

新しい1か月予報*

高野 清 治**

1. はじめに

気象庁では1996年3月から数値予報を用い1か月予報を行うことになった。新しいシステムでは水平分解能 T 63, 鉛直30層の数値予報モデルを用い, 10個の数値予報からなるアンサンブル予報を行う。これに伴い1か月予報の発表形式も大きく変更した。新しい発表形式では, 最も予報精度が期待できる向こう1か月平均の予報に重点を置くこととし, また中・高緯度の気象では避けて通れないカオスの性質を考慮し確率予報を導入した。ここではこの新しい1か月予報について述べる。

2. 数値予報による1か月予報の技術的課題

今回の新しい1か月予報では数値予報モデルを利用している。しかし, 数値予報モデルを使い1か月予報を行う場合予報期間が長いこといくつかの技術的課題がある。以下ではまずそのことについて箇条書きにしてみよう。

2.1 数値予報モデル

気象庁ではこれまでは数値予報は1週間先までの週間予報等に利用されてきたが, 今回1か月予報にも主たる予報資料として利用することとなった。予報期間が長くなるので, それだけモデルの完成度を上げることがまず重要な条件である。

2.2 予測可能限界

1か月予報ぐらい予報期間が長くなると, 予測可能限界の問題を考慮に入れる必要が出てくる。最近よく話題にされる「バタフライ効果」の問題である (Lorenz, 1963)。すなわち, 境界条件を固定した初期値問題として考えると, 初期値に含まれた微小な誤差が, 時間とともに成長するため, 十分時間が経てば実際の値と全く違った結果となるというものである。1か月予報で予測対象とするのは, 超長波, 太平洋高気圧等, 時間

～空間スケールの大きなもので, 週間予報のように日々の温帯高低気圧に対応する総観規模擾乱を対象としているものではない。従って予測可能限界も総観規模擾乱を対象にする場合より延びると考えられるが, それにしても限界があるであろう。ただし注意しなければならない点は, この予測可能限界はいつも一定であるわけではないことである。すなわち初期値に含まれる誤差が成長しやすい場合としにくい場合があるのである。そしてそれは大気の流れの場で決まっていると考えられる。

典型的に誤差が成長しやすいのはブロッキング現象の発生の場合である。ブロッキングは急に発生するので初期値問題としての予測には困難が予想される。実際予報実験でも初期値を僅かに変えるとブロッキングが発生したり, 発生しなかったりする (Mureau *et al.*, 1993)。逆に流れの場によっては初期値に小さな誤差が含まれても, 誤差の成長は小さくかなり長い期間予報が可能の場合もある。以上のことを概念的に示したものが第1図である。

2.3 境界条件

1か月予報では予報期間が長く, また月平均場等, 長い期間の平均場も予報対象とするので, 海面水温, 積雪面積, 土壌水分量など境界条件の影響も無視できなくなる。従ってこれらの取り扱いも重要な課題となる。

以上述べたように数値予報による力学的1か月予報を行うには様々な技術的課題がある。特に2.2節は原理的問題として重要な問題で, いくら高性能の数値予報モデルを用意しても, 単一の予報では精度のよい予報がいつでも可能なわけではないことを示している。

