

## 日本の潜在的な自然植生分布に対する気候変化の影響予測

石神靖弘・清水 庸・大政謙次

(東京大学大学院農学生命科学研究科)

## Projection of Climatic Change Effects on Potential Natural Vegetation Distribution in Japan

Yasuhiro ISHIGAMI, Yo SHIMIZU and Kenji OMASA

(Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8657, Japan)

## Abstract

In a previous paper, we modified some sub-models of BIOME3 to be applied to 1×1 km mesh data in order to increase the accuracy of simulation.

Using this modified model, we estimated potential natural vegetation distribution under climatic change using 4 types of GCM experiment data. GCM data that can be used presently have rough spatial resolution, so it is difficult to estimate the effect of climatic change at a local scale. Therefore, we used GCM data around Japan that was interpolated to a 10×10 km mesh.

We calculated the NPP, and predicted the distribution of potential natural vegetation and its vulnerability for the 2020s, 2050s and 2080s. Results from the simulation indicated the possibility of 60–100% increase of NPP in the 2080s. The increase in NPP was explained by the increase in air temperature and the concentration of CO<sub>2</sub>. Potential natural vegetation in Japan would be affected over a wide area by climatic change. In particular, the alpine plants/subalpine conifer forest area would decrease. In mixed forest in the Hokkaido area, where broad-leaved deciduous trees and conifer trees coexist, broad-leaved deciduous trees would become dominant. Broad-leaved evergreen forest area would expand, and the subtropical forest would to a prior species along the coastline of western Japan.

**Key words:** BIOME3, Climate change, Prediction of vegetation distribution, Process-based model.

**キーワード:** 気候変化, 植生分布予測, プロセスモデル, BIOME3

## 1. はじめに

IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の 2001 年の報告 (IPCC, 2001) によると, 大気中の温室効果ガス濃度の増加によって, 2100 年までに地球全体の平均地表温度が 1.4~5.8℃ 上昇すると予測されている。地球規模での予測の信頼性は依然として低いが, 地域によっては極端な高温現象, 洪水, 旱魃の頻度の増加, その結果としての火災, 疫病の発生の可能性がある。

陸上生態系は, 生存する動植物と環境の微妙なバランスのもとに成立している。温暖化による気候条件の変化が, そのバランスを崩し, 分布や構成に大きな影響を与えると考えられる。陸上生態系の中でも, 植物は, 光合成によって地球上の炭素循環に多大な影響を与え, それ

と同時に, 温暖化と大気中の二酸化炭素濃度の増加は, 陸上の植物に影響を与える (Woodward *et al.*, 1995)。気候変化により陸上の植物の一次生産力 (NPP: Net Primary Productivity) が変化すれば, 食糧生産の面でも人間活動に大きな影響がある (Melillo *et al.*, 1993)。

また, 気候変化時の炭素収支を予測するためには, 植物によって固定される NPP としての炭素量の推定も必要であり, そのためにはどのような植生タイプが分布しているか予測する必要がある (Mingui and Woodward, 1998)。植生に対する温暖化の影響の規模, メカニズムに関しては, 依然として不確かな部分が多いが, 変化の様子や脆弱性を明らかにしていくことは重要な課題といえる (Omasa, 2001)。

温暖化が植生に与える影響を予測するために, さまざまな種類の植生モデルが開発されている。炭素や窒素などの物質循環の推定を目的としたモデルや, 分布する植

2001年6月29日, 4学会合同大会にて発表

2002年11月6日 受付, 2003年7月14日 受理

生のタイプの推定を目的としたモデルなどがある (VEMAP members, 1995; Omasa *et al.*, 2002)。

地球温暖化は、大気中の二酸化炭素濃度の増加と気候条件の変化が同時に進行するため、植生のように温度だけでなく、水分状態や、二酸化炭素の濃度の変化などにも影響を受ける対象について、影響予測を行うためには、より植物の生理的側面を考慮した、プロセスモデルと呼ばれるモデルを用いるのが有効である (Woodward *et al.*, 1995)。筆者らは、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に改良を加え、潜在的な自然植生の分布を推定し、精度の検証を行った (Ishigami *et al.*, 2002)。本研究ではそのモデルに複数の GCM の結果を導入し、温暖化時の NPP と潜在的な自然植生分布の予測を行った。

