

## 第3章 数値予報システムの開発成果

### 3.1 開発成果一覧

第3章では、2021年1月から12月までの数値予報システムに導入した開発成果を報告する。

表 3.1.1 2021年1月から2021年12月までに数値予報システムに導入した開発成果

項	表題	運用開始日
第3.2節	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	3月30日
第3.3節	全球アンサンブル予報システムの改良	3月30日
第3.4節	局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良	3月31日
第3.5節	日本域高潮モデル予報時間延長と台風ポーガス利用手法改善	4月26日
第3.6節	メソ解析および局地解析における Metop-C 搭載マイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS の利用	5月25日 (メソ解析) 11月24日 (局地解析)
第3.7節	波浪アンサンブル予報システムのメンバー数増強	6月10日
第3.8節	全球解析における全天同化マイクロ波水蒸気サウンダの拡充	6月29日
第3.9節	全球解析における GOES-17 CSR および AMV データの利用	6月29日
第3.10節	全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ IASI の利用 データセット移行および Metop-C/IASI の利用	6月29日 (データセット移行) 11月24日 (Metop-C/IASI の利用)
第3.11節	航空機データの高度利用	6月30日
第3.12節	オリパラ向けガイダンス	6月30日
第3.13節	メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用	8月31日

## 3.2 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

### 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、台風進路・強度予報での利用、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、スーパーコンピュータシステムの更新とともに、全球数値予報システムの分解能の向上や計算手法の精緻化などの改良を通して予測精度の向上を進めてきた。第10世代スーパーコンピュータシステムにおいても鉛直、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)や全球解析(GA)の改良を開発計画(本田2018)に沿って進めている。2021年3月30日に実施した全球数値予報システムの更新では、GSMの鉛直層数を100層から128層へ増強するとともに、地表面解析の高度化、全球解析の高度化を行った。これらの更新により、北半球500 hPa高度や、対流圏下層気温等の予測精度を改善した。本稿では、そ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/GSM2103と呼ぶ。

### 3.2.2 変更概要

ここでは、GA/GSM2103における変更の概要やその狙いについて示す。各変更の詳細や個々の変更のインパクトについては、気象庁(2021a)及び気象庁(2021b)を参照されたい。

#### (1) 鉛直層増強

GSMの鉛直層数を100層から128層に増強した。この狙いは、鉛直離散化誤差の減少(氏家2019)を通じた大気表現能力の向上、データ同化の観測演算子で利用される第一推定値の大気プロファイルの改善によって観測情報がより適切に初期値に反映されることに伴う全体的な予測精度向上である。鉛直層増強では、モデルトップ(約80 km)、モデル最下層高度(約8 m)を保ちつつ、大気全体をほぼ均等に高分解能化した。これは、台風予測、日々の天気等に関わる大気現象やそれらの表現に関わる物理プロセスは、地表面から大気の上層まで鉛直方向に広範囲に渡ることを考慮したためである。また、全球解析におけるアウトモデル、インナーモデル及びLETKF(Local Ensemble Transform Kalman Filter: Hunt et al. 2007)・土壌水分解析におけるアンサンブル予報に使われる低解像度モデルの鉛直層もGSMと同様に100層から128層に増強した。

#### (2) 地表面解析の高度化

地表面解析については、下層大気を中心とした予測精度向上を狙い、日々の積雪分布、土壌水分の変動をより適切に初期値に反映させる改良を行った。

積雪深解析について、第一推定値として、気候値(Foster and Davy 1988)を基にしたものから、モデル予測値と衛星から推定した積雪域を組み合わせたものに変更した。また、第一推定値が高度化されたことにあわせて、解析値における第一推定値の寄与がより大きくなるよう、最適内挿法の設定を調整した。具体的には、観測誤差分散の背景誤差分散に対する比を大きくし、また、遠方での誤差相関がこれまでより小さくなるよう誤差相関の形を変更した。これらの改良により、作成時期が古く品質の高くない気候値に起因する不自然な積雪が解析値に残る問題や、局所的な積雪深観測の周囲で広く積雪が解析される問題が解決された。

土壌水分については、初期値に気候値を用いる手法から、土壌1~3層(表層19 cm)までは地上気温及び相対湿度観測を利用した土壌水分解析値を用いる手法(Mahfouf 1991)に変更した。解析処理は、(1)地上観測値を同化した地上気温・相対湿度の解析値作成、(2)地上解析値を観測値とみなした土壌水分解析値作成の2段階で構成される。(1)では、GSMの地上気温・相対湿度予測値を第一推定値として、SYNOPによる地上気温・相対湿度観測を2次元最適内挿法で同化する。(2)では、GSMの土壌水分予測を第一推定値として、土壌水分量と地上物理量の相関関係を利用して前述の地上解析値を同化し、土壌水分解析値を作成する。土壌水分解析では、データ同化手法として、カルマンフィルタの一種であるSimplified Extended Kalman Filter(SEKF, de Rosnay et al. 2012)を採用した。SEKFでは、本来のカルマンフィルタに対し、背景誤差共分散を更新せず固定とする、誤差の水平相関を無視するという簡略化を行っている。

#### (3) 全球解析の高度化

流れに依存する背景誤差の扱いの高度化による解析精度の向上を狙い、4次元変分法・LETKFのハイブリッド同化(Kadowaki et al. 2020)の改良を行った。まず、LETKFのアンサンブルメンバーを50から100へ増強した。これにより、サンプリング誤差が軽減され、アンサンブル予報から見積もった背景誤差共分散行列の精度が向上し、流れ依存性をより適切に考慮した解析が可能になる。また、メンバー数増強に伴うサンプリング誤差軽減にあわせて、LETKFにおける誤差相関の鉛直局所化の大きさをこれまでの1.5倍に増大するとともに、4次元変分法におけるアンサンブル予報由来の背景誤差を重みの15%から50%に増加した。いずれもアンサンブル予報による背景誤差の情報を解析処理でより活用する方向の変更に相当する。また、LETKFにおける地上気圧の初期値化の改良、気候値由来の背景誤差を最新の全球モデルの誤差統計に基づき更新する等の各種改良を行った。

### 3.2.3 検証結果

GA/GSM2103 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<sup>1</sup>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

対照実験には 2021 年 1 月時点の現業数値予報システムを用いた。以下では、対照実験を CNTL、CNTL に第 3.2.2 項で示した変更を取り込んだ実験を 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: 2019 年 6 月 2 日～2019 年 10 月 11 日
  - － 予報: 2019 年 6 月 12 日～2019 年 10 月 11 日
- 冬期間
  - － 解析: 2019 年 11 月 10 日～2020 年 3 月 11 日
  - － 予報: 2019 年 11 月 20 日～2020 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 種類がある。業務化試験では両方の解析を行うが、上の実験期間の解析とはサイクル解析を意味し、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 (2019) を参照されたい。

検証対象期間は各期間最初の 10 日間を除く期間とした。また、台風検証以外の検証では最後の 11 日間の予報も検証には用いておらず月末日を検証期間の終わりにしている。

#### (2) 北半球 500 hPa 高度場の予測

図 3.2.1 に北半球 500 hPa 高度の予測の二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) について TEST から CNTL を引いたものを示す。対解析値、対ラジオゾンデともに 3 日先まで夏期間、冬期間で統計的に有意な改善が見られた。夏期間、冬期間ともに対解析検証での 2 日先の RMSE の改善幅は約 0.2 m であった。図 3.2.2 に冬期間における、FT= 24, 48, 72 それぞれにおける北半球 500 hPa 高度の RMSE の改善幅の日々の変化を示している。特に FT=24, 48 については、特定の日付の事例で大きく改善・改悪が示されているだけでなく、ほとんどの事例で少しずつ TEST が CNTL より精度が改善されていることがわかる。これらの RMSE の減少を示す典型的な例として、図 3.2.3 に、冬期の一事例における日本周辺の 500 hPa 高度の 2 日予測の誤差を示す。TEST は CNTL に対して誤差のパターンが大きく変化しているわけではないが、華

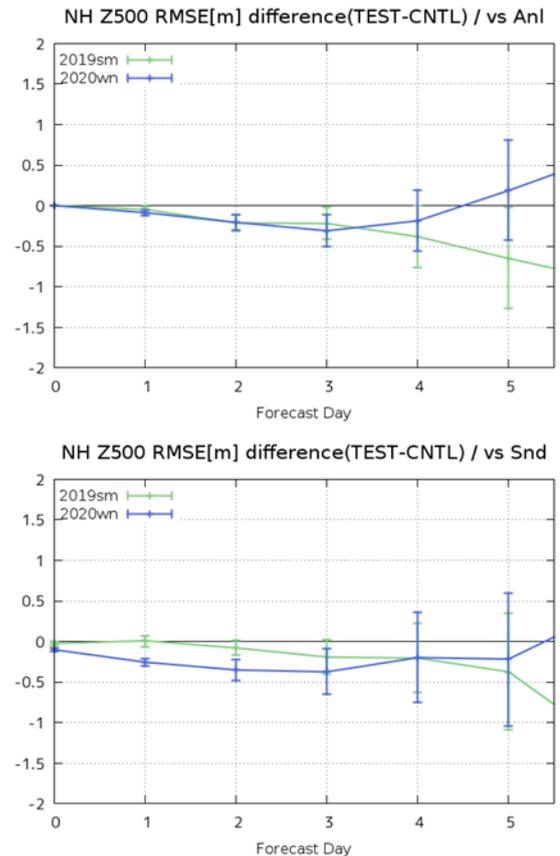


図 3.2.1 北半球 ( 20°N 以北) での 500 hPa 高度場の RMSE [m] について、TEST から CNTL を引いたもの (縦軸)。横軸は予測時間 [day]。上図が解析値に対する、下図がラジオゾンデ観測値に対する検証の結果。青線が冬期間で緑線が夏期間。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味する。エラーバーは、ブートストラップ法 (リサンプル数 10000) で見積もった 95%信頼区間を表す。

北や日本海、日本の東海上などで誤差の大きさが少しずつ小さくなっており、これらが RMSE の減少につながっていると考えられる。この図で示した事例の他にも、誤差のパターンは変わらないがその大きさが減少する事例が多く見られた。

#### (3) 下層気温の予測

地表面解析の改良による下層気温予測改善の例として、図 3.2.4 に日本周辺の 850 hPa 気温予測の例を示す。図中の赤点線の楕円で示す通り、この期間は、寒気を伴った低気圧が華北を通過する際に下層気温が解析値よりも低くなる誤差が見られたが、TEST ではその誤差が CNTL に対して減少した。この誤差の減少は積雪深解析の改良による積雪域の広がりすぎの抑制が影響していると考えられる。図 3.2.5 は、図 3.2.4 の事例の初期値として使用された積雪深と、参照データとして IMS(Interactive Multi-sensor Snow and Ice Mapping System、米国海洋大気庁国立気象衛星データ情報サービス作成の積雪域プロダクト) による積雪域分布を示

<sup>1</sup> 業務化試験の位置付け・内容については (石田 2017) を参照。

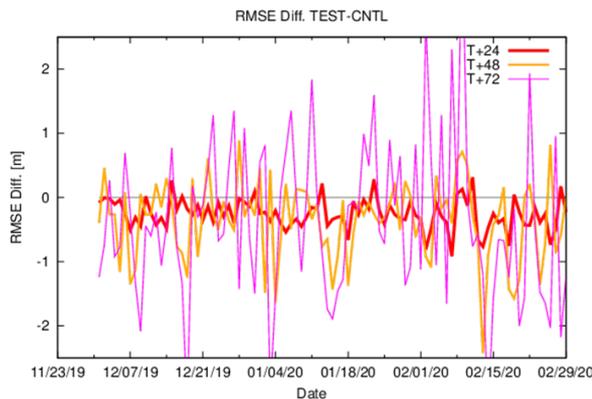


図 3.2.2 冬期間における、北半球 (20°N 以北) での 500 hPa 高度場の対解析値 RMSE [m] について、TEST から CNTL を引いたもの (縦軸) の FT=24 (赤), 48 (オレンジ), 72 (ピンク) における日々の変化。横軸は対象となる日付。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味する。

