

4011:604 (数値予報; 気象学史; 気候予測; 数値予報開始50周年; 記念講演)

3. 今後の数値予報への期待

木本昌秀*

1. はじめに

日本の数値天気予報50周年を迎え、まずは、諸先輩方の多大な努力とその見事な成果に対し、深い敬意とお慶びを申し上げる。記念行事の中でこのような講演の機会を頂いたことは、気象学徒のはしくれとして身に余る光栄である。1年2か月の休職を含むわずか5年半の数値予報課在籍で、ろくな貢献も為しえなかった私ごときに数値予報の将来展望を語る資格のあろうはずもないが、気候予測等の分野で、数値予報の強固な土台のもと、あれこれと四苦八苦している立場から、数値天気予報の更なる発展への勝手な期待を述べさせて頂くこととする。

2. よりよい予報をめざして

いうまでもなく、数値天気予報は、明日明後日の天気予報をコンピュータモデルによって行うことを目標に発展してきた。全世界の気象観測データをもとに、只今現在の気象状況をできるだけ詳しく把握し、その状態（初期値）からコンピュータモデルで将来を計算する。過去の経験やベテラン予報官の勘に頼ることなく、理科の本に載っているような物理学の基本法則にしたがって大気の流れや気温、水蒸気の凝結による降

雨などを予測しようとするものである。明日明後日の「短期天気予報」については、V. Bjerknes (1904) や L. F. Richardson (1922) の「夢」は1980年代には見事に実現し、現在はさらなる予測精度向上を目指すステージにある。

数日の間隔で訪れる移動性高気圧や低気圧に伴う天気変化が短期天気予報の主たる予測対象であり、これについての精度は現在相当高いレベルにある。受験勉強でもそうであろうが、平均点50点を1点上げるのに比べて80点、90点のレベルで1点上げるのは至難の業である。将来を計算するコンピュータモデルの精度向上もさることながら、衛星など新しい観測データを巧妙にモデルになじませて予報の初期値をこしらえるデータ同化手法の進展が90年代以降急速に進み、高レベルでの予報精度向上に貢献してきた。

現在では、予報をさらに有効なものとするために、集中豪雨や台風、突風などの顕著気象現象の予測精度の向上を目指して観測網の整備、データ同化手法の開発、そして雲や雨の生成過程の詳細に立ち入ることのできるコンピュータモデルの開発が行われている。すなわち、空間的に数千 km スケールの高気圧低気圧だけでなく、その中の気象の微細構造にまで立ち入った予測への努力が行われている。

多くの場合、顕著気象現象は人命被害を含めた深刻な気象災害をもたらす。できるだけ早く、かつ正確に

* 東京大学気候システム研究センター。

© 2009 日本気象学会

顕著気象現象の発現を予測し、それを市民に伝えることは、気象庁のみならず、気象学に携わるもの全てにとっての使命である。

どんな予測にも不確実性は避けられない。予測対象が難しくなれば不確実性も大きくなる。現状の観測網、科学技術のレベルでは、1時間に100 mmを超えるような局地的集中豪雨をピンポイントで予測することは不可能である。台風についても1、2日先ならともかく1週間先となると大きな誤差が伴う。そもそも台風ができるかどうかになるともっと難しい。それでは何の情報も出せないかということ、そんなことはなく、不確実性を定量化するアンサンブル予報技術などを駆使すれば、被害の回避、軽減につながるポテンシャル予報は可能である。ポテンシャル予報や確率予報と言うと一般の市民には、わかりにくい、使いにくい、という印象が避けられないだろう。不確実性を伴う予測情報をいかに有効にユーザに伝えるかは、天気予報、気候予測に限らず、予測科学の大きなテーマである。

集中豪雨の短時間（ポテンシャル）予測、台風の延長予測や、飛行場予報などの局地予測の高精度化は、数値予報の直近の大きなテーマであり、観測網の充実、データ同化、アンサンブル予報技術の向上、雲など空間的に細かい気象現象の再現精度を上げたコンピュータモデルの開発等が一体となって推進されて初めて実現するであろう。

また、気象の人は、気温や降水量の予測を出すことに腐心するが、一般ユーザの求めるものは、土砂崩れが起こるのかどうか、逃げる必要があるのかどうか、といったもっと直接的な情報である。気象予測情報から土壌水文モデルや河川モデルなどを用いてより直接的な災害情報に変換し伝える努力をさらに続ける必要がある。長期予報や気候予測では、ダム操作など水資源管理や農作物の収量や水産資源の変化情報を提供する方向へと向かうべきであろう。

