

306:4011 (地球システム; 相互作用;  
気候モデル; 気候予測)

## 1. 地球システム相互作用のモデリング

G. P. ブラッサー\*

### 1. 数値予報の発展

20世紀を通じて、我々大気科学の分野は知的興味をそそられる幾つかの科学的挑戦に向き合ってきた。このうち最も重要な挑戦としてまず初めに採り上げたいのは、17世紀にニュートンが著した物理の基本法則に基づく正確な気象予報の開発で、その始まりは100年以上前にも遡る。大気物理学が進歩し、7つの基礎方程式を解くことで天気予報が(原理的に)可能な段階にまで到達したのだと、ノルウェーの気象学者V. ビャークネスが主張したのは20世紀初頭のことだった。第1次大戦中、L. F. リチャードソンは、これらの方程式を数値計算で解くことで西ヨーロッパの天気を予報することを初めて試みた(Richardson 1922)。当時はこれらの計算を全て人間の手で行わなくてはならなかったため、8時間先の予報に6週間もの時間を費やしたのだった。しかし、この試みは失敗に終わった。その原因は、初期値の著しい不正確さに加え、より重要な問題として数値積分上の制約条件が破られたことであった。

数学者J. フォン・ノイマンと気象学者J. チャーニーによる最初の数値天気予報の成功は、世界初の電子計算機の完成を待たねばならなかった。1950年に行なわれたこの予報実験において、彼らは北米領域を約700 km 間隔の格子点270個で覆い、プリンストン高等研究所の計算機(ENIAC)を用いた。完璧からは程遠いものの、その予報結果は希望を与えるものであり、新しい時代の幕開けとなったのだった。その後数十年の間に、予報モデルはずっと精緻なものとなり、気象観測もより頻繁に行なわれるようになってデータ

も豊富になり、さらにデータ同化技術も高度化された結果、数値予報の精度は大いに改善された。

### 2. 大循環モデル・気候モデルの発展

気象学が向き合った最も重要な挑戦の2つ目は気候変化の予測である。J. フーリエが1824年に発見した“glass bowl”効果(温室効果)に基づき、大気中の二酸化炭素濃度の倍増によって地球の気温が約5°Cも上昇することになるとS. アレニウスが予想したのは1896年だった(Arrhenius 1896)。その後、数値予報からの知見を活かし、N. フィリップスは大気大循環モデルの開発に成功した。彼の手法は大気の長期気候状態を再現するモデルへと次第に拡張されていったが、これらの大気モデルでは、与えられた簡単な境界条件を介して地表面や海洋との相互作用を表現するだけだった。

1970年代に入ると、大気と海洋の研究者は大気海洋結合モデルの開発を目指して緊密に連携するようになった。それは、海洋の諸過程と外力に対する海洋の応答が、気候の変動に強く影響することが明らかになってきたからである。しかし、この開発作業は簡単ではなかった。これらの結合モデルで得られる気候状態は、積分時間が進むにつれて非現実的な状態に向かってドリフトを起こすことも珍しくなかった。このドリフトを除去・軽減するため海面での熱フラックスの人為的な補正が必要となったが、この補正によって結合モデルによる気候の将来予測が持ち得る信頼性がかなり疑問視された。1990年代になってこの問題に対する本質的な進展があり、現行のモデルにおいては過去から現在までの気候状態の再現の際には、このような人為的な補正は最早不要となっている。

これと並行して地表面モデルの改良も進み、極めて精緻な水文モデルや凍土モデルを気候再現実験に採り

\* 米国大気科学研究センター地球・太陽システム研究室。

© 2009 日本気象学会

入れる試みにも成功した。また、気候の変化に応じた植生の消長を表現するために、かなり包括的な動態植生モデルの導入も試みられてきた。その中でも先進的なモデルは、気候変化に伴う生物種の地理的な遷移をも表現することが可能となっている。さらに、氷床の動態をより良く表現するための努力も続けられている。

一方、未だ完全に解決を見ない難しい課題としては、エアロゾルやその雲形成への関与、それに関連したエアロゾルの放射への直接的・間接的効果とそれを通じた気候学的影響の表現が挙げられる。より一般的に捉えれば、水循環とそれにしばしば関連する大気サブグリッドスケールの現象の表現に未だ不正確さが残され、雲の微物理過程や対流、降水過程の表現を改善することが必要である。それにはモデルの空間解像度を高めることが必要であり、従ってより強力なスーパーコンピュータとデータ保存システムが必要となるのである。

