

地球システムモデリング*

河 宮 未知生**

1. はじめに

人間活動による環境改変の影響が、地球規模でも顕在化しつつある。地球温暖化はその端的な例であるが、他にも人為起源二酸化炭素による海洋の酸性化、工業的に固定された窒素が引き起こす地球規模窒素循環の攪乱など、問題は気候変化のみにとどまらない。これらの問題は相互に関係しており、そしてどの1つをとっても、解決のためには気象・海洋学や地球化学、生物学、さらに人文・社会系の諸科学など、多岐にわたる知識を動員して取り組まねばならない。こうした状況に呼応して、大気や海洋、陸面、生物圏、そして社会が構成する地球環境を、これら構成要素の相互作用の場としての「システム」と認識する「地球システム科学」の必要性が叫ばれて久しい。

地球表層環境をシステムとして見る考え方の提唱者としては、1920年代に生物圏の概念を確立したロシアのウラジミール・ヴェルナツキーや、1970年代に地球環境の維持に生物圏が能動的役割を果たすとするガイア仮説を発表し論争を起こしたジェームズ・ラブロック（英）とリン・マーギュリス（米）などを挙げることができる。これらの業績を礎としながら、地球システム科学という術語を明示的に用い、その今日的な意味の輪郭を初めて明確にしたのは、1988年に米国航空宇宙局（NASA）諮問会議から提出された報告書¹⁾であろう。この報告書では地球システム科学の目標を「地球システムの構成要素および要素間の相互作用がどのように発展してきたか、どのように機能しているか、またあらゆる時間スケールについて将来どのよう

に発展していくか、を記述して、地球システム全体についての科学的理解を得ること（筆者訳）」と規定し、目標達成のための道具立てとして、全球規模観測や、観測データおよび研究成果を効率的に配布するための情報ネットワーク、モデリングの重要性を指摘している。インターネットの普及が一部の研究機関内にとどまっており、また大気や海洋の大循環モデルに生物・化学過程を導入する試みがほとんど行われていなかった時代に、情報ネットワークやモデルによる将来予測の有用性を強調しているという点など、高い先見性に驚かされる。

2. 地球システム科学で用いられるモデル群

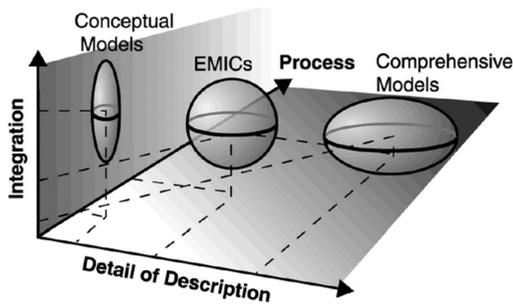
2.1 概念モデル

上記報告書が指摘している通り、地球システムの動態解析にはモデルが有力な道具となる。これまで様々なモデルが開発・利用されてきているが、それらはその複雑さや統合の度合いにより、第1図のように分類することができる。この分類の中で複雑さの度合いの最も低い「概念モデル」は、少数の方程式から成るものの、それらの表す過程の相互作用により複雑な振舞を示すタイプのモデルを指す。気象学の教科書にしばしば登場する、地球の放射平衡温度を計算するモデル（例えば、小倉²⁾）が中でも最も単純な例といえるだろう。また Budyko³⁾や Sellers⁴⁾が、雪氷圏と大気圏の相互作用により全球気候に多重平衡があることを示すのに用いたモデルなども、このタイプに属する。この種のモデルは取り扱いが簡単ながら示唆に富む結果を与え、地球システムにおいて機能する相互作用やフィードバックの概念的把握には非常に有益である。ただし扱う過程の抽象化の度合いが高いため、方程式中の各項が自然界のどの過程に対応するのか具体的にははっきりしない場合が多く、それ故パラメータの正確

* Earth system modeling.

