

## 気象庁の新しい週間アンサンブル予報システム\*

酒井 亮太\*\*

### 1. はじめに

気象庁では、週間天気予報の支援を目的として、週間アンサンブル予報システム(週間EPS)を運用している。2007年11月、週間天気予報の精度向上のため、週間EPSに大幅な変更を行った。本稿では、新しい週間EPSの概要について、アンサンブル予報についての基礎知識と共に紹介する。

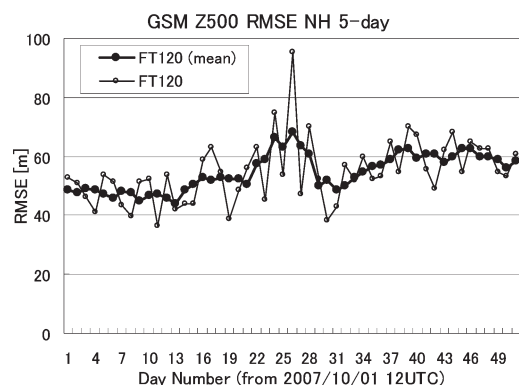
### 2. アンサンブル予報とは

近年の数値予報技術の進歩により、数値予報モデルによる予報誤差は年々小さくなっているが、皆無ではない。予報誤差の発生する要因は2つあり、1つには初期値に含まれる誤差で、観測データそのものに含まれる誤差や数値予報モデルの初期値作成の解析処理で生じる誤差などがあげられる。もう1つは予報モデルの時間積分時に生じる誤差で、予報モデルの時間・空間的離散化や物理過程の不完全性から生じる誤差などが挙げられる。これらの誤差は、たとえ初期の頃はわずかであっても、大気の流れの非線形的性質により、予報時間が進むにつれて増幅してしまう。したがって、数値予報の結果には必ず誤差が含まれることから、本来は予報誤差も考慮して利用されるべきであるが、単独予報(決定論的予報)では、そのような予報誤差の情報が事前に与えられることはない。

第1図は気象庁で現業運用されている全球モデルによる5日予報の500 hPaの高度の予報誤差である。誤

差は日々変動しており、大気の状態に大きく支配される。複数の数値予報の結果に統計的処理を加えることにより、この予報誤差の変動を事前に予測でき、「予報の不確実性」を定量的に扱うことが可能となれば、確率情報などを付加することにより、予報誤差を考慮した予報の利用が可能となる。

第2図はアンサンブル予報手法の概念図である。ここでは気象庁の週間EPSと同様に初期値の不確実性のみを考慮した手法について示している。初期値に解析の誤差程度のばらつき(摂動)を与えた複数のアンサンブル初期値を用意し、それぞれに対して数値予報モデルによる予測を実行する。そこで得られた複数の数値予報結果(アンサンブルメンバー予報)のばらつきを統計的に処理することにより「予報の不確実性」

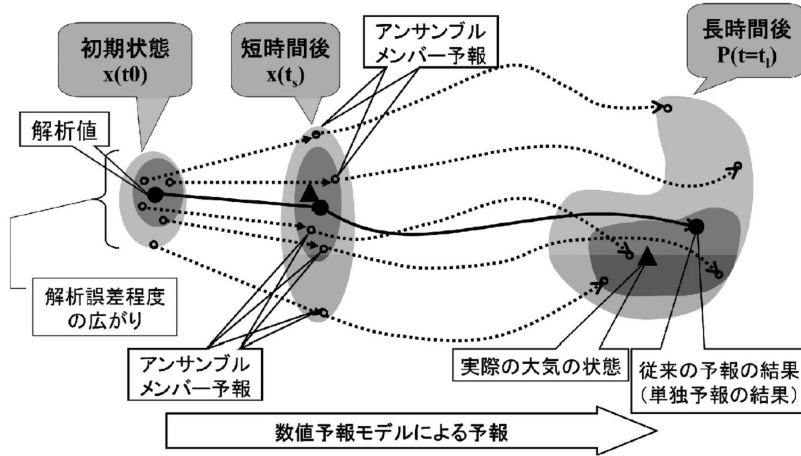


第1図 気象庁現業全球数値予報モデルによる北半球(20 N-90 N)の500 hPa面高度の5日予報の誤差。横軸は2007年10月1日12 UTCからの日数。縦軸は予報誤差(RMSE: m)。細線は日別の予報誤差。太線は5日移動平均とした予報誤差。

\* A new operational One-week Ensemble Prediction System at JMA.

