Vol. 36 No. 2　　情　報　処　理　　Feb. 1995

解　説

最先端の科学技術とスーパコンピューティング

7. 気象・環境科学における スーパコンピューティング†

住　明　正††

1. はじめに―数値モデルの歴史と発展

今日では，天気予報もスーパコンピュータを用いた膨大な数値計算に基づいて行われていることは広く知られている．しかし，このような試みも，一朝一夕にできたわけではない．計算機をめぐる状況が大きく変化しつつある今，先人の苦労の跡を概括するは，今後の方向を考える上でも示唆の多いことと考えられる．

このような大型の数値計算の分野で忘れられない人は，L. F. Richardson である．彼の苦闘は，その著作[1]の中に余すことなく書かれている．地球上の大気の状態の変化を，流体力学，及び，熱力学の方程式を数値的に積分することによって予測しようと初めて考え，かつ，数年にわたる数値計算の努力を試みたのである．その悲劇的な結果と，それにもかかわらず将来の超並列計算機を思わせるような記述によって，彼の影響は不滅のものとなったのである[2),3)]．

彼の失敗の理由は，具体的に計算を行う道具の不備による．数年をかけたといっても，実際，彼の計算したのは最初の時間の時間変化率のみである．それを6時間外挿したら，地上気圧が約100 mb も下がる結果となったというわけで，決して，実際に6時間計算したわけではないのである．現在の最先端のモデルを用いても，観測値をもとに時間積分を始めると，同じ程度の時間変化率を示す(**図-1**)．ただ違うのは，決して単調に変化するのではなく振動しながらやがてゆっくりと変化し始めるということである．つまり，彼が，実際に6時間計算してみることができたのならば，このようなモデルの振舞いに気が付くことができたはずであり，大気の運動の秘密を発見し得たことであろう．そのことが，気象力学の発展を促し，また逆に，数値計算を可能にしたと思われる．先進的な発想と現実の技術の不一致による悲劇の典型的な例がここにみられる．

その意味でも，次の発展が von Neumann らによって行われたのは印象的である．すなわち，彼らは，問題の解き方(準地衡風モデル)と同時にノイマン型計算機という解く道具も開発したのである[4)]．

彼らの成功を受けて，気象の予測は各国の予報センターで実用化されるに至る．時を同じくして，電子計算機も発展していく．計算機の開発と機を一にしてモデルの開発が行われたのである．そして，この協力には理由がある．気象の分野は常に最先端の計算機を必要としており，また，天気予報の精度向上などを通して最先端の計算機の能力を社会的な需要に還元できるからである．初期の大型計算機の開発のときも，ベクトル計算機の導入のときもそうであったし，今後の超並列計算機にとっても同様であろう．

以上に述べたように，気象のモデル，環境問題に用いられるモデルの開発は，計算機の技術者・情報処理の人々との協力が不可欠である．この小文が情報処理に関係する人々の興味を引くことができるならば幸いである．

2. 大気モデルにおける数値計算の特徴

環境科学で用いられる数値モデルの特徴を代表的な気象のモデルを例に，考えてみよう．

その特徴の第一は，同一の演算の繰返しということである．この決まった手続きの繰返しという特徴は，暗号解読と並んでノイマン型の計算機にも，ベクトル型の計算機にも最も適した計算処理の例と言われている．繰返し演算ではあるが，気

† Super Computing in Atmospheric and Environmental Sciences by Akimasa SUMI (Center for Climate System Research, University of Tokyo).

