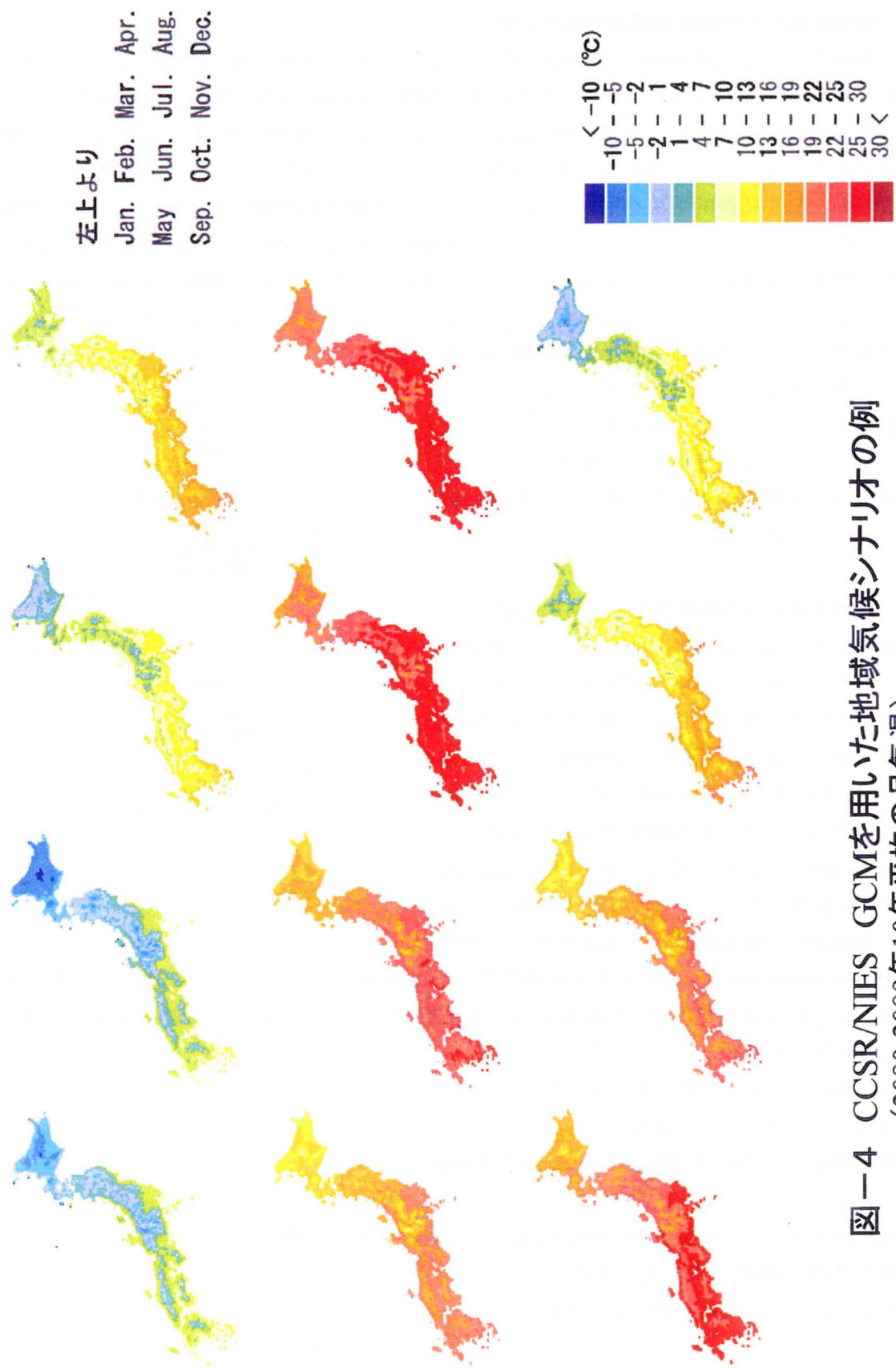


図-4 CCSR/NIES GCMを用いた地域気候シナリオの例  
 (2090-2099年10年平均の月気温)

### 3. 1 温暖化の自然生態系への影響評価モデル

#### (1) 自然生態系への影響評価モデルのレビュー

自然生態系に対する地球温暖化の影響評価モデルはモデルの予測対象と構造により分類される。代表的なモデルの予測対象は、①植生、植物群落や個体の地理的分布の推定、②森林など自然生態系が作り出す純一次生産力 (Net Primary Productivity、NPP) や窒素・炭素などの物質循環の推定である。モデルの予測対象による分類に加えて、方法論もいくつかに分類されており、代表的なものとして統計的手法を用いた経験的モデル、植物生理的なプロセスに基づいて構築されるプロセスモデル (シミュレーションモデル) が挙げられる。これまでわが国においては、植生の分布を推定する場合、統計的手法を用いる場合がほとんどであり、植物の内部の機構や生産プロセスを記述するようなモデルは開発されていない。地球温暖化は、大気中の二酸化炭素濃度の増加と平行して進行するため、自然生態系、特に植生のように温度だけでなく二酸化炭素濃度の変化にも影響を受けるような対象について、影響評価を行うためには植物の生理的側面や群落の構造等を考慮したモデルを用いる必要がある。

