2.1 週間アンサンブル予報システム¹

2.1.1 はじめに

週間アンサンブル予報システム(以下、週間 EPS²) は、週間天気予報作業の支援を目的に運用されており、 500 hPa、850 hPa、地上の気象要素の予測結果はアン サンブル平均やばらつき、確率情報として予報作業に 用いられている(林・川上 2006;村 2011)。また、こう した予報支援資料は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発表するた めにも利用されている。

数値予報課は 2001 年 3 月の運用開始以来、週間 EPS の開発を続けている。週間天気予報の支援資料の精度 向上を目指して、GSM の改良の成果を取り込むだけ ではなく、初期摂動作成手法の変更・メンバー数の増 強・モデルアンサンブルの導入といった様々な改良を 行っており(経田・山口 2006;酒井 2006;米原 2008, 2009, 2010;山口 2011)、週間アンサンブル予報の精度 は年々向上している。例えば、図 2.1.1 に示すアンサン ブル平均予報の北半球域 500 hPa 面高度のアノマリー 相関係数(ACC)の時系列を見ると、2014 年の 8 日先 (FT=192)の予測に対する ACC は、10 年前の 2004 年 の 7 日先(FT=168)の予測に対する ACC を上回って いることが分かる。

2014 年 2 月 26 日に現業化した現在の週間 EPS で は、計算頻度を1日2回(00,12UTC 初期値の計算を 実行)に増やした³。従来の週間 EPS では数日先の顕 著現象に関する予報支援資料は1日1回しか提供する ことができなかったが、この変更により、初期値の更 新に伴う週間 EPS の予測の変化をより詳細に把握し、 数値予報資料の変化をいち早く捉えられるようになっ た。同時に、顕著現象や地域特性の予測精度向上を目 的として、予報モデルの水平格子間隔を約55 km から 約40 km へと高解像度化し、2013 年 4 月に変更され た GSM の改良(層積雲スキームの改良⁴・モデル定数 の更新)を取り込んだ。

1日2回への高頻度化や予報モデルの水平高解像度 化を行うためには、従来に比べてより多くの計算機資 源が必要であり、2012年に更新された計算機でも従来 の週間 EPS と同じメンバー数を維持することはでき なかった。一般に、アンサンブル予報では、メンバー 数が多いほどアンサンブル平均予報の精度は向上する (高野 2002)が、水平高解像度化・予報モデルの更新に

² Ensemble Prediction System の略字。



図 2.1.1 アンサンブル平均予報のアノマリー相関係数の前 12か月移動平均値の時系列。期間は 2003 年 1 月 ~ 2014 年 6 月。検証対象は北半球域(20°N ~ 90°N) 500 hPa 面 高度場。色の違いは予報時間の違いを意味し、上から順に 4,5,6,7,8日である。

よる予測精度の向上がメンバー数の減少による予測精 度の悪化を上回れば、全体としてアンサンブル平均予 報の精度は向上する。そこで、予測精度の向上を図り ながら割り当てられた計算機資源内で週間 EPS の高度 化を行うために1実行あたりのメンバー数の見直しを 行い、1実行あたりのメンバー数は27 メンバー(1日 あたり54 メンバー)とした。表2.1.1 に、本変更前後 の週間 EPS の仕様についてまとめた。赤字の記述が今 回変更した週間 EPS の仕様を示している。

本節では、現在の週間 EPS(以下、現行システム) の性能を前週間 EPS(以下、前システム)との比較や 事例解析を通して述べる。まず第2.1.2 項では、現行 システムの性能を前システムと比較する。次に第2.1.3 項では、新しく実行を開始した00UTC 初期値のアン サンブル予報の精度を確認した上で、高頻度化による 利点を述べる。続いて第2.1.4 項では、1 実行あたりの メンバー数の減少によるアンサンブル予報の精度への 影響や現行システムの予測における課題について述べ る。最後に第2.1.5 項で、現行システムの資料を利用す る上での注意点をまとめる。

2.1.2 現行システムと前システムの予測精度の比較

週間アンサンブル予報は、週間天気予報作業におい て、アンサンブル平均予報として利用されるだけでな く、そのばらつきによる不確実性の定量的な指標、顕 著現象に対する確率情報として、統計処理を加えた上 で多岐にわたって利用されている。週間アンサンブル 予報を評価する上で、それらの検証結果を総合的に用 いることが重要である。本変更は水平高解像度化、予 報モデルの更新のような予報モデル自体の仕様の変更 も伴うため、予報モデルの予測特性の変化にも注目す る。また、前項で述べたように水平高解像度化・予報 モデルの更新とメンバー数の変更を合わせて予測精度 の向上が得られたかということも確認する必要がある。

¹ 越智健太、経田正幸

³ 同日、部外配信資料は現行の 12UTC 初期値の 1 日 1 回の 配信から、00UTC および 12UTC 初期値の 1 日 2 回の配信 に変更された。なお、配信資料の領域、格子間隔、要素等は 変更前と同じである。

⁴ 詳細は下河邉・古河 (2012) を参照していただきたい。

表 2.1.1 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			

そこで、本変更にあたって、主に以下の4つの観点 の比較・検証を行い、前システムの予測に対する現行 システムの予測の精度の変化を確認した。

- 1. 水平高解像度化、予報モデルの更新に伴う予測特 性の変化
- 2. アンサンブル予報のばらつきと予測誤差の関係
- 3. アンサンブル平均予報の精度
- 4. 確率予測精度

本項ではこれらの検証結果を順に示し、現行システ ムの性能について前システムと比較しながら述べる。 性能の評価期間は夏期間を2012年7月3日~10月11 日、冬期間を2011年12月3日~2012年3月11日と して、現行システムと同じ仕様による予報実験の結果 を前システムを用いた予報実験の結果と比較した。

なお、現業的に行っているアンサンブル予報の検証 についての詳細は経田ほか (2013) を参照していただき たい。

(1) 水平高解像度化、予報モデルの更新による予測特 性の変化

図 2.1.2 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詳細に表 現されていることが分かる。

ここでは、特に高解像度化に伴う影響が大きく、日々 の予報で着目されている降水の予測特性の変化を述べ る。なお、高解像度化に伴う系統的な台風予測特性の 変化は第 2.2 節を参照していただきたい。

夏期間における降水予測特性の変化

図 2.1.3 にコントロールランの FT=48⁵ における前 24 時間降水量をアメダス降水量に対して閾値毎に検証 した結果を示す。図 2.1.3 左上の夏期間におけるバイア ススコア (BI) を見ると、やや BI が大きくなっている 閾値は見られるものの、統計的に有意な差は見られな い。右上のエクイタブルスレットスコア (ETS)を見る とほぼ同じ値となっている。これらのことから、夏季 の降水予測精度は統計的にはほぼ同等であると言える。

統計的には有意な差は見られないものの、個別の事 例に着目すると実際に降水予測特性が変わった事例が いくつか見られた。夏期間の降水表現で予測特性の変 化が見られた一例を図2.1.4 に示す。図2.1.4 を見ると、 現行システムでは前システムよりも強い不安定性降水 を表現していることが分かる。事例別に見ると、強い 降水の表現はより高解像度である GSM に近くなって いる(図略)。

冬期間における降水予測特性の変化

|冬期間では、前24時間降水量が0.5mm/24h以上や、 1 mm/24h 以上の降水に対する BI がやや小さくなり、 ETS が高くなっていることが分かる (図 2.1.3 下段)。 この改善は検証事例の多くを占める弱い降水に対する 空振りが減少したことによりもたらされた。図 2.1.5 に 冬型の降水事例として、2012年1月7日12UTC初期 値の FT=144 までの 24 時間降水量が 1 mm/24h 以上 となる確率分布を示す。図 2.1.5 を見ると、脊梁山脈の 風下側の降水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、多くのメンバーで冬型の降水が 過度に太平洋側に広がる傾向が解消されていることが 分かる。これは、図 2.1.2 に示した通り、脊梁山脈にお ける地形が現実の地形により近く(脊梁山脈では従来 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。

(2) アンサンブル予報のばらつきと予測誤差の関係

理想的なアンサンブル予報では、アンサンブル平均 予報の平方根平均二乗誤差 (RMSE) とスプレッドの大

⁵後に本項(4)にも示すように、夏期間における強雨の予測 精度はFT=120で気候値予報と同程度となっている。そのた め、ある程度予測精度のあるFT=48における結果を示す。



図 2.1.2 高解像度化前後の週間 EPS の地形 [m]。(左)現行システム、(右)前システム。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。