上記のような限界はあるものの、現行の気候モデルは、現在の気候状態だけでなく、過去1世紀にわたる気候変化もとても良く再現できている。それは全球平均値に注目すれば特に明らかである。ただし、全球規模や地域的な空間分布パターンについては、モデル間の差もモデルと観測値との差も依然として大きいままである。現行モデルにおいて、地域的な気候状態の観測からのずれや、エル・ニーニョ=南方振動(ENSO)や北大西洋振動(NAO)といった卓越した気候変動モードに見られる再現性のバイアスが何故生じるのかを理解することは大きな課題として残されている。とはいえ、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)から最近出されたばかりの第4次報告書(AR4; IPCC 2007)では、気候モデルがかなり改善されてきたことが示されており、それらのほとんどがほぼ同程度に現実的な結果を出している。将来解決すべき問題点も数多く残されているものの、モデル予測に対する信頼性は高まっているのである。

こうして気候モデルの改良が進むにつれ、全球平均値以上の情報がモデルからもたらされるといふ社会の期待を認識することが重要となろう。新たな社会的関心は、将来の水循環と水資源の将来予測や、環境に関連した商品やサービスの展開など、純粋な気候学的疑問への回答に留まらず、その先へと向かいつつある。このような問題に向き合うには、地球システムの変化を決定する諸過程の間に働く相互作用に対するより深

い理解が要求されるのである。

### 3. 地球環境システムモデルの開発

従って、気象学分野が立ち向かう第3の挑戦は、我々の惑星の機能の特徴付ける複雑な相互作用の解明である。科学界では、地球を、生態系を中核とした非線型の複雑系と認識することが必要となってきた。そのような系では、ちょっとした系の振舞が、人間社会にとって難題となり得るような系の大きな応答を生み出す可能性がある。1960年代にE. ローレンツは大気循環のカオス的な振舞に既に着目していた(Lorenz 1963)。それは、複数のアトラクターの存在と、それによりもたらされる異なる状態間の遷移という観点からであった。また、気候がある安定した状態から別な状態に極めて急速に変化し得ることも知られている。例えば、氷期・間氷期サイクルは、この非線型的な系の振舞の現れなのかも知れない。ローレンツは、数値天気予報では初期条件を誤差なく完全に知ることが出来ないため、有意な予報は1~2週間先までが限界と結論付けた。そこで次のような疑問が生じてくる。気候状態、より一般的には地球環境の変化はどの程度先まで予測可能なのだろうか? 複数の指標からは、地球環境が1つの系として変動してきたことが分る(Steffen *et al.* 2004)。例えば、南極Vostok基地で得られた氷床コアからは、大気中の温室効果気体の濃度が長期にわたって気候状態と相関を持ちつつ変動してきた証拠、即ち海洋・大気・陸域が互いに影響し合いつつ変遷してきた記録が抽出されている。地球生物化学的なサイクルは、生物活動とは異なる時間スケールで物理的な気候システムに影響を与える。まだ完全には解明されていないものの、地球システムに様々な種類の「遠隔影響」が存在することは、異なる時空間スケールを持つ現象の間に非線型的な相互作用が存在することを示唆している。

現在の主要な課題の1つは、人間活動がこの複雑な地球環境システムにいかなる影響を与えるかを評価することである。あるいは、地球システムに人為的な強制が与えられたとき、系内の既知の非線型過程がその応答を増幅するのか、それとも緩和するのかという問いかけは、より興味深いものかも知れない。地球システムへの人為起源の強制力がここ数十年で劇的に増加したことはよく知られている。これは、温室効果気体や汚染物質の排出、水資源の利用増大、化学肥料の利用、森林伐採の拡大、土地利用の変化、交通網の発

達、都市化の進展など、人口増加と経済成長に伴うものである。これに対する地球システムの応答を予測するのは容易なことではない。だが、気候変化の確証が観測されるまで何もせずに待つよりは、地球そのものを危険に晒さずに全種類の強制力に対する応答を予測できる地球システムモデルを開発する方がより適切ではないだろうか。第1図は気候系・大気組成・生態系などの間の相互関係を示したものである。ここで、外部強制力には、温室効果気体その他の化学物質の放出、土地利用の変化、森林火災、ダムや灌漑設備の建設などが含まれている。

