

アンサンブル予報とその利用*

経 田 正 幸**・林 久 美**

1. 数値予報の誤差を前提とするアンサンブル予報

数値予報とは、物理方程式に基づいて現在の状態(初期状態)から未来の状態を数値計算によって予測する手法である。大気の数値予報の歴史は古く、気象庁は1959年に大型計算機を導入し翌年に数値予報を開始している。その後の計算機処理能力の向上と人工衛星を始めとする新たな気象観測システムの整備、そして数値予報モデルや解析手法の緻密化が精力的に行われた結果、現在の数値予報技術は予報業務になくてはならないといった水準にまで達している。しかし、一方で、「バタフライ効果」として知られる大気の特徴である「初期値鋭敏依存性」のため、初期値に必然的に含まれる僅かな誤差は数値積分中に増幅してしまい、数値予報の誤差を完全になくすことは不可能であることが知られている。

近年の数値予報の技術開発は、数値予報モデルや解析手法の高度化だけでなく、初期値の誤差や数値予報モデルの不完全性を前提とした手法をも対象としている。この手法の代表的な仕組みは、解析誤差程度の違いを表す初期値の集合(アンサンブル)を用意し、それぞれの初期値から数値予報をして予報値の集合を得るというものであり、このような数値予報をアンサンブル予報と呼ぶ。この運用目的は、アンサンブルが表す数値予報の不確実性を定量的に求めることにあり、この情報の活用により、予報精度の向上はもちろん、予報の利用価値を高めることが可能になる。

最初の実用的なアンサンブル予報は、1992年12月にほぼ同時に登場した米国環境予測センター(NCEP)

と欧州中期予報センター(ECMWF)によるものであり、両者の仕組みも複数の初期値を用意するというものであった。第1表に現在実用化されている中期予報(3~10日先を予報対象日とする)用アンサンブル予報の例を示す。近年は、数値予報モデルの不完全性を補完するための技術を導入するアンサンブル予報の実用化が盛んである。

2. アンサンブル予報の性能

前述の通り、アンサンブル予報は、複数の予報を集合として扱うことで、予報のばらつきに関する情報を得るための数値予報技術である。個々の予報をメンバーと呼び、特に初期値の誤差や数値予報モデルの不完全性を考慮しない単独の予報をコントロールラン、それ以外の予報を摂動ランと呼ぶ。また、予報の総数はアンサンブルサイズもしくはメンバー数と呼ぶ。

アンサンブル予報の性能は、用いる数値予報モデルの表現能力と集合のメンバーの選択方法でほぼ決まる。もちろん、メンバー数は標本誤差を減らすために出来るだけ大きいことが望ましい。しかし、数値予報の実用化に際しては、限られた計算機資源内での実施と予報担当者の作業開始までの計算終了が求められるため、数値予報モデルの分解能とメンバー数との間の

第1表 気象庁、NCEP、ECMWFで現業運用されている中期アンサンブル予報の仕組みの概要。

	気象庁	NCEP	ECMWF
数値予報モデルの水平解像度	約120 km	約105 km	約50 km
1回(1日)当たりのメンバー数	51 (51)	14 (56)	51 (102)
数値予報モデルの不完全性	考慮なし	考慮なし	考慮あり

* Ensemble forecasting and its applications.

** Masayuki KYOUDA, Kumi HAYASHI, 気象庁予報部数値予報課。

© 2007 日本気象学会

最適な組み合わせを求める検証作業が重要となる。第1表の通り、現在現業運用中のアンサンブル予報のメンバー数は10～100程度であり、大気の自由度の大きさに比べて非常に小さい。また、中期アンサンブル予報には全球規模の大気の運動を予測する大気大循環モデルが不可欠となることから、気象庁は日本の天気予報を行う上で重要となる温帯低気圧を表現可能な比較的高分解能の全球モデルを用いている。

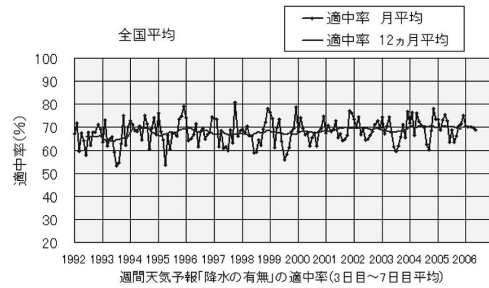
3. 週間アンサンブル予報の実用化

気象庁は、週間天気予報、1か月予報、季節予報を支援するアンサンブル予報を現業運用している。週間アンサンブル予報とは、1週間先までを予報対象期間とするアンサンブル予報を指す。