\*\* Ryota SAKAI, 気象庁予報部数値予報課.

© 2008 日本気象学会



第2図 アンサンブル予報の概念図(初期値アンサンブル)。○印は各アンサンブルメンバーの予報。●印は解析値から予報を開始する単独予報の結果。▲印は長時間予報後の実際の大気の状態。灰色の領域はそれぞれの時間で大気の状態が存在していると考えられる確率密度を表している。

を得ている。アンサンブルメンバーの予報結果が互いに大きく異なれば予報の信頼度は小さく、逆に予報が揃っていれば予報の信頼度は大きいといえる。ここで重要なことは、適切な摂動を予報初期値に与えることであり、予報誤差の変動に影響を与えるような初期値の不確実性を十分に反映した初期摂動を作成する必要がある、そのためにさまざまな手法が考案されている。

### 3. 気象庁週間アンサンブル予報システムの変遷

第1表に気象庁で現業運用されている週間EPSの変遷を示す。気象庁の週間EPSは、1999年3月の試験運用によりスタートした。このときの初期摂動作成手法はBGM (Breeding of Growing Mode) 法(Toth and Kalnay 1993)を採用していた。予報モデ

第1表 気象庁で運用している週間アンサンブル予報システムの変遷。

システム変更年月	モデル解像度 (水平、鉛直解像度)	初期摂動作成手法	摂動領域	アンサンブルサイズ
1999年3月 (試験運用)	T63L30 (1.875度、30層)	BGM法	北半球(20N-90N)	9(8+1)
2001年3月	T106L40 (1.125度、40層)	BGM法	北半球(20N-90N)	25(24+1)
2002年2月	T106L40 (1.125度、40層)	BGM法	北半球(20N-90N) 熱帯(20S-20N)	25(24+1)
2006年3月	TL159L40 (1.125度、40層)	BGM法	北半球(20N-90N) 熱帯(20S-20N)	51(50+1)
2007年11月	TL319L60 (0.5625度、60層)	SV法	北半球(30N-90N) 熱帯(20S-30N)	51(50+1)

陰影部の期間は試験運用期間を示す。  
アンサンブルサイズは(摂動ラン数+コントロールラン数)で示している。

ルは、計算機資源の制約上、解像度の粗い全球モデルでの運用であった。また、アンサンブルサイズ(メンバー数)も小さく9メンバーで構成されていた。

2001年3月に、計算機システムの更新に合わせて週間EPSの本運用が開始された。この時、予報モデルは大幅な高解像度化がなされ、アンサンブルサイズも25メンバーへ強化された。

その後、初期摂動作成手法、予報モデル本体の双方にさまざまな改良が加えられ、更に2006年の計算機更新時にはアンサンブルサイ

ズが51まで増強され、週間天気予報支援資料の精度向上が続けられてきた。

今回の週間EPSの変更は、初期摂動作成手法をBGM法からSV(Singular Vector)法(Buizza and Palmer 1995)へ、予報モデルは水平解像度を1.125度(TL159)から0.5625度(TL319)へ、鉛直解像度を40層から60層へ、それぞれ変更となっており、週間EPS本運用開始以来、最も大きな変更となっている。次章では、新週間EPSの概要について紹介する。

### 4. 新週間アンサンブル予報システム

ここでは新週間EPSの概要について、4.1節、4.2節で初期摂動作成手法の変更点について、4.3節で予報モデルの改良についてそれぞれ解説する。

#### 4.1 初期摂動作成手法の変更

新週間EPSの初期摂動作成手法は、これまでのBGM法からSV法へと変更されている。BGM法は、短時間予報(例えば12時間予報)で成長した誤差がその後も引き続き成長することを仮定した初期摂動作成手法である。一方、今回週間EPSで採用したSV法は、評価時間(例えば48時間)内に誤差の線形成長が大きな摂動が非線形モデルでも成長することを仮定した初期摂動作成手法である。

これまでの週間EPSのBGM法による初期摂動作成では、得られた初期摂動が必ずしも十分に大きな誤差成長率を持つとは限らず、予報後半で十分なスプ

レッドを得るために初期摂動を不自然に大きくする必要があった。今回、週間 EPS の初期摂動作成手法として SV 法を採用することにより、予報初期における誤差成長の大きな摂動を算出して利用することが可能となることから、このような過大な初期摂動を利用しなければいけないという問題の解決が可能となった。

