

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

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター

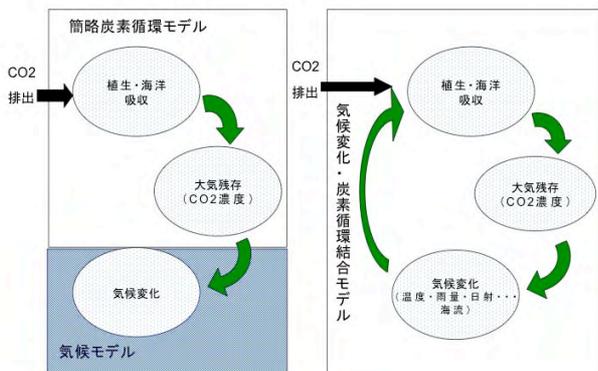
松野 太郎

1. プロジェクトの目的と必要性

地球環境フロンティア研究センター（FRCGC）では、東大気候システム研究センター（CCSR）、国立環境研究所（NIES）および幾つかの大学の研究者との協力により、地球（環境）システムの統合モデルを開発中である。これは、文部科学省の人・自然・地球共生プロジェクト・日本モデルミッションの一つ、課題2として、2002～2006年度の5年計画で行っているものである。

このプロジェクトの目的は、地球温暖化とそれに伴う気候変化・植生（生態系）変化のように地球環境を形づくる諸要素が相互に影響を与えながら全体として変化していく状況の一つのモデルで総合的にシミュレートすること、そのための地球（環境）システムの統合モデルを開発することである。また、その途中の段階として大気・海洋・陸域にわたる全球炭素循環プロセスを気候モデルに導入し、CO₂濃度と気候変化との相互作用を取り入れた地球温暖化実験を行うことも目的の一つである。

これまでは、CO₂放出の将来シナリオをもとに簡易炭素循環モデルを用いて陸域生態系・海洋によるCO₂吸収を評価し、その結果の大気CO₂濃度の将来シナリオを気候モデルに与えて温暖化・気候変化の予測シミュレーションを行ってきた。しかし、温暖化・気候変化は陸域生態系（植生と土壌）によるCO₂収支に大きな影響を与え、それが地域的に異なる効果を持つが、簡略化モデルではそのようなフィードバックを正しく表現することはできない（図1）。



これまでの温暖化予測 地球環境システム統合モデル

図1：これまでの温暖化予測実験と統合モデルによる予測実験の対比

海洋によるCO₂吸収に関しても同様の問題があり、さらに対流圏O₃やCH₄のような他の温室効果ガスの大気中濃度分布も気温や循環によって左右される。このため、地球温暖化予測においてこのような「統合モデル」の必要性が近年強く認識されるようになってきた。最近行われた炭素循環への気候変化の影響を取り入れた予備の実験では、温暖化によって土壌有機物の分解が促進されCO₂濃度が相当高くなる（大きな正のフィードバック）という結果と、傾向は同じだが量的には少ないという別の結果が得られている（Cox et al. 2000, Friedlingstein et al. 2001）。そこで我々は独自のモデルによってこの問題に取り組んで行く。

2. モデルの構成と開発戦略

地球環境フロンティア研究センターは「地球変動（グローバルチェンジ）予測の実現に向けて」設立されたものである。統合モデルの開発は、そのミッションであると言ってもよい。実際、センターには気候の変動から水循環、大気組成、生態系それぞれの変動の予測を目指したプログラムが置かれ、それぞれの変動プロセスの研究とサブシステム・モデルづくりが行われている。したがって統合モデル開発の戦略として既存のモデルを結合して相互作用を取り入れるというのがもっとも自然な道である。

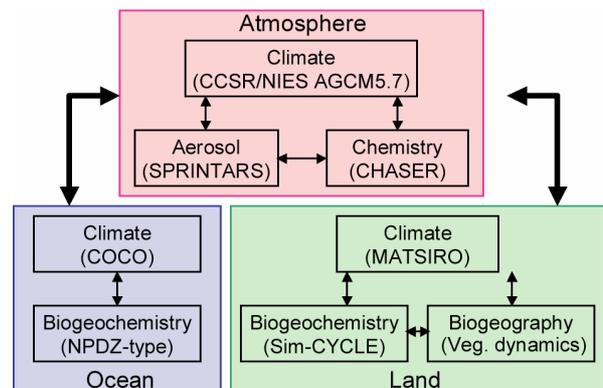


図2：地球環境フロンティア研究センターで開発中の地球環境システム統合モデルの構成。統合モデル全体は、Kyousei Integrated Synergetic System Model of the Earth (KISSME) と呼ぶ。