アンサンブル予報の最初の実用化はECMWF、NCEPによってなされたが、その対象は中期予報であった。気象庁は1996年3月に世界ではじめて1か月先を予報対象とするアンサンブル予報に成功したが、週間アンサンブル予報の導入は4年遅れての1999年3月であった。週間予報への適用が遅れたのは、1か月予報で用いていた初期値の最適モードを求める際の数値予報モデルが、計算機資源の制約から鉛直2層となっていたために、週間予報にとっては重要な傾圧性の不安定が十分に表現されなかったことが理由の1つである。そこで、初期値作成法として米国で開発されていた成長モード育成(BGM)法を採用し調整を行った。運用開始時は9メンバーで数値予報モデルの解像度も現在のものより低かったが、その後、計算機システムの増強に合わせて、2001年3月に数値予報モデルの高解像度化と25メンバー化、2006年3月に51メンバー化といった週間アンサンブル予報の高度化がなされてきた。また、2002年からは、資料を週間予報支援図(アンサンブル)として部外にも配信している。

週間天気予報の利用上の問題点は、予報発表毎に対象とする日の天気予報が変わってしまうことである。これを予報作業現場では「予報の日替わり」と呼んで、予報の信頼を損なうものとして注意している。一般的に、数値予報は初期時刻が新しくなればなるほどその精度が向上するものの、1～2日先でさえしばしば「予報の日替わり」が現れる。特にアンサンブル予報が実用化される以前は毎回の数値予報の精度情報が乏しかったために、週間天気予報の後半は気候値予報(統計的に現れやすい天候)を参照することが多かった。

週間アンサンブル予報を用いることで、「予報の日



第1図 週間天気予報の降水の有無の成績の時系列(気象庁ホームページより転載)。縦軸は3～7日目予報の適中率(%)の平均値を表す。月平均値と合わせて、季節要因を除いた12か月移動平均値(変動が小さい線)を示す。

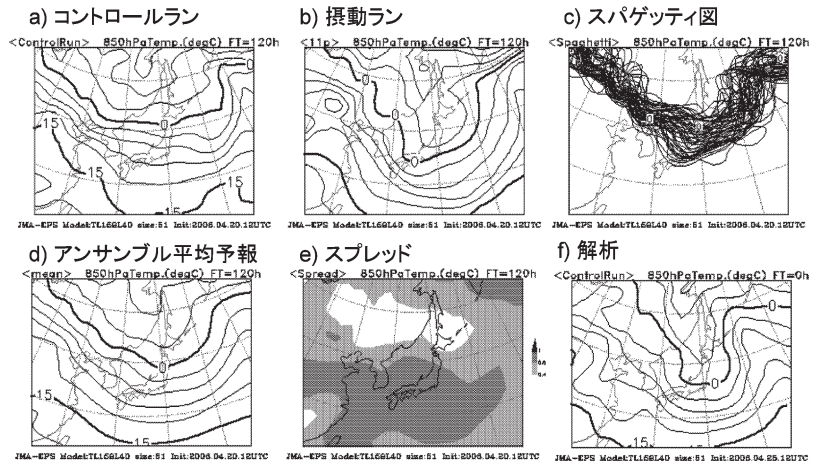
替わり」が起こる時は、概ねメンバー間の予想がばらつき、平均すると気候値に近い天気が予想され、一方、ばらつきが小さい時はよりはっきりとした天気予想できると期待される。実際、アンサンブル予報を導入して以来、後半に気候値とは大きく異なるような場が予想されたとしても、確度があると判断すれば、数値予報の結果どおりに予報を発表するようになっていく。第1図に最近の15年間の週間予報の降水のあるなしの適中率を示す。なお、週間天気予報では24時間降水量が1mm以上の場合を「降水あり」と定義し、雨予報の基準としている。季節的な変動もあり月ごとに見ると変動しているが大きな流れで見ると徐々に精度は向上している。

4. 週間アンサンブル予報の利用

アンサンブル予報は、統計処理によって効果的に利用可能な予報となる。平均と標準偏差といった集合の特徴を表す統計量は、もっともらしい予測と予測のばらつき具合を示す指標としてよく用いられ、それぞれアンサンブル平均予報とスプレッドと呼ばれる。原理的に、アンサンブル平均予報はランダムな誤差が軽減された中間的な値で、期待値に等しい。そして、スプレッドが大きい時のその予報精度は相対的に低いとみなすことが出来る。

