第2章 中期予報のための現業アンサンブル予報システムと顕著現象予測

2.1 中期アンサンブル予報システムとその動向¹

気象庁をはじめ、世界の数値予報センターの多くが 中期予報²を対象とするアンサンブル予報システム(中 期 EPS; EPS は Ensemble Prediction System の英略 語)を現業運用している。アンサンブル予報に基づく 確率情報は年々精度が向上しており、その活用も盛ん になってきている。また、第1.1節で述べたとおり、こ こ10年間は顕著現象の1日~2週間先の予測精度向上 の促進を目的とした国際研究プログラム「観測システ ム研究・予測可能性実験(THORPEX)」も実施され、 大雨のような社会的に大きな影響を与える大気現象の 予測可能性研究も活発に行われている。

本節では、まず世界における中期 EPS の変遷をここ 10年間に着目して述べる。その後に、中期 EPS の変遷 の中で注目すべき動向を取り上げる。最後に、近年の 中期 EPS の予測成績を示す。なお、気象庁の週間 EPS と台風 EPS の性能や顕著現象予測の成績については、 次節以降を参照していただきたい。また、今後の気象 庁の中期 EPS の計画と開発については、第3章で報告 する。

2.1.1 システムの変遷

世界で最初に実用化された EPS は、1992 年に欧州 中期予報センター (ECMWF) と米国環境予測センター (NCEP)によりほぼ同時に運用が開始された中期 EPS である。実用化が中期予報の分野から始まった理由を、 高野(2002)は「1)予報対象とする総観規模擾乱の予報 に対して予測可能性が問題になる予報時間であること、 2) 総観規模やそれ以上のスケールを対象とするモデル の完成度が上がり、完全モデルの仮定が近似的にでも使 えること、3) 数値予報の誤差に見合った一定の大きさ の PDF 「確率密度関数 (probability density function) の英略語:引用者注]の広がりをもたらす初期摂動作成 法が開発されたこと、の3つが挙げられる。」と述べ ている。気象庁は、1996年3月に世界に先駆けて延長 予報³を対象とした EPS である「1 か月 EPS」の実用 化に成功した後、2001年3月に中期予報を対象とした 「週間 EPS」の現業運用を開始した。

竹内 (2006) は世界の中期 EPS の一覧を示し、2006 年2月現在における気象庁を含む9つの数値予報セン ターが中期 EPS の現業運用を行っていることを報告し た。その中で、それら中期 EPS の概要は以下の通りま とめられている。

- (a) 予報モデルの水平格子間隔は、T106(約120 km)
 ~TL399(約50 km)
- (b) 予報期間は、5センターが8~10日、4センターが 第2週まで(15~16日)
- (c) メンバー数は、ECMWF が1回当たり51(1日2 回運用のため1日あたりは102)と飛びぬけて多い(多くは1日あたり20~40程度)
- (d) 大気の初期摂動の求め方である初期値アンサンブ ル(第1.2節)はセンター毎に異なり、成長モー ド育成 (BGM: Breeding of Growing Modes) 法は 4 センター、特異ベクトル (SV: Singular Vector) 法は3 センター
- (e) モデルの不完全性を考慮するモデルアンサンブル は2センターのみが採用(ECMWFの確率的物理 過程強制法、カナダ気象センター(CMC)の集合 モデル法)

なお、その時点での気象庁の週間 EPS の仕様は、 (a) T106、(b) 9 日、(c) 25、(d) BGM 法、(e) なし、 であった。

現在、気象庁を含む多くの数値予報センターが中期 EPS を現業運用している。最近の世界の中期 EPS の 仕様は表 2.1.1 のとおりである。この一覧表は、2015 年 3 月に開催された数値実験作業部会 (WGNE)⁴ の第 30 回会合資料⁵ を基にまとめたものである。

気象庁及び世界の中期 EPS の現状は、竹内 (2006) と同様の分類でまとめると以下の通りである。

(a) 予報モデルの水平格子間隔

 予報モデルの水平格子間隔の範囲は、T126(約 100 km)~TL639(約32 km)である。その中で、
 気象庁の週間・台風EPSはTL479(約40 km)と比較的高分解能なシステムといえる。また、ECMWFとNCEPのシステムは、予報時間に応じて水平格子間隔を変える手法を導入している。

(b) 予報期間

ほとんどのシステムが10日以上で、その内の約半 数が15,16日と2週先までを対象期間とする。な お、気象庁の週間 EPS の予報期間は11日と長く はない。また、台風 EPS は台風の進路予測を対象 としており、その予報期間は台風の平均寿命(5.3

¹ 経田 正幸

² 中期予報とは、3日を越えて 10日先までを対象期間とす る予測のこと。巻末付録 B 参照。

³ 延長予報とは、10日を越えて 30日先までを対象期間とす る予測のこと。巻末付録 B 参照。

⁴ WGNE (Working Group on Numerical Experimentation) は、様々な規模の大気現象の予測のための数値モデル を用いた実験に関わる研究開発を推進するために、世界気象 機関大気科学委員会と世界気候研究計画合同科学委員会の合 同で設けられた作業部会である。部会メンバーは主要な数値 予報センター及び研究機関から選出されており、気象庁予報 部数値予報課の職員が継続的に選ばれている。

⁵ 会合のサイトのアドレスは http://polar.ncep.noaa. gov/conferences/WGNE-30/。当該資料は、サイトトップ ページの中の「Agenda & Presentations」の「Recent developments in Ensemble Prediction」に掲載されている。

 表 2.1.1 中期予報を対象とするアンサンブル予報システムの一覧(2015 年 12 月現在)。2015 年 3 月に開催された WGNE 第 30 回会合資料を基にし、気象庁については台風アンサンブル予報システムを加え、フランス気象局 (Météo-France) について は予報期間が短い(初期時刻 06UTC は 3 日、初期時刻 18UTC は 4.5 日)ことから除いた。また、CMA, NCEP, UKMO についてはその後の更新情報⁶ を反映するために変更した。

				SEC OICo			1	1
数値予報センター名		予報モデル	予報期	メン	初期値アンサ	モデル	境界値アンサンブ	
		の水平格子	間(+	バー	ンブル b	アンサ	ル	
			間隔と鉛直	は延長	数		ンブル゜	
			層数 ^a	期間)				
BoM (オース	トラリ	ア気象局)	$\sim 60 \text{ kmL79}$	10日	24	LETKF	RP	なし
CMA (中国気	象局)		TL639L60	15日	15	BGM 法	SPPT	なし
CMC (カナダ	気象も	2ンター)	0.6 度 L40	16日	21	EnKF	SKEB,	なし
							SPPT	
CPTEC(ブラ	ラジル	天気予報	T126L28	15日	15	EOF	なし	なし
気候研究センタ	7—)							
ECMWF (欧	州中	下段は	TL639L91	10日	F 1		SKEB,	予報モデルは陸面・
期予報センター) 延長分		TL319L91	+5日	51	SV 法+EDA	SPPT	海洋モデル含む	
HMCR(ロシ	ア水文	気象セン	T169L31	10日	14	BGM 法	なし	不明
ター)								
JMA (気象	週間	EPS		11日	27	GV 2+	SPPT	なし
庁)	台風	EPS	1L479L60	5.5日	25	- SV法		
KMA(韓国気象局)		$\sim 40 \text{ kmL70}$	12日	24	LETKF	RP,	SST 摂動あり	
						SKEB		
NCEP(米国環境 下段は		下段は	TL574L64	8日	01	EnKF	CTTD	+>1
予測センター) 延長		延長分	TL382L64	+8日	21		SIIP	'&U
NRL(米国海軍研究所)		T239L50	16日	20	Local ET	なし	なし	
UKMO(英国気象局)		33 kmL70	7日	12	LETKF	RP,	SST 摂動あり	
						SKEB		

^a予報モデルの分解能の表記法は巻末付録 B を参照。

^b 初期値アンサンブルの各手法(LETKF, BGM 法、EnKF, EDA, SV 法)の詳細は第 1.2.2 項を、CPTEC の導入する EOF (Empirical Orthogonal Function) は Mendonça and Bonatti (2009)、NRL の導入する Local ET (Ensemble Transform) は McLay et al. (2010) を参照。なお、ECMWF のシステムは大気に加え地表面の初期摂動を含む。

^c モデルアンサンブル手法であるランダムパラメータ法 (RP: Random Parameter scheme)、確率的物理過程強制法 (SPPT: Stochastically Perturbed Physics Tendencies scheme)、確率的運動エネルギー後方散乱法 (SKEB: Stochastic Kinetic Energy Backscatter scheme)の解説は米原 (2009)を、全時間変化率の確率的摂動法 (STTP: Stochastic Total Tendency Perturbation scheme) については Hou et al. (2008)を参照。

日)より若干長い5.5日であるが、中期予報としては短い。

(c) メンバー数

気象庁の週間・台風 EPS を含め、ほとんどのシス テムは 12~27 とする中、ECMWF のシステムは 51 と他と比べて突出して多い。

(d) 初期値アンサンブル システム毎に異なる。SV やブレッドベクトル (BV: Bred Vector)⁷ といった成長モードを用いるシステ ムに加え、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF: Ensemble Kalman Filter) といった解析誤差に基 づくばらつきを用いるシステム、さらに両者を採 用するシステムと多様である。

(e) モデルアンサンブル
 気象庁の週間・台風 EPS を含め、多くのシステム
 が採用している。システムの中には2手法を併用
 するものもある。

ここ10年間の変遷に注目すると、中期EPSの予報モ デルの高解像度化やモデルアンサンブル手法の導入、予 報期間の延長が進められてきたことがわかる。また、シ ステム間の比較からは、ECMWFのシステムが(a)~(c) のいずれの点でも最高ランクで、予報モデルに海洋と の結合モデルを導入していることがわかる。このこと は、ECMWFがEPSの運用とその開発に最も多くの

⁶ NCEP の更新情報の掲載アドレス:http://www.nco. ncep.noaa.gov/pmb/changes/と、TIGGE サイト内に設 けられている、UKMO と CMA の更新情報の掲載アドレ ス:https://software.ecmwf.int/wiki/display/TIGGE/ Models。

⁷ BGM 法によって求まる成長モードのこと。

計算機資源を割いていることも意味している。

2.1.2 システムの運用形態と仕様の動向

第2.1.1 項では、ここ 10 年の間に中期 EPS が強化さ れたことを述べた。中でも、近年実用化の著しい手法と して、アンサンブルに基づいたデータ同化手法と、それ によって求まる解析誤差に応じた初期摂動を定める手 法が挙げられる。さらに、大気下層のばらつきを得るた めとして、海面水温 (SST: Sea Surface Temperature) といった境界条件に摂動を与える手法も登場している。 本項では、中期 EPS の変遷と最近の運用の中で、注 目すべき動向を項目立てして取り上げ、数値予報セン ターでの主な活動状況を述べる。

(1) 運用形態

気象庁は週間・台風 EPS の2つの中期 EPS を運用 している。ただし、気象庁の他に、台風 EPS のように 特定の気象の予測のために別の中期 EPS を運用する数 値予報センターはない。

ほとんどのセンターは中期 EPS の予報期間を 10 日 以上としている。中には、中期予報と延長予報を一体 的に支援するシステムとして運用しているセンターも ある。例えば、ECMWF のシステムは 2008 年に延長 予報システムと統合され (Vitart et al. 2008)、月・木 曜日の 00UTC を初期時刻とする予測の予報期間を 15 日から 46 日 (2015 年 5 月に延長した。それ以前は 32 日。)に変えることで延長予報の支援という目的も果 たしている⁸。Vitart et al. (2008) は、この統合の効 果のひとつに、中期予報と延長予報で再予報結果の共 有(中期予報用としてはコントロールランのみの仕様 から摂動ランを含むものへの拡充となる)が実現でき た点を挙げている。また、CMC のシステムは 2013 年 12月に木曜日の00UTCを初期時刻とする予測の予報 期間を32日と長くする変更が加わり、延長予報を支援 している⁹。

(2) 顕著現象予測

計算機の処理能力の向上に合わせて、予報モデルの 高解像度化と予報期間の延長が進められた。こうした システムの高度化は、THORPEX の下での顕著現象の 予測可能性研究の推進と共に各国の予報業務の拡充に つながっている。

気象庁は、2009年4月に予報円形式の確率情報として 発表している台風の進路予報を5日先まで延長したが、 その4日先、5日先の予報円の大きさは台風アンサン ブル予報のばらつきを基に決めている (岸本 2009b,a)。 また、気象庁では、交通政策審議会気象分科会 (2015)

にある課題5「台風等を想定した、タイムライン(時系 列の防災行動計画)による防災対応支援のための、数 日先までの警報級の現象になる可能性の提供」に応え るため、アンサンブル予報の結果を用いたガイダンス の開発を進めている。

海外の例として、英国気象局 (UKMO) では、雨・風・ 雪·霧·凍結に関する5日先までのリスク(発生確率×影 響度合)情報を英国荒天警報 (National Severe Weather Warnings) として発表しており、この発生確率はアン サンブル予報に基づいた値としている¹⁰。NCEPでは、 Hazards Outlook としてアンサンブル予報に基づく 2 週先までの確率情報を発表している¹¹。

(3) 海面水温摂動

一部の数値予報センターは、大気にとって下部境界 となる海面状態の不確実性を考慮する EPS を運用して いる。その中でも、ECMWF のシステムは、中期 EPS の予報モデルとして海洋との結合モデルを導入してい る唯一のシステムである。その海洋モデルは、水平解 像度1度・鉛直 42層の NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean)¹² であり、風による海洋混合 が SST の低下をもたらして海洋の熱量を変化させる といった作用とそのばらつきを考慮できるシステムと なっている。

