

# 高解像度全球モデルを用いた次期現業アンサンブル予報システム

経田正幸・酒井亮太・山口宗彦（気象庁予報部数値予報課）

## 1. THORPEXと現業アンサンブル予報

THORPEX（観測システム研究・予測可能性実験）とは、世界気象機関の下で実施される国際研究計画である<sup>1</sup>。その目的は、1日から2週間先までの社会的に影響が大きい大気現象の予報精度の向上であり、気象庁といった現業気象機関と研究機関の協力により顕著現象の解明と予測可能性の研究を行う点がTHORPEXの特徴である。THORPEXの実施期間は2005～2014年であり、現在国内でも日本気象学会THORPEX研究連絡会を通じた活動が盛んである（大淵・榎本 2005）。

研究促進のためのプロジェクトのひとつに、TIGGE（THORPEX双方向グランド全球アンサンブル）がある。これは世界中の数値予報センターで現業的に実施されている中期予報を対象としたアンサンブル予報（中期アンサンブル予報）を集合させ、より多様なアンサンブルの作成と利用を目指している。つまり、異常気象や顕著現象などの予測可能性を研究する世界中の研究者は、TIGGEの実現により、世界中の現業アンサンブル予報の結果を準リアルタイムで手にすることが可能となる。一方、日々の天気予報の支援のために現業運用されるアンサンブル予報システム（EPS、アンサンブル予報のための数値予報システム）には、理論的研究の成果に加え、アド・ホックともいえる調査結果に基づいた改良作業が施されている。このため、TIGGEを活用した予測可能性研究は、比較的頻繁に変更が施される現業EPSの動向に沿ったものとなるが、その成果やそのための高度な数値予報の活用技術は、現業EPSの改良にとって有益な情報となると期待されている。

ここでは、現在の中期EPSとその課題を述べる。さらに、気象庁の中期EPS（週間天気予報の支援を目的とすることから週間EPSと呼ぶ、経田2006a）については、最新の開発状況と問題点を述べる。

## 2. 中期EPS

### 2.1. 現業運用と利用

1992年12月、米国環境予測センター（NCEP）と欧州中期予報センター（ECMWF）はほぼ同時に中期EPSの現業運用化に成功し、現在では気象庁を始め十近い現業数値予報センターが中期EPSを運用

日付	11 土	12 日	13 月	14 火	15 水	16 木	17 金
北部	雨時々止む	曇時々雨	晴時々曇	曇一時雨	曇一時雨	曇一時雨	曇時々晴
降水確率(%)	40/70/60/70	60	20	70	50	50	30
南部	曇時々雨	曇時々晴	晴時々曇	曇	曇時々晴	曇時々晴	晴時々曇
降水確率(%)	30/70/50/50	30	50	40	30	30	20
京都 最低(℃)	15(←)	8(±2)	5(±3)	9(±3)	7(±3)	5(±4)	5(±4)
京都 最高(℃)	19(←)	14(±4)	18(±3)	18(±4)	15(±4)	14(±4)	16(±4)
日別信頼度			A	A	B	B	B
平年値	降水量の合計		最高最低気温		最高気温		
京都	平年並 3 - 19mm		8.1℃		17.3℃		

週間天気予報の的中率は期間の後半になるほど下がります。このため、気象庁では利用の際の参考として、発表した週間予報を過去の週間予報の精度と比較して、A,B,Cのランク付けを行っています。

- ・A: 予報期間前半(4日目まで)の平均的な精度と同程度の高い信頼度
- ・B: 予報期間後半(4日目以降)の平均的な精度と同程度の並の信頼度
- ・C: 予報期間後半(4日目以降)の平均的な精度より低い、予報精度の低い信頼度

