

第6図 4次元変分法の推定誤差の模式図。

ると、図に示したように、一般にもとの時間発展に近づく方向（収縮面）とそれから離れる方向（発散面）とが共存している。この発散面の存在が、数値予報の初期値敏感性の原因になっている。収縮面に沿った運動としては、散逸による減衰や地衡風調節などが挙げられる。

推定誤差が図のようになることは、4次元変分法の方法から察しがつくであろう。それは期間の中間で小さく、期間の両端で大きい。数値予報の初期値として使う期間の終わりの推定誤差は、発散面の方向にのびた扁平な分布になる。言い換えれば、初期値の誤差に

は時間と共に成長するような成分が多く含まれることになる。カルマンフィルタは4次元変分法とおおまかには等価であり、最適内挿法はカルマンフィルタの粗い近似、3次元変分法は最適内挿法の拡張とみなせるから、この結論は他のデータ同化法についてもおおよそ当てはまると考えてよい。したがって第6図は、アンサンブル予報において成長しやすい摂動を使うことの1つの根拠になる。

参考文献

- Isaksen, L., 1998 : Impact of ERS scatterometer winds in ECMWF's four dimensional variational assimilation system, *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling*, No. 27, 1.29-1.30.
- Rabier, F., E. Klinker, P. Courtier and A. Hollingsworth, 1996 : Sensitivity of forecast errors to initial conditions, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 121-150.
- Tsuyuki, T., 1997 : Variational data assimilation in the tropics using precipitation data. Part III : Assimilation of SSM/I precipitation rates, *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1447-1464.
- 露木 義, 1997 : 変分法によるデータ同化, 数値予報課報告・別冊第43号「データ同化の現状と展望」, 気象庁予報部, 102-165.

4011 : 101 (予測可能性 ; アンサンブル予報)

3. 予測可能性とアンサンブル予報

高野 清 治*

1. はじめに

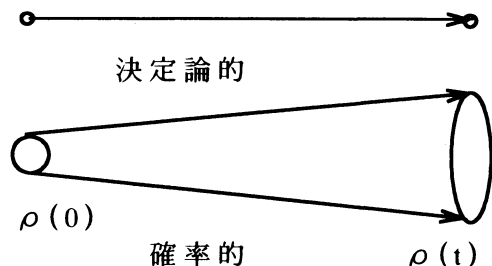
地球大気はカオスの性質を持ち、初期値に含まれる微小な誤差が成長するため、初期値問題としては原理

的に限界がある。このことは数値予報の発展の初期の段階から認識されていた（例えば Lorenz, 1965 ; Epstein, 1969 など）。一方数値予報の誤差をもたらすものはそれだけではなく、数値予報モデルや客観解析の不完全性に起因するものもある。

実際の数値予報開発の現場ではこれまで、モデル

* 気象庁気候・海洋気象部気候情報課。

© 1999 日本気象学会



第1図 決定論的予報と確率分布関数 ρ の予報。従来の予報では1つの初期値から出発した1つの数値予報で予報を行う。これに対し初期値に含まれる誤差程度の広がりを持つ確率分布関数を考え、その広がりを予測するという考え方がある。大気のカオスの性質を考慮すれば、予報時間が長い場合確率分布関数の予報を行う必要がある。

と、それは、初期値に含まれる微小な誤差に起因すると仮定するものである。この仮定は実際の数値予報モデルで完全に満たされているわけではないが、少なくとも中・高緯度の総観規模以上の現象の数値予報についてはある程度成り立っていると考えられる。

2. 確率分布関数の予測とアンサンブル予報

大気のカオスの性質により初期値敏感性があり、それが予報結果に反映するとすると、これまでの1つの初期値からの決定論的予報から考え方を根本的に変えなければならない。初期値となる客観解析値には微小な解析(観測)誤差が含まれており、それが時間的に増大すると考えると、ある時点での客観解析値に考えられる解析誤差分布を加えた点の集合の位相空間上の確率分布を表す確率分布関数(Probability Distribution Function, 略してPDF) ρ の時間変化を予測し、それにより確率的な予測を行うというのが正しい方向であろう(第1図)。このPDF ρ の予測の最も正統的な取り扱い方はPDF $\rho(t)$ の位相空間上での時間発展方程式を正確に、あるいは近似的に解くというやりかたである(Epstein, 1969; Ehrendorfer, 1994など)。しかしローレンツ系等の低自由度の力学系ならいざしらず、数値予報モデルなどの自由度が膨大な系(10^6 から 10^7)の位相空間内で実際そのようなことを行うことはいくら計算機の能力が発達したからといって不可能である。従って実用上はその他の方法を探さなければならない。

