

第4章 メソアンサンブル予報システム

4.1 はじめに¹

気象庁においてメソモデル(以下、MSM という)は防災気象情報、航空気象情報の作成支援を目的として運用されている。MSM は2001年3月より水平格子間隔10 kmで1日4回18時間予報による正式運用が開始され、2006年3月に水平格子間隔が5 kmに高分解能化されるとともに1日8回15時間予報を行うように拡張された。その後、2007年5月より1日8回の予報のうち、03, 09, 15, 21UTC 初期時刻について運航用飛行場予報(TAF)に対応すべく33時間予報に延長された。さらに、2013年3月と5月に予報領域の拡張及び予報時間の39時間への延長が実施された。一方、MSM より高分解能である水平格子間隔2 kmの局地モデル(以下、LFM という)について、試験運用を経て東日本領域を対象に1日8回9時間予報による正式運用が2012年8月に開始され、さらに、2013年5月より予報領域が日本全国を覆う領域に拡大されるとともに、1日24回の運用へと高頻度化されている。LFMの運用が開始され、最新の観測が同化された9時間先までの予測情報が高頻度に提供されるようになったことをふまえると、MSM においては、LFMの予報時間がカバーしない1日先程度までの大雨や暴風などの災害をもたらす気象現象の発生及び推移に対する予測の重要性が高まっていると考えられる。

一方、MSM が予測対象とするメソスケール現象は、時間・空間スケールが小さく1日先程度以降の予測においては初期値の不確実性により誤差が大きくなりやすい。加えて側面・下部境界条件や予報モデルのもつ不確実性により決定論的な予測では精度良く実況をとらえることができない場合がある。そこで、決定論的なMSMの予測に対して、信頼度や確率的な情報とともに、数値予報による複数の客観的な予測情報を提供することを目指して水平格子間隔5 kmのメソアンサンブル予報システム(以下、MEPS という)の導入に向けた開発を進めている。

2006年ごろまでのメソスケール現象の予測に向けたアンサンブル手法の開発については齊藤ほか(2006)に説明があり、例えば、2008年の北京オリンピックにおける予報実証/研究プロジェクトによる開発成果はSaito et al. (2011)で述べられている。ここでは、それ以後の開発について簡単に述べる。数値予報課においては、2007年度よりメソスケール現象の予測に向けたアンサンブル手法の開発を開始した。齊藤ほか(2006)にある通り、この時点では国内外を含めてメソスケール現象の予測に向けたアンサンブル予報システムのあるべき姿は明確でなかったことから、LAF (Lagged Average

Forecast)によるメソスケール現象の予測に向けたアンサンブル手法の特性把握を行うとともに(津口2008)、初期摂動作成手法の基礎調査から着手した。初期摂動の作成においては、成長率の大きい誤差パターンを生成する特異ベクトル法(小野2010)とデータ同化と一体化して流れに依存する解析誤差を反映させた摂動を生成する局所アンサンブル変換カルマンフィルタ及び3次元変分法を用いたデータ同化アンサンブルによる手法の三者について比較検討を行い、2012年度当初の時点でもっとも実用化に近いと考えられた特異ベクトル法による摂動作成手法を採用することとした。一方、MEPSの予報領域は全球ではないため側面境界条件を与える必要がある。特に予報期間後半では側面境界の影響が領域の内側まで及ぶことから、特異ベクトル法による摂動に側面境界摂動も組み合わせることにした。MEPSの初期摂動・境界摂動の詳細は第4.3節を参照いただきたい。

また、MEPSは予報モデルによる複数の予測計算を行うことから、多くの計算機資源を要する。そのため、正式運用には新しいスーパーコンピューターシステムが必要となり、現時点ではスーパーコンピューターシステムの更新後概ね1年後を目途に正式運用開始を想定している。正式運用では、MSMと同じ水平格子間隔・予報領域・予報時間で21メンバーによる39時間予報を1日4回計算することを想定している²。

正式運用に先立って現在のスーパーコンピューターシステムによる予報部における部内試験運用を行い、正式運用に向けた精度向上のための開発を進めるとともに、予報部内における現業予報における利用方法の検討を行う必要がある。このためには限られた計算機資源を用いてシステムを構築する必要があり、2013年度から部内試験運用の仕様について検討を行った。水平格子間隔については、10 kmとしてメンバー数を試験運用と揃える仕様も考えられたが、5 kmと2 km以外は現時点では運用していない³こと、MSMとMEPSで水平格子間隔が異なると予測特性が異なり、正式運用で想定される仕様との違いが大きいと利用方法の検討に支障があることから、MSMと同じ5 kmとした。予報領域・予報時間については、側面境界の影響が領域の広さに依存する。前述の通り、初期値と側面境界値の両方に摂動を与えており、その組み合わせの影響を評価するためには予報領域・予報時間を正式運用で想定する仕様と合わせることが望ましい。そこで、MSMと同じ予報領域・予報時間とした。メンバー数は予測精度に影響を与えるとともに、予報作業での利用にも影

² 本節執筆時点での想定であり確定ではない。

³ 一般に、水平格子間隔が異なれば物理過程等を変更する必要があり、現時点で運用していない水平格子間隔のシステムを運用するには新たに相応の開発が必要となる。

¹ 石田 純一

響を与える。利用方法の検討に際してはなるべく正式運用とメンバー数の違いがないことが望ましいが、計算機資源が限られていることから、定常的に実施する部内試験運用は11メンバーとし、その代わり、ある事例に着目して詳細な検討を行う場合等、非定常的に必要に応じて21メンバーの計算を実施することとした。また、予測頻度は正式運用で想定する1日4回から1日1回として、計算機資源を実行可能な範囲に収めた。こちらにも必要に応じて1日複数回の計算を行うことも考えている。この部内試験運用の仕様に基づいて開発を進め、2015年3月より部内試験運用を開始した。

気象庁において、メソスケール現象の予測に対するアンサンブル手法の導入はMEPSが初めてとなる。MEPSによる予測の解釈はMSMやLFMのような決定論のシステムや週間アンサンブル予報システムのそれとは大きく異なるため、利用方法を十分にユーザーと検討する必要がある。そこで、予報課・航空予報室・業務課・気象研究所とMEPSに関する打ち合わせを2014年度より開始した。これは、MEPSの仕様や予測結果等についてユーザーと情報を共有することで、予報作業における利用手法を確立し、ひいてはガイダンスやシステム等の開発に資することを目的としている。現時点では予測結果の検証や利用方法の詳細の検討を行っている段階である。部内試験運用の事例検討を通じて情報共有・意見交換を行い、検討結果をMEPSの開発や予測結果閲覧用のモニタの開発に反映させ、MEPSの予測結果について理解を深めている。これまでに、メソスケール現象の中でも不安定性降水のようなスケールの小さい現象から、スケールの大きい現象である低気圧の中心位置・示度に対する予測特性やガイダンスを通じた最高気温の大外し事例等について検討を進めてきたところである。

第4.2節では海外の気象機関におけるメソスケールの現象を対象としたアンサンブル予報システムの運用動向及び開発動向について述べる。第4.3節では現在の部内試験運用システムの概要を紹介するとともに、今後の開発課題について述べる。

参考文献

- 小野耕介, 2010: メソ特異ベクトル法. 数値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 93-104.
- 斉藤和雄, 経田正幸, 山口宗彦, 2006: メソアンサンブル予報. 数値予報課報告・別冊第52号, 気象庁予報部, 66-79.
- Saito, K., M. Kunii, M. Hara, H. Seko, T. Hara, M. Yamaguchi, T. Miyoshi, and W. Wong, 2011: WWRP Beijing Olympics 2008 Forecast Demonstration / Research and Development Project (BO8FDP/RDP). *Tech. Rep. MRI*, 214 p.
- 津口裕茂, 2008: LAFによるメソアンサンブル予報. 数値予報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 241-245.

4.2 諸外国の現状と動向¹

4.2.1 はじめに

本節では、諸外国の気象機関の領域モデルによるアンサンブル予報システム（以下、EPS という²）の動向について述べる。総観スケールの現象を対象とした全球を予測領域とする EPS は第 1.1 節に述べられている通り、1990 年代から様々な気象機関で運用されている。一方、メソスケールの現象を対象とした EPS は諸外国でも 2000 年代になって現業運用が開始されたところであり、当庁を含めて試験運用段階の気象機関もある。

本項の筆者は WGNE（数値実験作業部会）の気象庁からの委員を務めており、米国海軍研究所の委員である Dr. Caroline Reynolds と共同して各気象機関における全球・領域 EPS のレビューを 2015 年 3 月に行った。これらの情報を元に、主要気象機関の領域 EPS の概要を表 4.2.1 にまとめた。ここに掲載した気象機関及びその他の気象機関の領域 EPS の詳細について第 4.2.2 項で述べる。

また、本項の筆者は 2015 年 10 月 5 日から 8 日にかけてセルビアで開催された第 37 回欧州領域モデリング会合及び第 22 回短期数値予報会合（以下、EWGLAM ミーティングという）へ出席し、領域 EPS に関する情報を収集した³。WGNE におけるレビューと EWGLAM ミーティングで収集した情報を元に、当庁で現在開発中の事項を含む今後の動向について、第 4.2.3 項に簡単にまとめた。

4.2.2 各気象機関の現在⁴の領域 EPS

(1) 米国

NCEP では、2001 年より領域 EPS SREF (Short-Range Ensemble Forecast system) を運用している (Du and Tracton 2001; Du et al. 2009, 2015)⁵。現在、北米を覆う領域において水平格子間隔 16 km、鉛直層数 40 層、26 メンバーで 1 日 4 回 (03, 09, 15, 21UTC), 87 時間予報を実行している (Du et al. 2015)。初期値は、3 つのシステム⁶ による予報値または解析値から、メンバーによって異なるものを用い、これに初期摂動を加

えて作成する。初期摂動は、領域 BGM 法 (Regional Breeding of Growing Modes method: 領域成長モード育成法) と全球 EnSRF (Ensemble Square Root Filter: Whitaker and Hamill 2002) による摂動を合成したものである。また、側面境界値としては、全球 EPS (GEFS: Global Ensemble Forecast System) の異なるメンバーの予報値を用いる。予報モデルとして、13 メンバーずつ NMMB (Nonhydrostatic Multiscale Model on the B-grid) と WRF-ARW (Weather Research and Forecasting-Advanced Research WRF) を用い、さらに、メンバーごとに様々な物理過程の組み合わせを用いている。また、一部の物理過程パラメータに確率的な摂動を導入している。

一方、研究機関において、いずれも予報モデル WRF-ARW を用いた CONUS (Contiguous United States: 米国本土) 域を対象とする、高解像度領域 EPS のリアルタイム実行が試みられている。

NSSL では、水平格子間隔 4 km, 9 メンバーのアンサンブル予報を 1 日 1 回 (00UTC) 実行している⁷。メンバーごとに異なるシステムによる予報値を初期値、側面境界値として、ダウンスケーリングを行う (1 メンバーが NAM, 1 メンバーが GFS, 7 メンバーが SREF の予報値を用いる)。

NCAR/MMM では、水平格子間隔 3 km, 10 メンバーのアンサンブルによる 48 時間予報を 1 日 1 回 (00UTC) 実行している (Schwartz et al. 2015)⁸。初期値としては、WRF/DART (Data Assimilation Research Testbed: Anderson et al. 2009) の 50 メンバー EAKF (Ensemble Adjustment Kalman Filter: Anderson 2001, 2003) の解析サイクルからのメンバーを用いる。また、側面境界値としては、背景誤差特性に基づく確率分布からランダムに生成した摂動を GFS 予報値に加えたものを用いる。

(2) 英国

UKMO では、英国域を対象とする 12 メンバーの領域 EPS MOGREPS-UK (Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System UK) を運用している (Tennant 2015)。MOGREPS-UK の水平格子間隔は 2.2 km で、英国域の決定論的領域モデル UKV の水平格子間隔 1.5 km よりも若干粗い解像度である。また、鉛直層数は 70 層である。MOGREPS-UK では、36 時間予報を 1 日 4 回 (03, 09, 15, 21UTC) 実行する。MOGREPS-UK 独自の初期摂動生成は行っておらず、水平格子間隔 33 km, 12 メンバーの全球 EPS MOGREPS-G (Bowler et al. 2008, 2009; Tennant et al. 2011; Tennant and Beare 2014) による予報値を初期値として用い、予報モデル Met Office Unified

¹ 石田 純一 (第 4.2.1 項、第 4.2.3 項)、藤田 匡 (第 4.2.2 項)

² 本節では、全球域を対象とする EPS を総称して全球 EPS と記す。

³ この会合の講演資料は本節執筆時点で公開されていないため、文献を引用出来ないことをご了承いただきたい。

⁴ 本項執筆時点 (2015 年 12 月) での情報である。

⁵ <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mb/SREF/SREF.html>

⁶ それぞれ、NAM/NDAS (North American Model/NAM Data Assimilation System: <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/nam/>), GFS/GDAS (Global Forecast System/Global Data Assimilation System: <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>), RAP (Rapid Refresh: <http://rapidrefresh.noaa.gov/>)。

