

《小特集》

気候のコンピューターシミュレーションと 地球シミュレーター

松野 太郎*

ABSTRACT A brief history of numerical weather prediction and development of climate models both in the world and in Japan is reviewed, and physical processes to determine climate and how to simulate climate are explained as well. Then impacts of the Earth Simulator on climate modeling is discussed. It is reminded that climate scientists in Japan encounter a difficult situation arising from the fact that Japanese climate science community is relatively small and young having been given small computer resources so far, but now the community is getting the world's biggest computer. Ways how to exploit the coming Earth Simulator are discussed especially in the context of global warming prediction.

1. 数値天気予報とコンピューター

最近の天気予報は、1~2日先なら当たって当然、週間予報も充分実用になるレベルに達し、人々の天気予報への依存度、信頼度は10年くらい前に比べて格段に高くなっているのではないだろうか。この背景にはコンピューターによって将来の天気を計算する数値天気予報の進歩、それを支える(スーパー)コンピューターの能力の飛躍的向上がある。

数値天気予報はコンピューター(電子計算機)と共に生まれ育ってきた。1940年代末、*von Neumann*がプリンストンの高等研究所で電子計算機を初めて作ったとき、それを応用して解決すべき問題として数値天気予報を取り上げた。地球規模の大気の流れの場の変化を、流体力学方程式(非線形偏微分方程式)を数値的に解くことによって、将来を予測しようというものである。気象学者の*Charney*らと協力して、対流圏中層の高低気圧の移動と変形を計算し、実際に近い結果が得られたのが1950年の事である。その後間もなく、大気鉛直構造も考慮することによって低気圧の発達をも扱えるようになり、1955年にアメリカで、1959年には日本(気象庁)で電子計算機による天気予報が業務として始められた。このように半世紀にも及ぶ歴史を持ちながら数値天気予報が実際に役立つ(経験を積んだ予報官の修正の助けを借りなくてすむ)ように

なったのは15年くらい前と言ってよい。大気力学の方程式を差分近似して解くときの水平の格子間隔が250 km以下、鉛直方向の層の数が10以上と、温帯低気圧の3次元構造を十分な精度で表現し、それに応じる大量の計算を短時間に実行できるまでにコンピューターの能力が達したのがこの頃である。また、数値天気予報の精度を決定するもう一つの要因である全地球大気の初期状態が人工衛星によって充分詳しく観測されるようになった事と、そのデータの解析手法に飛躍的進歩が見られた事(それにも予報と同等の計算量が要る)も予報の精度向上に等しく貢献している。なお、物理量(気温・気圧等)の三次元的分布を表すのに、三次元の格子の他に、鉛直方向は多層に分割(差分)した上で水平面内の分布は球面調和関数の重ね合わせで表現するスペクトル法も広く用いられている。ちなみに現在気象庁で数値天気予報に用いられている全球大気モデルは、スペクトルモデルで、鉛直方向30層、水平方向の打ち切り波数(最大波数)は213すなわち P_n^m の n の最大が213(格子間隔60 km相当)である。

2. 気候モデル

数値天気予報と手を携えて成長して来たのが気候モデルである。数値天気予報を1週間にとどめず、1ヶ月でも1年でも続けて行くと「予報」としては意味がなくなるが、方程式の中に熱帯では日射が強く暖まる効果、高緯度では赤外放射の方が大きく冷える効果が取入れてあれば、南北の温度差が生み出され、その中で温帯低気圧が次々と生成消滅を繰り返す状況が計算

Climate Modeling and Impacts of the Earth Simulator. By *Taroh Matsuno* (Frontier Research System for Global Change, Institute for Global Change Research).

*地球フロンティア研究システム

結果として得られるであろう。個々の低気圧の位置や強さに意味は無くても、南北の加熱差の存在下で温帯低気圧が生まれ、大気上層では中緯度に集中した強い西風、ジェットストリームが生成されることが長期積分の結果として得られる。すなわち、大気の平均的構造と循環—大気大循環が物理法則をもとにした数値モデルにより再現されるのである。このような試みは早く1956年にPhillipsによって行われ、彼はこれを大気大循環の数値実験（numerical experiment）と呼んだ。このように計算機によって大気大循環を再現する基礎となる方程式系やその数値解法を与える一連の数式群（さらにはそれをコンピューター・プログラム化したもの）を大気大循環モデル（AGCM）と呼ぶ。

