

## 力学的長期予報の現業化\*

前 田 修 平\*\*・小 林 ちあき\*\*\*

### 1. はじめに

気象庁は1996年に1か月予報, 2003年に3か月予報と暖・寒候期予報に数値予報を導入した。本稿では, これら力学的長期予報<sup>1)</sup>の現業化の経緯を振り返る。

数値予報の初期値に含まれる誤差を0にすることは出来ない。また, 大気には, 初期状態が少し異なるとその後の時間発展が大きく異なるというカオス的な性質がある。このため, 予報時間の長い1か月予報は決定論的に行うことができず, 確率的に行う必要がある。この確率予報を実現するために考えられたのが, 解析誤差程度の僅かに異なった複数の初期値からスタートした複数の予報を利用するアンサンブル数値予報である<sup>1)</sup>。1か月予報へのこのアンサンブル数値予報の導入の経緯を第2節で述べる。

大気の初期値問題としての性質が強い1か月予報に比べ, より予報時間の長い季節予報では, 海面水温などゆっくり変動する境界条件の影響を予測することが重要である<sup>2)</sup>。この季節予報への数値予報の導入について第3節で解説する。

### 2. 1か月アンサンブル数値予報の現業化

#### 2.1 最初の1か月アンサンブル数値予報実験の成功

1か月予報に数値予報を用いる試みは1979年まで遡ることが出来るが, ここでは, 予報部数値予報課と長期予報課(現地球環境・海洋部気候情報課)が協力して1か月アンサンブル数値予報の現業化に向けた開発

を開始した, 1980年代後半から話を始める。当時, ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)や米国気象センター(後の米国環境予測センター, NCEP)などで, 全球大気モデルを用いた1か月アンサンブル予報実験が盛んに行われていた。アンサンブルの構成方法は, Lagged Average Forecast法(ある時間間隔で行われた複数の解析値からそれぞれ予報を行い同じ時刻の予報でアンサンブルを構成するという単純な方法<sup>3)</sup>, 以後, LAF法と略す)が用いられていた。

気象庁では, 1988年3月に全球大気モデルによる8日予報の毎日運用を開始し, 同時に15日予報の月3回運用も開始した。この15日予報では, 実況で熱帯の季節内振動の東進が顕著な時にそれをよく予報し, そのときの北半球循環場の予報もよい傾向があるという, 1か月数値予報の可能性を示す注目すべき結果が得られていた<sup>4)</sup>。これら15日予報の実績を踏まえ, また, 外国の数値予報センターにおける実験にも刺激され, 気象庁でもLAF法による1か月アンサンブル予報実験を開始した<sup>5)</sup>。

最初の実験は, 1988年12月29日を最新の初期値とする9メンバーで行われた。その予報成績は実験前の想定を大きく上回る驚異的なもので, 10日平均北半球500 hPa高度のアンサンブル平均予報のアノマリ相関係数は, 予報20日ごろまで0.6を超えた。極渦が強い正の符号の北極振動パターンと, ヨーロッパから東アジアにかけての波列状のユーラシアパターンなど, 北半球規模の大規模な変動が見事に予報されていた。続いて1989年1月29日を最新の初期値とする実験を行った。この事例も高い予報成績を示し, しかも, 2月初めに発生したアラスカ付近の強いブロッキング高気圧

\* Introduction of operational numerical long-range forecasting systems at JMA.

