

気象庁週間アンサンブルの現状と開発

米原 仁・小森 拓也・酒井 亮太 (気象庁・数値予報課)

1. 気象庁における週間アンサンブル

1.1 現在の気象庁週間アンサンブル予報システム

気象庁週間アンサンブル予報システム（以下、週間 EPS）は週間天気予報作成の支援を目的に運用されており、各メンバーの予報を始め、アンサンブル平均やスプレッド等各種の資料が気象庁の週間予報において利用されている。

気象庁における週間 EPS の本運用は、2001 年 3 月の計算機システム更新と同時に開始された。以降初期摂動作成手法と数値予報モデル、およびメンバー数等に改良が施され、その精度向上が図られてきた（経田 2006）。表 1 に運用開始以来の主な仕様の変化をまとめる。

2007 年 11 月、週間 EPS に初期摂動作成手法の変更や、予報モデルの高解像度化等の大幅な変更が加えられた、ここではその変更内容及び改善点について述べる。

表 1: 週間 EPS の変遷

年月	モデル解像度	初期摂動作成手法	摂動ターゲット領域	アンサンブルサイズ
2001 年 3 月	T106L40	BGM 法	NH	25 (24+1)
2002 年 2 月	T106L40	BGM 法	NH,TR	25 (24+1)
2006 年 3 月	TL159L40	BGM 法	NH,TR	51 (50+1)
2007 年 11 月	TL319L60	SV 法	NH [†] ,TR [†]	51 (50+1)

NH(20N-90N),TR(20S-20N),NH[†](30N-90N),TR[†](20S-30N)

新週間 EPS の予報モデルは、同時期に現業化された高解像度全球モデル (TL959L60)¹ の低解像度版 (TL319L60) である。表 2 に新旧の週間 EPS の予報モデルを比較したものを示す。今回の変更で週間 EPS の解像度は大幅に強化されており、鉛直層数は 40 層から 60 層へ、水平解像度はこれまでの 1.125 度 (TL159、約 120km) から 0.5625 度 (TL319、約 60km) となった。図 1 に新旧週間 EPS の本州付近の地形を比較したものを示す、この高解像度化により、地形性降雨等の気象現象のより細かい表現が可能となった。

¹北川 他 (2007)

また、高解像度全球モデルと同様に、時間積分の 2 タイムレベル化、積雲対流スキームへの DCAPE の導入などの改良も行われ、予報モデルの高速化・精度向上がはかられている（北川 2006）。

表 2: 新旧週間 EPS の予報モデルの比較

	旧週間 EPS	新週間 EPS
水平解像度	TL159(1.125 度, 約 120km)	TL319(0.5625 度, 約 60km)
鉛直解像度	40 層 (モデル最上層気圧 0.4hPa)	60 層 (モデル最上層気圧 0.1hPa)
予報時間 (初期時刻)	216 時間 (12UTC)	
時間積分	3 タイムレベル (間隔: 1200 秒)	2 タイムレベル (間隔: 1200 秒)
初期値	TL319L40 の解析値を TL159L40 へ解像度変換したもの	TL959L60 の解析値を TL319L60 へ解像度変換したもの
海面水温 (境界値)	1.0 度格子の解析値	0.25 度格子の解析値
海水分布 (境界値)	1.0 度格子の気候値	0.25 度格子の解析値

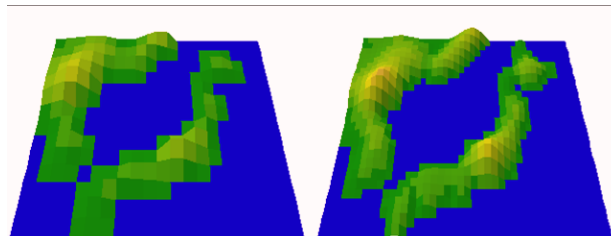


図 1: 新旧週間 EPS の本州付近の地形の比較。左が旧週間 EPS のもの、右が新週間 EPS のもの

表 3 に新週間 EPS で用いられている初期摂動作成手法の仕様を示す。2007 年 11 月の変更では、この手法が成長モード育成法 (BGM 法、Breeding of Growing Mode 法) (Toth and Kalnay 1993) から特異ベクトル法 (SV 法、Singular Vector 法) (Buizza and Palmer 1995) へ変更された。SV の計算には、全球解析の 4 次元変分法 (門脇 2005) で用いられている接線形モデルとその随伴モデルを利用している。旧週間 EPS で用いられていた BGM 法では、育成サイクルを用いて摂動を作成しており、過去の育成サイクル期間において成長してきたモード

