

討論

Q(木村)：今のお話にあった雲クラスターの特性は地球全体に当てはまる普遍的なものか？

A：熱帯に関しては多少の地域差は別にして本質的に同一だと考えている。しかし中緯度で激しい現象を伴うメソシステムは別のカテゴリーと考えたい。というのは中緯度は鉛直には安定なことが多く温帯低気圧の力学が支配的で、部分的偶発的に潜在不安定状態が実現する。アメリカのシビアストームがその典型で、上

層での寒気移流と下層での暖気移流の会合によって強い潜在不安定ができる。その際自由対流高度まで負の浮力に打ち勝って持ち上げるための仕事が大きくそれを可能にする特別な仕掛けとしてメソシステムが生じていると思う。さらに、そこではコリオリの力(f)が大きいため、加熱によって渦が作られ易く、そして一旦できると渦の保存で、擾乱のライフタイムが熱帯より長くなり、2〜3日も継続する場合があると考えられる。

4011 (メソスケールモデル)

2. メソスケール数値予報の現状と将来*

瀬上 哲秀**

1. はじめに

天気予報や大雨、集中豪雨などの予測精度向上のためには、メソスケール現象を予測対象とする数値予報モデルが必要である。現在、イギリスやフランス、日本など、いくつかの国でメソスケールモデルが現業化されている。水平分解能としては、イギリスが15 kmのモデルを実現しており、フランスや日本が30 km程度のモデル、その他は50〜60 km程度のモデルである(Bougeault, 1992)。どの国のモデルも静力学平衡を仮定し(イギリスでは1992年12月に非静力学平衡のモデルから静力学平衡のUnified Modelに戻した)、積雲対流についてはパラメタライズする手法をとっている。以下では、気象庁のメソスケールモデルである日本域モデル(Japan Spectral Model, JSM)を中心にメソスケール現象の予測の現状を概観し、将来の開発の主題、今後目指すべき数値予報システムの方向について私見を述べたい。

2. 気象庁・日本域モデルの概要と予測能力

JSMは1988年3月から運用が開始され、1日2回ルーチ的に24時間予報がなされている(Segami et al., 1989)。1992年3月に大幅にバージョンアップさ