こうして作り上げる統合モデルの全体構造を図 2 に示す。大気・海洋・陸面の物理過程を結合した気候モデルとして既存の CCSR/NIES モデルの中解像度版（大気 T42、海洋 1°）を用いる。これの高解像度版は共生プロ課題 1 の温暖化実験に用いられている。この物理気候モデルをもとに、下記のように生物地球化学過程、生態過程のサブシステム・モデルを組み込んで行く。

- ・ 陸域炭素循環：Sim CYCLE (Ito and Oikawa, 2002)
- ・ 海洋生物地球化学過程：NPZD 型モデル (Oschlies and Garçon, 1999) に無機炭酸を加えたモデルを新たに開発
- ・ 動的全球植生モデル：個体ベースの新しい型のモデルを開発
- ・ 大気化学：CHASER (Sudo et al. 2002)

具体的手順としては気候モデルに Sim CYCLE と海洋生物地球化学過程を組み込み、炭素循環・気候変化結合モデルを作る。一方、CHASER と気候モデルを結合し大気化学・気候結合モデルを作る。Sim CYCLE では植生タイプの地理分布は固定されており、気候や CO₂ 濃度変化に応じた植生・土壌の炭素吸収・放出の変化は表現するが、気候変化によって生じる植生タイプの変化は扱われない。100 年以上の長期にわたる変化では、植生タイプの変化はそれ自体として、また炭素循環への影響として重要なので、別途新しく開発し、その後 Sim CYCLE と融合する。

この他に将来の温暖化によって南極・グリーンランドの氷床が変化する状況をシミュレートするため、氷床の変動（水収支、流動、基盤岩の応答）を扱うモデル ICIES (Saito and Abe-Ouchi, 2003) も結合し、長期にわたるシミュレーションを実施する。

3. 開発の現状とこれまでの成果

3. 1. 全地球炭素循環・気候結合モデル

陸域炭素循環モデル Sim CYCLE と新しい海洋生物地球化学プロセスモデルの CCSR/NIES 大気・海洋・陸面モデルへの組み込みが最近終了し、予備的実験を始めている。IPCC 第 4 次報告書に向けた計画、「炭素循環・気候変化モデル相互比較プロジェクト (C4MIP)」で決められた手順に従い、1900 年を初期状態として 2000 年までの 20 世紀再現実験を行い、それに引き続いて人為的 CO₂ 放出のシナリオに従って将来予測を行う。なお、CO₂ 濃度変化には過去に

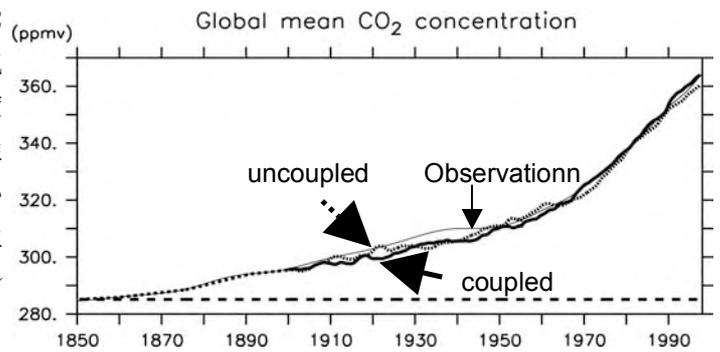


図 3：全球炭素循環・気候結合モデルに 1900 年からの人為的 CO₂ 放出源を与えてシミュレーションした大気 CO₂ 濃度の変化

おいても土地利用変化（森林の耕地化など）が重要なので Sim CYCLE を改造しそれも取り入れている。図 3～5 に 20 世紀再現実験の最近の結果を示してある。図 3 の大気中 CO₂ 濃度の変化は実際におこった変化をよく再現している。計算では気候変化との結合を取り入れた場合（実線）と取り入れなかった場合（点線）の両方を行ったが、20 世紀中は未だ気候変化が僅かなので両者の差は小さい。地表近くの大気 CO₂ 濃度の季節変化（図 4）も北半球森林の吸収・放出をほぼ正しく反映しているようだし、海面を通しての年平均フラックスも観測とまずまずの一致を示している（図 5）。これまでの CO₂ 増加に伴い