図 2.1.3 12UTC 初期値のコントロールランの FT=48 における前 24 時間降水量の閾値毎の降水検証スコア。検証に用いた実 況値はアメダス観測値。横軸は降水の閾値 [mm/24h] を示す。左列:バイアススコア、右列:エクイタブルスレットスコア。 検証期間は、上段:夏期間、下段:冬期間。前システムは青線、現行システムは赤線で各スコアを示している。エラーバーは 95%信頼区間を示している。



図 2.1.4 2012 年 7 月 29 日 18UTC までの前 6 時間降水量。初期時刻は 2012 年 7 月 28 日 12UTC (FT=30)。(左)従来シス テム、(中)現行システム、(右)解析雨量。



図 2.1.5 2012 年1月13日12UTC までの24 時間降水量が1 mm/24h 以上となる確率予測結果。(左)従来システム、(中)現 行システムのFT=144 における予測結果。(右)変更前後の確率分布の差。緑点は解析雨量で前24 時間降水量が1 mm/24h 以上の点、黒点は1 mm/24h 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、その中に従来システ ムの予測よりも現行システムの予測の方が降水確率が低い地点(濃青色格子)がいくつかある。

きさはほぼ等しくなる (高野 2002) ため、予測のばら つきの大きさが適切であるかどうかを評価する際には RMSE とスプレッドの関係に着目する。ここでは、現 行システム・前システムそれぞれの RMSE とスプレッ ドの大きさを比較する。

図 2.1.6 に、現行システム・前システムについて、北半 球域 500 hPa 面高度場の解析値に対するアンサンブル 平均予報の RMSE とスプレッドの比を FT 別に示す⁶。 図 2.1.6 を見ると、変更前後ともに FT=96 から RMSE とスプレッドの比は約0.9を示しており、RMSE に対 してスプレッドが小さいことが分かる。これは、予報 モデル自体にバイアスがあることや、予測の誤差に対 して個々のメンバーのばらつき方が小さく、ばらつき が十分でないことによるものであると考えられる。現 行システム・前システムでは初期摂動作成手法は変えて おらず、RMSE とスプレッドの間の定量的な関係につ いて大きな差が見られない結果は妥当であると言える。

(3) アンサンブル平均予報の精度

図 2.1.7 に、現行システム・前システムについて、北 半球域 500 hPa 面高度場の解析値に対するアンサンブ ル平均予報の RMSE を FT 別に示す。夏・冬期間とも に、概ね予報期間を通じて前システムよりも現行シス テムの方が RMSE は小さくなっており、予測精度が高

⁶ 以降、500 hPa 面高度場や 850 hPa 面気温場の検証結果は、 日本域の週間天気予報を行う上で重要となる傾圧不安定波の 予測精度を予報期間を通じて見るために、北半球域(20° N ~ 90° N)を検証領域としたものを示す。なお、赤道域(20° S ~ 20° N)、南半球域(90° S ~ 20° S)における検証結果につい ても北半球域の検証結果とほぼ同様の傾向が見られた。

図 2.1.6 北半球域(20°N~90°N)500 hPa 面高度場の解析値に対するアンサンブル平均予報の RMSE とスプレッドの比とス プレッド。横軸は予報時間。赤実線は現行システム、緑破線は前システムの RMSE とスプレッドの比を示す。また、橙実線 は現行システム、黄緑破線は前システムのスプレッドを示す。検証期間は、左:夏期間、右:冬期間。検証には 12UTC 初期 値の予測のみを使用。

図 2.1.7 北半球域(20°N~90°N)500 hPa 面高度場の解析値に対するアンサンブル平均予報の RMSE。横軸は予報時間。赤 実線は現行システム、緑破線は前システムの RMSE(値は左の縦軸に対応)を示す。黄実線は前システムに対する現行シス テムの改善率(値は右の縦軸に対応)を示す。検証期間は、左:夏期間、右:冬期間。検証には 12UTC 初期値の予測のみを 使用。

図 2.1.8 図 2.1.7 と同様。ただし、ACC を示す。

いことが分かる。ただし、夏期間については週間天気 予報で対象とする予報時間よりも長い FT=216 以降で 前システムよりも現行システムの方が RMSE が大きく なっている。図 2.1.8 に示す ACC についても同様の傾 向が見られる。これは、1 実行あたりのメンバー数の 減少⁷ や、北半球域 500 hPa 面高度場に対する現行シ ステムのコントロールランの FT=216 以降での予測精 度の悪化(図略)が影響していると考えられる。

(4) 確率予測精度

アンサンブル予報の確率予測精度を評価する際には、 気候学的出現率(付録 C.3.8 参照)を基準とした確率(メ ンバーの割合)の検証を行っている。図 2.1.9、図 2.1.10 にそれぞれ北半球域 500 hPa 面高度場、850 hPa 面気 温場の平年偏差が -1 σ(σは気候学的標準偏差⁸)以下

⁷ 実際に、前システムの 51 メンバーの予測のうち現行システムと同じ初期摂動を与えている 27 メンバーを用いてアンサンブル平均予報の ACC を計算すると、現行システムの ACC とほぼ同程度の値であった(図略)。

⁸ 気候学的標準偏差の算出には JRA25 を用いた。

図 2.1.9 北半球域(20°N~90°N)500 hPa 面高度場の平年偏差が –1 σ 以下となる確率の BSS。横軸は予報時間。赤線は現 行システム、緑線は前システムの BSS(値は左の縦軸に対応)を示す。紫線は前システムと現行システムの差(値は右の縦 軸に対応)を示す。検証期間は、左:夏期間、右:冬期間。検証には 12UTC 初期値の予測のみを使用。

図 2.1.10 図 2.1.9 と同様。ただし、BSS は 850 hPa 面気温場に対する検証結果を示す。

図 2.1.11 図 2.1.9 と同様。ただし、BSS は前 24 時間降水量 5 mm/24h 以上に対する検証結果を示す。検証に用いた実況値は アメダス観測値である。

図 2.1.12 図 2.1.11 と同様。ただし、BSS は前 24 時間降水量 10 mm/24h 以上に対する検証結果を示す。

の負偏差⁹となる確率のブライアスキルスコア (BSS) を示す。また、図 2.1.11、図 2.1.12 にはそれぞれアメダ ス降水量が前 24 時間降水量で 5 mm/24h、10 mm/24h 以上となる確率の BSS を示す。夏・冬期間ともにほぼ 予報期間を通じて、概ね前システムよりも現行システ ムの BSS は高いことが分かる。ただし、両期間とも に FT=216 以降ではやや悪化する要素も見られた(図 略)。なお、図 2.1.11、図 2.1.12 を見ると、夏期間の FT=120 以降において BSS が 0 以下となっており、気 候値予報と同程度の予測精度しかないと言える。

2.1.3 高頻度化の利点

従来の週間アンサンブル予報は1日1回12UTC初期 値のみの実行であったが、今回の変更で新たに00UTC 初期値の実行が加わり、現在は1日2回実行している。 アンサンブル予報においても、一般的に最新の初期値 の予測ほど誤差が小さいため、00UTC初期値の追加に よって、より高頻度に精度の高い最新初期値の予測を 利用できるようになることが期待できる。

本項では、まず(1)で00UTC初期値の予測の精度 が1つ前の12UTC初期値の予測よりも高い精度であ ることを確認し、(2),(3)で、顕著現象の予測の事例を 見て、高頻度化の利点を述べる。

(1) 00UTC 初期値の予測の精度

00UTC 初期値の予測は、12UTC 初期値の予測と同 じ仕様で実行している。また図 2.1.8 に示したように、 予測精度は予報時間の経過とともに単調に減少してい るため、新たに実行開始した 00UTC 初期値の予測精度 は 1 つ前の 12UTC 初期値の予測に対して 12 時間分の 利得があることが推察される。実際に確認のため、図 2.1.13 に、00UTC 初期値の予測と 1 つ前の 12UTC 初 期値の予測の予報対象時刻を揃えて算出した、北半球 域 500 hPa 面高度場の解析値に対するアンサンブル平 均予報の ACC を示す。FT=192 以降において 00UTC 初期値の予測の ACC の値が 12UTC の値に次第に近 づく傾向は見られるものの、概ね予報期間を通じて、1 つ前の 12UTC 初期値の予測の精度よりも 00UTC 初 期値の新しい予測の精度の方が高いと言える。

(2) 関東地方の夏季の低温事例(2012年7月21日)

日々の週間天気予報で予報対象となる気温の予測に ついて、顕著現象が発生する可能性をより早く捉える ことができた事例として、2012年7月21日00UTCを 予報対象時刻とした00,12UTC初期値の週間アンサン ブル予報の推移を確認する。