している。華北付近 (図中の黒点線の楕円で示す領域) において、CNTL では IMS では見られない積雪域が見られたが、TEST ではそのような積雪域は見られず、IMS と整合した積雪分布となっている。図 3.2.5 で示した事例に限らず、冬期間では北半球の積雪域の減少と北半球の下層の気温の低温バイアスの軽減が見られた (図略)。業務化試験でみられたこれらのインパクトは、積雪深改良に向けた開発時の試験でも確認されており (気象庁 2021a)、期待されたものである。なお、これら改善は後述の第 3.2.3 項 (5)、第 3.2.3 項 (6) でも示すとおり、統計検証でも表れている。

#### (4) 台風予測

図 3.2.6 に台風進路予測の検証結果を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。図に示すように、FT=72 まで台風進路予測は概ね中立であった。FT=84 以降は TEST の方が誤差が大きいが、台風の事例数が少ない影響で、予報時間を通じて一貫した有意性は見られない。また、個別の台風事例で見ると、改善と改悪の両方を含む。このため、FT=84 以降の台風進路予測は中立と判断した。また、台風の強度予測については、TEST の方が僅かに中心気圧が下がり台風が強まる傾向が見られた (図 3.2.7)。一方、その差は平均で 1 hPa 程度であり、プロダクト利用上の注意点を変更する程度の変化ではないと考える。

#### (5) 各種統計検証スコア (冬期間)

図 3.2.8 及び図 3.2.9 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、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)、RMSE、RMSE、平均誤差 (ME: Mean Error) とその変化の有意性について

のものである。

冬期間では、対初期値検証・対ラジオゾンデ検証ともに多くの要素で予測時間前半を中心に改善が見られた。特に、北半球での 500 hPa 高度場や 850 hPa 気温の RMSE, ME の改善が大きい。

#### (6) 各種統計検証スコア (夏期間)

図 3.2.10 及び図 3.2.11 に、夏期間について解析値とラジオゾンデ観測値を対象として、冬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。

夏期間も多くの要素で改善が見られた。特に、北半球領域の 850 hPa 気温の改善が対解析・対ラジオゾンデ検証ともに顕著である。一方で、熱帯では改悪する要素も見られる。

### 3.2.4 まとめと今後の開発

気象庁は、2021 年 3 月 30 日に全球数値予報システムについて、GSM の鉛直層数を 100 層から 128 層に増強、地表面解析の高度化、全球解析システムの高度化を行った。この改良により、冬季の北半球 500 hPa 高度や対流圏下層の気温等の予測精度が改善した。2 日後の北半球 500 hPa 高度の予測誤差は、0.2 m 減少する結果であった。また、台風進路予測誤差は中立であった。更新に伴う予測特性の変化について、500 hPa 高度の系統誤差の大きな変化は見られないが、RMSE の減少等ランダム誤差が減少した。また、北半球における 850 hPa 気温の低温バイアスは軽減した。

今後の開発として、GSM の水平解像度を 20 km から 13 km に増強する計画である。GSM の水平高解像度化に向けた力学過程の開発では、実効解像度の向上 (フィルター処理、離散化誤差、非線形項に伴うエアリングのいずれにも大きく影響されないスケールをより高波数側に拡大させること) を目的に、格子系として 2 次格子の導入、モデル地形作成手法の見直し、水平拡散の調整を進めている。また、GSM の水平高解像度化と同時に実施する物理過程の改良としては、地形性抵抗過程のパラメータ見直し、次期季節予報システムに向けた開発成果 (湖面温度の考慮や放射過程改良等) の取り込み等を進めている。開発進捗の詳細については、第 4.1 節を参照されたい。

### 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、2021 年 12 月時点での最新 GSM のバージョン名は、本稿で示す 2021 年 3 月に運用を開始したものであり、「GSM2103」と呼ぶ。表の中の分解能の表記について、はじめの T もしくは TL は三角形

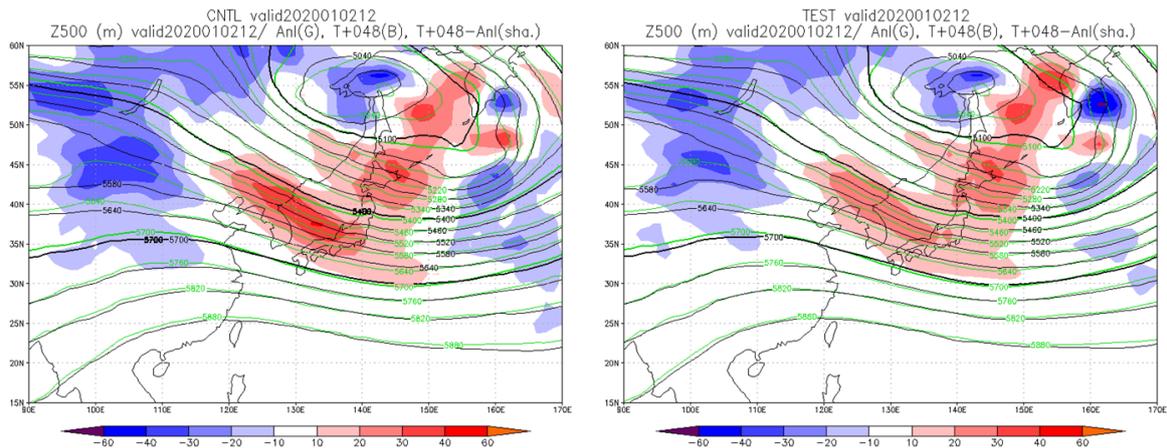


図 3.2.3 2020 年 1 月 2 日 12UTC を対象とした、日本周辺の 500 hPa 高度 [m] の 48 時間予測値 (等値線：黒)、解析値 (等値線：緑)、48 時間予測値の対解析誤差 (カラー)。(左) CNTL、(右)TEST。

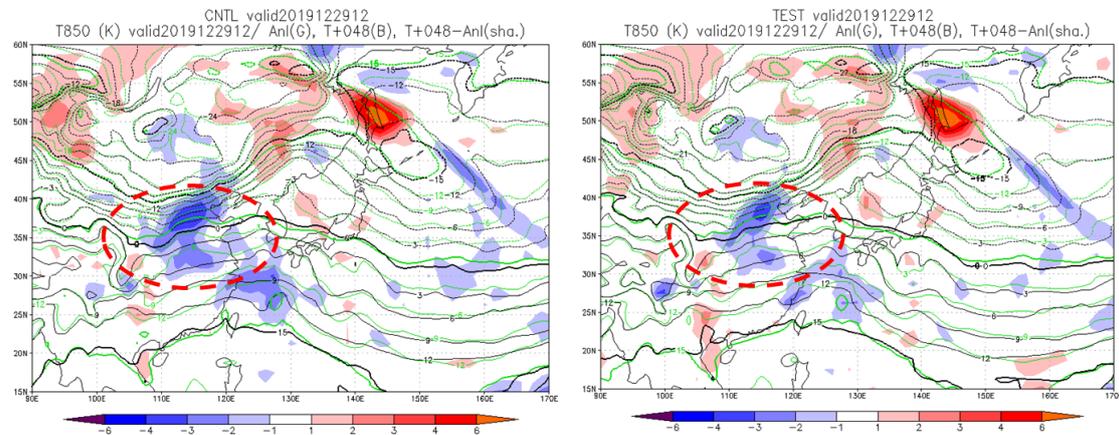


図 3.2.4 2019 年 12 月 29 日 12UTC を対象とした、日本周辺の 850 hPa 気温 [K] の 48 時間予測値 (等値線：黒)、解析値 (等値線：緑)、48 時間予測値の対解析誤差 (カラー)。(左) CNTL、(右)TEST。図中の赤点線の楕円については、本文の記述を参照。

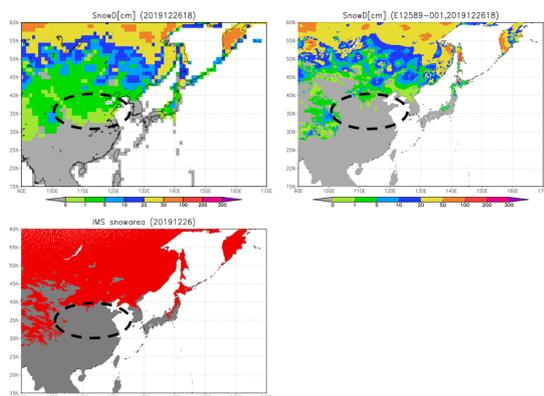


図 3.2.5 図 3.2.4 の事例において、(左上) CNTL、(右上) TEST の初期値として用いられた積雪深の分布 [cm]。(左下) IMS プロダクトによる積雪域分布 (赤が積雪域)。図中の黒点線の楕円については、本文の記述を参照。

波数切断を意味し、その後の数字は切断波数を表す。T の場合は 2 次格子、TL の場合は線形格子を意味する。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。

GSM2103 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。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 次元変分法やアンサンブル予報の中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やアンサンブル予報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。

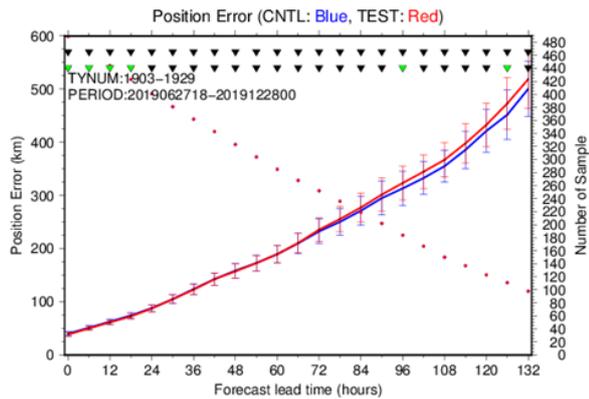


図 3.2.6 夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした進路予測の気象庁ベストトラックに対する誤差 [km] (実線、左軸) とサンプル数 (丸、右軸)。赤線が TEST で青線が CNTL、線に付属したエラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間を表す。TEST と CNTL でサンプルは揃えてあり、両方で追跡できたものだけを検証対象としている。このため、サンプル数を表す丸は TEST と CNTL で重なっている。図上部の三角は差の有意性を示すもので、上段が時間方向の相関を考慮、下段が独立仮定で計算した有意判定結果を示し、緑色は有意、黒色は有意でないことを示す。

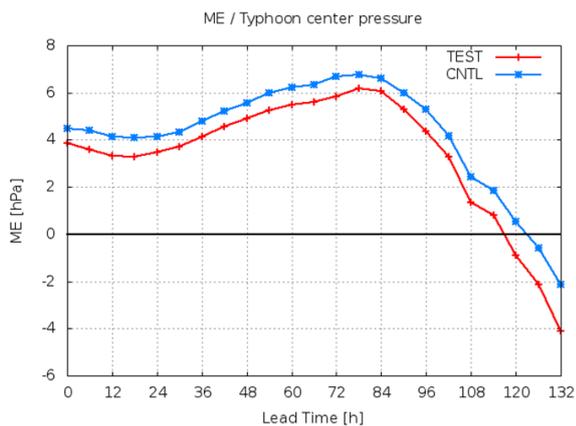


図 3.2.7 夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした中心気圧の平均誤差 [hPa]。赤線が TEST で青線が CNTL。