表 3: 週間 EPS の初期摂動作成手法

	北半球領域	熱帯領域
SV 計算の対象領域	30N - 90N	20S - 30N
接線形・随伴モデルの解像度	T63L40(1.875 度)	
接線形・随伴モデルの初期値化	あり	
接線形・随伴モデルの拡散	水平拡散、鉛直拡散	
接線形・随伴モデルの物理過程	乱流	(左に加えて) 積雲対流、重力波抵抗、長波放射、雲水
評価時間	48 時間	24 時間
誤差の大きさの評価 (ノルム)	湿潤トータルエネルギー	
摂動として利用する成長後 SV の積分時間	48 時間	24 時間
初期摂動の振幅の大きさ	500hPa の高度場の RMS 値が気候学的変動量の 0.12	850hPa の気温場の RMS 値が気候学的変動量の 0.26
SV から初期摂動を作成する手法	パリアンスミニマム法	
利用する SV の数	それぞれの領域で 25 個	

から、アンサンプルの各メンバーの初期摂動を作成する(経田 2006)。BGM 法においては、育成サイクル期間に成長してきたモードがその後も引き続き成長することを期待しているが、実際には作成された初期摂動は必ずしも十分に成長するとは限らなかった。そのため、旧週間 EPS では予報期間の後半で十分なスプレッドを得るために、初期摂動の大きさを初期値解析の誤差と比べて大きめに調整する必要があった。

一方、新週間 EPS で採用された SV 法は、接線形モデルにおいて、初期時刻からある未来の評価時間の間での成長率が大きな誤差ベクトルを求め、アンサンプル予報の初期摂動を作成する手法である。この手法ではより適切に成長する摂動を求めることができるため、予報初期において初期摂動の大きさを適切にすることが可能になった(酒井 2008, 米原 2008)。

図 2 に新旧週間 EPS について、NH 領域 (20N-90N) についての 500hPa 面の高度場 (Z500) のスプレッドとアンサンプル平均予報の RMSE を、予報時間毎に比較したものを示す。検証結果は月の平均で、対象期間は左列が 2004 年の 8 月 (夏季)、右列が 2005 年の 12 月 (冬季) であり、上段が旧週間 EPS のもの、下段が新週間 EPS の結果である。旧週間 EPS では予報時間初期において RMSE よりもスプレッドが過大であったが、新週間 EPS ではかなり近い値になっており適正化されている。

また、TR 領域 (20S-20N) においても同様に、予報時間初期における過大なスプレッドが改善されている(図略)。検証は全て 2.5 °×2.5 °格子を用いて行っており、また以下全ての検証についても同様である。

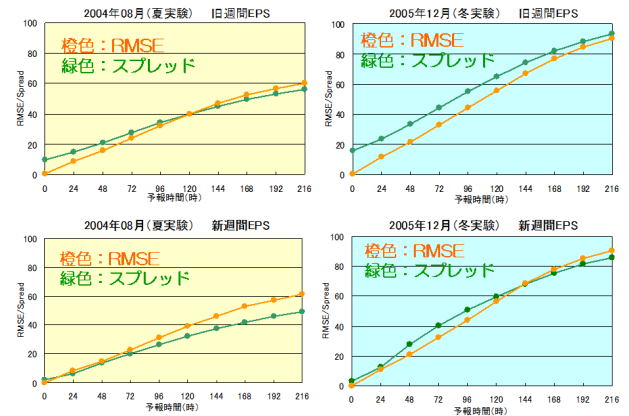


図 2: 新旧週間 EPS の、Z500 スプレッドとアンサンプル平均予報の RMSE。縦軸がスプレッド [m] (橙色線) 及び RMSE[m] (緑色線) で、横軸が予報時間 [時] である。検証結果は NH 領域についての月平均で、期間は左列が夏季で右列が冬季。上段が旧週間 EPS で下段が新週間 EPS の結果である。