3. 予報の延長

予測期間の延長も数値天気予報の大きな課題の一つである。明日明後日予報の成功のみに満足することなく、コンピュータモデルを用いた数値予報の手法は、10日程度先までの中期予報（日本では週間予報）、1か月先までの延長予報、さらにその先、1～2年先までの長期予報へと拡張されてきた。エルニーニョ現象の予測は1990年代に実用化され、日本の気象庁は世界

でもいち早く、90年代後半に、延長予報にコンピュータモデルを用いた手法を導入した。いまや、世界中の研究機関で実験的な長期予報研究の花盛りである。

1980年代までは、「果たして天気予報のような初期値問題の手法で力学的長期予報が可能か」といった議論がさかんに行われた。当時は、全球大気大循環モデルの数か月積分がようやくとといった状態であったし、エルニーニョ現象の力学もよくわからず、まして、大気のカオス性により、2週間以上先の決定論的予測（短期予報のようにある日ある町の天気の予測をすること）は理論的にも不可能、とされていたのであるから、無理はない。

しかし、国際研究計画 TOGA (Tropical Ocean and Global Atmosphere, 1985-1995) などにより、エルニーニョ現象の理解が進み、エルニーニョに伴う東太平洋の海面水温については現在では1年以上先までの有効な予測が可能である。コンピュータの発達にも助けられ、異常気象をもたらす大気循環の偏差についてのコンピュータモデルによる長期予報が行われている。

しかし、エルニーニョのように比較的寿命が長く、しかも変動の顕著な（振幅の大きい）現象はともかく、異常天候をもたらす大気循環の微妙な変化の長期予測は極めて難しい。コンピュータが速くなったのでモデルによる長期予測は盛んに行われるようになったが、精度が思うようには上がっていない。

長期予報は、気象庁のような現業機関のみならず、気象研究界も乗り出して、よりよい予測の実現を模索すべき分野であろう。異常気象が起きても多くの場合、何が原因でそうなったのか特定できることは稀である。また、カオスを越えて1か月以上先、どのような現象なら予測可能なのかもはっきりしない。季節平均程度の時間スケールでは、海や大陸の陸面条件など、ゆっくり変化する（大気にとっての）境界条件に支配される予測可能成分がある、とよく言われるが、海も陸もゆっくりではあるが大気とともに変化するし、エルニーニョになりそう、程度の大雑把な予想では、異常天候にともなう微妙な大気循環のずれまでは予測できない。

1か月予報では、大気解析データの品質向上もあって、地球上はるかに離れた場所がロスビー波等の大気波動や大気固有の変動モードを通じて遠隔結合（テレコネクション）されているようすがありありと見えるようになってきた。波動の励起メカニズムなどの研究

が進めば、長年の課題であった、カオスの壁を越えた長期予報の精度向上も望めるのではなかろうか。研究界への期待も大きいと思う。ただし、すでに起こったことをああだこうだという研究ばかりでは期待ほどの進展は得られるかどうか。得られた仮説を予測の成功という形で実証するような研究姿勢、体制が望まれる。

予報の延長という観点では、気候予測研究界では、近未来予測、あるいは十年規模気候変動予測の議論が、にわかには盛り上がってきている (Meehl *et al.* 2009)。人為起源の地球温暖化という人類の重要課題にあたって、定量的な適応策、緩和策の策定には、100年も先の話ではなく、30年程度先の定量予測が必要であるが、そのような近未来予測では、二酸化炭素やエアロゾルの人為排出量のような、気候のコンピュータモデルに境界値として与えられる量もさることながら、太平洋や大西洋で発見された十年規模の気候変動の動向が現在どうなっており、今後どうなるか、という、天気予報のような初期値問題としての様相が出てきたのである。エルニーニョ予測がようやく使いものになるかならないかの段階で、十年規模現象の予測とはきわめて大胆な試みに聞こえるが、数十年の寿命を持つ現象が認知可能なら、その半周期くらいは予測できてもおかしくはない。実践的予測研究は、エルニーニョのときの経験が示すとおり、現象に対する理解を飛躍的に増進させる。十年規模予測に対する科学者の知的好奇心は大いに盛り上がっており、いくつか希望の持てる結果も出つつある。