その他の方法として、初期の確率分布関数に応じた初期データのサンプリングを行い、それを初期値とする数値予報を多数行い、それにより時刻 t のPDF $\rho(t)$ を推定するという、アンサンブル予報がある。この方法は最初にLeith (1974)により提案された方法であり、分布 $\rho(t)$ をとる集団の平均値の推定だけならそれほどたくさんの数の数値予報は必要ない可能性がある。彼は主張した。この方法は前述の方法よりは計算機資源を要しないが、それでもランダムにサンプリングを行うモンテカルロ法によるアンサンブル予報ではサンプリングの数が多すぎ、多大な計算機資源を要するため、実用には至らなかった。

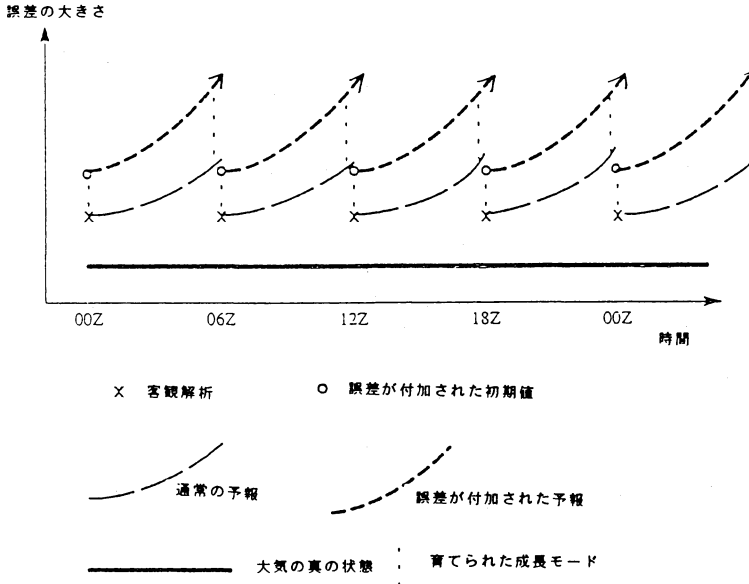
その後、次の節で述べるより少ない数(概ね $10 \sim 50$ 程度)のサンプリングで行えるアンサンブル予報が考案され、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)、アメリカ国家環境予報センター(NCEP, 旧NMC)、気象庁等で実用化されている。

の改良と初期値となる客観解析の改良のための努力がなされてきた。そして実際大きな成果があがり、予報精度は飛躍的に向上してきた。これらの努力はこれからも必要と考えられるが、数値予報の精度向上とともに予報時間が延びるにつれ、ここ10年ほどの間に、予測可能限界の問題が予報現場でも意識されるようになってきた。

その一例を挙げると中期予報(日本では週間予報)における予報の日替わりの問題である。気象庁においては週間予報用の数値モデルは毎日1回その日の12 UTCの解析値をもとに実行されているが、前日の解析値を初期値として実行した結果と、当日の解析値を初期値として実行した結果が特に予報期間の後半になると大きく異なる場合がある。この現象の原因は必ずしも明らかではないが、カオスに基づく初期値敏感性の結果生じている可能性は十分ある(Kimoto *et al.*, 1992)。

近年、この予測可能性の問題に対処するため、アンサンブル予報という手法が登場し、いくつかの気象機関では既に現業化されている。気象庁においても力学的1か月予報に対して、アンサンブル予報が導入されており、週間予報用にも導入される予定である。ここではこのアンサンブル予報について述べることにする。

なお、以下の議論では基本的に「完全モデル」の仮定を用いる。これは、初期値が誤差なく得られれば、数値予報モデルは完全に地球大気の流れを再現でき、数値予報結果と実際の大気の流れに差異があるとする



第2図 BGM法の模式図 (Toth and Kalnay, 1993を一部改変).

