

第3章 数値予報システムの開発成果

3.1 開発成果一覧

表 3.1.1 2025 年 1 月から 2025 年 12 月までに数値予報システムに導入した開発成果

節	表題	日時
3.2	全球数値予報システムの並列化手法及び物理過程の改良	3 月 18 日
3.3	全球アンサンブル予報システムの改良（予報モデル更新、モデルアンサンブル改良等）	3 月 18 日
3.4	メソモデルの高精度標高データの利用開始及び物理過程の改良	5 月 20 日
3.5	メソモデル・メソアンサンブル予報システムによる大雨発生確率ガイダンスの改良	5 月 20 日
3.6	全球解析における観測データ利用手法の改良	10 月 15 日
3.7	メソ解析・局地解析における観測データ利用手法の改良	2 月 12 日
3.8	高潮モデルの改良	1 月 28 日 11 月 20 日
3.9	全球化学輸送モデルのオゾン同化に関する改良	12 月 16 日

3.2 全球数値予報システムの並列化手法及び物理過程の改良

3.2.1 はじめに

全球数値予報システムは、天気予報や週間天気予報、台風予報での利用、メソ数値予報システムへの境界値提供をはじめ多くの役割を担う基盤数値予報システムである。気象庁では、平成30年に当庁が策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」（以下、重点計画）で示した方向性に沿い、全球数値予報システムの予測精度向上に向けた開発を継続的に進めてきている。第10世代スーパーコンピュータシステムにおいては、本田(2018)で示した計画通り、鉛直・水平解像度の増強や物理過程の精緻化等を通じた全球モデル(GSM)及び全球解析(GA)の継続的な改良を実施した(気象庁2021; 気象庁2022; 気象庁2024a)。

2024年3月から運用開始された第11世代スーパーコンピュータシステムにおいてもGSMの予測精度向上に向けた開発を進めている。同時に、計算機の性能の伸びが鈍化している近年の状況から、高速化・省資源化も重要な課題の一つとなっている。2025年3月18日に実施した全球数値予報システムの更新では、今後の更なるGSMの高解像度化や精緻化に向けたステップとして、並列化手法と配列構造を改良し省資源化を達成するとともに、計算機の構成や特性への柔軟な対応を可能とした。あわせて、物理過程の改良として、陸面過程で利用する葉面積指数(LAI: Leaf Area Index)¹気候値、放射過程で利用する二酸化炭素濃度気候値を更新した。これらの改良により、全球予報及び全球4次元変分法(全球4D-Var)のメモリ使用量削減、北半球の地上付近や成層圏における対ラジオゾンデの気温バイアスの改善等を確認した。本稿では、これらの改良内容と予測精度の評価結果及び予測特性の変化について報告する。以下では、第3.2.5項に示すGSMのバージョンの命名規則に沿い、本稿で示す改良を総称してGA/GSM2503と呼ぶ。

3.2.2 変更概要

ここでは、GA/GSM2503における変更の概要やその狙いについて示す。GSMの各変更の詳細や個々の変更のインパクトについては、気象庁(2024b)、気象庁(2025)を参照されたい。

(1) 全球モデルにおける並列化手法と配列構造の改良

今後のGSMの高解像度化を見据え、省資源化を目的に、格子空間におけるMPI分割手法の見直しを実施した。GA/GSM2503より前のGSMでは、格子空間の領域分割について、物理過程用にラウンドロビン方

式²、移流計算用にブロック割当方式³を採用しており、両過程間の遷移時に領域分割変更に伴う多くの通信が必要となっていた。GA/GSM2503では、これら2種類の領域分割方式をブロック割当方式へと統合することによって通信回数を削減した。また、スレッド並列化効率・ベクトル化効率の向上や、特性の異なる他計算機への移植性向上、配列サイズの適正化等を目的に、配列構造の見直しを実施した。

(2) 陸面過程の改良

LAI分布の表現の現実との整合性向上を通じた地上気象要素や大気下層の気温のバイアス軽減を目的に、GSMで用いるLAI気候値を更新した。GA/GSM2503で利用するLAI気候値の作成には、旧気候値の作成元よりも高精度・高解像度のMODIS⁴プロダクト(Myneni et al. 2002)を用いた。また、3区分の緯度帯(熱帯、温帯、寒帯)及び植生種別ごとに平均した月別気候値から格子ごとの月別気候値へと変更した。

(3) 放射過程の改良

GSMで利用する二酸化炭素濃度気候値(全球一様)の値を396.0 ppmv(2013年の観測値)から417.9 ppmv(2022年の観測値)へと更新した。現在の気候状態をより適切に反映した気候値の利用により、特に成層圏において予測精度が向上した。

放射過程は計算量・メモリ使用量が多い過程であるため、計算方法は変更しない範囲で実装を全体的に見直すことで、高速化・省資源化を達成した。同時に、今後の開発の効率化のため、可読性の高いコードとなるような修正も行った。

(4) 全球解析における並列化手法の改良

以上のGSMに対する改良を全球4D-Varのインナーモデル(非線形、接線形、随伴)にも導入した。加えて、格子空間の領域分割方式について、全球4D-Varの観測演算子用とインナーモデルの物理過程・移流計算用の方式を統合する改良を行った。

全球4D-Varの観測演算子は観測項の構成要素であり、インナーモデルによって観測スロットの代表時刻まで時間推進された摂動から観測相当量を求め、それを格子空間上で観測位置へと水平・鉛直内挿する。これまでのインナーモデル格子空間ではラウンドロビン方式で割り当てられた不連続な領域分割が行われていたが、観測位置への摂動の近接4点内挿を効率よく行うために、観測演算子では連続したブロック領域を用いた独自の分割方式が採用されていた。この領域分割

¹ 単位面積あたりの葉(片面)面積 [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$]。

² 各MPIプロセスが、様々な地域の格子点を担当するようにする領域分割手法。

³ 各MPIプロセスが、地理的に近い格子点を担当するようにする領域分割手法。

⁴ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Terra衛星及びAqua衛星に搭載されている中分解能撮像分光放射計)。

方式の違いは両者の間に大きな通信を発生させる要因となっていた。GA/GSM2503 のインナーモデル格子空間では連続するブロック領域を用いた分割方式が採用されたことから、観測演算子も独自方式を廃止し、インナーモデル格子空間の方式を利用することにした。これによりインナーモデル・観測演算子間の通信は大幅に削減された。

3.2.3 検証結果

GA/GSM2503 の現業導入に際して実施した、予測精度を検証するための業務化試験⁵等の結果に基づき、予測精度の変化の概要を示す。

(1) 実験設定

以下では、2024 年 4 月時点の現業数値予報システムによる実験を CNTL、CNTL に第 3.2.2 項で示した変更を取り込んだシステムによる実験を TEST と呼ぶ。実験期間は北半球における夏冬の 2 期間を対象としており、ここではそれぞれ夏期間、冬期間と呼ぶ。実験の解析と予報は以下の期間について実施した。

- 夏期間
 - － 解析：2023 年 6 月 10 日～2023 年 10 月 11 日
 - － 予報：2023 年 6 月 20 日～2023 年 10 月 11 日
- 冬期間
 - － 解析：2023 年 11 月 10 日～2024 年 3 月 11 日
 - － 予報：2023 年 11 月 20 日～2024 年 3 月 11 日

全球解析には、予測を決められた時刻までに提供するための速報解析と、解析値の品質を維持するために観測データの入電を十分待ってから行うサイクル解析の 2 種類があり、業務化試験では現業運用に準じて両方の解析を行う。上の実験期間の解析とはサイクル解析を意味する。また、速報解析で作成した初期値から予報モデルを実行するため、速報解析の実施期間は予報と同一になる。なお、両解析と予報の間のデータフローなど、気象庁の全球数値予報システムの全体像については JMA (2025) を参照されたい。

検証対象期間は、夏期間、冬期間それぞれ以下の期間としている⁶。

- 夏期間：2023 年 7 月 1 日～2023 年 9 月 30 日
- 冬期間：2023 年 12 月 1 日～2024 年 2 月 29 日

(2) メモリ使用量

夏期間におけるある一つの初期値に対して実行した 132 時間予測と全球 4D-Var のメモリ使用量の変化を図 3.2.1 に示す。全球数値予報システムの並列化手法及び配列構造の改良の効果として、132 時間予測で約 19%、全球 4D-Var で約 14%のメモリ使用量が削減された。

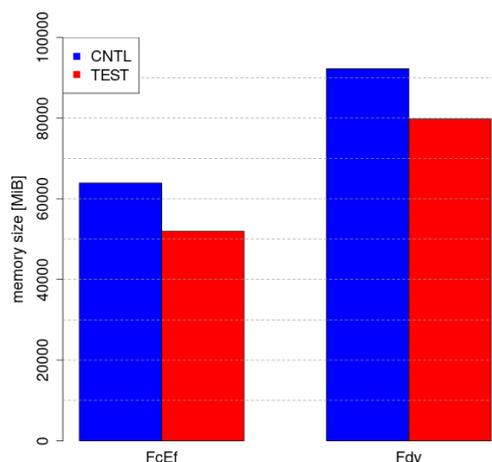


図 3.2.1 132 時間予測 (FcEf、解像度：TQ959L128) と全球 4D-Var (Fdv、解像度：TL319L128) における 1 計算ノードあたりのメモリ使用量 [MiB] の最大値。青は CNTL、赤は TEST を表す。

(3) 台風予測

気象庁ベストトラックに対して行った台風進路予測の検証では、特に変化は見られず中立であった (図略)。また、台風強度予測にも影響は見られなかった。今回の変更は、主に陸上と成層圏に影響を与えるものであり、北西太平洋の海上での予測特性に直接的に影響を与えるものではないことと整合的である。

(4) 気温の予測

図 3.2.2 は、夏期間の北半球における気温の予測値について、ラジオゾンデ観測に対する平均誤差の予報時間別の鉛直プロファイルである。地上から大気下層にかけて気温のバイアスが改善しているが、これは LAI 気候値の更新を通じ、潜熱・顕熱フラックスの予測精度が向上したためである。一方、成層圏においても気温の高温バイアスが改善しているが、これは二酸化炭素濃度の増加に伴い成層圏での長波放射による冷却が強まったためである。冬期間についても同様の傾向が見られた (図略)。

(5) 各種統計検証スコア (夏期間)

図 3.2.3 及び図 3.2.4 に、夏期間について解析値とラジオゾンデ観測値を参照値として、代表的な要素の予測を領域ごとに検証した結果を示す。検証は、アノマリー相関係数 (ACC:Anomaly Correlation Coefficient) またはラジオゾンデ観測に対しては相関係数 (CC:Correlation Coefficient)、二乗平均平方根誤差 (RMSE:Root Mean Square Error)、平均誤差 (ME:Mean Error) とその変化の有意性についてである。今回の変更による予測への影響は小さく、対解析値検証・対ラジオゾンデ検証ともに概ね中立の結果となった。

⁵ 業務化試験の位置付け・内容については、石田 (2017) を参照。

⁶ 台風検証については、サンプル数を確保するため実験期間中の全てのデータを利用する。

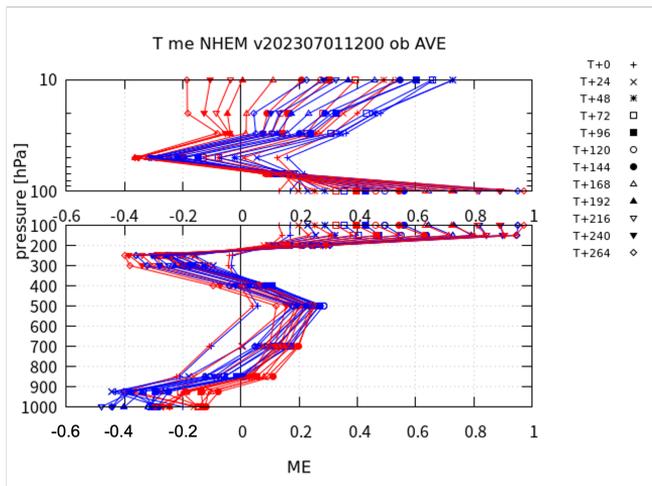


図 3.2.2 夏期間の北半球 (20°N-90°N) における気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差 [K] の予報時間間 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。青は CNTL、赤は TEST を表す。

(6) 各種統計検証スコア (冬期間)

図 3.2.5 及び図 3.2.6 に、冬期間について解析値とラジオゾンデ観測値を参照値として、夏期間と同様に代表的な要素を領域ごとに検証した結果を示す。冬期間についても、夏期間と同様に対解析値検証・対ラジオゾンデ検証ともに中立傾向であった。

3.2.4 まとめと今後の開発

2025 年 3 月 18 日に実施した全球数値予報システムの更新では、並列化手法と配列構造の改良及び LAI 気候値と二酸化炭素濃度気候値の更新を実施した。これらの改良により、省資源化と北半球の地上付近や成層圏における対ラジオゾンデの気温バイアスの改善を確認した。

今後の開発として、引き続き GSM の更なる高解像度化を見据えた高速化・省資源化に関する開発を進める。特に、GSM 高解像度化に伴いデータ転送量・演算量の増加が見込まれるため、それらを削減する一手段である浮動小数点数単精度化の調査を進めている。並行して予測精度向上に向けた開発も進めており、重点計画で示した方向性である、全球 10km メッシュの高解像度海面水温解析値の利用に向け、試験データを用いた全球数値予報システムの予測精度への影響調査を進めている。全球 4D-Var についても、今後の利用観測の高頻度化・高解像度化への対策として、省資源化を目的とする浮動小数点数単精度化の調査を進めているところである。これと同時に、解析精度向上を目的とするアンサンブル背景誤差の局所化手法の高度化に関する開発も進行中である。これらの開発や調査の進捗については、第 4.1 節で報告する。

3.2.5 補足：全球モデル (GSM) の仕様

表 3.2.1 に、GSM の水平・鉛直の分解能等の基本仕様の向上や、力学・物理過程の改良についての更新履歴を示す。表の左列に示すように、GSM にはバージョン名が付けられており、変更に伴い改定されている。バージョン名の形式は、全球数値予報システムに改良を導入した西暦の下二桁と月を「GSM」の後ろに付けたもので、例えば、2025 年 12 月時点での最新 GSM のバージョン名は、本稿で示す 2025 年 3 月に運用を開始したものであり、「GSM2503」と呼ぶ。表の中の分解能の表記について、はじめの T, TL もしくは TQ は三角形波数切断を意味し、その後の数字は切断波数を表す。T または TQ の場合は 2 次格子⁷、TL の場合は 1 次格子を意味する。また、その後の L は鉛直層を意味し、直後の数字は層数を表す。

GSM2503 について、力学過程及び物理過程の仕様を表 3.2.2 にまとめる。各過程の詳細については JMA (2025) もあわせて参照されたい。表におけるアウターモデル及びインナーモデルとは、データ同化プロセスにおいて 4 次元変分法で用いられるモデルであり、アウターモデルは解析における第一推定値の計算に用いるモデルを、インナーモデルは解析修正量を求める計算に用いるモデルを指す。ただし、4 次元変分法で用いるインナーモデルの物理過程にはバージョンの古いものや簡略化したものが含まれている。

参考文献

Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.

Beljaars, A., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1327-1347.

Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327-341.

Best, M. J., A. C. M. Beljaars, J. Polcher, and P. Viterbo, 2004: A proposed structure for coupling tiled surfaces with the planetary boundary layer. *J. Hydr. Meteorol.*, **5**, 1271-1278.

Chou, M.-D., M. J. Suarez, X.-Z. Liang, and M. M.-H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *Technical report series on global modeling and data assimilation, Vol. 19, NASA Goddard Space Flight Center*, 56pp.

Coakley, J. A., R. D. Cess, and F. B. Yurevich, 1983: The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: a parameterization for climate

⁷ T または TQ の場合で違いはないが、実効解像度を向上させることを目的に 2 次格子を採用している場合は TQ で表記している。

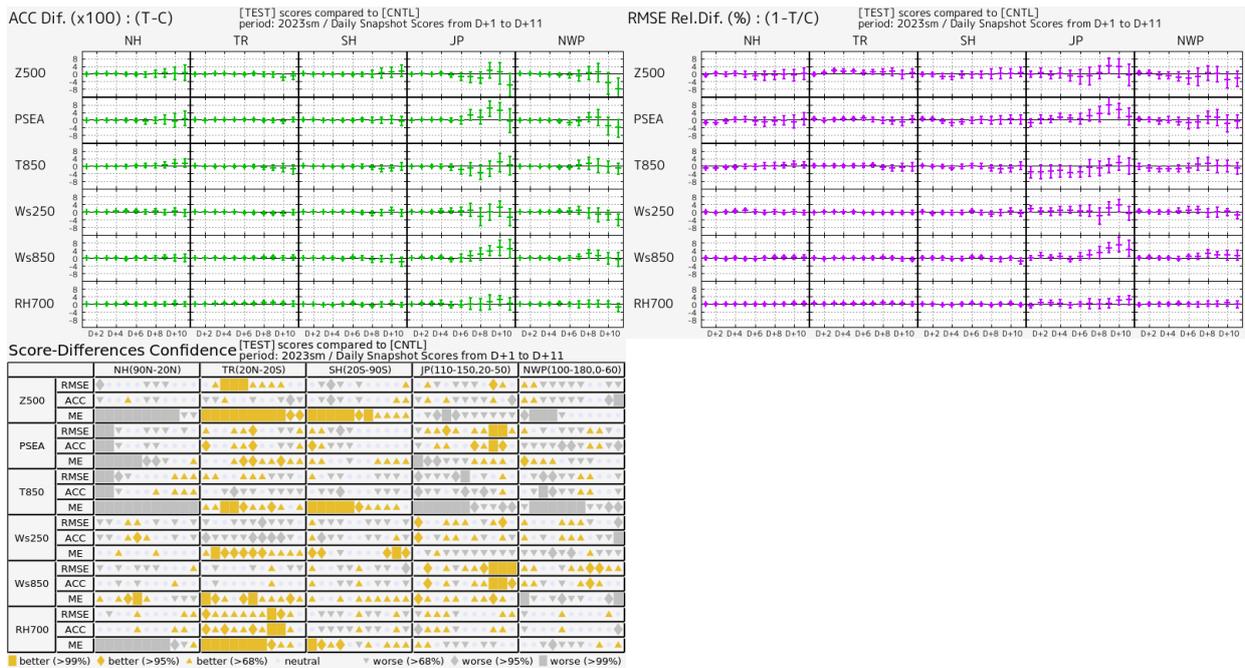


図 3.2.3 夏期間における対流圏主要要素の ACC の改善幅 (左上図)、RMSE の改善率 (右上図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (左下図: スコアカード)。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S–20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E–150°E, 20°N–50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E–180°E, 0°–60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、ACC、ME について、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

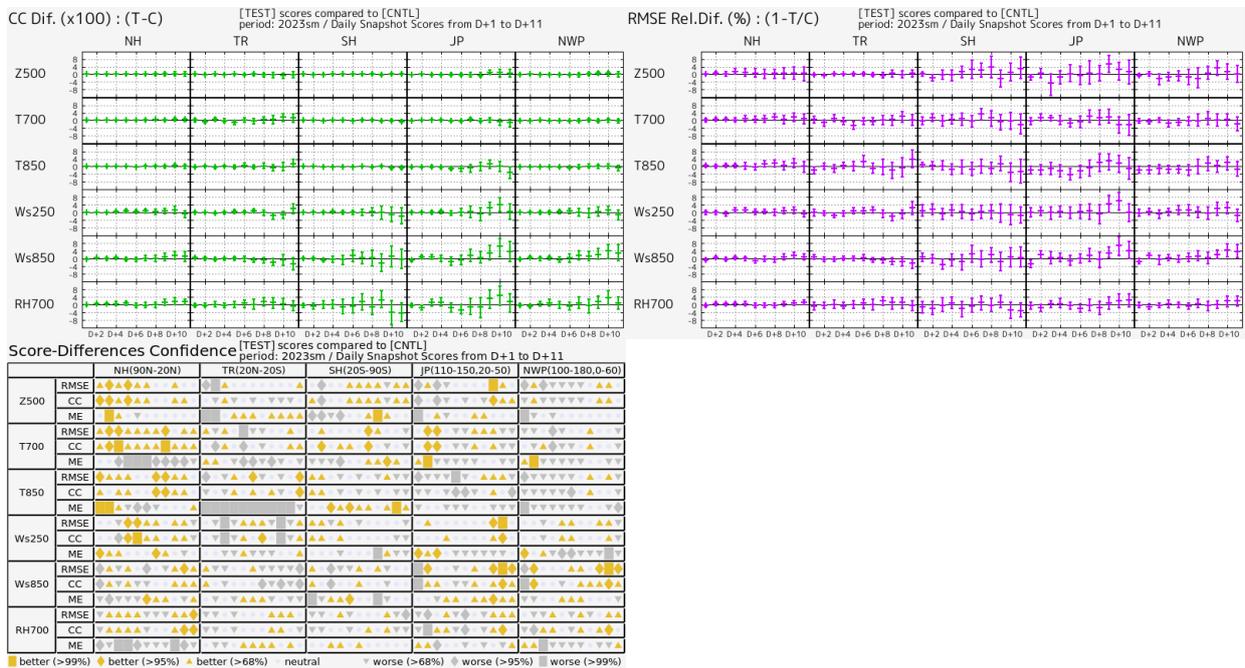


図 3.2.4 夏期間における対流圏主要要素の CC の改善幅 (左上図)、RMSE の改善率 (右上図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (左下図: スコアカード)。ラジオゾンデを参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S–20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E–150°E, 20°N–50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E–180°E, 0°–60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、700 hPa 気温 (T700)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、CC、ME について、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