図 3 に新旧週間 EPS について予報時間毎に NH 領域の予報のスコアを比較したものを示す。対象期間は図 2 と同じもので、赤線が新週間 EPS、青線が旧週間 EPS のものである。比較対象は、上段がアンサンプル平均予報の Z500 のアノマリー相関係数 (ACC)、中段が 850hPa 面での気温 (T850) のアノマリーが、気候学的変動量 σ の 1.5 倍より大きくなる確率のブライアスキルスコア (BSS)、下段が T850 のアノマリーが、 -1.5σ より小さくなる確率の BSS である。

ACC を見ると、冬季においては予報成績は同程度となっているが、夏季においては FT96 から FT168 にかけて若干の改善となっている、また、BSS においてはほぼ全ての予報時間において改善となっており、その改善幅も大きい。初期摂動作成手法の変更により、スプレッドをより適切にした効果が現れている。

1.2 現在の課題

アンサンプル予報においては、メンバーの集合が確率密度関数の広がり適切に補足していることが重要であり、そのためにはまず、スプレッドとアンサンプル平均予報の RMSE が適切に対応し

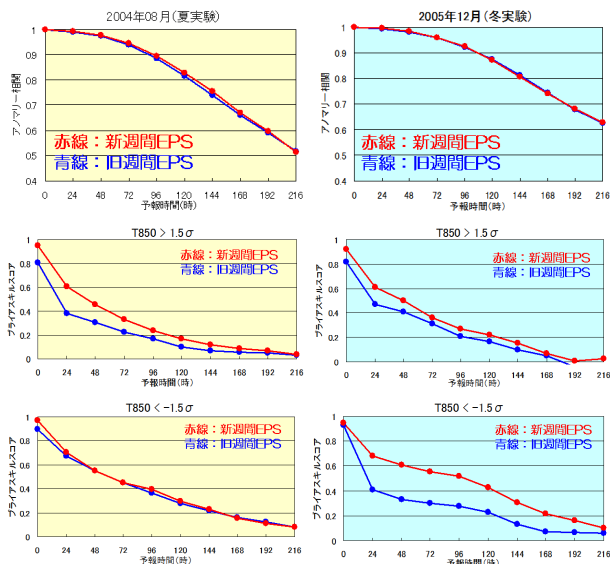


図 3: 新旧週間 EPS のスコアの比較。それぞれ上段が Z500 の ACC、中段が T850 の BSS (閾値 : T850 のアノマリー > 1.5σ)、下段が T850 の BSS (閾値 : T850 のアノマリー < -1.5σ) の比較である。縦軸が ACC 及び BSS、横軸が予報時間 [時]。左列が夏季、右列が冬季の結果で、赤線が新週間 EPS、青線が旧週間 EPS のもの。

ている必要がある。週間 EPS においては、2007 年 11 月における初期摂動作成手法の変更の結果、予報時間初期におけるこの関係は大きく改善されたが、完全というわけではなくまだいくつかの課題が存在する。

図 4 に、現在の週間 EPS の予報結果について、NH 領域での Z500 スプレッドとアンサンブル平均予報の RMSE の比較を示す。左図が 2008 年 07 月の月平均、右図が 2008 年 1 月の月平均である。緑線は、アンサンブルメンバー数を M として、両者の比 $(M+1)(\text{スプレッド})^2/(M-1)/RMSE^2$ をとったもので、完全モデルの仮定の下では 1 になるべき量である²。

図 4 を見ると、1 月においてはスプレッドは RMSE に比べて FT24 から FT144 にかけて大きくなっている。初期値摂動を構成する、SV 方によって求めた特異ベクトルの大きさは任意であり、初期摂動の大きさ自体は、本来は解析誤差から決定されるべきものである。しかし、現在の気象庁の解析予報システムでは解析誤差を求めておらず、週間 EPS においてはその大きさは調整パラメータとなっている。1 月において、スプレッドは予報初