## 2. 手 法

### 2.1 モデル

予測に使用したモデルは、BIOME3 (Haxeltine and Prentice, 1996) をもとに、筆者らが日本の潜在的な自然植生分布を推定するために改良したモデルである。本モデルは、植物のフェノロジー (常緑樹・落葉樹) や葉の形態 (針葉樹・広葉樹) などの、植物の生理生態学的プロセスに与える特性を考慮して、複数の植物機能タイプを作成しておき、最低気温などの制約条件のもとで、分布可能な複数の植物機能タイプを選び出す。選び出された植物機能タイプごとに、土壌からの水分吸収などを考慮して、最も大きな NPP を得られる植物機能タイプとそのときの LAI (Leaf Area Index) を求める。このとき、NPP の計算には、Farquar *et al.* (1980) をもとにした光合成サブモデルが用いられている。そして、その最も大きな NPP を獲得できる植物機能タイプが優占種となるとして、そのときの LAI をもとに植生の分布を推定するモデルである。

### 2.2 GCM データ

将来の気候変化の見通しは、温室効果ガスやエアロゾル前駆物質の排出やそれらが大気中に残留する割合の仮定に依存する。その見通しに関して IPCC では排出シナリオを検討している。シナリオにはいくつかの種類があるが、1992年に設定された IS92 シナリオでは、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、ハロカーボン類 (CFC 類とそれらの代替物質)、対流圏オゾン前駆物質、硫酸エアロゾル、バイオマス燃焼に伴うエアロゾルを含んでいる。またシナリオには将来における経済的、人口統計学および政策決定要因に関する広い範囲の仮定が含まれている (IPCC, 1992)。このシナリオをもとに、将来の温室効果ガスの

濃度、気温変化が予測されている。

IS92 シナリオには、IS92a から IS92f までの 6 つのシナリオがあり、1990~2100 年までに、産業革命以前と比較して、CO<sub>2</sub> は 35~170%、CH<sub>4</sub> は 22~175%、N<sub>2</sub>O は 26~40% の範囲で温室効果ガスの濃度が増加すると予測されている。

将来の気候変化の予測には、大気大循環モデルと海洋大循環モデルを結合した大気海洋結合モデル (CGCM: ocean Coupling General Circulation Model) と呼ばれる気候モデルが用いられている。これらのモデルは陸面過程、海水に関連する過程、その他気候系に含まれる多くの複雑な過程を含んでいる。大気大循環モデルは太陽放射に対する大気分子の応答、大気中の水分の凝結・蒸発過程および地表面の状態 (植生、地形) といった条件のもとで地球上での流体力学方程式を数値的に解くことによって、大気の運動や気温、湿度などが計算される。また海洋大循環モデルは海洋 3 次元循環運動を記述するモデルである。この結合モデルを用いて、長期間 (数年間~数百年) の気候変動が予測されている。IPCC Data Distribution Center では、大気海洋結合モデルである CGCM 等をすべて、GCM と表記しているため、以後 GCM と記述する。

GCM によって計算された将来の気候変動に関するデータのうち IPCC が承認したデータについては IPCC Data Distribution Center から WWW を通じて配布されている (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>)。本研究において温暖化影響予測に使用した GCM データは、IS92a シナリオに沿った CO<sub>2</sub> 漸増実験の結果であり、以下の 4 つの GCM によるデータである。

CGCM1 (Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, Canada)

CCSR-98 (Center for Climate Research Studies, Japan)

CSIRO-Mk2 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia)

ECHAM4/OPYC3 (Deutsches Klimarechenzentrum, Germany)

現在使用できる GCM のデータは局地的な現象を論じるには空間解像度が粗いと考えられる。そこでこの GCM データを局地的な影響予測に使用するため、Yokozawa *et al.* (2003) が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 年間ごとの平均値であり (2020 年次のデータであれば、2020~2029 年の平均値)、データには気温 (最高、最低、平均)、月降水量、月日射量が含まれる。

