

3.3 全球アンサンブル予報システムの物理過程改良、利用する海面水温の変更

3.3.1 変更の概要

2023年3月14日に全球アンサンブル予報システム(GEPS: Global Ensemble Prediction System)の改良を行った。本稿では、その改良内容と予測精度の評価結果、予測特性の変化について報告を行う。

GEPSは、台風進路予報、週間天気予報、2週間気温予報、早期天候情報及び1か月予報に使用しているアンサンブル予報システム(EPS: Ensemble Prediction System)である。このシステムは数値予報課が運用していた週間・台風EPSと気候情報課が運用していた1か月EPSを統合したもので、2017年1月19日に週間・台風EPSに代わって運用を開始し、同年3月23日に1か月先までの延長予報を開始した(山口2017; 新保2017)。

以下に今回の各変更項目の概要を記す。変更内容の詳細については数値予報開発センター年報(令和4年)第4.2節(気象庁2023b)に記載があるので参照いただきたい。

予報モデルの更新

GEPSでは、予報モデルに気象庁全球モデル(GSM: Global Spectral Model)の低分解能版を用いている。今回のGEPSの改良では使用するモデルについて、数値予報開発センター年報(令和4年)第4.1節(気象庁2023c)に記述された、GSMの改良(非地形性重力波過程の改良、標高オリジナルデータセットの更新)を採用した。

2段階SST法の適用範囲の拡大

2段階SST法で外力として使用する現業季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS3: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System version 3)のSST予測値について、適用領域を低緯度域中心から全球域に拡大した。

3.3.2 業務化試験

変更の効果については、令和4年の数値予報開発センター年報(気象庁2023b)で総合性能評価試験の結果について報告した。ここでは、実際の現業利用に即した設定での試験(業務化試験)の結果について記す。総合性能評価試験では(1)コントロールメンバーを計算する初期値をサイクル解析から作成、(2)初期時刻は12UTCのみ、(3)再予報型実験の実行頻度は月1回としていたのに対し、業務化試験では(1)速報解析から作成、(2)1日4初期時刻(00, 06, 12, 18UTC)、(3)月2回としている。なお、以下の文章および図説におけるCNTLは比較対象となるGEPS2203(気象庁2023a)による予測実験、TESTは今回の改良を加えたシステ

ムによる予測実験を表す。

(1) 連続初期日型実験

実験の設定

- 実験期間
 - － 2021年11月21日から2022年3月11日(冬)
 - － 2021年6月21日から10月11日(夏)
- 検証対象:00UTCと12UTCを初期時刻とする264時間予測(台風検証については06UTCと18UTC初期値を加えて132時間までの検証を行う)
- メンバー数:51
- 初期値に用いる解析:TESTは2023年3月に現業化されたシステムによる全球速報解析、CNTLはそれ以前のシステムによる全球速報解析を使用した。

主要要素の確率予測

図3.3.1に冬期間について11日先までの予報時間ごとのCRPS¹を示す。いずれの要素・検証領域においてもおおむね中立から改善となっており、夏期間についても同様のことが言える(図略)。モデルの改良の効果が現れたものと考えられる。

日本付近の降水確率予測

図3.3.2に日本の降水予測について解析雨量に対して検証した結果を示す。ブライアスキルスコア(BSS: Brier Skill Score)は1mm/24hr及び5mm/24hrの閾値について、夏期間はほぼ中立、冬期間はやや改善傾向となっている。これもモデルの改良によるものである。

台風進路予測

図3.3.3に予報時間ごとのアンサンブル平均台風進路予測誤差を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。予報後半で若干改善しているように見えており、GSM2303についての試験結果第3.2節と整合している。なお、台風接近確率のBSS、信頼度曲線や予測頻度に大きな変化はなかった。

(2) 再予報型実験

予測12日以降の評価のための実験として、再予報型実験を実施した。CNTL、TESTともに大気初期値はJRA-3Qを用い、1991年～2020年での月2回(15日と月末の12UTC初期値)の予測のみを対象とした13メンバーで評価した。

まず、地上気温に対する予測2週目のアノマリー相関係数(図3.3.4)の水平分布を確認すると、夏初期日と冬初期日ともに中高緯度の海上で改善していることが分かる。これは2段階SST法の全球域への拡大によるものと考えられる。

¹ Continuous Ranked Probability Scoreの略で、閾値t以下となる確率予測に対するブライアスコアを $\int_{-\infty}^{\infty} dt$ で積分したもの。値が小さいほど精度が高いことを意味する。

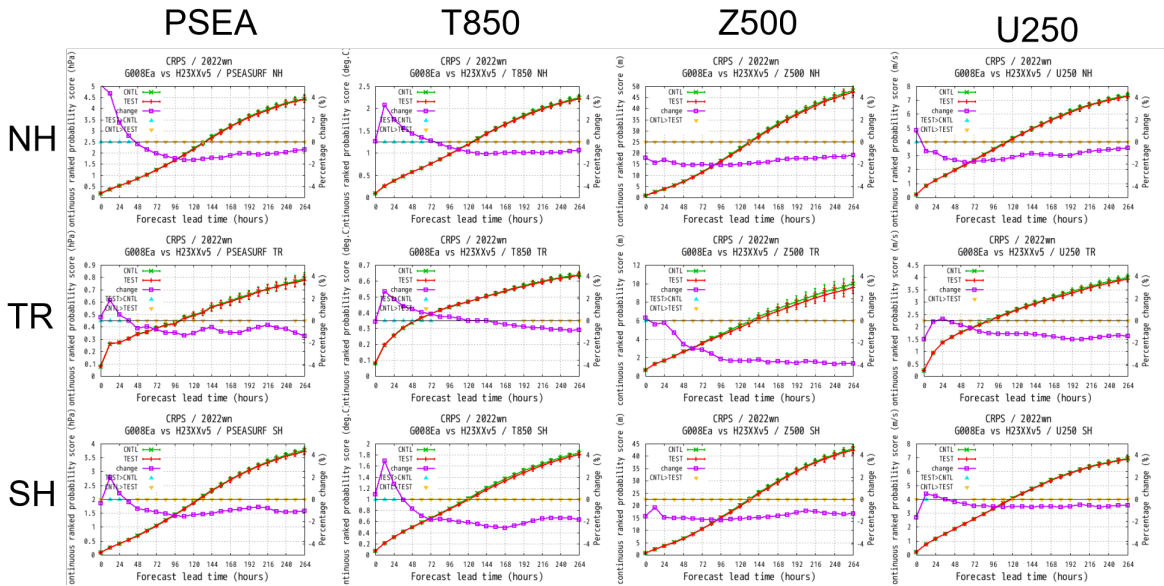


図 3.3.1 冬期間における、主要要素に対する領域別の CRPS。要素は左から順に海面更正気圧 [hPa]、850hPa 気温 [K]、500 hPa 高度場 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (90°N - 20°N)、熱帯 (20°N - 20°S)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL}[\%])$ 、右縦軸。ブートストラップ法による判定で、CNTL と TEST の差が有意水準 5% で有意である場合に ∇ (CNTL>TEST) ないし Δ (TEST>CNTL) をプロットしている。