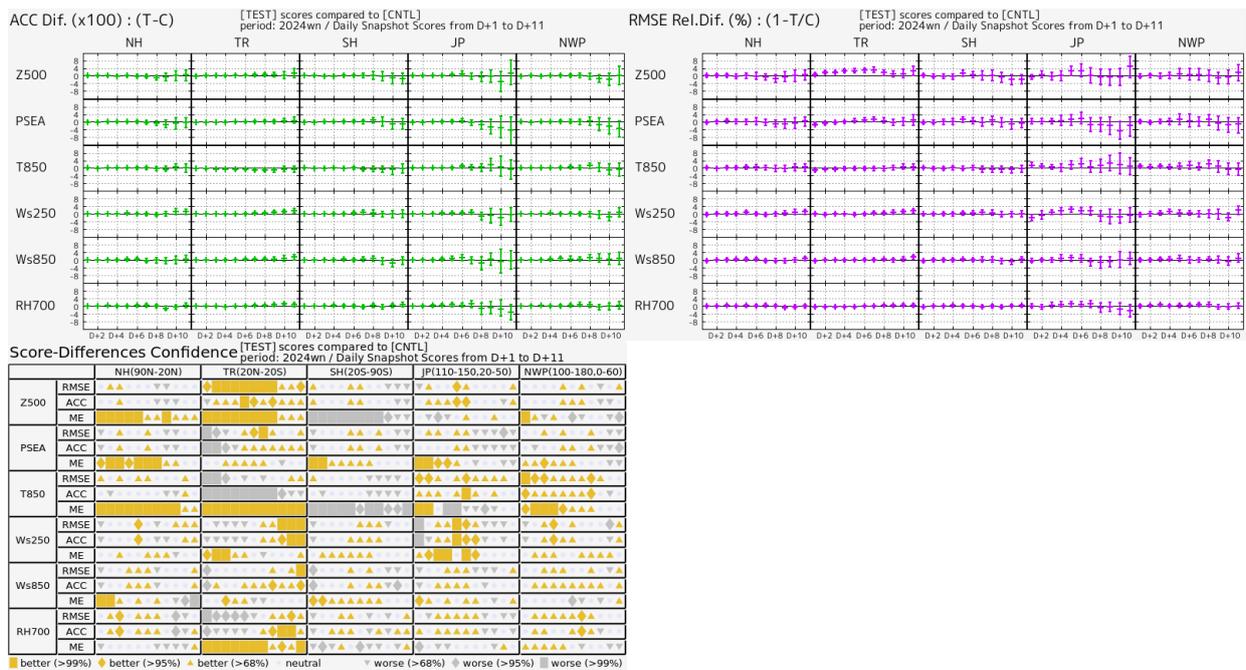


図 3.2.5 冬期間についての解析値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.3 と同じ。

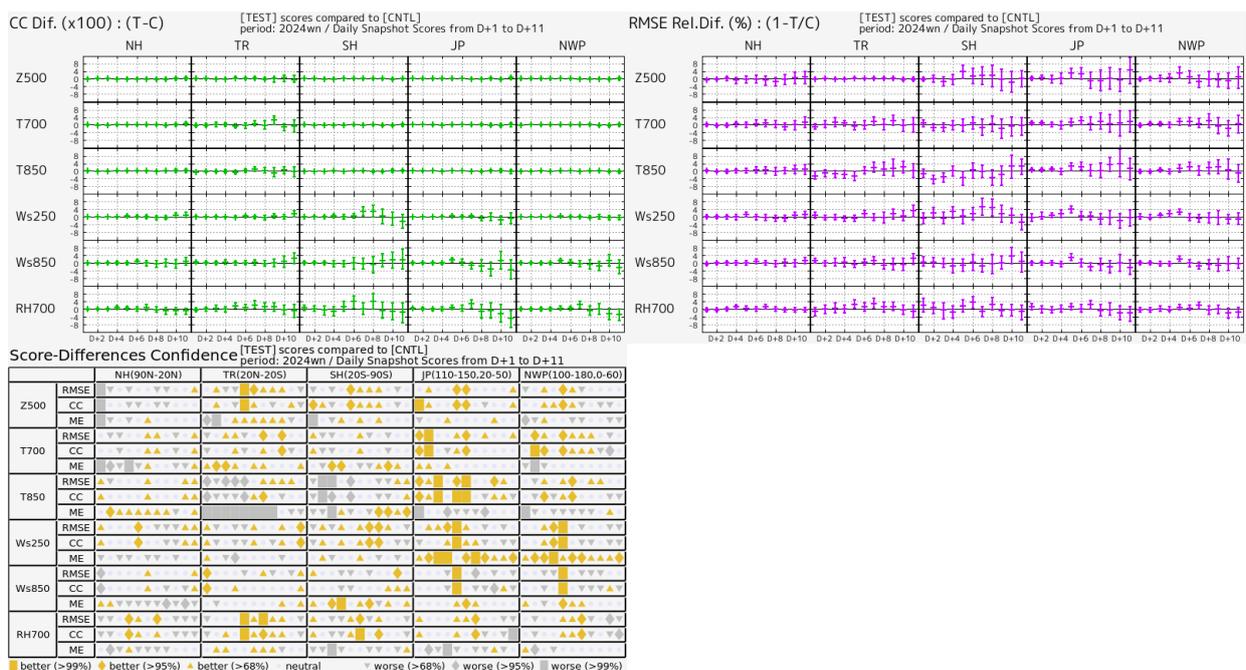


図 3.2.6 冬期間についてのラジゾンデ観測値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.4 と同じ。

models. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 116–138.

Collins, W. D., 2001: Parameterization of Generalized Cloud Overlap for Radiative Calculations in General Circulation Models. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3224–3242.

Dobbie, J. S., J. Li., and P. Chýlek, 1999: Two-and four-stream optical properties for water clouds and solar wavelengths. *J. Geophys. Res.*, **104**, 2067–2079.

Ebert, E. E. and J. A. Curry, 1992: A parameterization of ice cloud optical properties for climate models. *J. Geophys. Res.*, **97**, 3831–3836.

Fu, Q. and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139–2156.

Geleyn, J.-F. and A. Hollingsworth, 1979: An economical analytical method for the computation of

- the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contrib. Atmos. Phys.*, **52**, 1–16.
- Han, J. and H.-L. Pan, 2011: Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*, **26**, 520–533.
- 本田有機, 2018: NAPS10 における改良計画. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2–5.
- 石田純一, 2017: 数値予報システム開発のプロセス. 数値予報課報告・別冊第 63 号, 気象庁予報部, 4–10.
- JMA, 2025: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan, 262 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2025-nwp/index.htm>).
- Joseph, J. H., W. J. Wiscombe, and J. A. Weinman, 1976: The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2452–2459.
- Kawai, H. and T. Inoue, 2006: A Simple Parameterization Scheme for Subtropical Marine Stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17–20.
- 気象庁, 2021: 全球モデルの改良. 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, 31–41.
- 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.
- 気象庁, 2024a: 全球数値予報システムの水平解像度向上、物理過程改良、全球解析の高度化. 数値予報開発センター年報 (令和 5 年), 気象庁 数値予報開発センター, 17–29.
- 気象庁, 2024b: 全球モデルの開発進捗. 数値予報開発センター年報 (令和 5 年), 気象庁 数値予報開発センター, 83–90.
- 気象庁, 2025: 全球モデルの開発進捗. 数値予報開発センター年報 (令和 6 年), 気象庁 数値予報開発センター, 47–54.
- Lindner, T. H. and J. Li, 2000: Parameterization of the Optical Properties for Water Clouds in the Infrared. *J. Climate*, **13**, 1797–1805.
- Lott, F. and M. J. Miller, 1997: A new subgrid-scale orographic drag parametrization : Its formulation and testing. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 101–127.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.
- 宮本健吾, 2005: 適合ガウス格子. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 39–42.
- Moorthi, S. and M. J. Suarez, 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 978–1002.
- Myneni, R. B., S. Hoffman, Y. Knyazikhin, J. L. Privette, J. Glassy, Y. Tian, Y. Wang, X. Song, Y. Zhang, G. R. Smith, A. Lotsch, M. Friedl, J. T. Morisette, P. Votava, R. R. Nemani, and S. W. Running, 2002: Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, **83**, 214–231.
- Randall, D. and D.-M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. *The representation of cumulus convection in numerical models, AMS Meteorological Monograph Series*, **46**, 137–144.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505–531.
- Simmons, A. J. and D. M. Burridge, 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758–766.
- Smith, R. N. B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435–460.
- Untch, A. and A. J. Simmons, 1999: Increased stratospheric resolution in the ECMWF forecasting system. *ECMWF Newsletter*, **82**, 2–8.
- Vosper, S. B., 2015: Mountain waves and wakes generated by South Georgia: Implications for drag parametrization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 2813–2827.
- Wells, H. and S. B. Vosper, 2010: The accuracy of linear theory for predicting mountain-wave drag: Implications for parametrization schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 429–441.
- Yabu, S., 2013: Development of longwave radiation scheme with consideration of scattering by clouds in JMA global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **43**, 4.07–4.08.

Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) –Model Description–. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **64**, 1–83.

表 3.2.1 GSM の主な更新履歴

バージョン	主な変更内容
GSM8803	運用開始。仕様は T63L16、最上層 10 hPa
GSM8911	T106L21 へ仕様向上、ハイブリッド座標系と新陸面過程の導入
GSM9603	T213L30 へ仕様向上、新積雲対流過程の導入
GSM9912	雲水スキームの導入、積雲対流過程と放射過程の改良
GSM0103	T213L40・最上層 0.4 hPa へ仕様向上、積雲対流過程の改良
GSM0305	積雲対流過程の改良、及び雪の近赤外アルベドの調整
GSM0407	層積雲スキームの導入、雲氷落下・積雲対流過程の改良、氷床アルベドの調整
GSM0412	晴天放射スキームの改良
GSM0502	TL319L40 へ仕様向上、セミラグランジュ移流スキームの導入
GSM0507	放射過程における雲の取扱いの改良、オゾン気候値の改定
GSM0711	TL959L60・最上層 0.1 hPa へ仕様向上、時間積分の 2 タイムレベル化、エーロゾル気候値の改定
GSM0801	積雲対流過程の改良
GSM0808	力学過程の改良、適合ガウス格子の採用
GSM1212	層積雲スキームの改良
GSM1304	放射過程（エーロゾル気候値、水蒸気吸収係数）の改良
GSM1403	TL959L100・最上層 0.01 hPa へ仕様向上、放射・境界層・重力波・積雲過程の改良、陸面初期値利用の改良
GSM1603	積雲対流・雲・陸面・放射・海水・海面過程、及び力学過程の改良
GSM1705	積雲対流・雲・陸面・放射・海水過程、及び力学過程の改良
GSM2003	地形性抵抗・非地形性重力波・境界層・陸面・雲・海水過程の改良
GSM2103	TL959L128 へ仕様向上、積雪、土壌水分初期値利用の改良
GSM2303	TQ959L128 へ仕様向上、地形性抵抗・非地形性重力波・放射過程の改良、地形オリジナルデータセットの更新
GSM2503	並列化手法の改良、陸面・放射過程の改良

表 3.2.2 GSM の仕様 (2025 年 3 月時点)

力学過程		
支配方程式	プリミティブ方程式系	
予報変数	東西風、南北風、気温、比湿、雲水量、地上気圧の対数	
離散化	水平：球面調和関数を基底関数としたスペクトル法、鉛直：有限差分法	
水平格子系	適合ガウス格子 (宮本 2005)	
水平分解能	予報モデル及びアウターモデル：TQ959 (格子間隔約 13 km : 0.125 度)、インナーモデル：TL319 (格子間隔約 55 km : 0.5625 度)	
鉛直座標系	$\sigma - p$ ハイブリッド座標 (Simmons and Burridge 1981)	
層数 (最上層)	128 層 (0.01 hPa)	
移流+時間積分	2 タイムレベル セミインプリシット - セミラグランジアン法 (Yukimoto et al. 2011)	
積分時間間隔	300 秒 (TQ959)、600 秒 (TL319)	
数値拡散	4 次の線形水平拡散を渦度、発散、仮温度に適用。スポンジ層として 2 次の線形水平拡散を 30 hPa より上層で発散に適用。	
物理過程		
放射	長波	2 方向吸収近似 (Yabu 2013) による放射伝達、大気分子による吸収は 2 種類の k -分布法で評価 (Fu and Liou 1992; Chou et al. 2001)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップ (Geleyn and Hollingsworth 1979) を仮定。光学特性は、水雲は Lindner and Li (2000)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
	短波	δ -Eddington 法による散乱・吸収計算 (Joseph et al. 1976; Coakley et al. 1983)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップを仮定し、Collins (2001) に基づく簡略化した独立カラム近似を適用。光学特性は、水雲は Dobbie et al. (1999)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
積雲対流	予測型クロージャアを用いるスペクトル型マスマックススキーム (Arakawa and Schubert 1974; Moorthi and Suarez 1992; Randall and Pan 1993)。雲モデルには氷相を考慮した簡易な雲微物理過程を用いる。	
雲	確率密度関数に基づいた凝結スキーム (Smith 1990) を基本に、雲水から降水への変換や再蒸発、雪の融解などの簡易な雲微物理過程、及び雲氷と雪の落下スキームを含む。また、層積雲に関する診断的スキーム (Kawai and Inoue 2006) を使用。	
境界層	乱流エネルギークロージャア型 (Mellor and Yamada 1974, 1982) と K クロージャア型 (Han and Pan 2011) のハイブリッドスキーム。	
地形性抵抗	Lott and Miller (1997) のスキームに Wells and Vosper (2010) 及び Vosper (2015) に基づく改良を加えたもの。Beljaars et al. (2004) のスキームにより乱流地形抵抗を扱う。	
非地形性重力波	緯度依存性を持つ定数励起源によるスペクトルパラメタリゼーション (Scinocca 2003)。	
地表面	Monin-Obukhov 相似則に基づくバルク式、安定度関数は Beljaars and Holtslag (1991) を用いる。開水面と海氷面は Best et al. (2004) の手法により混在格子として扱う。	
陸面	植生	Sellers et al. (1986) によるスキームを改良した手法でモデル化。
	積雪	体積、密度、アルベド、温度等の変化を予測。部分積雪を扱う。
	土壌	熱伝導はフーリエの法則に従い、水分の移動及び凍結・融解が考慮される。
海水	体積・形状・密度不変で物性が一律の熱伝導体として扱う。内部の熱伝導はフーリエの法則に従い、表面では放射と乱流フラックスの上部境界条件、及び融解を考慮する。	
化学過程	成層圏での簡易な診断型メタン酸化及び光乖離スキーム (Untch and Simmons 1999)。	
海面水温	時間発展は、全球海面水温解析値の平年偏差を、予測時間により季節変動する気候値に加える。	
海水分布	時間発展は、南北半球ごとの全球海水密度解析値の海水面積平年偏差を維持するように、海水密度の初期偏差固定予測値を気候値で修正する手法で扱う。	

3.3 全球アンサンブル予報システムの更新（予報モデル更新、モデルアンサンブル改良等）

3.3.1 はじめに

2025年3月18日に全球アンサンブル予報システム（全球EPS）の改良を行った。全球EPS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。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。

以下に今回の各変更項目の概要を記す。

予報モデルの更新

全球EPS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。今回の全球EPSの改良では、使用するモデルについて、2025年3月に全球決定論予報に導入したGSM（本年報の第3.2節参照。変更点については、数値予報開発センター年報（令和6年）第4.1節（気象庁2025b）および数値予報開発センター年報（令和5年）第4.1節（気象庁2024c）参照）に更新した。また、モデルの並列化手法と配列構造の改良によりメモリ使用量が削減されたことから、18日先予測まで1メンバーあたりのノード数を5から4に減少させ、ルーチン実行時の省資源化を図った。並列化手法と配列構造の改良は分解能の変換や特異ベクトル（SV）計算にも適用し、GSMと揃えた。

確率的水蒸気プロファイル参照（SHPC）法の導入

全球EPSのモデルアンサンブル手法として、新たに確率的水蒸気プロファイル参照（SHPC: Stochastic Humidity Profile for Convective parametrization）法を導入した。SHPC法は、積雲対流過程における不確実性を表現するため、積雲対流過程の入力となる水蒸気プロファイルに摂動を与える手法である。主に熱帯における予測のばらつきを増やす効果があり、これに合わせて熱帯のSVによる初期摂動の振幅調整（0.2から0.12に変更）を実施した。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6年）第4.2節（気象庁2025a）に記載があるので参照いただきたい。

SSTのリセンタリングの変更

海面水温（SST）摂動について、18日先予測以降のアンサンブル平均SSTとコントロールメンバーのSSTの不一致を解消するため、メンバー数51の18日先予測までとメンバー数25の18日より先の予測の双方でアンサンブル平均が0となるようにリセンタリング方法を変更した。18日先予測以降の地上気温の予測がわずかに改善することを確認している（詳細は数値予報開発センター年報（令和5年）第4.2節（気象庁2024a）を参照）。

3.3.2 業務化試験

変更の効果については、数値予報開発センター年報（令和6年）第4.2節（気象庁2025a）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）コントロールラン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は比較対象となる変更前の全球EPS（気象庁2024b）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
 - － 夏実験:2023年6月21日～2023年10月11日
 - － 冬実験:2023年11月21日～2024年3月11日
- 検証対象：00UTCと12UTCを初期時刻とする264時間予測および06UTCと18UTCを初期時刻とする132時間予測
- 初期値に用いる解析：TESTは2025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。

主要要素のスプレッドスキルと確率予測

図3.3.1に夏実験における主要な要素のスプレッドスキル¹を示す。熱帯では対流圏上層を中心に予測初期で過剰なばらつきが減少し、FT=72程度より先でいずれの要素もばらつきが増加して理想的なばらつきに近づいている。中高緯度では大きな変化はない。また、冬実験も同様であった（図略）。

図3.3.2に図3.3.1と同じ要素の夏実験の対解析値のCRPS²を示す。熱帯ではスプレッドの適正化に伴い、CRPSが改善している。中高緯度ではおおよそ中立から小幅な改善の要素が多いが、夏実験の北半球の中下層については予測初期でCRPSが若干悪化している。これは葉面積指数（LAI）気候値の更新に伴う変化と考えられ、陸上を中心に下層気温のバイアスの変化やそれに伴うCRPSの変化が見られているが、北半球の対従来型観測値のCRPSでは悪化は見られない（図略）ことから、大きな問題はないと考えられる。また、冬実験についてはこの悪化は見られず、その他は夏実験

¹ $c \times (\text{スプレッド} / \text{アンサンブル平均 RMSE})^2$ で定義し、1より大きいときはスプレッドが理想的な状態より過大であることが示唆される。 c は指標のメンバー数依存性を排除するためのメンバー数に関する係数である。

² 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 $\int_{-\infty}^{\infty} dt$ で積分したものの。値が小さいほど精度が高いことを意味する。

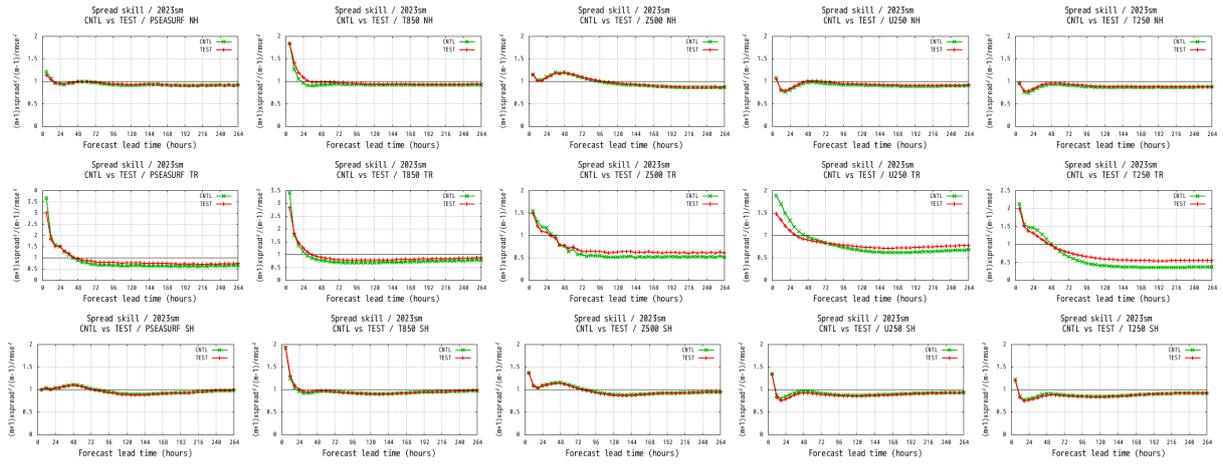


図 3.3.1 夏実験における予報時間ごとのスプレッドスキル。左から海面更正気圧、850 hPa 気温、500 hPa 高度、250 hPa 東西風、250 hPa 気温。上から検証領域が北半球 (90°N - 20°N)、熱帯 (20°N - 20°S)、南半球 (20°S - 90°S)。緑線が CNTL、赤線が TEST。1 (黒線) が理想的なばらつきを表す。

