

## 第4章 植生分布変動モデル

### 本章の目的

前章までで地球の陸上生態系の炭素循環モデルを構築し、現在の気候条件における植生と土壌の炭素蓄積量、植生の純生産速度について計算した。さらに、将来の気候変動が陸上生態系の炭素循環に及ぼす影響について予測した。しかしながら、将来の気候変動は陸上生態系の炭素循環だけでなく、植生の分布についても影響を及ぼすことが予測される。よって、本章では植生の分布の変動を予測するために、陸上生態系の炭素循環モデルを用いて植生の分布の変動を予測するモデルを構築したので述べる。

また、大気中の炭酸ガス濃度は徐々に増加しつつあり、それに伴って気候変動も徐々に起こることが予想される。よって、このような気候条件が定常状態に達するまでの陸上生態系の変動を考慮する必要がある。本章ではさらに、非定常状態における植生の分布の変動を予測するためのモデルを構築したのでこれを述べる。

### 4-1 植生分布変動モデル

将来の気候変動の陸上生態系へ与える影響を評価するためには炭素蓄積量等の陸上生態系の炭素循環だけでなく、植生の分布の変動でも評価する必要がある。なぜなら、地球規模の植生分布は様々な因子によって決定されており、中でも気候条件、温度及び降雨量は重要な役割を占めているといえるからである。こうした気候条件と植生分布との対応関係を構築しようとする研究はこれまでに多くの研究なされてきた。これらの研究の多くは統計学的方法による。(Monserud and Leemans, 1992, Prentice, 1990, Guetter and Kutzbach, 1990) また、人工衛星データを用いて地球の植生分布を直接見ようという試みもある(Murai and Honda, 1991)。植生分布ではないが陸上生態系の炭素循環の分布を評価しようという研究もある。Ohta et al. (1993) は東アジアにおける気候変動の純生産速度に与える影響を予測している。

現在のような植生分布を形成する要因は温度、降雨量、日照、土壌、地形など環境条件や植物間の競争など様々考えられる。これらの要因をすべて考慮し、地球規模の植生分布を決定するモデルを構築することは極めて困難であるといえよう。本モデルではこれらの要因を植生の炭素蓄積量で代表できるものと仮定する。一般に炭素蓄積量が大きな植物は背が高い傾向にあり、背の高い植物は他の背の低い植物への光を遮断する。このような光環境の優劣によって、その地域の優占種が決まる。Takada and Iwasa (1986) はこのような光環境の影響を考慮した植物群落の成長モデルを構築し、定常状態では植物群落のサイズ分布がFig. 4-1-1に示すようなL-シェイプのパターンを形成するという結果を得ている。

本研究では、地球の陸地を緯度5度×経度5度あるいは緯度1度×経度1度のメッシュ

に区切り、それぞれのメッシュについて植生の炭素蓄積量を計算する。陸上生態系を5つのタイプ、熱帯林、温帯林、寒帯林、草原、植生なしに分類した。計算方法は次の通りである。それぞれのメッシュについて熱帯林、温帯林（パラメータは温帯常緑林のものを用いる）、寒帯林の3つのタイプについて炭素蓄積量を計算する。計算は、現在の気候条件（The IIASA Climate Database、Leemans and Cramer、1990）を用い、定常状態に達するまで行った。各メッシュ毎に3つの植生の炭素蓄積量を比較し、最大の炭素蓄積量を持つ植生がそのメッシュの優占種となるとした。ただし、最大の炭素蓄積量が5  $[\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}]$ 以下のときは植生は草原に、0.5  $[\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}]$ のときは植生なしになるとした。各メッシュの優占種決定までの流れをFig. 4-1-2に示す。

#### 4-2 現在の気候下での植生分布

Fig. 4-2-1にモデル計算による現在の気候条件における地球の植生の分布図を示す。また、他の方法で決定された植生の分布図をFigs. 4-2-2(a)~(c)に示す。Fig. 4-2-2(a)はHoldridgeの植生分類から求められた植生分布図である(Holdridge、1947、Leemans、1989、1990)。Holdridgeの植生分布図は気候条件のみから、それに対応する植生を求めたものである。Fig. 4-2-2(b)はOlsonの植生データから求めた植生分布図である(Olson、1983)。Olsonの植生分布図は航空機データや研究対象地点の集中的な調査から得られた実測値を基にして求められた分布図である。植生をその炭素蓄積量の大きさから44のタイプに分類している。Fig. 4-2-2(c)に1987における人工衛星から得られたデータを基に作製したものを示す(Honda et al.、1992)。Hondaらの分布図は全地球のNVI (Normalized Vegetation Index) データから作製されたものであり、植生の分類はFig. 4-2-3のようにNVIの季節変動のパターンに基づく。本モデルでは植生のタイプを5つに分類しているが、Figs. 4-2-2(a)~(c)に示した植生分布図はいずれも5つ以上のタイプに分類している。これら3つの植生分布図の植生分類と本研究の植生分類の対応表をTable 4-2-1に示す。また、本研究の植生分布図のメッシュサイズは5度×5度であるが、これら3つの植生分布図のオリジナルなデータのメッシュサイズは異なる。よって、本研究では比較のため、これらの植生分布図のメッシュサイズを5度×5度で再編成した。

Table 4-2-2にこれらの3つの植生分布図の各植生の面積、本モデルによる計算値（緯度5度×経度5度及び、緯度1度×経度1度）、さらにはWhittaker and Likens (1973)と依田(1982)による推定値を示す。Fig. 4-2-1とFig. 4-2-2(a)を比較すると、部分部分で異なるところも見受けられるが、植生と植生との境界線の位置はほぼ似ている。これはHoldridgeの植生分布図は気候条件のみを考慮しているため、植生と植生との境界線の大体の位置が似ているものと思われる。一方、Holdridgeの植生分布図には土壤条件が含まれていない。そのため、部分的に異なると思われる。Fig. 4-2-1とFig. 4-2-2(b)を比較すると、Olsonの植生分布図の草原の面積が大きいことが分かる。これは、Olsonの植生分布図が植生を炭素蓄積量に基づいて44に分類しているためであると思われる。これは、本モデルではたとえ植生の炭素蓄積量が小さくても5  $[\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}]$ であれば、そのメッシュ

は森林であるとしているためであるとする。Fig. 4-2-1とFig. 4-2-2(c)を比較すると、その分布はかなり違うことが分かる。これは本研究は環境条件を基に植生分布を決定しているのに対して、Fig. 4-2-2(c)はNVIの季節変動のみから植生分布を決定しているためにあると思われる。また、人工衛星データは森林の農地化などの人間活動の影響が入っているので、他のデータに比べて森林、特に熱帯雨林の面積が少なくなっている。しかしながら、熱帯林、温帯林を合わせた枠、あるいはこれに寒帯林を合わせた森林という枠で考えると、これらの合計の面積はTable 4-2-2によると同程度であることが分かる。これは本モデルと人工衛星のデータの整合性を示すものであると思われる。

Fig. 4-2-1では地球上の各メッシュの優占種をモデル計算により5つの植生に分類したが、各メッシュにおける気候条件から各メッシュがHoldridgeの気候分類のどこに属するかを各植生別にFigs. 4-2-4(a)~(e)に示す。Holdridgeの気候分類は以下のAPPT、APE、APETRの3つの気候条件から求める。

$$APPT = \sum_{M=1}^{12} PPT(M)$$

$$APE = 58.93 \times ABT$$

$$APETR = APE / APPT$$

ABT ( $= 1/12 \sum_{M=1}^{12} T(M_{\text{mo}})$ )	annual biotemperature	[°C]
APPT	average total annual precipitation	[mm]
APETR	annual potential evapotranspiration ratio	[-]
APE	annual potential evapotranspiration	[-]
PPT(M)	monthly precipitation	[mm]
T(M <sub>mo</sub> )	mean monthly temperature >0	[°C]

Fig. 4-2-4(a)によると、モデルにより熱帯林とされたメッシュは全てHoldridgeの気候分類でも熱帯林の範疇に属する。しかし、Figs. 4-2-4(b), (c)によると、モデルにより温帯林とされたメッシュはHoldridgeの気候分類では熱帯林と温帯林の両範疇に、モデルにより寒帯林とされたメッシュはHoldridgeの気候分類では温帯林と寒帯林の両範疇に属する。また、Figs. 4-2-4(d), (e)によると、モデルにより草原とされたメッシュはHoldridgeの気候分類では熱帯林、温帯林、草原の範疇に、モデルにより植生なしとされたメッシュはHoldridgeの気候分類では寒帯林、草原、植生なしの範疇に属する。

Fig. 4-2-2(b)では地球上の各メッシュの優占種をOlsonの植生分類により5つの植生に分類したが、各メッシュにおける気候条件から各メッシュがHoldridgeの気候分類のどこに属するかを各植生別にFigs. 4-2-5(a)~(e)に示す。いずれの植生についてもFigs. 4-2-3(a)~(e)の場合と同様に必ずしもHoldridgeの気候分類による植生分類とOlsonの植生分類との範疇は一致せず、その傾向はFigs. 4-2-5(a)~(e)と4-2-4(a)~(e)は似ていることが分かる。

モデルによる植生分類であっても、Olsonの植生分類であっても、気候条件のみから各メッシュの植生の分類を行うと、本モデルによる植生分類とHoldridgeの気候分類による植生分類は一致するはずである。しかしながら、このように各植生分類とHoldridgeの気候分類による植生分類が異なるのは、本モデルによる植生分類とOlsonの植生分類が気候条件のみから求めているのではないことが挙げられる。Figs. 4-2-6(a)~(e)にすべてのメッシュの土性がheavy clayであるとした場合における、Figs. 4-2-7(a)~(e)にすべてのメッシュの土性がsandy loamであるとした場合における、各メッシュがHoldridgeの気候分類のどこに位置するかを示す。土性がheavy clayの場合は、土性がsandy loamの場合に比べ、森林のメッシュが減少し、草原のメッシュが増加している。このように地球上の植生分類には気候条件だけでなく土壌条件が大きく影響しているといえよう。

Table 4-2-3 に本モデルによる植生分布図とHoldridgeの分類による植生分布図、本モデルによる植生分布図とOlsonの分類による植生分布図、さらに、Holdridgeの分類による植生分布図とOlsonの分類による植生分布図をそれぞれ比較して、地球上で同一の場所にあるメッシュの植生の種類が同一であるものの面積を示す。本モデルによる植生分布と一致する面積の割合が一番高いのはHoldridgeの植生分類による熱帯林であり、一致する面積の割合が一番低いのはOlsonの植生分類による温帯林である。概して本モデルによる植生分布とHoldridge、Olsonの両植生分類による植生分布とを比較すると、熱帯林、寒帯林、植生なしの一致する面積の割合が高く、温帯林、草原の一致する面積の割合が低い。しかしながら、HoldridgeとOlsonの植生分布を比較すると同じ様な傾向が見られ、温帯林、草原の両植生の分布の記述は困難であるといえる。また、植生全体の一致する面積の割合は本モデルとHoldridgeの植生分類が66.3%、本モデルとOlsonの植生分類が52.4%、Holdridgeの植生分類とOlsonの植生分類が60.2%である。

以上、本モデルによる植生分布を他の3つの異なる方法で求められた植生分布と比較したが、本モデルによる植生分布は現在の植生分布を十分に再現できるものと思われる。

また、Table 4-2-2 によると本モデルによる計算値はメッシュを緯度5度×経度5度に区切った面積と、緯度1度×経度1度に区切った面積とでは各植生の面積が違うことが分かる。これは緯度5度×経度5度のメッシュはそのメッシュ内全てが同一の植生であるとしているためであり、そのために、緯度1度×経度1度のメッシュより精度が粗いといえよう。

さらに、Table 4-2-2とTable 3-1-3ではモデル計算による炭素蓄積量が異なっている。これはTable 3-1-3の計算が植生分布を固定している（Holdridgeの植生分類を用いている）ことと、Table 4-2-2では植生分類で「草原」を5 [kgC・m<sup>-2</sup>]以下、「植生なし」を0.5 [kgC・m<sup>-2</sup>]としているためである。

#### 4-3 パラメータの植生分布へ及ぼす影響

本モデルではいくつかのパラメータ使われているが、それぞれのパラメータが植生分布にどのような影響を与えるかを検討する。パラメータをTable 4-3-1のように植生

の種類に固有のパラメータと植生の活性と環境条件との関係を表わすパラメータにわけ、それぞれについて検討する。

#### 4-3-1 植生の種類に固有のパラメータの植生分布へ及ぼす影響

植生の種類に固有のパラメータをそれぞれ-75%~+75%変化させた時の植生の面積の変動をFigs. 4-3-1(a)~(h)に、植生の炭素蓄積量の変動をFigs. 4-3-2(a)~(h)に示す。ただし、熱帯林、温帯林、寒帯林すべてのパラメータを同時に変化させる。植生の種類に固有のパラメータのうち、 $A_1$ 、 $\alpha$ 、 $k_2^R$ 、 $k_2^L$ が変化しても植生の面積、炭素蓄積量の変動はあまり見られない。しかしながら、 $p_0$ 、 $K$ 、 $b$ 、 $k_1^L$ が変化すると植生の面積、炭素蓄積量の両方に変動がみられる。 $p_0$ 、 $b$ は個葉の光強度と光合成速度の関係を表わすパラメータである。Fig. 4-3-1(c)によると、 $K$ が大きくなるにつれて熱帯林の面積が増加し温帯林の面積が減少する。しかし、植生の炭素蓄積量をみると熱帯林の炭素蓄積量がほぼ横ばいであることから、単位面積当たりの炭素蓄積量は減少していることが分かる。これは $K$ が大きいと群落内の光透過が小さくなるためである。Oikawa (1986)は熱帯雨林の三層構造を記述したシミュレーションモデルによって、上層の葉が地球温暖化によって繁茂することによって、中・下層への光透過が減少し、その結果、中・下層の植生が成長できなくなるという結果を得ている。また、 $K$ が大きくなるにつれて熱帯林の面積が増加し温帯林の面積が減少するのは、温帯林の $K$ が熱帯林の $K$ に比べて大きくなり、その結果、温帯林の炭素蓄積量が減少するためである。 $p_0$ に関しては $K$ の全く逆が成り立つ。これはEq. 1-3-2からも予測することができる。 $b$ に関してはEq. 1-3-2から $K$ と同様の傾向をみせることが予測される。しかしながら、その変動は $K$ よりも激しい。これは $b$ が大きくなると、小さい光強度でも大きな光合成速度を得ることができるためである。また、 $b$ が小さくなると大きな光強度でも小さな光合成速度しか得られないため、森林が成長せず草原の面積が増大する。 $k_1^L$ が小さくなればなるほど植生の炭素蓄積量が増え、草原だった地域が森林へ移行し、特に炭素蓄積量の変動が急激に増える。

以上より光合成速度に関するパラメータが特に植生の面積や炭素蓄積量に大きな影響を与えることが分かった。

#### 4-3-2 温度条件に関するパラメータの植生分布へ及ぼす影響

植生の活性と温度条件との関係を表わすパラメータ $T_{opt}$ と $\Delta T$ をそれぞれ-75%~+75%変化させた時の植生の面積の変動をFigs. 4-3-3(a)、(b)に、植生の炭素蓄積量の変動をFigs. 4-3-4(a)、(b)に示す。Fig. 4-3-3(a)によると、 $T_{opt}$ に関しては草原や植生なしの面積は変わらないが、 $T_{opt}$ が大きくなるにつれて、熱帯林の面積が減少し、温帯林や寒帯林の面積が増加する。逆に、 $T_{opt}$ が小さくなるにつれて、熱帯林の面積が増加し、温帯林や寒帯林の面積が減少する。また、Fig. 4-3-3(a)によると、 $T_{opt}$ が大きくなるにつれて、植生の炭素蓄積量が減少し、 $T_{opt}$ が小さくなるにつれて、植生の炭素蓄積量が増加する。現在、熱帯林のある地域の平均気温は高く、ほぼ熱帯林の $T_{opt}$ と同程度である。よって、

熱帯林の $T_{opt}$ が高温側へずれると、こうした平均気温の高い地域における熱帯林の活性が低くなる。一方、温帯林や寒帯林の $T_{opt}$ が高温側へずれると、平均気温の高い地域における温帯林や寒帯林の活性が高くなり、熱帯林に変わって温帯林や寒帯林がその地域の優占種となる。また、熱帯林の $T_{opt}$ が低温側へずれると、平均気温の低く、それまで熱帯林の活性が低かった地域における熱帯林の活性が高くなる。一方、現在、温帯林や寒帯林のある地域の平均気温は低く、ほぼ温帯林や寒帯林の $T_{opt}$ と同程度である。よって、温帯林や寒帯林の $T_{opt}$ が低温側へずれると、こうした平均気温の低い地域における温帯林や寒帯林の活性が低くなり、温帯林や寒帯林に変わって熱帯林がその地域の優占種となる。

Figs. 4-3-5(a)~(e)に $T_{opt}$ が現状の場合における、Figs. 4-3-6(a)~(e)に $T_{opt}$ が-25%の場合における、Figs. 4-3-7(a)~(e)に $T_{opt}$ が+25%の場合における、各メッシュがHoldridgeの気候分類のどこに位置するかを各植生別に示す。Figs. 4-3-5(a), (b), Figs. 4-3-6(a), (b)を比べると、 $T_{opt}$ が-25%になると気候条件からは温帯林が存在すべきメッシュに熱帯林が侵入しているのが分かる。つまり、 $T_{opt}$ が減少することによって、温帯林が存在するような地域の低い温度に $T_{opt}$ が近づくためである。Figs. 4-3-5(a), (b), Figs. 4-3-7(a), (b)を比べると、 $T_{opt}$ が+25%になると気候条件からは熱帯林が存在すべきメッシュに温帯林が侵入しているのが分かる。つまり、 $T_{opt}$ が増加することによって、熱帯林が存在するような地域の高い温度から $T_{opt}$ が遠ざかるため、植生の成長が低くなるとおもわれる。

Fig. 4-3-4(b)によると、 $\Delta T$ が大きくなるにつれて、熱帯林と寒帯林の面積が増加し、温帯林の面積が減少する。逆に、 $\Delta T$ が小さくなるにつれて、温帯林や草原の面積が増加し、熱帯林や寒帯林の面積が減少する。また、Fig. 4-3-4(b)によると、 $\Delta T$ が大きくなるにつれて、植生の炭素蓄積量が増加し、 $\Delta T$ が小さくなるにつれて、植生の炭素蓄積量が減少する。熱帯林の $\Delta T$ が大きくなると、それまで熱帯林の活性の低かった中・低温地域の活性が上昇し、中・低温地域に熱帯林が侵入ことを意味する。また、同時に寒帯林の $\Delta T$ が大きくなると、それまで寒帯林の活性の低かった中・高温地域の活性が上昇し、中・高温地域に寒帯林が侵入ことを意味する。よって、これら高温域の熱帯林と低温域の寒帯林に挟まれた中温域の温帯林は減少する。逆に、それぞれの $\Delta T$ が小さくなると温帯林が増加する。ただし、 $\Delta T$ が小さくなりすぎると植生の成長する温度範囲が小さくなり、森林が育たなくなり、草原が増加する。

以上より、植生の温度に関するパラメータは植生の面積や炭素蓄積量に大きく影響を与えることが分かった。

#### 4-3-3 土壤条件に関するパラメータの植生分布へ及ぼす影響

植生の活性と土壤条件との関係を表わすパラメータ $W_{wp}$ と $W_{lc}$ のとりうる値の組み合わせは土性の種類によって12通りある。現状では世界中には様々な土性が分布しているが、世界の土性が一様であると仮定して、12種類の土性それぞれが世界に一様に分布している時の植生の面積の変動をFig. 4-3-8に、植生の炭素蓄積量の変動をFig. 4-3-9に示す。植生の面積はheavy clayからloamまでほぼ一様であるが、sandy clay loamからは急激に森

林の面積が減少し、草原の面積が減少することが分かる。植生の炭素蓄積量に関しても同様の傾向が伺える。また、Figs. 4-2-6(a)~(e)にすべてのメッシュの土性がheavy clayであるとした場合の、Figs. 4-3-10(a)~(e)にすべてのメッシュの土性がlight clayであるとしたの、Figs. 4-2-7(a)~(e)にすべてのメッシュの土性がsandy loamであるとしたの、各メッシュがHoldridgeの気候分類のどこに位置するかを示す。Figs. 4-2-6(a)~(e)とFigs. 4-3-10(a)~(e)は特に草原に属するメッシュ数ではほぼ同様の傾向を示すが、Figs. 4-2-7(a)~(e)は草原に属するメッシュ数が増えている。以上より、植生の活性と土壌条件との関係はloamとsandy clay loamを境にして大きく異なることが分かる。

#### 4-4 植生分布の変動予測

前節では現在の気候条件における植生分布をモデルによって記述した。本節では将来の気候変動後の気候条件における植生分布を予測する。現在大気中の炭酸ガス濃度倍増時の気候変動は様々な機関の3次元気候モデル(大気大循環モデル:GCM)によって予測されており、Table 0-1-1やFig. 0-1-1に示すようにHoughton et al. (1990)がそれらをまとめている。本節では、Table 0-1-1の中でも水平の解像度が高く、雲量の予測をし、海流の熱移動を考慮したCanadian Climate Center (CCC)、Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL)、United Kingdom Meteorological Office (UKMO)の各GCMの計算結果を気候変動のシナリオとして用いる。本研究で用いた各GCMの炭酸ガス倍増時の平衡状態における温度上昇と降雨量増加の全球平均をTable 4-4-1に示す。また、各GCMの予測する気候変動は、地域や季節によってその変動幅が異なる。各GCMの冬季及び夏季の温度増加分布及び降雨量増減分布図をFigs. 4-4-1(a)~(c)に示す。計算は陸地を緯度1度×経度1度のメッシュに区切り、初期条件は現在の気候条件(The IIASA Climate Database、Leemans and Cramer, 1990)を用いて計算した結果を用い、定常状態に達するまで行った。

Figs. 4-4-2(a)~(d)に現在の気候条件における植生分布及び、各GCMの計算結果に基づいた将来の植生分布を示す。Figs. 4-4-3(a)~(d)に現在の気候条件における植生の炭素蓄積量の分布及び、各GCMの計算結果に基づいた将来の炭素蓄積量の分布を示す。Tables 4-4-2(a)~(c)に各GCMの計算結果に基づいた将来の各植生の面積及び、炭素蓄積量の大陸別変動を示す。Fig. 4-4-3(a)と(b)を比較すると、CCCのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積を計算すると、南米の熱帯林が若干減少し、北米の寒帯林が減少し、ヨーロッパの森林が減少しているのが分かる。Fig. 4-4-3(a)と(c)を比較すると、GFDLのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積を計算すると、南米、アフリカの熱帯林が減少し、ヨーロッパの森林が減少しているのが分かる。また、Fig. 4-4-3(a)と(d)を比較すると、UKMOのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積を計算すると、ヨーロッパの森林が減少しているのが分かる。Figs. 4-4-1(a)~(c)によると、このような森林の減少の見られる地域には、次の2つのどちらかがあてはまるとえよう。1つは温度の大幅な上昇の見られる地域(これはヨーロッパに該当する)であり、もう1つは温

度の上昇と降雨量の減少が同時に起こる地域（これは南米に該当する）である。また、Tables 4-3-2(a)~(c)によると、CCCのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積及び、植生の炭素蓄積量を計算すると、地球規模で森林の面積は7.7%減少し、森林の炭素蓄積量は8.2%減少する。さらに、全植生の炭素蓄積量は6.9%減少する。GFDLのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積及び、植生の炭素蓄積量を計算すると、地球規模で森林の面積は7.6%減少し、森林の炭素蓄積量は10.4%減少する。さらに、全植生の炭素蓄積量は6.6%減少する。UKMOのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積及び、植生の炭素蓄積量を計算すると、地球規模で森林の面積は0.4%減少し、森林の炭素蓄積量は1.0%減少する。さらに、全植生の炭素蓄積量は0.5%減少する。CCCとGFDLの予測を用いた計算は、ほぼ同程度の陸上生態系の衰退を示す。しかしながら、UKMOの予測を用いた計算は、陸上生態系のわずかな衰退を示す。これはUKMOの気候変動の予測が他のGCMに比べて、気温の大幅に上昇する地域がアジアの草原地帯に集中していることと、降雨量の減少する地域が他のGCMに比べて少ないことが挙げられる。