4.2 新週間 EPS のアンサンブル初期摂動作成方法

SV 法では数値予報モデルを線形化した接線形モデルとその随伴モデル（アジョイントモデル）を用いて、ある評価時間内で線形成長率の最も大きな摂動を求め、アンサンブル予報の初期摂動として利用する。なお、ここでは、新週間 EPS での SV 法の仕様および初期摂動作成手法について述べる。SV 法の理論については山根（2002）、数値予報モデルへの利用の詳細については経田（2006）や山口（2006）に解説があるので、そちらを参照していただきたい。

週間 EPS における初期摂動作成手法の仕様は第 2 表のとおりである。初期摂動は北半球（北緯30度から北緯90度）と熱帯（南緯20度から北緯30度）の2つの領域に分けて計算している。SV 法で必要な接線形モデルは、気象庁の全球解析で用いられている全球4次元変分法（門脇 2005）と同じものを利用している。北半球領域では一部の物理過程（初期値化、力学過程、水平拡散、鉛直拡散）のみの簡略化された物理過程を考慮する接線形モデルで計算した乾燥 SV を、熱帯領域ではそれらに重力波抵抗、長波放射、雲水過程、積雲対流過程を加えた多くの物理過程を考慮した

湿潤 SV をそれぞれ利用している。また、SV 計算における成長率の評価時間は、北半球で48時間、熱帯で24時間とし、成長率の大きいものから順番に必要な個数求めている。以上のような設定は、北半球域では傾圧不安定による現象を、熱帯域では湿潤過程が重要な現象を、それぞれを対象としているためである。このとき、成長率を評価する指標としては、Ehrendorfer *et al.* (1999) の湿潤トータルエネルギーノルムを利用している。

$$TE = \frac{1}{2} \int_D \int_{\eta_1}^{\eta_2} \left[ u'^2 + v'^2 + \frac{C_p}{T_r} T'^2 \right] d\eta dD + \frac{\epsilon}{2} \int_D \int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{L^2}{C_p T_r} q'^2 d\eta dD + \frac{1}{2} \int_D RT_r \left( \frac{P'_s}{P_r} \right)^2 dD \quad (1)$$

ここで  $C_p$  は定圧比熱、 $R$  は気体定数、 $L$  は潜熱（蒸発）、 $u'$ 、 $v'$  は風速、 $T'$  は気温、 $P'_s$  は地上気圧、 $q'$  は比湿に対応し、 $\epsilon = 1/25$  は水蒸気の効果を示す経験的に定めたパラメータ、 $T_r = 300$  K、 $P_r = 800$  hPa は参照大気の状態および気圧である。また、積分区間は水平ターゲット領域、 $\eta$  は鉛直層数に対応する。このようにして求まる「今後成長する SV」に加え、過去から初期時刻までに「成長した SV (Evolved SV)」も利用している。成長した SV は、それぞれの領域における評価時間前（北半球は48時間前、熱帯は24時間前）の初期値で計算された SV を、現在の初期時刻まで評価時間分だけ接線形モデルで時間積分させたものである。これは、この時刻まで成長した SV はその後も成長する可能性があること考慮しており、BGM 法の考え方に似ている。「成長した SV」は「今後成長する SV」と線形結合して利用される。

このようにして求めた複数の SV は、それぞれ個々の擾乱に対応した局所的な分布を示すことから、複数の SV を重ね合わせるにより、適切な空間分布をもった初期摂動を作成する。その際、初期摂動の振幅の大きさは、北半球領域と熱帯領域でそれぞれ指

第 2 表 新週間アンサンブル予報システムの初期摂動作成手法の仕様。

	北半球領域	熱帯領域
摂動作成手法	Singular Vector法(特異ベクトル法)	
対象領域	北緯30度～北緯90度	南緯20度～北緯30度
接線形・随伴モデルの解像度	T63L40 (1.875度)	
接線形・随伴モデルの物理過程	* simplified-physics	** full-physics
評価時間	48 時間	24 時間
ノルム(摂動の大きさの評価)	湿潤トータルエネルギー	
Evolved SV ***	利用 (48 時間積分)	利用 (24 時間積分)
アンサンブル初期摂動作成手法	バリエアンスミニマム法	
初期摂動の振幅	500hPaの高度の変動量のRMS値が気候学的変動量の12%.	850hPaの気温の変動量のRMS値が気候学的変動量の26%.
初期摂動数	25個	
摂動ラン数(アンサンブルメンバー数)	50メンバー	