図1: 週間天気予報の発表例と信頼度の説明（気象庁ホームページより）。日別かつ地域別に、天気予報、降水確率、最低・最高気温と誤差幅、信頼度が発表されている。

している。そして、これらセンターのほとんどは、TIGGEプロジェクトへの参加を表明している（竹内 2006）。

現状の中期EPSが提供するアンサンブルサイズは、日別に30～100程度である。この数は、アンサンブル平均予報の推定精度の向上と顕著現象といった気候学的に稀な現象の検出に、最低限必要な大きさといえる。また、中期EPSの水平分解能は100km程度であり、日別の天気予報を行う上で重要となる総観規模擾乱を表現可能な大きさである。なお、EPSの性能を決めるこれら要素の構成は、EPSの現業運用に割り当て可能な計算機資源の大きさだけでなく、予報作業開始までの計算終了を見込んだものである。このような現業運用上の制約のため、現業EPSのアンサンブルサイズは、大気の自由度の大きさに比べて非常に小さい値しか取りえない。

このような現業EPSの結果が表す総観規模擾乱の不確実性は、天気予報として一般に提供されている。例えば、気象庁が発表する週間天気予報は一週間先までのいくつかの日別予報要素からなる（図1）。例えば、降水確率予報や気温の誤差幅、信頼度は、アンサンブル予報のばらつきに基づいている。さらに、現業運用中の中期EPSは、Buizza(2006)にある予報値などの提供という形で、延長予報や局地予報、洪水予報などを対象とする他のEPSへの支援をも担っている。

<sup>1</sup> <http://www.wmo.int/thorpex/>

## 2.2. 性能と課題

アンサンブルサイズはもちろん、EPSモデルの性能や分解能、初期摂動作成法といった構成要素がEPSの性能を決める。現業運用中の全ての中期EPSには、初期値に必然的に含まれる誤差が引き起こす数値予報の不確実性を効率的に表すためのアンサンブル手法(初期摂動作成法)が取り入れられている。代表的な初期摂動作成法として、最初の中期EPSに導入された手法である成長モード育成法(Toth and Kalnay 1993)と特異ベクトル(SV)法(Buizza and Palmer 1995; Palmer et al. 1998)がある。これらは摂動の線形発展理論を応用した技術であり、現在でも多くの中期EPSに採用されている。また、数値予報の誤差には、初期値の不完全性だけでなく数値予報モデルの不完全性に起因するものもある。このことから、カナダ気象センター(CMC)はEPSモデルとして複数の数値予報モデルを用い、またECMWFは確率的物理変化項法(stochastic physics, Buizza et al. 1999)を開発し、導入している。

数値予報モデルの不完全性を表すアンサンブルを取り入れる現業EPSが実際には限られているように、現業EPSの構成内容は最新の数値予報技術に基づいているとは限らず、それを運用する数値予報センターの事情によって様々である。Buizza et al.(2005)は、CMC, ECMWF, NCEPのアンサンブル平均予報の3カ月平均の精度を比較した。図2を見ると、いずれの中期EPSも予報期間後半のばらつきが実際の数値予報の誤差の範囲を表現できていないことがわかる。つまり、現状の中期EPSは予報の不確実性を十分に表しきれていない。

また、一般の数値予報と同様に、EPSが表現可能な現象には限界があり、現状の中期EPSでは台風に伴う地形性の大雨といった顕著現象を、十分な精度で定量的に表せない。このことから、中期EPSの結果を初期値や境界値とする局地モデルによるアンサンブル予報の現業化もなされている(力学的ダウンスケーリング手法、例えば

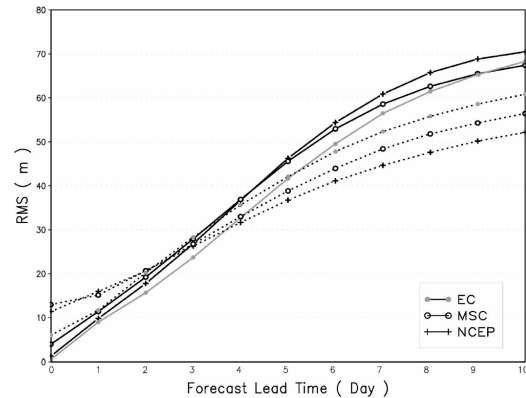


図2: 3センター(CMC,ECMWF,NCEP)のアンサンブルスプレッド(点線)とアンサンブル平均予報の平方根平均二乗誤差(RMSE、実線)。検証期間は2002年5~7月、検証要素は500hPa面高度、検証領域は20N-80Nである。(Buizza et al. 2005)