3. アンサンブル中期予報の2つの初期値作成法—SV法とBGM法—

前述のように実用的なアンサンブル予報ではできるだけ少数の初期値から出発し、効率的にPDF $\rho(t)$ の形状を推定する必要がある。このような観点からどのように初期値を作ればよいのかについて現在2つの方法が提案されている。どちらの方法も、客観解析により得られた初期値に解析の際生じると考えられる程度の大きさの人工的誤差を重ね合わせ、それらを初期値として多数の数値予報を行うものである。この2つの方法の違いは人工的誤差の作り方にある。

SV (Singular Vector) 法は初期値に重ね合わせる人工的誤差として Singular Vector を用いる。Singular Vector は時間的に変化する基本場に対し、線形論の範囲で固有値の大きいものほど、指定した有限時間内での成長率の大きいベクトルである。固有値が最大のもは有限時間内で最も成長率が大きい。またこれらのベクトルはお互いに直交する (Molteni *et al.*, 1993)。この Singular Vector のうち固有値の大きいものを初期値に重ね合わせる誤差として利用するのがSV法である。この方法はECMWF (ヨーロッパ中期予報センター) で採用されている。ECMWFではこの Singular Vector の計算には予報モデルより低分解能の物理過程は最小限しか含まれない水平T42、鉛直31層のプリミティブモデルが使われており、メンバー数

50のアンサンブル予報が現業化されている。

もう1つの方法はBGM (Breeding of Growing Mode)法と呼ばれるものである。この方法は第2図のように、実際の数値予報モデル内で最初にランダムに与えた誤差を育てていくもので(Breeding)、一定の解析時間毎に成長した誤差を一定振幅になるようにスケールダウンしていく。このためその時間間隔で成長率の大きいものだけが生き残ることになる。このやり方では、仮に誤差を加えない場が時間的に変化しないとすると、その場に対する最も成長率の大きいノーマルモードが計算されることになる。このモードはToth and Kalnay (1997)によれば、力学的には(位相空間上の)LocalなLyapunov Vectorに相当するとしている。このようにして育てた誤差パターンを客観解析に重ね合わせてアンサンブル予報を行う。この方法はNCEP (アメリカ国家環境予報センター、旧NMC)で採用されておりメンバー数17のアンサンブル予報が現業化されている。

どちらの方法もサンプリングの効率を上げるために、時間的に早く成長する人工的誤差を使うという点では共通している。できるだけ成長率の大きい人工的誤差を使用してPDFの最大限の広がりを捕まえようという考え方である。両者の違いはSingular Vectorは評価時間までは大きく成長するがその後は成長は鈍るのに対し、Bred Vector (Breeding法により作られ

たモード)では成長率は鈍らない. 従って Bred Vector は Singular Vector の評価時間までは Singular Vector より成長は遅いもののその後も基本場が大きく変わらないとすればより早い成長率で成長することになる. もっともこれは線形論の範囲でのものであり, 実際の予報では2日以上たてば解析誤差程度の微小な誤差に対しても非線形効果が重要になるであろう. また Bred Vector は, 実際に使用する数値予報モデル内で育てられるので, 降水過程などの物理過程が自動的に反映された結果の成長モードとなっていることも特徴の1つである. なお, 中・高緯度の気象においてこれらの Vector の成長を支えているのは主として基本場からの傾圧的なエネルギーの転換である. このことは, 数日程度の時間スケールでは傾圧的な不安定性が最も強いことを示している.

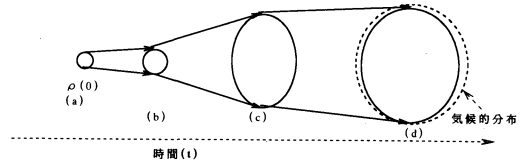
これらの方法の他に, より簡便な方法として時間的に連続した解析値を初期値として数値予報を行い, それらを集めてアンサンブル予報とする方法もある (Lagged Average Forecast, LAF 法と呼ばれる). この方法は, 古い初期値の予報が含まれること, 初期の誤差を人工的に決めていないのでサンプリングの効率が悪いことなどから, 中期予報の分野では現在ほとんど用いられていない. ただし, その方法の簡便さから, より長い季節予報のアンサンブル予報実験などにはよく用いられる.