#### (2) 自然生態系への影響評価モデルの構築

地球温暖化が日本の植生に与える影響を予測するためにプロセスモデルである BIOME3 に日本付近で予測を行うための改良を加え、潜在的な自然植生の分布を予測し、植生の脆弱性の評価を行った<sup>2)</sup>。BIOME3 は従来別々に開発が進んできた 2 種類のプロセスモデル、①潜在的な植生の分布を気候、土壌などと関連付け予測するモデル (Biogeography model; 生物地理モデル) と、②与えられた植生分布のもとで生態系内の物質循環などを計算するためのモデル (Biogeochemistry model; 生物地球化学モデル) を融合させることを目的として作られたモデルである。地球温暖化などの気候変化が自然生態系に与える影響を予測する場合、この両者を考慮したモデルが必要となってくる。

モデルを構成する要素を挙げると以下のようなになる。

- ・炭素と水フラックスの結合
- ・植生機能タイプ (PFT: Plant Functional Types)
- ・C3/C4 の選択
- ・葉面積と純一次生産量 (NPP: Net Primary Production) の予測
- ・優先 PFT の選択による植生決定

シミュレーションの流れを図-5 に示した。

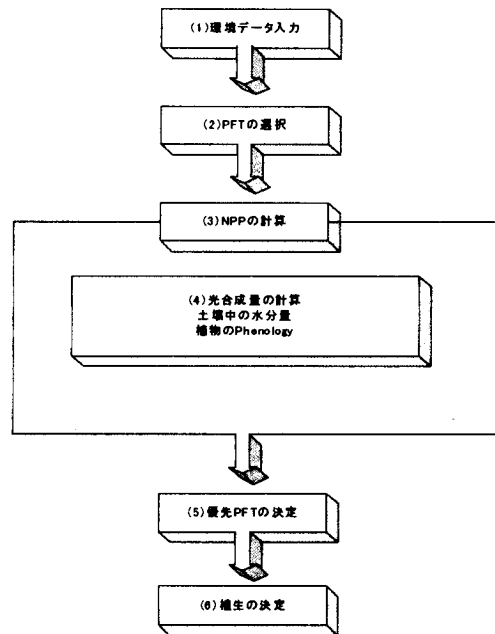


図-5 シミュレーションの流れ



### 3. 2 影響評価モデルの適用と結果

#### (1) 影響評価モデルの適用上の工夫

全球モデルである BIOME3 をベースに対象地域を日本全域に絞り、日本の潜在的な自然植生の推定および地球温暖化が潜在的な自然植生に与える影響を予測するためにモデルの改良を行った。改良にあたっては、メッシュサイズの変更（緯度経度 0.5×0.5 度、日本付近で約 50×50km<sup>2</sup> から、緯度 30 秒、経度 45 秒、約 1km<sup>2</sup>、3 次メッシュへ変更）、最低気温データの作成（PFT 選択の制約条件の一つとして最低気温が必要）、閾値の変更（植生タイプを選択する際に使用する最低気温の条件を変更）を行い、一連の変数や計数を変更した。

#### (2) 的中率

算定した植生分布の算定値を現況植生等と比べることにより、モデルの適合性を検討した。植生調査データをもとに算出したモデル的中率は 69.3%、潜在植生データをもとに算出したモデル的中率は 78.6%と、Tsunekawa, et al.<sup>3)</sup>の作成した統計モデル(的中率約 75%)、野上ら<sup>4)</sup>の暖かさの指数(温量指数)を基にモデル (的中率約 85%)に比べても遜色ない的中率が得られ、本モデルが地球温暖化の自然植生への影響の将来予測に適用できることを確認した。