第3章では植生の面積や炭素蓄積量の減少が温度の上昇によることが示唆されたため、本節では温度に関するパラメータの変動によって、植生の面積や炭素蓄積量がどう変動するかを検討した。5つの植生分類の中でも熱帯林に着目して熱帯林の $T_{opt}$ のみを-75%~+75%変化させた。Figs. 4-4-4(a), (b)に熱帯林の $T_{opt}$ を変化させたときの気候変動前後の熱帯林、温帯林、寒帯林それぞれの植生の面積と炭素蓄積量の変化を示す。気候変動はGFDLのGCMの計算結果を用いた。Fig. 4-4-4(a)によると、 $T_{opt}$ が25℃より小さいと気候変動前後では熱帯林は衰退し、 $T_{opt}$ が25℃より大きいと熱帯林は増大することが分かる。これは $T_{opt}$ が小さいと、温度上昇によりそれまで気温が $T_{opt}$ 以下であった地域の気温が $T_{opt}$ を越え、光合成速度の温度依存性が減少するためである。一方、 $T_{opt}$ が大きいと、たとえ温度が上昇しても気温が $T_{opt}$ を越えないため、その分光合成速度の温度依存性が増大するためであるといえよう。いずれにせよ、 $T_{opt}=25\sim30\text{℃}$ 付近が熱帯林の面積や炭素蓄積量が気候変動によって衰退するか増大するかの境界であるといえよう。また、Fig. 4-4-4(a)より、熱帯林が減少すれば温帯林や寒帯林が増大し、逆に熱帯林が増大すれば温帯林や寒帯林が減少することが分かる。これによって、熱帯林が衰退するとその地域に温帯林や寒帯林が侵入することが示唆される。

Monserud and Leemans (1992)はHoldridgeの植生分類を用いてそれぞれのGCMが予測した気候変動から植生の面積の分布の変動をTable 4-4-3のように予測した。Table 4-4-3によると、熱帯林は気候変動によって増大するもの(Tropical Dry Forest, Tropical Rain Forest)と減少するもの(Tropical Seasonal Forest)がある。実際の熱帯林の $T_{opt}$ がTable 1-3-8によると25~30℃であることから、気候変動によって熱帯林が増大するものと減少するものが様々であることがFigs. 4-4-4(a), (b)より予測されるが、これはTable 4-4-3の結果と一致するといえよう。しかしながら、熱帯林の総計に関しては本モデルでは3.6%減少(Table 4-4-2(b)より)に対して、Table 4-4-3では17%増加となっており相反する。これは、Table 4-4-3がHoldridgeの植生分類(Fig. 0-3-1)のみから求めた結果であり、温度上昇による光合成速度の減少を組み込んでいないためであると考えられる。以上より、温度に関するパラメータが気候変動後の植生の変動を予測するの

に重要な役割を果たすことが分かった。

#### 4-5 非定常状態における植生分布の変動

植生分布変動の過程を記述するためには、ある植生から別の植生に変化する速度を考慮することが重要であるといえよう。このような過程を考慮するために森林の更新過程をモデルに組み込む必要がある。Shugart (1984) は木の発芽から、成長、死に至るまでの過程を考慮し、森林生態系の更新を記述するシミュレーションモデルを構築した。Shugart (1984) によると、森林の更新過程は次の3つの過程がある。

- 1 既存の植生が枯死する過程
- 2 裸地になったところにいくつかの新たな植生が発芽し、成長する過程
- 3 いくつかの植生同士の競争の結果新たな植生がその場所を優占する過程

現在の気候下でも上記の過程は起こるが、過程3のところで新たに優占する植生は既存の植生と同じな為結果として植生分布は変化しないといえる。しかしながら、将来の気候変動後では過程3のところで既存の植生と違う植生が優占する可能性があるので地球規模の植生分布の変化が起こりうるといえよう。

Shugart (1984) はまた、自らの森林の更新モデルに、森林生態系におけるギャップフェイズという概念を導入している。ギャップフェイズとは、一様に見える森林生態系であっても、植生の成長過程(枯死直後のフェイズ、様々な植生が発芽し、成長の途中段階にあるフェイズ、植生が十分に成熟しているフェイズ)によって、いくつかの植生のまとまり(パッチ)に分割することができ、モザイクのような構造を形成している。そして各パッチ毎に上記の森林更新の過程を繰り返すので、全体として森林生態系が定常状態にあるように見えるという概念である。そこで本研究ではこの概念を導入し、非定常状態における植生の分布の変動モデルを構築した。

Fig. 4-5-1に本モデルにおいて導入した、森林生態系の更新過程の概念を示す。上記のような森林生態系の更新過程は地球の陸地を緯度5度×経度5度に分割したメッシュ毎に起こるとした。過程1の植物の枯死速度は森林生態系の更新速度に依存するものと仮定する。1つのメッシュ内の森林生態系の更新速度が $RN$  [yr]とすると、そのメッシュ内は $RN$ 個のエリアに分割することができる。現在の気候条件下ではFig. 4-5-1(a)に示すように、 $RN$ 個のエリア全てに同一の植生がすでに存在しているものとする。そして毎年、Fig. 4-5-1(b)-1に示すように、そのエリア1つずつの森林が枯死し、裸地が生じる。しかしながら、気候変動によってFig. 4-5-1(b)-2に示すように、全てのエリアの植生が枯死してしまう場合がありうる。その場合には全てのエリアに一斉に新たな植生が発芽するものとする。1つのエリアが裸地になった後、Fig. 4-5-1(c)に示すように、そのエリアにはいくつかの新たな植生が発芽し、成長する。そして、そのエリアで植生同士による競争が起こり、その競争に勝ったものがそのエリアを優占する。競争は前節で述べたように各植生の炭素蓄積量の大小で決まるものとする。その競争の結果、Fig. 4-5-1

(d)-1に示すように新たな植生が既存の植生と同じであれば、その後の次々とメッシュ内の各エリアで更新が進んだとしても、Fig. 4-5-1(e)-1に示すようにそのメッシュの植生は変化しない。しかしながら競争の結果、Fig. 4-5-1(d)-2に示すように新たな植生が既存の植生と違う種であれば、その後の次々とメッシュ内の各エリアで更新が進むことによって、Fig. 4-5-1(e)-2に示すようにそのメッシュ内の過半数のエリアの植生が変化すると、そのメッシュの植生は変化する。以上のように植生の変動が起こると仮定した。

#### 4-6 過去の植生分布の変動

前節で述べた森林の更新過程を考慮した非定常状態における植生分布の変動予測モデルが実際の植生の更新過程を再現することが可能かということを過去における植生の分布と比較することによって検証する。過去の環境変動と植生分布の関係についての研究は2つに分類することができる。1つは花粉の化石やボーリングコアなどの分析によって極めて長いスケールの過去の気候や植生分布を推定する古生態学的方法であり、もう1つは人工衛星から直接地球環境を観察する方法である。この方法は、近年急速に研究されつつあり (Woodwell, 1984)、こうした最近の数年間に蓄積されたデータを用いることによってごく近い過去の植生分布の変動が分かる。

地球の大気状態、気候条件、植生分布は過去大きく変化してきた。門村ら (1990) はアフリカ大陸における過去2万年の気候変動とそれに対応する植生分布の変動をまとめている (Table 4-6-1, Fig. 4-6-1)。Fig. 4-6-2に過去2万年の炭酸ガス濃度の変動を示す (茅根, 1993)。このように地球の植生分布は過去の気候変動と共に大きく変動していることが分かる。しかしながら、今後地球温暖化によって起こるであろう植生分布の変動はこうした地球が過去に経験した植生分布の変動よりも急激であることが予測される。例えば、北アメリカ大陸でのブナの成育範囲の変化を考えると約1万5千年前に北アメリカが温暖化した際に、ブナは年間20kmの速さで移動したことが、化石解析より明らかになっているが、Roberts (1989) の予測によると将来の気候温暖化によってブナは100年間に700~900kmの距離を移動しなければならない (高橋, 1991)。また、こうした極めて長い時間スケールの環境変動には気候変動だけではなく地形変動も起こったことが考えられる。門村 (1987) は中期の湿潤期ではサバンナ化~ステップ化していた赤道地帯の斜面では活発な熱帯性の豪雨により土壌侵食が起こり、それまで砂丘で閉塞されていたナイル、ニジェール、コンゴなどの各河川に大洪水が頻発するようになった、としている。しかしながら、今後起こる気候変動によって極めて大規模な地形変動が起こるとは考えられない。

このように過去の古生態学的な気候変動は極めて長いスケール (約1000年) で起こったが、今後地球温暖化によって起こるであろう気候変動の時間スケールは約100年程と考えられる。また、こうした環境変動は大規模な地形の変動を伴うので、こうした古生態学的なデータを今後100年間の植生分布の変動の検証に用いるのは不適であると考えられる。

一方、人工衛星からのデータによる植生分布の変動は時間スケールが1年であるので、今後100年間の植生分布の変動の検証するデータとしては適していると考えられる。用いているデータは1983～1987における人工衛星データによる植生面積の変動 (Honda et al., 1993) を用いた。計算は地球を緯度5度×経度5度のメッシュに区切り、各メッシュ毎に1983～1987の気温と降雨量のデータを用いた。まず、現在の気候条件 (The IIASA Climate Database, Leemans and Cramer, 1990) で約100年間計算を行ない、その時点での炭素蓄積量を初期条件とした。ただし、その間の100年間は同じ気候条件で計算した。計算はRN=30 [yr]として行った。Fig. 4-6-3に本モデルによる「熱帯林+温帯林」と「熱帯林+温帯林+寒帯林」の面積の変動及び、人工衛星データによる「熱帯林+常緑林+落葉林」と「熱帯林+常緑林+落葉林+ツンドラ」の面積の変動の比較を示す。また、Table 4-6-2に人工衛星データによる植生面積の変動と本モデルによる植生面積の変動を示す。人工衛星データによると1983～1984は森林の面積が極端に低いことが読み取れる。この両年は世界的な異常気象のために人工衛星データによる植生分布は実際の植生を再現しているとはいえず (Honda et al., 1993)、計算結果と比較することは不適格である。Dregne and Tucker (1988) によると人工衛星データによって求めたアフリカの砂漠の境界線が1984年を境に1年間に200kmも移動している。これは降水変動に伴う植生の短期的変化と砂漠化による土地の長期的劣悪化現象との識別を困難なものにしている。門村ら (1991) はアフリカの砂漠の急激な変動について干ばつ以前と同種の植生が砂漠地域へ侵入したかあるいは埋土種子の発芽や生き残った地下茎からの回復によるものかは不明であり、また、みかけ上の植生分布は同じであっても乾燥に強い種に置き変わっている可能性がある、としている。よって、本モデルの検証のためのデータとしては1985～1987のデータが適当であると考えられる。

Honda et al. (1993) の植生分類ではツンドラは森林には分類されないので、Table 4-6-2の「熱帯林+温帯林」が本モデルの「熱帯林+温帯林+寒帯林」と対応すると考えられる。1985～1987までは、森林の面積の増減に関しては、ほぼ同じ傾向が見られる。86で森林の面積がHonda et al. (1993) では $0.4 [10^6 \text{km}^2]$  (1985の面積の+0.8%)、本モデルでは $0.7 [10^6 \text{km}^2]$  (85の面積の+1.4%)とやや上昇し、87でそれぞれ $1.2 [10^6 \text{km}^2]$  (1986の面積の-2.6%)、 $3.4 [10^6 \text{km}^2]$  (1986の面積の-6.6%)と大きく減少している。また、Table 4-6-3に本モデルによる植生分布とHonda et al. (1993) による植生分布の森林の面積と森林以外の面積をそれぞれ比較して、地球上で同一の場所にあるメッシュの植生の種類が同一であるものの面積を示す。Table 4-2-3に示したような本モデルと他の植生分類とが一致する面積の割合に比べ、85～87の森林の面積に関しては一致する面積の割合はほぼ30%前後 (森林に以外は20%前後) であり、かなり低い。Bolle and Rsasool (1985) や熊崎 (1990) によると人工衛星データによる植生分類が実際の植生分布とずれることが指摘されており、現時点では本モデルと人工衛星データとの一致する面積の割合が低いのもやむを得ないとえよう。しかしながら、Fig. 4-6-3やTable 4-6-2に示すように、本モデルで非定常状態における植生分布の変動は十分に記述できるといえよう。

#### 4-7 非定常植生分布変動モデルによる将来予測

本節では将来の気候変動が植生分布へ及ぼす影響を非定常状態過程を考慮した植生分布変動モデルによって予測する。気候変動幅は前章と同様にGFDL、CCC、UKMOの3つのGCMの出力結果を用いる。ただし、大気中の炭酸ガス濃度が2倍になり、Table 4-3-1のような気候変動に達するのは100年後とし、それまでは炭酸ガス濃度、気温上昇、降雨量増減は経過年数に比例するものとした。初期条件は現在の気候条件(The IIASA Climate Database、Leemans and Cramer、1990)によって計算した計算値を用い、計算は100年間行った。Figs. 4-7-1(a)~(f)にCCCのGCMの出力結果に基づいた植生分布の変動を示す。また、Figs. 4-7-2(a)~(f)に各GCMの出力結果に基づいた植生面積及び植生の炭素蓄積量の変動を示す。ただし、各植生の変動が不連続的に起こるのは、植生の面積が各メッシュ毎に代わるためである。Figs. 4-7-1(a)~(f)によると、20年後までは中央アジアでの草原が温帯林と植生なしの地域に別れることが分かる。しかしながら、気候変動が進むにつれて温帯林の地域が草原地域に移行する地域も見られることが分かる。また、80~100年後になると、アフリカや南米の熱帯林のなかで草原に衰退していくの地域があることも分かる。Figs. 4-7-2(a)、(b)に示すように、CCCのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積及び、植生の炭素蓄積量を計算すると、初期の時点で温帯林の面積が増加するが、その後は熱帯林の面積とともに減少する。全体の炭素蓄積量も初期の時点では増加するが徐々に減少し、100年後の時点ではほぼ現状と同じレベルまで落ちてしまう。Figs. 4-7-2(c)、(d)に示すように、GFDLのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積及び、植生の炭素蓄積量を計算すると、温帯林が増え、100年以内では増加傾向が続く。一方熱帯林はあまり変わらないことが分かる。全体の炭素蓄積量に関してCCCのGCMによる予測を用いた計算と同様に初期の時点では増加するが徐々に減少し、100年後の時点ではほぼ現状と同じレベルまで落ちてしまう。Figs. 4-7-2(e)、(f)に示すように、UKMOのGCMの気候変動の予測を用いて植生の面積及び、植生の炭素蓄積量を計算すると、植生の面積、炭素蓄積量の両者ともCCCのGCMによる予測を用いた計算と同様の傾向を示す。しかしながら、気候条件が定常に達するとTables 4-4-2(a)~(c)に示した結果に徐々に近づくことが予測されるため、すべての森林が100年経過以降、徐々に衰退していくものと考えられる。また、Figs. 4-7-2(a)、(c)、(e)によると、いずれの結果も温帯林の面積の増加する反面、草原の面積が減少することが予測される。これは、草原の炭素蓄積量が $5 \text{ [kgC} \cdot \text{m}^{-2}]$ 以上になり、森林へ移行するためであるといえる。しかしながら、Figs. 4-7-2(b)、(d)、(f)によると、その炭素蓄積量の増加はあまり大きくないことがわかる。つまり、草原地帯がすぐに温帯森林を形成するのではなく、サバンナのような草原と森林の中間体に移行するものとおもわれる。

Figs. 4-7-3(a)~(d)に気候変動が平衡状態に達するまでの時間と各植生の面積の変動の関係を示す。Figs. 4-7-3(a)、(c)によると、熱帯林や寒帯林では気候変動が平衡に達するまでの時間が長いと植生の面積の変動も緩やかであること示されている。この傾向はわずかではあるが温帯林に関しても見られるが、草原には見られない。これは気候変動の影響が、まず森林に表れ、その森林が変動することによって草原の面積が変動するた

めであると考えられる。また、気候変動が平衡状態に達するまでの時間（大気中の炭酸ガス濃度が現在の濃度の2倍になるまでの時間）は、炭酸ガス排出のシナリオや排出された炭酸ガスの大気残留率などによって様々であるが、NAS（米国科学アカデミー）モデルによると炭酸ガス倍増の時期が2050年以前となる確率は25%で、2050~2010年となる確率は50%であるとしている（茅、1987）。よって、気候変動が平衡状態に達するまでの時間が10ないし30年の時ような変動は考えられないが、50年のときであってもFig. 4-7-3(c)に示すような急激な植生分布の変動（60年間で約 $10 \times 10^6 \text{ km}^2$ の寒帯林の減少）が起こることが予測される。

#### 本章のまとめ

陸上生態系の炭素循環モデルを記述するモデルを用いて、植生分布の変動を予測するモデルを構築した。植生分布に関して他の文献値と比較することによって、本モデルによって現状の植生分布が十分に記述できることを示した。また、モデルで使用されている各パラメータを検討することによって、光合成速度に関するパラメータ、温度条件に関するパラメータ、土壌条件に関するパラメータが植生の面積や炭素蓄積量に大きな影響を及ぼすことが分かった。また、GCMの気候変動の予測を用いて、将来の植生分布及び、炭素蓄積量の変動に関する予測を行なった。それによると植生の面積及び、炭素蓄積量両者共に減少することが示された。

さらに、植生分布の変動を予測するモデルを発展させ、非定常状態における植生分布の変動を予測するモデルを構築した。植生分布の変動に関して、過去の人工衛星データによる植生の分布とを比較することによって、本モデルによって植生分布の変動が十分に記述できることを示した。また、GCMの気候変動の予測を用いて、将来の植生分布及び、炭素蓄積量の変動に関する予測を行なった。それによると初期の時点では、植生の面積及び、炭素蓄積量両者共に増加するが、その後徐々に減少することが示された。

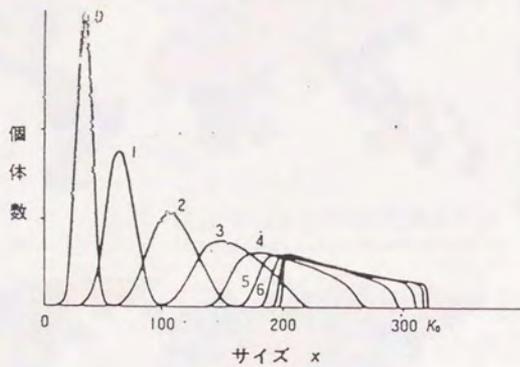


Fig. 4-1-1 非対称な競争がある時のサイズ分布の変化 (Takada and Iwasa, 1986)

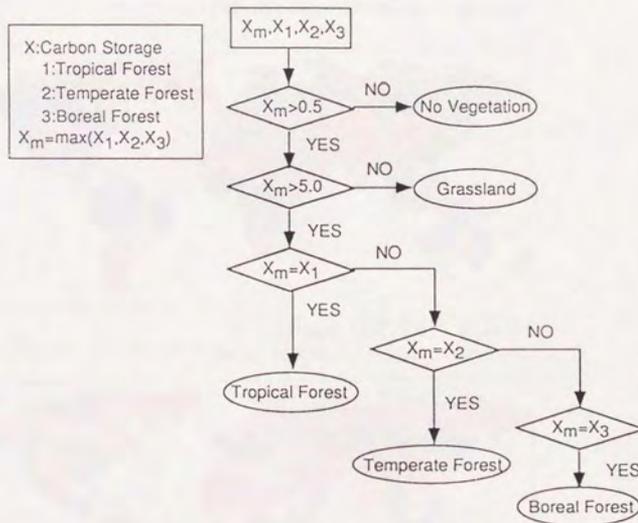


Fig. 4-1-2 優占種決定までの流れ図 (kgC/m<sup>2</sup>)

