

数値予報開発センター一年報

2025（令和7）年

令和8年3月
March 2026

気象庁 数値予報開発センター

はじめに

数値予報開発センター年報は、前年の1月から12月までの1年間に数値予報開発センターで実施した開発等の活動や成果を網羅的にまとめて年度末に報告するもので、数値予報開発センターが発足した令和2年度より毎年刊行している¹。

令和7年の数値予報開発センター年報では、業務概要や沿革等を紹介する「数値予報開発センターの概要」に続き、数値予報の開発に関する話題を「数値予報システムの概要と今後の開発計画」「数値予報システムの開発成果」「数値予報システムの開発進捗」の3つの章で紹介する。それぞれ、全球、メソ、局地数値予報システム（数値予報モデル及びデータ同化システム）とそれらのアンサンブル予報システム、局地モデルの予測結果と観測結果を活用して三十分ごとの大気場の解析を行う三十分大気解析、各数値予報システムの予測結果を利用して後処理を行うガイダンス、大気海洋結合モデルにより構成される季節アンサンブル予報システム、長期再解析を含む長期的に同じシステムで全球の大気解析を継続的に実施する気候データ同化システム、波浪や高潮の予測を行う波浪・高潮モデル、海流や海水、海水温等の監視・予測を行う海況監視予測システム、黄砂・紫外線等に関する解析・予測を行う物質循環システムなど、多様なシステムに関する開発計画や開発成果、開発進捗について報告する。続いて、開発以外の関連活動として「成果発表」「連携・共同研究」「受賞・研究交流」「委員・専門家等」について報告する。「連携・共同研究」では、研究者の協力を得て実施している「富岳」政策対応枠に関する話題についても取り上げる。

なお、数値予報課では「数値予報解説資料集（基礎編・応用編・事例解析編・資料編）」を別途刊行している²。数値予報に関する体系的な理解に資する資料として、まずは解説資料集をご覧いただきたい。

気象庁は、平成30年に交通政策審議会気象分科会で取りまとめられた提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」を踏まえ、「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定し、数値予報技術開発を推進してきた。令和7年6月には、同分科会から「『2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方』の補強」が示され、線状降水帯の予測精度向上の推進に加え、台風情報・気候変動情報の高度化、さらには先端AI技術の活用などが、気象庁が追加的に講じるべき施策として明確化された³。数値予報技術開発においても、データ駆動型気象予測モデル（AI気象モデル）を含む先端AI技術の発展により、予測技術の革新的な高度化が進みつつある。また、生成AI需要の高まり等を背景に、スーパーコンピューターはGPU等の加速器を用いるものが急速に拡大しており、将来動向に不確実性が増す中、多様な計算機資源の柔軟な適応が求められている。こうした状況を踏まえ、数値予報開発センターでは今年度「先端AI活用チーム」を新設してAI気象モデルの開発に向け調査・評価に着手した。さらに、既存の数値予報モデルについて、GPUへの移植に向けた対応を進めている。

数値予報開発センターでは、これらの政策方針・技術動向を踏まえ、現業運用を見据えた実証と基盤整備を着実に推進するとともに、より広い分野・視点で学官連携を拡充し、先端技術の適切な評価・導入を推進する。専門家・研究者各位におかれては、数値予報開発センターにおける活動について、本年報を通してご理解いただくと共に、他機関と実施している共同研究等を参考に当センターとの連携について一層の発展を検討いただければ幸いである。

田中泰宙 数値予報モデル基盤技術開発室長

¹ https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/npdc_annual_report.html

² <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html>

³ https://www.jma.go.jp/jma/press/2506/27c/bunkakai_doc.html

数値予報開発センター年報

目次

第1章	数値予報開発センターの概要	1
1.1	業務概要	1
1.2	沿革	2
1.3	組織	2
第2章	数値予報システムの概要と今後の開発計画	3
2.1	全球数値予報システム	3
2.2	全球アンサンブル予報システム	3
2.3	メソ数値予報システム	4
2.4	メソアンサンブル予報システム	4
2.5	局地数値予報システム	5
2.6	局地アンサンブル予報システム	5
2.7	三十分大気解析	5
2.8	短期予報ガイダンス	8
2.9	季節アンサンブル予報システム	11
2.10	気候データ同化システム	11
2.11	波浪モデル	12
2.12	高潮モデル	12
2.13	海況監視予測システム	12
2.14	物質循環システム	13
第3章	数値予報システムの開発成果	17
3.1	開発成果一覧	17
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	18
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）	26
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	30
3.5	MSM、MEPS 大雨発生確率ガイダンスの改良	34
3.6	全球解析における観測データ利用手法の改良	37
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	43
3.8	高潮モデルの改良	48
3.9	全球化学輸送モデルのオゾン同化に関する改良	52
第4章	数値予報システムの開発進捗	55
4.1	全球モデルの開発進捗	55
4.2	局地モデルの高解像度化に向けた開発	64
4.3	局地アンサンブル予報システムの運用開始に向けた開発	68
4.4	観測データの新規導入と利用方法の改良	78
4.5	季節アンサンブル予報システムの開発	94
4.6	波浪モデル	100
4.7	高潮モデル	102
4.8	気候データ同化システムの観測データ利用拡充	105
第5章	成果発表	109
5.1	論文・報告	109
5.2	国際会議・会合	111

5.3	国内会議・会合	113
5.4	数値予報課コロキウム	115
第6章	連携・共同研究	117
6.1	気象研究所との開発連携	117
6.2	気象衛星センターとの共同研究	118
6.3	共同研究一覧	119
6.4	「富岳」政策対応枠「豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発」	122
第7章	受賞・研究交流	126
7.1	受賞	126
7.2	当センター共催研究会・研修	126
第8章	委員・専門家等	127
8.1	国際機関の委員・専門家等	127
8.2	国内機関の委員・専門家等	128
付録A	略語表	129
付録B	本報告で使用した表記と統計的検証に用いる代表的な指標	136
B.1	本報告で用いた表記	136
B.2	統計的検証に用いる代表的な指標	136
B.3	カテゴリー検証で用いる指標	137
B.4	確率予測に関する指標など	139

第1章 数値予報開発センターの概要

1.1 業務概要

2020年10月、茨城県つくば市の高層気象台庁舎内に数値予報開発センター（以下、「開発センター」と表記）が設立された。開発センターは気象庁情報基盤部数値予報課の「数値予報モデル基盤技術開発室」、「数値予報モデル技術開発室」、「地球システムモデル技術開発室」の3室で構成されている。

開発センター設立の約2年前の2018年8月に交通政策審議会気象分科会の提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方¹」に示された気象・気候分野に関する技術開発の現状と課題を踏まえ、防災分野をはじめ社会における情報サービスの基盤である数値予報の技術開発を強力かつ着実に推進していくため、同年10月に「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画²」（以下「重点計画」という）が策定された。重点計画の数値予報に関する気象庁のビジョンでは、「数値予報は、気象・気候予測の根幹であり、安全・安心で豊かな生活に不可欠な社会基盤」とされている。防災をはじめ社会の様々なサービスの充実・発展に、気象庁がより効果的に貢献するためにも、数値予報の高度化・精度向上が必要である。2030年に向けて掲げた4つの重点目標、「豪雨防災」、「台風防災」、「社会経済活動への貢献」、「温暖化への適応策」を達成するため、予測精度向上の鍵となる「次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用」、「日本の気象を世界最高の精度と解像度でシミュレーション」、「確率予測とAI技術の融合による意思決定支援」について、技術革新を重点的に推進し、同時に「幅広い連携の推進」、「開発者の育成と確保」、「研究・開発基盤の整備」といった開発マネジメントを強化して、開発を力強く推進する必要がある。

このように数値予報のさらなる高度化・精度向上が強く求められる中、2020年10月の気象庁組織再編に伴い、「数値予報開発センター」を設置し、これまで全球モデル、メソモデル、局地モデル、季節予報モデル、海洋モデル、物質輸送モデルなど予測対象等によって部署ごとに分かれていた数値予報モデルの開発部門を統合して分野横断的に開発できる体制を整備し、一体的に数値予報モデルの開発を進めることにした。また、開発センターを茨城県つくば市に設置することで、気象研究所や筑波研究学園都市の大学等研究機関と、より密接に連携して開発に取り組んでいる。

数値予報モデル基盤技術開発室は、基盤開発管理係と評価チーム、システム・サポートチーム、ガイダンスチーム、先端AI活用チームの1係4チームで構成され、数値予報モデルの精度検証・評価や数値予報実験システムや開発管理システム等の基盤システムの開発・管理、数値予報成果の応用（ガイダンス）に関する技術開発、AI気象モデル（深層学習による過去の解析値・観測値を学習したデータ駆動型気象モデル）に関する調査に取り組むとともに、数値予報モデル開発を効率よく進めるために開発センター内の調整・運営、また数値予報課本課との調整を行っている。2025年度には、AI気象モデルの調査を担当する先端AI活用チームを新たに設置した。2024年度まで設置されていた次世代AI活用チームはガイダンスチームに統合され、AI技術を活用したガイダンス開発に引き続き取り組む。

数値予報モデル技術開発室は、全球モデルチーム、全球同化・EPSチーム、メソモデルチーム、メソ同化・EPSチーム、アクティブセンサデータ利用チーム、輝度温度データ利用チームの6チームで構成され、警報・注意報等の防災気象情報や航空気象情報、短期から週間天気予報の基礎資料作成の元となる全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、30分大気解析の開発に取り組んでいる。

地球システムモデル技術開発室は、結合モデルチーム、気候データ同化チーム、高潮・波浪モデルチームの3チームで構成され、季節アンサンブル予報システム、長期再解析（JRA）、波浪モデル、高潮モデル、海況監視予測システム、黄砂解析予測システム、紫外線予測システム等といった気候、海洋、環境気象に関する様々な数値予報モデルの開発に取り組んでいる。2021年度までは結合モデルチーム、再解析チーム、海洋モデルチーム、大気化学モデルチームの4チーム体制であったが、2022年度から現在の体制となった。

¹ <https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai.teigen.pdf>

² https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html

1.2 沿革

- 2020年 10月 組織再編に伴い、茨城県つくば市に数値予報開発センターを設置。
2022年 4月 地球システムモデル技術開発室のチーム体制を変更。
2025年 4月 数値予報モデル基盤技術開発室のチーム体制を変更。

1.3 組織

数値予報開発センターは、「数値予報モデル基盤技術開発室」、「数値予報モデル技術開発室」、「地球システムモデル技術開発室」の3室から構成され、以下の通り、さらに各チームに分かれて、開発を行っている。

- 数値予報モデル基盤技術開発室 : 基盤開発管理係
: 評価チーム
: システム・サポートチーム
: ガイダンスチーム
: 先端 AI 活用チーム
- 数値予報モデル技術開発室 : 全球モデルチーム
: 全球同化・EPS チーム
: メソモデルチーム
: メソ同化・EPS チーム
: アクティブセンサデータ利用チーム
: 輝度温度データ利用チーム
- 地球システムモデル技術開発室 : 結合モデルチーム
: 気候データ同化チーム
: 高潮・波浪モデルチーム

第2章 数値予報システムの概要と今後の開発計画

第2章では、数値予報開発センターで開発を行っている各数値予報システムの概要と近年の更新履歴、今後の開発計画について報告する。全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析について、開発計画の線表を図 2.7.1 に示し、第 2.1 節から第 2.7 節で述べる。ガイダンス、マルチモデルガイダンスについて、開発計画の線表を図 2.8.1、図 2.8.2 に示し、第 2.8 節で述べる。季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデル、高潮モデル、海況監視予測システム、物質循環システムについて、開発計画の線表を図 2.14.1、図 2.14.2 に示し、第 2.9 節から第 2.14 節で述べる。

気象庁は 2023 年 3 月に線状降水帯予測スーパーコンピュータ (気象庁情報基盤部 2023) を、続いて 2024 年 3 月に気象庁の第 11 世代となるスーパーコンピュータシステム (気象庁情報基盤部 2024) を導入した。数値予報システムのうち、局地数値予報システム及び三十分大気解析は線状降水帯予測スーパーコンピュータで、その他の数値予報システムは第 11 世代スーパーコンピュータシステムで現業運用されている。

2.1 全球数値予報システム

全球数値予報システムは、天気予報や週間予報、台風予報などでの利用に加え、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システムである。システムの全体像は JMA (2025) を参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018) では、特に台風防災に資するため、台風進路に関する予測誤差を 3 日先の予測で 100 km 程度にするといった飛躍的な改善が必要であるとしている。

全球数値予報システムは、初期値を作成する全球データ同化システム (全球解析) 及び予測計算を行う全球モデル GSM により構成されている。GSM は 2026 年 1 月現在、水平格子間隔約 13 km、鉛直層数 128 層の構成で運用されている。全球データ同化システムは、4 次元変分法を基本とし、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF, Hunt et al. 2007) で作成される背景誤差の情報を考慮するハイブリッド 4 次元変分法を用いている。全球数値予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。

2024 年 3 月のスーパーコンピュータシステムの移行と同時に NOAA-21 搭載のマイクロ波サウンダ ATMS 及び赤外サウンダ CrIS による輝度温度観測データの新規利用を開始した (気象庁 2025b)。2025 年 3 月には、全球モデル及び 4 次元変分法の並列化手法の改良、物理過程 (陸面・放射過程) の改良を行った (第 3.2

節)。さらに 2025 年 10 月には全球データ同化システムにおいて、ひまわりや欧米静止気象衛星の CO₂ バンド CSR の利用開始、他機関の極軌道気象衛星搭載マイクロ波サウンダデータの利用拡充及び高度化、GNSS 掩蔽データの利用手法改良及び利用拡充を行う (第 3.6 節) とともに、GOES-19 の AMV、CSR の利用を開始した。

2026 年度には、AMV の利用拡充及び利用高度化、国内ラジオゾンデ高解像度観測データの利用開始、GNSS 掩蔽データの利用手法改良及び利用拡充、ATMS の利用チャンネル拡充、静止気象衛星輝度温度の全天同化、赤外サウンダ利用高度化等を計画している (第 4.4 節)。また全球モデルの高速化や物理過程等の改良、全球解析におけるトラジェクトリの単精度化及び水平局所化の改良に向けた開発を進めている。

今後も GSM の精度向上に向けた物理・力学過程の開発とともに、将来の計算機への対応を見据えた、並列化手法の改良・GPU 利用・単精度化等の高速化に向けた取り組みや、観測データの利用高度化等の開発を進める。中長期的にはスーパーコンピュータシステムのスペックに応じて GSM の水平格子間隔を 10 km 以下まで強化し詳細な予測値をメソモデルへ引き継ぐとともに、台風の進路予測精度を飛躍的に向上させることを目指している。

2.2 全球アンサンブル予報システム

全球アンサンブル予報システム (GEPS) は GSM による予測に対して信頼度や不確実性等の情報を与えることに加え、より長い 2 週間から 1 か月先までの確率的予測での利用も目的として運用されている。システムの詳細については経田 (2016) や新保 (2017) などを参照頂きたい。また、最新の開発の成果や進捗の詳細については第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018) では、台風防災に資するための台風の進路予報に関する不確実性の情報や、社会経済活動への貢献に資するため 2 週間及び 1 か月先までの顕著現象予測の精度向上が必要であるとしている。

GEPS に利用される数値予報モデルは基本的に低解像度版の GSM で、18 日予測までは水平格子間隔約 27 km、それより先の 34 日目までは約 40 km と、予報時間の途中で格子間隔を切り替える仕様となっている。鉛直層数は GSM と同様 128 層である。アンサンブル数は、18 日目までは 51 メンバー、19~34 日目までは 25 メンバーである。アンサンブル予報のための初期摂動については LETKF と特異ベクトル法 (SV 法) により与えている。また数値予報モデルの不確実性を考慮するため、確率的物理過程強制法 (SPPT 法) (米

原 2010) を採用している。なお 2026 年 1 月に予定している季節アンサンブル予報システム (季節 EPS) の更新後は、1 か月予報支援の役割についても季節 EPS が担うことになり、GEPS の 18 日より先の予測は廃止される。

2025 年 3 月に、確率的水蒸気プロファイル参照法の導入、初期摂動の振幅調整、SST 摂動の作成手法の改良、数値予報モデルの物理過程更新と並列化手法の更新の導入を行った (第 3.3 節)。

2026 年度中の現業導入を目指し、数値予報モデルの改良の適用に向けた開発を行っている。今後も GSM の改良とともに確率的予測の改善を目指した開発に取り組む。中長期的には GSM 同様に、将来の計算機への対応を見据え、スーパーコンピュータシステムのスペックに応じた、高速化対応や省資源化を検討している。さらに、大気海洋の相互作用の取り扱いの精緻化に向けた調査開発も進めていく。

2.3 メソ数値予報システム

メソ数値予報システムは、数時間から 3 日程度先までの大雨や暴風などの災害をもたらす現象の予測を目的とし、主に天気予報や防災気象情報、航空気象情報の作成支援に利用されている。システムの全体像については JMA (2025) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018) では、台風防災及び豪雨防災に資するため、台風に伴う 3 日先までの降水量予測や、線状降水帯の発生・停滞等による集中豪雨の予測のため予測時間の延長や顕著現象の降水量等の定量的予測の精度向上が必要であるとしている。

メソ数値予報システムは初期値を作成するメソデータ同化システム (メソ解析) とメソモデル MSM により構成されている。MSM は 2026 年 1 月現在、水平格子間隔 5 km、鉛直層数 96 層の非静力学モデル asuca(気象庁予報部 2014; Ishida et al. 2022) により 1 日 8 回運用されている。予報時間は 00UTC, 12UTC 初期値については 78 時間、その他の初期値からの予測は 39 時間である。メソ数値予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。

2024 年 3 月には、第 11 世代スーパーコンピュータシステム移行と同時に、地上マイクロ波放射計による可降水量データや NOAA-21 搭載の ATMS 及び CrIS による輝度温度観測データの新規利用を開始した (気象庁 2025b,c)。2024 年 6 月には、新凌風丸船舶 GNSS 観測データ利用、及び、2022 年 8 月から 2023 年 7 月に設置されたアメダス観測湿度計の現業利用を開始した。2024 年 11 月には、気象レーダー更新に関して新潟・名瀬・鹿児島 of レーダーの利用を再開した。2025 年 2 月には、水蒸気に感度のあるマイクロ波気温サウンダ窓チャンネルの新規利用や、アメダス湿度計の利

用手法改良等の観測データ利用高度化を行った (第 3.7 節)。さらに 2025 年 5 月には、MSM への地形性抵抗の効果の新たな導入や標高オリジナルデータセットの更新、放射・陸面といった物理過程の改良を行った (第 3.4 節)。2025 年 6 月には 2023 年 8 月から 2024 年 7 月に設置されたアメダス観測湿度計の現業利用を開始した。

2025 年度末には、地上 GNSS データの利用高度化、ひまわり CO₂ バンド CSR の利用開始、GNSS 掩蔽データの利用拡充及び利用高度化等の観測データ利用高度化や、解析基本場の単精度保持による省資源化の改良を計画している (第 4.4 節)。今後も MSM の精度向上に向けた物理・力学過程の開発を進めるとともに、観測データの利用高度化等の開発を進める。また、将来の計算機への対応を見据えた GPU 利用、単精度化等による高速化も重要な課題であり、引き続き開発を進めていく。さらに、現行のデータ同化システムは 4 次元変分法を採用しているものの、その時々々の気象条件に応じた背景誤差の情報が十分活用できていないことから、データ同化手法の改善も課題となっている。なお、メソ数値予報システムにおける観測データ利用の高度化については、スーパーコンピュータ「富岳」を活用して、二重偏波気象ドップラーレーダーやひまわり CSR のデータを利用した共同研究を進め、観測データの高度利用に係る開発加速化を図っている。「富岳」活用の成果については第 6.4 節を参照頂きたい。

2.4 メソアンサンブル予報システム

メソアンサンブル予報システム (MEPS) は、MSM の予測に対して信頼度や不確実性の情報を付加する目的で運用されている (河野ほか 2019)。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018) では、豪雨防災に資するため特別警報級の大雨となる確率情報の精度向上のための予測精度向上が必要であるとしている。

MEPS に用いる数値予報モデルは基本的に MSM と同一であり、2026 年 1 月現在の水平格子間隔は 5 km、鉛直層数は 96 層である。アンサンブル予報のための初期値や側面境界値の摂動は特異ベクトル法 (SV 法) を用いて与えている。また数値予報モデルの不確実性を考慮するため、SPPT 法 (米原 2010) を採用している。

2025 年 5 月に、MSM の更新に合わせて、MEPS で用いるメソモデルを更新した (第 3.4 節)。

今後は、MSM の更新に合わせた改良に加えて、摂動作成手法の高度化等、確率的予測の改善を目指した機能拡充を行う。

2.5 局地数値予報システム

局地数値予報システムは、半日程度先までの大雨をはじめとする災害をもたらす現象を予測することを目的とし、防災気象情報や航空気象情報、降水短時間予報等の作成支援での利用のため、空間・時間スケールの小さい現象を予測することを目指して運用されている。「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018)では局地的な大雨の半日前の予測に資するため、積乱雲等の予測を行えるよう、更なる高度化・高解像度化が必要であるとしている。近年、線状降水帯などに伴う集中豪雨による災害が多発しており、豪雨防災に早期に資するため、局地数値予報システムについては開発計画を前倒しして開発を進めている。

局地数値予報システムは、初期値を作成する局地データ同化システム(局地解析)と局地モデル LFM により構成されている。LFM は 2026 年 1 月現在、水平格子間隔 2 km、鉛直 76 層の非静力学モデル asuca により、1 日 24 回毎正時を初期値に運用されている。予測時間は 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC 初期値では 18 時間、その他の初期値からの予測は 10 時間である。この 3 時間ごとの 18 時間予測は、半日前からの線状降水帯予測に資するために、2024 年 3 月の第 11 世代スーパーコンピュータシステム導入に合わせて延長されたものである。データ同化手法には初期時刻の 3 時間前から 3 次元変分法 (3DVar) による同化と 1 時間予測を繰り返す手法 (Rapid Update Cycle) を用いている。この 3DVar によるデータ同化では、予測誤差として気候学的に事前に見積もった値とアンサンブル手法から算出した気象場に応じた値を考慮するハイブリッド同化を行っている。局地数値予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第 4 章を参照頂きたい。

2024 年 3 月には前述の予報時間延長とともに、力学過程、物理過程(雲物理過程、放射過程)の改良、地上マイクロ波放射計による可降水量データ、NOAA-21 搭載の ATMS 及び CrIS による輝度温度観測データの新規利用を開始した(気象庁 2025a,b,c)。2024 年 11 月には、気象レーダー更新に関して新潟・名瀬・鹿児島 のレーダーの利用を再開した。2025 年 2 月には、水蒸気に感度のあるマイクロ波気温サウンダ窓チャンネルの新規利用やアメダス湿度計の利用手法改良等の観測データ利用高度化を行った(第 3.7 節)。

2025 年度末には積乱雲のような小さいスケールの現象の予測を改善するため、LFM の水平格子間隔を 1 km に高解像度化することを計画している(第 4.2 節)。また、あわせて観測データ利用手法の改良を行う(第 4.4 節)。

なお、本開発計画に資する活動として、スーパーコンピュータ「富岳」を活用して、2022 年度には西日本狭領域、2023 年度及び 2024 年度には全国を予報領域とした水平格子間隔 1 km のモデルのリアルタイムシ

ミュレーション実験を実施し、高解像度化(格子間隔を現行の 2 km から 1 km へ)に伴う特性変化の把握や計算安定性の確認等を行ってきた。「富岳」活用の成果については第 6.4 節を参照頂きたい。

2.6 局地アンサンブル予報システム

「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018)では豪雨防災に資するため、確率的予測を行う局地アンサンブル予報システム(LEPS)の開発が課題となっている。開発の方向性として、計算機資源の増加にあわせ、局地モデルに解像度を近づけたモデルを利用して高解像度モデルによる予測に整合的な不確実性を表現するとともに、メンバー数を増強して顕著現象の確率予測を高度化することを目指している。

近年、線状降水帯などに伴う集中豪雨による災害が多発しており、その豪雨防災のための予測に早期に資するため、開発計画を前倒しして、2021 年度からスーパーコンピュータ「富岳」を用いた LEPS の開発に取り組んできた。2025 年には 6 月 2 日から 10 月 31 日まで、水平格子間隔 2 km、21 メンバーの 21 時間予測のリアルタイムシミュレーション実験を 1 日 2 回実施した。これまでの「富岳」を用いた開発成果をもとに、2025 年度末には、気象庁の線状降水帯予測スーパーコンピュータにおいて、水平格子間隔 2 km、21 メンバーで 21 時間予測を 1 日 4 回実行するシステムの現業運用を開始する計画である(第 4.3 節)。

なお、「富岳」活用の成果については第 6.4 節を参照頂きたい。

2.7 三十分大気解析

三十分大気解析は、航空気象情報などの作成支援のため、大気の実況監視を目的として風と気温について 1 日 48 回、3 次元変分法を用いた客観解析により毎三十分実行されている(気象庁 2022)。2026 年 1 月現在、LFM を第一推定値とする 2 km の水平格子間隔、鉛直 76 層(地上~約 21.6 km)で解析を行っている。

ウィンドプロファイラから得られる風のデータ、アメダスと航空機から得られる風と気温のデータに加えて、地上気象レーダーから得られるドップラー速度や、ひまわりから得られる大気追跡風など高頻度・高密度な観測データを利用してプロダクト作成を行う。メソ・局地解析と同様、気象レーダーの更新に伴い利用を一時休止し、品質を確認した上で利用再開した。

参考文献

- 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.
- Ishida, J., K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi,

- Y. Kitamura, and C. Muroi, 2022: ASUCA: The JMA Operational Non-hydrostatic Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 825–846, doi:10.2151/jmsj.2022-043.
- JMA, 2025: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan, 277 pp., (Available online at https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2025-nwp/pdf/outline2025_all.pdf).
- 河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2019: メソアンサンブル予報システム. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–15.
- 気象庁, 2022: 高頻度大気解析. 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, 106–109.
- 気象庁, 2025a: 局地モデルの予報時間延長と力学・物理過程の改良. 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, 18–28.
- 気象庁, 2025b: 全球解析、メソ解析、局地解析における NOAA-21 搭載 ATMS および CrIS 輝度温度データの新規利用. 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, 29–32.
- 気象庁, 2025c: メソ解析および局地解析における地上マイクロ波放射計観測データの新規利用. 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, 33–35.
- 気象庁, 2018: 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画. 平成 30 年報道発表資料, 気象庁, 54, (Available online at https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_2body.pdf).
- 気象庁情報基盤部, 2023: 「線状降水帯予測スーパーコンピュータ」を稼動開始します. 令和 5 年報道発表資料, 気象庁情報基盤部, 2, (Available online at https://www.jma.go.jp/jma/press/2302/24b/20230224_press.pdf).
- 気象庁情報基盤部, 2024: 新しいスーパーコンピュータシステムを運用開始します. 令和 6 年報道発表資料, 気象庁情報基盤部, 3, (Available online at https://www.jma.go.jp/jma/press/2402/21a/20240221_press.pdf).
- 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.
- 経田正幸, 2016: 全球アンサンブル予報システムの運用に向けた取り組み. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 52–57.
- 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.
- 米原仁, 2010: 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62–65.

数値予報開発計画（R07～R11）

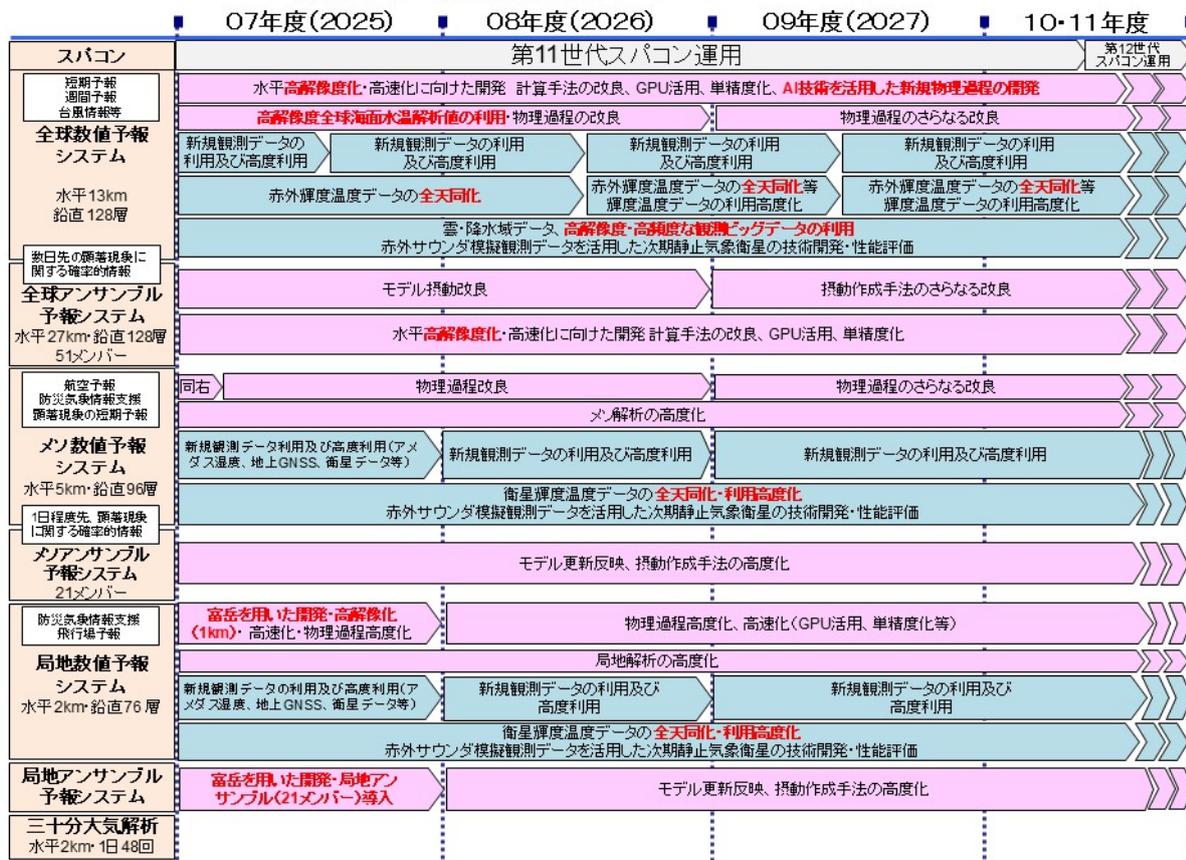


図 2.7.1 数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析)

2.8 短期予報ガイドンス

2.8.1 はじめに

ここでは短期予報で用いられるガイドンスに関する開発計画を述べる。ガイドンスの一覧および概要については計盛ほか(2019)を、ガイドンスの詳細については気象庁予報部(2018)をご覧ください。

ガイドンスは、数値予報の応用プロダクトの一つであり、数値予報モデルで出力される地上気温や風など様々な予測値を統計的な手法により補正して誤差を軽減したり、数値予報が直接出力しない天気等の要素を作成したりすることによって予報作業を支援するものである。

ガイドンス作成には、ニューラルネットワークなど機械学習の手法が用いられている。近年、機械学習手法として深層学習(DNN: Deep Neural Network)と、それをを用いた先端AI技術が急速に発展している。平成31年1月から令和5年3月まで、理化学研究所革新知能統合研究センター(理研AIP)との共同研究を実施した。この成果は気象庁から「気象観測・予測へのAI技術の活用に向けた共同研究の成果について」¹と題して令和5年6月に報道発表されている。この共同研究で得られた知見を踏まえ、最新AI技術やツールについての利用可能性に関する調査を実施したところ、各モデルのガイドンスの出力結果を統合するのではなく、各モデルの出力を直接、深層学習(DNN)技術を用いて統合することにより、ガイドンスの精度が大きく向上する可能性があることがわかった(Kudo 2022)。先端AI技術については、交通政策審議会気象分科会で令和7年6月にとりまとめられた『「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」の補強～近年の社会動向を踏まえた追加的施策～』において、防災気象情報の高度化のため、その活用が不可欠であるとされている。

現在、ガイドンスについては、様々な気象要素に対して、単一の数値予報モデルやアンサンブル予報システムを用いてプロダクトを作成する個別のガイドンスと、複数のガイドンスやモデルの出力値等を統合して単一のガイドンスを作成するマルチモデルガイドンスの開発を行っている。本節ではそれぞれの計画について簡単に述べる。なお、開発計画の線表については図2.8.1、図2.8.2をご覧ください。

2.8.2 ガイドンス

ガイドンスの開発においては、数値予報モデルの出力データと予測対象である実況の観測データを用いて、統計手法により予測式を作る(高田2018a)。ここで作られた予測式は、数値予報モデルの特性に大きく依存するため、数値予報モデルの改良が行われて特性が変

わる際には対応が必要となる。具体的には、予め改良された数値予報モデルの出力データをガイドンスの予測式に与えて予測精度を評価し、精度が悪化すると見込まれる場合には再学習を行って予測式を改良後の数値予報モデルの特性に適するように変更する(高田2018b)。そのため、今後もGSM、GEPS、MSM、MEPS、LFMの改良のタイミングに合わせて、各モデルを入力としているガイドンスの評価および必要に応じて再学習等を行う。また観測データが、観測測器の追加や観測場所の変更等により変わる場合にも対応が必要となる。数値予報モデルの改良への対応と同様に、観測測器や観測場所の変更後、観測で得られるデータを予測するガイドンスの精度を評価した上で、必要に応じて再学習等を行う(高田2018c)。たとえばアメダスの測器追加や地点変更が行われる場合は、その変更計画に応じて随時対応する。また、航空気象観測については完全自動化が様々な空港で進められており、観測の自動化により視程・雲の観測特性が変わることから特性変更に応じるための再学習等を随時行う。

LFMについては令和6年3月に予報時間が18時間に延長され、ガイドンスについてもこれに対応した。令和6年12月には、GSM、MSMおよびMEPSの降雪量ガイドンスについて計算手法の改良を実施した。令和8年3月にはLFMの高解像度化と局地アンサンブル予報システム(LEPS)の運用開始が計画されており、それに対応するガイドンスの開発を進めている。

航空気象業務に関しては、国際民間航空機関(ICAO)の要請に伴う世界空域予報システム(WAFS)のプロダクト改訂に伴う対応を令和7年12月に行った。また、令和7年4月から大阪・関西万博で実施された「空飛ぶクルマ」の運行を支援するための飛行場予報(TAF)ガイドンスの運用を行った。

気象庁の様々な情報発信に資するため、新たなガイドンスの開発も実施している。平成30年8月にとりまとめられた交通政策審議会気象分科会提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」では、「概ね3～5年後に、半日程度先までに特別警報級の大雨となる確率のメッシュ情報の提供」が求められている。これに応じて開発しているMSMおよびMEPS大雨発生確率ガイドンス(特別警報級の大雨確率メッシュ情報)について、令和7年5月に改良を行い、予測精度の向上を確認した(第3.5節)。また、よりきめ細かな予測が可能なLFMの予測情報をベースとした大雨発生確率ガイドンスを令和6年5月より部内試験運用を開始した。さらに1km LFMとLEPSについても、対応した大雨発生確率ガイドンスの開発を進め、令和8年3月からの部内試験運用開始を計画している。

2.8.3 マルチモデルガイドンス

数値予報課では平成30年度から、全球モデル、メソモデル、局地モデル等の複数の数値予報結果をAI技術

¹ https://www.jma.go.jp/jma/press/2306/30b/20230630_ai.html

観測システム 変更対応	令和7年度	令和8年度				令和9年度			令和10年度
		R7Q1	R7Q2	R7Q3	R7Q4	R8Q1	R8Q2	R8Q3	R8Q4
アメダス地点変更		ル変							(随時対応)
航空気象観測完全自動化									(随時対応)
プロジェクト 対応	線状降水帯予測	大雨発生確率ガイダンス	MSM, MEPS ル変						調査・開発 (新規説明変数の導入等)
	近域平均雨量ガイダンス開発支援	平均降水量ガイダンス			LFM1km版、LEPS版の部内試験運用	ル変			ルーチン運用
	大阪・関西万博用TAFガイダンス								調査・開発 (大規模擾乱時の過大なバイスの軽減等)
	WAFSプロダクト改訂 (ICAO第3附属書改正対応)	SIGWX図	開発	ル変 (データ形式変更)		ル変 (バグ/アラート/アラート/アラート)			
		WINTER図	開発	ル変 (データ高解像度化)					
		HWIS (悪天情報サービス) データ開発							調査・開発 (乱気流・着氷)
ガイダンス開発全般									調査・改良・保守作業を実施
モデル改良 対応	全球モデル系更新対応								精度評価・ル変
	メモデル系更新対応								精度評価・ル変
	LFM高解像度化対応 (降雪量、風、気温、視程)								改修・精度評価

図 2.8.1 ガイダンス開発計画

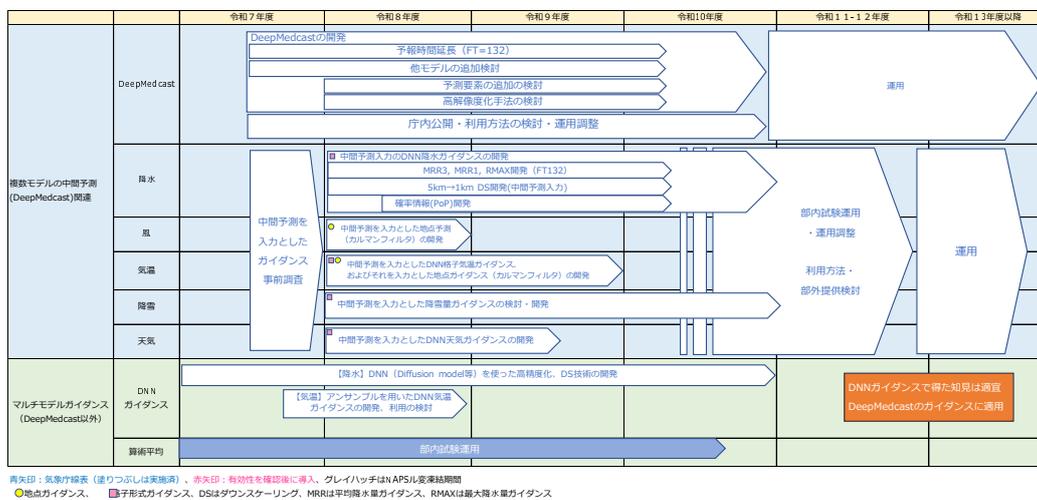


図 2.8.2 マルチモデルガイダンス開発計画

の活用によって統合し、単一の予測結果を出力するマルチモデルガイダンスの開発を行っている (図 2.8.3)。マルチモデルガイダンスは、各ガイダンスの予測を統合することで、ランダム誤差を軽減して予測精度の向上が見込まれる (高田 2018d) ほか、予報時間に対してシームレスな予測情報を提供したり、信頼度の高い確率情報を作成・提供したりすることが可能となる。

現在、マルチモデルガイダンスの降水 (平均降水量、最大降水量、確率情報)、風 (地点形式、格子形式)、気温 (地点形式、格子形式)、降雪量 (地点形式) については部内における試験運用を開始している。マルチモデル降水ガイダンスについては、LFM の令和 6 年 3 月に行われた予報時間延長の変更などを取り込む改良を令和 6 年 12 月に実施した。また、DNN 技術を用いたマルチモデルガイダンスとして、天気のカテゴリを対象とする天気ガイダンスの開発にも取り組んでおり、DNN 版の天気ガイダンスについては、令和 6 年 4 月から部内試験運用を開始して評価を行っている。

また、マルチモデルガイダンス技術として、複数のモデル間で物理的な整合性を保った中間状態を AI 技

術を用いて生成する技術 (中間予測、DeepMedcast) (Kudo 2025) の開発を進めている。これにより、物理的に解釈可能で予測精度の高い数値予報ガイダンスの作成を目指している。このような調査結果に基づき今後の開発計画についても見直しを行い、これまで開発した成果については部内試験運用を継続、その活用方法検討を進める一方で、更なる改良のための開発は、DNN 技術を用いた新たな手法を中心に進めていくこととした。ただし、このような新たな手法を用いたガイダンスの開発には一定程度時間がかかると見込まれており、現在のところ令和 12 年頃の導入を目指している。

参考文献

計盛正博, 石川宣広, 片山桂一, 2019: 数値予報システムおよびガイダンスの概要一覧表. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 116-143.
 気象庁予報部, 2018: ガイダンスの解説. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 248pp.
 Kudo, A., 2022: Statistical Post-Processing

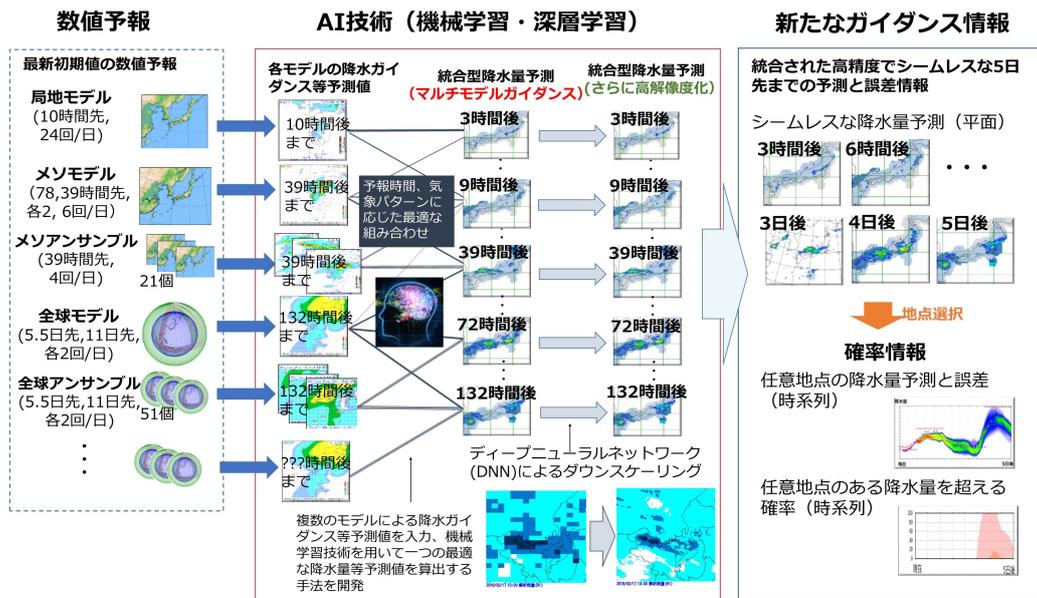


図 2.8.3 マルチモデルガイダンスの模式図

for Gridded Temperature Prediction Using Encoder–Decoder–Based Deep Convolutional Neural Networks. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 219–232, doi:10.2151/jmsj.2022-011.

Kudo, A., 2025: DeepMedcast: A Deep Learning Method for Generating Intermediate Weather Forecasts among Multiple NWP Models. *J. Meteor. Soc. Japan*, **103**, 613–628, doi:10.2151/jmsj.2025-031.

高田伸一, 2018a: ガイダンス概論. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 3–8.

高田伸一, 2018b: モデル更新への対応. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 88–90.

高田伸一, 2018c: 観測所の移設等の影響と対応. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 91–93.

高田伸一, 2018d: ガイダンスの今後. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 233–236.