#### (3) 自然生態系の脆弱性マップ

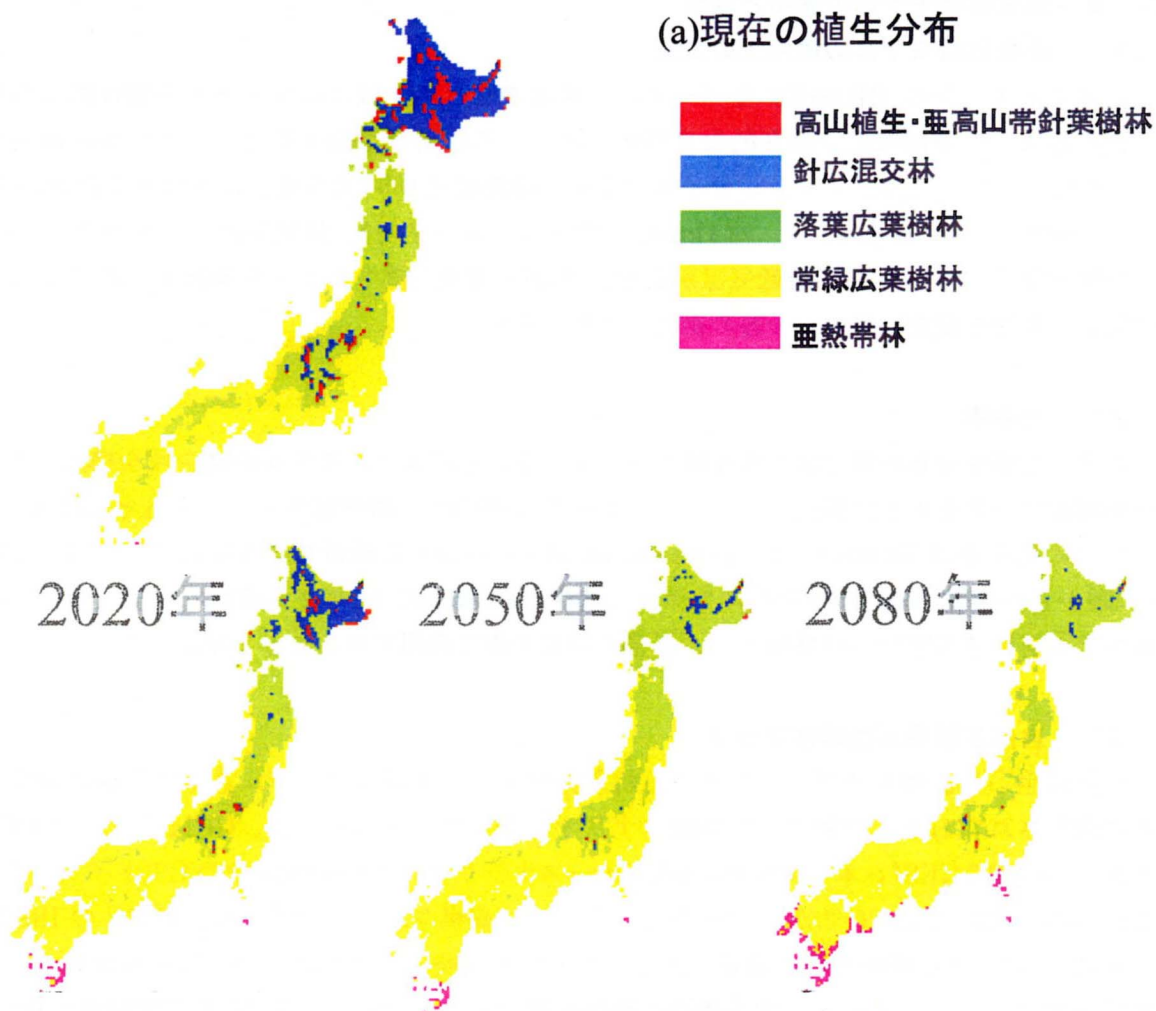
自然植生への影響を予測するために、将来気候として本研究プロジェクトで共通に使用するために開発された日本を対象にした気候シナリオを用いた。具体的には、GCM として CCCma(カナダ)、CCSR/NIES(日本)、CSIRO-Mk2(オーストラリア)、ECHAM4/OPYC3(ドイツ)である。これらの GCM は IPCC のデータ配布センターから提供されたものであり、IPCC の IS92a シナリオに沿った CO<sub>2</sub> 漸増実験の結果である。これらの気候シナリオについては相互比較を行い、影響評価モデルの入力データとする場合の特性を検討した。これらの GCM の空間精度が粗いため、局地的な影響を予測するために、二次メッシュに内挿したデータを使用した。このデータは 10 年ごとの平均値であり、データには気温（最高、最低、平均）、月降水量、月日射量が含まれている。

図-6 は予測結果の 1 例として CCCma による気候シナリオをもとに、算定した結果を現在の植生分布が変化する場所を赤色で示したものである。すなわち、地球温暖化の進行とともに、現在の植生が変化する地点を示している。2020 年、2050 年、2080 年と温暖化が進行するにつれて、植生が変化する部分が広がることが予想された。