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、エア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 (エアロゾル気候値、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・海氷・海面過程、及び力学過程の改良
GSM1705	積雲対流・雲・陸面・放射・海氷過程、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・海氷過程の改良
GSM2103	TL959L128 へ仕様向上、積雪、土壌水分初期値利用の改良

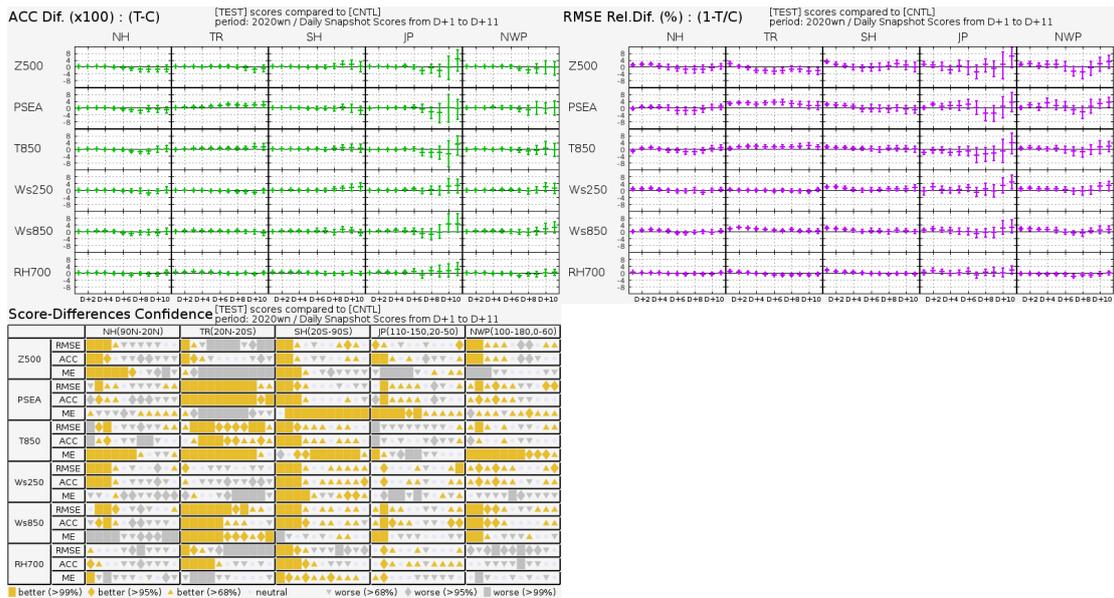


図 3.2.8 冬期間における対流圏主要要素の解析値に対する ACC の改善幅（左上図）、RMSE の改善率（右上図）と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定（左下図：スコアカード）。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球（20°N 以北）、TR が熱帯（20°S - 20°N）、SH が南半球（20°S 以南）、JP が日本周辺（110°E-150°E, 20°N-50°N）、NWP が北西太平洋領域（100°E-180°E, 0°-60°N）を意味する。要素は上から 500 hPa 高度、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 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、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。

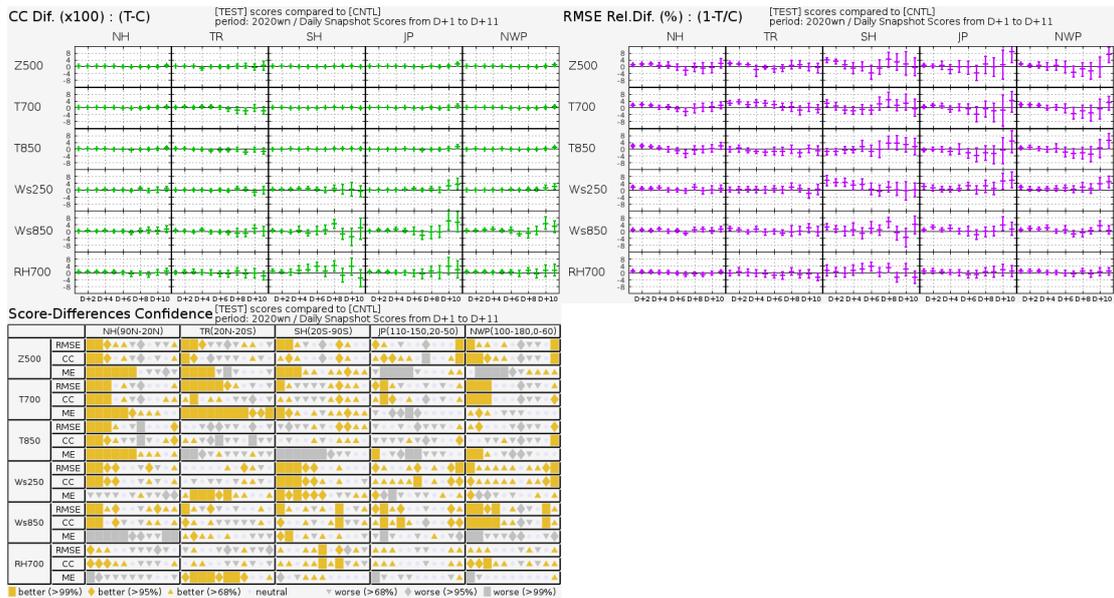


図 3.2.9 冬期間における対流圏主要要素のラジオゾンデ観測値に対する CC の改善幅（左上図）、RMSE の改善率（右上図）と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定（左下図：スコアカード）。ラジオゾンデを参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球（20°N 以北）、TR が熱帯（20°S - 20°N）、SH が南半球（20°S 以南）、JP が日本周辺（110°E-150°E, 20°N-50°N）、NWP が北西太平洋領域（100°E-180°E, 0°-60°N）を意味する。要素は上から 500 hPa 高度、700 hPa 気温 (T700)、850 hPa 気温 (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、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。

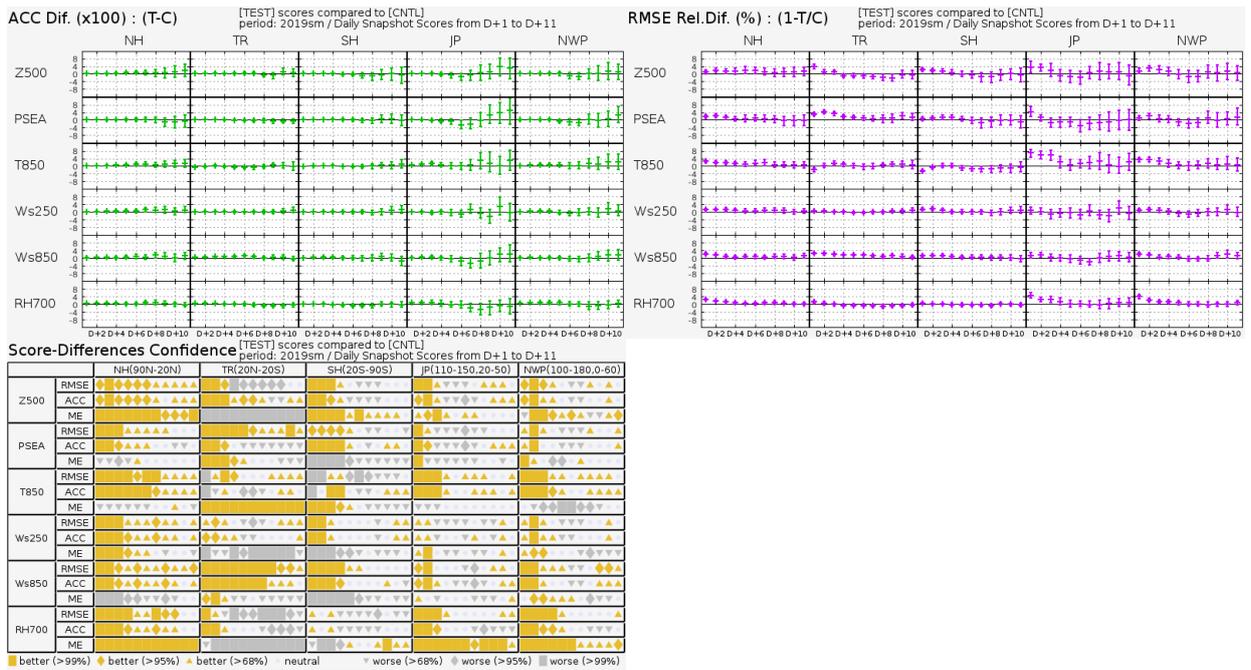


図 3.2.10 夏期間についての解析値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.8 と同じ。

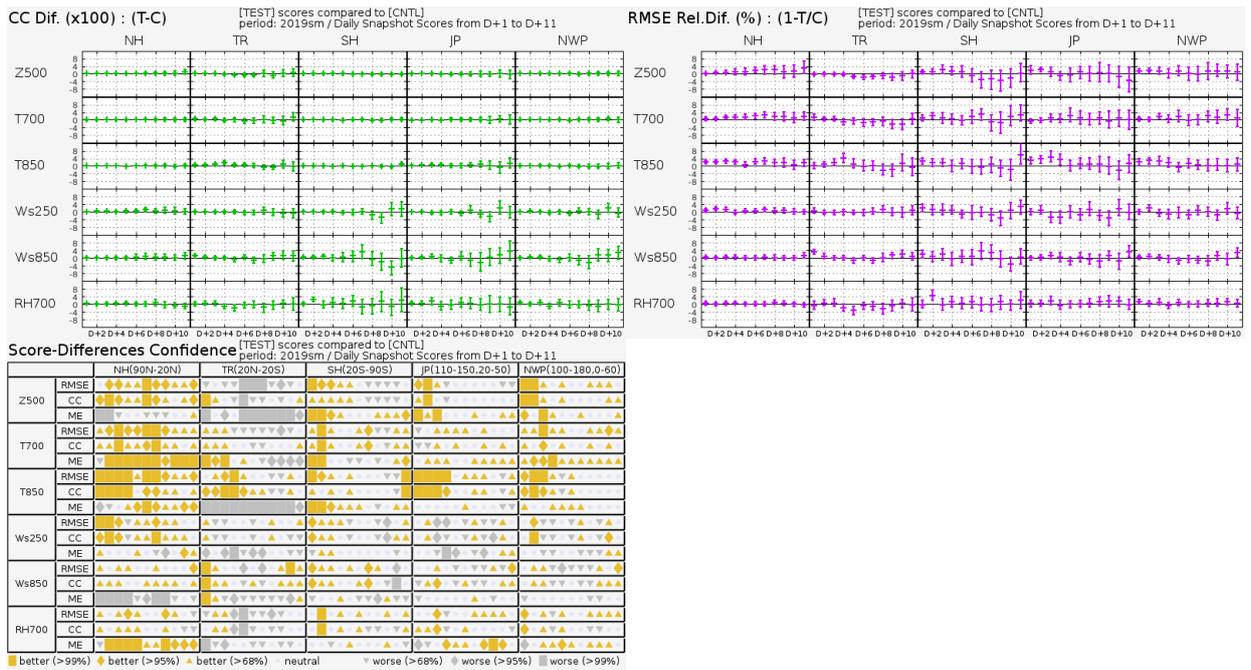


図 3.2.11 夏期間についてのラジオゾンデ観測値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.9 と同じ。

表 3.2.2 GSM の仕様 (2021 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トターモデル：TL959 (格子間隔約 20 km : 0.1875 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	400 秒 (TL959)、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	$\delta$ -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	予測型クロージャを用いるスペクトル型マスマフラックススキーム (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、雪の融解などの単純化した雲微物理過程、及び雲水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型 (Mellor and Yamada 1974, 1982) と K クロージャ型 (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。開水面と海水面は 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年間偏差を、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接度解析値の海面面積年間偏差を維持するように、海水密接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。	

## 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 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.
- de Rosnay, P., M. Drusch, D. Vasiljevic, G. Balsamo, C. Albergel, and L. Isaksen, 2012: A simplified Extended Kalman Filter for the global operational soil moisture analysis at ECMWF. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 1199–1213.
- 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.
- Foster, D. J. and R. D. Davy, 1988: *Global Snow Depth Climatology. Tech. Rep. USAF-ETAC/TN-88/006*. Scott Air Force Base, Illinois, 48 pp.
- 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.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica. D.*, **230**, 112–126.
- 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, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological 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>).
- 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.
- Kadowaki, T., Y. Ota, and S. Yokota, 2020: Introduction of a new hybrid data assimilation system for the JMA Global Spectral Model. *WGNE. Res. Activ. Earth. Sys. Modell.*, **50**, 1.9–1.10.
- Kawai, H. and T. Inoue, 2006: A Simple Parameterization Scheme for Subtropical Marine Stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17–20.
- 気象庁, 2021a: 全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化. 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, 77–84.
- 気象庁, 2021b: 全球解析システムの改良. 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, 85–92.
- 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.
- Mahfouf, J.-F., 1991: Analysis of Soil Moisture from Near-Surface Parameters: A Feasibility Study. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 1534–1547.
- 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.
- 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.
- 氏家将志, 2019: 鉛直層増強. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 16–24.
- 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.