どの GCM データも気温については、現在から 2020

年代までに1.5~3.0°C程度の上昇を示し、それ以後はシナリオによって変化が異なる。特にCCSR-98ではその変動が大きく、反対にCGCM1とCSIRO-Mk2ではほぼ一定の上昇を見せる。降水量に関してはさらに複雑に変動するが、おおよそ現在の-50~+100%程度の範囲で変化することが予測されている。2050年前後では、ECHAM4/OPYC3とCGCM1では、東日本で現在から-50~-20%程度の変化が予測され乾燥傾向であるのに対し、CSIRO-Mk2とCCSR-98では+10~+80%となり、湿潤傾向を見せた。日射量に関しては現在の-30~+20%の範囲で変動し、年による変化は気温と同じような傾向を見せた。以上のようなことから、日本列島付近ではCGCM1、CCSR-98およびECHAM4/OPYC3で年次変動が大きく、CSIRO-Mk2では比較的緩やかな変化が予測されている(Goto *et al.*, 2000)。また、気候変化時と現在の気候条件での予測結果を比較するために、三次メッシュの平年値の気候データを二次メッシュに変換したデータを用いて推定も行った。

### 2.3 NPP および植生分布の予測

NPP および植生分布の予測は、前述の4種類のGCMデータにおける、2020年、2050年、2080年の3時点のデータを用いて行った。なお各時点におけるCO<sub>2</sub>濃度はIS92aシナリオに従い、それぞれ420, 520, 620 ppmvに相当する。ただし、本研究で用いたモデルは、潜在的な自然植生分布を推定するモデルであるため、予測された結果は、各年次における気候条件が持続し、その状態で分布する植生のタイプとそのNPPの予測値である。

## 3. 結 果

### 3.1 NPPの予測結果

Fig. 1に二次メッシュ気候値を用いて推定した現在の気候条件下でのNPPの年間値、Fig. 2に現在の気候条件下でのNPPの年間値に対する気候変化時のNPPの年間値の増加率を示す。

NPPについてGCMデータごとの特徴を述べると、CGCM1データを用いた予測結果は、2050年時点で大きな増加を示すが、2080年時点では、CSIRO-Mk2やECHAM4/OPYC3ほどの大きな増加は示さない。

CCSR-98データでは、4つのGCMデータの中で最も増加の幅が小さくなっているが、九州四国南岸部などにおいては、2080年の時点で、二次メッシュ気候値の推定値と比較して、約40%と大きな増加が見られる可能性がある。

CSIRO-Mk2データは、4つのGCMデータのうち

最も増加の割合が大きく、特に北海道などの高緯度地域でそれが著しく、二次メッシュ気候値の推定値と比較して、2050年時点でも約60%増加する可能性が示された。

ECHAM4/OPYC3データは、2020年時点では、上昇幅が小さいが、2080年にかけて急激な上昇を見せる可能性がある。北海道などの高緯度地域での増加は大きい。

程度に差はあるものの、いずれのGCMデータでも年次が進むにつれ、NPPが増加し、低緯度地域よりも高緯度地域で増加の割合が大きいことが予測された。

### 3.2 植生分布の予測結果

Fig. 3に二次メッシュ気候値を用いて推定した潜在的な自然植生分布図を示す。またFig. 4に各GCMデータを用いて予測した潜在的な自然植生の分布について示す。また、Fig. 5に各植生の比率変化のグラフを示す。Table 1に各時点での気候状態で予測された潜在自然植生の変化を示す。

それぞれのGCMデータごとに予測結果を述べると、CGCM1データでは2080年に高山植生・亜高山帯針葉樹林が大幅に減少し、そのほとんどが針広混交林、落葉広葉樹林に変化する可能性が示されている。また他のGCMデータと比べ亜熱帯林の構成比が4.7% (2080年)と高くなっている。

CCSR-98データでは2020年の段階で、針広混交林が他のGCMデータよりも広い地域に残っているが、その後急激な減少を見せる。

CSIRO-Mk2データは高山植生・亜高山帯針葉樹林の構成比が2020年の段階で0.15%と他のデータに比べ早い段階で減少している。また、針広混交林も早い時点で、すべて落葉広葉樹林に変化するという結果になった。CSIRO-Mk2データが高緯度地域において気温上昇が激しいことに起因すると考えられる。また、2050年に常緑広葉樹林の構成比が一度減少し、その後2080年には増加している。

ECHAM4/OPYC3データでは、落葉広葉樹林から常緑広葉樹林に変化する割合が、他のGCMデータの予測結果よりも大きく、亜熱帯林の構成比がそれほど増加していない。

4種類のGCMデータの結果をまとめると、植生分布に関しては、特に北海道地域で大きな影響を受ける可能性が高いことが示唆された。北海道の大部分を占める針広混交林は1つの植生タイプが優的に生息せず、針葉樹と広葉樹が共存している状態となっている。そのために温暖化が起こった場合、そのバランスが崩れ、大きな影響を受ける可能性が高いといえる。またいずれの植生も、より暖かい地域に生息する植生に押し上げられる形



Fig. 1. Estimated NPP map using nomals.