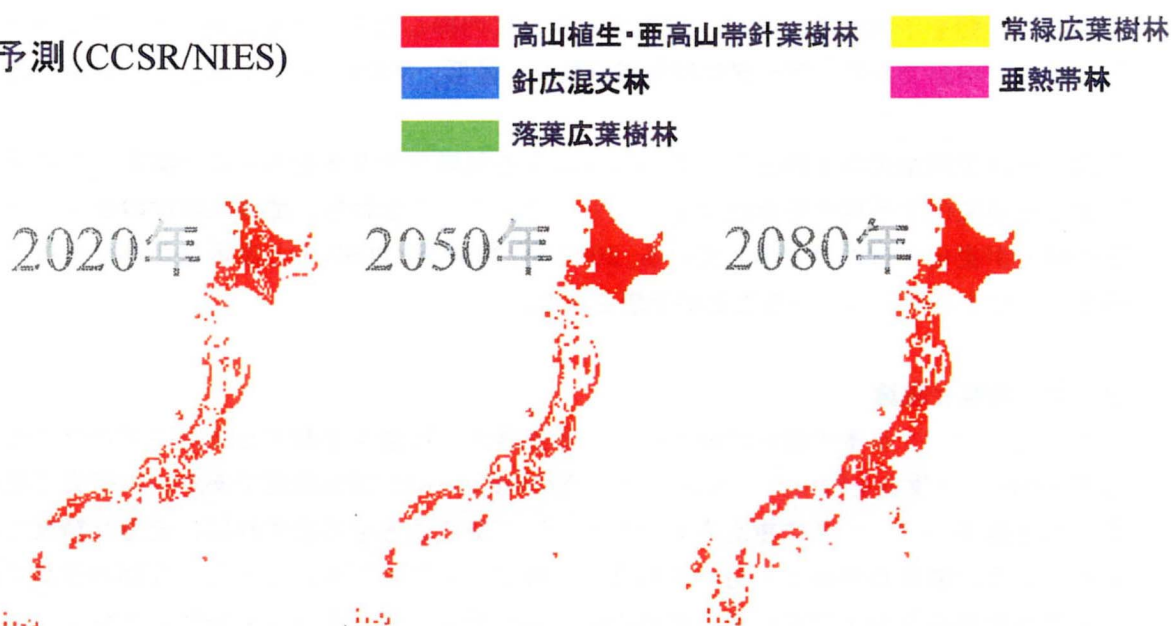
### 3. 3 考察と結論

本研究において日本の潜在的植生に与える温暖化の影響を予測するためにプロセスモデルである BIOME3 の改良を行った。改良したモデル的中率は 70%程度であり、本研究で使用したモデルが生態系のプロセスに重点をおいたモデルであることを考慮すれば、十分な精度を達成しており、日本の潜在自然植生の分布を精度よく推定できるモデルになった。今回の改良では高山植生・北方針葉樹林および針広混交樹林的中率が低く、両者をうまく分類しきれていない。また NPP に関しては筑後モデルとの比較により日本の森林植生の純一次生産力がある程度の精度で推測できたといえる。

(a)現在の植生分布



(b)将来予測(CCSR/NIES)



(c)植生が変化する脆弱な地域

脆弱性が高いと予測された地域

図-6 植生分布の変化予測と抽出された脆弱な地域

本モデルを使用し GCM データを用いた温暖化の影響予測の結果から日本の森林植生は温暖化により大きな影響を受けることが予測された。特に高山植生・亜高山帯針葉樹林は生息地域が狭められる可能性が高いと言える。また常緑広葉樹林は分布範囲が広がることが予測された。この最も大きな原因は温度の上昇であるといえる。NPP に関しては日本全域で増加傾向にあり低緯度地域よりも高緯度地域において増加の割合が大きくなることが予測された。これには温度の上昇と大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇による CO<sub>2</sub> 施肥効果が大きく影響していると同時に、植生分布が変化することも寄与していると考えられる。しかし NPP が増大すればより多くの大気中の CO<sub>2</sub> を吸収することになるため、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が変化し NPP の増加現象に影響を及ぼす可能性もある。

モデルの改良点としては、十分な精度で分類することができなかった植生を的確に分類するために新しいプロセス、例えば積雪の影響や植物群落の 3 次元構造などを新しくモデルに加えることにより、予測精度が向上することが期待できる。

#### 4. 生物季節による地球温暖化の検出と予測

##### (1) 温暖化の影響の検出方法

地球温暖化の雪氷や自然生態系への影響を検出する方法は、気候変化の検出と原因究明の方法論を援用して行われている。気候変化については、①変化の検出：気候要素の変化が経年的に確認できること、例えば、気温が上昇傾向にあることが観測データから統計的に判断できること、また温暖化すると現われる現象が確認できること（例えば、成層圏の温度低下、氷河や海水の融解など）、そして、②その変化傾向を引き起こしている原因が人間活動から排出されている二酸化炭素などの温室効果ガスであることが、確認される必要がある。

①については、過去 140 年間の地球の平均気温データや温暖化すると生じる種々の気温、降水量関連の変数の観測結果から判定される。②については、太陽活動の変化や火山の噴火など自然的要因によるのか、石油、石炭の消費による二酸化炭素の排出など人為的要因によるかを判定する必要がある、従来両者のかかわり方が複雑であり、不確実性が高いとされてきた。IPCC の第三次評価報告書では、GCM を使ったシミュレーションにより、自然的要因、人為的要因単独では、過去の地球の平均気温の上昇傾向は再現できなかったが、両者を考慮した計算からほぼ従来の傾向変動を再現できたことから、ここ 50 年間に観測されている温暖化傾向が自然的要因のみで説明はできず、人為的な要因によると判定した。