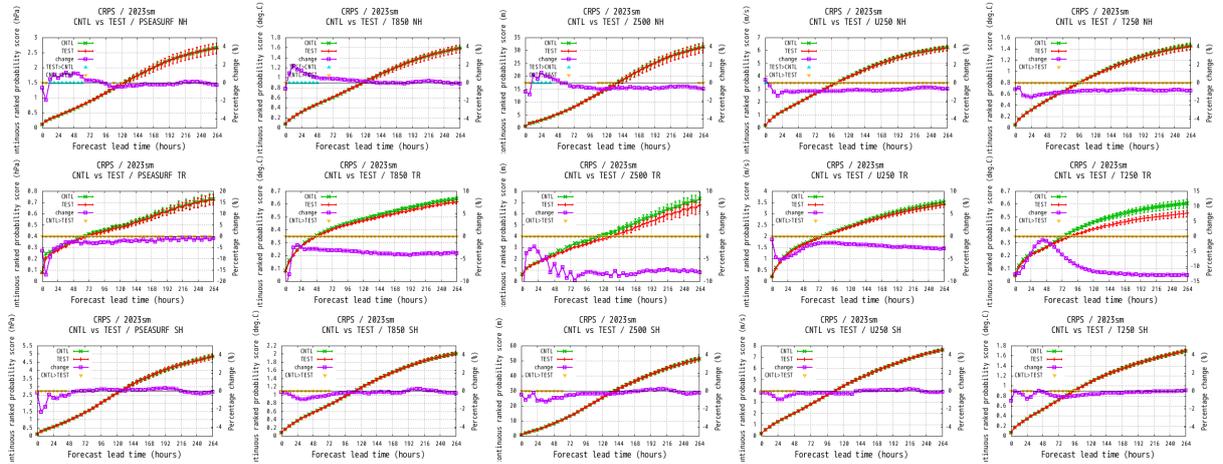


図 3.3.2 図 3.3.1 と同様、ただし対解析値の CRPS を表す。左から海面更正気圧 [hPa]、850 hPa 気温 [K]、500 hPa 高度 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]、250 hPa 気温 [K]。紫線は変化率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL})[\%]$ 、右縦軸で、水色の Δ 、黄色の ∇ はそれぞれ、TEST が CNTL に対してブートストラップ法で有意水準 5% で有意に増加、減少していることを表す。

と同様に中高緯度は中立から小幅な改善、熱帯は改善となっている (図略)。

日本付近の降水確率予測

図 3.3.3 に降水確率予測の対アメダス観測値のブライアスキルスコア (BSS) を示す。夏実験では予測前半を中心に改善が見られる。冬実験も中立から改善である。ブライアスコアを信頼度、分離度、不確実性に分解してみると、夏実験では主に信頼度で改善が見られ (図略)、降水の予測がよりばらつくようになったことで信頼度が改善し、BSS の改善につながったと考えられる。図 3.3.4 に 2023 年 6 月 24 日 12UTC 初期値の FT=72 の前 24 時間降水量予測の 1 mm/24h の超過確率に対応する時刻の解析雨量を示す。CNTL と比べ TEST の方が北日本 (黒丸) への降水域の広がりが見られるメンバーが多く、より実況を捕捉している。

台風進路予測

アンサンブル平均の台風進路予測誤差や台風接近確率の BSS についてはほぼ中立であった (図略)。台風を中心気圧に関しては TEST の方がばらつきが大きくなる事例があり (図略)、これは SHPC 法の導入によって台風周辺における降水分布のメンバー間のばらつきが大きくなり、台風の発達程度が変化したためと考えられる。

実行時間

実行時間についてはモデルの並列化手法と配列構造の改良により高速化される一方で、ノード数を減らすことから、トータルでは 264 時間予報で 6 分程度 (17% 程度) 増加した。ただし、ルーチン運用上の提供目標時間には十分に間に合っている。

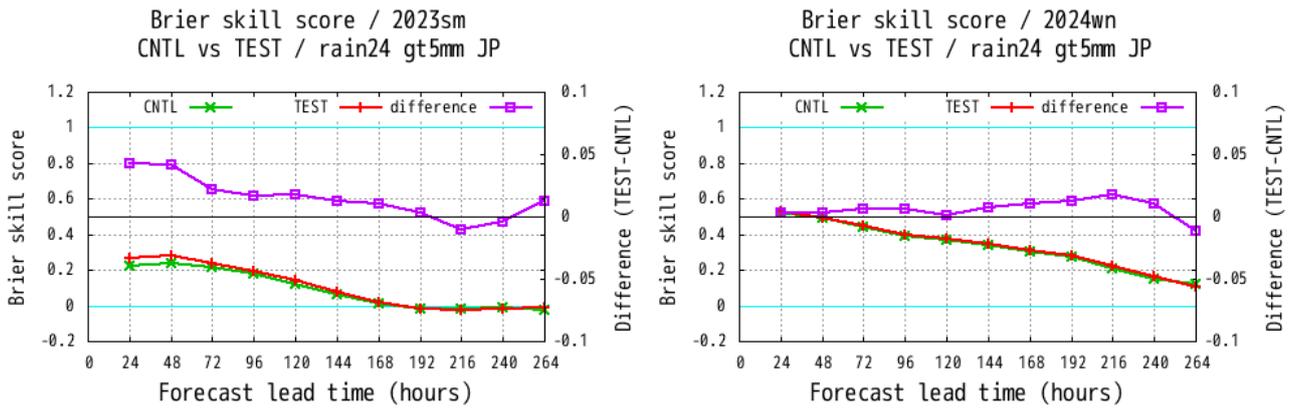


図 3.3.3 夏実験 (左)、冬実験 (右) における 5 mm/24h を閾値とする降水確率予測の対アメダス観測値の BSS。緑線が CNTL、赤線が TEST、紫線が TEST-CNTL (右縦軸) を表す。

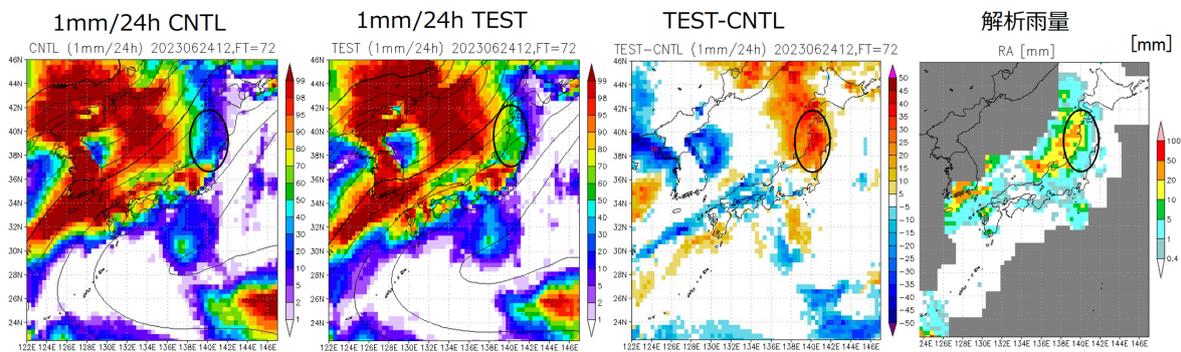


図 3.3.4 2023年6月24日12UTC初期値のFT=72の前24時間降水量予測の1mm/24hの超過確率 (左からCNTL、TEST、TEST-CNTL) と対応する時刻の解析雨量 (右)。左2つの図の等値線はアンサンブル平均の海面更正気圧を表す。

(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(各月の15日及び月末)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。

図3.3.5(左)に冬(12,1,2月)初期日の熱帯域における200hPa速度ポテンシャルのスペルッドの変化を示す。CNTLのスペルッドは予報開始から4日目にかけて減少し、その後増加に転じている。これは熱帯SVの初期摂動により200hPa速度ポテンシャルに対して予報初期に過大なスペルッドとなっていたことが原因である。TESTでは熱帯SVの初期摂動の振幅を小さく調整したためこの挙動が改善し、予報開始から一貫して予報時間とともにスペルッドが増加している。さらにSHPC法の導入により予報4日以降ではTESTの方がCNTLよりもスペルッドが大きい。図3.3.5(右)のスペルッドスキルで見ると予報5日目以降にTESTの方がCNTLよりも理想的な値である1に近い値で推移していることが確認できる。

図3.3.6に北半球域のアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差(TEST-CNTL)を示す。春の200hPa流

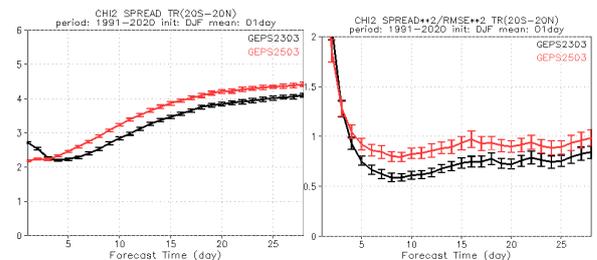


図 3.3.5 再予報型実験における熱帯域での 200hPa 速度ポテンシャルのスペルッド (左) とスペルッドスキル (右) の予報時間時系列。バイアス補正なし。冬初期日サンプルの結果。黒線は CNTL、赤線は TEST を表す。

線関数ではやや改善傾向、夏の 850hPa 流線関数はやや悪化傾向であるが、いずれの季節・要素でも変化が小さく概ね中立の結果となった。平均誤差についても同様に概ね変化が小さく、中立の季節・要素が多かった(図略)。

3.3.3 まとめ

全球 EPS について、予報モデルの更新に加え、SHPC法の導入、熱帯SVによる初期摂動の振幅調整、SST摂動のリセンタリングの変更を行った。これらの変更

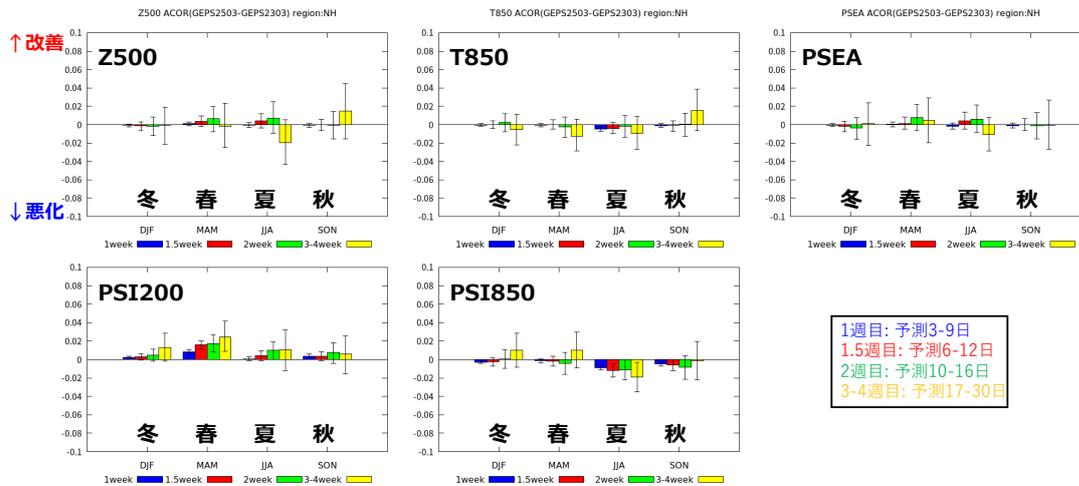


図 3.3.6 再予報型実験でのアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差 (TEST-CNTL)。北半球域、バイアス補正なし。上段は左から 500hPa 高度、850hPa 気温、海面更正気圧、下段は左から 200hPa 流線関数、850hPa 流線関数。各図内は左から冬 (12,1,2 月)、春 (3,4,5 月)、夏 (6,7,8 月)、秋 (9,10,11 月) でそれぞれ検証した結果を示す。検証の対象とした予報時間は図中の凡例を参照。

は 2025 年 3 月 18 日に現業システムへ導入されている。モデルの並列化手法と配列構造の改良による省メモリ化や高速化により、全球 EPS の 18 日先までの予測で用いるノード数を減らすことができた。SHPC 法の導入と熱帯 SV の初期摂動の振幅調整により、熱帯の予測のばらつきが適正化され、熱帯を中心に確率予測精度が改善し、夏季の日本付近の降水確率予測も改善した。また、予報モデル更新のうち LAI 気候値の変更によると考えられる陸上の下層気温の予測の変化が見られた。

参考文献

- 気象庁, 2024a: 全球アンサンブル予報システムの開発. 数値予報開発センター年報 (令和 5 年), 気象庁 数値予報開発センター, 91-92.
- 気象庁, 2024b: 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. 数値予報開発センター年報 (令和 5 年), 気象庁 数値予報開発センター, 30-33.
- 気象庁, 2024c: 全球モデルの開発進捗. 数値予報開発センター年報 (令和 5 年), 気象庁 数値予報開発センター, 83-90.
- 気象庁, 2025a: 全球アンサンブル予報システムの開発. 数値予報開発センター年報 (令和 6 年), 気象庁 数値予報開発センター, 55-59.
- 気象庁, 2025b: 全球モデルの開発進捗. 数値予報開発センター年報 (令和 6 年), 気象庁 数値予報開発センター, 47-54.

3.4 メソモデルの高精度標高データの利用開始および物理過程の改良

3.4.1 はじめに

メソモデルは日本域を予報領域とした水平解像度 5 km の予測システムとなっており、防災気象情報や航空気象情報の作成支援、降水短時間予報への入力を主な目的としている。また、局地モデルへの側面境界値を提供している。

気象庁が策定した「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、3 日前から河川流域雨量や高潮予測に基づいた広域避難を可能とするため、メソモデル等の延長予測により台風などに伴う大雨・高潮の予測精度向上を図り、高精度かつ整合性のある数値予報プロダクトを提供するとしている。この目標に資するため、2022 年 6 月から 00, 12 UTC 初期値の予測期間を 51 時間から 78 時間に延長した。また、対流圏上部から成層圏下部にかけて感度のある衛星観測データを利用するため、モデル上端高度を 21.8 km (約 40 hPa) から 37.5 km (約 5hPa) に引き上げた。さらに、延長予測に先立って 2022 年 3 月には、予測精度を改善するため、雲・放射、境界層、陸面および海面などの物理過程の全般的な改良を行った(気象庁 2022)。

本節では、2025 年 5 月に行ったメソモデルの更新の概略と、改良による予測特性の変化について報告する。

3.4.2 メソモデル改良の概要

ここでは、2025 年 5 月に更新したメソモデルにおける変更の概要やその狙いについて示す。各変更の詳細や変更のインパクトについては、気象庁(2025)を参照されたい。

(1) 高精度標高データの利用

地形に関わる表現の精緻化を通じた循環場の改善による予測精度の向上を目的として、メソ解析およびメソモデルで用いる格子平均標高の作成に必要な標高オリジナルデータセットを、水平解像度約 1 km である米国地質調査所の GTOPO30 (Gesch et al. 1999) から、より高解像度・高精度(水平解像度約 90m)である MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) に変更した。

(2) 地形性乱流形状抵抗の導入

メソモデルの系統誤差として、対流圏下層や地上に強風バイアスが存在することが統計検証から分かっている。メソモデルではサブグリッドの地形起伏に伴う乱流抵抗を考慮しておらず、強風バイアスの一因である可能性がある。そこで、サブグリッドスケールの地形起伏によって生じる乱流による抵抗の効果を表現するために、TOFD (Turbulent Orographic Form Drag; Beljaars et al. 2004) を導入した。また、同スキームに必要なサブグリッドの地形に関する統計量は MERIT DEM から算出した。

(3) 気孔抵抗最小値の調整

メソモデルでは、夏季の中国大陸北部において、対流圏下層に高温バイアスが存在することが統計検証から分かっている。そのバイアス軽減を目的として、陸面過程で計算される蒸発散フラックスの定式に含まれるパラメータのうち、気孔抵抗最小値を調整した。具体的には、大陸上の低植生域における気孔抵抗最小値を小さく設定し、潜熱フラックスの増加および顕熱フラックスの減少を促した。

(4) 放射微量気体濃度定数の変更

これまでのメソモデルでは、放射過程で用いる微量気体濃度(CO₂, N₂O, CH₄)は 2000 年前後の全球平均値を用いており、近年の値と比べ過小となっている。そこで、これらの濃度を局地モデル同様に(気象庁 2023)、WMO が算出している 2020 年の全球気候値(WMO 2021)に更新した。

(5) 境界層過程の計算安定性向上

メソモデルは境界層過程に改良 Mellor-Yamada レベル 3 スキーム(MYNN; Nakanishi and Niino 2009)を利用している。計算安定性向上のためのさまざまな改良がこれまで行われている(西本 2020)が、大きな乱流エネルギーが長時間維持されるような場では、稀に計算が安定に行えず数値振動を起こすことがある。数値振動の要因を調査したところ、逆勾配項に関連する量が振動することにより計算不安定となる場合があることがわかった。この数値振動を抑えるため、線形安定性解析から見積もられた安定に計算が行える積分時間間隔に収まるよう、逆勾配項の係数を補正する仕組みを導入した。この補正を加えることで、過去に顕著な数値振動が発生した事例について振動が抑えられることを確認した。また、メソモデルの予測精度に有意な変化は見られないことも確認した。

3.4.3 予測特性の変化、検証結果

(1) 実験設定

前項の改良による予測特性の変化を調べるために実施した業務化試験の検証結果について述べる。以下では、対照実験をコントロール(CNTL)、CNTLに前項で述べた改良を適用した実験をテスト(TEST)と表記する。境界値はCNTLとTESTどちらも2025年3月に現業化した全球モデル導入時の業務化試験結果を利用している。実験期間は夏冬の2期間を対象としており、ここでは夏期間、冬期間と呼び、以下の期間について実施した。

- 夏期間：2023年6月26日～9月21日

- 冬期間：2023年12月10日～2024年2月25日

なお、予測特性の変化傾向は夏期間と冬期間でほぼ同様であったことから、結果を表す図については夏期間の主要なもののみ示す。

(2) 風速予測

図 3.4.1 に夏期間における領域に含まれる全てのラジオゾンデに対する風速の平均誤差と二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) を示す。CNTL では 850hPa 以下で強風バイアスが見られるが、TEST では強風バイアスが減少し、RMSE も有意に減少している。TEST は 700hPa では弱風バイアスが増加するが、RMSE は大きく変わらない。

図 3.4.2 に夏期間における領域に含まれる全てのアメダスに対する風速の平均誤差と RMSE を示す。横軸の各対象時刻に沿って予測特性の日変化を見ると、日中は弱風バイアスが悪化するが、夜間の強風バイアスが軽減し、RMSE も顕著に軽減する。

強風バイアスが改善した事例として、2023 年台風第 7 号が近畿地方を北上時の風速予測検証結果を図 3.4.3 に示す。色は対アメダス風速の平均誤差を示し、赤色で強風バイアス、青色で弱風バイアスを表す。台風中心は兵庫県明石市に上陸直前の海上に位置し、CNTL では東北地方より以西では強風バイアスが顕著だが、TEST では全域で強風バイアスが緩和し、特に中部地方でのバイアス軽減が顕著であった。

冬期間では、ラジオゾンデに対する検証結果 (図略) を見ると、CNTL は中国大陸や台湾では高度 925hPa は強風バイアスだが、TEST では強風バイアスは軽減した。地上検証結果 (図略) は、夏期間と同様に夜間は強風バイアスの軽減、日中は弱風バイアスの悪化であった。RMSE はどの対象時刻においても軽減した。

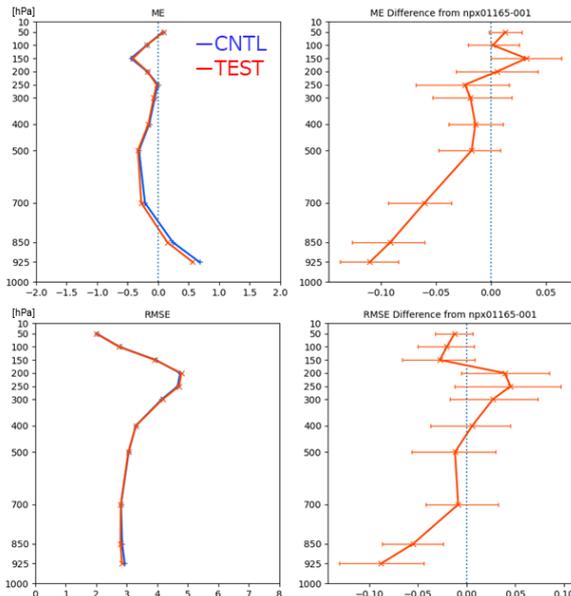


図 3.4.1 夏期間における、風速の 24 時間予測の対ラジオゾンデ検証。上が平均誤差 [m/s]、下が RMSE [m/s]。左が CNTL (青線)、TEST (赤線) のそれぞれの検証結果、右は TEST と CNTL の差。右図の差のエラーバーは 95% 信頼区間。縦軸が高度 [hPa]、横軸が誤差 [m/s]。

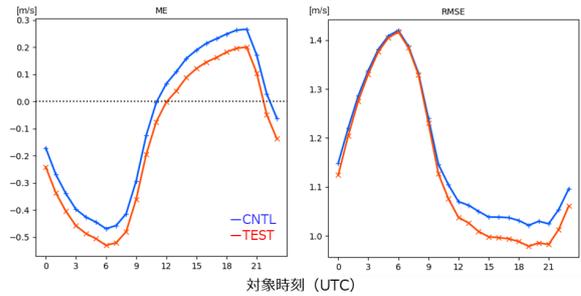


図 3.4.2 夏期間における、地上観測に対する風速の対象時刻別 (横軸、UTC) 検証。左が平均誤差、右が RMSE。縦軸が誤差 [m/s]。青線が CNTL、赤線が TEST を表す。

(3) 気温予測

図 3.4.4 は夏期間におけるラジオゾンデに対する高度 925hPa 気温の平均誤差である。CNTL では日本域ではやや低温バイアスだが、中国大陸上では高温バイアス域が広がっており、バイアス特性が異なる。TEST では中国大陸上の高温バイアスが減少して、領域全体での検証で RMSE が減少した。地上観測に対する気温検証結果 (図略) を見ると、日中の低温バイアスおよび夜間の高温バイアスが縮小し、日較差が小さいバイアスが軽減した。RMSE はどの対象時刻においても減少した。

冬期間におけるラジオゾンデ検証結果 (図略) を確認すると、CNTL では華南を除いて高度 925hPa は低温バイアス傾向だが、TEST では低温バイアスが軽減し RMSE も減少した。地上気温の検証結果 (図略) は夏期間と同様にどの対象時刻でもバイアスが縮小し、日較差が小さいバイアスが軽減した。RMSE もどの対象時刻においても減少した。