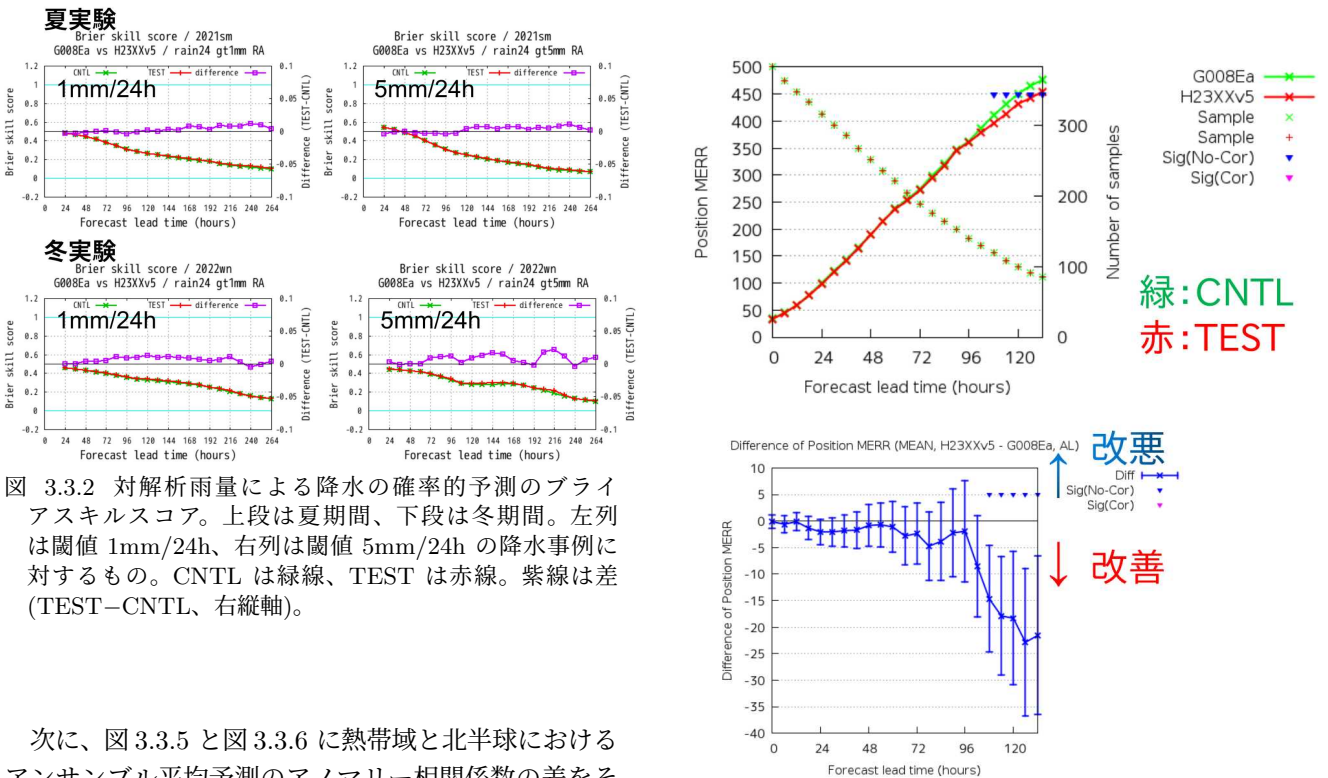


図 3.3.2 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は夏期間、下段は冬期間。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

次に、図 3.3.5 と図 3.3.6 に熱帯域と北半球におけるアンサンブル平均予測のアノマリー相関係数の差をそれぞれ示す。どちらも中立の要素・季節が多いが、熱帯域では冬と夏の CHI200 が改善傾向、北半球では冬の PSI200 が改善傾向であったことが確認できる。

3.3.3 おわりに

GEPS について、予報モデルを更新したほか、SST 予測値を適用する領域を拡大した。これらの変更は 2023 年 3 月 14 日に現業システムへ導入されている。

図 3.3.3 アンサンブル平均の台風進路予測平均誤差。上段：CNTL は緑、TEST は赤。× と実線が平均誤差 [km] (左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクと青の ∇ はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。下段：TEST の誤差から CNTL の誤差を差し引いたもの。負値が改善を意味する。

