2014年2月に更新した気象庁週間アンサンブル予報システム ～低気圧予測における高解像度化・高頻度化の効果について～

越智　健太・経田　正幸（気象庁予報部数値予報課）

1　はじめに

数値予報結果の誤差の原因は大きく 2 つに分けられる。ひとつは初期値に含まれる誤差が大気のカオス的性質によって予報時間の経過とともに拡大することである。もうひとつは、計算機の性能の限界によりある大きさの格子を用いた定式化であることなど、数値予報モデル自体が完全ではないことである。このような誤差の拡大を事前に把握するための数値予報技術に、複数の力学的予測を行い、将来の状態を確率密度分布として表現するアンサンブル手法があり、解析誤差程度に異なる複数の初期値の生成やモデルの不完全性を表現する手法の開発が盛んである。気象庁では、この開発成果を週間天気予報作業に活用するため、2001 年から週間アンサンブル予報システム（週間 EPS）を運用している。現在、週間 EPS による予測結果は週間天気予報の降水確率や信頼度に利用されるだけでなく、強い寒気の南下や急速に発達する低気圧などの顕著現象に関する気象情報を作成する際の技術資料ともなっている。

気象庁数値予報課では週間 EPS に係わる開発を継続しているが、2014 年 2 月には、台風などの顕著現象や地域特性の予測精度を向上させることを目的として、予報モデルの水平格子間隔を約 55km から約 40km へと高解像度化した。同時に、2013 年 4 月に変更された高解像度全球モデル(GSM)の改良点（層積雲スキームの改良[1] ・モデル定数の更新）を週間 EPS の予報モデルにも導入した。更に、急速に発達する低気圧等の発生可能性の高まりをいち早く捉えるために、実行頻度を 1 日 2 回（00, 12UTC 初期値の計算を実行）に増やした。表 1 に、本変更前後の週間 EPS の仕様についてまとめた。

本稿では、2014年2月に更新した現行システムにおける高解像度化・高頻度化の効果について述べる。なお、詳細については越智・経田(2014)を参照していただきたい。

[1] 詳細は下河邉・古河(2012)を参照していただきたい。

2　予報モデルの高解像度化の効果

図1に水平解像度の変更前後の日本周辺の地形を示す。現行システムの地形は前システムの地形に比べて、奄美大島や沖縄本島の有無や、中部山岳付近の標高に見られるように、各地域の地形がより精細に表現されていることが分かる。このことにより予測精度が改善した例として、冬型の降水事例が挙げられる。図2に、2012年1月7日12UTC初期値のFT=144まで[2]の24時間降水量が1 mm以上となる確率[3]を示す。脊梁山脈の風下側の確率は前システムに比べて現行システムでは低くなっており、観測と比較して冬型の降水が過度に太平洋側に広がる傾向が多くのメンバーで解消されていることが分かる。これは、図1に示した通り、脊梁山脈における現行システムの地形が現実の地形により近く（脊梁山脈では前システムより標高が高く）表現された結果、冬季日本海側の降水域が太平洋側まで広がらないようになったためであると考えられる。

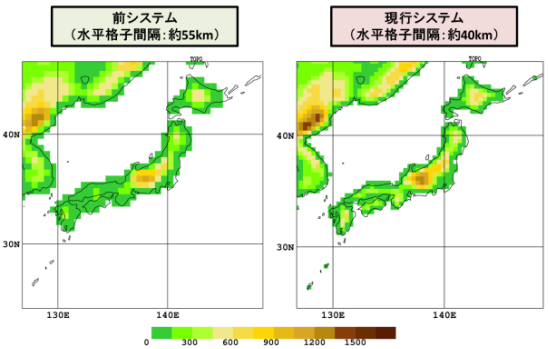

図１　高解像度化前後の週間 EPS の地形[m]。(左) 前システム、(右) 現行システム。色を塗っていないところは、海格子であることを示している。

[2] 本稿中で、FT=○○という表記は○○時間予報を意味する。

[3] ここでの確率はアンサンブルメンバーの比率から求めた。例えば、現行システムにおいて 24 時間降水量が 1 mm 以上となるメンバー数が 1 であった場合、その確率は約 3.7%(=1/27)になる。