地球上の大気大循環は南北の温度差のみでなく海陸の熱的性質の差に起因する季節風や中緯度のジェットストリームの大規模山岳の影響を受けた蛇行など地表面の不均一に強く影響され、その結果として、気温や風や降雨は地域の特徴を持った分布をしている。すなわち地域に特有の「気候」を生み出している。そこで、海陸分布の効果をも取り入れたAGCMを作ってコンピューターで計算を進めるとその結果として各地の気候を再現する事ができる。すなわち物理法則にもとづいて地球上の気候を計算する事ができる。この計算の基礎となるものが気候モデルである。各地の気候分布を支配する要因としては海面水温分布やその原因となる海流は決定的に重要である。そこで、気候を物理法則をもとに説明し、理解しようとするなら、海流や水温をも方程式に従って計算しなければならない。一方、海流や海水温は大気の影響を受けているから、気候モデルは大気と海洋が相互作用を及ぼし合っただけの変動する状態—大気海洋結合システムの状態を記述する方程式群より構成される事になる。さらに、気候は、海洋ばかりでなく大陸上の積雪、土壌水分、植生など陸面状態によっても支配されるが、これらもまた気象状態の結果として変化するものである。結局「気候を計算する」には大気・海洋・陸面状態から構成されるシステム（気候システムと呼ぶ）の物理的状態の変化を、構成要素間の相互作用を取り入れた一連の方程式系により、適当な初期条件（例えば等温・静止）から出発して統計的平衡状態に達するまで長時間積分し、「気候」を表す各地の気温、雨量などの平均値を求めることになる。時間積分の長さは海洋の深層循環までを扱う本来の気候シミュレーションの場合は1000年以上、簡略化して海洋の運動は考えず、熱容量の効果のみを取り入れる場合は10年程度である。また、水平

格子間隔は、現段階で前者は300 kmくらい、後者は100 kmくらいとなっている

気候のシミュレーションは、数値天気予報を母体として生まれたものではあるが、以上の説明から想像されるように、当初の“流体力学方程式の数値積分”という概念とは随分と違ったものになっている。大気中の可視、赤外の放射伝達、雲粒の形成と降水要素の成長といった多様な物理過程を含み、しかも、流体力学方程式のように確立した物理法則では表現できない過程がほとんどである。雲の形成一つをとっても100 kmの程度の格子では積乱雲を直接計算できる訳ではないから、大気の鉛直方向の安定性とか、100 km平方で平均した上昇速度などのパラメータをもとに雲の存在と量、その熱及び水蒸気輸送効果を経験則として定式化する（パラメタリゼーション）。「気候システム」の構成要素とそこに含まれる多様な過程を図1に模式的に示してある。

このような物理過程のパラメタリゼーションをどうするかによって個々の気候モデルの間に差違を生じ、それを応用した数値シミュレーションの結果も違ってくる。地球温暖化の予測で、同一のCO₂濃度増加のシナリオに対して100年後の地球平均温度の上昇の見積もりが30余りのモデルの間で1.5℃～4.5℃という広い範囲にばらついてしまう事は、気候モデリング研究の上での大問題となっている。

気候のシミュレーションに大量の計算を必要とすることは容易に想像できよう。現在、地球フロンティア研究システムの地球温暖化研究領域長をしておられる眞鍋淑郎博士は、1958年から40年間、米国海洋大気庁・地球流体研究所（GFDL/NOAA）において気候モデリングの研究に従事され、これまで説明して来たモデルの発展の先頭に立ち、「コンピューターモデルによる気候と気候変化の機構の解明」という研究分野

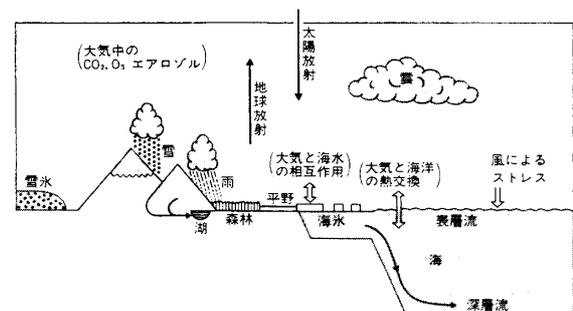


図1 気候システムの構成要素と諸過程の概念図

を創り出して来られたのであるが、その背景には GFDL には常にその時代最高のコンピューターが置かれ、それを少数 (4~5) グループの研究者が占有して研究を行って来た、という環境がある。