で、境界域が北方に移動している。高山植生・亜高山帯針葉樹林は高緯度、高標高地域に生息しているために、温暖化によりさらにその分布域を狭める可能性が高い。落葉広葉樹林はいったんは分布域を広げるものの、その後、常緑広葉樹林に押され、分布域が減少するという可能性がある。また九州の沿岸部および小笠原諸島では常緑広葉樹林から、亜熱帯林が潜在的に優位になる可能性がある。いずれの GCM データにおいても潜在的な自然植生分布に大きな変化が起こる可能性が示され、潜在的な自然植生の温暖化に対する脆弱性が示された。

#### 4. 考 察

これまでに述べた GCM データを用いた将来予測の結果から NPP に関しては、現在と比べ 2020 年では 10~30%、2050 年では 20~50%、2080 年では 60~100% 程度増加する可能性が示された。これらの結果は GCM ごとに多少異なるが、GCM ごとの、気温上昇の程度により生じた違いであると考えられる。NPP の増加は、本モデルで使用されている光合成サブモデルのもととなった Farquar *et al.* (1980) のモデルにおいて、温度の上昇と CO<sub>2</sub> 濃度の増加は、光合成量を増加させ

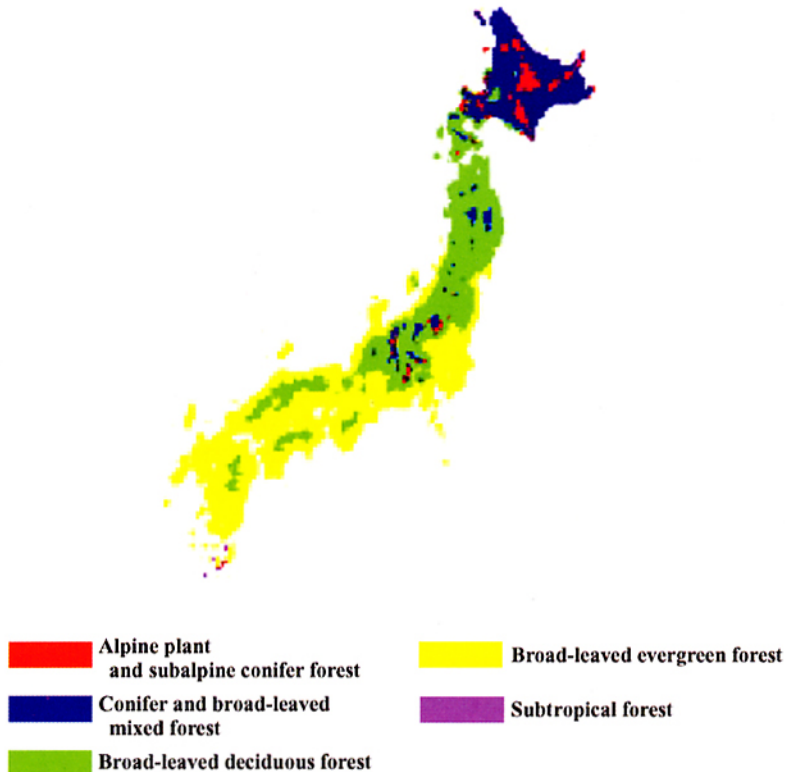


Fig. 3. Estimated potential natural vegetation distribution using nomals.