2.9 季節アンサンブル予報システム

季節アンサンブル予報システム（季節 EPS）は、3 か月予報、暖・寒候期予報、エルニーニョ予測の基礎資料として利用されている。季節 EPS の予測モデルは、季節予報のために改良・調整を加えた GSM の低解像度版に気象研究所共用海洋モデル MRI.COM (Tsuji no et al. 2017) を結合した大気海洋結合モデルを用いている。数値予報ルーチンの大気初期値には全球大気解析、再予報¹の大気初期値には気候データ同化システム（第 2.10 節参照）、海洋初期値には数値予報ルーチン・再予報共に全球海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM) (Fujii et al. 2023) を使用している。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、社会経済活動への貢献に資するため、エルニーニョなどの日本域への影響も大きい熱帯起源の大気海洋現象の再現性などの向上が求められている。

季節 EPS の予測モデルについては、2022 年 2 月に JMA/MRI-CPS3 (Hirahara et al. 2023) へ大幅にバージョンアップしている。JMA/MRI-CPS3 では、大気及び海洋モデルの水平方向の高解像度化（大気：110 km から 55 km へ、海洋：東西 1 度・南北 0.5 度（渦非解像）から 0.25 度（渦許容）へ²）や鉛直層数の増強（大気：60 から 100 層へ、海洋：52 から 60 層へ）を行うとともに、より新しいバージョンの GSM 及び MRI.COM を使用して気候再現性の向上のための改良・調整を加えた。また、MOVE/MRI.COM についてはデータ同化手法を 3 次元変分法から 4 次元変分法へ変更するなどの高度化が行われ、更に海水データ同化の新規導入や摂動作成手法の改良も行われた。

2025 年は、2026 年 1 月の季節 EPS 更新に向けて、最終的な性能評価を進めるとともに、プロダクト構成の検討・調整などシステム更新に必要な準備全般を進めた。季節 EPS 更新後は、1 か月予報支援の役割についても季節 EPS が担うことになる。また、その作業と並行して、その次の季節 EPS 更新に向けた開発も進めた。中長期的には、大気海洋結合モデルの改善・高度化や地球システム要素の取り込み手法の高度化に向けた調査開発を進め、階層的³な地球システムモデルを使用した季節 EPS の構築をめざす。

¹ 再予報 (re-forecast) は、運用するモデルを用いて行う過去事例の予報実験。予報精度の評価やモデル統計値、系統誤差の計算のために行う。

² 海洋の渦は熱帯から中高緯度にかけて変形半径が小さくなるため (Hallberg 2013)、海洋モデルの解像度に応じて渦非解像 (eddy parameterizing：約 1 度格子)、渦許容 (eddy permitting：約 0.25 度格子)、渦解像 (eddy resolving：約 0.1 度格子) と区別されている。

³ ターゲットとする予測の精度向上に有効で、かつ、現実的に運用可能なコストで導入できる地球システム要素を段階的に取り込む

2.10 気候データ同化システム

季節 EPS の初期値作成や、気候系監視、異常気象分析、数値予報モデルの評価検証等には、長期間にわたって時間的・空間的に均質かつ再現性の高い過去の大気状態のデータが必要である。このような目的のために、利用可能な過去の観測データを、最新かつ一貫したデータ同化システムで解析するのが再解析であり、これを行うシステムが気候データ同化システムである。現在の気候データ同化システムの仕様は、2018 年 12 月時点の現業全球データ同化システムに準拠した解析システムを用いて計算を実施した、「気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q)」(Kosaka et al. 2024) と同じシステム（水平分解能 40 km、鉛直層数 100 層）であり、「JRA-3Q 準リアルタイムデータ」として継続運用している。

JRA-3Q は、1947 年 9 月から現在までの対象全期間の計算が 2022 年 11 月に完了し、2023 年 3 月より気象業務支援センターで全期間のデータ公開が開始された。また、他のデータ提供協力機関からの公開も順次進められ、データ統合・解析システム DIAS からは 2023 年 8 月以降、筑波大学計算科学研究センター CCS からは 2024 年 3 月以降、米国大気研究センター NCAR からは 2024 年 9 月以降、全期間のデータが公開されている。気象業務支援センターからはこれまで、データ容量の都合により解像度の粗いデータセット¹のみを公開してきたが、2025 年 4 月からは気象庁クラウド環境の活用により詳細なデータセット²の提供も開始された。

2025 年は、前述のデータ公開作業を進めたほか、全球解析へ導入済みの新規観測データについて、気候データ同化システムへの導入を 2026 年 1 月に実施すべく準備を進めた。また、WMO の全球気候再解析センターへの立候補に向けた準備を進めた。2024 年秋開催の第 6 回世界気候研究計画 (WCRP) 再解析国際会議 (ICR6) の開催報告を米国気象学会誌で出版 (Nakamura et al. 2025)、日本気象学会誌へ投稿した。日本気象学会 2025 年秋季大会の専門分科会「気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) と日本における今後の長期再解析の展望」を関係者と協力して開催した。ICR6 や本分科会での議論も踏まえつつ、次期長期再解析の実施に向けた中長期的な調査・検討を進め、検討状況について長期再解析推進懇談会で報告した³。

¹ <https://www.jmbasc.or.jp/jp/offline/hd0025.html>

² <https://www.jmbasc.or.jp/jp/online/cloud/x-online20001.html>

³ 令和 6 年度以降の資料は、https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/reanalysis_kondankai/reanalysis_kondankai.html で公開されている

2.11 波浪モデル

波浪モデル及びその初期値を作成する波浪客観解析には、地球全体を対象とする全球（水平分解能 27 km）と日本近海を対象とする沿岸（同 5 km）の 2 種類の対象領域を設けている。全球波浪モデルは外洋波浪図や外洋域を航行する船舶向けの波浪情報の発表に利用されている。沿岸波浪モデルは波浪警報・注意報や日本周辺の波浪予報の発表に利用されている。また、全球を対象とした水平分解能 55 km のモデルを使用する波浪アンサンブル予報システムは、2 日先から 5 日先までの早期注意情報（警報級の可能性）の発表に利用されている。仕様の詳細については竹内ほか (2012) や JMA (2025) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風防災に資するため、沿岸域などの高波をより精緻に表現することが求められている。

2025 年は、気象業務支援センターから提供する GPV の拡充、観測データの利用拡充、全球・沿岸波浪モデル用の台風ボーガスの改良、単精度化や格子系の改良等による高速化に向けた開発などを進めた。GPV 提供の拡充は 2026 年 4 月を予定している。また、新規衛星・高次処理観測データの利用等を 2026 年度に開始すべく準備を進めている。台風ボーガスについては、高潮モデル用の台風ボーガス作成手法をベースとした手法へ変更することにより、使用する予測情報の時間間隔など既知の課題のいくつかを軽減・解決することを目指しており、2027 年度出水期までの導入を目指している。また、高速化の開発を進めることにより、次世代（第 12 世代）のスーパーコンピュータシステムでは、沿岸波浪モデル程度の領域をカバーする高解像度（日本沿岸で 1.7 km）で高頻度に実行（8 回/日）する、メソモデルを外力とした波浪モデルの運用を目指している。中長期的には他にも、引き続き新規衛星観測データ利用を進めるとともに、台風ボーガス手法のさらなる改善、スーパーコンピュータシステムの仕様に応じた高速化と高解像度化等を検討している。

2.12 高潮モデル

高潮モデルは、高潮注意報・警報の発表で利用する日本域（水平分解能 沿岸部 1 km～沖合 16 km）と、台風委員会メンバー（国・地域）への高潮情報提供を主な目的とするアジア域（同 1.5～50 km）の 2 種類の対象領域を設けている。仕様の詳細について、日本域高潮モデルは林原 (2011) など、アジア域高潮モデルは Hasegawa et al. (2023) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風防災に資するため、台風に伴う高潮をより高い精度で予測することが求められている。日本域・アジア域の高潮モデルに関しては、高潮に関する早期注意情報（警

報級の可能性）の発表の開始等に向け、2022 年 8 月に以下のような内容で更新した。日本域高潮モデルの 00, 12UTC 初期時刻の予報時間を 78 時間へ延長するとともに、5 日先までの台風予報の信頼度も考慮した高潮予測に関する基礎資料とするため、日本域台風時高潮確率予報システム（日本域高潮 PFS）の運用を開始した。また、アジア域高潮モデルについては、沿岸部の解像度を 3.7 km から 1.5 km へ向上させるとともに、全球アンサンブル予報システムの 51 メンバー全てと全球決定論モデルを用いた 52 メンバーによるアンサンブル予報化、台風ボーガス手法へ陸域の影響による海上風の減衰の効果を導入し、予測精度を改善した新しいアジア域高潮アンサンブル予報システムとして運用を開始した。

2025 年は、アジア域高潮モデルの台風ボーガスについて、台風予報が途切れた先で台風ボーガスを緩やかに消すよう変更¹する等の改良を 1 月末に導入した。11 月には、日本域高潮モデル・日本域高潮 PFS の台風ボーガスで使用する定数（陸面粗度長）を、最新のメソ解析の結果を元に更新する等の変更を導入した。これらについての詳細は第 3.8 節を参照頂きたい。他にも、単精度化や格子系の改良等による高速化、台風ボーガスの改良（vortex relocation やプロファイル変更）、日本域高潮 PFS のメンバー生成手法の改良、潮汐スキームの開発なども進めた。さらには、非台風時における高潮早期注意情報を支援するための資料拡充に向けた検討も進めた。これらのうち、vortex relocation を始めとする台風ボーガス改良のアジア域高潮モデルへの適用については 2026 年度、日本域高潮モデルの格子系の改良による高速化とそれに伴う高解像度化については 2027 年度の導入を目指し開発を進めている。中長期的には他にも、台風ボーガス手法のさらなる改善、スーパーコンピュータシステムの仕様に応じた高速化と高解像度化を検討している。

2.13 海況監視予測システム

日本沿岸海況監視予測システム (MOVE/MRI.COM-JPN) は、海面水温や海流の 1 か月予報などの発表に利用されている。本システムは、全球（水平解像度 100 km、鉛直層数 60 層）-北太平洋（同 10 km、60 層）-日本近海（同 2 km、60 層）の 3 段階の海洋モデルと変分法データ同化システム (NPR-4DVAR 及び GLB-3DVAR) から構成される。仕様の詳細については Hirose et al. (2019) や Sakamoto et al. (2019) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開

¹ 台風予報は最大 120 時間先までであり、台風ボーガスも最大 120 時間先まで作成される。この変更を加える以前は、120 時間以降も台風であり続ける場合は 120 時間を境に、また、120 時間以前に台風でなくなる場合はその時刻を境に台風ボーガスが瞬時に無くなる仕様であり、不自然な潮位振動が発生する要因になっていた。

発重点計画」では、海況要因による水位上昇など沿岸防災に資する現象や、黒潮流路・海水の変動など社会・経済的に影響の大きい現象の再現性の向上が求められている。

2025 年は、数値計算の安定性向上と新しい衛星 (Sentinel-6 Michael Freilich) による海面高度データの利用を開始する改良を 2 月に導入した。2026 年 1 月の季節 EPS 更新と同時に、予測の 18 日より先で与える大気外力を従来の全球 EPS と JRA-3Q 気候値から季節 EPS へと切り替える計画であり、影響評価をはじめとする準備を進めた。また、季節 EPS 更新と同時に、衛星による海面高度の観測データの取得・デコード処理を現在よりも堅牢な処理へと更新する計画であり、そのための開発・準備を進めた。流域雨量指数を活用した沿岸域の塩分の再現性向上に向けた開発、気象研究所で開発・更新された最新版海洋モデルを利用するための開発なども進めている。中長期的には他にも、引き続き新規衛星観測データの同化利用を進めるとともに、スーパーコンピュータシステムの仕様に応じた高速化と高度化を検討している。

2.14 物質循環システム

2.14.1 黄砂解析予測システム

黄砂解析予測システムは黄砂情報の発表に利用されている。本システムでは、気象研究所の大気大循環モデル MRI-AGCM3 (Yukimoto et al. 2019) と全球エアロゾルモデル MASINGAR mk-2 (Yukimoto et al. 2019) を結合させたモデル (水平分解能 40 km、鉛直層数 40 層) を用いている。本システムでは、モデルで予測するエアロゾルの 3 次元分布から計算したエアロゾル光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness, AOT) と気象衛星ひまわりの観測データからリトリブされた AOT を 2 次元変分法 (Yumimoto et al. 2018) を用いてデータ同化することで観測情報を取り込んでいる。仕様の詳細については 田中・小木 (2017)、小木ほか (2022) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、黄砂プロダクトの高度化のため、エアロゾルの予測精度向上が求められている。

2025 年は、本システムの改善に向け、GCOM-C/SGLI データの利用に向けた調査や、ひまわりエアロゾルプロダクト (可視・近赤外) に含まれる観測時刻に依存するバイアスについての調査を行った。また、2026 年度の導入を目指し、気象研究所が開発を進める最新の地球システムモデルをベースとして、黄砂と紫外線のシステム統合に向けた開発を本格的に開始した。中長期的な課題としては他にも、極軌道衛星などの衛星観測データ利用の高度化や他の予測システムでのエアロゾル解析値の利用などがある。

2.14.2 紫外線予測システム

紫外線予測システムは紫外線情報の発表に利用されている。本システムでは、大気大循環モデル MRI-AGCM3 (Yukimoto et al. 2019) と化学輸送モデルを結合させたモデル MRI-CCM2.1 (Deushi and Shibata 2011; Yukimoto et al. 2019) (水平分解能 110 km、鉛直層数 64 層) を用いており、即時的に利用可能な衛星データ (オゾン全量) による観測情報を取り込んでいる。仕様の詳細については JMA (2025) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、紫外線プロダクトの高度化のため、オゾンの予測精度向上が求められている。

2025 年は、データ同化手法の高度化に向けた開発を進め、ナudgingから 2 次元変分法への変更を始めとする改良を 12 月に実施した (詳細は第 3.9 節を参照)。また、第 2.14.1 項で述べた通り、黄砂と紫外線のシステム統合に向けた開発を進めた。中長期的な開発課題としては他にも、衛星観測データ利用の高度化などがある。

2.14.3 大気汚染気象予測システム

大気汚染気象予測システムは大気汚染気象予報の支援を目的として運用されてきた。2025 年 1 月末に大気汚染気象予報業務は終了となったことから 2 月に運用を終了した。

2.14.4 二酸化炭素解析システム

二酸化炭素解析システムは二酸化炭素分布情報 (池上ほか 2009) の発表に利用されている。本システムでは、全球モデル GSM に二酸化炭素の輸送過程を組み込んだモデル GSAM-TM (Nakamura et al. 2015) とベイズ統合逆解析による二酸化炭素の放出・吸収量の補正を組み合わせた手法を用いている。現在の GSAM-TM は水平分解能 110 km、鉛直層数は 60 層で運用している。

2025 年は、気象研究所の支援により、当システムの実行環境や運用マニュアルの整備、WMO 温室効果ガス世界資料センターが提供する観測データの仕様変更への対応作業が進められた。温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT による CO₂ 観測データを逆解析へ導入する技術開発が気象研究所で行われており (Maki et al. 2023)、今後導入が検討されている。

参考文献

- Deushi, M. and K. Shibata, 2011: Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model version 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry. *Pap. Meteor. Geophys.*, **62**, 1–46, doi:10.2467/mripapers.62.1.
- Fujii, Y., T. Yoshida, H. Sugimoto, I. Ishikawa, and S. Urakawa, 2023: Evaluation of a global ocean reanalysis generated by a global ocean data as-

- simulation system based on a Four-Dimensional Variational (4DVAR) method. *Front. Clim.*, doi:10.3389/fclim.2022.1019673.
- Hallberg, R., 2013: Using a resolution function to regulate parameterizations of oceanic mesoscale eddy effects. *Ocean Modelling*, **72**, 92–103, doi:10.1016/j.ocemod.2013.08.007.
- Hasegawa, H., J. Sugano, T. Fukuura, and M. Higaki, 2023: Upgrade of JMA's Storm Surge Prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS) in 2022. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **25**, 1–14.
- 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.
- Hirahara, S., Y. Kubo, T. Yoshida, T. Komori, J. Chiba, T. Takakura, T. Kanehama, R. Sekiguchi, K. Ochi, H. Sugimoto, Y. Adachi, I. Ishikawa, and Y. Fujii, 2023: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System Version 3 (JMA/MRI-CPS3). *J. Meteor. Soc. Japan*, doi:10.2151/jmsj.2023-009, accepted.
- Hirose, N., N. Usui, K. Sakamoto, H. Tsujino, G. Yamanaka, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Fujii, and N. Kohno, 2019: Development of a new operational system for monitoring and forecasting coastal and open-ocean states around Japan. *Ocean Dynamics*, **69**, 1333–1357, doi:10.1007/s10236-019-01306-x.
- 池上雅明, 藤田建, 平原隆寿, 竹内綾子, 須田一人, 眞木貴史, 森一正, 2009: 二酸化炭素分布情報について. *測候時報*, **76**, 4–6, URL <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/76/vol76p221.pdf>.
- JMA, 2025: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan, 262 pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2025-nwp/index.htm>).
- 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, doi:10.2151/jmsj.2024-004.
- Maki, T., K. Kondo, K. Ishijima, T. T. Sekiyama, K. Tsuboi, and T. Nakamura, 2023: Independent Bias Correction Method for Satellite Observation Data Introduced to CO₂ Flux Inversion. *SOLA*, **19**, 157–164, doi:10.2151/sola.2023-021.
- Nakamura, H., S. Kobayashi, M. A. Wanzala, F. Adloff, L. Cheng, A. Cobb, D. Dee, A. El Akkraoui, M. Fujiwara, H. Hersbach, H. Naoe, S. I. Rani, N. Rayner, A. Simmons, L. Slivinski, T. Tanaka, P. Thorne, C. Yang, Y. Yin, A. S. Ayinde, A. Banerjee, M. G. Bosilovich, L. C. M. Buella, B. Dong, S. Fukui, N. Hirose, H. Ikeuchi, N. Krakauer, A. Lenouo, B. Niraula, C. L. G. Oikonomou, S. Sekizawa, N. Sharma, A. Yamazaki, and T. Yoshida, 2025: Toward Future Reanalyses That Meet Evolving Needs in Science, Public Services, Policymaking, and Socioeconomic Activity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **106**, E1445–E1453, doi:10.1175/BAMS-D-25-0126.1.
- Nakamura, T., T. Maki, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, and Y. Niwa, 2015: Improvement of Atmospheric CO₂ Inversion Analysis at JMA. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, URL <https://agu.confex.com/agu/fm15/meetingapp.cgi/Paper/64173>, A31B-0033.
- 小木昭典, 松本隆則, 北島俊行, 田中泰宙, 弓本桂也, 関山剛, 眞木貴史, 2022: 気象庁全球黄砂解析予測モデルにおけるエーロゾルデータ同化手法の導入について. *測候時報*, **89**, 1–15.
- Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, N. Hirose, N. Usui, and G. Yamanaka, 2019: Development of a 2-km resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application. *Ocean Dynamics*, **69**, 1181–1202, doi:10.1007/s10236-019-01291-1.
- 竹内仁, 高野洋雄, 山根彩子, 松枝聡子, 板倉太子, 宇都宮忠吉, 金子秀毅, 長屋保幸, 2012: 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望. *測候時報*, **79**, S25–58.
- 田中泰宙, 小木昭典, 2017: 気象庁全球黄砂予測モデルの更新について. *測候時報*, **84**, 109–128.
- Tsujino, H., H. Nakano, K. Sakamoto, S. Urakawa, M. Hirabara, H. Ishizaki, and G. Yamanaka, 2017: Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4). *Tech. Rep. MRI*, **80**, doi:10.11483/mritechrepo.80.
- Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**,

931–965, doi:10.2151/jmsj.2019-051.

Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, M. Yoshida, M. Kikuchi, T. M. Nagao, H. Murakami, and T. Maki, 2018: Assimilation and Forecasting Experiment for Heavy Siberian Wildfire Smoke in May 2016 with Himawari-8 Aerosol Optical Thickness. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 133–149, doi: 10.2151/jmsj.2018-035.

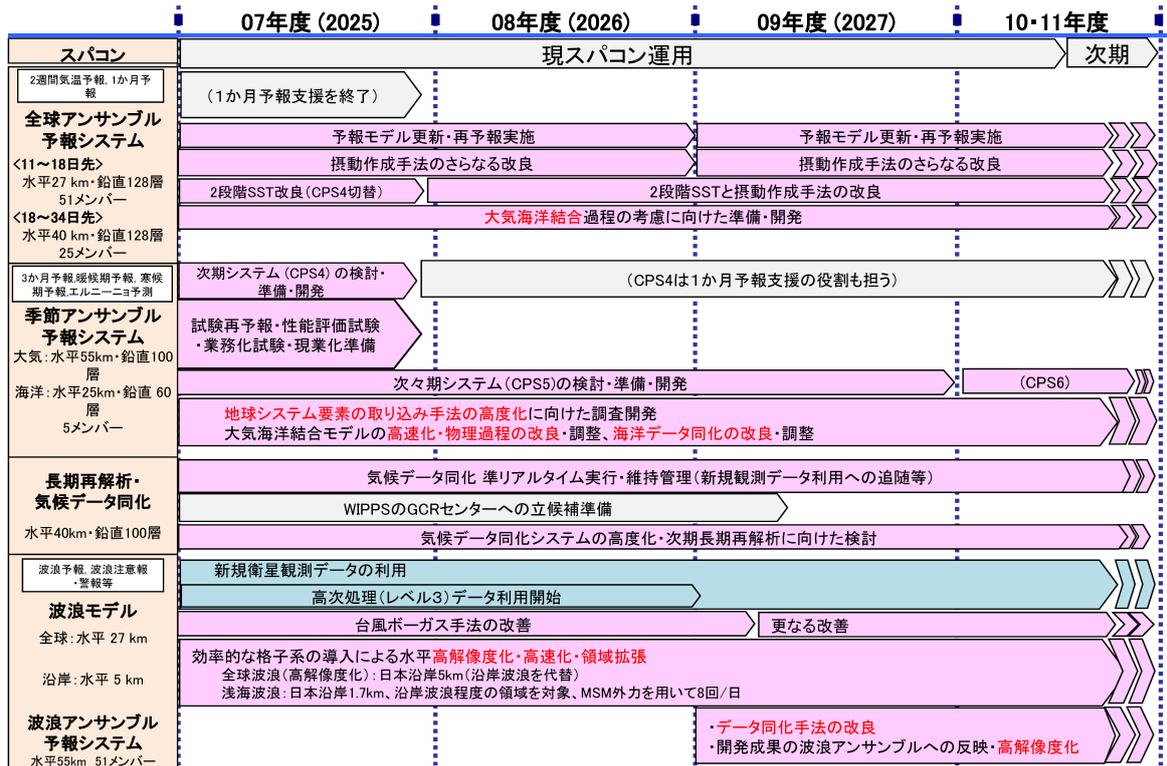


図 2.14.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデルの開発計画

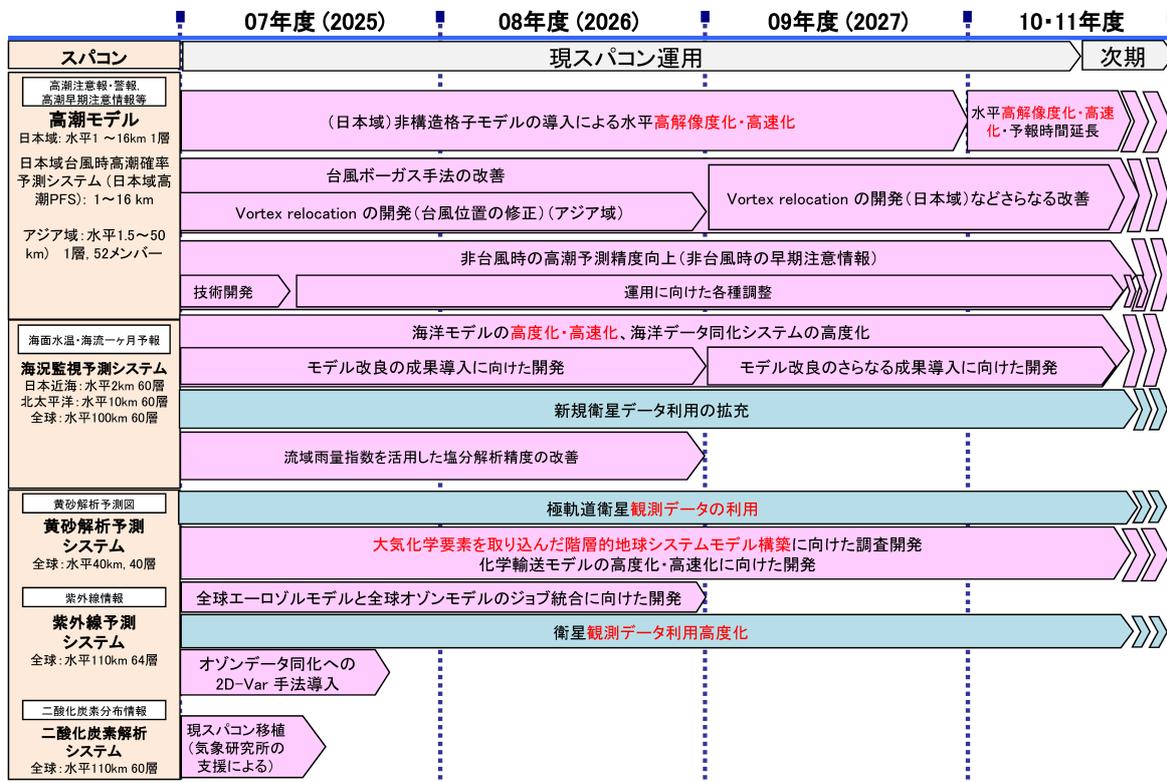


図 2.14.2 高潮モデル、海況監視予測システム、物質循環システムの開発計画

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。

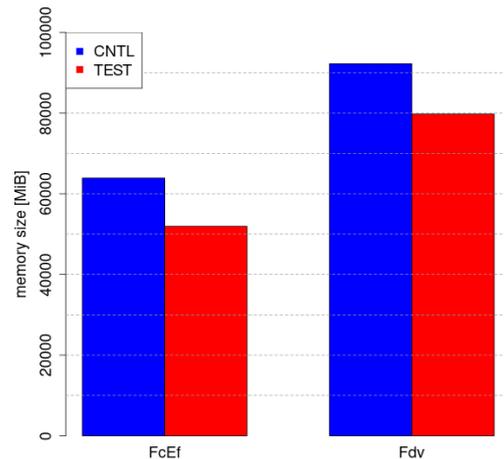


図 3.2.1 132 時間予測 (FcEf、解像度：TQ959L128) と全球 4D-Var (Fdv、解像度：TL319L128) における 1 計算ノードあたりのメモリ使用量 [MiB] の最大値。青は CNTL、赤は TEST を表す。

(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。

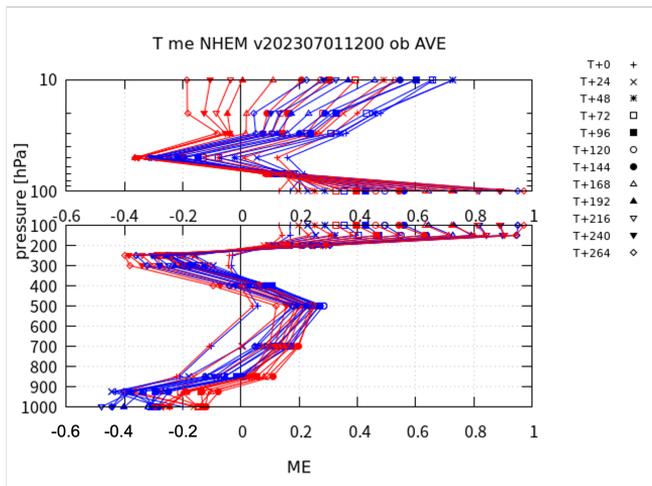


図 3.2.2 夏期間の北半球 (20°N-90°N) における気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差 [K] の予報時間間隔 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。青は CNTL、赤は TEST を表す。

(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。

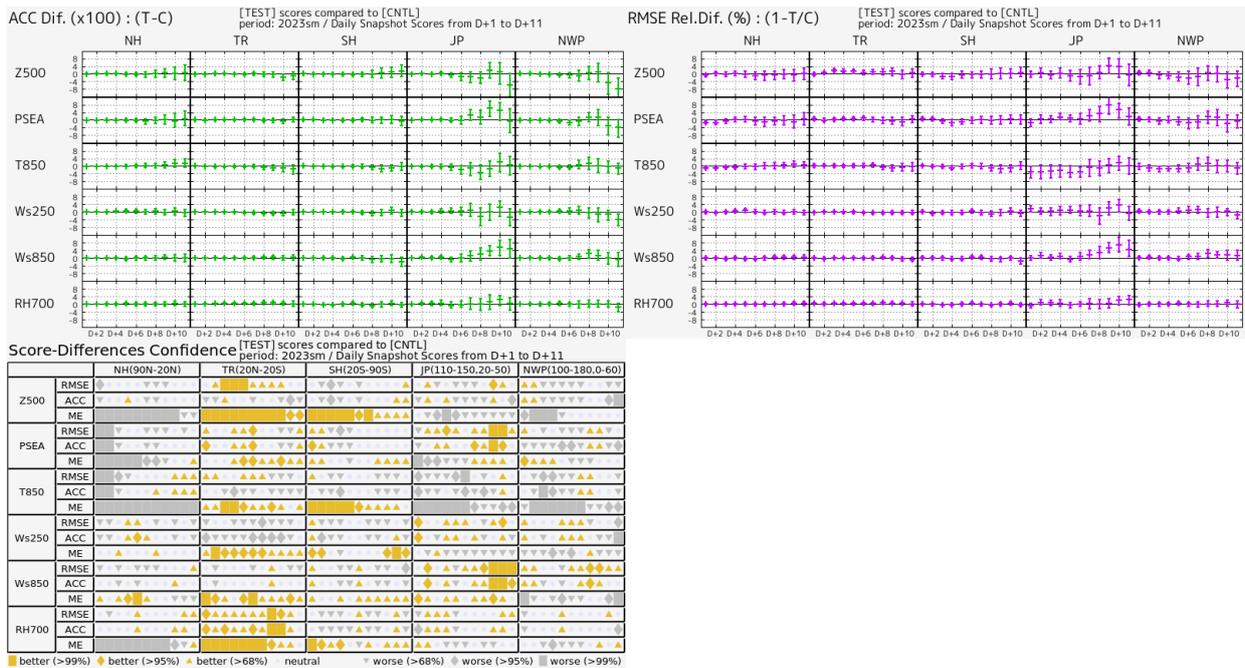


図 3.2.3 夏期間における対流圏主要要素の ACC の改善幅 (左上図)、RMSE の改善率 (右上図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (左下図: スコアカード)。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S–20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E–150°E, 20°N–50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E–180°E, 0°–60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 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。

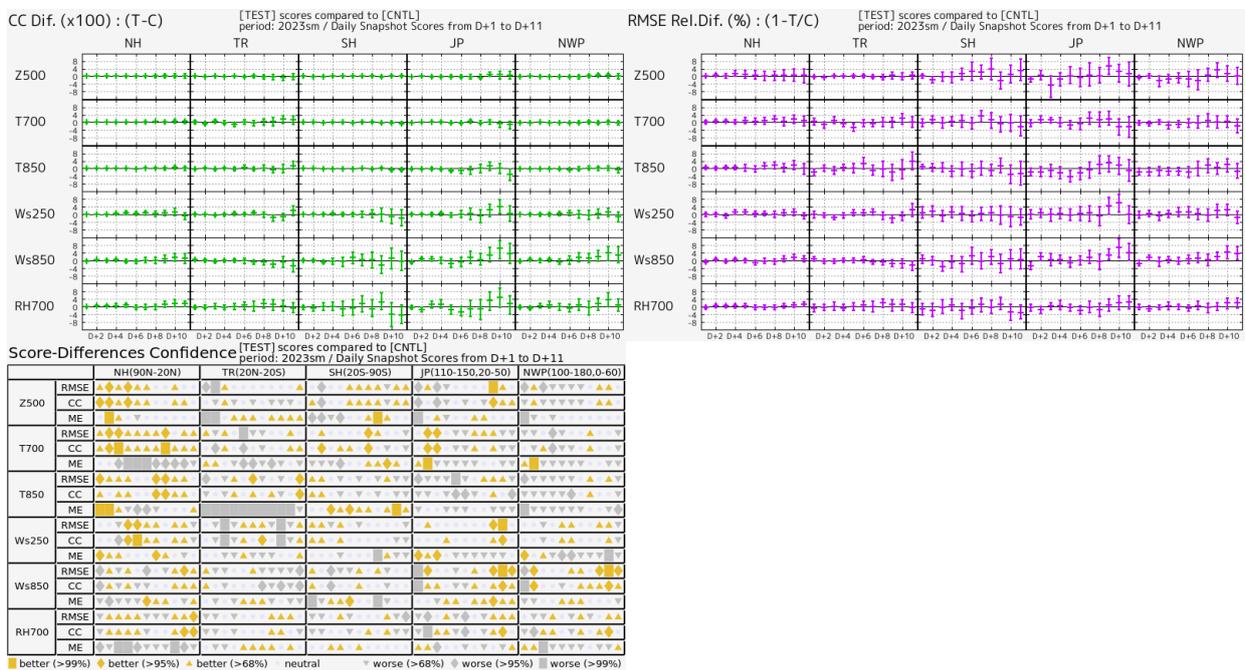


図 3.2.4 夏期間における対流圏主要要素の CC の改善幅 (左上図)、RMSE の改善率 (右上図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (左下図: スコアカード)。ラジオゾンデを参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S–20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E–150°E, 20°N–50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E–180°E, 0°–60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、700 hPa 気温 (T700)、850 hPa 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。

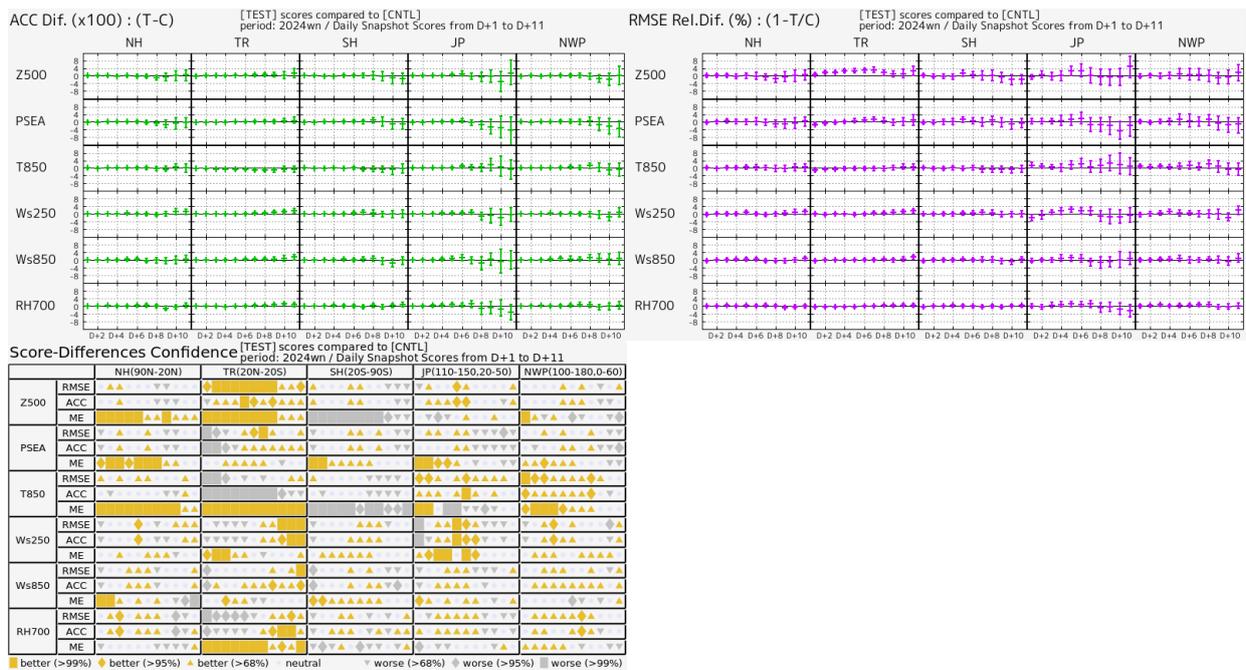


図 3.2.5 冬期間についての解析値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.3 と同じ。

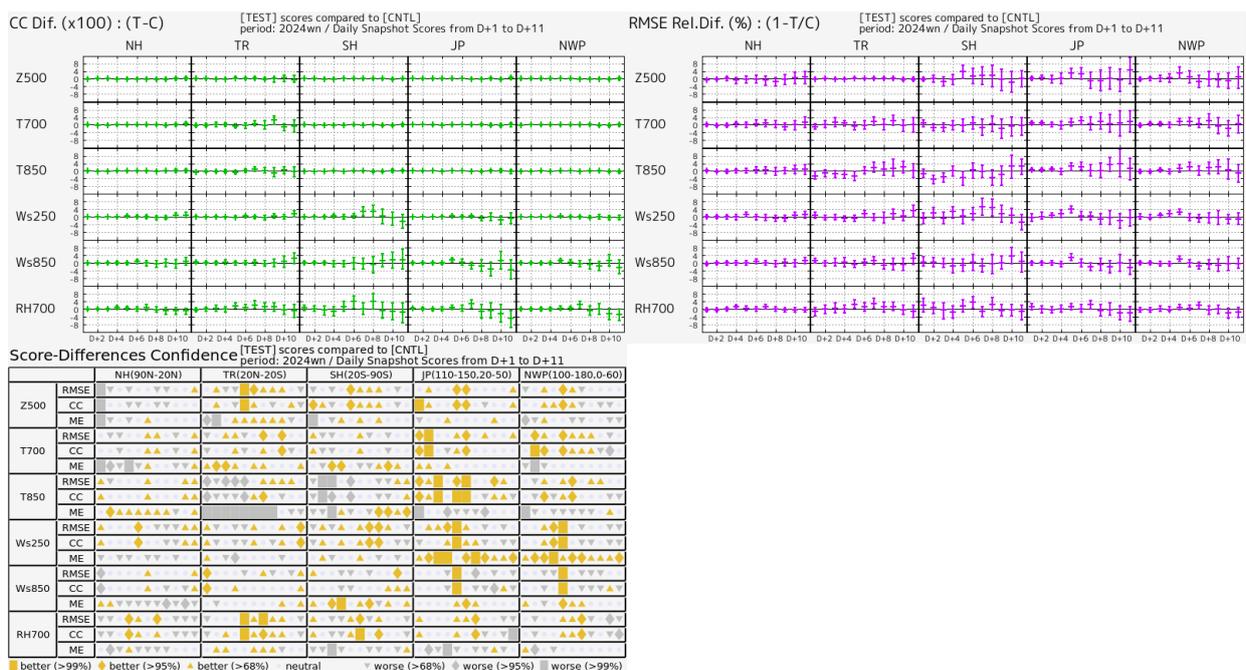


図 3.2.6 冬期間についてのラジゾンデ観測値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.4 と同じ。

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。値が小さいほど精度が高いことを意味する。

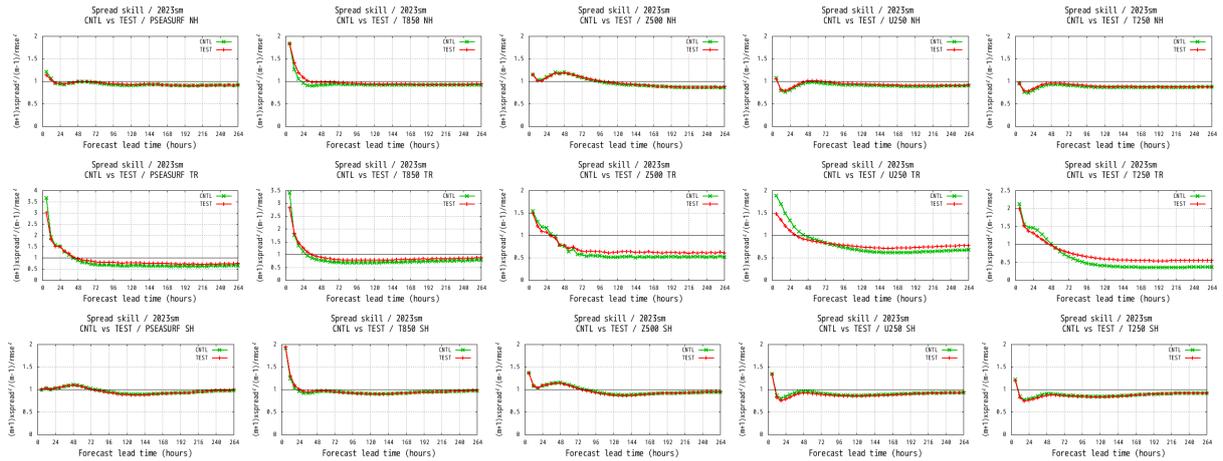


図 3.3.1 夏実験における予報時間ごとのスプレッドスキル。左から海面更正気圧、850 hPa 気温、500 hPa 高度、250 hPa 東西風、250 hPa 気温。上から検証領域が北半球 (90°N - 20°N)、熱帯 (20°N - 20°S)、南半球 (20°S - 90°S)。緑線が CNTL、赤線が TEST。1 (黒線) が理想的なばらつきを表す。

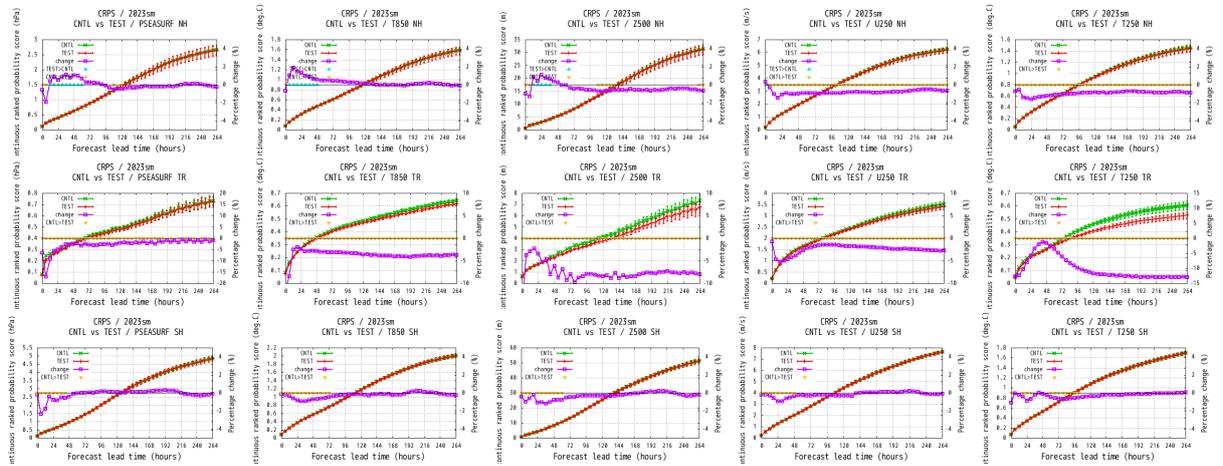


図 3.3.2 図 3.3.1 と同様、ただし対解析値の CRPS を表す。左から海面更正気圧 [hPa]、850 hPa 気温 [K]、500 hPa 高度 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]、250 hPa 気温 [K]。紫線は変化率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL}[\%])$ 、右縦軸で、水色の Δ 、黄色の ∇ はそれぞれ、TEST が CNTL に対してブートストラップ法で有意水準 5% で有意に増加、減少していることを表す。

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。

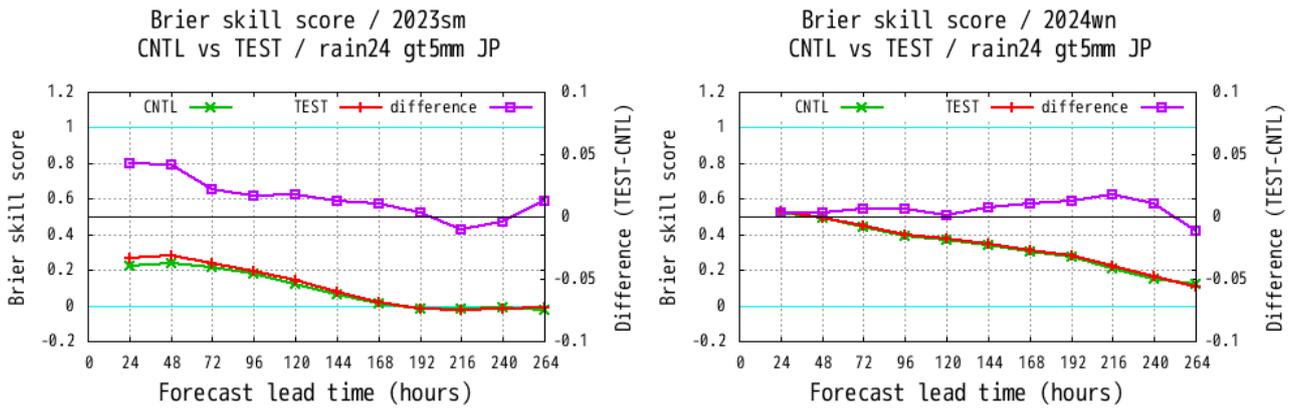


図 3.3.3 夏実験 (左)、冬実験 (右) における 5 mm/24h を閾値とする降水確率予測の対アメダス観測値の BSS。緑線が CNTL、赤線が TEST、紫線が TEST-CNTL (右縦軸) を表す。

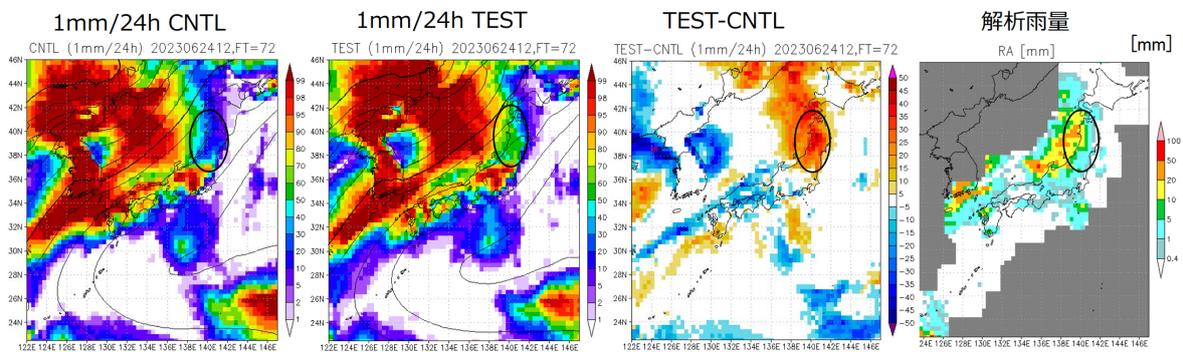


図 3.3.4 2023年6月24日12UTC初期値のFT=72の前24時間降水量予測の1mm/24hの超過確率 (左からCNTL、TEST、TEST-CNTL) と対応する時刻の解析雨量 (右)。左2つの図の等値線はアンサンブル平均の海面更正気圧を表す。

(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

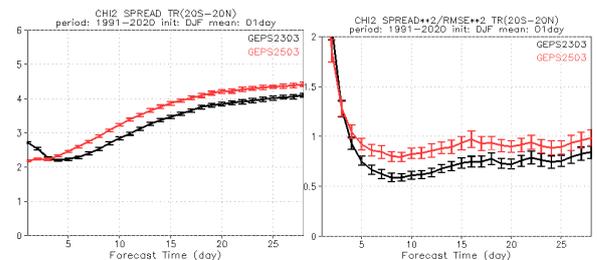


図 3.3.5 再予報型実験における熱帯域での200hPa速度ポテンシャルのスペルッド(左)とスペルッドスキル(右)の予報時間時系列。バイアス補正なし。冬初期日サンプルの結果。黒線はCNTL、赤線はTESTを表す。

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

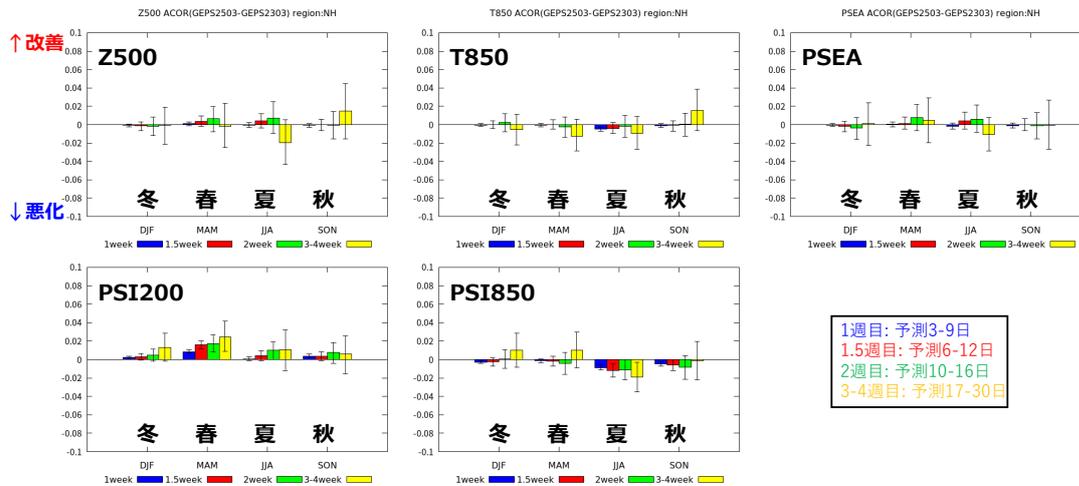


図 3.3.6 再予報型実験でのアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差 (TEST-CNTL)。北半球域、バイアス補正なし。上段は左から 500hPa 高度、850hPa 気温、海面更正気圧、下段は左から 200hPa 流線関数、850hPa 流線関数。各図内は左から冬 (12,1,2 月)、春 (3,4,5 月)、夏 (6,7,8 月)、秋 (9,10,11 月) でそれぞれ検証した結果を示す。検証の対象とした予報時間は図中の凡例を参照。

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(WMO2021)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。

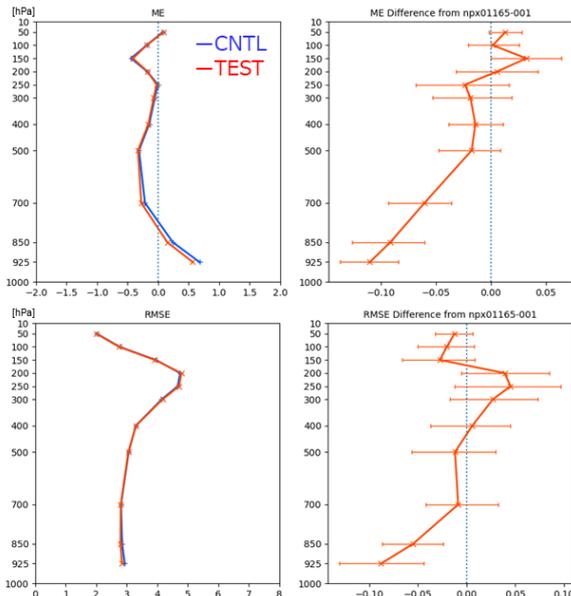


図 3.4.1 夏期間における、風速の 24 時間予測の対ラジオゾンデ検証。上が平均誤差 [m/s]、下が RMSE [m/s]。左が CNTL (青線)、TEST (赤線) のそれぞれの検証結果、右は TEST と CNTL の差。右図の差のエラーバーは 95% 信頼区間。縦軸が高度 [hPa]、横軸が誤差 [m/s]。

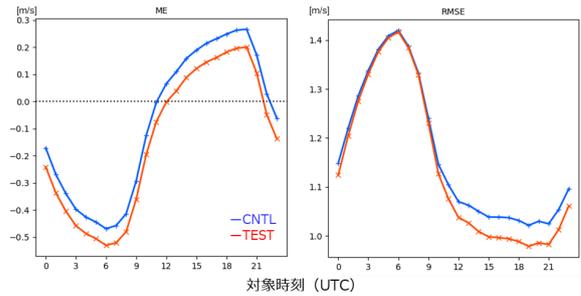


図 3.4.2 夏期間における、地上観測に対する風速の対象時刻別 (横軸、UTC) 検証。左が平均誤差、右が RMSE。縦軸が誤差 [m/s]。青線が CNTL、赤線が TEST を表す。

(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

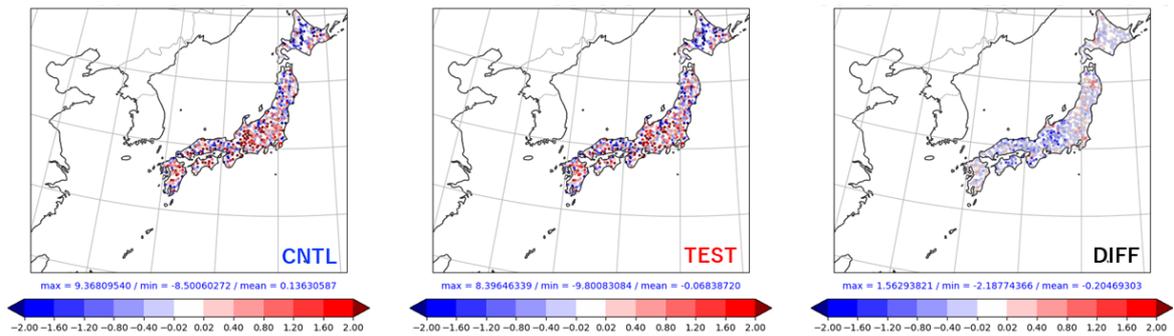


図 3.4.3 2023 年 8 月 15 日 12 時 (日本時) を対象とする地上風速の 24 時間予測の検証結果。各点は地上観測との差 [m/s]。左が CNTL、中央が TEST、右が TEST と CNTL の差。暖色系で正バイアス、寒色系で負バイアスを表す。

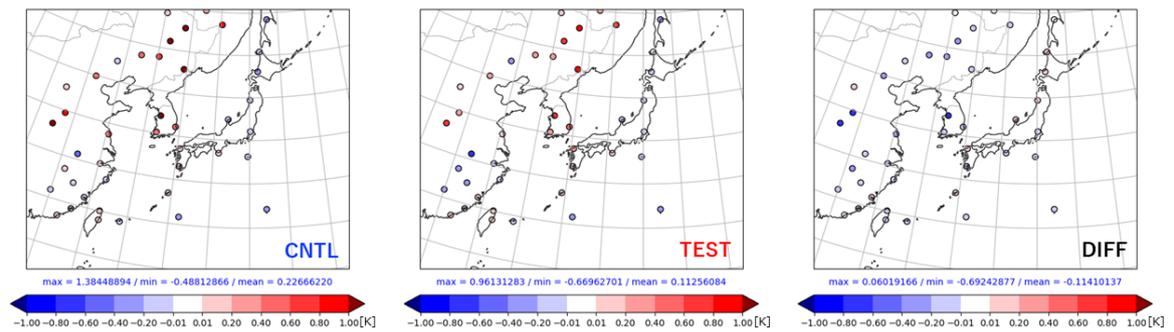


図 3.4.4 夏期間における、ラジオゾンデ観測を参照値とする高度 925hPa 気温の 24 時間予測の平均誤差。左が CNTL、中央が TEST、右が TEST と CNTL の差。暖色系で正バイアス、寒色系で負バイアスを表す。

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.