\*\* Shuhei MAEDA, 気象庁地球環境・海洋部気候情報課。

\*\*\* Chiaki KOBAYASHI, 気象庁オゾン層情報センター。

© 2007 日本気象学会

† 気象庁の用語の定義とは異なり, ここでは長期予報を1か月予報と季節予報(3か月予報, 暖・寒候期予報)とに分けて述べる。

を予測できたグループとそうでないグループに分かれるという、大気のカオス的な性質を明瞭に示す興味深い結果も得られた。

## 2.2 1か月アンサンブル数値予報の現業化まで

2つの予報実験の成功により、力学的1か月予報への期待が一気に高まった。しかし、その後の本格的な多数事例の予報実験<sup>5)</sup>の結果はそれほど楽観的なものではなく、現業化に向け解決すべき課題をいくつか浮き彫りにした。特に深刻な問題のひとつは、モデルで予測されるブロッキング高気圧の頻度が予報時間とともに減り、1か月予報の後半には観測される頻度の半分程度になってしまうことであった<sup>6)</sup>。このことは、たとえアンサンブル数値予報を行ったとしても、1か月予報にとって決定的に重要な予報対象であるブロッキング高気圧を、確率的にも正しく予報出来ないことを意味している。また、古い初期値を使うLAF法では、予報前半のアンサンブル平均予報の精度が最新の初期値から始めた単独予報の精度を下回ること<sup>7)</sup>や、アンサンブル平均予報の誤差とアンサンブルメンバー間の拡がりとの相関関係が得られないため予報精度の予報ができないこと<sup>8)</sup>など、アンサンブル数値予報のための初期摂動作成手法にも問題があることも示された。

このうちブロッキング高気圧の頻度の問題に関しては、その後の全球大気モデルの改良で大きく改善された。数値予報課では1996年の数値予報計算機システム更新に向け全球大気モデルの水平・鉛直解像度をT213L30にあげ、物理過程も大幅に改良した。その中解像度版(T63L30)のモデルを用いて1か月予報実験を行ったところ、ブロッキング高気圧の頻度が観測に近くなった。小林ほか<sup>7)</sup>は、物理過程、特に積雲対流スキームの改良で熱帯域の降水量の再現性がよくなったこと<sup>8)</sup>が、この改善に効果的であったことを示唆している。

初期摂動作成手法の開発については、ECMWFとNCEPが先行した。ECMWFでは特異ベクトル(SV)法が開発された<sup>9)</sup>。SV法は、簡略化した数値予報モデルを用いて有限時間で線形成長が最も速い擾乱(SV)を求め、それを解析値に重ねる手法で、初期値に含まれる誤差の確率分布よりも、予報をスタートした後の誤差成長を重視するものである。一方、NCEPでは成長モード育成(BGM)法が開発された<sup>10)</sup>。BGM法は現業数値予報解析サイクルの中で成長モードを育成し(breed)、それを解析値に重ねる手法である。初期値に含まれる誤差の特徴を重視し

た方法で、SV法と違いその計算に簡略化したモデルを必要としないというメリットもある<sup>11)</sup>。気象庁では、ECMWFと同様にSV法を開発し、これによる予報実験を行ったところ、アンサンブル平均予報の誤差とスプレッドとの相関関係がある程度得られるようになるなど、一定の改善が見られた<sup>11)</sup>。

以上のような開発、また、アンサンブル数値予報の結果を発表予報の要素に翻訳するガイダンスの開発<sup>12)</sup>、北半球大気的主要変動モードの予測に関する調査<sup>13)</sup>などの成果を踏まえ、気象庁は1996年の数値予報計算機システム更新時に、1か月アンサンブル数値予報の現業運用を開始した。一般に公表している1か月予報にアンサンブル数値予報を用いるのは、世界で始めてのことであった<sup>14)</sup>。同時に、確率予報を導入し、予報精度に見合うよう予報期間を変更するなど、1か月予報の発表内容を大幅に変更した<sup>14)</sup>。この時点で、長期予報に初めて確率予報が導入された。

## 2.3 1か月アンサンブル数値予報の現業化以後

1996年の現業化以後、水平・鉛直解像度の増を含む幾度かの数値予報モデルの改良、週間アンサンブル予報の現業化に伴うSV法からBGM法への変更<sup>15)</sup>、陸面解析の開始<sup>16)</sup>、アンサンブル数の増加などを経て現在に至っている(第1表)。