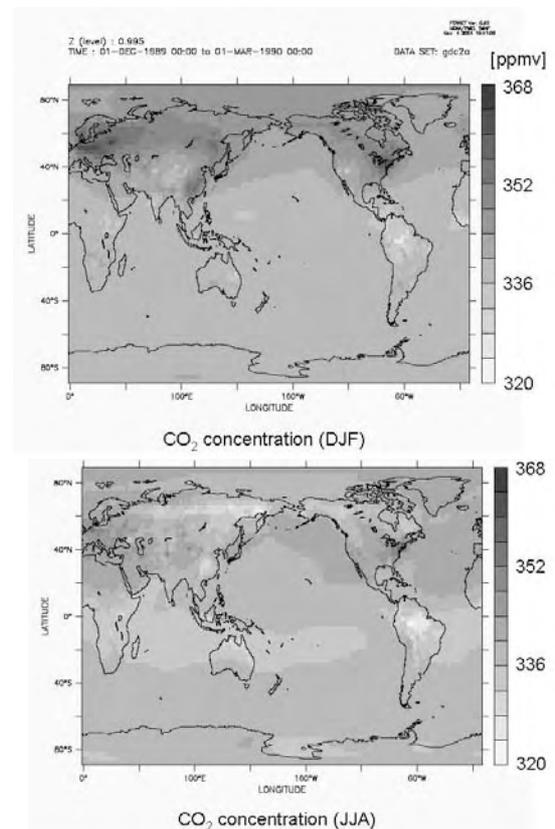


図 4：モデルで得られた 12, 1, 2 月（上）と 6, 7, 8 月（下）の地表近くの大気 CO₂ 濃度の全球分布

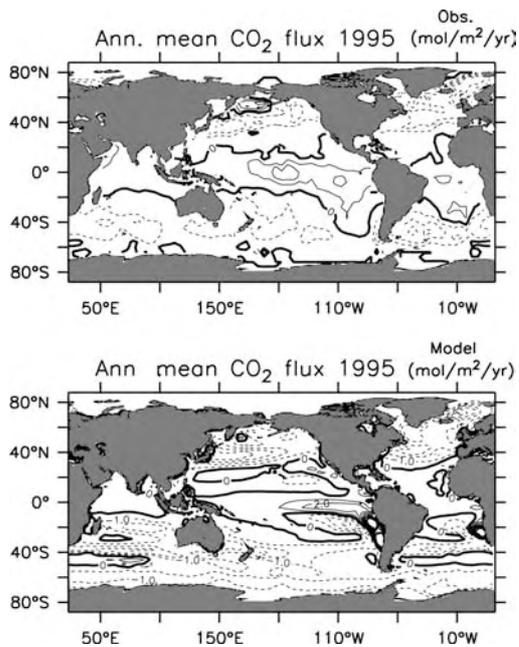


図5: 大気-海洋間CO₂フラックスの分布。観測(上)とモデル(下)の比較

海水へ溶け込んだ過剰炭素の海洋内分布も観測からの推定と比べ分布・量ともかなり良い結果となっている。しかしごく最近得られた結果で、陸域・海洋ともまだ問題点が少なくなく、改善の必要がある。

3. 2. 新しい動的全球植生モデルの開発

植生分布は気候を主とした環境条件によって決まっており、従って地球温暖化が進行すると例えば寒帯林から温帯林へと植生タイプが変化する可能性がある。温暖化問題が社会的に注目されるようになった初期には、来るべき気候変化はそのスピードが自然の気候変化に比べ余りに速いので、植生変化が追いつけず生態系が崩壊するおそれがある、などと言われたこともある。そのように極端なことはなくても、この問題は温暖化の影響で一つのキーポイントであることに変わりはない。このような目的のために、全地球の植生変動をモデルで推定しようという試みは、1990年代から始められたが、肝心の変化のスピードを決める上で任意性のある仮定を置かざるを得ないのが実情である。そこで、今回のプロジェクトでは、地球シミュレータという大きな計算機資源を活用して、環境変化に対する植生の応答を個々の樹木のライフサイクルを追うことでシミュレートする「個体ベースモデル」を開発することにした。具体的には各グリッド・ボックス毎に、10個(以内)程度の30m x 30m(約0.1ha)の代表領