一方、ECMWFのEPSを除く全てのシステムの予報 モデルは全球大気モデルであり、予報期間中の SST は 大気との相互作用を仮定しない下部境界条件として与 えられる。そのうち、UKMOのシステムは与える SST に過去の統計量に基づいた SST の摂動を加え、大気下 層のばらつきを得ている (Tennant and Beare 2014。 詳細は第3.4.2項を参照)。

(4) 解析システム・領域アンサンブルとの関係

いくつかの数値予報センターは、中期 EPS と解析シ ステムとの関係を双方向型として強めている。ECMWF のデータ同化アンサンブル (EDA: Ensemble of Data Assimilations) や UKMO の局所アンサンブル変換力 ルマンフィルタ (LETKF: Local Ensemble Transform Kalman Filter), CMC の EnKF など、アンサンブルに 基づいたデータ同化手法によって解析誤差に応じた初 期摂動を導入するシステムが増えている。そして、同じ 手法で求まるばらつきの情報を解析システムにおける 流れ依存の背景誤差情報としても利用している(例え ば、ECMWF の EDA は Bonavita et al. 2012, UKMO のLETKFはClayton et al. 2013など)。

また、多くの数値予報センターは、短期予報¹³もし

⁸ http://www.ecmwf.int/en/forecasts/

documentation-and-support/extended-range/ ecmwf-monthly-forecasting-system/

⁹ http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/CMOI/ product_guide/docs/changes_e.html#20131127_geps_3. 1.0

¹⁰ http://www.metoffice.gov.uk/research/news/ weather-warnings

¹¹ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/

predictions/threats/threats_ie.php

http://www.nemo-ocean.eu/

¹³ 短期予報とは、12 時間を越えて 72 時間先までを対象期間 とする予測のこと。巻末付録 B 参照。

くは中期予報はじめまでを予報期間とする、領域モデル を用いる EPS(以後、領域 EPSと記述)を開発・運用 している(詳細は第4.2節を参照)。中期 EPSの摂動や 予測結果はそれら領域 EPSの初期値や境界値に利用さ れており、近年の中期 EPSの重要な目的の1つに領域 EPSの支援もある。利用例としては、UKMOが運用す る、高分解能なアンサンブルを生成するシステム(呼称 は MOGREPS-UK で、その仕様は(a) 2.2 km、(b) 36 時間、(c) 12、(d) 中期 EPS である MOGREPS-G の 摂動を流用、(e) SPPT)などがある。

(5) 国際協力

世界的には、複数のセンター間で同じ中期 EPS を用 いるという枠組みがある。UKMO の開発するシステ ムは、韓国気象局 (KMA) で 2010 年 12 月から運用中、 オーストラリア気象局 (BoM) でも運用を開始予定で ある。なお、こうした活動は EPS に限ったものではな く、KMA, BoM の決定論的予報システムでは UKMO のモデルを利用している。そして、熱帯気象や台風の 予測といった各センターの開発の強みをシステムの向 上に活かすこととしている¹⁴。

また、マルチセンターである点を活かす「北米アン サンブル予報システム (NAEFS: North American Ensemble Forecast System)¹⁵」も存在する。NAEFS は 米国・カナダ・メキシコの各国気象局による国際共同 プロジェクトで、米国とカナダの中期 EPS の複合結果 の現業利用を目的に 2004 年 10 月に立ち上げられた。 各センターが単独ではなく協力して精度の高い北米域 の予測に取り組むのは、バイアス補正といった利活用 技術を効率的に開発・運用する狙いもある。

(6) 予測可能性研究での活用

世界の中期 EPS の結果は 2006 年 10 月以降 THOR-PEX のサブプログラム「TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)」(Swinbank et al. 2016) として集められ、現在も表 2.1.1 に挙げた多くのセン ターの予測結果は研究・教育目的としてアーカイブセン ターの運用する TIGGE サイトから取得可能である¹⁶。 ただし、商用利用は許されておらず、データが利用可能 となるのは初期時刻から 48 時間が経過した後である。 広く公開された最新の現業システムの予測結果によ

リ予測可能性研究や開発での活用¹⁷が進み、本報告



図 2.1.1 JMA, ECMWF, KMA, NCEP の中期アンサンブ ル予報の CRPS と CRPS スキルスコアの時間発展。対象 は北半球域(北緯 20 度以北)の 500 hPa 面高度、平均 期間は 2014 年 9 月 ~ 2015 年 8 月の 12 か月である。横 軸は予報時間を表し、補助目盛は 24 時間毎である。 は CRPS(左縦軸参照。単位はm)、×はコントロールラン を基準値とする CRPS スキルスコア(右縦軸参照。単位 は%)である。JMA は赤線、ECMWF は緑線、KMA は 紫線、NCEP は橙線(ただしスキルスコアはなし)であ る。なお、CRPSの解説については巻末付録 B を参照。

でもこの結果を第 1.2 節や第 2.5 節、第 3.2 節で用い ている。TIGGE データの開発成果や検証結果を定期 的に掲載・更新するサイトとして広く知られているも のに、筑波大学のインターネットサイト内に設けられ た「TIGGE 博物館¹⁸」がある。ここに掲載されている 顕著現象予測資料 (Matsueda and Nakazawa 2015) は 世界気象機関の荒天予報実証プロジェクト (SWFDP: Severe Weather Forecast Demonstration Project)¹⁹ の 下で利用されている。また、検証資料は現業気象機関 や各種国際プロジェクトにて活用されている。

2.1.3 中期アンサンブル予報の成績

第 2.1.2 項では、中期 EPS の高度化が顕著現象の予 測可能性研究の推進と共に各国の予報業務の拡充にも つながっていることを述べた。本項では、近年の中期 EPS の性能を述べることとする。

中期アンサンブル予報の成績を、アンサンブル予報 特有の確率的な予測の誤差を測る CRPS (決定論的予 測での平均絶対誤差に相当し、完全予報の場合に最小 値0をとる。詳しくは巻末付録 Bを参照。)で確認す る。ここでは、各数値予報センターから世界気象機関 基礎システム委員会の下で活動する EPS 検証リードセ ンター²⁰ に報告された検証資料の内、CRPS を報告す

¹⁴ http://www.metoffice.gov.uk/barometer/features/ 2014-03/model-partners

¹⁵ https://weather.gc.ca/ensemble/naefs/index_e. html

 ¹⁶ アーカイブセンターを務める ECMWF のサイトのアド レスは http://apps.ecmwf.int/datasets/data/tigge/。 なお、表 2.1.1 にあるセンターの内、HMCR と NRL は TIGGE 不参加のため結果は取得できず、BoM の結果は 2010 年 7月 20 日分まで(当時のシステムのもの)を取得できる。
 ¹⁷ TIGGE データを用いた論文一覧は TIGGE サイト内のペー ジ (https://software.ecmwf.int/wiki/display/TIGGE/ Research+articles)を参照。

¹⁸ http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/TIGGE/

¹⁹ http://www.wmo.int/pages/prog/www/swfdp/

²⁰ 中期アンサンブル予報の検証資料の交換推進のために設け られたセンターである。気象庁は本業務を務めており、各数 値予報センターの報告とそれらの可視化結果を同センターの サイト(http://epsv.kishou.go.jp/EPSv/)に掲載してい る。

る主要 4 センター (気象庁 (JMA), ECMWF, KMA, NCEP)の値を示す。なお、JMA の結果は週間 EPS の検証結果である。

図 2.1.1 は、北半球域の 500 hPa 面高度場を検証対 象とする CRPS および CRPS スキルスコア(基準値 はコントロールランの CRPS) である。各センターの)を見ると、ECMWF が他のセンターより CRPS (大幅に小さいことが目立つ。ECMWF と他センターの CRPS の差を同じ予報誤差の大きさに達する予報時間 の長さで測ると、8日先 (FT=192) 程度までは1日分 程度、それ以降では2日分程度まで拡がる。アンサン ブル手法による改善率を示す CRPS スキルスコア(×) を見ると、予報期間を通して20%以上を示し、予報期 間後半で40%以上と高い。センター間比較をすると、 中期予報の範囲では ECMWF の改善率が最も高く、ま た JMA, KMA との差が数%と大きい。短期予報の範 囲では JMA の改善率が最も低い。第1.2 節で示され ているとおり、予報初期のばらつきはセンター間で大 きく異なっているものの、ECMWF と KMA は共に解 析誤差に応じた初期摂動を定める手法を導入しており、 この効果が短期予報の範囲の高い改善率に現れている と考えられる。

参考文献

- Bonavita, M., L. Isaksen, and E. Hólm, 2012: On the use of EDA background error variances in the ECMWF 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 138, 1540–1559.
- Clayton, A. M., A. C. Lorenc, and D. M. Barker, 2013: Operational implementation of a hybrid ensemble/4D-Var global data assimilation system at the Met Office. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139, 1445–1461.
- Hou, D., Z. Toth, Y. Zhu, and W. Yang, 2008: Impact of a stochastic perturbation scheme on NCEP global ensemble forecast system. *Preprints*, 19th Conf. on Probability and Statistics, New Orleans, LA, Amer.Meteor.Soc., 1.1, URL http:// ams.confex.com/ams/pdfpapers/134165.pdf.
- 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.
- 交通政策審議会気象分科会(編), 2015: 「新 たなステージ」に対応した防災気象情報と観 測・予測技術のあり方(提言). 国土交通省, 41 p., URL http://www.mlit.go.jp/policy/ shingikai/kishou00_sg_000058.html.
- Matsueda, M. and T. Nakazawa, 2015: Early warning products for severe weather events derived from operational medium-range ensemble forecasts. *Me*-

teorol. Appl., **22**, 213–222.

- McLay, J., C. H. Bishop, and C. A. Reynolds, 2010: A local formulation of the ensemble transform (ET) analysis perturbation scheme. *Wea. Forecasting*, 25, 985–993.
- Mendonça, A. M. and J. P. Bonatti, 2009: Experiments with EOF-based perturbation methods and their impact on the CPTEC/INPE ensemble prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1438–1459.
- Swinbank, R., M. Kyouda, P. Buchanan, L. Froude, T. Hamill, T. Hewson, J. Keller, M. Matsueda, J. Methven, F. Pappenberger, M. Scheuerer, H. Titley, L. Wilson, and M. Yamaguchi, 2016: The TIGGE Project and its achievements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, in press.
- 高野清治,2002: 各国におけるアンサンブル予報の現状 と将来. 気象研究ノート,201,105-120.
- 竹内義明, 2006: 海外の現業全球アンサンブル予報の 動向. 数値予報課報告・別冊第 52 号, 気象庁予報部, 13-22.
- Tennant, W. and S. Beare, 2014: New schemes to perturb sea-surface temperature and soil moisture content in MOGREPS. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140, 1150–1160.
- Vitart, F., R. Buizza, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, J.-R. Bidlot, A. Bonet, M. Fuentes, A. Hofstadler, F. Molteni, and T. N. Palmer, 2008: The new VarEPS-monthly forecasting system: A first step towards seamless prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1789–1799.
- 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.

2.2 週間アンサンブル予報システム¹

2.2.1 運用の目的

数値予報モデルの予測の誤差の成長率は予測される 大気の状態に応じて異なっている。特に週間天気予報 で予報対象とする時間スケールでは、予測の価値を左 右するほど日々大きく変動し、ときには数値予報モデ ルの予測の誤差が気候値予報の誤差を上回り、その予 測が有効でなくなることもある。週間天気予報作業に おいて数値予報資料を有効に利用するためには、その 予測の不確実性がどの程度か、予測の有効性はどうで あるかを評価することが重要である。決定論的な予測 ではその不確実性を定量的に評価することは難しいが、 アンサンブル予報ではスプレッドの大きさから数値予 報モデルの予測の不確実性を定量的に見積もることが 可能である²。また、アンサンブル平均は個々のメン バーの予測のランダムな誤差を打ち消しあうため、統 計的には個々のメンバーよりも予測精度は高くなる(高 野 2002)。このようにアンサンブル予報から得られる 情報は、週間天気予報において有益な情報となり得る。

気象庁では 2001 年 3 月から週間アンサンブル予報 システム(以下、週間 EPS: Ensemble Prediction System)の運用を開始し、各メンバーの予測結果から計算 されるアンサンブル平均やスプレッド、確率情報を週 間天気予報作業の支援資料として利用している。例え ば、アンサンブル平均やスプレッドは予報作業の支援 資料として、総観規模の現象の変化やその予測の不確 実性を把握するために利用されている(林・川上 2006; 村 2011)。スプレッドや確率情報は週間天気予報の日 別信頼度を発表する際の指標としている信頼度ガイダ ンスに利用されている(川上ほか 2007)。

2.2.2 仕様の変遷

数値予報課では、週間天気予報の支援資料の精度向 上を目指して週間 EPS を改良してきた。表 2.2.1 に これまでの週間 EPS の仕様の変遷を示す。個々のメン バーの予測精度向上のために全球モデル (GSM: Global Spectral Model) の改良の成果を取り込むだけでなく、 確率情報の精度向上のための初期摂動作成手法の改良、 モデルアンサンブル手法の導入、メンバー数の変更を 行ってきた。また、初期値の更新に伴う数値予報資料 の変化をいち早く捉えられるように、2014 年 2 月に高 頻度化も行った。週間 EPS の予測に用いる初期値には 全球解析値を波数切断して用いていることから、全球 解析の改良の成果も週間 EPS の精度には反映されて いる。