改善事例について具体例 (図略) を述べると、気象庁 (2025) で示したように局地前線が内陸にずれる傾向が緩和する事例が確認できた。

(4) 水蒸気混合比予測

最後に水蒸気混合比予測の改善について示す。図 3.4.5 は夏期間におけるラジオゾンデに対する高度 925hPa 水蒸気混合比の平均誤差である。CNTL は南西諸島では湿潤バイアスが目立つが、中国大陸上では乾燥バイアスが顕著でバイアス特性が異なる。TEST では中国大陸上の乾燥バイアスが減少して、領域全体での検証で RMSE が減少した。ただし、南西諸島では湿潤バイアスがわずかに拡大した。地上観測に対する水蒸気混合比の検証結果 (図略) をみると、夜間は乾燥バイアスが軽減し、日中は湿潤バイアスが拡大した。RMSE は対象時刻によらず中立から改善であった。

冬期間における高度 925hPa 水蒸気混合比の検証結果 (図略) は、CNTL では中国大陸上で乾燥バイアスが目立つが、TEST では乾燥バイアスが減少して RMSE が減少した。地上観測に対する検証結果 (図略) を見ると、日中の湿潤バイアスがわずかに拡大するが、RMSE

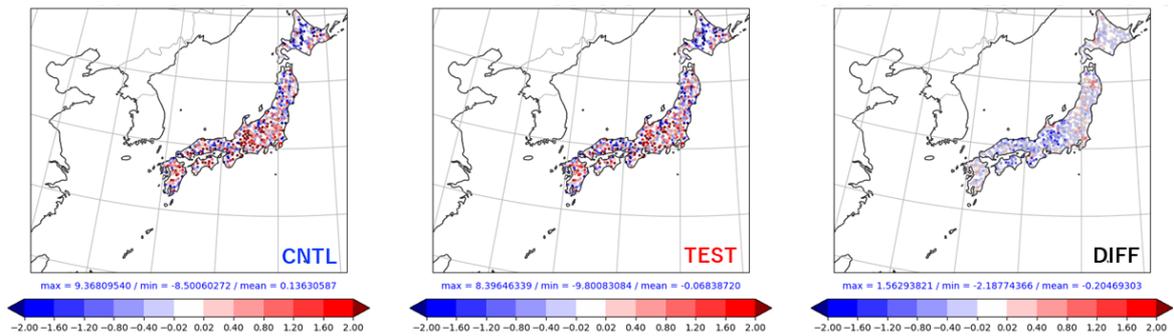


図 3.4.3 2023 年 8 月 15 日 12 時（日本時）を対象とする地上風速の 24 時間予測の検証結果。各点は地上観測との差 [m/s]。左が CNTL、中央が TEST、右が TEST と CNTL の差。暖色系で正バイアス、寒色系で負バイアスを表す。

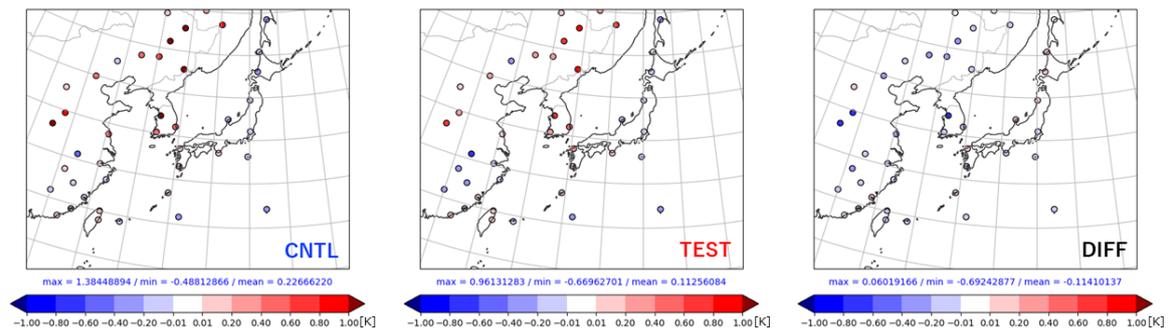


図 3.4.4 夏期間における、ラジオゾンデ観測を参照値とする高度 925hPa 気温の 24 時間予測の平均誤差。左が CNTL、中央が TEST、右が TEST と CNTL の差。暖色系で正バイアス、寒色系で負バイアスを表す。

ほどの対象時刻においても減少した。

3.4.4 まとめと今後の開発

2025 年 5 月のメソモデル更新では、数日前からの大規模災害に備えた広域避難に資する台風・集中豪雨などの予測精度向上を目的として、主に環境場の予測精度改善に向けて高精度標高データの利用を開始し、物理過程を改良した。主に地形性乱流形状抵抗の導入により、対流圏下層の強風バイアスが縮小した。また、気孔抵抗最小値の調整により、大陸上で夏季の対流圏下層の高温・乾燥バイアスが縮小した。日本域では夏期間・冬期間ともに地上気温、水蒸気混合比、風速の予測誤差が縮小することを確認できた。以上のように、狙ったバイアス軽減に向けた改良の効果を確認できた。ただし、日本域での湿潤バイアスや日中の弱風バイアスが夏・冬ともに拡大したことなどは今後の課題である。また、メソモデルでは、台風が過発達する傾向は依然として見られており、誤差軽減には対流に伴うサブグリッドスケールの鉛直輸送の表現を改善することが不可欠と考えられる。こうした物理過程等の改良に今後も継続的に取り組む計画である。

参考文献

Beljaars, A. C. M., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,

130, 1327–1347, doi:10.1256/qj.03.73.

Gesch, D. B., K. L. Verdin, and S. K. Greenlee, 1999: New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos Trans. AGU*, **80**, 69–70, doi:10.1029/99EO00050.

気象庁, 2022: メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、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, 92–99.

気象庁, 2023: 局地モデルの改良. 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, 81–84.

気象庁, 2025: メソモデルの物理過程改良に向けた開発. 数値予報開発センター年報（令和 6 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 60–66.

Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895–912, doi:10.2151/jmsj.87.895.

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.

WMO, 2021: The state of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, **17**, 1–10.

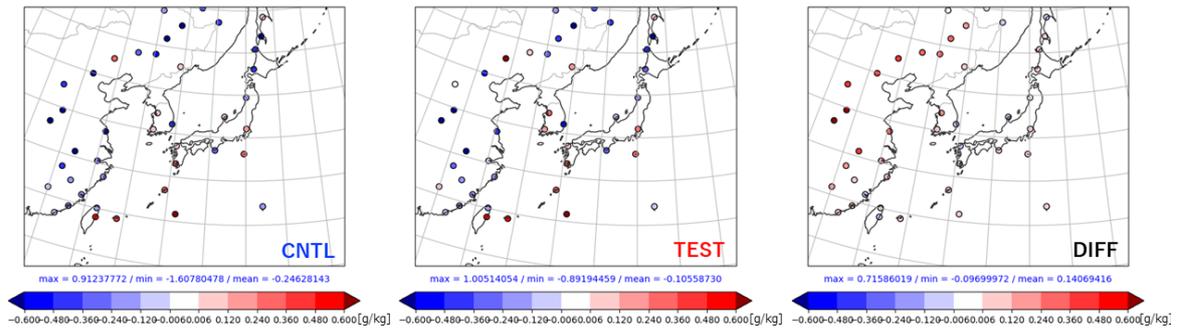


図 3.4.5 夏期間における、ラジオゾンデ観測を参照値とする高度 925hPa 水蒸気混合比の 24 時間予測の平均誤差。左が CNTL、中央が TEST、右が TEST と CNTL の差。暖色系で正バイアス、寒色系で負バイアスを表す。

Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates, 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5844–5853, doi:10.1002/2017GL072874.

表 3.5.1 MSM, MEPS 大雨発生確率ガイドランスの仕様

作成対象	5 km 格子 (等緯度経度格子)
作成対象とするモデル	MSM, MEPS
予測対象	3 時間降水量が 100, 150 mm 以上となる確率
予測対象時間単位	3 時間 (対象時刻及び前後 1 時間)
予測期間と時間間隔	MSM: 初期時刻は 3 時間毎。予報時間は FT=3~51 (00, 12UTC 以外の初期値は FT=3~39) の 1 時間間隔。MEPS: 初期時刻は 6 時間毎。予報時間は FT=3~39 の 1 時間間隔。
作成手法	ロジスティック回帰
逐次学習の有無	なし
説明変数	3 時間降水量、500 m 高度水蒸気フラックス、500 m 高度相当温位、地形性上昇流×比湿、700 hPa 上昇流
目的変数	対象とする 5 km 格子を含む周囲 11×11 格子 (55 km 四方) の範囲のどこかで 3 時間降水量が閾値以上となるか否か (閾値以上は 1、未満は 0)。
層別化処理の対象	初期時刻、予報時間、地域 (北日本、東日本、西日本、九州、南西諸島の 5 つ)
備考	MSM で作成した予測式を MEPS に適用してメンバーごとの確率を作成。

3.5 MSM、MEPS 大雨発生確率ガイドランスの改良

3.5.1 はじめに

近年、線状降水帯による甚大な大雨災害が発生しており、線状降水帯の発生予測技術を確立することは気象庁の急務となっている。気象庁では、令和 4 年度出水期より、半日程度前から線状降水帯による大雨への警戒を呼びかける地方単位での情報の提供を開始し、令和 6 年度出水期からは府県単位での情報の提供を新たに開始した。この防災気象情報の作成に資するため数値予報開発センター (数値予報モデル基盤技術開発室) では、令和 4 年にメソモデル (MSM) とメソアンサンブル予報システム (MEPS) による大雨発生確率ガイドランスを、令和 6 年に局地モデル (LFM) による大雨発生確率ガイドランスの部内試験運用を開始した。今般、MSM および MEPS による大雨発生確率ガイドランスについてさらなる改良を図り、令和 7 年 5 月 20 日に数値予報ルーチンへの適用を行った。ここではその改良の内容について紹介する。

3.5.2 仕様

MSM 大雨発生確率ガイドランスおよび MEPS 大雨発生確率ガイドランスの仕様を表 3.5.1 に示す。仕様に関して、今回の改良による変更点は無い。

3.5.3 改良点

今般 MSM, MEPS 大雨発生確率ガイドランスに行った改良点について紹介する。改良の内容については LFM 大雨発生確率ガイドランスの開発を通じて得た知見によるものであり、LFM 大雨発生確率ガイドランスにはすでに本改良点を取り入れている (気象庁 2025)。

説明変数の扱いの変更

700hPa 上昇流について、空間平均を行う領域範囲を 400km 四方から 200km 四方に変更した。500m 高度水蒸気フラックスおよび地形性降水についてはこれまで格子点値の利用していたが、それぞれ周囲 15×15 格子の最大値 (500m 高度水蒸気フラックス)、周囲 3×3 格子の平均値 (地形性降水) を利用するように変更した。これらの変更はそれぞれ、平滑領域の縮小による空振りの抑制、地形による極端な説明変数の寄与の軽減、より風上の水蒸気量を説明変数に取り込める効果を期待した改良になる。これにより、空振り率の減少、捕捉率の増加がみられたことに加え、予測分布が滑らかになり不自然な予測事例が減少することを確認できた。

学習期間データの変更

従来の 2018, 2019, 2020 年のそれぞれ 6~8 月 (計 9 か月) から、2019, 2020, 2021, 2022 のそれぞれ 5~9 月 (計 20 か月) に学習期間を変更した。学習期間を増加し、さらにより最新の MSM を利用することで、従来より高精度でかつ最新の MSM に適応した予測式を得た。

3.5.4 検証

ここからは改良を適用したガイドランスを改良版、改良適用以前のガイドランスを旧版と表記する。図 3.5.1 に、検証領域を全国、検証期間を 2023, 2024 年の夏期 5 月 1 日~9 月 30 日とした、MSM 大雨発生確率の改良版 (赤線) および旧版 (青線) の統計検証の比較図を示す。左上図は予測確率毎の捕捉率 (破線) 及び空振り率 (実線) の比較図である。捕捉率については全体的に同程度または低確率域で改善傾向が見られ、改良版の空振り率は特に高確率の閾値において改善傾向が見られる。一般的に捕捉率と空振り率はトレードオフの関係にあるため、本改良の効果が現れていると言える。右上図は予報時間 (FT) 別のブライアスキルスコア (BSS) を示している。全体的に同程度か改善傾向が見られ、特に 1 日程度先までの FT については改良版が旧版を上回っており、確率情報としてより有効であると言える。左下図は信頼度曲線の検証図である。この図中には 2 本の直線が描かれており、信頼度曲線が原点を通る対角線に近いほど確率予測の精度が高いことを示し、もう一方の直線は確率予測が予測スキルを持つ下限を示している (気象庁 2023)。改良版では旧版に対して一部の予測値 (85~90% 付近) を除いて対角

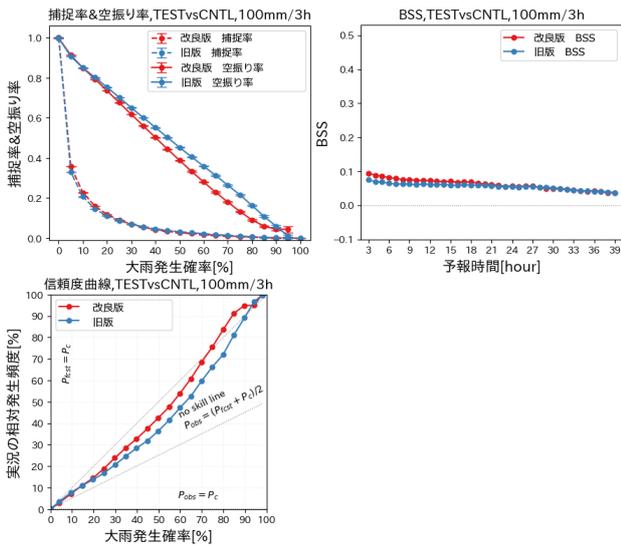


図 3.5.1 100 mm/3h 以上を対象とした、改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）、旧版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）の捕捉率および空振り率（左上図）、同じく FT 毎のプライアスキルスコア（右上図）、同じく信頼度曲線（左下図）。検証対象領域は全国、予報時間は 3～39 時間、検証期間は 2023, 2024 年の夏期（5 月 1 日～9 月 30 日）。

線に近い予想ができており、予測に対する観測の出現頻度がより適切な傾向であることが確認できる。

図 3.5.2 には、検証領域を全国、検証期間を 2023 年の夏期とした、令和 6 年に部内試験運用を開始した LFM 大雨発生確率ガイダンスに対する MSM 大雨発生確率の FT 毎の統計検証（BSS）の比較図を示す。旧版の MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）と LFM 大雨発生確率ガイダンス（緑線）との比較（左図）では、全体的に旧版 MSM 大雨発生確率ガイダンスは精度が低い傾向が見られるが、改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）との比較（右図）ではいずれの FT においても同程度の BSS を示しており、今回の改良の成果が現れていることが分かる。

最後に、図 3.5.3 に検証領域を全国、検証期間を 2023, 2024 年の夏期とした、改良版 MEPS 大雨発生確率ガイダンスと旧版 MEPS 大雨発生確率ガイダンスのアンサンブル平均の統計検証結果を示す。左図は改良版（赤線）と旧版（青線）のアンサンブル平均値による捕捉率（破線）、空振り率（実線）の比較になる。MSM と同様に、捕捉率は同程度を保ちつつ、空振り率を減少する方向に改善が示されている。右図は同じくアンサンブル平均値による BSS の比較である。こちらも MSM と同様に全般的に同程度または改善傾向であり、1 日先程度の FT までは特に改善幅が大きい。

3.5.5 事例

MSM, MEPS 大雨発生確率ガイダンスの例として、2024 年 9 月 21 日の能登半島の大雨事例を示す。図 3.5.4

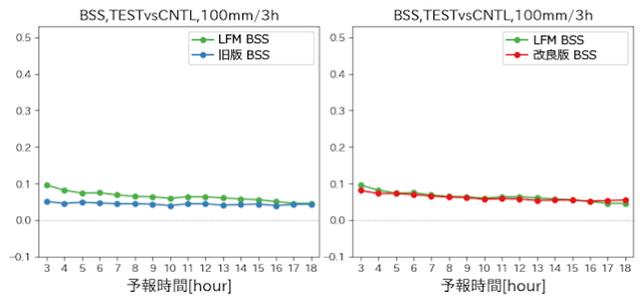


図 3.5.2 100 mm/3h 以上を対象とした、MSM 大雨発生確率ガイダンス、LFM 大雨発生確率ガイダンスのプライアスキルスコアの検証結果。左図は旧版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）、右図は改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）について、それぞれ LFM 大雨発生確率ガイダンス（緑線）との比較を行ったもの。検証領域は全国、予報時間は 3～18 時間。検証期間は 2023 年夏季（6 月 1 日～9 月 30 日）。LFM 大雨発生確率ガイダンスについては 2023 年期間を学習データから抜いたクロスバリデーション検証の結果。

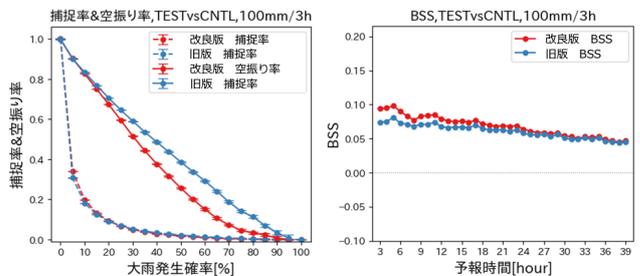


図 3.5.3 100 mm/3h 以上を対象とした、MEPS 大雨発生確率ガイダンスの改良版（赤線）、旧版（青線）のアンサンブル平均値についての検証結果。それぞれ捕捉率・見逃し率（左図）、プライアスキルスコア（右図）の図。検証領域は全国、予報時間は 3～39 時間。検証期間は 2023, 2024 年の夏季（5 月 1 日～9 月 30 日）。

は 2024 年 9 月 21 日の午前 9 時の日本付近の地上天気図である。この日、日本海には黄海から日本の東に伸びる停滞前線に低気圧があり東進していた。また、台風第 14 号が黄海にあり、台風からの下層暖湿気が前線付近に流入し、北陸地方は対流雲が発達しやすい状況であった。21 日 9 時過ぎに石川県能登で線状降水帯が発生し、9 時 7 分に顕著な大雨に関する気象情報が発表され、さらに 10 時 50 分に石川県の輪島市、珠洲市及び能登町に大雨特別警報を発表された。

図 3.5.5 には、いずれも 2024 年 9 月 21 日 09 時を対象とした、旧版および改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンスの予測、MSM モデル 3 時間地上降水量の予測、前 3 時間解析雨量を示す。100m/3h 以上の大雨発生確率のピークを、旧版では能登半島西方の海上に予想しているが、改良版では能登半島付近に予想しており、解析雨量との対応がより適切であることがわかる。図 3.5.6 は、同じく 2024 年 9 月 21 日 09 時を対象とし

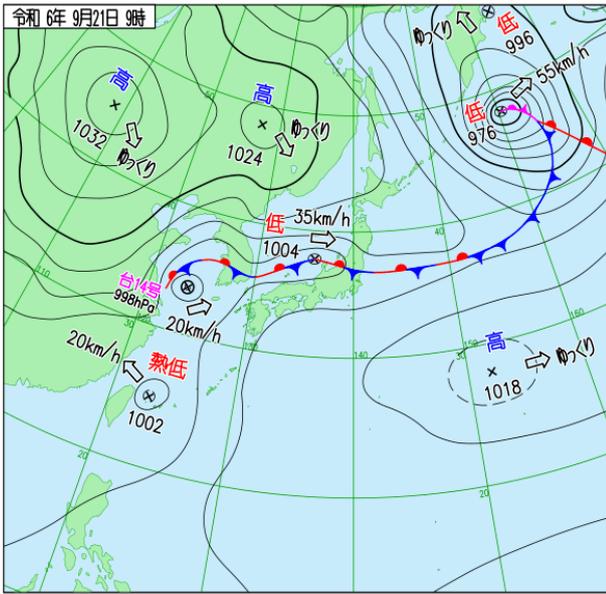


図 3.5.4 2024 年 9 月 21 日 09 時の地上天気図

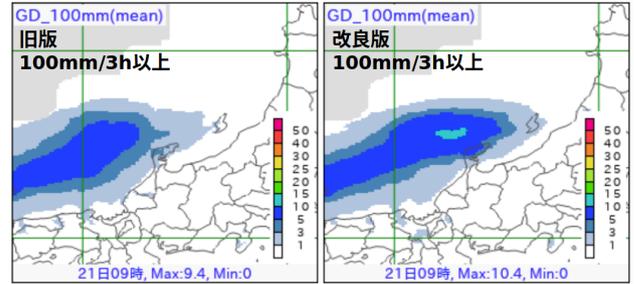


図 3.5.6 2024 年 9 月 21 日 09 時を対象とした FT=21 の MEPS 大雨発生確率ガイダンスの 100 mm/3h 以上を対象とした確率のアンサンブル平均値。左図は旧版、右図は改良版。

開発を行いつつ、あわせて高解像度化された局地モデル（第 4.2 節）および局地アンサンブル（第 4.3 節）を入力とした大雨発生確率ガイダンスの開発・改良を進める。

参考文献

- 気象庁, 2023: 確率値別出現率図. 令和 4 年度数値予報解説資料集, 気象庁情報基盤部, 528.
- 気象庁, 2025: 局地モデルによる大雨発生確率ガイダンス. 数値予報開発センター年報 (令和 6 年), 気象庁数値予報開発センター, 36-38.

