

地球システムモデルで用いられる陸域モデル：研究の現状と課題

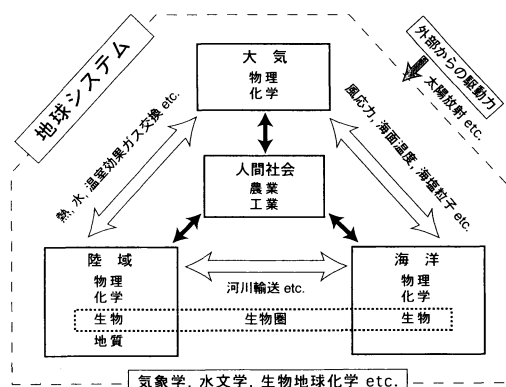
伊 藤 昭 彦^{*1}・市 井 和 仁^{*2}・田 中 克 典^{*3}・佐 藤 永^{*1}
江 守 正 多^{*4}・及 川 武 久^{*5}

1. はじめに：地球システムモデル

地球環境問題は、地球科学諸分野の発展を加速させただけでなく、それらの分野を横断して全体像を構築する研究の必要性を生じさせている。成層圏オゾンの減少や対流圏の温暖化といった代表的な地球環境問題は、それ自体は大気中の現象であるが、その制御には水圏、地圏、生物圏、そして人間社会といった様々な地球の構成要素が深く関与している。さらに気候の長期変動を解釈する場合には、積極的に地球全体の変動の一部として大気変動を位置づけなければならない。

地球を単なる独立した構成要素の集合ではなく、相互作用によって結ばれた1つの系として捉える「地球システム」という概念がある。この概念自体は特に新しいものではないが、一部の独創的な研究者（例えば J. Hutton や V. I. Vernadsky）の思惟対象¹⁾に過ぎない時期が長く続いた。しかし、近年の計算機技術の発展により複雑かつ大規模なシミュレーションが可能となり、地球システムの定量的モデル化が現実のものとなりつつある。すなわち、従来の気候モデルに含まれていた大気海洋、海洋と陸域の生態系・大気化学・氷床など、さらには人間活動までの構成要素モデルを相互に結合し(第1図)、地球のダイナミクスを仮想的に計算機内に創出しようという試みがある。しかし、大

気-海洋の結合大循環モデル(AOGCM)は20年以上前から開発されているが(McGuffie and Henderson-Sellers, 2001)、それ以外の構成要素が導入され始めたのはごく最近である。特に、簡単な物理法則では十分に記述できない生物圏の導入は手探り段階にあると言っても過言ではない。従来の気候モデルにも大気と陸面との間の運動量・熱・水交換を計算するスキームは使用されている。しかし、新しい地球システムモデルでは、炭素循環などの生物地球化学過程や植生遷移などの生態過程を含んだ陸域モデルが導入されることになる(Foley *et al.*, 2000)。そのため、世界の多くの気象学研究機関において、陸上で営まれる主要な過程をシミュレートする陸域生物圏モデルの開発が行われている。この世界的な潮流に、日本国内の研究は必ずしも先んじていたわけではなかったが、2002年度より開始された文部科学省の『人・自然・地球共生プロジェクト』では地球システムモデルの開発がテーマの



第1図 地球システムの概念図

^{*1} 地球フロンティア研究システム, 生態系変動予測研究領域.

^{*2} 名古屋大学, 大学院工学研究科.

^{*3} 地球フロンティア研究システム, 水循環予測研究領域.

^{*4} 地球フロンティア研究システム, モデル統合化研究領域.

^{*5} 筑波大学, 生物科学系.

—2003年10月28日受領—

—2004年2月16日受理—

¹⁾ 代表的な著作として J. Hutton には『Theory of the Earth (1795)』, V. I. Vernadsky には『The Biosphere (1926)』がある.

1つに掲げられ、それを受けて陸域生物圏モデルの開発が発端することになった。それは世界最速（2004年1月現在）のスーパーコンピュータである『地球シミュレータ』上に、精緻な地球システムモデルを構築する計画である。そこでは2007年に出版予定の第4次IPCCレポートに貢献できる成果が期待されている。

1990年から始まった地球圏-生物圏国際協同研究計画(IGBP)は、地球変動の統合的理解の推進という意味で象徴的なプロジェクトであろう。IGBPが開始されて10年以上が経過して学際的交流は以前に比べると進んだとはいえ、多くの気象研究者にとって陸域生態系を扱うモデルは馴染みの薄い存在と思われる。本稿の目的は、第1に、地球システムモデルにおいてなぜ炭素循環や植生動態を取り入れた陸域モデルが必要となるのかを説明することであり、第2に、この分野の現状と課題とを整理して気象研究者に報告することである。この試みにより共生プロジェクトだけでなく、大気-陸域の相互作用に関係するなるべく多くの研究に資することができれば幸いである。なお、本文中で用いた略語は末尾の一覧でまとめて説明することにした。

2. 陸域の諸過程

モデル研究の現状を述べる前に、陸域で進行する気候学的に重要な過程（陸面過程と呼ばれる）について概略を示しておこう。関連する教科書としてはJones (1992), Schlesinger (1997), Campbell and Norman (1998), Bonan (2002), Chapin *et al.* (2002) などがある。また、陸面過程研究における近年の展開は馬淵 (1999) などに紹介されているので参照されたい。ここでは便宜的に現象の時間スケールに応じて短期、中期、長期に分けて説明する。

短期的には(例えば数日以内)、境界層、植生キャノピー、地表面および雪面、地中および積雪中で行われる運動量・水・エネルギーの移動伝達などがその時間スケールを代表する過程である。それらは移流や拡散といった物理法則で記述されるとはいえ、地表面の不均質さのために必ずしも正確な計算は容易ではなく、様々な方法で近似計算が行われている（本来は複雑な現象を便宜的に簡単な近似式で扱うことをパラメタリゼーションと呼ぶ）。日射とその反射、大気と地表面との間の長波放射の収支によって、正味の放射エネルギー収支が決定される。その吸収されたエネルギーは、地中への伝導、植生や湛水への貯熱、大気への顕熱輸

送、蒸発散による潜熱輸送、そして割合としては僅かであるが光合成に使用される。そこでは時々刻々と変化する日射、温度、風速、降水などが物理過程に影響を与える一方、植生のバイオマス・葉面積指数（単位土地面積あたりの葉面積）や植生分布などの生物要因はほとんど時間的に一定とみなすことができる。ただし、気孔（植生の葉表面に散在するガス交換を行う微少な孔隙）の開度は数分以内の応答性を示すので、キャノピーにおける交換過程を正確にモデル化するには、気孔抵抗(またはその逆数である気孔コンダクタンス)の環境応答のパラメタリゼーションが必要となる。