Montani et al.(2003) )。それでも、総観規模の現象とより小さな現象との相互作用が強い場合の不確実性は、このような手法でも表現できないであろう。

信頼性の高いアンサンブル予報を運用するために、中期EPSの改良作業は進められている。現業EPSには、依然として多くの課題があり、その克服のため新たなアンサンブル手法の開発や導入といった開発作業も盛んである。

## 3. 気象庁の週間EPSの高度化

### 3.1. 高度化の目的

週間EPSの運用目的は週間天気予報の支援であり、その本運用は2001年3月の計算機システム更新と同時に開始された。そして、2006年3月の新たな計算機システムの導入を機に、確率情報の精度向上を目的としたメンバー数の増強を実施した。2007年には、予報発表区域毎の支援資料の拡充を目指し、EPSモデルの高解像度化を行う予定である。それと同時に、EPSモデルを気象庁全球

表1: 高解像度実験と対照実験の仕様の比較

	高解像度実験	対照実験
EPSモデル	気象庁全球モデル TL319L60	気象庁全球モデル TL159L40
初期摂動作成法	特異ベクトル法	成長モード育成法
初期摂動の領域と個数	南緯20度以北、25個	同左
メンバー数	51	同左
予報時間	216時間	同左
実験初期時刻	2004年7月23日~8月31日各日の12UTC、2005年12月23日~2006年1月31日各日の12UTC	同左
大気解析値	TL959L60データ同化サイクル結果	同左
陸面解析値	TL959L60データ同化サイクル結果	2004年8月と2006年1月当時の解析結果

表2: 高解像度実験における初期摂動作成法(特異ベクトル法)の詳細

SVの評価ノルム	初期時刻と評価時間後の評価ノルムは同じで、全エネルギー量。ただし、大気上層(約500hPa面以上)の水蒸気を評価しない。
SVの評価領域	評価時間後の評価領域として北半球域(北緯20度以北)と熱帯域(南緯20度～北緯20度)の二種類のSVの算出を行う。なお、初期時刻の評価領域は全球域とする。
SVの成長率の評価時間	北半球域は24時間、熱帯域は6時間
線形モデルの解像度	T63L40(水平解像度約180km)
線形モデルの物理過程	北半球域は断熱過程のみ、熱帯域は非断熱過程も含む
初期摂動の作成に用いるSVと作成方法の概要	北半球域と熱帯域のそれぞれの領域において、最大40個のSVを求め、各々の領域で位置の重なりが小さいSVを25個選択する。さらに、前回(24時間前)に求めた北半球域のSVから、成長率が大きい25個を選択し、それらを24時間時間積分する。初期摂動はこれらSVを空間的なばらつきが大きくなるように線形結合したものである。

モデルの最新版とし、週間EPSの初期摂動作成法を他にも用いられている数値予報技術と共有することで、EPSの性能向上とEPS開発の効率化も目指す(経田 2006b)。

### 3.2. 高度化に向けた数値実験

前項で述べたように、2007年にEPSモデルの高解像度化と初期摂動作成法の変更を施す予定である。これらがもたらす週間アンサンブル予報への効果を調べるため、表1に示す「高解像度実験」と「対照実験」の二種類の数値実験を実施した。なお、両実験で用いた大気解析値は同じで、2007年に利用が予定される全球解析値である。また、検証期間に2004年8月と2006年1月を選び、それぞれを夏実験、冬実験として二季節の予報特性も調べた。