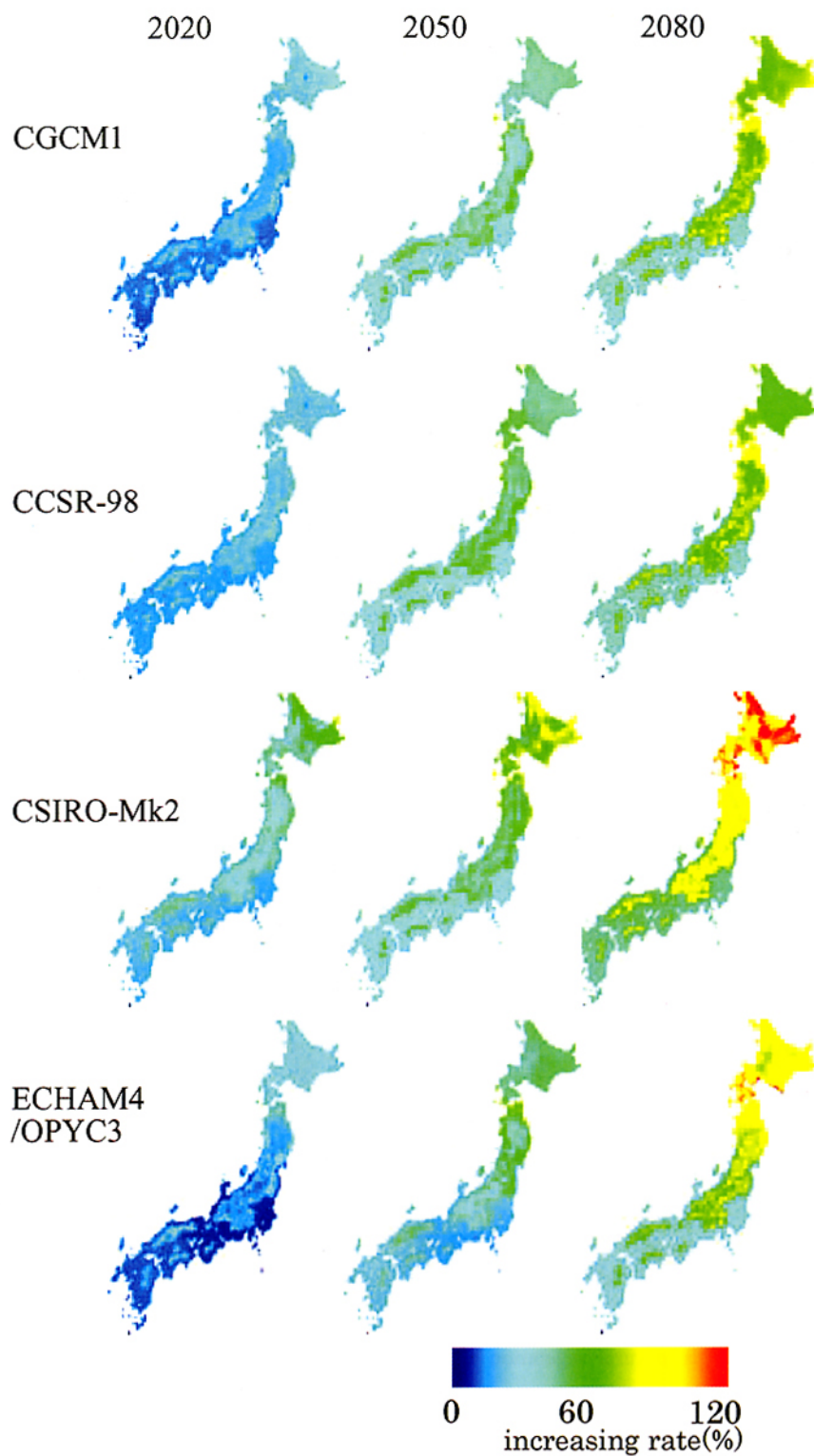


Fig. 2. Increasing rate of NPP using each GCM data set. The percentage of NPP projected by GCM data to second mesh climate data.