図 2.1.14 に 2012 年 7 月 21 日 00UTC の全球解析値 を示す。この日は、関東地方の東海上までオホーツク 海高気圧が張り出しており、大気下層の冷涼な北東気 流の流入によって、関東地方の広い範囲で日最高気温 が平年よりも低くなった。例えば、館野の日最高気温 は 22.1 °C で、7 月の最高気温の平年値よりも約 6 °C 低かった。

図 2.1.15 に 2012 年 7 月 21 日 00UTC を対象とした FT=132 から FT=84 の予測について、海面更正気圧 のアンサンブル平均、925 hPa 面の気温のスパゲッティ 図を示す。図 2.1.15 上段の海面更正気圧の 1015 hPa の等値線(太線)に着目すると、古い初期値の予測ほ どオホーツク海高気圧の張り出しが十分表現できてい ないことが分かる。また、同図下段の 925 hPa 面の気 温のスパゲッティ図は古い初期値の予測ほどばらつき が大きく、多くのメンバーが関東地方付近に 15 °C 以 下の低温を予測するのは FT=84 の時点であることが 分かる。

7月21日00UTCの館野における高層気象観測値を 見ると、大気下層の寒気移流が顕著に現れていたのは 925 hPa 面以下の高度までであった(図略)。そこで、 館野の925 hPa 面の気温の予測が各メンバーでどのよ うな予測であったか、図2.1.16の各初期値の累積相対 度数分布で確認する。

図 2.1.16 の横軸は館野の 925 hPa 面における気温を 示しており、その観測値(橙色線)や解析値(桃色線) は縦の直線で表されている。例えば、17日 12UTC 初 期値の予測の累積相対度数分布を示す緑色線と解析値 を示す桃色線は縦軸が約 15%のところで交わっている。 このことは、約 15%のメンバー(4 メンバー)が7月 21日 00UTC における 925 hPa 面の気温の解析値以下 の低温を予測していたことを示している。このように、 ある地点における全メンバーの予測結果を初期値毎に 累積相対度数分布図上に示すことで、アンサンブル予 報で特定の値を予測していた確率の推移を詳細に追う ことができる。

図 2.1.16 の青線が示す 16 °Cは、気象庁平年値(1981 年~2010 年の観測値)に基づく館野の 925 hPa 面気 温 -1.5σ (σ は標準偏差)にほぼ対応する値である。 平年偏差が -1.5σ を下回る気候学的な出現率は正規 分布を仮定するとおおよそ 10 %で、この値は階級区 分値で「かなり低い」と呼ばれる出現率である。この 「かなり低い」気温となる可能性を、いかに早く予測で きていたかという観点で予測の推移を見てみる。最初 に 15 日 12UTC 初期値の予測を示す線を見ると、横軸 が 16 °C を示すところで縦軸の値は約 12%を示してい る。この確率は「かなり低い」となる気候学的な出現 率とほぼ等しいことから、15 日 12UTC 初期値の予測 (FT=132)の段階では低温となるシグナルは十分捉え られていないと言える。

次に16日00UTC初期値の予測(FT=120)を示す線 に着目すると、16°C以下の「かなり低い」気温を予 測するメンバー数は約40%へと大幅に増加している。 次の16日12UTC初期値の予測(FT=108)では、16 °C以下の低温を予測するメンバー数は1つ前の予測よ

⁹ 例えば 500 hPa 面高度場で負偏差となる領域はトラフに 対応する。

図 2.1.13 北半球域(20°N~90°N)500 hPa 面高度場の解析値に対するアンサンブル平均予報の ACC。赤実線は 00UTC 初 期値の予測の ACC、緑破線は 12UTC 初期値の予測の ACC を示す。横軸の予報時間は 00UTC 初期値の予測に合わせてお り、12UTC 初期値の予測の実際の予報時間は横軸の値よりも 12 時間分大きい。検証期間は、左:夏期間、右:冬期間。

図 2.1.14 2012 年 7 月 21 日 00UTC の全球解析値。(左)海面更正気圧 [hPa] と地上の風、(右) 925 hPa 面の気温 [°C] と風。 矢羽は風向・風速 [ノット] を示す。

図 2.1.15 2012 年 7 月 21 日 00UTC を予報対象時刻とした週間 EPS の海面更正気圧のアンサンブル平均 [hPa] と 925 hPa 面 気温 [°C] のスパゲッティ図。上図の黒線は予測値、赤い領域は海面更正気圧が解析値よりも高いところ、青い領域は海面更 正気圧が解析値よりも低いところを示す。下図の水色線は 10 °C 線、緑色線は 15 °C 線、赤色線は 20 °C 線を示す。初期時 刻は左から順に 2012 年 7 月 15 日 12UTC (FT=132)、16 日 00UTC (FT=120)、16 日 12UTC (FT=108)、17 日 00UTC (FT=96)、17 日 12UTC (FT=84)。

図 2.1.16 2012 年 7 月 21 日 00UTC を予報対象時刻とした館野における 925 hPa 面気温 [°C] の週間アンサンブル予報の累積 相対度数分布。横軸は 925 hPa 面気温 [°C]、縦軸は気温の非超過確率。縦の桃色線は解析値、橙色線はゾンデによる観測値、 青線はかなり低いとみなせる値の境界を示す。

図 2.1.17 2012 年 4 月 3 日 12UTC の(左)海面更正気圧 [hPa] の全球解析値。(中) 500 hPa 面高度 [m] の全球解析値。(右) 前 24 時間積算降水量 [mm/24h]。矢羽は風速 [ノット] を示す(矢羽があるところは 34 ノット以上の風速であることを示す)。

りもやや高く約 52%である¹⁰。このように、本事例で は、前システムでは実行していなかった 00UTC 初期 値の予測を実行するようになったことで、より早い段 階で館野で顕著な低温となるシグナルを捉えていると 言える。

(3) 急速に発達する低気圧の事例(2012年4月3日) 急速に発達する低気圧がもたらす顕著な現象が、現 行システムでどのように表現されるかを示す。ここで は、2012年4月2日から3日にかけて日本海で急速に 発達した低気圧の事例を取り上げる。

本事例で対象とする低気圧は4月3日午後から4日 にかけて日本海を通過した。その低気圧の通過に伴い、 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)。当時 の GSM はそ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、週間アンサンブル予報ではそ 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)。

図 2.1.17 に低気圧の発達が最盛期を迎えていた 2012 年4月3日12UTCにおける全球解析値と前24時間解 析雨量を示す。この時刻を予報対象時刻として、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 2.1.18 に示す¹¹。なお、図 2.1.18 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

¹⁰ 図 2.1.16 に示すその後の初期値の予測を見ると、17 日 00UTC 初期値の予測については 16 °C 以下の低温を予測す るメンバー数は約 40%を示している。次の 17 日 12UTC 初 期値の予測では約 90%のメンバーが 16 °C 以下の低温傾向 を示しており、気候学的な出現率のかなり低い低温となる予 測の確実性がより高まった。

¹¹ 現行システムの予測では、前システムの予測に比べて、地 上の低気圧に対応する 500 hPa 面高度のトラフ周辺のスプ レッドがやや大きくなる傾向は見られたが、コントロールラ ンの低気圧の発達傾向・位相速度については、ほぼ差が見ら れなかった(図略)。

図 2.1.18 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/24h 以上となる 確率をそれぞれ示す。

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。初期値が新しくなるにつれて、顕著な現象の 予測結果がどのように推移しているかという点に着目 する。

3月30日12UTC (FT=96)

中心気圧が 980 hPa 以下になる予測が現れ始めた。 また太平洋側の海域で 34 ノット以上となる確率 が 70%を超えており、強風をもたらす可能性が高 まった。

- 3月31日00UTC (FT=84) 中心気圧が980 hPa以下となる確率が増加した。 また、アンサンブル平均の低気圧の中心位置と980 hPa以下となる確率が高い位置は異なっており、発 達を予測するメンバーとしないメンバーで低気圧 の位相速度にばらつきがある。海上風が34 ノット 以上となる確率はさらに高まった。
- 3月31日12UTC (FT=72)

500 hPa 面のトラフのアンサンブル平均はさらに 深まる予測となり、スプレッドは小さくなった。ま た、アンサンブル平均の地上低気圧の中心位置と 中心気圧が 980 hPa 以下となる確率の高い位置が ほぼ一致しており、低気圧の位相速度の不確実性 が小さくなった。

4月1日00UTC (FT=60)