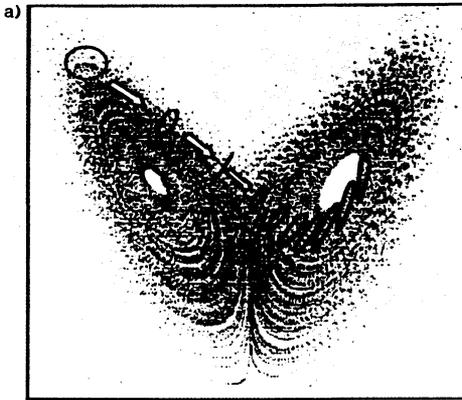
3. 気象庁における新1か月予報システムのデザイン

第2章で述べたような技術的課題を踏まえ, 我々は次のような技術的なデザインにおいて新しい1か月予報を開始することにした。

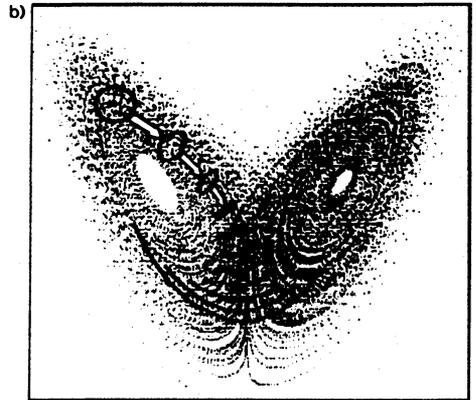
* Dynamical one month forecast.

** Kiyoharu Takano, 気象庁気候・海洋気象部気候情報課。

予測可能な期間が長い場合



予測可能な期間が短い場合



第1図 ローレンツモデルを使った予測可能な期間の長短を示す概念図。ローレンツモデルは熱対流のモデルでありローレンツが定式化した (Lorenz, 1963)。このモデルでは対流の状態は位相空間上の点で表され、この点是非線形の時間発展方程式に従い変化する。この点の運動は周期的でもないし、また、無限大になることもない。また、僅かに異なる初期値から出発した2つの点は、十分時間がたつと全く違った値となる。このことは、この系での数値予報は無限に長く行うことは出来ないことを示している。これらの特徴は中高緯度大気モデルになると考えられる。十分時間がたてば、2つの点は全く違った値となるため、予報は不可能だが、有限時間では必ずしもそうとは限らない。左側の図では、最初の○内の初期値から出発した点は時間と共にあまり広がらず、予測可能な期間は長い。それに対し右側の図では、途中から大きく広がり、単一の予報では予測可能な期間は短いと考えられる。このように出発する初期値が位相空間上のどこにあるかにより予測可能な時間は違ってくる (Palmer, 1993 より)。

3.1 数値予報モデル

気象庁では明日、明後日の天気予報用の局地モデルに境界条件を提供するためと週間天気予報のために水平方向の解像度 T 213 (水平波数の三角切断213, 格子間隔およそ 65 km), 鉛直30層モデル(モデルの最上層は 10 hPa)の全球スペクトルモデルを1996年3月から新しく運用開始した。従来のモデルと比べ水平、鉛直分解能が向上したが、さらに新モデルでは様々な物理過程のパラメタリゼーションにも改良が施されている。例えば積雲対流のパラメタリゼーションでは従来の Kuo のパラメタリゼーションから Arakawa-Schubert のパラメタリゼーションに改められている (室井ら, 1995)。1か月予報用にも本来ならばこのモデルを運用することが望ましいが、後に述べるアンサンブル予報を行うために、計算機への負担が軽い水平分解能のより低いモデル (T 63, 格子間隔およそ 180 km)を採用することにした。ただし、その他の部分については T 213 モデルと全く同じであり、同じ分解能の旧モデルと比べ、特に夏の北半球の予報精度が向上することがわかっている (吉松ら, 1996)。