アンサンブル予報の利用例を、実際の週間アンサンブル予報資料を使いながら見てみる。第2図は850hPa面気温の予想資料(a～e)と対応する実況(f)である。第2図の予想図は初期時刻を2006年4月20日21時とする5日予報資料であり、その予報対象日である25日は東日本上空を強い寒気が通過し、関東地方で

降電が観測された日である。第2図aはコントロールラン、第2図bは51ある予報の中で東日本まで寒気の南下を予想していた代表的な摂動ランの予想図である。寒気の南下度合いを0°C線に注目して全メンバー分の等温線を描いたものが第2図cである。この図はばらついて交差する等値線の様子からスパゲッティ図と呼ばれ、全ての予報を概観するのに適している。アンサンブル平均とスプレッドはそれぞれ第2図d, eである。アンサンブル平均予報が平均場であるにも関わらず、コントロールランに比べて日本付近の寒気トラフを明瞭に

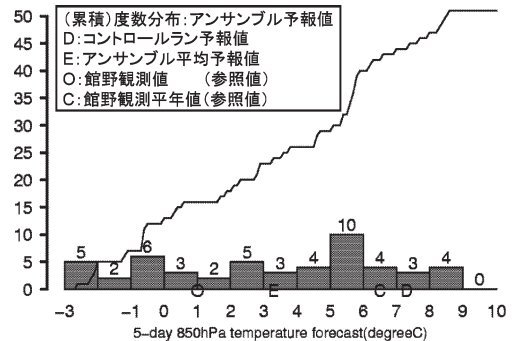


第2図 週間アンサンブル予報に基づいた数値予報資料の例と対応する実況図。
 a) コントロールラン, b) 特徴的な摂動ラン, c) スパゲッティ図(0°C線), d) アンサンブル平均, e) スプレッド, f) 解析。a~eは850 hPa 面気温予想図, 初期時刻は2006年4月20日21時, 予報時間は120時間。fの解析時刻は, 予想図の検証対象時刻と同じ2006年4月25日21時。スプレッドの大きさは気候学的変動を1とする値であり, 0.4, 0.6, 1.0の違いを3階調の濃淡で表す。

予想しており, 東日本まで寒気が南下する可能性が高いことがわかる。スプレッドの図からは, 北日本ではばらつきが小さいのに対し, 東日本から西日本にかけてばらつきが大きいことがわかり, 寒気の南下度合いや西日本への流入の可能性に不確定性が大きいことを示している。第2図fは25日21時の850 hPa 面気温の解析図である。実際に0°Cを下回る寒気が関東地方にまで達したが, これはアンサンブル予報のばらつきの範囲内であり, また関東地方周辺のコントロールランの予報誤差はアンサンブル平均予報のそれよりも大きいことがわかる。

スプレッドが表すばらつき具合や集合そのものを確率分布とみなした情報は, 従来の決定論的な数値予報とは異なる可能性を表す量であり, 数値予報の精度の予測情報に他ならない。この精度情報は数値予報モデルから算出される物理量全てに対して求めることが可能である。

ここで, 第2図に示した予報資料と同初期時刻同予報時間の週間アンサンブル予報による格子点予報値に基づいた度数分布図(実況値, 平年値併記)を利用した確率情報の求め方を示す(第3図)。第3図の横軸は850 hPa 面気温, 縦軸は度数を表し, グラフの上にある数字が各区間に入る予報数でその総和はメンバー数の51になる。ここで, 予報値は館野(茨城県つくば市)付近の格子点値であり, 英字D, E, O, Cはそ



第3図 館野付近格子点850 hPa 面気温における5日予報の度数分布図(ヒストグラム)と累積度数分布(折れ線)。(累積)度数分布はアンサンブル予報値を表し, グラフの上の数字は各区間の度数。D, Eはそれぞれコントロールラン予報値, アンサンブル平均値の位置を表し, O, Cは館野におけるラジオゾンデ観測値とその平年値の位置を表す。

れぞれコントロールラン予報値(7.3°C), アンサンブル平均予報値(3.3°C), 館野のラジオゾンデ観測値(1.0°C), 観測平年値(6.5°C)を意味している。第2図で確認したように, コントロールランは関東地方への寒気の南下を予想しておらず, 館野付近では平年より高い予想となっている。一方, アンサンブル予報では-2.6~8.5°Cとばらつきが大変大きく, アンサン