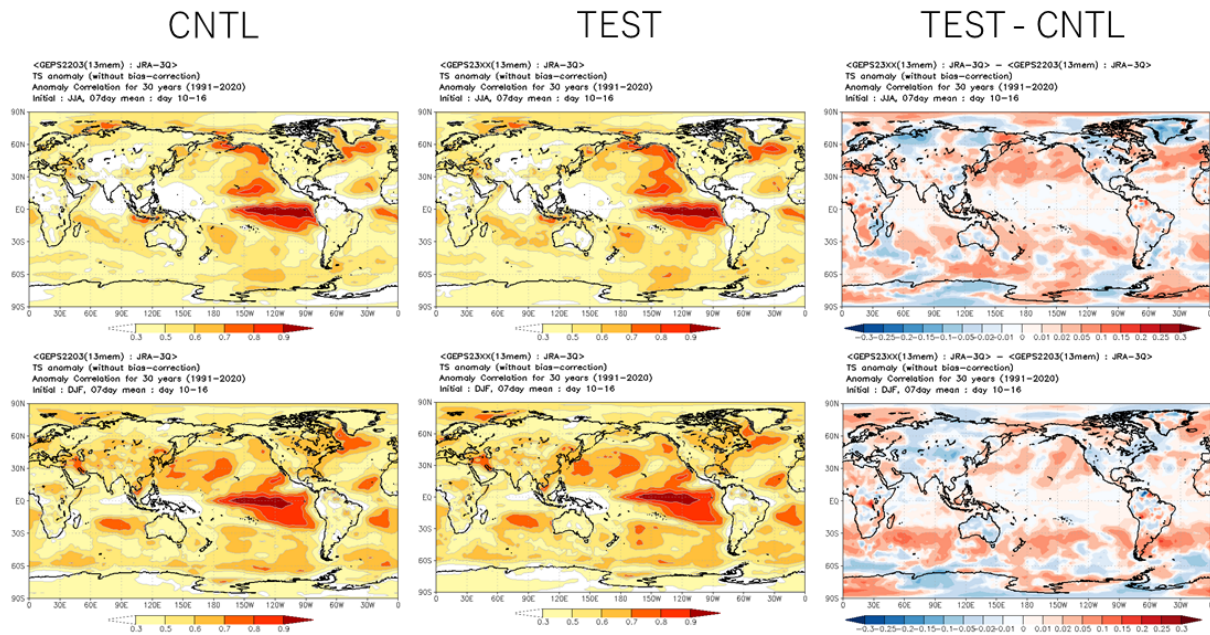


図 3.3.4 地上気温に対する予測 2 週目のアノマリー相関係数。上段：夏初期日、下段：冬初期日。左から CNTL、TEST、TEST-CNTL（暖色系が改善、寒色系が改善）の結果。

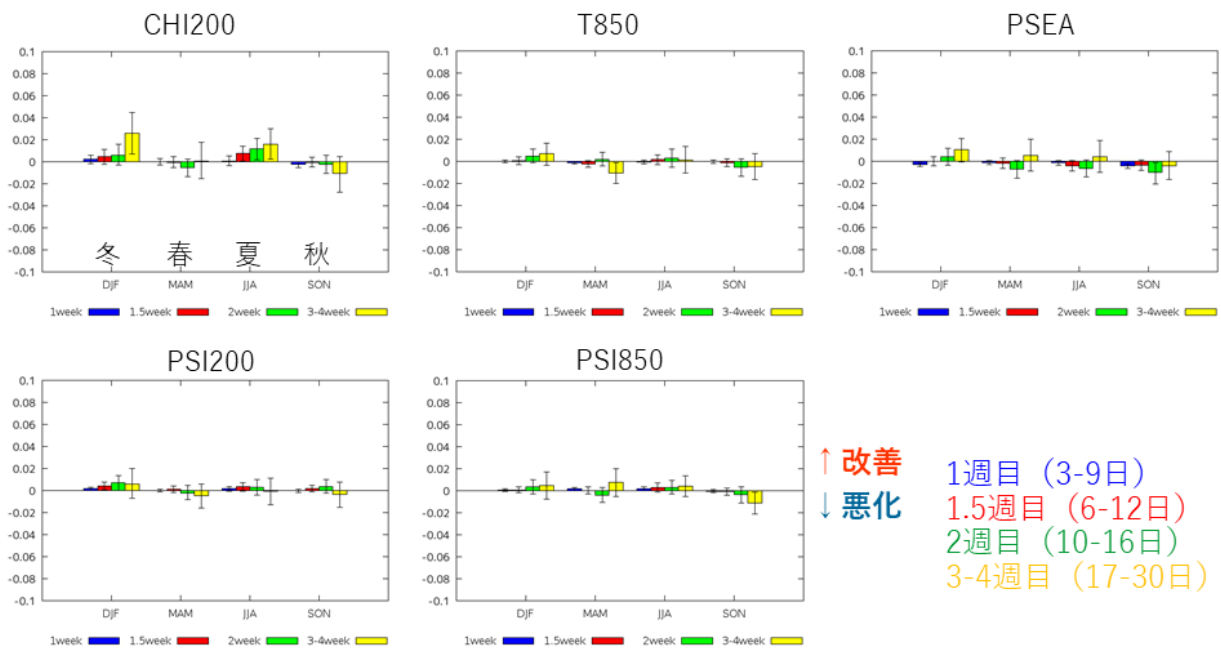


図 3.3.5 再予報（1991～2020 年）による 13 メンバーアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差（TEST-CNTL）。熱帯域で平均した結果であり、上段は左から 200hPa 速度ポテンシャル、850hPa 気温、海面更正気圧、下段は左から 200hPa 流線関数、850hPa 流線関数。それぞれの図は左から順に冬、春、夏、秋の並びとなっており、青は 1 週目（予測 3～9 日）、赤は 1.5 週目（予測 6～12 日）、緑は 2 週目（予測 10～16 日）、黄は 3～4 週目（予測 17～30 日）を表す。

この改良により、確率予測情報についてはモデルの改善の効果により、いずれの要素・検証領域においてもおおむね中立から改善となった。

台風進路予測の精度は全体としては中立であるが、予報後半の進路予測が若干改善しており、GSM2303 の試験結果と整合的であった。

さらに 30 年間の再予報型実験では、2 段階 SST の

適用領域を拡張した中高緯度の海上において改善が確認でき、また、アンサンブル平均予測のアノマリー相関係数は中立～改善傾向であった。

参考文献

気象庁, 2023a: 全球アンサンブル予報システムの改良（第 3.2 節）. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）,