表 1　2014 年 2 月の変更前後の週間 EPS の主な仕様。変更点は赤字で示している。GSM のバージョンの 4 桁の数字は、週間 EPS の予報モデルに採用した GSM の現業化時期（西暦下 2 桁・月）を表す。

	前週間EPS （2011年3月～2014年2月）	現在の週間EPS （2014年2月～）
予報モデル (GSMのバージョン)	TL319L60（水平格子間隔：約55km） GSM1009	**TL479L60（水平格子間隔：約40km）** **GSM1304**
予報時間	264時間	
積分時間間隔	1200秒	**720秒**
実行初期時刻	12UTC（1日1回）	**00UTC, 12UTC（1日2回）**
1実行あたりのメンバー数	51	**27**
初期摂動作成手法	特異ベクトル法（SV法）	
初期摂動ターゲット領域	北半球（30°N－90°N）、熱帯（30°S－30°N）、南半球（90°S－30°S）	
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法	

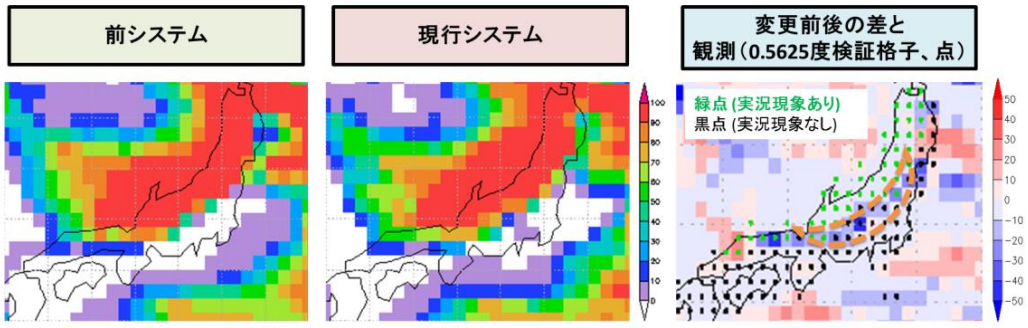

図 2　2012 年 1 月 13 日 12UTC までの 24 時間降水量が 1 mm 以上となる確率予測結果。（左）前システム、（中）現行システムの FT=144 における予測結果。（右）変更前後の確率の差。緑点は解析雨量で前 24 時間降水量が 1 mm 以上の点、黒点は 1 mm 未満の点を示す。橙色破線で囲まれた領域は、降水の有無の境目であり、その中に前システムの予測よりも現行システムの予測の方が確率が低い地点（濃青色格子）がいくつかある。

また、台風の予測についても、高解像度化による予測精度の改善がみられた。図3に、コントロールランの台風進路予測の平均誤差の検証結果を示す。図3をみると、サンプル数が十分確保できている予報期間前半については、有意に予測精度が改善していることが分かる。この改善は、主に転向後の進行速度が解析に比べて遅いという傾向が小さくなったことによる。台風強度予測の平均誤差は現行システムの値の方が小さく、これは台風の中心気圧をより深く表現できるようになったためである（図略）。

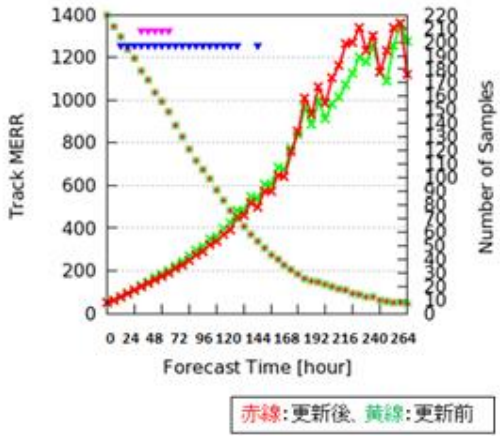

図 3　コントロールランの台風進路予測の平均誤差(km)。評価期間は 2012 年 7 月～9 月。図の上の三角形は、差が統計的に有意であることを示す（青：FT 毎に独立とみなした場合、紫：時系列の相関を考慮した場合）。