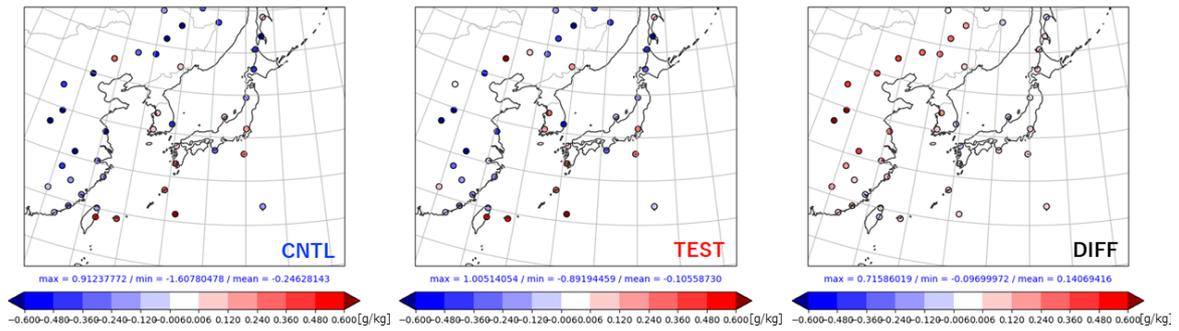


図 3.4.5 夏期間における、ラジオゾンデ観測を参照値とする高度 925hPa 水蒸気混合比の 24 時間予測の平均誤差。左が CNTL、中央が TEST、右が TEST と CNTL の差。暖色系で正バイアス、寒色系で負バイアスを表す。

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

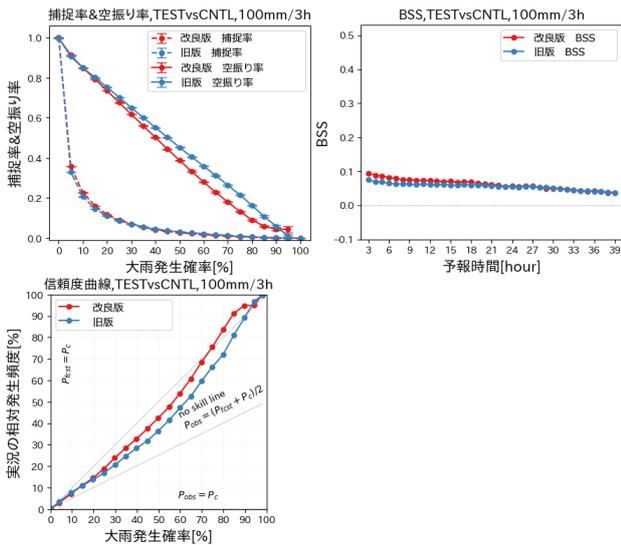


図 3.5.1 100 mm/3h 以上を対象とした、改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）、旧版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）の捕捉率および空振り率（左上図）、同じく FT 毎のプライアスキルスコア（右上図）、同じく信頼度曲線（左下図）。検証対象領域は全国、予報時間は 3～39 時間、検証期間は 2023、2024 年の夏期（5 月 1 日～9 月 30 日）。

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

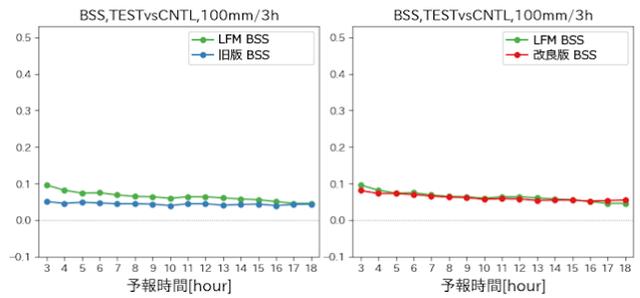


図 3.5.2 100 mm/3h 以上を対象とした、MSM 大雨発生確率ガイダンス、LFM 大雨発生確率ガイダンスのプライアスキルスコアの検証結果。左図は旧版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）、右図は改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）について、それぞれ LFM 大雨発生確率ガイダンス（緑線）との比較を行ったもの。検証領域は全国、予報時間は 3～18 時間。検証期間は 2023 年夏季（6 月 1 日～9 月 30 日）。LFM 大雨発生確率ガイダンスについては 2023 年期間を学習データから抜いたクロスバリデーション検証の結果。

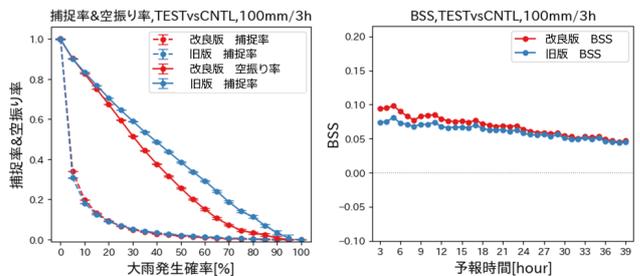


図 3.5.3 100 mm/3h 以上を対象とした、MEPS 大雨発生確率ガイダンスの改良版（赤線）、旧版（青線）のアンサンブル平均値についての検証結果。それぞれ捕捉率・見逃し率（左図）、プライアスキルスコア（右図）の図。検証領域は全国、予報時間は 3～39 時間。検証期間は 2023、2024 年の夏期（5 月 1 日～9 月 30 日）。

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

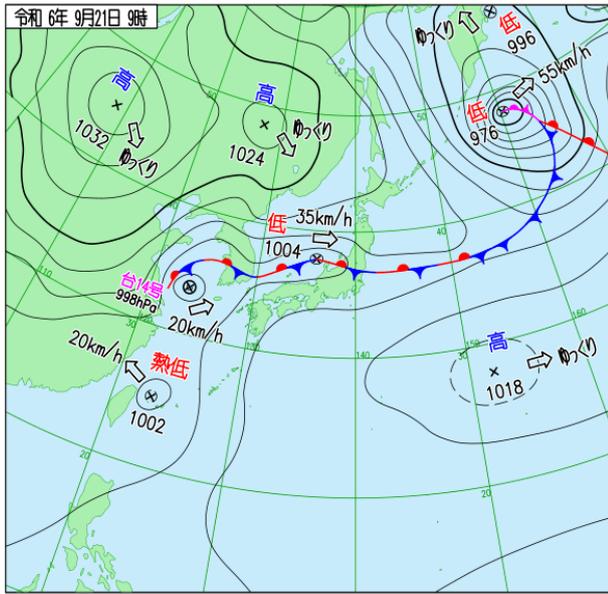


図 3.5.4 2024 年 9 月 21 日 09 時の地上天気図

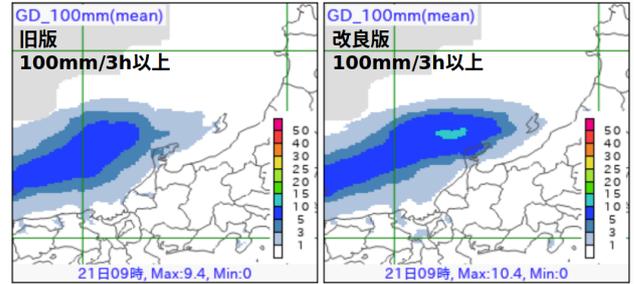


図 3.5.6 2024 年 9 月 21 日 09 時を対象とした FT=21 の MEPS 大雨発生確率ガイダンスの 100 mm/3h 以上を対象とした確率のアンサンブル平均値。左図は旧版、右図は改良版。

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.

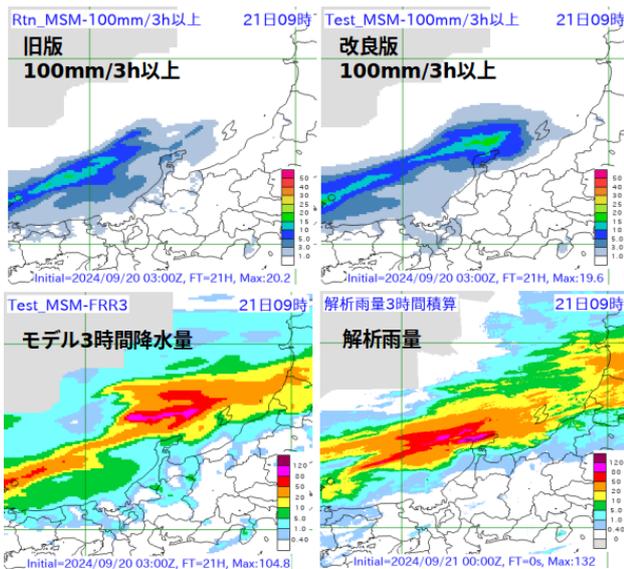


図 3.5.5 2024 年 9 月 21 日 09 時を対象とした旧版 MSM 大雨発生確率ガイダンス (左上)、改良版 MSM 大雨発生確率ガイダンス (右上)、MSM モデル 3 時間地上降水量 (左下)、3 時間積算解析雨量 (右下) の分布。ガイダンス、モデルについては FT=21 の予測。ガイダンスについては 100 mm/3h 以上を対象とした確率。

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。

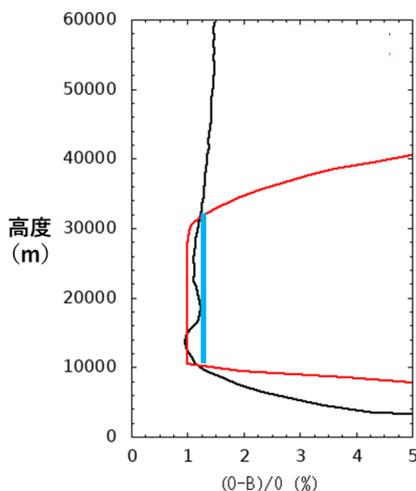


図 3.6.1 観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差 (黒線)、更新前 (赤線) 及び更新後 (青線) の観測誤差について、観測値で規格化 [%] した鉛直高度分布 (m)

(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)。

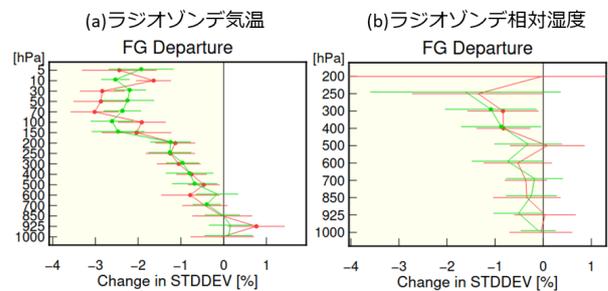


図 3.6.2 観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の CNTL に対する TEST の変化率 [%]。赤線は夏季間、緑線は冬季を示す。(a) ラジオゾンデ気温、(b) ラジオゾンデ相対湿度。エラーバーは 95% 信頼区間、丸点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

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

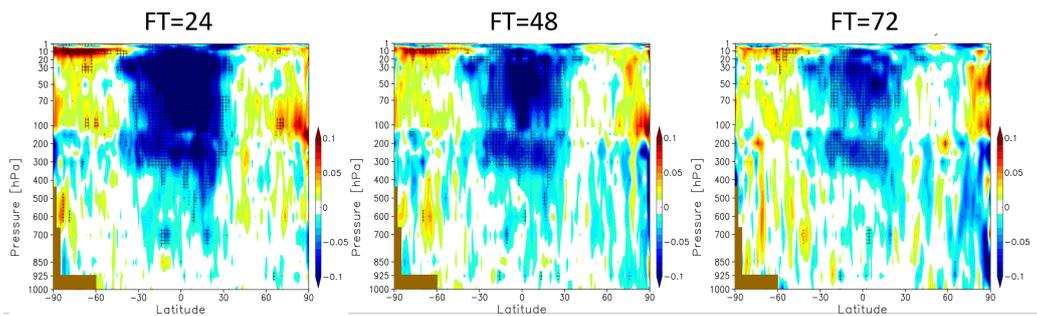


図 3.6.3 冬季実験における気温予測の RMSE の CNTL に対する TEST の変化率 [%] の鉛直緯度別帯状平均分布。左から順に、24 時間予測、48 時間予測、72 時間予測。参照値は ERA5。寒色系は改善、暖色系は改悪を示す。図中の茶色の部分は南極大陸付近にてマスキングした領域を示す。

- 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

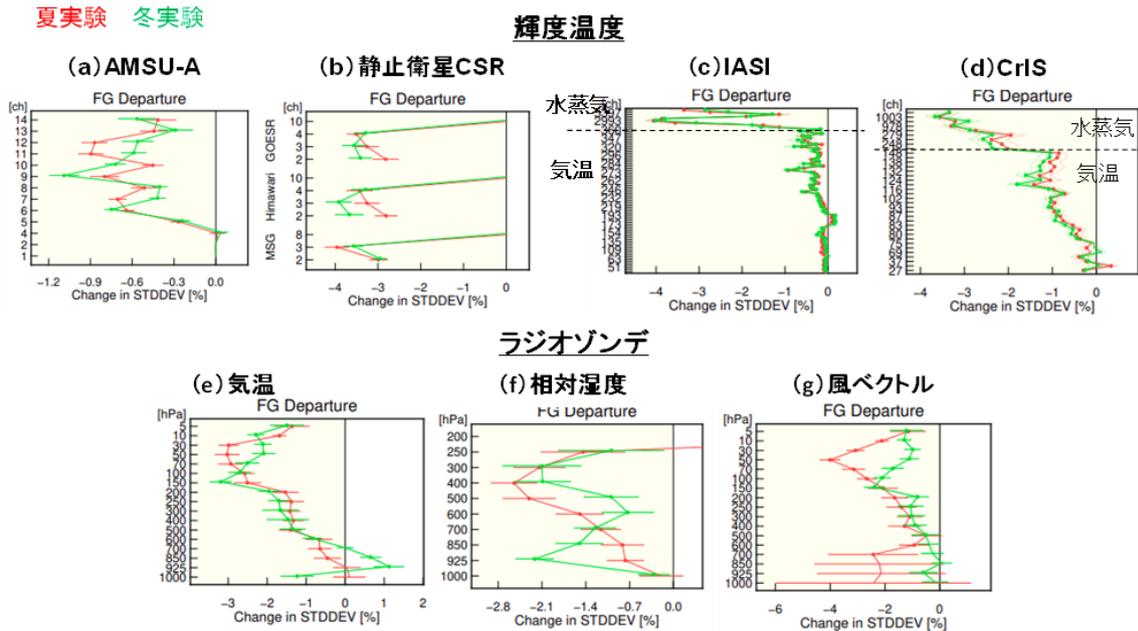


図 3.6.4 観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の CNTL に対する TEST の変化率 [%]。赤線は夏季、緑線は冬季を示す。上段：(a) マイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b) 静止衛星晴天輝度温度 (CSR)、(c) ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI、(d) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS、下段：(e) ラジオゾンデ気温、(f) ラジオゾンデ相対湿度、(g) ラジオゾンデ風ベクトル。エラーバーは 95%信頼区間、丸点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。上段 (a)~(d) の輝度温度データについては、観測演算子 RTTOV の変更 (3.6.2(1))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

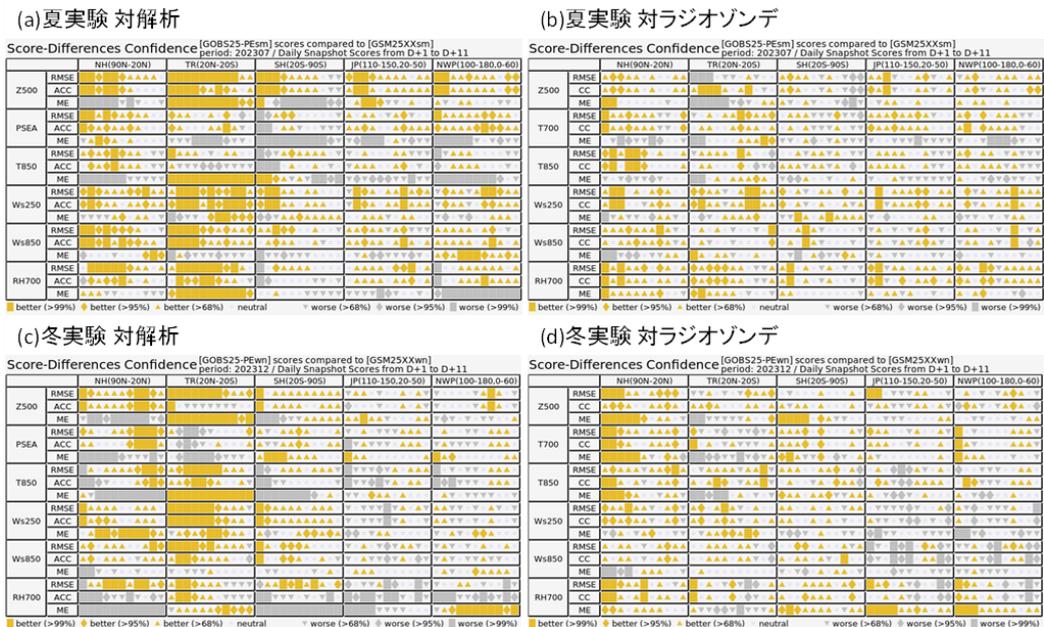


図 3.6.5 対流圏主要要素の TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (スコアカード)。検証期間と参照値は、(a) 夏季、解析値、(b) 夏季、ラジオゾンデ観測値、(c) 冬季、解析、(d) 冬季、ラジオゾンデ観測値。検証対象の領域は、NH が北半球 (20° N 以北)、TR が熱帯 (20° S-20° N)、SH が南半球 (20° S 以南)、JP が日本周辺 (110° E-150° E, 20° N-50° N)、NWP が北西太平洋領域 (100° E-180° E, 0° -60° N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (P5EA) 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.

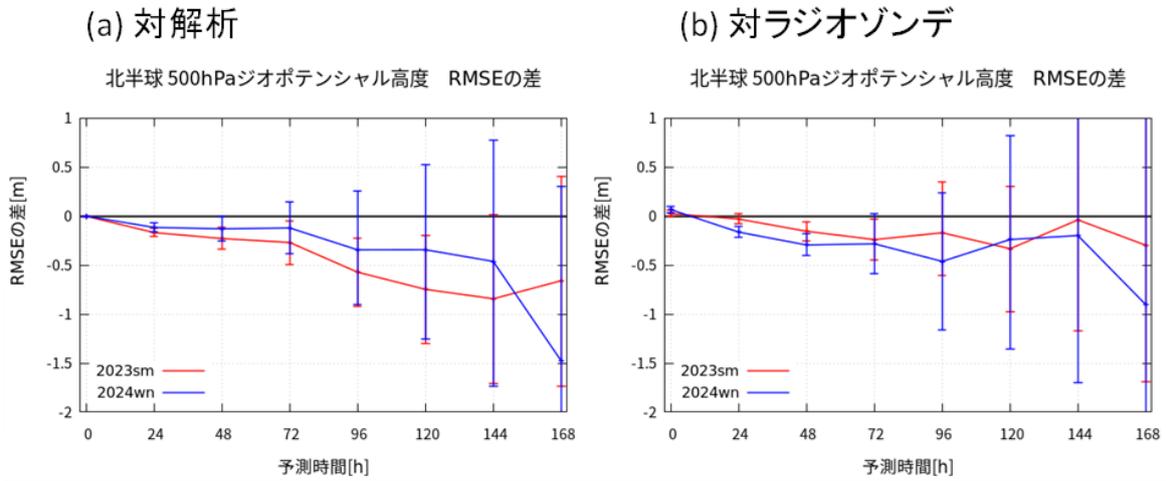


図 3.6.6 北半球 (20° N 以北) での 500 hPa 高度場の RMSE[m] の CNTL に対する TEST の差の予測時間 [hour] 別に示した検証結果。参照値は、(a) 解析値、(b) ラジオゾンデ。赤線が夏季、青線が冬季を示す。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味する。エラーバーは 95%信頼区間を表す。

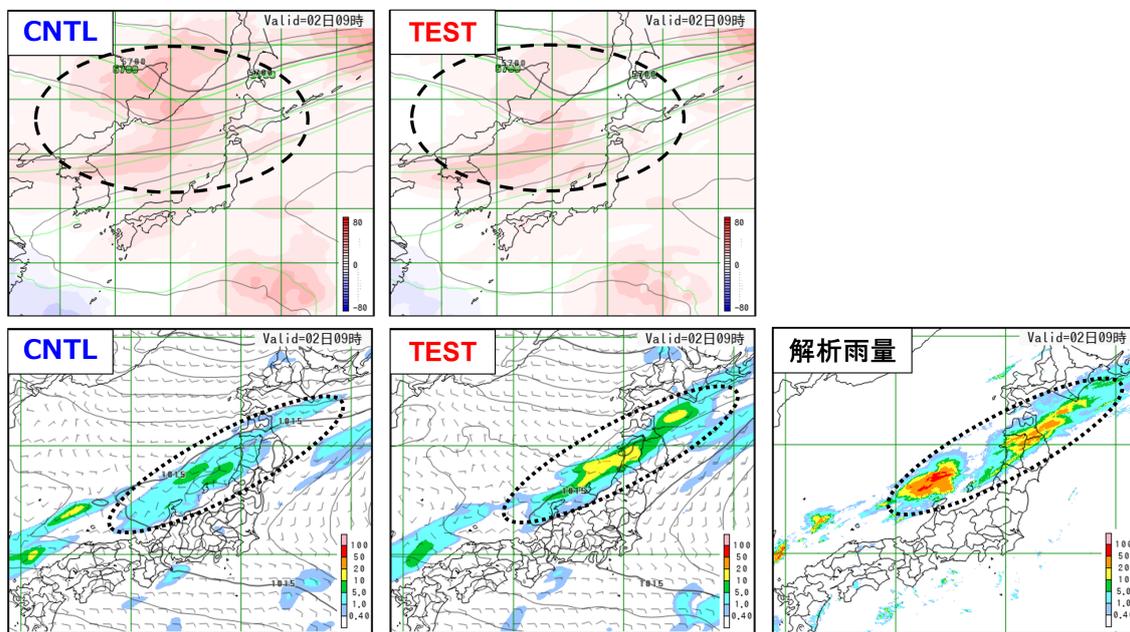


図 3.6.7 2023 年 9 月 2 日 9 時 (日本時間) を対象とした、(上段) 500 hPa ジオポテンシャル高度の 48 時間予測、(下段) 前 3 時間降水量 [mm/3h] の 48 時間予測と解析雨量。上段各図の黒線、緑線及び陰影は予測、予測対象時刻の解析と予測誤差を示す。

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。

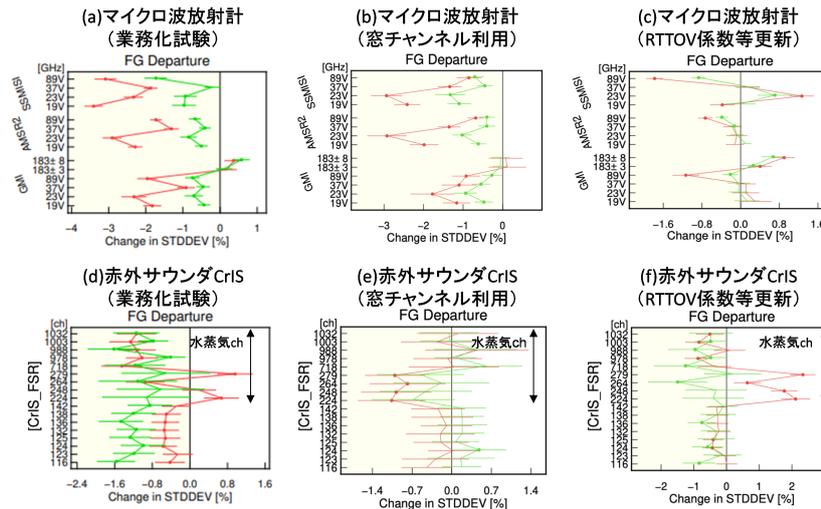


図 3.7.1 メソ解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。上段 (a) (b) (c) はマイクロ波イメージャ GMI, AMSR2 及び SSMIS、下段 (d) (e) (f) は赤外サウンダ CrIS についての結果。CrIS は上から 9 チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。左列 (a) (d) に業務化試験の結果、中央列 (b) (e) に変更項目 (2) のマイクロ波気温サウンダ窓チャンネル利用の単体試験の結果、右列 (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 3.7.1)。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ー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ージャ、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。

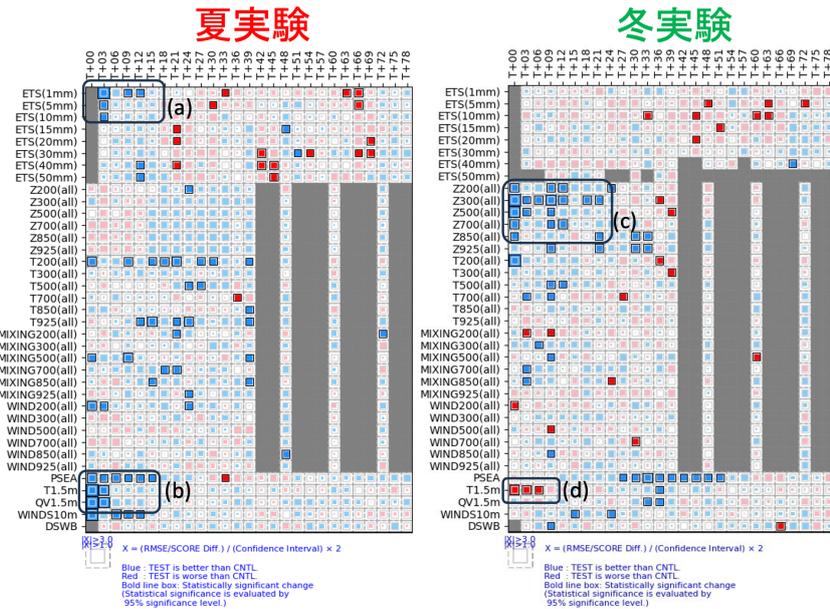


図 3.7.2 メソ数値予報システムにおける主要要素の対 CNTL 統計検証結果。統計値には、降水量では解析雨量を参照値としたエクイタブルスレットスコア (ETS) を用い、その他の要素では、高度場、気温、水蒸気混合比、風速についてはラジオゾンデ、地上要素についてはSYNOPとアメダス観測を参照値とした二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。各行は統計検証要素、各列は予測時間 (単位: 時) に対応する。青が CNTL と比べて改善、赤が CNTL と比べて改悪を表しており、色付きの領域が各セルの内側の正方形以上の場合、統計的に有意であることを示す。左図は夏実験、右図は冬実験の結果を示す。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

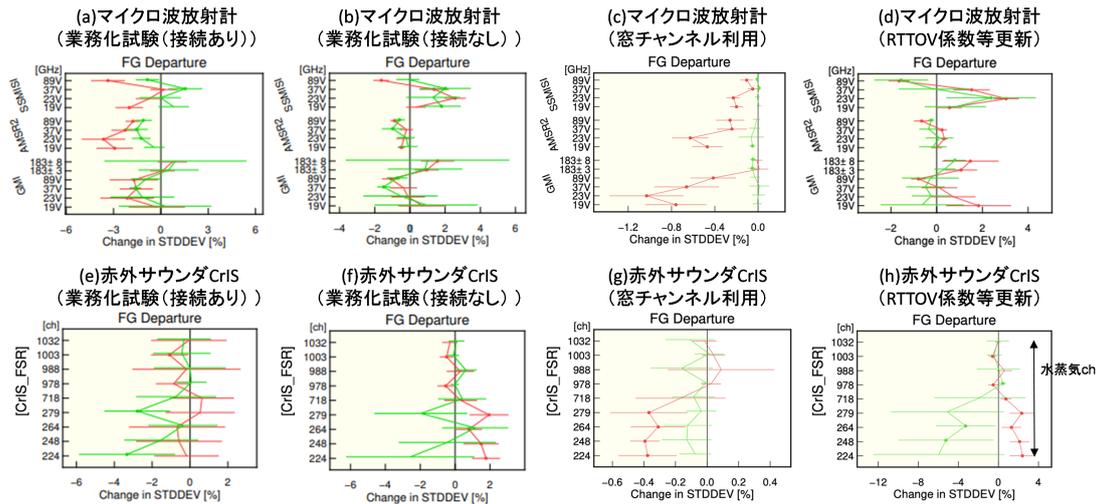


図 3.7.3 局地解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。上段 (a) (b) (c) (d) はマイクロ波イメージャ GMI, AMSR2 及び SSMIS、下段 (e) (f) (g) (h) は赤外サウンダ CrIS についての結果。CrIS の利用チャンネルはすべて水蒸気チャンネル。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。左列から、(a) (e) に TEST (接続あり) の結果、(b) (f) に TEST (接続なし) の結果、(c) (g) に変更項目 (2) のマ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

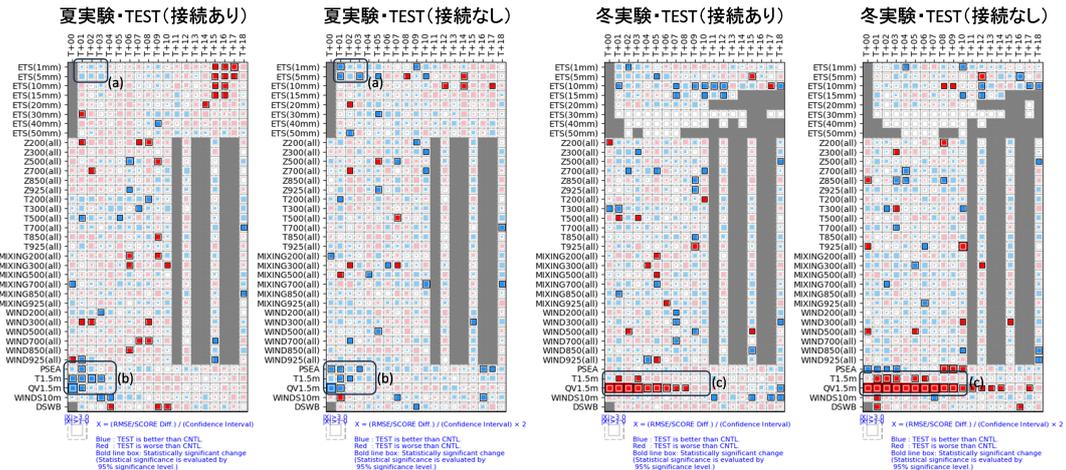


図 3.7.4 局地数値予報システムにおける主要要素の対 CNTL 統計検証結果。図の見方は図 3.7.2 と同じ。左から、夏実験・TEST (接続あり)、夏実験・TEST (接続なし)、冬実験・TEST (接続あり)、冬実験・TEST (接続なし) の結果をそれぞれ示す。図中の (a) (b) (c) は本文から参照する着目点を示す。

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)

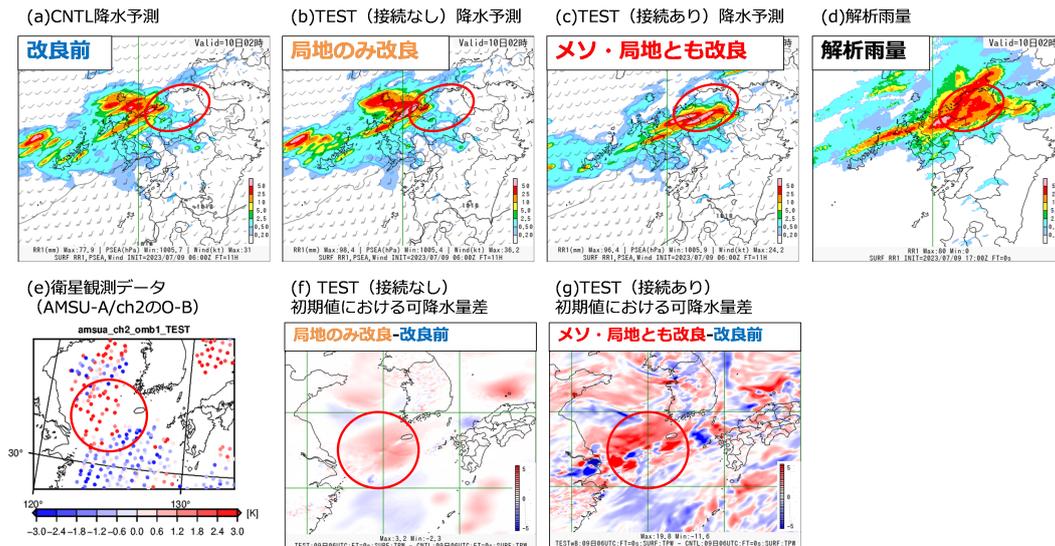


図 3.7.5 2023 年 7 月 10 日に福岡・佐賀・大分県で発生した線状降水帯事例。局地モデルにおける 2023 年 7 月 9 日 15 時 (JST) 初期値からの 11 時間後 (7 月 10 日 2 時) の予測 (前 1 時間積算雨量)。(a) CNTL による降水予測、(b) TEST (接続なし) による降水予測、(c) TEST (接続あり) による降水予測、(d) 解析雨量。初期値時刻における、(e) メソ解析における衛星観測データ (AMSU-A/ch2 の O-B)、(f) TEST (接続なし) と CNTL の可降水量の差、(g) TEST (接続あり) と CNTL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

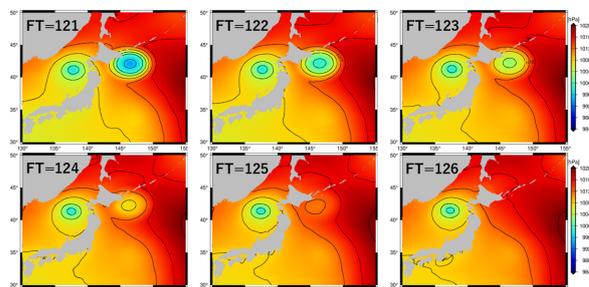


図 3.8.1 2024年8月7日18UTC初期値における海面気圧[hPa]の分布(変更後)。上段左からFT=121、122、123、下段左からFT=124、125、126の分布を表す。

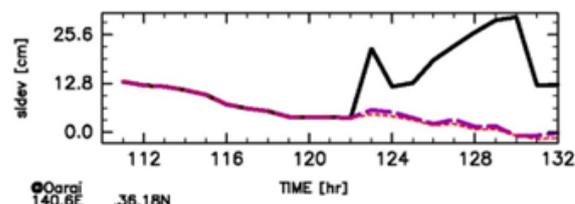


図 3.8.2 2024年8月7日18UTC初期値における銚子沖格子の潮位偏差時系列。黒線は変更前、赤点線は6時間かけて台風ボーガスを消した場合、紫破線は3時間かけて消した場合(変更後)の潮位偏差[cm]を表す。

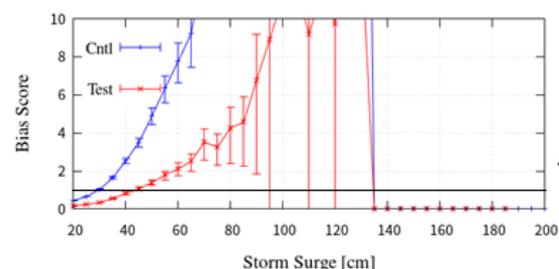


図 3.8.3 潮位偏差のバイアスコア。統計期間は2022~2024年の6~11月で、台風事例による検証結果を表す。国内約200地点の潮位観測点(気象庁ほか、港湾局や海上保安庁、国土地理院が運用)の観測値を利用し、3時間ごとの最大値で検証したもの。Cntl(青線)は台風ボーガス改善前、Test(赤線)は改善後を表す。エラーバーは95%の信頼区間を示す。FT=121~132が対象。

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。

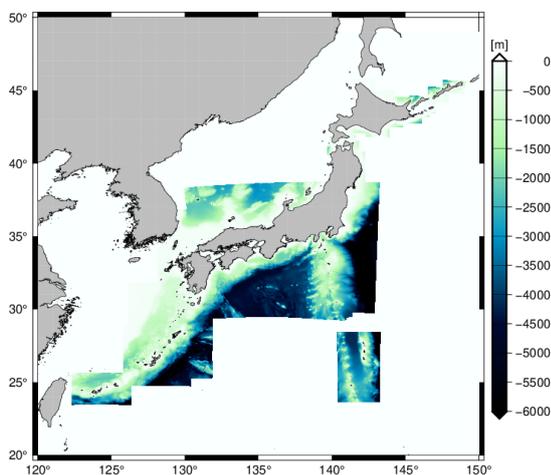


図 3.8.4 GtTM による水深データ。

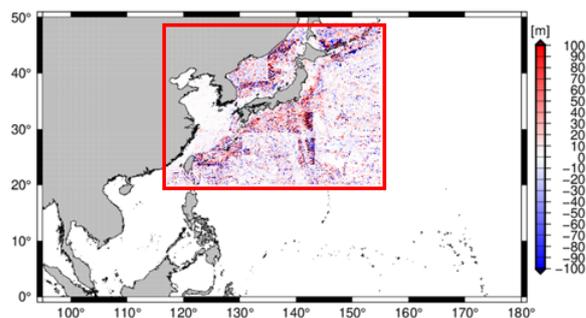


図 3.8.5 新旧水深データの比較。新水深 - 旧水深 [m]。赤線矩形領域は GtTM と GEBCO2023 を使用している領域を示す。

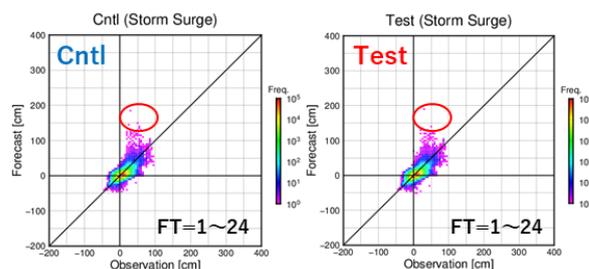


図 3.8.6 潮位偏差の散布図。Cntl (左図) は海底摩擦と水深の変更前 (図 3.8.3 で Test としたバージョンに相当)、Test (右図) は変更後による検証結果。統計期間と使用した観測データは図 3.8.3 と同じ。横軸は観測値、縦軸は予測値 [cm]。FT=1~24 が対象。

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>

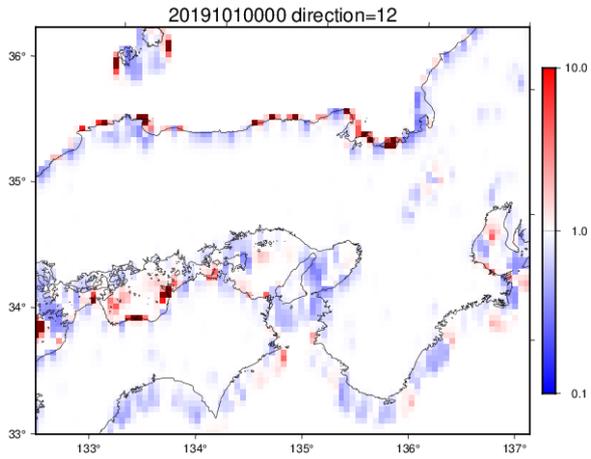


図 3.8.7 陸面粗度長の変更後と変更前の比（変更後/変更前）。1月における北風に対する値。対数スケールであることに注意。

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。

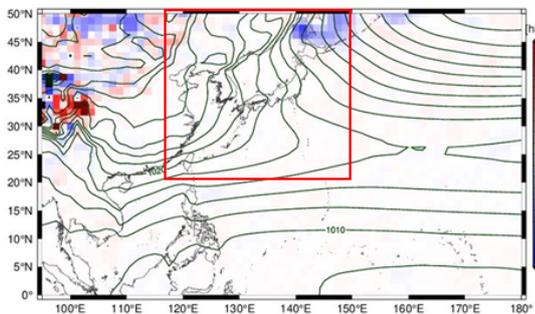


図 3.8.8 JRA-3Q 海面気圧平年値（1991～2020年）の変更後－変更前の差分 [hPa]。1月1日の日別平年値。赤線矩形領域は日本域高潮モデル及び日本域高潮PFSの計算領域を示す。

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。

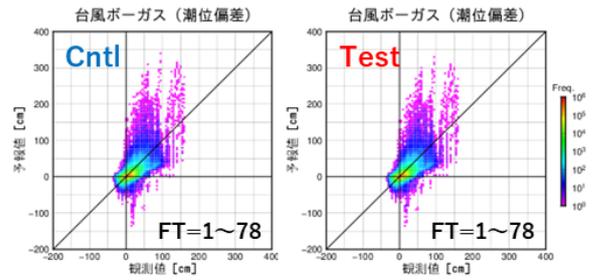


図 3.8.9 台風ボーガス中央コースによる潮位偏差の散布図。Cntl（左図）は陸面粗度長と JRA-3Q 平年値の更新前、Test（右図）は更新後による検証結果。2022～2024年の台風事例による検証結果を表す。国内約 200 地点の潮位観測点（気象庁ほか、港湾局や海上保安庁、国土地理院が運用）の観測値を利用し、3時間ごとの最大値で検証したもの。横軸は観測値、縦軸は予測値 [cm]。FT=1～78 が対象。

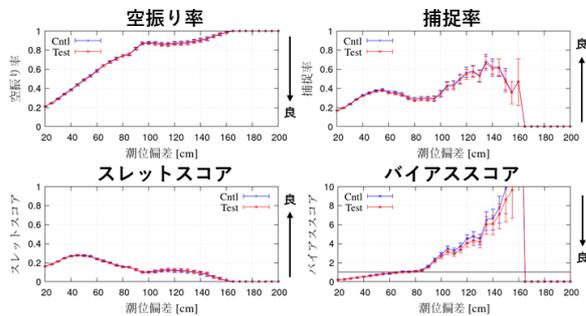


図 3.8.10 台風ボーガス中央コースによる潮位偏差の検証スコア。Cntl（青線）は陸面粗度長と JRA-3Q 平年値の更新前、Test（赤線）は更新後を表す。エラーバーは 95% の信頼区間を示す。統計期間と使用した観測データは図 3.8.9 と同じ。