3. 日本における気候モデリング

1960~70 年代に気候モデルが数値天気予報モデルから分れて発展した時代には、GFDL の眞鍋博士の他に、国立大気研究センター (NCAR) の笠原彰博士、カリフォルニア大ロサンゼルス校 (UCLA) の荒川昭夫博士と日本出身の気象学者が中心となって世界の研究をリードしていた。1950 年代、数値天気予報誕生の時期に研究者として出発したこれら諸先輩は、コンピューターも大学の研究職もない日本を離れざるを得ず、アメリカに活躍の場を見出したのであった。一方、日本では、1950 年代初めプリンストンで数値天気予報を学んで来た、当時東大助手の岸保勘三郎博士を中心に、大学・気象庁の若手研究者がグループを作って研究を進める傍ら、気象庁に計算機導入を働きかけ、その結果 1959 年という早い時期に、当時最大の IBM704 が設置されて数値天気予報が始められた。しかし、これは業務としての毎日の予報とそれに使うモデルの改良に主に使われ、大気大循環 (気候) モデルなどの研究にまで利用する余裕は無かった。

大学では、理・工学部の研究者が会社と協力して小型のコンピューターの試作を行っており、私は、当時東大理学部の後藤英一博士の発明になるパラメトロンを演算素子に使ったメモリー 512 語のコンピューターを利用させてもらって修士論文を作った (1959 年)。勿論、大型コンピューターの必要性は研究者の間に広く認識されており、1960 年代はじめ、若手研究者により (当時理学部講師の有馬朗人氏は中心人物の一人) 大学共同利用の計算センター設立の運動が起こされ、その努力が実って東大・大型計算機センターが設立され、1966 年に運用を開始した。しかし、当時の国産計算機は米国のものにはるかに及ばず、しかも全国に一つで多数の共同利用であるから、気候モデルの開発など夢にも考えられなかった。(軸対称を仮定して 2 次元の台風発達の数値シミュレーションを行うのが精一杯であった。) このように在米日本人研究者の大活躍とは裏腹に、1960~70 年代に日本での気候モデル研究は全く無かったと言ってよい。この状態に関係者が手を拱いていたわけではなく、全国の気象若手研究者が集まって将来計画を議論し、米国の NCAR に倣って、大型計算機を備え大気大循環モデルの研究を主

目的の一つとする「大気物理研究所」設立の提案 (1965 年学術会議より政府に勧告) をしたが結局、実現を見なかった。

その間、日本のコンピューター技術は徐々に向上して世界の水準に追いつき、また、1980 年に気象研究所が筑波に移転したのを機に研究専用のコンピューターが導入されて、気候モデルの開発が漸く始められた。大学では、1983 年に東大・大型計算センターに導入された HITAC S810 (ピーク性能 630MFLOPS) をもって世界と並ぶ所まで来た。しかし、大学における気象研究は一講座に限られ、大型計算機利用に必要な研究費も少なかったから、1985 年以降私が東大・気象研究室をリードして始めた大気モデル (気象庁より移植) を用いた研究もいわば理論の延長としての基礎的なものに限られていた。(勿論、そのような研究も重要で、理想化した「水惑星」モデルによる実験は当時注目を浴びていた実際現象の機構解明に突破口を開いた。)

1980 年代末、成層圏オゾンの減少や地球温暖化が人類全体の未来にかかわる問題である事が明らかになり、その予測にコンピューターを用いたモデル実験が主役を果たしていることが知られるようになった。その結果、気候モデルの開発とそれを用いた研究を行う事を目的とした全国共同利用機関として 1991 年「気候システム研究センター」が東大に設立された。個人的回顧をすれば、1963 年に前述の将来計画作りに若手研究者の一人として参加し、大気物理研設立を構想してから 28 年が経過していた。また、同年国立環境研にスーパーコンピューターが導入され、省庁を越えて地球環境研究のための共同利用に供されることになった。このように、計算機資源と研究者数の面で日本の気候モデル研究が何とか世界の仲間に入ったのはこの 10~15 年程である。地球温暖化予測研究のまとめである IPCC (気候変動に関する政府間パネル) のレポートは、1990 年以降 5 年毎に作られているが、90 年に気象研究所の海洋混合層の熱効果のみを取り入れた CO₂ 2 倍気候の実験、95 年には深層循環まで取り入れて将来 100 年間の変化を予測した結果 (国立環境研のコンピューター利用)、2000 年のレポートには、同様の実験で気象研のものと東大気候センターと国立環境研の共同研究によるものの二つの結果が提出された。1997 年 10 月「地球フロンティア研究システム」が宇宙開発事業団と海洋科学技術センターの共同研究プロジェクトとして開始され、「地球変動予測の実現に向けて」地球シミュレーター計画と共に研究が進め