** Michio KAWAMIYA, 地球環境フロンティア研究センター. kawamiya@jamstec.go.jp

© 2007 日本気象学会



第1図 地球システムモデルの分類。地球システムの研究には、単純な概念モデルから大循環モデル (GCM) をベースとしたものまで、様々なモデルが用いられる。それらのモデルは、プロセスの取り扱いの具体性や統合の度合いにしたがって、大きく3種類に分けることができる。

な値を見積もることも困難である。そのため、どちらかと言えば教育目的や理論体系構築のための手助けとして用いられることが多く、将来予測に用いられることは少ない。

2.2 EMICs

これに対し、温暖化やエルニーニョなどの予測に用いられてきたのが大気や海洋の大循環モデル (GCM) である。大循環モデルを土台とした地球システムモデル開発については後述するが、この種のモデルの欠点は計算量が多く、計算資源の面で制約が大きいことである。そこで、概念モデルと GCM それぞれの欠点を補うよう、EMICs (Earth system Models of Intermediate Complexity) と呼ばれるモデルが最近盛んに開発されている⁵⁾。これは、大気、海洋の運動方程式や放射過程の取り扱いを大幅に簡略化しつつ、気温や深層循環といった基本的な気候変数の地理分布は出力されるよう工夫したモデル群のことで、大型計算機を用いなくとも長期間の積分が可能である。ポツダム気候影響研究所 (ドイツ) で開発された CLIMBER-2⁶⁾ などがよく知られており、日本では名古屋大学で開発が進められている^{7,8)}。Petoukhov *et al.*⁹⁾ は各国研究機関で開発されている 8 つの EMICs の結果を集めて検討を行い、現在気候における気温や降水量といった基本的な変数の再現性が GCM に比べて決して劣らないこと、CO₂ 漸増に対する反応も GCM のそれと大きく変わらないことを示した。

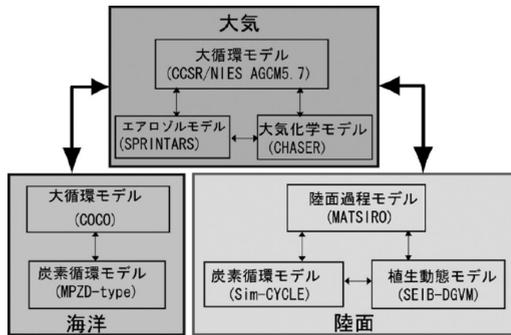
計算資源面での効率の良さという特長から、EMICs は数千年スケールの時間積分が必要となる古

気候の問題に適用されることも多い。例えば Clausen *et al.*¹⁰⁾ は CLIMBER-2 を用い、北米の氷床量と北大西洋への淡水フラックスを変動させて、モデル内でハイインリッチ・イベントを強制的に発生させる実験を行った。この強制力によって引き起こされた温度変化は、北半球ほぼ全域と南半球の一部まで広がることが示され、地質学的なデータに矛盾しない結果となった。また Brovkin *et al.*¹¹⁾ は CLIMBER-2 に海陸の炭素循環過程を組み込み、完新世初期から中期における植生変化と大気中二酸化炭素濃度上昇を再現することに成功した。彼らの研究のように EMICs に植生動態や炭素循環の過程を組み込む開発もさかんに進められており、後で詳しく述べる「気候-炭素循環結合モデル相互比較プロジェクト (C⁴MIP)」には 7 つの GCM とともに 4 つの EMICs が参加している¹²⁾。

2.3 大循環モデル

EMICs は有効に用いれば強力な研究の道具となり、比較的長いタイムスケールにおける将来予測に利用されることもある¹³⁾。しかし、概念モデルについて指摘した、扱う過程の抽象化に起因する問題は軽減こそされるものの依然として残ることになる。地球環境の将来予測やプロセス研究は、計算資源が許す範囲で EMICs と GCM ベースの地球システムモデルとを相補的に併用しながら行うことが望ましい。