⁷ <http://wrf.nssl.noaa.gov/newsite/index.php?about>

⁸ <http://ensemble.ucar.edu/>

表 4.2.1 各国の気象機関における領域アンサンブル予報システム

	日本	米国	英国	フランス	ドイツ	カナダ
水平格子間隔	5 km	16 km	2.2 km	2.5 km	2.8 km	15 km
予報期間	39 時間	87 時間	36 時間	42 時間	27 時間	72 時間
メンバー数	11	26	12	12	20	21
初期値	SV 法	BGM 法 + 全球 EnKF	全球 EPS からのダウン スケーリング	全球 EPS からのダウン スケーリング	複数の全球モデル からのダウン スケーリング	全球 EPS からのダウン スケーリング
側面境界値	週間 EPS	全球 EPS	全球 EPS	全球 EPS	複数の全球 モデル	全球 EPS
モデルの 不確実性	なし	複数の物理過程 + 複数のモデル	SPPT	SPPT	パラメータ摂動	SPPT
予報モデル	JMA-NHM	WRF-ARW + NMMB	Unified Model	AROME	COSMO	GEM
備考	試験運用			試験運用		

Model (Davies et al. 2005) によるダウンスケーリングを行う⁹。

なお、以前、UKMO はこの他に欧州から北大西洋を覆う領域を対象とする水平格子間隔 18 km の MOGREPS-R¹⁰ を運用しており、当初 MOGREPS-UK は MOGREPS-R からのネスティングを行っていた。しかし、MOGREPS-G の高解像度化に伴い、2013 年に MOGREPS-UK は MOGREPS-G からの直接のネスティングとなった。その後、MOGREPS-R の運用は終了した。

(3) フランス

Météo-France では、非静力学モデル AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Mésos-Echelle) によるフランス域での高解像度決定論的予報 AROME-France を 2008 年から運用している。現在の AROME-France の水平格子間隔は 1.3 km である。領域 EPS の運用は行っていないものの、2016 年の運用開始を目指して、AROME による EPS (PEARO: prévision d'ensemble AROME) の開発を進めている (Bouttier et al. 2015)。PEARO の領域は AROME-France と同様のフランス域で、水平格子間隔 2.5 km、鉛直層数 90 層、12 メンバーで 1 日 2 回 42 時間予報の運用を計画している¹¹。

PEARO の初期値は Météo-France で運用している全球 EPS PEARP (prévision d'ensemble Arpège:

Descamps et al. 2015)¹² によるアンサンブル摂動にダウンスケーリング・振幅調整を適用し、AROME-France の解析値に加えることで生成している。また、側面境界値は PEARP (35 メンバー) からクラスター解析に基づいて選択されたメンバーを用いている (Nuissier et al. 2012)。さらに、下部境界摂動として、地表面パラメータや海面温度、土壌温度、土壌水分に自己相関を持ったランダム摂動を使用している (Bouttier et al. 2015)。予報モデルの不確実性の表現としては、確率的物理過程強制法 (SPPT: Stochastically Perturbed Physics Tendencies) を導入している (Bouttier et al. 2012)。

(4) ドイツ

DWD では、ドイツ域を対象とする COSMO (Consortium for Small-scale Modeling) モデルによる決定論的予報 COSMO-DE (COSMO Deutschland) を水平格子間隔 2.8 km で運用している。COSMO-DE-EPS (COSMO-DE Ensemble Prediction System) は、COSMO-DE と同じ水平格子間隔 2.8 km で、2012 年から運用されている (Gebhardt et al. 2008, 2011; Peralta et al. 2012; Kühnlein et al. 2014)。現在、1 日 8 回 (00, 03, ..., 21UTC)、20 メンバー、鉛直層数 50 層で、03UTC 初期値については 45 時間予報、その他の初期値については 27 時間予報を行っている。

COSMO-DE-EPS の側面境界値は水平格子間隔 7 km、4 メンバーの EPS である BC-EPS (boundary condition-EPS) によって生成される。BC-EPS は、欧州領域で、4 つの現業センターによる全球予報値¹³ を

⁹ MOGREPS-G の初期値は、44 メンバーの Localised ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter: Bowler et al. 2009) のうち 11 メンバーのアンサンブル摂動を決定論的の全球解析値に加えることで生成する。これに、摂動を加えないコントロールメンバーを合わせて 12 メンバーとなる。

¹⁰ 24 メンバーで、1 日 4 回 60 時間予報を実行していた。

¹¹ 仕様は執筆時点で得られた情報によるおおよその値である。

¹² フランス付近での水平格子間隔は約 10 km である。

¹³ DWD の ICON (Icosahedral Nonhydrostatic Model)、ECMWF の IFS (Integrated Forecast System)、NCEP の GFS、気象庁の GSM (Global Spectral Model)。

初期値、側面境界値として用い、COSMO モデルによりダウンスケーリングを行う。

さらに、BC-EPS のアンサンブル摂動を COSMO-DE の解析値に加えて、COSMO-DE-EPS の初期値が生成される。予報モデルの不確実性の表現として、物理過程のパラメータに 5 通りの摂動を用いており、これと BC-EPS の 4 通りの初期値・側面境界値摂動との組み合わせにより、COSMO-DE-EPS の 20 メンバーが生成される。

(5) カナダ

Environment Canada では、2011 年より、領域 EPS REPS (Regional Ensemble Prediction System) を運用している (Charron et al. 2011; Erfani et al. 2013)。REPS では、北米域を対象として水平格子間隔 15 km、鉛直層数 48 層、21 メンバーの 72 時間予報を 1 日 2 回 (00, 12UTC) 実行する。初期値、側面境界値は全球 EPS GEPS (Global Ensemble Prediction System: Gagnon et al. 2013a,b) の初期値、予報値を用い¹⁴、予報モデル GEM (Global Environmental Multi-scale model) の領域モデル版によるダウンスケーリングを行っている。また、予報モデルの不確実性の表現として SPPT¹⁵ を導入している。

(6) イタリア

イタリアの地方機関 ARPA-SIMC は、COSMO-LEPS (COSMO Limited-Area Ensemble Prediction System) を 2005 年より運用している。COSMO-LEPS は、欧州域を対象とする水平格子間隔 7 km、鉛直層数 40 層、16 メンバーの領域 EPS である。ECMWF メンバー国による定時実行のアプリケーションとして、ECMWF の計算機で 1 日 2 回 (00, 12UTC)、132 時間予報が実行される (Marsigli et al. 2001, 2005; Montani et al. 2003, 2008, 2011)。COSMO-LEPS では、ECMWF 全球 EPS の、COSMO モデルによるダウンスケーリングを行う。初期値、側面境界値は、ECMWF 全球 EPS からクラスター解析に基づいて選ばれたメンバーの予報値である (Molteni et al. 2001)。モデルの不確実性の表現として、メンバーによって 2 つの異なる積雲対流スキームを用いている (Tiedtke スキーム、IFS-Bechtold スキームをそれぞれ半数ずつのメンバーに適用する)。

4.2.3 諸外国の今後の動向

WGNE の領域 EPS のレビュー¹⁶ では、現業領域 EPS について以下の通りまとめている。

- 各気象機関で運用する決定論的領域モデルと同程度かやや粗い水平格子間隔としている。
- いくつかの気象機関では将来の現業化に向けて研究的な運用や試験運用を行っている。
- アンサンブル同化の研究が多くの気象機関で進められている。
- ほとんどの気象機関でモデルの不確実性を取り込むための開発が進められている。
- 側面境界値の与え方は気象機関により様々である。

EWGLAM ミーティングでは、UKMO (現時点では決定論のシステムよりも粗い分解能を用いている) から決定論システムと同じ水平格子間隔 (1.5 km) とする検討を行っていることが報告された。

初期値の与え方は大別して 2 種類ある。UKMO, Météo-France, DWD ではダウンスケール (決定論的 全球モデルまたは全球 EPS から) による手法を採用しているのに対し、当庁と米国では初期摂動をダウンスケールに依らない手法で与えている。特徴的なのは DWD であり、DWD, ECMWF, NCEP、気象庁の決定論的 全球モデルの予測を用いて複数の初期値を作成する手法を採用している。

また、モデルの不確実性への対応が気象機関により大きく異なっていることが特徴として挙げられる。SPPT、複数の物理過程を併用する手法、物理過程のパラメータとして異なるものを用いる手法等がある。現時点ではこのように複数の手法が採用されているが、今後の動向として、多くの気象機関で SPPT の導入・改良に向けた開発を行っている。当庁でも SPPT の導入に向けた基礎調査を行っている (第 4.3 節)。

陸面や海面水温といった下部境界条件もアンサンブルの予測に影響を与えることから、この不確実性について考慮することが必要である。表 4.2.1 にまとめた気象機関では Météo-France のみが下部境界条件の不確実性の対応として、海面水温、土壌水分、積雪、地形に対する摂動を与えている。EWGLAM ミーティングで得た情報によると、今後の動向として、DWD を中心とする COSMO コンソーシアムと UKMO で土壌水分摂動を、北欧を中心とする HIRLAM コンソーシアムでは下部境界条件の摂動として、土壌水分、アルベド、海面水温に摂動を与える手法を開発するとともに、運動量・熱・水蒸気フラックスに摂動を与える手法 (前述のモデルの不確実性への対応とも見ることが出来る) の調査を行っている。中欧を中心とする LACE コンソーシアム (予報モデルは Météo-France を中心とする ALADIN コンソーシアムと共用) では陸面過程の SPPT をそれぞれ開発中であることが報告された。

¹⁴ GEPS は 21 メンバーの全球 EPS であり、初期値は EnKF (Ensemble Kalman Filter: Houtekamer et al. 2014) により生成される。

¹⁵ Environment Canada による手法の名称は PTP (physics tendency perturbations: Erfani et al. 2013; Charron et al. 2010) である。

¹⁶ http://polar.ncep.noaa.gov/conferences/WGNE-30/pdfs/day1/15b-EPS_jishida.pdf

当庁でも下部境界条件の不確実性の考慮の必要性について認識しており、第 4.3 節で簡潔に述べられている。

当庁における MEPS の運用目的（半日から 1 日程度先の大雨、暴風等予測の利用）と諸外国の気象機関における目的が必ずしも同じとは限らないため、本節で述べた海外気象機関における手法がそのまま当庁で利用できるとは限らない。しかし、当庁の目的に応じて問題点の把握・改良を行っていく際に、他機関の動向はおおいに参考になると思われる。なお、紙幅の関係もあり、検証手法・プロダクト・ユーザとの連携に関する海外の動向について述べなかったが、これらの情報も入手しており、今後の開発の参考にしていきたい。

参考文献

- Anderson, J. L., 2001: An Ensemble Adjustment Kalman Filter for Data Assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884–2903.
- Anderson, J. L., 2003: A Local Least Squares Framework for Ensemble Filtering. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 634–642.
- Anderson, J., T. Hoar, K. Raeder, H. Liu, N. Collins, R. Torn, and A. Avellano, 2009: The Data Assimilation Research Testbed: A Community Facility. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1283–1296.
- Bouttier, F., B. Vié, O. Nuissier, and L. Raynaud, 2012: Impact of Stochastic Physics in a Convection-Permitting Ensemble. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3706–3721.
- Bouttier, F., L. Raynaud, O. Nuissier, and B. Ménétrier, 2015: Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, DOI:10.1002/qj.2622.
- Bowler, N. E., A. Arribas, K. R. Mylne, K. B. Robertson, and S. E. Beare, 2008: The MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 703–722.
- Bowler, N. E., A. Arribas, S. E. Beare, K. R. Mylne, and G. J. Shutts, 2009: The local ETKF and SKEB: Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 767–776.
- Charron, M., G. Pellerin, L. Spacek, P. L. Houtekamer, N. Gagnon, H. L. Mitchell, and L. Michelin, 2010: Toward Random Sampling of Model Error in the Canadian Ensemble Prediction System. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1877–1901.
- Charron, M., R. Frenette, and N. Gagnon, 2011: First Operational Implementation of the Regional Ensemble Prediction System at CMC (REPS 1.0.0). *Canadian Meteorological Centre Technical Note*, 22 p., URL http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/op_systems/doc_opchanges/technote_reps_20111004_e.pdf.
- Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1759–1782.
- Descamps, L., C. Labadie, A. Joly, E. Bazile, P. Arbogast, and P. Cébron, 2015: PEARP, the Météo-France short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1671–1685.
- Du, J. and M. S. Tracton, 2001: Implementation of a Real-Time Short Range Ensemble Forecasting System at NCEP: An Update. *9th Conf. on Mesoscale Processes, Ft. Lauderdale, Florida*, paper P4.9, Amer. Meteor. Soc.
- Du, J., G. DiMego, Z. Toth, D. Jovic, B. Zhou, J. Zhu, H. Chuang, J. Wang, H. Juang, E. Rogers, and Y. Lin, 2009: NCEP Short-Range Ensemble Forecast (SREF) System Upgrade in 2009. *19th Conf. on Numerical Weather Prediction and 23rd Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Omaha, Nebraska*, paper 4A.4, Amer. Meteor. Soc.
- Du, J., G. DiMego, B. Zhou, D. Jovic, B. Ferrier, and B. Yang, 2015: Regional ensemble forecast systems at NCEP. *23rd Conf. on Numerical Weather Prediction and 27th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Chicago, Illinois*, paper 2A.5, Amer. Meteor. Soc.
- Erfani, A., R. Frenette, N. Gagnon, M. Charron, S. Beaugaurd, A. Giguère, and A. Parent, 2013: The New Regional Ensemble prediction System (REPS) at 15 km horizontal grid spacing (from version 1.1.0 to 2.0.1). *Canadian Meteorological Centre Technical Note*, 39 p., URL http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/technote_reps201_20131204_e.pdf.
- Gagnon, N., H. Lin, S. Beaugaurd, M. Charron, B. Archambault, R. Lahlou, and C. Côté, 2013a: Improvements to the Global Ensemble Prediction System (GEPS) from version 3.0.0 to version 3.1.0. *Canadian Meteorological Centre Technical Note*, 38 p., URL http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/technote_geps310_20131204_e.pdf.
- Gagnon, N., X.-X. Deng, P. L. Houtekamer, M. Charron, A. Erfani, S. Beaugaurd, B. Archambault,