対照実験の初期摂動作成法は2006年3月以降の週間EPSと同様(成長モード育成法)であり、その詳細は経田(2006a)にまとめられている。一方、高解像度実験の初期摂動作成法は山口(2006)にあるSV法とし、その初期摂動は北半球域と熱帯域で独立に求めたSVの線形結合とする。この初期摂動作成法の仕様は表2の通りで、現実化の際に割り当てられる予定の計算機資源内で適切な初期摂動を求めるためのいくつかの工夫が施されている。例えば、北半球域のSVは傾圧不安定の発達時間を考慮して評価時間を24時間にし、その計算時は断熱過程のみの簡略で高速な線形モデルを用いている。一方、熱帯域のSVは対流不安定を考慮して、その計算は非断熱過程を含むより緻密な線形モデルを用いるが、評価時間を6時間と短くして全体の計算時間の増加を抑えている。

### 3.3. 数値実験における初期摂動

図3は、高解像度実験における2004年8月19日12UTC初期値の計算で得られた全てのSVの構造を

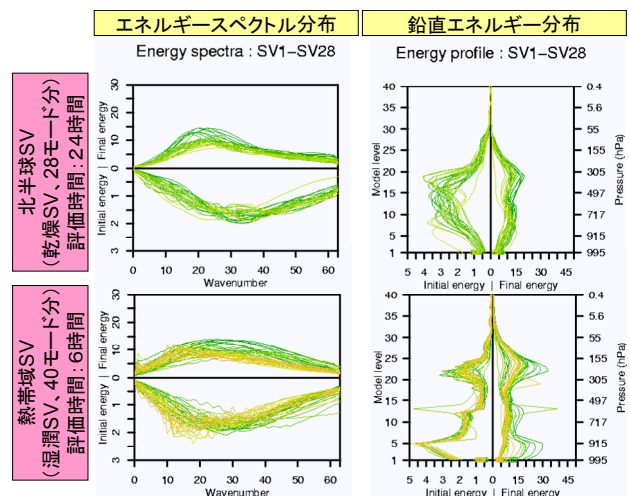


図3: 高解像度実験のSVの構造。初期時刻は2004年8月19日12UTC、評価領域は北半球域(上段)と熱帯域(下段)。左列は全エネルギースペクトル分布図(下半分が右SV、上半分が左SV)で、横軸が波数(63まで)を表す。右列は全エネルギー鉛直分布図(左半分が右SV、右半分が左SV)で、左縦軸はモデル層番号、右縦軸は地上気圧が1000hPaの時の参照値(hPa)。SVは成長率の大きなもののみを示し、北半球と熱帯域の総数はそれぞれ28と40。モード数は、線の色の違い(緑～黄)で表す。

示す。評価時間を北半球とするSV(北半球SV)を見ると、右SV(初期時刻の時点のSV)が比較的高波数で対流圏中層にひとつのピークを持ち、左SV(評価時間後のSV)では低波数側へのピークのシフトと鉛直的にダブルピークを持つといった特徴があることがわかる。そして、これらの特徴はほとんどの北半球SVに共通である。また、エネルギーの内訳の変化(図略)から、位置エネルギーから運動エネルギーへの変換が見られ、求まる北半球SVが傾圧モードに対応することがわかる。

次に、評価時間を熱帯域とするSV(熱帯域SV)を見ると、右SVと左SVのピーク間の低波数側へのシフトが存在するものの、北半球SVほど顕著では

ない。また、鉛直構造をみると、対流圏の下層から上層へのエネルギーピークのシフトがみられる。

表2の通り、高解像度実験と対照実験は初期摂動作成法の違いがある。それぞれの方法が算出対象とするモードが異なるため、両実験の初期摂動の分布も異なる。この程度を見るため、ここでは初期時刻における両者のスプレッドを比較する。図4は、日本付近と日本の南に熱帯擾乱が存在した時のコントロールランの初期値とスプレッドである。全般的に、高解像度実験のスプレッドは対照実験のそれに比べて小さい。特に、対照実験の熱帯域には、初期の段階で気候学的変動と同程度かそれ以上のばらつきがある領域(暖色域)が目立つ。また、熱帯域における両者のスプレッドのスケールの違いが目立つ。これは、高解像度実験の初期摂動が対流モードに対応するものを中心に構成されているのに対し、対照実験のそれが対流モード以外に対応するものも含まれていることを示している。