500 hPa のトラフの予測がほぼそろった。そのト ラフに対応する地上低気圧の中心気圧は 980 hPa 以下となる確率が 80%を超え、急速に発達する予 測にそろってきた。

本事例で示したように、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初期値 の予測によって、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た。

これらの事例のように、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、気温偏差の ような日々の予報に関わる場の変化だけでなく、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。

2.1.4 予報期間終盤の予測精度とその向上に向けた 課題

第 2.1.2 項で述べた通り、現行システムによる FT=216 までのアンサンブル予報の成績は前システム に比べて概ね向上するものの、FT=216 以降の予報時 間では低下する要素が見られた。このような予報期間 終盤の精度低下には、1 実行あたりのメンバー数の減 少が影響したと考えられる。そこで、最新初期値の予 測と古い予測を併せてアンサンブル予報とする LAF 法 (Lagged Average Forecast method)を用いて現行シス テムの範囲でメンバー数を増やすことが可能であるか 調査した。ここでは、その結果を紹介する。また、予 報期間終盤の予測結果は、図 2.1.6 で予報期間終盤の RMSE が十分大きくなることが示すように、実況から かなり離れてしまう。特に予報期間を通して大きく成 長する系統誤差は、アンサンプル予報のばらつきの信 頼性をも損ねてしまう。本項の最後では、FT=216 以 降といった予報期間終盤の予測精度改善のための系統 誤差の定量的な把握に向けた課題を説明する。

まず、図 2.1.19 に、現行システムにおいて 12UTC 初期値の予測と1つ前の 00UTC 初期値の予測による LAF 法を用いた予測(メンバー数 54)と、現行システ ムの 12UTC 初期値の予測(メンバー数 27)のそれぞ れに対する、北半球域 500 hPa 面高度場の RMSE とス プレッドの比とスプレッドを FT 別に示す。図 2.1.19 を見ると、全予報時間を通じて LAF 法の利用によりス プレッドが増大していることが分かる。また、赤線で 示す LAF 法を用いた予測の RMSE とスプレッドの比 は FT=120 以降で1に近づいており、両者の関係はよ り適切になっていると言える。

スプレッドと RMSE の関係の改善の影響は確率予測 精度に現れている。図 2.1.20 に、LAF 法を用いた予 測と現行システムの予測について、北半球域 500 hPa 面高度場が -1 σ 以下となる確率予測の BSS を示す。 FT=192 以降で LAF 法を用いた場合の BSS が現行シ ステムの BSS を上回っていることが分かる。

しかし、図 2.1.21 に示す RMSE に着目すると、 FT=228 以降は LAF 法を用いた予測の方が RMSE が 小さいものの、それまでの FT では LAF 法を用いた 予測の方が RMSE が大きいことが分かる。検証する要 素・期間によっては、予報期間を通して、LAF 法を用 いた予測の方が RMSE が大きかった(図略)。これは、 第 2.1.3 項(1)に示したように最新初期値の予測精度が 最も高いと期待できるため、古い初期値の予測を併せ て用いる LAF 法では、メンバー数増加の効果はあって も、1 つ前の初期値の予測と平均することによって精 度が低下していることを示している。

以上のように、特別な計算機資源を要さずに現行シス テム内で実施可能な LAF 法に効果が見られたものの、 その範囲は FT=168 以降の確率情報と限定的であった。

今後、週間 EPS の予報期間終盤といった長い時間ス ケールの予測精度を改善するためには、メンバー数の 増加だけでなく、予報時間とともに拡大する系統誤差 を小さくすることも重要である。例えば、850 hPa 面 の気温が予報時間の経過とともに次第に高くなるよう な系統誤差があると、その系統誤差の分アンサンブル 平均予報の精度は悪化する。その上、高温を予測する メンバーは増加し、低温を予測するメンバーは減少す るため、気候学的に出現率の低い気温の予測に対する 確率の精度も悪化する。

系統誤差を小さくするための有効な手段として、ハ

図 2.1.19 北半球域(20°N~90°N) 500 hPa 面高度場の解 析値に対するアンサンブル平均予報の RMSE とスプレッド の比とスプレッド。横軸は予報時間。赤実線は LAF 法を利 用した予測、緑実線は現システムの 12UTC 初期値の予測 の RMSE とスプレッドの比を示す。また、橙実線は LAF 法を利用した予測、黄緑破線は現行システムの 12UTC 初 期値の予測のスプレッドを示す。検証期間は夏期間。

図 2.1.20 北半球域(20°N~90°N) 500 hPa 面高度場の平 年偏差が -1 σ 以下となる確率のブライアスキルスコア。 横軸は予報時間。赤実線は LAF 法を利用した予測、緑破 線は現行システムの 12UTC 初期値の予測を示す。橙実線 は現行システムと LAF 法を利用した予測の差(値は右の 縦軸に対応)を示す。検証期間は夏期間。

図 2.1.21 北半球域(20°N~90°N) 500 hPa 面高度場の解 析値に対するアンサンブル平均予報の RMSE。横軸は予 報時間。赤実線は LAF 法を利用した予測、緑破線は現シ ステムの 12UTC 初期値の予測を示す。橙実線は現行シス テムに対する LAF 法を利用した予測の改善率(値は右の 縦軸に対応)を示す。検証期間は夏期間。

インドキャスト(再予報)(高谷 2012)が挙げられる。 ハインドキャストとは、過去の多数の事例を現システ ムを使って再予測することを意味している。その目的 は、予報モデルが持つバイアスを事前に把握してモデ ルの系統誤差や、アンサンブルメンバーのばらつき・ 確率分布の補正を行うことである。アンサンブル予報 をより有効に利用するためには、再予報による予測の 補正を行うことが重要であり、再予報の運用・利用に ついては今後の開発課題である。

2.1.5 現在の週間アンサンブル予報の資料利用上の 注意点

これまで、2014 年 2 月に更新した週間 EPS による アンサンブル予報の予測特性の変化や特徴について述 べてきた。最後に、これまで述べてきた前システムの 予測特性と異なる点、現行システムのアンサンブル予 報の利用上の注意点についてまとめる。

- 水平高解像度化によって降水予測特性が変わった。 夏季は不安定降水によってより強い降水を予測す る事例も見られた。冬季は、冬型時の太平洋側へ の降水域の広がりが過剰であった傾向が弱まった。 このような予報モデルの更新による予測特性の変 化に留意していただきたい。
- 2. 00UTC 初期値の予測は 12UTC 初期値の予測と同様に利用できる。統計的には予報時間が短いほど最新初期値の精度が高い。また、従来よりも高頻度に更新される週間 EPS のアンサンブル平均予報、確率情報を見ることで、顕著現象をより早く捉えることができる。00UTC 初期値の予測も含めて、最新初期値の予測を重視して利用していただきたい。

参考文献

- 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.
- 経田正幸,山口宗彦,2006: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.
- 経田正幸,山口春季,檜垣将和,2013:週間・台風アン サンブル予報の検証.数値予報課報告・別冊第59号, 気象庁予報部,34-44.
- 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.
- 酒井亮太,2006: 週間アンサンブル予報システムにおけるメンバー数増強の効果.数値予報課報告・別冊第52号,気象庁予報部,43-49.
- 下河邊明,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.

- 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.
- 高谷祐平,2012: 再予報・ハインドキャスト.天気,59(6), 493-494.
- 林久美,川上正志,2006:現業におけるプロダクト.数 値予報課報告・別冊第52号,気象庁予報部,34-37.
- 村規子,2011:週間天気予報の新しい作業支援図.平成 23年度予報技術研修テキスト,気象庁予報部,88-94.
- 山口春季,2011: 週間アンサンブル予報における初期摂 動作成手法の改良. 平成 23 年度数値予報研修テキス ト,気象庁予報部,20-24.
- 米原仁, 2008: 週間アンサンブル予報システムの改良. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23-26.
- 米原仁, 2009: モデルアンサンブル. 数値予報課報告・ 別冊第 55 号, 気象庁予報部, 126-137.
- 米原仁,2010: 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入.平成22年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,62-65.