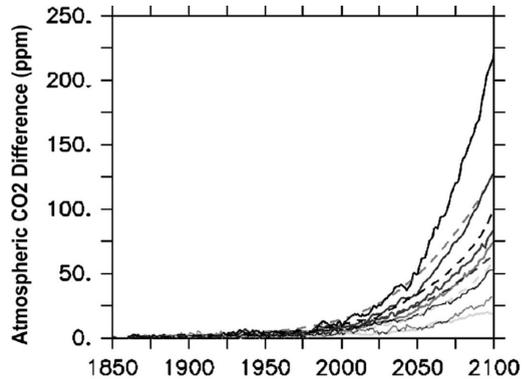
GCM に植生動態モデル (砂漠や森林といった植生タイプを予報) や炭素循環モデル (植生タイプは固定し、炭素のやり取りを予報) などを導入することにより、より精緻化した地球システムモデルを開発する試みが、各国の研究機関で続けられている。日本では、気象研究所が固有の GCM をベースに開発に取り組んでいるし、また海洋研究開発機構の地球環境フロンティア研究センター (FRCGC) も、国立環境研究所および東京大学気候システム研究センターの協力のもと開発を進めている^{14,15)}。FRCGC では地球環境変動に関わる自然科学の分野を網羅する形で 6 つのプログラムに分かれ、それぞれの分野に特化したモデルを開発してきた。こうした既存のモデルを、大気海洋 GCM を基盤として結合し、構成要素となるモデル間の相互作用を取り入れていくというのが地球システムモデル開発の方針である。FRCGC 等が開発している地球システムモデルの構造を第 2 図に示す。ハドレーセンターや NCAR など、海外の主要な研究機関でも同様のモデル開発に取り組んでいるが、それらの基本的な構造は第 2 図と大きく違わない。



第2図 海洋研究開発機構が国立環境研究所，東大気候システム研究センターの協力のもと開発している地球システムモデルの構造。()内はモデルの名称。

FRCGCがモデル開発にあたり基本とした設定は，大気部分の水平解像度がT42(約 2.8°)で鉛直方向に高度約20 kmまで20層，海洋部分の水平解像度 $0.5^\circ - 1.4^\circ$ で鉛直方向には海底まで44層，というものである。これに加え，大気部分のモデル上端を約80 kmまで拡張し，成層圏に特有な物理・化学過程を導入する作業も進行中である。このような努力により，成層圏準二年振動の再現や，オゾン，一酸化炭素などの化学物質の分布再現にある程度成功している。2006年8月現在，第2図に示した地球システムモデルの構成要素のうち「植生動態モデル」を除くすべての要素はコード上では既に結合されており，現実的なシミュレーションを行うための，パラメータ調整やコード最適化に取り組んでいる段階である。

本モデルにおける大気化学コンポーネントや植生動態コンポーネントの開発状況についてはKawamiya *et al.*¹⁴⁾や河宮¹⁵⁾，およびその引用文献に譲り，ここでは炭素循環過程を大気海洋結合GCMに組み込んだモデルで行った，気候-炭素循環系のフィードバックを調べる実験結果について述べる。それによると，将来の温暖化が炭素循環過程に与える影響を考慮した場合，しない場合に比べ2100年時点でのCO₂濃度が130 ppmほど高く予測されることがわかった¹⁴⁾。これは，温度上昇にともない微生物による土壌有機物の分解が盛んになりCO₂放出が増大すること，また海水温上昇により人為起源のCO₂が海洋に吸収されにくくなることによる。130 ppmのCO₂濃度増加は約 1°C の温度上昇に対応する。すなわち，温暖化が炭素循環過程に影響を与えることによってCO₂濃度が上昇し，



第3図 気候-炭素循環結合モデル相互比較プロジェクト(C⁴MIP)参加11モデルにおける，気候-炭素循環系のフィードバックの強さ。各々のモデルで，気候変化と炭素循環との間の相互作用を考慮する設定としない設定で2100年までの温暖化実験を行い，2実験間でのCO₂濃度の差を時系列として表している。正の値は相互作用を考慮したときにCO₂濃度が高くなることを示す。

さらなる温度上昇につながるわけで，気候-炭素循環系には有意な正のフィードバックが存在すると言える。

海外の研究機関ではさらに大きな正のフィードバックの可能性も示唆されている¹⁶⁾。今後，モデル間でのこうした結果の違いを検討することで，地球規模の炭素循環過程の理解が深まるものと期待される。実際，そのような比較検討を促進するための国際プロジェクトとして，前出のC⁴MIPが進行中である。参加している10グループ11モデルを用いて気候-炭素循環系のフィードバック強度を調べた結果を第3図に示す。モデルにより強度に差はあるものの，いずれの結果も正のフィードバックを示していることが分かる。CO₂濃度の将来予測の際には，このようなフィードバックの存在も念頭に置く必要がある。ここで示したようなC⁴MIPでの議論は，2007年に発行が予定されている「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」第4次報告書に反映される可能性が高い。日本からはFRCGCがC⁴MIPに参加しており，国際貢献への重要な足がかりとして積極的な関与を行っている。

