

気象庁「全球アンサンブル予報システム」について

山口 春季、松川 知紘、太田 洋一郎(気象庁数値予報課)、
越智 健太、関口 亮平、金浜 貴史(気象庁気候情報課)

1 はじめに

気象庁では、気象庁における台風情報、週間天気予報、異常天候早期警戒情報、1 か月予報の予報作業を支援するために運用していた台風アンサンブル予報システム(EPS)、週間EPS、1 か月 EPS の 3 システムを、「全球アンサンブル予報システム(全球 EPS)」と呼ばれる 1 つのシステムへと 2017 年 3 月に統合した。この統合は、従来の 3 システムを一体的に開発し、開発成果の共有や相互活用を促進するとともに、システム間の数値予報資料の整合性の向上や、運用に必要な計算機資源の効率的な利用を図ることを目的としている。全球 EPS では、従来のシステムから予報モデルやアンサンブル手法等が改良されている。本稿では、全球 EPS の仕様と、従来システムと全球 EPS の予測精度の比較について述べる。なお、従来のシステムと全球 EPS の比較については気象庁地球環境・海洋部(2017)と山口(2017)も参考にされた。

2 全球 EPS の仕様

従来の台風・週間・1 か月 EPS と全球 EPS の仕様を表 1 に示す。全球 EPS の実行頻度と予測期間は従来のシステムのものを包含している。基本的には 1 日 2 回(初期時刻:00, 12UTC)、11 日先までの予測計算が実行され、土・日曜日には 18 日先、火・水曜日には 34 日先まで予測が延長される。また現在もしくは 1 日以内に、台風が北緯 0-60 度、東経 100-180 度の領域にあると予想される場合には、台風進路予報の予報作業を支援するために、1 日最大 2 回(初期時刻 06, 18UTC)、5.5 日先までの予測計算が追加で実行される。

全球 EPS のメンバー数は 11 日先までの予測計算では 1 初期時刻あたり 27 メンバーで、11 日先以降では 13 メンバーに減らして実行される。異常天候早期警戒情報及び 1 か月予報プロダクトとして利用される際は、4 初期時刻(最新初期時刻とそれより 12, 24, 36 時間前の初期時刻)を組み合わせることで 50 メンバーを構成する。

全球 EPS の予報モデルは、GSM1304(下河邊・古河 2012; 室井・松下 2013)から

GSM1603E(新保 2017; 山口 2017)と呼ばれるバージョンへ更新された。これにより、GSM の力学過程と物理過程における GSM1403(米原 2014)、GSM1603(米原 2016)の改良と、GSM1705(米原 2017)の改良の一部が反映された。予報モデルの水平格子間隔は 18 日先までは約 40 km、18 日先以降の予測計算では計算量の増加を抑制するため約 55 km と粗くしている。台風・週間 EPS と比較すると水平格子間隔の変更はないが、1 か月 EPS と比較すると 18 日先までの予測計算では従来の約 55 km から高解像度化された。一方、鉛直層と最上層の気圧は、それぞれ 60 層、0.1 hPa から 100 層、0.01 hPa に増強・延長された。

全球 EPS の初期摂動には特異ベクトル(SV)法(Buizza and Palmer 1995)と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)(Hunt et al. 2007)を利用した初期摂動を組み合わせている。SV 法は、予測を大きくばらつかせる原因となりうる摂動を SV として求め、それを初期摂動に用いる手法である。全球 EPS の SV 法では、週間 EPS の手法(酒井 2008; JMA 2013)に対して計算安定性を向上させる改良を加えたほか、後述の LETKF による初期摂動を利用することで、初期摂動が局所的になるとともに初期のばらつきが小さい点を補う目的で利用していた線形成長後の SV の利用をやめた。また、全球 EPS では、観測データの取り扱いを気象庁全球解析に準じた LETKF による解析予報サイクルを導入した(太田・堀田 2016a)。ただし、LETKF のサイクルでは、解析値のアンサンブル平均を最新の全球解析のもので毎回置き換えることで、全球解析と LETKF のサイクルが乖離しないようにしている。LETKF の解析アンサンブルを利用した初期摂動により、全球解析のもつ不確実性を全球 EPS の初期摂動に反映することを狙っている。

全球 EPS では、下部境界条件となる海面水温に対して、解析値と予測時間内の時間変化の不確実性を考慮するため、海面水温摂動(太田・堀田 2016b)を導入した。また、モデル摂動では、従来のシステムから使用している確率的物理過程強制法(Buizza et al. 1999; 米原 2010)