中期的には(例えば数か月～数年)、短期的過程の影響が蓄積されて植生や土壌にも目に見える変化が生じ、それが逆に水熱収支などの短期的過程を変化させる要因となる。例えば、落葉樹林では夏季の生育期間と冬季(または乾季)の休眠期間とでは、葉面積指数が全く異なるため、そこでのアルベドや蒸散量が季節的に大幅に変化する。また、この時間スケールでは土壌水分や積雪量の変化も生じうるが、それらは場合によっては地域的・全球的なスケールの気候にも影響を与える可能性がある。地球環境変動に関して、中期的時間スケールで大きな課題となっているのが炭素循環である。陸域においては植生と土壌は重要な炭素プールであり、それらによる光合成・呼吸・分解はグローバル炭素循環においても主要な循環要素となっている。現に、大気中のCO₂とその安定炭素同位体組成の変動には、全球的な植生活動の季節変化や経年変化の影響が明瞭に認められる。すなわち、北半球の中高緯度では生育期間の開始とともに光合成と呼吸の収支が正味の吸収側に大きく傾くため、大気中CO₂濃度は相対的に低下する。さらに大気中CO₂濃度の長期増加トレンドに見られる経年変動についても、少なくとも部分的には、ENSOや火山噴火による気候的アノマリーに陸域炭素収支が応答した結果であることを示唆する研究がある。陸域生態系に貯留されている有機炭素の平均滞留時間は数十年であり、今世紀中の温暖化にほぼ対応した時間スケールで強い応答を示す可能性が高いと考えられる。

長期的には(例えば数十年～数百年)、炭素循環だけでなく、植生の地理的分布に有意な変化が発生する可能性がある。気候的に敏感な寒冷圏では、山岳氷河のような大規模な事象にも消長の変化が発生する。気候条件が変わると、生物の環境順応性・食物連鎖・競争関係のバランスが崩れ、既存の生物の死滅や、外部か

らの生物の侵入が起こるかもしれない。過去の気候変化、例えば最終氷期から現在までに、植生分布が大幅に変化してきたことは様々な古生物学的証拠から確認されている。また、植生型の地理的分布と温度・水分の環境との間の対応関係は古くから研究されており、その関係を用いることで温暖化した場合の植生移動の方向性についておおその見当を付けることはできる。しかし、今世紀に起こると予測されているような急速な気候変化に対して、植生帯の移動が追従できる可能性は低いとみられている。逆に、急速に進行するが予測困難な過程として、都市域の拡大、耕作地化、過放牧による砂漠化などの人間活動に関するものが挙げられる。とはいえ、ある場所に成立する植生の種類が変化すると（例えば裸地から草原へ、常緑林から落葉林へ、森林から耕作地へ）、そこでの水・熱および炭素の収支が大幅に変化することは間違いない。

以上に述べたものは、実際に陸域で進行している過程の一部でしかなく、その他の過程として、湿原でのメタン発生や森林での揮発性炭化水素放出、動物や微生物に関する諸過程、より長時間スケールで進む風化などの地質学的過程、など枚挙に暇がない。陸域の構成要素や過程の間に見られる相互作用は極めて複雑多様で、未知のものすら存在する可能性がある。これは単なる観測データの不足以上の不確実性を意味しており、大気・海洋と異なる陸域の難しさの一端を示している。重要なのは、対象とする時空間スケールに応じて最も重要な影響力をもつ過程の種類が変わる点である。一般に長期スケールあるいは広域スケールになるほど、そこで卓越する過程に関する情報が不足しており、予測の信頼性は低下してしまう。また、水・熱収支や炭素交換など多くの過程は決定論的過程として扱えるが、中には落雷による山火事の発生や風による植物の種子散布など、偶然に支配される確率的な過程も含まれている（ある程度広域には統計的な扱いができる）。

3. 陸域モデル研究の現状

陸域では非常に複雑多様な現象が起こっているため、取り扱う過程の取捨選択がモデル研究の方向性をほぼ決定することになる。つまり、同じ陸域生態系を対象としても気象学と生態学では注目する過程が違うため、全く異なるモデルが作成されてきた。逆に陸域の簡単な面として、大気海洋では3次元空間を扱うのに対して、陸域過程は地表面の2次元で考えればよい。

また水平方向の相互作用は鉛直方向の相互作用に比べて相対的に小さいと考えられるので、多くの場合は各格子点について大気-植生-土壌をつなぐ鉛直1次元な系として扱うことができる。ただし植生の空間的移動や陸水の水平移動を考える場合には、格子点間の相互作用を考える必要がある。

本節では、まず(1) 気候モデルで用いられる陸面パラメタリゼーション、(2) 炭素の生物地球化学的循環を扱うモデル、(3) 植生の動態と地理分布を扱うモデル、について、これまでの研究と現状を概括する。そして、地球システムモデルで使用される、(4) これら個別の陸域過程を統合して扱うモデル研究、について最近の動向を紹介する。誌面の都合で(1)~(3)の各モデルに関する詳細を紹介する事はできないので、個別の論文や詳しい解説（例えば Arora (2002)）を参考にされたい。

3.1 陸面パラメタリゼーションスキーム (LPS)

LPS は前節の短時間スケールの現象を再現することに主眼を置いたモデルである。ここではアルベド、正味放射、蒸発散(潜熱)、顕熱輸送、表面温度、流出、積雪・土壌水分などの変動、さらに最近では大気-植生間のCO₂交換も見積もられる。Sellers *et al.* (1997) によると、現在までに開発されたLPSは3世代に類型化されるという。第1世代にあたるのは1960年代に開発されたシンプルなパラメタリゼーションであるBucketモデル(Manabe, 1969)である。ここでは簡便さと引き替えに、植生は明示的に扱われておらず、土壌からの流出過程も非常に単純化されていた。第2世代にあたるSiB (Sellers *et al.*, 1986)やBATS (Dickinson *et al.*, 1993)は植生キャノピーを陽に表現しており、気孔抵抗による蒸散の制御や遮断蒸発が計算されるようになった。Garratt (1993)は第2世代LPSを導入することで、GCMによる気候場の再現結果が総じて向上したと述べている。しかし、この段階では実際のキャノピーで行われている光合成などの生物過程は取り入れられていなかった。第3世代のLPSの特色が、まさに炭素循環過程の導入であった。ここでは植物生理学的により精緻な気孔抵抗(葉の内部と外部との間のガス拡散に対する抵抗)のパラメタリゼーションが使用され、蒸散だけでなく光合成速度も同時に計算することができた。代表的なモデルには、SiBの改良版であるSiB2 (Sellers *et al.*, 1996)や米国NCARで開発されたLSM (Bonan, 1996)などがあ。国内で開発されたモデルに、Mabuchi *et al.* (1997)

のBAIM, Nagai (2002) のモデル, Takata *et al.* (2003) のMATSIRO などがある。第3世代LPSでは、光合成を行う反応経路が異なるC₃/C₄植物¹²を分けて扱い、それぞれについて生化学的な光合成-気孔モデルを適用している。そこでは、植物生理生態学者が少なからずモデル開発に寄与していた（例えばSellers *et al.* (1996) の共著者であるJ. A. BerryやC. B. Fieldは著名な植物生理生態学者である）。加えて、微気象学的過程の表現も改良されている点にも留意すべきだろう。例えばSiBからSiB2への発展の間に、キャノピー内の葉の垂直分布を考慮したクロージャーモデルを導入して、乱流による運動量輸送の計算に改善が図られている（Sellers *et al.*, 1989）。