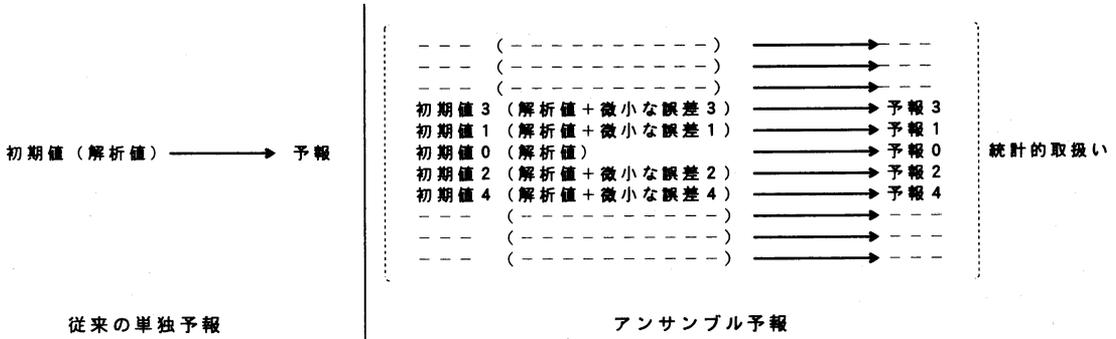
3.2 アンサンブル予報

1か月予報では平均的な予報精度を向上させること

が重要であることはいうまでもない。それとともに、2.2節で述べたことを考えると、大気の予測可能性がどれくらいあるのかを、あらかじめ知ることが重要となる。

これらのことを考慮し、1か月予報では短期予報などで行われている一つの初期値から出発する数値予報ではなく、アンサンブル数値予報を行うことにした。アンサンブル数値予報とは、僅かに異なる初期値から出発した、複数の予報結果を統計的に処理して利用するものである (第2図)。具体的には個々の予報の平均 (アンサンブル平均) や分散等を利用する。アンサンブル平均は、真の値 (実況値) に対する統計的に最もよい推定値になる (Leith, 1974)。また、分散は予報の信頼度 (予測可能性) を知る目安となる。すなわち、予報結果がばらつき分散が大きいときは、初期値に含まれる微小な誤差が成長しやすいことを示しており、逆に分散が小さいときは誤差が成長しにくいことを示している。また、アンサンブルサイズ (1回に行う数値予報の数) を十分多くとることができれば、その頻度分布をそのまま確率予報とすることができる。

アンサンブル数値予報を行うには、よく似た複数の初期値を作る必要がある。そのためには、ある時刻の



第2図 単独数値予報とアンサンブル数値予報.

客観解析値に解析誤差程度の人工的誤差をつけ加える必要がある。この人工的誤差の与え方にはいくつかの方法が提案されている。最も簡単な方法は、ランダムに誤差をつけ加えることである。計算機の能力が十分高く多数の数値予報を行うことができればこの方法で行えばよいのだが、実際には計算機の能力には制約があり、それほどたくさんの数値予報を行うことはできない。従って、できるだけ少数の例で効率的なアンサンブル予報を行う必要がある。ここでいう効率的なアンサンブル予報とは、できるだけ各予報結果が、実現の可能性のある様々な状態を尽くせるようにするという意味である。そのためには、初期に人工的に重ねあわせる誤差としては成長が速く、またお互いに空間的構造が違うものが望ましい。

このような人工的誤差を得る方法として、最適モード法 (Mureau *et al.*, 1993), BGM 法 (Toth and Kalnay, 1993) などが提案されている。最適モード法はヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) で開発された方法で、有限時間 (初期値の誤差が線形に成長する期間、具体的には数日) に線形的な成長率が大きいモードを計算により求め、これを人工的誤差として重ね合わせるものである。この有限時間に線形的に最大成長するモードは最適モード (あるいは singular vector) と呼ばれこのモードを使うことから最適モード法と呼ばれる。BGM (Breeding of Growing Mode) 法はNCEP (アメリカ) で開発された方法で、付加する誤差として数値モデル中で育てた (Breed した) モードを利用するものである。具体的には、数値予報モデル内に初期にランダムな誤差を与えておき線形性が保てるように解析時間毎に誤差の振幅を調整していき、成長するモードを求めていく。

この二つの方法には一長一短があるが、気象庁では

ECMWF の最適モード法を採用した (露木, 1993)。最適モードは本来なら数値予報モデルと同じプリミティブ方程式系の同じ分解能のモデルで計算することが望ましいが、計算時間の関係から分解能を粗くした準地衡風モデル (水平 T 21, 鉛直 2 層) で計算している。

現業における1か月予報のアンサンブルのサイズ (1回に行う数値予報の数) は10であるが、2日に分けて5個ずつ計算を行うこととした。

3.3 境界条件

海面水温は、初期値の時点の解析により平年偏差を算出し、その平年偏差が予報期間中持続するものとしている。積雪面積、土壌水分量等地表面過程については、初期値としては気候値を使っているが、その後はモデル内の地表面過程に従い時間変化する。