影響の研究については、動植物の変化について気温や降水量などの気候因子が支配的な場合もあると考えられているが、一方人間活動の影響（生息地への侵入や建設や開発行為）も大きく、これらの人為的な影響と気候変化の影響を分離することについては議論が多かった。IPCC の第三次評価報告書では、すでに人為的な温暖化の影響が雪氷や動植物に顕在化していると判定したが、その判定基準としては、①動植物の特性（例：生息範囲、開花日）が時間とともに変化していること、②特性が局所的な気温の変化と関連していること、③局所的な気温が時間とともに変化していることを挙げており、このうちの 2 つ条件に合致する研究事例を集めて判定をしている。簡単に言うと、長期の観測データが存在すること（20 年以上が望ましいが、10 年以上でも可能）、生息範囲の拡大や開花が早まっているなど、地域の気温上昇のみが関連していると考えられること、が影響が検出されるための条件となる。実際、10 年～20 年以上の動植物の観測、観察デー

タは非常に限定されるが、IPCC ではこうした条件に合致する 400 種以上の動植物に関する 44 地域における事例を対象としている。事例があるのは、北米、欧州、南極地域が中心である。なお、降水量については、降水量データが気温データに比べて少ないこと、降水量のみと動植物の関連を扱った論文も少ないことから、第三次評価報告書では取り上げられていない。

## (2) 生物季節のデータ

気候変化の長期の生物影響に関する観測データとして生物季節が注目を集めている。生物季節は、気候の季節変化に伴って植物や動物が変化する現象を言う。気象庁では生物季節のデータを 1953 年からとり始めているので 2002 年までの 50 年間のデータの蓄積がある。生物季節は、植物 15 種目、動物 11 種目が観測されており、植物の発芽・開花・満開や紅葉、鳥や動物の初鳴や初見の観測が行われている。植物季節のうち桜の開花日や満開日のデータについては欠測値が比較的少ないが、動物季節データについては、欠測値が多いといった特徴がある。生物季節データの概要を表-2 に示した。図-7 は観測地点を地図上に示したものである。

表-2 生物季節の概要

植物季節	動物季節
1:ウメの開花日	17:ヒバリの初鳴日
2:ツバキの開花日	18:ウグイスの初鳴日
3:タンポポの開花日	19:ツバメの初見日
4:サクラの開花日	20:モンシロチョウの初見日
5:サクラの満開日	21:キアゲハの初見日
6:ヤマツツジの開花日	22:トノサマガエルの初見日
7:ノダフジの開花日	23:シオカラトンボの初見日
8:ヤマハギの開花日	24:ホタルの初見日
9:アジサイの開花日	25:アブラゼミの初鳴日
10:サルスベリの開花日	26:ヒグラシの初鳴日
11:ススキの開花日	27:モズの初鳴日
12:イチョウの発芽日	
13:イチョウの黄葉日	
14:イチョウの落葉日	
15:カエデの紅葉日	
16:カエデの落葉日	

## (3) 温暖化の検出指標としての生物季節の意義

生物季節データは、その土地の季節変化や気象環境を把握する上で役立つとともに、花暦などにまとめられて農作業の適期を決める目安としても用いられてきた。とくに花暦は気温観測機器が用いられる前から利用されており、いかなる種類の気象観測データよりも精密に表現される気象測器であり、観測データでは得られない微妙な環境指標としての位置付けもなされて



図-7 生物季節の観測地点

いる。温暖化の影響検出のための指標としては、単に気温や降水量などの気候変数を観測するだけでは不十分であり、生物季節など生物の影響を観測、監視することが重要であると考えられる。とくにそうした生物を指標とした温暖化の影響検出として生物季節データは長期の観測結果を有すること、観測方法が確立していることから、温暖化が進行しつつある現状で、将来も温暖化の進行による影響をいち早く監視するためにも重要なものである。生物季節や生物を温暖化の影響指標として採用することの意義としては次のような点が挙げられる。

①環境変化の積算値：植物の開花・満開などは、ある時点の気温や降水量ではなく、それまでの積算温度が重要な役割を果たす。絶対温度よりも積算温度が重要であるから、一定期間の気象や気候の変化に反応しているので、気温や降水量では判定しえない。影響の現われ方には、絶対値、積算値、複合的な閾値があるので、計器測定は絶対値を計っているのに対し、生物（季節）は積算値及び複合的な閾値を計っていることになる。

②総合的な指標：温度計や湿度計では感知できない、環境の変化を敏感に反映しており、総合的な環境指標である。この場合、気候変化ばかりでなく、大気汚染など人為的な変化も影響するので注意が必要である。