れ、水平格子間隔が40 kmから30 kmに、鉛直が19層から23層へと高分解能化している。また、予報解析サイクルや本格的な放射スキームが導入されるなどの

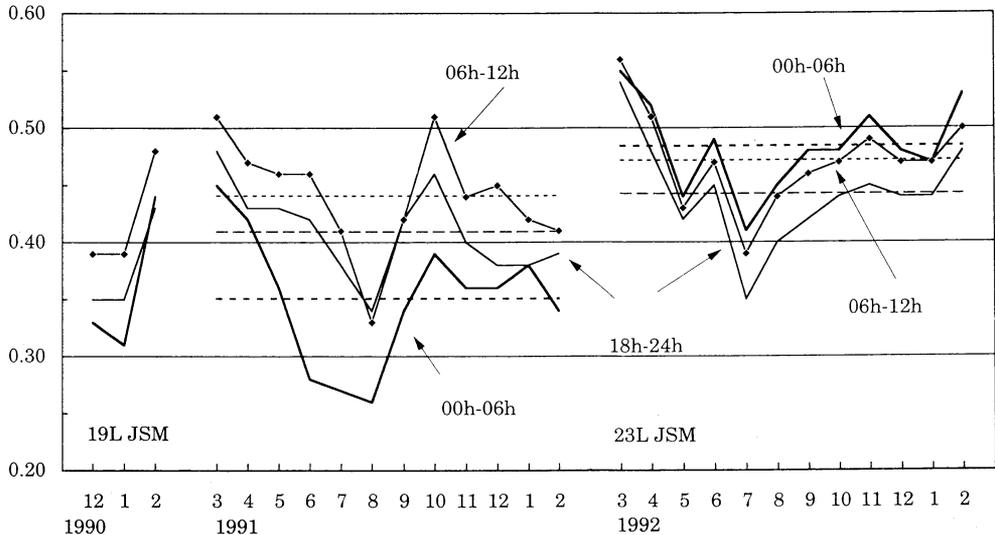
第1表 現在の日本域モデル(JSM)の概要

計算法	スペクトル法 (2重フーリエ法)
格子間隔	30 kmの変換格子 (ポーラーステレオ 60°N)
格子の数と波	変換格子 129 * 129 最大波数 83 * 83
鉛直の層数	23
時間差分	セミインプリシット
データ同化	予報解析サイクル
境界値	ASMの予報値
物理過程	短波 放射： 長波
放射：	
降水過程	大規模凝結 湿潤対流調節 雨滴の蒸発
雲量	相対湿度の経験的関数
海面水温	毎日の解析値
海氷分布	週2回の解析値
地表面温度	地中の3レベル地温を予想
境界層	クロージャーマデル(L2) Louisのスキーム

* Current status and perspective of mesoscale numerical weather prediction.

** Akihide Segami, 気象庁数値予報課.

JSM Threat Score 1mm/6hours



第1図 6時間1ミリ以上の降水予測に対する、スレットストアの変遷。予報時間0-6h, 6-12h, および18-24hの3つのスコアを示す。破線は各1年間の平均値。
1992年3月以降、新しいJSMになって、予測精度が大幅に向上していることが分かる。

改良がなされた(瀬上ら, 1993年度日本気象学会春季大会予稿集)。現在のJSMの概要を第1表に示す。

このモデルの変更により、降水の立ち上がりの問題や、山の風上側での地形効果による大雨の予想など、降水予測の精度が大幅に向上した。このことは、第1図に示したスレットスコア¹⁾(6時間1ミリ以上の降水に対応)の変遷を見ても明らかである。さらに、地上気圧の予想や放射過程の導入による下層雲の予想など、ほぼ全般にモデルの性能が向上していた。多少の当たり外れや問題点も残っているが、今回の変更により、メソ α スケール擾乱(水平スケール200~2000km, ここではOrlanski (1975)の定義にしたがった)に対する予報はかなり完成の域に近づいたと考えている。

3. メソ β スケール現象の予測

今後の課題はメソ β スケール現象(水平スケール20~200km)をどう予測するかに力点が移ってきている。このスケールでは、まだ個々の積雲対流を取り扱うのではなく、積雲の集合である雲クラスターやレインバンド、スコールラインを対象とする。1983年の島根豪雨のように日本付近で起こる集中豪雨はこの程度のスケールを持っている場合が多い。現在のモデルで

1) 的中率の一種であり、数値が高いほど精度が良いことを示す。

はあくまで大雨のポテンシャルを予測するに過ぎない。時間・場所を特定した量的な豪雨の予測には、メソ β スケール現象の予測はぜひ必要である。

それでは、果たしてこのスケール現象を予測することは可能であろうか。

一般的に、数値予報モデルで現象の予測が可能なためには、

- ①現象を表現できるほど、水平・鉛直ともに高分解能であること、
- ②物理過程(積雲対流・放射・境界層)のパラメタリゼーションがその現象を表現する上で適切であること、
- ③初期場に現象(のタネ)が解析されていること、が必要である。

①については、メソ β スケール擾乱のためにはとにかく10km, 5kmと水平分解能を上げることが不可欠である。その際、鉛直の分解能も同時に上げる必要がある。このほとんどの部分が計算機の能力に依存するが、セミラグランジアンなどの効率的な計算手法の開発もする必要がある。また、静力学平衡の妥当性についても押さえておくべきである。

さて、分解能を現在よりさらに細かくした時、②の物理過程はどうすれば良いか。問題は積雲対流のパラメタリゼーションである。大規模場を予測するモデル

では、積雲対流の集団としての効果をパラメタライズすれば良かった。また、1 km 以下の水平分解能を持つ雲モデルでは個々の積雲対流を表現することが可能となる。われわれがいま問題としているのは、そのどちらでもない5~10 km 程度の水平格子間隔を持つメソ β スケールのモデルである。