域を置き、それぞれの森林の中の樹木の生長を周囲との関係から決まる日射を計算して追跡し、また樹木の定着・枯死も既存の知識に基づき個々に決定する。このような個体ベースの動的植生モデルは、1ha程度の森林を対象として幾つかの植生タイプについて研究され、実際と比較・検証されている。環境条件の変化に応じる植生タイプ間の競争は基本的に個体間の競争として行われるのだから、この新しいモデルは競争の結果としての森林全体の植生タイプ変化のスピードをより正しく表現し得ると考えられる。図6にこのような個体ベースモデルで得られた100年間の森林の変化の一例を示す。また、それに伴う植生タイプごとの葉面積指数(LAI)と植物体および土壌の炭素保有量の変化の例(北海道と熊本)を図7に示す。

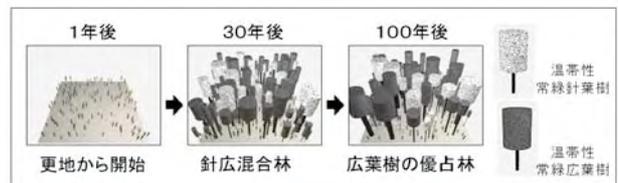


図6: 新しく開発した動的植生モデルによる森林変遷のシミュレーション

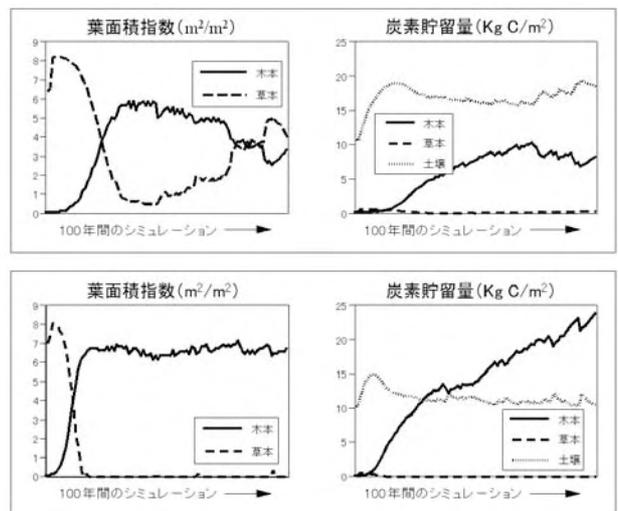


図7: 新動的植生モデルを北海道(上)と九州(下)の気候条件下で100年間走らせた時の葉面積指数と生態系各部の炭素貯留量の変化。寒冷気候では土壌炭素が植物体の炭素より大きい、温暖気候では逆になっている。また、北方林は成長が遅いので、偶然ギャップ(部分的空地)が生まれると下草が広がる様子がシミュレートされている。

3. 3. 大気化学・気候変化結合モデル

日本で独自に開発された対流圏を主対象とした大気化学モデル CHASER (Sudo et al. 2002) は既に対流圏オゾンやメタンの全球分布と季節変化に応用され、現実をよく再現することが確かめられている。また、1997/98年に起こったエルニーニョに伴う気候の変化(気温・水蒸気・循環の変化)によってもたらされた熱帯太平洋域での O_3 の変化の再現にも成功している。従って、これを気候モデル(CCSR/NIESモデル)と結合すれば気候変化のフィードバックを取り入れた CO_2 以外の温室効果ガスやエアロゾルの将来予測が可能となる。現在は、予備実験としてシナリオに基づく将来の温暖化・気候変化のモデル計算の結果を気候条件として与え、CHASERでその効果を含めた大気組成の将来予測(オフライン計算)を行っている。その例を図8と図9に示す。

大気化学モデルは計算量が多いので、現在計算上の問題も検討している。また CHASER はもともと対流圏化学モデルだったので、成層圏・中間圏への拡張を目指し、オゾン層破壊で重要なハロゲン系化学種と反応を加え、さらに成層圏・中間圏の循環場(物理過程)の改良も行っている。これによってオゾン層破壊(および回復)と気候変化との相互作用や CO_2 による中層大気冷却を介しての成層圏オゾンの変化や気候変化も統一的に扱えるようになるであろう。さらに太陽活動の11年周期に伴う大きな紫外線変動(5%くらい)が成層圏温度を変え、それが対流圏の気候に及ぼす影響も評価できるようになる。