- F. Petrucci, and A. Giguère, 2013b: Improvements to the Global Ensemble Prediction System (GEPS) from version 2.0.3 to version 3.0.0. *Canadian Meteorological Centre Technical Note*, 49 p., URL http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/lib/op_systems/doc_opchanges/technote_geps300_20130213_e.pdf.
- Gebhardt, C., S. Theis, P. Krahe, and V. Renner, 2008: Experimental ensemble forecasts of precipitation based on a convection-resolving model. *Atmos. Sci. Lett.*, **9**, 67–72.
- Gebhardt, C., S. E. Theis, M. Paulat, and Z. Ben Bouallègue, 2011: Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries. *Atmos. Res.*, **100**, 168–177.
- Houtekamer, P. L., X. Deng, H. L. Mitchell, S.-J. Baek, and N. Gagnon, 2014: Higher Resolution in an Operational Ensemble Kalman Filter. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1143–1162.
- Kühnlein, C., C. Keil, G. C. Craig, and C. Gebhardt, 2014: The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 1552–1562.
- Marsigli, C., A. Montani, F. Nerozzi, T. Paccagnella, S. Tibaldi, F. Molteni, and R. Buizza, 2001: A strategy for high-resolution ensemble prediction. II: Limited-area experiments in four Alpine flood events. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 2095–2115.
- Marsigli, C., F. Boccanera, A. Montani, and T. Paccagnella, 2005: The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlin. Proc. Geophys.*, **12**, 527–536.
- Molteni, F., R. Buizza, C. Marsigli, A. Montani, F. Nerozzi, and T. Paccagnella, 2001: A strategy for high-resolution ensemble prediction. I: Definition of representative members and global-model experiments. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 2069–2094.
- Montani, A., M. Capaldo, D. Cesari, C. Marsigli, U. Modigliani, F. Nerozzi, T. Paccagnella, P. Patrino, and S. Tibaldi, 2003: Operational limited-area ensemble forecasts based on the ‘Lokal Modell’. *ECMWF Newsletter*, **98**, 2–7.
- Montani, A., C. Marsigli, and T. Paccagnella, 2008: Five Years of Limited-Area Ensemble Activities at ARPA-SIM: The COSMO-LEPS system. *COSMO Newsletter*, **8**, 23–26, URL http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/newsLetters/newsLetter08/cnl8_montani.pdf.
- Montani, A., D. Cesari, C. Marsigli, and T. Paccagnella, 2011: Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges. *Tellus*, **63A**, 605–624.
- Nuissier, O., B. Joly, B. Vié, and V. Ducrocq, 2012: Uncertainty of lateral boundary conditions in a convection-permitting ensemble: a strategy of selection for Mediterranean heavy precipitation events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12**, 2993–3011.
- Peralta, C., Z. Ben Bouallègue, S. E. Theis, C. Gebhardt, and M. Buchhold, 2012: Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS. *J. Geophys. Res.*, **117**, D07108, doi: 10.1029/2011JD016581.
- Schwartz, C. S., G. S. Romine, R. A. Sobash, K. R. Fossell, and M. L. Weisman, 2015: NCAR’s Experimental Real-Time Convection-Allowing Ensemble Prediction System. *Wea. Forecasting*, **30**, 1645–1654.
- Tennant, W. J., G. J. Shutts, A. Arribas, and S. A. Thompson, 2011: Using a Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme to Improve MOGREPS Probabilistic Forecast Skill. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1190–1206.
- 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.
- Tennant, W., 2015: Improving initial condition perturbations for MOGREPS-UK. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 2324–2336.
- Whitaker, J. S. and T. M. Hamill, 2002: Ensemble Data Assimilation without Perturbed Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1913–1924.

4.3 メソアンサンブル予報システムの開発状況¹

4.3.1 はじめに

数値予報課ではメソモデル (MSM: Meso-Scale Model) の予測に対して信頼度・不確実性等の情報を付加することを目的に、メソアンサンブル予報システム (MEPS: Meso-scale Ensemble Prediction System) の開発を行っており、2015年3月24日から部内試験運用を開始した。MEPSの仕様を表4.3.1に示す。部内試験運用は1日1回18UTCを初期時刻として行われている。MEPSにおける予報モデルは気象庁非静力学モデル (JMA-NHM: JMA Non-Hydrostatic Model) であり、その設定は力学過程・物理過程及びこれらのパラメータ全てMSMと同じである。このため、摂動を与えないコントロールラン (以下、CTL) はMSMによる予測値そのものであり、MSMの初期値及び側面境界値に摂動を与えて複数の初期値及び側面境界値を作成してアンサンブル予報を行っている。アンサンブルメンバー数はCTLを含めて11である。初期摂動の作成には特異ベクトル (SV: Singular Vector) 法を採用し (第1.2節参照)、側面境界摂動については週間EPS (第2.2節参照) の直近予測値を利用して算出している。

本節では、MEPSで導入している初期摂動及び側面境界摂動の概要を述べ、MEPSの一般的な性能として部内試験運用開始からおよそ7か月間の統計検証スコアを示す。また、開発中のモデルアンサンブル及び下部境界摂動についてその効果を簡潔に示し、最後に今後の開発について述べる。なお、初期摂動の設計に当たって検討した事項についてはこれまで報告を行っていないため、この節の付録に示した。側面境界摂動については、海外気象機関において用いられる手法のレビューとともに第1.4節にも示してある。

4.3.2 初期摂動

MEPSでは、はじめに(1)気象庁全球モデルに基づく全球SV (GSV: Global SV; 酒井2009参照) 及びJMA-NHMに基づくメソSV (MSV: Meso-scale SV) を計算し、(2)これらのSVの振幅を揃えてから結合することで初期摂動を作成する。さらに初期摂動を(3)MSMの初期値に加減算し、飽和調節を行って複数の初期値を作成する。以下ではこれらの概要を示す。

(1) SVの計算

MEPSでは初期摂動の作成手法に、週間EPSと同じSV法を採用している。しかし、小野(2010)で述べているように、MEPS向けにMSVの算出が可能であるが、得られる摂動が局所的であるため、予報領域全体の不確実性をMSVのみで表現することは難しい。このため、GSVによって総観規模擾乱を対象とするスケ-

ールの大きなSVを、日本付近をターゲットとして週間EPSとは別途計算する。これをベースとして、メソスケールの現象を対象としたMSVを計算し、これらを後述の方法によって結合することで初期摂動を計算している。各SVの設定を表4.3.2に示す。

GSVの計算では、予報時間39時間に対して評価時間を24時間としている。これは予報後半では側面境界値の影響が初期値に対して大きくなることから、初期値において予報期間中盤にかけて総観規模擾乱の予測に感度のある領域を算出することを目的としているためである。また、摂動を評価するノルムには乾燥トータルエネルギー (TE: Total Energy; 第3.2節参照) を用いている²。湿潤TEを用いた場合、GSVによる水蒸気摂動が初期場の広域を一律に加湿あるいは乾燥させるため、事例によっては降水予測に過大なばらつきを与えたり、予報初期のアンサンブル平均予報誤差を悪化させたりする原因となることがわかった。このため、部内試験運用では乾燥TEを用いている。したがって、初期値における水蒸気場の不確実性については、MSVから計算される摂動によって考慮している。

MSVについては、小野(2010)で述べた計算設定から大きな変更はない。メソ β スケール以上の現象を対象とした水平格子間隔40km・評価時間6時間によるMSV (以下、MSV40)、メソ α スケール以上の現象を対象とした水平格子間隔80km・評価時間15時間のMSV (以下、MSV80) をそれぞれ計算することで、メソスケールの現象の予測に感度のある摂動を求めている。

(2) 初期摂動の計算

算出されたSVは、その振幅を調整した後にバリエーションミニマム法 (VM: Variance Minimum; Yamaguchi et al. 2009など参照) によって線形結合し初期摂動を計算する。SV法から得られる摂動は第1.2節で述べられているように、初期値に与える前にその振幅を決定する必要があり、そのための倍率を何らかの手段によって求める必要がある。理想的には日々の流れに応じた倍率を動的に決定すべきであるが、初期値に含まれる誤差についての客観的な情報を得ることは困難であるため³、斉藤ほか(2008)を参考とした静的な基準値等を基に調整している。具体的には、まず算出されたSVの絶対値の領域平均が基準値⁴となるように倍率をいったん求める。次に、この倍率を乗じたSVの

² ノルムとは長さの概念の一般化であり、その定義 (数学書参照) を満たせば様々な指標がノルムとなる。TEもこの定義を満たすためノルムとなる。なお、MEPSにおけるGSVの計算には熱帯SV (酒井2009) を用いており、基本場の計算では水蒸気を考慮する。一方で、SVを評価するノルムには水蒸気摂動を考慮しない乾燥TEを用いており、このためGSVから算出される水蒸気摂動は0となる。

³ アンサンブルカルマンフィルタなどでは、初期場の不確実性を反映した振幅を持つ摂動が得られる。

⁴ 風1.8 m/s、温位1 K、水蒸気0.001 kg kg⁻¹。

¹ 小野 耕介

表 4.3.1 MEPS 部内試験運用の仕様

運用開始	2015 年 3 月 24 日より	
実行頻度 (初期時刻)	1 日 1 回 (18UTC)	
予報期間	39 時間	
予報モデル	名称	JMA-NHM
	水平分解能・鉛直層数	5 km, 48 層
初期値	大気	メソ解析値
	陸面	地中温度第 1・2 層は予測値、地中温度第 3・4 層及び土壌水分 (体積含水率) は気候値
	海面	全球海面水温解析値及び北半球海水解析値
境界値	陸面	地中温度は熱伝導方程式、体積含水率は強制復元法により予測
	海面	初期値に固定
アンサンブル手法	初期摂動	SV 法
	モデル摂動	なし (開発中)
	境界摂動	側面境界摂動は週間 EPS 予測値から計算、下部境界摂動はなし (開発中)
メンバー数	11 (CTL を含む)	

表 4.3.2 SV 計算の仕様 (予報変数の太字は摂動として用いる変数)

	MSV40	MSV80	GSV
水平格子間隔	40 km	80 km	T63 (およそ 180 km)
鉛直層数	38	同左	40
予報変数	運動量水平成分、鉛直成分、気圧、温位、水蒸気	同左	水平風、気温、水蒸気、地上気圧
評価時間	6 時間	15 時間	24 時間
ノルム	湿潤 TE	同左	乾燥 TE
水平ターゲット	東経 125-145 度、北緯 25-45 度	同左	同左
鉛直ターゲット	水蒸気: モデル面 2-15 層 (高度 2900 m まで) 水蒸気以外: 同 2-20 層 (同 5300 m まで)	同左	同 20 層 (同 9000 m) まで
算出数	10	同左	20

振幅が過大とならないよう、あらかじめ定めた上限値⁵を超えるか確認し、上限値を越えた場合は倍率を修正する。以上によって倍率が決定され、SV に乗じられる。基準値及び上限値は、予報初期のアンサンブル平均予報誤差とアンサンブルスプレッドの大きさが概ね合うように調節している⁶。

SV の結合に VM 法を用いる理由のひとつは、局在化した個々の SV を空間的にばらつくよう結合して初期摂動を作成できることである。別な理由として、GSV

⁵ 風 6 m/s、温位 4 K、水蒸気 0.006 kg kg⁻¹。

⁶ 具体的には図 4.3.1 における FT=3 を参考としている。ただし、SV は局在化する性質があるため、GSV を用いても初期摂動は予報領域全体を覆いきれない。このため、誤差と比べてスプレッドが若干小さいことが妥当であると考えられる。

及び MSV は直交していないため単純な加算によって結合すると、両 SV が同符号の格子点ではその振幅が局所的に大きくなる一方、異符号の格子点では振幅が局所的に小さくなってしまふことが挙げられる。VM 法による線形結合係数を用いることで、このような不自然な分布を緩和することができる。

(3) 複数の初期値を作成

以上のプロセスを経て計算された初期摂動を MSM の初期値に加算あるいは減算し、飽和調節⁷を行って

⁷ 摂動を与えた水蒸気が飽和水蒸気量を上回った場合はその分を取り除き、負となった場合は 0 とするよう調節を行う。特に過飽和の除去は、予報の最初のステップにおける急な凝結及びそれに伴う潜熱による加熱を抑制する。

複数の初期値が作成される。なお、MEPS ではアンサンブルメンバー数が CTL を含め 11 であり、SV 法では摂動を加減算してアンサンブルメンバーを構成するため、初期摂動は 5 つ作成する必要がある。MEPS では摂動を加えたメンバーを 1~5 番、減じたメンバーを 6~10 番とし、1 番と 6 番、2 番と 7 番...が正負対のメンバー（初期時刻では摂動の空間パターンが同じで符号が異なる。図 4.3.13 参照。）となる。

4.3.3 側面境界摂動

領域 EPS では、側面境界値に対する不確実性を考慮することは予報時間の経過とともに重要となる。MEPS では、利用可能な直近初期時刻の週間 EPS による気圧面予測値から側面境界摂動を作成している。側面境界摂動の効果は第 1.4 節で述べられているので、ここでは作成の概要を述べる。