3　実行頻度の高頻度化の効果

週間EPSにおいても、統計的には最新の初期値の予測ほど誤差が小さいことがわかっており、現在、より高頻度に更新される最新の予測結果に基づいて予報作業が行われている。ここでは、実行頻度の高頻度化の効果の一例として、2012年4月に日本海で急速に発達した低気圧の事例を取り上げる。この低気圧は3日午後から4日にかけて日本海を通過し、西日本から北日本

では寒冷前線が通過し、各地で局地的な大雨や暴風が観測された（黒良・杉本 2013）。なお、当時のGSMはこの低気圧の発達や強風について4日前からよく予測できており、週間EPSによる予測ではそれよりも早く5日前からその可能性を予測できていた（氏家・小泉 2012）。

低気圧が最盛期を迎えた4月3日12UTCを予測対象時刻として、現行システムを実行した結果を初期値が古いものから順に図4に示す。なお、図4最上段には氏家・小泉(2012)で予測可能性が示された5日前を初期値とする予測結果を示している。新規追加した00UTC初期値の予測については左列の初期時刻を赤色で示している。図4において、前システムでは実行していなかった3月31日00UTC、4月1日00UTCを初期時刻とする予測に着目すると、12UTCを初期時刻とする予測のみを見るよりも、より早い段階で急速に発達する低気圧が発生する可能性が高まっていることが分かる。また、初期時刻が新しくなるとともにスプレッドが小さくなり不確実性が減っていく様子、顕著現象が発生する確率が高くなっていく様子がより詳細に把握できるようになっている。この事例のように、新しく実行開始した00UTC初期値のアンサンブル平均予報の場や確率情報が従来の12UTC初期値の資料に加わることで、顕著現象が発生する可能性をいち早く捉え、また不確実性の変化の推移をより高頻度に把握できるようになった。

4 週間EPSの課題

現行システムの課題として、予測期間後半におけるスプレッドが小さいことが挙げられる。理想的なアンサンブル予報では、スプレッドとアンサンブル平均予報のRMSEは同程度の大きさであることが望ましい（高野 2002）。しかしながら、図5に示す北半球・熱帯・南半球それぞれに対するスプレッドとRMSEの値を見ると、北半球・南半球ではFT=120前後から、熱帯ではFT=48前後からRMSEに対してスプレッドが小さいことが分かる。このことは、EPSにおける予測のばらつきが、表現されるべき不確実性に比べて不十分であり、予測精度が悪化している可能性があることを示している。

このような傾向が現れるのは、数値予報モデルの不完全性の考慮が不十分であるためと考えられる。その例の1つとして、境界値の不確実性を考慮していない点が挙げられる。特に、海面水温（以下、SST）は初期時刻におけるSST解析値の平年偏差を予報期間中一定[4]としており、全メンバー共通の値である。SSTの時間発展に対する不確実性を考慮することで、潜熱・顕熱輸送を通じて、大気現象のばらつき具合もより適切にできると考えられる。

他の例としては、現行システムで導入しているモデルアンサンブル手法（確率的物理過程強制法[5]）のみでは、予報モデルに内在する不確実性の表現が限られたものになっている可能性があるという点が挙げられる。例えば、欧州中期予報センター(ECMWF)、英国気象局など多くの海外数値予報センターは、確率的物理過程強制法に加えて確率的運動エネルギー後方散乱法(Shutts 2005)を導入している。この手法は、モデル解像度程度のスケールの運動エネルギーが系統的に過剰散逸することを補償するために用いられる、確率的パラメタリゼーションの手法の1つである。実際に、ECMWFのシステムにおいては、確率的運動エネルギー後方散乱法を導入したことで、特に北半球の予測期間後半においてRMSEに比べてスプレッドが小さい傾向が改善したという効果が確認された(Palmer 2009)。

また、山口(2013)が指摘しているように、現行システムに導入している確率的物理過程強制法の手法自体についても、その前提としている仮定に対して、実際の大気現象に基づいた検証がされているとは言い難い。モデルアンサンブル手法の高度化とともに、従来用いられている手法の原理的な妥当性についても検討する余地があるといえる。