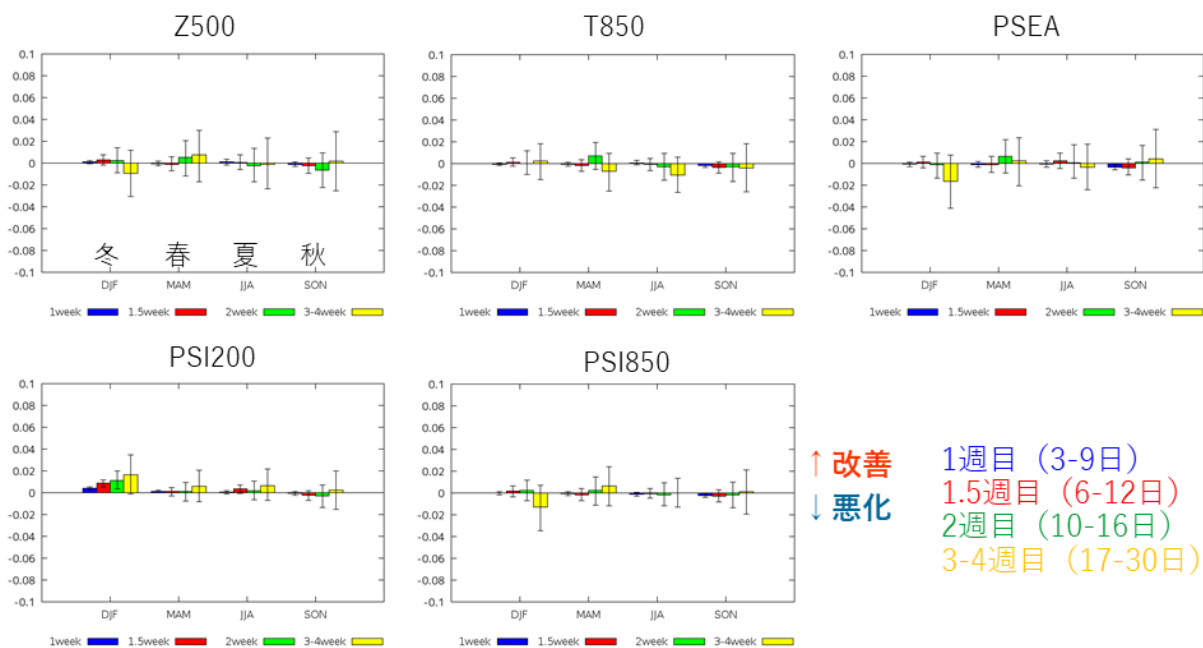


図 3.3.6 図 3.3.5 と同じ。ただし、北半球で平均した結果であり、上段の左図は 500hPa 高度。

気象庁 数値予報開発センター, 17-20.

気象庁, 2023b: 全球アンサンブル予報システムの改良 (第 4.2 節). 数値予報開発センター年報 (令和 4 年), 気象庁 数値予報開発センター, 71-75.

気象庁, 2023c: 全球モデルの物理過程改良. 数値予報開発センター年報 (令和 4 年), 気象庁 数値予報開発センター, 62-70.

新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-8.

山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-41.

3.4 メソ数値予報システムで利用する全球積雪深解析の変更

3.4.1 はじめに

メソモデル (MSM) の初期値を作成するメソ解析において、日本域外の積雪分布初期値は「全球積雪深解析」¹から作成している。全球積雪深解析は、近年、その高度化が進んでおり、全球解析では2021年3月からは新しい手法による積雪深解析の実施を開始し(気象庁 2022)、2023年3月には高頻度化などの改良を導入した(第3.2節)。2023年3月の改良に合わせて、メソ解析の積雪分布初期値(メソ積雪分布初期値)作成において利用する全球積雪深解析も新しい高度化された全球積雪深解析を利用するように変更した。

この変更は、全球積雪深解析の高頻度化等の改良を含む全球数値予報システムの改良(第3.3節)、メソ解析における観測データ利用の高度化(第3.7節、第3.9節、第3.10節)とともに2023年3月に現業化された。本節では、メソ積雪分布初期値作成に利用する全球積雪深解析の変更の概要を説明し、性能評価試験における検証結果を報告する。メソ積雪分布初期値作成手法の詳細については草開(2015)を参照いただきたい。

3.4.2 メソ積雪分布初期値作成手法と変更の概要

メソ積雪分布初期値は次のように作成する(草開 2015)。まず、大気の情報(気温、湿度、風、気圧、放射、降水(雨・雪))を入力にして積雪物理量を計算できる陸面モデルを用いて積雪深予測値を作成する。大気情報はMSM予測値と解析雨量を用いる。次に、日本域では、この予測値を第一推定値として、アメダス積雪深観測を用いて最適内挿法により積雪深分布を作成する(メソ積雪深解析)。日本域外では全球積雪深解析から作成する。日本域外では解析雨量が使えないので陸面モデルによる積雪深予測精度が十分でなく、また、アメダス積雪深観測による修正も得られないためである。最後に、解析した積雪深に対して閾値(5 cm)以上の格子を「積雪あり」と分類し、積雪分布初期値を作成する。

本変更は、日本域外で利用する全球積雪深解析の変更である。全球解析における積雪深解析は、2021年3月に衛星観測データから算出した衛星積雪域の利用等による高度化(気象庁 2022)、2023年3月には高頻度化などの改良を導入した(第3.2節)。メソ積雪分布初期値では、2021年3月の高度化以前の旧来の全球積雪深解析(JMA 2019)を利用していた²が、2023年3月から新しい全球積雪深解析を利用するように変更した。

¹ 後で旧来の全球積雪深解析と新しい全球積雪深解析について述べるが、ここでは両者を含めた「全球域の積雪深解析」を意味する。

² メソ積雪分布初期値における新しい全球積雪深解析の利用の影響を確認するまでの間、旧来の全球積雪深解析の作成が維持されていた。

3.4.3 検証結果

メソ積雪分布初期値作成に利用する全球積雪深解析を変更した試験の検証結果について述べる。2022年3月時点のルーチンシステム相当のメソ予報システム設定³の実験をコントロール(CNTL)とする。CNTLは2021年3月の高度化以前の旧来の全球積雪深解析を利用する。CNTLに対し、新しい全球積雪深解析(2023年3月現業導入相当)を利用するよう変更した実験をテスト(TEST)とする。実験期間は、2019年12月23日-2020年2月29日を設定した。

図3.4.1にCNTLとTESTの積雪分布について実験期間中の積雪存在率を示す。新しい全球積雪深解析は2021年3月の高度化において高解像度化されているため、TESTはCNTLに比べて大陸上において解像度の高い分布になっている。TESTとCNTLの差を見ると、大陸内陸部では積雪分布の減少傾向、朝鮮半島付け根の領域では増加傾向が見られた。

積雪分布初期値の変化がMSMの予測にどのような影響を与えるか確認する。図3.4.2(左)に925 hPaの気温についてTESTとCNTLの差(48時間予測)を示す。大陸内陸部で高温化、朝鮮半島付け根の領域で低温化していることが分かる。この気温の変化を図3.4.1の積雪分布の変化と見比べると、高温(低温)化の領域が積雪分布の減少(増加)域と対応している。このことは「積雪があると大気が冷える」というプロセス(草開(2015)に説明がある)と整合的である。大陸では、CNTLの低温誤差(図3.4.2(中)の赤点線枠)がTESTでは縮小した(図3.4.2(右)の赤点線枠)。925 hPaの気温の予測精度向上は、図3.4.3の平均誤差(ME)と二乗平均平方根誤差(RMSE)の時系列に示すように予報時間全体に見られた。

3.4.4 まとめ

日本域外のメソ積雪分布初期値作成において、旧来の全球積雪深解析に代えて、新しい高度化された全球積雪深解析を利用するように変更した。この変更により、大陸の積雪分布は変更前に比べて解像度の高いものになる。大陸内陸部では実験期間において統計的に積雪面積が減少し、朝鮮半島付け根の領域では増加した。この積雪分布初期値を用いたMSM予測においては、大陸上の対流圏下層気温の誤差縮小を確認した。この変更は、全球積雪深解析の高頻度化等の改良とともに2023年3月に現業化された。