4. アンサンブル予報の実際

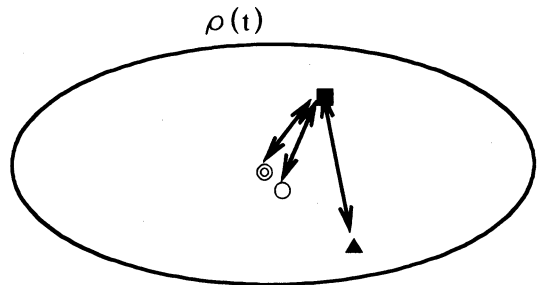
現在 ECMWF では水平 T156鉛直31層のモデルによるアンサンブルメンバー数50個の10日予報が現業化されている. また, 米国では主として T62モデルによる17メンバーの2週間予報が現業化されている. また気象庁では1週間に1回ではあるが Singular Vector 法による T63, 30層モデルによる10メンバーの1か月予報が現業化されている. また近々毎日の週間予報に対してもアンサンブル予報が導入される予定である.

前に述べたとおり, アンサンブル予報の目的は前述の確率分布関数の時間的変化に関する情報を得ようというものである. この確率分布関数は時間とともに増大していき最終的には気候学的な広がりと同じ広がりを持つようになるであろう(第3図). この図をもとに考えると, まず初期の広がりが十分小さい場合(第3図b)は効率から考えてアンサンブル予報は必要なく, 決定論的な予報が有効である.

次に PDF の広がりがある程度大きくなった場合を

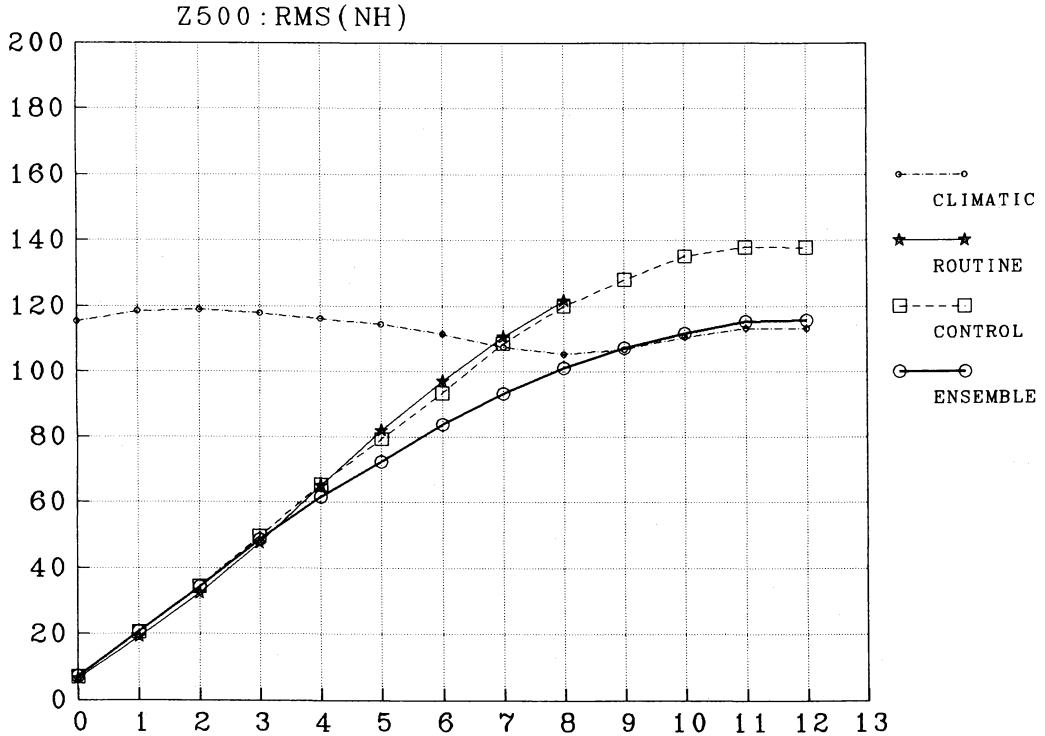


第3図 確率分布関数 (PDF) ρ の時間的変化. 予報時間と共に ρ は時間的に広がっていく. 広がりが小さい場合, 効率から考えて, アンサンブル予報は必ずしも必要なく, 決定論的予報が有効である(図b). ある程度の広がりを持った場合, アンサンブル平均予報が有効となる(図c). それより広がったり, PDFの形がいびつになったりした場合, 確率的な予報が必要となる. また, 十分時間が経ち, PDFの広がりが気候学的な広がりと同じになった場合, もはや初期値問題としての力学的予報は意味が無く, 十分メンバー数が多いアンサンブル平均予報は気候値予報と同じになるし, 確率予報も気候学的確率分布を示すようになる(図d).