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。

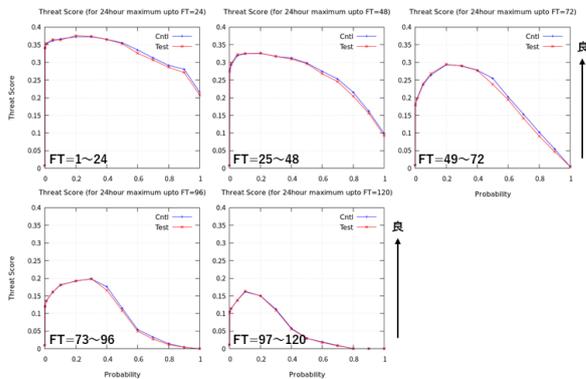


図 3.8.11 日本域高潮 PFS による確率予報のスレットスコア。閾値は潮位偏差 50 cm。横軸は超過確率。Cntl（青線）は陸面粗度長と JRA-3Q 平年値の更新前、Test（赤線）は更新後を表す。上段左から FT=1～24、25～48、49～72、下段左から FT=73～96、97～120 のスコアを表す。

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。

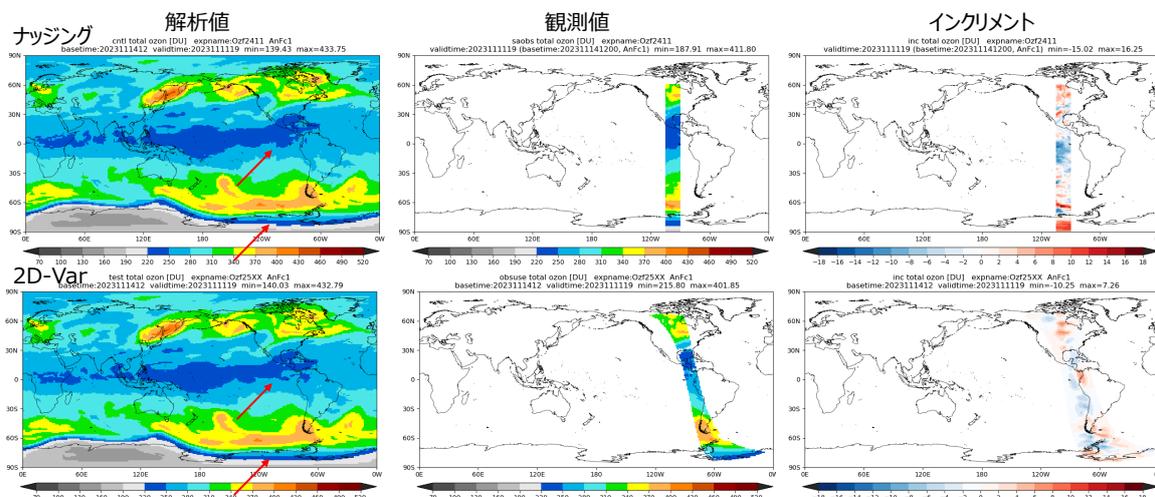


図 3.9.1 同化結果の一例 (2023 年 11 月 11 日 19UTC) : (上) CNTL、(下) TEST の左からオゾン全量 [DU] の解析値、同化に利用した観測値、インクリメント。矢印で示した先は同化領域と非同化領域の境目で解析値のギャップが CNTL では目立つが TEST では改善された例。

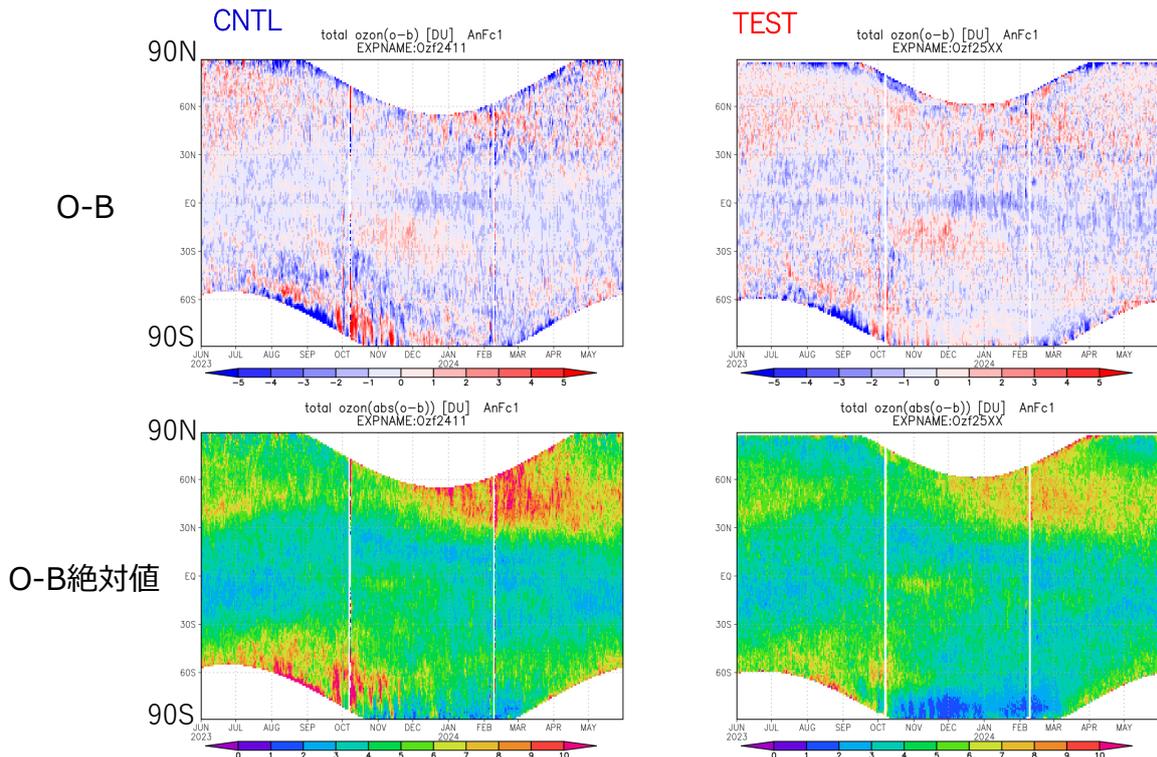


図 3.9.2 東西平均オゾン全量 [DU] の (上) 観測値と第一推定値の差 (O-B) と (下) O-B の絶対値の時系列。左から CNTL、TEST。

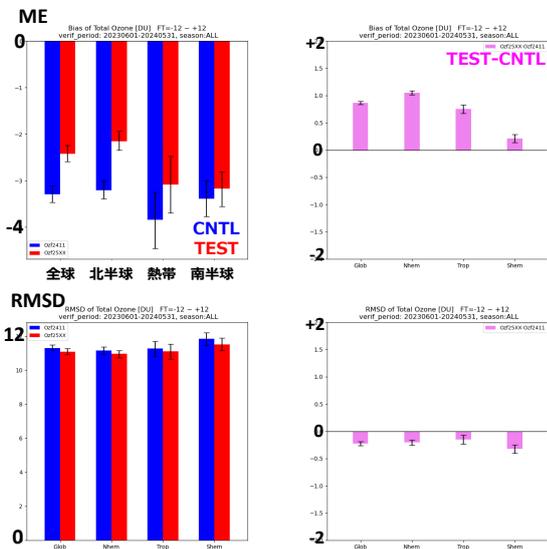


図 3.9.3 初期時刻の 12 時間前から 12 時間後までの日平均オゾン全量 [DU] の対分光光度計検証結果。上段はバイアス、下段は二乗平均平方根差を示す。左列は CNTL (青) と TEST (赤) のそれぞれの値、右列は両者の差 (TEST-CNTL)。検証領域の定義は全球 (南緯 90 度から北緯 90 度)、北半球 (北緯 20 度から北緯 90 度)、熱帯 (南緯 20 度から北緯 20 度)、南半球 (南緯 90 度から南緯 20 度)。エラーバーはブートストラップ法で見積もられた 95% 信頼区間。

第4章 数値予報システムの開発進捗

4.1 全球モデルの開発進捗

4.1.1 はじめに

気象庁では「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画（以下、重点計画）」において、台風防災への貢献として気象庁全球モデル（GSM）の水平格子間隔を10kmより高解像度化すること、また、台風予測において重要となる海面水温（SST）について全球10kmメッシュの高解像度海面水温データを作成することを開発の方向性として示している。加えて、データ同化システム高度化の方針として次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用の推進を掲げている。

予報モデルの高解像度化によりデータ転送量・演算量は増加する一方で、昨今の計算機性能は、演算性能の向上に対してノード間通信やメモリバンド幅など通信性能の向上が遅い傾向にある。現在のGSMの実行時間はノード間通信やメモリバンド幅の性能に対する依存が強く、ノード間、CPU-メモリ間のデータ転送量削減による実行時間短縮が重要な課題である。これは全球解析の中の4次元変分法（全球4D-Var）においても同様であるが、質、量ともに今後大幅な増加が見込まれる観測データを内部で保持するために、メモリ使用量自体を削減することも課題である。GSMや全球4D-Varで扱うデータの多くは浮動小数点数であるため、実行時間の短縮やメモリ使用量を削減する有効な方策の一つとして浮動小数点数を倍精度から単精度に変更することが挙げられる。

本稿では重点計画達成に向けた開発進捗として計算機の通信性能の伸長鈍化を背景に将来の高解像度化や観測データの大幅な増加への対応として取り組んでいるGSM及び全球4D-Varの浮動小数点数単精度化について報告する。また、増大する観測データからより多くの情報を引き出すことを目的とした解析手法の高度化にも取り組んでおり、その一つとして全球4D-Varへスケール依存局所化（SDL）の導入を目指している。全球10kmメッシュ海面水温データの作成については、気象庁大気海洋部にて全球0.1°メッシュ日別海面水温解析値（全球HIMSST）として開発に取り組んでおり、全球数値予報システムでの評価を進めている。これらの進捗についても合わせて報告する。

4.1.2 全球モデルの単精度化

数値計算における浮動小数点数の精度は計算誤差に直結し、誤差の累積は計算安定性を損なう可能性もあるため、要求される予測精度や計算機資源に合わせて適切に選択する必要がある。数値予報モデルにおいては倍精度の利用が主流であり、GSMも1996年3月の計算機更新に伴う資源増加に合わせて浮動小数点数を単精度から倍精度に変更し（柏木1995）、以降は倍精度を

使用してきた。しかし、近年は前述した計算機動向を背景に、浮動小数点数の精度を見直す必要性が議論され、大半の計算過程は単精度化しても予測精度に大きく影響しないことが明らかになってきた。例えばLang et al. (2021), Nakano et al. (2018), Rüdüsühli et al. (2013)などで単精度化したモデルの予測精度は変更前と中立であることが示されている。

単精度化により期待される効果は実行時間とメモリ使用量の減少である。実行時間が減少する要因は次の2つに分けられる。1つ目はデータ転送の効率化である。ノード間、CPU-メモリ間などのデータ転送量の減少に加え、より多くのデータをキャッシュに保持できることでキャッシュヒット率が向上しメモリアクセス頻度が低下、データ転送時間が減少する。2つ目はSIMD¹命令による演算の高速化である。SIMD命令が適用されている箇所では、倍精度から単精度になることで、一度にレジスタに入力される浮動小数点数の数は理想的には2倍になり、演算速度も2倍になる。先に挙げた先行研究において、単精度化による実行時間の減少率はいずれのモデルも約40%~45%が示されている。

2026年3月時点のGSM(GSM2503)の実行時間プロファイルを図4.1.1に示す。現在のGSMでは移流過程を除く力学過程の実行時間が約33%を占めており、そのうち、約15%はMPI通信によるものである。第3.2節の並列化手法の改良によりMPI通信の実行時間割合は減少しているものの、依然として全体に占める割合は高い。GSMはこのようなノード間通信に加え、メモリバンド幅への依存も強く、データ転送の効率化による実行時間の減少が期待できる。浮動小数点数を単精度化すると計算部分では情報落ちや桁落ちに伴う数値計算精度劣化が発生しやすくなるため予測精度を慎重に検証する必要がある。一方で、MPI通信部分を単精度化する場合、直接的に発生するのは丸め誤差のみであり、予測精度への影響が比較的小さいと考えられる。このことから、GSMではまずMPI通信のみを単精度化し、次にモデル全体を単精度化する二段階の対応を検討している。本稿ではそれぞれの調査状況について報告する。

(1) MPI通信単精度化

実際に現業運用しているGSMによる検証に先立って、MPI通信のみ単精度化したGSMの力学コアを用いた理想化実験を行い、いずれも予測精度に大きな問題はないことを確認した。主な結果を以下に示す。

- 球面調和変換の格子から波、波から格子への変換1往復あたりの相対誤差を確認した。変換前後の全格子点における最大の相対誤差はスカラー量で

¹ Single Instruction, Multiple Data；複数データへの単一命令実行。

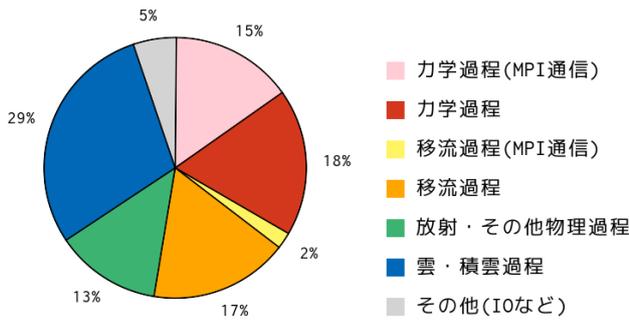


図 4.1.1 GSM2503 の時間積分内のランク平均した実行時間内訳。複数回実行したうち全体の実行時間が平均的だったある回の内訳を示している。出力専用ランクは含めず、計算ランクのみを集計対象としている。計算機は第 11 世代スーパーコンピュータシステム (Fujitsu PRIMERGY CX2550 M7) を使用。水平解像度は TQ959、予測期間は 5.5 日、計算ランク数は 384、OpenMP スレッド数は 14。インパランスの影響を軽減するために各過程に MPIBarrier 関数を追加し測定。

$O(10^{-7})$ 程度であり、概ね単精度の丸め誤差程度であった。

- セミラグランジュ移流過程の誤差確認の目的で、浅水系での非線形地衡流場の定常状態維持実験 (Williamson et al. (1992) のテストケース 2) を行い、層厚の対初期値誤差のノルムは丸め誤差程度であった。
- 力学過程全体を合わせた誤差確認の目的で、傾圧不安定実験 (Jablonowski and Williamson 2006) を行った。地表面気圧の MPI 通信単精度と倍精度の差の L2 ノルムは、Jablonowski and Williamson (2006) で示された異なる力学コアを持つモデル同士の差の L2 ノルムより小さかった。つまり MPI 通信単精度化の影響は力学過程を異なる離散化手法に変更した場合より小さいと考えられる。

次に、現業運用している GSM で MPI 通信単精度化した実験結果を示す。表 4.1.1 の 2 列目は倍精度からの実行時間の短縮率とメモリ使用量の減少率である。MPI 通信の合計の実行時間は約 49% 短縮し、ほぼ理想的な結果を得ることができた。GSM 全体としては実行時間が約 12% 短縮し、MPI 通信以外の過程も実行時間が減少している。その要因としては MPI 通信用変数のバッファサイズが減少することでその他過程の変数のキャッシュヒット率が向上すること等が考えられる。

予測精度に与える影響を確認するため、予測のみ MPI 通信単精度のモデルを用いた 31 事例の連続初日実験を行い、同じ初期値から実行した GSM2503 の予測結果と比較を行った。統計検証の結果、GSM2503 からの予測精度の変化はいずれも中立であり、特徴的な変化は見られなかった。一方、ある 1 つの初期値から予測を実行した実験でエネルギースペクトルを確認したところ、モデル上層の高波数側の発散の寄与が倍精度の

過程	MPI 通信 単精度	全体単精度
GSM 予測全体	12%	31%
力学 (MPI 通信)	48%	48%
力学	5%	40%
移流 (MPI 通信)	52%	54%
移流	2%	25%
放射・その他物理	1%	25%
雲・積雲	0%	19%
その他 (IO など)	5%	33%
MPI 通信合計	49%	49%
メモリ使用量	2%	34%

表 4.1.1 MPI 通信単精度と全体単精度の、GSM2503(倍精度) からの実行時間短縮率とメモリ使用量の減少率。測定環境と条件は図 4.1.1 と同様。「MPI 通信合計」は各過程の MPI 通信のみを合算したものである。メモリは 1 計算ランクあたりの使用量を比較。

場合と比べて波数ごとにばらつくことがわかった。

以上に示す通り、実行時間が短縮し、かつ予測精度も中立であることから、モデル全体の単精度化に先駆けて MPI 通信単精度を導入する計画である。今後はエネルギースペクトルの特徴的な変化などの問題について予測精度に影響がないか調査を行うとともに、解析予報サイクル実験を行い予測精度が期待通り中立であることを確認する予定である。

(2) GSM 全体単精度化

GSM 全体の単精度化の検証結果について示す。なお、GSM 全体を単精度化するにあたって、Legendre 陪関数の計算、フルレベルの気圧計算、放射過程の計算等で精度悪化による異常終了が発生したため、当該箇所は倍精度への変更や数学的に等価な別の式への変更等の対策を行った。

GSM 全体を単精度化した実験結果を示す。表 4.1.1 の 3 列目は倍精度からの実行時間の短縮率とメモリ使用量の減少率である。実行時間は全体では約 31% 短縮したが、本項の冒頭で示した先行研究の短縮率約 40%~45% に比べて低い。これは、セミラグランジュ移流過程、放射・その他物理過程、雲・積雲過程の短縮率がそれよりも低いためである。このうち、セミラグランジュ移流過程の実行時間の短縮率が低い原因は、SIMD 命令が適用されていない箇所が多いためであった。特に移流の上流点の物理量を求める内挿処理では、格子点ごとに対応する上流点が異なるため、格子点のループ処理における配列参照が連続せず、最適化されにくいと考えられる。他の過程についても同様に SIMD 命令の適用率が低いことが一因であると考えられる。

予測精度については総観規模での大きな違いはないものの、全体的に MPI 通信単精度に比べて倍精度からの差分が大きくなり、統計検証ではいくつか要素に

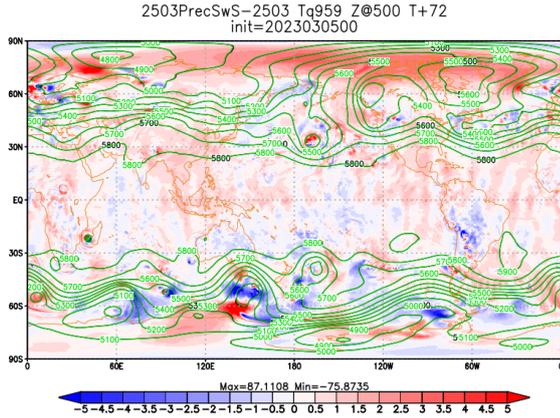


図 4.1.2 予報時間 72 時間における 500hPa 面のジオポテンシャル高度 [m]。コンターの黒が倍精度、黄緑がモデル全体単精度。シェードは単精度から倍精度を引いた差を表す。

精度悪化が見られた。図 4.1.2 は予報時間 72 時間での 500hPa 面ジオポテンシャル高度 (Z500) である。単精度と倍精度のコンターはほとんど重なっている一方、倍精度との差分に着目すると、中緯度から極にかけて広い範囲で 5 m 程度の差分が見られる。同じ予報時間における MPI 通信単精度での差分は基本的に 1 m 以下であり、全体単精度では差分がより大きくなっている。また、赤道付近の差分には縦縞の構造が見えるほか、Z500 の全球平均値は倍精度に比べ増加傾向であった (図略)。統計的な予測精度の変化を確認するために、予測のみ全体単精度のモデルを用いた 31 事例の連続初期日実験を行い、同じ初期値から実行した GSM2503 の予測結果と比較を行った。その結果、海面更正気圧 (PSEA) と Z500 の二乗平均平方根誤差が北半球の予報時間初期で悪化する傾向、弱い雨の降水頻度が予報時間全体で減少する傾向が見られた (図略)。

これら予測結果の変化のうち、Z500 の赤道付近の縦縞構造と全球平均値の増加傾向はセミラグランジュ移流過程、PSEA と Z500 の予報時間初期での悪化は球面調和変換の単精度化による影響が大きかった。セミラグランジュ移流過程では、主に次の 2 つの要因が予測精度を悪化させていた。1 つ目は上流点探査である。GSM の上流点探査は Temperton et al. (2001) に基づいているが、単精度化により、この上流点探査に用いる三角関数の計算精度が悪化する傾向にあった。これは Diamantakis and Vana (2022) とも整合的である。2 つ目は層厚の積算である。GSM で使用している鉛直保存セミラグランジュ法 (吉村・松村 2004) では層厚の積算を行う必要があるが、この処理の精度が単精度化により悪化する傾向にあった。また、球面調和変換の精度悪化については、主に東西波数 0 成分の Legendre 変換の影響であった。これは Lang et al. (2021) において、東西波数 0 成分の Legendre 変換を倍精度としており、GSM でも球面調和変換に対

策が必要であることが示唆された。これらの精度が悪化する箇所について、倍精度への変更や Kahan のアルゴリズムを使用するなどの対策をすることで精度悪化が軽減されることを確認している。一方で単純な対策では実行時間の短縮率も減り、単精度化によるメリットが少なくなることから、倍精度に変更する箇所の絞り込みなど引き続き対策の検討が必要となる。

以上の結果から、モデル全体を単精度化することにより GSM の実行時間は約 30% 短縮することがわかった。一方で予測精度面では、セミラグランジュ移流や球面調和変換で精度が悪化しており、対策が必要となった。今後はこれら以外の過程についても詳しく調査し、精度悪化が見られた場合には必要な対策を検討していく予定である。

4.1.3 全球 4D-Var の単精度化

ここでは、全球 4D-Var におけるメモリ使用量削減と実行時間短縮を目的とした浮動小数点数の単精度化について、2025 年 11 月時点での現業システム (以下 CNTL と呼ぶ) をベースとして各部分の浮動小数点数を単精度化した調査²の結果について報告する。

(1) 単精度化の設定

全球 4D-Var の単精度化の効果及び解析予測精度やインナーモデルの計算安定性に与える影響を単精度化個所別に切り分けて評価するために、単精度化範囲の異なる複数の設定の下での実行結果を比較した。1 つめは (モデル) トラジェクトリのみを単精度化した設定である (以下 TRJ4 と呼ぶ)。全球 4D-Var では、インナー非線形モデルの計算途中に現れる複数の場をモデル内の全ての時刻において倍精度で保存している。これがトラジェクトリであり、接線形・随伴モデルの基本場として用いられる。全球 4D-Var はトラジェクトリ保存のために総メモリ使用量の 20% 以上を費やしていることから、トラジェクトリは単精度化による資源削減の効果が特に大きいことが期待される。基本場であるトラジェクトリは評価関数の最小値探索のために行う接線形・随伴モデルの繰り返し実行の中で値が変化することはなく、単精度化した場合に結果に与える影響は限定的であることも期待される。2 つめは、トラジェクトリに加えて全球 4D-Var の観測演算子や評価関数、最小値探索といった変分法本体の大部分を単精度化した設定である (以下 VAR4 と呼ぶ)。3 つめは、第 4.1.2 項で報告した GSM 全体単精度化の成果を取り込むことでインナーモデルの大部分を単精度化した設定である (以下 MDL4 と呼ぶ)。結果に対する原因の切り分けを目的として VAR4 と MDL4 の単精度化範囲は重複を避けており、VAR4 では球面調和変換などのモデル側の機能を利用する部分は倍精度のまま扱い、MDL4

² 現状では、外部のファイルやライブラリの入出力、計算の安定性・整合性のために単精度化が難しい処理などは常に倍精度のまま扱っている。

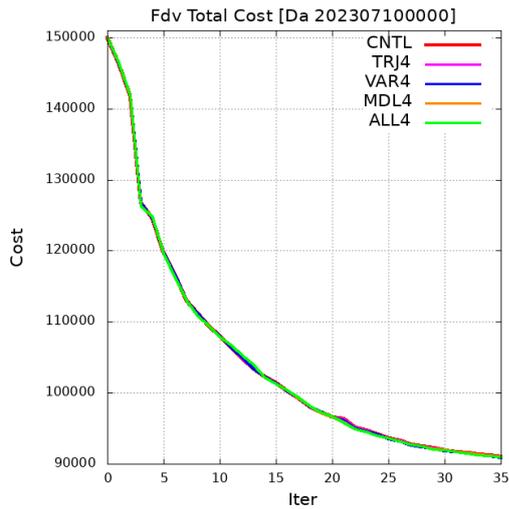


図 4.1.3 2023 年 7 月 10 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の浮動小数点数の精度別の評価関数値の推移。

実験名	評価関数値	
	初回	探索 35 回目
CNTL	149983.226305462769	90985.9835379593424
TRJ4	149983.226305462769	90985.9855378020438
VAR4	149983.265625000000	90927.703125000000
MDL4	149988.689996716799	91025.9898162671889
ALL4	149988.781250000000	90982.265625000000

表 4.1.2 2023 年 7 月 10 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の浮動小数点数の精度別の評価関数値。初回の値と最小値探索を 35 回行った後の値。

では変分法側の機能に分類したトラジェクトリは倍精度で保存することとした。最後は、VAR4 と MDL4 を同時に適用することで全球 4D-Var 全体を可能な限り単精度化した設定である（以下 ALL4 と呼ぶ）。

(2) 実行結果の例

図 4.1.3 及び表 4.1.2 はある事例における設定別全球 4D-Var の評価関数の最小値探索の推移である。探索途中も含めてグラフはほとんど重なっており、浮動小数点数の精度の違いによって生じた差は僅かである。この差をパーセンテージで表すと、初回で最大 0.004 % 程度、探索 35 回目で最大 0.06 % 程度である。特に TRJ4 では初回は CNTL と完全に一致し、探索 35 回目でも 0.000002 % 程度と、その差は極めて小さい。なお、それぞれの設定での解析インクリメントにも目立った差は生じていなかった（図略）。図 4.1.4 は同じ事例における設定別のメモリ使用量と実行時間の例である。CNTL と比較すると、メモリ使用量は TRJ4 で 10 % 程度、VAR4 で 30 % 程度削減できることがわかった。実行時間は TRJ4 では CNTL とほとんど変わらないが、VAR4 では 8 % 程度短縮した。MDL4 ではメモリ使用量は 5 % 程度の削減に留まるが、実行時間は 19 % 程

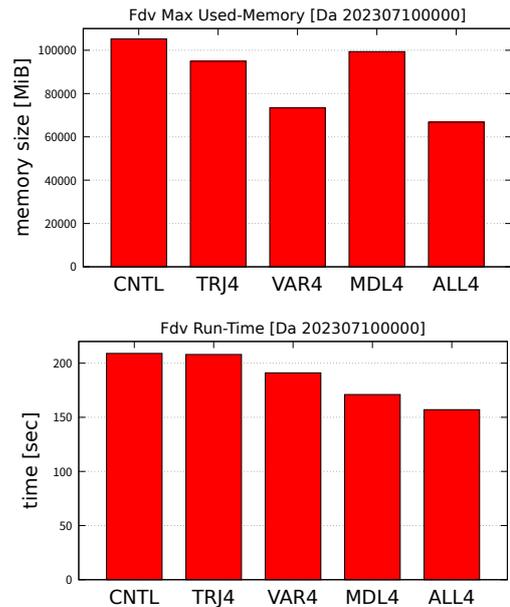


図 4.1.4 2023 年 7 月 10 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の浮動小数点数の精度別のメモリ使用量と実行時間。メモリ使用量は 32 ノード 256 並列実行時のノード別最大値。

度短縮した。VAR4 と MDL4 を同時に適用した ALL4 では、CNTL と比較してメモリ使用量を 37 % 程度削減しつつ、実行時間を 25 % 程度短縮するという結果が得られた。これは VAR4 と MDL4 の結果を合算した値に近く、両者の単精度化範囲を排他的に設定したとと整合的である。

(3) 解析予報実験の結果

解析予測精度への影響を確認するため、設定別の実験を実施した。これらの実験での単精度化対象は全球 4D-Var 本体のみであり、第一推定値作成に用いる GSM は倍精度のままである。平均解析場については、いずれの環境でも CNTL との間に大きな差は生じていないことが確認できた。予測精度については、TRJ4 と VAR4 はほぼ中立と言える結果であったが、MDL4 と ALL4 では Z500 の二乗平均平方根誤差が予報開始から 3 日目以降でやや大きくなる傾向などが見られた（図略）。Z500 の予測精度悪化は第 4.1.2 項で述べた GSM 全体単精度化実験の結果と整合しており、全球 4D-Var においても球面調和変換に同様の対策を行うことを検討している。

以上のように、全球 4D-Var では変分法本体の単精度化はメモリ使用量削減の効果が大きく、なおかつ解析予測精度維持との両立も実現できる可能性があるという結果が得られた。インナーモデルの単精度化は実行時間削減の効果が大きいですが、解析予測精度が悪化する可能性があり対策が必要である。今後、更なる調査と対策を検討していく。

4.1.4 全球 4D-Var への SDL 導入

2025 年 11 月時点の全球 4D-Var は気候学的背景誤差とアンサンブル背景誤差を併用するハイブリッド法を採用している。このうちアンサンブル背景誤差は複数メンバーのアンサンブル予報摂動から構成され、背景誤差の流れ依存性を考慮する上で重要な役割を担っている。しかし、実用上限られたメンバー数のみで構成せざるを得ないために、アンサンブル背景誤差の構造には見かけ上の誤差相関が混入してしまう。その対策として、十分に距離が離れた地点間の誤差相関を低減させる処理である局所化を行うことが一般的であり、全球 4D-Var では誤差の相関距離に応じた特定の局所化スケール値（水平方向には局所化距離、鉛直方向には対数気圧による局所化スケール高度）を用いたガウス関数型の局所化を採用している。誤差の相関距離は要素によって異なりうるが、要素間の誤差相関の扱いが難しいことから、全球 4D-Var では気温、気圧、風向・風速には同じ水平局所化距離を与え、他の要素との相関を考慮していない比湿のみ別の水平局所化距離を与えるという要素別局所化を行っている。また、誤差の相関距離は総観スケールの現象では長く、メソスケールの現象では短いというように現象のスケールに応じても異なると考えられるが、全球 4D-Var の水平局所化距離は 800km（比湿は 400km）、鉛直局所化スケール高度は 0.8 という一意の値を用いている。現象のスケールに応じた局所化を行う手法としては、スケール依存局所化（Scale-dependent Localization;SDL）が知られている（Buehner (2012); Buehner and Shlyayeva (2015)）。これはアンサンブル背景誤差を構成するアンサンブル予報摂動を波数空間上でスケール別に分離し、それぞれに異なる局所化距離を与える手法であり、アンサンブル背景誤差がより適切な誤差相関を表現できることから解析予測精度向上が期待できる。本稿では全球 4D-Var で用いる水平局所化への SDL 導入の検討について報告する。

(1) SDL の設定

2025 年 11 月時点の現業システム（以下 CNTL と呼ぶ）の全球 4D-Var に SDL を導入し、調査を行った。SDL はアンサンブル予報摂動をスケール別にカテゴリ分離して扱うため、その自由度は分離後のカテゴリ数に応じて増加する。必要な計算量・計算資源もその分だけ大きくなることから、まずは水平 2 スケール分離を導入することを考えた。Caron and Buehner (2018) を参考に、水平距離 2000km 以上の構造に対応する全波数 0 から 19 までは大（総観）スケールの現象を表していると見なし、これを分離した残りは中・小（サブ総観・メソ）スケールの現象を表していると見なすこととした。これは Caron and Buehner (2018) で行われた 3 スケール分離に対し、サブ総観スケールとメソスケールを統合した場合にあたる。スケール分離は

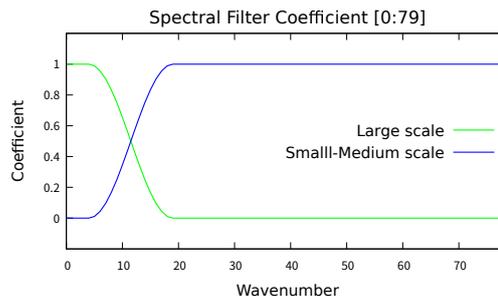


図 4.1.5 2 スケール分離のための係数。全波数 0 から 319 のうちの 79 まで（20 から 319 までは一定値で大スケールは 1、中・小スケールは 0）。

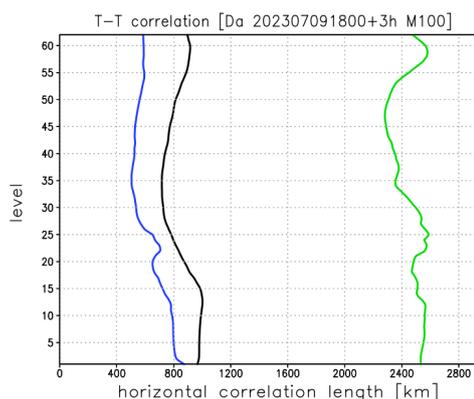


図 4.1.6 2023 年 7 月 9 日 18UTC を予報初期時刻とする 100 メンバーの全球 3 時間予報値から求めたスケール別の気温・気温相関に基づく水平局所化距離の推定結果。モデル面第 1 層から第 62 層目まで。青線が中・小スケール、緑線が大スケール、黒線がスケール分離なし（CNTL）の場合。

全波数 19 で切断するのではなく、滑らかに遷移するように波数空間上のアンサンブル予報摂動の各成分にスケール別の分離係数をかけることで行う。図 4.1.5 に本調査で用いた 2 スケール分離の係数を示す。全波数 5 から 19 にかけて遷移するように設定しており、係数の和はどの波数でも 1 である。

スケール別のアンサンブル予報摂動に与える水平局所化距離については、Ménétrier et al. (2015a,b) の手法に基づき推定した。これは実際のアンサンブル予報摂動のサンプルから各格子点における距離に応じた相関の大きさを評価し、その全球平均値を局所化関数と比較することで適切な水平局所化距離を推定する手法である。適切な水平局所化距離は高度によって変わるが、全球 4D-Var では対流圏で適切な局所化を行うことを重視して水平局所化距離を決めている。そのため、ここでは 250hPa 付近であるモデル面第 62 層よりも下層にのみ注目する。図 4.1.6 は気温・気温相関を用いて推定した水平局所化距離の鉛直分布の例である。スケール分離なしの場合の推定値は 700km から 1000km 程度であり、CNTL で用いている水平局所化距離 800km は適切であると言える。これに対し 2 スケール分離し

た場合の推定値は、中・小スケールでは 450km から 800km 程度、大スケールでは 2300km から 2600km 程度である。この結果を元に、中・小スケールに対しては、推定値よりやや小さいものの、これまでの比湿に対するものと同じ 400km の水平局所化距離を与えることとした。これは、アンサンブル背景誤差に対応する制御変数が与えた中で最小の水平局所化距離に基づいて実効解像度が変わることから、CNTLと同じ 400km を維持することで実効解像度の違いによる影響を排除することを意図している。一方、大スケールの推定値は CNTL で用いている 800km から大きく乖離している。先行研究での設定や予備的に行った実験の結果³を元に、本節で示す調査では現行設定から極端に大きな変更を行うことを避け、大スケールに与える水平局所化距離は 1200km とすることとした。また、比湿・比湿相関を用いた大スケールの推定値は他の要素を用いた場合と同程度であったこと（図略）、中・小スケールに対して従来の比湿と同じ 400km の水平局所化距離を与えたことから、2 スケール分離した場合には要素別局所化を行わず、比湿も他の要素と同じ扱いをすることとした。以後この設定を SDL0412 と呼ぶこととする。

(2) 疑似観測 1 点同化の結果

解析結果への影響を確認するための初動的調査として、疑似観測 1 点同化を実施した。図 4.1.7 は気温疑似観測 1 点同化に対する東西風インクリメントの例である。観測地点から 400km 以内では CNTL と SDL0412 に大きな差は見られないが、その外側では CNTL には局所的に大きな部分や波状の微細な構造といった、見かけ上の誤差相関から生じた可能性がある構造が存在する一方、SDL0412 ではそれらの発生を抑制できていることがわかる。また、気温インクリメントを比較すると SDL0412 は CNTL より遠くまでインクリメントが広がっている様子も確認できた（図略）。これらは SDL 導入で期待された通りの挙動であると言える。

(3) 実観測同化実験の結果

解析結果への影響をより詳しく確認するために、ある事例における実観測を用いた同化実験を実施した。SDL0412 のインクリメントは、大きな構造は CNTL のインクリメントと共通するものの、CNTL に見られる波状の微細な構造が見られなくなったことなど、疑似観測 1 点同化実験と共通する特徴が見られた（図略）。また、評価関数値を比較すると SDL0412 の方が最終値が小さくなる傾向が見られた。これは SDL0412 では解析値が観測値により近づく傾向があることを示唆している。これらの傾向は複数の事例で共通して見られており、SDL 導入の効果と考えられる。すなわち SDL0412 では、中・小スケールの現象を起源とする見かけ上の

³ 大スケールに与える局所化距離を 800km から 2400km まで変えながら、得られた解析値とそこからの予報値、観測値と予報値の差などを比較した。

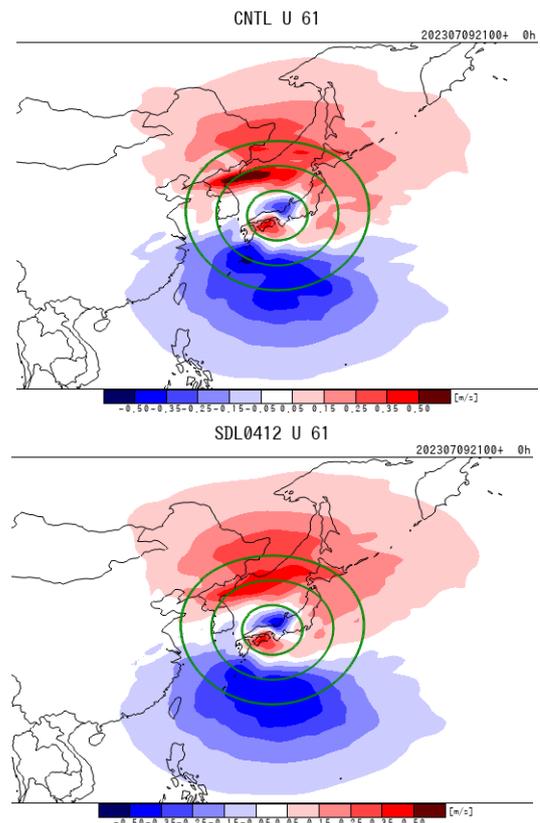


図 4.1.7 2023 年 7 月 11 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の同化窓先頭に置いた気温疑似観測 1 点同化に対する同化窓先頭の東西風インクリメントの例（モデル面第 61 層）。上が局所化距離 800km のみの場合（CNTL）、下はスケール分離した上で・小スケールに 400km、大スケールに 1200km の局所化距離を与えた場合（SDL0412）。緑線は観測位置を中心とする半径 400km、800km、1200km の同心円。

誤差相関から生じた不適切なインクリメント構造は軽減され、大スケールの現象を起源とする実際の誤差相関から生じたインクリメント構造はより適切に表現されるようになり、CNTL に比べると観測地点から比較的離れた場所も含めて観測値の情報が反映されやすくなった結果として、評価関数の最終値が小さくなったと解釈できる。

最後に、解析予測精度への影響を確認するために実施した解析予報サイクル実験の結果について述べる。SDL0412 は CNTL に対して、平均解析場の変化は比較的小さかったものの、個別に見ると解析値・予報値ともに観測値により近づく傾向が見られた。予測精度については主に夏半球の予報 7 日目あたりまでで改善が見られる一方、熱帯域の対流圏では気温などの平均誤差に悪化も見られた（図略）。

以上のように、全球 4D-Var に SDL を導入することでアンサンブル背景誤差をより適切に表現することができ、解析精度向上が期待できる。スケール分離や局所化距離の設定には調整の余地があることから調査を継続し、解析予測精度の更なる向上を目指す。

4.1.5 全球 HIMSST の利用に向けて

全球数値予報システムでは SST を下部境界条件としており、SST 解析値は気象庁大気海洋部作成の全球 0.25°メッシュ日別海面水温解析値 (MGDSST; 栗原ほか (2006)) を用いている。重点計画の下、より高解像度となる全球 0.1°メッシュの全球 HIMSST を開発しており、解析予報サイクル実験により全球数値予報システムへの影響を評価した。

これまで全球数値予報システムでは全球 HIMSST 利用に向けた予備調査として、英国気象局が作成する全球 0.05°メッシュの日別海面水温解析値 OSTIA (Good et al. 2020) を用いて、高解像度かつ高精度な SST 解析値の影響を評価してきた (気象庁 2024)。その結果、SST 解析値は解析予報サイクルを通じて全球数値予報システム全体の精度向上に影響し、時空間スケールごとの寄与を検討したところ、とくに短周期成分の効果が大きいことが確認されている。なお、全球数値予報システムにおける SST 解析値の役割や期待される効果は先述の気象庁 (2024) に詳述されているため、適宜参考にしてほしい。

(1) 全球 HIMSST の特性

全球 HIMSST の解析手法は MGDSST に準じているが、解像度が 0.25° から 0.1° に高解像度化され、利用観測データとして既存の観測に加え新たに静止気象衛星ひまわり搭載の可視赤外放射計による SST 観測値が利用される。考慮する時間スケールについて、気象庁 (2024) では全球 HIMSST で短周期 (周期 10 日~27 日) 変動成分を新たに利用開始予定としていた。しかし、2023 年 3 月から MGDSST にて AMSR2 による短周期成分の利用が開始されており、全球 HIMSST と MGDSST では仕様に大きな差はなくなっている。

全球 HIMSST と MGDSST の比較の一例として、2023 年 7 月の月平均 SST の差を示す (図 4.1.8)。全球 HIMSST と MGDSST の差は新たに利用されるようになった静止気象衛星ひまわりの観測領域のみならず全球域に見られ、黒潮及び黒潮続流やメキシコ湾流、南極周極流など海洋中小規模擾乱が存在する中緯度帯でとくに大きな違いが見られている。全球 HIMSST は MGDSST より解像度が高いため、より空間構造が細かい渦を表現できるようになったためと考えられる。また、大気海洋部で実施された全球 HIMSST と MGDSST の検証では、全球 HIMSST のほうが MGDSST よりも浮遊ブイ観測値に対する二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error; RMSE) が減少し、より高精度となっていることが確認されている (図略)。一方で、台風通過時における SST 低下は全球 HIMSST と MGDSST で大きな違いは見られなかった (図略)。両者の SST 解析において、ともに短周期変動成分として AMSR2 を利用しているため、大気現象への応答性が同程度となっていると考えられる。

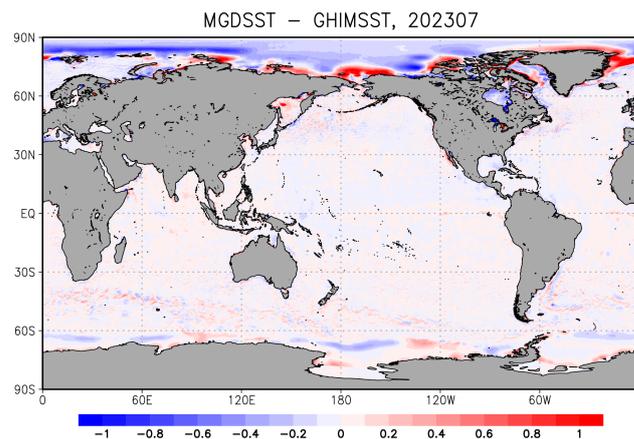


図 4.1.8 2023 年 7 月における月平均 SST の MGDSST と全球 HIMSST の差 (MGDSST- 全球 HIMSST) [K]。陸域は灰色としている。

(2) 解析予報サイクル実験

全球数値予報システムへの全球 HIMSST 利用のインパクトを確認するため、全球 HIMSST を SST 解析値として解析予報サイクル実験を実施した (以下、全球 HIMSST 実験)。比較対象は MGDSST を利用した実験である (以下、MGDSST 実験)。実験対象期間は 2023 年 7 月であり、解析が 2023 年 6 月 10 日から 2023 年 8 月 11 日まで、予報が 6 月 20 日から 8 月 11 日までである。

2023 年 7 月実験について第一推定値と観測値との差 (O-B) を確認すると、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A との整合性において、ch4 や ch5 など下層気温に感度があるチャンネルについて統計的な有意性はないものの改善傾向となっていた (図 4.1.9)。この結果は OSTIA を用いた予備実験 (気象庁 2024) と定性的に一致しているが、変化幅としては限定的である。また、予測精度は中立からやや改善であり (図 4.1.10)、台風予測精度については中立の結果を得ている (図略)。

実験対象とした時期では比較対象となる全球 HIMSST 実験、MGDSST 実験ともに短周期変動成分に AMSR2 が利用されていること、また、ひまわりは静止気象衛星のため観測領域が限られていることから、SST 解析に静止気象衛星ひまわりを新規に利用することの全球数値予報システムへの影響は OSTIA を用いた予備実験ほどは大きくならなかったと考えられる。全体として、解析予測精度は中立からやや改善であったため、全球数値予報システムにおける全球 HIMSST の利用に問題はないと考えている。

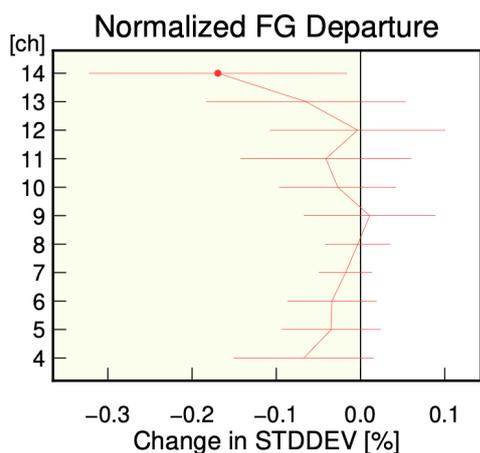


図 4.1.9 解析予報サイクル実験による 2023 年 7 月における全球域でのマイクロ波気温サウンダ AMSU-A による観測値と第一推定値との差の標準偏差の変化率 [%]。負の値は全球 HIMSSST 実験の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表し、エラーバーは 95%信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意であることを表す。

4.1.6 まとめ

(1) 各開発項目の進捗

本稿では、台風防災へ貢献するため取り組んでいる全球数値予報システムの開発について報告した。

将来の高解像度への対応として、GSM の浮動小数点数の単精度化について報告した。MPI 通信単精度化と全体単精度化の二段階の対応を検討しており、MPI 通信単精度化では予測精度は中立でありながら実行時間が約 10%短縮する結果を得た。全体単精度化では実行時間は 30%程度短縮するものの、予測精度が部分的に悪化することから調査と対策を検討していく。

利用観測データの増大に備え、全球 4D-Var についても浮動小数点数の単精度化を検討した。その結果、大幅なメモリ使用量削減と実行時間短縮を行えることを確認した。現時点で確認された解析予測精度への影響は限定的であるものの、今後も調査と開発を慎重に進めてゆく方針である。

また、全球 4D-Var に SDL を導入することでアンサンブル背景誤差をより適切に表現しうることが確認できた。解析予測精度向上につなげるため、更なる高度化も視野に開発を続けている。

全球 HIMSSST 利用に向けた開発では、高解像度化により全球 HIMSSST は MGDSSST に比較して海洋中小規模擾乱など細かい空間構造が表現されていることを確認した。また、全球数値予報システムでの解析予測精度も中立から改善となる結果を得た。

(2) 今後の計画

これらの開発項目について開発と評価を進め、順次全球数値予報システムに導入することを目指している。GSM の MPI 通信単精度化及び全球 4D-Var への SDL 導入と全球 HIMSSST の利用開始は令和 9 年 3 月頃を計

画しており、全球 4D-Var の単精度化も解析予測精度への影響が十分に小さいことが確認できた範囲についてはここでの導入を目指している。また、GSM の全体単精度化は令和 10 年 3 月頃の導入を目指し評価を進めている。全球 4D-Var の全体単精度化の導入時期は未定であるが、評価が済んだ範囲ごとに段階的に導入していく計画である。

参考文献

- Buehner, M., 2012: Evaluation of a spatial/spectral covariance localization approach for atmospheric data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 617–636.
- Buehner, M. and A. Shlyayeva, 2015: Scale-dependent background-error covariance localisation. *Tellus*, **67A**, 28 027.
- Caron, J.-F. and M. Buehner, 2018: Scale-dependent Background Error Covariance Localization : Evaluation in a Global Deterministic Weather Forecasting System. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1367–1381.
- Diamantakis, M. and F. Vana, 2022: A fast converging and concise algorithm for computing the departure points in semi-Lagrangian weather and climate models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **148(743)**, 670–684.
- Good, S., E. Fiedler, C. Mao, M. J. Martin, A. Maycock, R. Reid, J. Roberts-Jones, T. Searle, J. Waters, J. While, and M. Worsfold, 2020: The Current Configuration of the OSTIA System for Operational Production of Foundation Sea Surface Temperature and Ice Concentration Analyses. *Remote Sensing*, **12(4)**.
- Jablonski, C. and D. L. Williamson, 2006: A baroclinic instability test case for atmospheric model dynamical cores. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2943–2975.
- 気象庁, 2024: 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.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析。測候時報, 気象庁, **73 特別号**, S1–S18.
- Lang, S.T.K., A. Dawson, M. Diamantakis, P. Dueben, S. Hatfield, M. Leutbecher, T. Palmer, F. Prates, C. D. Roberts, I. Sandu, and N. Wedi, 2021: More accuracy with less precision. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **147**, 4358–4370.
- Ménérier, B., T. Montmerle, Y. Michel, and L. Berre, 2015a: Linear Filtering of Sample Covariances for Ensemble-Based Data Assimilation. Part I : Opti-

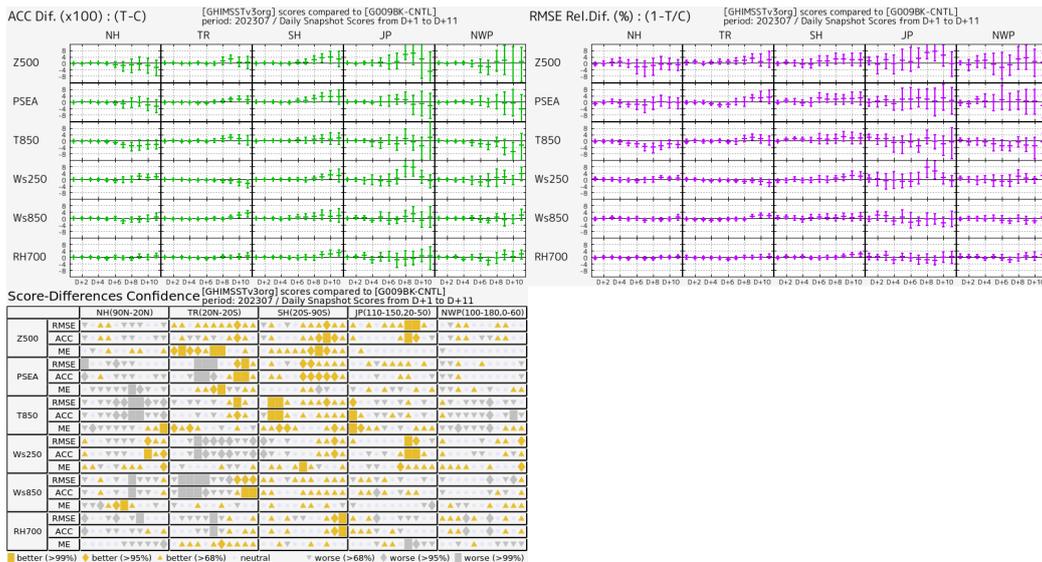


図 4.1.10 2023 年 7 月における対流圏主要要素のアノマリー相関係数の改善幅 (左上)、RMSE の改善率 (右上) と全球 HIMSS T 実験と MGDSST 実験のスコア差の有意性判定 (左下: スコアカード)。自実験の解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S–20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E–150°E, 20°N–50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E–180°E, 0°–60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (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有意水準が厳しい。

mality Criteria and Application to Variance Filtering and Covariance Localization. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1622–1643.