数値積分の1タイムステップの間に積雲対流の1サイクルが完了し、その効果が1つの格子点の中で閉じているという現在のパラメタリゼーションの方式が、メソ β モデルのタイムステップ(1分程度)、空間分解能では成り立つはずもない。また、分解能が細くなるにつれて降水量が多く出過ぎる欠点があるが、日本だけでなく多くの所で報告されている。

この様に問題点が山積しているにもかかわらず、積雲対流のパラメタリゼーションに対する取り組みは、特に日本ではほとんどなされていないのが現実である。外国では、分解能に依存するクロージャー仮定を試みたり、積雲対流の活動度を表す物理量を予測するスキームなどが提案されたりしている(Chen (1990), Randall and Pan (1992) など)。しかし、アメリカ大陸上で有効であったりヨーロッパの高緯度で使われているパラメタリゼーションが、梅雨前線などによる日本の豪雨にそのまま適用できるかどうか分からない。計算機のスピードが5年で10倍としても、1 km の数値予報モデルが実用化されるのは20年以上も先の話である。それまでの間、パラメタリゼーションで行くのか、あるいはパラメタライズしないやり方をとるのかも含め、5~10 km モデルでの積雲対流の問題を、数値予報課だけでなく気象学会全体でもっと積極的に取り組むべきであると考えます。

③の初期値に関して、ゾンデによる高層観測網が不十分なことは今更いうまでもない。それを補うため、現在でも衛星から求めた風を利用したり、レーダー、アメダスなどの高分解能データを水蒸気の客観解析に利用している。また、予報解析サイクルの導入でモデルの分解能に見合った初期値を作り出すことに成功している。メソ β スケール現象のためには、レーダー、アメダスから推定した非断熱加熱をモデルの初期値化に利用する²⁾など、既存のデータを積極的に利用する必要がある。さらに、ウインドプロファイラーやドップラーレーダー、航空機による気温・風の観測データ

2) この点は1993年5月11日より、ルーチンのJSMに取り入れられることとなった。しかし、鉛直の加熱分布をどう与えるかなどの問題点は残っている。

(ACARS)、また TRMM など衛星を使った降雨観測データの利用を考えるなど、メソスケール現象の予測のための最適な観測網の構築も検討して行く必要がある。連続的4次元同化やアジョイント法(変分法)などのデータ同化の手法も合わせて開発していく必要がある。

4. 今後のメソ数値予報システム

今後のメソ β スケールの数値予報システムを考える場合、いままで述べてきたこと以外に、メソスケール現象の予測可能性(予測可能な期間)についても検討しなければならない。初期値にはどうしても誤差や不確定性は避けられない。乱流理論に基づいた議論(Lorenz, 1969)では、メソ β スケールの現象はほんの2~3時間程度しか予測可能な期間がないことになる。一方、Anthes *et al.* (1985)が言うように、初期値の小さな誤差に対してメソスケールモデルは鈍感であるという、楽観的な見方もある。地形効果の強い擾乱や大規模場のフォーシングが強い場合には予測可能性が増すなど、擾乱によってかなり結果が異なるはずである。また、擾乱のライフサイクルを越えた、第2世代の擾乱が予測可能かどうか疑わしい面もある。理論的、およびモデルを使った研究が望まれる。

この点について現時点での私見を述べれば、メソ β スケールの現象(特に降水系)に対して数値予報モデルで決定論的に予測できるのは、高々12時間程度ではないかと考える³⁾。3時間先までの降水予測については、外挿法を主体とする短時間予報システムが既に気象庁で業務化されている。したがって、われわれが当面目指すべきものは、3時間から12時間先あたりまでの力学的短時間予報である。予測可能かどうか問題の残る24時間先の予報を1日2回行うより、12時間予報を1日4~6回程度行うほうが、防災上はるかに有益である。これは、レーダー、アメダスなどの有効利用と連続的な4次元同化システムの構築で十分に実用化が可能である。

12時間以降の予報についても、地形性の擾乱に限れば十分に予測可能であり、またそれが重要な場合が多い。しかし、それ以外のメソ β 擾乱の場合、決定論的な方法での予測は困難であり、アンサンブル予報で行くべきであると考えます。ここで言うアンサンブル予報