4. 天気予報から地球環境予測へ

数値天気予報で実証されたコンピュータモデルの有効性は、より時間スケールの長い気候の問題では、大気、海洋の運動とそれらと陸面や海水などとの間の相互作用をあつかう、大気海洋結合気候モデル (atmosphere-ocean coupled general circulation model; AOGCM) の発展を促し、二酸化炭素増加等の人為要因に対する気候の変化を計算する道具として、IPCC 報告書等にまとめられたような成果を挙げ、地球温暖化という重要課題への人類の迅速な対処を促す役割を果たしてきた。さらに、気候モデルは、砂塵、海塩などの自然起源エアロゾルや硝酸、炭素性の人為起源エアロゾルの放射、雲への影響を計算し、また、大気化学過程、陸面や海洋の炭素循環を含んだ生物地球化学過程も含んだ「統合地球環境モデル (earth system model; ESM)」へと進化した。温暖化予測も

二酸化炭素量を外部条件として与えるのではなく、人為排出量に基づきモデル内部で計算する手法が主流になりつつあり、成層圏化学モデルはオゾンホール将来動向を予測する。

砂塵やエアロゾル、化学物質の長距離輸送-反応モデルは、黄砂情報や化学天気予報としてすでに実用化も始まっており、地球環境モデルは、数十年や100年先の予測だけのものではない。

数値予報技術のもたらした大きな福音の一つに、長期再解析がある (Onogi *et al.* 2007)。これは、予測の初期値をこしらえるためのデータ同化技術を、観測データとモデル情報の融合手段ととらえ、現在の高度な技術を過去数十年の観測データに適用して、高精度かつ均質な長期データセットを作る試みである。数十年前の気象データは、当時の未熟なデータ同化技術により近年のものより精度が悪く、長期予報などで、長期間気候平均やそこからの偏差を解析する際に著しい困難となってきた。精度は高いが時空間的に隙間の多い観測データと、時空間的には稠密であるが人工物であるがゆえに誤差が避けられない数値モデルという二つの手段が相補って、各々単独では得られない高精度の地球監視データセットを作る、再解析が行えるようになったことは、長期予報や気候監視に多大なインパクトがあった。次世代は、統合地球環境モデルを用いて気象、海象のみならず、総合的に地球環境の監視が行える高精度の再解析データセットが作り出され、統合地球環境モデルは、最新の地球環境監視衛星等のデータを取り込みながら、時々刻々地球環境のダイナミックな変動の様子を明らかにしてゆくことだろう。

5. Seamless prediction

前節に述べたような、数値予報の天気予報から地球環境監視予測への拡張は、実は20年前、数値予報30周年記念の冊子の中で、後に数値予報班長も務められた佐藤信夫さんが、「30年後の数値予報—リチャードソンの夢を超えて—」と題するエッセイ (佐藤 1990) において、明確に予言されたとおりの展開である。筆者は、釈迦の掌上の猿にすぎない。このエッセイの中で佐藤さんは、「大統一モデル」についても語っておられる。その線に沿った議論も現在活発に行われているので触れておこう。

予測の実手法は予測対象によって微妙に異なる。予測には不確実性が避けられず、その半分は観測網の不足によるものとしても、残りは、予測に用いるコン

コンピュータモデルの、人間の作り出したものであるがゆえの不完全さによる。われわれの気象、地球環境システムに対する知識、理解の不足によるといつてよい。IPCC 第4次評価報告書で繰り返し述べられているとおり、地球温暖化の将来予測が、同一の将来の社会経済シナリオを用いても使うモデルによって定量的にばらつくのは、モデルで表現される雲やエアロゾル過程についての知識の不完全性によるものである。モデルの計算格子以下（サブグリッドスケール）の現象の集団効果は、パラメタリゼーションとよばれる半経験的な方法を用いて表現せざるを得ないが、ここに含まれる不確実性がひいては結果のばらつきを産む。とくに、現在の数値予報モデルや気候モデルでは個々の雲を解像することができないため、その集団効果のパラメタリゼーションに大きな不確実性が避けられない。雲内部での雲粒成長等の微物理過程、それに与えるエアロゾルの効果など、きわめて不確かである。

計算機能力が向上すれば、細かい現象を解像できるようになるので、パラメタリゼーションの経験性を除去することができるようになる。例えば、1 km 以下の計算格子を有するモデルでは、個々の雲をある程度表現できるようになるので、雲集団が数十 km 以上の大規模場に与える効果における経験性が大幅に軽減される。したがって、気象モデルは1 km 以下の雲解像領域に入ることによって明確な進化を遂げることになる¹³ (WCRP 2009)。地球シミュレータの登場により、全球を3.5 km 格子で覆った計算ができるようになり、日本は世界に先駆けて夢への実現に大きな一歩を踏み出した (NICAM モデル; 佐藤・富田 2008)。