†† 東京大学気候システム研究センター

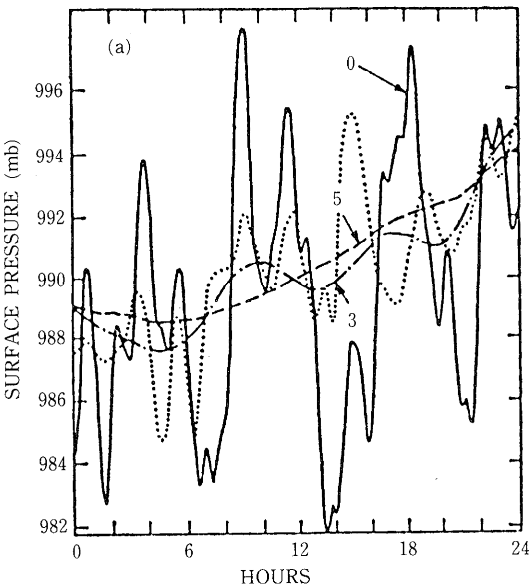

図-1　現在の数値予報モデルでのある地点(40 N，90 W)での地上気圧の時間変化．(0)と書いてあるのが初期値の段階で何もバランスを考えなかった場合．(3)，(5)と書いてあるのは，短い周期の変動が出ないように初期値を調整した結果を示す(点線は，調整を1回だけ行った場合である)．Richardson の行った計算は(0)に対応する

象のモデルの場合は，いわゆる，初期値問題を解いているわけで，境界値問題などを解く iteration とは異なる問題があることを認識しておく必要がある．

時間積分には，CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件と呼ばれる時間間隔に関する条件がある．この条件は，線形不安定と呼ばれる現象と関連しており，系の位相速度を c とすれば，格子間隔，Δx，時間間隔，Δt，との間に，$(c\Delta t/\Delta x<1)$ という条件を満たさなければならない，というものである．このため，格子間隔を短くするにつれて時間間隔を短くしなければならないことになる．一般的に，格子間隔を半分にすると，水平方向で格子点の数が4倍になり，時間間隔を半分にしなければならないので8倍計算時間がかかることになる．このことが，気象モデルの精度を向上させようとすると，等比級数的に計算時間が増加する理由である．

2番目の特徴は，移流項にともなう非線形性，$u\frac{\partial}{\partial x}+v\frac{\partial}{\partial y}+w\frac{\partial}{\partial z}$，である．このような非線形項は適当に差分を取れば良い，というわけではない．気象のモデルを時間積分しようすると，線形不安定のほかに非線形不安定と呼ばれる現象が存在することが知られている[5]．この不安定現象は，線形不安定現象と異なり，時間間隔を短くしても発生を抑えられない，という特徴がある(**図-2**)．

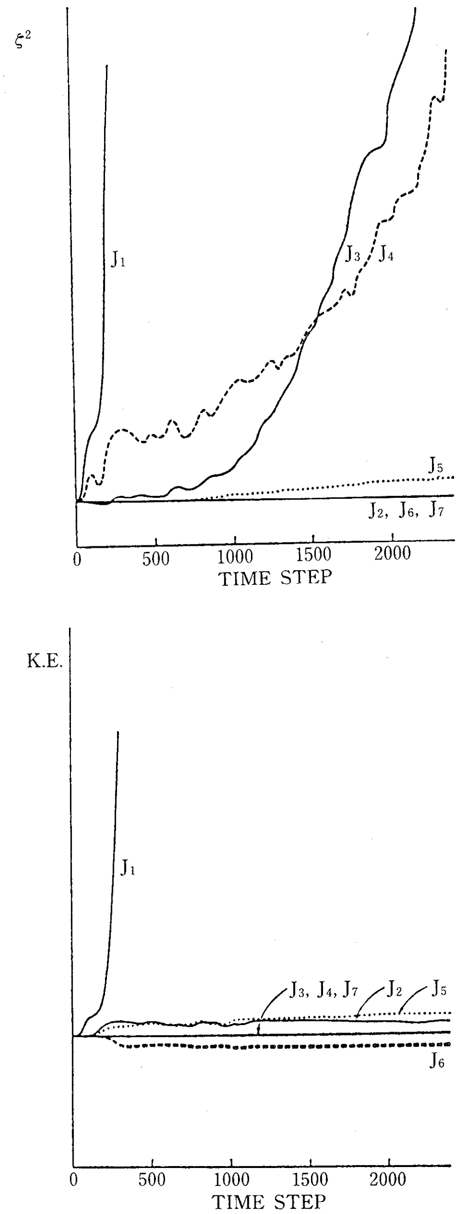

図-2　非線形不安定の一例．上段が領域平均のエンストロフィー，下段が運動エネルギー．J_1 から J_7 は，Arakawa の Jacobian と呼ばれる非線形の移流項の差分法の種別に対応する．J_1 で示されている現象が，非線形不安定の例で，J_7 で示されているスキームを採用すれば，長期間積分できることになる