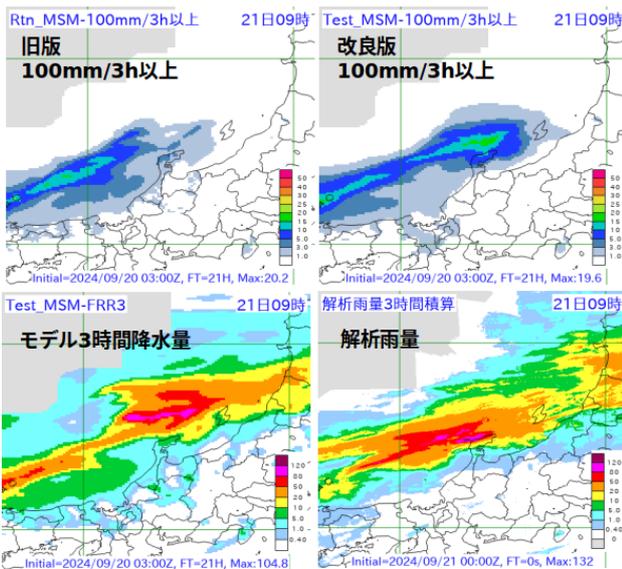


図 3.5.5 2024 年 9 月 21 日 09 時を対象とした旧版 MSM 大雨発生確率ガイダンス (左上)、改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンス (右上)、MSM モデル 3 時間地上降水量 (左下)、3 時間積算解析雨量 (右下) の分布。ガイダンス、モデルについては FT=21 の予測。ガイダンスについては 100 mm/3h 以上を対象とした確率。

た MEPS 大雨発生確率のアンサンブル平均の予想図を示す。左図が旧版で右図が改良版になる。こちらについても MSM と同様に能登半島付近にピーク値を予測できていることが確認できる。

3.5.6 今後

線状降水帯による大雨の発生予測が災害軽減に果たす役割は大きい。引き続き本ガイダンスの精度向上の

3.6 全球解析における観測データ利用手法の改良

3.6.1 はじめに

気象庁の数値予報システムでは、予測精度向上にとって重要な高精度の初期値を作成するために様々な観測データを同化している。全球数値予報システムでは2025年10月15日に、GNSS 掩蔽観測データの利用拡充、放射伝達モデル RTTOV の更新、マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充、マイクロ波水蒸気サウンダの利用高度化、CO₂ バンドの晴天輝度温度 (CSR:Clear Sky Radiance) の利用、極域の大気追跡風 (AMV:Atmospheric Motion Vector) の利用拡充といった衛星データの利用手法の改良を実施した。本節では、これらの改良の概略とそれによる初期値及び予測特性の変化について述べる。

3.6.2 変更の概要

ここでは、3.6.3にて詳述する GNSS 掩蔽データの利用拡充以外の変更の概要を示す。各変更の詳細と解析・予測へのインパクトは気象庁 (2025) を参照されたい。

(1) 高速放射伝達モデル RTTOV の放射伝達計算用係数及び海面射出率モデルの更新

輝度温度データの同化に観測演算子として利用している高速放射伝達モデル RTTOV(Saunders et al. 2018) について、最新の気体吸収データベースに基づく新しい放射伝達計算用係数への更新と最新の知見に基づいた海面射出率モデルへの更新を実施した。

放射伝達計算用係数は利用中のセンサのうち CrIS 以外の係数を更新した。海面射出率モデルはマイクロ波及び赤外の計算において精度向上の見られた FASTEM6 及び IREMIS の利用を開始した。これらの更新に伴い計算輝度温度の統計特性が変化したため、スキャンバイアス補正が必要な全てのセンサの補正量を更新した。この際、AMSU-A の品質管理において雲判定に用いる雲水量のリトリブ値が従来より増加したことから、利用データ数が従来と同程度になるように雲水量の閾値を調整した。

(2) 衛星搭載マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充

衛星搭載のマイクロ波気温サウンダ (AMSU-A, ATMS 等) は、全球解析で同化している気温の鉛直分布の情報を観測するチャンネルに加え、大気の透過率が高いチャンネル (窓チャンネル) も搭載している。これまで窓チャンネルは品質管理処理にのみ利用していたが、対流圏下層の水蒸気に感度があることから、全球解析での利用を開始した。

新規利用する窓チャンネルは、23.8 GHz (AMSU-A/ch1, ATMS/ch1) 及び 31.4 GHz (AMSU-A/ch2, ATMS/ch2) とした。陸面や海水面では射出率の不確実性が大きいことから、海上のデータのみを同化利用し

た。その際、観測視野の中心が海上であっても、視野内にわずかでも陸面や海水面が含まれる場合は同化利用に適さないことから、陸域や海水域との境界に近いデータをなるべく利用しないように QC 処理を一部変更した他、観測視野が大きくなる端寄りの FOV (Field of view, 観測視野角) のデータについては全て同化利用しないこととした。

(3) 衛星搭載マイクロ波水蒸気サウンダの利用高度化

衛星搭載マイクロ波水蒸気サウンダは、183 GHz 付近の水蒸気の吸収帯に複数のチャンネルを持ち、対流圏中上層の水蒸気量に感度を持つセンサである。全球解析では雲・降水域を含む観測データを同化 (全天同化) している (気象庁 2022)。地表面射出率を一定値としていたため、水蒸気量が少なく、輝度温度の地表面への感度が高くなる観測地点では限定的に利用していたが、動的射出率推定手法を導入し、水蒸気量が少ない地域での利用を拡充した。その際、同化利用しない乾燥域判定に用いる物理量を可降水量から透過率に変更した。

また、全天同化にて同化利用するデータの増加に向けて、代表性誤差に起因するモデルと観測の雲表現の乖離を低減するために全球モデルのインナーモデル格子での平滑化の導入、品質管理及び間引き距離の変更を行った。

(4) CO₂ バンド CSR の利用開始

CSR は静止気象衛星搭載の赤外イメージャにより観測された輝度温度を、小領域ごとに雲の影響を受けた画素を除き平均したプロダクトである。これまで対流圏に感度を持つ水蒸気バンドを利用してきたが、これに加え、対流圏下層の気温や水蒸気に感度を持つ CO₂ バンドの利用を開始した。CO₂ バンドは大気の透過率が比較的高く地表面の影響を受けやすいため、CO₂ バンドの計算輝度温度の算出にはモデル地上面気温ではなく窓バンドからリトリブした地表面温度を用いることとした。

(5) 極域の大気追跡風 (AMV) の利用拡充

AMV は気象衛星の観測する可視や赤外の時間的に連続した画像を用いて雲や水蒸気のパターンを時間的に追跡することにより算出される風プロダクトである。極域を含む高緯度域は、静止気象衛星による観測が困難なため、極域を比較的高頻度に観測できる極軌道衛星から算出した AMV を全球解析で利用している。今回の更新では、EUMETSAT が Metop-B 及び C から算出している極域 AMV の利用を開始した。

3.6.3 GNSS 掩蔽観測データの利用拡充

(1) Metop-C 及び COSMIC-2 の GNSS 掩蔽観測データ

GNSS 掩蔽法は、高度約 2 万 km を飛行する測位衛星から発信される電波を低軌道衛星にて連続的に受信

することで、大気による遅延量から大気の大気温度や水蒸気プロファイル鉛直方向に高解像度に導出する手法である (Kursinski et al. 1997)。GNSS 掩蔽観測は電波時計に基づき遅延量を計測する高精度な観測であり、数値予報では予報モデルのバイアスを補正するための基準値としての役割を担う重要なデータのの一つである。全球解析では、遅延量から算出された屈折角を同化し、主に成層圏から対流圏中上層の気温場の改善に寄与している。

Metop-C は EUMETSAT が運用する現業極軌道気象衛星であり、GNSS 受信機を含む多様なセンサを搭載して全球を観測している。COSMIC-2 は GNSS 掩蔽観測衛星 6 機から構成される衛星群であり、低緯度域を中心に観測している。今回の更新ではこれら 7 機の GNSS 掩蔽観測データの利用を開始した。

(2) データ利用手法の変更

屈折角は観測点付近を中心に大気上端までの大気屈折率(密度)の鉛直プロファイルの情報を有し、これを同化すると静水圧平衡の関係を通して観測点より下層の大気プロファイルも変化する。このため、GNSS 掩蔽観測データの利用拡充には鉛直方向の観測誤差を適切に設定することが重要である。図 3.6.1 に変更前後の観測誤差の鉛直プロファイル及び観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差を示す。変更前 (赤) は、高度 10 km から 30 km 付近 O-B の標準偏差が観測誤差より大きく、観測誤差が過少であることが示唆されたことから、当該高度域の観測誤差を 1.25 倍 (青) にした。今回の更新により観測データ数が大幅に増加することを踏まえ、全高度にて観測誤差膨張係数 1.41 倍を導入した。また、従前から利用している Metop-B の利用下限高度を 8 km から 2 km に緩和した。

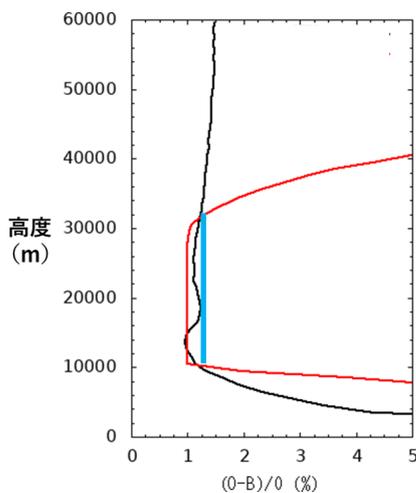


図 3.6.1 観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差 (黒線)、更新前 (赤線) 及び更新後 (青線) の観測誤差について、観測値で規格化 [%] した鉛直高度分布 (m)

(3) 解析・予測へのインパクト

2024 年 3 月時点の現業全球数値予報システム相当の実験 (CNTL) に対し、3.6.3(2) で示した Metop-C 及び COSMIC-2 の GNSS 掩蔽観測の利用拡充及び利用手法改良を適用した実験 (TEST) の検証結果を示す。検証期間は夏季が 2023 年 8 月、冬季が 2024 年 1 月である。

解析値の基となる第一推定値 (一初期時刻前の予測値) と既存の観測値の整合性の変化を確認する。ラジオゾンデの気温と相対湿度について、観測値と第一推定値の差の標準偏差を見ると、夏季・冬季ともに CNTL と比較して TEST において減少しており、第一推定値の気温場・水蒸気場が改善していることを示している (図 3.6.2)。同様の傾向は、気温・水蒸気に感度を有する衛星観測との比較においても確認された (図略)。また、気温の変化に対応して高度場も改善が見られた (図略)。

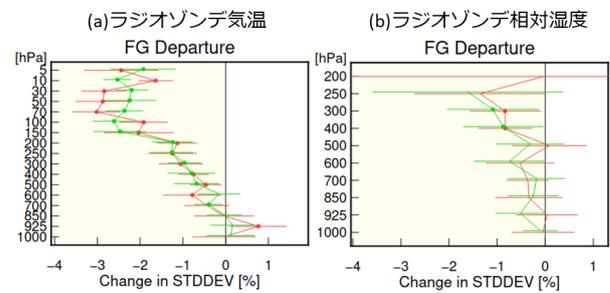


図 3.6.2 観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の CNTL に対する TEST の変化率 [%]。赤線は夏季間、緑線は冬季を示す。(a) ラジオゾンデ気温、(b) ラジオゾンデ相対湿度。エラーバーは 95% 信頼区間、丸点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

海外数値予報センターの解析値を参照値として気温場の予測を検証すると、中高緯度の成層圏にて一部改善が見られるものの、熱帯の成層圏や中高緯度対流圏を中心に全体としては予測精度の改善が卓越していた (図 3.6.3)。水蒸気や高度についても予測精度向上が確認された (図略)。

3.6.4 検証結果

3.6.2 項及び 3.6.3 項で示した改良項目の現業全球数値予報システムへの導入に際して実施した試験結果に基づき解析及び予測精度の変化の概要を示す。

(1) 実験設定

対照実験 (CNTL) には 2025 年 3 月時点の現業全球数値予報システムに準拠した実験システムを用い、CNTL に 3.6.2 項及び 3.6.3 項で示した改良を適用した実験を TEST とした。

実験及び検証は、夏季及び冬季について、以下の期間にて実施した。

- 夏季

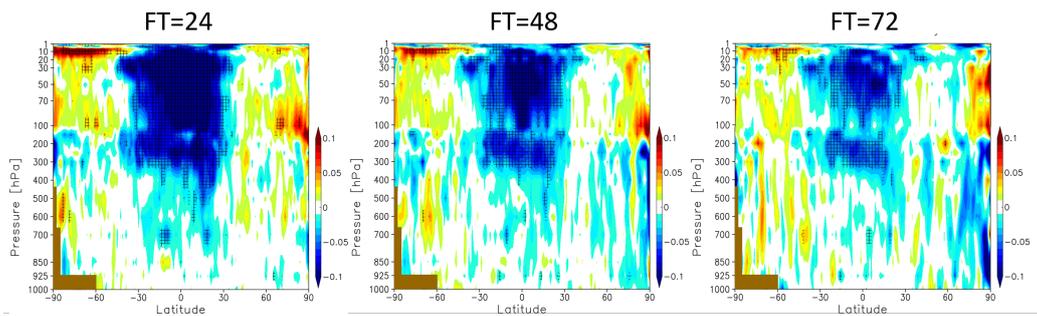


図 3.6.3 冬季実験における気温予測の RMSE の CNTL に対する TEST の変化率 [%] の鉛直緯度別帯状平均分布。左から順に、24 時間予測、48 時間予測、72 時間予測。参照値は ERA5。寒色系は改善、暖色系は改悪を示す。図中の茶色の部分は南極大陸付近にてマスキングした領域を示す。

- 実験: 2023 年 6 月 10 日～2023 年 10 月 11 日
- 検証: 2023 年 7 月 1 日～2023 年 9 月 30 日
- 冬季
 - 実験: 2023 年 11 月 10 日～2024 年 3 月 11 日
 - 検証: 2023 年 12 月 1 日～2024 年 2 月 28 日

(2) 観測値と第一推定値の整合性

第一推定値と既存の観測値の整合性の変化からは、ラジオゾンデの気温、風・相対湿度や水蒸気や気温に感度を有する輝度温度の観測値と第一推定値の差の標準偏差が夏季・冬季ともに CNTL と比較して TEST にて減少しており、第一推定値の気温場・水蒸気・風が大きく改善していることを確認した(図 3.6.4)。

(3) 予測スコア

予測場の精度については、熱帯での 500 hPa 高度や 850hPa 気温の対ラジオゾンデの平均誤差等、一部の要素で改悪がみられるものの、対初期値検証・対ラジオゾンデ検証ともに、夏季・冬季のいずれでも予測時間前半を中心に気温・水蒸気・風等の多くの指標で有意な改善が見られた(図 3.6.5)。特に、北半球 500 hPa 高度については、概ね 3 日先まで有意な改善が見られた(図 3.6.6)。夏季・冬季合わせた平均での 2 日先の RMSE の改善幅は約 0.22 m であった。500 hPa 高度の改善は、GNSS 掩蔽観測データの利用拡充単独の試験でも確認されており、この改良の効果が大きいと考えられる。対流圏下層の水蒸気場の予測も改善しており、マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充、マイクロ波水蒸気サウンダの利用高度化及び CO₂ バンドの CSR の寄与が多いと考えられる。台風進路予測と日本付近の降水予測の統計検証結果はいずれも中立であった。

なお、降水予測精度は統計的に中立であったが、500 hPa 高度の改善に伴い降水が改善した事例も確認した。2023 年 9 月 2 日 9 時(日本時間)を対象とした 48 時間予測(図 3.6.7)では、日本付近のトラフが CNTL の予測では実況より浅かったものの、TEST ではその誤差が軽減され、トラフの予測改善とともに前線に流れ込む下層の水蒸気も変化したことにより、東北地方で

の降水予測が実況に近づいたと考えられる。

3.6.5 まとめと今後

2025 年 10 月 15 日に実施した全球数値予報システムの更新では、GNSS 掩蔽観測データの利用拡充、放射伝達モデル RTTOV の更新、マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充、マイクロ波水蒸気サウンダの利用高度化、CO₂ バンドの晴天輝度温度(CSR)の利用、極域の大気追跡風(AMV)の利用拡充等を実施した。これら更新によって、解析値及び予測時間前半を中心に気温・水蒸気・風等が改善した。北半球 500 hPa 高度については、2 日先予測の RMSE が約 0.22 m 減少した。台風進路予測と日本付近の降水予測の統計検証結果はいずれも中立であったが、500 hPa 高度の改善に伴い降水が改善した事例も見られた

全球数値予報システムでの観測データ利用手法については、次期静止気象衛星搭載赤外サウンダ等の新たな観測を含む利用データの拡充、並びにモデル特性を踏まえた雲・降水域及び陸域の衛星輝度温度データや高密度・高頻度の観測データの利用手法の高度化等の改良を引き続き行う。これらの開発の進捗については、4.4 節を参照されたい。

参考文献

- Kursinski, E. R., G. A. Haji, J. T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy, 1997: Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, **102**, 23429–23465.
- Saunders, R., J. Hocking, E. Turner, P. Rayer, D. Rundle, P. Brunel, J. Vidot, P. Roquet, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, , and C. Lupu, 2018: An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 2717–2737.
- 気象庁, 2022: 全球解析における全天同化マイクロ波水蒸気サウンダデータ利用の拡充. 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

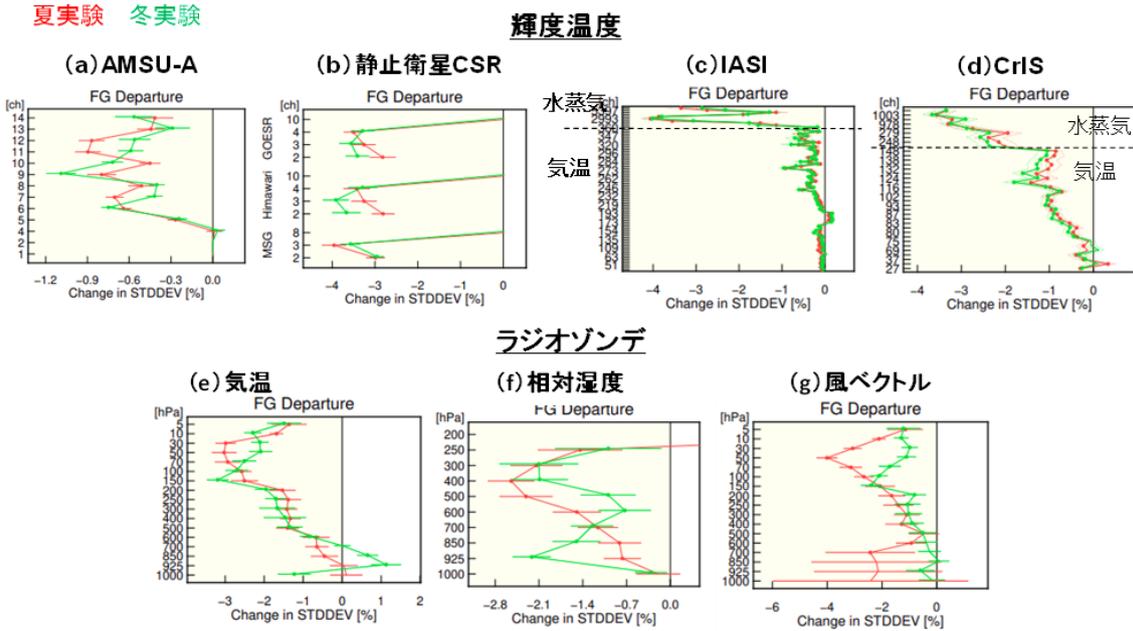


図 3.6.4 観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の CNTL に対する TEST の変化率 [%]。赤線は夏季、緑線は冬季を示す。上段：(a) マイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b) 静止衛星晴天輝度温度 (CSR)、(c) ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI、(d) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS、下段：(e) ラジオゾンデ気温、(f) ラジオゾンデ相対湿度、(g) ラジオゾンデ風ベクトル。エラーバーは 95%信頼区間、丸点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。上段 (a)~(d) の輝度温度データについては、観測演算子 RTTOV の変更 (3.6.2(1)) の影響を差し引くため、CNTL に当該項目を追加した実験と TEST の差異を示す。

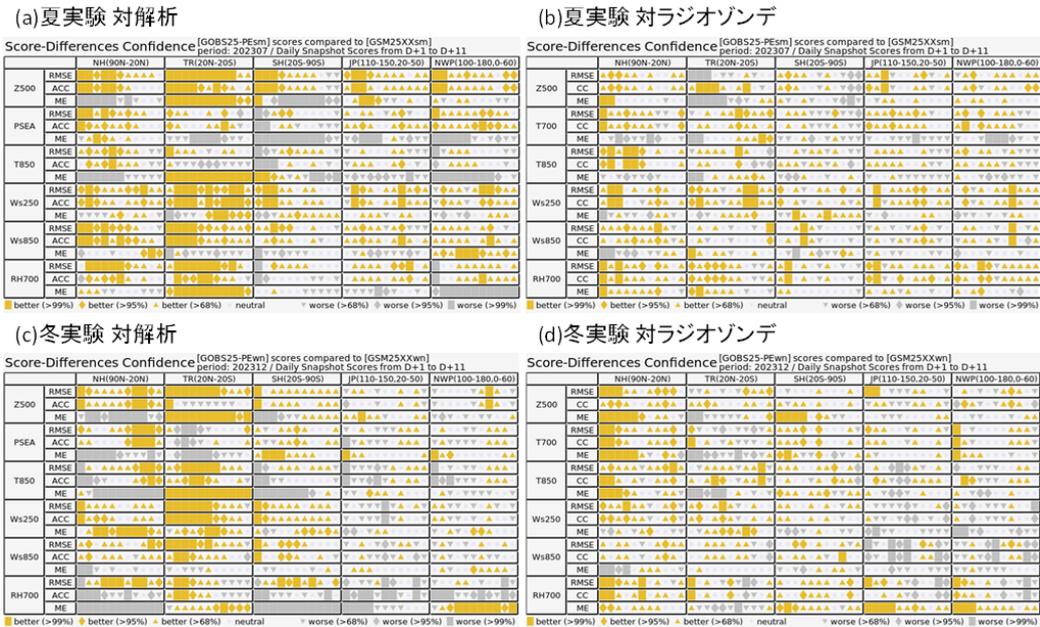


図 3.6.5 対流圏主要要素の TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (スコアカード)。検証期間と参照値は、(a) 夏季、解析値、(b) 夏季、ラジオゾンデ観測値、(c) 冬季、解析、(d) 冬季、ラジオゾンデ観測値。検証対象の領域は、NH が北半球 (20° N 以北)、TR が熱帯 (20° S-20° N)、SH が南半球 (20° S 以南)、JP が日本周辺 (110° E-150° E, 20° N-50° N)、NWP が北西太平洋領域 (100° E-180° E, 0° -60° N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (PSEA) または 700 hPa 気温 (T700)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から二乗平均平方根誤差 (RMSE)、アノマリー相関係数 (ACC) または相関係数 (CC)、平均誤差 (ME) について、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

ター, 40-43.