地球シミュレータに象徴される計算機の進展は、現在では短期予報、長期予報、気候予測等、予測対象、用途別に異なる解像度や実装するプロセス (例えば海洋運動を含む含まないなど) でモデルを用意し、目的に応じて (モデルの不完全性を補うための) パラメータ調整を行うなどの開発が行われているが、seamless prediction とは、できる限りこのような冗長な開発をやめて、短期予報から気候予測まで同一のモデルで、調整を行うべきではないかという議論である (WCRP 2009; Brunet *et al.* 2009; Palmer *et al.*

2009)。もちろん、計算機能力一杯の最高分解能モデルを数十年以上走らせることは現在も将来も困難であるので、用途に応じて解像度は落としてもよいが、パラメタリゼーションの調整等は (仮にあったとしても) どの時間スケールでも通用するような方法で行えるように、というほどの意味であると私は理解している。長期予報や気候予測のためのモデルのパラメタリゼーション改良の指針が、データ同化~短期天気予報のような多数の短い積分の解析から得られることは実例でも示されている (Rodwell and Palmer 2007)。雲解像大統一モデルの実用化にはまだ10年以上の歳月を要しようが、少なくとも短期予報や長期予報に用いられる全球大気モデルと地球温暖化予測等に用いられるモデルを同一仕様で開発してゆくアプローチは、気象庁/気象研究所などを初め各国の気象機関を中心に始められている¹⁴。

6. おわりに

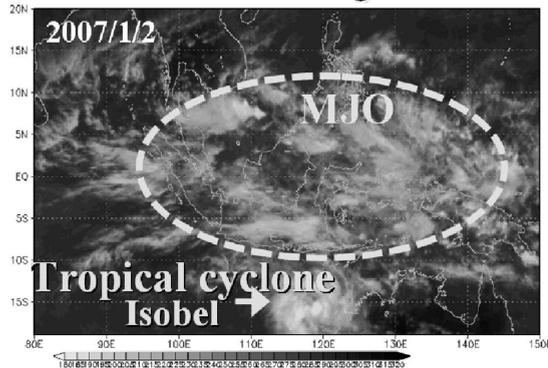
一般の方も含む講演会の要旨ということで、業界の事情も説明しながら、個人的な見解は抑え気味に書いた。最後に少しでもざつぱらんな感想を述べたいと思う。

まず、数値予報の成功は全ての気象関係者にとっての誇りである。社会にもっとも役立っている科学成果の一つであると私は固く信じ、その分野で生計を立てていることに誇りを持っているし、持ち続けたいと願っている。一方で、数値予報技術はあまりに高度化し、私のような石頭では追いかけてゆくのがつかなくなってきている部分もある。モデルそのものは大学でも使えるようになってきたが、データ同化などになると、道具が大掛かりになって手が出にくくなる。数値予報、研究界双方の歩み寄りとコミュニケーションの増進が必要であると感じる。40年以上前、数値予報の黎明期には東京数値予報グループ (NP グループ) という伝説の研究者集団があり、大学の人も気象庁の人も数値予報の実現と気象力学の進展に情熱を傾けていたと聞く。現在でも、気象庁と気象学会の間の気象研究コンソーシアム、異常気象分析検討会、非静力学モデル研究会などその流れを引き継ぐ活動がある。これ

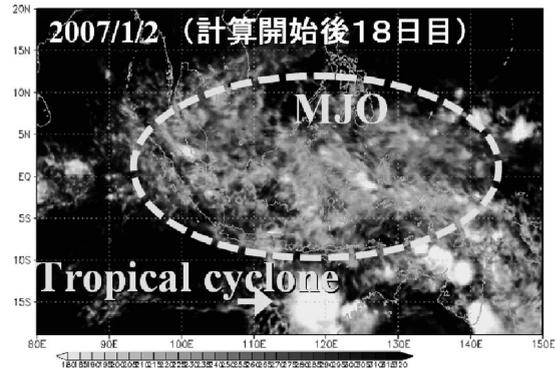
¹³ 次のブレイクスルーは、乱流や雲内の微物理を陽に解像することで訪れるだろうが、それには2~3桁以上の高解像化が必要である。ただし、全地球についてそのような高解像度化は無理でも、プロセスを取り出して研究することは、当然できる。

¹⁴ ところで、天気予報に加えて、長期予報、地球環境監視予測と守備範囲が急拡大すると、気象庁の計算機だけではとても足りなくなる。財政逼迫の折、困難な話ではあるが、体制の整備も重要な課題の一つだろう。