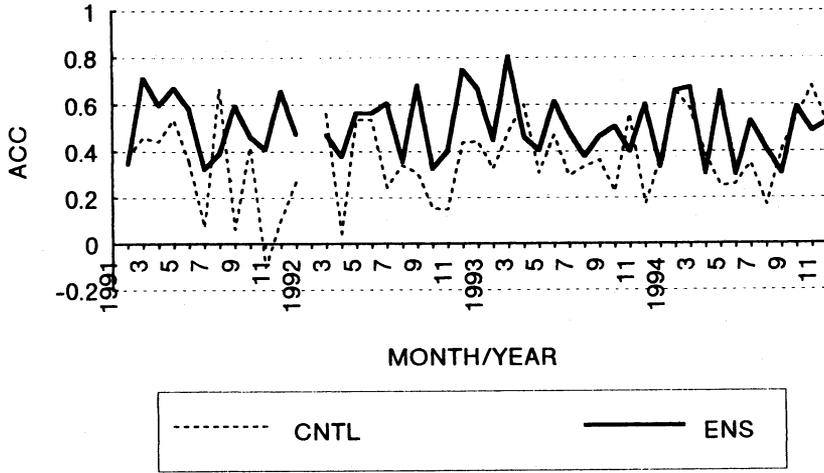
1か月という予報期間を考えると、海面水温の取り扱いについては、その持続性から考えて問題は少ないと考えられるが、地表面過程の初期値については改善の必要があろう。

3.4 新しい1か月予報の発表形式

今回の変更に伴って、1か月予報の発表内容、対象期間についても変更を行った。変更の主眼は予測可能性の問題を考慮して確率予報を導入すること、予測技術に見合った、予報要素、予報期間とすることである。

従来は10日毎に月3回予報を発表していたが、予報は毎週金曜日に発表することとした。また従来は第1旬、第2旬、第3旬にわけて予報を行っていたが、新しい予報では最も予報精度が期待される月平均の予報に重点をおくことにし、気温、降水量、日照時間の各要素について、確率予報を行うこととした。さらに、従来の旬単位の予報から週単位の予報とし、第1週、第2週を週単位で、予報時間が長くなる第3週と4週はま

28DAY MEAN Z500 NH ACC



第3図 アンサンブル数値予報による28日(予報2~29日)平均の北半球500hPa高度場の予報成績。横軸は予報の対象年月、縦軸は予報成績(アノマリー相関)、実線はアンサンブル平均予報(予報数は10)、破線は誤差を加えない解析値を初期値とする単独予報(本文参照)。

とめて2週間平均で予報することとした(もちろん第1週については週間天気予報により日毎の予報もある)。これらの週単位、2週単位の予報については、当面は最も予報精度が期待できる気温のみとしたが、将来的には他の要素についても充実していきたいと考えている。

これらの予報要素に対しては、数値予報結果を統計的に翻訳して、地上気温、降水量等を算出するガイダンスが予報作業用の資料として用いられる。

4. アンサンブル1か月予報の平均的予報精度

第3図は1991年から1994年の4年間の予報実験の結果である。予報実験は1991年~1994年の各年の月末(及びその前日)の解析値を初期値として第3章で説明した現業システムと同じスタイルで行った。都合により予報を行えなかった1例を除き総数47ケースである。成績は28日平均した北半球500hPa高度場に対するアノマリー相関で評価した。アノマリー相関とは解析値の年間偏差と予報値の年間偏差の相関であり、アノマリー相関が0.5~0.6以上あれば、目視でも偏差パターンはある程度似ており実用性があるとされる。28日平均場(月平均場)では、予報毎に成績の変動はあるものの、アンサンブル平均予報の成績がアノマリー相関0.4を下回ることは少なく、よいときには0.6以上

となる(47例平均で0.51)。特に注目すべきことはこの北半球28日平均場では、成績が目立った季節依存性は認められないことである。従って、28日平均場で見れば平均的には実用性があるといつてよいことになる。