気象庁, 2025: 観測データの新規導入と利用方法の改良. 数値予報開発センター年報(令和6年), 気象庁数値予報開発センター, 72-90.

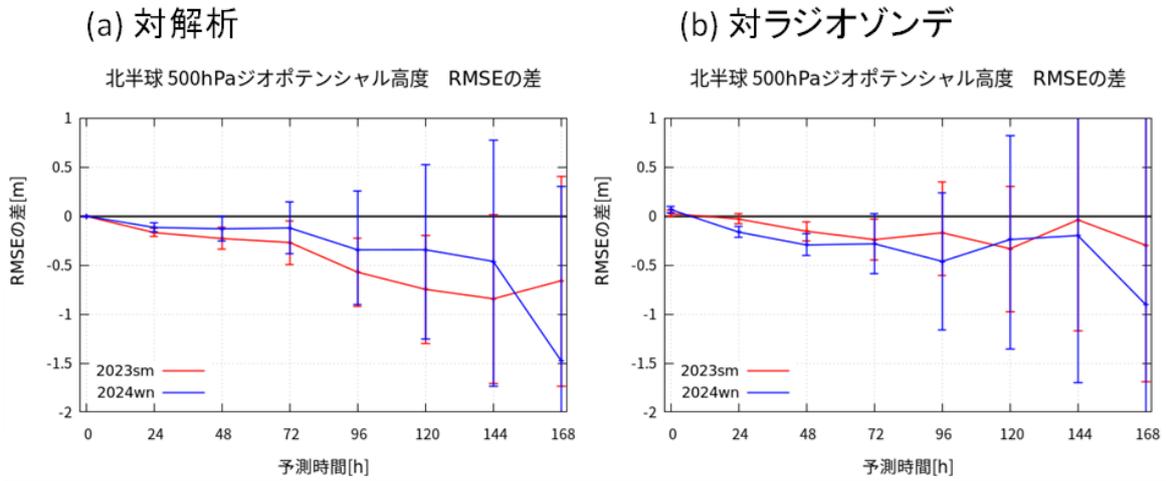


図 3.6.6 北半球 (20° N 以北) での 500 hPa 高度場の RMSE[m] の CNTL に対する TEST の差の予測時間 [hour] 別に示した検証結果。参照値は、(a) 解析値、(b) ラジオゾンデ。赤線が夏季、青線が冬季を示す。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味する。エラーバーは 95%信頼区間を表す。

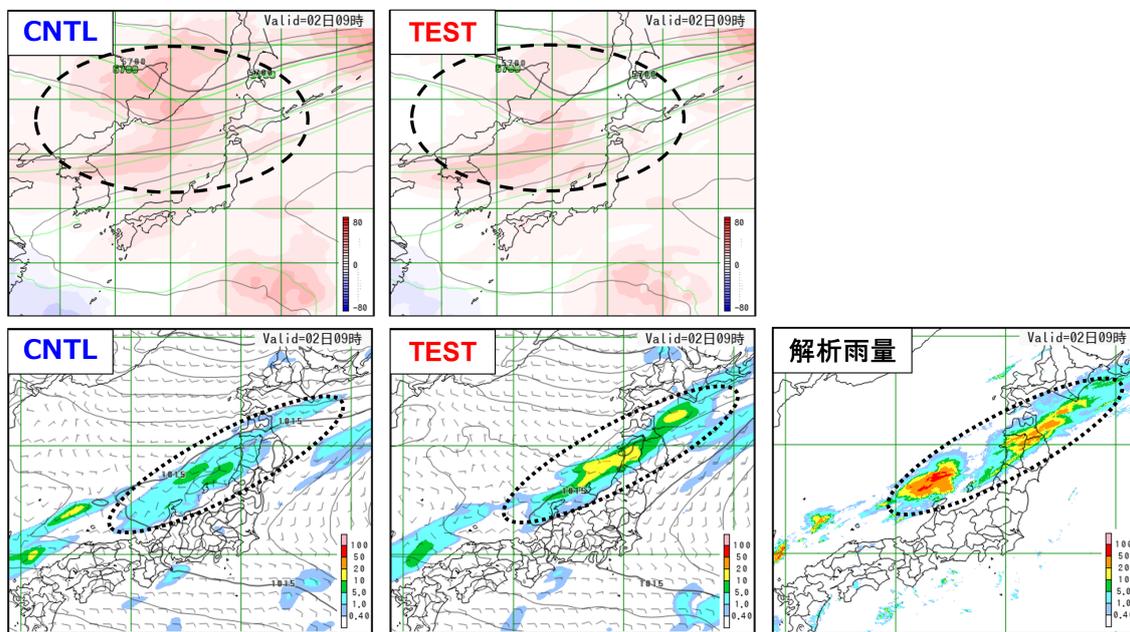


図 3.6.7 2023 年 9 月 2 日 9 時 (日本時間) を対象とした、(上段) 500 hPa ジオポテンシャル高度の 48 時間予測、(下段) 前 3 時間降水量 [mm/3h] の 48 時間予測と解析雨量。上段各図の黒線、緑線及び陰影は予測、予測対象時刻の解析と予測誤差を示す。

3.7 メソ解析・局地解析における観測データ利用手法の改良

3.7.1 はじめに

気象庁の数値予報システムでは、初期値解析において様々な観測データが同化されている。初期値精度の向上は予測精度向上に重要であり、新規観測データの導入や、観測データの利用法の改良が継続的に進められている。2025年2月12日に実施したメソ数値予報システム及び局地数値予報システムの変更では、高速放射伝達モデル RTTOV の更新、マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充及びアメダス湿度計データの観測誤差の調整を実施した。本節では、これらの概略と改良による予測特性の変化について述べる。

3.7.2 変更の概要

ここでは、2025年2月12日に実施した変更の概要について示す。各変更の詳細や個々の変更のインパクトについては、気象庁(2025)を参照されたい。

(1) 高速放射伝達モデル RTTOV の放射伝達計算用係数及び海面射出率モデルの更新

輝度温度データの同化に観測演算子として利用している高速放射伝達モデル RTTOV(Saunders et al. 2018) について、計算精度向上や機能追加、新規衛星への対応などの改良を反映するため、RTTOV-10.2 から RTTOV-13.0(Saunders et al. 2020) への更新を行った。本変更では、RTTOV-13.0 が動作するための必要最低限の変更を行った第一段階(気象庁 2023) に引き続き、最新の気体吸収データベースに基づく新しい放射伝達計算用係数への更新や、最新の知見に基づいた海面射出率モデルへの更新を、メソ解析及び局地解析において実施した。

放射伝達計算用係数については、利用中のセンサにおいて CrIS 以外の係数を更新した¹。これにより、放射伝達計算の精度が向上した。海面射出率モデルについては、赤外の計算において精度向上の見られた IREMIS(Saunders et al. 2017) の利用を開始した。さらに、上記の放射伝達計算用係数や海面射出率モデルの更新に伴って計算輝度温度の統計的特性が変化したことや、経年変化によってスキャンバイアス補正(統計に基づいた固定値によるバイアス補正)が不十分になっているセンサもあることから、スキャンバイアス補正が必要な全てのセンサについて、その補正量を更新した。また、AMSU-A については、品質管理で用いる雲水量のリトリブ値が従来よりも大きく算出されるようになったため、利用されるデータ数が従来と同程度になるように、品質管理において雲判定に用いる雲水量の閾値を変更した。

¹ CrIS は係数の更新により観測値と第一推定値の差(O-B)の標準偏差が増大するなど計算精度の向上が確認できなかったため、今回は更新を見送った。

これらの変更により、衛星観測輝度温度データ利用のための処理が高度化及び適正化された。また、より新しいバージョンへの更新により、今後の新規センサの利用拡充にも対応できるようになった。

(2) 衛星搭載マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充

全球、メソ及び局地解析で同化利用している極軌道衛星搭載のマイクロ波気温サウンダ(AMSU-A, ATMS 等)は、主に大気気温の鉛直分布に関する情報を観測するセンサであるが、対流圏下層の水蒸気に感度があり大気の透過率が高いチャンネル(窓チャンネル)も搭載している。これまで窓チャンネルは品質管理処理でのみ利用していたが、同化利用することで解析値の水蒸気場の改善を通じた予測精度の向上が期待できることから、メソ解析及び局地解析において利用を開始した。

新規利用する窓チャンネルは、23.8 GHz(AMSU-A/ch1, ATMS/ch1)及び31.4 GHz(AMSU-A/ch2, ATMS/ch2)のチャンネルとした。陸面や海水面では射出率の不確か性が大きいことから、海上のデータのみを同化利用した。その際、観測視野の中心が海上であっても、視野内にわずかでも陸面や海水面が含まれる場合は同化利用に適さないことから、陸域や海水域との境界に近いデータをなるべく利用しないようにQC処理を一部変更した他、観測視野が大きくなる端寄りのデータについては全て同化利用しないこととした。

この変更により、第一推定値の水蒸気場や、予測初期における比較的弱い降水の予測精度改善が確認された。

(3) アメダス湿度計データの観測誤差の調整

線状降水帯などに伴う集中豪雨の予測精度の向上のため、全国のアメダス観測所への湿度計の設置が順次進められている。整備されたアメダス湿度計は、メソ解析や局地解析で2023年3月に同化利用が開始されている。アメダス湿度計の整備が進み、数百地点規模、年単位の時間スケールで詳細な統計調査を行った結果、高湿時における観測精度が乾燥時よりも相対的に低いことが示唆された。そのため、高湿時の観測精度の低下に対応する目的で高湿時の地上比湿の観測誤差を大きく設定する変更を行った。

観測誤差の設定値としては、モデルの予報誤差や水蒸気の代表性誤差を考慮して、100%における湿度計の観測誤差を従来の3倍とした。0%から90%までは従来どおりの観測誤差とし、90%から100%までは、90%で従来の1倍、100%で従来の3倍となるように線型に増加させた。

この変更により、予測初期の地上比湿の高湿バイアスの改善、地上気温の高温バイアスの改善、降水予測における弱い雨の空振りの減少が確認された。

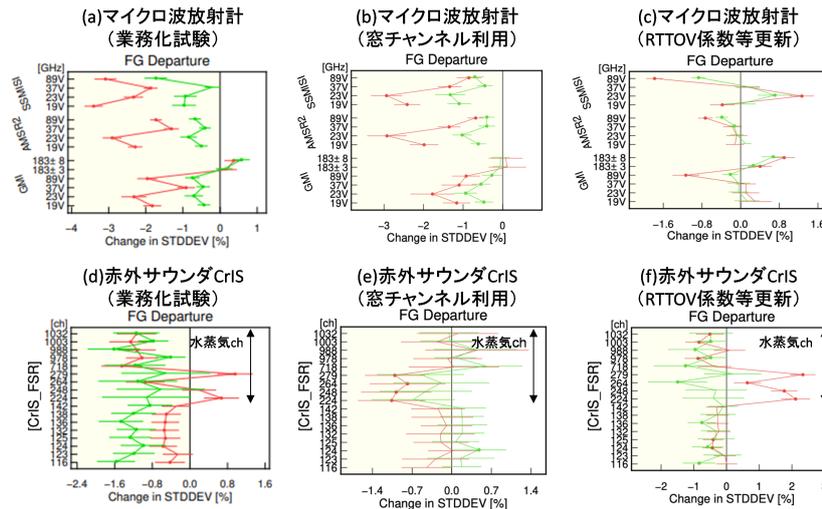


図 3.7.1 メソ解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。上段 (a) (b) (c) はマイクロ波イメジャGMI, AMSR2 及び SSMIS、下段 (d) (e) (f) は赤外サウンダ CrIS についての結果。CrIS は上から 9 チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。左列 (a) (d) に業務化試験の結果、中央列 (b) (e) に変更項目 (2) のマイクロ波気温サウンダ窓チャンネル利用の単体試験の結果、右列 (c) (f) に変更項目 (1) の RTTOV 係数更新の単体試験の結果をそれぞれ示す。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

3.7.3 メソ解析における検証結果

第 3.7.2 項で示した改良について、現業メソ数値予報システムへの導入に際して実施した業務化試験の結果を中心に示す。

(1) 実験設定

対照実験 (CNTL) には 2024 年 3 月 5 日時点の現業メソ数値予報システムに準拠した実験システムを用いた。CNTL に対して、第 3.7.2 項で示した改良を適用した実験を TEST とする。

実験は、夏季及び冬季について、以下の期間について実施した。初期値はいずれも 3 時間間隔で 1 日 8 回実行した。

- 夏期間
 - － 解析: 2023 年 6 月 21 日～2023 年 9 月 21 日
 - － 予報: 2023 年 6 月 26 日～2023 年 9 月 21 日
- 冬期間
 - － 解析: 2023 年 12 月 5 日～2024 年 2 月 25 日
 - － 予報: 2023 年 12 月 10 日～2024 年 2 月 25 日

(2) 観測値と第一推定値の整合性

様々な種類の観測データについて、解析処理における観測値と第一推定値との整合性を確認した。そのうち、マイクロ波イメジャ (SSMIS, AMSR2, GMI) 及び赤外サウンダ CrIS についての結果を示す (図 3.7.1)。一般的に、第一推定値が観測値により整合 (改善) している場合、変更を加えていない観測データについては、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差が減少し、グラフの 0 線より左側にプロットされることで第一推定値の精度向上を確認できる。ただし、本変更

では輝度温度の観測演算子である RTTOV の係数等を変更しているため、変更起因する変化がマイクロ波イメジャや赤外サウンダの標準偏差に反映されることから、標準偏差の減少/増加のみで改善/改悪を単純には判断できない。ここで、RTTOV の変更を加えていない、マイクロ波気温サウンダ窓チャンネル利用の単体での性能評価試験 (以降「単体試験」とする) の結果 (中央列) に着目すると、水蒸気に感度のあるマイクロ波イメジャ、及び赤外サウンダ CrIS (水蒸気チャンネル) で整合性の向上が確認できる。業務化試験の結果 (左列) については、RTTOV 係数更新の単体試験の結果 (右列) に見られる変化と、マイクロ波気温サウンダ窓チャンネル利用の単体試験の結果 (中央列) に見られる水蒸気場の改善の効果が概ね組み合わせられた結果となっており、水蒸気場の改善が業務化試験でも見られることや、複数の変更項目が適切に業務化試験に反映されていることを確認することができた。

(3) 各種統計検証スコア

予測場の精度について、主要要素の統計検証結果を確認した (図 3.7.2)。夏実験については、予報初期において弱い降水の予測精度の改善 (第 3.7.2 項で示した変更項目 (1)、(2) 及び (3) によるもの、図中 (a)) や、地上観測要素 (比湿、気温、気圧) に対する改善 (変更項目 (3) によるもの、図中 (b)) が見られた。冬実験については、高度場の予測 (FT=24 程度まで) における改善 (変更項目 (1) によるもの、図中 (c)) や、地上気温の悪化 (変更項目 (1) によるもの、図中 (d)) を確認した。地上気温の悪化については、変化の程度は僅かであり深刻なものではなかった。

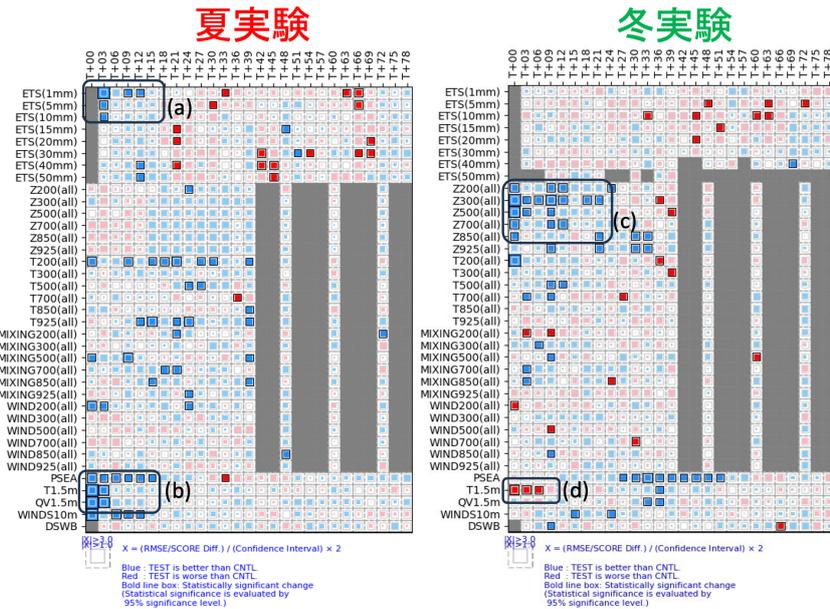


図 3.7.2 メソ数値予報システムにおける主要要素の対 CNTL 統計検証結果。統計値には、降水量では解析雨量を参照値としたエクイタブルスレットスコア (ETS) を用い、その他の要素では、高度場、気温、水蒸気混合比、風速についてはラジオゾンデ、地上要素についてはSYNOPとアメダス観測を参照値とした二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。各行は統計検証要素、各列は予測時間 (単位: 時) に対応する。青が CNTL と比べて改善、赤が CNTL と比べて改悪を表しており、色付きの領域が各セルの内側の正方形以上の場合、統計的に有意であることを示す。左図は夏実験、右図は冬実験の結果を示す。図中の (a) (b) (c) (d) は本文から参照する着目点を示す。

3.7.4 局地解析における検証結果

第 3.7.2 項で示した改良について、現業局地数値予報システムへの導入に際して実施した業務化試験の結果を中心に示す。

(1) 実験設定

対照実験 (CNTL) には 2024 年 3 月 5 日時点の現業局地数値予報システムに準拠した実験システムを用いた。CNTL に対して、第 3.7.2 項で示した改良を局地数値予報システムに適用した実験を TEST (接続なし) とする。また、メソ及び局地の現業数値予報システムに第 3.7.2 項で示した改良を同時に適用することを踏まえ、上記局地数値予報システムの TEST (接続なし) の第一推定値及び外部境界値として、第 3.7.3 項のメソ数値予報システムでの TEST を用いた実験を TEST (接続あり) とする。

実験は、夏季及び冬季について、以下の期間について実施した。初期値はいずれも 1 時間間隔で 1 日 24 回実行した。

- 夏期間
 - － 解析: 2023 年 6 月 28 日～2023 年 7 月 12 日
 - － 予報: 2023 年 6 月 28 日～2023 年 7 月 12 日
- 冬期間
 - － 解析: 2024 年 1 月 30 日～2024 年 2 月 14 日
 - － 予報: 2024 年 1 月 30 日～2024 年 2 月 14 日

(2) 観測値と第一推定値の整合性

様々な種類の観測データについて、解析処理における観測値と第一推定値との整合性を確認した。そのうち、マイクロ波イメージャ (SSMIS, AMSR2, GMI) 及び赤外サウンダ CrIS についての結果を示す (図 3.7.3)。メソ解析の結果 (図 3.7.1) と同様に、TEST (接続なし) の結果については、RTTOV 係数更新の単体試験の結果 (右列) に見られる変化と、マイクロ波気温サウンダ窓チャンネル利用の単体試験の結果 (中央右列) に見られる水蒸気場の改善の効果が概ね組み合わせられた結果となっており、水蒸気場の改善が TEST (接続なし) でも見られることや、複数の変更項目が適切に業務化試験に反映されていることを確認することができた。また、TEST (接続あり) の結果からは、メソ解析の変更における水蒸気場の改善の効果が波及し、より大きな改善が確認できた。

(3) 各種統計検証スコア

予測場の精度について、主要要素の統計検証結果を確認した (図 3.7.4)。TEST (接続なし) の結果については、いずれも個別の変更項目で見られた結果を反映しているものの、概ね中立であった。なお、個別の変更項目で見られた結果としては、夏実験では、予報初期での弱い降水の予測精度の改善 (変更項目 (1)、(2) 及び (3) によるもの、図中 (a)) 及び地上観測要素 (比湿、気温、気圧) に対する改善 (変更項目 (3) による