3) ここでいう予測とは、あくまでも時間と場所を特定した量的な予測であり、現象の発現が定性的に表せれば成功とするシミュレーションとは根本的に異なる。

とは、初期値の不確定性（あるいは観測誤差）を反映する多数例⁴⁾の初期条件から出発した数値積分の統計的処理を意味する。これを用いれば、起こりうるいくつかのシナリオを確率的に表現することができ、ユーザーに対する情報価値が増大する。全球モデルを用いた週間予報や力学的1か月予報に対しては、アンサンブル予報が有力な手法として、ECMWFや気象庁でも積極的に取り組まれるようになってきた (Palmer *et al.* (1992), 高野ら(1993))。メソスケールモデルを対象とした研究も行い、この手法の有効性を調べておく必要がある。現状では、モデル分解能を上げる効果の方が大きい。しかし、水平分解能が5 km, 10 kmのモデルが実現した時、決定論的な方法でさらに高分解能を目指すべきか、あるいはアンサンブル予報のために計算機資源を割くべきかの選択を迫られる時がいずれやってくるであろう。

最後に、防災上非常に重要なメソ β 現象の予測を成功させることは、ひとり気象庁数値予報課の力だけでできるものではない。できれば気象学会がイニシアティブを取り、数値予報課、気象研究所、大学などが協力しあい役割分担をうまくやりながら、効率的な開発を行っていくべきであると筆者は考える。

討論

Q (広田) : α , β , γ という分類は嫌い。メソ α の予測ができていてということは、メソ α スケールの擾乱は予測できていないメソ β の影響は受けていないということか？

A : モデルの守り範囲内はよく予測できている。

C (木田) : 擾乱の予測が同じ距離だけずれてもメソ α と β では相対的に見て精度が異なるから同じ土俵では議論できない。

Q (山田) : 水平分解能の他、鉛直分解能も重要。放射冷却など雲の効果をも正しく表現するには数mの分解能が必要な場合がある。

A : ごく薄い層での大きな非断熱加熱がどの程度メソスケール現象に影響するか見積りが不十分。一般に、今使われているモデルは水平分解能に比べて鉛直分解能が不足している。

Q (山田) : メソスケール現象の確率的予測の話があったが、確率にしてみると、「はずれ」がなくなる。それでいいのか？

A : 評価の問題は別として、いろんな可能性を示すことで、決定論的予測に比べて情報としての価値が増すと考えている。

参考文献

- Anthes, R. A., Y. H. Kuo, D. P. Baumhefner, R. M. Errico and T. W. Bettge, 1985 : Predictability of mesoscale atmospheric motions, *Advances in Geophysics* 28 B, 159-202.
- Bougeault, P., 1992 : Current trends and achievements in limited area models for numerical weather prediction research. PWPR Report Series No. 3, WMO/TD No. 510.
- Chen D. H., 1990 : A prognostic approach to deep convection parameterization for numerical weather prediction. Submitted to *Mon. Wea. Rev.*
- Lorenz, E. N., 1969 : The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus* 21, 289-307.
- Orlanski, I., 1975 : A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 56, 527-530.
- Palmer, T., F. Motteni, R. Mureau, R. Buizza, P. Chapelet and J. Tribbia, 1992 : Ensemble prediction. ECMWF Tech. Mem. No. 188.
- Randall, D. A. and V. Pan, 1992 : Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. "Cumulus Parameterization" a Meteorological Monograph. To be published by the A. M. S.
- Segami, A., K. Kurihara, H. Nakamura, M. Ueno, I. Takano and Y. Tatsumi, 1989 : Operational mesoscale weather prediction with Japan Spectral Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 907-924.
- 高野清治, 前田修平, 工藤達也, 露木 義, 山田真吾, 1993 : 気象庁全球モデルによる1か月予報実験—予報精度の予測—, 1993年度日本気象学会春季大会予稿集, C215.

4) 方法論や対象によっても異なるが、力学的1か月予報では数十例程度である。