Ménétrier, B., T. Montmerle, Y. Michel, and L. Berre, 2015b: Linear Filtering of Sample Covariances for Ensemble-Based Data Assimilation. Part II : Application to a Convective-Scale NWP Model. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1644–1664.

Nakano, M., H. Yashiro, C. Kodama, and H. Tomita, 2018: Single Precision in the Dynamical Core of a Nonhydrostatic Global Atmospheric Model: Evaluation Using a Baroclinic Wave Test Case. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 409–416.

Rüdisühli, S., A. Walser, and O. Fuhrer, 2013: COSMO in single precision. *COSMO Newsletter*, **14**, 70–87.

Temperton, C., M. Hortal, and A. J. Simmons, 2001: A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 111–127.

Williamson, D. L., J. B. Drake, J. J. Hack, R. Jakob, and P. N. Swarztrauber, 1992: A Standard Test Set for Numerical Approximations to the Shallow Water Equations in Spherical Geometry. *J. Comput. Phys.*, **102**, 211–224.

柏木啓一, 1995: 計算機システム. 平成 7 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 8–12.

吉村裕正, 松村崇行, 2004: セミラグランジュ統一モデ

ル. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 51–60.

4.2 局地モデルの高解像度化に向けた開発

4.2.1 はじめに

局地モデル (LFM) は日本域を予報領域とした水平解像度 2 km の予測システムで、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。

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、半日前から降水予測に基づいた住民の早期避難や地域の防災対応を可能とするため、線状降水帯等に伴う大雨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、線状降水帯を構成する個々の積乱雲を部分的に表現できるよう水平解像度を 2 km から 1 km へ高解像度化することで、線状降水帯の予測精度向上を計画している。また、より細かい地形を表現することで風の予測精度向上等による降水の立ち上がりの改善が期待される。並行して、計画している高解像度化による計算量増加への対応として、線状降水帯予測スーパーコンピュータ (NAPS11s) 向けの高高速化が必要となる。

本節では、2025年度末の LFM の高解像度化に向けた開発において課題となった地形に関する物理過程等の最適化、および雲物理過程の高高速化について報告する。

4.2.2 地形作成方法ならびにパラメータの最適化

LFM の 1 km 化にあたり、解像度に則したモデル標高およびその大気への影響を表現するため、モデル標高作成手法の調整と、サブグリッド地形起伏による乱流形状抵抗スキーム (TOFD; Beljaars et al. 2004) のパラメータの最適化を行った。

地形斜度制限の緩和

LFM のモデル標高は水平解像度約 90 m の高精度標高データセット MERIT DEM (Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM; Yamazaki et al. 2017) を用いて LFM 格子点における平均標高を計算する。さらに、モデルの計算安定性確保のため、モデル解像度の 1.5 倍相当の解像度に平滑化したのち、隣接格子との傾斜率 (標高差 ÷ 水平距離) が特定の上限值 (0.15) を超えないように高い側の格子の標高を下げる処理を施している。この方法で 1 km 解像度のモデル標高を作成したとき、現行の 2 km 解像度のものに比べて系統的に標高が低下してしまうことがわかった (図 4.2.1 左図)。この原因として、現在設定している最大傾斜率 0.15 では 1 km 解像度の場合に必要な急傾斜を抑えている可能性があることが判明した。この最大傾斜率は、以前の現業非静力学モデル (JMA-NHM; Saito et al. 2006, 2007) における設定を踏襲したものである。現在のモデルである asuca (気象庁予報部 2014; Ishida et al. 2022) は計算安定性が向上しており、傾斜が 45 度程度 (傾斜率 1.0 に相当) の地形であっても安定に計算できる

ことが理想実験等で確認されている (石田ほか 2014b)。これを踏まえ、最大傾斜率を 0.15 から 0.25 に変更し、斜度に対する制限を緩和することとする。図 4.2.2 は 2 km 解像度と 1 km 解像度のモデル標高を頻度分布で比較したものであるが、最大傾斜率を 0.15 のままで 1 km 解像度モデル標高を作成すると、2 km 解像度モデル標高とほぼ同じ頻度となっている。一般に、高解像度化すると標高のメリハリが付き、高標高の格子が増加することが想定されるが、最大傾斜率 0.15 ではそれを実現することはできない。最大傾斜率を 0.25 に変更して 1 km 解像度モデル標高を作成すると、高標高の格子が増加し、斜度制限変更前のモデル標高に見られていた系統的な標高の低下は見られないことを確認した (図 4.2.1 右図)。

TOFD のパラメータ調整

モデルの高解像度化に併せて、TOFD スキームのパラメータの最適化を行う。TOFD スキームではサブグリッドの標高標準偏差に基づいて地形抵抗の大きさを定式化している。標高標準偏差を計算する際、TOFD スキームが対象とするスケールの起伏を抽出するため、地形データにバンドパスフィルタを適用している。フィルタ関数は Beljaars et al. (2004) の (A.1) 式に基づいており、現行の LFM では高波数側のフィルタ幅を 400 m、低波数側のそれを 4 km に設定している。今回、1 km 解像度に変更するにあたって、低波数側のフィルタ幅を 2 km に変更する。加えて、波数空間のフィルタ関数 H_{flt} (Beljaars et al. 2004, (A.2) 式) の積分を数値的に計算し、最適なパラメータを算出する ($I_H = 0.00440 \text{ m}^{-1}$, $k_{flt} = 0.00243 \text{ m}^{-1}$)。

また、1 km 解像度の LFM を開発する過程で、現行 LFM と比べて地上風向の誤差はほぼ変わらないものの地上風速の正バイアスの拡大が認識された。感度実験等の結果から、地上風速誤差の縮小を目的として、TOFD 定式 (Beljaars et al. 2004, (16) 式) の定数 α を 12 から 24 に変更する。

最適化のインパクト

地形に関する最適化のインパクトを調査するために、2023年の夏 120 事例 (2023年6月28日から7月12日、1日8回実行) について実験を行った。図 4.2.3 は対アメダス地上風速予測の平均絶対誤差を表す。最適化後の地上風速誤差は、予報初期を除き、最適化前と比べて大きく縮小し、2 km 解像度実験と同等の予測精度となっていることがわかる。地上風向の予測誤差は縮小することを確認している (図略)。

4.2.3 NAPS11s 向けの雲物理過程の高高速化

LFM の演算量は、水平高解像度化により大幅に増加する。一方で、計算機資源を演算量の増加と同等に増強することは困難であり、プロダクトの提供時刻を維持するためには LFM の高高速化が必須となっている。現

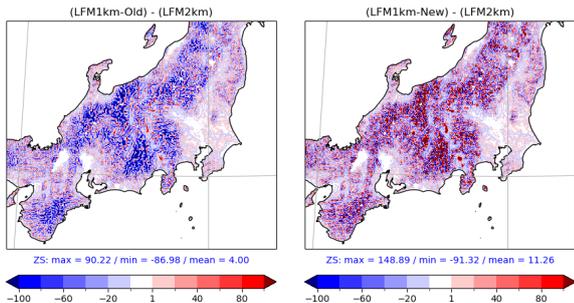


図 4.2.1 2 km 解像度と 1 km 解像度におけるモデル標高の差 [m]。左図は最大傾斜率を 0.15 で計算したものの、右図は 1 km 解像度について最大傾斜率を 0.25 で計算したものを表す。

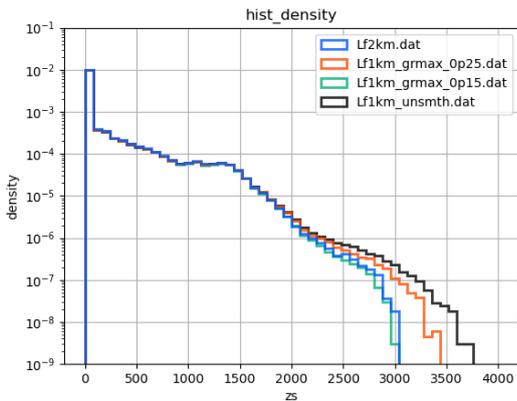


図 4.2.2 モデル標高のヒストグラム。青線は 2 km 解像度、緑線は 1 km 解像度で最大傾斜率を 0.15 としたものの、赤線は 1 km 解像度で最大傾斜率を 0.25 としたものの、黒線は 1 km 解像度で最大傾斜率による補正を行わないものをそれぞれ表す。

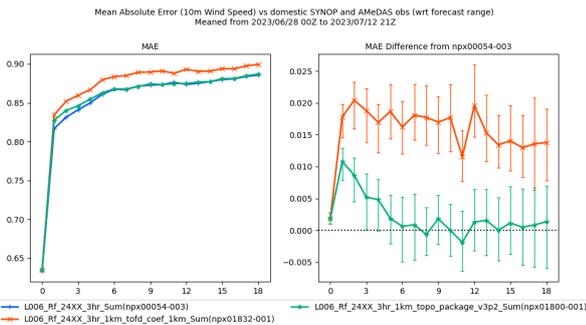


図 4.2.3 対アメダス地上風速のリードタイム別平均絶対誤差 [m/s](左図)。青線は 2 km 解像度実験結果、赤線は地形最適化前の 1 km 解像度実験結果、緑線は地形最適化後の 1 km 解像度実験結果。右図は 2 km 解像度実験結果に対する差分を表す。実験期間は 2023 年 6 月 28 日から 7 月 12 日まで (120 初期値)。

在 LFM が運用されている NAPS11s では、LFM の実行時間の約 25% を asuca の雲物理過程が占めていることがわかっている。そこで、主要なボトルネックである雲物理過程を対象に、NAPS11s 上での高速化を目的としたコーディングレベルでの最適化を行った。

asuca はスカラプロセッサ向けに設計されており、3次元配列の最内を鉛直方向とする kij 方式¹を採用している。並列化手法は、MPI を用いた水平 2次元の領域分割によるプロセス並列化と、各プロセス内の水平方向のループに対する OpenMP を用いたスレッド並列化を併用している。物理過程は、鉛直 1次元で実装された物理過程ライブラリ (原 2012) のサブルーチンを、各スレッドから呼び出す形で実装されている。

スーパーコンピュータ「富岳」と同じアーキテクチャを採用している NAPS11s 上でプログラムの実行性能を引き出すためには、CPU コアがもつベクトル化機能 (SIMD:Single Instruction Multiple Data²) を活用した命令数の削減や、ソフトウェアパイプライン³(SWPL:Software Pipelining) の適用による命令実行効率の向上が非常に重要である。これらのコンパイラによる最適化を適用するためには、最内ループにループ運搬依存⁴や複雑な分岐処理が存在しないことが求められる。また、SWPL を適用するには、必要に応じてループ分割を行うことによりループボディ⁵の粒度を適切に設定することが必要である。しかし、現行の雲物理過程は降水フラクション等の計算において鉛直方向のループ運搬依存があり、またループ内に多くの複雑な分岐処理を含んでいる。さらに、各素過程の時間変化率を足し込んだ結果を次の素過程の計算に使う手法 (シーケンシャルスプリットング) を採用していることからループ運搬依存が計算全体に及んでいる。その結果、全ての計算を単一のループ内で実行せざるを得ない構造となっており、ループボディが非常に大きくなっている。これらのコードの特徴が、最内ループでの SIMD 化や SWPL の適用を困難にしており、NAPS11s で実行性能が低い要因となっている。

そこで、コンパイラによる最適化が適用可能となるようにコーディングレベルでの最適化を行う。まず、最内ループの運搬依存を解消するために、雲物理過程計算時にのみ ikj 方式に切り替える変更を行った。具体的には、物理過程ライブラリの雲物理過程を (k) の 1次元実装から (i,k) の 2次元実装に変更し、asuca 側では j ループに対するスレッド並列処理内の雲物理過程を呼び出す前後で (k,i) と (i,k) の配列の詰め替えを行うように変更する。雲物理過程は水平方向にはループ運搬依存が無いため、この変更により最内ループの SIMD 化やループ分割が可能となる。さらに、SIMD 化を前提とした分岐処理の削減・整理、および SWPL が適用可能な粒度でのループ分割等の最適化も併せて行う。

¹ x,y,z 方向のループインデックスとして一般的に i,j,k を用いることから a(k,i,j) のように 3次元配列を定義する方式を「kij 方式」と呼んでいる (石田ほか 2014a)。

² 1つの命令で複数のデータを同時に処理する並列化方式。

³ コンパイラが命令を並び替え、ループ反復間で命令実行を重ね合わせることで、命令の並列性を向上させる最適化手法。

⁴ ループ反復間に依存関係が存在する状態。

⁵ 一つのループで囲まれたコードブロック。

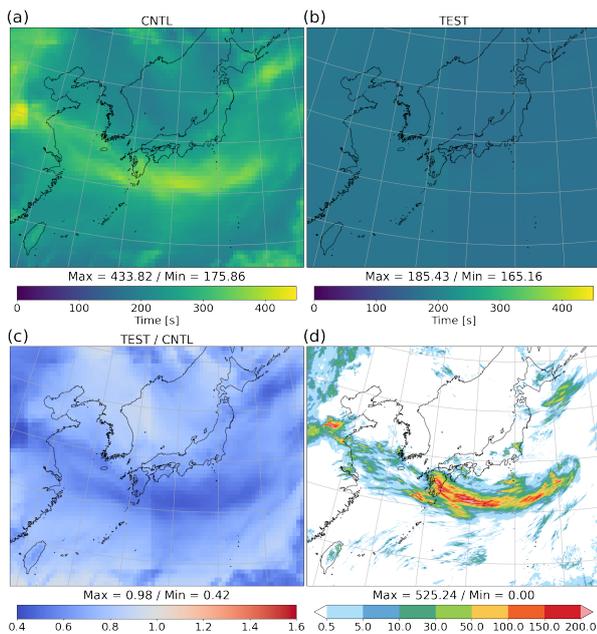


図 4.2.4 2023 年 7 月 3 日 00UTC 初期値の 1 km へ高解像度化した LFM の 18 時間予報における雲物理過程の MPI プロセス毎の実行時間 [s](a,b,c) と 18 時間積算降水量 [mm](d)。(a) は最適化前 (CNTL)、(b) は最適化後 (TEST)、(c) は最適化前後の比 (TEST/CNTL) を表す。

以上の変更により、雲物理過程のほとんどのループで SIMD 化および SWPL が適用されるようになる。

図 4.2.4 に 1 km へ高解像度化した LFM(1kmLFM) の 18 時間予報における雲物理過程の MPI プロセス毎の最適化前後の実行時間⁶と 18 時間積算降水量を示す。最適化前 (CNTL) は、水物質量の多い領域を含むプロセスの実行時間が相対的に長く、プロセス間のロードインバランスを拡大させる原因となっている。これは、CNTL のコード構造上 SIMD 化や SWPL が適用できず逐次実行となるため、演算量が水物質量に大きく依存してしまうことに起因する。一方、最適化後 (TEST) は、SIMD 化と SWPL の適用により演算の並列性と実行効率が向上し、特に CNTL でボトルネックとなっていた水物質量の多い領域で実行時間が最大約 58%削減され、プロセス間のロードバランスが改善する。この高速化により、1kmLFM のモデル全体としての実行時間は約 18%削減される。

4.2.4 まとめと今後の開発

2025 年度末の LFM 更新では、半日前からの住民の早期避難や地域の防災対応に向けて、線状降水帯をはじめとする大雨の予測精度向上を目的として、主に対流の表現力向上に向けた現行の水平解像度 2 km から 1 km への高解像度化とそれに伴う地形に関するパラメータ変更、計算量増加に対応するための高速化を行

⁶ ここでは、MPI 並列数を 4560、OpenMP スレッド数を 12 として評価した。

う。高解像度化に伴う地形の精緻化を図るため、最大地形斜度率の見直しを行い、入力となる地形データにより近い標高分布を取り込めることを確認した。高解像度化による予測精度への影響調査において、1 km LFM の地上風向の予測誤差は軽減し、地上風速の予測精度は、乱流形状抵抗スキーム TOFD のパラメータを最適化することで、現行の LFM と同程度となることがわかった。高速化の取り組みとして、NAPS11s 上でボトルネックの 1 つであった雲物理過程のコーディングレベルでの最適化を行い、1 km に高解像度化した LFM のモデル全体としての実行時間を最適化前に比べて大きく削減できることを確認した。これらのモデル改良の他、計算安定性の改善に向けた修正等を含めて、スーパーコンピュータ「富岳」を活用して、長期間にわたる再予報実験を行い、予測特性への影響や数値安定性に関する調査を進めている。今後は、本節で示した改良と観測データ利用改良 (第 4.4 節) 等を合わせた仕様での試験を実施し、改善の効果を確認したのち、2025 年度末に局地数値予報システムを更新する計画である。

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.

原旅人, 2012: 物理過程ライブラリの開発. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 205–208.

石田純一, 河野耕平, 荒波恒平, 2014a: 並列化・高速化. 数値予報課報告・別冊第 60 号付録 A, 気象庁予報部, 141–146.

Ishida, J., K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi, Y. Kitamura, and C. Muroi, 2022: ASUCA: the JMA operational non-hydrostatic model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 825 – 846.

石田純一, 河野耕平, 松林健吾, 2014b: 理想実験を通じたドライモデルとしての評価. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 62–87.

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.

Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic Atmospheric Models and Operational Development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271–304.

Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.

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.

4.3 局地アンサンブル予報システムの運用開始に向けた開発

4.3.1 はじめに

線状降水帯に代表される集中豪雨等のメソスケール現象は、毎年のように豪雨災害をもたらしており、その予測精度の向上は防災上の重要な課題である。気象庁はメソモデル（MSM: Meso-Scale Model; 水平格子間隔 5 km）の予測精度向上、MSM をベースとするメソアンサンブル予報システム（MEPS）による確率予測精度向上のための開発を進めてきた。また、より局地的な現象を捉えるため、局地モデル（LFM: Local Forecast Model）の継続的な改良を進め、線状降水帯に伴う局地的な強雨の分布や降水量をある程度表現することが可能になってきている。それでも、これらのモデルが対象とするメソスケール現象の予測可能性は本質的に低く（Zhang et al. 2003 など）、局地的な強雨を時間と場所を特定して予測することは困難であり、依然として予測の不確実性が高い。

気象庁が平成 30 年に策定した「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、豪雨防災の目標達成に向けた開発の方向性の一つとして、「キロメートル以下の高解像度局地モデル」の開発と「集中豪雨の予測が持つ不確実性を、適切に捕捉可能な局地アンサンブル予報システムの開発」を挙げ、決定論的予測の精度向上と、その予測不確実性を捉えるアンサンブル予報システムの開発を重要課題としている。気象庁では、これらの重要課題について、2025 年度末に、LFM の高解像度化（水平格子間隔を 2 km から 1 km）（4.2 節）及び LFM をベースとする局地アンサンブル予報システム（以下、LEPS とする）の運用開始を計画している。

LEPS は、線状降水帯予測スーパーコンピュータ及びスーパーコンピュータ「富岳」を活用して開発を進めてきた。気象庁（2024）では、2024 年時点で開発中の LEPS（初期摂動のみ）の強雨確率予測特性について事例調査結果を示した。その後の開発において、側面境界摂動を導入した性能評価試験を実施した後、本運用開始に向けた部内試験運用として、2025 年 6 月から 10 月に「富岳」において LEPS リアルタイムシミュレーション実験を実施した。

本節では、第 4.3.2 項で 2025 年度末に運用開始予定の LEPS の仕様を説明する。第 4.3.3 項では、まず摂動の時間発展の特性を概観し、次に LEPS の強雨確率予測特性について、側面境界摂動を導入した性能評価試験（2023 年の強雨事例を対象）の事例検証と統計検証を服部ほか（2025）に基づき報告する。側面境界摂動の効果及び影響範囲についても説明する。第 4.3.4 項では、「富岳」リアルタイムシミュレーション実験の結果を報告する。

4.3.2 運用開始予定の LEPS の仕様

運用開始予定の LEPS の仕様を説明する。本項の仕様により、第 4.3.3 項及び第 4.3.4 項の試験を実施した。

LEPS は、MEPS 摂動に由来する、主として 100 km 程度以上の水平スケールの初期摂動・側面境界摂動を与え、その摂動を起因とする水平格子間隔 2 km の LFM の振る舞いの違い（ばらつき）により、主に発生環境場に起因する強雨予測の不確実性を捉えるアンサンブル予報システムである。

LEPS の予報モデルは LFM（水平格子間隔 2 km; 以下、2kmLFM と呼ぶ）を用いて、各メンバーの予測における計算領域や水平格子間隔、鉛直層配置、物理過程を含む各種設定を全て 2kmLFM に揃える。予報時間は 21 時間とし、1 日 4 回（00,06,12,18UTC）実行する。メンバー数は 21（うち摂動を与えないコントロールラン 1）である。水平格子間隔 1 km に高解像度化する LFM（4.2 節）とは別に、2kmLFM を LEPS のコントロールランとして実行する。

摂動は初期摂動と側面境界摂動を与える。初期摂動は、6 時間前を初期値とする MEPS の 6 時間予報値とその時刻のアンサンブル平均の差から算出される摂動成分を用いて作成する。この摂動成分に、高度 5500 m の温位摂動の振幅が領域平均で基準値（0.4 K）になるよう算出した振幅調整係数（全予報変数に同一の係数を使用）を乗じた上で、初期値（局地解析）に加える。側面境界摂動は、MEPS の 6～27 時間予報値とその時刻のアンサンブル平均の差を摂動成分とし、初期摂動の振幅調整係数を乗じた上で、側面境界値（メソ予報値）に加える。MEPS の初期摂動は特異ベクトル（SV）法を用いており、総観規模、メソ α スケール、メソ β スケールの現象の予測の不確実性を捉えるため、全球 SV（水平格子間隔約 270 km）と 2 種類のメソ SV（水平格子間隔 80 km, 40 km）を組み合わせている（國井・小野 2020）。MEPS のメンバー数は LEPS と同じ 21 であるので、MEPS のあるメンバーから求めた摂動が LEPS のあるメンバーの摂動と対応する。この摂動の親子関係については第 4.3.3 項（1）で述べる。

4.3.3 2023 年梅雨期を対象とした性能評価試験

この項では、2023 年梅雨期の強雨事例を対象とした性能評価試験から、はじめに（1）で LEPS の摂動の時間発展を概観し、続いて（2）で事例検証、（3）で統計検証の結果を示す。（4）では、気象庁（2024）の報告以降に新たに導入した側面境界摂動の効果と影響範囲について述べる。実験期間は 2023 年 6 月 28 日～7 月 12 日（60 初期値）である。実験には、2024 年 4 月時点相当の現業数値予報システムの LFM、MEPS を利用した。

（1）MEPS と LEPS の摂動の親子関係

LEPS の摂動は、基本的には低解像度の親 EPS（MEPS）からのダウンスケーリングとなる。図 4.3.1 で、MEPS と LEPS 摂動の親子関係を、梅雨期のある初

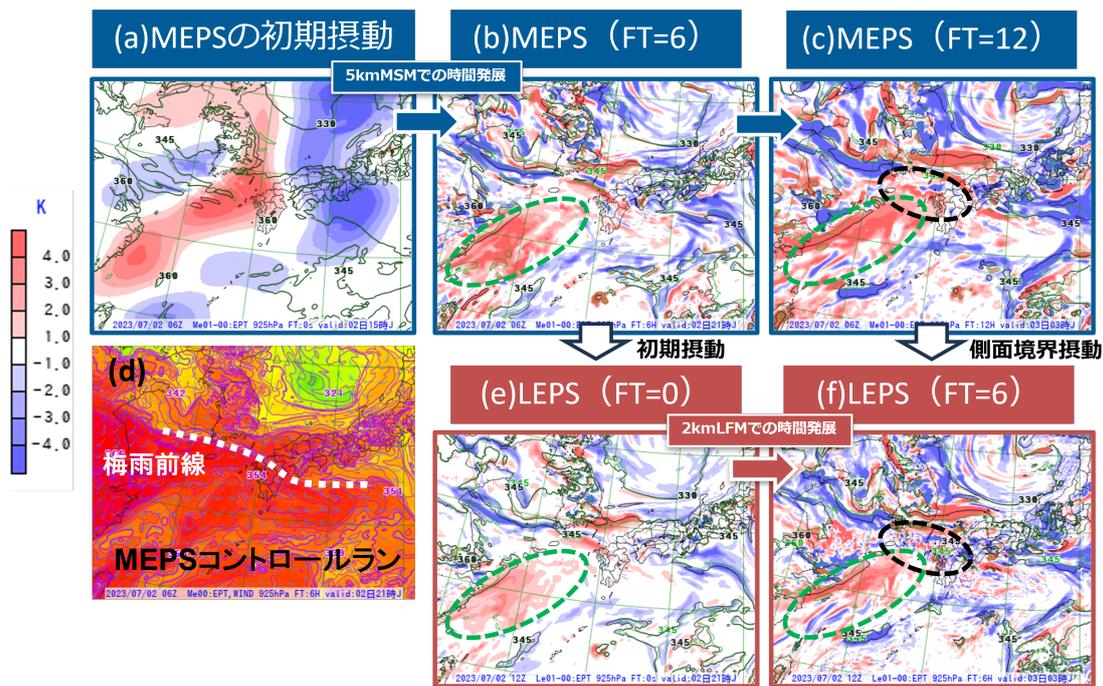


図 4.3.1 MEPS と LEPS の摂動の親子関係。上段 (a),(b),(c) の MEPS は 2023 年 7 月 2 日 06UTC 初期値、下段 (e),(f) の LEPS は 2023 年 7 月 2 日 12UTC 初期値。(b) と (e)、(c) と (f) の予報対象時刻はそれぞれ同じである (図の上下で予報対象時刻が同一になるように並べた)。いずれもメンバー 1 とコントロールランの 925 hPa 相当温度 [K] の差分を摂動例として示した。(d) は MEPS コントロールラン予測 (FT=6) の 925 hPa の相当温度・風。

期時刻の予測を用いて確認してみる。上段には親 EPS である MEPS、下段には、親子関係にあたる「MEPS 初期時刻から 6 時間後を初期時刻とする LEPS」を示している。MEPS のある 1 メンバーの初期摂動を (a) に示す。100 km 程度以上のスケールの空間構造を持った摂動が梅雨前線帯を中心に算出されている。この初期摂動は水平格子間隔 5 km の MSM によって 6 時間の時間発展をする中で、移流するとともに小さなスケールの摂動成分が増加していく (b)。この MEPS 摂動¹ を振幅調整した上で、LEPS の初期摂動とする (e)。この初期摂動は 2km LFM によって時間発展をする中で、移流するとともに小さなスケールの摂動成分が増加していく (f)。MEPS と LEPS での摂動の時間発展を比較すると、大きなスケールの摂動構造の時間発展 (たとえば緑点線の東シナ海の下層暖湿域内の正摂動の移流) は類似している。一方で、前線帯の対流活動域 (黒点線) での小さなスケールの摂動の時間発展の違いが大きい。環境場に与えた摂動に対する MSM と LFM の振る舞い (対流の空間スケール、発生のタイミング、発達の高さの表現等) の違いが現れている。

(2) 事例検証

実験期間中、梅雨前線帯に向かって流入する下層暖湿気の影響により、西日本を中心に線状降水帯が発生した。線状降水帯は、次々と発生した積乱雲が線状に

並び、ほぼ同じ場所に停滞することで線状の強雨域を形成する現象である。益子ほか (2024) は、個々の線状降水帯の発生機構や発生環境場がきわめて多様であることが明らかになってきたことを受けて、その体系的な理解につなげることを目的とし、線状降水帯の発生形態の分類を行った。その分類表では、A:「総観スケールの明瞭な前線本体に伴うもの」、B:「前線南側などの顕著な不安定場内」、といった環境場に着眼した大分類のもと、B-1:「広域の対流域の一部が局所的に強化」、B-2:「局所的な収束線が影響」、B-3:「トリガーは弱く、対流自身によって組織化したもの」、といった発生形態に基づいた分類となっている。また、数値予報モデル (水平解像度~1 km) による再現の相対的な難易度が「主観的」と注釈されつつ含まれており、各分類の難易度は A:「低」、B-1:「中」、B-2:「中」、B-3:「高」とされる。

以下では、益子ほか (2024) による線状降水帯の発生形態分類の着眼点とモデルによる再現の難易度を参考にしながら、実験期間中のうち 4 つの線状降水帯事例について、主観的な予測の難しさの順 (後ろほど難しい) に、①7月8日島根事例、②7月10日福岡・佐賀・大分事例、③7月3日熊本事例、④7月2日奄美事例における LEPS の予測結果を示す。

① 7月8日島根事例 (図 4.3.2)

中国地方に梅雨前線が停滞する中で (a)、島根県において前線帯の一部が強化され、線状の強雨が発生し

¹ 図 4.3.1 上段は MEPS のメンバー 1 とコントロールランの差分を示しているが、正確にはアンサンブル平均との差分を LEPS に与える摂動とする。

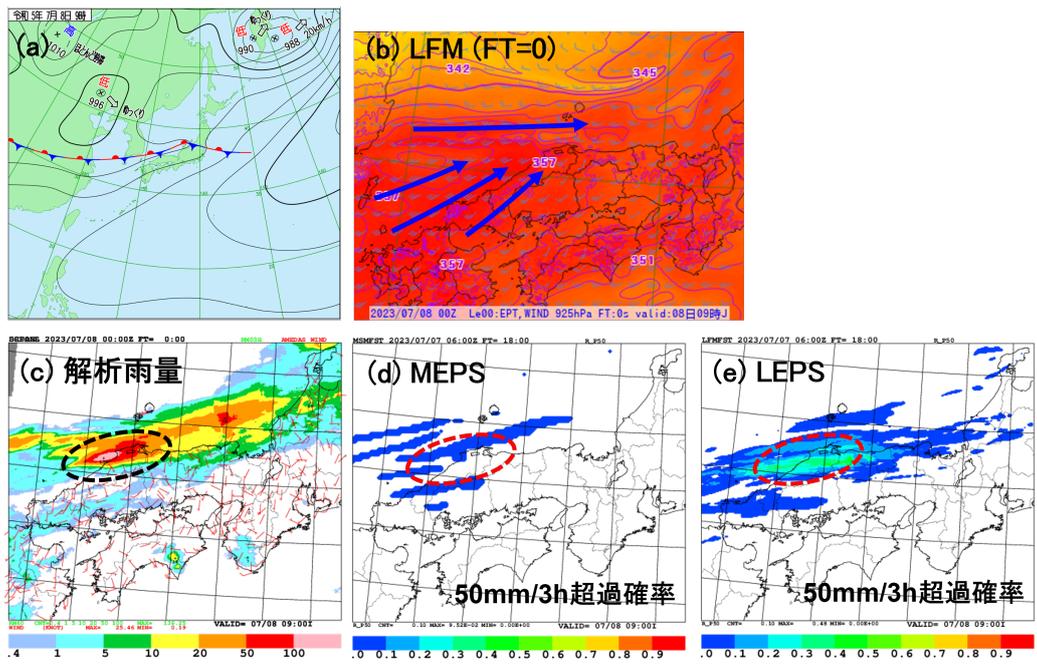


図 4.3.2 2023 年 7 月 8 日 09JST について、(a) 地上天気図、(b)925 hPa の相当温位・風 (LFM 初期値)、(c) 解析雨量 [mm/3h]、(d)MEPS による 50 mm/3h の超過確率予測、(e)LEPS による 50 mm/3h の超過確率予測。MEPS と LEPS 予測値は 2023 年 7 月 7 日 15JST 初期値の FT=18。

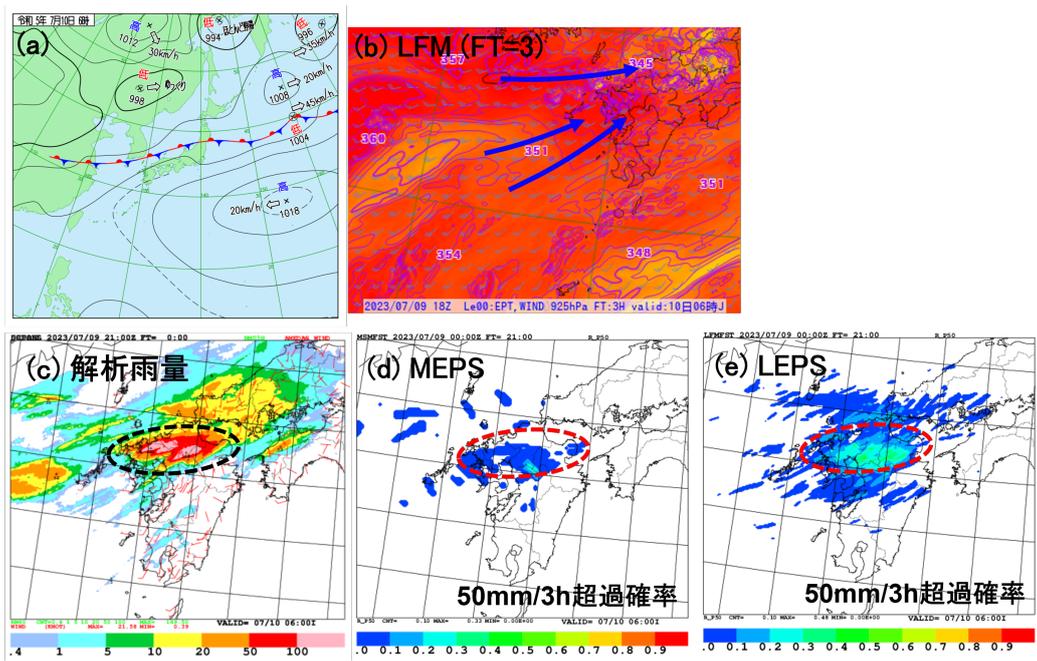


図 4.3.3 図 4.3.2 と同じ。ただし、2023 年 7 月 10 日 06JST について。また、初期時刻の関係で (b) は LFM の FT=3 を示す。MEPS と LEPS 予測値は 2023 年 7 月 9 日 09JST 初期値の FT=21。

た (c)。明瞭な前線本体に伴う大きなスケールの収束があり (b)、「分類 A」に相当する。現象のスケールが大きく、MEPS でもいくつかのメンバーで線状の強雨を予測した (d)。MEPS に比べて、LEPS は多くのメンバーで線状の強雨を予測し、50 mm/3h の超過確率で 30~40%程度の確率を示した (e)。

②7 月 10 日福岡・佐賀・大分事例 (図 4.3.3)

梅雨前線の南側で (a)、福岡・佐賀・大分県において線状の強雨が発生した (c)。太平洋高気圧の縁辺に沿った南西流と前線南側の西南西流との間で比較的大きなスケールの収束が存在した (b)。この収束域に沿った広域の対流域内で複数の降水システムが強化されており、「分類 B-1」に相当すると考える。収束域に対応し

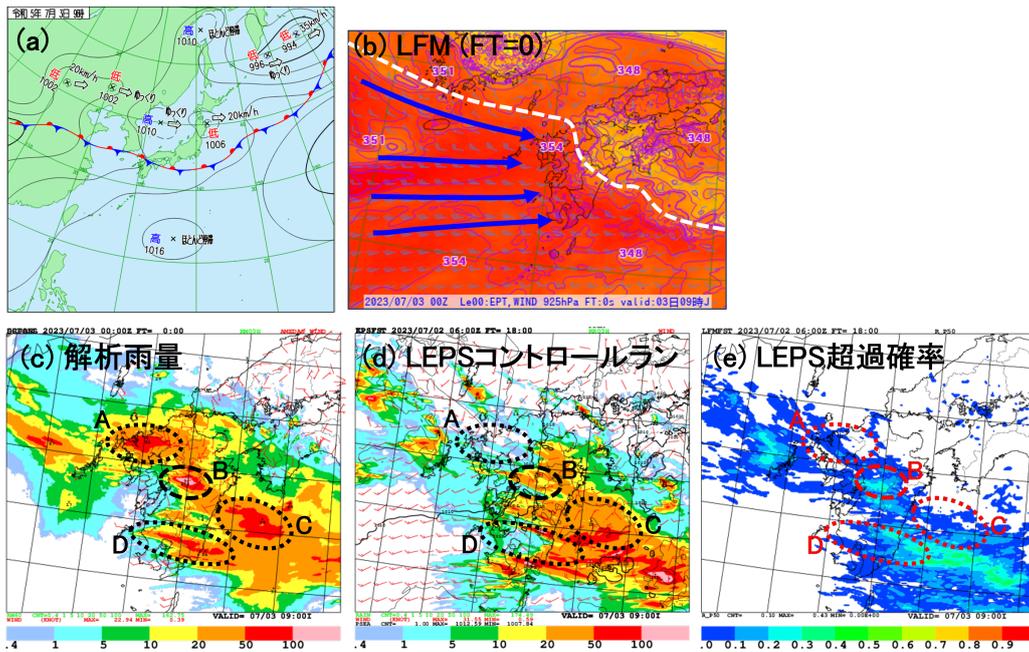


図 4.3.4 2023 年 7 月 3 日 09JST について、(a) 地上天気図、(b)925 hPa の相当温位・風 (LFM 初期値)、(c) 解析雨量 [mm/3h]、(d)LEPS コントロールラン予測の海面更正気圧・風・3 時間降水量、(e)LEPS による 50 mm/3h の超過確率予測。LEPS 予測値は 2023 年 7 月 2 日 15JST 初期値の FT=18。

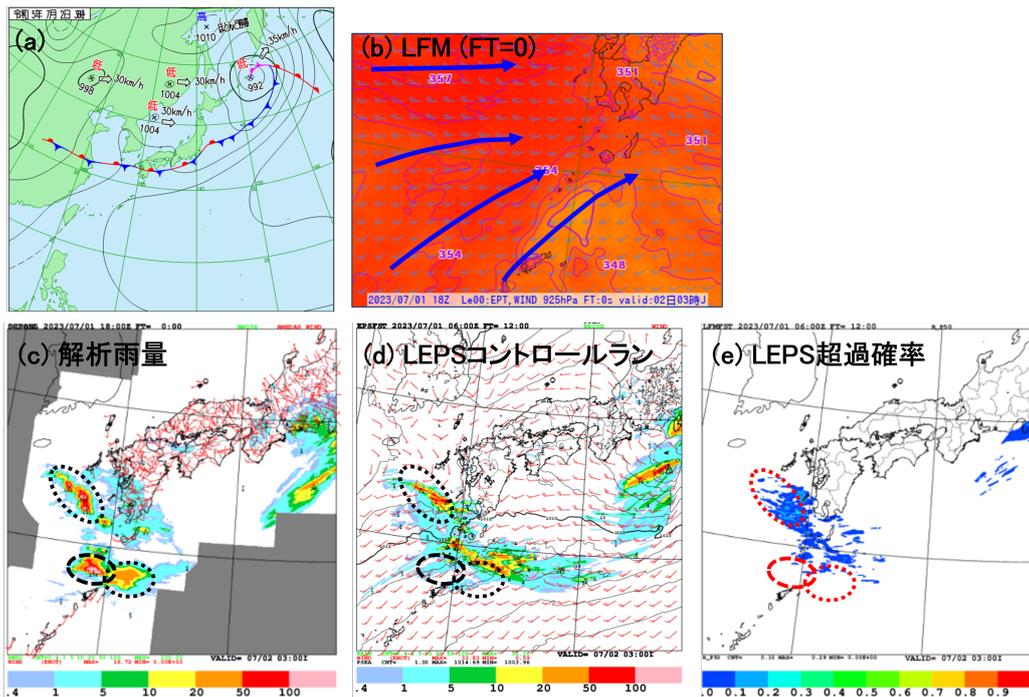


図 4.3.5 図 4.3.4 と同じ。ただし、2023 年 7 月 2 日 03JST について。LEPS 予測値は 2023 年 7 月 1 日 15JST 初期値の FT=12。

て MEPS でもいくつかのメンバーで強雨を予測したが、陸上では地形に沿った降水予測になる傾向(成田・森安 2010)も見られた(d)。MEPS に比べて、LEPS は多くのメンバーで実況に対応する線状の強雨を予測し、50 mm/3h の超過確率で 30~40%程度の確率を示した(e)。

③7 月 3 日熊本事例 (図 4.3.4)

梅雨前線の南側で(a)、複数の降水システム A, B, C, D が九州付近で発生し、熊本県付近の降水システム B が特に強雨となった(c)。降水システム C には相当温位の傾度が高い領域との対応が見られるが、降水システム A, B, D にはスケールの大きい明瞭な収束域は見られなかった。特に強雨となった降水システム B は

「分類 B-2」に相当すると考える（地形の影響もある可能性）。MEPS では各メンバーが九州の地形に沿った雨を表現し、個々の対流システムを MSM で表現するには限界があったと考えられる（図略）。LEPS コントロールランは、降水システム A を予測できず、B は強度が不足し、C, D は位置ずれが見られた (d)。LEPS の摂動メンバーに降水システム A, B, C, D を表現するメンバーが存在することにより、アンサンブル全体の超過確率として A, B, C, D の可能性を捕捉できた (e)。特に最も発達した降水システム B の可能性を捕捉できた。

④7月2日奄美事例（図 4.3.5）

梅雨前線の南側で (a)、複数の降水システムが九州海上で発生し、奄美大島の北に位置する降水システム（黒太点線）が特に強雨となった (c)。この奄美付近の降水システムは、太平洋高気圧の縁辺流と東シナ海の南西流が緩やかに合流する領域で発達した (b)。海上で収束も明瞭ではなく、トリガーが弱い中で対流が自己組織化した「分類 B-3」に相当し、予測が非常に難しかったと考えられる。LEPS コントロールラン、50 mm/3h の超過確率では、九州西海上の降水システムは捉えることができたが、奄美付近の二つの降水システムの発達、停滞は捉えられなかった (d,e)。実況よりも北東側に降水システムを予測するが、強度も不足していた。