### 3.3 全球アンサンブル予報システムの改良

#### 3.3.1 はじめに

2021年3月30日に全球アンサンブル予報システム(GEPS: Global Ensemble Prediction System)の改良を行い、確率予測情報などを改善した。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。過去に数値予報課が開発していた週間・台風EPS及び気候情報課が開発していた1か月EPSを統合したシステムで、2017年1月19日に週間・台風EPSを置き換える形で運用が開始され、同年3月23日には1か月先までの延長予報を開始した(山口2017; 新保2017)。

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おり、水平分解能は18日先までの予測ではTL479(約40km)<sup>1</sup>、その後はTL319(約55km)であり、鉛直層はGSMと同様の100層で最上層が0.01 hPaである。また、摂動なしのアンサンブルメンバー(コントロールラン)の初期値には、全球速報解析により作成される解析値を解像度変換したものをを用いている。

アンサンブルメンバー数は、11日先までの予測では1初期時刻あたり27メンバー、その後は13メンバーである。また、初期摂動としては、特異ベクトル(SV: Singular Vector)法(Buizza and Palmer 1995)とLETKF(Local Ensemble Transform Kalman Filter; Hunt et al. 2007)を利用した初期摂動を組み合わせて<sup>2</sup>用いている。両手法はお互いに補い合う関係にあり、SV法では予測時間が長くなるにつれて誤差の中で支配的になる成長率の高い摂動を捉え、LETKFでは予測時間の初期で特に重要な解析値のもつ不確実性を捉える。

また、限られた計算機資源で海洋の変動を考慮するため、季節アンサンブル予報システム(CPS2、第2.9節)で予測された海面水温(SST)を用いる2段階SST法(高倉・小森2020)を導入し、予測3・4週目の熱帯を中心に精度向上を図った。

アンサンブル予報システムの予測精度を向上するためには、予報モデルと初期値の精度を高めると同時に、両者の不確実性を適切に捉える摂動を作成することが必要である。また、アンサンブルメンバー数を増やすことで、より精度の良い確率予測情報を作成することが可

<sup>1</sup> 水平分解能の表記は、はじめのTLが三角形波数切断と線形格子を用いていることを意味し、その後の数字は切断波数を表す。

<sup>2</sup> SVを混ぜ合わせた26個(13個+逆符号の13個)の摂動と、LETKFのアンサンブルから抽出した26個の摂動を重みを付けて足し合わせて使用。

能となる。2021年3月30日に導入されたGEPS2103では、確率予測の精度やGSMによる決定論的予測との整合性の向上を目的として、アンサンブルメンバー数の増強と時間ずらし平均法(LAF法)の変更、初期摂動の改良、GEPSで使用する予報モデルの最新のGSM(GSM2103、第3.2節)への更新を行った<sup>3</sup>。

#### 3.3.2 変更の概要

GEPS2103の変更の概要を説明する。数値予報開発センター年報(令和2年)第2.3.3項(気象庁2021a)において、改良項目の一部について個別の影響評価結果を報告しているため、そちらも参照されたい。

##### アンサンブルメンバー数の増強とLAF法の変更

GEPS2103では、1初期時刻あたりのメンバー数を11日先までの予測では27から51に、そこから18日先までの予測では13から51に、さらに34日先までの予測では13から25にそれぞれ増強した。また、これまでは11日より先の予測は00,12UTC初期時刻<sup>4</sup>に対して実行され、予報作業においては両初期時刻の予測結果をLAF法により組み合わせて使用<sup>5</sup>してきたが、GEPS2103においては12UTC初期時刻に対してのみ予測を実行するよう変更した。

これらの変更により、18日先までの予測については、メンバー数を増強することでアンサンブル平均や確率予測情報の精度が向上し、また、アンサンブル予報が実況を捕捉できない事例を減らす効果も期待できる。また、11日より先の予測については、LAF法の変更により最新初期時刻の予測結果が多く使用されることになる<sup>6</sup>ため、精度向上が期待できる。

##### 初期摂動の改良

北半球及び南半球の初期摂動作成に使用するSVの数を現在の最大25個から50個に増強した。これにより、より多くの成長モードを初期摂動において考慮できるようになり、確率的情報としての精度が向上する。また、50hPaより上層を、SV計算において摂動の大きさを測るために用いるノルムの評価対象外とした。これにより、対流圏に影響を与えるような成長モードにより重点を置いた初期摂動を作成できるようになる。その他、影響が小さい改良として、空間相関に基づくSV選別処理の廃止、計算されたSVを合成して初期摂動を作成する際に用いるバリエーションミニマム法の収束判定条件緩和、SV計算で使用するモデル面の定義方法を最新GSMの方法に合わせる、SST摂動作成の

<sup>3</sup> GEPSの全体像についてはJMA(2019)を参照されたい。

<sup>4</sup> 18日より先の予測については火曜日と水曜日のみ。

<sup>5</sup> 作業スケジュール上、12UTC初期時刻の予測資料が最新。

<sup>6</sup> 18日先までの予測については最新12UTC初期時刻の予測結果のみが使用されるようになるためLAF法は使用されない。その先については火曜日00UTCの11メンバー、同12UTC及び水曜日00,12UTCの各13メンバーによるLAFから、火・水曜日12UTCの各25メンバーによるLAFとなる。

メンバー数増強への対応、SV 計算用モデルにおいて GSM2103 で新規導入された土壌水分解析結果を利用する、SV 摂動に対する振幅調整といった改良も実施した。

### 予報モデルの更新

GEPS2103 では予報モデルを GSM2103 へと更新した。GEPS2103 においても引き続き全球数値予報システムと GEPS とで予報モデルのバージョンが揃うことになり、適切な GSM 予測の不確実性情報を提供できる。予報モデルの改良内容としては鉛直層数の 100 層から 128 層への増強のみであるが、第 3.2 節で示した全球数値予報システムの更新にはモデルだけでなく初期値の精度向上も含まれ、GEPS でこの初期値を使用することによっても予測精度は向上する。

### 3.3.3 予測精度の検証

#### (1) 実験設定

週間天気予測、台風進路予測、2 週目以降の予測それぞれの予測精度の変化を確認するために、次の 4 種の比較実験を実施した。

#### 週間天気予測の評価のための実験

GSM2103 における CNTL 実験（第 3.2 節）で作成された初期値<sup>7</sup>を入力として、GEPS2003（Yamaguchi et al. (2020)、気象庁 (2021b)）を実行したものを対照実験とする。同 TEST 実験で作成された初期値を入力として、GEPS2103 を実行したものをテスト実験とする。以降、対照実験を CNTL 実験、テスト実験を TEST 実験と呼ぶ。夏期間は 2019 年 6 月 20 日～2019 年 10 月 21 日、冬期間は 2019 年 11 月 20 日～2020 年 3 月 11 日の 00,12UTC 初期値を対象に、11 日先まで 51 メンバーの予測を実行した。主要要素の確率予測と日本の降水予測についてはこの実験の結果を示す。

#### 台風進路予測の評価のための実験

2019 年台風第 3 号から 2020 年台風第 13 号<sup>8</sup>を対象として、00,06,12,18UTC 初期値について 5.5 日先まで 51 メンバーの予測を実行した。前述の実験期間に含まれる事例については、00,12UTC 初期値に追加する形で 06,18UTC 初期値の予測を実行した。その他の期間の事例については、追加期間の TEST 実験は GSM2103 による解析予報サイクル実験<sup>9</sup>で作成された初期値を入力として GEPS2103 を実行した。CNTL 実験は 2019 年 10 月 22 日から同年 11 月 20 日までの期間については GEPS2003 を現業システムへ導入するための評価に使用した結果を用い、2020 年 3 月 12 日以降の期間については当時の現業システムで作成された結果<sup>10</sup>を入

<sup>7</sup> 速報解析による初期値。

<sup>8</sup> 2019 年 6 月 20 日 00UTC から 2020 年 10 月 1 日 18UTC までの期間の台風事例。

<sup>9</sup> サイクル解析のみ実施。

<sup>10</sup> 初期値はサイクル解析の結果を使用し、初期摂動はその初期値を用いて再計算するのではなく現業システムで計算され

た結果をそのまま使用。

#### 1 か月先までの確率予測とメンバー数増強・LAF 法変更の評価のための実験

GEPS2103 の予測精度を評価するにあたり、気候場の年々変動の影響も考慮するため、過去 30 年（1981～2010 年）に対して、毎月 2 回（初期日は 15 日と月末）、JRA-55(Kobayashi et al. 2015) を初期値として 40 日予測を行う。これを再予報実験という。再予報実験において、2 段階 SST 法で用いる CPS2 の SST 予測値は、同じ期間の CPS2 による再予報で作成されたものである。また、LETKF による長期間の解析予報サイクルを実行することは計算機資源の観点で困難であることから、LETKF の代わりに Evolved SV（SV の評価時間分だけ過去（熱帯では 24 時間前、北半球と南半球では 48 時間前）に求めた SV を現在まで線形成長させたもの<sup>11</sup>）で摂動を作成した。GEPS2003 に対して、同じ仕様で実行したものを対照実験とする。通常の再予報実験は 12UTC 初期値に対して 13 メンバーで実行するが、今回はアンサンブルメンバー数の増強と LAF 法の変更をあわせて評価するため、2014～2018 年に対し、メンバー構成を現業相当に揃えての評価も実施した。TEST 実験では 12UTC 初期値に対して 2 週目までは 51 メンバー、3・4 週目は 25 メンバー× 2LAF で実行し、評価した。CNTL 実験では 00UTC と 12UTC 初期値に対して 4 週目まで 13 メンバー× 4LAF で実行し、2 週目までは 26 メンバー、3・4 週目は 50 メンバーで評価した<sup>12</sup>。