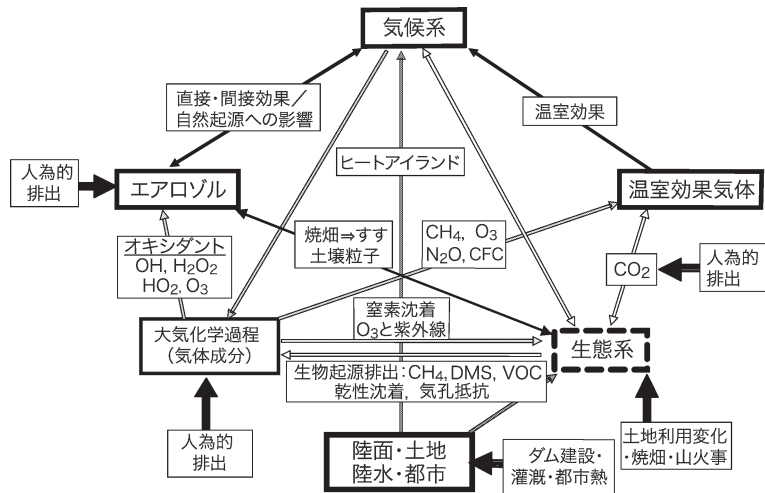
まだやるべき仕事は残されているにせよ、地球システムの相互作用過程のいくつかについては、その正確な定量化に向けて有望な進展が見られるようになった。一例として挙げられるのは、炭素循環と気候系との相互作用を定量化する試みである (Friedlingstein *et al.* 2006)。即ち、化石燃料の燃焼による二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出が引き起こす気候変動に対する応答として、生態系の状態が変化し、その結果海面・陸面での炭素のフラックスも変化するという過程である。

地球温暖化が大気中のCO<sub>2</sub>濃度を増加させることで温暖化が一層加速されるという正のフィードバック機構が存在することを、事実上全ての現行モデルが示唆している(第2図(p.414))。モデル間の差異は大きいものの、化石燃料からの直接排出のみの予測と比べ、2100年時点で0.5~1.5°Cものさらなる温暖化を引き起こすに十分な大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加が予想されている。地球の温暖・湿潤化に伴い予想されるメタン

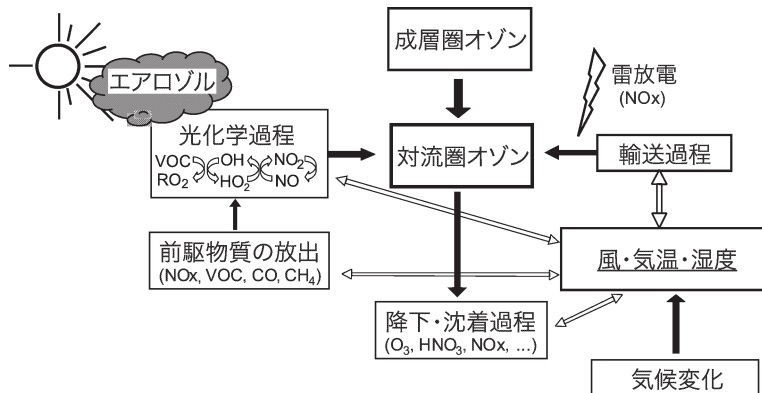
ガスの放出の増加が、地球システムに正のフィードバックを引き起こすかどうかを評価することも重要であろう。

地球システムに顕著なフィードバックを起こし得るその他の相互作用過程として挙げられるのは、エアロゾル・雲・放射系と大気化学の潜在的な役割である(第3図)。よって、気候と大気物質の間に潜在的に存在し得る関係を調べることは有益である。特に、生物起源の気体放出と大気中の2次有機エアロゾルの増加が気候変動に対して与え得る影響をより正確に評価する必要がある (例えば, Brasseur *et al.* 1999)。

これらの問題に答えるための複雑な気候モデルは、



第1図 気候システム、大気組成、水循環、生態系との複雑な相互作用。人為的な影響も示してある (P. Cox のご厚意による)。



第3図 オゾンとその前駆物質に着目した対流圏における化学-気候フィードバックの概略図 (M. Schultz のご厚意による)。

地球システムの果たす役割について多くの知見を与えるとともに、将来の気候変化の予測にとって重要な道具となるであろう。そのためには、利用可能なデータをモデルに同化し、数値実験の初期場を決めるために大いなる努力が要求される。将来予測の焦点はもはや数世紀単位の気候変化ではなく、気候状態、炭素循環、水循環、大気物質等における季節から数十年規模の変動の予測に移りつつあると考えられる。特にこの場合、スケールの異なる現象間の相互作用を表現する

ことが決定的に重要になってくる。そのためには、地球システムの振舞全てを(その社会的側面も含め)対象とする洗練された観測システムと包括的な監視システムが求められる。そのようなシステムが地球システムモデルと共に運用されることは(第4図)、“Climate Services”やさらに改良された“Earth System Services”の開発への礎となるであろう。