現在までに提唱されたLPSは派生したものも含めて優に20以上を数え、気象学の1分野として独自の位置を確立していると言える。実際にPILPS（Henderson-Sellers *et al.*, 1993）といったLPS相互比較プログラムが盛んに行われている。多くのLPSは基本構造が類似しているとはいえ、モデルの詳細さや個別過程のパラメタリゼーションには差があるため、相互比較によって各モデルの特徴的な振る舞いが明らかになる。LPSの進化は、それを用いた気候モデルの再現性を高めただけでなく、植生変化が気候に与える影響に関する種々の感度実験を行う契機を与えた。例えば、熱帯多雨林の破壊（粗度・アルベド・気孔抵抗などの変化）が降水量や表面温度に地域的变化を発生させることがモデル実験から示唆されている（例えばShukla *et al.*, 1990）。一方、この分野の課題には、植被や積雪によるグリッド内の地表面不均質性のパラメタリゼーション手法や、凍土・積雪・融解など寒冷域での物理過程の改善、big-leaf¹³または多層モデルを用いたキャノピーモデルの改良、などがある。より本質的な問題として、LPSでは植生分布や土壌特性そのものの時間変化が予測されるわけではないので、中・長期的な将来予測で誤差が避けられない点が挙げられる。これは、以下に述べる生態系モデルと結合することで解決が図られようとしている。

3.2 生物地球化学（物質循環）モデル

この分野のモデルの主眼は、光合成と植物・微生物による呼吸量をそれぞれ計算して大気-陸域間のCO₂交換を求め、生態系に貯留されている炭素量の時間変化をシミュレートすることである（中期的時間スケールに対応）。そこでは、生態系の構造を物質やエネルギーのプールへ、機能をフローへと単純化するボックスモデル（コンパートメントモデル）が多用される。ボックスモデルを用いた物質とエネルギーの流れの解析は、群落（～m²）から流域スケール（～10² km²）において常套的に用いられてきた手法である。その全球スケールへの拡張は、おそらくドイツのG. Esserがオズナブリュック生物圏モデル（OBM）を用いて行ったシミュレーション（Esser, 1987）が最初であろう。このように生態学的モデルの全球実験が気象学に比べてかなり遅れたのは、研究の重要性にもかかわらず、国際生物学事業計画（1964-74）が行われるまで最低限必要なデータが入手できなかったのが一因である。OBMは植生による炭素固定や土壌有機物の分解を再現することができたが、その計算モデルは経験式を多用していた。その後、植物や微生物の生理生態学的な研究が進展するにつれ、よりプロセス指向のモデルが開発されることになった。例えば、米国ウッズホール生物研究所によるTEM（Raich *et al.*, 1991）や米国モンタナ大学のBIOME-BGC（Running and Hunt, 1993；White *et al.*, 2000）、同じくコロラド州立大学のCENTURY（Parton *et al.*, 1993）などが1980年代後半から1990年代前半にかけて開発され、現在まで改良が重ねられている。最近のモデルでは、米国オークリッジ研究所のGTEC（Post *et al.*, 1997）などがあり、日本では地球フロンティア研究システムでSim-CYCLE（Ito and Oikawa, 2000, 2002）が開発されている。

炭素循環モデルは、入力データを外部から与えて単体で動作させるのが一般的な使い方である。現在では、高分解能な衛星データを入力して陸域を精密にマッピングする診断的研究と、分解能はやや低い気象データのみで駆動できるモデルで感度実験などを行う予報的研究とに方向性が分かれつつある。このうち、予測を目的とする地球システムモデルとの相性が良いのは後者であるが、全球的な炭素循環の定量的精度を高めることで前者のモデルも間接的に貢献しうる。診断的研究の例には、高空間分解能で北アメリカの生産力を推定したHicke *et al.* (2002) の研究やモンスー

¹² 高等植物は光合成経路の違いによってC₃植物（主に樹木や双子葉草本）とC₄植物（主に単子葉草本）に分類される。一般にC₄植物は光合成能力がC₃植物より高く高温・乾燥への耐性が強いが低温に弱い。

¹³ 植生キャノピーを大きな1枚の葉に例えて個葉レベルのパラメタリゼーションを適用する近似モデル。

ンアジアの生産力を求めた Matsushita and Tamura (2002)の研究が挙げられる。予想的なモデル研究には、20世紀中の陸域炭素収支を気象データに基づいて時系列的に解析した McGuire *et al.* (2001) や、GCM による温暖化予測シナリオを入力した Cao and Woodward (1998) のものがある。このように陸域の炭素循環モデルを用いた研究が盛んなのは、1997年の京都議定書における森林吸収源問題に象徴されるように、自然科学としてだけではなく社会経済的な関心・需要の高まりも背景にあるだろう。

それにも関わらず、陸域の炭素循環には相当に大きな不確実性が残されており、モデル研究はまだ成熟段階に達していないように思われる。大気-生態系間のCO₂交換を求める場合、光合成や呼吸の速度を計算することになるが、その定式化には現在でも標準モデルが確立されていない。個葉レベルの光合成に関しては一種の生化学モデルが定番となりつつあるが、そのキャノピーへのスケールアップは任意の方法 (big-leaf 法や多層モデル法など) で行われている。以前行われた光合成生産力に関するモデル相互比較プログラム (Cramer *et al.*, 1999) には16種類のモデルが参加したが、それらから得られた全球合計量には、最大値と最小値の間で100%もの差が見られた。この例に見られるように、炭素循環モデル間には大きな差があると認識されている一方、この分野ではモデル相互比較はあまり活発に行われていないのが現状である (理由はよく分からない)。各モデルは個別過程のパラメタリゼーションだけでなく、ボックスモデルの構造自体に大きな差が見られる。土壤炭素を例に挙げると、TEM では全体を1種類で代表させているが、Sim-CYCLE では枯死物と腐植質に2種類に分割し、さらに CEN-TURY では分解の程度に応じて6種類に分割している。詳細なモデルほど生態系の複雑さ・不均質さを取り入れることができ、またチューニング可能なパラメータも増えるので、現実に対する再現性は高まると期待される。しかし、特に全球シミュレーションでは、各フローとボックスの性質を特徴づけるに足るデータを得ることは困難なため、詳細モデルが必ずしもより正確な推定値を与えるという保証はない。

現在までに、GCM による温暖化予測の結果で炭素循環モデルを駆動した研究は数多く行われてきたし、最近では炭素循環モデルを気候モデルの一部として on-line で結合した実験も行われている (Cox *et al.*, 2000; Friedlingstein *et al.*, 2001)。しかし、そこで推