#### (2) 主要要素の確率予測

図 3.3.1 に夏期間について 11 日先までの予報時間ごとの CRPS<sup>13</sup>を示す。海面更正気圧、850 hPa 気温、500 hPa 高度、250hPa 東西風について多くの検証領域で統計的に有意な改善が確認できる。熱帯 500 hPa 高度場は 4 日先以降の予測で悪化しているが、同様の精度悪化は GSM2103 の検証結果においても確認されており、初期値やモデル更新の特性変化が GEPS の検証結果にも表れたと考えている。以上述べたことについては、冬実験についても同様である（図略）。改善については、アンサンブルメンバー数の増強が最も寄与している。

た結果をそのまま使用。

<sup>11</sup> LETKF による摂動の十分な代替となる保証はないが、予報初期数日を除けば予測精度に大きな違いはない（金浜 2017）。

<sup>12</sup> GEPS2003 を用いた 2 週目までの予報は毎日実行する 2LAF の計 26 メンバーを、3・4 週目の予報は週 2 日実行する 4LAF の計 50 メンバーを用いているため。

<sup>13</sup> 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。

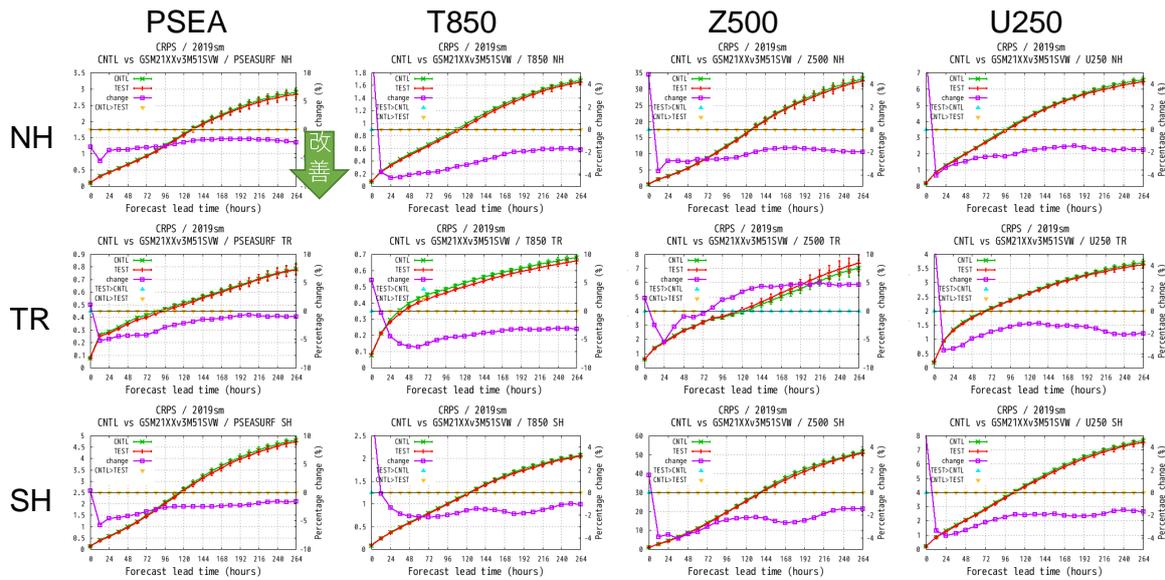


図 3.3.1 夏期間における、主要要素に対する領域別のCRPS。要素は左から順に海面更正気圧 [hPa]、850hPa 気温 [K]、500 hPa 高度場 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 ((TEST-CNTL)/CNTL[%]、右縦軸)。差に統計的に有意性がある場合に ▽(CNTL>TEST) ないし △(TEST>CNTL) をプロットしている。

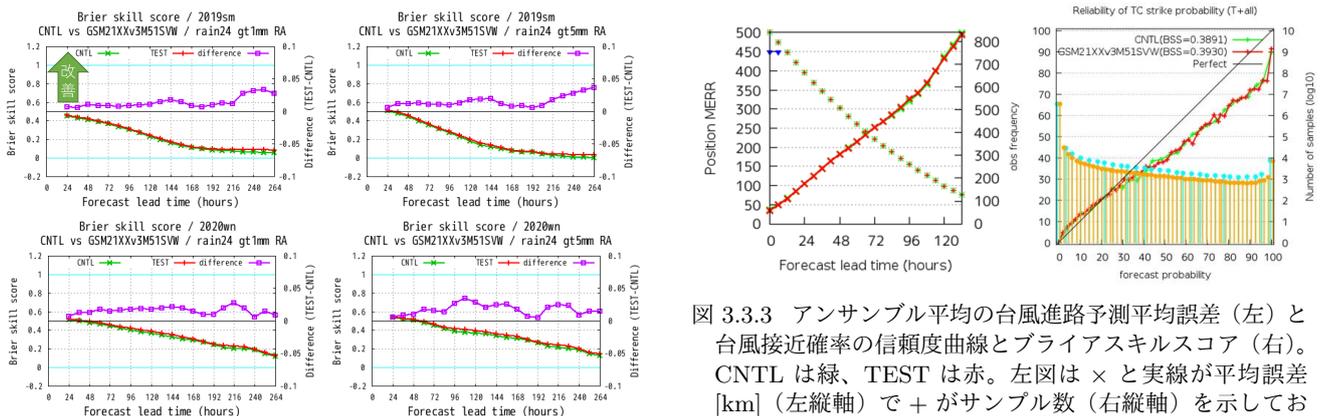


図 3.3.2 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は夏期間、下段は冬期間。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

図 3.3.3 アンサンブル平均の台風進路予測平均誤差 (左) と台風接近確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (右)。CNTL は緑、TEST は赤。左図は × 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、ピンクの三角 (該当なしのため描画なし) と青の三角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。右図は実線が信頼度曲線 (左縦軸)、水色とオレンジの棒グラフで CNTL と TEST の予報頻度 (右縦軸) を示す。また、ブライアスキルスコアを凡例中の「BSS=」以降に示す。

### (3) 日本の降水予測

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 1 mm/24hr 及び 5 mm/24hr の閾値について、夏期間・冬期間共に改善傾向である。この改善にも、アンサンブルメンバー数の増強が最も寄与している。

### (4) 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と、台風接近確率 (ここでは、FT=0-120 h の間に 120km 以内に台風中心が位置する確率) の予測の検証結果を示す。検証は気象庁ベストトラックに対

して行っている。図に示す通り、アンサンブル平均の台風進路予測の平均誤差に大きな変化はなかった。また、台風接近確率の BSS はほぼ中立であり、信頼度曲線や予測頻度に大きな変化はなかった。

また、アンサンブルメンバー数の増強により、実際の進路をより捕捉できるようになった事例が確認された。図 3.3.4 の上段を見ると、CNTL ではベストトラックを捕捉できていないが、TEST ではわずかに捕捉できている。また、下段を見ると、CNTL の予測は分布に偏りがあって中心付近に隙間があり、実況はその間を進んでいる一方、TEST の予測ではその隙間が埋められている。

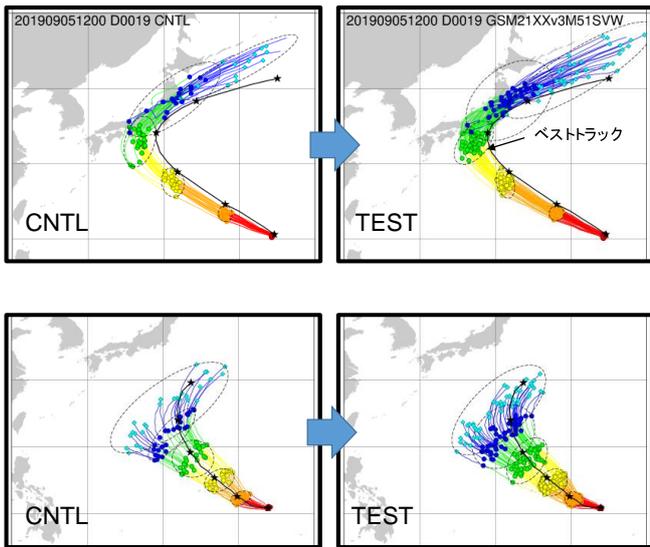


図 3.3.4 実況台風進路の捕捉状況が改善した事例。黒はベストトラック、色は各メンバーの進路予測。左はCNTL、右はTESTによる予測結果で、上段は2019年台風第15号を対象とした2019年9月5日12UTC初期時刻の予測。下段は2019年台風第21号を対象とした2019年10月19日12UTC初期時刻の予測。

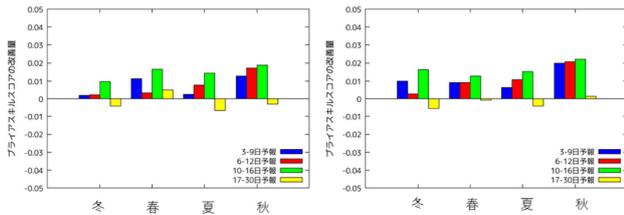


図 3.3.5 GEPS のメンバー構成の変更による季節別のブライアスキルスコアの改善量。左図は北半球の500hPa ジオポテンシャル高度、右図は同850hPa 気温の確率予測についてのブライアスキルスコア改善量を示す。青色は3~9日予報、赤色は6~12日予報、緑色は10~16日予報、黄色は17~30日予報のスコア。

### (5) 季節別の確率予測 (1か月先まで)

図 3.3.5 に、確率予測についてメンバー構成の変更による季節別の効果を示す。年間を通じて、2週目(10~16日予報)までのBSS<sup>14</sup>に改善が見られる。3週目以降は利用する火曜日と水曜日の2日間で構成する全メンバー数が50のままで変わらないため、季節や要素によって効果が異なり、平均すると予測精度は変更前と同等と考えられる。

### 3.3.4 おわりに

GEPS について、予報モデルを更新すると共に、アンサンブルメンバー数の増強とLAF法の変更、初期摂動の改良を行い、2021年3月30日に現業システムへ導入した。この改良により、確率予測情報については日本の降水予測を含め、多くの要素で改善が見られ

た。また、台風進路予測の精度は中立であるが、アンサンブルメンバー数の増強により実際の進路をより捕捉できるようになった事例が確認された。

### 参考文献

Buizza, R. and T. N. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434–1456.

Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica. D.*, **230**, 112–126.

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

金浜貴史, 2017: 再予報の仕様. 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, 9–11.

気象庁, 2021a: 全球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, 93–96.

気象庁, 2021b: 全球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, 42–47.

Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.

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.

高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2段階 SST 法の詳細と導入事例紹介. 令和 2 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2–8.

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.

Yamaguchi, H., M. Ikegami, K. Ochi, Y. Ota, R. Sekiguchi, and T. Takakura, 2020: Upgrade of JMA's Global Ensemble Prediction System. *WGNE. Res. Activ. Earth. Sys. Modell.*, **50**, 6.17–6.18.