2.2.3 予測の精度の変遷

週間 EPS の更新の際には、更新前後の仕様の実験結 果を比較して、アンサンブル平均や確率予測精度の改 善状況や、スプレッドの大きさの妥当性を事前に確認 してきた³。本項では、週間 EPS の過去 10 年程度の 検証結果から週間 EPS の改良の歴史を振り返るとと もに、更新によって狙った改良の効果が実際に得られ たかを確認する。検証指標として、アンサンブル平均 の予測精度を示す平方根平均二乗誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) と、確率予測精度を示す指標であ る CRPS (Continuous Ranked Probability Score) に 着目する。CRPS は決定論的な予測の平均絶対誤差に 相当する量で、0 に近いほど予測精度が高いことを示 す確率予測の統計検証の指標の1つである(巻末付録 Bを参照)。また、アンサンブル平均の誤差に対してス プレッドの大きさが妥当であるかを見る指標 R が、以 下のように示されている⁴。

$$R = \frac{M+1}{M-1} \frac{\langle S^2 \rangle}{\langle E_M^2 \rangle} \tag{2.2.1}$$

M はメンバー数、S はスプレッド、 E_M はアンサンブ ル平均の RMSE、〈〉は多数事例の平均値であることを 示す。*R*は理想的なアンサンブル予報では1になる量 で、1よりも大きければスプレッドが大きいことを、1 よりも小さければスプレッドが小さいことを表してい る。本節で示す RMSE やスプレッド、CRPS は世界気 象機関 (WMO: World Meteorological Organization) の基礎システム委員会 (CBS: Commission for Basic Systems) で定められた検証手法に基づき計算されたも のである。それらの検証指標の値は CBS に参加して いる他の数値予報センターの標準検証結果とともに公 開されている⁵。週間 EPS の検証結果と併せて、CBS に参加している数値予報センターのうち、主要な数値 予報センターの検証結果も示す。また、週間 EPS のコ ントロールランの RMSE も示し、アンサンブル平均 の RMSE と比べて小さくなっているか確認する。週間 EPS のコントロールランの RMSE との比較のために 決定論的な高解像度モデルである GSM の RMSE も示 す。GSM の改良の歴史や精度の経年変化についての詳 細は金浜 (2013) を参照いただきたい。

2003 年 1 月から 2015 年 11 月までの検証結果につい て、図 2.2.1 にアンサンブル平均の RMSE を、図 2.2.2 に (2.2.1) 式で定義した *R* を、図 2.2.3 に CRPS をそ れぞれ示す。各図に掲載した数値予報センターは、気

¹ 越智 健太

² 理想的なアンサンブル予報では、スプレッドはアンサンブ ル平均の平方根平均二乗誤差とほぼ同程度の大きさをもつこ とが示されている (高野 2002)。

³ 週間 EPS の現業化判断で重視する点については経田ほか (2013)を参照いただきたい。

⁴ Rの導出の詳細は高野 (2002)を参照いただきたい。

⁵ 各数値予報センターの中期アンサンブル予報の検証結果の 収集・公開は気象庁が行っている。各センターから報告され た標準検証結果とその可視化結果は以下の URL に掲載して いる。

http://epsv.kishou.go.jp/EPSv/

表 2.2.1 週間 EPS の主な改良の時期と仕様の変遷。予報モデルのバージョンや水平分解能の表記については巻末付録 B を参 照。初期摂動作成手法の BGM 法は成長モード育成法を、SV 法は特異ベクトル法を示す(詳細は第 1.2 節参照)。摂動対象領 域の各記号は NH: 30°N~90°N, TR: 30°S~30°N, SH: 30°S~90°S, NH*: 20°N~90°N, TR*: 20°S~30°N, TR**: 20°S~20°N を示す。

	予報モデル			アンサンブル手法			予報	
時期(年月)	バージョン	水平分解能	鉛直層数	メンバー数	初期摂動作成手法	モデルアンサンブル	期間	初期時刻
2001年3月	GSM0103	T106	L40	25 ×1/日	BGM 法 (NH^*)	なし	9日	12UTC
2002年2月					BGM 法 (NH^*+TR^{**})			
2003年 6月	GSM0305							
2005年3月	GSM0407							
2006年3月	GSM0603	TL159		51 ×1/日				
2007年11月	GSM0711	TL319	L60		SV 法 (NH+TR*)			
2009年3月	GSM0808							
2010年11月	GSM1009					確率的物理過程強制法		
2011年3月					SV 法 (NH+TR+SH)			
2013年 3月							11日	
2014年2月	GSM1304	TL479		27 ×2/日				00, 12 UTC

象庁 (JMA)、欧州中期予報センター (ECMWF)、米 国環境予測センター (NCEP)、韓国気象局 (KMA) で ある。上段から北半球域 (20°N~90°N) の 500 hPa 高 度場、熱帯域 (20°S~20°N) の 850 hPa 気温、南半球域 (20°S~90°S) の 500 hPa 高度場を検証対象とした各指 標のうち、報告のあった期間の値のみ示している。こ こで示す検証結果は金浜 (2013) と同様、FT=120 にお ける値で、各指標を計算する際の参照値は各数値予報 センターがそれぞれ用意した値を用いている⁶。

(1) 予報モデル・解析値の改良の効果

まず、図 2.2.1 に紫色線で示す週間 EPS のコントロー ルランの検証結果に着目する。北半球・南半球を見る と概ね RMSE は減少傾向にあることが分かる。この 減少傾向は橙色線で示した GSM と同様の傾向であり、 解析値の精度向上や予報モデルの改善によってもたら されたものであると考えられる。北半球・南半球では、 概ね GSM の方が週間 EPS のコントロールランよりも RMSE が小さい。

その減少傾向の中でも、2005年半ば、2009月初頭 で南半球の RMSE の減少幅が大きい。2005年半ばの 減少は全球解析への4次元変分法の導入(門脇 2005) と同時期であるため、週間 EPS の予測の初期値とする 全球解析値の精度の向上によるものであると考えられ る。2009年初頭の減少は、同時期に全球解析に導入さ れた静止気象衛星晴天輝度温度の利用及び変分法バイ アス補正の改良(石橋 2009)によるものであると考え られる。

一方、熱帯域に着目すると、2009年付近からは週間 EPS のコントロールランと GSM の RMSE に大きな 差は見られないものの、それ以前では週間 EPS のコン トロールランの方が GSM よりも RMSE が小さい。表 2.2.1 に示した週間 EPS の予報モデルのバージョンを 見ても、GSM の更新時期と1年以内のずれしかないた め、予報モデルのバージョンの違いが原因ではないと 考えられる。この差の明確な原因は分からないが、水 平分解能の違いによる予報モデルの予測特性の違いが 影響している可能性があると考えられる⁷。

(2) アンサンブル手法の改良の効果

次に、赤色実線・破線で示す週間 EPS のアンサンブ ル平均の RMSE の検証結果に着目する。図 2.2.1 の北 半球を見ると、アンサンブル平均の RMSE はコント ロールランの RMSE よりも小さくなっていることが 分かる。その中でも、2011年付近でアンサンブル平均 の RMSE の減少幅が大きい。この変化には、2011 年 3月に行った初期摂動の振幅調整(山口 2011)が寄与し ていると考えられる。図 2.2.2 の R の月別値の時系列 からは、2011 年 3 月以前は R は夏期で 1 より小さく、 冬期は1より大きくなる傾向が見られ、その増減幅が 大きいことが分かる。これは、2011年3月以前は初期 摂動の振幅を夏期で小さく、冬期で大きくする気候学 的な季節変化を与えていたためである。Miyoshi et al. (2007) が示した解析誤差の季節変動は小さいという調 査結果も踏まえて、2011年3月の改良では夏期・冬期 ともに R の値が1に近づくように、初期摂動の振幅に 季節変化を与えず一定値で代表するようにした。その 結果、2011年3月以降はRは全季節を通じて概ね1に 近づいている。山口(2011)では、計算機資源に限りが あるため夏期・冬期それぞれ1か月の実験のみで影響 評価を行っていたが、実際に期待した効果が全季節を

 ⁶ 週間 EPS のコントロールラン・アンサンブル平均の RMSE, CRPS の計算に用いる実況値には初期値を用いている。GSM の RMSE の計算に用いる実況値は全球解析値である。

⁷ 例えば、GSM1403 をベースとした予報モデルの水平分解 能を TL959 から TL479 に変更した際に、TL479 の予測に おいて上層の気温の正バイアスが TL959 よりも拡大する傾 向が見られた。このようなバイアス特性の違いが影響した可 能性があると考えられる。

通じて得られている。アンサンブル平均の RMSE の減 少については、この検証結果のみからでは明確な原因 は分からないが、摂動ランの予測の誤差の標準偏差が 初期摂動の振幅を小さくすることで軽減したことが影 響している可能性があると考えられる。また、同時期 には図 2.2.3 に示す北半球域の CRPS の減少幅も大き く、確率予測精度も向上している。

図 2.2.1 の南半球に着目すると、北半球同様、2011 年3月付近でアンサンブル平均の RMSE の減少幅が 大きい。この変化は 2011 年 3 月の初期摂動作成手法 の改良と同時に行った、南半球域における初期摂動の 導入(山口 2011)の効果が現れたものであると考えら れる。本変更では、日本域に限らない全球的な予測精 度の向上のため、南半球域も含めた全球域に初期摂動 を与えるようにした⁸。この変更は、北半球域と同様、 Rが1に近づくこと、アンサンブル平均のRMSEがコ ントロールランの RMSE よりも小さくなることを期待 したものである。図 2.2.2 の南半球の 2011 年 3 月付近 に着目すると、実際に南半球に初期摂動を導入して以 降、*R*は大きく増加して1に近づき、アンサンブル平 均の RMSE はコントロールランの RMSE よりも小さ くなった。図 2.2.3 に示す南半球域の CRPS も同時期 を境に大きく減少しており、南半球における週間 EPS の予測精度が狙い通り向上している。

図 2.2.2 に示す熱帯域の R の変化に着目すると、2006 年3月付近、2007年11月付近、2010年11月付近で 大きく変化していることが分かる。2006年3月には、 予報モデルの更新・高解像度化とメンバー数の増強(経 田 2006)を行った。本変更ではコントロールラン・ア ンサンブル平均の RMSE は大きく減少している一方、 メンバー数の増強によりスプレッドが増加した。その 結果、スプレッドと RMSE の比である R は1よりも 大きくなったと考えられる⁹。

2007年11月には、予報モデルの更新・高解像度化と 初期摂動作成手法の変更を行った(米原 2008)。初期摂 動作成手法の変更前の成長モード育成(BGM: Breeding of Growing Modes)法では変更後の特異ベクトル(SV: Singular Vector)法に比べて摂動の成長率が小さいた め、FT=120以降で十分なスプレッドを得るためには 初期摂動の振幅を大きくする必要があったが、SV法の 導入によって初期摂動を小さくしてもFT=120以降で も更新前と同程度のスプレッドが得られるようになっ た。実際に、同時期に北半球域では初期摂動の振幅を 小さくしているが、Rはそれ以前と同程度の値となっ

http://www.wis-jma.go.jp/swfdp/

ている。また、FT=120よりも前の予報時間では R は 1に近づき、スプレッドの大きさはアンサンブル平均の RMSEの大きさと比べて適切な値に近づいた(図略)。 これらは米原 (2008) に示された夏期・冬期それぞれ1 か月の実験結果でも確認できており、期待した効果が SV 法の導入によって得られていることが分かる。-方、図 2.2.2 の熱帯域に着目すると、本変更と同時に R が大きく減少し、1を下回るようになっている。この変 化は、予報モデルの更新・高解像度化による RMSE の 増大、SV 法の導入による FT=120 におけるスプレッ ドの減少のために生じたと考えられる。当時はモデル アンサンブル手法を導入していないため、スプレッド の大きさは初期摂動の振幅や SV 計算の評価時間内に おける摂動の時間発展に依存している。初期摂動の振 幅を大きくすれば FT=120 におけるスプレッドはある 程度大きくできたと考えられるが、当時は以下の理由 により、その設定以上に初期摂動の振幅を大きく出来 なかったと考えられる。第3.2節で示すように、熱帯 域の SV は対流モードを捉える目的で下層に比湿摂動 が求まりやすい設定となっている。当時の初期摂動の 設定でも、925 hPa 面に 10 g kg⁻¹ を越えるような大 きな比湿の初期摂動が加わっていた。このような大き な比湿の摂動は予報開始直後に積雲対流過程による非 常に大きな中層の加熱、上層の発散を引き起こし、と きには上層の風速に対して非常に大きな時間変化率が 求まりセミラグランジュ法における上流点探索が破綻 して、摂動ランの予測が異常終了することもあった¹⁰。 このようなことから、FT=120 でスプレッドを大きく するために初期摂動を大きく変更することは、計算安 定性確保の観点から難しかったと考えられる。

2010 年 11 月にはモデルアンサンブル手法として確 率的物理過程強制法 (SPPT: Stochastically Perturbed Physics Tendencies; Buizza et al. 1999) を導入した。 米原 (2010) に述べられているように、SPPT の導入に よって熱帯域のスプレッドの増加、アンサンブル平均 の RMSE の減少が確認されている。実際に、図 2.2.2 から 2010 年 11 月以降は熱帯の R が増大している。本 変更にはモデルの変更は伴わないため、R の増加はス プレッドの増大によるものであると言える。

ここまで示した週間 EPS の過去 10 年程度の検証結 果から、アンサンブル手法の改良によって更新前に想 定した効果が概ね得られていることが確認できた。

⁸ 本変更後、開発途上国における防災気象業務を改善するこ とを目的として WMO が推進する「荒天予報実証プロジェ クト (SWFDP)」に参画し、開発途上国の各気象機関を対象 として週間 EPS の予測結果の提供を開始した。