表 4.3.3 に側面境界摂動に用いる週間 EPS 気圧面予測値データの概要を示す。週間 EPS の初期時刻は毎日 00・12UTC であるが、MEPS の部内試験運用における初期時刻は 18UTC であるため、週間 EPS の初期時刻 12UTC の予測値を用いている。摂動計算は週間 EPS の 27 メンバーのうち正摂動⁸の 13 メンバーを用いる。メンバーの選択においては、予報期間を通して MEPS 予報領域において摂動の TE が大きい 5 メンバーを選択し、TE が大きい順に MEPS のメンバー 1~5 に加えるとともにメンバー 6~10 に減じることで、複数の側面境界値を作成する。

また MEPS と週間 EPS では初期時刻が異なっており、側面境界値は MEPS の予測時間と比べて誤差は大きくなっている。このため、MEPS の初期時刻に対応した誤差の大きさに合わせるよう摂動の振幅を調整（小さく）する。調整にあたって、日本付近の場の不確実性を考慮できるよう週間 EPS の MEPS 予報領域の 500 hPa ジオポテンシャル高度を用いて、予報時間毎に調整を行っている⁹。

4.3.4 メソアンサンブル予報システムの性能

この項では、MEPS の部内試験運用が始まった 2015 年 3 月 24 日 18UTC から 2015 年 10 月 31 日 18UTC 初期値までの全 222 予報を基にした統計検証結果を示す。はじめに、アンサンブル予報の精度検証で一般的に行われるアンサンブル平均予報誤差及び降水確率検

⁸ MEPS で利用する週間 EPS 予測値は最大でも初期時刻から 51 時間後までであり、格納されているデータは解像度が低い場合スケールの小さい情報は含まない。したがって、この間の摂動の時間発展は非線形性が大きくないと考えられ、正摂動でも負摂動でも加減算することで、結果的に概ね同じパターンとなるため正摂動を用いている。

⁹ ただし、側面境界値には初期時刻が 6 時間前の GSM 予測値を利用しており、MEPS 初期時刻における側面境界値は 6 時間予測値である。このため、すでに側面境界値の不確実性は初期値と比較して大きくなっており、振幅調整は GSM と週間 EPS の初期時刻とのずれを基に検討する必要がある。

表 4.3.3 側面境界摂動の計算に用いる週間 EPS 予測値の概要

水平格子間隔	1.25 度 (約 125 km)
鉛直層数	10 層 (1000-100 hPa)
用いる要素	東西風、南北風、気温、水蒸気
初期時刻	00 及び 12UTC

証を示す。次に、MEPS の予測結果の利用においては、CTL と個々のアンサンブルメンバーの比較も行われるため（後述）決定論検証を基にした CTL とアンサンブルメンバーの降水精度比較を示す。

(1) アンサンブル予報の検証

ここでは、対解析値（MSM 初期値）高層及び地上観測値を真値とした CTL とアンサンブル平均予報との誤差の比較、アンサンブル平均予報誤差とアンサンブルスプレッド（以下、スプレッド）の比較を行う。また、解析雨量を基にした 3 時間降水量の確率予報検証を示す。

図 4.3.1 に解析値に対する CTL 及びアンサンブル平均予報の平方根平均二乗誤差 (RMSE)、スプレッドの各高度の平均値の時系列を示す。はじめにアンサンブル平均予報誤差に着目すると、海面更生気圧 (Psea) 及びジオポテンシャル高度 (Z) を除き、予報時間の経過とともに CTL より減少する傾向がある¹⁰。Z 及び Psea に改善が見られない原因は未調査である。次にスプレッドに着目すると、予報時間の経過とともにアンサンブル平均予報誤差と比べて小さくなる。この理由は、メンバー数が 11 であること¹¹、側面境界摂動の振幅調整が不十分なこと、予報モデルに起因する誤差を考慮していないことなどが考えられる（モデルアンサンブルの効果は次項で示す）。その他、500 hPa において、風及び気温の予報初期のスプレッドが誤差と比べて過大な傾向がある。上空では GSV 成分のみによって初期値の不確実性を考慮しており、上空における GSV の振幅抑制の必要性を示唆している。

図 4.3.2 に FT=30 (09JST) における高層観測値に対する検証結果を示す。ここでは RMSE に加え平均誤差も併せて示した。図 4.3.1 と同様に、気温・風速・相対

¹⁰ FT=0 において、Z のアンサンブル平均予報誤差は CTL より大きい。これは、高度の積み上げ計算時の仮温度計算において、飽和調節によって正摂動メンバーと負摂動メンバーの対称性が崩れるため、アンサンブル平均の Z は CTL と一致せず悪化したためである。

¹¹ 小野 (2013) はメンバー数を 11 から 21 メンバーとすることでスプレッドが微増するが、それ以上では増加しないことを報告している。また、NCEP の全球 EPS による調査ではスプレッドのメンバー数依存性は小さいことが報告されている (Ma et al. 2012)。なお、降水確率予測精度については、メンバー数増強の効果は 30 程度まで大きく、それ以上増やしても改善幅は小さいことが報告されている (小野 2013 や Schwartz et al. 2014 など)。

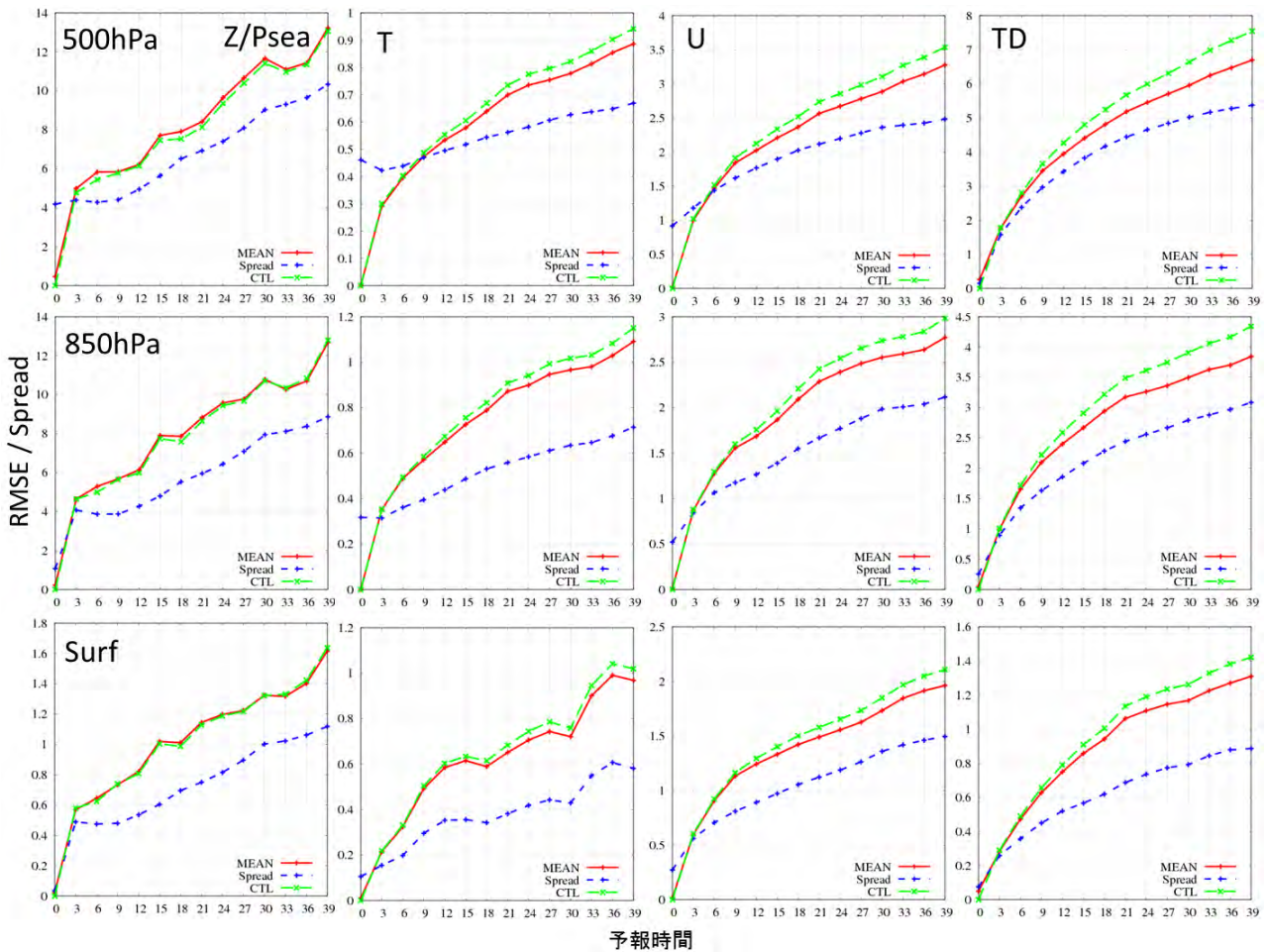


図 4.3.1 解析値に対する CTL (緑線) 及びアンサンブル平均予報 (赤線) の RMSE 及びスプレッド (青線) の時系列。左列からジオポテンシャル高度 [gpm] (最下段は海面更正気圧 [hPa])、気温 [K]、東西風 [m/s]、露点温度 [K] であり、上段から 500 hPa、850 hPa、地上 (風は高度 10 m、気温及び露点温度は高度 1.5 m)。横軸は予報時間を表す。

湿度においては、アンサンブル平均予報が CTL を改善するが、ジオポテンシャル高度については、若干の改善が見られるものの改善幅は小さい。

図 4.3.3 に地上観測値に対する検証結果を示す。MEPS では大気上層ほど初期摂動の振幅は小さく¹²、下部境界値にも摂動を与えていないため、予報初期からスプレッドは過小である。このため、CTL に対するアンサンブル平均の改善幅も予報前半ほど小さい。また RMSE 及びスプレッドには、日変化に対応した変化が見られる¹³。

次に、3 時間積算降水量に対する降水確率検証とし

て、ブライアスキルスコア (BSS: Brier Skill Score) を図 4.3.4 に示す。検証は MSM の降水検証 (草開・森安 2013) 同様に、検証格子 20 km における 3 時間積算降水量の平均値について行った。検証領域は全国を対象としている。

図 4.3.4 に各閾値における BSS の時系列を示す。弱い降水では予報時間とともに精度が徐々に悪化することがわかる。一方、強い降水ほど FT=12 及び 36 を中心に精度が悪化している。これは 15JST に対応し夏季日中の不安定降水の予測精度が影響している可能性がある。また、気候値予測では BSS が 0 となるため、アンサンブル予報が価値を持つためには BSS が 0 以上であることが基準となる。この観点では、予報期間を通して閾値 20 mm/3h までの降水に対して MEPS は気候値予測と比べて有効な予測であることがわかる。より強い降水では、30 mm/3h まで BSS が 0 以上の予測時間があるものの、50 mm/3h では予測時間のほぼ全体で気候値予測より有用な予測が難しいことがわかる。ただし、50 mm/3h の予測においても、台風のように強雨域が比較的大きな現象の予測に支配される事例に

¹² このことは図 4.3.1 の FT=0 における各高度のスプレッドを比較すると下層ほど小さいことからわかる。これは得られる SV の振幅が下層ほど小さいためである (図 4.3.16 左も参照)。

¹³ 解析値に対する検証 (図 4.3.1 下段) とは異なり予報誤差は初期時刻から大きい。この理由として、同化において気温・風・相対湿度の地上観測値は利用していないこと (永戸 2015)、モデルでは格子平均値を予測し観測点への内挿及び高度補正を行っても観測値からは乖離することなどが考えられる。

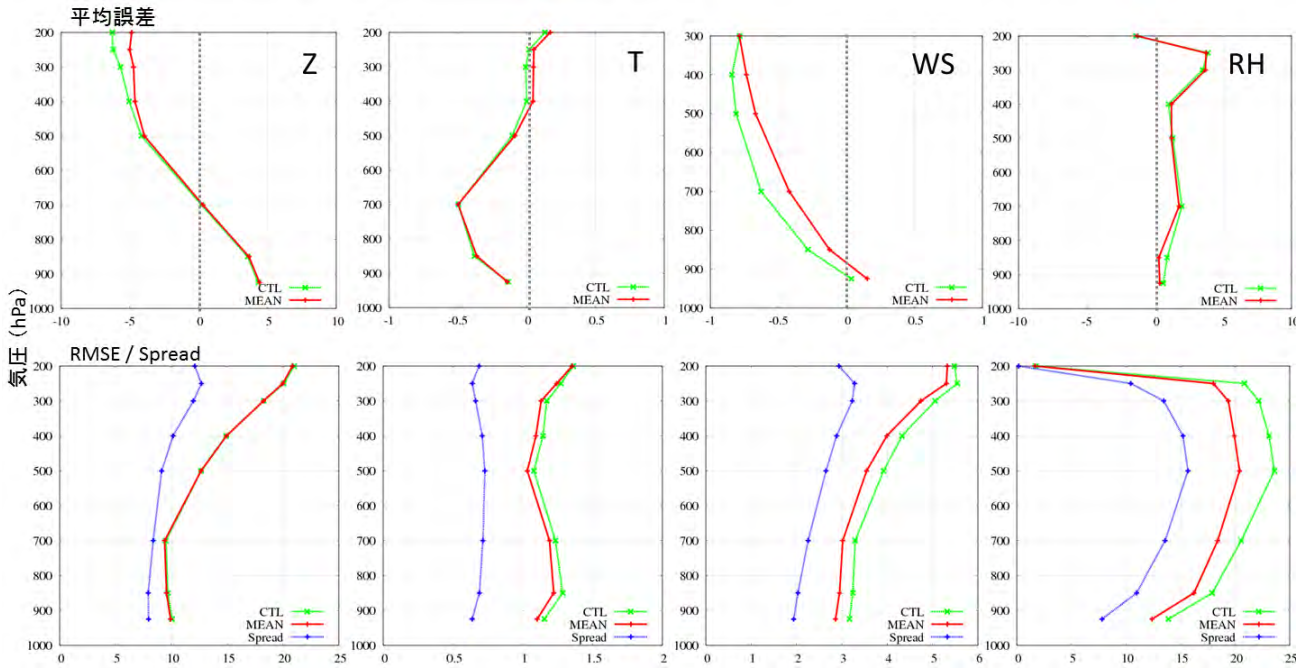


図 4.3.2 高層観測値に対する CTL (緑線) 及びアンサンブル平均予報誤差 (赤線) であり、上段が平均誤差、下段が RMSE 及びスプレッド (青線)。左列からジオポテンシャル高度 [gpm]、気温 [K]、風速 [m/s]、相対湿度 [%]。いずれも FT=30。