<sup>14</sup> 季節予報で用いる3つの階級「高い」「平年並み」「低い」の各事象を全て集計したスコア。

### 3.4 局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良

#### 3.4.1 はじめに

局地数値予報システム<sup>1</sup>は、時空間スケールの細かな現象の予測を目的に水平解像度 2 km の予報システムとして運用されており、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な基盤モデルと位置付けられている。本システムは 2012 年 8 月に、1 日 8 回、東日本を中心とした領域の 9 時間予報を行う仕様で本運用を開始した(永戸ほか 2012)。2013 年 5 月に予報領域を日本全域に拡張するとともに 1 日 24 回(毎正時初期値)の運用に高頻度化した。2015 年 1 月に JMA-NHM(気象庁予報部 2003)に基づく予報システムから、局地解析を asuca-Var(幾田 2014)、局地予報を asuca(気象庁予報部 2014; JMA 2019)へとそれぞれ置き換え、2019 年 3 月に予測期間を 10 時間に延長した。その後、局地モデルの鉛直層数を 58 層から 76 層に増強するとともに、予測精度向上を目的とした物理過程の改良を行い、2021 年 3 月に現業化された<sup>2</sup>。本節では、2021 年 3 月に現業化された局地モデル更新の概要と、改良による予測特性の変化について述べる。

#### 3.4.2 局地モデル改良の概要

前項で述べた通り、2021 年 3 月の局地モデル更新で鉛直層数を 58 層から 76 層に増強した。境界値を提供するメソモデルはこれまでも 76 層の鉛直層数で運用していたが、本更新では鉛直層数のみならずモデル上端高度および鉛直層間隔をメソモデルと局地モデルで揃えることで、モデル本体と境界値との整合性がより高まることになる<sup>3</sup>。従来の鉛直層配置と比べると特に下層の鉛直解像度が上がり、最下層のフルレベル(格子中心)の高度は 20 m から 10 m となる。このことから、境界層や地表面からのフラックス診断で精度が向上することが期待される。

本更新で適用された物理過程の改良項目を以下に挙げる。これらの改良は 2020 年 3 月のメソモデルで適用された項目と新規に開発して導入した項目の両者を含む。個々の改良項目の詳細については数値予報開発センター年報(令和 2 年)(気象庁 2021b)を参照されたい。

- 放射過程の氷雲量診断を Wilson and Ballard (1999)の方法に変更
- サブグリッド輸送表現に Leonard 項(Moeng et al. 2010)を導入
- 雪格子における熱伝導率の配置変更

<sup>1</sup> 局地解析と局地モデル(予報モデル)を合わせて局地数値予報システムと表記する。

<sup>2</sup> 局地解析は従来より鉛直層数 48 層で運用しており本更新に伴う鉛直層数の変更はない。

<sup>3</sup> 厳密にはメソモデルと局地モデルはそれぞれ水平解像度に応じた地形を用いるため、鉛直格子点が定義される高度は地形の差に起因した違いが生じる。

- 森林における格子内積雪被覆率の変更
- 有限体積法に適合した接地境界層フラックス定式化
- 接地境界層における安定時の普遍関数変更
- 地表面パラメータ(熱粗度・アルベド)の更新
- 蒸発散の計算に植生被覆率を考慮

#### 3.4.3 本改良による予測特性の変化

本項では、改良した局地モデルの予測特性の変化を述べる。以下では、改良前のルーチン相当の設定の実験をコントロール(CNTL)とし、改良を適用した現ルーチン設定の実験をテスト(TEST)と記す。比較実験は、2021 年 3 月末時点のルーチン設定とした全球モデルおよびメソモデルから作成された初期値・境界値を用いて実施した。統計検証期間は、夏期間・冬期間それぞれ 2019 年 8 月 21 日-31 日、2020 年 1 月 11 日-21 日で、検証にはルーチンと同様に毎時初期値で実行した結果を用いた。TEST において、親モデルに 2021 年 3 月に更新した全球モデルを用いた点が数値予報開発センター年報(令和 2 年)で報告した実験と異なっており、2022 年 1 月時点のルーチンに準拠した構成となっている。また、検証期間も異なっている。

本改良では、下層の鉛直解像度が向上したことに加え地表面過程を見直したことにより、地上気象要素に改善が見られた。図 3.4.1 に夏期間における地上風速の対地上観測での平均誤差と二乗平均平方根誤差(RMSE)を示す。図から分かるように、CNTL では全般的に地上風速は正バイアスとなっており、特に夜間でその傾向が強い。TEST では CNTL と比べて風速が弱められる傾向にあることが分かる。その結果、夜間の正バイアスは軽減しており、日中は負バイアスとなるものの RMSE は全対象時刻で改善したことが確認できる。改善幅の地理的分布を見るために、対象時刻 15 UTC(日本時間で 0 時)の RMSE の CNTL からの観測地点ごとの差を右図に示す。改善幅の地域差はそれほど小さくなく、全般的に改善が見られる。最下層のフルレベルの高度が 20 m から 10 m となったことで、10 m 風速の診断は格子平均値から格子点値を推定するだけでなく、推定の不確実性が小さくなった。また、地表面過程の見直しにより最下層の安定度が変わったことも改善に寄与したものと思われる。

図 3.4.2 に冬期間の地上気温の対地上観測検証結果を示す。冬期間の地上気温は夜間に顕著な負バイアスが現れることがこれまで問題となっていた。これは、安定成層時の地上への顕熱フラックスが過大で、大気最下層が地表面の冷却の影響を受けすぎていることが主な原因と考えられる。接地境界層における安定時の普遍関数を Beljaars and Holtslag (1991) から Gryanik et al. (2020)に変更したことで、強安定時の地上への顕熱フラックスが抑制された結果、TEST では夜間負バイアスが大幅に解消された。RMSE でも夜間の地上気温が改善されることが見てとれる。改善幅の地域分

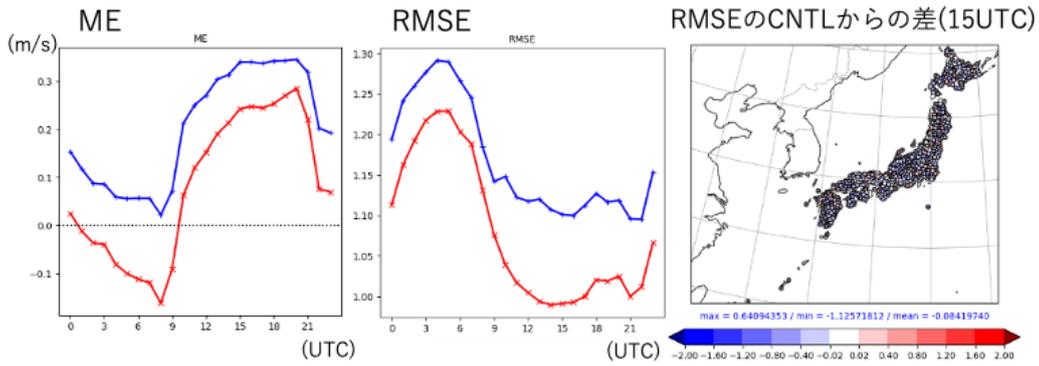


図 3.4.1 夏期間の地上風速（10 m 風速）の地上観測に対する平均誤差（左図）、二乗平均平方根誤差（中図）。横軸は対象時刻（UTC）となっており、青線、赤線がそれぞれ CNTL、TEST の検証結果に対応する。右図は対象時刻 15UTC での TEST の二乗平均平方根誤差の CNTL からの差。

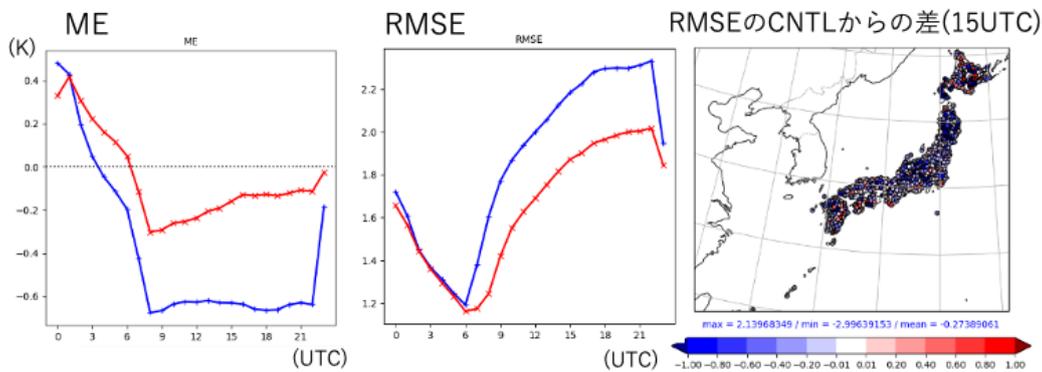


図 3.4.2 冬期間の地上気温（1.5 m 気温）の地上観測に対する平均誤差（左図）、二乗平均平方根誤差（中図）。線種および横軸は図 3.4.1 と同様。右図は対象時刻 15UTC での TEST の二乗平均平方根誤差の CNTL からの差。

布からは、沿岸部にわずかに悪化する地点が見られるもののほとんどの地点で改善することが確認できる。

大気鉛直プロファイルの改善点として、冬期間の気温プロファイルの改善が挙げられる。図 3.4.3 は冬期間の 925 hPa 面気温の CNTL の対ラジオゾンデ平均誤差と鉛直プロファイルの TEST と CNTL の RMSE の差である。鉛直プロファイルから分かる通り、全層で RMSE が改善しており特に 925 hPa 面と 500 hPa 面より上層で改善幅が顕著である。図には示さないが、2021 年 3 月更新前の全球モデルを用いた比較実験から、中上層の改善は全球モデルの更新も改善の半分程度寄与しており、925hPa 面の改善は主に局地モデルの改良によるものであることを確認している。これまで、925hPa 面の気温は日本域の多くの地点で負バイアスがあることが分かっており（左図）、地表面アルベドを気候値に基づいて更新したことなどが負バイアスの軽減に寄与したものと考えられる（中図）。

更新前の局地モデルでは、雲物理と放射過程で用いる氷雲量診断手法が異なっており、放射で用いる雲氷量が過剰となる問題があった。そこで、放射過程の氷雲量診断を雲物理と同様に Wilson and Ballard (1999) による方法を適用するよう修正した。放射過程の氷雲

量診断を見直したことによる予測特性の変化の例として、統計検証期間とは異なる事例となるが、上層雲量の予測結果と大気上端での外向き長波放射 (OLR) の分布の一例を図 3.4.4 に示す。図から分かるように、TEST では上層雲量が CNTL よりも減少する。これは放射過程において上層で過剰に診断されていた氷雲が減少したことに起因するものである。OLR の比較においても TEST の方が雲域で大きな値を持っており、衛星プロダクトの一つである CERES-SSF<sup>4</sup>の結果とより整合する。観測と比較すると TEST でも OLR の過剰バイアスは依然残っており、引き続き雲物理をはじめとした物理過程の改良が必要である。

図 3.4.5 に夏期間を対象とした 1 時間降水量の閾値別検証結果を示す。エクイタブルスレットスコア (ETS) を見ると、統計的に有意ではないものの弱雨を中心に改善の傾向が確認できる。見逃し率に大きな変化は見られない一方、弱雨の空振り率が低下しており、このことが ETS の改善に寄与する。バイアスコアは閾値 10 mm/h 以上で CNTL/TEST とともに 1 を超えており強雨バイアスがある。TEST では閾値 10 mm/h から

<sup>4</sup> Cloud and Earth's Radiation Energy System (CERES) Single Scanner Footprint (SSF)

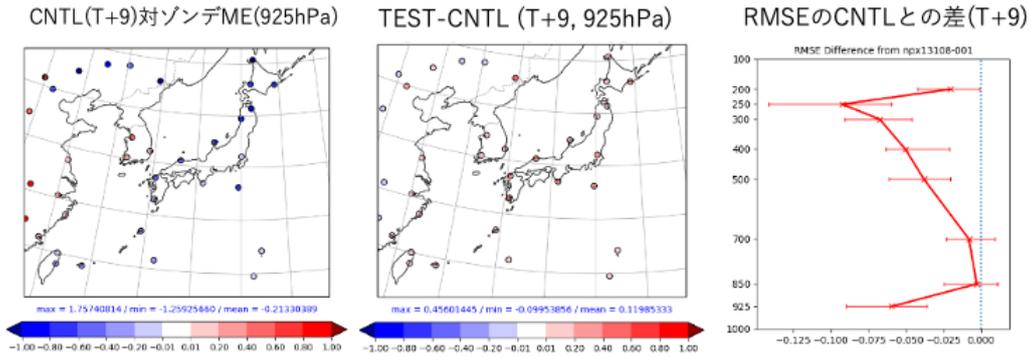


図 3.4.3 冬期間を対象とした 925 hPa 面気温の CNTL の対ラジオゾンデ平均誤差 (左図) および TEST の CNTL からの差 (中図)。右図は対ラジオゾンデ検証での二乗平均平方根誤差の TEST の CNTL からの差を表す。