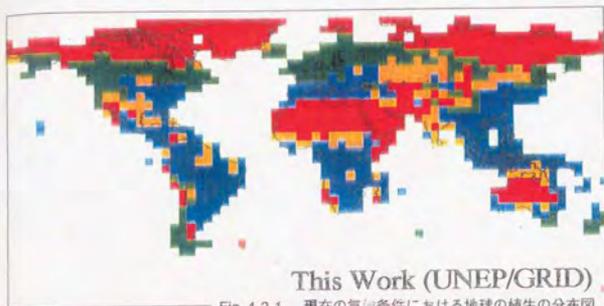


Fig. 4-2-1 現在の気候条件における地球の植生の分布図

- 熱帯林
- 温帯林
- 寒帯林
- 草原
- 植生なし

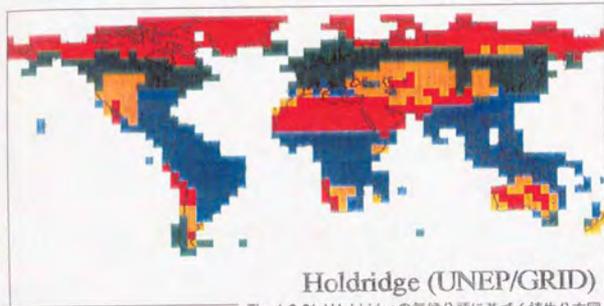


Fig. 4-2-2(a) Holdridgeの気候分類に基づく植生分布図

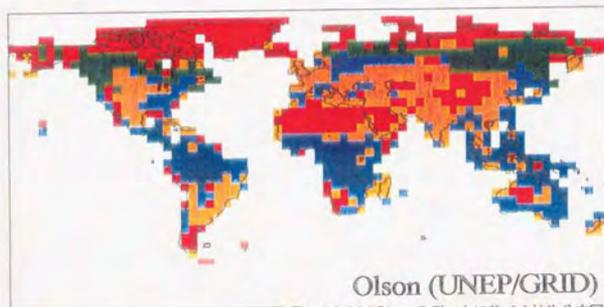


Fig. 4-2-2(b) Olsonのデータに基づく植生分布図

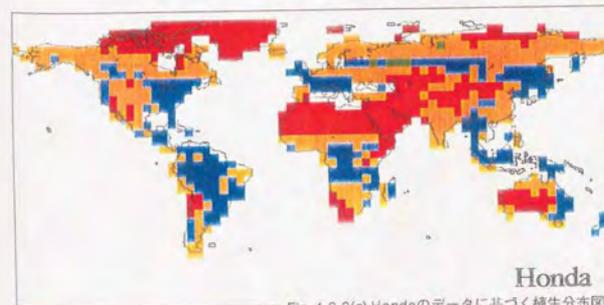


Fig. 4-2-2(c) Hondaのデータに基づく植生分布図

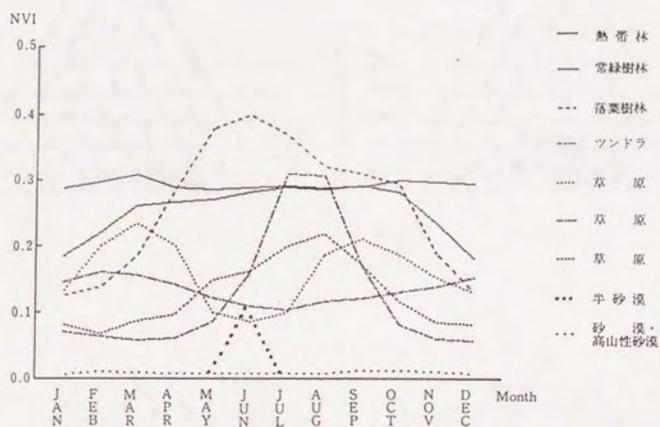
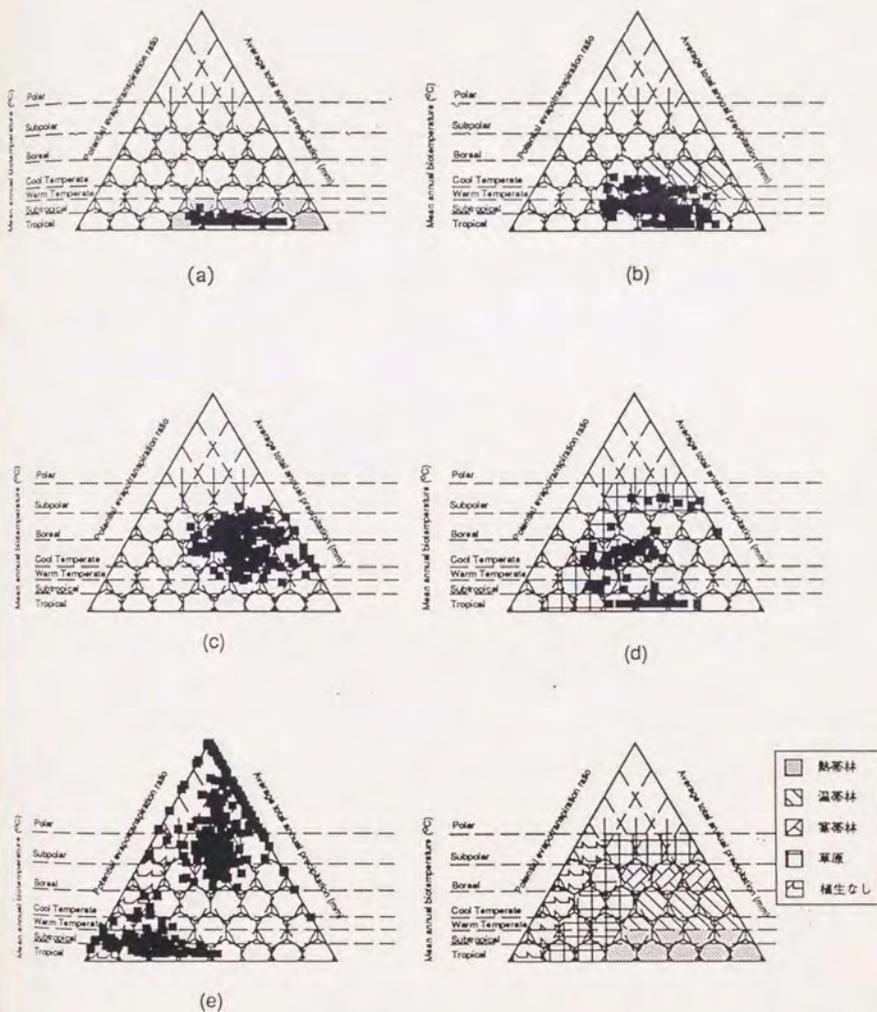
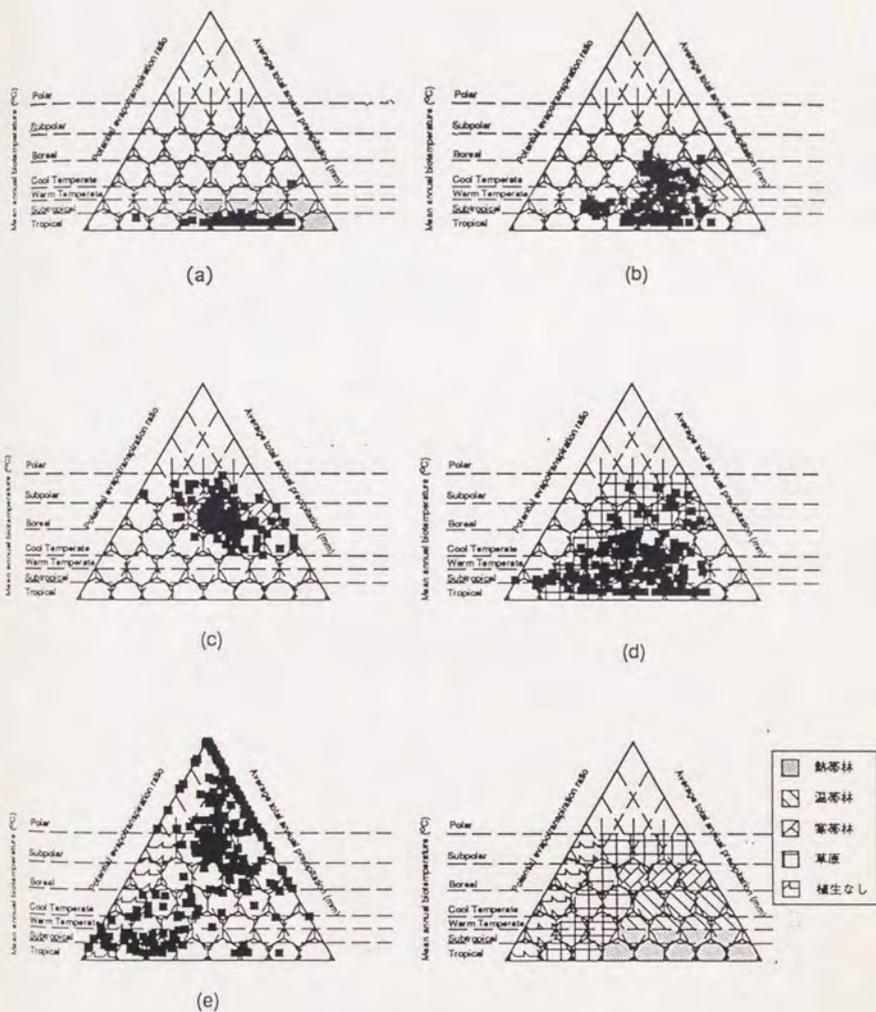


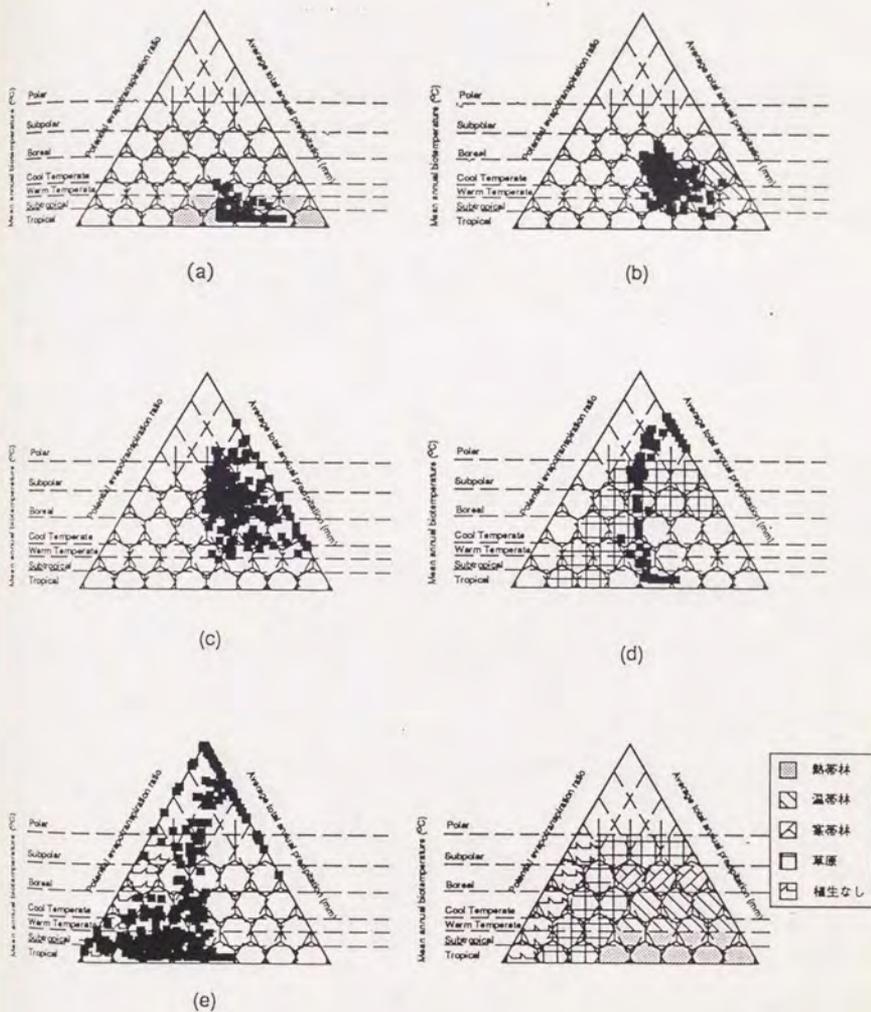
Fig. 4-2-3 植生区分と植生季節指標パターン (Honda et al., 1992)



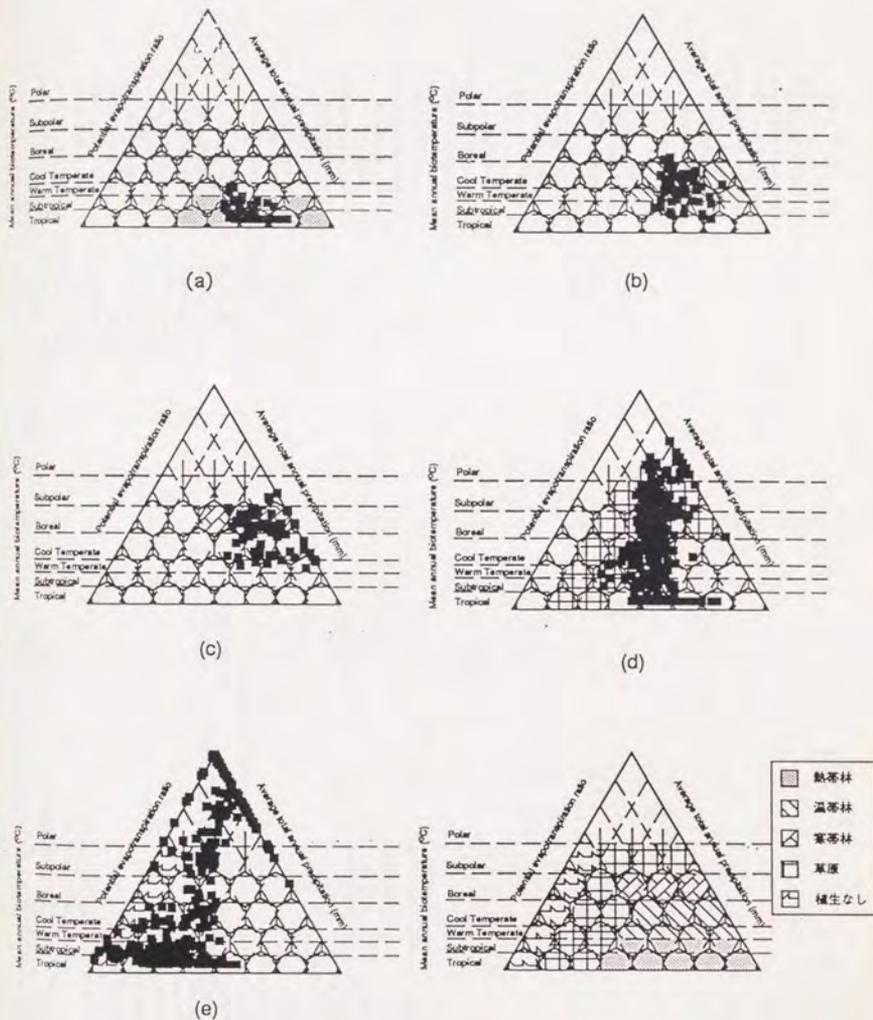
Figs. 4-2-4 (a)~(e) 本モデルの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし



Figs. 4-2-5 (a)~(e) Olsonの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし



Figs. 4-2-6 (a)~(e) 本モデルの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 (土性分布が全てheavy clayの場合)  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし



Figs. 4-2-7 (a)~(e) 本モデルの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 (土性分布が全て *sandy loam* の場合)  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし

Table 4-2-1 種別分類 (Holdridge's, 1947; Olson, 1983; Honcda et al., 1992)

This work 種別	Holdridge	Olson	Forma et al.
	Subtropical dry forest	Main oropical/subtropical forest	Tropical forest
	Tropical very dry forest	Broad-leaved humid forest	
	Subtropical moist forest	Dry forest and woodland	
	Tropical dry forest		
	Subtropical wet forest		
	Tropical moist forest		
	Subtropical rain forest		
	Tropical wet forest		
	Tropical rain forest		
闊葉林	Warm temperate dry forest	Mostly mid-latitude broad-leaved and mixed	Evergreen forest
	Warm temperate wet forest	Temperate broad-leaved forest	Deciduous forest
	Warm temperate moist forest	Mixed woods deciduous to evergreen broad-leaved, often with conifer	
	Warm temperate rain forest		
	Temperate deciduous forest		
	Cool temperate moist forest		
	Cool temperate wet forest		
	Cool temperate rain forest		
蕨葉林	Boreal moist forest	Mostly taiga and other conifer	Tundra
	Boreal rain forest	Main taiga	
	Boreal wet forest	Southern taiga	
	Other conifer		

This work  
種別

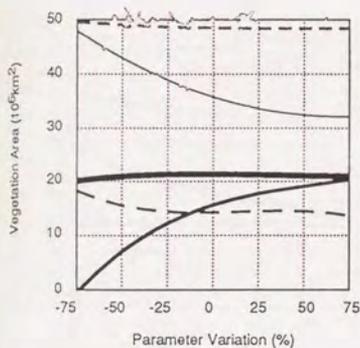
Holdridge	Olson	Forma et al.
Subpolar wet tundra	Tropical savanna and woodland	
Warm temperate desert scrub	Tropical monsoon complexes: Tall or dwarfed forest	
Subpolar rain tundra	grass, scrub, paramo moor	
Warm temperate thorn steppe	Woods/Scrub/Grass complexes	
Boreal desert	Succulents and thorn woods	
Subtropical desert	Mediterranean types	
Boreal dry scrub	Other dry or highland woods	
Subtropical desert scrub	Semiarid woodland or low forest	
Cool temperate desert	Second growth woods & field mosaics	
Subtropical thorn forest	Forest/field (allopatric)	
Cool temperate desert scrub	Tropical/subtropical humid forest	
Tropical desert	Temperate/boreal forest	
Cool temperate steppe	Forest/woods (allopatric)	
Tropical desert scrub	Temperate woods	
Warm temperate desert	Fields, grass, scrub	
Tropical thorn woodland	Irrigated land and surroundings	
	Pastureland	
	Other irrigated dryland	
	Other crop, settlements, and marginal lands	
	Cool or cold farms, towns	
	Warm or hot farms, towns	
	Main grassland of shrubland	
	Warm or hot shrub and grassland	
	Cool grassland/scrub	
	Heath and moorland	
	Cold grass of tundra woody complex	
	Tibetan, Siberian	
	Wooded tundra	
種別	Tundra and desert	Semi-Desert
	Tundra, arctic desert, and ice	Mountain Desert
	Nonpolar desert of semidesert	Desert
	Cool semidesert scrub	
	Sand desert	
	Other desert and semidesert	
	Spurs (rocky) vegetation	
	Wetland and/or coastal	
	Mtjck wetlands	
	Bog/Mire of cool or cold climates	
	Warm or hot wetlands (mangrove/ Tropical swamp forest)	
	Other coastal, aquatic and miscellaneous	
	Shrub and haterland complexes	

Table 4-2-2 各植生の面積の文献値と計算値の比較

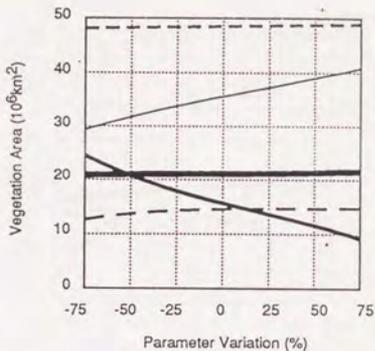
	熱帯林(a)	温帯林(b)	(a)+(b)	寒帯林(c)	(a)+(b)+(c)	草原	植生なし	合計
Holdridge	42.2	18.3	60.5	20.8	81.3	21.4	40.5	143.2
Olson	23.0	23.3	46.3	17.2	63.5	40.2	44.0	147.6
Honda	6.7	38.5	45.1	4.3	49.4	43.2	41.9	134.5
This work (5 deg.)	37.2	28.4	65.6	11.6	77.2	11.3	47.3	135.8
This work (1 deg.)	26.1	19.2	45.3	11.7	57.0	20.9	63.4	141.4
Whittaker	24.5	12.0	36.5	12.0	48.5	48.0	52.5	149.0
依田	18.0	11.0	29.0	12.0	41.0	69.0	28.0	138.0

Table 4-2-3 本モデル、Olson、Holdridgeの各植生分類による各植生の面積の比較

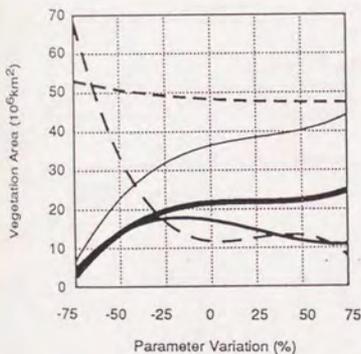
	Tropical Forest	Temperate Forest	Boreal Forest	Grass- land	No Vege- tation	Total
(a) This Work [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	37.2	28.4	11.6	11.5	47.3	136.0
(b) Holdridge [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	45.2	15.2	18.1	21.3	36.3	136.0
(c) Olson [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	28.2	18.5	16.3	39.1	33.7	135.8
(d) Agreement area between (a) and (b) [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	33.8	12.2	7.5	5.1	31.5	90.1
(e) (d)/(a) [%]	90.9	42.9	64.7	44.4	66.6	66.3
(f) Agreement area between (a) and (c) [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	22.9	9.5	6.4	6.1	26.4	71.2
(g) (f)/(a) [%]	61.5	33.3	55.0	53.1	55.8	52.4
(h) Agreement area between (b) and (c) [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	27.9	6.3	11.2	11.9	24.6	81.9
(i) (h)/(b) [%]	61.7	41.7	62.1	56.0	67.7	60.2



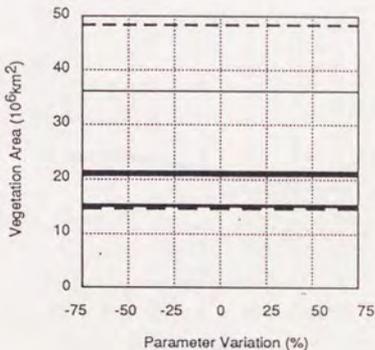
(a)  $p_0$ : 光飽和時の光合成速度



(b)  $K$ : 植物群落内の光の透過係数



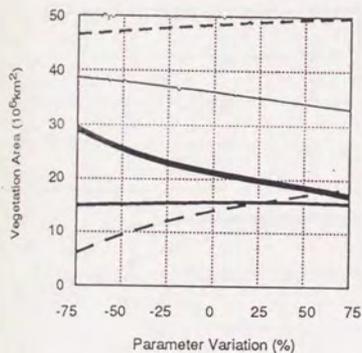
(c)  $b$ : 光合成速度と光強度関係における初期勾配



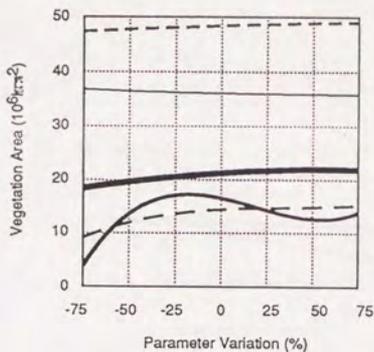
(d)  $A_L$ : 葉の比表面積

Figs. 4-3-1(a)~(d) 各パラメータと植生分布との関係 (1)

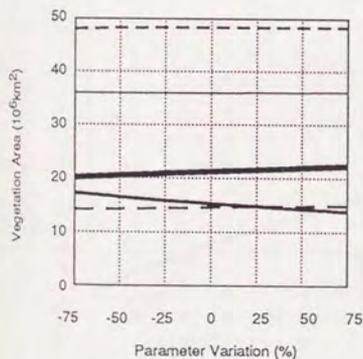
——— 熱帯林    ——— 温帯林    ——— 寒帯林  
 - - - 草原    - - - 植生なし



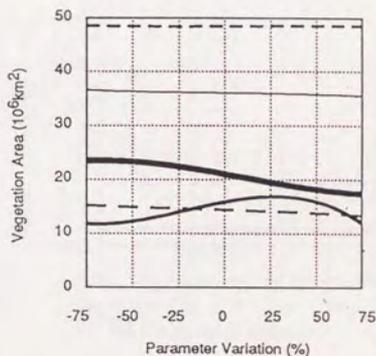
(e)  $k_1^L$ : 葉の枯死速度定数



(f)  $k_2^R$ : 幹の呼吸速度定数



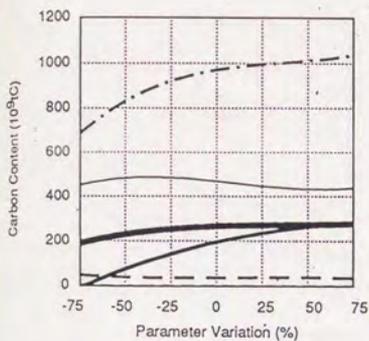
(g)  $k_2^L$ : 幹の枯死速度定数



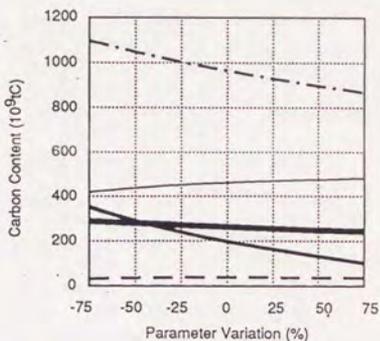
(h)  $\alpha$ : 光合成による固定化炭素のうち葉への分配比

Figs. 4-3-1(e)~(h) 各パラメータと植生分布との関係 (2)

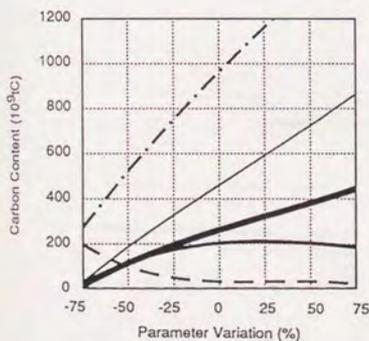
——— 熱帯林    ——— 温帯林    ——— 寒帯林  
 - - - 草原    - - - 植生なし



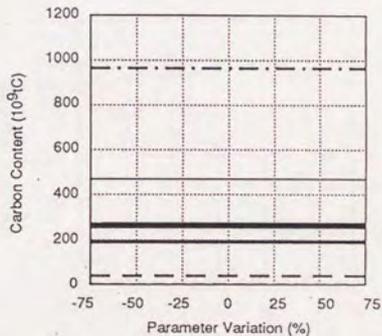
(a)  $\rho_0$ : 光飽和時の光合成速度



(b)  $K$ : 植物群落内の光の透過係数



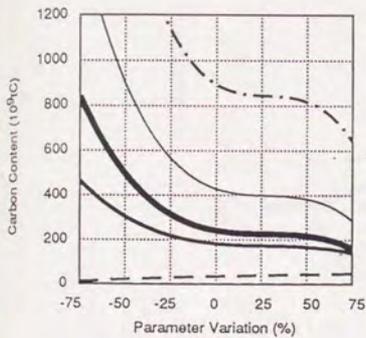
(c)  $b$ : 光合成速度と光強度関係における初期勾配



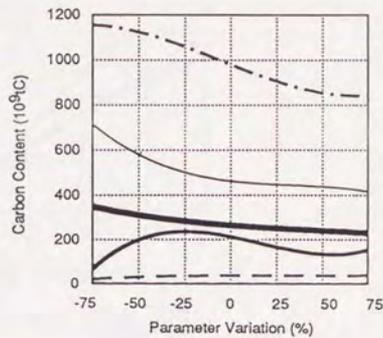
(d)  $A_L$ : 葉の比表面積

Figs. 4-3-2(a)~(d) 各パラメータと植生の炭素蓄積量との関係 (1)

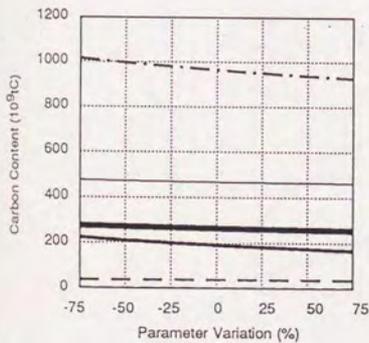
——— 熱帯林    ——— 温帯林    ——— 寒帯林  
 - - - 草原    - - - 植生なし    - . . . 合計