定された陸域炭素循環の応答には量的な差だけでなく、正負の方向性の違いすら見られている。それは、大気に対するフィードバック効果 (正味の CO₂ シンクなら温暖化に対する負のフィードバック) が異なることを意味している。大気 CO₂ 濃度上昇による施肥効果と気候温暖化により、(顕著な降水量の減少が起きる場合を除いて) 植物の光合成生産量が増加する点はこのモデル実験でも共通している。一方、土壤炭素の応答には差が大きく、それが生態系全体のフィードバック効果をほぼ決定している (Jones *et al.*, 2003)。その理由は、微生物による土壤有機物の分解速度は温度変化に対する感度が高く、気候変化シナリオの違いによって応答の規模が大きく異なるためである。また、その応答感度を規定するパラメータには、生物的要因を含む不確実性が残されている。従って、植物の根から土壤への炭素供給や土壤有機炭素の分解に関するより多くの実験的研究を行わないと、モデルによる炭素収支の精度を向上させることは不可能という強い意見がある。この問題は、以下に述べる植生分布の問題と同じく、数十年以上の時間スケールで特に重要な意味を持つと考えられる。

3.3 生物地理 (植生分布) モデル

植生の地理的分布の変化を推定するモデルは、数百年といった長時間スケールの研究で使用される。ここで扱う植生は、植物の種や個体を単位とすると余にも煩瑣になるので、同じような景観を構成する植物をグループ化したり (生態学という相観またはバイオーム)、類似の生態系機能をもつ植物をグループ化したりする (機能型)。前者の例には、熱帯多雨林や亜寒帯林、草原などがあり、後者の例には、常緑広葉樹、落葉針葉樹、C₃ または C₄ 草本などがある。

気候条件と植生分布とを関係づける生物地理学的モデルは、実は最も古い歴史を持っている。ケッペンの気候区分スキーム (Köppen, 1918) に代表されるように、植生の相観と気候条件との間の密な関係を定式化する試みはいくつかあったが、それは気候条件が長期的に一定であることを仮定していた。気候変化が植生分布に与える影響、特に温暖化の影響の重要性がはつきりと認識されたのは1985年のことである。Emanuel *et al.* (1985) は GCM による大気 CO₂ 濃度倍増時の気候シナリオをホルドリッジ植生区分スキーム (Holdridge, 1947) に適用し、現在のものと比較することで温暖化の影響を評価した。そこでは、大気 CO₂ 濃度の上昇が植生に与える施肥効果は考慮されていなかった

が、気候変動の影響だけで亜寒帯林の明らかな北進や草原の拡大などが大規模に発生する可能性が示唆された。この研究が与えた衝撃は大きく、以後、より高度なモデルの開発を促進する発端となった。1990年代半ばまでに開発された代表的なモデルに、MAPSS (Neilson, 1995) や BIOME (Prentice *et al.*, 1992; Haxeltine and Prentice, 1996) がある。それでも、このようなモデルは依然として長期平均的な気候データを使用していたため、植生帯の移動に要する時間遅れ（タイムラグ）を考慮できないという限界があった。そこで1990年代半ばより、植物の繁殖・死亡や競争関係をパラメタライズした動的植生モデルの開発が始まった。そこでモデルの基礎となったのは、それまで植物生態学で使用されていた個体ベースモデルや個体群動態モデルである。基本的には、バイオマス・個体数・個体サイズの分布における時間変化を、競争や繁殖を考慮しつつ微分方程式で表したモデルと考えてよい。しかし、それらは専ら生物同士の相互作用に注目していたため、環境変動の影響評価はどちらかと言えば不得手であった。それでも様々な改良の末、動的モデルはすでに全球に拡張され、動的全球植生モデル (DGVM) という分野を確立しつつある (Cramer *et al.*, 2001)。代表的モデルに、米国ウィスコンシン大学の IBIS (Foley *et al.*, 1996; Kucharick *et al.*, 2000)、ドイツのマックス・プランク研究所などの LPJ (Sitch *et al.*, 2003)、同じくドイツのポツダム気候影響研究所の VECODE (Brovkin *et al.*, 2002)、英国シェフィールド大学の SDGVM (Woodward *et al.*, 1995)、英国ハドレーセンターの TRIFFID (Cox *et al.*, 2000) などがある。

植生ダイナミクスの一般的モデルが確立していないことはこの分野の根本的な問題である。DGVM は、専ら将来の温暖化予測のために開発されているが（古気候に適用された例もある）、植生分布の再現性の検証は、前出の LPS や炭素循環モデルにも増して困難である。古気候・古生態データで見る限り植生分布の変動は数百年以上の時間スケールで進行するため、モデル検証を行う材料に乏しい。多くの場合、現時点での自然植生の分布をどの程度正しく再現できるかに基づいてモデルの妥当性が主張されている。しかし、数十年以上にわたる漸移についても、同様に妥当な推定が可能かどうかを判断することは現時点ではできない。そこで、火災などでダメージ（攪乱）を受けた生態系が再び元の状態に戻るまでの観察データを用いて、地点

レベルで長期的な植生変化（遷移）についてモデルによる再現性をみるといった代替的検証法 (Sitch *et al.*, 2003) が提案されている。

3.4 統合的陸域モデル

地球システムモデルが目指すのは、短期的な天気予報ではなく、少なくとも数十年にわたる気候変動の予測である。そこで用いられる陸域モデルは、LPS 的要素に加えて、中長時間スケールに対応した現象、すなわち炭素循環や植生動態を計算しつつ、大気との相互作用を再現しなくてはならない。実際に、地球システムモデルを開発している多くの研究機関では、その一環として陸域モデルの研究も行われている（第1表）。統合的な陸域モデルが開発され始めたのは1995年頃であるが、それ以降の代表的なモデルについて以下に簡単に説明する。

アメリカのウィスコンシン大学で開発された IBIS (前出) は、気候モデル GENESIS (Pollard and Thompson, 1995) で使用されている LPS (LSX) をベースとしているが、炭素循環や植生動態モデルを取り入れたモデルとして先駆的な役割を果たした。この IBIS を用いて現在および更新世ヒブシサーマル期の気候条件を入力する実験が行われたが、最近では NCAR-CCM3 と結合した相互作用実験も行われている (Delire *et al.*, 2003)。

英国ハドレーセンターは GCM による気候予測研究では最先端に行く研究機関として著名であるが、自前の LPS である MOSES と植生動態モデル TRIFFID をリンクした陸域モデルの研究を行っている。Cox *et al.* (2000) はこのモデルを用いて、温暖化は陸域からの呼吸放出を（光合成による吸収以上に）促進し、温暖化への正のフィードバックを発生させる可能性を示した。これが正しいとすると、京都議定書で定められている森林の吸収源効果について根本的な見直しが必要になるかもしれないため、陸域炭素収支に関する研究が益々重視されることになった。

米国 NCAR は代表的な地球システムモデルであるコミュニティ気候システムモデル (CCSM) を開発しているが、陸域については既存の LPS (BATS, LSM, IAP94) に炭素循環や植生動態を加えた改良モデル CLM を平行して開発している (Bonan *et al.*, 2002)。このモデルは相対的に LPS の高度化に重点を置いているようで、植生動態などは他所で開発されたモデル (LPJ) を導入するに止めている。CCSM および CLM モデルはソースコードが公開されているためユーザが

第1表 気候モデルの構成要素として使用される（炭素循環過程などを含む）陸域モデル.