5 まとめ

気象庁数値予報課では2014年2月に週間EPSの予報モデルの高度化、及び実行頻度の高頻度化を行った。その結果、アンサンブル平均予報や確率予測の精度改善とともに、冬型の降水域の表現や、台風の進路予測、台風の中心気圧をより深く表現できるなどの改善が見られた。また、実行頻度の高頻度化によって、顕著現象が発生する可能性を従来よりも早い段階で捉えることができるようになった。

現行システムにおける不確実性の表現については、改善すべき課題が多い。課題解決のためには、研究分野からの最新の研究成果や評価を取り入れながら、現業予報モデルにおける

[4] GSM も同様の手法を用いている。

[5] 全物理過程の時間変化率の和に、その大きさに比例したランダムな摂動を加えて、物理過程に内在する不確実性を表現する手法である。

個々のプロセスの不確実性に対する理解を深め、開発していく必要があると考えている。

参考文献

黒良龍太, 杉本悟史, 2013: 急速に発達する低気圧の事例（2012年4月3～5日に暴風をもたらした日本海低気圧）. 平成24年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 1-11.

越智健太, 経田正幸, 2014: 週間アンサンブル予報システム. 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 49-61.

Palmer,T.N., R.Buizza, F.J.Doblas-Reyes, T.Jung, M.Leutbecher, G.J.Shutts, M.Steinheimer, and A.Weisheimer, 2009: Stochastic parametrization and model uncertainty. Tech.Memo. 598, ECMWF, 42pp.

下河邉明, 古河貴裕, 2012: 層積雲スキームの改良. 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 92-96.

Shutts,G., 2005: kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quart.J.Roy.Meteor.Soc.*, **131**, 3079-3102.

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

氏家将志, 小泉友延, 2012: 事例検証－平成24年4月3日・4日の、急激に発達した低気圧の予想について. 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 97-104.

山口春季, 2013: アンサンブル予報における確率的物理過程強制法. 数値予報課報告・別冊第55号, 気象庁予報部, 188-191.