4. 今後の計画

2002年度後半から開始したプロジェクトであるが、今のところほぼ予定通りに進行している。2005年の早い時期までに炭素循環・気候変化結合モデルに CO_2 放出シナリオを与えた21世紀末までの温暖化実験を終了し IPCC 第4次報告に取り入れられるようにしたい。

その先は、共生プロジェクトの期間である2006年度末までに統合モデルの第一版を完成させる計画である。

5. 成果文献

プロジェクト開始(最初の研究者着任)後やっと2年なので、このプロジェクト固有の成果で学術誌に掲載された論文はまだ無い。プロジェクト参加者

による関連したテーマ、あるいは統合モデルの基礎となる研究論文は多数あるが省略する。

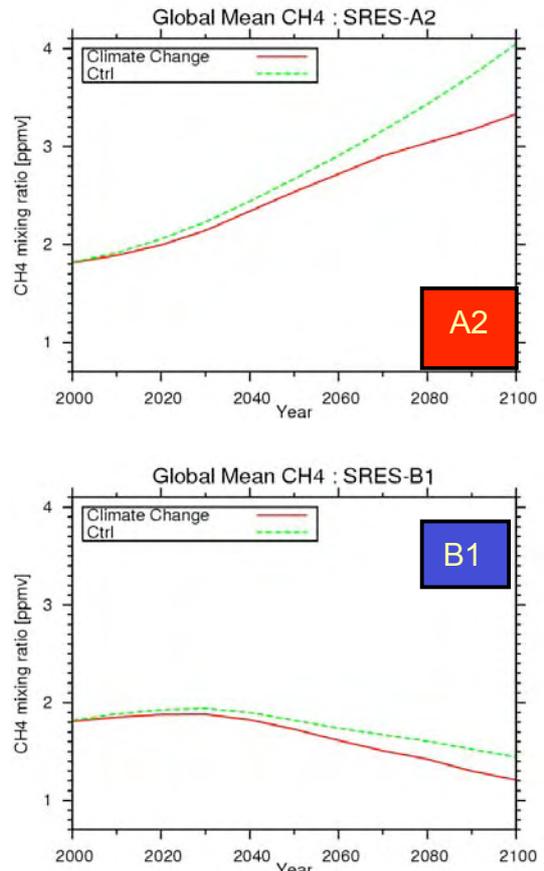


図8: SRES シナリオ A2, B1 による 21 世紀のメタン濃度変化(点線)と、同じシナリオにもとづきモデルで予測された気候変化を取り入れて計算した場合の変化(実線)

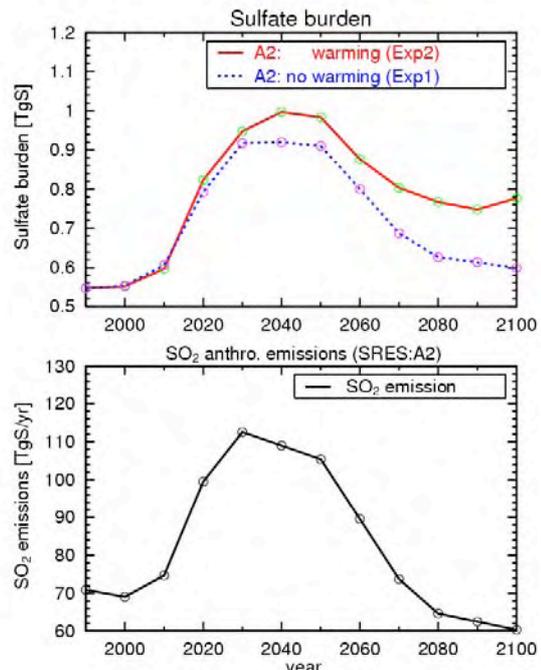


図9: SRES A2 シナリオによる SO_2 放出(下図)をもとに大気中の化学・物理的プロセスで生じる硫酸エアロゾル濃度のモデルによる計算(上図)現状気候で固定した場合(点線)と温暖化による変化を取り入れた場合(実線)の比較