に対して振幅の調整を行った。

3 台風・週間 EPS との比較

従来の台風・週間 EPS と全球 EPS の予測精度を比較したところ、台風の進路予測や、総観場の予測、日本域の降水の予測に改善が見られた。2015 年の台風第 3 号から台風第 27 号と 2016 年の台風第 1 号から台風第 18 号を対象とした、台風 EPS と全球 EPS の進路予測位置の平均誤差を図 1 に示す。摂動を加えていない単独予測であるコントロールラン(図略)とアンサンブル平均ともに予測誤差は改善しており、予報モデルを更新した効果が大きく寄与していると考えられる。

また、夏期(2015 年 6 月 22 日から 10 月 11 日)と冬期(2015 年 11 月 22 日から 2016 年 3 月 11 日)を対象として週間 EPS と全球 EPS の予測精度の比較を行った。北半球中高緯度 500 hPa 気圧面ジオポテンシャル高度におけるアンサンブル平均予測の解析値に対する CRPS の改善(図略)など、総観場の予測が改善した。日本域の降水予測について、0.5625 度(約 55 km)格子における平均降水量 1 mm/day 以上の降水予測に対する、対解析雨量のブライアスキルスコアを図 2 に示す。週間 EPS と比較して、全球 EPS は予測時間の前半を中心にブライアスキルスコアは改善した。これは、総観場の予測の改善や、日本海沿岸で弱い降水の予測頻度が減るなどの降水特性の変化が寄与していると考えられる。

4 1 か月 EPS との比較

従来の 1 か月 EPS との比較は、1981~2010 年を対象とした再予報の結果を用いて行った。再予報の実行頻度は月 3 回(10 日、20 日、月末各 12UTC 初期時刻)、メンバー数は 5 である。現業運用時と異なる仕様として、大気初期値と陸面初期値に気象庁 55 年長期再解析(JRA-55; Kobayashi et al. 2015)と JRA-55 に基づく強制力を与えたオフライン陸面解析値を使用した。また、LEKTF による解析予報サイクルが再予報期間には利用できないことから、LETKF を利用した初期摂動の代わりに線形成長後の SV を大気初期摂動に使用した。予測計算では温室効果気体の経年変化を考慮した。以降、12~2 月を初期時刻とする予測を「冬期間」の予測と定義する。同様に、3~5 月、6~8 月、9~11 月をそれぞれ春、夏、秋期間とする。

全球 EPS では、モデルの積雲・雲過程の改良等により、対流活動の予測特性が大きく変化した。200 hPa 気圧面速度ポテンシャルについて、夏期間の平均誤差の変化を図 3 に示す。1 か月 EPS では、フィリピン付近に中心を持つ大規模発散場について、上層で発散が弱い傾向が見られていたが、大幅に減少し解析に近づいた。一方、海上では東部太平洋や大西洋における対流圏上層での収束がより強まる傾向となった。

次に、北半球中高緯度の予測精度を検証するため、新旧システムについてバイアス補正済みの予測値のアノマリー相関係数をそれぞれ計算して、システム間で比較した(図 4)。対象とする要素は 500 hPa 気圧面ジオポテンシャル高度、850 hPa 気圧面気温、海面更正気圧で、どの要素とも、夏期間以外は概ね改善傾向であり、特に予測 2 週目にかけては統計的に有意な改善も見られた。一方、夏期間は多くの要素で予測精度は中立であった。

また、マッデン・ジュリアン振動(MJO)についての検証(久保 2017)や成層圏突然昇温の予測特性についての検証など、現象別の検証が行われた。成層圏突然昇温については、全球 EPS は 1 か月 EPS よりも昇温の予測頻度が多くなり、実際の昇温をより捉えることが可能となっていることがわかった。昇温に関する予測特性の変化には、成層圏において平均誤差が減少するなど全般的な予測精度の改善が寄与していると考えられるが、要因の更なる調査は今後の課題である。

5 まとめ

気象庁では、従来の台風・週間・1 か月 EPS を全球 EPS と呼ばれるひとつのシステムへと 2017 年 3 月に統合した。全球 EPS は、従来のシステムと比較して、予報モデルの更新や SV 法と LETKF を利用した初期摂動を組み合わせた大気初期摂動の採用、海面水温摂動の導入などの改良がなされた。これにより、台風 EPS や週間 EPS と比較して、台風進路予測、降水予測、総観場予測の改善がみられた。また、1 か月 EPS と比較して、熱帯対流活動には大きな予測特性の変化が見られた。北半球中高緯度の予測精度が概ね改善したほか、成層圏突然昇温等の現象に着目した予測特性に変化が見られた。