\* simplified-physics : 初期値化、水平拡散、鉛直拡散、乱流過程。

\*\* full-physics : 上記の物理過程に加えて、重力波抵抗、長波放射、雲水過程、積雲対流過程。

\*\*\* Evolved SV: 前のアンサンブル摂動作成時に作成された初期摂動を、接線形モデルで積分して得られた摂動を利用する手法。

標となる気象要素の気候学的変動量に応じて決定される。最後に、北半球領域と熱帯領域で求めたそれぞれの初期摂動を線形結合することにより、25個のアンサンブル予報初期摂動が作成され、これらのアンサンブル予報初期摂動を週間EPS用の初期値に加えたメンバーと引いたメンバーを作成することにより50個の摂動ランを作成し、コントロールランをあわせて合計51個のアンサンブル予報メンバーを用意している。

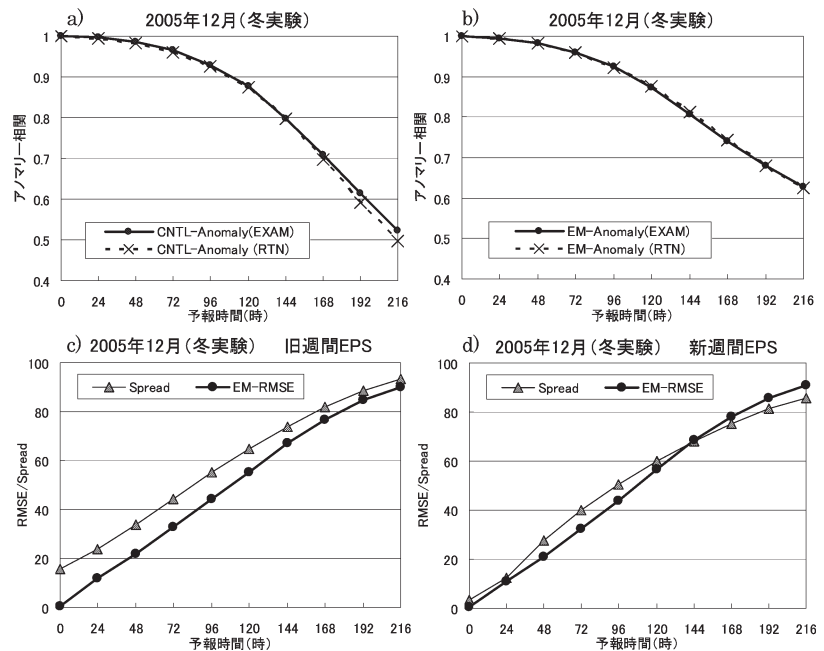
#### 4.3 予報モデルの改良

新週間EPSの予報モデルの仕様を旧週間EPSの予報モデルと比較して第3表に示す。予報モデルは、基本的には同時期に運用開始となった高解像度全球数値予報モデル(TL959L60)(北川 2008)と同じもので、その水平解像度を低くしTL319L60としたバージョンである。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)から0.5625度(TL319)へと高解像度化されている。このほか、高解像度全球数値予報モデルと同様に、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ている(北川 2006)。なお、週間EPSで利用されている初期値は、高解像度全球数値予報モデル用の解析値を週間EPSの解像度(TL319L60)へ解像度変換したものを利用している。

第3表 新週間アンサンブルシステムの予報モデルの仕様。

	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(地上~0.4hPa)	60層(地上~0.1hPa)
アンサンブルサイズ	51メンバー(50摂動ラン+コントロールラン)	
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を利用。	TL959L60の解析値をTL319L60へ解像度変換したものを利用。
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

予報モデルは、共に全球モデルの低解像度版を利用



第3図 新週間アンサンブル予報システムの性能評価実験の検証結果(2005年12月)。北半球域(北緯20度から北緯90度)の500 hPa高度の予報の検証。上段はアノマリー相関による検証の比較で、a)がコントロールラン、b)がアンサンブル平均予報に対応し、実線が新週間EPS、破線が旧週間EPSのスコアである。下段はスプレッドとアンサンブル平均予報のRMSEの関係の比較で、c)が旧週間EPS、d)が新週間EPSに対応し、細線の▲印がスプレッド(単位:m)、太線の●印がアンサンブル平均予報のRMSE(単位:m)。