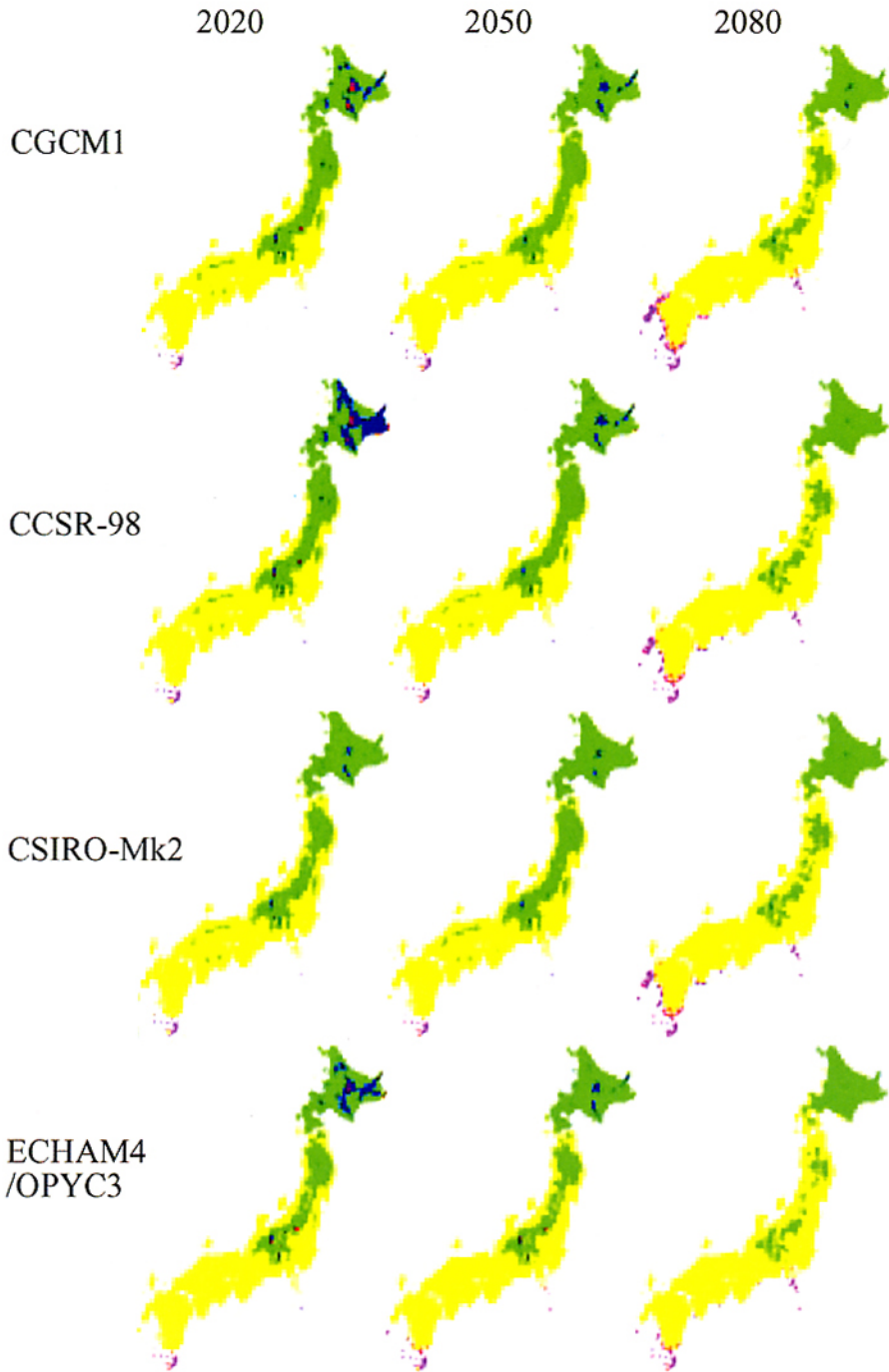


Fig. 4. Predicted potential natural vegetation distribution using each GCM data. The legend color is the same as for Fig. 3.