参考文献

太田洋一郎, 堀田大介, 2016a: 週間アンサンブル予報システムにおける LETKF の開発. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 66-76.
 太田洋一郎, 堀田大介, 2016b: 海面水温摂動の開発. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 77-84.
 気象庁地球環境・海洋部, 2017: 平成 28 年度季節予報研修テキスト. 気象庁地球環境・海洋部, 81 pp.
 久保勇太郎, 2017: MJO. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 33-37.
 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, 515-520.
 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.
 新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-8.
 室井ちあし, 松下泰広, 2013: 最近の改善のまとめ. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 128-129.
 山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-41.
 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.
 米原仁, 2014: 変更の概要. 平成 26 年度数値予報研修

テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
 米原仁, 2016: 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
 米原仁, 2017: 全球数値予報システムの改良の概要. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-7.
 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. and T. N. Palmer, 1995: The singularvector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434-1456.
 Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica. D.*, **230**, 112-126.
 JMA, 2013: Outline of the operational numerical weather prediction of the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research. Japan Meteorological Agency, 188 pp.
 Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **93**, 5-48.

表 1 台風・週間・1 か月 EPS と全球 EPS の仕様

システム(バージョン)	台風 EPS (TEPS1403)	週間 EPS (WEPS1402)	1 か月 EPS (V1403)	全球 EPS (GEPS1706)
支援業務	台風情報	週間天気予報	早警*1 と 1 か月予報	左記のすべて
実行頻度	1 日最大 4 回*2 (00,06,12,18UTC)	1 日 2 回 (00,12UTC)	土・日曜日と火・水曜日の週 2 回(12UTC)	1 日通常 2 回(00,12UTC)、最大 4 回*1(00,06,12,18UTC)
予測期間	5.5 日 (132 時間)	11 日	土・日曜日は 18 日、火・水曜日は 34 日	00,12UTC は 11 日、土・日曜日は 18 日、火・水曜日は 34 日 先まで延長 06,18UTC は 5.5 日
メンバー数	25	27	50(25×連続 2 初期時刻)	11 日先まで 27、その後 13
モデル	GSM1304			GSM1603E
水平分解能・鉛直層数	TL479L60(約 40km)		TL319L60(約 55km)	TL479L100(~18 日) TL319L100(18 日~)
大気初期値	全球速報解析値			
陸面初期値	オフライン陸面解析値		オフライン陸面解析値	全球速報解析に基づく値
土壌水分初期値	気候値 (Willmott)		予報予報サイクルの値	気候値(オフライン陸面解析に基づく平均値)
SST 気候値	NOAA OI-SST 月平均気候値		MGDSST 日別気候値	MGDSST 日別気候値
海氷気候値	海氷月平均気候値		海氷日別気候値	海氷日別気候値
海氷推定手法	初期半年偏差固定		初期半年偏差から統計的推定	初期半年偏差から統計的推定(改良)
大気初期摂動	SV 法	SV 法*3	BGM 法	SV 法+LETKF
モデル摂動	確率的物理過程強制法			確率的物理過程強制法
境界摂動	(なし)			海面水温摂動

*1 北緯 0-60 度、東経 100-180 度の領域に現在もしくは 1 日以内に台風があると予想される場合に実行

*2 早警: 異常天候早期警戒情報

*3 線形成長後の SV も使用

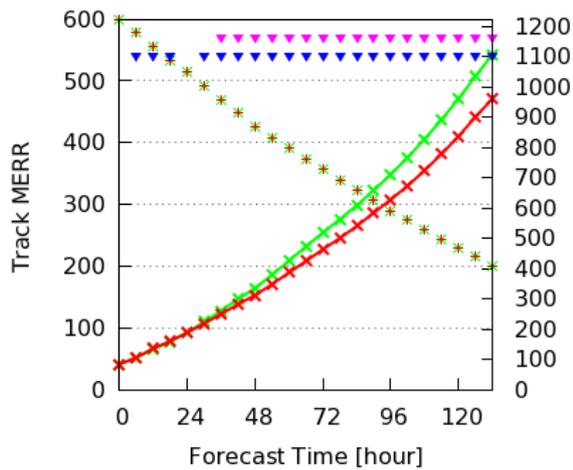


図 1 台風のアンサンブル平均予測の平均進路予測誤差。緑線は台風 EPS、赤線は全球 EPS を表す。左縦軸は進路予測誤差[km]、右縦軸はサンプル数(+)と×)、横軸は予報時間[時]。紫色の▼と青色の▼はそれぞれ時間方向の相関を考慮した場合と独立を仮定した場合に統計的に有意と判定された予測時間を表す。