### 3.4 数値実験の予報成績

アンサンブル予報の基本的な統計検証の結果を示す。高解像度実験(赤線)と対照実験(青線)のスプレッドの大きさ(○印実線)と、アンサンブル平均予報のRMSE(○印破線)とアノマリー相関スコア(△印実線)の大きさを図5に示す。まずスプレッドとRMSEを比べる。対照実験のスプレッドは、夏季で予報初期、冬季で予報期間後半までRMSEを上回る。一方、高解像度実験のスプレッドは、予報初期でRMSEとほぼ同じ大きさであるが、予報期間半ば以降RMSEより小さい。

このように、対照実験の結果は、スプレッドが過大であるという現状のアンサンブル予報の特徴(経田2006a)を表している。一方、高解像度実験の結果は、初期摂動の振幅(予報時間0の値)が小さく、予報初

期でばらつきの成長率を大きくするSV法の特徴が活かされている。しかし、予報期間半ば以降のスプレッドが過小である。北半球域を対象とした検証(図略)でも高解像度実験のスプレッドが過小である。ただし、日本域の検証で見られる予報期間半ばで顕著にな

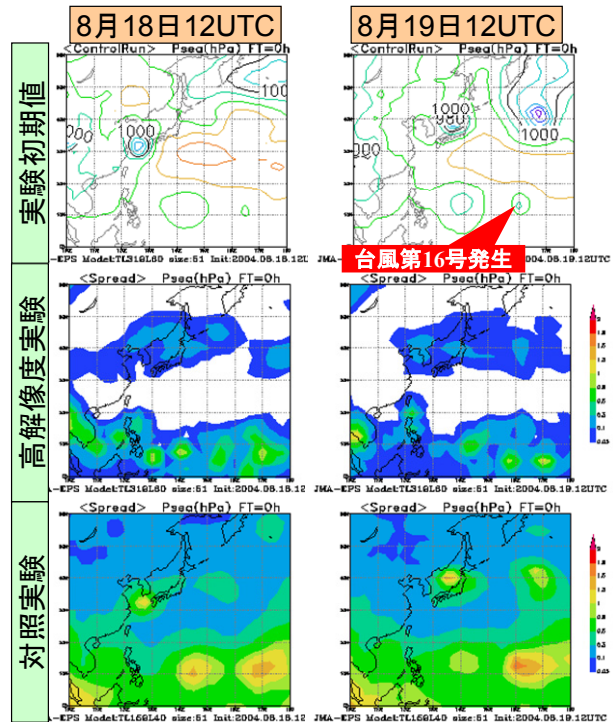


図4: 高解像度実験(中段)と対照実験(下段)の、初期時刻における海面更正気圧のアンサンブルスプレッドと、対応する解析値(hPa, 上段)。初期時刻は2004年8月18日12UTC(左列)と19日12UTC(右列)、領域は西太平洋域であり、日本付近に台風第15号、日本の南には台風第16号の発生がある。スプレッドはJRA-25長期再解析から求めた気候学的標準偏差で規格化したものであり、黄色～赤色の暖色領域は1以上の大きさ(ばらつきが気候学的変動より大きな場所)であることを表す。