#### 5. 新週間アンサンブル予報システムの精度

新週間EPSの運用開始にあたって、事前に新旧システムの性能比較を行うための実験を行った。ここでは、そのうち2005年12月の1ヶ月間を対象として行っ

た性能評価実験の対初期値検証の結果を紹介する。

第3図は北半球領域（北緯20度から北緯90度，初期擾動作成時の「北半球領域」とは異なる。）の500 hPa 面の高度場の検証結果である。予報と実況のパターンの相似度を示すアノマリー相関で評価すると，コントロールランのスコアが高い相似度を示す1に近いことから，新週間 EPS は旧週間 EPS よりも精度が良くなっていることが分かる（第3図 a）。一方，アンサンブル平均のアノマリー相関には差は見られなかった（第3図 b）。次に，アンサンブル予報のばらつきを度を示すスプレッド（以下，単にスプレッドとする）について評価する。スプレッドはアンサンブル平均予報の平方根平均二乗誤差（RMSE）と同程度となることが望ましい（高野 2002）。旧週間 EPS（第3図 c）では，スプレッドがアンサンブル平均予報の RMSE と比較して非常に大きくなっており，特に予報期間前半を中心に過剰なスプレッドとなっている。一方，新週間 EPS（第3図 d）では，予報期間を通してほぼ同程度となっており，適切なスプレッドとなっている。

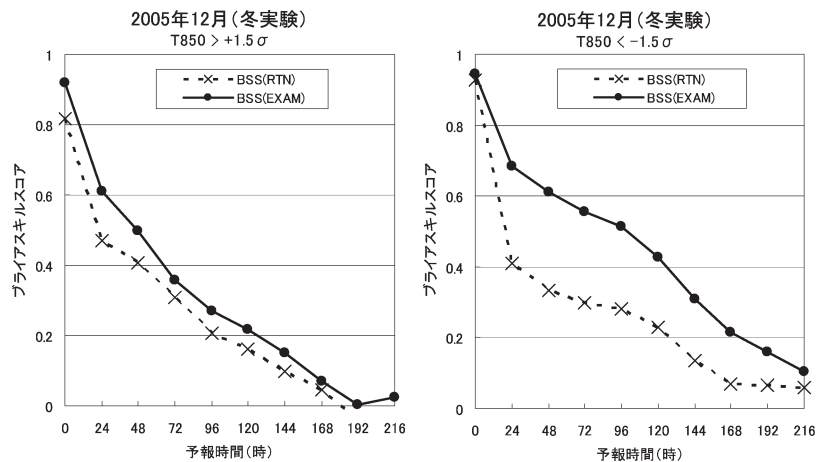
第4図は確率予報の検証結果である。顕著気象現象の確率予報の精度評価を目的として，850 hPa 面気温の予報について，気候値からの偏差が $1.5\sigma$ （ $\sigma$ ：気候学的な変動の標準偏差）以上または以下となる確率予報についてのブライアスキルスコアを示している。検証領域は東アジア領域（北緯30度から北緯60度，東経110度から東経150度の領域）としている。検証の結果，両確率予報とも新週間 EPS のスコアは旧週間 EPS のスコアを上回っており，確率予報の精度向上が確認できる。

以上，統計検証の結果から，旧週間 EPS と比較して，新週間 EPS の予報精度は同程度以上に向上しているのが確認できた。今回の週間 EPS の変更では，予報モデルの解像度が大幅に強化されている。この高解像度化の効果を第5図に示す。この図は，冬型の気

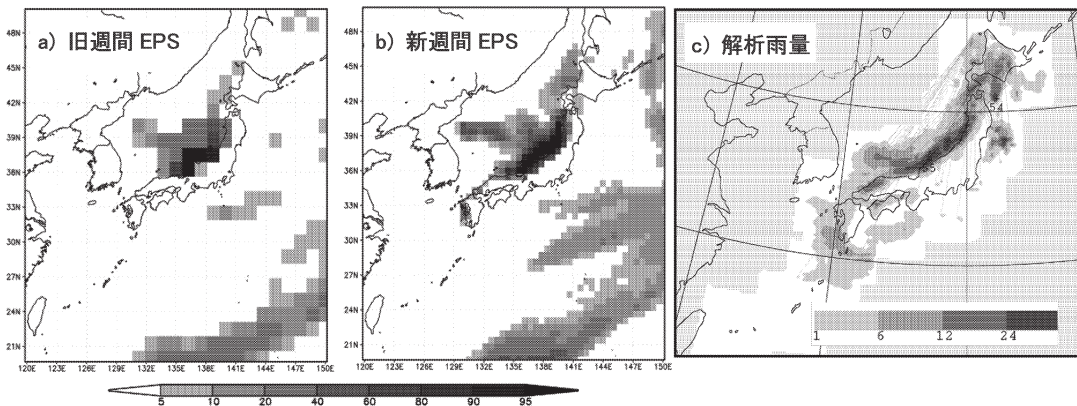
圧配置における日本付近の降水確率分布と，対応する時刻における解析雨量による前24時間降水量分布である。予報モデルの高解像度化の結果，冬型の気圧配置における日本海側の地形性降水の表現が，よりの確にかつ明瞭に表現されている。このように，地形の影響を受ける降水や気温の予報について，予報の表現能力が向上し，より現実的な確率表現が期待される。