⁹ 前述の通り、コントロールランの RMSE の減少は GSM の RMSE の増大と傾向が異なっており、RMSE や *R* の変 化は想定していたものであるかは明確には分からない。

¹⁰ なお、山口 (2011)の初期摂動の振幅の調整以降は異常終 了は発生していない。



図 2.2.1 FT=120 におけるアンサンブル平均の対初期値検証の月平均 RMSE(破線)と前 12 か月移動平均 RMSE(実線)。 検証対象領域・要素は上から順に北半球(北緯 20 度~北緯 90 度)の 500 hPa 高度場(単位:m) 熱帯(北緯 20 度~南緯 20 度)の 850 hPa 気温(単位:K) 南半球(南緯 20 度~南緯 90 度)の 500 hPa 高度場(単位:m)。JMA (MEAN)は 週間 EPS のアンサンブル平均の RMSE, JMA (CTL) は週間 EPS のコントロールランの RMSE, JMA (GSM) は GSM の RMSE。ECMWF, NCEP, KMA は各センターのアンサンブル平均の RMSE を示す。

図 2.2.2 FT=120 における月平均 R(破線)と前 12 か月移動平均 R(実線)。Rの定義は (2.2.1) 式参照。検証対象領域・要素は図 2.2.1 と同様。

図 2.2.3 FT=120 の対初期値検証の前月平均 CRPS(破線)と前 12 か月移動平均 CRPS(実線)。検証対象領域・要素は図 2.2.1 と同様。

2.2.4 各センターの中期アンサンブル予報の予測精 度との比較

本項では、各センターと週間 EPS の予測精度の経年 変化に着目し、予測精度の改善傾向や共通の課題につ いて述べる。

図 2.2.1、図 2.2.3 の各数値予報センターの検証結果 を見ると、概ねどのセンターも RMSE, CRPS は年々 小さくなっており、予測精度が着々と改善しているこ とが分かる。その中でも、ECMWF がどの領域におい ても最も精度が良い。第2.1.3項でも述べられている ように、ECMWF はコントロールランに対する CRPS のスキルスコアも全予報時間を通じて JMA より大き く、予報モデル単体の予測精度によるものだけでなく、 初期摂動作成手法・モデルアンサンブルによる CRPS の減少幅も大きいと考えられる。近年では、特に2009 年~2010年にかけて北半球域や熱帯域におけるアンサ ンブル平均の RMSE や CRPS の減少幅が大きい。こ れには予報モデルの改良による効果だけでなく、同時 期に行った SPPT の改良や確率的運動エネルギー後方 散乱法の導入 (Palmer et al. 2009)、データ同化アン サンブルによって作成された摂動の導入 (Buizza et al. 2008) が関係していると考えられる。これらの改良の 結果、図 2.2.2 に示す ECMWF の熱帯域における R も 1に近づいている。ただし、2015年現在、どの数値予 報センターも FT=120 における熱帯域の R は1より 小さい。5日程度の予測において、すでに熱帯域のス プレッドがアンサンブル平均の RMSE に比べて小さい ことは、どのセンターにも共通した課題であることが 分かる。また、本節では示していないが、FT=120以 降ではどの領域においてもスプレッドはアンサンブル 平均の RMSE よりも小さくなる傾向がどのセンターに も共通して見られる。これは、モデルアンサンブル手 法などによる数値予報モデルの不確実性の表現が不十 分であることが原因として挙げられる。Tennant and Beare (2014) や第 1.3 節で述べられているように、海 面水温や陸面状態の不確実性の表現が不十分であるこ とも原因の1つとして考えられる。1週間以上の予報 時間におけるアンサンブル予報の精度向上のためには、 それらの不確実性の表現の導入・改善も重要であると 考えられる。

2.2.5 まとめ

本節では、週間 EPS の過去 10 年程度の変更内容、 予測精度の変遷を示し、週間 EPS の予測精度が年々向 上していること、週間 EPS の更新後の毎日の予測結果 に想定された通りの改良の効果が得られていることを 確認した。これらの精度の向上は、全球解析や予報モ デルの精度向上、初期摂動作成手法やモデルアンサン ブル手法の導入、メンバー数の増強など、様々な改良 を繰り返した結果得られたものである。今後も引き続 き、ばらつきの表現の改善・確率予測精度の向上を目指 して、週間 EPS の改善に向けて取り組んでいきたい。 なお、今後予定されている週間 EPS の変更内容につい ては第3章を参照していただきたい。

参考文献

- 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., M. Leutbecher, and L. Isaksen, 2008: Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 2051–2066.
- 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.
- 石橋俊之,2009:静止気象衛星晴天輝度温度の利用、及 び変分法バイアス補正の改良.平成21年度数値予報 研修テキスト,気象庁予報部,49-53.
- 門脇隆志,2005:全球4次元変分法.数値予報課報告・ 別冊第51号,気象庁予報部,100-105.
- 金浜貴史, 2013: 全球決定論予報の WMO 標準検証.数 値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 122-126.
- 川上正志,高山大,板橋耕一郎,上野幹雄,2007:週間天 気予報の信頼度情報の改善.平成19年度量的予報研 修テキスト,気象庁予報部,41-54.
- 経田正幸, 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.
- Miyoshi, T., S. Yamane, and T. Enomoto, 2007: The AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis: ALERA. *SOLA*, **3**, 45–48.
- 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.
- 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. *ECMWF Tech. Memo.*, **598**, 42 p.
- 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.
- Tennant, W. and S. Beare, 2014: New schemes to perturb sea-surface temperature and soil moisture content in MOGREPS. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140, 1150–1160.
- 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,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.

2.3 台風アンサンブル予報システム¹

2.3.1 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ことから、 タイムラインによる防災対応支援のために早い段階か ら台風の接近に関する情報提供が求められる。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、2009年4月にその期間を5日先まで延長 した(岸本 2009a)。

台風アンサンブル予報システム(以後、台風 EPS と 記述。EPS は Ensemble Prediction System の英略語) は 2008 年 2 月に運用を開始した数値予報システムで ある(小森・山口 2008; Yamaguchi et al. 2009)。その 目的は、台風予報業務、特に 4,5 日先の台風進路情報 の作業支援にあり(岸本 2009b)、その特長として台風 周辺の初期摂動を使って高頻度にアンサンブル予報を 生成する点が挙げられる。

現行のシステムの運用形態と仕様を表 2.3.1 に示す。 この仕様での運用は 2014 年 3 月 11 日から開始してお り、従前からの変更点は以下の 3 点である (経田・越智 2014)。

- メンバー数を 11 から 25 へと増強した。
- 台風進路のばらつきの大きさが過剰である状態を 改善するため、2日先のばらつきと誤差の大きさ が見合うよう初期摂動の振幅を調整した。
- 予報モデルの水平格子間隔を約 55 km から約 40 km へと高解像度化した。

ただし、初期摂動を構成する特異ベクトル (SV: Singular Vector)の誤差成長の評価領域(以後、SV 評価領 域と呼ぶ)をはじめとするアンサンブル手法や運用形 態は変えていない。

一方で、週間アンサンブル予報システム(以後、週 間 EPS と記述)については、2014年2月26日に、実 行頻度を1日2回に増やし、メンバー数を台風 EPS と ほぼ同数の27、予報モデルの水平格子間隔を台風 EPS と同じく約40 km に変更した(越智・経田 2014)。こ うした台風 EPS と週間 EPS 双方の直近のシステム更 新により、両 EPS の仕様で大きく異なる点は初期摂動 作成の設定のみとなった。そして、第3章にあるとお り、全球 EPS(中期予報から延長予報までを一体的に 支援する EPS)の運用を計画する中、台風 EPS と週間 EPS の比較検証がより容易になったことで、全球 EPS の仕様内容の検討も進めやすくなった。

本節では、初めに台風 EPS と週間 EPS の SV 評価 領域の違いを示した後、SV 評価領域の台風の進路予 測への影響を明らかにし、最後にまとめと共に現在の 取り組みを述べる。なお、ここでの影響評価は、2014 年3月からの現行システムの成績に基づいた両 EPS の 比較とした。2014年3月に行った台風 EPS の変更の 内容やそれによる特性の変化は経田・越智 (2014) に、 現行の台風 EPS の詳細な仕様を含めた報告は Kyouda and Higaki (2015) にあるので、それらを参考にしてい ただきたい。

2.3.2 特異ベクトルの誤差成長の評価領域とその 影響

表 2.3.2 に台風及び週間 EPS の初期摂動作成部分の 設定内容を示す。ここでは、SV 評価領域の設定の違い に注目する。台風 EPS は、熱帯擾乱周辺域と北西太平 洋領域を対象領域とする SV を用い、これら以外の領 域のばらつきは不十分になる点を受容したものといえ る。他方、週間 EPS は、全球域を対象領域とする SV を使う一方で、台風周辺の SV を優先的に求める設定 とはなっていない。

現行の台風 EPS は、その SV 評価領域によって週間 EPS (当時のメンバー数は 51)が表せなかった台風進 路予測の不確実性を表現出来るという利点がある(経 田ほか 2013)。一方、経田ほか(2013)は、SV 評価領 域を限る台風 EPS には予報期間の終わりのばらつきが 過小になる問題があることを指摘したが、台風の進路 予測への影響は示されていない。

本項では、最初に現行の台風 EPS と週間 EPS の台 風進路予測の成績を比べ、それと SV 評価領域との関 係を明らかにする。検証期間は 2014 年 4 月 ~ 2015 年 9 月とし、予報初期時刻は両 EPS で共通の 00, 12UTC (台風 EPS の実行数²は 483 回で、検証対象の台風は 2014 年の台風第 4~23 号と 2015 年の台風第 1~21 号) とした。ここで、コントロールランとアンサンブル平 均の誤差の大きさを示すが、両 EPS のコントロールラ ンは共通であり、誤差の大きさも等しい。また、アンサ ンブル予報のばらつきを表す量としては、各摂動ラン と共通であるコントロールランとの差を用いた。なお、 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)である。

(1) 台風進路予測の成績

台風進路予測の成績として、まずアンサンブル平均 の誤差の大きさとコントロールランの誤差の大きさの 関係³を確認する。図 2.3.1 は、初期時刻から 132 時 間先までの6時間毎の、台風 EPS に基づくコントロー ルランとアンサンブル平均、週間 EPS に基づくアンサ ンブル平均の誤差の大きさを示す。予報期間を通して、 台風及び週間 EPS のアンサンブル平均がコントロール ランに対して優位性がないという問題点が見られる。

² 週間 EPS の実行頻度は毎日 2回(初期時刻は 00, 12UTC) であるが、台風 EPS は熱帯低気圧の解析や予報に従って変 わる。実行条件は表 2.3.1 を参照。

³ アンサンブル平均は予測にある不確実性の大き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)。

¹ 経田 正幸

実行頻度 (初期時刻)		1 日最大 4 回 [#] (00, 06, 12, 18UTC)				
予報期間		132 時間				
メンバー数		25				
予報モデ	バージョン	GSM1304(表記法は巻末付録B参照)				
ル	水平分解能・鉛直層数 TL479L60 (最上層 0.1 hPa)					
	大気	全球速報解析値				
初期値	陸面	積雪深・土壌温度は全球解析に基づく値、土壌水分は気候値				
	海面水温・海氷	MGDSST と海氷データセットの解析値(いずれも前日分)				
	海面水温	初期の平年偏差を、予報時間により季節変動する気候値に加えた値				
境界値	海氷	初期の海氷分布の平年偏差を、予報時間により季節変動する気候値に				
		加えた値				
アンサン	大気初期摂動	特異ベクトル法				
	モデル摂動	確率的物理過程強制法				
ノルナム	境界摂動	なし				

表 2.3.1 台風アンサンブル予報システムの仕様と運用形態(2015年9月現在)

台風アンサンブル予報システムは、1日4回を最大として、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(赤道~北緯 60 度、東経 100~180 度の領域)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

表 2.3.2 台風アンサンブル予報システムと週間アンサンブル予報システムの特異ベクトル (SV) 法の設定の比較 (2015 年 9 月 _____現在)

		台風アンサン	ブル予報システム	週間アンサンブル予報システム				
SV の評価領域		北西太平洋領域	熱帯擾乱周辺域	中高緯度帯	低緯度帯			
		北緯 20~60 度、	初期時刻から 24 時	北緯 30 度以北と	南緯 30 度 ~ 北緯 30			
		東経 100~180 度	間後の熱帯擾乱の推	南緯 30 度以南の	度			
			定位置を中心とする	2 領域				
			半径 750 km の等距					
			離領域(最大3領域)					
接線形・	水平分解能・	T63L40(最上層 0.4 hPa)						
随伴モデ	鉛直層数							
ル	物理過程 #	初期値化、水平拡	(左に加えて)積雲	初期値化、水平拡	(左に加えて)積雲			
		散、鉛直拡散、地	対流過程、重力波抵	散、鉛直拡散、地	対流過程、重力波抵			
		表面フラックス	抗、長波放射、雲水	表面フラックス	抗、長波放射、雲水			
			過程		過程			
SV 計算の	D評価時間	24 時間		48 時間	24 時間			
SV の大き	きさの評価	湿潤トータルエネルギー						
SV から	初期摂動を	バリアンスミニマム法						
合成する	手法							
合成に利用する SV		10 個の初期時刻時	持点での SV (initial	25 個の初期時刻時点及び評価時間後				
		SVs)		\mathcal{O} SV (initial and evolved SVs)				
初期摂動の振幅		湿潤トータルエネルギーを用いて決定		モデル第 15 層	モデル第 6 層(約			
				(約500 hPa)の	850 hPa)の気温の			
				気温の二乗平均	二乗平均平方根が			
				平方根が 0.3 K	0.3 K			