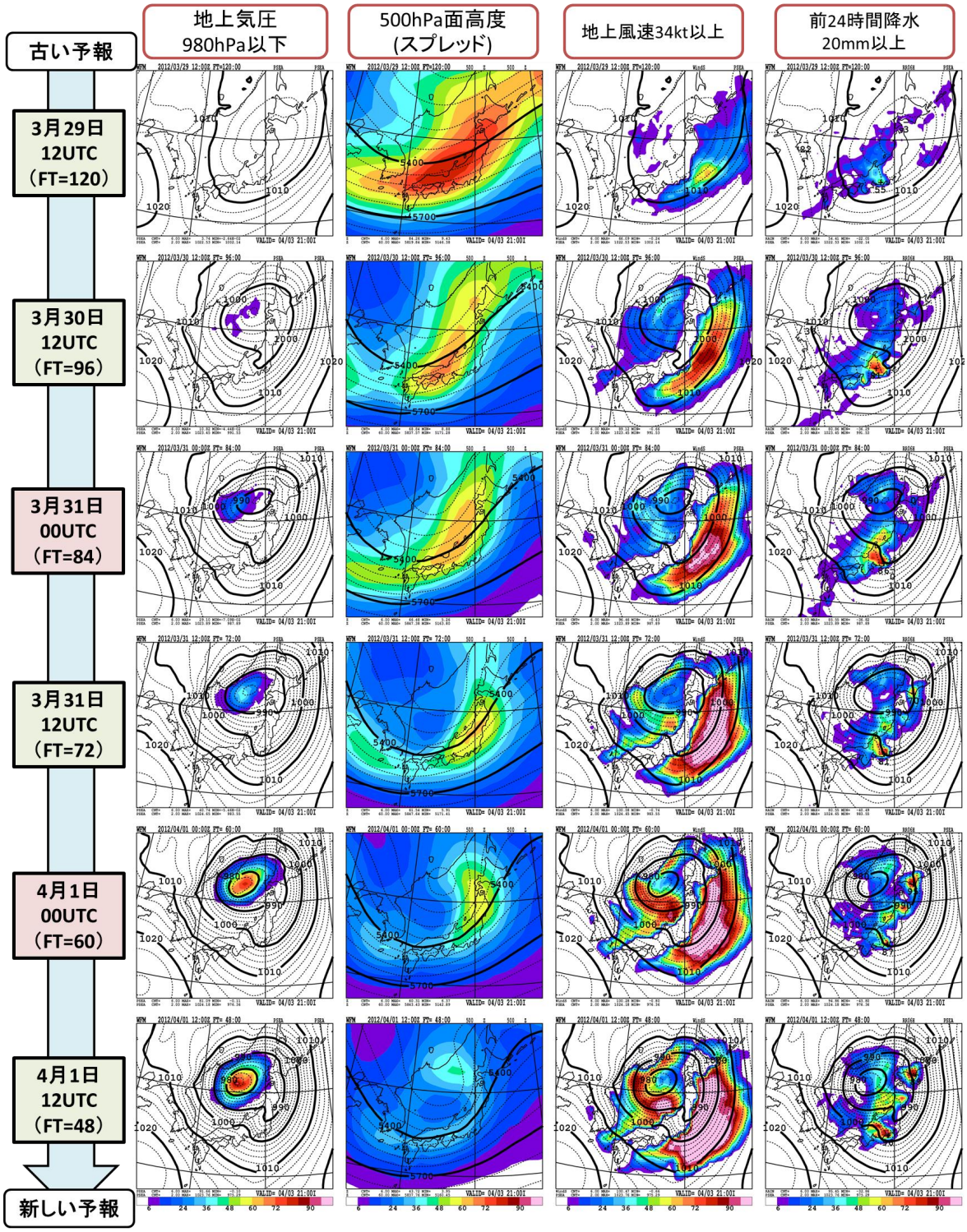

図 4　2012 年 4 月 3 日 12UTC を対象とした予測の時系列。各予測の初期時刻は上からそれぞれ 3 月 29 日 12UTC (FT=120)、30 日 12UTC (FT=96)、31 日 00UTC (FT=84)、31 日 12UTC (FT=72)、4 月 1 日 00UTC (FT=60)、1 日 12UTC (FT=48)である。左から順に海面更正気圧のアンサンブル平均[hPa]と海面更正気圧が 980 hPa 以下となる確率、500 hPa 面高度のアンサンブル平均とそのスプレッド[m]、地上風速が 34 ノット以上となる確率、前 24 時間降水量が 20 mm 以上となる確率をそれぞれ示す。

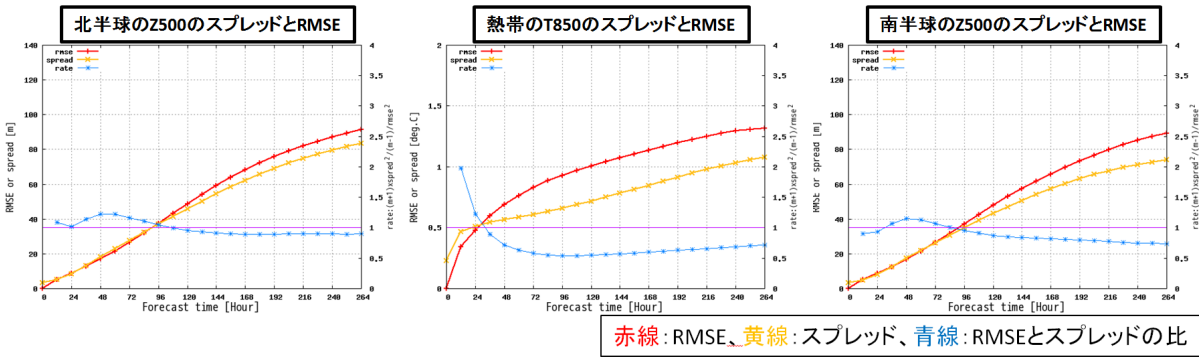

図 5　スプレッド（黄線）と RMSE（赤線）とその比（青線）。検証領域・要素はそれぞれ、（左）北半球（北緯 20 度～北緯 90 度）の 500hPa 面高度場[m]、（中）熱帯（南緯 20 度～北緯 20 度）の 850hPa 面気温場[K]、（右）南半球（南緯 90 度～南緯 20 度）の 500hPa 面高度場[m]。評価期間は 2011 年 12 月～2012 年 2 月。