5. アンサンブル1か月予報の具体例

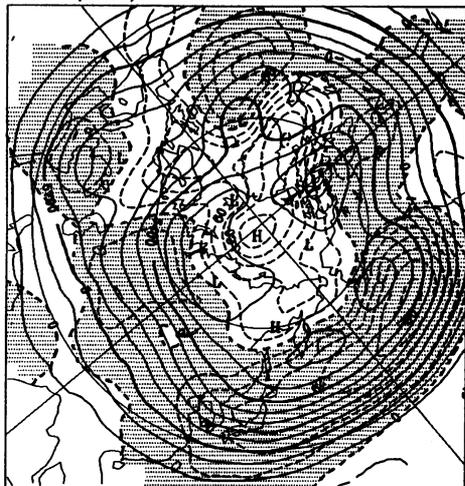
ここでは、アンサンブル1か月予報の具体例を示す。第4図は1996年3月28日12Zを初期値とした28日平均500hPa高度場のアンサンブル平均予報と対応する解析値である。1996年4月は西日本を中心に全国的に記録的な低温となったが、この例の場合北半球全体で見ても、日本付近で見ても非常によく的中している(北半球平均のアノマリー相関0.68)。特に太平洋域の強い負偏差をよく表現している。もっともグリーンランド付近やヨーロッパ付近では実際にはブロッキングが発生しているが、アンサンブル平均予報ではぼんやりしたものとなっている。

第5図は同じ初期値の東日本の850hPa温度場の予想である。10本の細い線は個々の数値予報の結果である(7日移動平均をとっているの、初期値の時間より前からばらついていくことに注意)。この予報結果によれば、東日本では少数の年並の可能性の他は強い低温の可能性が大きかったことがわかる。

この例はよく的中した例であり、実際には4章で示

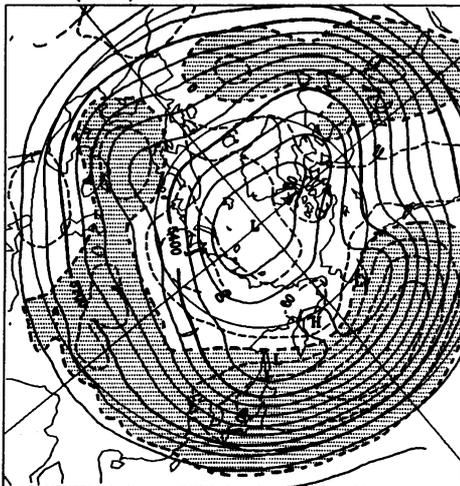
実際の解析値

Z500 (ANAL) FROM:1996. 3.30.12

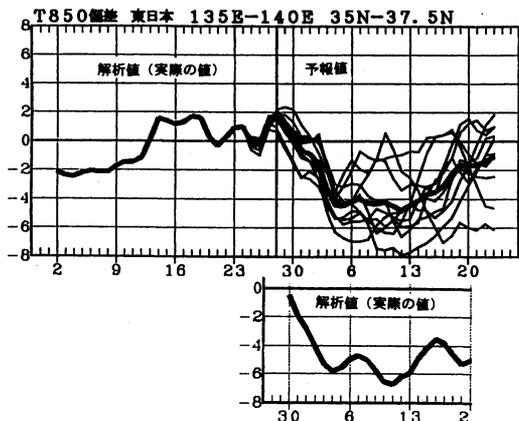


アンサンブル平均予報

Z500 (I.E.S) FROM:1996. 3.28.12



第4図 アンサンブル予報を使った500 hPa高度場の予報(初期値の日付1996年3月28日)。2日目から29日目の28日平均図で実線が500 hPa高度場で破線が平年偏差。負偏差のところはハッチが施してある。左:解析値(実際の値)。右:アンサンブル平均予報。