研究機関（国名）[統合モデル名]	陸域モデル	AOGCM
地球フロンティアなど（日） [KISS-ME]	陸面過程 (MATSIRO), 炭素循環 (Sim-CYCLE), 植生動態 (個体ベースモデル) を結合	CCSR/NIES/ FRSGC
気象研究所（日）	陸面過程 (JMA-SiB), 炭素循環 (Friedlingsteinモデル)	MRI
気象研究所（日）	陸面過程モデル (BAIM)	(MRI)
ハドレーセンター（英）[HadCEM]	陸面過程 (MOSES), 植生動態 (TRIFFID)	HadCM3
シェフィールド大学（英）	植生動態モデル (SDGVM)	UGAMP
マックスプランク研究所など（独）	大気-陸面交換 (BETHY), 植生動態 (LPJ), 流出 (VIC) を結合	ECHAM5
ポツダム気候影響研究所（独） [CLIMBER]	植生動態モデル (VECODE)	統計的-動的モ デル
ラプラス研究所（仏）	炭素循環+植生分布 (SLAVE)	IPSL
ビクトリア大学（カナダ） [UVic-ESCM]	陸面過程 (Matthews et al., 2003), 植生動態 (TRIFFID)	大気:放射収支 海洋:GCM
大気研究センターなど（米）[CCSM]	統合モデル (CLM) (陸面過程モデルBATS, LSM, IAP94が基礎)	CCM3
ウィスコンシン大学（米）	統合モデル (IBIS) (GENESIS陸面過程モデルLSXが基礎)	CCM3
プリンストン大学（米）	植生動態モデル (LM3)	GFDL-AM2
オークリッジ国立研究所（米）	炭素循環モデル (GTEC)	(CCM3)

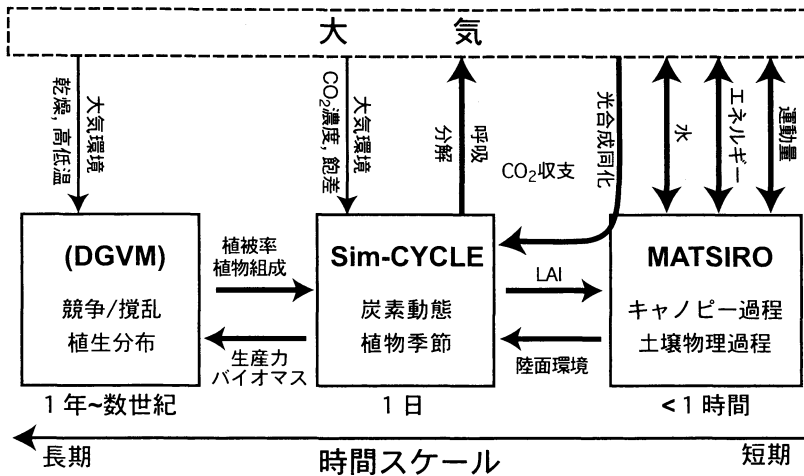
多い（開発効率も良いかもしれない）。また、米国プリンストン大学でも、GFDLのAOGCMと炭素循環・植生動態を含む陸域モデル (LM3) を結合した統合的モデル (OALIM) の開発が進められている (Shevliakova *et al.*, 2003)。

カナダのヴィクトリア大学では、大気の2次元放射収支モデル、海洋大循環モデル、Matthews *et al.* (2003) のLPS、そして植生動態モデル TRIFFID を結合した地球システムモデル (UVic-ESCM) を開発している。Meissner *et al.* (2003) はこのモデルを用いて、氷期-間氷期の気候変動における植生変化のフィードバック効果を見積もった。

フランスではラプラス研究所 (IPSL) がこの分野を主導しており、実績のある炭素循環モデル SLAVE (Friedlingstein *et al.*, 1994) とAOGCMとを統合したモデルによる研究が実施されている。例えば Berthelot *et al.* (2002) は1860～2100年のGCM出力を用いて陸域炭素収支の変動をシミュレートした。一方、ドイツマックス-プランク研究所における大循環モデル ECHAM を用いた研究では、LPSと炭素循環は BETHY (Knorr and Heimann, 2001), 植生動態は LPJ (前出), 水文学的流出は VIC (Liang *et al.*, 1994) と、個別過程のモデルをリンクしたスキームを用いている。

日本でも、冒頭に述べたように文科省共生プロジェクトを契機とした開発研究が行われている。地球フロンティア研究システムでは、LPSとしてMATSIRO (前出), 炭素循環に Sim-CYCLE (前出) を使用し、さらに植生動態には SORTIE モデル (Pacala *et al.*, 1993) を参考にした個体ベースモデル (生態系の空間構造を陽に扱うモデル) を開発しようとしている。また、気象研究所では、LPSであるJMA-SiBに、Friedlingstein *et al.* (1994) および Goudriann (1992) の炭素循環スキームを加えたモデルを使用している。小畑ら (2003) はそこで再現されたCO₂収支の季節変動などについて報告した。

陸域の包括的なモデルをゼロから開発するのは非常に時間と労力を要する仕事なので、既存の過程モデルを改良・調節し、お互いにリンクさせるのが一般的なかつ効率的な開発方法である。このようなリンクを行う場合は、いくつかの技術的問題を解決する必要がある。地球フロンティア研究システムで開発中の陸域モデル (第2図) を例として、この点を具体的に説明しよう。ここで使用されるMATSIRO, Sim-CYCLE, 個体ベースモデル (DGVM) は独立して開発されたものなので、出発段階では計算時間ステップ、植生タイプの定義、変数の定義と単位 (およびコード中での変数名) などは全く共通していない。例えばMATSIROは



第2図 地球システムモデルで用いられる陸域モデルの構造。共生第2課題で開発中のモデルの例（本文参照）。実際にはモデル間のデータ交換はカプラーを介して行われる。

GCMと同じ15分程度の時間ステップを持つのに対し、Sim-CYCLEは1日、個体ベースモデルに至っては1か月/1年の刻み幅で計算が行われる。また、MATSIROとSim-CYCLEはそれぞれ独自に水収支を計算するなど、重複部分も見られる。そのため、モデルを直接融合するのではなく、適当なカプラーを介してモデル間のデータ交換を行うことになる。また、基本的に短い時間ステップでの計算を優先的にを行い、その結果を日平均あるいは年平均して長い時間ステップを持つモデルに渡すことにする。時間積分を長期間続けるうちに、葉面積指数や植生分布が変化することが中長期スケールのモデル（この場合はDGVMやSim-CYCLE）から予報されると、その情報が短時間ステップモデル（同MATSIRO）に伝達される。そして、その変化した生態系特性に基づいて、炭素収支や水熱収支が計算される。そうすることで、中長期的な生態系変動による気候的フィードバックを地球システムモデルで評価することを可能としている。