本節で述べたとおり、日本域外では解析雨量が入力として使えないため陸面モデルによる積雪深予測精度が十分ではないこと、メソ積雪深解析では地上観測データのみを利用するため積雪観測点が少ない大陸上では積雪深第一推定値を十分に修正できないことから、日本域外の積雪分布は全球積雪深解析から作成している。

³ ただし、側面境界値には2023年3月導入のルーチンシステム相当の水平解像度13 kmの全球モデルを用いた。

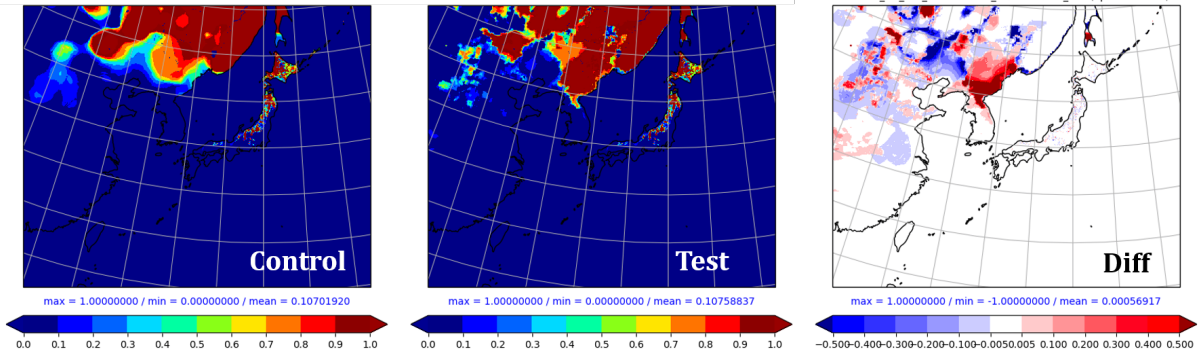


図 3.4.1 実験期間中の積雪存在率。(左) CNTL、(中) TEST、(右) TEST と CNTL の差。

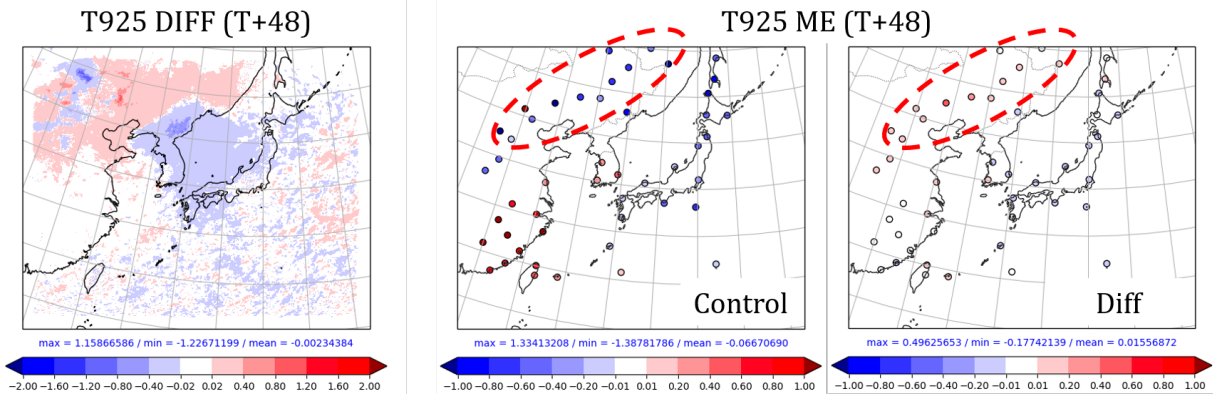


図 3.4.2 925 hPa 気温予測の変化。48 時間予測における期間平均。(左) TEST と CNTL の差、(中) CNTL の対ゾンデ観測の平均誤差、(右) 対ゾンデ観測の平均誤差について TEST と CNTL の差。

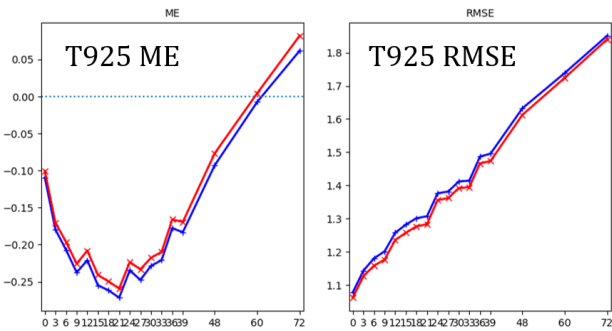


図 3.4.3 925 hPa 気温の予報時間別の対ゾンデ観測検証結果。(左) ME、(右) RMSE。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST をそれぞれ表す。

agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research. Japan, 229 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>).

気象庁, 2022: 全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化、全球解析の高度化. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 15-24.

草開浩, 2015: 積雪域解析の高度化. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 44-49.

大陸上の積雪域の解析精度は、大陸起源の擾乱や冬型時の大陸の高気圧、寒気吹き出しの表現にも影響する可能性があり、その解析精度向上は引き続き開発課題の一つである。課題の優先度等を考慮しながら、今後は衛星観測などを利用したメソ積雪深解析も視野に入れていく予定である。

参考文献

JMA, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological*

3.5 メソアンサンブル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入

3.5.1 はじめに

メソアンサンブル予報システム (MEPS) は、メソモデル (MSM) の予測に対して信頼度や不確実性等の情報付加することを目的に運用されており、MSM と合わせて防災気象情報、航空気象情報、天気予報等の作成を支援する資料として利用されている。

MEPS は 2019 年 6 月に運用を開始した (Ono et al. 2021)。國井・小野 (2020) は、MEPS の運用開始に至る開発経緯、仕様と狙いを述べるとともに今後の課題と展望を示した。これを踏まえ、数値予報開発センターでは MEPS の継続的な開発に取り組んでいる。2020 年 9 月には初期摂動と側面境界摂動を改良し (気象庁 2021)、2022 年 3 月には MSM の鉛直層増強と物理過程改良に追従して MEPS の設定を更新した (気象庁 2022)。また、國井・小野 (2020) が挙げた課題のうち、モデルアンサンブル手法の導入に向けた開発を進めてきた (気象庁 2023)。