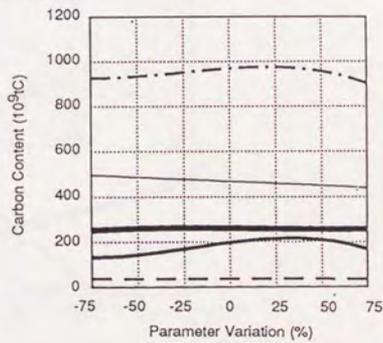
(e)  $k_1^L$ : 葉の枯死速度定数



(f)  $k_2^R$ : 幹の呼吸速度定数



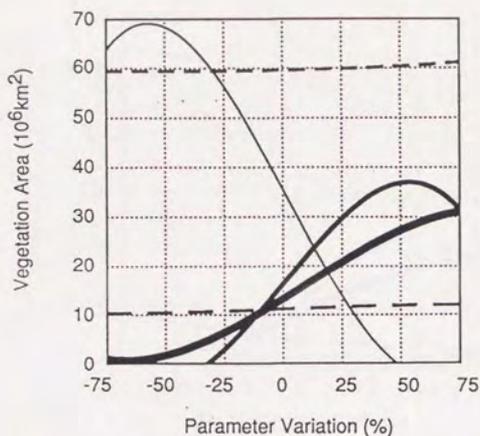
(g)  $k_2^L$ : 幹の枯死速度定数



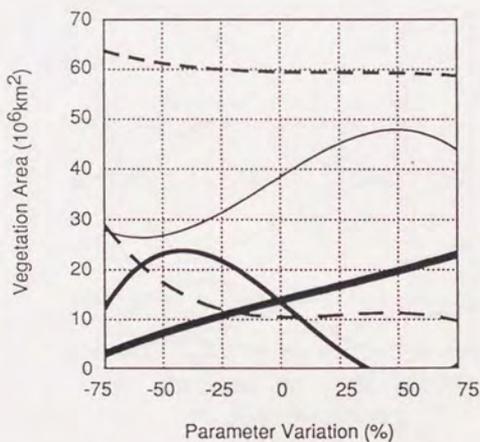
(h)  $\alpha$ : 光合成による固定化炭素のうち葉への分配比

Figs. 4-3-2(e)~(h) 各パラメータと植生の炭素蓄積量との関係 (2)

——— 熱帯林    ——— 温帯林    ——— 寒帯林  
 - - - 草原    - - - 植生なし    - - - 合計



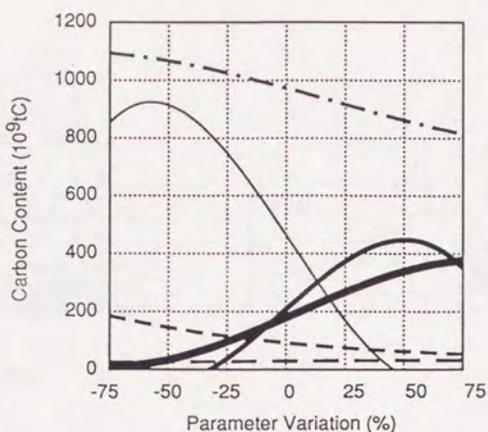
(a)  $T_{opt}$ : 光合成の最適温度



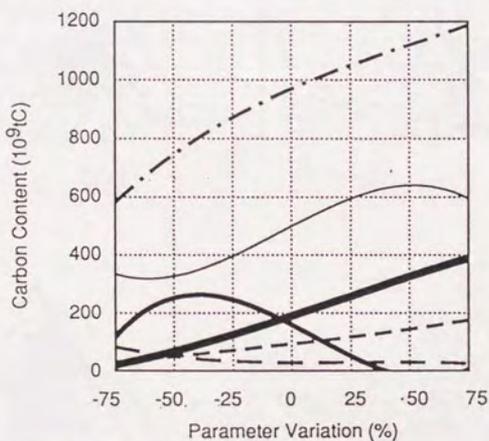
(b)  $\Delta T$ : 光合成が行われる温度範囲

Figs. 4-3-3(a)、(b) 温度条件に関するパラメータと植生分布との関係

——— 熱帯林    ——— 温帯林    ——— 寒帯林  
 - - - 草原    - - - 植生なし



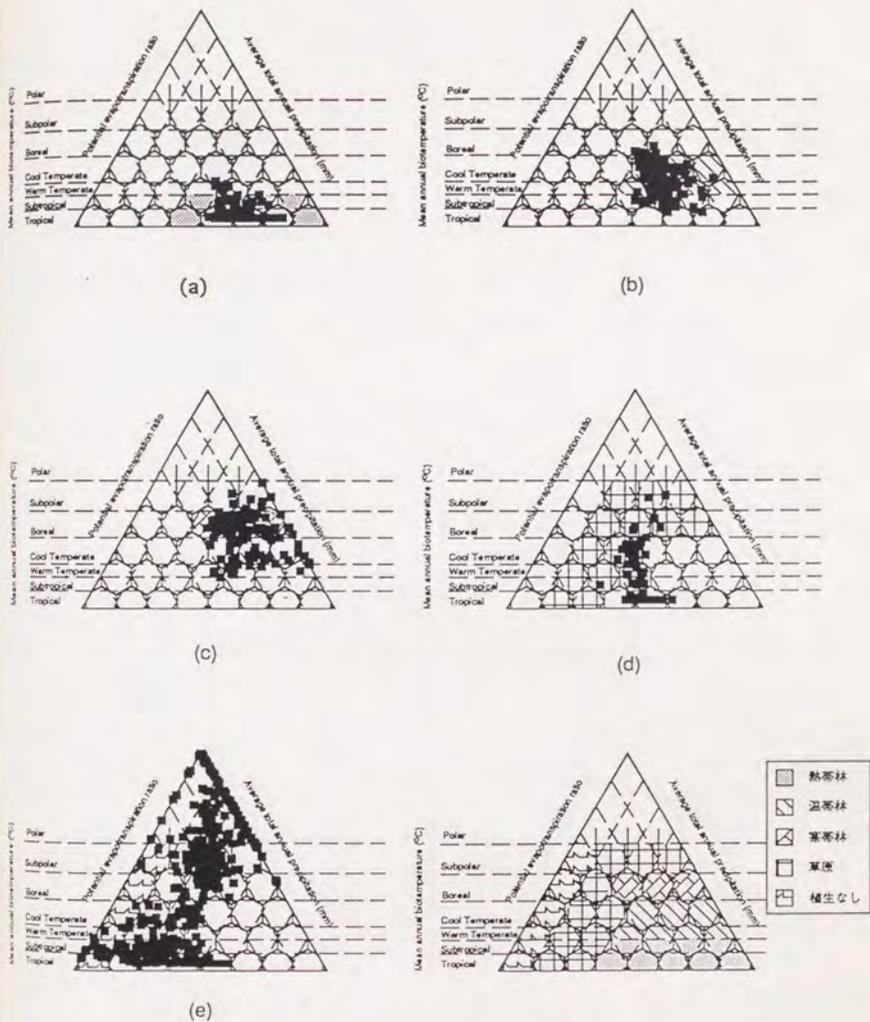
(a)  $T_{opt}$ : 光合成の最適温度



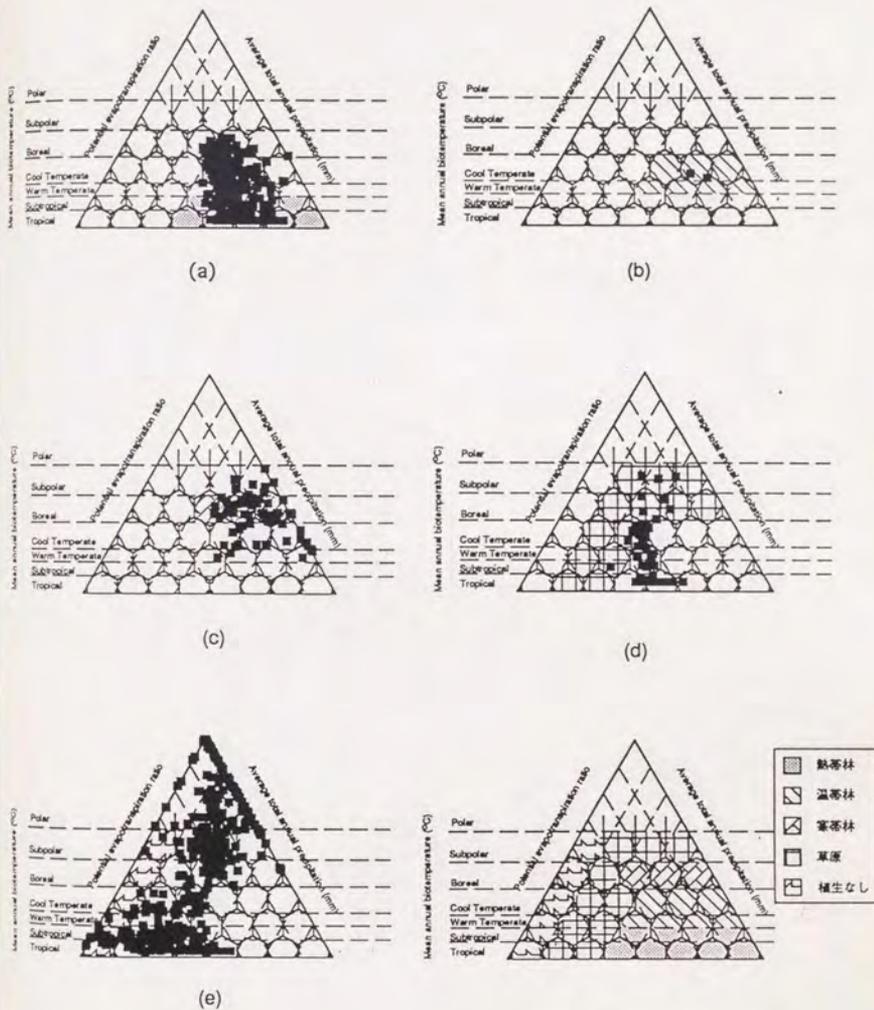
(b)  $\Delta T$ : 光合成が行われる温度範囲

Figs. 4-3-4(a)、(b) 温度条件に関するパラメータと植生の炭素蓄積量との関係

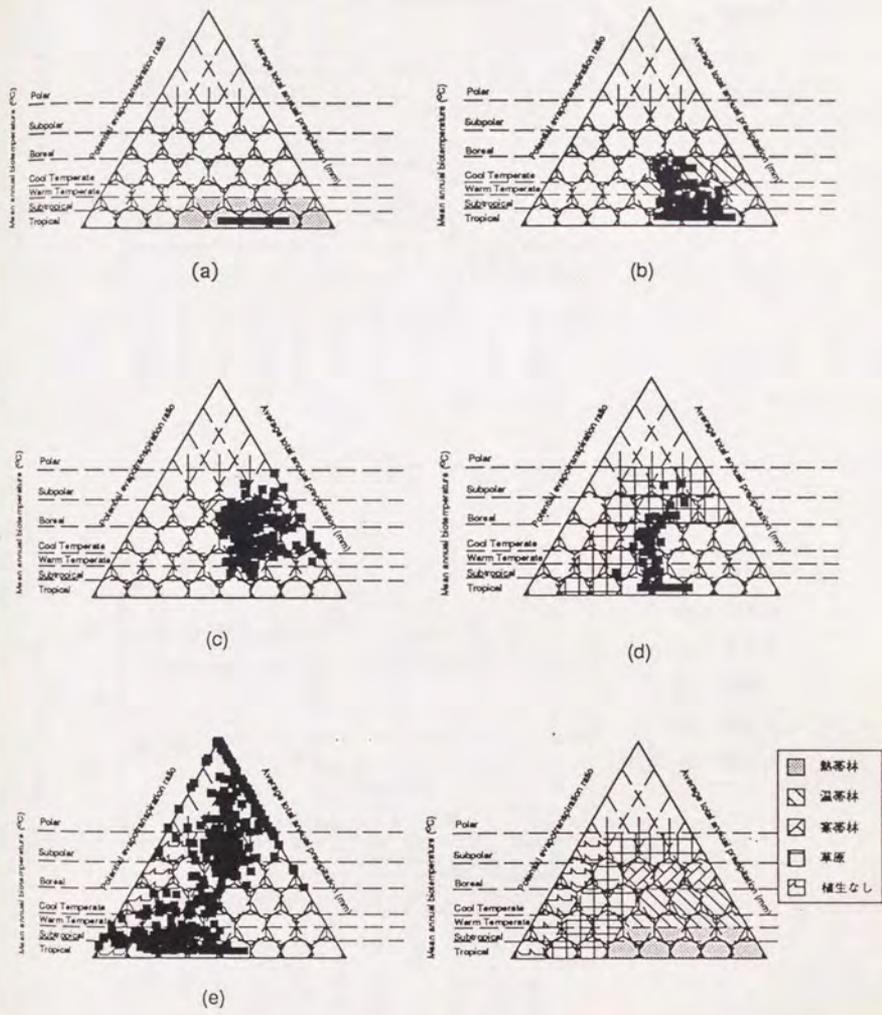
——— 熱帯林    ——— 温帯林    ——— 寒帯林  
 - - - 草原    - - - 植生なし    - . . . 合計



Figs. 4-3-5 (a)~(e) 本モデルの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 $T_{opt}$ が現状の場合  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし



Figs. 4-3-6 (a)~(e) 本モデルの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 $T_{opt}$ が-25%の場合  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし



Figs. 4-3-7 (a)~(e) 本モデルの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 $T_{opt}$ が+25%の場合  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし

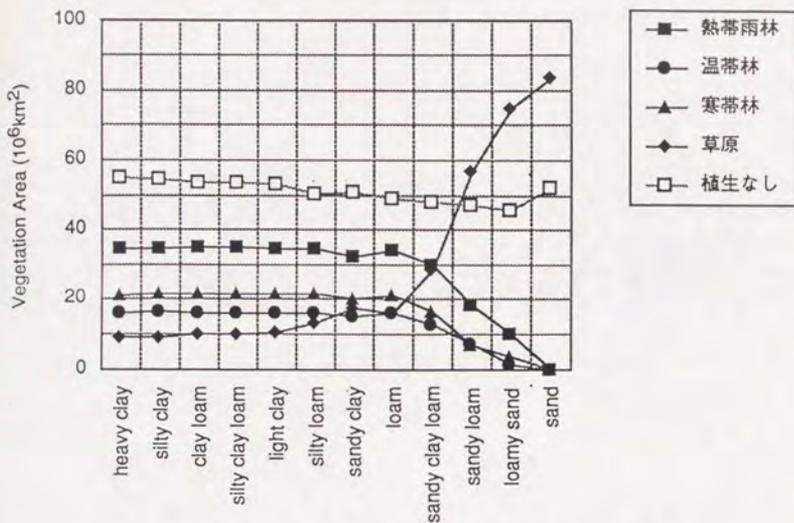


Fig. 4-3-8 土性と植生分布の関係

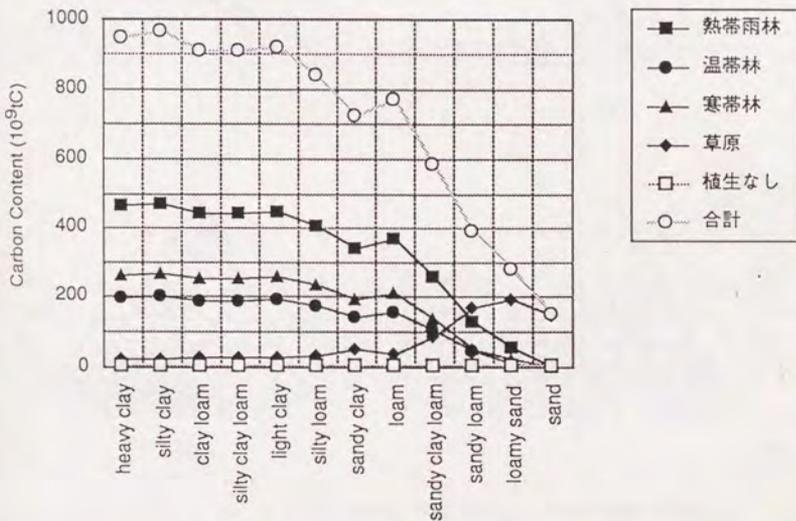
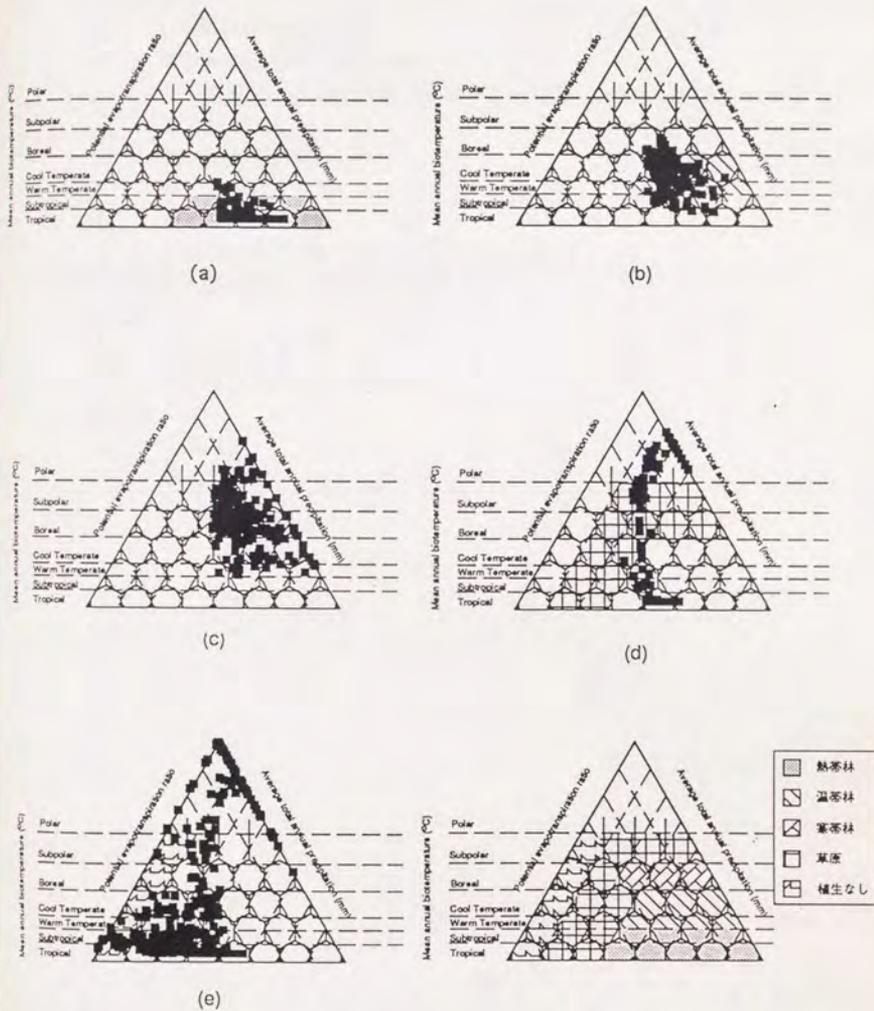


Fig. 4-3-9 土性と植生の炭素蓄積量の関係

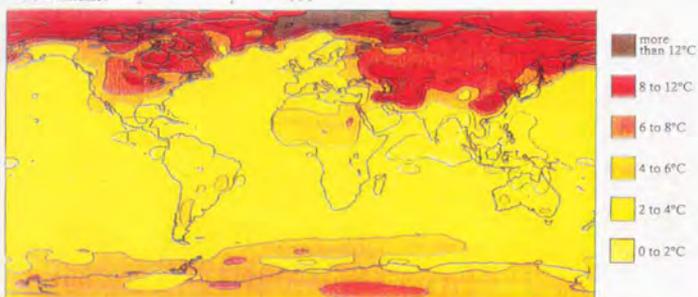


Figs. 4-3-10 (a)~(e) 本モデルの植生分布とHoldridgeの気候分類との関係図  
 (土性分布が全て light clay の場合)  
 (a)熱帯林 (b)温帯林 (c)寒帯林 (d)草原 (e)植生なし

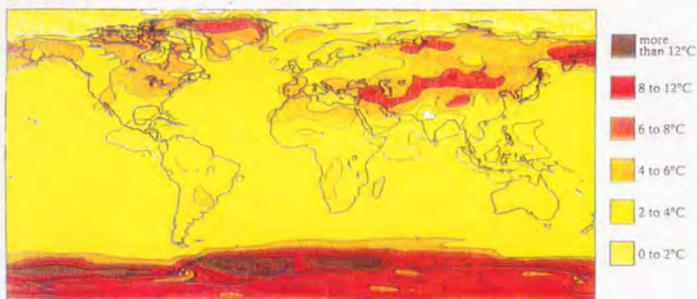
Table 4-3-1 本モデルで用いられるパラメータの分類

植生の種類に固有のパラメータ		
$p_0$	光飽和時の光合成速度	[ $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ ]
$K$	植物群落内の光の透過係数	[-]
$b$	光合成速度と光強度関係における初期勾配	[ $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{klux}^{-1}$ ]
$A_L$	葉の比表面積	[ $\text{m}^2 \cdot \text{kgC}^{-1}$ ]
$k_1^L$	葉の枯死速度定数	[ $1 \cdot \text{day}^{-1}$ ]
$k_2^R$	幹の呼吸速度定数	[ $1 \cdot \text{day}^{-1}$ ]
$k_2^L$	幹の枯死速度定数	[ $1 \cdot \text{day}^{-1}$ ]
$\alpha$	光合成による固定化炭素のうち葉へ分配比	[-]
植生の活性と環境条件との関係を表わすパラメータ		
温度条件		
$T_{\text{opt}}$	光合成の最適温度	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta T$	光合成が行われる温度範囲	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
土壌条件		
$W_{\text{wp}}$	しおれ点	[cm]
$W_{\text{fc}}$	圃場容水量	[cm]

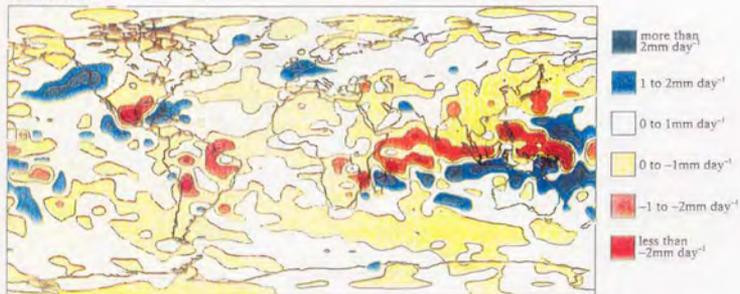
冬季の温度上昇



夏季の温度上昇



冬季の降雨量変化



夏季の降雨量変化

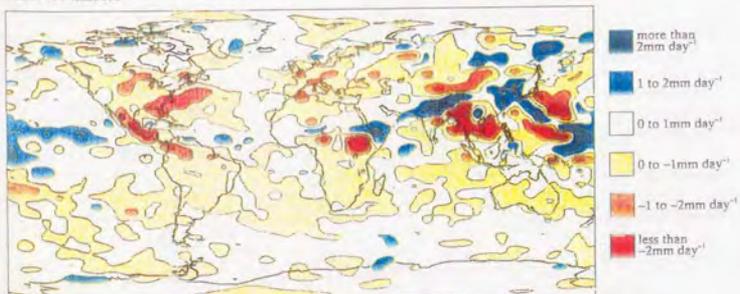
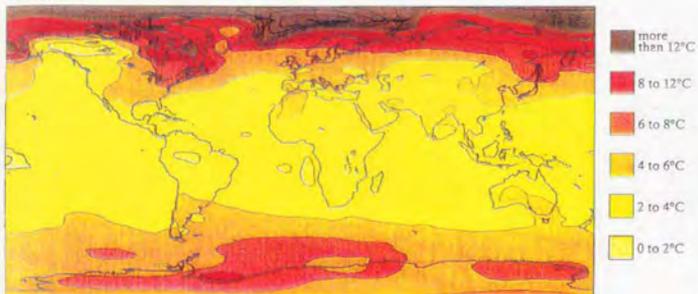
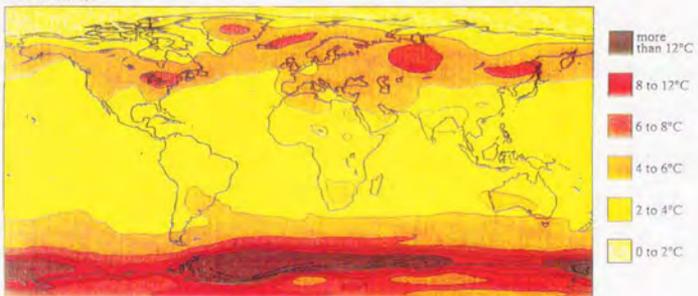


Fig. 4-4-1(a) 冬季及び夏期の温度増加分布及び降雨量増減分布図 (CCC)