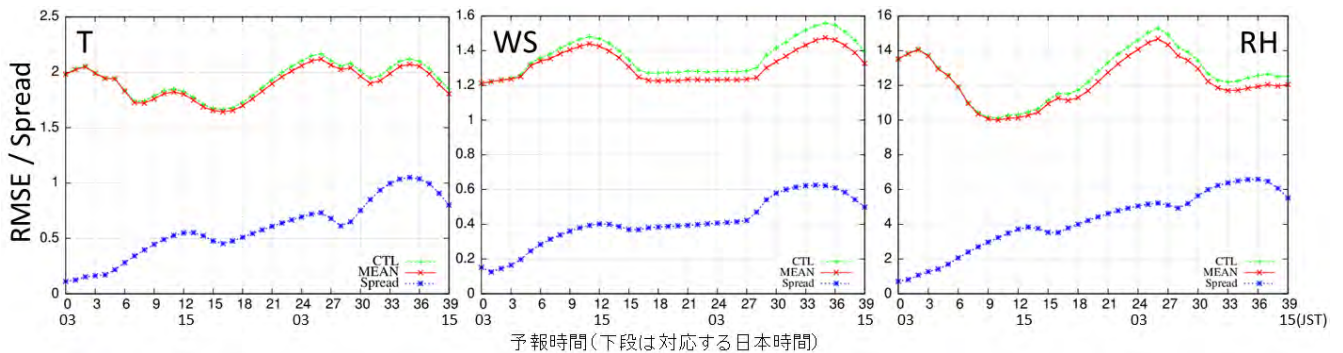


図 4.3.3 地上観測値に対する CTL (緑線) 及びアンサンブル平均予報 (赤線) の RMSE 及びスプレッド (青線) の時系列。左から気温 [K]、風速 [m/s]、相対湿度 [%]。横軸は予報時間を表す。

限定して検証を行うと、BSS が 0 を上回ることもあった (図略)。

(2) コントロールランと各メンバーの降水予測精度の比較

これまで述べたようにアンサンブル予報の検証では、アンサンブル平均予報誤差とスプレッドの検証、着目したい現象における確率予報の精度検証が行われるのが一般的である。一方、短期予報ではアンサンブルメンバーを決定論的予測とは異なるシナリオと見なす使い方の要望も大きい¹⁴。このような目的のためには、

¹⁴ 例えば、低気圧の進路が CTL と異なる場合のシナリオの想定、災害をもたらす現象が想定される場合の CTL より悪い予測の想定、あるいは CTL より実況に近い予測をするメンバーによってシナリオを代替する場合などである。具体的

CTL と各アンサンブルメンバーの精度比較を示すことが MEPS の利用可能性を広げるにあたっての基礎資料となる。ここでは 3 時間降水量のスレットスコア (TS: Threat Score) を CTL と各メンバーで毎初期値計算し、222 初期値で比較した結果を示す。なお、降水検証方法は降水確率検証と同様である。

はじめに、CTL 及び各メンバーの TS を図 4.3.5 に示す。また、参考としてアンサンブル平均予報の TS も示した。各メンバーは CTL より最大 0.05 程度劣ることがわかる。これは、各メンバーの初期値及び境界値には観測等の情報を持たない摂動を与えるためと考え

なシナリオに各メンバーの予測結果を用いることが想定される。

られる¹⁵。また、アンサンブル平均では弱い降水では CTL を改善し、強い降水では悪化していることがわかる¹⁶。

図 4.3.5 のように、期間平均を取ると各メンバーの精度は CTL より劣るが、特定初期値の特定予報時間という条件を課すと、CTL の TS を上回るメンバー（以下、改善メンバー）が存在し得る。そこで、予報時間毎に少なくとも 1 つでも改善メンバーがあった事例を抽出した（図 4.3.6 上）。この図より、弱い降水ほど改善メンバーがあった事例が多いことがわかる。また予報時間別に見ると、FT=3 では改善メンバーがあった事例が少ない。1 mm/3h から 15 mm/3h までの降水では、FT=6 以降の事例数は予報時間によらず一定である。それより強い雨では、予報時間とともに事例数が減少する傾向がある。なお、50 mm/3h の強い降水においても、10 事例前後で改善メンバーが存在する事例があることもわかる。

上記で抽出した事例において、改善メンバー数の平均値を示したのが図 4.3.6 下である。1 mm/3h から 15 mm/3h までの降水では、予報時間によらず、平均 3 メンバー前後の改善メンバーがある。また 20 mm/3h 以上の強い降水では、予報時間とともに改善メンバー数が徐々に減少するが、50 mm/3h の強雨でも予報期間を通して改善メンバー数は 2 程度はあることがわかる。

図 4.3.7 に CTL 及び改善メンバーの TS の平均及び改善メンバーの中の最大値の事例平均を、バイアスコア (BI: BIas score) とともに示す。CTL の TS は強雨ほど悪化するが、改善メンバーの TS の平均及び最大は閾値によらず 0.2 程度であることがわかる。一方で、改善メンバーの BI は CTL より大きく、過大な降水予測が的中率を上げる傾向にあることがわかる。

以上の結果は予報時間毎に比較した結果であるため、引き続き予報時間においても同一の改善メンバーが CTL を上回るとは限らない。そこでシナリオとしての価値を測るため、図 4.3.6 で抽出した改善メンバーにおいて、その後の予報時間においても引き続き CTL の TS を上回るメンバー数がいくつかを求め、平均したものを図 4.3.8 に示す。この図は予報時間ごとに CTL を上回るメンバーをまず見つけ、その 3 時間後に何メンバーが引き続き CTL を上回っているかを示したものである¹⁷。全体にグラフは右肩下がりであり、同一の

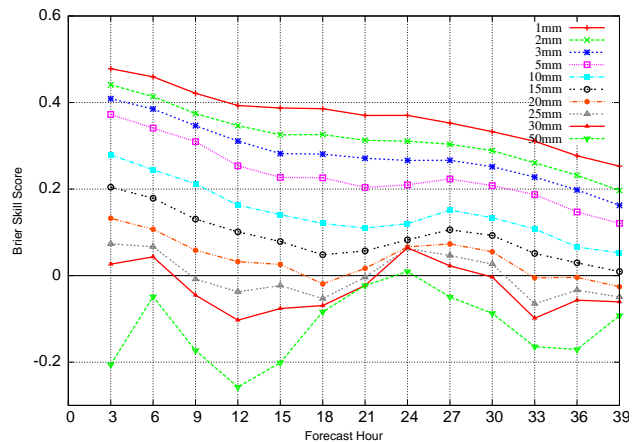


図 4.3.4 3 時間積算降水量の閾値別のブライアスキルスコア。横軸は予報時間を表す。

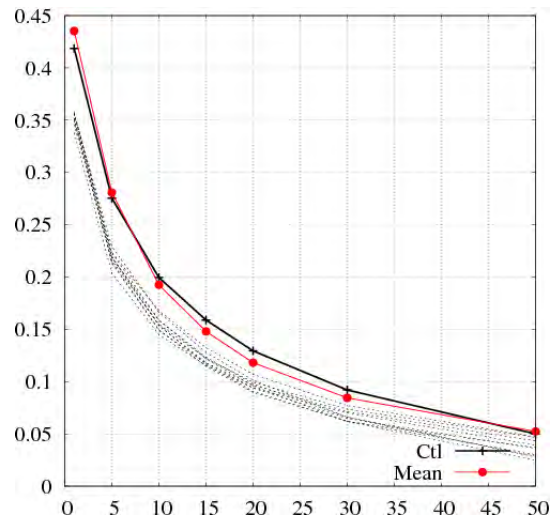


図 4.3.5 予報期間平均した 3 時間積算降水量のスレットスコア。黒実線が CTL、赤実線がアンサンブル平均予報、黒破線が各メンバーのスコアを表す。横軸は閾値 [mm/3h]。

改善メンバーが CTL を上回りつづける時間が短いことがわかる。また弱い降水では、6 時間後も CTL を上回り続けているメンバーがあるが（1 mm/3h の予報期間の後半など）、強い降水、特に 30 mm/3h の降水では平均すると 3 時間後には CTL をすぐ下回り、継続時間が短いことがわかる。

このように事例平均を取ると、CTL を長い時間上回り続けるメンバーは非常に少ないことがわかる。一方で、事例別に見ると特定メンバーが比較的長い時間 CTL を上回り続けることもある。図 4.3.9 に初期値ごとの、改善メンバー中の CTL を上回る最大継続時間を、閾値 30 mm/3h について示す。初期値によっては、12 時間以上 CTL を上回るメンバーが存在することが

より悪化した場合、改善が途切れたものとし、さらにその後の予報時間で再び CTL を改善した場合は、後の予報時間における改善メンバーとした。

¹⁵ また、MEPS では初期時刻毎に摂動を計算しており、モデルアンサンブルも考慮していない。このため、特定メンバー（例えばメンバー 1 と 6 だけ、など）がある特徴を持つといったことはないため、メンバー間の差が小さいと考えられる。一方、海外センターのようにメンバー毎に異なる物理過程あるいはパラメータを用いる場合は、メンバー間で異なる特徴が現れ得る。

¹⁶ これはアンサンブル平均によって弱い降水では CTL の頻度過小を改善する一方、強い降水では頻度過小となるためと考えられる。なお、50 mm/3h については CTL とほぼ同等であった。

¹⁷ なお、改善メンバーがその後の予報時間でいったん CTL

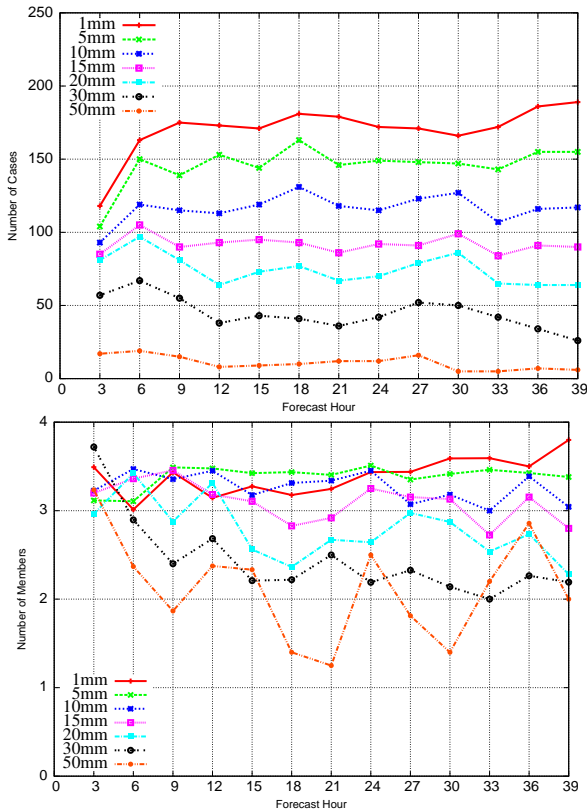


図 4.3.6 各予報時間における改善メンバーが少なくとも 1 以上だった事例数 (上) 及び改善メンバー数の平均値 (下)。横軸は予報時間。

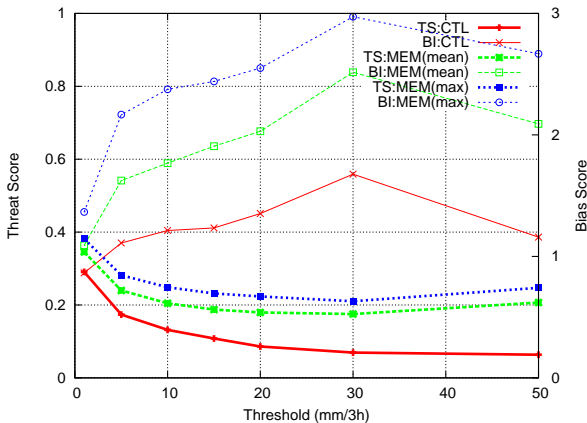


図 4.3.7 改善メンバーにおける TS の平均値及び最大値の事例平均値 (左縦軸)、及び BI (右縦軸)。横軸は閾値 [mm/3h]。

わかる。このことから、継続的に CTL より良い表現をするメンバーの出現は事例に依存するため、これを如何に抽出するかが今後の課題である。

4.3.5 その他の開発

(1) モデルアンサンブル

数値予報モデルに起因する誤差の起源は様々であり、そのため多種多様なモデルアンサンブル手法が提案さ

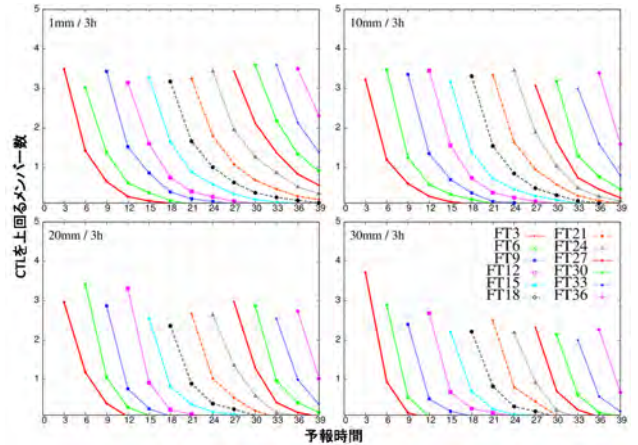


図 4.3.8 各予報時間において、CTL の TS を上回ったメンバーが引き続き予報時間においても上回り続けるメンバー数を、降水量閾値 1, 10, 20, 30 mm/3h について示す。横軸は予報時間。