2011 年 10 月まで全球解析に用いられていたものと同じ。

図 2.3.1 2014 年 4 月から 2015 年 9 月までの 00, 12UTC を初期時刻とする台風 EPS と週間 EPS 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。赤色 はコントロールラン(両システム で共通) 橙色 は台風 EPS に基づくアンサンブル平均の 誤差、紫色 は週間 EPS に基づくアンサンブル平均の誤 差(いずれも左縦軸参照)を表す。黒色×は 事例数(右縦軸参照)を表す。

こうした問題は予測のばらつきが適切でないために起 こることが多い。この点を本項(2)にて SV 評価領域 の違いに注目して検証する。

次に、確率的な台風進路予測の成績として、台風接 近確率の検証結果を確認する。ここでは、ある地点に おける台風接近を「初期時刻から5日先までの間に、 半径 120 km の円内に台風中心が入る現象」と定義し、 その確率をアンサンブル予報の追跡結果における出現 率としている。図 2.3.2 は台風 EPS と週間 EPS によ る台風接近確率の検証図4である。本検証の対象領域 は北太平洋西部 (赤道~北緯 60 度、東経 100~180 度 の範囲)であり、本検証での台風接近の気候学的出現 率 P_c は約 1%である。予測頻度(赤線と緑線)には、 接近なし(確率0%)が大半を占め、高い接近確率は 少ない、という共通の特徴がある。確率と Pc 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 価できるので、Pcよりも十分高い確率に注目すると、 台風 EPS は 100%を除き 60%以上の高確率の頻度が週 間 EPS より多い点が優れている。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。信 頼度曲線(橙色と紫色の曲線)を見ると、両者ともに no-skill line より傾きは十分大きく、また確率と実際の 出現率との間に概ね正比例の関係があるが、20%以下 の低確率では実際の出現率よりやや過小、30%以上で は実際の出現率より過大、という共通の特徴がある。

図 2.3.2 2014 年 4 月から 2015 年 9 月までの台風 EPS と週間 EPS による台風接近確率の確率値別出現率図。台風接近の定義と確率の求め方は本文を参照。横軸は確率 P_{fcst} 、左縦軸は実際の出現頻度 P_{obs} を示し、橙色・紫色の曲線がそれぞれ台風・週間 EPS の信頼度曲線である。赤色線・緑色線はそれぞれ台風・週間 EPS の予測度数(右縦軸参照。対数目盛であることに注意)であり、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%における両者の予測度数はほぼ同数のため、確率 0%における両者の予測度数はほぼ同数のため、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 切片約 0.5%の一点鎖線である。

また、60%前後で台風 EPS の信頼度は週間 EPS に比 べて低いのが目立つが、分離度と信頼度からなるブラ イアスキルスコアの大きさを求めると、台風 EPS の値 0.385 は週間 EPS の値と同じで、予報期間を通した確 率的な情報の成績は同等であるといえる。

(2) 北緯 20 度以南における成績

本項(1)では、現行の台風及び週間 EPS に基づく台 風進路予測全般の評価を示した。そこでは、アンサン ブル平均はコントロールランに対して優位性が見られ ず、また確率的な台風進路予測においては20%以下の 低確率で実際の出現率より過小、30%以上で実際の出 現率より過大、という共通の問題があることを述べた。

一方、本項の最初で述べたとおり、台風 EPS の SV 評価領域は熱帯擾乱周辺域と北西太平洋領域以外の領 域の大気のばらつきは不十分になる設定である。そし て、台風周辺を除いて大気のばらつきの大きさに大き な違いが生じている北太平洋西部での北緯20度以南 (以後、単に北緯20度以南と呼ぶ)に注目すると、台 風 EPS 固有の問題が存在することがわかった。このこ とを、アンサンブル平均の台風進路予測誤差とコント

図 2.3.3 2014 年 4 月から 2015 年 9 月までの 00, 12UTC を 初期時刻とする台風 EPS 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。 印はコントロールラン、 印はアンサンブル平均の 誤差(左縦軸参照。単位は km)を表す。色の違いは実況 の位置の違いを表し、紫色と赤色は「初期時刻で北緯 20 度以南」の場合、緑色と橙色は「各予報時間で北緯 20 度 以南」の場合を示す。×印は事例数(右縦軸参照)を表し、 赤色×が「初期時刻で北緯 20 度以南」の場合、橙色×が 「各予報時間で北緯 20 度以南」の場合を示す。

ロールランの誤差との関係から確かめる。

図 2.3.3 は、実況における台風中心位置が初期時刻 で、または初期時刻を含む各予報時間で北緯20度以 南である事例で抽出した、初期時刻から132時間先ま での6時間毎の台風 EPS に基づくコントロールラン とアンサンブル平均の誤差の大きさ、及び事例数を示 す。事例数は台風の寿命に合わせて予報時間と共に減 るが、条件「各予報時間で北緯20度以南」の事例数は 条件「初期時刻で北緯20度以南」の事例数と比べて台 風が北緯20度を越えた分少ない。また、誤差の大きさ としては、予報期間中盤で条件「各予報時間で北緯20 度以南」の方が大きく、終盤は条件「初期時刻で北緯 20 度以南」の方が大きくなる、という条件による差が 見られる。今回の条件による差の要因には、予報モデ ル GSM の台風進路予測の系統的な誤差⁵の大きさの 違いがあると考えられる。アンサンブル平均とコント ロールランとの関係に注目すると、条件「予報初期の み北緯20度以南」の予報期間終盤にてアンサンブル 平均の誤差がコントロールランよりも大きいが、条件 「各予報時間で北緯20度以南」でのアンサンブル平均 の誤差はコントロールランと同等といえる。

図 2.3.4 図 2.3.3 と同じ。ただし、週間 EPS による台風進 路予測の誤差の時間発展。

次に、図 2.3.3 の台風 EPS の検証結果と、図 2.3.4 に示す SV 評価領域が限なく全球域を覆う週間 EPS の 検証結果とを比較する(両 EPS のコントロールランは 共通)。週間 EPS の結果からは、条件「初期時刻で北 緯 20 度以南」では予報期間終盤にてアンサンブル平 均の誤差はコントロールランよりも大きく、先の台風 EPS の結果と同じ傾向の成績となっている。一方、条 件「各予報時間で北緯 20 度以南」では、FT=72 以降 アンサンブル平均の誤差はコントロールランの誤差よ りも小さいことがわかる。

台風 EPS と週間 EPS の検証結果の比較から、台風 EPS に基づく北緯 20 度以南でのアンサンブル平均は、 コントロールランに対してだけでなく週間 EPS のアン サンブル平均に対しても優位性がないことがわかる。 このことは北緯 20 度以南において熱帯擾乱周辺域以外 の大気のばらつきが不十分という台風 EPS 特有の問題 が影響していることを示唆している。

(3) ばらつきへの影響

本項(2)のとおり、各予報時間で北緯20度以南という台風進路予測に関して、台風EPSに基づくアンサン ブル平均とコントロールランの誤差の大きさに差はほ とんどなかった。こうした成績を示す典型とは、アン サンブル平均を構成する摂動ランとコントロールラン に差(ばらつき)がほとんどないアンサンブル予報で ある。台風EPSに基づく台風進路予測のばらつき具合 を、各摂動ランとコントロールランとの台風中心位置 の差で検証する。

まず、ばらつきの大きさの程度を知るため、ばらつ きを誤差の大きさと比べる。誤差の平均値(図 2.3.1) は台風中心位置の条件等で異なるものの、予報期間の 序盤・中盤・終盤を代表する FT=24,66,108 の値はそ

⁵ GSM の台風進路予測には、転向後の予測が進行方向に対して遅い傾向(スローバイアス)や転向前の予測が実況より も北寄りになる傾向(北上バイアス)といった系統的な誤差 がある(檜垣 2013; Kyouda and Higaki 2015)。

Position distance between control and perturbed run [km]

Position distance between control and perturbed run [km]

図 2.3.5 2014 年 4 月から 2015 年 9 月までの 00, 12UTC を初期時刻とする台風 EPS(左図)と週間 EPS(右図)による、 FT=24, 66, 108 での摂動ランとコントロールランとの台風進路予測位置の差の累積相対度数分布図。横軸は差の大きさ(範 囲は 0~800 km)を示す。色の違いは予報時間の違いを表し、紫・橙・赤色がそれぞれ FT=24, 66, 108 を示す。線種は実況 の位置の違いを表し、実線が初期時刻で北緯 20 度以南、点線が各予報時間で北緯 20 度以南を示す。線上の と添え数字は 各分布の平均値(単位は km)を示す。事例数は凡例の括弧内の数字で示す。

図 2.3.6 2014 年 4 月から 2015 年 9 月までの 00, 12UTC を 初期時刻とする台風 EPS(緑色)と週間 EPS(赤色)によ る、実況の位置が各予報時間で北緯 20 度以南の時の実況 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。左縦軸が予報時間ごとに全事例平均した台風進 路予測誤差の大きさ、右縦軸が事例数を示し、 および がメンバー中の最小誤差の平均値、 および がメンバー 中の最大誤差の平均値、×が事例数を表す。

れぞれ 100, 200, 400 km を超える。実況における台風 中心位置の条件(予報初期のみ北緯 20 度以南と各予報 時間で北緯 20 度以南)で分けた、FT=24, 66, 108 で の摂動ランとコントロールランとの台風中心位置の差 の累積相対度数⁶分布を図 2.3.5 に示す。ばらつきの平 均値(図 2.3.5 の各分布曲線上の点)を先に示した誤 差の平均値と比べるといずれの FT でも小さいことが わかる。

次に、台風 EPS (図 2.3.5 左) と週間 EPS (同図右) のばらつきの平均値の違いに注目する。予報期間序盤 といえる FT=24 での大きさはほぼ一致しているが、予 報期間中盤以降の台風 EPS のばらつきは週間 EPS に 比べても小さい。特に条件「各予報時間で北緯 20 度 以南」の場合(点線)に着目すると、台風 EPS の値 が FT=24, 66, 108 でそれぞれ 67, 139, 185 km であ るのに対し、週間 EPS の値が同じくそれぞれ 74, 168, 253 km と予報期間中盤から終盤までのばらつきの増分 は倍近くとなっており、こうした条件下での台風 EPS のばらつき具合は週間 EPS と比べてかなり小さいこと がわかる。

台風 EPS と週間 EPS のばらつきの違いを、実況捕 捉の度合を指標に評価してみる。図 2.3.6 は、実況の位 置が「各予報時間で北緯 20 度以南」の場合における、 台風・週間 EPS それぞれでメンバー中の台風進路予測 誤差の最小値と最大値を予報時間ごとに全事例平均し た値を示す。予報期間前半の FT=66 までは、台風 EPS の最小誤差平均値は小さいか同程度で台風 EPS の最大 誤差平均値は小さく、台風 EPS の成績は週間 EPS を 上回っており、台風 EPS のばらつきは週間 EPS より 適切であるといえる。一方、予報期間後半では、台風 EPS の最小誤差平均値は同程度か大きく台風 EPS の

⁶ 累積相対度数は、台風中心位置の差が図の横軸で示す距離 までに含まれる割合を示す。

(a) 台風 EPS

(b) 週間 EPS

図 2.3.7 台風 EPS(左)と週間 EPS(右)による 132 時間先までの台風進路予測の比較。対象の台風は 2015 年台風第4号、 初期時刻は 2015 年3月28日 12UTC である。初期時刻における台風の中心気圧は 985 hPa で、その後西北西進しながら 発達し、31日 06UTC に 910 hPa に達した。赤・橙・黄・黄緑・緑・深緑色と着色の変わる線は各メンバーの中心追跡結果 (色の変化は 24 時間毎)、黒線はベストトラックによる中心位置を示す(が 00UTC、 が 12UTC、×が 06UTC または 18UTC の位置)。

最大誤差平均値は小さい。また、同期間の週間 EPS の アンサンブル平均の誤差は台風 EPS よりも小さい(本 項(2))ことから、台風 EPS のばらつきは過小でその 状態は予報時間と共に悪化しているといえる。

(4) 北緯 20 度以南を進む台風の進路予測と指向流

台風は、主に台風周辺の大規模な大気の流れ(指向 流)によって移動していると考えられる(上野 2000)。 本項(2),(3)で注目した北緯20度以南を進む台風の検 証とは、貿易風により西向きに進んで転向しない台風 予測事例を主に対象にしているといえる。ここでは、 その具体例を取り上げて、指向流のばらつきとの関係 からSV評価領域の妥当性を確認する。

本検証期間内での北緯 20 度以南を西向きに進む台風 の典型例として 2015 年台風第4号がある。2015 年台 風第4号の全進路予測事例に限って両 EPS のアンサン ブル平均の予測誤差を比べても、台風 EPS の方が大き かった(図略)。ここでは、例として初期時刻 2015 年 3月28日12UTC の台風進路予測の結果を示す。台風 EPS の結果(図 2.3.7 左)をみると、3日先程度から ばらつきの大きさの変化は小さく、予報対象時刻1日 00UTC (FT=84)以降、その予測範囲外に実況が位置 していた。一方、週間 EPS の結果(図 2.3.7 右)では、 予報時間と共にばらつきは大きくなり、132 時間先ま でのばらつきの範囲内に実況は位置していた。

各メンバーの指向流を、大気の流れに対して緯度・経 度 20 度をカットオフ周期(カットオフ周波数は 0.05 = 1/20)とするランチョスフィルタ (Duchon 1979)を施し て台風自体の風成分を除いた後、台風中心半径 300 km 円内の領域平均して求めた。図 2.3.8 は台風 EPS 及び 週間 EPS の初期時刻 2015 年 3 月 28 日 12UTC の予測 結果に基づく台風の指向流である。予測は予報期間前 半・後半の代表として FT=48,96 の値、実況は各予測 対象時刻を初期時刻とするコントロールランの FT=0 から求めた値である。700 hPa 面の指向流のばらつき は両者ともに予報時間による違いは小さい。指向流の 比較で目立つ大きな違いは、台風 EPS では週間 EPS に比べて、300 hPa 面の指向流のばらつきが小さく、ば らつきの予報時間による違いがとても小さい点である。