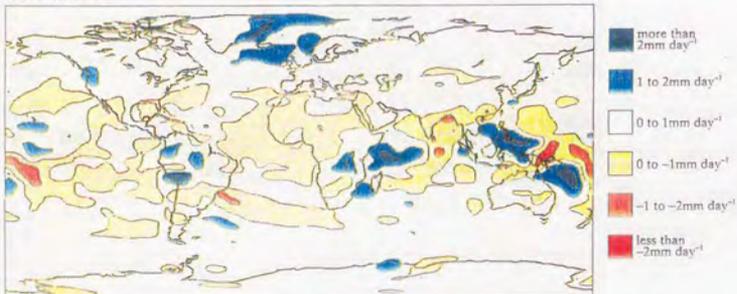
冬季の温度上昇



夏季の温度上昇



冬季の降雨量変化



夏季の降雨量変化

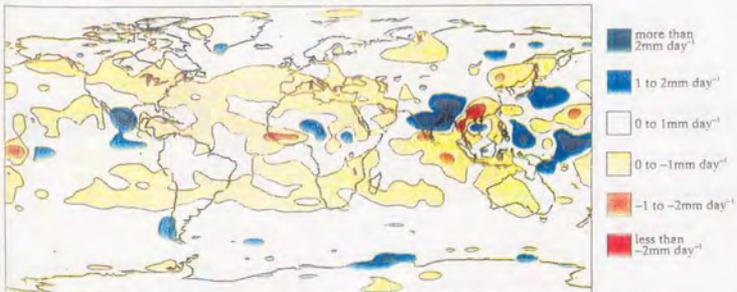
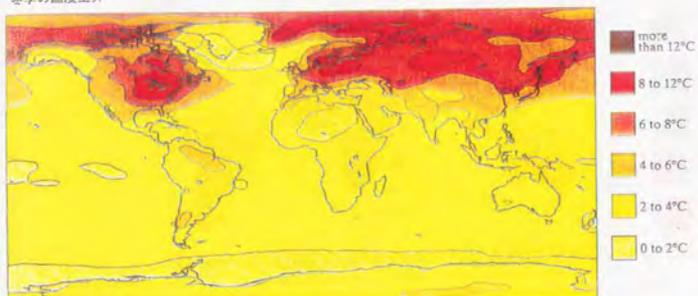
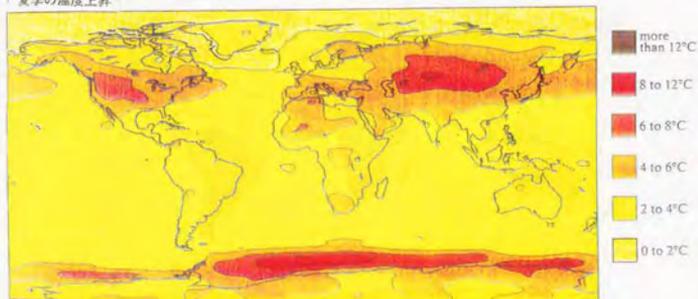


Fig. 4-4-1(b) 冬季及び夏季の温度増加分布及び降雨量増減分布図 (GFDL)

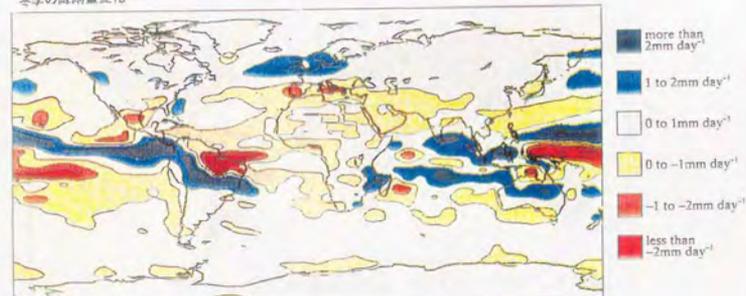
冬季の温度上昇



夏季の温度上昇



冬季の降雨量変化



夏季の降雨量変化

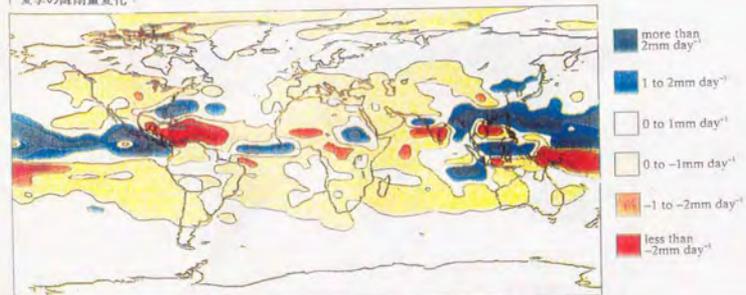


Fig. 4-4-1(c) 冬季及び夏期の温度増加分布及び降雨量増減分布図 (UKMO)

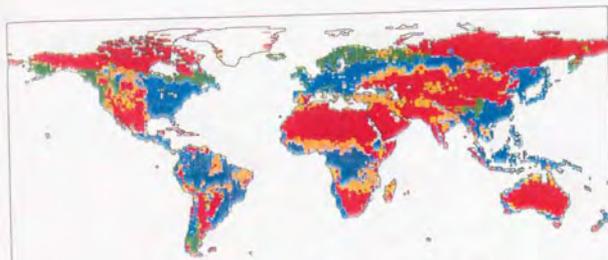


Fig. 4-4-2(a) 現在の気候条件における植生分布図

- 熱帯林
- 温帯林
- 寒帯林
- 草原
- 植生なし

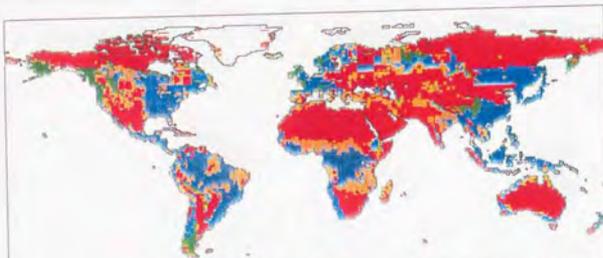


Fig. 4-4-2(b) 気候変動後 (CCC) の植生分布図

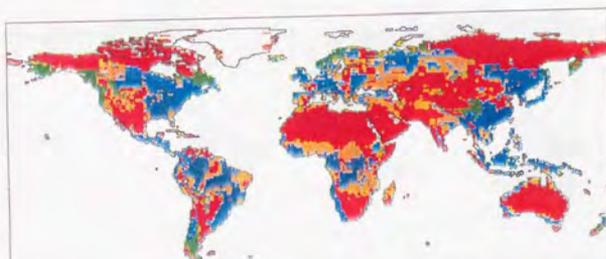


Fig. 4-4-2(c) 気候変動後 (GFDL) の植生分布図

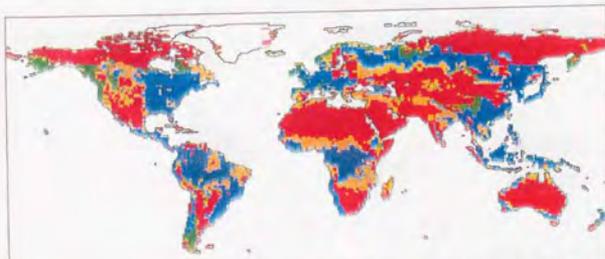


Fig. 4-4-2(d) 気候変動後 (UKMO) の植生分布図

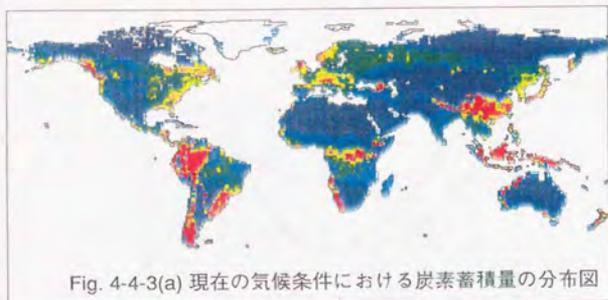


Fig. 4-4-3(a) 現在の気候条件における炭素蓄積量の分布図

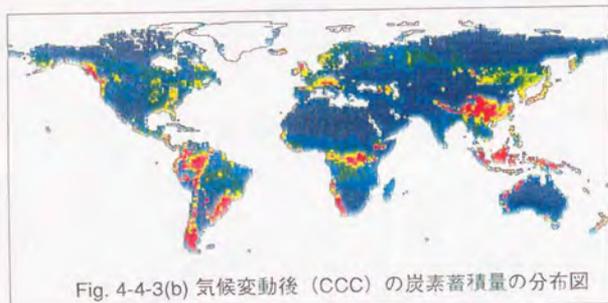
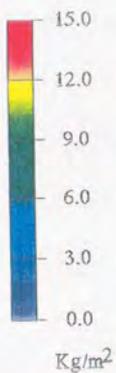


Fig. 4-4-3(b) 気候変動後 (CCC) の炭素蓄積量の分布図

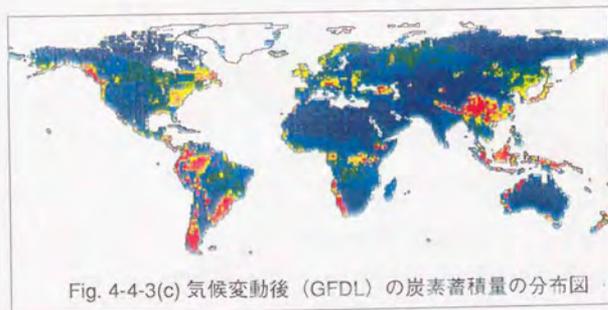


Fig. 4-4-3(c) 気候変動後 (GFDL) の炭素蓄積量の分布図

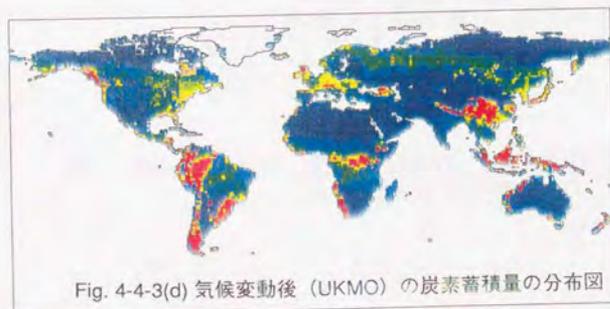
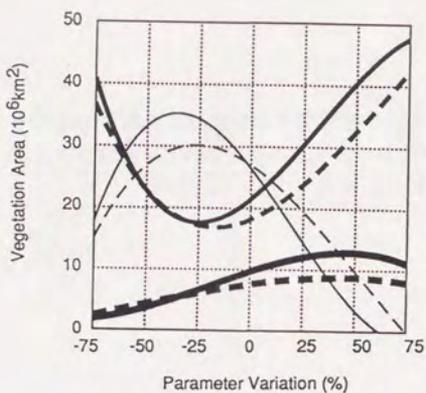
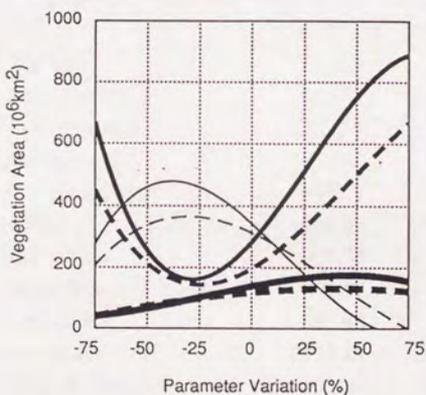


Fig. 4-4-3(d) 気候変動後 (UKMO) の炭素蓄積量の分布図



(a) 熱帯林の  $T_{opt}$  と植生面積の関係



(b) 熱帯林の  $T_{opt}$  と植生の炭素蓄積量の関係

	熱帯林	温帯林	寒帯林
気候変動前	———	————	—————
気候変動後	- - - - -	- - - - -	- - - - -

Figs. 4-4-4(a)、(b) 気候変動前後の植生面積及び炭素蓄積量と熱帯林の  $T_{opt}$  の関係

Table 4-4-1 各GCMの炭酸ガス倍増時の平衡状態の気候変化を求める結果から得られる全球平均地球気温の上昇量と全球平均降水量の増加量

	気温上昇 (°C)	降雨量増加 (%)
CCC	4.4	4
GFDL	4.3	8
UKMO	3.5	9

Table 4-4-3 Holdridgeの植生分類に基づいた気候変動が植生分布に与える影響予測：1000km<sup>2</sup> (Monserud and Leemans, 1992)

	気候変動前	気候変動後
Tundra	1036.89	429.29
Forest Tundra	885.71	394.17
Cold Parklands	280.99	284.47
Boreal Forest	1512.04	961.49
Temperate Forest	997.77	1185.85
Steppe	741.13	1158.90
Cool Desert	401.76	304.43
Warm Temperate Forest	321.67	195.58
Chapparal	562.86	740.61
Hot Desert	2085.22	2065.00
Tropical Semi-Arid	953.36	1398.89
Tropical Dry Forest	1485.48	1956.96
Tropical Seasonal Forest	1507.83	1002.29
Tropical Rain Forest	845.77	1540.65
Totals	13618.48	13618.58

Table 4-4-2(a) 気候変動(CCC)による植生面積及び炭素蓄積量の変動の予測

植生面積の変動の予測 上段：現状、下段：将来予測  $10^6 \text{ km}^2$ 

	熱帯林	温帯林	寒帯林	森林合計	草原	砂漠	合計
北アメリカ	2.60	4.86	3.96	11.41	2.82	9.42	23.65
	2.82	4.34	3.14	10.31	3.81	9.53	23.65
南アメリカ	9.09	1.69	1.30	12.09	3.01	3.81	18.90
	8.58	1.58	1.23	11.39	3.40	4.12	18.90
ヨーロッパ	0.02	3.32	2.15	5.49	0.65	0.40	6.54
	0.03	2.35	0.95	3.34	1.27	1.93	6.54
アジア	7.12	7.18	4.03	18.33	6.90	26.99	52.21
	8.06	7.03	2.80	17.89	6.31	28.01	52.21
オセアニア	0.28	0.85	0.15	1.28	0.93	6.73	8.93
	0.28	0.85	0.15	1.28	0.93	6.73	8.93
アフリカ	6.96	1.33	0.10	8.39	6.62	16.09	31.11
	6.94	1.33	0.10	8.37	6.59	16.15	31.11
合計	26.07	19.22	11.69	56.98	20.92	63.44	141.35
	26.70	17.48	8.38	52.56	22.31	66.47	141.35
増減 (%)	2.41	-9.04	-28.30	-7.75	6.63	4.78	0.00

炭素蓄積量の変化の予測 上段：現状、下段：将来予測  $10^9 \text{ ton C}$ 

	熱帯林	温帯林	寒帯林	森林合計	草原	砂漠	合計
北アメリカ	23.18	40.88	36.90	100.96	8.31	0.19	109.45
	24.85	34.13	27.08	86.05	11.63	0.19	97.87
南アメリカ	87.24	19.37	18.08	124.69	10.13	0.08	134.90
	79.50	17.43	17.55	114.48	11.11	0.08	125.67
ヨーロッパ	0.23	28.04	19.99	48.26	2.23	0.01	50.50
	0.19	19.55	9.54	29.29	3.61	0.04	32.94
アジア	72.52	64.27	38.52	175.31	19.83	0.54	195.68
	81.40	64.96	29.36	175.72	16.42	0.56	192.70
オセアニア	2.91	8.35	2.04	13.30	2.13	0.13	15.56
	2.91	8.35	2.04	13.30	2.13	0.13	15.56
アフリカ	60.20	13.94	1.22	75.36	20.15	0.32	95.83
	60.03	13.94	1.22	75.19	20.12	0.32	95.63
合計	246.27	174.86	116.75	537.88	62.78	1.27	601.93
	248.87	158.37	86.78	494.02	65.02	1.33	560.37
増減 (%)	1.06	-9.43	-25.67	-8.15	3.57	4.78	-6.90

Table 4-4-2(b) 気候変動(GFDL)による植生面積及び炭素蓄積量の変動の予測

植生面積の変動の予測 上段：現状、下段：将来予測  $10^6 \text{ km}^2$ 

	熱帯林	温帯林	寒帯林	森林合計	草原	砂漠	合計
北アメリカ	2.60	4.86	3.96	11.41	2.82	9.42	23.65
	3.12	5.06	3.24	11.42	3.29	8.94	23.65
南アメリカ	9.09	1.69	1.30	12.09	3.01	3.81	18.90
	8.02	1.46	1.26	10.74	3.57	4.60	18.90
ヨーロッパ	0.02	3.32	2.15	5.49	0.65	0.40	6.54
	0.06	2.92	0.78	3.75	1.79	1.00	6.54
アジア	7.12	7.18	4.03	18.33	6.90	26.99	52.21
	7.89	7.67	2.77	18.33	8.94	24.95	52.21
オセアニア	0.28	0.85	0.15	1.28	0.93	6.73	8.93
	0.28	0.85	0.15	1.28	0.91	6.74	8.93
アフリカ	6.96	1.33	0.10	8.39	6.62	16.09	31.11
	5.88	1.16	0.08	7.11	7.41	16.58	31.11
合計	26.07	19.22	11.69	56.98	20.92	63.44	141.35
	25.25	19.11	8.28	52.63	25.90	62.81	141.35
増減 (%)	-3.16	-0.59	-29.16	-7.63	23.80	-1.00	0.00

炭素蓄積量の変化の予測 上段：現状、下段：将来予測  $10^9 \text{ tonC}$ 

	熱帯林	温帯林	寒帯林	森林合計	草原	砂漠	合計
北アメリカ	23.18	40.88	36.90	100.96	8.31	0.19	109.45
	26.88	40.50	30.53	97.91	9.68	0.18	107.77
南アメリカ	87.24	19.37	18.08	124.69	10.13	0.08	134.90
	73.27	16.28	17.33	106.88	11.81	0.09	118.79
ヨーロッパ	0.23	28.04	19.99	48.26	2.23	0.01	50.50
	0.50	23.36	6.91	30.77	5.98	0.02	36.77
アジア	72.52	64.27	38.52	175.31	19.83	0.54	195.68
	76.97	64.78	29.65	171.40	26.59	0.50	198.49
オセアニア	2.91	8.35	2.04	13.30	2.13	0.13	15.56
	2.91	8.35	2.04	13.30	2.05	0.13	15.49
アフリカ	60.20	13.94	1.22	75.36	20.15	0.32	95.83
	48.36	12.40	1.09	61.84	22.43	0.33	84.61
合計	246.27	174.86	117.20	538.33	62.78	1.27	602.38
	228.89	165.67	88.00	482.56	78.55	1.26	562.36
増減 (%)	-7.06	-5.26	-24.91	-10.36	25.12	-1.00	-6.64

Table 4-4-2(c) 気候変動(UKMO)による植生面積及び炭素蓄積量の変動の予測

植生面積の変動の予測 上段：現状、下段：将来予測  $10^6 \text{ km}^2$ 

	熱帯林	温帯林	寒帯林	森林合計	草原	砂漠	合計
北アメリカ	2.60	4.86	3.96	11.41	2.82	9.42	23.65
	2.77	5.17	3.09	11.03	3.48	9.14	23.65
南アメリカ	9.09	1.69	1.30	12.09	3.01	3.81	18.90
	9.01	1.62	1.25	11.88	3.14	3.88	18.90
ヨーロッパ	0.02	3.32	2.15	5.49	0.65	0.40	6.54
	0.03	2.85	1.11	3.99	0.99	1.55	6.54
アジア	7.12	7.18	4.03	18.33	6.90	26.99	52.21
	8.00	9.14	3.05	20.19	6.85	25.18	52.21
オセアニア	0.28	0.85	0.15	1.28	0.93	6.73	8.93
	0.28	0.85	0.15	1.28	0.93	6.73	8.93
アフリカ	6.96	1.33	0.10	8.39	6.62	16.09	31.11
	6.96	1.33	0.10	8.39	6.60	16.11	31.11
合計	26.07	19.22	11.69	56.98	20.92	63.44	141.35
	27.05	20.95	8.76	56.76	22.00	62.59	141.35
増減 (%)	3.76	8.99	-25.08	-0.39	5.14	-1.34	0.00

炭素蓄積量の変化の予測 上段：現状、下段：将来予測  $10^9 \text{ ton C}$ 

	熱帯林	温帯林	寒帯林	森林合計	草原	砂漠	合計
北アメリカ	23.18	40.88	36.90	100.96	8.31	0.19	109.45
	24.47	44.71	27.75	96.92	10.36	0.18	107.46
南アメリカ	87.24	19.37	18.08	124.69	10.13	0.08	134.90
	85.24	18.34	17.47	121.05	10.52	0.08	131.65
ヨーロッパ	0.23	28.04	19.99	48.26	2.23	0.01	50.50
	0.29	25.36	10.67	36.33	3.00	0.03	39.35
アジア	72.52	64.27	38.52	175.31	19.83	0.54	195.68
	79.26	79.09	31.29	189.64	19.05	0.50	209.20
オセアニア	2.91	8.35	2.04	13.30	2.13	0.13	15.56
	2.91	8.35	2.04	13.30	2.13	0.13	15.56
アフリカ	60.20	13.94	1.22	75.36	20.15	0.32	95.83
	60.20	13.94	1.22	75.36	20.11	0.32	95.79
合計	246.27	174.86	116.75	537.88	62.78	1.27	601.93
	252.37	189.80	90.43	532.60	65.18	1.25	599.03
増減 (%)	2.48	8.54	-22.54	-0.98	3.82	-1.34	-0.48

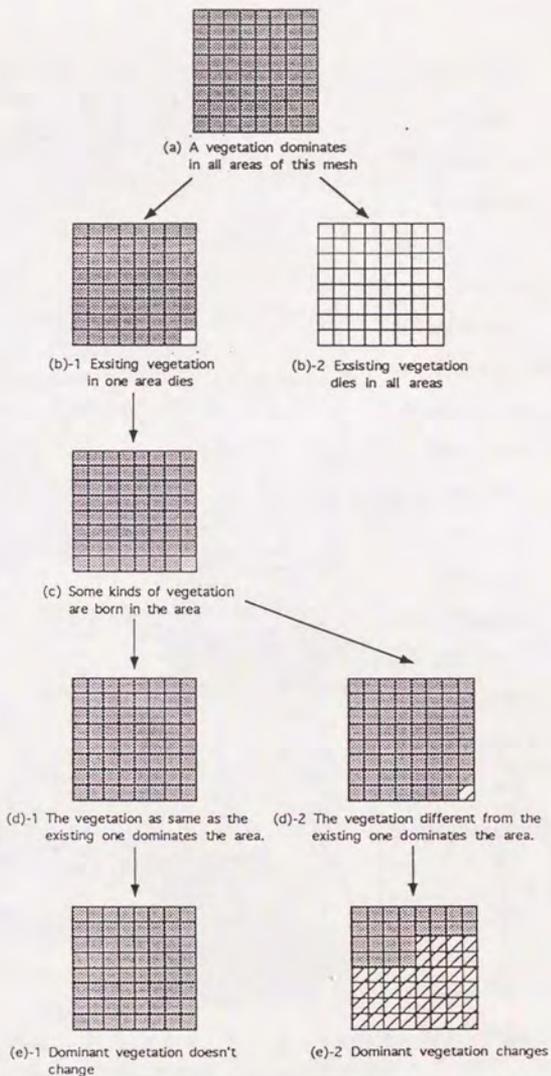


Fig. 4-5-1 非平衡状態における植生分布変動モデル概念図

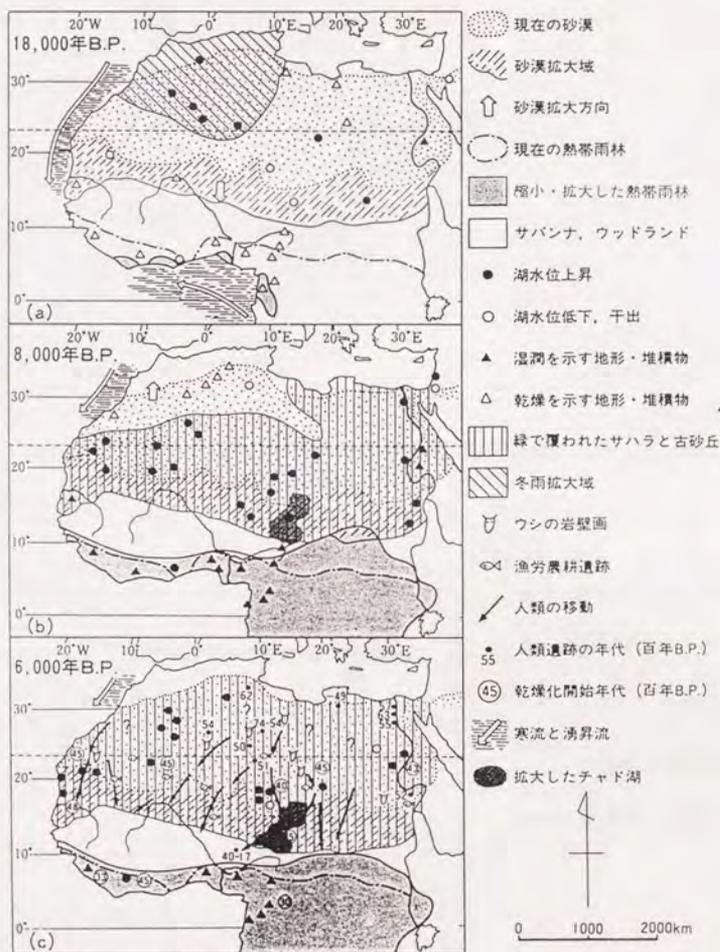


Fig. 4-6-1 第四紀末におけるサハラ・サヘル環境変遷 (門村, 1990)

(a) 最終氷期末大乾燥期 (18000年B.P.)