③生息域の移動：北海道や中部山岳地の積雪によるハイマツや高山植物の減少、木本植物の拡大、内陸部におけるシラカシなど常緑広葉樹の分布拡大、ブナ林の発芽能力のない実の増加、熱帯性キノコの北への拡大など、動植物の生息域の移動は温暖化影響の顕著な事例であり、こうした生息域の変化も監視していく必要がある。

#### （４）温暖化の生物影響の事例

##### ・ホプキンス(A.D. Hopkins)の法則

生物季節の法則としてホプキンスが提唱した法則がある。他の条件が等しければ、温帯北アメリカでは緯度1度、経度5度、高度120mごとに4日の割合で、春から夏にかけて緯度は北方へ、経度は東方へ、高度は上方へ、晩秋から秋にかけては、逆の方向に生物季節減少の遅れがみられる。

この法則は日本が南北に長く、周囲を海に囲まれているので完全には成立しないが、例えば、東アジアの春を代表するサクラの平均開花日をホプキンスによる北米の生気象学的法則を適用すると、緯度1度で0.8日、経度1度で0.2日、海拔高度で0.7日早く進むと推定される<sup>5)</sup>。

##### ・生物季節の変化の事例

IPCCの第三次評価報告書ではすでに温暖化の影響が雪氷圏や生物の顕在化していると結論した。IPCCをはじめ、生物への影響をまとめてみたのが表-3である。

表-3 温暖化の植物への影響の事例 (IPCC 他より作成<sup>6,7)</sup>)

地域	現象	研究者
欧米	1950-2000年に葉の展開が1~4週間早まり、落葉が1~2週間遅くなり、開花が1週間、昆虫、カエル、鳥などの動物の出現時期が1~2週間早まった	Penuelas and Fiella, 2001
オーストリア	1961-1990年にノルウェートウヒの直径が増加	Hasenauer et al., 1999
	アラスカシロトウヒの成長抑制、温度上昇による乾燥ストレスが原因	Barber et al., 2000
米国北東部	アカトウヒが減少	Hamburg and Cogbill, 1988
ウィスコンシン南部	1936-1947、1976-1998に10種の多年草・樹木種で開花時期が早まった。他の26種は変化なし	Bradley et al., 1999
欧州	12種の樹木と灌木の生長期間が長くなった	Menzel and Fabian, 1999
アリゾナ	冬季の降水が増加したため木本灌木が増大し、半乾燥生態系が再編された	Brown et al., 1997
西アフリカサヘル	長期の降水量減少により中湿性種が、より雨の降る低温地域へ収縮した	Gonzalez, 2001
アルプス	高山植物が10年に1~4m上方へ移動。山頂付近の植物が消失	Braun-Blaunquet, 1956; Grabherr et al., 1994
コロラド	春の最低気温が上昇したため短茎草本ステップ生態系が再編された	Alward and Detling, 1999

#### (5) 日本における影響 (ソメイヨシノの例)

2002年の春は全国的にサクラ(ソメイヨシノ)の開花や満開日が例年に比べて、2週間ほど早まった。このため、各地で桜祭りなどのイベント開催に支障がで、春のレクリエーション活動をはじめとした市民生活への影響が現われた。日本においては、サクラの開花がこの50年間に最大で5日ほど早くなっているため、今回のサクラの早い開花は、温暖化の影響に自然の変動性が加わった結果生じたものであると考えられる。

特にソメイヨシノの開花日は、最も早まった地点は50年間に福岡、岐阜、函館で約1週間早まった。名古屋や京都などの都市域でも早まっている。また、逆に過去50年間に潮岬・相川・高山・種子島では約2日遅くなっている。しかし、50年間でみると遅くなっている地点もあるが、1960年以降と1990年代を比べれば、90年代では全ての地点で早まっている。1950年代は1990年代に比べると低温であったが、60~80年代に比べれば温暖であったことを示している。

##### ・地点毎の特徴

ソメイヨシノの開花は日本列島を北へ緯度1度で4.4日遅れる。緯度1度は気温で約1℃、距離で100kmの違いとなる。すなわち、平均気温が1℃上昇すると、約100km南の地点と、高度では、約160m低い地点が同じ気候条件になる。しかし、ソメイヨシノの開花速度は温度に対する反応が北ほど早いという特徴がある。

東京：ソメイヨシノの開花日は、3月の平均気温1℃の上昇に対して、3.6日早まっている。気象庁の気温の将来予測値を用いてソメイヨシノの開花予測をすると、近い将来3月上旬の開花になるか、あるいは、日本ではこれまでの開花記録が3月10日以前にないことから開花しなくなることも予測される。