今後、統合型の陸域モデルを使用した気候研究は、さらに盛んになると予想される。米国のオークリッジ研究所で開発されているGTECや、同じく米国の植生分布モデルMAPSSと物質循環モデルを結合したMC1モデルなども、近いうちに地球システムモデルのコンポーネントとして使用される可能性がある。このような状況を踏まえ、リーダー的存在である英国のP. M. Coxらによって陸域と海洋の炭素循環を組み込んでいる地球システムモデル間の相互比較実験（C4

MIP）が提唱されたのは、自然の成り行きと言える。そして近い将来には、温暖化予測研究において炭素循環や植生動態を組み込んだモデルが標準的に使用されるようになるかもしれない。

4. おわりに：今後の課題

陸域モデルを地球システムモデルに導入する意義は、炭素収支や植生動態を介した中長期的時間スケールで表出するフィードバックを評価する点にある。いくつかの先駆的な研究（例えばCox *et al.*, 2000）がその潜在的な重要性を示したことで、硫酸塩エアロゾルの放射強制などと同様に、今後の温暖化予測は陸域ダイナミクスを導入したモデルを使用するのが主流になる可能性が高い。しかし、炭素循環・植生動態モデルを導入することは「精度」の向上につながるのか、という疑問は残されている。

現在、地球システムモデルには3種類のアプローチがある。第1は、シンプルな放射収支と炭素循環スキームで構成されたゼロ次元モデルによる解析である（Wigley, 1998；Ichii *et al.*, 2003；Kheshgi and Jain, 2003）。第2は、高分解能GCMをコアにして生態系、氷床、大気化学などのコンポーネントを追加した、システムの複雑さを可能な限り反映させた仮想地球の研究である。共生プロジェクトで採用している方針はこれにあたる。第3は、上記の対照的な両者の中間に当たるやり方で、低分解能のGCMに厳選したコンポーネントを加えた、中程度の複雑さを持つモデル

(EMIC ; Claussen *et al.*, 2002) の利用である。モデル研究では「素朴 (シンプル) なモデルと複雑なモデルのどちらが良いか?」という問題がよく議論になる。素朴なモデルは必然的に多くの過程を捨象することになるが、上手く本質的な部分を取り出すことができれば、軽快で生産効率の高いモデル研究を行うことができる。逆に複雑なモデルは、多くの過程を導入する分だけ現実になくなるので再現性の高さ (そして説得力の強さ) が期待されるが、開発や実行にかかる手間と時間は相当なものになる。そこでは手間と精度のトレードオフで判断することになるが、それは陸域モデルの開発と適用にも当てはまることである。

理想的には、陸域過程の全容を把握した個人が全体のバランスを勘案しつつ統合的モデルを構築するのが望ましい。しかし、余りに複雑な陸域過程の全てを網羅することは不可能に近いので、前述のように、統合的な陸域モデルを開発する近道として、既存の過程モデルをリンクして使用されている。この場合、気象研究者と生態系研究者との密接な共同作業が不可欠なのは明らかである。特に、国際的競争の中で高いレベルを目指すほど、各分野のエキスパートの参加が重要になってくる。地球シミュレータというハード面でのアドバンテージを活かせるかどうかは、モデル開発というソフト面での努力に委ねられている。

略語一覧

AM : Atmospheric Model
 AOGCM : coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model (大気海洋結合大循環モデル)
 BAIM : Biosphere-Atmosphere Interaction Model
 BATS : Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
 BETHY : Biosphere Energy Transfer HYdrology scheme
 BIOME-BGC : BIOME BioGeoChemistry model
 C4MIP : Coupled Carbon Cycle Climate Model Inter-comparison Project
 CCM : Community Climate Model
 CCSM : Community Climate System Model
 CCSR : Center of Climate System Research (東京大学気候システム研究センター)
 CENTURY : CENTURY model
 CLM : Community Land Model
 CLIMBER : CLIMate BiosphER model
 DGVM : Dynamic Global Vegetation Model (動的全球植生モデル)
 ECHAM : GCM based on ECMWF forecast models,

modified and extended in HAMBURG
 EMIC : Earth-system Model with Intermediate Complexity
 ENSO : El Niño and Southern Oscillation (エルニーニョおよび南方振動)
 FRSGC : Frontier Research System for Global Change (地球フロンティア研究システム)
 GCM : General Circulation Model (大循環モデル)
 GENESIS : GENESIS model
 GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
 GTEC : Global Terrestrial Ecosystem Carbon model
 HadCEM : Hadley centre Coupled Eddy-permitting Model
 HadCM : Hadley centre Climate Model
 IAP94 : Institute of Atmospheric Physics '94 model
 IBIS : Integrated Biosphere Simulator
 IGBP : International Geosphere-Biosphere Program (地球圏-生物圏国際協同研究計画)
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル)
 IPSL : Institut Pierre Simon Laplace
 JMA-SiB : Japan Meteorological Agency-Simple Biosphere model
 KISS-ME : Kyousei Integrated earth SyStem Model on the Earth simulator
 LM : Land Model
 LPJ : Lund-Potsdam-Jena model
 LPS : Landsurface Parameterization Scheme
 LSM : Land Surface Model
 LSX : Land-Surface-transfer scheme
 MAPSS : Mapped Atmosphere-Plant-Soil System model
 MATSIRO : Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff
 MC1 : Mapped Atmosphere-Plant-Soil System (MAPSS) and Century model
 MOSES : Meteorological Office Surface Exchange Scheme
 MRI : Meteorological Research Institute (気象研究所)
 NCAR : National Center for Atmospheric Researches (米国国立大気研究センター)
 NIES : National Institute of Environmental Studies (国立環境研究所)
 OALIM : Ocean-Atmosphere-Land-(sea) Ice Model
 OBM : Osnabrück Biosphere Model (オズナブリュック生物圏モデル)
 ORNL : Oak Ridge National Laboratory (米国オークリッジ国立研究所)
 PILPS : Project for Intercomparison of Landsurface

Parameterization Schemes

SDGVM : Sheffield Dynamic Global Vegetation Model

SiB : Simple Biosphere model

Sim-CYCLE : Simulation model of Carbon cYCLE in Land Ecosystems

SLAVE : Scheme for Large scale Atmosphere Vegetation Exchange

SORTIE : SORTIE model

TEM : Terrestrial Ecosystem Model

TRIFFID : Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics

UGAMP : Universities Global Atmospheric Modeling Group

USDA : United States Department of Agriculture (アメリカ合衆国農務省)

UVic-ESCM : University of Victoria Earth System Climate Model

VECODE : VEgetation CONTinuous DEscription model

VIC : Variable Infiltration Capacity model

謝 辞

本稿の準備にあたっては文部科学省の人・自然・地球共生プロジェクト第2課題「地球環境変化予測のための地球システム統合モデルの開発（代表：松野太郎）」関係者各位より多くの示唆を受けました。特に地球フロンティアの河宮未知生研究員には多くの有益なコメントをいただきました。