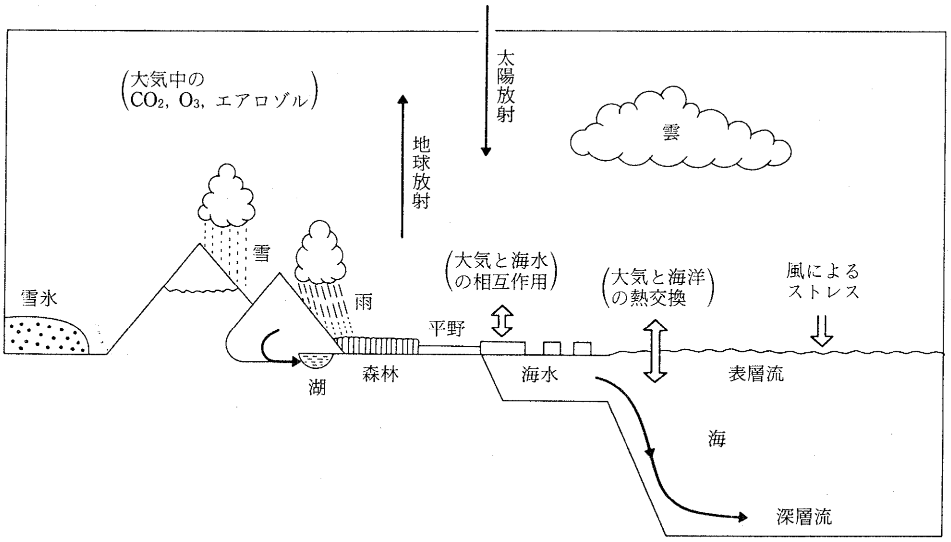

図-3　気候システムの模式図

この不安定は非線形項の不十分な取扱いによることが，Arakawa[6]によって明らかにされ，移流項の差分の取扱いが定式化されて初めて，気象モデルの長時間積分が可能となったのである．

3番目は，気象現象には，大気放射や積雲対流・雲，大気乱流などの複雑な物理的過程が関与しているということである．言い替えれば，気象の予測を行おうとすると，これらの物理過程もモデル化しなければならないことになる．しかしながら，これらの物理過程には特徴的なスケールが存在する．たとえば，われわれが目にする雲などは，直径10 km，寿命は30分程度のものである．しかしながら，現在用いられているモデルの格子間隔は，通常，250 kmから100 km程度である．それでは，どうすれば良いのであろうか？

この問題は，サブグリッド現象のパラメタリゼーションの問題と呼ばれている．この問題に関しては，“格子間隔で表現できない現象の効果は格子で表現できる”という仮定を用いて取り扱っている．その結果，気象のモデルには，“何何のパラメタリゼーション”というサブルーチンが多数入り込んでくることになる．

そこで，問題はこの仮定が有効か？という点である．エネルギーの散逸を表す過程ならいざしらず，気象の場合には雲・対流はエネルギーを発生している過程なので，一般的にはこの部分の取扱いは大気の状態にとって大きな影響を与えることになる．

3. 気候モデルの特徴

気候システムは，**図-3**に示されているように，大気・海洋・雪氷・生物圏などさまざまなサブシステムから成り立っている．しかしながら，これらのサブシステムの力学，時間・空間スケールなどは非常に多様である．にもかかわらず，気候システムはそれなりの統一性をもって変化している．このようなサブシステムの特性とその相互作用を正しく表現することが，気候モデルの目的と考えることができる．

このことがいかに困難か，一例をあげて説明してみよう．地球の7割は海洋によって占められている．地球の気候を考えるならば，海面水温が地球の気候を決める，と言うことができる．それゆえに，気候を正しく再現しようとすると，海面水温を正しく再現しなければならなくなる．ところが，海の特徴的な水平スケールは大気に較べると一桁小さく，また，その変化の時間スケールは数十から数百倍遅い(静止大気から大気の大循環を再現するには，大きなスケールでは1カ月，細部を含めると数カ月で十分なのに対し，海洋は，静止した海から大循環を再現するには，数万年も時間積分しなければならない)．