2.2 台風アンサンブル予報システム¹

2.2.1 はじめに

台風の接近、通過する地域では、風害、水害、高潮害 などの甚大な災害の起こる危険性が高まるため、先を 見越した防災行動のために早い段階から台風の接近に 関する注意喚起が求められる。気象庁は、台風の進路 予報を予報円形式の確率情報として発表しており、そ の4日先、5日先の予報円の大きさを台風アンサンブ ル予報のばらつきを基に決めている(岸本 2009a,b)。

台風アンサンブル予報システム(以下、台風 EPS²) は、こうした台風予報業務の支援を目的に 2008 年 2 月 に運用を開始した数値予報システムである。2014 年 3 月 11 日には、台風アンサンブル予報による確率的な台 風予測の精度向上を主な目的として、台風 EPS のメン バー数を 11 から 25 へと増やし、同時に予報モデルの 水平格子間隔を約 55 km から約 40 km へと変更した。

本節では、台風アンサンブル予報の精度とともに、 2014年3月に行った変更による改善点を述べる。ま ず、第2.2.2項にて、台風 EPS の運用開始以降の仕様 の変遷と課題について述べる。また、主なシステム構 成と運用形態も解説する。第2.2.3項では、2013年ま での台風アンサンプル予報の成績を示す。第2.2.4項に て、2014年3月に変更された台風アンサンブル予報を 以前のものと比較して、その変更内容と改善点を述べ る。第2.2.5項にまとめを記す。

2.2.2 システムの概要

現在、気象庁で現業運用している EPS は、本章で取 り上げる台風 EPS と週間 EPS のほか、季節予報業務 を支援する1か月 EPS (平井ほか 2015) と季節 EPS (高谷 2010)がある。現業 EPS が複数存在するのは、 割り当てられた計算機資源内でそれぞれの予報業務を 支援するのに適したシステムと運用形態にする必要が あったためである。

台風 EPS は、熱帯擾乱周辺の初期摂動等を使って高 頻度にアンサンブル予報値を生成するという特長を有 する。また、週間 EPS との一体的な開発と運用を進 めるため、週間 EPS との間でシステム構成の共通化 を図っている。中でも、台風 EPS における予報モデル (以下、EPS モデル)は運用開始以降週間 EPS と共通 としており、第 2.1 節にある予報モデルの特性は台風 EPS の特性でもある。

本項では、台風 EPS の変遷とともにこれまでの改善 点と課題、台風 EPS の主なシステム構成と運用形態に ついて、以下項目を立てて解説する。

(1) システムの変遷と改善点

台風 EPS の仕様の変遷を表 2.2.1 に示す。台風 EPS は 2008 年 2 月に運用を開始した (小森・山口 2008)。 小森 (2009) は 2008 年の台風アンサンブル予報による 3 日先の進路予測を検証し、以下の問題点を明らかに した。

- スプレッドの小さい事例のアンサンブル平均の予 測誤差(最も小さい方から 30 事例分の平均値)は よりスプレッドの大きい他の事例の誤差よりも大 きい。こうしたスプレッドの小さい事例が「ばら つきが大きいと予測誤差が大きい」という統計的 な関係を悪化させている。
- スプレッドの大きい事例では予測誤差がスプレッドよりも小さく、当時の台風 EPS の仕様によるスプレッドは大きめである。

その後、2010年5月に実施した特異ベクトル法の設 定の一部変更により、5日先の進路予測に、1つ目の問 題点に該当する「スプレッドが小さいにも関わらず予 測誤差の大きい事例」が減少するという改善があった (太田・佐藤 2010)。

2014 年3月にはメンバー数の増強と EPS モデルの 水平高解像度化という大幅な仕様変更を行った。同時 に、初期摂動の振幅を調整してばらつきの大きさを適 正化させることで、2つ目の問題点への対処とした。

(2) EPS モデルと予報期間

EPS モデルは水平格子間隔約 40 km、鉛直層数 60 (地上から 0.1 hPaまで)の全球モデルである。EPS モ デルの分解能は第 1.1 節の GSM に比べれば低いもの の、この選択により確率的な台風進路予測の精度を確 保しつつ、実行に必要な計算機資源を抑えている。物理 過程の仕様は 2013 年 4 月に現業運用を開始した GSM と同じである。予報期間は 5 日先までの台風進路予報 の範囲を含むよう、132 時間としている。

(3) 初期値と摂動作成手法

摂動を含まない予報(以下、コントロールラン)の 初期値は全球解析値を EPS モデルの解像度に合うよう 変換したものである。

メンバー数は摂動を含む予報(以下、摂動ラン)24 とコントロールラン1の合計25であり、この度数分布 を確率分布とみなした時の1メンバーあたりの刻み幅 は4%となっている。この25個の予報の違いを生み出 す摂動の作成手法として、初期値の不確実性と数値予報 モデルの不完全性を考慮するためにそれぞれ特異ベク トル (SV: Singular Vector, Buizza and Palmer 1995) 法と確率的物理過程強制法 (Buizza et al. 1999; Palmer et al. 2009) の2種類を導入している。台風 EPS の SV 法では、初期値に含まれる誤差の132時間先までの拡 大をアンサンブル予報で表現するため、初期時刻から 1日先の範囲(評価時間内)でよく成長する SV を複数 求め、それらの線形結合を用いて摂動ラン用の初期値 を生成する。また、求める SV の評価領域は北西太平 洋領域(20°N~60°N, 100°E~180°の領域)と熱帯擾 乱周辺域の2種類としている。台風周辺での摂動を優

¹ 経田 正幸、越智 健太

² Ensemble Prediction System の略字。

表 2.2.1 台風 EPS の仕様の変遷。運用開始以降の主な変更点をシステム構成別に並べている。モデル仕様にある数字は GSM の現業化時期(西暦年の下2桁と月)である。

運用開	EPS モデル		メン	特異ベクトル法(初期摂動作成手法)		モデルアン
始時期	モデル仕様	水平格子間隔	「バー数	熱帯擾乱周辺域の形状	振幅決定基準	サンブル
2008 年 2月	GSM0711			推定域を中心とする等	東西風または南北	
2009 年 6月	CCD 10000	101 F0000 // 1	海皮 領域	経度経度 経度 領域	風に上限値 6 m/s を設置	なし
2010 年 5月	GSM0808	新9 55 km	11	推定城东山心とする光		
2010 年 12月	GSM1009			推定域を中心とする中 径 750 km の等距離領 域	湿潤トータルエネ ルギー	確率的物理
2014 年 3月	GSM1304	約 40 km	25			過程強制法

表 2.2.2 台風 EPS の実行数。2014 年については 6 月末現在。

年	台風 EPS の実行数	台風の発生数
2008	377	22
2009	442	22
2010	253	14
2011	439	21
2012	557	25
2013	531	31
2014	115*	7

*この内、現行システムでの実行数は55。

先的に用いる理由は進路予測にあるばらつきを少ない メンバー数で表現するためであり、台風 EPS の特長で ある。

(4) 実行条件

台風 EPS は、1日4回(初期時刻00,06,12,18UTC) を最大として、気象庁予報部予報課による解析と予報 に従って以下のいずれかの条件が満たされた時に実行 される。

- 全般海上予報区(0°~60°N,100°E~180°の領域) 内に台風が存在する、または同区内で24時間以内 に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する 場合
- 全般海上予報区外に最大風速 34 ノット以上の熱 帯低気圧が存在し、24 時間以内に予報円または暴 風警戒域が同区内に入ると予想される場合

このため、台風 EPS の実行数は台風の発生数や寿命 の長さに応じて変わる。運用開始以降の実行数と台風 の発生数は表 2.2.2 の通りである。 Tropical cyclone mean position error

図 2.2.1 2008 年から 2013 年までの台風アンサンブル予報 による台風進路予測の年平均誤差の推移。青色 はコント ロールラン、赤色 はアンサンブル平均の誤差(左縦軸参 照。単位は km)を表し、誤差の小さい方から順に1,2,3, 4,5 日先の結果を表す。×は5 日先の事例数(右縦軸参照) を表す。吹き出しで台風 EPS の主な変更とその影響を受 け始めた検証年を指す。

2.2.3 2013 年までの台風アンサンブル予報による 台風進路予測の成績

台風アンサンブル予報の成績としては、各メンバー から導出した台風進路予測の精度、特にコントロール ランとアンサンブル平均の進路予測(各メンバーの台 風進路予測の平均)および台風進路に関する確率情報 の精度を重視している。本項では、2013年までの台風 アンサンブル予報による台風進路予測の精度を示す。 検証に用いる台風中心の実況値は事後解析による台風 経路確定値(気象庁ベストトラックデータ)とした。な お、定常的に行う検証項目や現業化判断の記述につい ては経田ほか(2013)にあるのでそちらをご覧いただき たい。

図 2.2.2 2011 年から 2013 年までの台風アンサンブル予報 による台風進路予測の誤差の時間発展。横軸は予報時間を 示し、補助目盛は6時間毎である。青色 はコントロール ラン、赤色 はアンサンブル平均の誤差(左縦軸参照) 位は km)を表す。×は事例数(右縦軸参照)を表し、両 者で共通なため同数である。