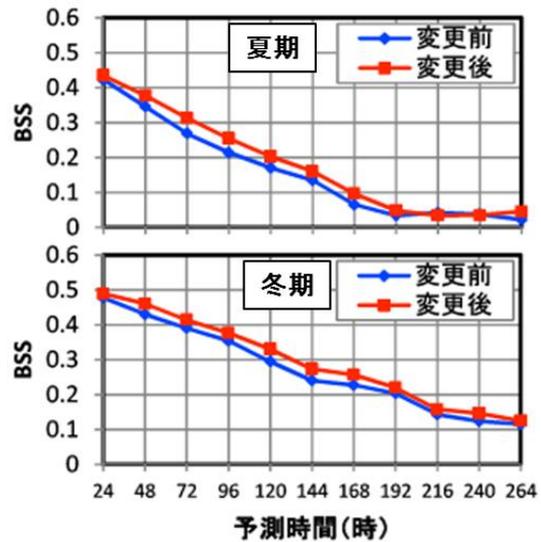


図 2 0.5625 度(約 55 km)格子における平均降水量 1 mm/day 以上の降水予測についての対解析雨量のブライアスキルスコア。上段は夏期、下段は冬期に対するもの。青線は週間 EPS、赤線は全球 EPS。縦軸はブライアスキルスコア、横軸は予測時間[時]。

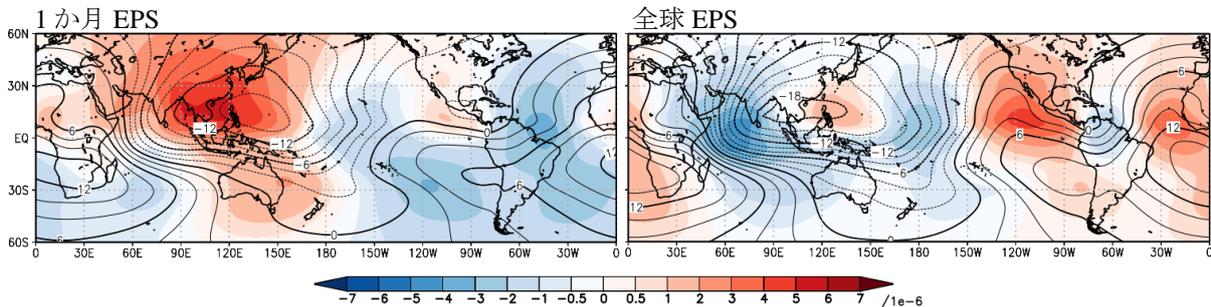


図 3 夏期間の 200 hPa 気圧面速度ポテンシャルの平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線) [$10^6 \text{ m}^2/\text{s}$] (予測 3~30 日目の 28 日平均場)。左は 1 か月 EPS、右は全球 EPS のもの。

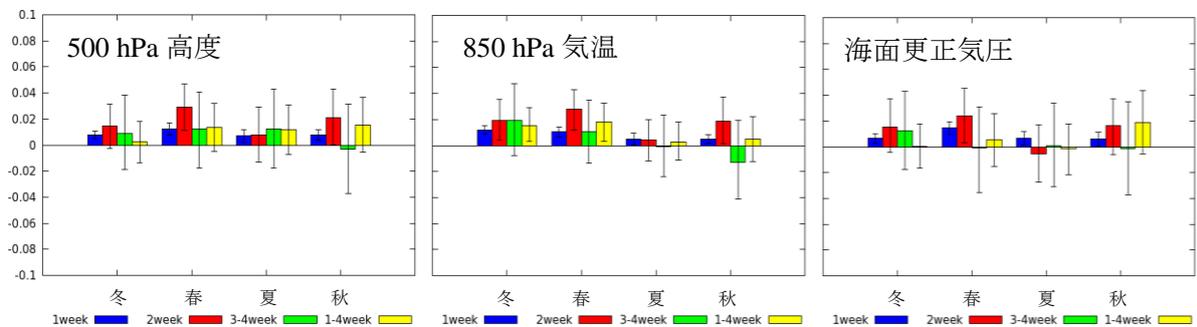


図 4 北半球中高緯度を対象とした、左から 500 hPa 気圧面ジオポテンシャル高度、850 hPa 気圧面気温、海面更正気圧のアンノミー相関係数の差(全球 EPS-1 か月 EPS)。青線、赤線、緑線、黄線はそれぞれ予測 1 週目、2 週目、3~4 週目、1~4 週目のスコア差を示しており、正の場合精度は改善している。誤差棒はブートストラップ法で見積もった 95% 信頼区間。横軸は冬期間~秋期間を表す。