たとえば，海洋の部分に関しては，格子間隔は50 kmとしよう．時間変化はゆっくりなので，時間間隔は半日でも良いとしよう．一方，その上の大気は，普通，格子間隔は250 km程度であ

る．その時間間隔は，十数分程度である．この二つのモデルを共存させながら，どのように積分すれば良いのであろうか？

大気の格子間隔は 250 km，海洋の格子間隔は 50 km としたら，大気と海洋の格子はズレることになる．ところが，大気と海洋は相互作用している．格子がズレているときに，両者の間の相互作用をどのように表現すれば良いのであろうか？内挿すれば良いのであろうか？

時間積分についても同様である．海洋の時間スケールに併せて大気を積分していくとすると，現在の大気モデルを数千年も時間積分することになる．このことは，非現実的と言える．それでは，どうすれば良いのであろうか？

大気と海洋を同期させないで時間積分する方法も考えられた．しかし，このようにした結果，答えの信頼度が少なくなることになる．特に，地球の温暖化問題など，答えを知らない問題に関しては悩みは深い．

4. 高速演算がもたらすもの

気候モデルを時間積分しようとすると，少なくとも，必要な水平・鉛直の時間スケールを決めなくてはならない．海洋の渦が重要であるならば，数十 km の格子間隔を取らねばならなくなるし，もし，雲が必要となるならば，数 km の格子が必要となる．要するに，膨大な計算量が必要ということになるのである．

ここで，**1.**で述べた Richardson の例を思い起こす必要があろう．学問には，本質的に必要な計算量がある．多くの場合，「より少ない計算量でなんとかならないか？」と努力するのであるが，この時には導入した仮定の意味に悩むこととなる．一方，このことは，必要な計算量が実現されるまで何もできないということを意味しない．計算量が得られないときでも，その準備はできる．しかしながら，必要な計算量を得るべく努力することも忘れてならないことである．学問の発展に関して常に矛盾した側面がある．学生に「道具がないからできません」と言われたときは，「頭が大事だ」と答えるのであるが，やはり，「頭」だけではできない世界がある．

このことを象徴的に表す出来事がある．数値予報の歴史の中では，70 年代は冬の時代であった．50 年代半ばにバロトロピックモデルで華々しく登場した数値モデルは，計算機の進歩発展にともない順調に発展してきた．しかしながら，70 年代になっても予想された精度が出なかった．研究者の中には，「現在行っているオイラー流の方程式を時間積分するという方式では限界があるのでは」という悲観論もあったのである．

この状況の突破口は，CRAY に代表されるベクトル型スーパコンピュータの登場と，それにともなう数値モデルの大型化によってもたらされた．少なくとも，今までの経験によれば，数値モデルの性能は計算機の能力の増大にともない，確実に進展した．水平・垂直解像度の向上にともなう精度の向上によって解決した問題は数多い．

なかでも，演算の算法が大きな影響を与えた一例を示しておこう．先ほどから，何回ともなく，格子間隔と述べた．モデルを格子で表現すると，格子にともなう切断誤差が不可避になる．また，球面上に一様な格子を取ることは不可能である．緯度・経度で格子を取ると，極地方で格子間隔が短くなり，CFL 条件を満たすために別の工夫をしなければならなくなる．そうすると，計算精度が落ちる，ということになる．

このような問題を解決する方法として，昔から，スペクトル法という方法が知られていた．全球を対象とする大気のモデルでは球面調和関数を用いて，

$$\Phi=\sum_{e}\sum_{m}\Phi_{em}Y_{e}^{m}(\theta,\lambda)$$

のように関数展開を行い，展開係数の時間変化を予測するという方法である．しかしながら，この方法で非線形項を計算しようとすると，

$$\sum_{e}\sum_{m}\sum_{e'}\sum_{m'}\Phi_{em}\Phi_{e'm'}\cdot I(l,m\,;\,e',m'\,;\,L,M)$$

の形に表現されることになり，計算量が膨大になることになる．

しかしながら，70 年代になって変換法という計算法が開発された．この方法は，非線形項の計算を波数空間で行うのではなく，非線形項を物理空間で計算し，それを波数展開するという形で計算しようという方法である．また，球面調和関数を用いて関数展開を行うときには，フーリエ変換が出てくる．この場合にも，FFT というアルゴリズムの登場によって非常に計算時間が短縮されることになった．これらのことから，スペクトル