令和 5 年の開発成果として、モデルアンサンブル手法の一つである確率的物理過程強制法 (SPPT 法: Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies scheme; Buizza et al. (1999), Palmer et al. (2009)) による摂動を新たに導入し、併せて初期摂動の振幅調整を行い、2023 年 3 月に現業化した。本節では、これらにおける MEPS の変更点の概要を説明し、業務化試験における検証結果を報告する。

本開発については、数値予報開発センター年報 (令和 4 年) 第 4.3 節 (気象庁 2023) (以下、R04 第 4.3 節と呼ぶ) で進捗を報告しており、併せて参照いただきたい。

3.5.2 変更の概要

MEPS で捕捉すべき MSM の不確実性は本来、初期値、境界値のほか、数値予報モデルの不確実性にも帰せられる。変更前の MEPS は、初期摂動と側面境界摂動のみで MSM の不確実性を表現するシステムとなっており、数値予報モデルの不確実性を考慮していなかった。また、初期摂動が過大な傾向が見られていた。このような課題に対し、今回の変更では、SPPT 法の導入と初期摂動の振幅を小さくする調整を行った。ここでは、はじめに SPPT 法について、次に初期摂動の振幅調整について述べる。

(1) SPPT 法

SPPT 法は、物理過程の時間変化率に対して摂動を与えることで、数値予報モデルの物理過程の不確実性を表現することを狙った摂動手法である。摂動を与える前と与えた後の物理過程の時間変化率をそれぞれ X_c 、 X_p とし、次のように摂動を与える。

$$X_p = (1 + r_X)X_c \quad (3.5.1)$$

ここで、 r_X は時空間に相関を持つガウス型の乱数を与える (Palmer et al. 2009)。時空間の相関スケールや振幅の大きさ¹には任意性がある。検討の結果、乱数の振幅は 0.5、時間相関 6 時間、空間相関 500 km とした。また、計算安定性の観点から、積雲対流過程と放射過程の時間変化率にのみ摂動を与えることとした²。

(2) 初期摂動の振幅調整

変更前の MEPS のスプレッドは、アンサンブル平均の RMSE と比べると特に日本域でスプレッドが過大な傾向にあった。また、SPPT 法を導入することで、数値予報モデル由来の摂動が新たに加わることになり、システム全体としてはスプレッドが増加する。これらのことから、SPPT 法の導入と併せて初期摂動の振幅を小さくした (変更前の MEPS の 95%)。

3.5.3 検証結果

SPPT 法の導入と初期摂動の振幅調整による影響を確認し、現業化の可否を検討するための業務化試験の検証結果について述べる。R04 第 4.3 節で報告した性能評価試験とは実験期間が異なることに加え、同時期 (2023 年 3 月) に現業化された全球モデルとメソ解析の改良の効果が含まれた実験であることが異なる。

変更前の 2022 年 3 月時点のルーチンシステム相当の設定の実験をコントロール (CNTL) とし、CNTL に対し以下の変更を適用した実験をテスト (TEST) とする。

- 改良された全球モデル³を側面境界値に、改良されたメソ解析⁴を初期値に用いる。
- 前項の MEPS の変更

実験期間は、統計検証期間として夏期間:2021 年 6 月 26 日-7 月 31 日、冬期間:2022 年 1 月 1 日-1 月 31 日を設定した。また、強雨事例における降水確率予測の確認のため、西日本を中心に強雨が続いた 2021 年 8 月 10 日-15 日についても実験を行った。

(1) スプレッドの適正化

図 3.5.1 に 850 hPa 相当温位について FT=9 における CNTL と TEST のスプレッドとアンサンブル平均の RMSE の夏期間の平均を示す。基本的には初期摂動が支配的であるため、TEST のスプレッドの空間分布が CNTL から大きく変化するわけではないが、TEST と CNTL のスプレッドの差 (左下) を見ると、TEST

¹ これらのパラメータについては Berner et al. (2015) を参照されたい。 r_X は Berner et al. (2015) の A2-A4 式に基づいて実装した。

² 雲物理過程 (氏家 2020)、境界層過程 (西本 2020) ではインプリシットスキームを用いることで計算安定性を確保できる時間変化率を求めており、これらの時間変化率を (3.5.1) 式によって変更することは計算不安定につながる。

³ 第 3.3 節、第 3.7 節、第 3.8 節を参照

⁴ 第 3.4 節、第 3.7 節、第 3.9 節、第 3.10 節を参照

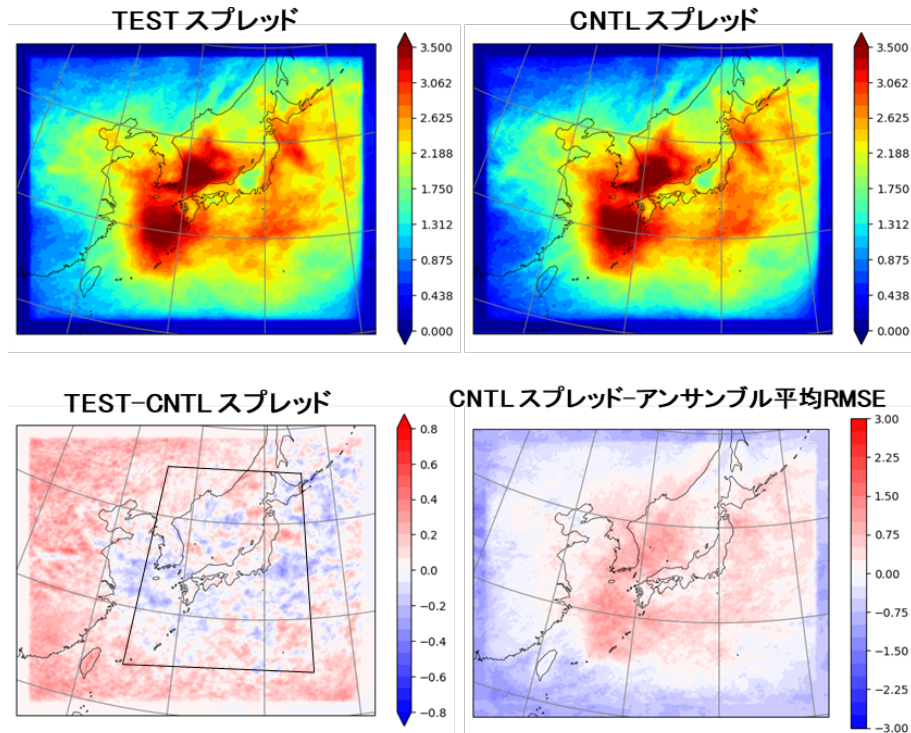


図 3.5.1 スプレッドおよびアンサンブル平均の RMSE の夏期間平均。850hPa の相当温位 [K]、FT=9。(左上) TEST のスプレッド、(右上) CNTL のスプレッド、(左下) TEST と CNTL のスプレッドの差、(右下) CNTL のスプレッドとアンサンブル平均の RMSE の差。左下図の黒枠は検証の日本域 (125°-145°E, 25°-45°N) を示す。