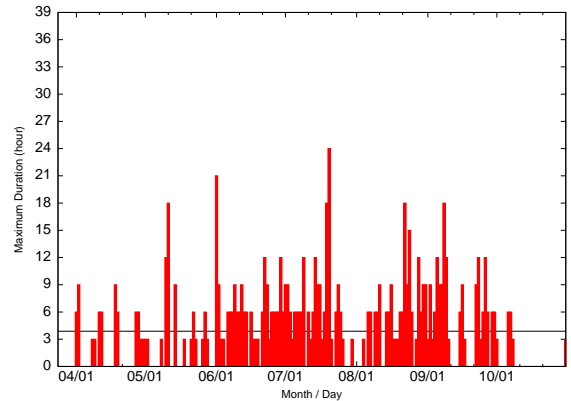


図 4.3.9 各初期値において、改善メンバー中の最大継続時間 (棒グラフ) 及びその平均値 (黒線、平均 3.9 時間)。ただし、TS の閾値 30 mm/3h から算出。縦軸が継続時間であり、横軸は初期時刻の日付を表す (初期時刻は全て 18UTC)。

れている (米原 2009 や山口 2013 参照)。領域 EPS においてもモデルアンサンブル手法についての調査が多数あり、Berner et al. (2015) は多数のモデルアンサンブル手法による精度比較を行い、確率的物理過程強制法 (SPPT: Stochastically Perturbed Physics Tendencies) が最も良いインパクトがあること、また複数の手法を複合することでさらに予測精度が向上することを示している¹⁸。

MEPS では、物理過程の不確実性を考慮するランダムパラメータ法及び SPPT による基礎調査を行っており (Ono 2012, 2014)、本項では SPPT の効果及びその課題を簡潔に述べる。なおこれら 2 手法を選択した理由は、導入が比較的簡便であり、SPPT については週

¹⁸ 一方、Kunii et al. (2011) では複数の物理過程を用いる場合、スキームの選択によっては予測精度が悪化することを報告しており、手法の選択には慎重な検討が必要である。

表 4.3.4 SPPT において摂動を与えた各過程からの時間変化率

境界層	運動量、温位、水蒸気
放射	温位
雲物理	温位、水蒸気
積雲対流	温位、水蒸気

間 EPS を含め海外センターにおいても実績があるためである。なお、フランス気象局の領域 EPS では SPPT が導入されている (Bouttier et al. 2012, 2015)。

調査を行った SPPT では、JMA-NHM の物理過程のうち境界層、放射、雲物理、積雲対流の各過程から毎タイムステップ計算される時間変化率 (表 4.3.4 参照) に以下のような形の摂動を与えた (予報変数 ϕ の力学過程及び物理過程からの時間変化率をそれぞれ $F(\phi)_{dyn.}$ 及び $F(\phi)_{phys.}$ 、摂動 r とする)。

$$F(\phi) = F(\phi)_{dyn.} + (1 + r)F(\phi)_{phys.}$$

摂動は、平均 0、標準偏差 0.1 のガウス型 (ただし上下限は ± 1) の乱数を基に空間スケール 1000 km 程度、時間スケール数時間程度の相関を与えて作成し、鉛直方向には一様とした。実験は 2014 年 7 月の 11 初期値について行った。

図 4.3.10 に 3 時間降水量の BSS 及び高層観測値によるランクヒストグラムを示す。この図より、風速及び相対湿度について予報のばらつき方が改善するとともに、3 時間降水量の BSS も全閾値において改善することがわかる。一方、気温については負バイアスが生じており、アンサンブル平均の RMSE も悪化している (図略)。

このように、SPPT は気温を除くアンサンブル平均予報及び降水確率予報に対して良い効果があることを確認している。一方で、下層気温の負バイアスについては原因を特定できていないため、SPPT の MEPS への導入は現在のところ見送っている。

(2) 下部境界摂動

地上観測値による統計検証結果 (図 4.3.3) では、下部境界値に摂動を与えていないが、アンサンブル平均予報誤差は CTL と比べて予報中盤以降改善することがわかる。これは大気側の不確実性が地上要素に反映されたためである。その一方、予報前半ではスプレッドが過小であり、アンサンブル平均による改善も小さい。したがって、下部境界値の不確実性を直接考慮することで、予報前半における地上要素の予測精度を改善できる可能性がある。

下部境界摂動については、近年領域 EPS においても研究が行われている。Lavaysse et al. (2013) 及び Tennant and Beare (2014) は、領域 EPS における下部境界要素に摂動を与えて、地上要素のスプレッド過

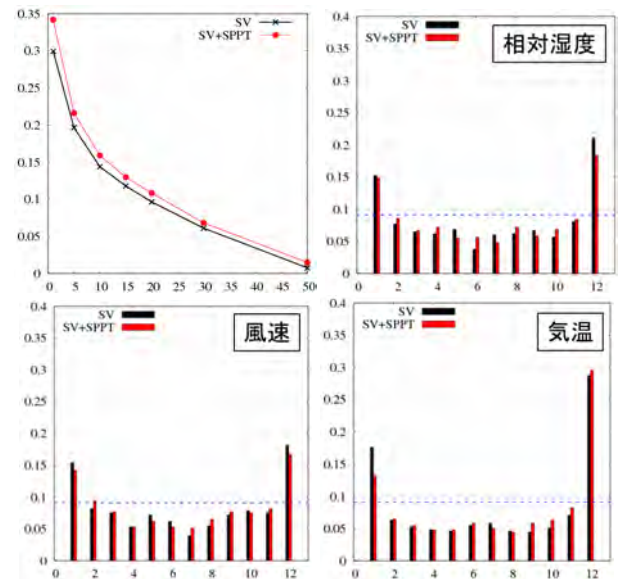


図 4.3.10 予報期間平均した 3 時間降水量の BSS (左上、横軸は閾値 [mm/3h]) 及び FT=30 における 850 hPa の高層観測に対するランクヒストグラムであり、相対湿度・風速・気温を示す。「SV」と表記したものが初期及び側面境界摂動のみを用いた実験であり、「SV+SPPT」が SPPT を導入した実験である。

小改善にインパクトがあること、土壌水分や海面水温の摂動の重要性を報告している。

JMA-NHM では、下部境界要素の地中温度を熱伝導方程式、土壌水分の体積含水率を強制復元法で予測しており、初期値はそれぞれ予報-予報サイクル及び気候値から作成している (原 2008)。地中温度及び体積含水率は大気下部境界条件である地表面フラックスを決める重要なパラメータであり、ともに下層大気の予測に影響を与え、地上要素の予測に大きな影響を持つ。また、夏季日中に生じる熱的不安定による降水予測にも影響を与え得る。

このため下部境界摂動の基礎調査として、成長モード育成法 (第 1.2 節参照) によって地面温度及び土壌水分へ摂動を与えた結果を簡潔に示す¹⁹。アンサンブル予報初期値は関東地方で対流雲が発達した 2014 年 7 月 23 日 18UTC とした。

図 4.3.11 に下部境界摂動及び FT=18 における地上気温のアンサンブルスプレッドを示す。スプレッドより、この事例では下部境界摂動の効果は陸上に限定されることがわかる。また摂動の効果は予報中盤にかけ

¹⁹ 摂動育成サイクルは初期時刻の 36 時間前から 12 時間サイクルで行い、サイクル初期には乱数を与えた。なお、この 12 時間予報は MEPS (初期値及び側面境界摂動有り) に下部境界摂動を加えたものである。また、サイクル 2 回目以降の体積含水率初期値は予報-予報サイクルとし、サイクル毎に摂動の直交化及び振幅調整を行っている。なお摂動の振幅は、地中温度が 0.5 K (上限値 1.5 K)、体積含水率が 0.2 (上限値 0.4) とした。これらの値の設定には慎重な調査を要する。

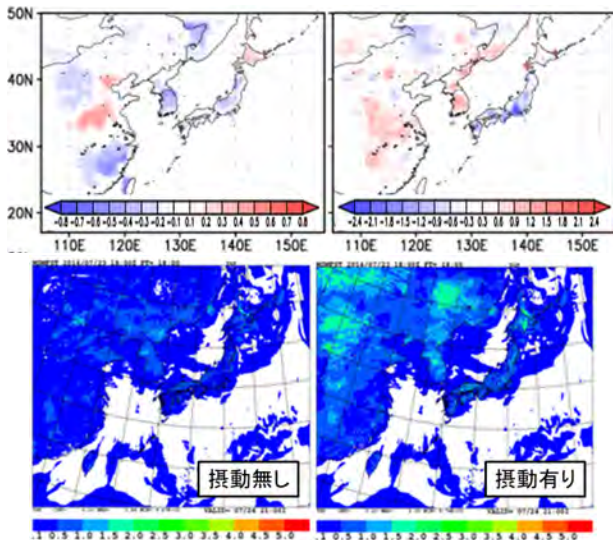


図 4.3.11 上段は下部境界摂動の例（左：体積含水率、右：地中温度第一層 [K]）。下段は FT=18 における高度 10 m 気温のスプレッド [K]。

で見られ、上空 850 hPa まで見られた（図略）。なお、地上気温のスプレッドのみアンサンブル平均予報誤差と比べて予報前半でやや大きく、誤差も摂動を与えない予報より悪化する傾向が見られ、摂動の振幅には慎重な検討が必要であることがわかった。なお関東地方の対流雲による降水は、MEPS 及び下部境界摂動を与えた実験においても予測はできなかった。

今回の基礎調査により、下部境界摂動を与えることで、大気下層の予報へのインパクトが大きいことがわかったが、摂動の大きさなどのパラメータは慎重に検討を行う必要がある。また、MSM では予報期間を通して固定値である海面水温についても不確実性を考慮することで、水蒸気フラックスを通して降水予報へのインパクトがあるものと考えられる。海面水温摂動については、Kunii and Miyoshi (2012) において過去の海面水温を利用した摂動作成方法が述べられており、前述の先行研究などの手法と併せて開発の参考になると思われる。

4.3.6 まとめと今後の開発

ここまで、部内試験運用を行っている MEPS の概要を示すとともに、およそ 7 か月間の確率論的検証結果及び降水予測精度の CTL と各メンバーの比較を示した。統計検証結果からはいくつかの課題も明らかになり、これらを改善するための調査及び開発を行う。

また、近い将来 MSM の予報モデルは現行の JMA-NHM から asuca (気象庁 2014) に変更する予定であり、MEPS においても予報モデルを asuca に変更する予定である。その後、現行の JMA-NHM に基づく MSV を asuca ベースに置き換える予定である。

物理過程摂動や下部境界摂動については、本節で述べた問題点を解決しつつ、asuca 移行後に本格的に MEPS

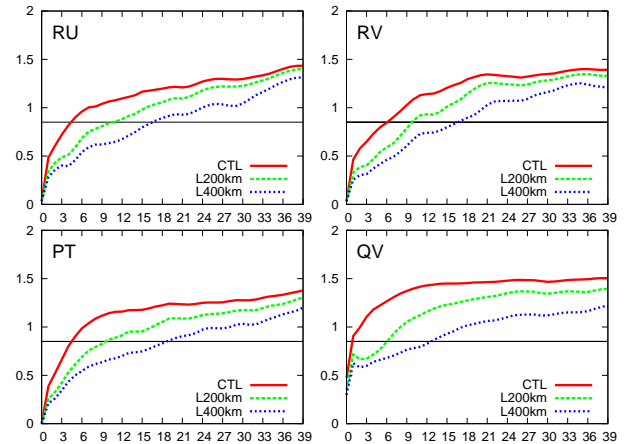


図 4.3.12 モデル面 10 層（高度およそ 850 m）における RNI（5 対のアンサンブル摂動の平均値）の時系列。横軸は予報時間。上段が運動量東西成分（左）及び南北成分（右）、下段が温位（左）及び水蒸気（右）を表す。また、L200 及び L400 は摂動に切断波数 200 km 及び 400 km のローパスフィルターを施して RNI を計算したものである（それぞれ緑及び青で示す）。また黒実線は、線形性破綻の閾値（およそ 0.87、本文参照）を表す。

へ導入できるよう開発を進める予定である。

この他、MEPS の予報作業への利用に資するユーザーとの意見交換を進め、利用方法の可能性を検討する基礎資料として検証結果を示していく必要がある。これは、MEPS 本運用に向けた利用促進のためには重要な課題であり、今後も継続していくことが重要である。