1か月アンサンブル数値予報の導入は、確率的な予報の開始や予報精度の向上に寄与したのみではなく、現場の予報作業も大きく変えた。すなわち、予報官は、短期予報や週間予報と同様に、数値予報天気図類を解釈し、予報を作成することとなった。その結果、予報現場では、1か月予報が対象とする大規模な大気運動とその予測可能性に関する知識が深まった。例えば、大西洋のブロッキング高気圧が、その崩壊の過程でアジアジェット沿いに準定常ロスビー波を射出し、日本の天候に大きな影響を与えること<sup>17)</sup>など、これまであまり知られていなかったことが予報現場で毎週のように議論されている。

また、最近では1か月アンサンブル予報値などを使った研究が大学でも進められ、成層圏突然昇温の予測可能性<sup>18)</sup>、マッデン・ジュリアン振動(MJO)に伴う不安定摂動の解析<sup>19)</sup>など、興味深い研究成果も出てきている。

<sup>11)</sup> ECMWFとNCEPは1992年に週間アンサンブル数値予報を導入したが、1か月予報には導入しなかった。

第1表 長期予報のためのアンサンブル数値予報システム (EPS) の仕様 (2006年4月現在).

システム名称	1か月EPS	季節EPS
メンバー数	50	31
運用頻度	週1回	月1回/年5回
予報時間	34日	120日/210日
数値予報モデル	気象庁全球大気モデル	
仕様名称	TL159L40	TL95L40
水平分解能	1.125度	1.875度
鉛直層数	40層 (モデルトップは0.4 hPa)	
初期摂動作成法	BGM法とLAF法併用	SV法
陸面初期値	陸面データ同化サイクル作成陸面解析値	
海面水温	予報初期日の年平均偏差持続	年平均偏差 (予報初期日以前の30日平均)、気候値、エルニーニョ監視海域の海面水温予報値の統計的組み合わせ

第2表 エルニーニョ予報のための数値予報システムの仕様 (2006年4月現在). 詳しくは、北村<sup>23)</sup>を参照のこと.

1) 大気海洋結合モデル (名称: JMA-CGCM02)	
大気モデル	気象庁全球大気モデル (GSM0103) の T42L40版
海洋モデル	Bryan-Cox型の大循環モデル. 水平解像度は東西は2.5度, 南北は赤道で0.5度, 緯度ともに増加し, 南北20度より極よりでは2度, 南緯70度~北緯65度まで. 鉛直は表層を密に20層.
大気海洋結合	結合間隔は24時間, 海面風応力・熱フラックス修正あり
運用頻度	5日に1回
予報時間	14か月 (エルニーニョ予報には, LAF法による12メンバーのアンサンブルを使用)
2) 海洋データ同化システム	
客観解析法	3次元変分法
同化方法	Incremental Analysis Update
観測データ	表層水温, 塩分, 海面高度
客観解析頻度	1日に1回

### 3. 季節予報への力学的手法の導入

#### 3.1 エルニーニョ現象の予報のための大気海洋結合モデルの現業化

1か月よりも長い, 3か月から半年程度先までの予報をする際に頼りになるのは, 緩和時間が長い海洋の影響を受けた大気の変動である. もちろん, 海洋も大気の影響を受けて変動するので, 季節予報を行うためには, 大気と海洋の相互作用を表現できる大気海洋結合モデルと, 海洋の初期値を得るための海洋データ同化システムが必要となる.

気象庁で季節予報のための大気海洋結合モデルと海洋データ同化システムの開発を始めたのは1980年代末のこと<sup>20)</sup>である. まずは, 気候システムの中で最も主要な年々変動であり, 熱帯のみならず中・高緯度大気に与える影響も大きく, その物理的メカニズムから予報可能性が高い現象と考えられる, エルニーニョ現象の予報をターゲットとした.