参 考 文 献

- Arora, V. K., 2002 : Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models, *Rev. Geophys.*, **40**, 1006, doi 10. 1029/2001RG000103.
- Berthelot, M., P. Friedlingstein, P. Ciais, P. Monfray, J. L. Dufresne, H. Le Treut and L. Fairhead, 2002 : Global response of the terrestrial biosphere to CO₂ and climate change using a coupled climate-carbon cycle model, *Global Biogeochem. Cycles*, **16**, 1084, doi : 10. 1029/2001GB001827.
- Bonan, G., 2002 : *Ecological Climatology : Concepts and Applications*, Cambridge Univ. Press, 678 pp.
- Bonan, G. B., 1996 : A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies : technical description and user's guide, NCAR, TN-417+STR.
- Bonan, G. B., K. W. Oleson, M. Vertenstein, S. Levis, X. Zeng, Y. Dai, R. E. Dickinson and Z.-L. Yang, 2002 : The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR Community Climate Model, *J. Climate*, **15**, 3123-3149.
- Brovkin, V., J. Bendtsen, M. Claussen, A. Ganopolski, C. Kubatzki, V. Petoukhov and A. Andreev, 2002 : Carbon cycle, vegetation, and climate dynamics in the Holocene : Experiments with the CLIMBER-2 model, *Global Biogeochem. Cycles*, **16**, 1139, doi : 10. 1029/2001GB001662.
- Campbell, G. S. and J. M. Norman, 1998 : *Introduction to Biophysics*, 2nd edition, Springer-Verlag, 286 pp. (「生物環境物理学の基礎第2版」久米篤, 熊谷朝臣, 大槻恭一, 小川滋訳, 森北出版)
- Cao, M. and F. I. Woodward, 1998 : Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change, *Nature*, **393**, 249-252.
- Chapin, F. S. III, P. A. Matson and H. A. Mooney, 2002 : *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, Cambridge Univ. Press, 436 pp.
- Claussen, M., L. A. Mysak, A. J. Weaver, M. Crucifix, T. Fichefet, M. -F. Loutre, S. L. Weber, J. Alcamo, V. A. Alexeev, A. Berger, R. Calov, A. Ganopolski, H. Goosse, G. Lohmann, F. Lunkeit, I. I. Mokhov, V. Petoukhov, P. Stone and Z. Wang, 2002 : Earth system models of intermediate complexity : closing the gap in the spectrum of climate system models, *Clim. Dynm.*, **18**, 579-586.
- Cox, P. M., R. A. Betts, G. D. Jones, S. A. Spall and I. J. Totterdell, 2000 : Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature*, **408**, 184-187.
- Cramer, W., D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. I. Moore, G. Churkina, B. Nemry, A. Ruimy, A. L. Schloss and Potsdam NPP Model Intercomparison Participants, 1999 : Comparing global NPP models of terrestrial net primary productivity (NPP) : Overview and key results, *Global Change Biol.*, **5** (Suppl. 1), 1-15.
- Cramer, W., A. Bondeau, F. I. Woodward, I. C. Prentice, R. A. Betts, V. Brovkin, P. M. Cox, V. Fisher, Foley, J. A., A. D. Friend, C. Kucharik, M. R. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White and C. Young-Molling, 2001 : Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change : Results from six dynamic global vegetation models, *Global Change Biol.*, **7**, 357-373.

- Delire, C., J. A. Foley and S. Thompson, 2003 : Evaluating the carbon cycle of a coupled atmosphere-biosphere model, *Global Biogeochem. Cycles*, **17**, 1012, doi : 10. 1029/2002GB001870.
- Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers and P. J. Kennedy, 1993 : Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled with the NCAR Community Climate Model, NCAR, Technical Note TN383+STR, 72 pp.
- Emanuel, W. R., H. H. Shugart and M. P. Stevenson, 1985 : Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes, *Clim. Change*, **7**, 29-43.
- Esser, G., 1987 : Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts, *Tellus*, **39B**, 245-260.
- Foley, J. A., I. C. Prentice, N. Ramankutty, S. Levis, D. Pollard, S. Sitch and A. Haxeltine, 1996 : An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics, *Global Biogeochem. Cycles*, **10**, 603-628.
- Foley, J. A., S. Levis, M. H. Costa, W. Cramer and D. Pollard, 2000 : Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models, *Ecol. Appl.*, **10**, 1620-1632.
- Friedlingstein, P., J.-F. Muller and G. P. Brasseur, 1994 : Sensitivity of the terrestrial biosphere to climatic changes : impact on the carbon cycle, *Environ. Pollut.*, **83**, 143-147.
- Friedlingstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, H. Letreut, P. Monfray and J. Orr, 2001 : Positive feedback between future climate change and the carbon cycle, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1543-1546.
- Garratt, J. R., 1993 : Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments-a review, *J. Climate*, **6**, 419-449.
- Goudriaan, J., 1992 : Biosphere structure, carbon sequestering potential and the atmospheric ^{14}C carbon record, *J. Exp. Bot.*, **43**, 1111-1119.
- Haxeltine, A. and I. C. Prentice, 1996 : BIOME3 : an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among functional types, *Global Biogeochem. Cycles*, **10**, 693-709.
- Henderson-Sellers, A., Z.-L. Yang and R. E. Dickinson, 1993 : The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **74**, 1335-1349.
- Hicke, J. A., G. P. Asner, J. T. Randerson, C. Tucker, S. Los, R. Birdsey, J. C. Jenkins and C. Field, 2002 : Trend in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982-1998, *Global Biogeochem. Cycles*, **16**, doi : 10. 1029/2001GL013578.
- Holdridge, L. R., 1947 : Determination of world plant formations from simple climatic data, *Science*, **105**, 367-368.
- Ichii, K., Y. Matsui, K. Murakami, T. Mukai, Y. Yamaguchi and K. Ogawa, 2003 : A simple global carbon and energy coupled cycle model for global warming simulation : sensitivity to the light saturation effect, *Tellus*, **55B**, 676-691.
- Ito, A., and T. Oikawa, 2000 : The large carbon emission from terrestrial ecosystems in 1998 : a model simulation, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **78**, 103-110.
- Ito, A. and T. Oikawa, 2002 : A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE) : A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation, *Ecol. Model.*, **151**, 147-179.
- Jones, C. D., P. Cox and C. Huntingford, 2003 : Uncertainty in climate-carbon-cycle projections associated with the sensitivity of soil respiration to temperature, *Tellus*, **55B**, 642-648.
- Jones, H. G., 1992 : Plants and Microclimate, Cambridge University Press, 428 pp.
- Kheshgi, H. S., and A. K. Jain, 2003 : Projecting future climate change : Implications of carbon cycle model intercomparisons, *Global Biogeochem. Cycles*, **17**, 1047, doi 10. 1029/2001GB001842.
- Knorr, W. and M. Heimann, 2001 : Uncertainties in global terrestrial biosphere modeling 1. A comprehensive sensitivity analysis with a new photosynthesis and energy balance scheme, *Global Biogeochem. Cycles*, **15**, 207-225.
- Köppen, W., 1918 : Klassifikation der klimate nach temperatur, niederschlag, und jahreslauf, *Petermann's Mitteilungen*, **64**, 193-203.
- Kucharick, C. J., J. A. Foley, C. Delire, V. A. Fisher, M. T. Coe, J. D. Lenters, C. Young-Molling, N. Ramankutty, J. M. Norman and S. T. Gower, 2000 : Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model : water balance, carbon balance, and vegetation structure, *Global Biogeochem. Cycles*, **14**, 795-825.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood and S. J. Burges, 1994 : A simple hydrologically based model