(1) コントロールランとアンサンブル平均の成績

図 2.2.1 に、2008~2013 年の各年のコントロールラ ン(青色)とアンサンブル平均(赤色)による台風進 路の予測誤差を予報時間別に示す。各年の事例数は台 風の発生数と寿命の長さの影響を受けて異なるため、 予測誤差の単純な比較には注意を要するものの、この 6年間を通した予測誤差にはいずれの予報時間におい ても減少傾向が見られる。これは、図中に吹き出し形 式で示したように台風 EPS の改良のみならず、初期値 (全球解析)やGSMの改良が台風進路の予測精度に反 映された結果と言える。また、アンサンブル平均は予 測にある不確実性の高い部分が打ち消しあったもので あり、多数事例の平均においてアンサンブル平均の誤 差はコントロールランの誤差より小さいと期待される (高野 2002)ものの、台風アンサンブル予報のアンサン ブル平均の誤差はそのコントロールランの誤差よりも 必ずしも小さくなっていない。

そこで、初期時刻から132時間先まで6時間毎のコ ントロールラン(青色)とアンサンブル平均(赤色)の 台風進路予測誤差の比較図を見てみる(図2.2.2)。検 証期間は2011~2013年で、この間に台風EPSの仕様 は変更されていない。期間中の台風EPSの実行数は 1,527であり、これらの中には複数の台風が存在するも のもあるため、検証事例数は実行数より多くなる予報 時間がある。この検証図から、アンサンブル平均の誤 差は4日先(FT=96)からコントロールランの誤差よ リ小さいと言えるが、2日先(FT=48)程度のアンサン ブル平均の誤差はコントロールランの誤差より大きく、

図 2.2.3 2011 年から 2013 年までの台風アンサンブル予報 による 2 日先の台風進路予測の誤差とスプレッドの度数分 布図。横軸は誤差またはスプレッドの大きさを示す。事例 数は 1,264 である。青、赤、緑色が、それぞれコントロー ルラン、アンサンブル平均、スプレッドを表し、実線が累 積相対度数分布(左縦軸参照)、実線上の が平均値、破 線が確率密度(右縦軸参照)を示す。

図 2.2.4 図 2.2.3 に同じ、ただし 4 日先の台風進路予測の誤 差とスプレッドの度数分布図。事例数は 687 である。

2 日先程度ではアンサンブル平均の優位性がない点が 大きな課題であることが分かる。

次に、台風アンサンブル予報のばらつきに注目する。 図 2.2.3 と図 2.2.4 は、それぞれ 2011 ~ 2013 年の 2 日 先と4日先の誤差とスプレッドの度数分布である。ア ンサンブル平均の誤差の分布(赤色)は2日先ではコ ントロールランの誤差の分布(青色)よりも全体的に 右側に寄り、4日先ではコントロールランの誤差の分 布とほぼ一致する。これは、図 2.2.2 で見た平均値で

の評価と同様である。一方、スプレッドの最頻値(破 線のピークの値)は2日先、4日先ともに誤差の最頻 値より大きくかつ右側に寄ったままで、誤差の分布に ある裾野の広さはスプレッドの分布にはない状態であ る。理想的なアンサンブル予報では、多数事例の平均 において予報期間を通じてばらつきと誤差の大きさは 同じとなる (高野 2002) ため、平均値(同図の)の大 きさでみると、台風アンサンブル予報の2日先のばら つきは過大、4日先のばらつきは過小と言える。予報 期間初期の過大なばらつきは、初期摂動の振幅が過大 である可能性を示している。そして、この過大な状態 が2日先程度でアンサンブル平均がコントロールラン に対して優位でない一因と推察される。また、4日先 のばらつきの過小は「スプレッドが小さいにも関わら ず誤差の大きい事例がある」という問題が依然存在し ていることを示唆しており、摂動の与え方や EPS モデ ルにある系統的な誤差が影響していると考えられる。

(2) 台風接近確率の成績

図 2.2.5 は 2011 ~ 2013 年の台風接近確率の検証図で ある。この確率値別出現率図の説明は第 C.4.4 項にあ る。ここでは、台風接近を「初期時刻から5日先まで の間に、ある地点から半径 120 km の円内に台風中心 が入る現象」とし、その確率を台風アンサンブル予報 の追跡結果での出現率としている。2011~2013年のメ ンバー数は11であったので、例えば、初期時刻から5 日先までの間に、東京を中心とする半径 120 km の円 内に台風中心が入ると予測するメンバー数が5であっ た場合、東京の台風接近確率は45%(=5/11)になる。 本検証の領域は0°~60°N, 100°E~180°の範囲、気候 学的出現率 P_c は約 1%である。予測頻度には、図の緑 色縦線で示すように、接近なし(確率0%)が大半を占 め、高い接近確率は少ない、という特徴がある。確率と P_cとの差が大きいほど分離がよい(確率の分離度が高 い)と評価できるため、Pcよりも十分高い確率 9%か ら注目する必要がある。次に、確率の信頼度(確率と 実際の出現率の一致の度合)に注目する。図の信頼度 曲線を見ると、確率9%で実際の出現率が10%と高く、 また確率27%以上で傾き1の直線から離れて実際の出 現率が低いという傾向はあるものの、no-skill lineより 傾きは十分大きく、確率と実際の出現率との間に正比 例の関係があることを示しており、台風アンサンブル 予報に基づく台風接近確率の信頼性は高いと言える。

2.2.4 高度化した台風アンサンブル予報の成績

2014年3月に、メンバー数の増強とEPSモデルの水 平高解像度化、また初期摂動の振幅調整を行った。本 項では、これら変更点の効果を述べた後、初期摂動の 振幅調整に伴うばらつきの変化を示す。その後、この 新しい台風アンサンブル予報による台風予測の精度向 上を変更前の予測と比較しながら述べる。本項(2),(4) で示すばらつきの違いがアンサンブル予報としてより

図 2.2.5 2011 年から 2013 年までの台風アンサンブル予報 による台風接近確率の確率値別出現率図。台風接近を台風 中心が初期時刻から 5 日先までに半径 120 km の円内に入 る現象とし、検証する台風接近確率を台風アンサンブル予 報の追跡結果での出現率としている。横軸が確率 P_{fcst} 、左 縦軸が実際の出現頻度 P_{obs} であり、青色の曲線が信頼度 曲線を示す。緑色線は予測度数(右縦軸参照。対数軸であ ることに注意)を示す。なお、確率の信頼度が完全な場合 ($P_{obs} = P_{fcst}$)の信頼度曲線は傾き 1、切片 0 の直線(こ こでは破線で示す対角線)となる。また、ここでの気候学 的出現率 P_c は約 1%と小さく、no-skill line の信頼度曲線 $P_{obs} = (P_{fcst} + P_c)/2$ は傾き 1/2、y 切片 0.5%の破線で ある。

望ましいかは、確率と実況の捕捉に関する本項(5),(6) で評価する。なお、比較期間は第2.2.3項でも選んだ 2011~2013年、検証に用いる台風中心の実況値は気象 庁ベストトラックデータとし、現行システムと同じ仕 様による予報実験の結果を当時の現業運用システムの 結果と比べた。現行システムに対し、2010年12月か ら2014年3月までのシステムを前システムと呼ぶ。両 者の仕様の違いは前出の表2.2.1の通りである。

(1) 2014年3月に行った主な変更

2014 年 3 月に行った台風 EPS の主な変更点とそれ ぞれの効果を以下に説明する。

(ア)メンバー数増強

メンバー数を 11 から 25 に増強した。また初期摂 動の計算に用いる SV を算出する際の繰り返し計 算の回数をメンバー数に見合うよう増やした。こ のメンバー数増強のみの効果を調べたところ、ス プレッドはより大きくなった。また、予報期間を 通して進路予測の確率表現が改善するものの、予 報期間中盤を中心にアンサンブル平均の進路予測 の精度は前システムより悪化した(図略)。この 悪化は、第 2.2.3 項 (1) で述べたスプレッドが過大 である状態がさらに悪化したことで生じた。

図 2.2.6 前システム(左)と現行システム(右)による 3 日先までの台風進路予測の比較。対象の台風は 2013 年台風第 26 号、 初期時刻は 2013 年 10 月 12 日 00UTC である。この時点の台風の中心気圧は 980 hPa、この後 15 日 00UTC 頃まで北西進 した。青色線はコントロールラン、暖色系(24 時間ごとに赤・橙・黄・黄緑色と着色を変更)の線は摂動ランの中心追跡結 果、緑色線はこれら中心追跡結果のアンサンブル平均、黒色・灰色線がベストトラックによる中心位置(が 00UTC、 が 12UTC、×が 06UTC または 18UTC の位置)を示す。コントロールランおよびアンサンブル平均の進路は前システム・現 行システムともにほぼ一致している。