ここで示した 4 事例に限らず、実験期間中の多くの事例において、①,②で見たように、LFM による強雨の表現能力により、LEPS は MEPS に比べ、局地的な強雨の可能性をよりの確に捕捉できることを確認した。また、③で見たように、アンサンブル予報を用いることで、コントロールラン単独では捉えきれなかった強雨の可能性が把握できることを多くの事例で確認した（少ないメンバーでの捕捉となるため超過確率は小さいことが多い）。

①-④のように益子ほか (2024) に基づく予測の難しさの順に見てみると、LEPS コントロールランで予測しやすい事例（スケールの大きい環境場の影響が大きい）では LEPS で高い超過確率を示し、LEPS コントロールランで予測が難しい事例（スケールが小さい、対流の発生に関する不確実性の影響が大きい等）では LEPS の示す超過確率は低い傾向があった。超過確率の大小と予測の難しさの高低が定性的には対応していると考えられる。

(3) 降水確率予測の統計検証

ここでは、降水の統計検証について MEPS と比較して評価する（各統計検証図の赤線：LEPS と青線：MEPS に着目）。

図 4.3.6 の閾値 50 mm/3h の降水予測の ROC 曲線では、MEPS に比べて高い捕捉率を示した。(2) の事例調査で見られた MEPS と比べた強雨の捕捉能力の高

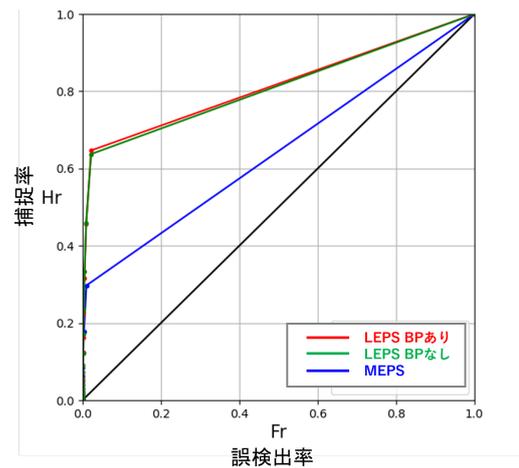


図 4.3.6 3 時間降水量について閾値 50 mm/3h に対する ROC 曲線（横軸が誤検出率 Fr、縦軸が捕捉率 Hr）。赤線が LEPS、青線が MEPS、緑線は LEPS 側面境界摂動なし（BP なし実験）。FT=3-21 の平均。

さが統計検証にも現れている。

図 4.3.7 (左) の降水予測の閾値別のブライアスキルスコア (BSS) では、LEPS (赤線) は閾値 30 mm/3h までは、気候値予測に比べて有効な予測であること、MEPS (青線) と比べて高いことを確認した。閾値 20 mm/3h の予報時間別の BSS (図 4.3.7 (右)) においても、どの予報時間でも MEPS に比べて LEPS が高い。これは、MSM の地形に沿った降水を過剰に予測する傾向が図 4.3.8 の信頼度曲線で見られる MEPS (青線) の高い確率予測での予測頻度過多につながっている一方、LFM に基づく LEPS (赤線) ではそのような傾向が見られないことによる。

MEPS の地形に沿った降水を過剰に予測する傾向など、MEPS と LEPS の超過確率の典型的な関係が現れた事例を図 4.3.9 に示す。MEPS は、10 mm/3h, 20 mm/3h 程度の降水について地形に沿った降水を過剰に予測しがちなこと (b,c)、50 mm/3h の降水は LEPS に比べて表現しづらいこと (e)、一方で LEPS は線状の降水を予測しやすいこと (g-j)、50 mm/3h などの強雨を MEPS よりも表現できること (j)、といった典型的な両者の関係性が分かる。

(4) 側面境界摂動の効果

ここでは、第 4.3.2 項で説明した初期摂動・側面境界摂動を与えた LEPS を「BP あり」、そこから側面境界摂動を与えないようにした設定（初期摂動のみ）とした実験を「BP なし」と呼び、両者の比較により、側面境界摂動の効果と影響範囲を説明する。

図 4.3.10 には実験期間の 925 hPa 相当温位のアンサンブル平均の二乗平均平方根誤差 (RMSE) とスプレッドの関係を示す。(a) の BP あり実験 (赤線) について、アンサンブル平均の RMSE がコントロールランの RMSE より小さいこと、スプレッドとアンサンブ

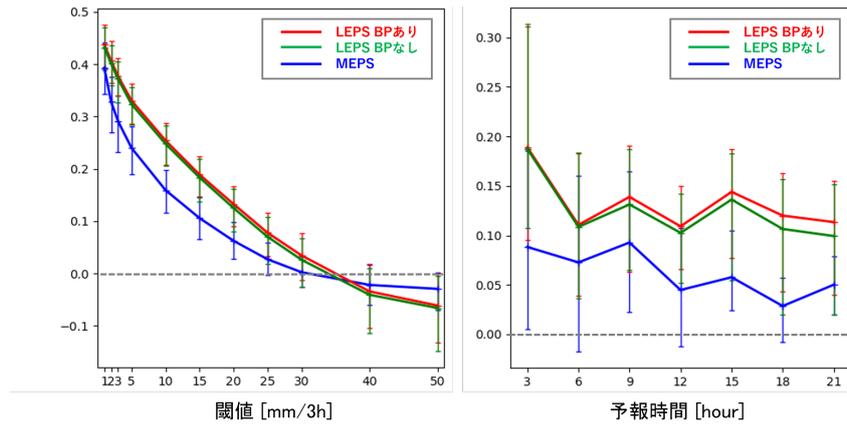


図 4.3.7 3 時間降水量のブライアスキルスコア。(左) 閾値別、(右) 20 mm/3h について予報時間別。赤線が LEPS、青線が MEPS、緑線は LEPS 側面境界摂動なし (BP なし) 実験。

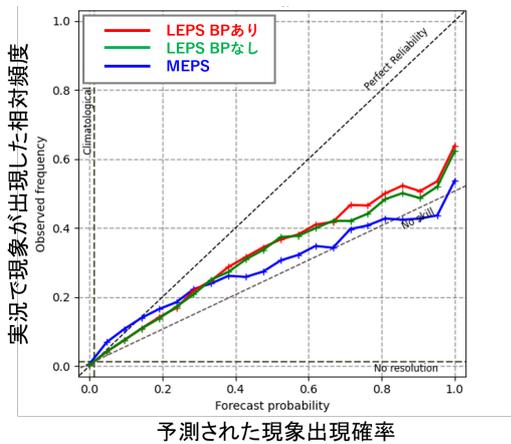


図 4.3.8 3 時間降水量 (20 mm/3h) の信頼度曲線。FT=3-21 の平均。赤線が LEPS、青線が MEPS、緑線は LEPS 側面境界摂動なし (BP なし) 実験。

ル平均の RMSE の大きさが近いこと (スプレッドスキルが 1 に近いこと) が確認できる。BP なし実験 (緑線) との比較から、側面境界摂動によりスプレッドが増加することでスプレッドスキルが 1 に近づき、アンサンブル平均の RMSE が予報後半に改善することが分かる。図 4.3.10(b)-(e) には、BP あり/BP なし実験について 925 hPa 相当温位のスプレッドとアンサンブル平均 RMSE の空間分布を示す。(b) と (d) の比較から、期間中の前線帯の位置に対応する領域でスプレッドとアンサンブル平均 RMSE が大きいことやその大きさに概ね対応が見られることが確認できる。(b) と (c) の比較から、側面緩和領域内や図中の白点線で示した西側側面境界から黄海付近の梅雨前線帯近傍でスプレッドが増加したことが分かる。(d) と (e) を比較すると、白点線の領域で RMSE の改善が大きかった (差分図略)。925 hPa 相当温位以外の要素・高度でも概ね同様の傾向が得られた。

側面境界摂動の降水確率予測への影響 (日本域の解析雨量で検証) について確認する。図 4.3.6 の ROC 曲線、

図 4.3.7 の BSS、図 4.3.8 の信頼度曲線には、BP なし実験を緑線で示している (各統計検証図の赤線:BP あり、緑線:BP なしに着目)。図 4.3.6 の ROC 曲線では、側面境界摂動導入による変化は小さかった。3 時間降水量の閾値別の BSS は閾値によらず改善し (図 4.3.7 (左))、予報後半ほど改善幅が大きい傾向があった (図 4.3.7 (右))。領域別では側面境界に近い北海道、南西諸島や九州で改善し、他の領域の変化は中立であった (図略)。事例での傾向としては、側面境界摂動の追加によって、強雨の超過確率がばらける方向 (雨域中心では低下、周囲は増加) であった (図略)。この傾向は、図 4.3.8 の信頼度曲線における BP あり (赤線) が BP なし (緑線) と比較して予測頻度の過多を緩和していることと整合する。

以上のことから、側面境界摂動には次のような効果があると考えられる。側面境界摂動は、境界から大気の流れによって徐々に拡がり、予報 21 時間のうちに影響しうる領域では期待通りスプレッドを適正化する。日本域の降水予測については、初期摂動の効果が支配的ではあるが、予報後半を中心に側面境界に近い領域で確率予測を改善 (より適切にばらつかせる) する。

4.3.4 2025 年出水期を対象とした「富岳」リアルタイムシミュレーション実験

2025 年 6 月から 10 月にかけて、部内試験運用として実施した「富岳」におけるリアルタイムシミュレーション実験の結果について報告する。実験の仕様は第 4.3.2 項で説明した運用開始予定の仕様に基づき、実行頻度が 1 日 2 回 (00,12UTC) である点だけが異なる。

「富岳」リアルタイムシミュレーションにより、第 4.3.3 項で把握した特性を 2025 年出水期の事例で確認することができ、統計検証では第 4.3.3 項 (3) と同様の結果を得た (図略)。以下では、実験期間中の 4 事例について第 4.3.3 項 (2) と同じ視点で、MEPS と比較した LEPS の強雨の可能性の捕捉能力を説明する。図 4.3.11 に、益子ほか (2024) を参考にしつつ予測の難し

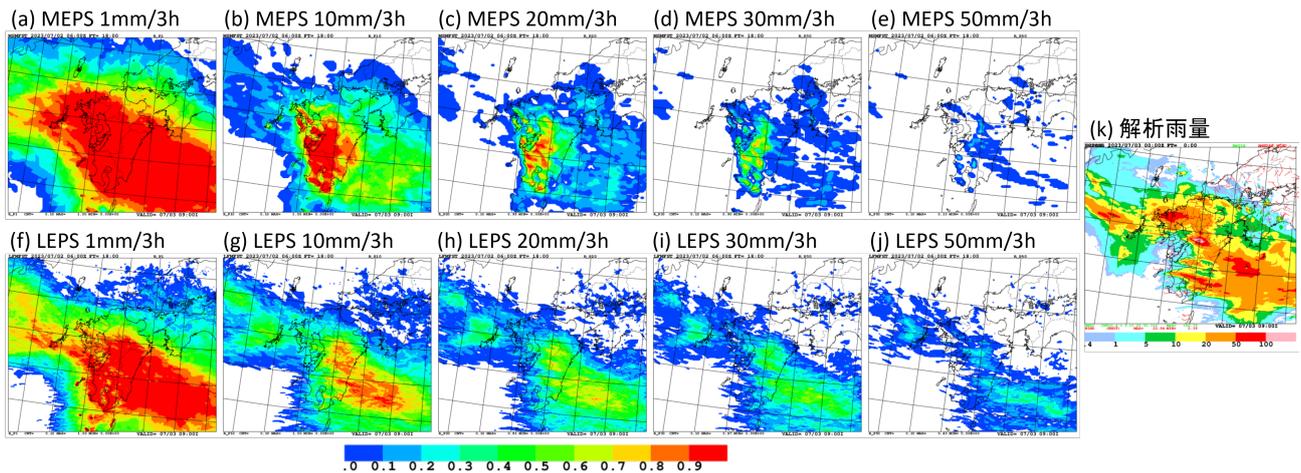


図 4.3.9 MEPS/LEPS の降水量閾値別の降水確率予測の特徴 (例: 2023 年 7 月 3 日 09JST)。上段 (a)-(e) に MEPS、下段 (f)-(j) に LEPS の各閾値 [mm/3h] の超過確率。2023 年 7 月 2 日 15JST 初期値の FT=18。(k) 解析雨量 [mm/3h]。

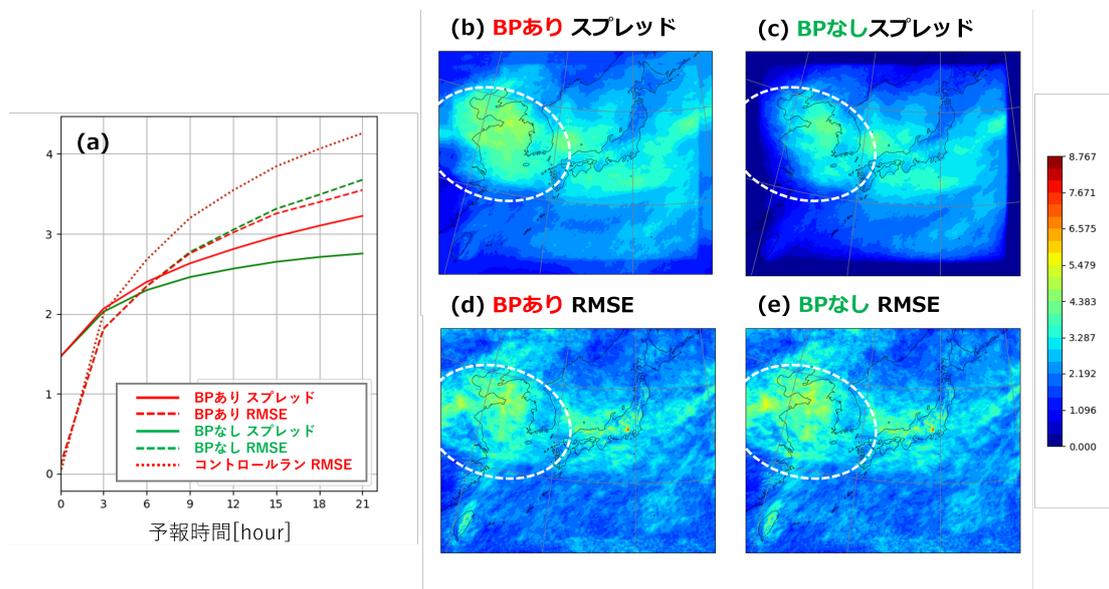


図 4.3.10 スプレッドおよびアンサンブル平均の RMSE(対局地解析)の実験期間平均。925 hPa の相当温位 [K]。(a) 時系列。横軸は予報時間 [h]、実線がスプレッド、点線がアンサンブル平均の RMSE、細点線はコントロールラン (BP あり/なし共通) の RMSE。赤線が BP あり、緑線は BP なし実験。(b) BP あり、スプレッド平面図 (FT=21)、(c)BP なし、スプレッド平面図 (FT=21)。(d)BP あり、アンサンブル平均の RMSE 平面図 (FT=21)、(e)BP なし、アンサンブル平均の RMSE 平面図 (FT=21)。

さの順 (後ろほど難しい、図では右列ほど難しい) に、
 ㉠8月9日福岡事例、㉡8月11日熊本事例、㉢8月8日鹿児島事例、㉣9月10日長崎事例における LEPS と MEPS の予測結果 (50 mm/3h の超過確率) を示す。

㉠8月9日福岡事例 (図 4.3.11 の 1 列目) は、九州北側の停滞前線 (a) において、広域な対流域の一部が福岡県付近で局所的に強化された (e)。「分類 A」に相当し、MEPS でもいくつかのメンバーで線状の強雨を表現するが、実況よりも北寄り (i) であった。MSM は山陰沖で小低気圧を発達させる予測 (この小低気圧は解析値では見られず、モデル予測の過発達と見られる)

となっており、その影響があったと見られる。MEPS に比べて、LEPS は多くのメンバーで線状の強雨を予測し、30~40%程度の比較的高い確率を示した (m)。

㉡8月11日熊本事例 (図 4.3.11 の 2 列目) は地上天気図の停滞前線 (b) の南側で、長崎県から熊本県にかけて、特に熊本県を中心に線状の強雨が継続した (f)。停滞前線上の低気圧後面からの北西風と太平洋高気圧縁辺からの南西風との収束域 (比較的スケールが大きい) に対応し、この収束域を総観スケールの前線と見做すと「分類 A」に相当する。南北に超過確率分布の幅はあり、また、地形に沿った降水表現は見られるが、

MEPS でもいくつかのメンバーで実況の強雨の可能性を捉えていた(j)。MEPS と同様に南北に超過確率分布の幅はあるが、MEPS に比べて、LEPS は多くのメンバーで線状の強雨を予測し、熊本県では 30~40%程度の比較的高い確率を示した(m)。

㉔8月8日鹿児島事例(図 4.3.11 の 3 列目)は、停滞前線(c)の南側で、比較的スケールの大きな収束域において対流の一部が強化され鹿児島県付近で線状の強雨となった(g)。「分類 B-1」に相当すると考える。MEPS でも一部のメンバーで対流域の強化を表現するが、強度が不足するメンバーが多かった(k)。MEPS に比べて、LEPS は多くのメンバーで線状の強雨を予測した。発生位置には南北の不確実性があることを表現しつつ、実況の強雨を少ないメンバーで捕捉した(o)。

㉕9月10日長崎事例(図 4.3.11 の 4 列目)は、九州の北側に位置する停滞前線(d)の南側の長崎県付近で、南西海上から暖湿気が流入する中で線状の強雨が発生した(h)。明瞭な下層の収束構造が見られず、トリガーが弱い中で対流自身によって組織化した「分類 B-3」に相当すると考えられる。MEPS では表現することが難しいスケールの現象であった(l)。LEPS では、やや西側に位置ずれがあるものの、一部のメンバーが長崎付近の強雨の可能性を示した(p)。対馬付近の停滞前線に対応する強雨域や、五島列島の西側海上に広がる雨域については、より高い確率を示していることから、これらに比べて、長崎付近の線状の強雨の予測が難しかったと考えられる。

図 4.3.11 では、第 4.3.3 項(2)と同様に、LEPS は MEPS に比べて局地的な強雨の可能性をよりの確に捕捉できること、LEPS の超過確率の大小と個々の事例の予測の難しさの高低が定性的に対応していること、が確認できた。次に、㉖8月11日熊本事例を例に、LEPS コントロールラン単独では捉えきれなかった強雨の可能性を LEPS 全体で捉えられていることを説明する。

図 4.3.12 には、㉖について 8 月 10 日 21JST から 11 日 06JST までの時間変化を示した。停滞前線上の低気圧後面からの北西風と太平洋高気圧縁辺からの南西風とのスケールの大きな収束域に伴う線状の強雨域が、10 日 21JST から 11 日 00JST にかけて一部強化しながら南下、06JST にかけて熊本県付近にはほぼ停滞した。LEPS コントロールランは、10 日 21JST では実況より北寄り、03JST にかけて強雨域を南下させ過ぎ、06JST では雨域はばらけて弱まった。LEPS による 50 mm/3h の超過確率ではコントロールランの上記の傾向を、それぞれの時間帯で補うメンバーが存在し、アンサンブル全体として、10 日 21JST から 11 日 06JST にかけての強雨の確率が継続して高いことを予測できている。たとえばメンバー 14 は 10 日 21JST の実況の強雨域を捉え、03JST では実況よりもやや南寄りであるが、06JST にかけて強雨の継続を比較的良好に捉えた。また、メンバー 07 は 11 日 06JST ではコント

ロールラン同様に雨域がばらけて弱まるが、それ以前の 03JST までは実況と対応する領域に強雨の継続を予測できた。個々のメンバーでは実況の 12 時間以上にわたる強雨を捉え続けることが難しい事例において、アンサンブル全体で強雨の可能性を確率的に捉えることの有用性が見えた事例と考えられる。

4.3.5 まとめと今後の課題

LEPS は 2025 年度末の運用開始を計画している。運用開始予定の LEPS は、水平解像度 2 km の LFM の 21 メンバーで構成し、21 時間予報を 1 日 4 回(00,06,12,18UTC)実行する。主として 100 km 程度以上の水平スケールの初期摂動・側面境界摂動(MEPS 摂動をダウンスケール)を与え、その摂動を起因とする 2km LFM の振る舞いの違い(ばらつき)により、主に発生環境場に起因する不確実性を捉えることを狙ったシステムである。

2023 年梅雨期を対象とした性能評価試験と 2025 年出水期を対象とした「富岳」リアルタイムシミュレーションによる部内試験運用を実施した。その結果から、LFM の線状の強雨を表現できる能力により、MEPS よりも高い確率で線状降水帯による大雨の可能性を捕捉できることを多くの事例で確認できた。この点は、LEPS と MEPS の各メンバーの強雨表現の違いから期待される結果であり、その有効性が改めて確認された。

LEPS は、LFM の予測に対して、ばらつきを持った複数の予測を計算し、信頼度・不確実性等の情報を提供できる。LEPS コントロールラン(2km LFM)だけでは捉えきれない大雨の可能性を LEPS により捕捉できることも多くの事例で確認できた。実験対象期間の多数の顕著事例において LEPS により強雨の可能性を捕捉できたことを把握した。また、LFM で予測しやすい事例(スケールの大きい環境場の影響が大きい等)では高い超過確率、予測が難しい事例(スケールが小さい、対流の発生に関する不確実性の影響が大きい等)では低い超過確率を示す傾向があり、個々の事例の予測の難しさと LEPS の超過確率の高低には定性的な対応が見られた。

最後に今後の課題を述べる。運用開始予定の LEPS では初期値・側面境界値の不確実性のみを考慮するが、今後はそれ以外の要素に起因する不確実性も考慮することにより、多様な線状降水帯の予測の不確実性を捉えていくことを検討していく。第 4.3.3 項(2)や第 4.3.4 項の事例で見えたような、小さなスケールの対流の発生予測の不確実性を捉えるには、対流発生に関する予報モデルの不確実性を表現する摂動が有効な可能性もある。LFM で解像・予測が難しい現象でもあり、予測の限界と不確実性の関係を見極めながら、この摂動の導入を検討する必要がある。これらの検討において、水平解像度 1 km の LFM(4.2 節)と 2 km の LFM(LEPS コントロールラン)の表現の違いは、今後の局

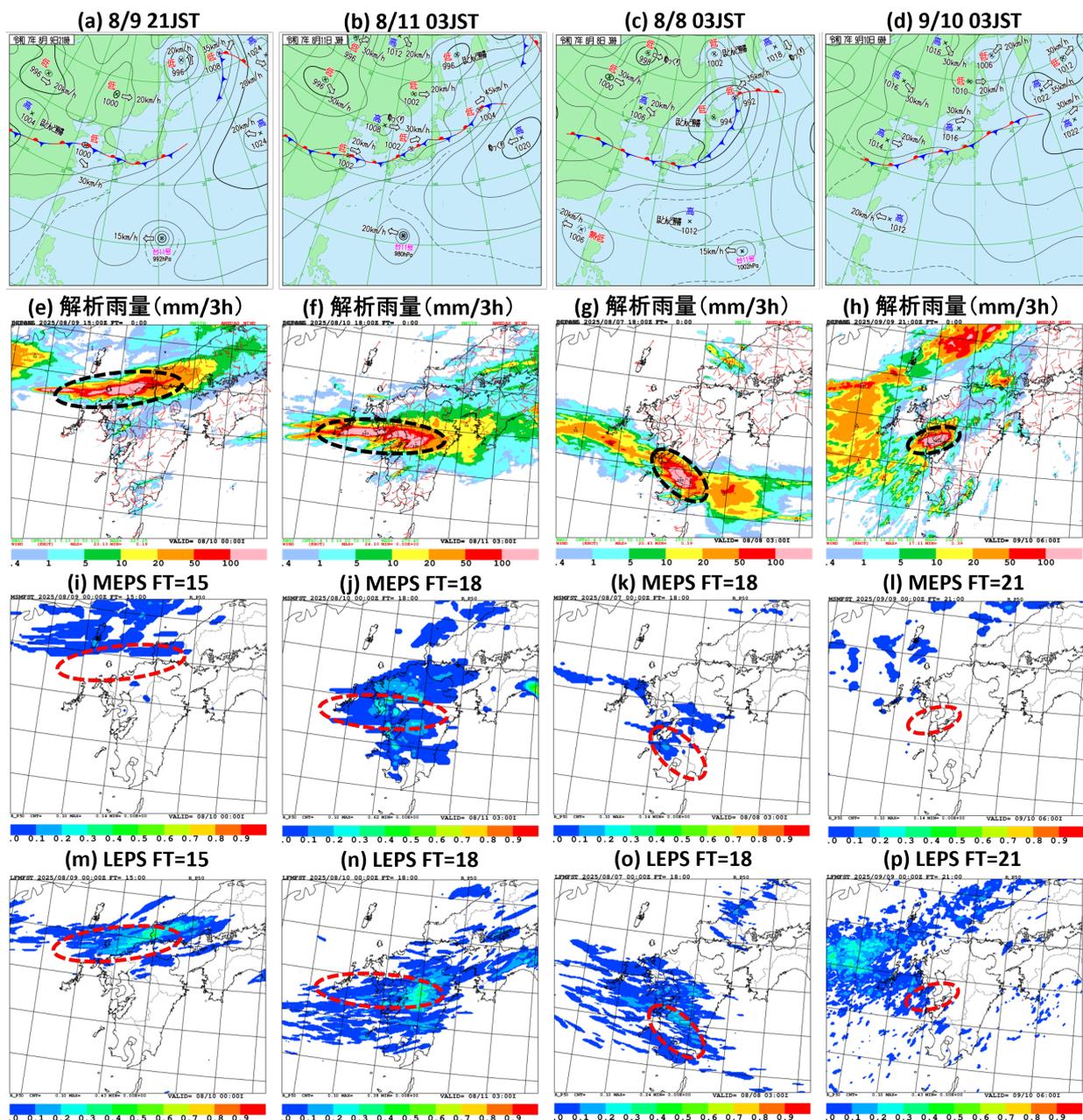


図 4.3.11 2025 年出水期の線状降水帯の例。左から①8 月 9 日福岡事例、②8 月 11 日熊本事例、③8 月 8 日鹿児島事例、④9 月 10 日長崎事例。上段から地上天気図、解析雨量 [mm/3h]、MEPS による 50 mm/3h の超過確率予測、LEPS による 50 mm/3h の超過確率予測。MEPS と LEPS の予測値は FT=15~21 を示す (事例ごとに異なる。(i)-(p) 図上部の説明を参照のこと。)

地数値予報システム・局地アンサンブル予報システムの利用や開発において注意深く確認を継続すべき点になる。また、下部境界の不確実性を表現することが重要となる事例もあり得る (川田ほか 2024)。多くの事例について、その予測可能性、メカニズム、誤差要因を把握しながら、より適切な摂動を検討していく。

参考文献

服部宏紀, 川田英幸, 欠畑賢之, 松葉史剛, 河野耕平, 2025: 開発中の気象庁局地アンサンブル予報システムの検証と評価. 2025 年度春季大会講演予稿集, 127,

B202.

川田英幸, 服部宏紀, 欠畑賢之, 松葉史剛, 河野耕平, 2024: 局地アンサンブル予報システムにおける SST 摂動の開発. 第 26 回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.

気象庁, 2024: 開発中の局地アンサンブル予報システムの強雨確率予測特性についての事例調査. 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, 76-80.

國井勝, 小野耕介, 2020: メソアンサンブル予報シス

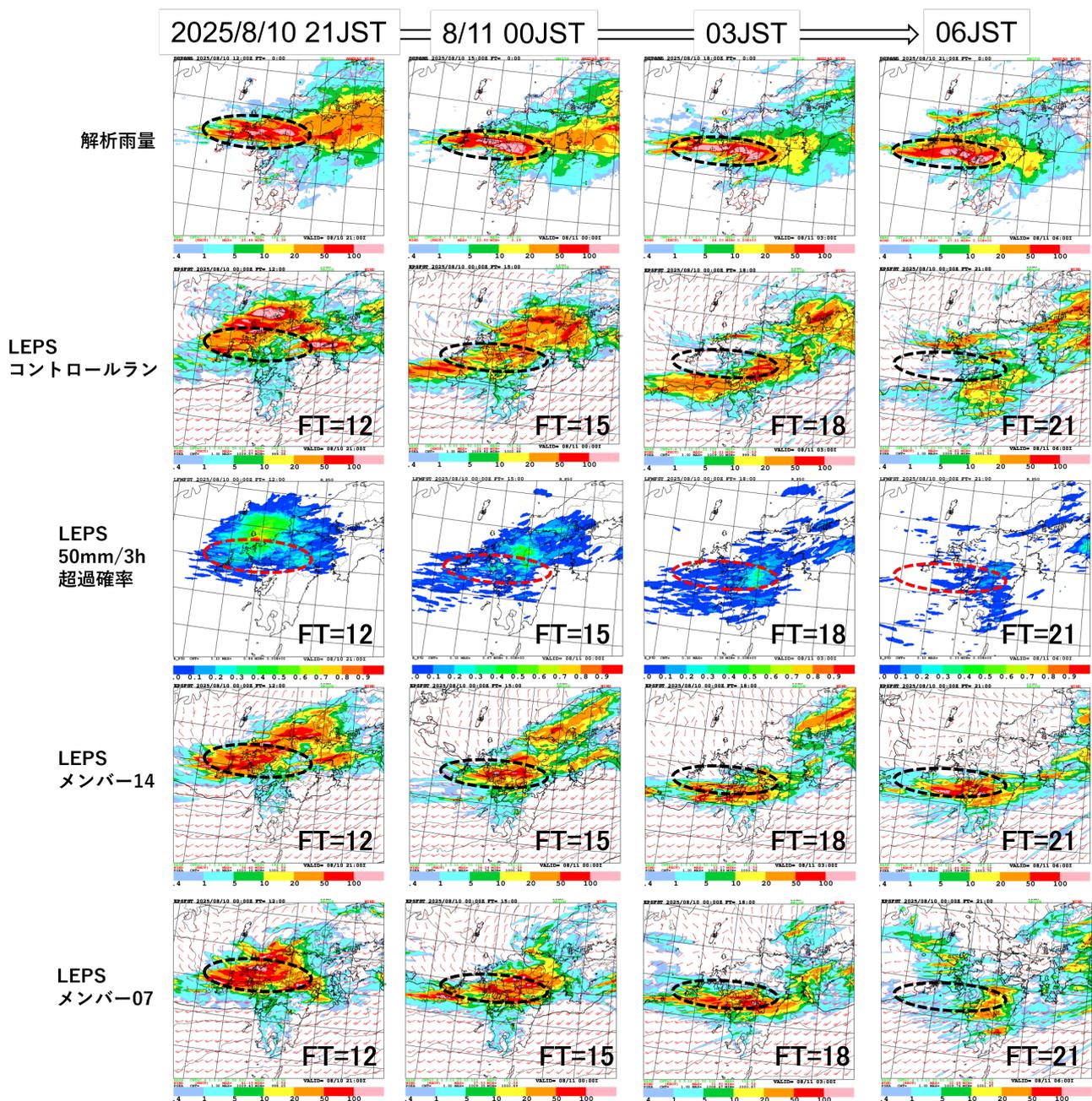


図 4.3.12 ⑥8月11日熊本事例の2025年8月10日21JSTから11日06JSTの時間推移について、上段から解析雨量 [mm/3h]、LEPS コントロールラン予測、LEPS による 50 mm/3h の超過確率予測、LEPS メンバー 14 の予測、LEPS メンバー 07 の予測。左から、8月10日21JST、11日00JST、11日03JST、11日06JST。LEPS 予測値は2025年8月10日09JST 期値の FT=12,15,18,21。

テム. 数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 85-115.

益子涉, 永戸久喜, 加藤輝之, 廣川康隆, 枋本英伍, 藤田匡, 新野宏, 竹見哲也, 佐藤正樹, 2024: 線状降水帯の発生形態の体系的な分類. 2024年度秋季大会講演予稿集, **126**, A367.

成田正巳, 森安聡嗣, 2010: メソモデルの対流スキームの変更. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 53-61.

Zhang, F., C. Snyder, and R. Rotunno, 2003: Effects of Moist Convection on Mesoscale Predictability. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1173-1185, doi:10.1175/1520-0469(2003)060<1173:EOMCOM>2.0.CO;2.

4.4 観測データの新規導入と利用方法の改良

4.4.1 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。本節では、新規観測データの導入や観測データの利用法の改良に関して、現在進められている主な開発の進捗を報告する。

第 4.4.2 項及び第 4.4.3 項では、メソ解析における地上設置型 GNSS の利用高度化、及び GNSS 遮蔽観測データの利用拡充について述べ、第 4.4.4 項では局地解析における衛星土壌水分量プロダクトの利用拡充について述べる。第 4.4.5 項から第 4.4.8 項では、衛星観測輝度温度データの利用高度化として、全球・メソ・局地解析における衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダの陸上での利用拡充、全球解析における静止衛星全天放射輝度温度 (ASR) の新規利用、メソ解析及び局地解析における衛星搭載マイクロ波サウンダ ATMS の利用拡充、及びメソ解析における CO₂ バンド晴天放射輝度 (CSR) の新規利用についてそれぞれ述べる。第 4.4.9 項では、今後のひまわり 10 号搭載赤外サウンダの利用に向けた開発状況について述べる。

4.4.2 メソ解析における地上 GNSS データの利用高度化

(1) はじめに

気象庁では、メソ解析における地上 GNSS データの利用高度化に取り組んでいる。メソ解析では、2009 年 10 月から国土地理院が展開している地上 GNSS 可降水量データを同化利用しているが (石川 2010)、今回の開発では地上 GNSS データの持つ水蒸気情報をより適切に反映することを目指し、湿潤遅延量データの同化利用に向けた開発を行った。

(2) 湿潤遅延量の利用

地上 GNSS では、受信機と GNSS 衛星との距離を衛星から発した電波が届くまでの時間によって測定しているが、衛星から発射される電波の伝搬速度は真空と大気との密度差 (屈折率) に応じて遅延する。この遅延を距離として解析したものが大気遅延量であり、乾燥大気からの遅延量 (静水圧遅延量) と湿潤大気による遅延量 (湿潤遅延量) で構成される。静水圧遅延量は地上気圧と比例関係があるため、高精度で推定することができ、大気遅延量から静水圧遅延量を引くことで湿潤遅延量を得ることができる。

可降水量は湿潤遅延量と比例関係にあり、その比例係数は観測点上空の気温と水蒸気分圧の鉛直プロファイルを用いて計算される水蒸気分圧で重みづけられた気温の鉛直平均値 (T_m) から決めることができる (大谷・内藤 1998)。可降水量同化では、 T_m の計算に必要

な全観測点における実況の気温と水蒸気の鉛直プロファイルデータは得られないため、ラジオゾンデ観測に基づく気候値と地上気温の関係式から T_m を推定 (観測 T_m) している。今回開発する湿潤遅延量同化では、メソモデルの第一推定値を用いて観測演算子に内包された T_m 計算を行うため、観測 T_m に比べてモデルが表現する時間変動を直接反映することが可能となり、初期値の水蒸気場の精度向上が期待できる。 T_m の精度を確認するため、図 4.4.1 に観測 T_m 、鹿児島におけるラジオゾンデ観測から計算した T_m 、メソモデルから計算した T_m の時系列を示す。メソモデルから計算した T_m は、観測 T_m に比べてラジオゾンデとの対応が良いことがわかる。この結果は全てのラジオゾンデ観測点で同様であり (図 4.4.2)、第一推定値を利用することにより水蒸気の情報現在よりも適切に取り出すことが可能となる。

品質管理 (石川 2010) については、これまで利用してきた可降水量から湿潤遅延量への物理量変換に伴う閾値の変更を行った。具体的には、気候値チェック、グロスエラーチェック及び空間整合性チェックの閾値について、現在設定している可降水量での閾値を湿潤遅延量に換算した。また、観測誤差については、モデルの湿潤バイアス等を考慮し、可降水量換算にて従来に比べて増加させる 50 mm (可降水量で約 8 mm 相当) とした。

(3) 性能評価試験

湿潤遅延量を同化利用することによる影響を確認するため、性能評価試験を実施した。実験は、2025 年 3 月末時点の現業メソ数値予報システムと同等の実験をコントロール (CNTL)、CNTL から地上 GNSS の同化要素を湿潤遅延量に変更した実験 (TEST) を行い、CNTL と TEST の結果を比較した。2023 年 6 月 26 日から 8 月 27 日までを夏実験、2023 年 12 月 10 日～2024 年 2 月 4 日までを冬実験の試験期間とする。

第一推定値の精度に関して、他の観測データとの整合性の確認として、CNTL 実験からの観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の変化を確認した (図 4.4.3)。湿潤遅延量を同化利用することにより、特に夏実験において第一推定値の地上比湿や地上気圧の標準偏差が CNTL より小さくなっていることがわかる。これは第一推定値の水蒸気場や気圧場が改善したことを示す結果である。ラジオゾンデや衛星観測については、概ね中立の結果であることを確認した (図略)。

可降水量における平均解析場の変化について、メソ領域全体としては水蒸気量が夏・冬ともに少し増加する結果となった (図略)。夏実験では東北から北海道で特に可降水量が増加、沖縄から九州にかけては減少する変化が見られた。この変化は、同化する要素を湿潤遅延量に変更したことに加え、湿潤遅延量の観測誤差の変更により、衛星観測を含めた水蒸気観測データの

■ Tm時系列@鹿児島

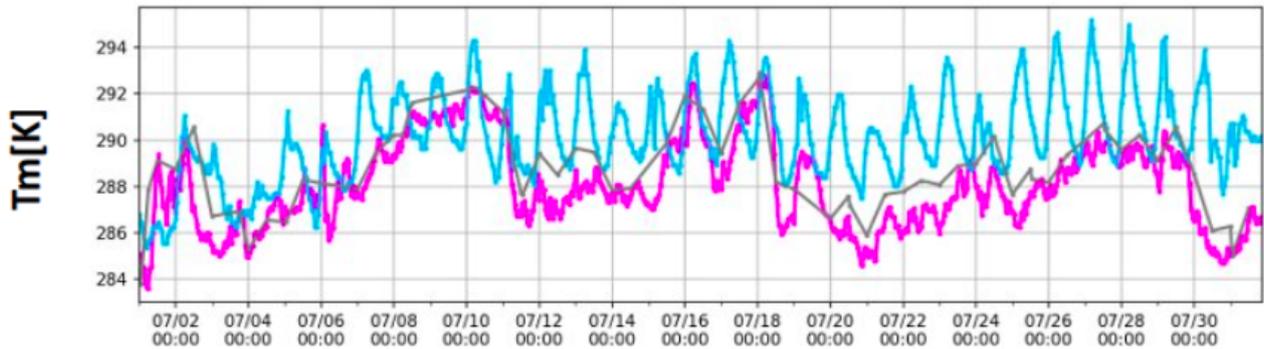


図 4.4.1 2023年7月1日～31日までの鹿児島における Tm の時系列。青線は現在利用しているラジオゾンデ気候値と地上気温から推定した結果、赤線がメソモデルから算出した Tm、黒線が鹿児島のラジオゾンデ観測から算出した Tm である。

■ 対ゾンデ Tm 標準偏差

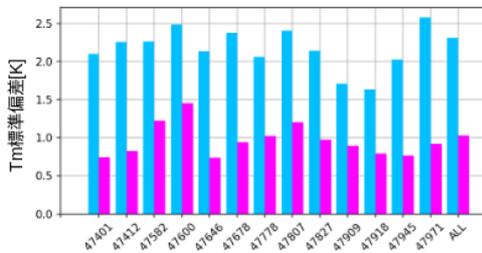


図 4.4.2 ラジオゾンデ観測点毎の Tm 標準偏差。青は現ルーチンで可降水量への変換で利用している Tm とラジオゾンデから算出した Tm の差の標準偏差、赤はメソモデルから計算した Tm とラジオゾンデから算出した Tm の差の標準偏差。観測地点は、左から、稚内 (47401)、札幌 (47412)、秋田 (47582)、輪島 (47600)、館野 (47646)、八丈島 (47678)、潮岬 (47778)、福岡 (47807)、鹿児島 (47827)、名瀬 (47909)、石垣島 (47918)、南大東島 (47945)、父島 (47971)、全ラジオゾンデ観測地点 (ALL)。統計期間は、2023年6月1日～8月15日。

(a) 夏実験 (b) 冬実験

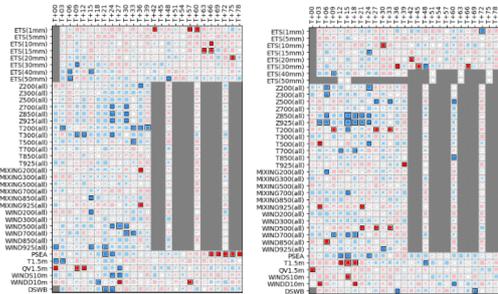


図 4.4.4 メソ数値予報システムにおける主要要素の対 CNTL 統計検証結果。降水量は解析雨量、高度場、気温、混合比、風速はラジオゾンデ、地上要素は SYNOP とアメダス観測を参照値としている。各行は統計検証要素、各列は予測時間に対応する。青が CNTL と比べて改善、赤が CNTL と比べて悪化、色付きの領域が各セルの内側の正方形以上の場合は統計的に有意であることを示しており、降水量については ETS 変化の有意性、降水量以外は RMSE 変化の有意性である。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。

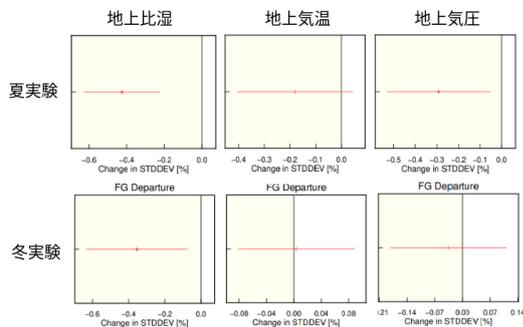


図 4.4.3 メソ解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。上段が夏実験、下段が冬実験であり、左は地上比湿、中が地上気温、右が地上気圧の結果。第一推定値が観測値により整合 (改善) している場合、0 線より左側にプロットされる。図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

寄与が変化した結果と考えている。

予報スコア (図 4.4.4) の変化を確認したところ、夏・冬実験ともに統計的には中立の結果となった。地上比湿の予報精度については、夏・冬実験ともに予報初期においてバイアスが改善する傾向であった (図略)。

解析雨量を用いた降水検証では、2~3 mm/3h の降水で僅かに悪化する結果があったものの、降水予測が改善する事例も見られた。図 4.4.5 は、2023年7月10日に福岡県、佐賀県及び大分県で発生した線状降水帯の事例について、2023年7月9日 18UTC の3時間前からの予測結果である。この事例では、湿潤遅延量を同化すること及び解析予報サイクルによる影響で長崎県から福岡県にかけて可降水量が増加した結果、実況で見られる九州北部の強雨域の表現が TEST で改善した。

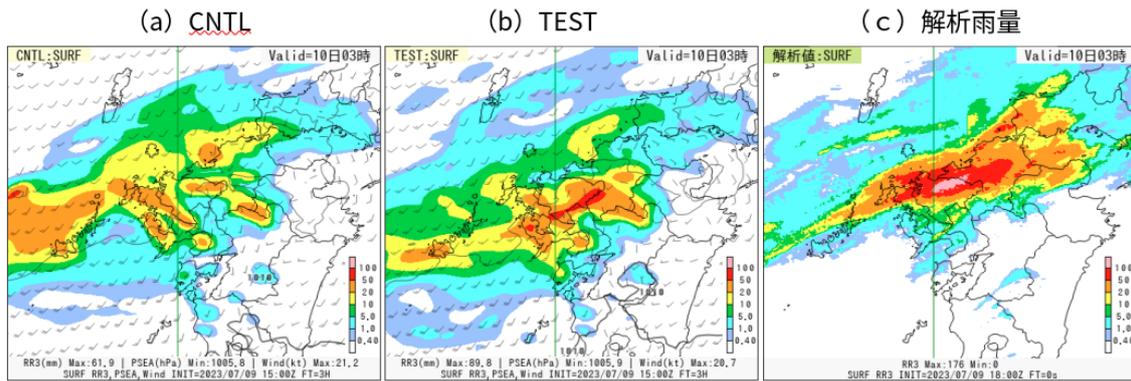


図 4.4.5 2023 年 7 月 9 日 18UTC における前 3 時間降水量 [mm/3h] の分布。(a) は可降水量を同化したメソ予報値、(b) は湿潤遅延量を同化利用したメソ予報値、(c) は解析雨量を示す。予測値は 2023 年 7 月 9 日 15UTC 初期値の 3 時間予測。

(4) まとめ

線状降水帯予測精度向上を目指し、メソ解析での地上 GNSS データの高度利用に向けた開発を行った。今回の開発では、同化要素を可降水量から湿潤遅延量に変更するとともに、モデルの湿潤バイアスを考慮して観測誤差を変更した。その結果、解析場としては夏実験と冬実験ともに地上比湿が改善することを確認した。予報について、統計的には中立であったが、降水予測が改善する事例があることを確認した。

4.4.3 メソ解析における GNSS 掩蔽観測データの利用拡充

(1) はじめに

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で連続的に受信し、大気による電波の遅延量から気温や水蒸気プロファイルを高解像度に導出する手法である (Kursinski et al. 1997)。この手法では、電波時計に基づいて精緻に計測された電波の遅延量から大気による屈折角を算出し、屈折角が屈折率の鉛直勾配の積分量であることを利用して屈折率を導出する。GNSS 掩蔽観測は高精度な観測であり、数値予報において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一つである。屈折角は屈折率より実観測に近く変換誤差が小さい一方で、数値予報での利用には観測点より上空の大気の情報も入力として必要となる。このため、モデルトップが高い全球解析では屈折角を、モデルトップが低いメソ解析では屈折率を利用している (大和田 2017)。全球・メソ解析ともに、GNSS 掩蔽観測は主に成層圏の気温場を中心に改善するものの、データ数が増加すると対流圏の気温・高度バイアスが拡大することが長年の課題であった。第 3.6 節で述べたように、全球解析では 2025 年 10 月に屈折角の観測誤差プロファイルの改良により、対流圏の気温・高度バイアスを改良しつつ、観測データの利用拡充を図った。メソ解析での屈折率データの利用拡充に向けては、全球