は CNTL と比べ、日本周辺域の初期摂動（主にメソ特異ベクトル）が入りやすい領域でスプレッドが小さくなり、それ以外の領域でスプレッドが大きくなる。このスプレッドの空間分布の変化は、初期摂動の振幅を小さくしたことによるスプレッドの減少が初期摂動の大きい領域で見られる一方、SPPT 法の導入によるスプレッドの増加は予報領域全体に初期摂動の分布よりも広く及ぶためであると考えられる。ここで、理想的なアンサンブル予報の性質として、スプレッドの大きさはアンサンブル平均の RMSE と同程度 (高野 2002) であることが望ましいので、CNTL のスプレッドとアンサンブル平均の RMSE との差 (右下) においては、日本周辺等の初期摂動が入りやすい領域ではスプレッドが過大傾向、それ以外の領域ではスプレッドが過小傾向という課題があることが分かる。TEST へ変更したことによるスプレッドの変化 (左下) は、これらの傾向を緩和する方向であることから、スプレッドが適正化する方向に変化していることが分かる。

図 3.5.2 は夏期間の 850 hPa 相当温位の予報時間別のスプレッドスキルである。左は予報領域全体 (MSM 域と呼ぶ)、右は図 3.5.1 の黒枠で示した領域 (「日本域」と呼ぶ、125°-145°E, 25°-45°N) について示した。日本域では予報前半のスプレッドの過大傾向が改善している。また、MSM 域では予報後半にかけてのスプレッドの過少傾向が改善していることが分かる。これらの変化は冬実験についても同様に見られた (図略)。

初期摂動の影響が大きい日本域のスプレッドの変化としては、夏期間、冬期間ともに 850 hPa の相当温位に見られるような予報前半の過大なスプレッドが抑制され適正化する要素がほとんどであった。予報後半にかけては、SPPT 法の導入によりスプレッドが増加して適正化する要素が多いが、下層の気温では過大傾向となった (図略)。一方、上層や地表付近は初期摂動の影響が小さくスプレッドが不足していたが⁵、SPPT 法の導入によりスプレッドが大きくなり適正化した (図略)。これらは R04 第 4.3 節の結果と同様の変化傾向である。

(2) 降水確率予測

降水確率予測の変化を確認するため夏期間の 3 時間降水量のブライアスキルスコア (BSS) を図 3.5.3 に示す。気候値予測よりスキルがある閾値 (15 mm/3h 以下) において CNTL に対して TEST が改善した。予報前半では改善は明瞭でなく、予報後半で改善傾向がより明瞭である (図 3.5.4)。冬実験については、気候値予測よりもスキルがある閾値 (15 mm/3h 以下) において、ほぼ中立であったが (図略)、予報時間別にみると、弱雨の予報初期 (FT=6 まで) において BSS が改悪となった (図 3.5.5)。これは、初期摂動の振幅を小さくしたことが影響したためと考えられる。

⁵ メソスケール現象の予測に影響が大きい中下層における物理量の摂動を優先的に算出している (國井・小野 2020)。

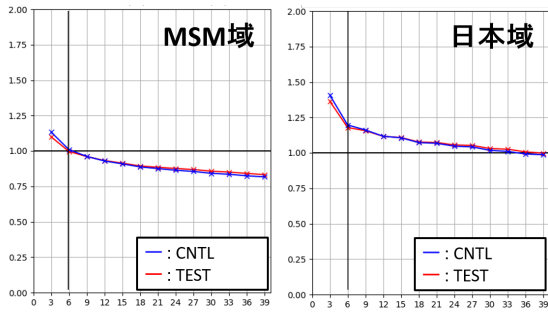


図 3.5.2 夏期間の 850hPa 相当温位 [K] の予報時間別のスプレッドスキル。青線が CNTL、赤線が TEST。検証領域は (左) MSM 域、(右) 日本域。横軸は予報時間 [h]。スプレッドスキルは 1 が最適であり、1 より大きい (小さい) とスプレッドが予測誤差に対して過大 (過小) であることを意味する。

R04 第 4.3 節では、積雲対流過程に摂動を与えたことにより、積雲対流過程が寄与する領域付近の降水分布の表現のばらつきが大きくなる事例が見られ、このことが降水確率予測の改善に寄与していると考えられることを述べた。本試験においても同様の傾向により降水確率予測が改善したと考えられる事例として、図 3.5.6 に 2021 年 8 月 12 日の九州北部における線状降水帯事例を示す。この業務化試験では、降水確率予測の変化は、全球モデルおよびメソ解析の改良による効果と MEPS の変更による効果が合わさった変化として見ることができる。それぞれの効果が分かりやすいよう、全球モデルおよびメソ解析の改良の効果のみを CNTL に加えた実験を BASE として示す⁶。

図 3.5.6 は CNTL、BASE、TEST の 3 時間降水量について、全 21 メンバーの予測結果の最大値を格子ごとに抽出した「アンサンブル最大」および 30 mm/3h の超過確率を示した。まず、CNTL と BASE の比較により、全球モデルおよびメソ解析の改良 (観測データ利用拡充) の効果によって、九州北部の実況の強雨に対応した領域に強雨を表現するメンバーが増加し、超過確率の分布が東西の走行を示すようになり、全体的な降水予測位置の改善が確認できる。次に、BASE と TEST を比較すると、MEPS での SPPT 法の導入の効果により、降水表現のばらつきが大きくなり、九州の西海上から線状の強雨域を表現するメンバーや、地形風下の降水を表現するメンバーが増加し、実況の強雨と対応する領域で超過確率の増加が見られた。R04 第 4.3 節で述べた変化と同様の傾向であり、積雲対流過程に摂動を与えた効果と考えられる。

⁶ なお、BASE と TEST の統計検証による比較も行っており、BASE に対し TEST は 3 時間降水量の BSS を改善することを確認している (図略)。