(b) 完新世初期大湿潤期 (8000年B.P.)

(c) 完新世中期湿潤期 (6000年B.P.) とその後の乾燥化に伴う人類の移動

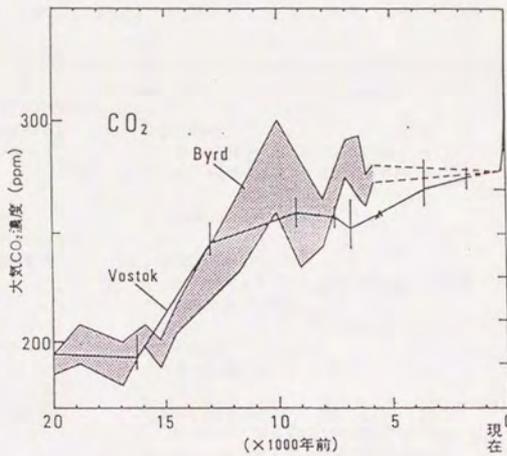


Fig. 4-6-2 過去2万年の大気中の炭酸ガス濃度の変動 (ByrdとVostok) 茅根 (1993) を改変

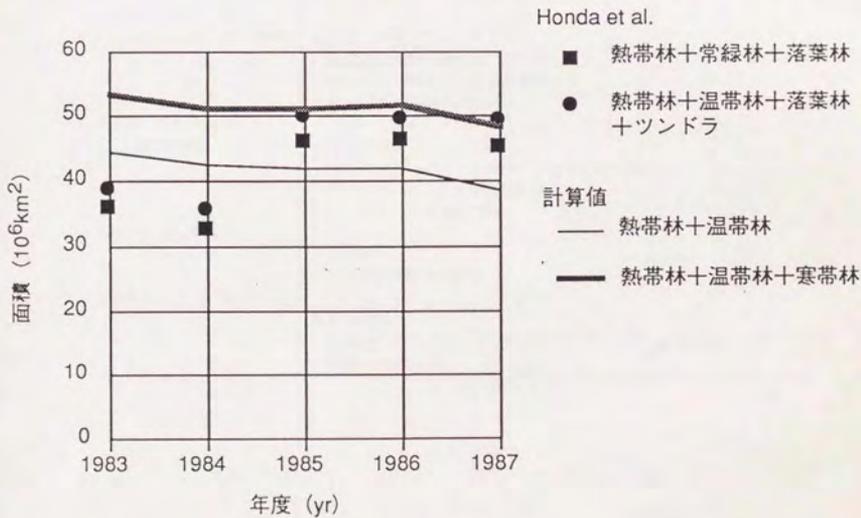


Fig. 4-6-3 植生分布の変動の文献値と計算値の比較

Table 4-6-1 熱帯アフリカにおける過去2万年間の気候・環境変動のあらまし  
(門村、1968)

ヨーロッパ	熱帯アフリカ (0-23.5°N)
20,000-12,000年 B.P. 最終氷期寒冷期	大乾燥期： サハラ砂漠南方へ数百 km 拡大 サーヘル・東アフリカ湖沼群干出 サバンナ南方へ拡大 熱帯雨林縮小・分断
12,000-11,000年 B.P. 温暖化開始期	湿润化開始期： サーヘル・東アフリカ湖沼群水位上昇開始 熱帯雨林回復開始
10,500年 B.P.頃 小寒冷期(新ドリラス期)	小乾燥期： チャド湖水位低下
10,000-8,000年 B.P. 温暖化期	大湿润期(フルビアル期)： 砂漠縮小(旧石器時代末“緑のサハラ”) サーヘル・東アフリカ湖沼群大拡大 サバンナ北方へ拡大 熱帯雨林北方へ拡大
7,500年 B.P. 小寒冷期	小乾燥期： 砂漠化(部分的) サーヘル・東アフリカ湖沼群水位低下
7,000-5,000年 B.P. 温暖期(ヒブシサーマル)	湿润期(サブ・フルビアル期)： 砂漠縮小(新石器時代末“緑のサハラ”) サーヘル・東アフリカ湖沼群再拡大 サバンナ・森林北方へ再拡大
4,500-4,000年 B.P. 冷涼化開始期	乾燥化開始期： 顕著な砂漠化開始(人類サハラより撤退開始) サーヘル・東アフリカ湖沼群水位低下 サバンナ・森林後退開始
3,500-3,000年 B.P.	小湿润期： チャド湖水位やや回復
3,000年 B.P.頃-現在	乾燥化進行： 小変動を繰り返しながら砂漠拡大、サバンナ・森林赤道方向に 後退、現在に至る

Table 4-6-2 植生分布の変動の文献値と計算値の比較：10<sup>6</sup>km<sup>2</sup>

		熱帯林(a)	温帯林(b) <sup>*1</sup>	(a)+(b)	寒帯林(c) <sup>*2</sup>	(a)+(b)+(c)	草原	植生なし	合計
Honda et al.	1983	3.9	32.1	36.0	2.6	38.7	49.1	46.7	134.5
	1984	1.0	31.6	32.6	3.2	35.8	52.1	46.6	134.5
	1985	8.3	37.6	45.9	3.9	49.8	40.8	43.8	134.5
	1986	8.9	37.4	46.3	3.3	49.6	41.2	43.7	134.5
	1987	6.7	38.5	45.1	4.3	49.4	43.2	41.9	134.5
This Work	1983	15.9	28.6	44.4	8.6	53.1	15.2	67.5	135.8
	1984	14.2	28.1	42.3	8.7	51.0	25.1	59.7	135.8
	1985	14.5	27.4	41.9	9.1	51.0	26.4	58.4	135.8
	1986	15.6	26.3	41.9	9.7	51.7	27.0	57.1	135.8
	1987	14.4	24.2	38.6	9.7	48.3	28.0	59.4	135.8

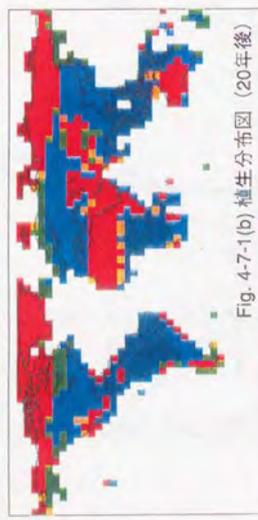
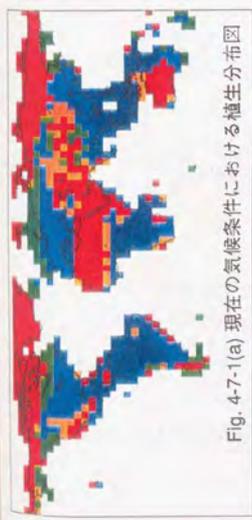
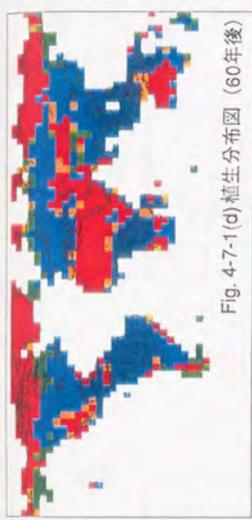
\*1 Honda et al.の「温帯林」の範疇は常緑林と落葉林を示す

\*2 Honda et al.の「寒帯林」の範疇はツンドラを示す

□ はそれぞれ分類で「森林」の範疇を示す

Table 4-6-3 本モデルと人工衛星データ (Honda et al., 1993) の植生の面積の比較

	1983	1984	1985	1986	1987
Forest					
(a)This Work [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	53.1	51.0	51.0	51.7	48.3
(b)Honda et al. [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	36.0	32.6	45.9	46.3	45.1
(c)Agreement area between (a) and (b) [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	5.4	15.7	17.8	19.5	14.4
(d) (c)/(a) [%]	10.1	30.7	34.9	37.7	29.7
(e) (c)/(b) [%]	15.0	48.2	38.8	42.1	31.9
Non-Forest					
(f)This Work [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	82.7	84.8	84.8	84.1	87.5
(g)Honda et al. [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	98.5	101.9	88.6	88.2	89.4
(h)Agreement area between (f) and (g) [10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ]	21.2	20.6	16.2	18.9	17.5
(i) (h)/(f) [%]	25.6	24.3	19.1	22.5	20.0
(j) (h)/(g) [%]	21.5	20.2	18.3	21.4	19.6



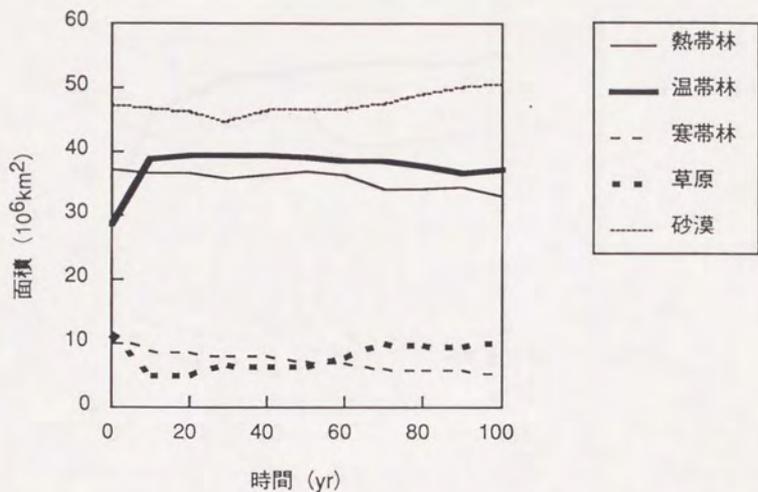


Fig. 4-7-2(a) 植生面積の変動予測 (CCC)

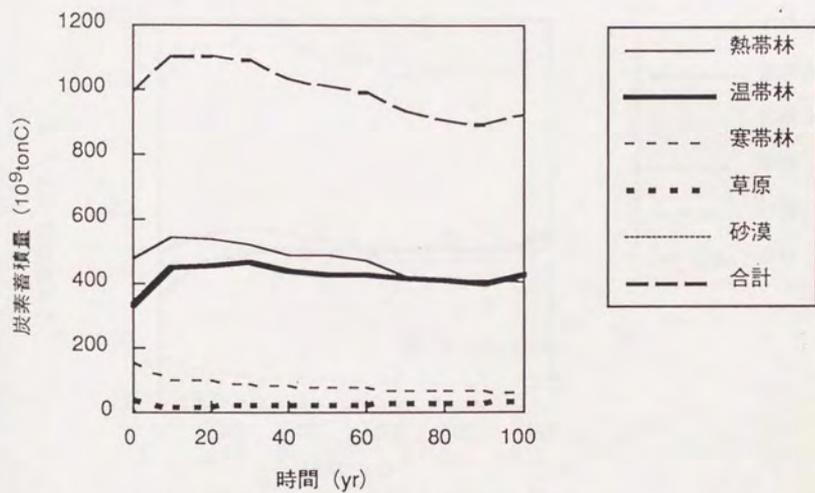


Fig. 4-7-2(b) 植生の炭素蓄積量の変動予測 (CCC)

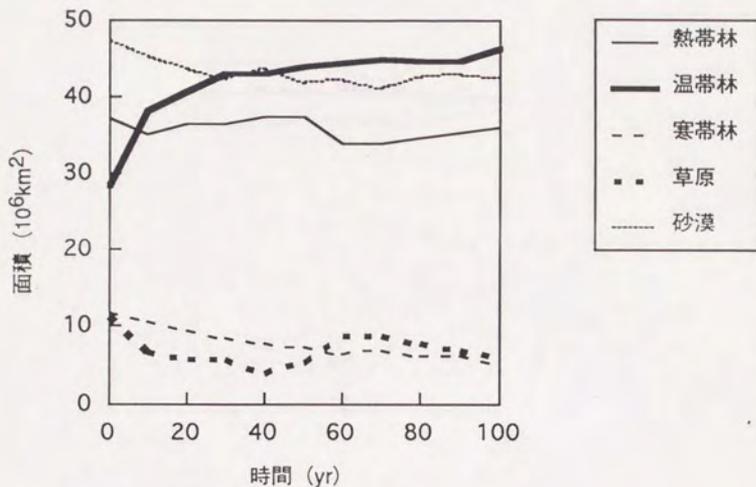


Fig. 4-7-2(c) 植生面積の変動予測 (GFDL)

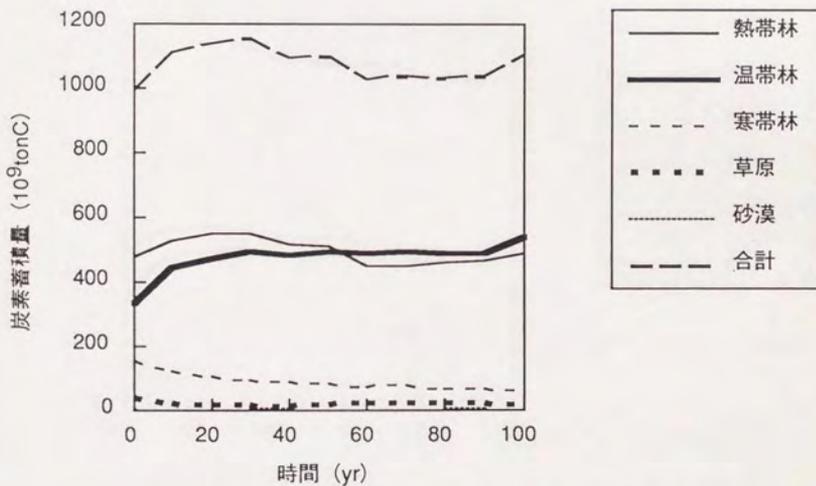


Fig. 4-7-2(d) 植生の炭素蓄積量の変動予測 (GFDL)

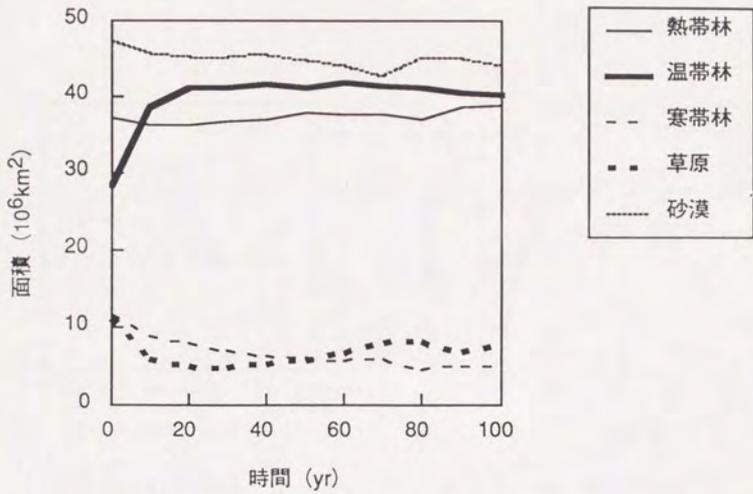


Fig. 4-7-2(e) 植生面積の変動予測 (UKMO)

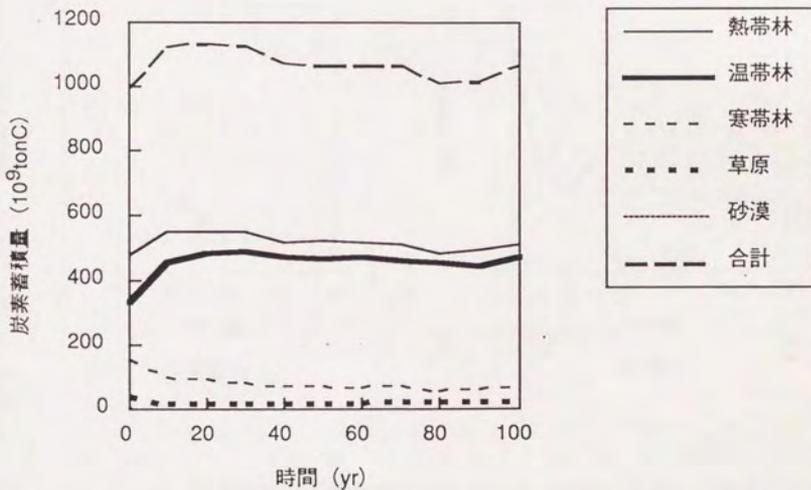
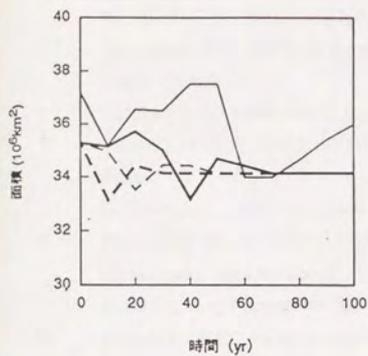
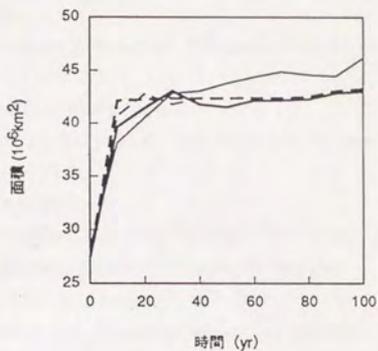


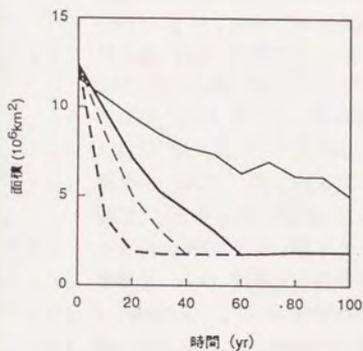
Fig. 4-7-2(f) 植生の炭素蓄積量の変動予測 (UKMO)



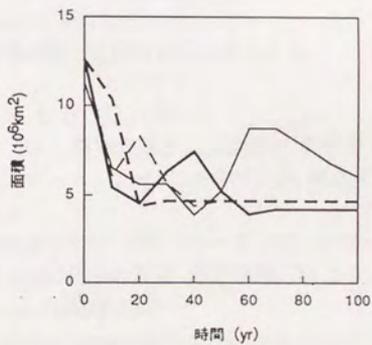
(a) 熱帯林



(b) 温帯林



(c) 寒帯林



(d) 草原

Figs. 4-7-3(a)~(d) 気候変動が平衡状態に達するまでの時間と各植生の面積との関係

—— 100年後    —— 50年後  
 - - - 30年後    - - - 10年後

## 2～4章参考文献

- 1) Bolle, H.-J. and S.I. Rasool, 1985, Development of the Implementation Plan for the International Satellite Land-Surface climatology Project (ISLSCP). Phase I. WMO/TD-No.46, WC-94, WMO/UNEP/ICSU, 89p
- 2) Bouwman, A.F., 1990, Soil and the Greenhouse Effect, John Wiley and Sons, New York, 61-127
- 3) Bridges, E.M., 1978, World Soils. Cambridge University Press
- 4) Cannell, M.G.R., 1982, World forest biomass and primary production data, Academic Press
- 5) FAO/Unesco, 1974-1981. Soil map of the world 1-10
- 6) Farnworth, G. and Golley, F.B., 1974. Fragile Ecosystems. Springer, New York
- 7) Goudriaan, J. and Kenter, P., 1984, A simulation study for the global carbon cycle, including man's impact on the biosphere, Climatic Change, 6, 167-192
- 8) Harvey, L.D.D., 1989, Managing atmospheric CO<sub>2</sub>, Climatic Change, 15, 343-381
- 9) Holdridge, L.R., 1947, Science, 105, 367-368
- 10) Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.), 1990, Climatic Change, the IPCC Scientific Assessment, Cambridge Univ. Press
- 11) Honda, Y., S. Murai, E.O. Box and S. Goto, 1993, A study on Global Environmental Assessment for Human Impacts, Report of the Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 38(2), 52pp, in Japanese with English summary
- 12) 門村浩, 1987, 熱帯アフリカにおける晩氷期-完新世初期の環境変動, アフリカ研究, 30, 71-93
- 13) 門村浩, 1990, サハラーその起源と変遷, 地理, 35, 26-37
- 14) 門村浩, 武内和彦, 大森博雄, 田村俊和, 1991, 環境変動と地球砂漠化, 朝倉書店
- 15) 茅陽一, 1987, 二酸化炭素問題のシミュレーション分析, 高橋浩一郎, 岡本和人編著, 21世紀の地球環境, 日本放送協会
- 16) 茅根創, 1993, サンゴ礁による二酸化炭素の固定, 地質ニュース, 465, 19-25
- 17) 熊崎実, 1990, 加速する熱帯林の消失と統計数学の混迷, 林業技術, 584, 2-6
- 18) Leemans, R., 1989, Holdridge Classification, GRID/UNEP
- 19) Leemans, R., 1990, Possible Changes in Natural Vegetation Patterns due to a global warming, WP-90-8, IIASA
- 20) Leemans, R. and W.P. Cramer, 1990, The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid, WP-90-41, IIASA
- 21) Mitchell, J.F.B., C.A. Senior and W.J. Ingram, 1989, Nature, 341, 132-134
- 22) Monserud, R.A. and R. Leemans, 1992, Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic, Ecol. Modelling, 62, 275-293
- 23) Müller, M.J., 1982, Selected climatic data for a global set of standard stations for vegetation science. Dr W. Junk Publisher, 306 pp

- 2 4) Ohta, S., Z. Uchijima and Y. Oshima, 1993, Probable effects of CO<sub>2</sub>-induced climate changes on net primary productivity of terrestrial vegetation in East Asia, *Ecological Research*, 8, 199-213
- 2 5) Olson, J.S., J.A. Watts and L.J. Allison, 1983, Carbon Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA
- 2 6) Shugart, H.H., 1984, *A Theory of Forest Dynamics*, Springer-Verlag, 278pp
- 2 7) Takada, T. and Y. Iwasa, 1986, Size Distribution dynamics of Plant with Interaction by Shading, *Ecological Modelling*, 33, 173-184
- 2 8) 高橋正征, 1991, 地球環境工学ハンドブック (茅陽一編), 147
- 2 9) Prentice, K.C., 1990, Bioclimatic distribution of vegetation for general circulation model studies, *J. Geophysical Res.*, 95, D8, 11811-11830
- 3 0) Roberts, L., 1989, *Science*, 243, 735-737
- 3 1) Whittaker, R.H. and G.E. Likens, 1973, Carbon and biosphere, U. S. Atomic Energy Commission, 281-300
- 3 2) Woodwell(ed.), 1984, The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: Measurement by remote sensing, SCOPE 23, John Wiley & Sons
- 3 3) 依田恭二, 1982, 大気中の二酸化炭素濃度に対する陸上生態系の影響, *地球化学*, 16, 78-85

## 終章 総括と今後の展望

### 5-1 本研究のまとめ

本研究は大気と陸上生態系間の炭素循環を記述する数理モデルを構築し、将来の炭酸ガス倍増時の気候変動が陸上生態系に与える影響を予測した。

本モデルの特徴は以下の通りである。

- 1 植生、土壌毎にパラメータを設定することによって、様々な植生あるいは土壌の炭素循環を計算できる。
- 2 陸地をいくつかのメッシュに区切り、それぞれのメッシュ毎の環境条件を考慮することによって、地球上の様々な地域の陸上生態系の炭素循環を計算できる。
- 3 植生分布の概念を導入することによって、植生の炭素蓄積量から植生分布を求めることができる。
- 4 森林の更新過程を導入することによって、非定常状態における植生分布の変動を求めることができる。

また、以上の特徴から従来のモデルでは不十分であった以下の点に関する予測が可能となった。

- 1 GCMによって予測されている気候変動の地域や季節による格差を考慮した将来予測が可能になった。
- 2 従来のモデルでは不可能であった植生分布と植生の炭素蓄積量の変動を同時に予測することが可能になった。
- 3 非定常状態における気候変動の陸上生態系への影響が予測可能になった。

本モデルによって将来の炭酸ガス濃度倍増時の気候変動が陸上生態系の炭素循環に及ぼす影響に関して以下のことが予測される。

- 1 気温の上昇は小さな範囲であれば陸上生態系の炭素蓄積量が増加する傾向にあるが、気温上昇幅が大きいと陸上生態系の炭素蓄積量は逆に減少する傾向にある。
- 2 降雨量の増加は陸上生態系の炭素蓄積量が増加させる傾向にあるが、大幅には増加しない。
- 3 気候変動によって植生の分布が変動することが予測され、定常状態では特に森林の面積が減少することが予測される。また、気候変動が起こる初期の時点で森林の面積は増大するが、その後定常状態に近づくにつれ徐々に減少することが分かった。