#### 4. おわりに

第4の挑戦は、地球システムの生物学的・物理学的な構成要素の変化に対して、社会的・経済的なフィードバックを反映させる方法論を開発することである。現在行なわれている気候予測においては、地球システムへの人為的影響は、CO<sub>2</sub>排出シナリオのように系への外部強制力として扱われている。次なる課題は、人間活動を地球システムの一部として取り込み、社会経済的要素や、各国内の政策、国際的な政策が、自然システムに将来いかなる影響を及ぼすかを評価することである。それにはまず、そのようなフィードバックを導入するための適切な方法を開発しなければならない。だが、それは複雑で困難な取組みで、経済発展、土地利用、エネルギー生産、水資源、保健衛生等の分野の専門家を必要とするはずである。

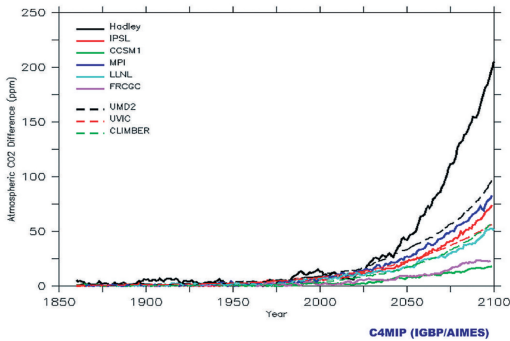
最後になるが、地球システムの問題は全球規模の現象のみに対象を限定すべきでないということを強調して

おきたい。今後、地域的な問題がより重要となってくると認識されている。それは、様々な地域・地方を対象とした統合的な研究プロジェクトを実行することで、地球システムの相互作用、特に社会経済と生物・物理過程との相互作用を研究するための最も良い基盤となると考えられるからである。

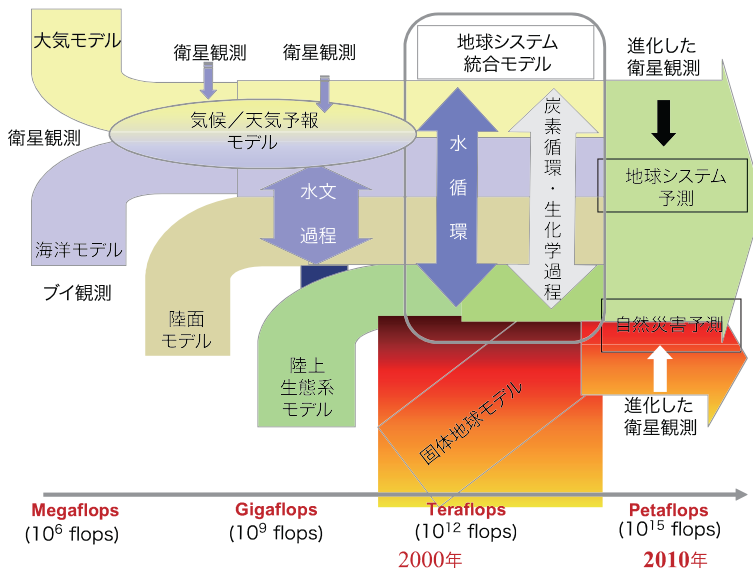
訳：大石龍太(東京大学気候システム研究センター)

#### 参考文献

Arrhenius, S., 1896 : On the influence of carbonic acid in the air on the



第2図 IPCCのSRES A2シナリオに基づき、9個の気候モデルで計算された、炭素-気候系フィードバックに伴って生ずる1850~2100年の大気二酸化炭素濃度の追加上昇(ppm, 縦軸)。IPCC(2007)に拠る。



第4図 地球システムモデルの実現に向けたモデル手法と観測データ利用の進歩、およびそれらに必要なとされる計算機資源を示す概念図。

- temperature of the ground. *Phil. Mag., Ser.5*, **41**, 237–276.
- Brasseur, G., J. Orlando and G. Tyndall, 1999 : *Atmospheric Chemistry and Global Change*. Oxford University Press, 654 pp.
- Friedlingstein, P. *et al.*, 2006 : Climate-carbon cycle feedback analysis : Results from the C<sup>4</sup>MiP model intercomparison. *J. Climate*, **19**, 3337–3353.
- IPCC, 2007 : *Climate Change 2007—The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, 1009 pp.
- Lorenz, E. N., 1963 : Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141.
- Richardson, L. F., 1922 : *Weather Prediction by Numerical Processes*, Cambridge University Press, 236 pp.
- Steffen, W., A. Sanderson, P. D. Tyson, J. Jäger, P. A. Matson, B. Moore, F. Oldfield, K. Richardson, H.-J. Schellnhuber, B. L. Turner and R. J. Wasson, 2004 : *Global Change and the Earth System : A Planet under Pressure*. Springer Verlag, 360 pp.
-