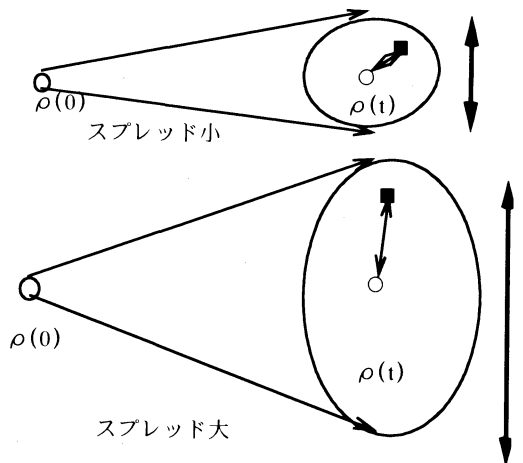
第4図 アンサンブル平均予報の説明. ■: 実況値(解析値), ●: 確率分布関数 $\rho(t)$ に属する点の平均値, ○: アンサンブル平均予報, ▲: ある単独予報. 各アンサンブルメンバーの予報(単独予報)も実況値(解析値)も PDFの広がりの中に含まれている. 実況値に対する予報としては, ある単独予報よりも, PDF内の点の平均値の最もよい推定値であるアンサンブル平均予報を使ったほうが, 統計的には(たくさんの事例を集めれば)2点間の距離(誤差)が小さくなる.

考えてみよう(第3図c). 完全モデルの仮定をすれば, 実際の気象の運動もこのPDFのどこかに含まれているはずであるが, それに対する推定値としては, 個々のアンサンブルメンバーの予報より, このPDFに属する予報の平均値の方が統計的には誤差が小さくなる. これは例えば過去データを使い東京の気温の予測する場合, 過去のある年の値を取り出しそれを予報と

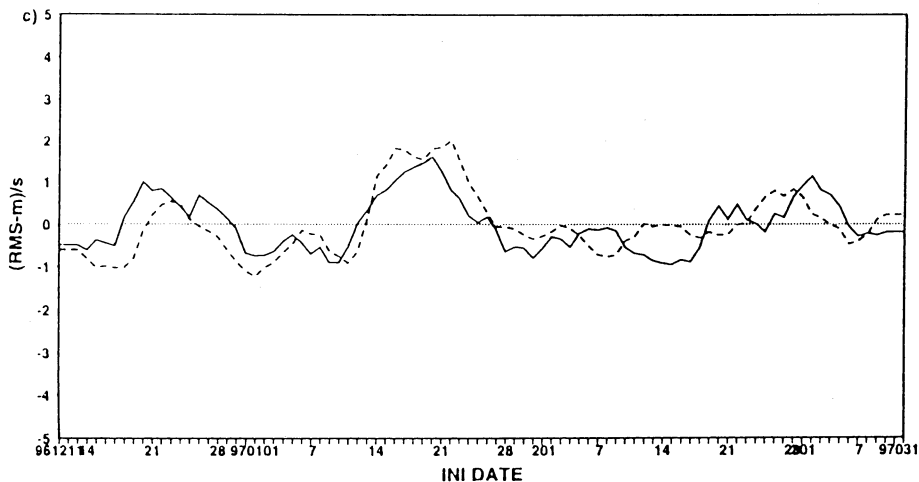


第5図 気象庁における予報実験結果. 500 hPa 高度場の冬の12例平均の予報成績(北半球平均根2乗平均誤差). 横軸は予報時間(単位日数), ☆: T213単独予報, □: T63単独予報, ○: アンサンブル平均予報, 一点鎖線: 気候値予報(統計的な気候値を予報としたもの).