付録 4.3.A 初期摂動の設計に関わる調査

(1) MEPS 初期摂動の時間発展について

SV 法は線形論に基づき成長率の大きい摂動を計算する手法である（第 1.2 節参照）。したがって、計算された摂動はアンサンブル予報を行う非線形モデル (NLM: Non-Linear Model) においても、接線形モデル (TLM: Tangent Linear Model) と同様な時間発展をする条件の下で予報に大きなばらつきを与えることが期待される。全球 EPS のように空間分解能が比較的低いモデルでは、摂動の時間発展が初期時刻から最大 2 日程度の期間まで線形的であることを示す研究 (Gilmour et al. 2001 や Reynolds and Rosmond 2003 など) があり、SV 法を採用する根拠となっている。一方、モデルの空間分解能が高くなると、時空間スケールの小さい現象が解像され、初期摂動の時間発展は複雑となる。Hohenegger and Schär (2007a) は、全球モデル（水平格子間隔 50 km）と領域モデル（同 2.2 km）における初期摂動の時間発展を比較し、領域モデルではスケールの小さい現象に関連する摂動の急激な時間発展と強い非線形性を示している²⁰。この結果は、高解像度の

²⁰ 初期に与えた摂動の大きさが 2 倍となる時間及び摂動パターンが線形と見なせる時間が、全球モデル及び領域モデルでそれぞれ 40 時間と 4 時間、54 時間と 1.5 時間であることを示している。

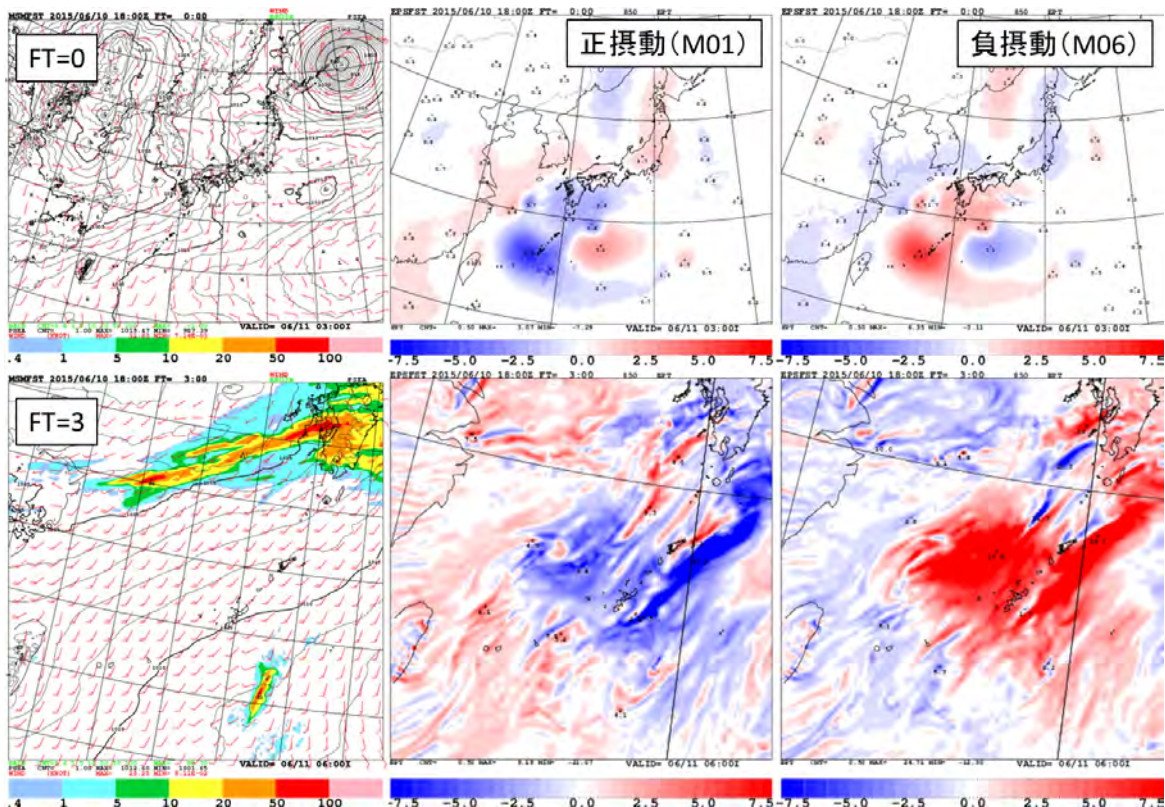


図 4.3.13 左列が CTL による海面更正気圧 (実線、単位は hPa)・風 (矢羽) 及び 3 時間降水量 (塗り分け、単位は mm/3h)、中央及び右列がそれぞれ 850 hPa における相当温位のメンバー 01 からの摂動 (正摂動) 及びメンバー 06 からの摂動 (負摂動) を表す。上段が初期時刻、下段が FT=3 を表す。下段は南西諸島付近を拡大している。

NLM では摂動の時間発展の非線形性が強く、TLM 同様の時間発展が期待されず、アンサンブル予報において十分なばらつきが得られない可能性を示唆している。

一方、MEPS で計算する MSV の水平格子間隔は 40 km 及び 80 km であり、5 km の予報モデル格子にダウンスケールすることで初期摂動に利用している。MSV の降水予報へのインパクトは既に小野 (2010) 及び Saito et al. (2011) などで示されているが、その摂動の時間発展を TLM 及びアンサンブル予報用の NLM において比較した調査等は十分に示されていない²¹。

ここでは、MEPS による水平格子間隔 5 km のアンサンブル予報における初期摂動の時間発展の線形性を調査するとともに、MSV40 の TLM 及び NLM における時間発展を比較する。

MEPS における初期摂動の線形性

はじめに、MEPS における初期摂動の線形性を評価する。実験の初期時刻は梅雨前線によって西日本で強い降水のあった 2015 年 6 月 10 日 18UTC を対象とした。また実験は初期摂動に着目するため側面境界摂動は無しとした。線形性の評価は Gilmour et al. (2001)

²¹ Stappers and Barkmeijer (2011) は水平格子間隔 50 km のモデルによる SV を評価時間である 12 時間後の TLM と NLM における時間発展の違いを調査し、両者が類似した構造を持つことを示している。

が提案した Relative Nonlinearity Index (RNI) を用いた。RNI は、予報時間 t における正摂動 $\delta x_+(t)$ 及び負摂動 $\delta x_-(t)$ により以下の式によって表される。

$$RNI = \frac{||\delta x_+(t) + \delta x_-(t)||}{0.5(||\delta x_+(t)|| + ||\delta x_-(t)||)}$$

RNI は誤差の時間発展パターンが完全に線形の場合は 0、非線形となるほど大きくなり、最大で 2 である²²。なお Hohenegger and Schär (2007a) では、摂動が乱数の場合 RNI は $\sqrt{3}$ であり、線形性破綻の閾値としてその半分の 0.87 程度と設定して議論を行っており、本項でもこの値に従う。また、RNI はノルムに依存するが (Reynolds and Rosmond 2003)、ここでは単純にユークリッドノルムを用いた。

図 4.3.12 にモデル面 10 層における RNI の時系列を、また図 4.3.13 に FT=0 及び 3 における MSM の予報及び 850 hPa における相当温位の正・負摂動の分布を示す。図 4.3.12 (赤線) より、運動量及び温位については 3~6 時間で摂動パターンの線形性が破綻し、水蒸気については 1 時間で破綻することがわかる²³。こ

²² RNI はアンサンブル予報を位相空間で表した概念図において、予報初期値を中心に摂動によって張られた部分空間が、時間の経過とともに崩れていく様子を数値化したものと考えればよい。

²³ 水蒸気については、飽和調節によって対摂動の対称性が崩れるため、初期時刻から RNI は 0 ではない。

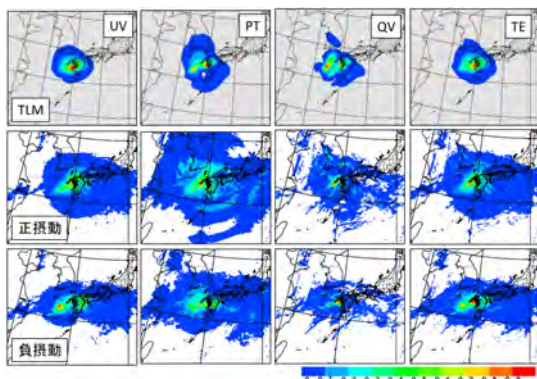


図 4.3.14 振動の各成分の鉛直積算した TE の分布。上段が TLM、中及び下段が 5 kmNLM による FT=6 の振動による結果。最大値で規格化している。

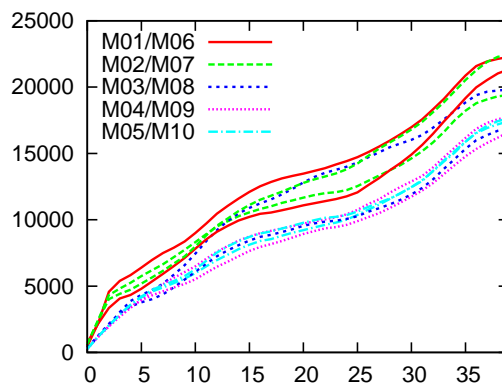


図 4.3.15 各メンバーにおける、振動の TE 空間積算値の時系列 (単位は $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$)。対振動は同色で表しており、横軸は予報時間を表す。

の線形性が破綻する様子は図 4.3.13 において確認できる。FT=3 の九州付近の降水域の南方の対流活動が活発と推測される領域では、小さいスケールにおいて振動の対称性が崩れている。対流域ではスケールの小さい誤差が急速に時間発展し、その後予報時間とともに upscale することが多くの研究 (Hohenegger and Schär 2007b や Selz and Craig 2015 など) で示されている。図 4.3.12 における予報の早い時間からの非線形性は、対流域におけるスケールの小さい現象の寄与が大きいことが推測される。

一方、FT=3 における振動の対称性は大きなスケールでは維持されているように見える。そこで、次によりスケールの大きな振動に着目する。図 4.3.12 には、MSV40 及び 80 によって表現可能なスケールである切断波数 200 km 及び 400 km²⁴ のローパスフィルターを振動に適用してから RNI を算出した結果を併せて示す。フィルターを適用した結果より、振動のスケールが大きいほど線形的な時間発展をする期間が長いこと、MSV の評価時間 (6 及び 15 時間) 程度まではスケールの大きな振動が線形的な時間発展をすることなどがわかる。これは上述の小さい誤差の upscale が MSV の評価時間程度まで卓越せず、大きなスケールでは振動の時間発展が線形的であることを示している。

MSV40 の NLM における時間発展

ここまで、MEPS のアンサンブル予報では予報初期において小さいスケールから非線形性が卓越する一方、MSV が表現可能な大きなスケールでは MSV の評価時間程度まで線形的な振動の時間発展が確認された。ここではもう少し踏み込んだ調査として、単独の MSV40 に着目し、TLM 及びアンサンブル予報で用いる NLM の時間発展を比較する。実験の初期時刻はここでも 2015 年 6 月 10 日 18UTC とし、MSV40 を VM 法による結合を行わず、振幅調整のみを行ったものを初期振動と

したアンサンブル予報を行った。なお、SV 算出時にも TLM とその基となる NLM²⁵ において時間発展の類似性を確認しているが、ここではアンサンブル予報に用いる水平格子間隔 5 km の JMA-NHM (上記の NLM と区別するため、以後、5 kmNLM と表記する) と比較する。このため、

- (a) TLM の基になる NLM と 5 kmNLM は同一ではない
- (b) 空間分解能が異なる
- (c) 初期時刻における SV の振幅が異なる

などの理由から、TLM と 5 kmNLM における時間発展の完全な一致を求めるのは条件が厳しいため、空間パターンの観点から評価時間における地理的分布の比較、誤差成長の観点から TE の時間変化に着目した。

はじめに、MSV40 の TLM と 5 kmNLM の評価時間における振動の地理的分布を比較する。図 4.3.14 は MSV40 の評価時間に対応する FT=6 において、5 kmNLM の正及び負振動 (メンバー 1 と 6) の鉛直積算した TE の分布を示している。TE の大きい領域は TLM, 5 kmNLM とともに九州西方海上と概ね一致し、各項で比較しても概ね一致することがわかる。一方で、TE の振幅が小さい領域を比較すると、5 kmNLM は TLM と比べて広く分布している。また、風速及び温位項と比べると、水蒸気項についてはスケールの小さい構造が 5 kmNLM において卓越し、TLM 及び 5 kmNLM における正負振動のピークの位置はわずかにずれていることが確認できる。これは対流活動によるスケールの小さい現象によるものと考えられる。

次に、MSV40 の 5 kmNLM における時間発展を確認するため、空間積算した TE の時系列を図 4.3.15 に示

²⁴ MSV が解像可能な現象のスケールは水平格子間隔の 5 倍とした。

²⁵ 4 次元変分法によるメソ解析のための接線形・随伴モデルの基になる NLM であり (Honda et al. 2005)、小野 (2014) に述べられているように MSM で用いる JMA-NHM とは一致しない。

す。正負の対となるメンバーは同じ色で表した²⁶。この実験ではMSV40を成長率順にメンバー1から5に与えているため(対となる負摂動は6から10)、5 kmNLMにおいてもおおよその順でTEが増加することがわかる。また、初期時刻からFT=3から5までTEの急増が確認でき、この間対摂動の大きさも同じである。その後、対摂動の大きさに各メンバー間で差が現れ、成長も緩やかになることがわかる。したがって、評価時間よりやや短い期間において、線形論で期待される成長が見られる。その後は、対摂動の対称性が崩れTEの増加率が鈍ることから非線形性が確認できるもののTEの増加はその後も続く。