以上、本モデルによって、大気中の炭酸ガス濃度上昇による気候変動は陸上生態系（特に森林）を衰退させることが予測される。しかしながら、将来の気候変動が陸上生態系に与える影響の予測に関しては、必ずしもすべての研究者の見解が一致しているわけではない。温度の上昇による光合成速度の増加によって、森林の増大が起こると予測する研究者もいる一方、気候変動による乾期の長期化や台風等の被害の増大によって森

林が衰退すると予測する研究者もいる。また、Figs. 4-4-4(a), (b)によると本モデルによる予測も、設定するパラメータの値によって森林が増大する場合もあれば衰退する場合もある。このように様々な仮定を導入することによって将来予測は大きく異なってくるといえよう。つまり、陸上生態系の炭素循環の構造や環境条件の影響、パラメータの値等、本研究で用いられている様々な仮定のみを考慮する限り森林の面積が減少することが予測されるといえる。さらに、このような本研究で仮定された要因が森林生態系を衰退させることから、将来への対策の一つの指針となるといえよう。

## 5-2 将来への対策

本研究により地球温暖化は陸上生態系、特に森林を衰退させることが予測される。これは新しい気候条件へ陸上生態系が対応しきれないこと、特にTable 3-2-3によると温度条件に対して植生が対応しきれないことによるものであることが示唆された。この原因としてFigs. 4-4-4(a), (b)では、植生のもつ光合成に対する最適温度を気温が越えてしまうと逆に光合成速度が減少してしまうという植物の生理現象を挙げることができた。さらに、熱帯林を例にとると植生の光合成に対する最適温度が高温側へずれると、地球温暖化による気候変動によって熱帯林はむしろ増大の方向へ進むことが示唆された。また、Table 3-2-3によると降雨量の増加によって植生はわずかながら増大する。これは、土壌の水分保持能力には限界があるので、降雨量が増大しても植生の光合成速度はそれほど増大しないためである。

こうした点から将来の気候変動に対する対策として以下の方法が考えられる。

- 1 植物の進化、つまり、植物自らの環境適応力によって温度に対する光合成の最適温度が高温側へずれることを期待する。しかしながら、この方法は極めて消極的な方法であり、気候変動の速度に植物の進化の速度が対応できない可能性の方が強い。人為的になしうる方法としては、今後植林をする場合には高温条件下で成長するような種を植えることを心掛けるべきであったり、高温域でも光合成速度の衰えない新種の改良などが考えられる。

また、非定常状態における植生分布モデルの結果によると (Figs. 4-7-2(a)~(f))、気候変動の初期の時点で温帯林が増大している。これは気候変動の初期では気温上昇幅が少ないために、温帯林の光合成の最適温度を気温が越えないためであると考えられる。このように、気温の上昇幅をあらかじめ予測し、それぞれの時期の気温に最適な植物を植林を計画することも重要であろう。

- 2 土壌の圃場容水量を増大させる。Figs. 4-3-8, 9によると比較的圃場容水量の大きな土壌では植生の炭素蓄積量に関しては変化が少ないが、圃場容水量の小さな土壌のそれは急激に落ちる。よって、砂漠地域に存在する *sandy loam*, *loamy sand*, *sand* 等の圃場容水量の小さな土壌を圃場容水量の大きな土壌に変えることによ

て陸上生態系の衰退を抑えることができよう。しかしながら土壤の交換は植林に比べ比較にならないほど困難であることが予測される。Table 4-4-2(a)によると本モデルでは森林の衰退面積は $4.42 \times 10^6 \text{ km}^2$ であることが予測され、これは全ヨーロッパの面積に匹敵する。これらの面積の土壤を人為的に入れ替えることは全くの不可能であろう。

しかしながら、過去の植生分布の変化を考慮するとそこには大規模な地形の変動が同時に起こっていると考えられる。例えば熱帯アフリカでは気候変動によって大規模な集中豪雨がおこり、その結果河川の氾濫によって地形が変動したと考えられている。こうした地形の変動を人工的に引き起こすことが $4.42 \times 10^6 \text{ km}^2$ という大規模な面積の土壤の改善へ残された唯一の方法ではないだろうか。人為的に集中豪雨を引き起こすことは現在の気象学の技術では不可能であろうが、河川の流路を変更したりすることは現在の土木技術では可能であろう。ただし、これまでの土木は洪水を防ぐための治水技術であったが、今後は洪水を助長する技術が必要であろう。

- 3 本研究では平面的な植生の分布を検討してきたが、一般に鉛直方向でも植生の分布は異なる。このような植生の鉛直分布に大きな影響を及ぼす因子として温度が考えられる。高山帯の森林限界はヒマラヤ東部から極東にかけての地域にとると、アッサムヒマラヤで海拔高度3900m、台湾で3600m、日本中部で2300~2600m、北海道で1000~1500m、シベリア東部の $65 \sim 70^\circ \text{ N}$ で海面高度である（吉野ら、1985）。山岳地帯の麓の植生が温度上昇による光合成速度の低下を引き起こしても、高所では光合成速度の低下を引き起こすまで温度は上昇しないことが考えられる。よって、高山帯の森林限界はより高度の高い位置へ移動することが考えられる。以下の表に大陸別の高度別面積の割合を示す。

Table 5-2-1 大陸別の高度別面積の割合 (%) 理科年表より

	Asia	Europe	Africa	N.America	S.America	Australia	Antarctic	Total
200m以下	24.6	52.7	9.7	29.9	38.2	39.3	6.4	25.3
200~500	20.2	21.2	38.9	30.7	29.8	41.6	2.8	26.8
500~1000	25.9	15.2	28.2	12.0	19.2	16.9	5.0	19.4
1000~2000	18.0	5.0	19.5	16.6	5.6	2.2	22.0	15.2
2000~3000	5.2	2.0	2.7	9.1	2.2	0.0	37.6	7.5
3000~4000	2.0	0.0	1.0	1.7	2.8	0.0	26.2	3.9
4000~5000	4.1	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	1.5
5000m以上	1.1	-	0.0	0.0	0.0	-	-	0.4
平均高度m	960	345	750	720	590	340	2200	875

このように地球上には高度の高い地域の割合が大きい。特に3000m以上の高度を持つ面積の割合は全地球陸地の5.8% ( $8.20 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) に達し、この面積は気候変

動によって衰退すると本モデルが予測した森林の面積の約2倍である。このように高山帯にあり、現在は草原などの地域が森林帯に移行すれば、気候変動前後では炭素蓄積量の変動がなくなることが予測される。しかしながら高山帯の森林限界は温度以外の要因が関与することもある (Fitter and Hay, 1981)。例えば標高が高くなると大気圧が減少するので、大気中の炭酸ガス濃度は低下することも一つの要因として考えられる。また、光強度が標高や季節、積雪の状態によって異なることや、風が強いなどの様々な要因が重なって、高山環境は極端に変動し易いことも挙げられる。また、よって、高山帯の森林を拡大するためには、高山帯の環境をなるべく低地環境に近づけることが重要である。山岳地帯であれば中腹をならして平地を作ることが、高地帯であれば窪地を作ることが考えられる。このような平地を作ることによって風の影響を抑えることができ、風による土壌水分の直接的な昇華による干ばつを防ぐことができると考えられる。

### 5-3 今後の展望

以上、本モデルの結果を踏まえた上での幾つかの対策を述べた。しかしながら、こうした気候条件の変化による陸上生態系の変化とは別に人間活動による森林の破壊や、砂漠化の進行なども考慮しなくてはならないであろう。Grainger (1984) によると年間  $6.11 \times 10^4 \text{ km}^2$  の面積の熱帯雨林が失われており、UN (1978) によると年間  $6 \times 10^4 \text{ km}^2$  の面積の土地が砂漠化によって失われている。こうした人間活動の影響は気候条件などの自然環境の変化だけでは予測できず、社会的、経済的な環境の変化をも考慮しなくてはならないであろう。ただし、既存のMARKALモデルやエドモンズ=ライリー=モデルなどの経済・エネルギーモデルはエネルギーの需給を扱うモデルであって、炭酸ガスの排出量は予測できても、森林伐採や焼畑農業、過放牧などの人間活動の陸上生態系へのインパクトを予測するには不適切である。また、本モデルのような物質循環を扱うモデルとの整合性は現時点では取れない。

よって、自然環境と人間環境との間を自由に往来できる共通の変数やシステムを作る必要がある。その時重要なのは、その変数が人間の生活を基準としたものとするか、あるいは人間を含めた地球全体を基準としたものとするかで大きく異なることであろう。人間の生活を基準とするものであれば、人間全体の利益を基準とするのか、一部の人間の利益のみを優先するのか。地球全体を基準とするのであれば、人間を含めた生物全体を基準とするのか、一つの惑星として地球を扱うのか。また、そのシステムが単にコンピューターの上に再現可能か、不可能かという基準だけでなく、現実本来どのような姿であるべきなのか。開放的であるか閉鎖的であるか、確率論的であるか決定論的であるか、自律的であるか他律的であるか、分散的であるか集中的であるか。さらに、こうした問題は対象とする時間的、空間的スケールに依存するであろうか、それとも統一された理論が存在するのであるか。

このように地球環境問題はとかく科学技術の進歩に依存しがちな我々に、多くの波紋

を投げかけた。現時点では地球環境問題に対する答えは十人十色であるが、それは我々（特に先進国の国民が）が十分な豊かさを享受するため、地球環境問題が身近な問題でないからだといえよう。これは豊かな環境条件にある熱帯に多くの種が存在していることに似ている。しかしながら、寒帯地方の極めて厳しい環境条件で存在する種は極めて少ないことから、地球環境問題が目に見えて深刻になっていけばいくほど選択の幅は狭められることが予測される。

地球環境問題が深刻になる前に、我々がなさなければならないことは新しい変数やシステムを有するモデルを構築し、将来への指針を示すことである。炭酸ガス排出量を少なくするためには既存の産業構造はどうあるべきか。21世紀には人口100億ともいわれる人類は十分な食料を得ることができるのか。地球環境時代において社会構造はどう変化していくのか。今述べたのはほんの一例にすぎないが、ただひとついえることは人類は確実に今まで経験しなかったほど急激な変化を（物質的にも精神的にも）体験するであろう。このような変化に人類が対応するために、我々は人類の進むべきビジョンあるいはストラテジーを示すべきである。そのためには、将来の地球の姿を明確に描くことのできるモデルを提示することは不可欠なものであり、本研究はそうした総合的なモデル構築への第1歩であるといえよう。

終章参考文献

- 1) Fitter, A.H. and R.K.M. Hay, 1981, Environmental Physiology of Plants, Academic Press
- 2) Grainger, A., 1984, J. World Forest Resource Management, 1, 21
- 3) UN, 1978, Round-Up Plan of Action and Resolutions, United Nations Conference on Desertification, 29 August-9 September, 1977, 43p
- 4) 吉野正敏, 浅井富雄, 河村武, 設楽寛, 新田尚, 前島郁雄, 1985, 気候学・気象学辞典, 二宮書店

## Appendix

式一覽

記号一覽

Program List

業績一覽

### 炭素収支式 (植生)

葉	$\frac{dC_1}{dt} = \alpha R_1^P - R_1^L$	
幹	$\frac{dC_2}{dt} = (1-\alpha)R_1^P - R_2^R - R_2^L$	
$C_1$	葉の炭素蓄積量	[kgC · m <sup>-2</sup> ]
$\alpha$	光合成によって固定化される炭素のうち葉へ分配される割合	[-]
$R_1^P$	光合成速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$R_1^L$	葉の落葉速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$C_2$	幹の炭素蓄積量	[kgC · m <sup>-2</sup> ]
$R_2^R$	幹の呼吸速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$R_2^L$	幹の枯死速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$t$	時間	[day]

### 炭素収支式 (土壌)

植物遺体 (地表)	$\frac{\partial C_3}{\partial t} = F \frac{\partial C_3}{\partial z} + R_1^L + R_2^L \quad (z=0)$	
植物遺体 (土壌中)	$\frac{\partial C_3}{\partial t} = F \frac{\partial C_3}{\partial z} - R_3^H - R_3^D \quad (z>0)$	
腐植質	$\frac{\partial C_4}{\partial t} = F \frac{\partial C_4}{\partial z} + R_3^H - R_4^D$	
$R_1^L$	葉の落葉速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$R_2^L$	幹の枯死速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$C_3$	植物遺体の炭素蓄積量	[kgC · m <sup>-2</sup> ]
$R_3^H$	植物遺体の腐植化速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$R_3^D$	植物遺体の分解速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$C_4$	腐植質の炭素蓄積量	[kgC · m <sup>-2</sup> ]
$R_4^D$	腐植質の分解速度	[kgC · m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> ]
$F$	浸透水による移流速度	[m · day <sup>-1</sup> ]
$z$	土壌深さ	[m]

炭素移動式 (植生)

葉の光合成速度	$R_1^P = \eta_{T,P} \eta_{w,p} \eta_{CO_2} f_1^P$
葉の落葉速度	$R_1^L = k_1^L C_1$
幹の呼吸速度	$R_2^R = \eta_{T,R} k_2^R C_2$
幹の枯死速度	$R_2^L = k_2^L C_2$

$k_1^L, k_2^R, k_2^L$	温度20度における速度定数	$[1 \cdot \text{day}^{-1}]$
$C_1$	葉の炭素蓄積量	$[\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}]$
$C_2$	幹の炭素蓄積量	$[\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}]$

$\eta_{T,P}$	光合成速度の温度依存性	$[-]$
--------------	-------------	-------

$$\eta_{T,P} = \begin{cases} 0 & T \leq T_{\text{opt}} - \frac{\Delta T}{2}, T \geq T_{\text{opt}} + \frac{\Delta T}{2} \\ \cos\left(\frac{T - T_{\text{opt}}}{\Delta T} \pi\right) & T_{\text{opt}} - \frac{\Delta T}{2} \leq T \leq T_{\text{opt}} + \frac{\Delta T}{2} \end{cases}$$

$T$	温度	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{\text{opt}}$	光合成の最適温度	$[^{\circ}\text{C}]$
$\Delta T$	光合成が行われる温度範囲	$[^{\circ}\text{C}]$

$\eta_{w,p}$	光合成速度の土壤水分依存性	$[-]$
--------------	---------------	-------

$$\eta_{w,p} = \begin{cases} 0 & W < W_{wp} \\ \left(\frac{1}{W_{fc} - W_{wp}}\right)(W - W_{wp}) & W \geq W_{wp} \end{cases}$$

$W$	土壤水分量	$[\text{cm}]$
$W_{wp}$	しおれ点	$[\text{cm}]$
$W_{fc}$	圃場容水量	$[\text{cm}]$

$\eta_{CO-P}$  光合成速度の炭酸ガス濃度依存性 [-]

$$\eta_{CO-P} = \frac{R_2^R + (R_{1,0}^P - R_2^R)(1 + 0.5 \ln(CO_2/CO_2^0))}{R_{1,0}^P}$$

$CO_2$  将来の炭酸ガス濃度 [ppm]

$CO_{2,0}$  現在の炭酸ガス濃度 [ppm]

$R_{1,0}^P$  炭酸ガス濃度の影響を考慮しない場合の光合成速度  
[kgC·m<sup>-2</sup>·hr<sup>-1</sup>]

$r_1^P$  環境の影響を排除した光合成速度 [kgC·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>]

$$r_1^P = D_1 \frac{P_0}{K} \ln \left\{ \frac{1 + (b/P_0)K I_m}{1 + (b/P_0)K I_m \exp(-KA_L C_1)} \right\}$$

$P_0$  光飽和時の光合成速度 [kgC·m<sup>-2</sup>·hr<sup>-1</sup>]

$K$  植物群落内の光の透過係数 [-]

$b$  光合成速度と光強度関係における初期勾配  
[kgC·m<sup>-2</sup>·hr<sup>-1</sup>·klux<sup>-1</sup>]

$A_L$  葉の比表面積 [m<sup>2</sup>·kgC<sup>-1</sup>]

$I_m$  1日の平均光強度 [klux]

$D_1$  1日の日長時間 [hr·day<sup>-1</sup>]

$\eta_{T-R}$  呼吸速度の温度依存性 [-]

$$\eta_{T-R} = 2^{(T-20) \cdot 10}$$

$T$  温度 [°C]

炭素移動式（土壌）

植物遺体の腐植化速度  $R_3^H = k_3^H C_3$

植物遺体の分解速度  $R_3^D = \eta_{T-D} \eta_{W-D} k_3^D C_3$

腐植質の分解速度  $R_4^D = \eta_{T-D} \eta_{W-D} k_4^D C_4$

$k_3^H$ 、 $k_3^D$ 、 $k_4^D$  温度20度における速度定数 [1・day<sup>-1</sup>]  
 $C_3$  植物遺体の炭素蓄積量 [kgC・m<sup>-2</sup>]  
 $C_4$  腐植質の炭素蓄積量 [kgC・m<sup>-2</sup>]

$\eta_{T-D}$  分解速度の温度依存性 [-]

$$\eta_{T-D} = 2^{(T-20) \cdot 10}$$

$T$  温度 [°C]

$\eta_{W-D}$  分解速度の土壌水分依存性 [-]

$$\eta_{W-D} = 1 - (W/0.8 \cdot W_g - 1)^2$$

$W$  土壌水分量 [cm]

$W_g$  圃場容水量 [cm]

本研究で使用した記号

ABT	=annual biotemperature	[°C]
$A_{\text{type}}$	=area of "type" vegetation in one mesh	[m <sup>2</sup> ]
$A_L$	=specific leaf area	[m <sup>2</sup> ·kgC]
APE	=annual potential evapotranspiration	[-]
APETR	=annual potential evapotranspiration ratio	[-]
APPT	=average total annual precipitation	[mm]
$b$	=Initial tangent of photosynthesis-light intensity relation	[kgC·m <sup>2</sup> ·hr·klux]
$C_1$	=carbon storage in LEAF	[kgC·m <sup>2</sup> ]
$C_2$	=carbon storage in TRUNK	[kgC·m <sup>2</sup> ]
$C_3$	=carbon storage in DEAD BIOMASS	[kgC·m <sup>2</sup> ]
$C_4$	=carbon storage in HUMUS	[kgC·m <sup>2</sup> ]
$CO_2$	=carbon dioxide concentration	[ppm]
$CO_{2,0}$	=present carbon dioxide concentration	[ppm]
$I_m$	=illumination intensity	[klux]
$K$	=attenuation coefficient of light	[-]
$k_2^R$	=respiration rate constants of TRUNK	[1·day <sup>-1</sup> ]
$k_3^D$	=decomposition rate constants of DEAD BIOMASS	[1·day <sup>-1</sup> ]
$k_3^H$	=humification rate constant of DEAD BIOMASS	[1·day <sup>-1</sup> ]
$k_4^D$	=decomposition rate constants of HUMUS	[1·day <sup>-1</sup> ]
$k_1^L$	=litterfall rate constants of LEAF	[1·day <sup>-1</sup> ]
$k_2^L$	=litterfall rate constants of TRUNK	[1·day <sup>-1</sup> ]
$L_D$	=day time length in a day	[hr·day <sup>-1</sup> ]
PPT(M)	=monthly precipitation	[mm]
$p_0$	=photosynthesis rate at saturated light intensity	[kgC·m <sup>-2</sup> ·hr <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{mesh}}$	=carbon content or net primary production in one mesh	[kg·m <sup>-2</sup> or kg·m <sup>-2</sup> ·year <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{type}}$	=carbon content or net primary production of "type" vegetation in one mesh	[kg·m <sup>-2</sup> or kg·m <sup>-2</sup> ·year <sup>-1</sup> ]
$R_1^P$	=photosynthesis rate	[kgC·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> ]
$R_{1,0}^P$	=photosynthesis rate without effect of carbon dioxide concentration	[kgC·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> ]
$R_1^L$	=litterfall rate of LEAF	[kgC·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> ]
$R_2^R$	=respiration rate of TRUNK	[kgC·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> ]
$R_2^L$	=litterfall rate of TRUNK	[kgC·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> ]
$R_3^D$	=decomposition rate of DEAD BIOMASS	[kgC·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> ]
$R_3^H$	=humification rate of DEAD BIOMASS	[kgC·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> ]

$R_4^D$	=decomposition rate of HUMUS	$[\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}]$
$r_1^P$	=basic photosynthesis rate	$[\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}]$
RN	=renewal time of forest	[year]
$T$	=temperature	$[\text{°C}]$
$T(M_{>0})$	=mean monthly temperature >0	$[\text{°C}]$
$T_{\text{opt}}$	=optimum temperature for photosynthesis	$[\text{°C}]$
$\Delta T$	=temperature range for active photosynthesis	$[\text{°C}]$
$t$	=time	[hr]
$W$	=soil water content	[cm]
$W_{\text{wp}}$	=wilting point	[cm]
$W_{\text{fc}}$	=field capacity	[cm]
$z$	=soil depth	[cm]
$\alpha$	=allocation ratio for LEAF	[-]
$\eta_{T-P}$	=photosynthesis efficiency depending on temperature	[-]
$\eta_{T-R}$	=temperature dependency of the respiration	[-]
$\eta_{T-D}$	=temperature dependency of the decomposition	[-]
$\eta_{W-P}$	=photosynthesis efficiency depending on water content	[-]
$\eta_{W-D}$	=decomposition efficiency depending on water content	[-]

<Subscripts>

1	=LEAF compartment
2	=TRUNK compartment
3	=DEAD BIOMASS compartment
4	=HUMUS compartment

<Superscripts>

P	=photosynthesis
R	=respiration
L	=litterfall
H	=humification
D	=decomposition

# Program List

```
//AA417500 JOB ,CLASS=Y
// EXEC VPFORT, RG=1, RE=7, OPTION=AE
```

```
*****
**
** GLOBAL CYCLE MODEL BETWEEN ATMOSPHERE AND **
** TERRESTRIAL ECOSYSTEMS **
**
** FOR CALCULATION OF STEADY STATE CONDITIONS **
**
** IN PRESENT CLIMATE CONDITIONS **
**
** FOR VP-100 SUPER COMPUTER **
**
** BY NAOHIRO GOTO **
** INSTITUTE OF INDUSTRIAL SCIENCE **
** UNIVERSITY OF TOKYO **
**
*****
```

INTEGER N, LAN, LAL, LO1, N1

```
+++++
++
++ N, N1 Mesh Number +
++ LAN Latitude Number in Each Mesh +
++ LAL Latitude +
++ LO1 Longitude +
++
+++++
```

INTEGER LANO(934), LA(934), LONG(934), LO(934), S(934), S1

```
+++++
++
++ LANO(N) Latitude in Each Mesh +
++ LA(N) North(=0) or South(=1) Hemisphere +
++ LONG(N) Longitude in Each Mesh +
++ LO(N) East(=0) or West(=1) Hemisphere +
++ S(N), S1 Soil Number in Each Mesh +
++
+++++
```

INTEGER DLE(365,36)  
REAL I(365,36),RAD(365,36)

```
+++++
++
++          DLE(D,LAN)      Day Time Length in a Day      [hr*day-1] +
++          I(D,LAN)       Illumination Intensity          [klux] +
++          RAD(D,LAN)     Radiation                        [W*m-2] +
++
+++++
```

REAL TE(934,12),SW(934,0:12),EV(934,12)  
INTEGER PR(934,12)

```
+++++
++
++          TE(N,M)        Temperature                    [°C] +
++          SW(N,M)        Soil Water Content              [cm] +
++          EV(N,M)        Evapotranspiration              [cm] +
++          PR(N,M)        Precipitation                    [cm] +
++
+++++
```

REAL LI(934,5),TI(934,5)  
REAL L(934,5),T(934,5)  
REAL L1(934,5),T1(934,5)

```
+++++
++
++          LI(N,V)        Initial Condition of Carbon Storage in LEAF +
++                               [kgC*m-2] +
++          TI(N,V)        Initial Condition of Carbon Storage in TRUNK +
++                               [kgC*m-2] +
++          L(N,V),L1(N,V) Carbon Storage in LEAF          [kgC*m-2] +
++          T(N,V),T1(N,V) Carbon Storage in TRUNK         [kgC*m-2] +
++
+++++
```