られている。

4. 地球シミュレーター時代の気候モデリング

前節に記したように、日本における気候モデル研究は、今漸く世界と肩を並べる所まで来た。研究の遅れの原因が計算機資源の不足と、そのために専門研究者のコミュニティが数でも活動でも十分成長できなかったことにあることも了解されるであろう。その状況の下で、いきなり世界最高水準の「地球シミュレーター」が間もなく完成する。地球シミュレーターを如何に有効に利用し、巨額の税金に値する研究成果を出すかは大変に難しい問題である。難しさの原因は「二段跳び、三段跳び」にある。図2は年代ごとの世界最大級のコンピューターの能力（理論ピーク演算速度）の時代的変遷を示したものである。右側には、代表的気候モデル計算（10～100年積分を1～3ヶ月で行う）を行う際に可能な水平解像度（格子間隔）のめやすを記してあり、さらに、図にはIPCCレポートに現れたモデルの水平解像度を右スケールによって記入した。

図には日本の気候研究コミュニティに利用可能な（関係研究機関に設置された）計算機の能力が線で書き入れてある。図から読み取れるように機種更新によ

り階段状の変化をし5～7年毎に10倍強の向上が見られる。ところが間もなく完成する地球シミュレーターに関しては100倍に近く、しかもそれは最近の東大及び気象研における機種更新（1999年）のわずか3年後に実現するのである。この状況は、グラフの線が表すように階段の二段三段を一挙に駆け上がるのたとえられよう。その上、多数のプロセッサを使う並列機は、1999年に初めて体験したものでありその飛躍も大きい。一般に、機種更新による計算能力のアップに際しては、前段階での経験をもとに新しい計画を立て、その為の準備をするものである。所が今回は二、三段跳びであるから計画を立てるのも準備をするのもなかなか難しい。

これまでの気候モデルの発展と、気候変動研究の動向、特に社会的要請の強い温暖化予測の確度向上などを考えた時、計算機能力の飛躍的向上に対応するモデル開発の方向としては、次のようなものが考えられる。

- (1) これまでと同じモデルで水平及び鉛直の解像度を上げる。それによって、例えば日本海側と太平洋側といった地域的特色を持った気候のシミュレーション及び温暖化に伴う気候変化の違いを明らかにする。また、現在の100km程の格子では困難であった梅雨期の低気圧とか熱帯低気圧など