する(ランダム予報)より過去のデータから平均値(気候値)を作りそれを予報とするほうが(気候値予報)誤差が小さくなるのと同じである(もちろんトレンド等はないと仮定する). つまりこの場合, PDF内での気候値予報のほうが, PDF内でのランダム予報より成績がよく, 統計的な(たくさんの事例を集めた平均の)根2乗平均誤差はランダム予報の $1/\sqrt{2}$ となる. このPDFの平均値の推定値として個々のアンサンブル予報の平均すなわちアンサンブル平均予報が使われる(Leith, 1974). 従ってアンサンブルメンバーの数を増やしても誤差は単独予報の $1/\sqrt{2}$ までしか減らない(第4図参照). また, 時間とともにPDFが気候学的分布と同じ程度に広がれば(第3図d), 十分アンサンブルメンバーが多いアンサンブル平均予報は本来の気候値予報となり, 初期値問題としての力学的予報の意味はなくなる. 第5図は気象庁で行ったアンサンブル予報実験の例である. 手法はBGM法であり, アンサンブルメンバーの数は10である. 確かに単独予報よりアンサンブル平均予報のほうが成績が良くなっているこ



第6図 スプレッドと予報成績の関係. ■: 実況値(解析値), ○: アンサンブル平均予報. 統計的にはPDFの広がりが小さいほど(スプレッドが小さいほど)実況値とアンサンブル平均予報の距離(誤差)は小さくなる.



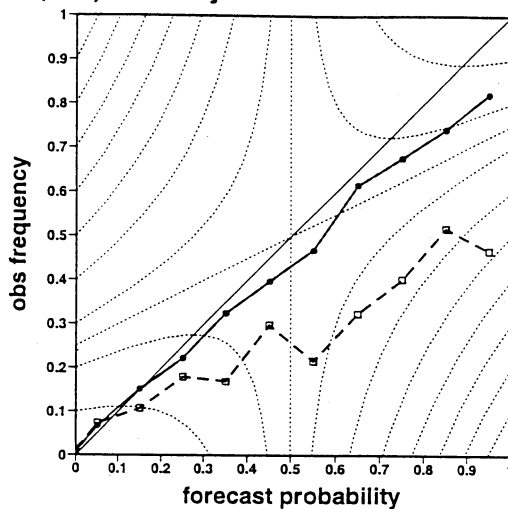
第7図 スプレッドと予報成績の関係。根二乗平均誤差(実線)とスプレッド(破線)(7日目の予報)の時系列図(予報は毎日行われており、結果には5日移動平均が施してある)。500 hPa 高度場, ヨーロッパ域。どちらも平均誤差からのずれを標準偏差で規格化して示してある (Palmer *et al.*, 1998)。

とがわかる。また予報期間のおわりには気候値予報と同じになっている。

次に、PDFの時間的な拡がり方は流れの場の初期値敏感性により異なると考えられる。多数例の統計的な平均をとれば、PDFの拡がり小さい場合は、個々の単独予報、あるいはアンサンブル平均予報の実況値に対する誤差は小さいと考えられるし、拡がりが大きい場合は大きいと考えられる(第6図)。従ってPDFの拡がり予測できれば、予報精度の予測ができると考えられる。このPDFの拡がりを推定するものとしてスプレッドという量が使われる。スプレッドはアンサンブル平均と個々のアンサンブルメンバーの差の根2乗平均として定義される(統計学における標準偏差とほぼ同じ)。スプレッドが大きいほどPDFの広がりが大きいと考えられ、従って統計的には予報精度も悪いと予想される。第7図はECMWFにおける予報誤差とスプレッドの時系列図である。確かにスプレッドが大きいときは誤差も大きくなっており、予報精度の予測が可能ながわかる。

それ以上PDFが拡がったり、PDFの形がいつになつたりした場合は、予報は本質的に確率的になる。例えば、ブロッキングの予報の場合、ブロッキングが起るか、起らないかでPDFがbimodalな形になることは十分考えられる。このような場合はアンサンブル平均予報という概念はもはや有効ではないであろう。このような場合、アンサンブル予報で得られた各