解析での知見を活かし、観測誤差プロファイルや品質管理手法の改良を進めている。本項ではその開発状況について述べる。

(2) Metop の GNSS 掩蔽データの品質管理手法の変更

Metop 衛星は、EUMETSAT が運用する現業の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いる。現在は Metop-B および Metop-C の 2 機が運用されており、メソ解析では Metop-B の屈折率データが利用されている。Metop の GNSS 掩蔽観測データには、処理状況に応じた 16 項目の品質情報が付加されており、数値予報への同化に際して品質管理に参照されている。従来は屈折角の品質情報が「異常」と判定されたデータのみを棄却していたが、調査の結果、推定された大気プロファイル全体の品質情報が「異常」とされる場合には観測精度が劣ることが確認された。これを踏まえ、変更後はプロファイル全体の品質情報が「異常」と判定された場合も棄却することにした。図 4.4.6 に、品質情報参照方法の変更前後における観測値と第一推定値 (O-B) の標準偏差を示す。変更前 (青線) に高度 10 km から 20 km にかけて見られた標準偏差の増加は変更後 (赤線) では解消されている。

(3) 観測誤差設定の変更

屈折率は大気密度の情報をもつので、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 4.4.7 に変更前後の屈折率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 (青) は、高度 10 km 付近や高度 5 km 以下で O-B の標準偏差が観測誤差より大きく、観測誤差が相対的に過少であることが示唆された。変更後 (赤) は、これらの高度で観測誤差を大きくするとともに、高度 20 km 以上で観測誤差が鉛直上向きに単調に増加するようにした。

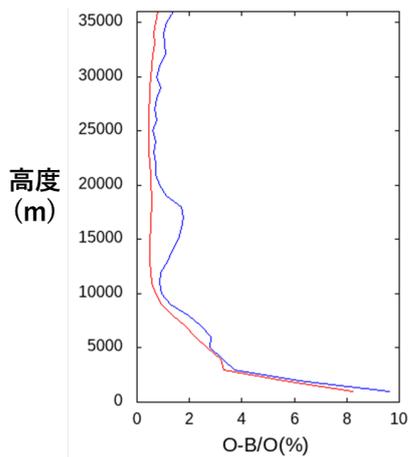


図 4.4.6 変更前（青線）及び変更後（赤線）の観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差について、観測値で規格化した鉛直高度分布 [m]。

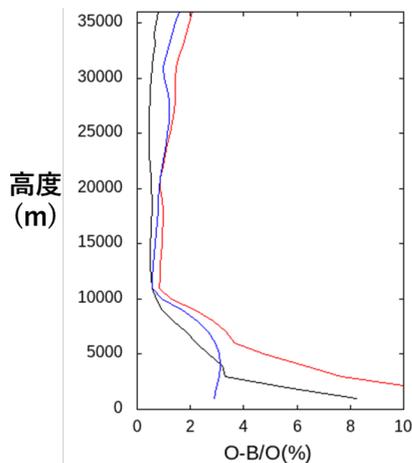


図 4.4.7 O-B の標準偏差（黒線）、変更前（青線）及び変更後（赤線）の観測誤差について、観測値で規格化した鉛直高度分布 [m]。

(4) 解析・予測へのインパクト

2024 年 8 月時点の現業メソ数値予報システム相当の実験 (CNTL) に対し、利用データに Metop-C を追加した上で (2), (3) で示した利用手法の変更を適用した実験 (TEST) の検証結果を示す。検証期間は夏季が 2023 年 6 月 28 日から 8 月 15 日、冬季が 2024 年 1 月 18 日から 2 月 23 日である。解析値について対ラジオゾンデの高度との平均誤差を見ると、夏季・冬季ともに CNTL と比較して TEST において対流圏中上層において低高度バイアスが減少しており、高度場が改善傾向であることを示している (図 4.4.8)。解析値の基となる第一推定値 (一初期時刻前の予測値) と既存の観測値との整合性の変化については、対ラジオゾンデ検証を含め、概ね中立であった (図略)。予測精度については、ラジオゾンデや解析雨量、地上観測を参照値として検証した結果、概ね中立であった (図略)。

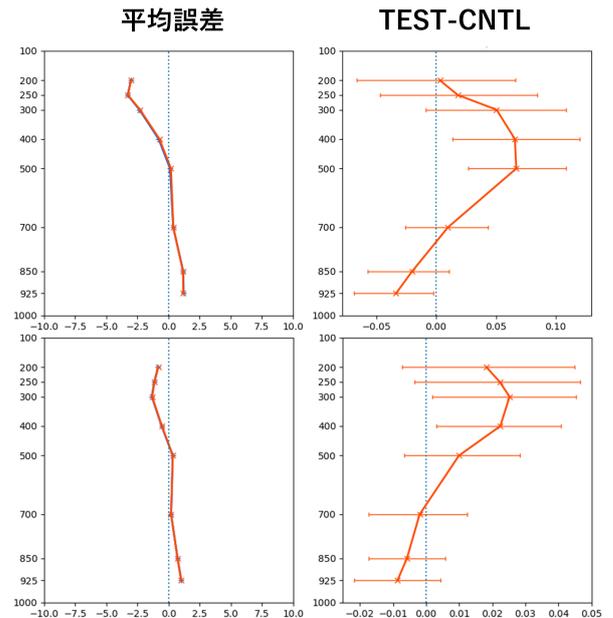


図 4.4.8 解析値の気温の対ラジオゾンデ検証結果。夏季（上段）、冬季（下段）。気温の対ゾンデ平均誤差の鉛直プロファイル（左図）、気温の対ゾンデ平均誤差の TEST と CNTL の差の鉛直プロファイル（右図）。横軸の単位はすべて K。左図で青線が CNTL、赤線が TEST を表す。

(5) まとめと今後

メソ解析での GNSS 掩蔽観測データの利用拡充に向けて、品質情報の参照方法や観測誤差プロファイルを変更するとともに Metop-C 屈折率データを追加した実験を行った。従来の屈折角の品質情報に加え、推定された大気プロファイルの品質情報を参照することで品質が向上し、そのデータを適切に設定した観測誤差で同化したところ、対流圏中上層の高度場のバイアスが改善する傾向であることを確認した。GNSS 掩蔽観測は数値予報において予報モデルのバイアスを補正するための基準値として用いられており、数値予報モデルのバイアス特性に影響を与えるので、観測・モデルの特性を踏まえた観測誤差の更なる改良は引き続き重要な課題である。また、相対的に品質が低い対流圏中下層データの利用手法の高度化も必要である。

4.4.4 局地解析における Metop-C 土壌水分量プロダクトの新規利用

(1) はじめに

衛星観測土壌水分量プロダクトは、衛星による輝度温度観測データから地表面付近の土壌水分量をリトリブしたプロダクトであり、このリトリブされた土壌水分量を同化利用することにより土壌水分量の初期値の精度が向上し、地表面からの潜熱フラックスを通じて地上気温予測精度向上への効果が期待される。局地解析では、水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) に搭載されているマイクロ波放射計 AMSR2 及び

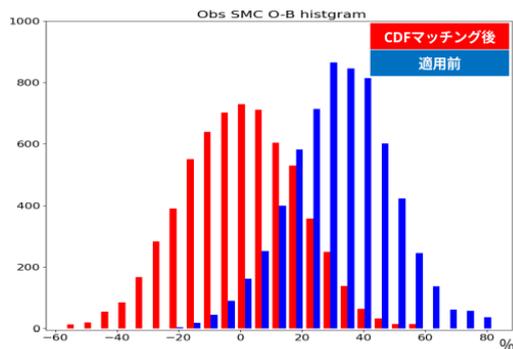


図 4.4.9 Metop-C の CDF マッチング適用前後の観測値と第一推定値の差 (O-B) のヒストグラム。赤線は CDF マッチング適用後の O-B、青線は CDF マッチング適用前の O-B を示す。期間は 2025 年 6 月 1 日～6 月 30 日。

Metop-B に搭載されているマイクロ波散乱計 ASCAT の土壌水分量プロダクトを 2017 年から現業利用している (幾田 2017)。本項では、衛星観測土壌水分量プロダクトの利用拡充を目的とし、Metop-C に搭載されているマイクロ波散乱計 ASCAT の土壌水分量プロダクトの利用に向けた開発について述べる。また、Metop-B 及び C については、高解像度化された新しいプロダクトへの切替が行われていることから、高解像度化されたデータの利用に向けた開発についても紹介する。

(2) 観測データ利用法

局地解析では、衛星土壌水分量プロダクトを利用するための観測演算子として累積分布関数 (Cumulative Distribution Function: CDF) マッチング (Drusch and Gao 2005; Scipal and Wagner 2008) と呼ばれる手法を利用している。ここでの CDF マッチングとは、観測と第一推定値の平均と分散が合うように補正する手法である。土壌水分量プロダクトは対象としている土壌の深さや土壌水分量を表す指標が衛星毎に異なるため、衛星毎に CDF マッチングのパラメータを作成する必要がある (幾田 2017)。今回新規に利用を開始する Metop-C 土壌水分量プロダクトについては、2025 年 2 月～5 月の約 3 か月分のデータからパラメータを作成した。これに合わせて、現在利用している Metop-B 及び GCOM-W/AMSR2 についてもパラメータ更新を実施した。

新規利用する Metop-C について、CDF マッチング適用前後の観測値と第一推定値の差 (O-B) のヒストグラムを図 4.4.9 に示す。CDF マッチングを適用 (図 4.4.9 の赤) することにより、適用前に比べて O-B バias が補正されていることが分かる。なお、Metop-C の新規利用にあたり、観測誤差及び間引き間隔は観測データの特性が同じ Metop-B と同じ設定 (観測誤差を 20%、間引き間隔を 25 km) とした。

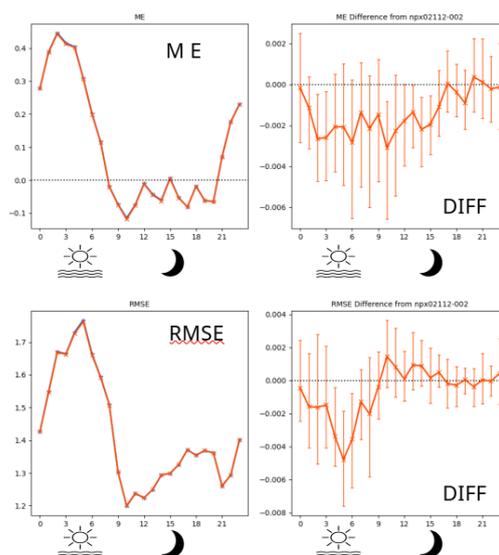


図 4.4.10 夏実験を対象にした予報対象時刻毎 (UTC) の対アメダス気温検証結果。横軸は予報対象時刻 (UTC)。左上が平均誤差 (ME)、右上が平均誤差の差 (TEST-CNTL)、左下が二乗平均平方根誤差 (RMSE)、右下が RMSE の差 (TEST-CNTL) であり、エラーバーは 95% 信頼区間を表す。縦軸の単位はすべて K。左図における赤線は TEST、青線が CNTL の結果を表す。

(3) 局地数値予報システムへの影響

Metop-C 土壌水分量プロダクトを利用することによる効果とパラメータ更新の効果を確認するため、2025 年 6 月時点の現業局地予報システム相当の実験を CNTL、CNTL に Metop-C 土壌水分量プロダクト新規利用及び既存の土壌水分量プロダクトの CDF マッチングパラメータを更新した実験を TEST として性能評価試験を実施した。2024 年 7 月 1 日から 7 月 14 日までを夏実験、2024 年 1 月 30 日～2 月 14 日までを冬実験の試験期間とする。

統計的な降水予測スコアやラジオゾンデ検証では、夏と冬の両方とも TEST と CNTL に明瞭な差は無く中立の結果となった (図略)。地上気温予測に与える影響を確認するため、図 4.4.10 に夏実験における予報対象時刻毎の対アメダス気温の検証結果を示す。この結果から、地上気温が高い日中において、CNTL よりも TEST の方が僅かに RMSE が減少しており、改善傾向にあることが分かる。

(4) 土壌水分量プロダクトの高解像度化

Metop-B 及び C 土壌水分量プロダクト (低解像度) は 2025 年 7 月に配信停止となり、今後は高解像度化された新プロダクト (高解像度) が配信される¹。そのため、高解像度プロダクトの利用に向け、低解像度データとの違いについて調査を行った。

図 4.4.11 は、2025 年 6 月 19 日 02UTC における土

¹ <https://user.eumetsat.int/news-events/news/changes-to-ascats-soil-moisture-products>

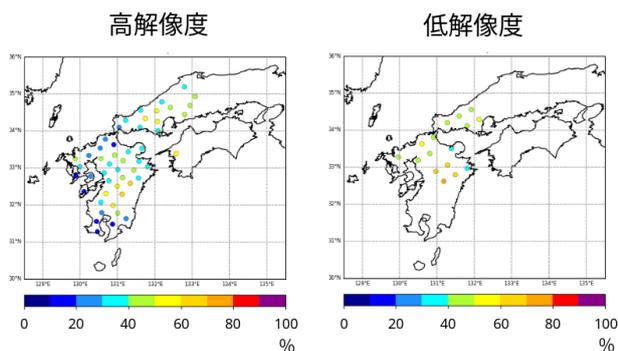


図 4.4.11 2025 年 6 月 19 日 02UTC における土壌水分量プロダクトの観測点分布。左図が高解像度データ、右図が低解像度データであり、観測点の色は土壌水分量の値 [%] である。

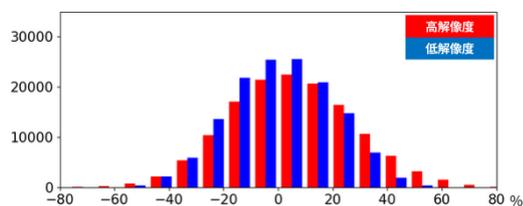


図 4.4.12 Metop-C の O-B ヒストグラム。赤は新しく配信される高解像度プロダクト、青は従来プロダクトであり、期間は 2025 年 5 月 1 日～6 月 30 日。

土壌水分量プロダクトのカバレッジを比較したものである。高解像度データの方がデータ数が多く、低解像度データに比べて広範囲のデータを利用することができる。また、低解像度データと高解像度データの特徴を比較するため、図 4.4.12 に Metop-C の低解像度データとその半径 12.5 km 内にある高解像度データのみ抽出した CDF マッチング適用後の O-B ヒストグラムを示す。プロダクトを直接比較した場合には、高解像度プロダクトに負バイアスが見られる (図略)。しかし、高解像度データについても CDF マッチングパラメータを作成・適用することにより、類似したデータ特性になることを確認した。さらに、(3) で述べた TEST の土壌水分量プロダクトを高解像度データに変更してインパクト実験 (TEST-H) を実施した結果、TEST-H は TEST と同様な結果であることを確認した (図略)。

(5) まとめと今後

現在局地解析で利用している土壌水分量プロダクトについて、新たに Metop-C の新規利用と CDF マッチングパラメータを更新した性能評価試験を実施し、地上気温の予測が改善傾向であること確認した。また、Metop-B 及び C については、高解像度プロダクトへの移行調査として、これまで利用していたプロダクトとの特性比較を実施した。結果、CDF マッチングを適用することにより低解像度と高解像度プロダクトの特性

の違いは小さく、高解像度プロダクトのデータ数が増加することが分かった。

今後の課題として、現在利用している GCOM-W/AMSR2 の土壌水分量プロダクトは、GOSAT-GW/AMSR3 に移行される予定であり、データ特性を把握しながら現業化に向けた開発を進める必要がある。

4.4.5 極軌道衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダの陸上での利用

(1) 概要

ハイパースペクトル赤外サウンダ (以下「赤外サウンダ」) は、赤外の波長帯において高い波長分解能で多数のチャンネルを有しており、これらの観測データから気温や水蒸気量の鉛直分布に関する情報を得ることのできるセンサである。現在の赤外サウンダの利用手法においては、陸上 (本項では海水上も含むこととする) での雲頂高度推定が行えないため、陸上では対流圏界面より下層に感度の低いチャンネルのみを利用している (岡垣 2015)。赤外サウンダの水蒸気チャンネルの全天同化について調査した Okamoto et al. (2024) は、全球数値予報システムを用いて、陸上の対流圏界面より下層に感度のある水蒸気チャンネルを透過率が小さい場合において同化することにより、水蒸気場の予測精度が改善したことを示した。このため、メソ・局地数値予報システムにおいても、対流圏界面より下層に感度のあるチャンネル (以下「対流圏チャンネル」) を陸上で利用することで、数値予報の予測精度が改善すると考えられる。本項では、赤外サウンダの陸上での対流圏チャンネルのデータ同化に向けて行った品質管理の変更点や、メソ・局地数値予報システムにおける予測精度への影響を調査した結果について述べる。

(2) 変更点について

赤外サウンダの対流圏チャンネルを陸上において同化利用するためには、雲頂高度推定を行い、雲頂よりも上層に感度のあるチャンネルのみを利用するように品質管理を変更する必要がある。現在利用している CO2 スライシング手法 (Eyre and Menzel 1989) は透過率の高いチャンネルの計算輝度温度を利用しているが、陸上では海上と同等の精度の地表面温度や射出率が得られないため、妥当な雲頂高度が求められていない。そこで雲頂高度推定手法をこれまでの CO2 スライシング手法から McNally and Watts (2003) の手法へと変更した。この手法は、晴天を仮定した場合の観測値と第一推定値の差 (O-B) が、雲の影響を受けると負に大きくなることを利用しており、複数チャンネルの O-B を感度高度順に下層から上層にかけて参照し、O-B の値やその高度方向の傾きを利用して雲頂高度を推定する。そのため、地表面の影響を受けるような特定のチャンネルの計算輝度温度のみに依存しない手法となっている。品質管理後の O-B の統計や静止衛星赤外画像との比較から、陸上において本手法による雲頂高度推定

の結果がある程度妥当であることを確認している。海陸で統一的に処理するため、雲頂高度推定手法を海上も含めて変更した。それにより、海上においてはこれまで過剰に取り除かれていたと思われる観測が利用されるようになり、同化利用数は増加する傾向がみられた。また、CO2 スライシングでは取り除けていなかった O-B が負で雲の混入が疑われるようなデータが取り除かれるようになり、品質管理後データの O-B の標準偏差が小さくなることを確認している。雲頂高度推定手法の変更のみによる予測精度への影響は概ね中立であった。

全球数値予報システムを用いた予備実験において、気温に感度のある対流圏チャンネルを陸上で利用すると、南半球において AMSU-A や ATMS で O-B の標準偏差が増加する結果が得られた。この結果は第一推定値の気温場の精度悪化を示す結果であるが、透過率が十分小さいデータのみを利用した場合にも生じたため、今回は気温に感度のある対流圏チャンネルは陸上で利用しないようにし、水蒸気チャンネルのみについて、透過率が 0.1 未満の場合に利用することにした。また McNally and Watts の手法では O-B を計算するチャンネル数が多い方が適切な雲頂高度を推定できることから、CrIS で品質管理用に計算するチャンネル数を増加させた。これに伴い、CrIS のスキャンバイアス補正値を既存チャンネルも含めて更新した。新しいスキャンバイアス補正値は、データ間引き距離を小さくして 1ヶ月程度の O-B を計算し、晴天域のみの集計結果から求めた。なお、スキャンバイアス補正値の更新による予測精度への影響は軽微であることを別途確認している。

(3) メソ数値予報システムにおける影響評価

メソ数値予報システムにおける上記変更の影響評価を行った。2025 年 8 月時点の数値予報システム相当を CNTL とし、上記変更を加えたものを TEST とする実験を実施した。実験は夏実験として 2023 年 6 月 21 日から 8 月 23 日、冬実験として 2023 年 12 月 5 日から 2024 年 1 月 7 日の期間で実施した。図 4.4.13 は 2023 年 6 月 30 日 06UTC の初期値解析において利用された赤外サウンダデータの分布を示す。海上においては TEST と CNTL で大きなデータ利用分布の違いは無いが、TEST では陸上でのデータ利用数が増加していることが分かる。実験期間で統計すると TEST の赤外サウンダの利用データ数は CNTL と比べて 47% 増加した。

水蒸気に感度のある衛星観測である MHS, ATMS, CSR において O-B の標準偏差が CNTL よりも減少していることが確認できた(図 4.4.14)。これは第一推定値の水蒸気場の改善を示す結果である。また CSR の ch4 の O-B の標準偏差は、主に陸上で減少していることが夏・冬実験ともに確認された(図 4.4.15)。

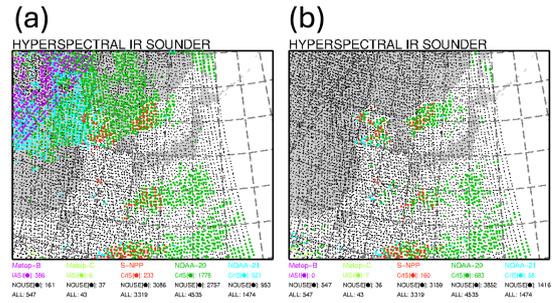


図 4.4.13 2023 年 6 月 30 日 06UTC の解析に入力された赤外サウンダデータの分布。着色点は同化利用したことを、黒点は同化利用していないことを示す。(a) は TEST、(b) は CNTL の結果。

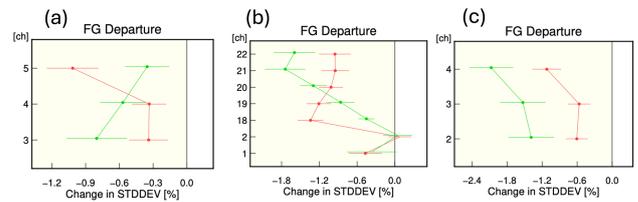


図 4.4.14 メソ解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。(a), (b) はマイクロ波サウンダ MHS, ATMS、(c) は晴天放射輝度 CSR について示す。縦軸はチャンネル番号を示す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

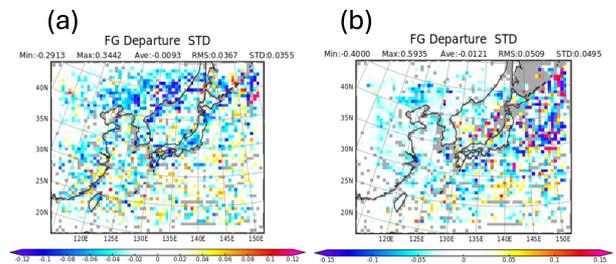


図 4.4.15 O-B の標準偏差の TEST と CNTL の差 [K]。晴天放射輝度 CSR の ch4 の結果について示す。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。

予測精度の変化を確認したところ、ラジオゾンデを用いた検証で、夏実験において 850 hPa から 500 hPa の水蒸気混合比が初期値から 6 時間予測にかけて改善していることが確認された(図 4.4.16)。改善した領域は概ね衛星観測での検証で改善が確認された領域と類似していた。冬実験やその他の要素(気温・高度・風・降水など)では概ね中立であった。

(4) 局地数値予報システムにおける影響評価

局地数値予報システムにおける上記変更の影響評価を行った。2025 年 3 月時点の数値予報システム相当を CNTL とし、上記変更を加えたものを TEST とする実

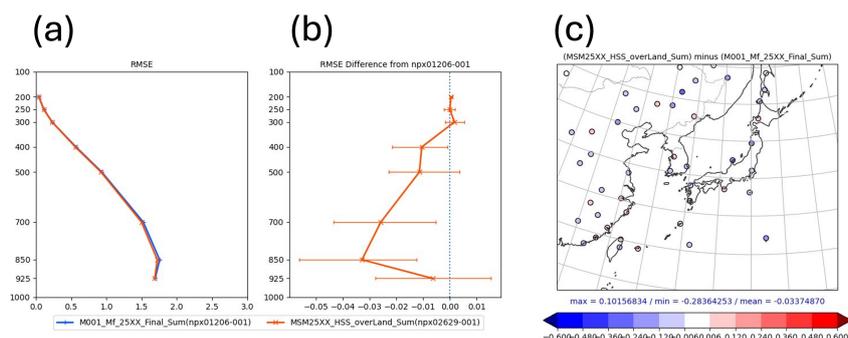


図 4.4.16 夏実験における水蒸気混合比 [g/kg] の 6 時間予測値のラジオゾンデを用いた検証結果。(a) 赤線は TEST、青線は CNTL についての RMSE の鉛直分布を示す。(b) RMSE の TEST と CNTL の差。(c) 850 hPa 面における RMSE の TEST と CNTL の差。

験を実施した。実験は夏実験として 2023 年 6 月 28 日から 7 月 12 日、冬実験として 2024 年 1 月 30 日から 2 月 14 日の期間で実施した。メソ数値予報システムでの評価と同様に、水蒸気に感度のある衛星観測である MHS, ATMS, CSR で O-B の標準偏差が CNTL よりも減少していることが確認できた。また標準偏差が減少した領域は陸上を中心であることも確認した (図略)。

予測精度の変化は小さく、概ね中立であった。メソ数値予報システムでの評価と比べて水蒸気場で改善が得られなかったのは、局地解析ではデータ同化サイクルが繋がっていないことから、観測時刻の限定されるラジオゾンデでの検証において不利であったことが原因として考えられる。

(5) まとめと今後

赤外サウンダの水蒸気に感度のある対流圏チャンネルを陸上において同化利用するための品質管理の変更を行い、メソ・局地数値予報システムにおける影響評価を行った。

メソ・局地数値予報システムともに陸上において水蒸気に感度のある衛星観測の O-B の標準偏差が減少したことやラジオゾンデの検証結果から、陸上の水蒸気場の予測精度に改善がみられた。降水予測やその他の要素に関しては概ね中立であった。

今後、全球解析においても同様の導入を目指すほか、気温に感度のある対流圏チャンネルの利用や、より地表面に感度のあるチャンネルの利用 (透過率の制限の撤廃) に向けた開発を行う予定である。

4.4.6 静止衛星全天放射輝度温度 (ASR) の利用

(1) 概要

静止気象衛星に搭載された赤外イメージャによる観測は、熱帯から中緯度で定常的に利用でき、全球解析では、ひまわりを始め、米国の GOES、欧州の Meteosat による水蒸気バンド及び CO₂ バンドの晴天放射輝度温度 (CSR: Clear Sky Radiance) を同化利用している。CSR は主に対流圏の水蒸気に感度を持ち、解析精

度の向上に寄与している。CSR は領域内の晴天域の輝度温度を平均したプロダクトで、同様に雲域を含めて輝度温度を平均した全天放射輝度温度 (ASR: All-Sky Radiance) も作成されている。CSR に代えて ASR を同化利用することで、雲域まで含めてより空間的に均質な精度向上が期待される。本項では、全球解析における ASR の同化利用に向けた開発の進捗について述べる。

(2) ASR の同化利用における課題

マイクロ波の衛星観測については各国の数値予報センターで全天同化が導入されている (Geer et al. 2019)。気象庁では、2019 年 12 月以降、全球解析においてマイクロ波イメージャやマイクロ波水蒸気サウンダの全天同化を順次導入してきた (気象庁 2021)。一方で赤外観測の全天同化においては、雲に対する強い非線形応答に起因して、観測値と第一推定値の差 (O-B) 分布の非ガウス性や強いチャンネル間誤差相関が存在するため、マイクロ波観測と比べてもより高度な品質管理や同化手法が必要となる。気象研究所においては、ASR を始めとして赤外観測の全天同化手法の開発が進められて

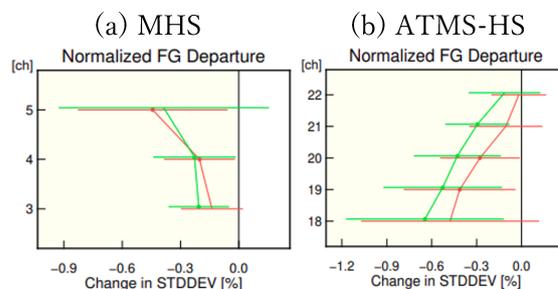


図 4.4.17 全球解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、(b) マイクロ波サウンダ ATMS (水蒸気チャンネル)。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

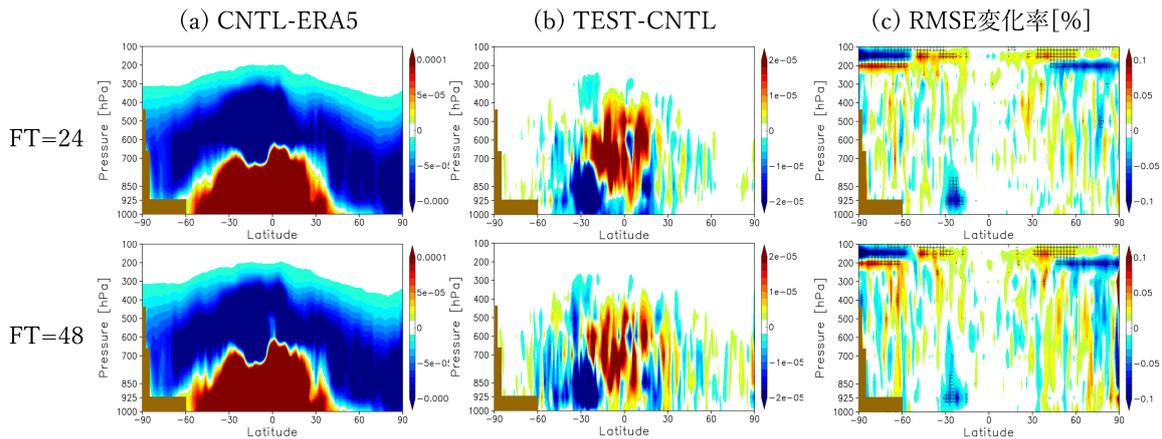


図 4.4.18 全球解析における、24 時間後（上段）、48 時間後（下段）の比湿度予測値の検証結果。冬期間の結果を示す。(a) CNTL の ERA5 に対する差分の平均値 [kg/kg]、(b) TEST の CNTL に対する差分の平均値 [kg/kg]、(c) ERA5 に対する TEST の CNTL からの RMSE の変化率 [%]。RMSE の変化率は、寒色系は改善を、暖色系は悪化を示す。

おり (Okamoto et al. 2023)、数値予報開発センターでは、その成果を現業数値予報システムへ組み込むための開発と検証を進めている。以降では、ひまわりの水蒸気バンドの ASR 同化利用における品質管理手法の変更点や ASR を同化した性能評価試験の結果について記す。

(3) 品質管理手法

全天同化における O-B は観測と第一推定値の雲の位置ずれによる外れ値を多く含み、その分布はガウス分布とならない。ガウス分布に近い O-B 分布を得るため、雲の影響度合いを評価した雲効果パラメータ (C_A) を用いた QC を導入し、第一推定値との乖離が大きい観測を除去するとともに、 C_A に応じて観測誤差が変動するように設定する。また変分法バイアス補正 (VarBC: Variational Bias Correction) の説明変数に C_A を追加し、雲由来のバイアスを除去する。従来は観測誤差相関を陽に扱う代わりに、水平間引きや観測誤差を大きくする措置 (観測誤差膨張) を行ってきた。しかし、赤外観測の全天同化では雲や降水の影響で強いチャンネル間誤差相関が存在するため、観測誤差膨張による同化では性能を十分に引き出すことが困難である。そのため、チャンネル間誤差相関を陽に扱い、 C_A を用いて層別化した誤差モデル (3×3 行列) により観測誤差を与える。

(4) 性能評価試験

2024 年 3 月時点の現業数値予報システム相当の実験 (CNTL) に対して、静止気象衛星ひまわりに搭載された可視赤外放射計 (AHI: Advanced Himawari Imager) の水蒸気バンドについて、CSR に代わって ASR を同化利用する実験 (TEST) で影響評価 (性能評価試験) を行った。実験の評価期間は、夏実験については 2023 年 8 月、冬実験については 2024 年 1 月とした。第一推定値の精度に関して、他の観測データとの整合性を

確認するため、CNTL 実験からの O-B の標準偏差の変化を確認したところ、水蒸気に感度のある MHS や ATMS (水蒸気チャンネル) で整合性の向上が見られた (図 4.4.17)。これは、第一推定値として用いられる短時間予測における水蒸気場の予測精度が向上したことを示唆する。

また ECMWF の再解析データである ERA5 を比較対象とした検証などを通じて、対流圏中下層水蒸気場の改善が見られた (図 4.4.18)。これは、CSR から ASR へ利用データを変更したことによって、湿潤な対流圏中上層水蒸気場の情報がより多く取り込まれるようになり、モデルが持つ低中緯度帯における対流圏中上層の乾燥バイアス及び対流圏下層の湿潤バイアスが軽減したことに起因すると考えられる。

(5) まとめと今後

赤外イメージャ観測の CSR から ASR への利用高度化に向けて調査を行っている。AHI の水蒸気バンドについて CSR に代えて ASR を同化利用することで、対流圏中下層における水蒸気場の予測精度が向上することを確認した。2026 年は GOES 及び Meteosat を含めた静止気象衛星観測において ASR への利用高度化を目指している。また、ハイパースペクトル赤外サウンダの水蒸気チャンネルへの全天同化手法の適用に関する研究も進んでおり、さらなる観測の利用拡充と予測精度向上を目指している。

4.4.7 衛星搭載マイクロ波サウンダ ATMS の利用チャンネル拡充

(1) 概要

米国の極軌道衛星 Suomi-NPP, NOAA-20, NOAA-21 に搭載されているマイクロ波サウンダ ATMS は、主に大気的气温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を観測するセンサーで、同化利用することで解析値及び予測値の精度向上に貢献することが期待される。

ATMSのうち主に水蒸気に感度のあるチャンネル（以下、水蒸気チャンネル）は全球・メソ・局地解析で同化利用している一方、主に気温に感度のあるチャンネル（以下、気温チャンネル）については、メソ解析及び局地解析では未利用で、全球解析では一部のチャンネルのみを同化利用している。

当庁では、ATMS 気温チャンネルと同様に気温に感度のあるマイクロ波サウンダ AMSU-A を同化利用しているが、AMSU-A を搭載する衛星は徐々に運用終了となっている²。このような状況下で気温場の解析精度及び予測精度を維持するためには、メソ解析及び局地解析における ATMS 気温チャンネルの新規利用、及び全球解析における未利用チャンネルの新規利用が重要である。本開発はこれらの課題の解決を目指しており、令和7年は主にメソ解析及び局地解析に焦点を当てて取り組んだ。

(2) ATMS 同化利用の経過

気象庁では、AMSU-A の気温チャンネルを全球・メソ・局地解析で長らく同化利用しており、特に全球解析では気温場や高度場の予測精度の維持に大きく貢献してきた（岡本 2007, 気象庁 2023b）。2012 年打ち上げの Suomi-NPP に初めて搭載された ATMS は AMSU-A の後継センサーとされ、気温チャンネルのほとんどが AMSU-A 搭載チャンネルと同じ中心周波数となっている（表 4.4.1）。そのため、当庁でも AMSU-A と同等の手法で ATMS を同化利用する開発が進められた。

全球数値予報システムにおいては、ATMS を同化利用することで気温場や高度場の予測精度に一定の改善が確認できたものの、成層圏に感度のある ATMS/ch10-15 を同化すると、主に高緯度域において、AMSU-A の同周波数のチャンネルの観測値と第一推定値の整合性が悪化する結果が得られた。このため、水蒸気チャンネル (ch18-22) と対流圏に感度のある気温チャンネル (ch6-9) に限定して、2017 年 3 月に ATMS の同化利用を開始した（平原 2017）。

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、ATMS の気温チャンネルで観測値と第一推定値との差 (O-B) に AMSU-A とは異なるバイアス傾向が見られ、同化利用したところ対流圏の中下層で気温場や高度場の予測精度悪化が確認された。このため、メソ解析及び局地解析では水蒸気チャンネル (ch18-22) に限定して、それぞれ 2022 年 6 月と同年 8 月に ATMS の同化利用を開始した（気象庁 2023a）。

(3) メソ解析における開発進捗

メソ数値予報システムにおける ATMS 気温チャンネルの O-B バイアス傾向を、2025 年 3 月時点の現業システムで調査した。調査期間における ATMS/ch7 及び同周波数の AMSU-A/ch6 の O-B 分布は図 4.4.19 に示す通りで、最新のシステムでも ATMS と AMSU-A の間で O-B バイアスの差異が確認された。この課題に対処するため、マイクロ波気温サウンダの変分法バイアス補正 (VarBC) の説明変数に積算荷重気温減率 (Integrated Weighted Lapse Rate; IWLR, 岡本 2007) を追加した。IWLR は、対象とするチャンネルの荷重関数と観測地点の気温減率の積を鉛直方向に足し合わせたもので、VarBC 説明変数として利用することで、放射伝達モデルの透過率と実際の透過率との差異により生じる第一推定値のバイアスを解消することが期待できる。またこの変更と併せて、マイクロ波気温サウンダのうち海面付近に感度のないチャンネル (AMSU-A/ch7-11, ATMS/ch8-12) については、VarBC 説明変数から海面温度（陸上及び海水上では地表面温度）を除外した。新たな説明変数で VarBC を行った結果、ATMS と AMSU-A の間での O-B バイアスの差異が軽減されることを確認した（図 4.4.20）。

なお、全球解析では ATMS/ch10-15 を利用することにより高緯度域の気温の予測精度が悪化するが、メソ解析の計算領域には影響しないと考えられ、これらのチャンネルでも先に示した手法の有効性が確認された。メソモデルのモデル上端高度を考慮し、結果的に ATMS の気温チャンネルとして ch6-12 を同化利用することとした。

上記の設定で ATMS 気温チャンネルを新規に同化利用し、メソ数値予報システムにおける影響評価（性能評価試験）を行った。夏実験として 2023 年 6 月 26 日から 8 月 11 日、冬実験として 2023 年 12 月 10 日から 2024 年 1 月 10 日の期間で実験を実施した。様々な種類の観測データについて、観測値と第一推定値との整合性を確認したところ、航空機による気温観測や、ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI, CrIS などにおいて、第一推定値が観測データにより近づき、整合性が向上した（図 4.4.21）。これは第一推定値として用いた短時間予測 (FT=0~3) の気温場や水蒸気場の精度が向上したことを示唆するものである。また、ラジオゾンデ観測を対象とした検証から、FT=6, 12 における高度場の予測誤差が減少したことを確認した（図略）。

(4) 局地解析における開発進捗

局地解析についても、メソ解析と同様の VarBC 説明変数の変更を行うことで ATMS と AMSU-A 間の O-B バイアスの差異が軽減されることを確認した。メソ解析と同様の設定で ATMS/ch6-9 を新規に同化利用し、局地数値予報システムにおける影響評価（性能評価試験）を行った。夏実験として 2023 年 6 月 28 日から 7

² 当庁では、2025 年 4 月時点では米国の極軌道衛星 NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 及び欧州の極軌道衛星 Metop-B, Metop-C に搭載された AMSU-A を同化利用していたが、このうち NOAA-15, 18, 19 については 2025 年 6 月に運用が終了した。Metop-B, C についても、運用終了が 2030 年に計画されている。

表 4.4.1 AMSU-A 気温チャンネルと ATMS 気温チャンネルの対応及び同化利用状況。* <https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>, ** ○: 同化利用中、-: 未利用

観測中心周波数 [GHz] (WMO/OSCAR/Space *に準拠)	AMSU-A			ATMS				
	ch 番号	同化利用状況 **			ch 番号	同化利用状況 **		
		全球	メソ	局地		全球	メソ	局地
52.800	4	○	○	○	5	-	-	-
53.596 ± 0.115	5	○	○	○	6	○	-	-
54.400	6	○	○	○	7	○	-	-
54.940	7	○	○	○	8	○	-	-
55.500	8	○	○	○	9	○	-	-
$f_0=57.290344$	9	○	○	-	10	-	-	-
$f_0 \pm 0.217$	10	○	○	-	11	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.048$	11	○	○	-	12	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.022$	12	○	-	-	13	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.010$	13	○	-	-	14	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.0045$	14	○	-	-	15	-	-	-

月 12 日、冬実験として 2024 年 1 月 30 日から 2 月 13 日の期間で実験を実施した。夏実験では ATMS 水蒸気チャンネル (ch18-22) において観測値と第一推定値の整合性が悪化した (図 4.4.22 (a))。ATMS 気温チャンネルの観測誤差を大きくする措置 (観測誤差膨張) を施して追加実験を実施したが、結果として悪化傾向は改善されなかった (図 4.4.22 (b))。本件の詳細については現在調査中である。

(5) まとめと今後

メソ数値予報システム及び局地数値予報システムでの ATMS 気温チャンネルの新規利用に向け調査を行った。マイクロ波気温サウンダの VarBC 説明変数を変更することで、ATMS と AMSU-A の同一周波数のチャンネル間で見られていた O-B バイアスの差異が解消することを確認した。ATMS 気温チャンネルを同化することで、メソ数値予報システムについては改善効果が確認できたが、局地数値予報システムでは第一推定値の一部要素で予測精度の悪化が示唆される結果が得られ、引き続き調査している。

また、全球数値予報システムについても、成層圏に感度のある気温チャンネルの新規利用に向けた開発を別途進めている。

4.4.8 メソ解析におけるひまわり CO2 バンド晴天放射輝度 (CSR) の新規利用

(1) 概要

メソ解析では、静止気象衛星ひまわりに搭載された可視赤外イメージャ AHI のうち、対流圏中上層の水蒸気に感度のある水蒸気バンド (バンド 8、バンド 9、バンド 10) の晴天放射輝度温度 (Clear Sky Radiance;

CSR) を同化利用している。全球解析では、2025 年 10 月より水蒸気バンドに加え、CO2 バンド (バンド 16) の同化利用を開始し、対流圏の中下層を中心に精度向上が確認された (気象庁 2025)。メソ解析においても同様の効果が期待されるため、導入に向けた開発を進めている。

バンド 8、バンド 9、バンド 10 は、それぞれ中心波長が約 6.2 μm 、約 7.0 μm 、約 7.3 μm であり、対流圏の上層、中上層、中層の水蒸気場に感度がある (図 4.4.23 赤・橙・黄線)。一方、バンド 16 は中心波長が約 13.3 μm であり、二酸化炭素の吸収帯の一部に応答を持つ。大気中の二酸化炭素の不均一性は水蒸気よりも小さいことから、輝度温度の変化には気温の変化の寄与が大きく、またバンド 16 が応答を持つ波長帯には水蒸気の吸収線も含まれることから、水蒸気にも一定の感度がある。水蒸気バンドが対流圏の中上層に感度があるのに対して、CO2 バンドは対流圏の中下層に感度がある (図 4.4.23 緑線)。

CO2 バンドは既存の水蒸気バンドに対して情報の独立性が比較的高い。現在同化利用している水蒸気バンドに加えて CO2 バンドも同化することで、上層に対する場の修正と下層に対する場の修正をより独立に扱えるようになり、インクリメントの過剰な広がりや系統的バイアスの緩和が期待される。

以降では、メソ解析においてひまわりの CO2 バンドを同化利用する際の、品質管理手法や性能評価試験の結果について記す。

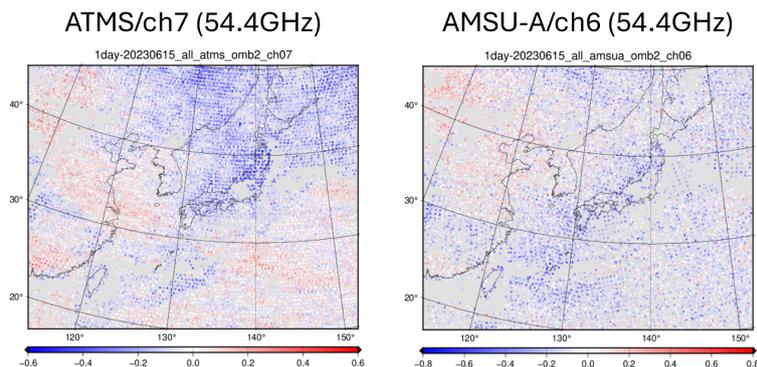


図 4.4.19 メソ解析における ATMS/ch7 と AMSU-A/ch6 (いずれも 54.4 GHz) の輝度温度観測値と第一推定値との差 (O-B)[K] の分布。VarBC による補正前の結果を示す。2023 年 6 月 15 日 00UTC~21UTC の解析結果から作成。

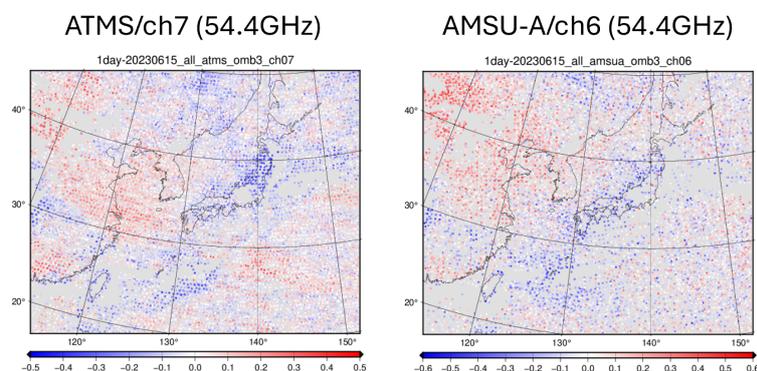


図 4.4.20 メソ解析における ATMS/ch7 と AMSU-A/ch6 (いずれも 54.4 GHz) の輝度温度観測値と第一推定値との差 (O-B)[K] の分布。ただし VarBC による補正後の結果を示す。統計期間は図 4.4.19 と同じ。

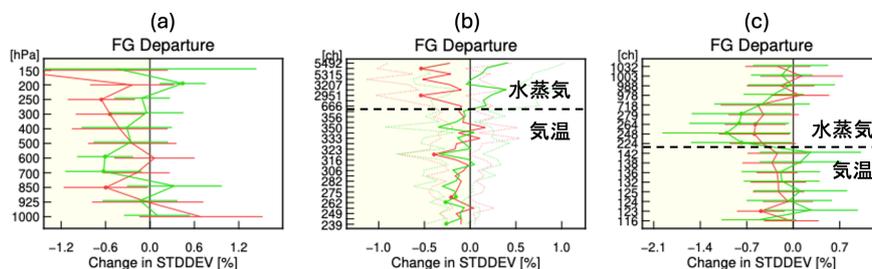


図 4.4.21 メソ解析における O-B の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。(a) 航空機気温観測, (b) ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI, (c) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

表 4.4.2 品質管理及び観測誤差の設定

	水蒸気バンド	CO2 バンド
晴天判定率	90%以上	90%以上
海陸 QC	なし	あり
山岳 QC	4000 m 以下	4000 m 以下
画素の標準誤差	0.5 K 以下	0.5 K 以下
観測誤差	1.5 K	1.5 K
観測誤差の膨張係数	3.0	3.0
グロスエラーチェック	3.0 K	3.0 K

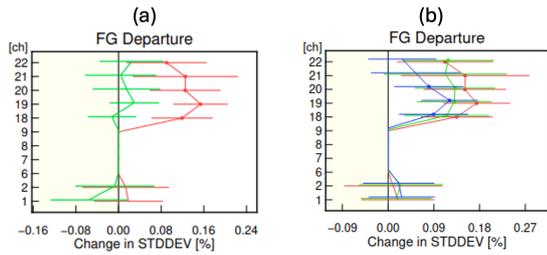


図 4.4.22 局地解析における O-B の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。(a) 性能評価試験の結果、(b) 観測誤差膨脹を変更した結果。(a) では赤線が夏実験、緑線が冬実験の結果、(b) では赤線、緑線、青線がそれぞれ観測誤差膨脹係数を $\sqrt{3}$ 倍 (デフォルト)、2 倍、3 倍とした場合の夏実験の結果を示す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