どの高度の指向流が実際の台風の移動とよく一致す るかは台風の構造によって異なり、毎回、そして予報 時間毎に特定することは困難であるが、これまでの 研究(例えば、Dong and Neumann 1986 や Velden and Leslie 1991)から 1000~100 hPa 面の深層平均値 (DLM: deep-layer mean)が選択として最適であるこ とが示されている。強度との関係として、Velden and Leslie (1991)はハリケーン(最大風速が 64 ノット以 上)にとっての最適な高さはその他の熱帯低気圧より 高いとしている。今回はこうした層厚の上・下層の代 表として 300,700 hPa 面を取り上げた。実況は必ずし も両 EPS のばらつきの範囲に入っているわけではない が、台風が予報期間を通して西進する中で予報時間と 共にばらつきが大きくなっているのは週間 EPS による 300 hPa 面の指向流であり、台風 EPS にはこうした上

(d) 週間 EPS 700 hPa 面指向流

図 2.3.8 台風 EPS(左列)と週間 EPS(右列)での 48,96 時間先の指向流の比較。予測事例は図 2.3.7 と同じで、対象の 台風は 2015 年台風第4号、初期時刻は 2015 年3月28日 12UTC である。各図の横軸は東西風速(東向きが正。範囲は -12~2 m/s) 縦軸は南北風速(北向きが正。範囲は -6~8 m/s)である。上段は 300 hPa 面、下段は 700 hPa 面での値。 緑・紫色はそれぞれ48,96 時間の予測値を示し、 がコントロールラン、 が摂動ランを示す。また、赤・橙色 はそれぞ れ48,96 時間先の実況値(コントロールランの FT=0 から求めた値)を示す。

層の大気の流れのばらつきを生じさせる初期摂動がな かったために、3日先程度からの台風進路予測のばら つきの変化も小さくなったと考えられる。一方、週間 EPS のこうした上層の大気の流れのばらつきは主に熱 帯 SV によってもたらされたと考えられる(第3.2節 を参照)。

2.3.3 おわりに

台風 EPS と週間 EPS の SV 評価領域の設定は異なっている。前者は熱帯擾乱周辺域と北西太平洋領域であり、北緯20度以南では台風周辺のみとなる設定である。一方、後者は全球を覆っているものの台風周辺の 摂動を優先的には求めない。

本節では、現行の台風 EPS と週間 EPS に基づく台 風進路予測の精度比較により、両者の共通の特徴と共 に、成績の違いには SV 評価領域の設定が大きく影響 していることを示した。実況の台風の中心位置が北緯 20 度以南にある場合という条件下での台風 EPS の優 劣と初期摂動の効果は以下のとおりである。

- 予報期間前半では、台風 EPS は高い精度の台風進 路予測を得ており、台風周辺の摂動を優先的には 求めない設定の週間 EPS に対して優位である。
- 予報期間後半では、台風 EPS の上層の指向流のば
 らつきは過小であり、また台風 EPS の成績は週間
 EPS に対して劣っている。

これらから台風 EPS による台風周辺の初期摂動の影響は予報期間前半までといえ、4,5日先の台風進路予 測の更なる精度向上を図るためには、台風 EPS に関し て週間 EPS と同様に北緯20度以南の大気のばらつき を考慮するという SV 評価領域の設定見直しが効果的 といえる。この課題への取り組みの一つとして、SV 評 価領域を3種類(週間 EPS の設定にある中高緯度帯と 低緯度帯に台風 EPS にある熱帯擾乱周辺域を加える) とする EPS を試験的に構築するなど、予測実験にてそ の効果の確認を始めている。こうした予備実験での成 果を全球 EPS(第3章)の仕様に反映して台風進路予 測の精度向上を図る予定である。

一方、予報期間内に転向などで実況の台風の中心位 置が北緯20度を越える事例においては、現行の台風 EPSや週間EPSの結果に基づくアンサンブル平均は コントロールランに対して優位性がみられないという 共通の問題がわかった。現在取り組んでいる全球EPS に向けた開発においても同様の検証を進める必要があ り、またこの問題の解決についても、指向流になる偏 西風や太平洋高気圧の西端を周る縁辺流の予測のばら つき、予報モデルの系統誤差であるスローバイアスを 検証することで、初期摂動もしくは予報モデルの課題 を見つける作業が有効であろう。しかし、今回の検証 期間でも多くの事例数は得られておらず、検証期間を 延ばすといった検証の充実が必要である。また、台風 の移動をよく説明できる指向流の高度は台風毎に異な るため、最新の台風の調査研究成果や評価を取り入れ た課題設定が重要になる。引き続き台風の移動メカニ ズムとその不確実性の最新の知見を取り入れながら問 題の解決を図っていく予定である。

参考文献

- Dong, K. and C. J. Neumann, 1986: The relationship between tropical cyclone motion and environmental geostrophic flows. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 115–122.
- Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. J. Appl. Meteor., 18, 1016–1022.
- 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.
- 岸本賢司, 2009a: 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.
- 岸本賢司, 2009b: 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.
- 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.
- Kyouda, M. and M. Higaki, 2015: Upgrade of JMA's Typhoon ensemble prediction system. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, 17, 13 p.
- 経田正幸, 越智健太, 2014: 台風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, 62-71.
- 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.
- 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.
- 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.
- 上野充,2000:数値モデルによる台風予報.気象研究 ノート,197,131-286.
- Velden, C. S. and L. M. Leslie, 1991: The basic relationship between tropical cyclone intensity and the depth of the environmental steering layer in the Australian region. *Wea. Forecasting*, 6, 244–253.
- Yamaguchi, M., M. Sakai, M. Kyoda, T. Komori, and T. Kadowaki, 2009: Typhoon ensemble prediction system developed at the Japan Meteorological Agency. Mon. Wea. Rev., 137, 2592–2604.

2.4 低気圧予測の精度¹

中期予報を対象としたアンサンブル予報システム (EPS: Ensemble Prediction System) の果たすべき役 割の一つとして、社会的影響の大きい顕著現象発生の 可能性を十分なリードタイムを持って予測することが 挙げられる。例えば THORPEX (観測システム研究・ 予測可能性実験)では、EPS などを用いて社会的に影 響の大きな気象現象の2週先までの予測可能性の研究 が行われた。また、第3.1節で述べるように、気象庁で は短期から1か月予報までを支援する全球 EPS の構築 を計画している。全球 EPS においても、2週間先まで を予測対象期間とした顕著現象発生の可能性に関して 予測資料を提供することが期待されており、その予測 精度を把握することは重要である。さらに、特定の現 象の予測に着目した評価・検証を行うことで、従来の 検証指標では知ることができないモデルやアンサンブ ル手法の特性を明らかにすることができると考えられ る。モデルの予測特性の把握は予報作業における数値 予報資料の解釈にとって不可欠であるとともに、数値 予報システムの開発にとっても重要である。本節では こうした現象の検出や検証の一例として対流圏下層の 低気圧の進路予測や平均個数などに着目し、週間 EPS における予測精度について紹介する。なお、台風の活 動予測とその精度については次節で述べる。

2.4.1 低気圧検出手法

低気圧の予測精度を調べるにあたって、まずどのよ うな基準で低気圧を検出するかを決める必要がある。 数値予報結果から低気圧を自動的に検出・追跡する方 法についてはこれまでにも様々な手法が提案されてい るが、その多くが海面更正気圧や対流圏下層の相対渦 度を基準にして低気圧の中心を検出している²。本調 査を行うにあたっては、1) 過去長期間に渡って保存さ れている限られた要素から追跡を行うこと、2)陸上で 海面更正気圧にのみ現れる見かけ上の低気圧の検出を できるだけ抑えるため、下層の低気圧性循環を基準に 用いること、3) 低気圧検出に用いる格子点値の解像度 にできるだけ依存しないこと、の3つの条件を考慮し た。また、簡便のため低気圧の種類(温帯低気圧や熱 帯低気圧)は区別せず、対流圏下層の低気圧性循環を 対象とした。本調査では既存の低気圧検出手法の要点 を抑えつつ、これらの条件を満たすべく、以下のアル ゴリズムにより低気圧を検出・追跡することとした。

- 1. 海面更正気圧において、半径 500 km 内で最小の 値をとる格子点を検出する。
- 2.1 で選ばれた格子点のうち、以下の2つの条件を

満たす場合を低気圧とする。

- (a) 当該格子点から 300 km 以内の 850 hPa 相対 渦度の平均が 30×10⁻⁶ s⁻¹ 以上(南半球の 場合、-30×10⁻⁶ s⁻¹ 以下)
- (b) 海面更正気圧の格子点最小値が半径 300 km
 以内の平均海面更正気圧より 0.5 hPa 以上
 低い
- 当該格子点の近傍4点の海面更正気圧の値を用いて、下に凸な回転放物面でフィッティングを行い、中心位置の微調整を行う。
- 4. 検出した低気圧の中心位置をもとに、前後の予報時間にある低気圧のうち、中心位置が850 hPaと250 hPaの水平風の平均の0.7倍で移動したと仮定した点から(80×追跡時間間隔)kmの範囲内で最も近い低気圧を同一とみなし、追跡する。

1 と 2b の条件は、十分な水平スケールと深さをもった 低気圧を検出するための基準で、2a はこれに加えて対 流圏下層に低気圧性循環が存在することを条件として 課している。2 で基準を最大値・最小値でなく領域平 均値としたのは、低気圧検出に用いる格子点データの 解像度による依存性を軽減するためである。3 は使用 する格子点データの解像度が粗い場合に対応するため の措置である。4 は低気圧が対流圏内の平均的な風速 に流されると仮定して設けた条件で、その基準値は日 本付近の典型的な温帯低気圧や熱帯低気圧で追跡の失 敗が少なくなるように調整した。

本手法を JRA-55 再解析データ (Kobavashi et al. 2015) の 1.25 度格子の解析値に対して適用した場合の 低気圧の平均個数を図 2.4.1 に示す。期間は 2001~2014 年の12,1,2月(北半球冬期)と6,7,8月(北半球夏) 期)で、値は各点の半径 200 km 以内に、各解析時刻 において存在した低気圧中心の平均個数(単位:×0.01 個)である。北半球では日本の東海上からアリューシャ ン列島にかけてと米国東海岸からアイスランド沖にか けてのストームトラックに対応する低気圧が多く検出 されており、特に冬期に顕著である。北極海でも低気 圧の検出数が比較的多く、特に夏期に検出の割合が多 い。冬期は地中海でも低気圧が多く検出されているが、 夏期はその数が大幅に減っている。南半球では南極大 陸周辺の海上で低気圧が多く検出されている。北半球 ほど顕著ではないものの、南半球の冬期にはオースト ラリア大陸の東や南米ウルグアイ南東沖にストームト ラックに対応すると思われるピークが見られる。これ らの特徴は Blackmon et al. (1977) や Nakamura and Shimpo (2004) などのストームトラックの解析と整合 しており、Neu et al. (2013) などの低気圧追跡手法の 比較研究で見られる特徴ともおおよそ合致している。 熱帯では熱帯低気圧の発生域に対応するピークが見ら れるとともに、夏季アジアモンスーンによるモンスー ントラフに伴うと考えられるピークがベンガル湾など に見られる。本手法は大まかに実際の低気圧存在の多

¹ 太田 洋一郎

² 例えば、Neu et al. (2013) はこれまで提案されている様々 な低気圧検出手法についてレビューし、検出結果の相互比較 を行っている。

図 2.4.1 JRA-55 再解析データの 1.25 度格子の解析値で検 出された低気圧の平均個数。各点の半径 200 km 以内に存 在した低気圧中心の平均個数(単位:×0.01 個)を示す。 期間は 2001~2014 年で上段が北半球冬期(12,1,2 月)、 下段が北半球夏期(6,7,8 月)。

表 2.4.1 4	表 2.4.1 検証期間における週間 EPS に関わる土な変更					
年/月	変更内容					
	高解像度決定論予報の高解像度化					
	$(TL319L40 \rightarrow TL959L60)$					
2007/11	週間 EPS の高解像度化					
2007/11	$(TL159L40 \rightarrow TL319L60)$					
	初期摂動作成手法の更新					
	(BGM 法 $ ightarrow \operatorname{SV}$ 法)					
2008/08	高解像度決定論予報へ適合ガウス格子導入					
2009/03	週間 EPS へ適合ガウス格子導入					
2010/12	確率的物理過程強制法導入					
2011/03	南半球摂動導入、初期摂動振幅調整					
	週間 EPS の高解像度化					
2014/02	$(\mathrm{TL}319\mathrm{L}60{\rightarrow}\mathrm{TL}479\mathrm{L}60)$					
2014/02	1日1回51メンバーから					
	1日2回27メンバーに高頻度化					
2014/03	高解像度決定論予報の100層化					

寡を捉えていると言える。一方で、気候学的に知られ ている低気圧の多発域とは異なるピーク(アンデス山 脈の東など)も散見される。海面更正気圧と850 hPa の相対渦度のみから低気圧を検出していることから、 特に標高の高い領域や急峻な地形がある領域では、海 面更正気圧計算の際に用いる地上気温の変動が海面更 正気圧の差となって現れやすく、こうした見かけ上の