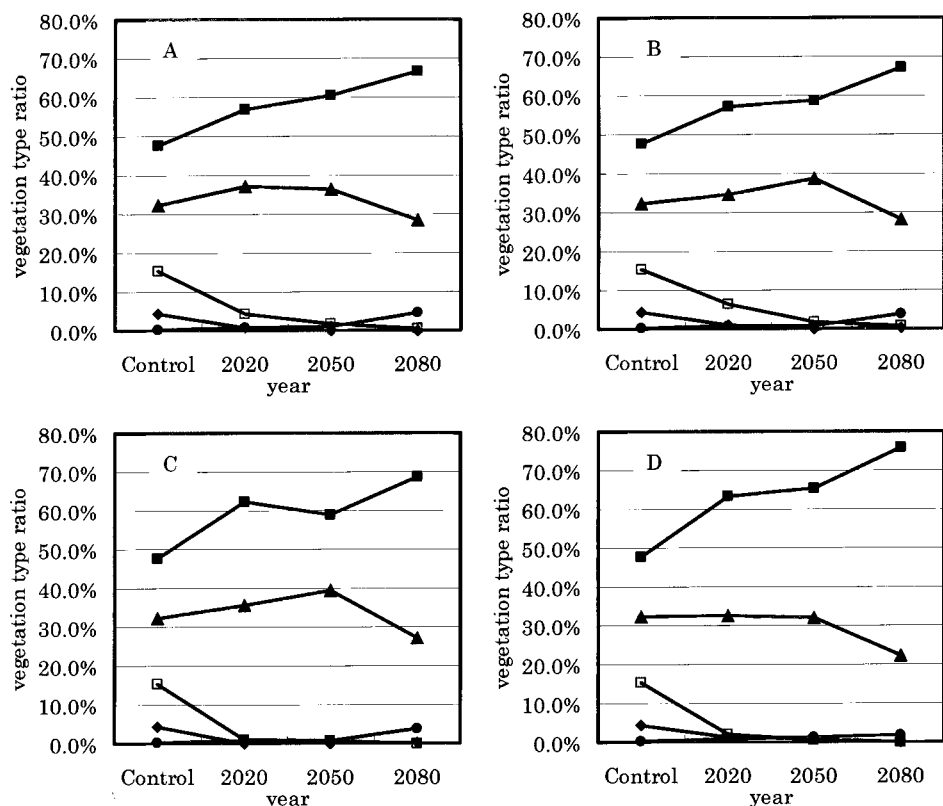


Fig. 5. Change of vegetation type ratio using each GCM data set. A : CGCM1, B : CCSR-98, C : CSIRO-Mk2 and D : ECHAM4/OPYC3. ◆ : Alpine plants and subalpine conifer forest, □ : Conifer and broad-leaved mixed forest, ▲ : Broad-leaved deciduous forest, ■ : Broad-leaved evergreen forest, ● : Subtropical forest.

Table 1. Comparison between estimated vegetation type under the current climate and projected vegetation type under each scenario. a : Alpine plants and subalpine conifer forest, b : Conifer/broad-leaved mixed forest, c : Broad-leaved deciduous forest, d : Broad-leaved evergreen forest, e : Subtropical forest.

	Change of projected vegetation type (%)																				
	CGCM1					CCSR-98					CSIRO-Mk2					ECHAM4/OPYC3					
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	
2002	a	2.8	41.0	56.1	0.0	0.0	19.3	50.5	30.2	0.0	0.0	4.2	18.4	76.9	0.5	0.0	10.8	59.0	30.2	0.0	0.0
	b	0.0	1.0	99.0	0.0	0.0	2.9	34.4	62.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	5.0	9.4	85.6	0.0	0.0
	c	0.0	0.0	57.7	42.3	0.0	0.0	0.0	69.3	30.7	0.0	0.0	0.0	28.8	71.2	0.0	0.0	0.0	49.7	50.3	0.0
	d	0.0	0.0	0.0	98.1	1.9	0.0	0.0	0.0	98.8	1.2	0.0	0.0	0.0	92.6	7.4	0.0	0.0	0.0	98.8	1.2
2050	a	0.5	21.7	77.8	0.0	0.0	3.8	40.1	56.1	0.0	0.0	4.2	18.4	76.9	0.5	0.0	4.7	27.4	67.5	0.5	0.0
	b	0.0	0.4	99.6	0.0	0.0	0.5	0.9	98.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	1.9	0.3	97.8	0.0	0.0
	c	0.0	0.0	43.5	56.5	0.0	0.0	0.0	64.5	35.5	0.0	0.0	0.0	28.8	71.2	0.0	0.0	0.0	42.1	57.9	0.0
	d	0.0	0.0	0.0	95.1	4.9	0.0	0.0	0.0	98.8	1.2	0.0	0.0	0.0	92.6	7.4	0.0	0.0	0.0	97.5	2.5
2080	a	0.0	9.0	89.6	1.4	0.0	4.2	18.4	76.9	0.5	0.0	2.8	0.9	94.3	1.9	0.0	0.5	0.5	85.4	13.7	0.0
	b	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
	c	0.0	0.0	28.2	71.8	0.0	0.0	0.0	28.8	71.2	0.0	0.0	0.0	24.0	76.0	0.0	0.0	0.0	10.1	89.9	0.0
	d	0.0	0.0	0.0	90.7	9.3	0.0	0.0	0.0	92.6	7.4	0.0	0.0	0.0	92.3	7.7	0.0	0.0	0.0	96.1	3.9