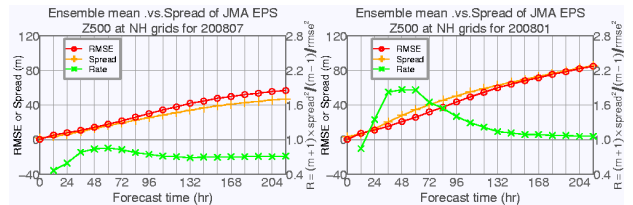


図 4: 最近の週間 EPS の予報結果について、NH 領域での Z500 スプレッド [m] とアンサンブル平均予報の RMSE [m] (左軸)、右軸は比で $(M+1)(\text{スプレッド})^2/(M-1)/RMSE^2$ 。赤線が RMSE で橙線がスプレッド、緑線が比である。

期の FT24 からすでに大きく、この過大の原因は初期値摂動の大きさが大きすぎることでありと考える。

一方、7 月においては FT72 付近からスプレッドが RMSE に比べ小さくなっている。予報の初期では両者は比較的良く一致しており、比で見たときに FT72 付近から悪化が始まっていることから、初期値摂動の大きさの問題とは考えにくい。Buizza et al.(2005) は ECMWF 他いくつかの現業センターの EPS の予報を比較した結果、予報後半においてスプレッドが不足するのは共通の問題であることを指摘しており、またモデルの不確実性を考慮した摂動を加えることは重要であると議論している。

スプレッド不足の問題は、熱帯領域においてより顕著である。図 5 に TR 領域における、Z500 (左図) と T850 (右図) についてのスプレッドとアンサンブル平均予報の RMSE を示す。

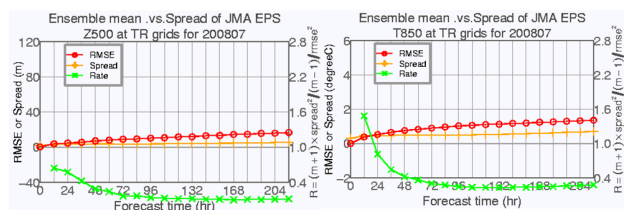


図 5: 最近の週間 EPS の予報結果について、2008 年 7 月における TR 領域でのスプレッドとアンサンブル平均予報の RMSE。図 4 と同様。

熱帯においては、予報の RMSE は予報時間と共に成長し続けるのに対して、スプレッドのは FT24 付近で成長が頭打ちとなっており、それ以降スプレッドが不足となっている。この点についてはまず、SV 法により成長する摂動が求まっているかが問題になるが、熱帯においても、中緯度帯の夏季

²Murphy(1988) 等参考

における特異ベクトルと同程度には成長率の大きな特異ベクトルが求まっており、また実際の予報における、初期摂動の成長も中緯度に比べるとやや劣るが十分成長している。このスプレッド不足について原因がはっきりと分かっているわけではないが、初期摂動についての問題だけであるとは考えにくく、改善の為に予報モデル自体の改善や、境界値やモデルの不確実性を考慮することが重要であると考えられる。

2. 確率的物理過程強制法導入の試み

現在我々は、週間 EPS における夏季や熱帯におけるスプレッド不足の改善や、確率予報の精度向上を目的に、確率的物理過程強制法導入の導入を試みている。

2.1 確率的物理過程強制法

確率的物理過程強制法は、Buizza et al. (1999) によってヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) において開発された手法であり、現在の同センターの現業 EPS で用いられている。

この手法では、予報時間を t 、系の状態の変数集合を $x(t)$ として、予報方程式の集合 $F(x, t)$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = F(x, t) \quad (1)$$

に対し、 $F(x, t)$ 中のパラメタリゼーションされた部分を $P(x, t)$ として、

$$\frac{\partial x}{\partial t} = F(x, t) + \alpha(\lambda, \phi, t)P(x, t) \quad (2)$$

とモデルの不確実性による摂動を表現する。ここで λ, ϕ は緯度、経度であり、 $\alpha(\lambda, \phi, t)$ は水平方向の区画毎に異なる、 $[-0.5, 0.5]$ の一様分布をとる確率変数で予報時間が進むとともに更新される。ECMWF においては、水平方向の区画には緯度、経度方向ともに 10 度の正方形、更新時間には 6 時間を用いている。