図 2.4.2 週間 EPS の低気圧追跡位置の JRA-55 の低気圧中 心位置に対する平均位置誤差 (km)。上から北半球域、熱 帯域、南半球域の前 12 か月平均の結果を示す。濃色実線 はアンサンブル平均、淡色実線はコントロールラン、点線 はスプレッドを示す。紫、青、緑、黄、赤、黒線がそれぞ れ FT=0, 24, 48, 72, 96, 120 を示す。横軸のラベルの位 置は各年の1月に当たる。図中の赤、青、緑の縦線はそれ ぞれ 2007 年 11 月、2010 年 12 月、2011 年 3 月の変更時 期に対応 (本文および表 2.4.1 参照)。

偽の低気圧を検出することがある。

2.4.2 週間アンサンブル予報の低気圧検証

前項の低気圧追跡手法を週間 EPS の各メンバーに適 用し、低気圧の予測精度を評価した。期間は 2006 年 3 月から 2015 年 8 月を対象とし、以下特に断りがない 限り前 12 か月平均の検証結果を示す。検証領域は北半 球域(20°N 以北)、熱帯域(緯度 20°以下)、南半球 域(20°S 以南)とした。低気圧の追跡には 1.25 度の等 緯度経度格子の予報値を使用した。検証期間中の週間 EPS に関わる主な変更点は表 2.4.1 の通りである。

図 2.4.2 に低気圧追跡位置の JRA-55 の低気圧中心位

図 2.4.3 北半球域における週間 EPS の低気圧中心の接近確率のブライアスキルスコア (BSS)。JRA-55 で検出された低気圧 を真として検証。細線は各月のスコア、太線は前 12 か月平均を示す。左上からそれぞれ積算時間前 0, 24, 72, 120 時間の結 果。横軸のラベルの位置は各年の1月に当たる。

置に対する平均位置誤差の変化を示す。ここでは、初 期時刻において週間 EPS と JRA-55 の低気圧中心位置 が 200 km 以内にある場合を同一の低気圧と見なして 予測における中心位置誤差を計算した。2007 年 11 月 (図2.4.2の赤縦線)に大きな誤差の減少が見られ、高 解像度決定論予報の更新および週間 EPS の予報モデル の高解像度化による改善が大きいことが示唆される。 また、同時に初期摂動作成手法が BGM 法から SV 法 に更新されたことに伴って、初期時刻における低気圧 の中心位置のばらつきが大幅に小さくなっていること がわかる。北半球域では2011年ごろにも大きな改善が 見られ、これは確率的物理過程強制法の導入(図2.4.2 の青縦線、米原 2010) や初期摂動振幅調整(図 2.4.2 の緑縦線、山口 2011) などの改良によるものと思われ る。特に、FT=48~72 ではスプレッドがアンサンブル 平均の誤差を上回って予測初期の低気圧の予測に関す るばらつきが大きすぎる傾向が見られていたが、この タイミングで解消している。これは冬期を中心に初期 摂動の振幅を小さくしたためと考えられる。南半球域 では2011年3月の南半球中・高緯度をターゲットとし た初期摂動の導入(図2.4.2の緑縦線)によって低気圧 中心位置のスプレッドが大幅に大きくなっており、特 に FT=72 以降でアンサンブル平均の位置誤差がコン トロールランの位置誤差より小さくなった。熱帯域で は、特に FT=72 以降でアンサンブル平均の中心位置 誤差に対してスプレッドが過小となる傾向が期間を通

して見られる。

図 2.4.3 に北半球域において半径 200 km 以内に低気 圧中心が存在する場合を「現象あり」とする接近確率 のブライアスキルスコア (BSS) を示す。積算時間を対 象予報時間から前0,24,72,120時間として接近確率を 算出した。この際、FT=0より前に積算時間が及ぶ場 合は接近確率の計算に含めていない(このため、例えば FT=24 についての積算時間前 24, 72, 120 時間の BSS は同一)。接近確率の気候値は JRA-55 の 1981~2010 年の同月日における低気圧検出位置より算出した。中 心位置誤差ほど明瞭ではないが、接近確率についても 徐々に精度が向上している。北半球域では冬季が夏季 と比べて BSS の大きい傾向があり、冬季の低気圧の方 が予測の精度が高いことがわかる。単一の予報時間(積 算時間前0時間)における接近確率のスキルは予報時 間とともに急速に低下し、5日予報以降では気候値に対 するスキルはほぼなくなる。積算時間を増やすとより リードタイムの長い予測でもスキルを維持することが でき、積算時間を前120時間とすると9日予報程度ま でスキルが保たれていることがわかる。すなわち、予 測を2週目まで延ばした場合、特定の予報時刻におけ る低気圧の接近の有無について予測することは困難で あるものの、前後のある程度幅を持った期間で低気圧 が通過しやすいかどうかを判断するスキルはあること が考えられる。

北半球域や南半球域では予報時間が進んでいった際に

図 2.4.4 週間 EPS の低気圧中心の半径 200 km 以内の平 均個数(単位:×0.01 個)の比較。上段が FT=0、中段 が FT=264、下段が FT=264 と FT=0 の差を示す。予報 対象時刻は 2014 年 4 月 1 日 00UTC~2015 年 3 月 31 日 12UTC。

BSS がおおよそ0 に収束しているが、熱帯域では-0.05 程度に収束している(図略)。BSS が負に収束すること は、モデル気候値における低気圧の存在密度がJRA-55 の気候値と異なることを示唆している。これが低気圧 の個数の年々変動に主に起因するのか、それともモデ ルバイアスに起因するのかを確認するため、同じ予報 対象期間における解析値と予報値の低気圧の平均個数 を比較した。図 2.4.4 に 2014 年 4 月 1 日 00UTC~2015 年3月31日12UTC を予報対象時刻とする週間 EPS の低気圧中心の半径 200 km 以内の平均個数を示す。熱 帯に着目すると、北東太平洋では予測された低気圧の 存在のピークが解析と比べて南に偏っている。逆に、 フィリピンの東海上では予測のピークの方が解析より 北に偏っていることがわかる。また、南インド洋では 解析よりも多くの低気圧が予測されており、週間 EPS のモデルにおけるこの海域の熱帯低気圧の活動が活発 過ぎることを示している。このように、解析値に対し て予測における熱帯の低気圧の個数には顕著な違いが あることがわかる。全球モデルによる熱帯の低気圧の 予測には、中・高緯度と比べてまだ多くの改善の余地 があると言える。

2.4.3 まとめと今後

本節では簡便な低気圧追跡手法を用いて、週間 EPS における低気圧の進路予測や平均個数などの精度につ いて検証した結果を紹介した。アンサンブル平均の低 気圧の位置誤差や低気圧の接近確率の精度が年々向上 していることが確認できた。また、週間 EPS の予測を 2週目へと延ばすにあたって、特定の予報時間ではなく 数日の幅を対象とすれば、低気圧接近確率に関する有 意義な情報を得ることができる可能性が示された。一 方で、熱帯における低気圧の表現には、中・高緯度と 比べて多くの改善の余地があることが示唆された。

本節では紹介しなかったが、低気圧追跡結果を用い ることで低気圧周辺の予測誤差のコンポジット解析や 長期積分におけるストームトラックの検証なども行う ことができる。こうした検証は数値予報モデルの特性 の把握に大きく貢献することが期待される。低気圧の 他にもトラフや前線といった現象に着目すれば、さら に有用な情報を得ることもできるであろう。また、中 期予報の予報作業支援資料として EPS による低気圧の 追跡結果を用いることが考えられる。今後もこうした 特定の現象に着目した数値予報精度の検証を行いつつ、 EPS のさらなる高精度化に取り組んでいきたい。

参考文献

- Blackmon, M. L., J. M. Wallace, N.-C. Lau, and S. L. Mullen, 1977: An observational study of the northern hemisphere wintertime circulation. J. Atmos. Sci., 34, 1040–1053.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, 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.
- Nakamura, H. and A. Shimpo, 2004: Seasonal variations in the southern hemisphere storm tracks and jet streams as revealed in a reanalysis dataset. J. Climate, 17, 1828–1844.
- Neu, U., M. G. Akperov, N. Bellenbaum, R. Benestad, R. Blender, R. Caballero, A. Cocozza, H. F. Dacre, Y. Feng, K. Fraedrich, J. Grieger, S. Gulev, J. Hanley, T. Hewson, M. Inatsu, K. Keay, S. F. Kew, I. Kindem, G. C. Leckebusch, M. L. R. Liberato, P. Lionello, I. I. Mokhov, J. G. Pinto, C. C. Raible, M. Reale, I. Rudeva, M. Schuster, I. Simmonds, M. Sinclair, M. Sprenger, N. D. Tilinina, I. F. Trigo, S. Ulbrich, U. Ulbrich, X. L. Wang, and H. Wernli, 2013: IMILAST: A community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms. Bull. Amer. Meteor. Soc., 94, 529–547.
- 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,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.

2.5 台風活動度予測の精度¹

2.5.1 はじめに

本節では、中期アンサンブル予報システムによる熱帯 低気圧の活動度の予測精度について、台風の発生する北 西太平洋域の検証結果を中心に述べる。また、複数の中 期アンサンブル予報システムによる予測結果を合わせ たマルチセンターグランドアンサンブル予測 (MCGE) の有効性についても述べる。

世界の気象機関で利用されている予報プロダクトに、 熱帯低気圧接近確率図と呼ばれるものがある (Van der Grijn et al. 2005)。同図の典型的な例は、予測の初期 時刻から5日先までに熱帯低気圧が120 km 以内に近 づく可能性をアンサンプル予報を用いて確率的に表現 したもので、初期時刻に熱帯低気圧が存在する場合に 作成されるプロダクトである。

一方、本節で扱う熱帯低気圧の活動度予測とは、ある場所、ある期間における熱帯低気圧の存在の有無を 確率的に予測するものである (Vitart et al. 2010)。熱 帯低気圧接近確率の予測と異なる点は、

- 予測の初期時刻における熱帯低気圧の有無に関わらず接近確率を算出すること、
- 任意の予報期間(たとえば、5~8日先予測)に対して接近確率を算出すること、

である。したがって、熱帯低気圧の活動度予測とは、 熱帯低気圧の発生とその後の進路の予測を含む熱帯低 気圧の有無の予測と見ることが出来る。この熱帯低気 圧の活動度予測のプロダクトは欧州中期予報センター (ECMWF)で現業的に利用されている (Vitart et al. 2012)。

本調査では、気象庁 (JMA)、ECMWF、米国環境予 測センター (NCEP)、英国気象局 (UKMO) の中期アン サンブル予報を用いて、台風の活動度予測の有効性を検 証する (JMA の中期アンサンブル予報とは気象庁週間 EPS の意味である)。また、MCGE として、ECMWF, NCEP, UKMO の 3 センターによる MCGE3 と、全 4 センターによる MCGE4 を作成し、MCGE の有効性 についても検証を行う²。

なお、北西太平洋域を含む世界の各熱帯低気圧発生 海域での検証結果に関しては Yamaguchi et al. (2015) にまとめられているので、適宜参考にして頂きたい。

2.5.2 方法

本調査では、台風の活動度を「ある3日間(72時間) に300 km 以内に台風が存在する確率」で定義した(予 報期間、距離の閾値を変えた検証結果は図2.5.5 参照)。 この3日間の予報期間は、2週先まで1日間隔で設定さ れ(0~3日先、1~4日先、・・・、11~14日先)、それぞ れの予報期間で検証を行う(たとえば、1~4日先とは 予報時間24~96時間に対応する)。熱帯低気圧の追跡 は、ECMWFで使用されている追跡手法(Vitart et al. 2012)を用いた。この手法では、地上風速や海面更正気 圧、850 hPaの渦度や台風の暖気核の強さから熱帯低気 圧を追跡する。検証領域は、東経方向には熱帯低気圧地 区特別気象センター(RSMC Tokyo-Typhoon Center) の責任領域と同じ東経100度~180度、緯度方向は台 風の発生に注目するために赤道~北緯25度とした。

ECMWF, JMA, NCEP, UKMO の中期アンサンブ ル予報の予測結果は ECMWF の TIGGE アーカイブ サイトから取得した(諸元は表 2.5.1 を参照)。検証期 間は 2010 年 1 月 1 日 ~ 2013 年 12 月 31 日で、12UTC 初期時刻の予測を使用した。この期間、JMA の中期ア ンサンブル予報の予報期間は 9 日であったため、JMA の検証は 6~9 日先の予報期間までである。うるう年を 含む 4 年間の検証で、1461 (365×4+1)事例ある。検 証の指標には、確率予報の標準的な指標であるブライ アスキルスコア (BSS)を用いる。

BSSの算出に必要となる気候学的な台風の活動度(気候値)の算出には、検証期間である2010~2013年を含まない1951~2009年までの気象庁ベストトラックデータを使用した。まず、6時間毎のベストトラックデータを使用した。まず、6時間毎のベストトラックデータを使用した。まま、距離の閾値は、アンサンブル予報と同じ300kmとした。その後、3日間の予報期間に相当する気候値を作成した。実際の台風の活動度(0%もしくは100%)についても、気象庁ベストトラックデータを使用した。距離の閾値は、アンサンブル予報、気候値と同じ300kmである。アンサンブル予報、気候値と同じ300kmである。アンサンブル予報、気候値、実際の台風の活動度は、0.5度×0.5度の格子間隔で計算し、検証には気候値において確率が0%よりも大きい格子点を用いた。

検証対象は、最大風速が34ノット以上の熱帯低気圧 である。最大風速が34ノット以上の熱帯低気圧でも、 その生涯で34ノット未満の強度の期間や温帯低気圧と なった期間は「台風活動なし」とする。