法が全世界の数値予報センターで採用されるようになった理由なのである．

現在，東大気候システム研究センターの大気大循環モデルは，東西方向に128個，南北方向に64個の格子点(水平分解能約250 km)をもち，鉛直方向に20層のモデルであるが，これを東大大型計算機センターのS3800(公称，8 GFLOPS/1プロセッサ)で計算すると，1年分で，計算時間が10時間程度である．もちろん，この時間は，モデルの効率化を計れば短かくすることは可能ではある(しかし，効率性と保守の容易さとは矛盾する概念で，どちらを優先するかは，そのセンターの考え方による)．しかし，それにも限界があることには言うまでもない．

将来の大気モデルとしては，水平解像度は，50 km，窮極的には，1 kmと言われている．海洋モデルでも，水平解像度は，10 km以下とされる．このために必要とされる計算量は，現在の計算量の125 ($=5^3$)(50 kmの場合)，1億5千($=250^3$)万倍(1 kmの場合)程度にもなると予想される．このような計算を可能とする超高速計算機の登場を待っている状況である．

現在は，超並列計算機の登場を待っていろいろな研究が行われている．特に，超並列の計算機にあったアルゴリズムは何なのか，が問題になる．気候モデルは，非常に分岐の多いプログラムである．このことは，ベクトル型のスーパコンピュータのときにも計算時間を速くするときに障害になったが，超並列の場合でも，それぞれの計算機の負荷を一定にもたせることが大きな問題になっている．

5. まとめ

地球環境研究で重要な役割を果たしている数値モデルについて概括してきた．一言で言えば，計算量の不足に喘いでいると言えよう．もちろん，これには研究者のライフサイクルも関係している．30年かけて一つの計算，というわけにいかないのが現状だからである．

「量的変化は質的変化をもたらす」とはマルクスの言葉であるが，こと計算量に関しては真実であると思われる．気象のモデルの精度の向上がこのことを如実に示している．

参 考 文 献

1) Richardson, L. F.: Weather Prediction by Numerical Process, Dover Publ. Inc., 236pp. (1922).
2) 住 明正：数値予報の過去・現在・未来，ながれ(日本流体力学会機関誌)，5，312-325 (1986)．
3) 岸保勘三郎：温帯低気圧モデルの歴史的発展，天気(日本気象学会機関誌)，29，269-298 (1982)．
4) Charney, J. G., Fjortoft, R. and von Neumann, J.: Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation, Tellus, 2, 237-254 (1950).
5) Phillips, N. A.: An Example of Nonlinear Computational Instability, The Atmosphere and the Sea in Motion, Rossby Memorial Volume(1959).
6) Arakawa, A.: Computational Design for the Long-Term Numerical Integration of the Equations of Atmoshereic Motion, J. Comp. Phys., 1, 119-143 (1966).

(平成6年2月23日受付)

住 明正

1948年生．小学校5年のとき，伊勢湾台風に会い，気象現象に興味を持つ．長ずるに及び，物理的世界を目指すようになる．東京大学入学後，激動の時代に巻き込まれ，人間を含む社会・経済的環境にも興味が広がる．1973年，結婚を契機に気象庁に就職し，東京管区気象台調査課，予報部電子計算室で働く．電子計算室の掲げる「現場で学問をする」という理念に共感する．1979年から81年にかけてハワイ大学気象学教室で，アジア・モンスーンの研究に従事，村上多喜雄教授の薫陶を受ける．要請に応じ，1985年，東京大学理学部地球物理学教室に移る．「大学といえども，今の気象学には組織的・プロジェクト的な研究が必要である」という理念のもとに，松野太郎教授や団塊の世代の同僚とともに，共用可能な気候モデルの開発，気候研究を行なう体制の整備，東京大学気候システム研究センターの設立，そして，全球大気と熱帯海洋に関する国際共同研究（TOGA）計画の推進に努める．1991年，センターの設立とともに移る．地球環境問題が政治問題化するにつれて，再び，研究体制の維持・管理・運用や「学問と社会の関わり」などの現代的問題に取り組むはめとなる．