この α についての区画のとり方と更新時間は、モデルの不確実性による摂動の、空間と時間方向の相関長と対応している。Shutts (2005) によると、ECMWF におけるこの値は、中緯度において摂動が気象場のバランス成分に効果的に影響するように、空間方向にはロスビーの変形半径、時間方向にはコリオリタイムスケール ($1/f, f$: コリオリパラメータ) の 2 倍に近い値に設定されているようである。

2.2 2004 年夏実験の結果

この手法を評価する為に、現在の週間 EPS を用いて 2004 年 8 月を対象に評価実験を行った。

今回の実験については、確率変数 α は、 $[-0.5, 0.5]$ の一様分布で、水平方向の区画には 10 度の正方形、更新時間 6 時間を用いている。また、パラメタリゼーションの部分 $P(x, t)$ としては、乱流、長波放射、短波放射、重力波、格子スケールの雲、及び積雲対流の各過程を考え、各過程から計算される気温、比湿、東西風、南北風の時間変化量に確率変数をかけて摂動項とする。なお、コントロールメンバーにはこの摂動を加えない。以下、本手法適応有りをテスト (test)、無しをコントロール (cntl) と呼ぶ。コントロールとテストはモデルの本手法による摂動以外は、初期値と初期摂動、及び予報モデルについてまったく同じ条件である。

図 6 に 2004 年 8 月 24 日 12UTC 初期値の予報について、コントロールとテストで初期値が同じアンサンブルメンバー同士についての予報時間毎のアノマリー相関係数を示す。それぞれ左図が NH 領域の Z500 で右図が TR 領域の T850 のものである。

まず NH 領域の Z500 をみると、FT72 までほぼ 1 で総観場としては両者の違いは小さく、その後両者の違いが徐々に見え始めている。確率的物理過程強制法では、物理過程で計算される時間変化量をランダムに 0.5 倍から 1.5 倍にしており、一見その影響は強そうであるが、中緯度においてはこの手法による摂動を加えても予報時間がある程度進まないと、両者の総観場にあまり大きな違いは現れないようである。一方 TR 領域の T850 では、FT24 までに比較的大きな違い現れ、その後徐々にアノマリーの相関は小さくなっていき、その相関が小さくなっていく速度は NH 領域に比較して遅くなっている。

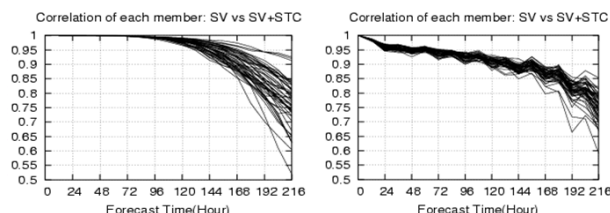


図 6: 確率的物理過程強制法の評価実験の結果 1。2004 年 8 月 24 日 12UTC 初期値の予報について、同じ初期値からスタートしたメンバー同士のアノマリー相関係数。

図 7 に予報時間毎のスプレッドを比較したもの

を示す。青線がテスト、赤線がコントロールで、左上図がNH領域のZ500[m]、左下図がTR領域のZ500[m]、右上図がNH領域のT850[K]、右下図がTR領域のT850[K]についての比較である。NH領域については、Z500ではスプレッドは微増、T850では増加となっている。一方、TR領域においては両要素ともスプレッドがかなり増加している。

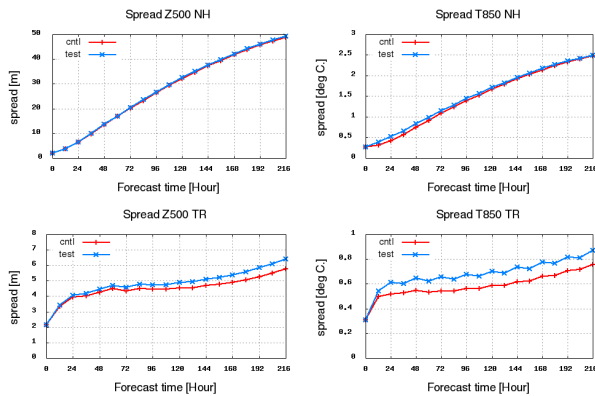


図 7: 確率的物理過程強制法の評価実験の結果 2。予報時間 [時] 毎のスプレッドの比較。テスト (青線) とコントロール (赤線) のスプレッドの比較。左上が NH 領域の Z500[m]、左下が TR 領域の Z500[m]、右上が NH 領域の T850[K]、右下が TR 領域の T850[K] についての比較。