横浜・八丈島：横浜では1℃に反応する速度は3.7日と東京とほぼ同じ値であるが、八丈島では、2.1日となる。

京都・和歌山・潮の岬：北ほど気温と開花の相関はよく、3月の平均気温が1℃上昇すると京

都が 3.6 日、和歌山が 3.9 日、潮岬が 3.1 日早まる。特に 2002 年 3 月は気温が高く、舞鶴が和歌山、京都が潮岬の気温に近い値を示し、ソメイヨシノの開花も和歌山が 3 月 16 日で平年より 12 日早く、京都が 3 月 18 日で平年より 13 日早い観測史上最速の開花であった。潮岬が 3 月 20 日と京都や和歌山よりも遅い開花となったことも急激な温暖化による現象と考えられる。舞鶴が 3 月 25 日と平年よりも 10 日早い開花であった。

・九州地方：表-4 は九州についてのソメイヨシノの開花の早まりの速度と 3 月平均気温の上昇速度との関係を示したものである。全ての地点の開花と 3 月平均気温の関係は厳原を除いて全国平均 (3.5 日) より小さい値である。1953~2002 年の 50 年間に 3 月の平均気温は全地点において 1~2℃上昇しており、上昇率がもっとも大きいのは鹿児島約 2℃ (0.39℃/10 年) で、次いで福岡の 1.6℃(0.31℃/10 年) で、開花速度は鹿児島が 2 日 (0.04 日/年)、福岡が 8 日 (0.18 日/年) 早く開花している。開花速度は 50 年間に大分、福江でも 1 週間早まっている。とくに福岡は温暖化による気温上昇と都市化による気温上昇が相まって気温の上昇率が大きく現われており、気温の上昇速度にソメイヨシノの開花速度が追いつけなくなり始めている。今後さらに温暖化が進むと多くの地点が福岡のような開花パターンとなったり、春に開花しない不時現象が多くなることが予想される。

表-4 九州における過去 50 年間のソメイヨシノの開花と 3 月の平均気温の関係及び気温上昇率と開花速度

地点	3 月平均気温 1℃上昇によるソメイヨシノの開花	相関係数 (R2)	開花速度 日/年	3 月平均気温の上昇率 °C /10 年	観測データ
鹿児島	1.4 日	0.2416	0.04	0.39	1953-2002
長崎	2.7 日	0.4287	0.07	0.23	1953-2002
厳原	3.5 日	0.5679	0.10	0.25	1953-2002
種子島	1.6 日	0.0463	0.04	0.22	1953-2002
延岡	2.0 日	0.2320	0.05	(0.37)	1953-2002
佐賀	2.8 日	0.4629	0.09	0.19	1953-2002
宮崎	2.6 日	0.4510	0.09	(0.28)	1953-2002
熊本	2.9 日	0.5679	0.10	0.28	1953-2002
福江	1.1 日	0.2257	0.15	(0.42)	1962-2002
大分	3.3 日	0.5933	0.15	0.30	1953-2002
福岡	1.3 日	0.0613	0.18	0.31	1953-2002

#### (6) 温暖化の影響検出の指標としての生物季節

2002 年春季は、桜が平年よりも 2 週間あまり早く咲いた。このため、市民生活にも種々の影響がでた。桜に関わるイベントが中止になったりなどの影響が中心であるが、文化的、ライフスタイルへの影響も大きかったと思われる。生物季節は、桜の開花や満開など、温暖化の影響を直接受ける感度の高い指標とみることにもできる。今後、こうした生物季節現象や植物の生長を注意深くみていくことにより、温暖化の影響の発現をいち早く検出できるので、影響を緩和するべく適応策の検討も容易になると考えられる。

### 5. 成果と今後の課題

(1) 温暖化の自然生態系への影響、脆弱性評価のための、日本の将来気候値を気候モデル (GCM) の予測値を用いて作成し、共通の地域気候シナリオとして用いた。共通したシナリオを用いることにより、各種生態系の影響予測結果の相互比較ができる。また、積雪と自然生態系については密接な関連があるので、積雪の将来シナリオについては、農業環境技術研究所 (サブ課題4を担当) のものを利用したが、生態系によってはより詳細な空間精度が必要なこと、さらに積雪の開始と終わりの時期が重要であることから、各サブ課題ごとに積雪シナリオを開発して利用した。これらの開発したシナリオについては、水資源、人間の健康など他分野における影響評価に利用可能である。今後の課題としては、現在開発が進んでいる地域気候モデルの予測結果は空間的精度が20~50km、日本の複雑な地形も考慮にいった将来気候予測を行っているので、こうした空間的に詳細な地域気候モデルの結果を用いることにより、影響、脆弱性評価がより信頼性が高いものとなると考えられる。