### 6. おわりに

最後に週間 EPS の精度向上と利用改善に向けた，今後の気象庁の取り組みを紹介する。現在の週間 EPS では初期値のみの不確実性を考慮したアンサンブル予報システムとなっており，第2章で述べた数値予報モデルの不確実性は考慮していない。欧州中期予報センター（ECMWF）では確率的物理過程強制法（Stochastic Physics Scheme）を用いて，数値予報モデルの不確実性についても考慮している（Buizza *et al.* 1999）。Buizza *et al.* (2005) は，ECMWF のアンサンブル予報システムが米国環境予測センター（NCEP）やカナダ気象サービス（MSC）のそれよりもスプレッドの成長が大きい理由の1つとして，この確率的物理過程強制法を導入しているためとしている。今回気象庁が導入した週間 EPS についても，現業運用前の性能評価実験から，夏季のスプレッドの成長が鈍く予報後半のスプレッドが小さいことが確認さ



第4図 新週間アンサンブル予報システムの性能評価実験の確率検証の結果（2005年12月）。東アジア域（北緯30度から北緯60度，東経110度から東経150度）の850 Pa 面の気温予報の気候値からの偏差についてのブライアスキルスコア。左図が $+1.5\sigma$ （ $\sigma$ ：気候学的な変動の標準偏差）を越える確率，右図が $-1.5\sigma$ を下回る確率についての検証結果。



第5図 降水の確率予報の分布図と対応する解析雨量。a) は旧週間 EPS について、2005年12月13日12 UTC 初期値の4日予報における前24時間予報降水量が12 mm 以上となる確率分布(単位:%)、b) はa)と同じ、ただし新週間 EPS についての確率分布、c) は対応する時刻の前24時間積算の解析雨量分布(単位:mm)。a) と b) の新旧週間 EPS の図の確率分布の解像度は、モデルの解像度にほぼ対応している。

れており、これを軽減するために確率的物理過程強制法の導入のための開発を進めている。このほか、初期摂動作成についても、より適切なアンサンブル初期摂動作成のために、SV 計算での摂動の成長率を評価するノルムの定義や領域(ターゲット領域)などについても改良を進めていく計画である。

アンサンブル予報システムの予報結果を有効に利用するためには、統計的手法などを用いてさまざまな情報を引き出す必要があり、予報の応用のためのプロダクトの開発もアンサンブル予報システム開発と同様に重要である。今回の週間 EPS の変更では、特に予報モデルの高解像度化により、気象現象の表現能力の向上が期待できる。これにより、強風や大雨といった総観規模の顕著現象の発生の可能性について、より現実的な確率表現が可能となる。今後、このような能力の向上を十分生かしたプロダクトの開発を行い、これまで週間天気予報が主な目的であった週間 EPS の利用を、総観規模の顕著現象に対する気象災害リスクの評価への応用も含めた利用方法を検討していきたい。

#### 参考文献

- Buizza, R. and T. N. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434-1456.  
 Buizza, R. M. Miller and T. N. Palmer, 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. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1076-1097.

Ehrendorfer, M., R. M. Errico and K. D. Raeder, 1999: Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1627-1648.

門脇隆志, 2005: 全球4次元変分法。数値予報課報告・別冊, (51), 気象庁予報部, 100-105.

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

北川裕人, 2008: 気象庁の新しい高解像度全球数値予報モデルについて。天気, **55**, 509-514.

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

高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術。アンサンブル予報, 気象研究ノート, (201), 73-103.

Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.

山口宗彦, 2006: 特異ベクトル法の開発。数値予報課報告・別冊, (52), 気象庁予報部, 50-58.

山根省三, 2002: 摂動の線型発展の理論。アンサンブル予報, 気象研究ノート, (201), 21-71.