- of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, **99**, 14415-14428.
- 馬淵和雄(編), 1999: 陸面過程の研究の現状と将来, 気象研究ノート, (195), 79pp.
- Mabuchi, K., Y. Sato, H. Kida, N. Saigusa and T. Oikawa, 1997: A biosphere-atmosphere interaction model (BAIM) and its primary verification using grassland data, *Papers Meteorol. Geophys.*, **47**, 115-140.
- Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation I. the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface, *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 739-774.
- Matsushita, B. and M. Tamura, 2002: Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia, *Remote Sens. Environ.*, **81**, 58-66.
- Matthews, H. D., A. J. Weaver, M. Eby and K. J. Meissner, 2003: Radiative forcing of climate by historical land cover change, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1055, doi 10. 1029/2002GL016098
- McGuffie, K. and A. Henderson-Sellers, 2001: Forty years of numerical climate modeling, *Int. J. Climatol.*, **21**, 1067-1109.
- McGuire, A. D., S. Sitch, J. S. Clein, R. Dargaville, G. Esser, J. Foley, M. Heimann, F. Joos, J. Kaplan, D. W. Kicklighter, R. A. Meier, J. M. Melillo, B. I. Moore, L. J. Williams and U. Wittenberg, 2001: Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analysis of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models, *Global Biogeochem. Cycles*, **15**, 183-206.
- Meissner, K. J., A. J. Weaver, H. D. Matthews and P. M. Cox, 2003: The role of land surface dynamics in glacial inception: A study with the UVic Earth System Model, *Clim. Dynm.*, **21**, 515-537.
- Nagai, H., 2002: Validation and sensitivity of a new atmosphere-soil-vegetation model, *J. Appl. Meteor.*, **41**, 160-176.
- Neilson, R. P., 1995: A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance, *Ecol. Appl.*, **5**, 362-385.
- 小畑 淳, 行本誠史, 千葉 長, 佐藤康雄, 2003: 気候-炭素循環結合モデルの開発, 日本気象学会2003年春季大会予稿集, P447.
- Pacala, S. W., C. D. Canham and J. A. J. Silander, 1993: Forest models defined by field measurements: I. The design of a northern forest simulator, *Can. J. For. Res.*, **23**, 1980-1988.
- Parton, W. J., J. M. O. Scurlock, D. S. Ojima, T. G. Gilmanov, R. J. Scholes, D. S. Schimel, T. Kirchner, J.-C. Menaut, T. Seastedt, E. G. Moya, A. Kamalrut and J. I. Kinyamario, 1993: Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide, *Global Biogeochem. Cycles*, **7**, 785-809.
- Pollard, D. and S. L. Thompson, 1995: Use of a land-surface-transfer scheme (LSX) in a global climate model: The response to doubling stomatal resistance, *Global Planet. Change*, **10**, 129-161.
- Post, W. M., A. W. King and S. D. Wullschlegel, 1997: Historical variations in terrestrial biospheric carbon storage, *Global Biogeochem. Cycles*, **11**, 99-109.
- Prentice, I. C., W. Cramer, S. P. Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud and M. Solomon, 1992: A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate, *J. Biogeogr.*, **19**, 117-134.
- Raich, J. W., E. B. Rastetter, J. M. Melillo, D. W. Kicklighter, A. L. Grace, B. Moore III and C. J. Vörösmarty, 1991: Potential net primary productivity in South America: Application of a global model, *Ecol. Appl.*, **1**, 399-429.
- Running, S. W. and E. R. J. Hunt, 1993: Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models, in *Scaling Physiological Processes* (eds. J. R. Ehleringer, and C. B. Field), Academic Press, 141-158.
- Schlesinger, W. H., 1997: *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*, Academic Press, 588 pp.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atom. Sci.*, **43**, 505-531.
- Sellers, P. J., W. J. Shuttleworth, J. L. Dorman, A. Dalcher and J. M. Roberts, 1989: Calibrating the simple biosphere model (SiB) for Amazonian tropical forest using field and remote sensing data. Part I, Average calibration with field data, *J. Appl. Meteor.*, **28**, 727-759.
- Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo and L. Bounoua, 1996: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. part I: Model formulation, *J. Climate*, **9**, 676-705.
- Sellers, P. J., R. E. Dickinson, D. A. Randall, A. K.

- Betts, F. G. Hall, J. A. Berry, G. J. Collatz, A. S. Denning, H. A. Mooney, C. A. Nobre, N. Sato, C. B. Field and A. Henderson-Sellers, 1997 : Modelling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere, *Science*, **275**, 502-509.
- Shevliakova, E., S. W. Pacala, S. Malyshev, G. C. Hurtt and J. P. Caspersen, 2003 : Carbon cycle and vegetation dynamics in the GFDL-Princeton coupled atmosphere-biosphere model, *EOS Trans., AGU*, **84**, Fall Meet. Suppl., Abstract B52E-04.
- Shukla, J., C. Nobre and P. Sellers, 1990 : Amazon deforestation and climate change, *Science*, **247**, 1322-1325.
- Sitch, S., B. Smith, I. C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J. O. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, M. T. Sykes, K. Thonicke and S. Venevsky, 2003 : Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, *Global Change Biol.*, **9**, 161-185.
- Takata, K., S. Emori and T. Watanabe, 2003 : Development of the minimal advanced of the surface interaction and runoff, *Global Planet. Change*, **39**, 209-222.
- White, M. A., P. E. Thornton, S. W. Running and R. Nemani, 2000 : Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model : Net primary production controls, *Earth Interactions*, **4**, 1-85.
- Wigley, T. M. L., 1998 : The Kyoto Protocol : CO₂, CH₄, and climate implications, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2285-2288.
- Woodward, F. I., T. M. Smith and W. R. Emanuel, 1995 : A global land primary productivity and phytogeography model, *Global Biogeochem. Cycles*, **9**, 471-490.

Land Process Models Used in Earth-System Models : State-of-the-Art.

Akihiko ITO^{*1} • Kazuhito ICHII^{*2} • Katsunori TANAKA^{*3} • Hisashi SATO^{*4}
 • Seita EMORI^{*5} and Takehisa OIKAWA^{*6}

^{*1} (Corresponding author) *Ecosystem Change Research Program, Frontier Research System for Global Change, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan.*

^{*2} *Graduate School of Engineering, Nagoya University.*

^{*3} *Hydrological Cycle Research Program, Frontier Research System for Global Change.*

^{*4} *Ecosystem Change Research Program, Frontier Research System for Global Change.*

^{*5} *Integrated Modeling Research Program, Frontier Research System for Global Change.*

^{*6} *Institute of Biological Sciences, University of Tsukuba.*

(Received 28 October 2003 ; Accepted 16 February 2004)