REAL GPD(934),RTD(934),FLD(934),FTD(934),ALT(934)

```
+++++
++
++          GPD(N)         Photosynthesis Rate            [kgC*m-2*day-1] +
++          FLD(N)         Litterfall Rate of LEAF        [kgC*m-2*day-1] +
++          RTD(N)         Respiration Rate of TRUNK       [kgC*m-2*day-1] +
++          FTD(N)         Litterfall Rate of TRUNK        [kgC*m-2*day-1] +
++          ALT(N)         Carbon Flux Rate from LEAF to TRUNK +
++                               [kgC*m-2*day-1] +
++
+++++
```

+++++

REAL OP (5), RA (5), PO (5), B (5), K (5), GT (5), AL (5), O (5), LL (5), LT (5)

+++++

```
++
++      OP (V)          Optimum Temperature for Photosynthesis  [°C] +
++      RA (V)          Temperature Range for Active Photosynthesis +
++                                  [°C] +
++      PO (V)          Photosynthesis Rate at Saturated Light    +
++                                  Intensity                    [kgC·m-2·hr-1] +
++      B (V)           Initial Tangent of Photosynthesis-Light  +
++                                  Intensity Relation          [kgC·m2·hr·klux] +
++      K (V)           Attenuation Coefficient of Light          [-] +
++      GT (V)          Respiration Rate Constants of TRUNK      [1·day-1] +
++      AL (V)          Allocation Ratio for LEAF                 [-] +
++      O (V)           Specific Leaf Area                       [m2·kgC] +
++      LL (V)          Litterfall Rate Constants of LEAF        [1·day-1] +
++      LT (V)          Litterfall Rate Constants of TRUNK       [1·day-1] +
++
```

+++++

REAL GDB (12), GHU (12), HUF (12), WP (12), FC (12)

+++++

```
++
++      GDB (S)         Decomposition Rate Constants of DEAD BIOMASS +
++                                  [1·day-1] +
++      GHU (S)         Decomposition Rate Constants of HUMUS      +
++                                  [1·day-1] +
++      HUF (S)         Humification Rate Constant of DEAD BIOMASS +
++                                  [1·day-1] +
++      WP (S)          Wilting Point                             [cm] +
++      FC (S)          Field Capacity                            [cm] +
++
```

+++++

REAL SWEP (934, 12), TEP (934, 12, 5), TERD (934, 12)

+++++

```
++
++      SWEP (N,M)      Photosynthesis Efficiency Depending on Water +
++                                  Content                       [-] +
++      TEP (N,M,V)     Photosynthesis Efficiency Depending on    +
++                                  Temperature                    [-] +
++      TERD (N,M)      Temperature Dependency of the Respiration [-] +
++
```

+++++

INTEGER D, Y, NT, M, DT, V, MO (365), NC, DD

```

+++++
++
++      D          Day in a Year          [Day] +
++      DD         Day in a Month        [Day] +
++      DT         Length of Time Step    [Day] +
++      Y          Year                   [Year] +
++      NT         Calculation Time       [Year] +
++      NC         Total Number of Mesh   +
++      M,M(D)     Month                   [Month] +
++      V          Vegetation Type        +
++
+++++

```

REAL SAEKI(934),Q(934)

```

+++++
++
++      SAEKI(N)   Photosynthesis Rate without Effect of Carbon +
++                Dioxide Concentration      [kgC·m-2·day-1] +
++      Q(N)       Sum of Heat Index          +
++
+++++

```

REAL PAI,IJ

```

+++++
++
++      PAI        π                      +
++      IJ         Heat Index              +
++
+++++

```

```

NT=100
NC=934
DT=1
PAI=3.1415

```

```

-----
-      READING DATA      -
-----

```

```

DO 10 LAN=1,36
DO 11 DD=1,30
11 READ(37,1001) (DLE(D,LAN),D=12*(DD-1)+1,12*(DD-1)+12)
READ(37,1002) (DLE(D,LAN),D=361,365)
1001 FORMAT(12I3)

```

```

1002 FORMAT (5I3)
      DO 12 DD=1,30
      12 READ (38,1011) (RAD (D, LAN), D=12*(DD-1)+1, 12*(DD-1)+12)
          READ (38,1012) (RAD (D, LAN), D=361, 365)
1011 FORMAT (12F6.1)
1012 FORMAT (5F6.1)
      10 CONTINUE

      DO 20 D=1,365
      DO 20 LAN=1,36
      20 I (D, LAN)=RAD (D, LAN) /10*.7*(1-0.1*COS ((D-60)/364*2*PAI)) *2

      DO 30 V=1,5
      30 READ (47,1004) PO (V), B (V), K (V), O (V), AL (V), GT (V), LL (V), LT (V), OP (V), RA (V)
1004 FORMAT (F6.4, 1X, F8.6, 1X, F4.2, 1X, F5.1, 1X, F4.2, 1X, F6.4, 1X, F7.5, 1X,
          +F8.6, 1X, F4.1, 1X, F4.1)

      DO 40 V=1,12
      40 READ (48,1005) HUF (V), GDB (V), GHU (V), WP (V), FC (V)
1005 FORMAT (F8.6, 1X, F5.3, 1X, F7.5, 1X, F4.1, 1X, F4.1)

      DO 101 N=1,NC
      READ (28,1010) (TE (N,M), M=1,12)
      READ (29,1020) NO, LA (N), LO (N), (PR (N,M), M=1,12)
      READ (30,1030) LA1, LO1, S (N)
      IF (S (N) .EQ. 0) S (N)=1
      READ (2,1032) N1, S1, LA1, LO1, LI (N,1), LI (N,2), LI (N,3), LI (N,4), LI (N,5)
      READ (3,1032) N1, S1, LA1, LO1, TI (N,1), TI (N,2), TI (N,3), TI (N,4), TI (N,5)
1010 FORMAT (12 (1X, F5.1))
1020 FORMAT (1X, I3, 1X, I3, 1X, I4, 12 (1X, I3))
1030 FORMAT (I3, 1X, I4, 1X, I2)
1031 FORMAT (I3, 1X, I4, 1X, I2, 1X, I2, 1X, F4.1, 1X, F4.1)
1032 FORMAT (I4, 1X, I2, 1X, I3, 1X, I4, 5 (1X, F5.2))
      101 CONTINUE

      DO 103 N=1,NC
      LANO (N)=18-INT (LA (N) /5)
      LONG (N)=36+INT (LO (N) /5)
103 CONTINUE

      DO 112 V=1,5
      DO 112 N=1,NC
      IF (LI (N,V) .LE. 0.01) LI (N,V)=0.01
      IF (TI (N,V) .LE. 0.01) TI (N,V)=0.01
112 CONTINUE

      DO 401 D=1,365

```

```
MO(D)=INT(D/30)+1
IF (MO(D).EQ.13) MO(D)=12
401 CONTINUE
```

```
-----
--                                     --
--      CALCULATION OF EVAPO-TRANSPIRATION      --
--                                     --
-----
```

```
*VOCL LOOP,VI(N)
DO 104 N=1,NC
Q(N)=0.0
DO 104 M=1,12
  IF (TE(N,M).LE.0.0) THEN
    IJ=0.0
  ELSE
    IJ=(TE(N,M)/5)**1.514
  END IF
  Q(N)=Q(N)+IJ
104 CONTINUE
```

```
*VOCL LOOP,VI(N)
DO 105 M=1,12
DO 105 N=1,NC
  IF (TE(N,M).LE.0.0) THEN
    EV(N,M)=0.0
  ELSE IF (TE(N,M).GT.0.0.AND.TE(N,M).LE.26.25) THEN
    EV(N,M)=1.6*(10*TE(N,M)/Q(N))**((492390.0+17920.0*Q(N)
+-77.1*Q(N)**2+0.675*Q(N)**3)/1000000)
  ELSE IF (TE(N,M).GT.26.25.AND.TE(N,M).LE.26.75) THEN
    EV(N,M)=13.5
  ELSE IF (TE(N,M).GT.26.75.AND.TE(N,M).LE.27.25) THEN
    EV(N,M)=13.95
  ELSE IF (TE(N,M).GT.27.25.AND.TE(N,M).LE.27.75) THEN
    EV(N,M)=14.37
  ELSE IF (TE(N,M).GT.27.75.AND.TE(N,M).LE.28.25) THEN
    EV(N,M)=14.78
  ELSE IF (TE(N,M).GT.28.25.AND.TE(N,M).LE.28.75) THEN
    EV(N,M)=15.17
  ELSE IF (TE(N,M).GT.28.75.AND.TE(N,M).LE.29.25) THEN
    EV(N,M)=15.54
  ELSE IF (TE(N,M).GT.29.25.AND.TE(N,M).LE.29.75) THEN
    EV(N,M)=15.89
  ELSE IF (TE(N,M).GT.29.75.AND.TE(N,M).LE.30.25) THEN
    EV(N,M)=16.21
```

```

ELSE IF (TE(N,M) .GT. 30.25 .AND. TE(N,M) .LE. 30.75) THEN
  EV(N,M)=16.52
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 30.75 .AND. TE(N,M) .LE. 31.25) THEN
  EV(N,M)=16.8
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 31.25 .AND. TE(N,M) .LE. 31.75) THEN
  EV(N,M)=17.07
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 31.75 .AND. TE(N,M) .LE. 32.25) THEN
  EV(N,M)=17.31
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 32.25 .AND. TE(N,M) .LE. 32.75) THEN
  EV(N,M)=17.53
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 32.75 .AND. TE(N,M) .LE. 33.25) THEN
  EV(N,M)=17.72
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 33.25 .AND. TE(N,M) .LE. 33.75) THEN
  EV(N,M)=18.05
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 33.75 .AND. TE(N,M) .LE. 34.25) THEN
  EV(N,M)=18.18
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 34.25 .AND. TE(N,M) .LE. 34.75) THEN
  EV(N,M)=18.29
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 34.75 .AND. TE(N,M) .LE. 35.25) THEN
  EV(N,M)=18.37
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 35.25 .AND. TE(N,M) .LE. 35.75) THEN
  EV(N,M)=18.43
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 35.75 .AND. TE(N,M) .LE. 36.25) THEN
  EV(N,M)=18.47
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 36.25 .AND. TE(N,M) .LE. 36.75) THEN
  EV(N,M)=18.49
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 36.75 .AND. TE(N,M) .LE. 37.25) THEN
  EV(N,M)=18.5
ELSE IF (TE(N,M) .GT. 37.25 .AND. TE(N,M) .LE. 37.75) THEN
  EV(N,M)=18.5
END IF
105 CONTINUE

```

```

-----
-                                     -
-   CALCULATION OF SOIL WATER CONTENT   -
-                                     -
-----

```

```

DO 106 N=1,NC
106 SW(N,0)=30.0

DO 360 M=1,12
DO 360 N=1,NC
  SW(N,M)=SW(N,M-1)+PR(N,M)/10.0-EV(N,M)
  IF (SW(N,M) .LE. 0.0) THEN

```

```

      SW(N,M)=0.0
      ELSE IF (SW(N,M).GE.FC(S(N))) THEN
        SW(N,M)=FC(S(N))
      END IF
360 CONTINUE

      DO 361 N=1,NC
361 SW(N,0)=SW(N,12)

      DO 362 M=1,12
      DO 362 N=1,NC
        SW(N,M)=SW(N,M-1)+PR(N,M)/10.0-EV(N,M)
        IF (SW(N,M).LE.0.0) THEN
          SW(N,M)=0.0
        ELSE IF (SW(N,M).GE.FC(S(N))) THEN
          SW(N,M)=FC(S(N))
        END IF
362 CONTINUE

      DO 363 N=1,NC
363 SW(N,0)=SW(N,12)

      DO 364 M=1,12
      DO 364 N=1,NC
        SW(N,M)=SW(N,M-1)+PR(N,M)/10.0-EV(N,M)
        IF (SW(N,M).LE.0.0) THEN
          SW(N,M)=0.0
        ELSE IF (SW(N,M).GE.FC(S(N))) THEN
          SW(N,M)=FC(S(N))
        END IF
364 CONTINUE

```

```

-----
-                                     -
-   EFFECT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS   -
-                                     -
-----

```

```

      DO 107 M=1,12
      DO 107 N=1,NC
      IF (SW(N,M).LE.WP(S(N))) THEN
        SWEP(N,M)=0.0
      ELSE
        SWEP(N,M)=1/(FC(S(N))-WP(S(N)))*(SW(N,M)-WP(S(N)))
      END IF
107 CONTINUE

```

```

DO 109 V=1,5
DO 109 M=1,12
DO 109 N=1,NC
  IF (TE(N,M) .GE. (OP(V)-RA(V)/2) .AND. TE(N,M) .LE. OP(V)+RA(V)/2) THEN
    TEP(N,M,V)=COS((TE(N,M)-OP(V))/RA(V)*PAI/2)
  ELSE
    TEP(N,M,V)=0.0
  END IF
109 CONTINUE

```

```

DO 108 M=1,12
DO 108 N=1,NC
  TERD(N,M)=2**((TE(N,M)-25)/10.0)
108 CONTINUE

```

```

-----
-                                     -
-   CARBON CYCLE CALCULATION         -
-                                     -
-----

```

```

DO 111 V=1,5
DO 111 N=1,NC
L(N,V)=LI(N,V)
T(N,V)=TI(N,V)
111 CONTINUE

DO 300 Y=0,NT
DO 400 D=1,365
DO 100 V=1,5

DO 121 N=1,NC
121 SAEKI(N)=PO(V)/K(V)*LOG((1+B(V)/PO(V)*K(V)*I(D,LANO(N)))/(1+B(V)/PO(V)
+*K(V)*I(D,LANO(N))*EXP(-K(V)*O(V)*L(N,V))))

DO 122 N=1,NC
122 GPD(N)=SWEP(N,MO(D))*TEP(N,MO(D),V)*SAEKI(N)*DLE(D,LANO(N))

DO 123 N=1,NC
123 RTD(N)=GT(V)*TERD(N,MO(D))*T(N,V)

DO 125 N=1,NC
ALT(N)=AL(V)*GPD(N)
FLD(N)=LL(V)*L(N,V)
FTD(N)=LT(V)*T(N,V)

```

125 CONTINUE

```
DO 127 N=1,NC
  L1(N,V)=L(N,V)+DT*(GPD(N)-FLD(N)-ALT(N))
  T1(N,V)=T(N,V)+DT*(ALT(N)-RTD(N)-FTD(N))
```

127 CONTINUE

```
DO 128 N=1,NC
  L(N,V)=L1(N,V)
  IF(L(N,V).LT.-10.0)L(N,V)=-10.0
  T(N,V)=T1(N,V)
```

128 CONTINUE

100 CONTINUE

400 CONTINUE

300 CONTINUE

```
DO 210 N=1,NC
  WRITE(1,2000)N,S(N),LA(N),LO(N),(L(N,V)+T(N,V),V=1,5)
```

210 CONTINUE

```
2000 FORMAT(I4,' ',I2,' ',I3,' ',I4,' ',F5.2,' ',F5.2,' ',F5.2
+', ',F5.2,' ',F5.2)
```

END

```
//GO.FT01F001 DD DSN=AA41750.VPLTOG5I.DATA1,DISP=(NEW,CATLG),
// SPACE=(TRK,(5,1),RLSE),UNIT=VPDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3120)
//GO.FT28F001 DD DSN=AA41750.VPCOF5M.DATA(TEMP),DISP=SHR
//GO.FT29F001 DD DSN=AA41750.VPCOF5M.DATA(PREC),DISP=SHR
//GO.FT30F001 DD DSN=AA41750.VPCOF5M.DATA(TEXTURE),DISP=SHR
//GO.FT37F001 DD DSN=AA41750.VPCOF5M.DATA(DAY5),DISP=SHR
//GO.FT38F001 DD DSN=AA41750.VPCOF5M.DATA(RAD5),DISP=SHR
//GO.FT47F001 DD DSN=AA41750.VPPARAME.DATA(VEGEDAT),DISP=SHR
//GO.FT48F001 DD DSN=AA41750.VPPARAME.DATA(SOILDAT),DISP=SHR
```

## 業績一覧

### 投稿論文

- 1 Motoyuki Suzuki, Naohiro Goto and Akiyoshi Sakoda, Simplified dynamic model on carbon exchange between atmosphere and terrestrial ecosystems, *Ecological Modelling*, 1993,70, 161-194  
第1章、第2章-1
- 2 Naohiro Goto, Akiyoshi Sakoda and Motoyuki Suzuki, Modelling of soil carbon dynamics as a part of carbon cycle in terrestrial ecosystems, *Ecological Modelling*, 1994, in press  
第1章、第2章-2
- 3 後藤尚弘、迫田章義、鈴木基之、炭素循環モデルによる地球温暖化の陸上生態系への影響予測、*化学工学論文集*、1993、19(5)、771-780  
第3章
- 4 Naohiro Goto, Akiyoshi Sakoda and Motoyuki Suzuki, Prediction of global vegetation distribution change by using carbon dynamics model, in preparation  
第4章

### その他

- 5 鈴木基之、後藤尚弘、迫田章義、地球規模の土壌内炭素循環のモデル化、*化学工学誌*、1993、57(5)、357-358  
第1章
- 6 後藤尚弘、迫田章義、鈴木基之、陸上生態系の地球規模の炭素循環モデルに関する研究の現状と課題、*生産研究*、1993、45(7)、10-17  
序章
- 7 後藤尚弘、大気と陸上生態系間の炭素循環のモデル-地球環境と人間活動の調和への道、93「独創性を拓く先端技術学生論文（日本工業新聞社主催、文部省、フジサンケイグループ後援）、ニッポン放送賞受賞
- 8 後藤尚弘、迫田章義、鈴木基之、陸上生態系内の炭素循環を考慮した地球規模の植生分布変動モデル、*化学工学シンポジウムシリーズ38*、「CO<sub>2</sub>対策技術と基礎研究」、38-41、1993  
第4章

## 謝辞

本論文は筆者が1989年4月～1994年3月まで東京大学生産技術所第4部鈴木研究室に大学院生として在籍している間の研究をまとめたものです。

この間、適切かつ親切な指導をしてくださると同時に、筆者に研究者として進むべき道標を常に示してくださった鈴木基之教授に心より感謝いたします。

研究に対する適切な助言だけでなく、論文作成などの基本的な指導をしてくださった迫田章義助教授に感謝いたします。

環境科学の研究者として、あるいは鈴木研究室の先輩として様々な助言をしてくださった川島博之農業環境技術研究所主任研究官、川西琢也金沢大学助手に感謝いたします。

分野は違いますが研究者としての心得などをご教示してくださった酒井康行助手、藤井隆夫技官に感謝いたします。

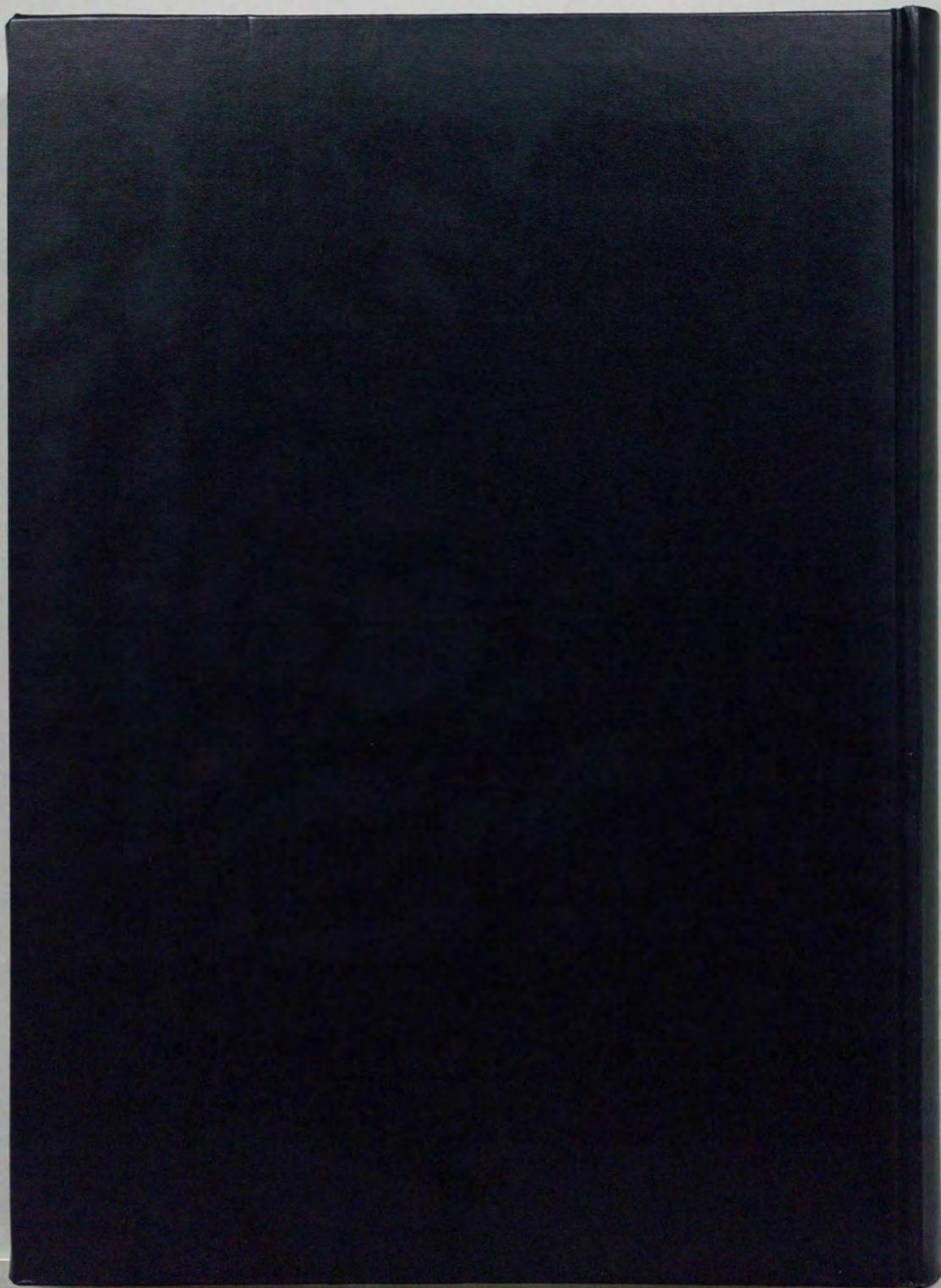
常に研究室内で暖かく見守っていただきました鶴達郎技官、野村剛志技官に感謝いたします。

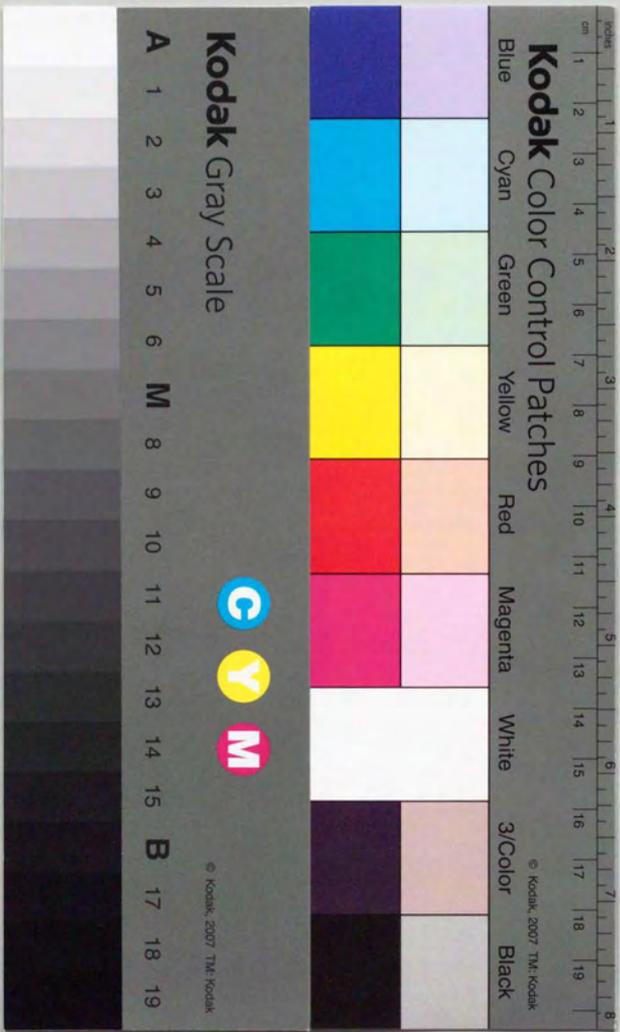
このほかにも様々な助言をいただきました先生方や先輩方、また、様々な協力をしていただいた研究室内外の皆様感謝いたします。

最後に5年間の長い間、精神的に支えてくれた家族に感謝します。

平成6年2月

後藤尚弘





# Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

# Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM: Kodak