ル平均値 (E) の確度は高くないものの、平年 (C) を下回るメンバーの数が40を超えている (確率80%以上)。特に、0°C以下となる確率は25%以上と高く、平年を大きく下回る可能性が高いことを示している。実際の館野の観測値 (O) は1°Cと平年値より5°C以上低かった。

5. アンサンブル予報による精度情報の活用

私たちの暮らしを支える産業活動は、金利や商品価格の変動だけでなく、多少なりとも天候の影響を受ける。例えば、盛夏期の日中の最高気温は電力需要のピーク量を決め、冬の寒さは燃料消費量を大きく左右する。このような気象リスクも他のリスクと同様に金融工学の手法による制御が行われ、気象リスク要因の導入には発生可能性を定量的に表す確率情報が適切な入力となる²⁾。

定量的な精度情報は過去の数値予報結果の統計処理により推定されることが多い。しかし、この情報は平均的な数値予報の精度に他ならず、初期値毎に精度が異なる数値予報の特徴を表すことができない。特に、年間を通して発生頻度が小さい気象災害リスクに対しては、過去の統計処理に頼る情報そのものの確度は低くなる。その結果、損失が大きい気象災害リスクに対しては、数値予報の精度情報に係わらず常に最悪のシナリオに備えるといった状況が生じている。

一方、将来起こりうる可能性がある現象を最新の数値予報の集合にて表すアンサンブル予報は、最新の数値予報に関する定量的な精度情報を示す。発生頻度が小さな気象現象に対しても、メンバー数10~100のアンサンブル予報があれば10~1%の分解能で出現可能性を評価していることになる。

このように、気象リスクの危機管理において、アンサンブル予報による精度情報がより適切な判断を可能にすると期待される。なお、現実の地形を表現するのに十分な解像度でないなど数値予報モデルの不完全性を伴う現在の現業アンサンブル予報の結果には、実況との差に系統的な誤差 (バイアス) が少なからず存在するため、過去の結果の統計処理により事前にバイアスを把握することは重要な作業である。

6. 今後のアンサンブル予報

アンサンブル予報は1週間程度先の数値予報精度の向上を目指して始まった。近年は社会活動に及ぼす気

象の影響が高い関心を集めており、アンサンブル予報による精度情報は気象リスクに対する危機管理でも使われ始めている。このような中、高解像度で信頼度の高いアンサンブル予報の実用化への期待は大きい。

また、様々な気象リスクに対応するため、今後は多様なアンサンブル予報の実施が考えられている。例えば、週間アンサンブル予報の数値予報データ (格子点値) を初期値・境界値とする局地モデルや波浪モデルの実行 (力学的ダウンスケーリング手法と呼ばれる) といった研究が現在盛んになされている³⁾。また、ヨーロッパでは同手法による局地モデルのアンサンブル予報がすでに実用化されており、防災情報を含めた精度情報の向上に成功している⁴⁾。

アンサンブル予報から得られる予測のばらつき具合の情報は、気象情報だけでなく解析システムや観測システムでの利用が始まっており、今後は数値予報精度の向上を目的とした最適データ同化や観測が現業化されるであろう。その具体的な技術として、例えば予報の誤差情報をデータ同化で利用するアンサンブルカルマンフィルタ⁵⁾や、予報に大きな影響を与える観測領域を決定する最適観測法などがあり、これらの一部は実用段階にある。

2005年から10年間を実施期間とする国際研究計画 THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験) が世界気象機関の下で行われており、その目的は1日~2週間先の天気予報精度の向上である。複数の数値予報センターの数値予報結果の集合が信頼度の高い確率情報の作成に効果的であることは既に多くの研究で示されている。THORPEX は世界の主要な数値予報センターで現業的に実施されている全球アンサンブル予報の複合利用が可能な TIGGE (THORPEX 双方向大全球アンサンブル) の作成を進めている。このデータは準リアルタイムに公開される予定であり、多様な予報の集合が利用可能であることから予測可能性に関する多くの研究成果が得られるものと期待されている。

参考文献

- 1) 高野清治, 2002: 気象研究ノート, 201, 73-103.
- 2) 立平良三, 1999: 気象予測による意思決定—不確実情報の経済価値—, 東京堂出版, 142pp.
- 3) 斉藤和雄ほか, 2006: 数値予報課技術報告, 52, 66-79.
- 4) Montani *et al.*, 2003: ECMWF Newsletter, 98, 2-7.
- 5) 三好建正, 2005: 天気, 52, 93-104.