これらの開発は, 1995年の海洋データ同化システムの現業化<sup>21)</sup>を経て, 1999年にエルニーニョ予報のための大気海洋結合モデルの現業運用として結実した<sup>22)</sup>. その後, 3次元変分法の導入や塩分などの新たな観測データの利用などによる海洋データ同化システムの高度化, 大気モデルの変更など大気海洋結合モデルの改良を経て, 現在に至っている (第2表). 過去事例を対象としたハインドキャストの結果によれば, 太平洋赤道域中・東部のエルニーニョ監視海域の海面水温の予報精度は, リードタイム6か月でも0.7を超え, エルニーニョ予報としては十分に実用に耐えるものである<sup>23)</sup>.

#### 3.2 季節予報の潜在的予報可能性評価

大気海洋結合モデルの開発と並行して, 海面水温が完全に予報できた場合に到達可能な予報可能性の上限を調べる, 季節予報の潜在的予報可能性に関する研究

が進められた<sup>24,25,26)</sup>. これらの研究では, 観測された海面水温を下部境界条件として全球大気モデルによるアンサンブル数値実験を行うことにより, 海面水温の変動に対する大気の応答成分 (シグナル) とそれ以外の変動成分 (ノイズ) を求め, その比を予報精度の上限と考える. 杉<sup>27)</sup>は, 日本付近の季節平均850 hPa気温の予報精度の上限は, アンサンブル平均予報と観測値との相関係数で0.6程度であり, 降水量はさらに小さいと述べている. これらの研究により, 季節予報の予報可能性に対する理解が深まるとともに, 予報可能性の上限を目指すというモデル開発の目標が明確になった.

#### 3.3 季節予報への力学的手法の導入

3.1で述べたように, 気象庁の現業大気海洋結合モデルは, 太平洋赤道域中・東部の海面水温に関しては実用に耐える予報精度が確認されている. しかしながら, 他の海域では海面水温の予報精度が十分でなく, リードタイムが短い場合は持続予報 (予報初期の年平均偏差が持続すると仮定)の方が, リードタイムが長くなると気候値予報 (年平均偏差を0と仮定)の方が, それぞれ誤差が小さいことが多い. また, 大気海洋結合モデルで中・高緯度大気の高確率予報に必要なアンサンブル数を確保することは, 計算機資源の制限から無理であった. これらの理由により, 気象庁が2003年に始めた力学的手法では, 大気海洋結合モデルによる大気予報結果を用いるという, いわゆる一段階法ではなく, あらかじめ予報された海面水温を全球大気モデルの境界条件として用いる二段階法を採用した. 海面水温は, エルニーニョ監視海域の海面水温予報値, 持続予報, 気候値予報を, それぞれの予報精度を考慮し統計的に組み合わせた値を用いた.

力学的手法の導入にあたっては, 事前に過去18年分

5メンバーのハインドキャストを行い、その精度を検証した<sup>28)</sup>。日本の天候に大きな影響を与えるアジアモンスーンの予測精度が十分ではないなどの問題もあったが、日本付近の気温の予測精度が従前の統計的手法よりは高いことが確認できたので、モデル改良による今後の精度向上も期待して、導入に踏み切った。その後、全球大気モデルの改良等を経て、現在に至っている(第1表)。

#### 4. まとめと今後の課題

長期予報への力学的手法の導入について、過去20年程度の経緯を振り返った。この間、数値予報モデルの改良、アンサンブル数値予報手法の開発等、飛躍的に予報技術が進化した。中でも特筆すべきは、予測可能性に関する科学的な理解が進み、それが技術開発により現業長期予報に生かされるようになったことである。最後に、長期予報の改善に向けた今後の課題について述べ、結びに変えたい。

季節予報については、本来の予測手法であり、既にECMWFやNCEPなどの主要な数値予報センターで実施している、大気海洋結合モデルを直接用いる一段階法の導入が当面の重要な課題である。現在、気候情報課は気象研究所と協力しつつ、大気海洋結合モデルと海洋データ同化手法の改良を行っており、太平洋西部熱帯域の海面水温予測精度の向上など、その成果も得られつつある。また、大気海洋相互作用がMJOの振る舞いに重要な役割を果たしているとの研究もあり、将来的には1か月予報においても大気海洋結合モデルの導入を検討する必要があるだろう。