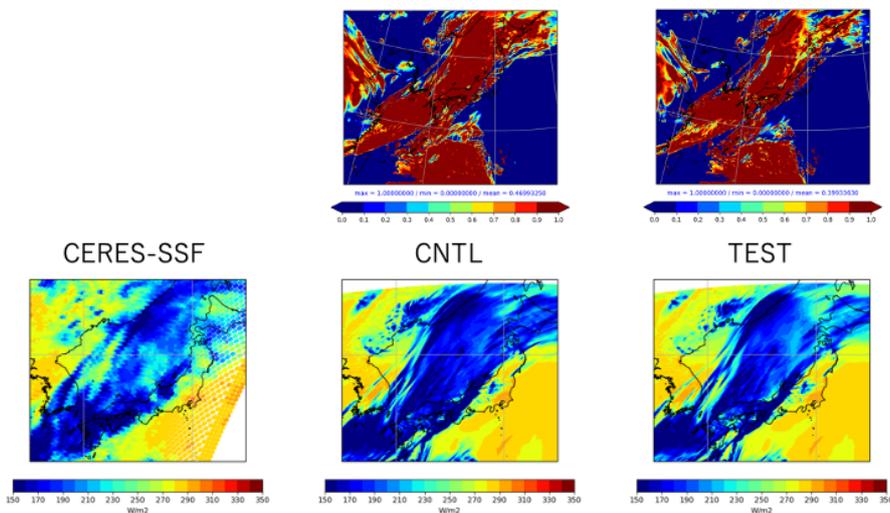


図 3.4.4 上層雲量の予測結果 (上図) と大気上端での外向き長波放射 (OLR) の分布 (下図) の一例。対象時刻は 2018 年 6 月 29 日 12 時で FT=6 の予測結果を示している。左図は CERES-SSF 衛星プロダクトによる同時刻の結果。

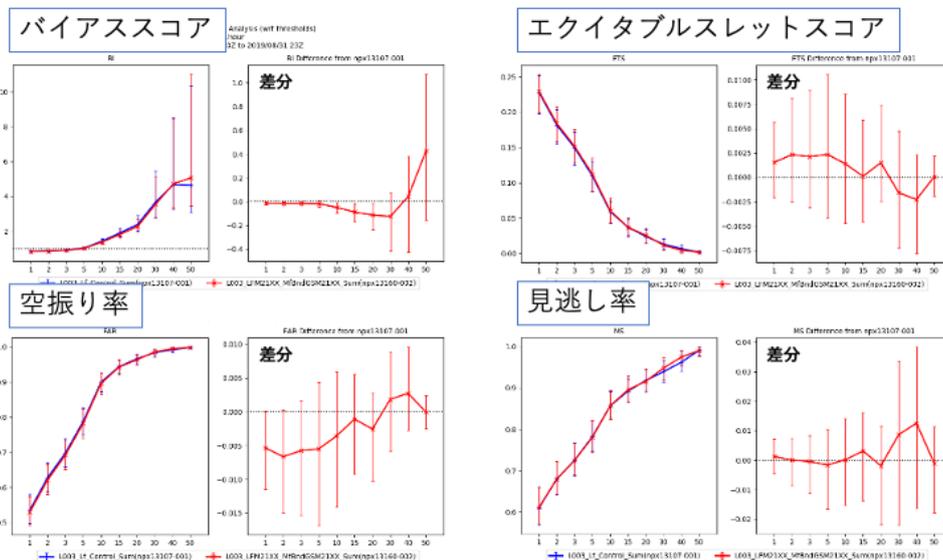


図 3.4.5 夏期間の 1 時間降水量の閾値別統計検証結果と TEST の CNTL からの差。左上: バイアスコア、右上: エクイタブルスレットスコア、左下: 空振り率、右下: 見逃し率をそれぞれ表す。検証格子は 10km としている。線種は図 3.4.1 と同様。

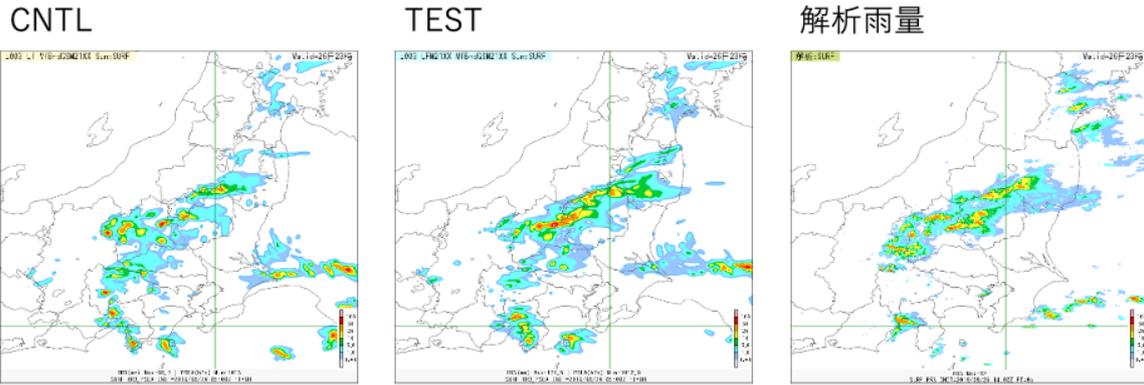


図 3.4.6 不安定降水の事例。対象時刻は 2019 年 8 月 26 日 23 時 (JST)、FT=9 の前 3 時間積算降水量で、左：CNTL、中央：TEST、右：解析雨量をそれぞれ示す。

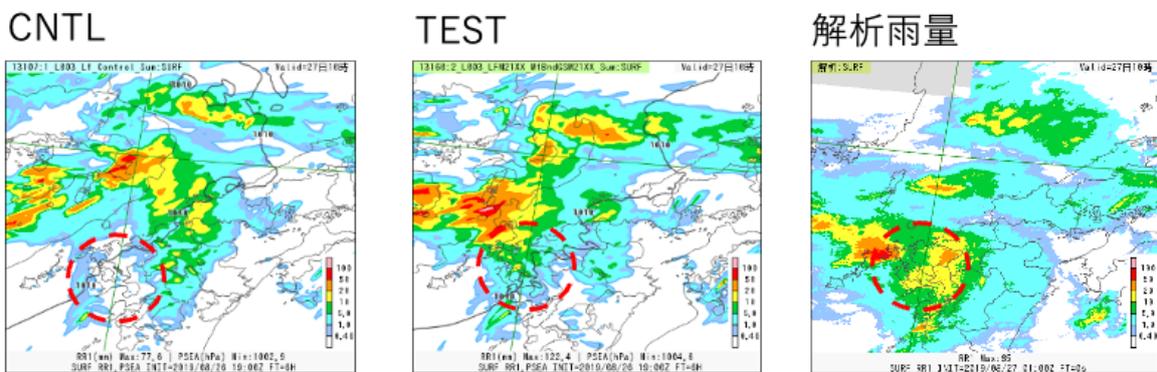


図 3.4.7 対象時刻 2019 年 8 月 27 日 10 時 (JST)、FT=6 の前 1 時間積算降水量。各図は図 3.4.6 と同様。

30 mm/h の範囲で CNTL よりもバイアスコアが小さくなっており改善が見られる。

次に、降水量の面的分布の特性変化について事例を紹介する。不安定降水の事例として、対象時刻 2019 年 8 月 26 日 23 時 (JST) の前 3 時間積算降水量の予測結果を図 3.4.6 に示す。CNTL (左図) では、解析雨量では見られないような狭い領域に集中した降水域がところどころに現れており、そこでは解析雨量よりも強い降水となっている。一方、TEST ではそのような集中した降水が抑えられ、降水域の広がりもより解析雨量と対応する。この特性の変化は、主に境界層・乱流過程において Leonard 項を導入したことによる鉛直輸送高度化の効果によるものと考えられる。数値予報開発センター年報 (令和 2 年) で報告した通り、Leonard 項は格子スケールの上昇流の周辺で顕熱・潜熱を上方に輸送するように作用する。格子スケールの上昇流に加え Leonard 項が熱輸送を部分的に担うことにより、格子スケールの対流が過剰に発達する傾向が抑えられるようになったものと推測される。

降水分布の違いが現れた例として、図 3.4.7 に対象時刻 2019 年 8 月 27 日 10 時 (JST) における前 1 時間積算降水量の予測結果 (FT=6) を示す。観測雨量では長崎県を中心に強雨が観測されている。この事例では

CNTL/TEST とともに強雨域のピークが北から北東寄りにずれているものの、TEST では長崎県に見られる強雨域を部分的に捕捉したことが分かる。

最後に夏期間、冬期間それぞれの閾値別降水量の検証スコア、高層・地上気象要素の RMSE について変化有意性の統計検証結果を図 3.4.8 に示す。降水については、夏期間の FT=1 に改悪が見られるものの、それ以外では夏冬通して中立から改善傾向であった。高層検証は主に冬期間で改善した。先に見たように気温については全層で改善しており、中上層および 925 hPa 面で改善が顕著である。比湿や風速についても主に上層で改善したことが確認できる。地上気象要素については、下向き短波放射を除き改善しており、気温・比湿・風速のいずれも予測期間通して有意に改善した。本更新で下層の鉛直解像度が向上して最下層高度が下がったことや、地表面過程・接地境界層過程の改良が主に改善に寄与したと考えられる。

### 3.4.4 まとめ

2021 年 3 月に更新された局地数値予報システムでは、局地モデルの鉛直層を 76 層に増強するとともに、雲放射過程、積雲対流過程、境界層・乱流過程、および地表面過程等の物理過程を改良した。前ルーチンと

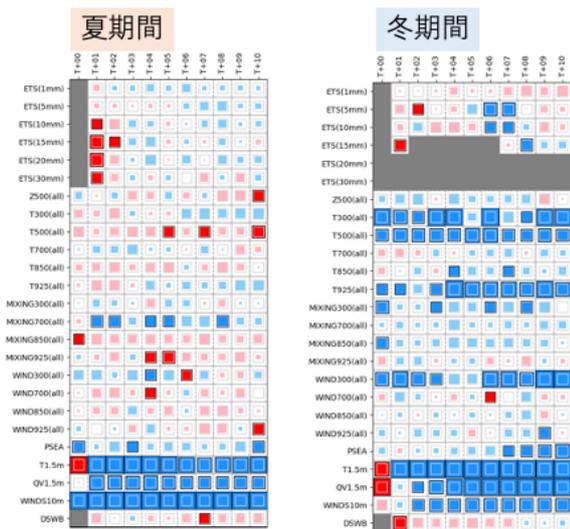


図 3.4.8 夏期間（左）、冬期間（右）の閾値別降水量の検証スコア、高層・地上気象要素の RMSE の変化有意性の統計検証結果。各行は統計検証要素、各列は予測時間に対応する。各統計検証要素は、ETS: 降水量のエクイタブルスコア（括弧内は降水量の閾値）、Z: ジオポテンシャル高度、MIXING(QV): 混合比、T: 気温、WIND: 風速、PSEA: 海面更正気圧、DSWB: 地上における下向き短波放射をそれぞれ表す。青が CNTL と比べて改善、赤が CNTL と比べて改悪を表しており、色付きの領域が各セルの内側の正方形以上の場合、95 パーセント信頼区間で統計的に有意であることを示す。