(イ)初期摂動の振幅調整

変更点(ア)で述べた悪化を解消するため、台風 アンサンブル予報の2日先のばらつきの大きさが 2日先程度の進路予測の誤差に見合う大きさとな るよう、初期摂動の振幅を小さくした。この変更 により、予報期間前半のアンサンブル平均の進路 予測の精度はコントロールランと同程度の精度ま で改善するとともに、予報期間後半のアンサンブ ル平均の進路予測の精度も前システムと同程度と なった。また、予報期間を通しての進路予測の確 率表現も改善した。

(ウ) EPS モデルの水平高解像度化

EPS モデルの水平格子間隔を約 55 km (TL319) か ら約 40 km (TL479) へと変更した。これにより、 上陸後の台風を含めて、TL479 による進路はより 分解能の高い GSM の進路に近づいた。その結果、 転向後の台風の進行を実況よりも遅めに予測する 傾向 (スローバイアス)が低減するなどして、進 路予測の誤差が減少した。また、TL479 による中 心気圧・最大風速は実況により近い値となった。

(2) 台風進路予測のばらつきの変化

今検証期間の多数事例の平均で見て、現行システム の2日先におけるスプレッドと進路予測の誤差は同程 度の大きさとなった(図略)。これは、本項(1)の変更 点(イ)の狙い通りに進路予測のスプレッドが小さく なったことを示している。次に、この初期摂動の振幅 調整が個別の台風進路予測のばらつきにどのように表 れるかを確認する。図2.2.6 は、2日先程度までの台風 進路予測の結果においてコントロールランおよびアン サンブル平均がほぼ一致した事例を示している。各メ ンバーの進路のばらつき具合を見ると、両システムと もに予報期間初めから進路の広がりが見られ、2日先 程度において現行システムのばらつきは前システムよ り小さくなった。このように個別の事例においてもば らつきに違いが生じており、初期時刻から時間ととも に広がる進路予測のばらつきは小さくなる。

(3) コントロールランの成績

現行システムと前システムのコントロールランによ る台風進路予測誤差の比較を図 2.2.7 に示す。現行シ ステムの進路予測誤差(緑色)は予報期間を通して前 システム(青色)より小さかった。この誤差成分の内、 特に進行方向成分が予報期間を通して小さくなってお り、スローバイアスの低減の効果が大きいことが分かっ た(図略)。次に、現行システムと前システムのコント ロールランによる台風中心気圧予測の平均誤差の比較 を図 2.2.8 に示す。現行システムの平均誤差(緑色)は 予報期間を通して前システム(青色)より軽減した³。 このように、現行システムのコントロールランの精度

³ 平均誤差は両システムともに 4 日先 (FT=96) 以降に減少 に転じている。この 4,5 日先といった予報時間の長い検証事 例は自ずと台風の発達期から最盛期、衰弱期を含む事例とな る中で、過発達(平均誤差は負の値)を示す予測事例の割合 が増えるために全体の事例平均である平均誤差は減る傾向を 示していた。

図 2.2.7 2011 年から 2013 年までの台風アンサンブル予報コ ントロールランの台風進路予測の誤差の比較。横軸は予報 時間を示し、補助目盛は6時間ごとである。青色 は前シ ステム、緑色 は現行システムの誤差(左縦軸参照。単位 は km)を表す。×は事例数(右縦軸参照)を表し、両者で 共通なため同数である。

は前システムより高いと言える。ただし、予測は実況 よりも中心気圧が高いという傾向は引き続き残ったま まであり注意が必要である。

GSM や台風アンサンブル予報による台風予測には、 転向後のスローバイアスや転向前の進路予測が実況よ りも北寄りになる傾向(北上バイアス)、中心気圧が高 いという傾向といった系統的な誤差がある(檜垣 2013)。 図 2.2.9 (この事例の初期時刻は図 2.2.6 の 24 時間後) に両システムでスローバイアスが見られた事例を示す。 15 日 00UTC 頃の転向までコントロールランと実況と の差は大きくないものの、その後 16 日 00UTC にかけ て大きくなった。このように、系統的な誤差は今回の EPS モデルの水平高解像度化により低減したものの、 なくなったわけではない。そして、こうした傾向はそ のままアンサンブル予報の各メンバーにも表れ、時に はばらつきの確からしさを損なってしまう。アンサン ブル予報のばらつきの活用や評価においても、数値予 報モデルの予測特性を踏まえておく必要がある。

(4) アンサンブル平均の成績

現行システムと前システムのアンサンブル平均によ る台風進路予測誤差の比較図を図 2.2.10 に示す。現行 システムの誤差(橙色)は予報期間を通して前システ ム(赤色)より小さかった。また、現行システムのアン サンブル平均とコントロールランの進路予測誤差を比 べる(図 2.2.11)と、3日先(FT=72)までは両者の誤 差の大きさは同程度であり、4日先(FT=96)以降では アンサンブル平均の方が小さかった。第 2.2.3項(1)で 述べた前システムの性能と比べると、2日先程度のア ンサンブル平均のコントロールランに対する精度悪化

図 2.2.8 図 2.2.7 に同じ、ただし台風アンサンプル予報コン トロールランの台風中心気圧予測の平均誤差の比較。

はほぼ解消する一方、4日先以降の改善幅は縮小する。 さらに、現行システムの前システムに対する台風アン サンブル予報の成績の向上は、2008~2013年各年の台 風進路の予測誤差に、現行システムと同じ仕様を用い た2011~2013年の予報実験の結果を加えた図2.2.12 でも確認できる。このように、現行システムのアンサ ンブル平均の台風進路の予測精度は前システムより高 く、現行システムのコントロールランよりも4日先以 降で高い。そして、前システムで4日先までに見られ たアンサンブル平均の誤差がコントロールランより大 きい状態は解消したと言える。

5日先のアンサンブル平均による進路予測の誤差を事 例別に比較したところ、現行システムは前システムに 比べて多くの事例で誤差が小さかった。しかし、2011 年台風第12号と2012年台風第4号や台風第17号の事 例では現行システムは前システムに比べて誤差が大き かった。そこで、現行システムの誤差がより大きい事 例として、2012年台風第17号を対象とした初期時刻 2012 年 9 月 22 日 12UTC の進路予測の結果を見てみ る(図2.2.13)。前システム(同図左)には実況(黒色 線)と同様の進路を予測したメンバーはなかったもの の、台風が西進し南シナ海に進む予測がいくつかあっ たことが分かる。こうした進路の平均であるアンサン ブル平均(緑色線)は実況に比較的近くなった。一方、 現行システムには実況により近い予測はいくつかあっ たが、前システムにある西進の予測はなかった。この 結果、アンサンブル平均の進路予測は実況より東側と なった。

図 2.2.9 図 2.2.6 に同じ、ただし初期時刻は 2013 年 10 月 13 日 00UTC で、この時点の台風の中心気圧は 955 hPa、この後 15 日 21UTC 頃に関東地方に接近した。15 日 00UTC 頃の転向から関東地方の東に達した 16 日 00UTC までにかけて、前 システム・現行システムともに台風の北上が実況より遅い。

図 2.2.10 2011 年から 2013 年までの台風アンサンブル予報 によるアンサンブル平均の台風進路予測の誤差の比較。横 軸は予報時間を示し、補助目盛は6時間ごとである。赤色 は前システム、橙色 は現行システムの誤差(左縦軸参 照。単位は km)を表す。×は事例数(右縦軸参照)を表 し、両者で共通なため同数である。

図 2.2.11 現行システムによる 2011 年から 2013 年までの台 風進路予測の誤差の時間発展。横軸は予報時間を示し、補助 目盛は6時間ごとである。緑色 はコントロールラン、橙 色 はアンサンブル平均の誤差(左縦軸参照。単位は km) を表す。×は事例数(右縦軸参照)を表し、両者で共通な ため同数である。

図 2.2.12 図 2.2.1 に同じ、ただし当時のシステムのコントロールラン(青色)とアンサンブル平均(赤色)に現行システムによる 2011~2013 年の予報実験の結果(コントロールランは緑色、アンサンブル平均は橙色)を加えたもの。