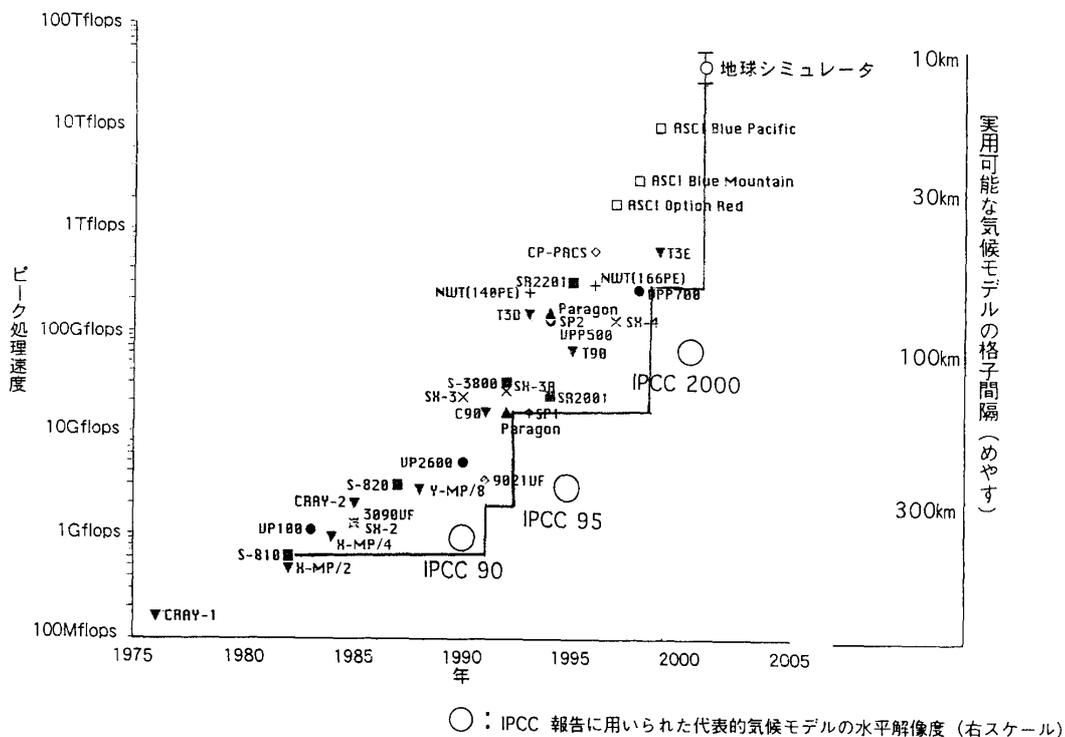


図2 高速計算機の性能向上の動向と気候モデルの水平解像度

比較的小さな現象がより良く表現され、温暖化に伴うこれらの変化（極端な天候の頻度の変化）の予測が可能になると思われる。ただし、メッシュサイズをただ小さくすれば良いわけではなく、物理過程の取り扱い方（パラメタリゼーション）を新しい解像度において正しくなるように変更あるいは調整しなければいけない。

- (2) ある限界を越えて解像度を上げることによりモデルに質的变化がもたらされる。すなわち現象のスケールが従来の格子間隔より小さなものは、これまで「パラメタライズ」して扱うしかなかったが、新しい格子で直接表現可能になれば、(方程式で直接扱うことができれば)より確かな（第一原理に近い）シミュレーションが可能になる。現在、地球フロンティアで計画しているものでは、温暖化予測に用いる結合モデルの海洋部分は 0.1° （10 km）の格子間隔にし、海洋中の中規模渦と呼ばれるものを直接扱い、その熱・塩分輸送効果をパラメタライズしないで取り入れることにしている。ほかに5 km以下の格子による大気モデルでこれまでパラメタライズされていた積乱雲を直接表現し、集中豪雨や台風を確かな基礎のもとにシミュレートすることも計画している。それによって温暖化によって梅雨はどう変わるか、台風の数や強さはどうなるか、といった社会的に重要な問いにより確かに答えることができよう。
- (3) 諸物理過程のパラメタリゼーションをより厳密により詳しく扱う。例えば雲による日射の反射と吸収を計算するのに雲層を構成する雲粒の数の粒径分布、その原因（凝結の核）となる吸湿性エアロゾルの種類、サイズ、数まで考慮したパラメタリゼーションを案出し気候モデルに組み入れる、などである。地球温暖化予測の不確定の大きな原因が、雲による反射の温暖化に伴う変化にあるので、このような詳しい扱いは試みる価値がある。この場合、雲を対象とした詳細なモデルによって数値実験を行い、それに基づいて気候モデル用のパラメタリゼーションを行うことも必要となる。

- (4) 気象と同じく気候も「カオス」を含んでいる。仮に最初にほとんど同じ状態があったとしても時間とともに小さな差が広がって行く。従って、自然の気候変動でも地球温暖化でも1回の予測だけでは不十分であり、初期条件を少しずつ変えた計算を多数行い（アンサンブル実験）その統計的振舞いから将来予測を行う必要がある。温暖化予測のような大量計算では、これまで無理だった多数のアンサンブル計算を行うのに、並列機である地球シミュレーターは特に適している。
- (5) 地球温暖化予測に関して、これまでの気候変化（気温、風、降水量の変化）にとどまらず、その原因である炭素循環（ CO_2 の海洋や陸上生態系による吸収）さらには生態系（植生）の変化をもモデルによってシミュレートする。すなわち地球環境の統合モデルを作る。

現在、このような方向に向けてのモデル開発が各研究グループで進行中である。地球フロンティアでは、(2)に記したような格子間隔10 kmの海洋モデル、5 km以下の大気モデルを目標として開発研究を行っている。大気モデルは、現在のスペクトル法では、最大波数(n)が大きくなると変換計算の量が n^3 に比例して莫大となり、かつ非局所的のため並列計算の能率が落ちるから高解像度モデルには使えない。他方、格子法にしても通常の緯度・経度を等間隔に切る格子では、極近くで経度方向の間隔が小さくなり、積分の時間間隔を短くせねばならないからやはり不適である。そこで、球面をなるべく一様に覆う格子として、正20面体を基礎としその各面（正三角形）を細分化して球面に投影する格子や、6面体から出発してそれを局所的に直交する線で切る格子などを用いることとしその場合の精度の良い差分スキームや格子生成法の研究を進めている。このような研究開発を要するもの、「二段跳び、三段跳び」の為の問題の一つと言えよう。前記の様々な開発に伴ってこのような問題がそれぞれにあるろうが、逆に、この困難を乗り越ければ、遅れていた日本の気候モデリングが、コンピューターと同様に一挙に世界の先頭に立つ可能性があるとは私は考えている。