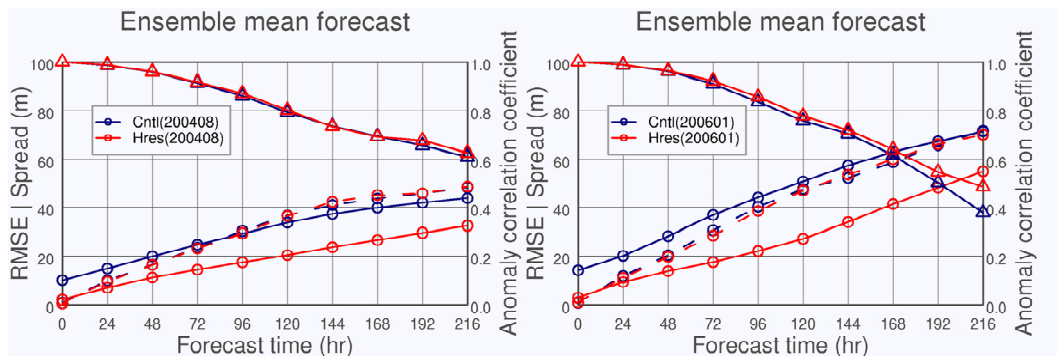


図5: 対照実験(青線)と高解像度実験(赤線)のスプレッドの大きさ(○印実線)と、アンサンブル平均予報のRMSE(○印破線)とアノマリー相関スコア(△印実線)の大きさ。検証対象は2004年8月(左図)と2006年1月(右図)の日本域500hPa面高度。横軸は予報時間、左縦軸はスプレッドの大きさ(範囲:0~100m)、右縦軸はアノマリー相関スコアの大きさ(範囲:0~1)を表す。

る傾向はない。

### 3.5. 実験結果と今後の課題

高解像度実験では、より小さな規模の現象を表現可能とする高解像度のEPSモデルを用いるため、初期摂動の成長率の増加が期待される。このことから、高解像度実験の初期摂動の振幅の大きさを比較的小さな値とした。その結果、高解像度実験の予報初期におけるスプレッドは理想的な大きさとなり、現状のアンサンブル予報に見られる予報初期の過大なスプレッドが引き起こす問題を解決できる。一方、高解像度実験の日本付近のスプレッドの大きさを見ると、予報期間半ば以降過小となることがわかった。この原因として、日本周辺、特に上流地域の初期摂動量が不十分であることがあげられる。特に、日本の南は海上のため、解析値の誤差は大きいと考えられるが、現状のSV法の設定ではこの付近にSVが都合よく求まらない。

これらの結果を踏まえ、振幅の大きさやSV評価領域の変更などの初期摂動の見直しを現在進めている。スプレッドの増加にはSVの成長率の評価時間を延ばすことも有効な手段であることがわかっており、限られた運用時間内で出来るだけ長い評価時間のSVが算出できるような見直しも行っている。その後、アンサンブル全球モデルの最新版も導入した数値実験を再度行い、ここから得られた成果を次期の週間EPSの運用開始時に反映する予定である。

#### 参考文献

- Buizza, R. and T. Palmer, 1995: The singular-vector 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.
- Buizza, R., J.R. Bidlot, N. Wedi, M. Fuentes, M. Hamrud, G. Holt, T. Palmer, and F. Vitart, 2006: The ECMWF variable resolution ensemble prediction system (VAREPS). *ECMWF Newsletter*, **108**, 14-20.
- Montani, A., M. Capaldo, D. Cesari, C. Marsigli, U. Modigliani, F. Nerozzi, T. Paccagnella, P. Patrino, and S. Tibaldi, 2003: Operational limited-area ensemble forecasts based on the 'Lokal Modell'. *ECMWF Newsletter*, **98**, 2-7.
- Palmer, T.N., R. Gelaro, J. Barkmeijer, and R. Buizza, 1998: Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 633-653.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.
- 大淵済・榎本剛, 2005: 「第1回THORPEX研究会」報告 - 中期予報の精度向上にはどのような知見が必要か. また、何ができるのか - . *天気*, **52**, 885-889.
- 経田正幸, 2006a: 週間アンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第52号, 気象庁予報部, 23-33.
- 経田正幸, 2006b: 週間アンサンブル予報. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 41-48.
- 竹内義明, 2006: 海外の現業全球アンサンブル予報の動向週間. 数値予報課報告・別冊第52号, 気象庁予報部, 13-22.
- 山口宗彦, 2006: 特異ベクトル法の開発. 数値予報課報告・別冊第52号, 気象庁予報部, 50-58.