図 2.2.13 現行システム(右)の5日先のアンサンブル平均の進路予測誤差が前システム(左)より大きかった事例。対象の台 風は 2012年台風第17号、初期時刻は 2012年9月22日12UTCである。この時点の台風の中心気圧は980 hPa、その後の 24時間で台風は中心気圧925 hPaと発達した。青色線はコントロールラン、暖色系(24時間ごとに濃赤・赤・橙・黄・黄緑 色と着色を変更)の線は摂動ランの132時間先までの中心追跡結果、緑色線はこれら中心追跡結果のアンサンブル平均であ る。黒色・灰色線がベストトラックによる中心位置を示す。前システムは橙色楕円で囲んだ進路の通り、台風が西進し南シナ 海に進む予測がいくつかあり、緑色円で示す5日先のアンサンブル平均の位置は黒色円で示す実況の位置に近い。一方、現 行システムには台風が西進する予測はなく、5日先のアンサンブル平均の位置は実況から離れている。

(5) 台風接近確率の成績

現行システムの台風接近確率のブライアスキルスコ アは 0.356 と前システムの値 0.338 よりも大きく、現 行システムの台風接近確率の精度の方が高かった。捕 捉率や誤検出率で見ると、空振りが減り、捕捉が向上 した (図略)。こうした改善の要因として、図 2.2.14 の縦線で示す両者の台風接近確率の予測頻度を比較す ると、階級の数が増えることでの見掛け上の低下のほ か、現行システム(赤色)は前システム(緑色)に比 べ確率100%の予測頻度を増やすことなどで分離度が 向上したことが分かる。ただし、同図の信頼度曲線を 見ると、現行システム(橙色)の確率 10%と 70%前後 の信頼度は低下した。前者はばらつきを小さくしたこ とに対応している。後者は現行システムの分離度がバ イアスの大きい事例も含めてよくなった結果、高い確 率の信頼度はバイアスのある事例の影響を強く受けて 低下したことを表している。こうした低下はあるもの の、現行システムの確率的な進路予測情報の精度は予 報期間を通して概ね改善していると言える。

(6) 実況捕捉の度合

本項(2)で取り上げた初期時刻2013年10月12日 00UTC の台風進路予測の結果 (図 2.2.6) では、前シ ステムと現行システムのアンサンブル平均はほぼ一致 し、その3日先の誤差はそれぞれ211 km,205 kmと 平均的な大きさ約300kmより小さかった。しかし、前 システムのメンバーの中には3日先で南西に大きく外 れたものもあった。3日先で最も外れたメンバーの進 路予測誤差は、前システムで 699 km だったのに対し て現行システムで 380 km と小さかった。また、本項 (4) で取り上げた初期時刻 2012 年 9 月 22 日 12UTC の 台風進路予測の結果(図2.2.13)では、現行システム のアンサンブル平均の誤差 (5日先で 627 km) は前シ ステム (同 264 km) に比べて大きかったものの、現行 システムには前システムに比べて実況に近いメンバー があった。5日先で実況に最も近いメンバーの進路予 測誤差は、前システムで 249 km だったのに対して現 行システムで 103 km と小さかった。

ここでは、個別事例で見られた進路予測のばらつき 具合の変化を実況捕捉の度合を指標にして評価する。図 2.2.15 左に、予報時間ごとに全事例平均したメンバー 中の進路予測誤差の最小値と最大値を示す。現行シス テムのばらつきは前システムよりも小さくなったにも かかわらず、現行システム(赤色)における進路予測 誤差の最小値・最大値はともに予報期間を通じて前シ ステム(青色)より小さく、実況の捕捉に改善があっ た。また、進路予測誤差の最小値が120 km 以下の割合 (図 2.2.15 右)を見ても、1日先 (FT=24) 以降の現行 システム(赤色)の割合は前システム(青色)よりか なり高く、実況に近い進路予測の割合は高かった。こ のように、メンバー数を増やしつつ過剰なばらつきを

システムによる予報実験の結果を加えたもの。前システム と現行のシステムの信頼度曲線をそれぞれ青色と橙色の 曲線で示す。前システムと現行システムの予測度数をそれ ぞれ緑色と赤色の線で示す。階級はそれぞれのメンバー数 に合わせている。確率 0%における両者の予測度数はほぼ 同数のため、確率 0%の縦線は重なっている(緑色線のみ 表示)。

抑えた結果、現行システムによる実況捕捉は改善して いると言える。

2.2.5 まとめ

台風アンサンブル予報システムは台風予報業務の支援を目的に運用している数値予報システムであり、熱帯擾乱周辺の初期摂動等を使って高頻度にアンサンブル予報値を生成するという特長を持つ。

2008年の運用開始以降、台風アンサンブル予報によ る台風進路の予測精度は年々向上している。5日先まで の台風進路に関する確率情報の信頼性も高く、また4 日先程度からはアンサンブル平均の精度がコントロー ルランを上回る。しかし、2日先のばらつきは過剰で あり、2日先程度のアンサンブル平均の精度はコント ロールランを下回るという課題があった。

2014年3月に、メンバー数を25に増やし、予報モデ ルの水平解像度を約40kmへと変更した。あわせて、 台風進路のばらつきが過剰である状態を改良するため、 初期摂動の振幅の大きさを小さくした。その結果、予 報モデルの変更による転向後のスローバイアスが低減 し、台風進路の予測精度は向上した。また、メンバー 数の増強と初期摂動の振幅調整の効果もあって、2日 先程度のアンサンブル平均の精度はコントロールラン と同程度となり、確率情報の精度も改善した。そして、

図 2.2.15 2011 年から 2013 年までの各台風進路予測における、現行システムと前システムの実況捕捉の比較。横軸は予報時 間を示し、補助目盛は 6 時間ごとである。左図は予報時間ごとに全事例平均したメンバー中の進路予測誤差の最小値と最大 値を示し、 および が最小誤差の平均値、 および が最大誤差の平均値、青色線が前システム、赤色線が現行システム の結果(左縦軸参照) ×が事例数(右縦軸参照)を表す。右図は予報時間ごとに求めたメンバー中の進路予測誤差の最小値 が 120 km 以下である割合を示し、青色線が前システム、赤色線が現行システムの結果(左縦軸参照)、×が事例数(右縦軸 参照)を表す。

全般的なばらつきの大きさは小さくなったものの、実 況の捕捉は改善し実況と大きく異なるメンバーも減っ た。なお、現行のアンサンブル予報にも転向前の北上 バイアスや転向後のスローバイアス、過発達という傾 向がみられる。こうした傾向が時にはばらつきの確か らしさを損なう原因にもなることから、予報モデルの 予測特性の把握はアンサンブル予報のばらつきを解釈 する際にも大変有用である。

また、アンサンブル予報による台風進路予測の改善 には、アンサンブル手法だけでなく、初期値の精度と 予報モデルの性能が重要な役割を果たしている。引き 続き、これらの向上を目指して週間アンサンプル予報 システムとの一体的な開発と運用を進める計画である。

参考文献

- 太田洋一郎, 佐藤芳昭, 2010: 台風アンサンブル予報シ ステムの改善. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 66-70.
- 岸本賢司, 2009a: 台風5日進路予報. 平成20年度量的 予報研修テキスト, 気象庁予報部, 103-112.
- 岸本賢司, 2009b: 5日先までの台風進路予報の発表開 始について.天気, 56, 565-569.
- 経田正幸,山口春季,檜垣将和,2013:週間・台風アン サンブル予報の検証.数値予報課報告・別冊第59号, 気象庁予報部,34-44.
- 小森拓也, 2009: 台風 EPS の特徴. 数値予報課報告・別 冊第 55 号, 気象庁予報部, 144-147.
- 小森拓也,山口宗彦,2008: 台風アンサンブル予報シス

テムの導入. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気 象庁予報部, 27-30.

- 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.
- 高谷祐平, 2010: 季節アンサンブル予報システムの詳 細. 平成 22 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球 環境・海洋部, 10-14.
- 檜垣将和,2013: 全球数値予報による台風の予測結果. 気象庁技術報告第134号,気象庁,148-157.
- 平井雅之, 宮岡健吾, 佐藤均, 杉本裕之, 南敦, 松川知紘, 高谷祐平, 新保明彦, 2015: 1か月アンサンブル予報 システムの変更の概要. 平成 26 年度季節予報研修テ キスト, 気象庁地球環境・海洋部, 印刷中.
- Buizza, R. and T. N. Palmer, 1995: The singularvector 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.
- Palmer, T. N., R. Buizza, F. Doblas-Reyes, T. Jung, M. Leutbecher, G. J. Shutts, M. Steinheimer, and A. Weisheimer, 2009: Stochastic parametrization and model uncertainty. *ECMWF Technical Memoranda*, **598**, 42pp.