以上から、MEPSの初期摂動は、MSV程度のスケールでは評価時間程度まで線形的に時間発展すること、MSV40は5 kmNLMにおいてもおおまかにTLMと同様な時間発展をすることがわかった。このため、評価時間にかけて各メンバー間の予報はばらつき、降水予報に対してもインパクトがあるものと考えられる。

MEPSでは水平格子間隔が40 kmのMSVを計算している。より高解像度のMSVを利用する場合は、線形的な時間がより短くなり、TLMとNLMとの乖離がより大きくなると考えられる。さらには高解像度化に伴いMSV計算に多くの計算機資源を要することにもなる。このため、より高解像度のMSVの利用については慎重な調査が必要であると考えられる。

(2) 複数のスケールを持つSVの利用

第4.2節においてレビューされているように、海外気象機関における領域EPSのための初期摂動の作成手法は全球EPSからのダウンスケーリングが主流である。この手法の長所は、全球EPSにおいて予測されたスケールの大きな現象に関わる初期値(及び境界値)の不確実性を、容易に領域EPSに反映できる点である。またSaito et al. (2011)は同じダウンスケーリングでも、気象庁週間EPSに基づく摂動とGSVによって領域EPS用に作成した摂動の予報精度を比較し、後者のほうがブレッドスキルの関係が良好であり、アンサンブル平均予報精度も前者を上回ることを示している。GSVの利用は、SVそのものを領域EPS用に計算する必要があるものの、時空間分解能が低く少ない計算機資源によって計算可能であるため有効な手法である。数値予報課でも、MSVの開発と並行してGSVの開発を行っており、MEPSの初期摂動のベースとしている。

一方で、領域モデルの初期値には、ダウンスケーリングによる摂動が解像するスケールより小さい現象に関わる誤差が含まれる。一般に大気現象は空間スケールが小さいほど時間スケールは短いため、初期値に含

まれる空間スケールの小さい誤差は、特に予報前半における予測精度に対する影響が大きい。このため、領域EPSではダウンスケールによる摂動と比べより高い分解能の摂動を用いることが重要である。しかし、スケールの小さい摂動だけではダウンスケーリングによる摂動の予測精度を上回ることができないといった報告もある。Bowler and Mylne (2009)は英国気象局の領域EPSにおいて、アンサンブル変換カルマンフィルタ(ETKF: Ensemble Transform Kalman Filter)に基づく全球EPS予測値(水平格子間隔およそ90 km)からのダウンスケーリング、及び領域ETKF(同およそ24 km)をそれぞれ初期摂動とするアンサンブル予報の精度比較を行っている。その結果では、全般的な精度ではダウンスケーリングが上回ること²⁷、高解像度の摂動の効果は予報18時間までであることなどが報告されている。Saito et al. (2011)では、強い降水における確率予測精度に限定すると高分解能のモデルに基づく摂動手法(摂動作成の水平格子間隔は40 km)のほうがスコアが良い一方、並雨までの確率予報精度及びアンサンブル平均予報精度はGSVをしのげないことを示している。

したがって先行研究を踏まえると、スケールの大きい摂動をベースにして、スケールの小さい摂動によって強い降水精度を確保することが望まれる²⁸。このことに着目して、数値予報課では、GSVによる摂動を基本とするものの、MSVから得られる解像度の高い摂動を合成することで、全般的な精度をGSVで確保するとともに、MSVにより予報前半の強雨についての不確実性を考慮するシステムを構築し(Ono et al. 2011)、部内試験運用に向けた開発を行ってきた。なお、これまで述べたように、MSV40による摂動は局在化した構造を持つため、MSV40とGSVの間のMSV80を導入している。

ここでは、スケールの異なるSVを合成した効果を確認するため、初期時刻2015年6月10日18UTCによる実験結果を示す。なお、実験は初期摂動の効果に着目するため、側面境界摂動は導入しておらず、MEPSによる初期摂動による実験(CNTL)、GSVのみによる実験(TESTg)、MSV40及びGSVをブレンドした実験(TESTmg)を行った。なおTESTg及びTESTmg

²⁷ 第4.1節に述べられているMEPSの初期摂動作成手法の決定においても、現SV法とJMA-NHMベースの局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(摂動生成解像度40 km)及び3次元変分法に基づくアンサンブルデータ同化(摂動生成解像度5 km)を比較した際も、後者2手法については、SV法に比べ予報のばらつきが不十分であった。

²⁸ オーストリア気象局では、ヨーロッパ中期予報センターのEPSの摂動及び領域モデルで育成したブレッドベクトル(BV)をブレンドした初期摂動を作成し、ダウンスケーリングによる高解像度のBVを短波成分に足しこみ、精度改善を図っている(Wang et al. 2011)。最近ではブレンドを用いる研究あるいは現業センターが増えている(Caron 2013やZhang et al. 2015など)。

²⁶ 線形的な時間発展では、対摂動のTEは同じ値となり、値の乖離は非線形性を反映している。

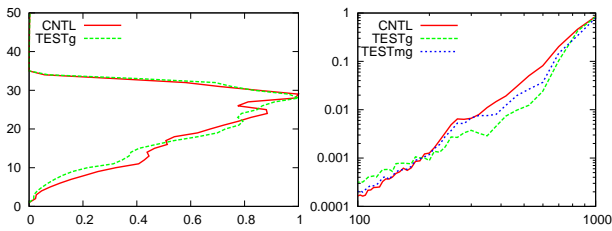


図 4.3.16 各実験における初期摂動の TE の鉛直分布 (左) 及びモデル面 10 層の運動量東西成分の波数スペクトル (右、両対数で表し、横軸は波長で単位は km)。ただし、TE は最大値で規格化し、波数スペクトルは波長 1000 km 付近の値によって規格化している。

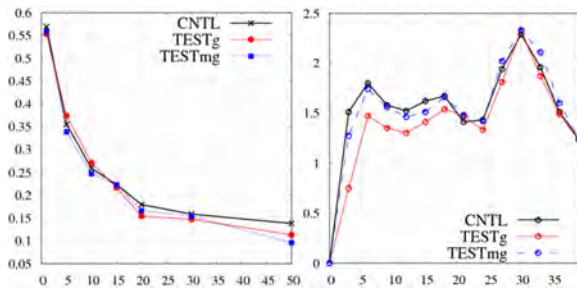


図 4.3.17 各実験における 3 時間降水量の予報期間平均した BSS (左) 及び 3 時間降水量のスペード時系列 (右、横軸が予報時間)。

における SV の算出数は CNTL と同じであり、VM 法を用いて初期摂動を作成した。

図 4.3.16 に、各実験における初期摂動の TE の鉛直分布及びモデル面 10 層の運動量東西成分の波数スペクトルの 10 メンバーの平均値を表す。なお、波数スペクトルはメソスケール (数 100 km スケール) に着目して比較するため、波長 1000 km における値によって規格化している。TE の鉛直分布より、GSV によってモデル面 30 層 (高度およそ 8000 m) にエネルギーのピークを持つ対流圏中層の総観規模の流れに対応する摂動が得られていることがわかる。一方、CNTL では MSV を合成することで下層の TE が増加していることが確認できる。また波数スペクトルより、TESTg では 1000 km より波長が短いほどスペクトルが小さい。一方、TESTmg では TESTg と比べ波長 200 から 600 km におけるスペクトルが大きいことがわかる。CNTL では TESTmg から波長 300 から 600 km における大きく、MSV80 による効果がわかる²⁹。

降水予測への影響を図 4.3.17 に、3 時間降水量の A

²⁹ なお、波長 180 km 付近から短波長にかけて TESTg のスペクトルが大きいのは、GSV を内挿する際に現れる縞状の人工的な構造のためであることが調査の結果わかった。この構造は予報開始 1 時間で不明瞭となり、予報に大きな影響は無い。この構造を取り除いた実験も行ったが、除去によって降水確率予測精度が悪化したため、改修を見送っている。この構造及び MSV40 よりスケールの小さい摂動を MEPS でどう考慮するかは現在検討中である。

ンサンプルスプレッド及び BSS を示す (検証方法はこれまでと同様)。CNTL と TESTmg は予報前半を中心に降水予報のばらつきが増しており、特に FT=18 までの 3 時間降水量スプレッドの増加が著しい。このため、BSS は強い降水を中心に改善している。

以上のように、GSV をベースとしつつ、MSV によってよりスケールの小さい情報を合成して初期摂動を作成することで、予報前半を中心に降水のばらつきが増し、特に強い降水の予測精度が改善することがわかる。

参考文献

- Berner, J., K. R. Fossell, S.-Y. Ha, J. P. Hacker, and C. Snyder, 2015: Increasing the skill of probabilistic forecasts: Understanding performance improvements from model-error representations. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1295–1320.
- Bouttier, F., B. Vié, O. Nuissier, and L. Raynaud, 2012: Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3706–3721.
- Bouttier, F., L. Raynaud, O. Nuissier, and B. Ménétrier, 2015: Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, DOI:10.1002/qj.2622.
- Bowler, N. E. and K. R. Mylne, 2009: Ensemble transform Kalman filter perturbations for a regional ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 757–766.
- Caron, J., 2013: Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 356–374.
- 永戸久喜, 2015: 数値予報システムおよびガイダンスの概要一覧表. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 115.
- Gilmour, I., L. A. Smith, and R. Buizza, 2001: Linear regime duration: Is 24 hours a long time in synoptic weather forecasting? *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3525–3539.
- 原旅人, 2008: 地表面過程. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 166–193.
- Hohenegger, C. and C. Schär, 2007a: Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 1783–1793.
- Hohenegger, C. and C. Schär, 2007b: Predictability and error growth dynamics in cloud-resolving models. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 4467–4478.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki, 2005:

- A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3465–3475.
- 気象庁, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 1–151.
- Kunii, M., K. Saito, K. Seko, H. Hara, M. Hara, M. Yamaguchi, D. Jian, M. Charron, J. Du, Y. Wang, and D. Chen, 2011: Verification and intercomparison of mesoscale ensemble prediction systems in the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project. *Tellus*, **63A**, 531–549.
- Kunii, M. and T. Miyoshi, 2012: Including uncertainties of sea surface temperature in an ensemble Kalman filter: A case study of typhoon Sinlaku (2008). *Wea. Forecasting*, **27**, 1586–1597.
- 草開浩, 森安聡嗣, 2013: 現業モデルにおける検証 (メソモデル). 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 16–24.
- Lavaysse, C., M. Carrera, S. Bélair, N. Gagnon, R. Frenette, M. Charron, and M. K. Yau, 2013: Impact of surface parameter uncertainties within the Canadian regional ensemble prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 1506–1526.
- Ma, J., Y. Zhu, R. Wobus, and P. Wang, 2012: An effective configuration of ensemble size and horizontal resolution for the NCEP GEFS. *Advances in Atmospheric Sciences*, **29**, 782–794.
- 小野耕介, 2010: メソ特異ベクトル法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 93–104.
- Ono, K., Y. Honda, and M. Kunii, 2011: A mesoscale ensemble prediction system using singular vector methods. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **41**, 5.15–5.16.
- Ono, K., 2012: Preliminary results of mesoscale ensemble prediction system with stochastic parameterization. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **42**, 5.17–5.18.
- 小野耕介, 2013: メソアンサンブル予報精度に対するアンサンブルサイズ依存性. 第 15 回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集.
- Ono, K., 2014: Test-operation of Mesoscale Ensemble Prediction System at JMA. *Joint Workshop of 6th International Workshop on Global Cloud Resolving Modeling and 3rd International Workshop on Non-hydrostatic Numerical Models*.
- 小野耕介, 2014: 接線形・随伴モデルの実装. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 98–103.
- Reynolds, C. A. and T. E. Rosmond, 2003: Nonlinear growth of singular-vector-based perturbations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3059–3078.
- 齊藤和雄, 瀬古弘, 國井勝, 原昌弘, 原旅人, 山口宗彦, 経田正幸, 2008: WWRP 北京オリンピック予報実証/研究開発プロジェクト (B08FDP/RDP). 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 246–260.
- Saito, K., M. Hara, M. Kunii, H. Seko, and M. Yamaguchi, 2011: Comparison of initial perturbation methods for the mesoscale ensemble prediction system of the meteorological research institute for the WWRP Beijing 2008 Olympics research and development project (B08RDP). *Tellus*, **63A**, 445–467.
- 酒井亮太, 2009: 初期摂動作成手法. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 117–125.
- Schwartz, C. S., G. S. Romine, K. R. Smith, and M. L. Weisman, 2014: Characterizing and optimizing precipitation forecasts from a convection-permitting ensemble initialized by a mesoscale ensemble Kalman filter. *Wea. Forecasting*, **29**, 1295–1318.
- Selz, T. and G. C. Craig, 2015: Upscale error growth in a high-resolution simulation of a summertime weather event over Europe. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 813–827.
- Stappers, R. and J. Barkmeijer, 2011: Properties of singular vectors using convective available potential energy as final time norm. *Tellus*, **63A**, 373–384.
- 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.
- Wang, Y., M. Bellus, C. Wittmann, and co-authors, 2011: The central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 483–502.
- Yamaguchi, M., R. 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.
- 山口春季, 2013: アンサンブル予報における確率的物理過程強制法. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 188–191.
- 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.
- Zhang, H., J. Chen, X. Zhi, Y. Wang, and Y. Wang, 2015: Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system. *Advances in Atmospheric Sciences*, **32**, 1143–1155.