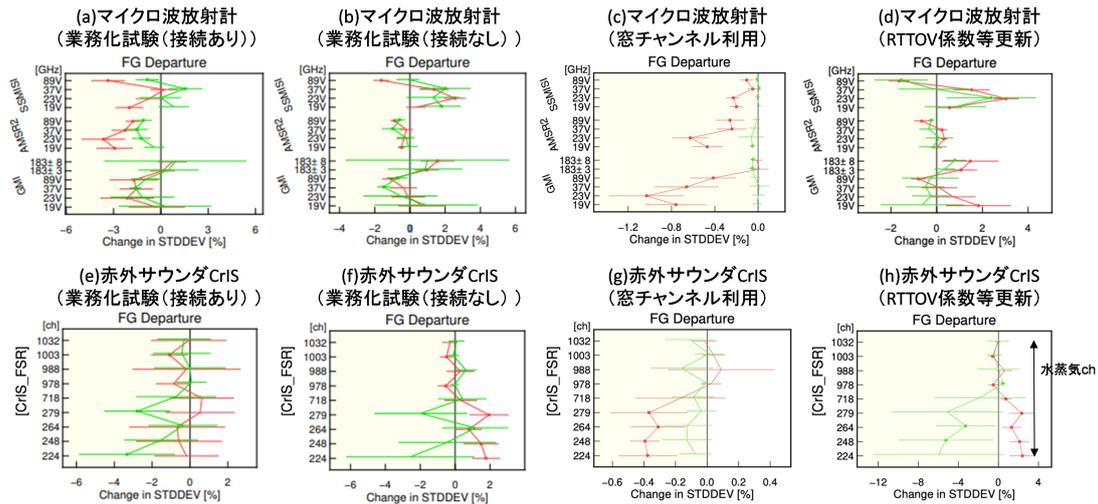


図 3.7.3 局地解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。上段 (a) (b) (c) (d) はマイクロ波イメージャ GMI, AMSR2 及び SSMIS、下段 (e) (f) (g) (h) は赤外サウンダ CrIS についての結果。CrIS の利用チャンネルはすべて水蒸気チャンネル。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。左列から、(a) (e) に TEST (接続あり) の結果、(b) (f) に TEST (接続なし) の結果、(c) (g) に変更項目 (2) のマイクロ波気温サウンダ窓チャンネル利用の単体試験の結果、(d) (h) に変更項目 (1) の RTTOV 係数更新の単体試験の結果をそれぞれ示す。図の見方は図 3.7.1 と同じ。

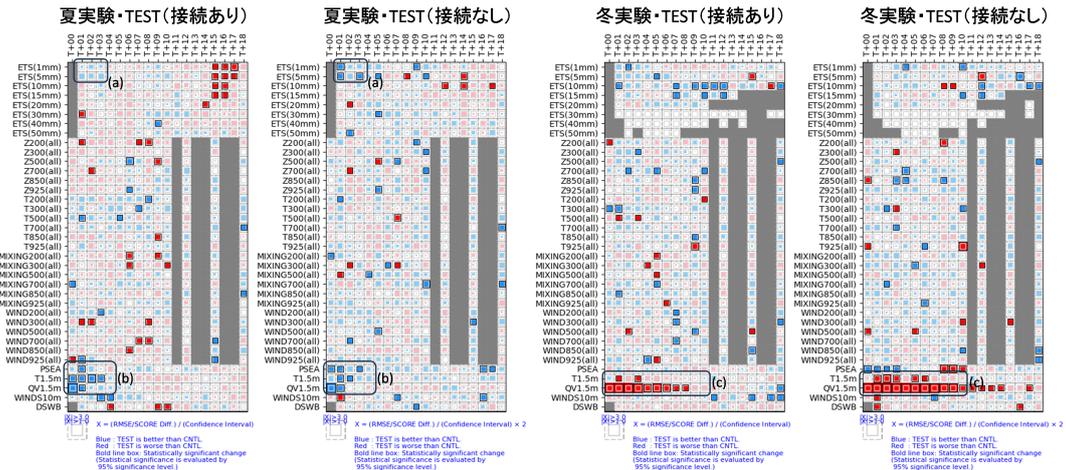


図 3.7.4 局地数値予報システムにおける主要要素の対 CNTL 統計検証結果。図の見方は図 3.7.2 と同じ。左から、夏実験・TEST (接続あり)、夏実験・TEST (接続なし)、冬実験・TEST (接続あり)、冬実験・TEST (接続なし) の結果をそれぞれ示す。図中の (a) (b) (c) は本文から参照する着目点を示す。

もの、図中 (b)) が確認され、冬実験では、地上観測要素 (比湿、気温、気圧) に対しては、気温の悪化 (変更項目 (1) によるもの、図中 (c)) や、比湿の悪化 (変更項目 (3) によるもの、図中 (c)) が確認された。気温や比湿の悪化については、変化の程度は僅かで深刻なものではなかった。TEST (接続あり) の結果についても、概ね中立であったが、メソ解析の変更による第一推定値及び境界値の差異による変化が支配的で、TEST (接続なし) で見られた特徴は不明瞭となる傾向が見られた。

(4) 予測改善事例

降水予測精度は統計的には概ね中立の範囲内であったが、改善事例も見られることを確認した。図 3.7.5 に、2023 年 7 月 10 日に福岡・佐賀・大分県で発生した線状降水帯事例について、局地モデルにおける 2023 年 7 月 9 日 15 時初期値からの 11 時間後 (7 月 10 日 2 時) の予測 (前 1 時間積算雨量) を示す。改良前には予測されていなかった (同図 (a)) 福岡県付近の降水域 (同図 (a)–(d) 中赤 o) が、局地のみに改良を適用した TEST (接続なし) (同図 (b)) では大きな変化は見られなかったものの、メソ・局地とも改良した TEST (接続あり)

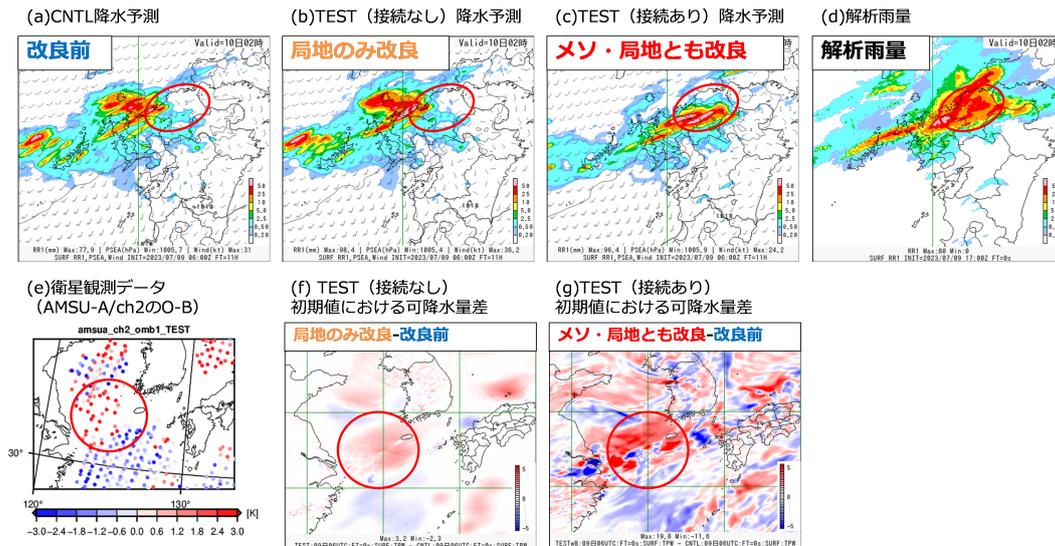


図 3.7.5 2023 年 7 月 10 日に福岡・佐賀・大分県で発生した線状降水帯事例。局地モデルにおける 2023 年 7 月 9 日 15 時 (JST) 初期値からの 11 時間後 (7 月 10 日 2 時) の予測 (前 1 時間積算雨量)。(a) CNTL による降水予測、(b) TEST (接続なし) による降水予測、(c) TEST (接続あり) による降水予測、(d) 解析雨量。初期値時刻における、(e) メソ解析における衛星観測データ (AMSU-A/ch2 の O-B)、(f) TEST (接続なし) と CNTL の可降水量の差、(g) TEST (接続あり) と CNTL の可降水量の差。

(同図 (c)) において、解析雨量 (同図 (d)) に近い予測となった。変化のあった降水域を初期値に遡ると、日本の西方海上の水蒸気量の増加に対応していた (同図 (f) (g) 中赤)。水蒸気量の増加は、変更項目 (2) で追加した、水蒸気に感度のある衛星観測データ (AMSU-A 窓チャンネル) の O-B が正 (水蒸気が増加する方向) の領域に対応しており (同図 (e))、衛星データによって与えられた水蒸気場の変化が、降水の改善につながったと考えられる。この事例では、初期値における可降水量の CNTL との差は、TEST (接続なし) (同図 (f)) より TEST (接続あり) (同図 (g)) で大きく、局地モデルだけでなく、局地モデルに第一推定値と境界値を与えるメソモデルでの水蒸気量の精度向上が、降水予測の改善に寄与したことが確認できた。

3.7.5 まとめと今後

2025 年 2 月 12 日に実施したメソ数値予報システム及び局地数値予報システムの更新では、高速放射伝達モデル RTTOV の更新や、マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充、アメダス湿度計データの観測誤差の調整を実施した。この更新によって、第一推定値の水蒸気場を中心とした改善が確認された。主要な気象要素を用いた予測精度の統計検証結果は概ね中立であったが、本変更により水蒸気場が変化し、降水分布が改善する事例を確認することができた。

メソ数値予報システム及び局地数値予報システムにおいては、引き続き利用観測データの拡充や利用手法の高度化に取り組んでおり、2025 年度末頃の現業化を目指した開発を進めている。詳細については、第 4.4 節を参照されたい。

参考文献

気象庁, 2023: 放射伝達モデル RTTOV の更新. 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, 85-87.

気象庁, 2025: 観測データの新規導入と利用方法の改良. 数値予報開発センター年報 (令和 6 年), 気象庁数値予報開発センター, 72-90.

Saunders, R., J. Hocking, D. Rundle, P. Rayer, S. Havemann, M. Matricardi, A. Geer, C. Lupu, P. Brunel, and J. Vidot, 2017: RTTOV-12 science and validation report. *Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF*, URL https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/rtm/docs_rttov12/rttov12_svr.pdf.

Saunders, R., J. Hocking, E. Turner, P. Rayer, D. Rundle, P. Brunel, J. Vidot, P. Roquet, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, , and C. Lupu, 2018: An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 2717-2737.

Saunders, R., J. Hocking, E. Turner, S. Havemann, A. J. Geer, C. Lupu, J. Vidot, P. Chambon, C. KöpkenWatts, L. Scheck, and others, 2020: RTTOV-13 science and validation report. *Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF*, URL https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/rtm/docs_rttov13/rttov13_svr.pdf.

3.8 高潮モデルの改良

3.8.1 はじめに

気象庁は、高潮警報・注意報等の防災情報提供のために、台風や発達した低気圧によって引き起こされる高潮を予測する日本域高潮モデル(林原 2011)を運用しているほか、「早期注意情報(警報級の可能性)」(杉本・木下 2016)に必要な5日先までの確率的高潮予測を行うための日本域台風時高潮確率予報システム(日本域高潮 PFS)を、2022年8月から運用している(気象庁 2023c)。また、WMOの高潮監視スキーム(Storm Surge Watch Scheme)の枠組みで ESCAP/WMO 台風委員会の加盟国気象機関に高潮予測情報を提供するため、アジア域高潮アンサンブル予報システム(アジア域高潮 EPS)を運用している(気象庁 2023a)。

2025年1月に、アジア域高潮 EPS の台風ボーガスの改善と海底摩擦スキームの改良などの変更を行ったほか、2025年11月に、日本域高潮モデルと日本域高潮 PFS で利用する陸面粗度長と JRA-3Q 平年値を更新した。以下では、これら 2025 年の開発成果を紹介する。

3.8.2 アジア域高潮 EPS の台風ボーガス改善と海底摩擦スキームの改良など

アジア域高潮 EPS では、台風もしくは台風昇格見込みの熱帯擾乱が存在する場合、気象庁の台風予報を元に作成した台風ボーガスを、大気モデルの海面気圧・海上風分布に埋め込んで高潮予報計算を行う。アジア域高潮 EPS の予報時間(FT)は132時間であるのに対し、台風予報は最大でも120時間先までである。これまでの仕様では、台風予報が途切れると、高潮モデル内部の台風ボーガスが瞬時に消滅し、以降は、ベースの大気外力として使っている全球モデル及び全球 EPS の海面気圧・海上風分布のみから高潮予報計算を行っていた。この仕様により、瞬間的に外力が変わることによって不自然な潮位振動が発生し、台風から離れた地点にも影響を及ぼすことが問題になっていた。この問題を解決するため、台風予報が途切れた後は、台風ボーガスを外挿しつつ全球モデル・全球 EPS との間で重み付けをし、徐々に台風ボーガスが消えていくようにする変更を、2025年1月に実施した。

図 3.8.1 は、変更後のモデルによる、令和 6 年 8 月 7 日 18UTC 初期値における FT=121 以降の海面気圧分布(台風ボーガスを埋め込んだもの)を示している。FT=121 の分布において、北海道東方沖にある低圧部が台風ボーガスによるものであるが、これが6時間かけて徐々に消えることが分かる。これにより、図 3.8.2 のように、例えば台風から離れた銚子沖格子で見られていた潮位偏差の振動が抑えられるようになった。ここでは、台風ボーガスを6時間かけて消した場合と3時間かけて消した場合を比較しているが、3時間では

場の急変を十分吸収できないため、6時間かけて消す方を最終的に採用した。図 3.8.3 は長期間の統計検証の結果(バイアスコア)であるが、これによると、台風ボーガスの改善により、FT=120 以降目立っていた過大傾向が緩和したことが分かる。

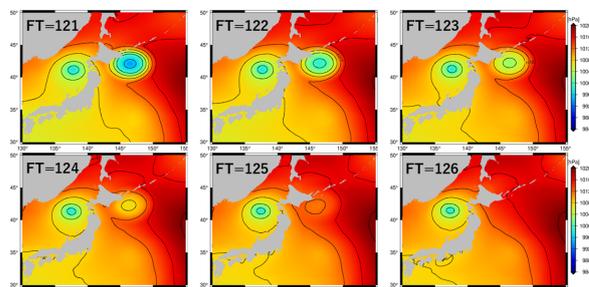


図 3.8.1 2024年8月7日18UTC初期値における海面気圧[hPa]の分布(変更後)。上段左からFT=121、122、123、下段左からFT=124、125、126の分布を表す。

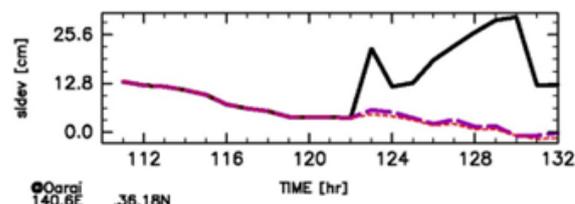


図 3.8.2 2024年8月7日18UTC初期値における銚子沖格子の潮位偏差時系列。黒線は変更前、赤点線は6時間かけて台風ボーガスを消した場合、紫破線は3時間かけて消した場合(変更後)の潮位偏差[cm]を表す。

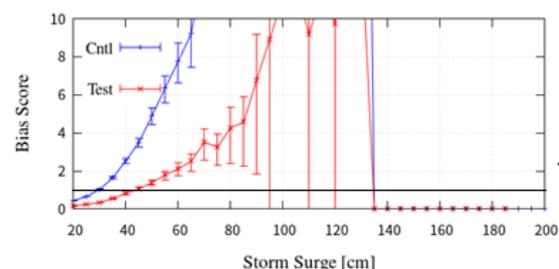


図 3.8.3 潮位偏差のバイアスコア。統計期間は2022~2024年の6~11月で、台風事例による検証結果を表す。国内約200地点の潮位観測点(気象庁ほか、港湾局や海上保安庁、国土地理院が運用)の観測値を利用し、3時間ごとの最大値で検証したもの。Cntl(青線)は台風ボーガス改善前、Test(赤線)は改善後を表す。エラーバーは95%の信頼区間を示す。FT=121~132が対象。

一般に、水深が浅いほど海底粗度の影響が大きくなるため、海底摩擦係数は水深が浅いほど大きくなると考えられるが、これまでの気象庁の高潮モデルでは、水深の影響は小さいとして、海底摩擦係数は水深に関係なく一定として扱っていた。これは Konishi and Tsuji (1995) での古い台風事例検証に基づいているが、他機

関の高潮モデルや、高潮計算と本質的に同じ浅水方程式をベースとする津波シミュレーションでは、水深に依存する海底摩擦係数を使うことが多い。このため、水深依存性のある海底摩擦係数として Manning の式を導入するとともに、水深の深い領域で海底摩擦が小さくなりすぎるのを防ぐため、従来の海底摩擦係数を下限値として与えた (3.8.1)。

$$C_w = \max \left(\frac{gn^2}{H^{1/3}}, 2.6 \times 10^{-3} \right) \quad (3.8.1)$$

ここで、 H は全水深 [m]、 g は重力加速度 [m/s^2]、 n は Manning の粗度係数であり、 $n = 0.025$ である。

従来は地形データとして GEBCO2021¹ を計算領域全体で利用していたが、日本周辺海域においては、日本沿岸・湾内の他、南海トラフや日本海溝・千島海溝の領域を対象とする高解像度・高品質データである GtTM² (Global tsunami Terrain Model、内閣府中央防災会議による。図 3.8.4) が公開されており、その利用を検討した。精度検証の結果、日本周辺海域では GtTM と GEBCO2023³ を組み合わせたデータを、その他の領域では従来どおり GEBCO2021 のデータを採用することで (図 3.8.5)、中立以上の精度を確保できることが分かった。これらの変更による精度への影響は全体としてはわずかであるが、散布図 (図 3.8.6) に示すように (図中赤丸)、一部の事例で潮位偏差過大傾向が緩和するといった改善が見られた。

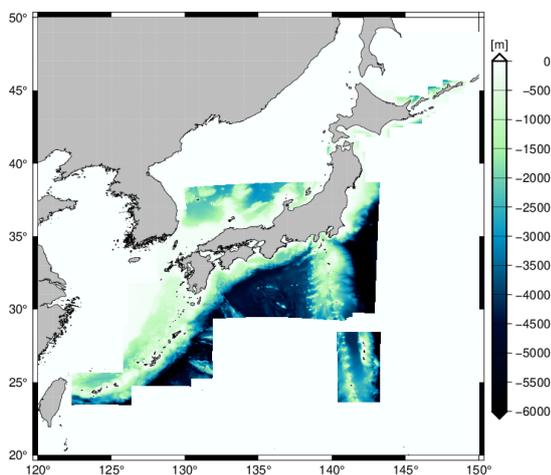


図 3.8.4 GtTM による水深データ。

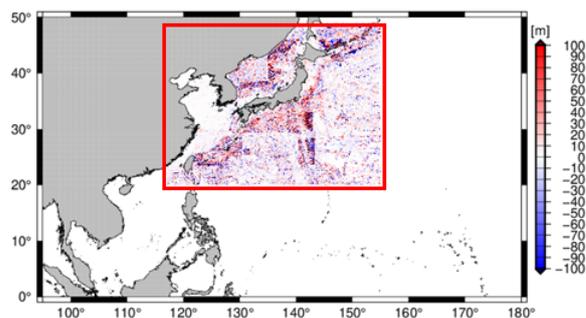


図 3.8.5 新旧水深データの比較。新水深 - 旧水深 [m]。赤線矩形領域は GtTM と GEBCO2023 を使用している領域を示す。

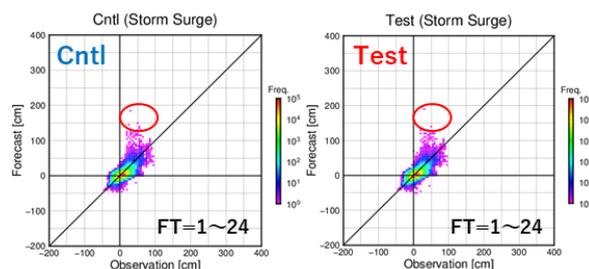


図 3.8.6 潮位偏差の散布図。Cntl (左図) は海底摩擦と水深の変更前 (図 3.8.3 で Test としたバージョンに相当)、Test (右図) は変更後による検証結果。統計期間と使用した観測データは図 3.8.3 と同じ。横軸は観測値、縦軸は予測値 [cm]。FT=1~24 が対象。

3.8.3 日本域高潮モデル及び日本域高潮 PFS の陸面粗度長と JRA-3Q 平年値更新

日本域高潮モデル及び日本域高潮 PFS では、台風ボーマスによる高潮計算時に、湾内や内海での高潮の過大予測を防ぐため、Westerink et al. (2008) が提案した沿岸域での海上風減衰手法を利用している (気象庁 2022)。この手法では、沿岸域の各海格子にて、風向毎に風上側の陸面粗度長を重み付け平均し、それと海上の粗度長の比から沿岸域での海上風速の減衰係数を計算する。陸面粗度長は、2019 年の各月のメソ解析の結果を用いて作成したものを利用していましたが、2025 年 11 月に、これをメソ解析の 2024 年のデータを用いて再作成した。新しい陸面粗度長には、2019 年以降のメソ解析の改良が反映されている。図 3.8.7 は、陸面粗度長の更新前後の違い (比) を表している。主に沿岸域で違いが見られるが、これはメソ解析の改良により、沿岸域の陸面粗度の表現が向上した結果であると言える。

高潮の主な成因である吸い上げ効果 (気象庁 2024) を計算するには、対象時刻の海面気圧 (の予報値) の他に、基準となる海面気圧が必要である。気象庁の高潮モデルでは、この基準となる海面気圧に気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century; Kosaka et al. 2024) による海

¹ https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2021

² https://www.hitachi-zaidan.org/activities/kurata/data/report52/ku_kankyoku1400.pdf