確率予報を正しく行うためには、アンサンブル手法も改良する必要がある。初期摂動の作成手法については、BGM法、SV法ともに改良の余地は多い。アンサンブル予報に非常に適したデータ同化手法であるアンサンブル・カルマンフィルターも開発中<sup>29)</sup>であり、今後、初期摂動作成法は大きく改善される可能性が高い。また、初期値のみでなく、数値予報モデルの不完全性に起因する予測の不確実性に対処するためのいくつかの異なるモデルの予報結果を利用するモデルアンサンブル<sup>15)</sup>の導入も必要であろう。

長期予報に関係する現象とその予測可能性に関する理解も不足している。例えば、エルニーニョ現象が日本の天候に影響を及ぼすメカニズムとその予測可能性

が十分に理解されているとは言い難い。気象庁と大学・研究機関との連携をより一層深め、これらの現象と予測可能性に関する研究を進め、その成果を現業に効果的に生かす仕組みを構築することが必要である。また、使いにくい確率予報の有効利用を目指し、ユーザーと連携した調査・研究を行うことも必要である。

#### 参考文献

\*参考文献には気象庁の刊行物を多く取り上げた。そのうち、季節予報研修テキストは「季節テキスト」、数値予報課報告別冊は「数値別冊」と略す。

- 1) 高野清治, 1994:平成6年度季節テキスト, 5-50.
- 2) 高野清治, 2003:平成15年度季節テキスト, 4-13.
- 3) Hoffman and Kalnay, 1983: *Tellus*, **35A**, 100-118.
- 4) 露木 義, 1989:数値別冊第35号, 112-138.
- 5) 山田真吾, 1992:数値別冊第38号, 92-113.
- 6) 前田修平, 1995:平成7年度季節テキスト, 21-40.
- 7) 小林ちあきほか, 1999:1999年度春季大会予稿集, 日本気象学会, 120.
- 8) 隈 健一, 1996:数値別冊第42号, 30-47.
- 9) Mureau, F. *et al.*, 1993: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 299-323.
- 10) Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.
- 11) 山根省三, 2002:気象研究ノート, (201), 21-71.
- 12) 渡部文雄ほか, 1995:平成7年度季節テキスト, 44-62.
- 13) Yamada, S. *et al.*, 1997: *Advances in Atmos. Sci.*, **14**, 23-40.
- 14) 酒井重典, 前田修平, 1995:平成7年度季節テキスト, 63-65.
- 15) 経田正幸, 2006:数値別冊第52号, 1-12.
- 16) 徳広貴之, 2002:平成14年度季節テキスト, 76-77.
- 17) 伊藤 明, 前田修平, 2006:平成17年度「異常気象と長期予報」研究集会報告書, 128-132.
- 18) Mukougawa, H. and T. Hirooka, 2004: *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1764-1776.
- 19) Chikamoto, Y. *et al.*, 2007: *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04806, doi:10.29/2006GL028450.
- 20) 木本昌秀, 1989:数値別冊第35号, 74-111.
- 21) 石井正好, 1997:平成9年度季節テキスト, 30-36.
- 22) 吉川郁夫, 1997:平成9年度季節テキスト, 21-29.
- 23) 北村佳照, 2003:平成15年度季節テキスト, 77-86.
- 24) Sugi, M. *et al.*, 1997: *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 717-736.
- 25) Kobayashi, C. *et al.*, 2000: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2111-2123.
- 26) Kusunoki, S. *et al.*, 2001: *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 77-99.
- 27) 杉 正人, 2002:平成14年度季節テキスト, 2-7.
- 28) 気象庁気候・海洋気象部, 2003:平成15年度季節テキスト, 86pp.
- 29) 三好建正, 2006:数値別冊第52号, 80-99.