MTSAT Infrared Image



NICAM



第1図 2007年1月2日のMTSAT赤外画像(左)と全球雲解像モデルNICAMによる予測18日目の計算値(右). 熱帯季節内変動Madden-Julian Oscillation (MJO)の東進がよく予想され, 南半球での台風の発生が予測されている。(Fudeyasu *et al.* 2008; 図提供佐藤正樹博士)

らの一層の活性化を望みたい。個人的には、長期予報、十年規模予測や、台風などのポテンシャル予測、アンサンブルカルマンフィルタを用いたデータモデル融合などは、研究的にも魅力的な課題だと思っているので、現場の方にも有用と思える研究を推進したいと考えている。

数値予報や気候予測情報の成果をより広く社会一般に有用な情報に変換してゆく活動の意義はどなたも承知のことと思うが、異分野間コミュニケーションは存外難しいものである。学界からも協力が必要だろう。

全球雲解像モデルは、気象学、数値予報に間違いなく大きなブレークスルーをもたらす。すでに、NICAMによる赤道季節内振動とそれに伴う2週間後の台風発生予測の可能性 (Miura *et al.* 2007; Fudeyasu *et al.* 2008) という興味深い報告がある。ただ、これらが雲を解像しない通常の客観解析初期値からの結果であることを考えると、私には大規模場と積雲群間のパラメータ化可能性を暗示するものではないかとも思える。すべての局面で何もかもを解像することは100年経っても無理であろうが、進化した計算資源を生かして、プロセス解像の結果をもとに、経験に依存しないパラメタリゼーション=スケール間相互作用の本質に迫る研究が可能になりつつある。予測とか社会貢献とかは畢竟プロである現業官庁に任せざるを得ないと思うが、このあたりは、研究コミュニティの本懐を遂げる場ではなかろうか。

いずれにせよ、雲解像予測がこれからますます活発になり、現業やらプロジェクトやらを越えたところで

NPグループの興奮が甦るとよいと思う。

数値予報のさらなる進化を願い、また、自分でも多少はそれに貢献したいと思いつつ筆を置く。

参考文献

- Bjerknes, V., 1904: Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Meteor. Z., 21, 1-7. (Translation by Yale Mintz)
- Brunet, G., M. Shapiro, B. Hoskins, M. Moncrieff, R. Dole, G. Kiladis, B. Kirtman, A. Lorenc, B. Mills, R. Morss, S. Polavarapu, D. Rogers, J. Schaaake and J. Shukla, 2009: Toward a seamless process for the prediction of weather and climate: The advancement of sub-seasonal to seasonal prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., to appear.
- Fudeyasu, H., Y. Wang, M. Satoh, T. Nasuno, H. Miura and W. Yanase, 2008: Global cloud-system-resolving model NICAM successfully simulated the lifecycles of two real tropical cyclones. Geophys. Res. Lett., 35, L22808, doi: 10.1029/2008GL036003.
- Meehl, G. A., L. Goddard, J. Murphy, R. J. Stouffer, G. Boer, G. Danabasoglu, K. Dixon, M. A. Giorgetta, A. M. Greene, E. Hawkins, G. Hegerl, D. Karoly, N. Keenlyside, M. Kimoto, B. Kirtman, A. Navarra, R. Pulwarty, D. Smith, D. Stammer and T. Stockdale, 2009: Decadal prediction: Can it be skillful? Bull. Amer. Meteor. Soc., submitted.
- Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda and K. Oouchi, 2007: A Madden-Julian oscillation event

- realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, **318**, 1763-1765.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007 : The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Palmer T. N., F. J. Doblas-Reyes, A. Weisheimer and M. J. Rodwell, 2008 : Towards seamless prediction : Calibration of climate change projections using seasonal forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 459-470.
- Richardson, L. F., 1922 : *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press (reprinted by Dover Publications, New York, 1965, with a new introduction by Sydney Chapman).
- Rodwell, M. J. and T. N. Palmer, 2007 : Using numerical weather prediction to assess climate models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 129-146.
- 佐藤正樹, 富田浩文, 2008 : 準一様格子を用いた全球雲解像大気モデルの開発とそれによる熱帯対流雲集団のシミュレーション—2007年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, **55**, 451-456.
- 佐藤信夫, 1990 : 30年後の数値予報—リチャードソンの夢を超えて—. 「リチャードソンの夢を超えて—数値予報課 (電子計算室) 30年の歩み—」 記念冊子, 13-19.
- World Climate Research Programme, 2009 : Workshop Report : World Modelling Summit for Climate Prediction, Reading, UK, 6-9 May 2008. WCRP No. 131, WMO/TD No. 1468, 29 pp. (available from http://wcrp.wmo.int/PG_Reports_WCRPSeries.html)
-