最後に、図 8 にアンサンブル平均予報についての、FT216 における海面更正気圧 (PSEA) の解析値からの平均誤差の月平均の比較を示す。今回の実験では、両者はほとんど変わらず、本手法を適用した影響は見られなかった。

2.3 今後の開発

アンサンブル予報において、初期値の不確実性だけでなくモデルの不確実性に基いた摂動を加えることは重要であり、これまで様々な研究が行われ、多くの現業センターにおける現業予報に利用されてきている。気象庁においても、現在確率的物理過程強制法の導入を目指し開発が続けられている。今後もこの開発を続けるとともに、より高度な確率的物理過程の導入へ向けて開発を行う方針である。

参考文献

門脇隆志, 2005: 全球 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 100–105.
 北川裕人, 大河原育揚, 美濃寛士, 平井雅之, 中川雅之, 村井臣哉, 小森拓也, 小野田浩克, 田宮久一郎

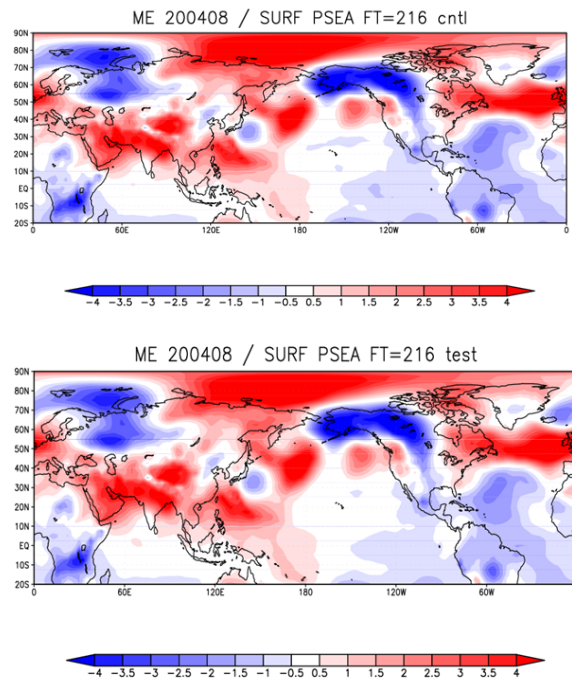


図 8: 確率的物理過程強制法の評価実験の結果 3。アンサンブル平均予報についての FT216 における PSEA のバイアス比較 (対解析、月平均)。上図がコントロール、下図がテスト。

2007: 高解像度全球モデル. 平成 19 年度数値予報課研修テキスト, 気象庁予報部, 1–28.

北川裕人, 2006: 高解像度全球モデル. 平成 18 年度数値予報課研修テキスト, 気象庁予報部, 7–10.

経田正幸, 2006: アンサンブル予報概論. 数値予報課報告・別冊第 52 号, 気象庁予報部, 1–12.

酒井亮太, 2008: 気象庁の新しい週間アンサンブル予報システム. 天気, 55, 67–76.

米原 仁, 2008: 週間アンサンブル予報システムの改良. 平成 20 年度数値予報課研修テキスト, 気象庁予報部, 23–26.

Buizza, R., T. N. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1434–1456.

Buizza, R., Miller M., Palmer T. N., 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 2887–2908.

Buizza, R., P. L. Houtekamer, Z. Toth, G. Pellerin, M. Wei, and Y. Zhu, 2005: A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems. *Monthly Weather Rev.*, 233, 1076–1097.

- Murphy, J. M., 1988: The impact of ensemble forecasts on predictability. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **114**, 463–493.
- Shutts, G., 2005: Kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3079–3102.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317–2330.