C⁴MIPを含む国際舞台では，IPCC第5次報告書(AR5)へ向けたモデル実験計画作成が既に始まっている。AR5では炭素循環過程を取り入れた地球システムタイプのモデルが標準的になると期待されてい

る。実験結果が、排出シナリオ作成を担当する社会学者と自然科学者とが共通認識のもと意見交換する土台となるよう、実験計画作りが進められている。

3. おわりに

以上、簡単にはあるが地球システム科学をとりまく現状について、主にモデリングの活動を通して述べてきた。冒頭で述べたように、地球環境の要素間相互作用および全体としての振舞を対象とするという、地球システム科学の概念の提唱自体は以前からなされている。しかし、その必要性の認識はここ10年ほどの間に高まってきたにすぎず、読者のなかには未だにその輪郭を掴みかねている向きも多いと思われる。実際、工学分野における「システム論」が制御工学の数学的基盤を与える一分野としての立場を明瞭に確立しているのに対し、地球科学分野における「地球システム科学」の立場は模糊としたものでしかない。他の新しい科学分野の多くが、研究対象や手法を定義し限定化することによってその姿を明確にしてきたのに対し、地球システム科学は対象の拡大や既存体系の統合を目指している点が、その概要把握を難しくしている一因であろう。

筆者としては、地球システム科学を分野としてよりはむしろ、物の見方や考え方、立場といったものに冠せられた名称だと捉えている。このような解釈の方が多くの人々にとって納得がいくと思う反面、とすれば地球システム科学を「専門」とするという立場がありうるのかという疑問が頭をもたげる。しかし、地球温暖化など地球環境問題への対応が、地球科学全体が総力を挙げて取り組むべき課題として認識された現在、細分化した地球科学の諸専門分野という縦糸を織り上げる横糸が不可欠であることは論を待たない。気象・海洋学、地球化学、生態学などの関連分野を俯瞰しそれらの間の共通言語を創造そして維持する営みは、研

究者が専門として取り組むに値する。ますます奥行きを深める諸専門分野と、今後拡がりを増すだろう地球システム科学との相補的發展に、本稿で記したモデリングが資するところは大きい。

参考文献

- 1) NASA Advisory Council, 1988 : Earth System Science : A Closer View, Report of the Earth System Sciences Committee, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C., 208pp.
- 2) 小倉義光, 1984 : 一般気象学, 東京大学出版会, 314 pp.
- 3) Budyko, M. I., 1969 : *Tellus*, **21**, 611-619.
- 4) Sellers, W. D., 1969 : *J. Appl. Meteor.*, **8**, 392-400.
- 5) Claussen M. *et al.*, 2002 : *Climate Dyn.*, **18**, 579-586.
- 6) Petoukhov, V. *et al.*, 2000 : *Climate Dyn.*, **16**, 1-17.
- 7) Ichii, K., *et al.*, 2003 : *Tellus*, **55B**, 676-691.
- 8) 村上和隆, 山口 靖, 2006 : 名古屋大学21世紀 COE プログラム「太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学」平成17年度報告書6-11節.
- 9) Petoukhov, V. *et al.*, 2005 : *Climate Dyn.*, **25**, 363-385.
- 10) Claussen, M. *et al.*, 2003 : *Climate. Dyn.*, **21**, 361-370.
- 11) Brovkin, V. *et al.*, 2002 : *Global Biogeochem. Cycles*, **16** (4), doi : 10.1029/2001GB001662.
- 12) Friedlingstein, P. *et al.*, 2006 : *J. Climate.*, **19**, 3337-3353.
- 13) Knutti, R. *et al.*, 2005 ; *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20707, doi : 10.1029/2005GL023294.
- 14) Kawamiya, M. *et al.*, 2005 : *J. Earth Simulator*, **4**, 18-30.
- 15) 河宮未知生, 2006 : 生物・化学過程を取り入れた気候モデルの開発, 小池勲夫編「地球温暖化はどこまで解明されたか」4.5節, 丸善株式会社, 128-136.
- 16) Cox, P. M. *et al.*, 2000 : *Nature*, **424**, 754-757.