る効果があり、より大きな光合成量をもたらした結果であるといえる。さらに、植物機能タイプのフェノロジーの違いにより、落葉樹から常緑樹へといった、より大きな NPP を得ることのできる植生タイプに置き換わったことが大きな要因になっていることが考えられる。また、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る。特に高山植生・亜高山帯針葉樹林は分布域が狭められる可能性が高いといえる。また、広葉落葉樹と針葉樹が共存し安定した森林を形成している針広混交林は、そのバランスが崩れ、広い地域で広葉落葉樹が優先種となる可能性がある。

これに対し、Kohyama and Shigesada (1995) はサイズ分布モデルに基づいた森林の地理分布動態モデルを用いて、温暖化時における仮想的な森林帯の移動について推定を行った。その結果、残存植生の存在により、加入定着が抑制され、森林帯の境界はあまり移動しないという結果を得た。本研究で使用したモデルは潜在的な植生の分布を予測するものであり、また植生の遷移現象などもそのプロセスには入っていない。しかし、気候変化によって、潜在的な自然植生の分布が変化すれば、地域によっては残存植生が最適な生育環境下から外れることになる。Kohyama and Shigesada (1995) の研究では、残存植生に対する温暖化の影響は考慮していないが、残存植生が何らかの影響で枯死した場合などには、本研究で予測したように植生分布が著しく変化する危険性が考えられる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、二次メッシュ気候値データを提供して下さった、農業環境技術研究所の清野 豁博士、気候変化メッシュデータを提供して下さった農業環境技術研究所の横沢正幸博士に深く感謝いたします。

## References

- Farquar, G. D., Caemmerer, S. and Berry, J. A., 1980: A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> plants. *Plant*, **149**, 78-90.
- Goto, S., Yokozawa, M., Toritani, H. and Seino, H., 2000: Changes of climate resources around Japan under 4 GCM scenarios. *Abstracts of Joint Meeting on Environmental Engineering in Agriculture 2000*, pp. 48-49 (後藤慎吉・横沢正幸・鳥谷 均・清野 豁, 2000: 4つのGCMシナリオによる日本列島付近の気候資源量の変化. 日本農業気象学会・日本生物環境調節学会2000年合同大会講演要旨集, pp. 48-49).
- Haxeltine, A. and Prentice, I. C., 1996: BIOME3 An equilibrium terrestrial biosphere model based ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochem. Cycles*, **4**, 693-709.
- IPCC, 1992: *Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment* (eds. by Houghton, J. T., Callander, B. A. and Varney, S. K.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, 205 pp.
- IPCC, 2001: *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability* (eds. by McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. and White, K. S.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp. 1-18.
- Ishigami, Y., Shimizu, Y. and Omasa, K., 2002: Estimation of potential natural vegetation distribution in Japan using a process model. *J. Agric. Meteorol.*, **58**, 123-133.
- Kohyama, T. and Shigesada, N., 1995: A size-distribution-based model of forest dynamics along a latitudinal environmental gradient. *Vegetatio*, **121**, 117-126.
- Melillo, J. M., McGuire, A. D., Kicklighter, D. W., Moore, B., Vorosmarty, C. J. and Schloss, A. L., 1993: Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, **363**, 234-240.
- Mingui, C. and Woodward, F. I., 1998: Net primary and ecosystem and production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biol.*, **4**, 195-198.
- Omasa, K., 2001: The effects on terrestrial ecosystem. In *Effects of global warming on Japan 2001* (ed. by Harasawa, H.). Ministry of Environment, pp. 59-140 (大政謙次, 2001: 陸上生態系への影響. 地球温暖化への影響 2001 (原沢英夫編). 環境省, pp. 59-140).
- Omasa, K., Shimizu, Y. and Ishigami, Y., 2002: Impact assessment models of global warming on terrestrial ecosystem and related topics of the IPCC third assessment report. *Eco-Engineering*, **14**, 19-29.
- VEMAP Members, 1995: Vegetation/ecosystem modeling and analysis project: Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO<sub>2</sub> doubling. *Global Biogeochem. Cycles*, **9**, 407-437.
- Woodward, F. I., Smith, T. M. and Emanuel, W. R., 1995: A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochem. Cycles*, **9**, 471-490.
- Yokozawa, M., Goto, S., Hayashi, Y. and Seino, H., 2003: Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *J. Agric. Meteorol.*, **59**, 117-130.