中期アンサンブル予報で使用されている数値予報モ デルの解像度などが原因で、モデルで表現される熱帯 低気圧の強度は、実際の強度よりも弱い可能性がある。 また、TIGGE で蓄積されているデータの解像度はア ンサンブル予報のモデル解像度よりも低いことがある (表 2.5.1)。そこでモデルで表現される台風を定義する 際、35 ノット³ の閾値の他、30, 25, 20, 15 ノットで もモデル台風を定義し、それぞれの閾値で BSS を算出

¹ 山口 宗彦 (気象研究所)

²本調査では、2010~2013年の中期アンサンブル予報を用いて検証を行った。この期間、JMAの中期アンサンブル予報の予報期間は9日であった。MCGEにおける2週先までの予測精度を検証するために、予報期間の短いJMAを除いたMCGE3を作成した。2016年1月現在、予報期間は11日に延長されている。

³ 台風の定義は、最大風速が 34 ノット以上の熱帯低気圧で あるが、ベストトラックデータでは 35 ノットを含む 5 ノッ ト間隔で最大風速が解析されている。

表 2.5.1 本調査で使用したアンサンブル予報の諸元。

	ECMWF	JMA	NCEP	UKMO
モデルの	TL639	TL319	T254	$0.55^\circ \times 0.83^\circ$
水平解像度	(0~10日)	(0~9日)	(0~8日)	(0~15日)
(予報期間)	TL319		T190	
	(10~15日)		(8~16日)	
アンサンブルサイズ	51	51	21	24
TIGGE アーカイブ				
におけるデータ	$0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$	$1.25^\circ \times 1.25^\circ$	$1.0^\circ \times 1.0^\circ$	$0.55^\circ \times 0.83^\circ$
水平解像度				

した。

台風活動度予測の例を示す。図 2.5.1 は、2013 年 にフィリピンに甚大な被害をもたらした台風第 30 号 (Haiyan)の事例で、初期時刻は 2013 年 10 月 31 日 12UTC、予報期間は 5~8 日先である。この初期時刻 は、台風 Haiyan が発生する(最大風速が 35 ノット以 上になる)およそ 4 日前、またフィリピンに上陸する およそ 8 日前である。風速の閾値は、NCEP が 35 ノッ ト、ECMWF, UKMO が 30 ノット、JMA が 20 ノッ トである。どのアンサンブル予報も、台風 Haiyan が 発生し、その後フィリピンに向かって進むことを予想 していることが分かる。

2.5.3 結果

(1) 各センターの予測精度

図 2.5.2(a) に、ECMWF, JMA, NCEP, UKMO の 各予報期間における BSS を比較した図を示す。この図 では、各センター、予報期間ごとに、15~35 ノットま での閾値でそれぞれ BSS を算出し、最も大きい値を表 示している。表 2.5.2 に、最も大きな BSS を与える最 大風速の閾値をまとめた。

図 2.5.2(a) を見ると、1 週先の予測(4~7日先)まで はどのセンターも BSS が正の値であり、気候学的な予 測に対してスキルがあることが分かる。2 週目を含む予 報期間、例えば6~9日先においても ECMWF, JMA, UKMO のアンサンブル予報は BSS が正の値であり、 気候学的な予測に対してスキルがあることが分かる。

個々のセンターに注目すると、ECMWF は全予報期 間で BSS が他センターよりも大きく、最も精度が良い。 JMA は、表 2.5.2 が示す通り、他センターよりも BSS が最大となる最大風速の閾値が小さい(他の海域でも 同様の傾向である)。これは、TIGGE に蓄積されてい るデータの解像度が $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ (表 2.5.1)と他セン ターよりも粗いことが原因である可能性がある。また モデルで表現される熱帯低気圧の強度が他センターよ りも弱い可能性がある。NCEP は、TIGGE データの解 像度が $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (表 2.5.1)であるにも関わらず、BSS が最大となる最大風速の閾値は現実と同じ 35 ノットで

ある。モデルで表現される熱帯低気圧の強度が相対的に 強いことが推測される。また NCEP は、予報期間後半 で BSS が他センターと比べて小さく、負の値となって いる。図 2.5.3(a), (b), (c), (d) は、それぞれ ECMWF, JMA, NCEP, UKMO の予報期間 6~9 日先の信頼度曲 線図である。予測の確率が高いとき、実際の出現頻度 は予測確率よりも低いという特徴が ECMWF, JMA, NCEP に見られるが、予測の頻度(実線の棒グラフ) を見ると NCEP が高いことが分かる。実際には台風活 動がない場所で高確率で台風活動を予測する事例が他 センターよりも多いことが負の BSS の原因となってい ると考えられる。UKMOの特徴は、台風活動度の予測 頻度のバイアスが他センターよりも小さいことである。 予測頻度のバイアスは、台風活動が実際にあった領域 (格子点の数)に対するアンサンブル予報が台風活動を 予測した領域(予測された確率値で重み付けされた格 子点の数)の比で定義され、1より大きければモデル は実際よりも多く台風活動を予測しており、1より小 さければモデルは実際よりも少なく台風活動を予測し ていることを意味する。図 2.5.4 は、ECMWF, JMA, NCEP, UKMO の予測頻度のバイアスを最大風速の閾 値ごとに検証した結果である。ある最大風速の閾値で 見ると、ECMWF, JMA, NCEP のアンサンブルは予 報期間とともに予測頻度が少なくなる傾向があるが、 UKMO はほぼ一定である。

(2) マルチセンターグランドアンサンブルの予測精度

図 2.5.2(b) に、MCGE3, MCGE4 の各予報期間にお ける BSS を示す(MCGE4 は JMA のアンサンブルを 含んでいるため、検証は 6~9 日先の予報期間までで ある)。参考のため、最も精度の良かった ECMWF の BSS も描画している。MCGE を作成する際の最大風 速の閾値は各センターで異なっており、表 2.5.2 に示さ れている値を用いた。また、表 2.5.1 が示す通り、アン サンブルサイズは各センターによって異なるが、メン バー数が多いセンターも少ないセンターも1メンバー 当たり同じ重みを与えている。

図 2.5.2(b) から、最も精度の良い単独のアンサンブ

図 2.5.1 台風 Haiyan を対象とする台風活動度予測の例。初期時刻は 2013 年 10 月 31 日 12UTC で、予報期間は 5~8 日先。(a) は気候値(スケールが(b)~(f)と異なる)、(b)は実際の台風活動度、(c)~(f)はそれぞれ ECMWF, JMA, NCEP, UKMO の活動度予測。陰影は確率値で単位は%。

ルよりも MCGE の BSS は大きいことが分かる。また MCGE3 は、予報期間 11~14 日先まで BSS が正の値 であり、気候学的な予測に対して 2 週先までスキルが あることが分かる。さらに図 2.5.3(e), (f) に示す通り、 単独のアンサンブルよりも予測の信頼度が改善し、信 頼度曲線はより直線的となる。一方、MCGE では、各 センターにあった 90%や 100%といった高確率を予測 する頻度が減少する。

(3) 予報期間、距離の閾値の感度実験

ここまで、台風の活動度を「ある3日間に300 km 以内に台風が存在する確率」で定義した。一方、予測 のスキルは予報期間や距離の閾値に応じて変わること が予想される。また、プロダクトの利用者に応じて関 心のある予報期間や距離の閾値が異なることも予想さ れる。そこで、予報期間を3日から1,5,7日へ、距離 の閾値を300 km から100,500,700 km へと変更し、

図 2.5.2 (a) ECMWF(黒色の棒グラフ)、JMA(灰色)、 NCEP(白)、UKMO(斜線)のアンサンブルによる台 風活動度予測の BSS、(b) ECMWF(黒色の棒グラフ)、 MCGE3(灰色)、MCGE4(白)による台風活動度予測の BSS。横軸は予報期間(日)。

BSS を再計算した。予報期間、距離の閾値を変更した 検証では、アンサンブル予報だけでなく、気候学的な 台風の活動度、実際の台風の活動度も変更した閾値を 用いて再作成した。

予報期間、距離の感度実験の結果を図 2.5.5 に示す。 BSS は、距離の閾値が大きくなるほど大きくなる傾向 がある。また、予報期間に関しては、特に予報期間後 半で、予報期間が長くなるほど BSS が大きくなる傾向 がある。2 週先(14日目)を含む予報期間で最も BSS が大きくなったのは、予報期間が7日、距離の閾値が 700 km のときであった。一方、距離の閾値が100 km のときは、BSS が小さい傾向がある。近年の台風進路 予報の年平均誤差が1日予報で約100 km、5日予報で 約500 km であることを考えると、100 km という距離 の閾値は小さ過ぎるのであろう。

2.5.4 まとめ

本調査では、ECMWF, JMA, NCEP, UKMO の現 業中期アンサンブル予報を用いて、台風の活動度予測 の検証を行った。主な結果は、以下の通りである。

現業中期アンサンブルは、気候学的な予測に対してスキルのある予測を、2週目を含む予報期間に

表 2.5.2 最も大きな BSS を与える最大風速の閾値(ノット)。

予報期間	ECMWF	JMA	NCEP	UKMO
0~3 日先	35	25	35	30
1~4 日先	35	25	35	30
2~5 日先	35	25	35	30
3~6 日先	35	20	35	30
4~7 日先	35	20	35	35
5~8 日先	35	20	35	35
6~9 日先	30	20	35	35
7~10 日先	30	_	35	35
8~11 日先	30	_	35	35
9~12 日先	30	_	35	35
10~13 日先	30	_	35	35
11~14 日先	30	_	35	35

図 2.5.3 (a) ECMWF, (b) JMA, (c) NCEP, (d) UKMO, (e) MCGE3, (f) MCGE4 の予報期間 6~9 日先の信頼度 曲線(太線)。横軸は予測の確率値(%)、左の縦軸は実際の 出現頻度(%)。実線の棒グラフは予測の頻度(格子点数) 点線の棒グラフは実際の出現頻度(格子点数)で右の縦軸 に対応する。細線は y = x の直線。

おいて提供することが出来る。

- マルチセンターグランドアンサンブルは、最も精度の良い単独のアンサンブル予報よりも精度が良く、2週先までスキルのある予測を提供することが出来る。
- マルチセンターグランドアンサンブルでは、予測の信頼度が改善する。
- 予測のスキルや信頼度は、モデルで表現される熱帯低気圧の最大風速の閾値に敏感である。
- ECMWF, JMA, NCEP のアンサンブルは、予報
 時間と共に台風の活動度の頻度が減少する傾向が ある。

一方、本調査の注意点・課題もいくつかある。1つ 目は、台風の影響の範囲を 100~700 km と一定値を用 いたが、台風の影響範囲は個々の台風の大きさや強さ、 非軸対称度によって変わり得る。台風の影響の範囲を、 台風中心からの距離ではなく、ある閾値を超える風速 の領域とすればより適切に台風の影響を反映出来るか もしれない。一方、この場合、検証に用いる実況値の 品質に注意しなければならないだろう。2つ目は、最大 風速が35 ノットよりも小さい熱帯低気圧が大きな被害 を引き起こすこともあるが、本調査ではこのような熱 帯低気圧の活動度は扱っていない。最大風速が34ノッ トよりも小さい熱帯低気圧の発生のタイミングをどの ように定義するか、またその定義の妥当性、客観性な どの問題はあるが、弱い熱帯低気圧の検証は課題であ る。3つ目は、台風の発生だけに注目した予測のスキ ルの検証も必要である。本調査では、活動度予測の検 証を行ったので、どの程度発生予測のスキルがあるか は不明確である。特に予報期間前半のスキルには初期 時刻に既に台風が存在している事例の影響が多いと考 えられる。一方、予測の検証域を赤道から北緯25度に 限定していること、また台風の平均寿命が5日程度あ ることを考えると、予報期間後半の検証は「台風の発 生とその後の進路予測」の検証と見なすことが出来る であろう。

他海域の RSMC(地域特別気象中枢)や TCWC(熱 帯低気圧警報センター)が数日先、また5日先の熱帯 低気圧発生予報を発表しており、気象庁でも台風の発 生に関する予報プロダクトの有効性を実証する調査・ 研究、また予報ガイダンスの開発を行うことが今後重 要であろう。

参考文献

- Van der Grijn, G., J. E. Paulsen, F. Lalaurette, and M. Leutbecher, 2005: Early medium-range forecasts of tropical cyclones. *ECMWF Newsletter*, 102, 7–14.
- Vitart, F., A. Leroy, and M. C. Wheeler, 2010: A comparison of dynamical and statistical predictions

図 2.5.4 台風活動度の予測頻度のバイアス(縦軸)。横軸は 最大風速の閾値(ノット)。各最大風速の閾値にある 12本 (JMA は7本)の棒グラフは左から予報期間 0~3 日先、 1~4 日先、・・・、11~14 日先に対応する。

図 2.5.5 MCGE3 による台風活動度予測の BSS。(a), (b), (c), (d) は予報期間がそれぞれ 1, 3, 5, 7 日の検証結果に 対応する。横軸は予報期間(日)。各図の各予報期間に対 応する 4 つの棒グラフは、左から距離の閾値が 100, 300, 500, 700 km である。

of weekly tropical cyclone activity in the Southern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3671–3682.

- Vitart, F., F. Prates, A. Bonet, and C. Sahin, 2012: New tropical cyclone products on the web. *ECMWF Newsletter*, 130, 17–23.
- Yamaguchi, M., F. Vitart, S. T. K. Lang, L. Magnusson, R. L. Elsberry, G. Elliott, M. Kyouda, and T. Nakazawa, 2015: Global distribution of the skill of tropical cyclone activity forecasts on short- to medium-range time scales. *Wea. Forecasting*, **30**, 1695–1709.