第5図 東日本の850 hPaの気温平年偏差の予報(初期値の日付1996年3月28日)。値は7日移動平均値。上図の左側は解析値(実際の値)で真ん中の太い縦線から予報が始まっている(但し、7日移動平均をとるため、この縦線より前から各線は違ってきている)。細い線は個々の数値予報結果(この場合10個)で、右側の太い線はそれらの平均値(アンサンブル平均)。下図が対応する解析値(実際の値)。

の不完全さに起因するものでなければ、大気予測可能な期間が予報対象期間より短いことを示していることになる。

予報精度がこのように変動することを考えれば、あらかじめ(予報発表の時点で)アンサンブルを構成する各数値予報間のばらつき(分散)により予測可能性を見積もることが重要であることになる。そうすれば、予報がどの程度の信頼性を持つのかを予報発表の時点で付加することができるようになる。

この予報の信頼性は予報文の中では確率予報を通じて発表されることになる。

6. まとめと今後の課題

1996年3月から開始した新しい1か月予報について簡単に説明した。第2章で述べた技術的課題を踏まえ、現時点の数値予報技術、アンサンブル予報技術、計算機能力を勘案しこのようなシステムとした。現時点でも一定の予報精度、予測可能限界の予報などの有効な情報の抽出は期待できるものまだまだ十分とはいえない。従って今後もシステムを着実に改善していく必要がある。改善の方向はいうまでもなく、第2章で示した技術的課題のより一層の改善であり、具体的には数値予報モデルの改良、アンサンブル予報法の改良、海面水温や土壌水分量等境界条件の改良等である。

したように平均的精度はこれよりやや劣るし、場合によってはアンサンブル平均予報が極端に成績が悪い場合がある。そのような場合は、それが数値予報モデル

1か月予報は、明日、明後日の天気予報等に重要な初期値問題としての性格と1か月より長い予報にとって重要な境界値問題としての性格を併せ持っており、それだけに技術的困難も大きい。しかし、この1か月予報の着実な改善の経験が、今後開発が本格化するであろう、より長い予報期間を対象とする数値予報モデルを使った気候予報にも活かされていくと考えられる。

参考文献

- Leith C. E., 1974: Theoretical skill of Monte Carlo forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 409-418
- Lorenz E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow, *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141
- Muraeu, R., F. Molteni, and T. N. Palmer, 1993: Ensemble prediction using dynamically conditioned perturbations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 299-323
- 室井ちあし, 隈健一, 岩崎俊樹, 1995: 気象庁新全球予報モデルの概要, 日本気象学会1995年度秋季大会講演予稿集.
- Palmer, T. N., 1993: Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 49-65
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecast at NMC: The generation of perturbations, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330
- 露木義, 1993: 最適モードを用いた予報精度の予測, 1993年日本気象学会春季大会予稿集.
- 吉松和義, 高野清治, 隈健一, 1996: 気象庁全球モデルによるアンサンブル1か月予報実験-夏-その2, 1996年日本気象学会春季大会予稿集.

≡≡≡支部だより≡≡≡

北海道支部 平成8年度気象講演会のお知らせ

テーマ『滝川周辺の気象と最近の地震活動』

日時:

平成8年10月18日(金) 午後1時～4時40分

会場:

滝川市大町1丁目2番15号

滝川市役所 大会議室(8階)

講演内容:

4人の講師により、一般市民を対象に身近な気象現象と最近の北海道周辺の地震活動について講演する。

①『最新レーダーが明かす降雪のしくみ』

北海道大学大学院理学研究科助教授 上田 博

②『グライダーと気象～雲達の千の顔・青空の千の色』

滝川市教育委員会スカイスポーツ課係長

丸伊 満

③『地球環境問題とオゾン層破壊』

北海道大学大学院地球環境科学研究科助教授

塩谷雅人

④『北海道北部浅発地震帯の活動～北竜町の地震を中心に～』

北海道大学理学部附属地震予知観測地域センター長

助教授 笠原 稔

主催:

日本気象学会北海道支部

共催:

滝川市, 滝川市教育委員会

後援:

NHK 札幌放送局, 北海道新聞社滝川支局

日本気象協会北海道本部, 札幌管区気象台