の比較実験により、地上気象要素や冬期間の高層プロファイルが改善し、不安定降水事例でしばしば見られていた格子スケールに集中した降水が緩和されることを確認した。数値予報開発センター年報（令和 2 年）では、前ルーチンの全球モデルを用いた実験結果を示したが、本節では 2021 年 3 月に現業化した全球モデルに基づく実験結果を示した。両者の比較において、局地モデル改良の効果としての予測特性の変化に本質的な差異は見られなかった。

2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画では、豪雨防災を重点目標の一つに掲げており、線状降水帯に代表される集中豪雨の発生前に、明るいうちの避難等、早期の警戒・避難を実現するため、局地モデルによる集中豪雨の予測精度向上が求められている。更新した局地数値予報システムは、弱雨の予測精度や不安定降水の面的分布に降水特性の改善が見られるものの、集中豪雨の観点からは対流の発生の遅れや降水帯の停滞の表現が十分でないなど、線状降水帯の発生・維持に直接関わる課題も多い。線状降水帯の予測精度向上に資するため、物理過程の開発を継続的に実施することが重要である。また、将来的に局地モデルの予測期間を延長し、水平分解能を向上させる計画である。

## 参考文献

- Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.
- Gryanik, V. M., C. Lüpkes, A. Grachev, and D. Sidorenko, 2020: New Modified and Extended Stability Functions for the Stable Boundary Layer based on SHEBA and Parametrizations of Bulk Transfer Coefficients for Climate Models. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 2687–2716.
- 幾田泰醇, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91–97.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194 pp.
- 気象庁予報部, 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, 151 pp.
- 気象庁予報部, 2019: メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 165 pp.
- 気象庁, 2021: 局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良. 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, 97–102.
- Moeng, C.-H., P. P. Sullivan, M. F. Khairoutdinov, and D. A. Randall, 2010: A Mixed Scheme for Subgrid-Scale Fluxes in Cloud-Resolving Models. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3692–3705.
- Wilson, D. R. and S. P. Ballard, 1999: A microphysically based precipitation scheme for the UK meteorological office unified model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1607–1636.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72–86.

### 3.5 日本域高潮モデルの台風ボーガス手法改善

#### 3.5.1 概要

気象庁は、日本国内の高潮注意報・警報発表のために台風や発達した温帯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。2021年4月には、数値予報開発センターにおいて、日本域高潮モデルで使用する台風ボーガス手法の改善の現業化を行った。以下では、開発内容について報告する。

#### 3.5.2 日本域高潮モデルで使用する台風ボーガス手法の改善

日本域高潮モデルでは、予報時間内に台風が日本沿岸付近に接近すると予測される場合、MSMを大気外力とした高潮計算のほかに、熱帯低気圧情報を元に作成した台風ボーガスを用いた5通りの高潮計算を行っている。これら複数の予報結果は、台風進路予報の不確実性に伴う高潮予測の不確実性を評価するために用いられる。

高潮モデルでの従来の台風ボーガスは、Fujita (1952)のパラメトリックな気圧・風速分布を仮定しており、陸の影響による海上風の減衰を考慮していなかったため、湾内や内海での高潮の過大予測の原因となっていた。これを改善するために、Westerink et al. (2008)が提案した沿岸域での海上風減衰手法の利用を検討した。Westerink et al. (2008)の手法では、沿岸付近の各海格子にて、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付近での海上風速の減衰係数を計算する。この手法を応用する際の陸面粗度長としては、2019年の各月のメソ解析の結果を用いた。本手法を適用した高潮モデル実験結果では、期待通りこれまでの過大予測傾向が抑制され、空振り率が低減することが分かった(図略)。一方で捕捉率の低下も認められたため、原因を調査したところ、従来のパラメータ決定手法では強風が吹く範囲が小さめに評価され、台風中心から離れた領域で高潮が過小に予測されていたことが分かった。

この問題に対応するため、台風ボーガスで用いているFujita (1952)の式での台風の大きさを決定するパラメータ $r_0$ の決定手法の見直しを行った。従来のパラメータ決定法では、台風進行方向右側の風速が最大となる方向で、熱帯低気圧情報の暴風円半径(50 kt半径)で風速が50 ktとなるように $r_0$ を決定していたが、今回の改善では、(1)暴風円半径の円上に任意個の分点を取り、(2)各分点で「50kt半径で風速50kt」を満たすよう $r_0$ を決定し、(3)平均した $r_0$ を採用、とすように変更した。なお、台風に暴風域が存在せず熱帯低気圧情報に暴風円半径が指定されない場合は、同じ処理を強風円半径(30 kt半径)に対して行う。これにより、台風中心から離れた領域での風速が熱帯低気

圧情報や観測に整合するよう改善される(図3.5.1)。

#### 3.5.3 精度検証結果

上記二点の改善策を適用した高潮モデルの精度を評価するため、2015~2018年の台風事例(全1303初期値)を対象に高潮モデル予測実験を行い、変更前の現業高潮モデルの予測結果との比較検証を行った。検証に用いた観測データは、気象庁、国土交通省港湾局、海上保安庁、国土地理院等が運用する潮位観測点の観測値である。図3.5.2で変更前の現業高潮モデル(図中橙線)と台風ボーガス改善を適用した高潮モデルの予測結果(図中緑線)を比較した。この検証では、台風進路の予測誤差等の影響をなるべく除いてボーガス改善の効果を確認するために、3~12時間予測を検証対象とした。図3.5.2では、ボーガス改善版で空振り率は有意に低下する一方で、捕捉率は改善前とほぼ同等か閾値によってはやや改善であることが確認できた。また、2018年台風第21号などの顕著な高潮事例で事例検証を行った結果でも、変更前の現業高潮モデルが実況より過大傾向であったのが、今回の2つの台風ボーガス改善手法を適用することで、実況に近づくことが確認できた(図3.5.3)。

#### 3.5.4 まとめ

上に示したように、Westerink et al. (2008)の手法を適用し陸地の影響を考慮することで、内湾等でのこれまでの過大予測傾向を抑制して空振り率を低下させるとともに、新しい台風ボーガスパラメータ決定手法の採用により現行の高潮モデルと同水準の捕捉率を維持できることが確認できた。この結果を踏まえ、台風ボーガス手法改善の現業数値予報システムへの適用を2021年4月に行った。

#### 参考文献

- Fujita, T., 1952: Pressure distribution within typhoon. *Geophys. Mag.*, **23**, 437-451.
- 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.
- Westerink, J. J., R. A. Luetlich, 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.

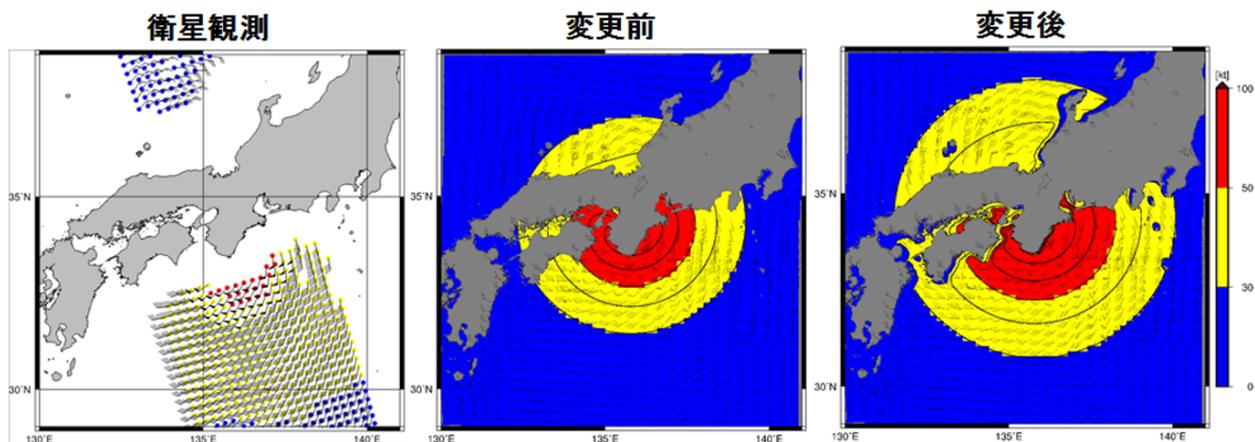


図 3.5.1 平成 30 年 (2018 年) 台風第 24 号通過時の 9 月 30 日 06 UTC 初期値の 6 時間予報の風分布。左図が衛星観測 (ASCAT)、中央図がボーガス改善前、右図が改善後の風分布を示す。中央図と右図の赤色は暴風域、黄色は強風域を示している。

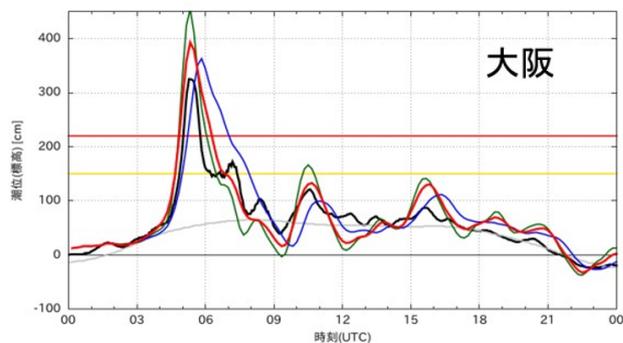
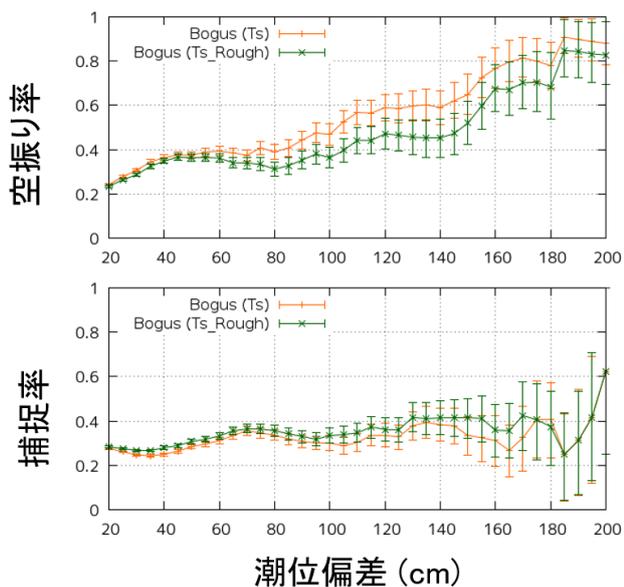


図 3.5.2 日本域高潮モデルでの 3~12 時間予報における空振り率 (上段)、捕捉率 (下段)。横軸は潮位偏差。図中、橙線は変更前の現業高潮モデル、緑線は台風ボーガス改善を適用した高潮モデルの予測スコアである。

図 3.5.3 平成 30 年 (2018 年) 台風第 21 号通過時 9 月 4 日 00 UTC 初期値の高潮モデル潮位時系列。横軸は時刻 (UTC)、縦軸は潮位を表す。対象地点は大阪。黒線：観測値、緑線：ボーガス改善前、赤線：ボーガス改善後 (台風情報としてベストトラックを使用)、青線：ボーガス改善後 (台風情報として 9 月 4 日 00 UTC の台風予報を使用)、灰色線：天文潮位、赤横線：高潮警報基準、黄横線：高潮注意報基準