³ <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data/gebco2023-grid>

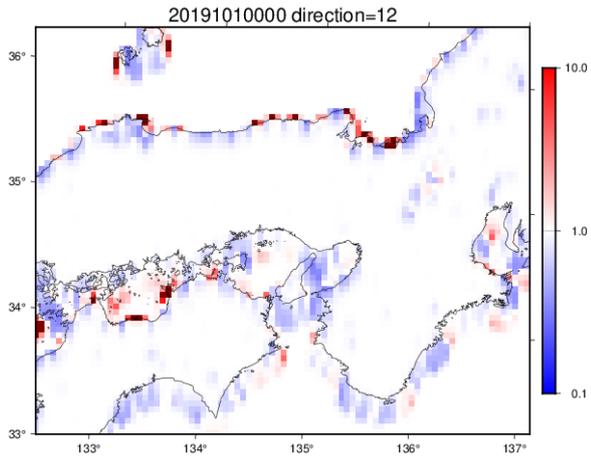


図 3.8.7 陸面粗度長の変更後と変更前の比（変更後/変更前）。1月における北風に対する値。対数スケールであることに注意。

面気圧平年値を用いている。2024年にJRA-3Qの平年値が更新されたため、2025年11月に高潮モデルで用いる海面気圧平年値を更新した。図3.8.8は、JRA-3Q海面気圧平年値の更新前後の差分を表している。日本域高潮モデルと日本域高潮PFSの計算領域（赤線矩形領域）に注目すると、オホーツク海付近で違いが見られるが、 ± 0.1 hPaに収まっており、これが潮位偏差に与える影響は ± 0.1 cm以下である。

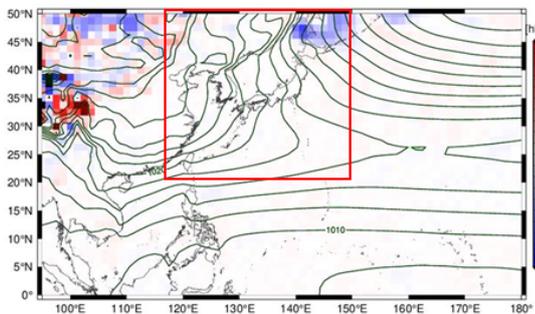


図 3.8.8 JRA-3Q 海面気圧平年値（1991～2020年）の変更後－変更前の差分 [hPa]。1月1日の日別平年値。赤線矩形領域は日本域高潮モデル及び日本域高潮PFSの計算領域を示す。

図 3.8.9 は、陸面粗度長及び海面気圧平年値の更新前後の、台風ボーガス中央コースによる潮位偏差の散布図である。Cntl（左図）に比べ Test（右図）の方がわずかに過大傾向が改善しているが、両者の違いは非常に小さい。検証スコア（図 3.8.10）でも、空振り率や捕捉率、スレットスコアでは大きな違いはない。バイアスコアでは、潮位偏差の過大傾向がやや緩和していることが分かる。これは上述のように、沿岸域の陸面粗度の表現が向上したことによると考えられるが、エラーバーが大きく統計的に有意な違いとは言えない。全体として更新前後で精度に大きな違いはないと言える。

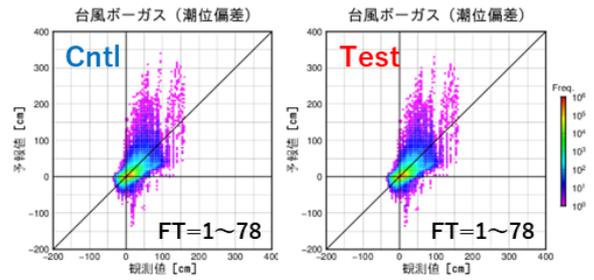


図 3.8.9 台風ボーガス中央コースによる潮位偏差の散布図。Cntl（左図）は陸面粗度長と JRA-3Q 平年値の更新前、Test（右図）は更新後による検証結果。2022～2024年の台風事例による検証結果を表す。国内約 200 地点の潮位観測点（気象庁ほか、港湾局や海上保安庁、国土地理院が運用）の観測値を利用し、3時間ごとの最大値で検証したもの。横軸は観測値、縦軸は予測値 [cm]。FT=1～78 が対象。

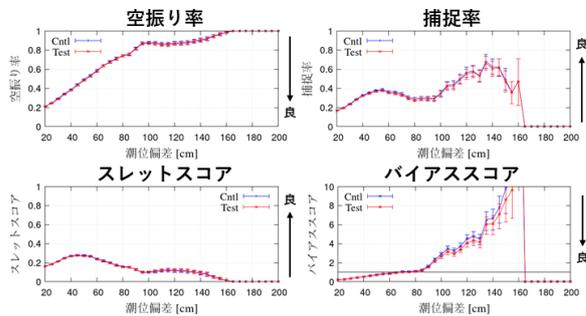


図 3.8.10 台風ボーガス中央コースによる潮位偏差の検証スコア。Cntl（青線）は陸面粗度長と JRA-3Q 平年値の更新前、Test（赤線）は更新後を表す。エラーバーは 95% の信頼区間を示す。統計期間と使用した観測データは図 3.8.9 と同じ。

日本域高潮PFSによる確率予報のスレットスコアを図 3.8.11 に示す。確率予報でも、全体として更新前後で大きな違いは見られない。一部大きめの確率帯でスレットスコアの低下が見られるが、その違いはわずかである。

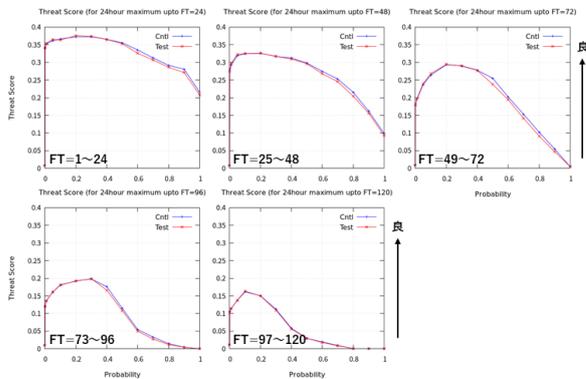


図 3.8.11 日本域高潮PFSによる確率予報のスレットスコア。閾値は潮位偏差 50 cm。横軸は超過確率。Cntl（青線）は陸面粗度長と JRA-3Q 平年値の更新前、Test（赤線）は更新後を表す。上段左から FT=1～24、25～48、49～72、下段左から FT=73～96、97～120 のスコアを表す。

3.8.4 まとめ

2025年1月におけるアジア域高潮EPSの変更では、台風ボーガスを外挿しつつ全球モデル・全球EPSとの間で重み付けをし、徐々に台風ボーガスが消えるようにすることで、不自然な振動を抑えられるようになった。また、水深依存性のある海底摩擦係数を採用したほか、地形データをより新しいものに更新することにより、わずかながら精度の向上が見られた。2025年11月の変更では、使用する陸面粗度長やJRA-3Q海面気圧平年値の更新を行った。

台風ボーガスについて改善が行われ一定の精度向上が図られたものの、二つ玉台風(気象庁2023b)が起こりうる問題は残っている。これを解決するため、令和8年度にアジア域高潮EPSへvortex relocation(Kurihara et al. 1993, 1995)を導入することを計画しているが、これについては4.7で解説する。

参考文献

- 林原寛典, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて. *天気*, **58**, 235–240.
- 気象庁, 2022: 日本域高潮モデル予報時間延長と台風ボーガス利用手法改善. 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, 32–35.
- 気象庁, 2023a: アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入. 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, 34–35.
- 気象庁, 2023b: 高潮モデル. 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, 130.
- 気象庁, 2023c: 日本域台風時高潮確率予報システムの導入. 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, 31–33.
- Konishi, T. and Y. Tsuji, 1995: Analysis of the storm surges in the western part of the Inland Sea of Japan caused by Typhoon 9119. *Mon. Wea. Rev.*, **15**, 1795–1823.
- Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa; T. Y. Tanaka, T. Tokuhira, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109.
- Kurihara, Y., M.A. Bender, and R.J. Ross, 1993: An Initialization Scheme of Hurricane Models by Vortex Specification. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2030–2045.
- Kurihara, Y., M.A. Bender, R.E. Tuleya, and R.J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL Hurricane Prediction System. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791–2801.
- 杉本悟史, 木下信好, 2016: 「警報級の可能性」の経緯

と目的. 量的予報技術資料(平成27年度予報技術研修テキスト), 気象庁予報部, 61–62.

- Westerink, J. J., R. A. Luettich, J. C. Feyen, J. H. Atkinson, C. Dawson, H. J. Roberts, M. D. Powell, J. P. Dunion, E. J. Kubatko, and H. Pourtaheri, 2008: A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to southern Louisiana. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 833–864, doi:10.1175/2007MWR1946.1.

気象庁, 2024: 日本域高潮モデル. 数値予報解説資料集(令和5年度), 気象庁情報基盤部, 188–196.

3.9 全球化学輸送モデルのオゾン同化に関する改良

3.9.1 はじめに

数値予報課では、紫外線情報の作成などを目的として、オゾン量の解析・予測を行う全球化学輸送モデルを運用している (JMA 2025)。全球化学輸送モデルでは衛星観測データを用いたオゾン全量 (オゾン量の鉛直積算値) をナッジングにより同化しているが、衛星の軌道に沿った同化ができておらず観測時刻と同化時刻のずれが大きくなることがある。また、複数衛星利用など更なる改良を行いつらい等の課題もある。課題改善のため、黄砂解析予測システム (JMA 2025) でも導入されている二次元変分法 (2D-Var) を同化手法として採用し、高度化した。この変更は 2025 年 12 月に現業化した。

3.9.2 変更項目

変更項目の概要を下記に示す。変更前後のデータ同化の仕様は表 3.9.1 を参照されたい。

- オゾン全量の同化手法をナッジングから 2D-Var に高度化
- 米国海洋大気庁が提供するオゾン全量観測のオリジナルデータ (ここでは L2 観測データと呼ぶ。) から変換した同化用観測値の仕様の見直し
 - － バイアスの一因となっている 0.25 度等緯度経度格子への空間間引きから、モデル格子への平均処理 (スーパーオブザベーション) へ変更
 - － 日別データから、衛星観測の軌道に沿った同化が可能な特別データへ変更
- 同化用観測値の仕様の見直しに伴う品質管理の変更とグロスエラーチェック閾値の強化

3.9.3 試験結果

2023 年 6 月から 2024 年 5 月を対象期間として、全球化学輸送モデルの業務化試験 (以下、TEST) を実行した。対照実験 (CNTL) として 2025 年 3 月時点のルーチン相当の結果を使用した。TEST と CNTL の比較の概要を以下に示す。

- 同化結果の一例を図 3.9.1 に示す。CNTL では同化用観測値として、日別データから切り出したローカルタイムが南中時刻にあたる 15 度幅の矩形経度帯 (同化領域) を使用する。これは実際の観測時刻と同化時刻との間に乖離が生じる原因となる。また、インクリメントは同化領域の中でのみ計算されるため、解析値では同化領域と非同化領域の境目でギャップが目立つことがある。一方、TEST では同化用観測データには衛星観測の軌道に沿った特別データを使用する。また、観測領域の周辺にもインクリメントが入りギャップが改善する。
- 同化用観測値の仕様を見直し、それに伴う品質管理

も変更した。これにより、低～中緯度では CNTL と比べて TEST はオゾン全量が大きくなる (図略)。CNTL では同化用観測値を作成する空間間引きの際に、誤差が小さいと考えられる太陽高度の高い (気候学的に低濃度な) 低緯度側の L2 観測データを優先的に採用するため、TEST に対して負バイアスであったと考えられる。また、高緯度では太陽天頂角の品質管理を緩和したことで TEST にはより極側までの観測値が含まれる (図略)。

- 中高緯度を中心に観測値と第一推定値の整合性は向上した (図 3.9.2)。
- オゾン全量解析値 (東西平均) は、熱帯～中緯度では増加したが、変化量は概ね 2DU 以下 (変化率は 1%未満) であった。また、高緯度では減少する傾向が見られたが、極夜域の差の大きなところで数 DU～10DU 程度 (変化率は最大 3～4%程度) にとどまった (図略)。また、オゾン濃度の鉛直分布は TEST と CNTL の差が概ね 0.1ppmv 以下であり大きな変化はなかった (図略)。
- 分光光度計観測に対するオゾン全量検証では解析値 (プロダクト作成初期時刻を基準に 12 時間前から 12 時間後までの統計) においてオゾン全量の負バイアスがやや軽減し、RMSD は改善傾向がみられたが、改善率は 2%程度にとどまった (図 3.9.3)。予測 1 日目 (初期時刻の 12 時間先から 36 時間先の統計) についても同様だった (図略)。Aura/MLS 観測やオゾンゾンデ観測に対する鉛直プロファイルの検証では、鉛直分布の特性に大きな変化はみられなかった (図略)。
- 2D-Var を予報計算の途中でサブルーチンと呼び出して実行することで、必要とする計算機資源は CNTL と TEST で大きく変わらない。

3.9.4 まとめ

全球化学輸送モデルで利用している同化手法を 2D-Var へ高度化する業務化試験を行った。その結果、これまでオゾン全量の解析値に見られていた空間ギャップの改善や解析・予測精度の改善が見られたことから、本改良を 2025 年 12 月に現業化した。

参考文献

- JMA, 2025: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan, 262 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2025-nwp/index.htm>).
- Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, N. Oshima, and T. Maki, 2017: JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 3225–3253.

表 3.9.1 データ同化の仕様と変更前後の比較

	現行	変更後
データ同化手法	ナッジング	2D-Var(Yumimoto et al. 2017)
解析変数	オゾン全量 オゾン濃度の鉛直分布はオゾン全量の解析値にあうようスケーリングして修正	
背景誤差、背景誤差共分散	背景・観測誤差等はなく、修正量の重みは固定値 (0.75)	気候学的変動量の 0.15 倍、誤差相関距離 200km で設定
観測誤差		スーパーオブザベーションで作成。長い経路長に対して誤差を大きくする調整あり
同化ウィンドウ	1 時間	
観測値 (オゾン全量 L2 観測データを変換して作成)	空間間引き (変換先格子内で経路長 [†] が最短の観測値を採用) により 0.25 度等緯度経度格子へ変換。1 日分の観測値を集約して全球的な日別データを作成 (ここでは L3 観測データと呼ぶ。)。各正時の観測値はローカルタイムが 12~13 時となる 15 度幅の経度帯とみなす。	平均処理 (スーパーオブザベーション) によりモデル格子 (TL159) へ変換。各正時の前後 30 分の L2 観測データを集約して時別データを作成。
観測値の品質管理	<u>L2 観測データに対する品質管理</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 気候学的チェック：70~600DU ● 品質フラグが良好 <u>L3 観測データに対する品質管理</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 周辺格子の平均値との差が 15DU 以上、もしくは周辺格子の標準偏差の 2 倍以上を排除 ● 極夜域の外側近辺 (緯度方向に 12 度) を排除 <u>グロスエラーチェック</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 閾値：50DU 	<u>L2 観測データに対する品質管理</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 気候学的チェック：70~600DU ● 太陽天頂角 ≤84 度 ● 衛星天頂角 ≤45 度 ● 雲量 ≤0.8 ● 昇交軌道 ● 品質フラグが良好 <u>グロスエラーチェック</u> <ul style="list-style-type: none"> ● 閾値：20DU
利用衛星/測器	メイン：NOAA-20/OMPS、バックアップ：Suomi-NPP/OMPS (メイン衛星の観測データが長期間利用できないときに利用)	

[†] 経路長は太陽天頂角余弦の逆数と衛星天頂角余弦の逆数の和で定義する。

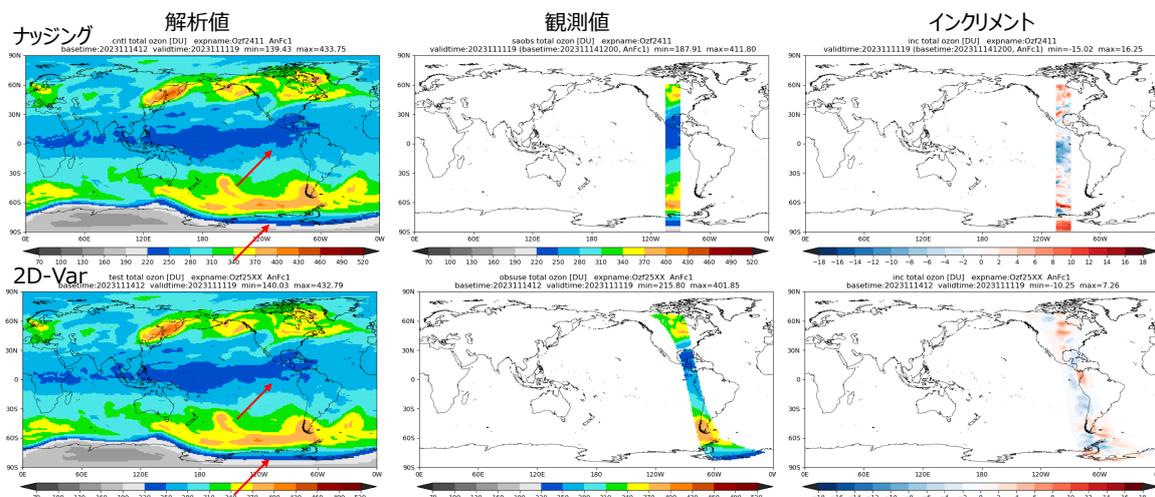


図 3.9.1 同化結果の一例 (2023 年 11 月 11 日 19UTC) : (上) CNTL、(下) TEST の左からオゾン全量 [DU] の解析値、同化に利用した観測値、インクリメント。矢印で示した先は同化領域と非同化領域の境目で解析値のギャップが CNTL では目立つが TEST では改善された例。

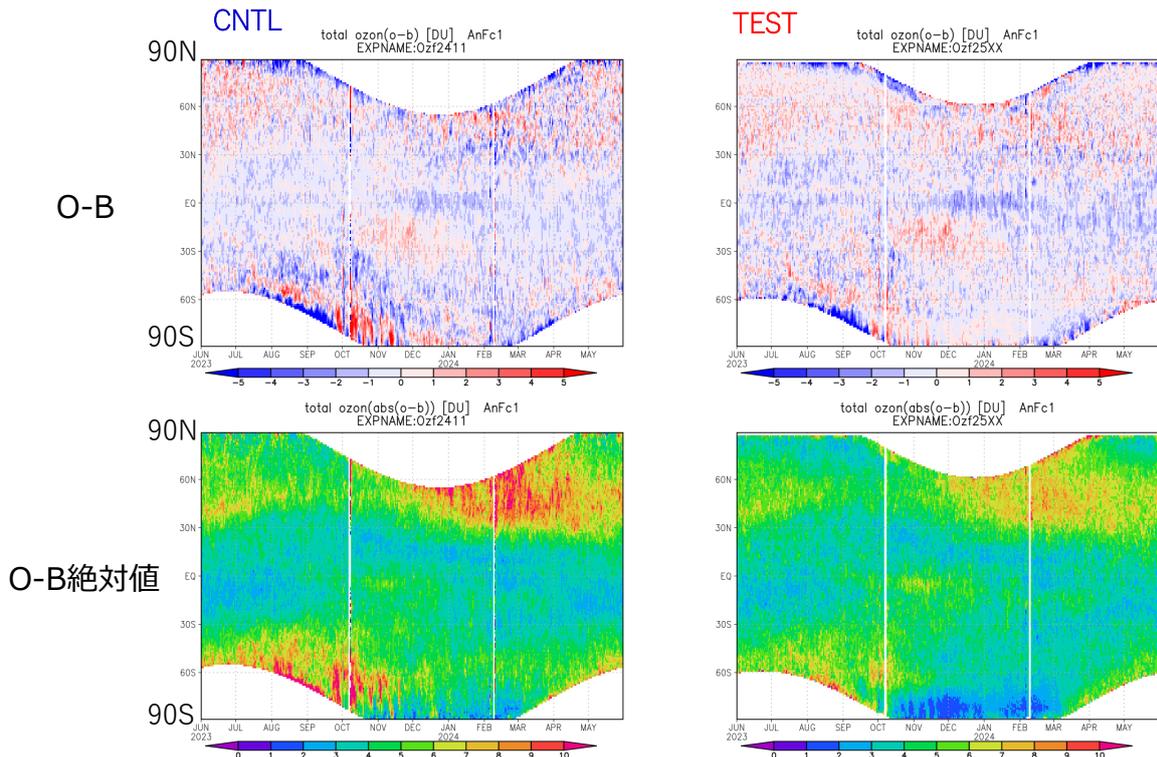


図 3.9.2 東西平均オゾン全量 [DU] の (上) 観測値と第一推定値の差 (O-B) と (下) O-B の絶対値の時系列。左から CNTL、TEST。

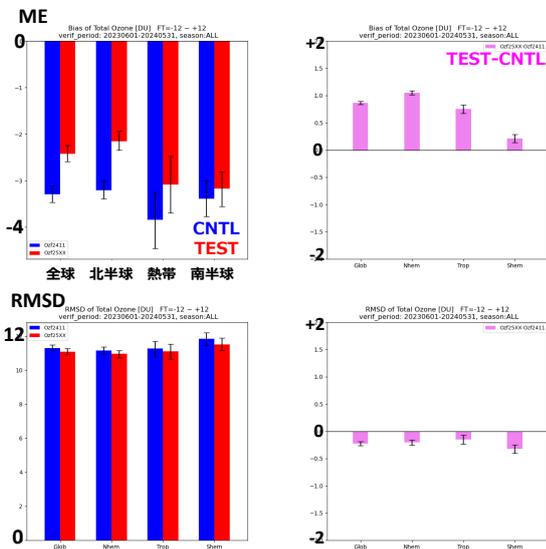


図 3.9.3 初期時刻の 12 時間前から 12 時間後までの日平均オゾン全量 [DU] の対分光光度計検証結果。上段はバイアス、下段は二乗平均平方根差を示す。左列は CNTL (青) と TEST (赤) のそれぞれの値、右列は両者の差 (TEST-CNTL)。検証領域の定義は全球 (南緯 90 度から北緯 90 度)、北半球 (北緯 20 度から北緯 90 度)、熱帯 (南緯 20 度から北緯 20 度)、南半球 (南緯 90 度から南緯 20 度)。エラーバーはブートストラップ法で見積もられた 95% 信頼区間。