T(850) anomaly $t - 8$ K $t + 144$



第8図 Reliability Diagram, ヨーロッパ上空の850 hPaの気温が平年より8°C以上下がる確率の予報(6日目)。横軸はアンサンブル予報から計算した確率、縦軸は各確率予報に対応する出現頻度。実線は新システムによる予報。破線は旧システムによる予報(旧システムはT63モデルでアンサンブルメンバー32, 新システムはT156モデルでアンサンブルメンバー数50) (Palmer *et al.*, 1998)。

メンバーの現象の予想の頻度分布をそのまま確率予報とすることになる。もちろん、この確率予報も十分時

間がたてば気候学的な確率分布となる。

第 8 図は ECMWF の検証結果で Reliability Diagram と呼ばれるものである。横軸がアンサンブル予報により予想された生起確率（この場合ヨーロッパの 850 hPa の気温が平年より 8°C 以上低くなる確率）、縦軸がそのような予報が出た場合のうち、実際にその現象が出現した割合である。原点を通り傾き 1 の直線になれば理想的だが、実際の検証でもほぼ傾き 1 の直線に乗っており、このレベルの PDF の推定法としてアンサンブル予報がうまくいっていることがわかる。

5. おわりに

1990 年ごろ ECMWF で行われた Singular Vector 法によるブロッキングの中期予報実験の成功がアンサンブル中期予報への道を拓いた (Mureau *et al.*, 1993)。この実験では従来の LAF 法などによるアンサンブル予報では全く再現できなかったブロッキングの 144 時間予報が Singular Vector 法によるあるメンバーの予報で再現できたのである。ほぼ同じ頃、アメリカでは BGM 法が開発され、2 つのセンターでまずアンサンブル予報が現実化された。

今後更にこのアンサンブル予報は発展していくであろう。特に初期値作成法は近年データ同化の手法が大きく進歩してきており、更に改善されていくであろう。本来、解析誤差は地域（海洋上と大陸上等）ごと、各観測時間毎に違うはずでありそれに伴い初期の PDF は変わるはずであるが、現在実用化されている初期値作成法では必ずしもその情報が十分反映されているとは言い難い。今後 4 次元データ同化等の進歩と共に、より初期における解析誤差を反映した初期値作成法が開発されていくであろう（露木氏の項参照）。

また、現在実用化されているアンサンブル予報は主として中期予報の分野であり、現象のスケールでいえば総観規模以上のスケールに対してである。しかし、他のスケールの現象に対しても予測可能限界に近い場合、有効性は高いと考えられる。例えば集中豪雨などのメソスケールの現象にも現象の時間—空間スケールに応じた予測可能限界の問題があるはずであり、そのような場合アンサンブル予報の手法は有効であろう。ただしそのためには前提として湿潤過程が重要であるメソ数値予報モデルが、近似的にでも「完全モデル」と呼べるかどうかがまず問題であろう。

また、初期値問題ではなく、海面水温などの境界条

件に対する大気の応答を見る必要がある力学的季節予報の分野においても、やはりアンサンブル予報は必要である。すなわち、このような場合、与えられた境界条件により、大気の状態が取りうる確率分布が変わると考えられるので、その確率分布を予想するためにアンサンブル予報が必要となる。

謝 辞

気象庁数値予報課藤田司氏に、第 5 図を提供頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Ehrendorfer, M., 1994: The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part 1: Theory, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 703-713.
- Epstein, E. S., 1969: Stochastic dynamic prediction, *Tellus*, **21**, 739-759.
- Kimoto, M., H. Mukougawa, and S. Yoden, 1992: Medium-range forecast skill variation and blocking transition: A case study, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1616-1627.
- Leith, C. E., 1974: Theoretical skill of Monte Carlo forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 409-418.
- Lorenz, E. N., 1965: A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model, *Tellus*, **17**, 321-333.
- Molteni, F., R. Mureau and T. N. Palmer, 1993: Predictability and non modal finite time instability of the Northern winter circulation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 269-298.
- Mureau, R., F. Molteni and T. N. Palmer, 1993: Ensemble prediction using dynamically conditioned perturbations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 299-323.
- Palmer, T. N., R. Buizza and F. Lalaurette, 1998: Performance of the ECMWF ensemble prediction system, *Proceeding of Seminar/Workshop on Short-Term Climate Prediction*, Tokyo, 2-4 March 1998.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecast at NMC: The generation of perturbation, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297-3319.