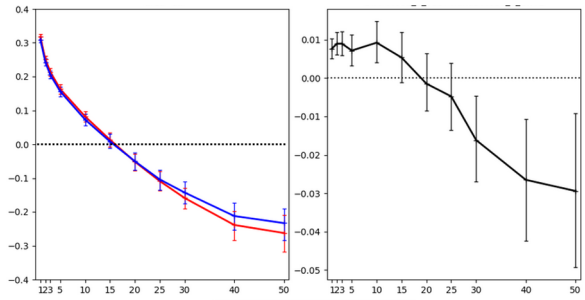


図 3.5.3 夏期間の 3 時間降水量の (左) ブライアスキルスコア、(右) TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は閾値 [mm/3h]。

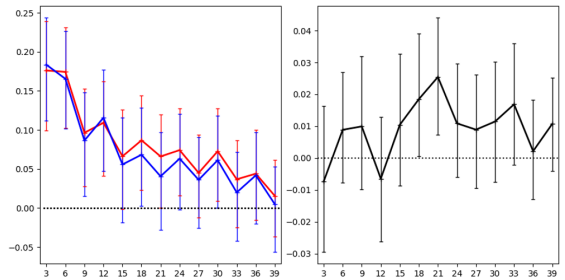


図 3.5.4 夏期間の閾値 10 mm/3h の (左) ブライアスキルスコア、(右) TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は予報時間 [h]。

3.5.4 まとめ

初期摂動と側面境界摂動のみを考慮してきた MEPS において、新たに数値予報モデルの不確実性を表現するため、SPPT 法の導入に向けた開発を進めた。SPPT 法を導入し、初期摂動の振幅を抑えたシステムにおいて、スプレッドの空間分布の適正化、降水確率予測の改善を確認した。これらの効果は、同時期に現業化予定であった全球モデル、メソ解析の変更と組み合わせた実験でも改善をもたらすことが確認できた。この結果を踏まえ、2023 年 3 月に MEPS に本変更を導入した。

今後の開発に向けて、今回適用できなかった物理過程 (雲物理、境界層、地表面等) の不確実性を捕捉する手法の検討や、不確実性が小さいと考えられる晴天放射の時間変化率に摂動を与えない修正 (Lock et al. 2019)、

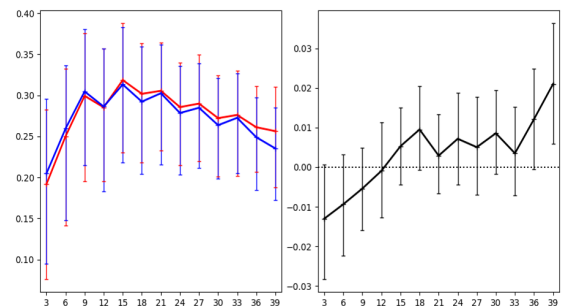


図 3.5.5 冬期間の閾値 2 mm/3h の (左) ブライアスキルスコア、(右) TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は予報時間 [h]。

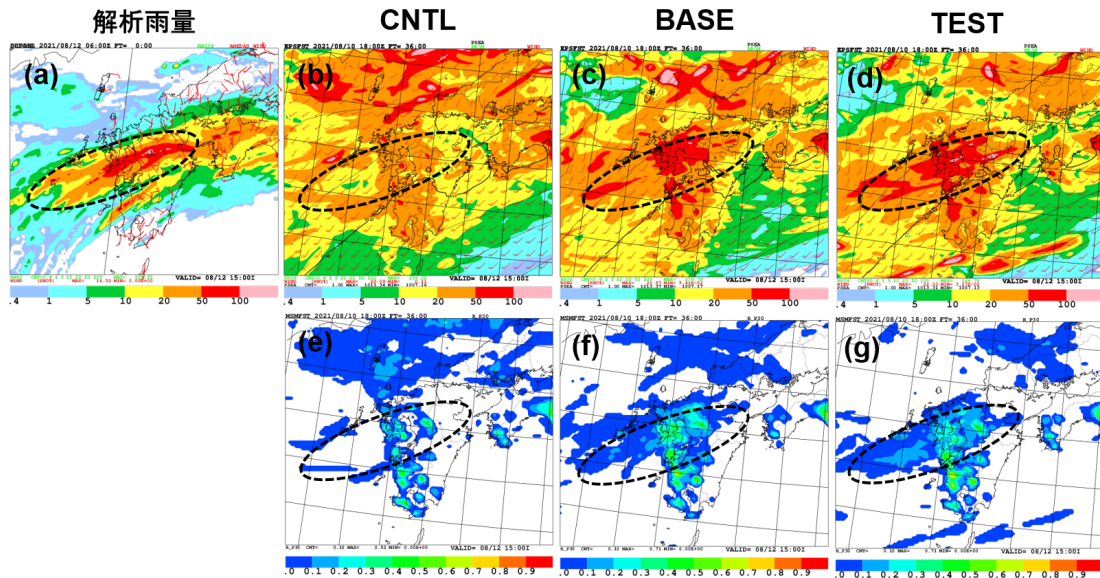


図 3.5.6 2021 年 8 月 12 日 15JST の 3 時間降水量について、上段の左から (a) 解析雨量、続いて (b)CNTL、(c)BASE、(d)TEST のアンサンブル最大降水量 (全 21 メンバーの予測結果の最大値を格子ごとに抽出)、下段は左から (e)CNTL、(f)BASE、(g)TEST の 30 mm/3h 超過確率。予報値は 2021 年 8 月 10 日 18UTC 初期値の FT=36。

等が SPPT 法の改良課題として挙げられる。また、他のモデルアンサンブル手法との併用なども含め、MEPS における数値予報モデルの不確実性のより適切な表現を考えていく必要がある。さらには初期摂動や側面境界摂動の改良、下部境界摂動の導入も今後の MEPS の改良課題として重要であり、これらの課題の優先度等を検討しながら、引き続き MEPS の改良に取り組んでいく。

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.

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.

気象庁, 2021: メソアンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 66–73.

気象庁, 2022: メソアンサンブル予報システムの鉛直層増強と物理過程の改良. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 100–101.

気象庁, 2023: メソアンサンブル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入. 数値予報開発センター年報 (令和 4 年), 気象庁 数値予報開発センター, 76–80.

國井勝, 小野耕介, 2020: メソアンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部,

85–115.

Lock, S. J., S. T. Lang, M. Leutbecher, R. J. Hogan, and F. Vitart, 2019: Treatment of model uncertainty from radiation by the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme and associated revisions in the ECMWF ensembles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 75–89.

西本秀祐, 2020: 境界層. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 69–78.

Ono, K., M. Kunii, and Y. Honda, 2021: The regional model-based Mesoscale Ensemble Prediction System, MEPS, at the Japan Meteorological Agency. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **147**, 465–484.

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

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

氏家将志, 2020: 雲過程. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 45–55.