(2) 日本の自然生態系への温暖化影響を包括的に評価する生態系モデルを構築し、現在に植生分布で検証を行い、十分な予測精度をもつことを確認した後に、気候シナリオを用いて将来予測を行った。将来予測値と現状との差が変化する部分であり、これらの地点 (地域) を脆弱な地域とし脆弱性マップを作成した。GCMとして何を使うかにより多少のバラツキはあるものの、温暖化の進行により、日本の自然生態系が大いに影響されるであろうと予測された。今後の課題としては、さらに地域或いは地方レベルで予測ができるようにモデルを改良することにより、より空間的にきめ細かな評価が可能となるとともに、適応策などの検討にも十分活用できるモデルとなると考えられる。

(3) 生物季節による温暖化の検出について検討し、桜などの生物季節が、気温などの気象観測データのみでは測定しえない、総合的な環境指標として重要であることが再確認できた。また桜の生物季節のデータ解析により、この50年間で桜の開花が最大5日早まっており、日本においても温暖化に敏感な自然生態系に影響がすでに顕在化していることが確認できた。2002年春には、日本の各地で桜の開花や満開が例年に比べて2週間ほど早くなったが、これは、上述の温暖化の傾向と自然の変動性の両方が相乗的に働き、早い開花や満開となったと考えられる。今後の課題としては、2002年の早い開花について、より詳細な解析とその市民生活に及ぼす影響についての情報収集と解析が必要である。また、生物季節データは温暖化の影響評価、検出のうえで気象観測データを補完する重要な指標であることから、全国各地で実施されている生物季節データの収集、及び生物季節のデータの解析方法などの検討が必要であろう。

## 6. 参考文献

- 1) IPCC, 1994: IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptation. IPCC Special Report, 59pp. (国立環境研究所地球環境研究センターより入手可)
- 2) Haxeltine, A and C. Prentice, 1996: BIOME3 An Equilibrium terrestrial biosphere model based ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemistry Cycles*, 4, 693-709.
- 3) Tunekawa, A., H. Ikeguchi, and K. Omasa, 1996: Prediction of Japanese potential vegetation distribution in response to climate change. *Climate change and plants in East Asia*, Springer, 57-65.



- 4) 野上道男, 1994: 森林植生帯分布の温度条件と潜在分布の推定、地学雑誌、103(7), 886-897.
- 5) 増田啓子・吉野正敏・朴恵叔(1999) 生物季節による温暖化の影響と検出、地球環境、4、91-103.
- 6) Penuelas, J. and I. Filella, 2001: Response to a warming world. Science, 294, 793-795.
- 7) IPCC, 2001: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. The contribution of the Working Group II to the IPCC, 1034pp.

[国際共同研究等の状況]

IPCCは、気候変化の最新の知見を第三次評価報告書としてとりまとめた。本研究プロジェクトの研究者が第三次評価報告書の作成作業に執筆者として参画し、本プロジェクトで得られた成果などを積極的に報告書に反映させるようにした。

[研究成果の発表]

(1) 誌上発表

- ①原沢英夫: 天気 47(10), 29-36(2001)  
「地球温暖化のアジア地域への影響. 日本気象学会2000年春季大会シンポジウム「21世紀に気候～予測とそのままらすのも～」の報告」
  - ②原沢英夫: 地球環境, 4(1&2), 69-71(2000)  
「温暖化研究の最前線」
  - ③原沢英夫: 新しい地球環境学(西岡秀三編), 古今書院, 73-94(2000)  
「地球温暖化の影響予測評価にむけて」
  - ④Lal, M. and H. Harasawa, 2000: Journal of the Meteorological Society of Japan, 78(6), 871-879 (2000)  
“Comparison of the Present-Day Climate Simulation over Asia in Selected Coupled Atmosphere-Ocean Global Climate Model”
  - ⑤Lal, M. and H. Harasawa: Journal of the Meteorological Society of Japan, 79(1), 219-227 (2001)  
“Future Climate Change Scenarios for Asia as Inferred from Selected Coupled Atmosphere-Ocean Global Climate Models”
  - ⑥増田啓子・吉野正敏・朴恵淑: 地球環境, 4(1 & 2), 91-103 (1999)  
「生物季節による温暖化の影響と検出」
  - ⑦増田啓子: 龍谷紀要, 23(1), 155-168 (2001)  
「日本で認められる地球温暖化の生物への影響」
- (2) 口頭発表
- ①原沢英夫: 日本気象学会2000年春季大会シンポジウム「21世紀に気候～予測とそのままらすのも～」, 23-28(2000)  
「地球温暖化のアジア地域への影響」
  - ②原沢英夫: 平成12年度CELS S学会学術講演会招待講演, 10-27 (2000)  
「地球温暖化問題における最近のIPCCの動向－第三次報告書と森林シンクの問題－」
  - ③原沢英夫:、第34回気候影響・利用研究会発表会 (2000)

「IPCC第三次評価報告書（影響、適応、脆弱性）の概要」

(3) 出願特許、受賞等

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

熊本県、葛飾区、連合の市民向けのシンポジウムにおいて、本研究成果である温暖化の植生への影響を提示し、温暖化の影響の現状、将来予測に関する科学的知見を提供した。