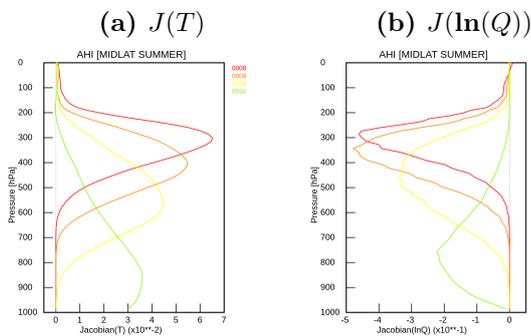


図 4.4.23 夏の北半球の中緯度帯の標準的大気を仮定した輝度温度の Jacobian (大気の変化に対する輝度温度の応答; $\partial T_B(x)/\partial x$)。縦軸は気圧座標 [hPa]。(a) が気温 T 、(b) が比湿 q の対数 $\ln(q)$ に対するもの。緑が CO2 バンド、赤・橙・黄が水蒸気バンド。

(2) 品質管理手法

メソ解析における CO2 バンドの同化利用に向けた品質管理手法や観測誤差設定は、気象研究所で開発した手法(田上ほか 2024)を基本とする。これは、水蒸気バンドの同化利用で用いられているリトリーブ地表面温度を活用した CSR の同化手法 (Okabe and Okamoto 2023, 岡部 2020) を CO2 バンドに拡張したものである。品質管理と観測誤差の主な設定を表 4.4.2 に示す。

CO2 バンドは水蒸気バンドより大気の透過率が高いため、輝度温度の計算の際に用いるモデルの地表面温度の不確実性が、観測とモデルの輝度温度の乖離に強く影響する。水蒸気バンドにおける同化利用開発が示すように、地表面温度に窓バンドからのリトリーブ値を用いることで、この乖離を大幅に低減できるため、本開発でもこれを採用した。

さらに CO2 バンドでは、既存の水蒸気バンドで採用していた品質管理に加えて、観測とモデルの海陸判定の乖離がある観測を除外する海陸 QC を導入する。輝度温度の計算の際に想定する地表面射出率及び地表面温度の設定が海陸で異なることから、海陸判定の乖離により輝度温度の結果に誤差が生じるためであり、本

QC の導入により、特に冬季において判明した観測値と第一推定値の差 (O-B) のバイアスや分散が異なる観測点の混入を除去することができた。なお、観測誤差の設定値に関しては、既存の水蒸気バンドを参考に観測統計の分布から保守的な値を設定している。将来的に誤差の最適化や地表面温度の評価の精緻化によってさらに小さな値を採用する可能性がある。

(3) 性能評価試験

メソ数値予報システムにおける CO2 バンド同化利用の影響評価 (性能評価試験) を行った。2025 年 8 月時点の数値予報システム相当を CNTL とし、上記変更を加えたものを TEST とする実験を、夏実験は 2023 年 6 月 21 日から 9 月 12 日、冬実験は 2023 年 12 月 10 日から 2024 年 1 月 31 日の期間で実施した。

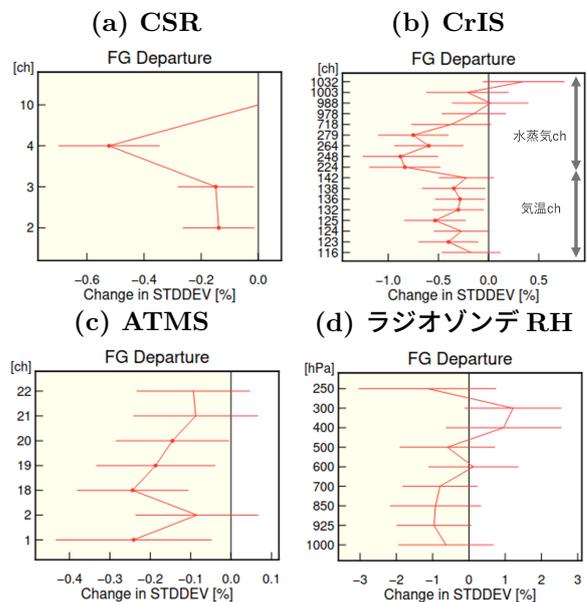


図 4.4.24 夏実験のメソ解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。それぞれ (a) Himawari CSR、(b) CrIS、(c) ATMS、(d) ラジオゾンデ相対湿度を指す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。各観測で整合的に中下層の標準偏差が低下している。(※ CSR の ch10 は CO2 バンドであるが、CNTL に観測がないため便宜上 0 となっている)

CO2 バンドの導入による、観測とモデルの短時間予測である第一推定値との整合性の向上を確認した。その結果、夏実験において、(a) ひまわり CSR の水蒸気バンドや (b) 赤外サウンダ (CrIS の水蒸気チャンネル)、(c) マイクロ波サウンダ ATMS で特に下層に感度のあるチャンネルを中心に O-B の標準偏差が減少した。さらに (d) 従来型観測であるラジオゾンデにおいても相対湿度について対流圏の中下層を中心に O-B の標準偏差の減少が確認された (図 4.4.24)。ゾンデの水蒸気に関しては、標準偏差に加えて、同高度でみられていた乾燥バイアスをわずかに低減する結果が得られた (図略)。一方で、冬実験では顕著な改善は認められ

ず、夏実験と比較して効果は限定的であった（図略）。

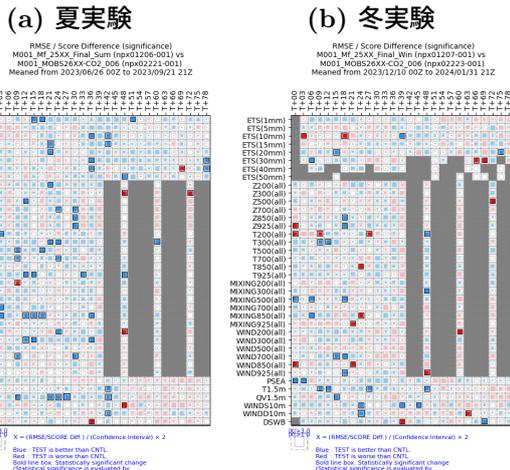


図 4.4.25 メソ数値予報システムにおける主要要素の対CNTL統計検証結果。図の見方は図 4.4.4 と同じ。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。

予測精度に関しても、夏実験においては降水や高度場、気温、水蒸気混合比に対して、概ね 2 日先予測にかけて改善傾向となった（図 4.4.25）。特に降水に関しては、予測で見逃し率や空振り率、バイアスが減少し、予測スコアが改善した。冬実験に関しては、概ね中立な結果であった。地上要素や予報初期の気温・水蒸気に若干の改善傾向は見られるが統計的なゆらぎの範疇と考える。

(4) まとめと今後

メソ解析において、水蒸気バンドに加え新たに CO2 バンドの CSR を同化利用するための変更を行い、影響評価を行った。夏実験において、第一推定値の対流圏中下層の水蒸気の精度が向上し、予測精度についても、対流圏下層から中層の気温や水蒸気、降水予測を中心に改善する傾向が見られた。夏季の下層水蒸気場や降水の改善は気象庁の防災業務において重要なことから、現業システムへ導入することとし、準備を進めている。

今後の改良として、冬季における予測精度の向上に向けて、バイアス補正や品質管理（誤差評価を含む）の精緻化を考えている。加えて、水蒸気バンドも含め、より高解像度の CSR の同化について調査を進める。また、局地解析においても導入を検討する。

4.4.9 ひまわり 10 号搭載赤外サウンダの利用に向けた開発

(1) 概要

2030 年度に運用開始予定の次期静止気象衛星ひまわり 10 号には、日本の静止気象衛星としては初めてハイパースペクトル赤外サウンダ（以下、赤外サウンダ）GHMS が搭載される（別所ほか 2024）。GHMS は日本周辺域の 3 次元的な大気構造を高頻度に観測できるこ

とから、台風や線状降水帯といった顕著現象の予測精度向上に有用であると期待されている。

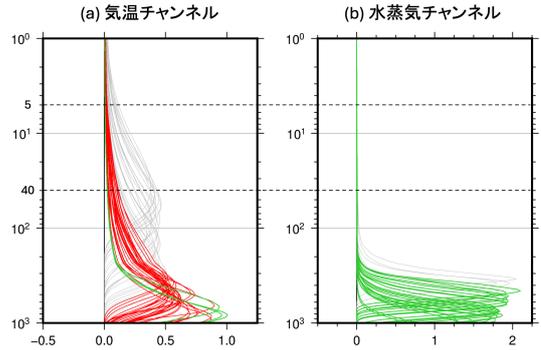


図 4.4.26 OSSE で同化利用した GHMS の各チャンネルの荷重関数。左図に気温に感度のあるチャンネル、右図に水蒸気に感度のあるチャンネルを示す。緑線が全球解析・メソ解析・局地解析で同化利用したチャンネル、赤線が全球解析及びメソ解析で同化利用したチャンネル、灰色線が全球解析のみで同化利用したチャンネル。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa] で、横点線はメソモデル及び局地モデルのおおよその上端高度（約 5 hPa、約 40 hPa）を示す。

数値予報開発センターでは、GHMS の観測データをひまわり 10 号の運用開始後に速やかに数値予報現業システムで利用できるよう、模擬観測データを用いた観測システムシミュレーション実験（OSSE: Observation System Simulation Experiment, 石橋 2013）を実施し、技術開発を進めている（気象庁 2025）。本項では令和 7 年の OSSE に関する開発進捗について報告する。

(2) 開発進捗

前回の報告（気象庁 2025）からの開発進捗として、全球数値予報システムだけでなく、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も OSSE を実施した。同化利用するチャンネルは、全球解析用を選択した気温または水蒸気に感度のある計 86 チャンネルのうち、メソモデル及び局地モデルのそれぞれのモデル上端高度より上空に感度のあるチャンネルを除外した、それぞれ計 55 チャンネル及び計 25 チャンネルとした（図 4.4.26）。品質管理手法及び同化手法は、現業数値予報システムで利用中の極軌道衛星搭載赤外サウンダと同様（亀川・計盛 2017, 気象庁 2024）とした。

図 4.4.27 に、2023 年 6 月時点の現業メソ数値予報システムに対して実施した OSSE の結果の一例を示す。この降水事例では、図中の楕円で示した領域において、現業相当の実験（CNTL）と比較して OSSE で降水強度予測が解析雨量に近付いた。予報初期値の変化を確認すると、OSSE では降水域の風下側で下層水蒸気量が増加しており、これは ERA5 に含まれる情報が模擬観測データを通して初期値に適切に反映されたことを示している。なお、この時刻には赤外サウンダを搭載した極軌道衛星搭載は日本上空を通過していないため、静止軌道で観測可能な GHMS の利点が発揮された改善

事例といえる。ただし、OSSEで見られる変化はERA5における下層水蒸気や降水の表現に依存するため、必ずしも全ての事例で改善が得られるとは限らない。このため、ERA5の特性を踏まえながら慎重に検証を進めている。

また、観測誤差設定の妥当性などを確認するため、模擬観測データの観測誤差相関をDesroziers et al. (2005)の手法で推定した結果、チャンネル間及び水平方向において実観測 (IASI) よりも強い相関を持つことがされた (図 4.4.28)。これは、ERA5に含まれる背景誤差由来の相関に加え、本開発で利用している模擬観測データでは雑音特性が未考慮であることが原因と考えられる。現在は、解析処理内で誤差相関を陽に考慮する代わりに、実観測よりも大きく観測誤差を膨張させた上で同化することで対処している。

(3) まとめと今後

GHMSの模擬観測データを用いて、全球・メソ・局地の各数値予報システムでOSSEを実施している。実験結果から予測精度の向上が確認されており、今後は模擬観測データに特有の性質に注意しつつ、赤外サウンダの利用高度化に向けた調査をOSSEを通じて進める予定である。

また、GHMSの利用に向けた技術開発として、中国の静止気象衛星FY-4B搭載の赤外サウンダGIIRSや、2025年7月に打ち上げられた欧州の静止気象衛星MTG-S1搭載の赤外サウンダIRSの実観測データを用いた調査も並行して実施する予定である。

参考文献

別所康太郎, 安藤昭芳, 隅田康彦, 安部実希, 2024: 静止気象衛星ひまわり10号について. *天気*, **71**, 511–515.

Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis - error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385–3396.

Drusch, E., M. Wood and H. Gao, 2005: Observation operators for the direct assimilation of TRMM microwave imager retrieved soil moisture. *Geophys. Res. Lett.*, *32*, L15403, doi:10.1029/2005GL023623, 4317.

Eyre, J. R. and W. P. Menzel, 1989: Retrieval of Cloud Parameters from Satellite Sounder Data: A Simulation Study. *J. Appl. Meteor. Climat.*, **28**, 267–275.

Geer, A., N. Bormann, K. Lonitz, P. Weston, R. Forbes, and S. English, 2019: Recent progress in all-sky radiance assimilation. *ECMWF Newsletter*, **161**, 20–25.

平原洋一, 2017: 全球解析におけるSuomi-NPP/ATMS輝度温度データの利用開始. 平成29年度数値予報研

修テキスト, 気象庁予報部, 70–73.

幾田泰醇, 2017: 局地数値予報システムにおける新規観測データの利用開始及び同化手法の高度化. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 82–85.

石橋俊之, 2013: 観測システムシミュレーション実験(OSSE). *天気*, **60**, 831–833.

石川宜広, 2010: 地上GPSデータのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 54–60.

亀川訓男, 計盛正博, 2017: 全球解析におけるSuomi-NPP/CrIS輝度温度データの利用開始. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 73–74.

気象庁, 2021: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトグループの全球解析への導入. 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, 23–28.

気象庁, 2023a: メソ解析および局地解析におけるマイクロ波サウンダATMSの利用. 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, 42–47.

気象庁, 2023b: FSOI (Forecast Sensitivity Observation Impact). 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, 93–98.

気象庁, 2024: ハイパースペクトル赤外サウンダの全球解析における利用改良およびメソ・局地解析における新規利用. 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, 46–52.

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.

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**, 23 429–23 465.

McNally, A. and P. Watts, 2003: A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3411–3423.

大谷竜, 内藤勲夫, 1998: GPS可降水量の物理と評価. **192**, 15–33.

岡部いづみ, 2020: 静止気象衛星ひまわりCSR. 数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 133–141.

Okabe, I and K. Okamoto, 2023: Assimilation of surface-sensitive bands' clear-sky radiance data using retrieved surface temperatures from geostationary satellites. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **149**, 1473–1497, URL <https://doi.org/10.1002/qj.4469>.

岡垣晶, 2015: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第61号, 気象庁予報部, 43–46.

岡本幸三, 2007: ATVOS直接同化. 数値予報課報告・

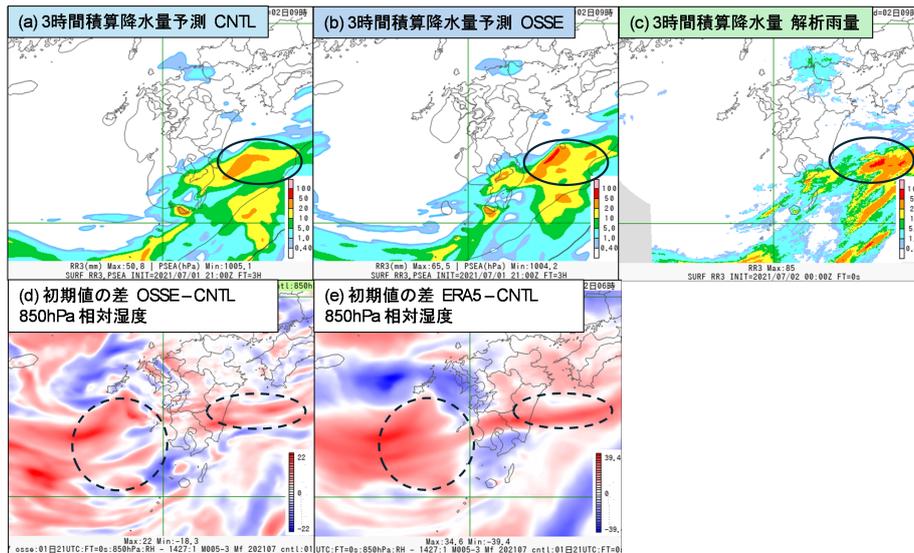


図 4.4.27 メソ数値予報システムにおける前3時間降水量 [mm/3h] の改善事例。上段は 2021 年 7 月 1 日 21UTC を初期値とした 3 時間後の予測 (7 月 2 日 00UTC) で、(a) CNTL、(b) OSSE、(c) は解析雨量。下段は初期値における 850 hPa 面の相対湿度 [%] の差で、(d) は OSSE と CNTL の差、(e) は模擬観測データの作成元である ERA5 と CNTL の差を示す。

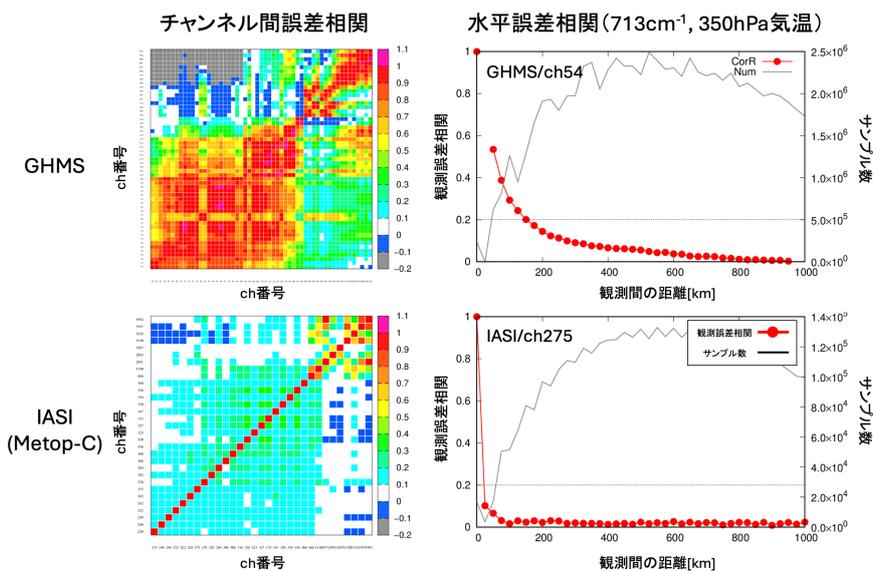


図 4.4.28 GHMS 模擬観測データのチャンネル誤差相関及び水平誤差相関の推定値。参考として、下段に Metop-C 搭載 IASI の実観測データでの推定値を示す。水平誤差相関は、350 hPa 付近の気温に感度のある GHMS/ch54 及び IASI/ch275 での計算結果を示す。

別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58-70.

Okamoto, K., T. Ishibashi, and I. Okabe, 2023: All-sky infrared radiance assimilation of a geostationary satellite in the Japan Meteorological Agency's global system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **149**, 2477-2503.

Okamoto, K., T. Ishibashi, I. Okabe, and H. Shimizu, 2024: Extension of all-sky radiance assimilation to hyperspectral infrared sounders. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **150**, 5472-5497.

大和田浩美, 2017: GNSS 掩蔽観測データの利用の改

良. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 77-80.

Scipal, M., K. Drusch and W Wagner, 2008: Assimilation of a ERS scatterometer derived soil moisture index in the ECMWF numerical weather prediction system. **31**, 1101-1112.

田上雅浩, 岡部いづみ, 近藤圭一, 幾田泰醇, 太田芳文, 川畑拓矢, 岡本幸三, 秋元銀河, 安藤慧, 草野直人, 村田英彦, 2024: メソ解析への Himawari CO2 バンド CSR データの利用検討. 日本気象学会 2024 年度秋季大会.

4.5 季節アンサンブル予報システムの開発

4.5.1 はじめに

数値予報開発センターと気象研究所では、3か月予報、暖・寒候期予報及びエルニーニョ予測の予測精度向上を目指して、次期季節アンサンブル予報システム(CPS4)の開発を行っている。また、現在1か月予報の基礎資料は全球アンサンブル予報システム(GEPS)が担っているが、これをCPS4で担う計画であり、その予測精度向上も目指している。CPS4は令和8年1月頃の運用開始を計画している。

今期はCPS4を現業化可能か評価するための業務化試験を行い、現在運用中のCPS3に対して季節内予測～季節予測スケールの系統誤差が改善することやGEPSに対して季節内予測スケールの予測精度が中立以上であることなど、事前に実施した性能評価試験の結果(気象庁2025)と概ね同等であることを確認した。また、CPS4の予測結果を後続利用するシステムとしてGEPS及び日本沿岸海況監視予測システム(MOVE-JPN)への影響評価を行い、影響は概ね中立であることを確認した。これらの結果から、CPS4の現業化に進む予定である。本稿ではそれらの試験の結果について報告する。

4.5.2 改良・変更項目

CPS3からCPS4への変更点は気象庁(2025)に記載したとおりであり、ここではその概要のみ記載する。

全球海洋同化システム

- 高解像度モデルへの力学的ダウンスケーリング(G3F)へのインクリメントに低解像度モデルによる4D-Var(G3A)の格子スケールの空間フィルタを適用
- 海洋モデル(MRI.COM)で採用されている時間積分法等の改良(G3Fのみ)

結合予測モデル

- 大気モデルの雲・層積雲・積雲過程や陸上積雪・湖過程の改良
- 海洋モデル(MRI.COM)で採用されている時間積分法等の改良
- 線形オゾンスキームの導入
- 初期摂動としてGEPSで採用されている特異ベクトル(SV)法、及び局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)法の導入
- モデルアンサンブル手法としてGEPSで採用された確率的水蒸気プロファイル参照法(SHPC)の導入
- 大気モデルの鉛直層を100層から128層へ増強

システム構成

- 火曜・水曜初期日は1か月先までの予測のメンバー数を5から25へ増強

- 再予報のメンバー数を1か月先までは5から13へ増強

4.5.3 業務化試験結果

CPS4の再予報実験を1991～2020年の各月中旬・月末初期日(合計720初期日。初期時刻は00UTC)、メンバー数は5(ただし、季節予測検証ではLAFにより10)の仕様で実施した。対照実験にはCPS3と2025年3月に更新されたGEPS(第3.3節)を用いた。CPS3と比較してバイアス、年々変動、スプレッドには変更から想定される変化が概ねみられた。また、GEPSと比較して3,4週目のバイアス、年々変動、スプレッドは概ね良好であった。以降の検証では、記載がない限り海面水温はMGDSST、その他はJRA-3Qを検証値として使用している。また、運用の安定性に関する確認も実施した。

(1) 季節予測検証

はじめに、3か月予報、暖・寒候期予報及びエルニーニョ予測の予報時間に対応する季節予測検証の結果について述べる。図4.5.1に夏季と冬季のCPS4とCPS3のSSTバイアスを示す。太平洋赤道域の中部から東部にかけては、西に拡大しているSST低温(冷舌)バイアス、北半球夏季のインド洋熱帯域で正のインド洋ダイポールモード現象に類似したSSTバイアスがCPS4では軽減した。これには積雲対流スキームの変更が寄与していると考えられる。また、北半球夏季の中高緯度のSST低温バイアスが改善した。これには雲スキームの改良が寄与していると考えられる。また、海洋性層積雲が発生する領域に概ね対応して、ペルー沖のSST高温バイアスが改善した。これには層積雲スキームの改良が寄与していると考えられる。

続いて、図4.5.2に夏季と冬季の2m気温のCPS4とCPS3のバイアスを示す。北半球夏季の陸上の高温バイアスは改善傾向であった。これには雲スキームの改良が寄与していると考えられる。また、北半球冬季のシベリア・北米東部の高温バイアスが改善した。これには湖モデルの改良や、積雪過程の改良が寄与していると考えられる。

最後に、図4.5.3にバイアス補正後のSST指数の予測精度(ACC)を示す。バイアス補正により前述のSSTバイアスの改善の効果は取り除かれることから、気候値からの年々変動が主にスコアに反映されることに留意されたい。ACCはNINO.3領域(150°W-90°W、5°S-5°N)では悪化、NINO.WEST領域(130°E-150°E、0°-15°N)では改善した。NINO.3での悪化について着目すると、CPS4ではエルニーニョ・南方振動(ENSO)のシグナルが不明瞭な時期では主にスプリングバリアと呼ばれる北半球の春をまたいだ予測のACCが悪化傾向だが、ENSO成熟期～衰弱・遷移期のACCはほぼ中立であった(気象庁(2025)の図4.7.12の再掲となるため省略)。

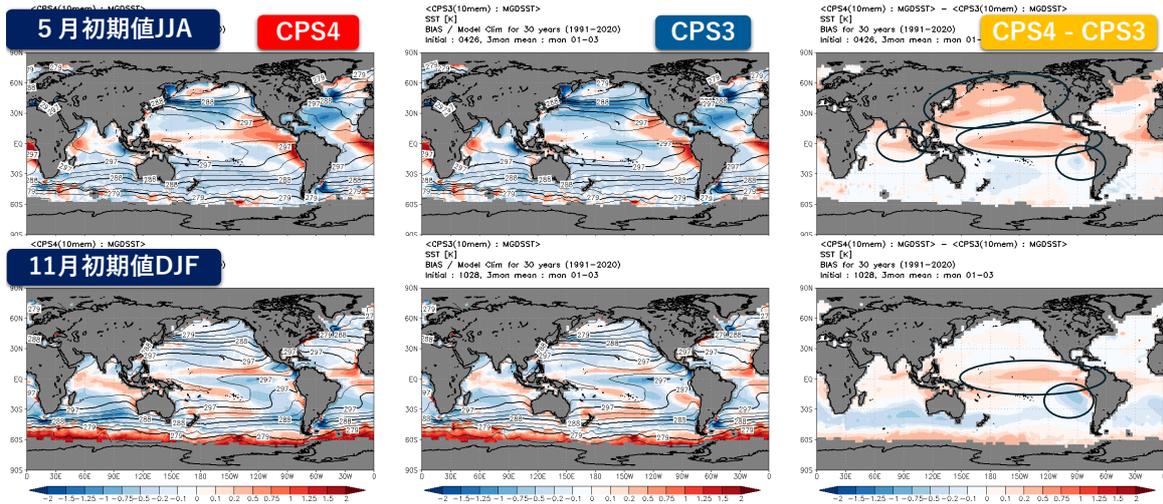


図 4.5.1 CPS4、CPS3 の SST バイアスとその差分 [K] (塗りつぶし)。等値線は予測平均値。上段と下段は 5 月初期値、11 月初期値の 3 か月平均 (JJA、DJF)。差分の図には特徴的な変化の箇所について楕円を付している。

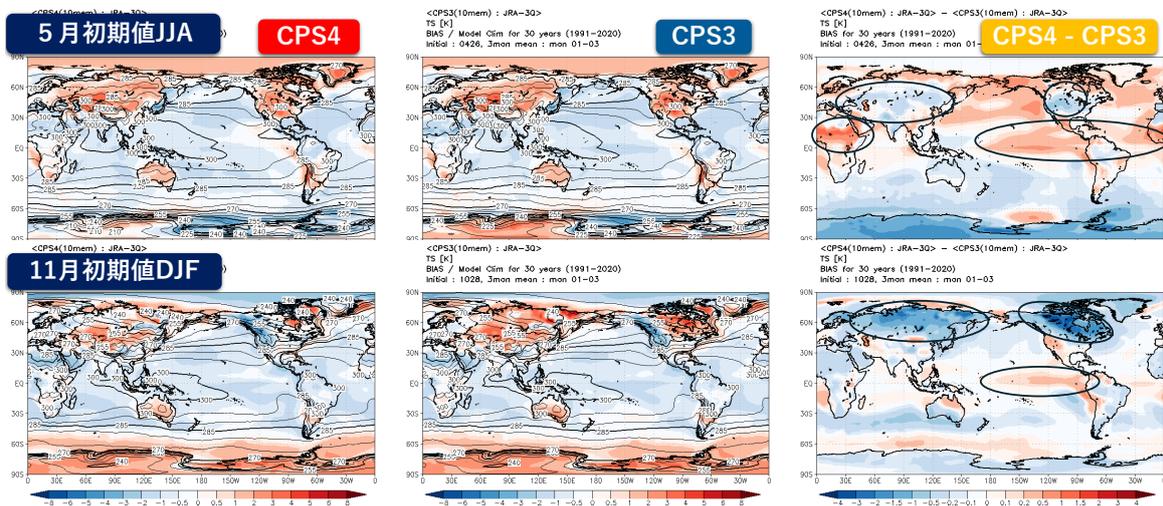


図 4.5.2 CPS4、CPS3 の 2m 気温バイアスとその差分 [K] (塗りつぶし)。等値線は予測平均値。上段と下段は 5 月初期値、11 月初期値の 3 か月平均 (JJA、DJF)。差分の図には特徴的な変化の箇所について楕円を付している。

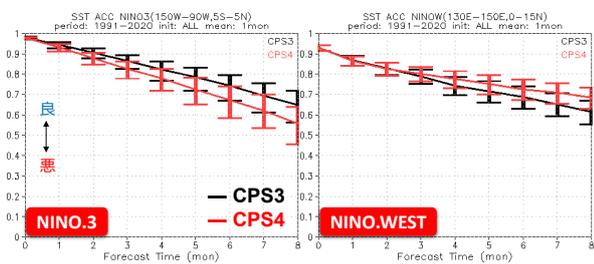


図 4.5.3 バイアス補正後の NINO.3 領域 (左) と NINO.WEST 領域 (右) の SST 指数の ACC。横軸はリードタイム (単位は月)。黒線は CPS3、赤線は CPS4。エラーバーはリサンプリング回数 1000 回の bootstrap 法により見積もった 95% 信頼区間。

(2) 季節内予測検証

次に、1 か月予測の予報時間に対応する季節内予測検証の結果について述べる。200hPa 速度ポテンシャル (CHI200) のバイアス (1-4 週平均) (図 4.5.4) は対 CPS3 では全体的にバイアスが軽減した。対 GEPS では夏のフィリピン海周辺の対流不活発が軽減した。850hPa 気温のバイアス (1-4 週平均) (図 4.5.5) では、対 CPS3 でも対 GEPS でも海上の低温バイアスが悪化した。一方で、夏季の陸上の高温バイアスは対 CPS3 からやや改善した。

続いて、アノマリー相関 (図 4.5.6) を CPS3 と比較すると、北半球 500hPa 高度 (Z500) は改善傾向であった。熱帯 CHI200 では予報 1 週目程度は改善傾向であり、その後はほぼ中立であった。また GEPS と比較すると、北半球 Z500 は予報 2 週目程度までは GEPS の

方が良い傾向、予測3~4週目は概ね中立であった。熱帯CHI200は予報7日目以降、CPS4の方が良い傾向であった。また、スプレッドスキルの関係はCPS3でみられた中高緯度の予報1週目程度までのZ500のスプレッド過剰が改善しGEPSとほぼ同程度になった。CPS3でみられた熱帯の予報2週目程度までのCHI200のスプレッド過小も軽減した(気象庁(2025)の図4.7.13と同様の傾向のため図略)。

最後に、Madden-Julian振動(MJO)の予測精度(図4.5.7)はCPS3に比べて中立~やや悪化であったが、GEPSと比べると改善した。CPS4はCPS3に比べて、振幅はやや過小だが、GEPSに比べて改善した。CPS3では東進が遅い傾向であったが、CPS4では改善した。

このようにCPS4はGEPSと比べて予測2週目程度までの中高緯度の予測ではGEPSより予測精度は高くはないが、1か月予報に重要な熱帯の循環場や季節内振動の予測精度や中高緯度の予測3~4週目の予測精度が中立~改善となっている。

(3) 運用安定性に関する確認

所定の時刻内にプロダクトを作成するためにはモデルの異常終了を防止するための計算安定性も重要である。計算安定性に関わる指標を確認して問題がみられないこと、業務化試験の全事例でモデルが正常終了することを確認した。

4.5.4 後続システムの影響評価

(1) 全球アンサンブル予報システムへの影響評価

GEPSでは予測6日先以降の海面水温にCPS3の予測結果を利用しているが、これをCPS4に変更する。この影響を評価するため2023年夏(7~9月)と2023/24年冬(12~2月)の11日予報連続初期日実験(ただし現業と同じ51メンバーはなく13メンバーで実施)及び1991~2020年(各月末初期日×30年の合計360初期日)の2週間再予報実験を実施した。前節ではCPS4のSSTバイアスに改善がみられたことを取り上げたが、GEPSではCPS3・CPS4の予測結果を系統誤差補正して利用するため、CPS3とCPS4のバイアスの差異は影響しない。影響を及ぼすのは系統誤差補正後のCPS3とCPS4の海面水温の予測精度の差異であるが、その変化は小さかった(図略)。その結果から想定されるとおり、11日予報連続初期日実験及び2週間再予報実験のいずれの予測特性・予測精度も概ね中立であった(図略)。

(2) 日本沿岸海況監視予測システムへの影響評価

MOVE-JPNでは北太平洋領域について31日先までの予測プロダクトを作成しており、その予報計算においては大気外力として18日先以降にGEPSの1か月予報向け計算のコントロールメンバー及びGEPSの最大予報時間を越える範囲にJRA-55気候値を使用して

いるが¹、これらをCPS4のコントロールメンバーに変更する。この影響を評価するため2023年夏(8~10月)、2024年冬(1~3月)を対象に連続初期日型の予報実験を行った。図4.5.8に夏の結果を示す。28日先予測ではモデル最表層(1m深)水温は全般的に低下傾向であり、地上気温の低下や日射の減少といった大気外力の差異(図略)と統合的な変化であることを確認した。これにより西部熱帯域では高温バイアスが縮小しRMSEが改善した。冬についても同様の傾向がみられた(図略)。100m深水温では系統的な変化は表層より小さく、予測精度は改善・悪化が混在し概ね中立であった(図略)。JRA-55気候値を参照しない28日先予測だけでなく、JRA-55気候値を一部参照する28日より先の予測も同様の傾向であった。

4.5.5 まとめ

CPS4の業務化試験と、CPS4の予測結果を後続利用するシステムであるGEPS及びMOVE-JPNへの影響評価を行い、現業化に支障がないと判断されたことから、令和8年1月頃にCPS4の運用開始を予定している。また、これに伴いCPS4の1か月予報における利用を開始し、GEPSの予測時間は1か月予報に対応する34日から2週間気温予報等に対応する18日先までに変更される予定である。

参考文献

- 気象庁, 2025: 次期季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS4)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, 99-109.
- Wheeler, M. C. and H. H. Hendon, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917-1932.

¹ GEPSの1か月予報向け計算は火・水曜日実行に限られている。一方、MOVE-JPNは毎日実行するため、MOVE-JPNの月・火曜日実行において前週水曜日のGEPSの予測結果を参照する際にMOVE-JPNの最大予報時間がGEPSの最大予報時間を越える。

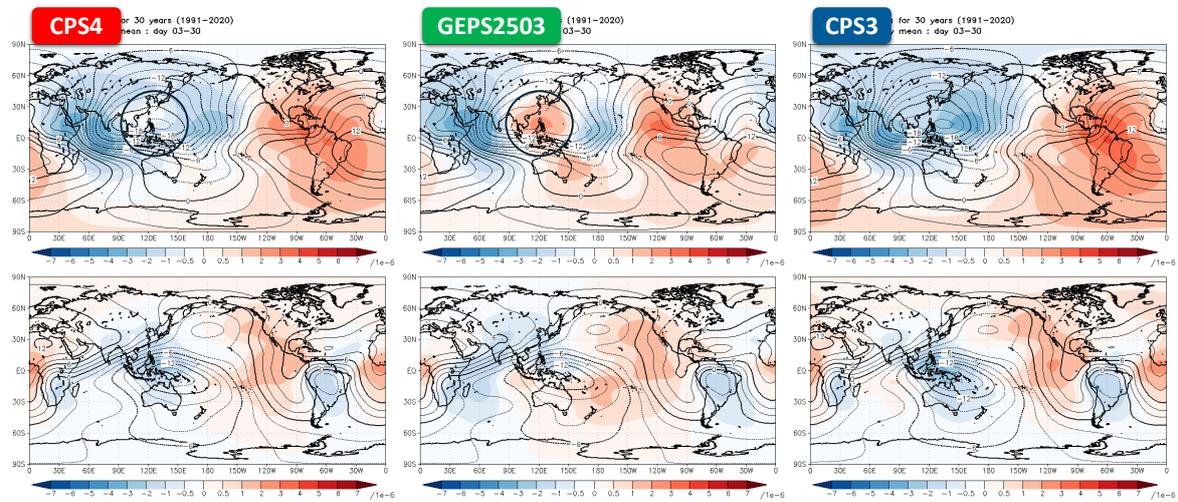


図 4.5.4 CPS4、GEPS、CPS3 の 200hPa 速度ポテンシャルのバイアス (色) とモデル平年値 (等値線)。単位は $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。上段と下段は夏初期日、冬初期日の 1-4 週平均。特徴的な変化の箇所について楕円を付している。

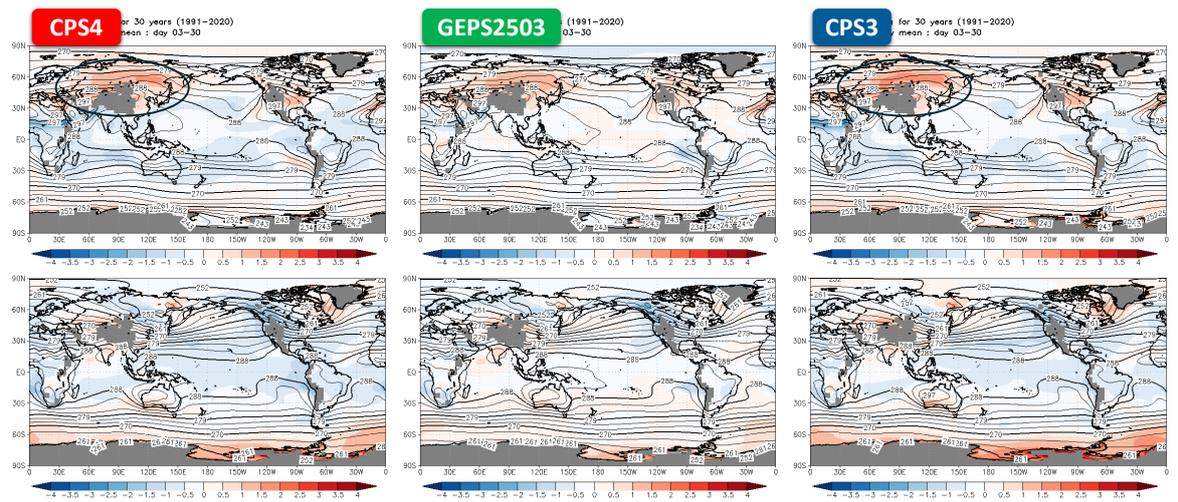


図 4.5.5 CPS4、GEPS、CPS3 の 850hPa 気温のバイアス (色) とモデル平年値 (等値線)。単位は K。上段と下段は夏初期日、冬初期日の 1-4 週平均。特徴的な変化の箇所について楕円を付している。

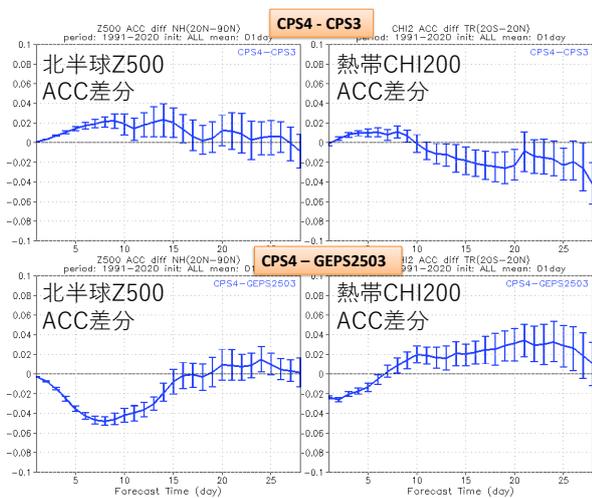


図 4.5.6 北半球 500hPa 高度（左列）と熱帯 200hPa 速度ポテンシャル（右列）の ACC を CPS4 と CPS3、GEPS で差をとったもの。上段は CPS4 から CPS3 の ACC を引いたもの、下段は CPS4 から GEPS の ACC を引いたもの。横軸はリードタイム（単位は日）。エラーバーはリサンプリング回数 1000 回の bootstrap 法により見積もった 95%信頼区間。

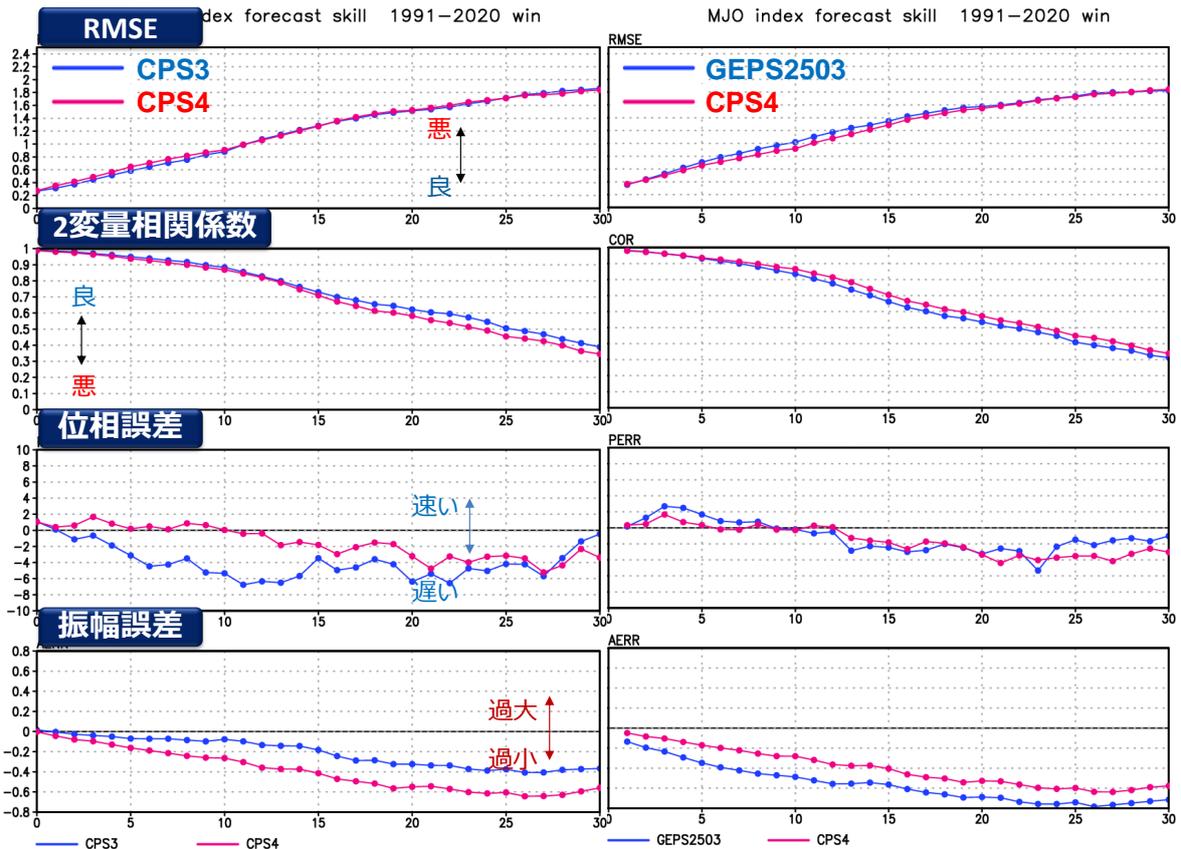


図 4.5.7 Wheeler and Hendon (2004) の RMM index で定義した MJO の検証結果。左列は CPS3 と CPS4 の比較、右列は GEPS と CPS4 の比較。上から RMSE、2 変量相関係数、位相誤差、振幅誤差。対象は北半球冬季 MJO の振幅が 1 より大きい事例のみ。

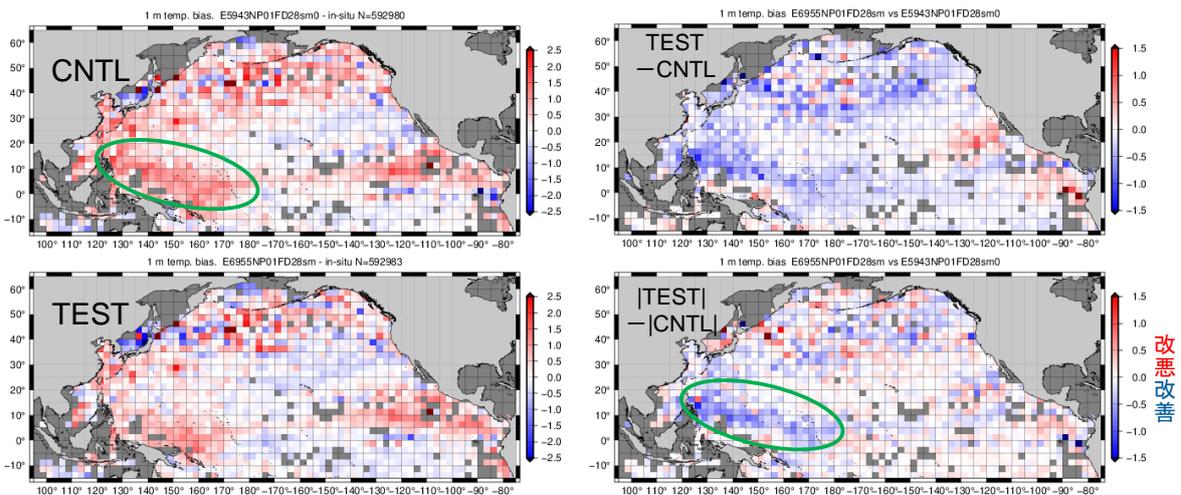


図 4.5.8 2023 年夏実験の MOVE-JPN の 28 日先予測におけるモデル最表層 (1m 深) 水温 ([K]) のバイアス (対現場観測) と CNTL と TEST との差。左上は CNTL のバイアス、左下は TEST のバイアス、右上はバイアスの TEST-CNTL、右下はバイアスの絶対値の TEST-CNTL。特徴的な変化の箇所について楕円を付している。

4.6 波浪モデル

気象庁では波浪警報・注意報等の防災情報の提供のために、全球波浪モデル (GWM) と沿岸波浪モデル (CWM) を運用している (竹内ほか 2012)。また、大気モデル予測の不確実性を考慮するため、多メンバーの波浪予測計算を行う波浪アンサンブル予報システムを運用しており、その予測情報は「早期注意情報 (警報級の可能性)」の発表に利用されているほか、WMO の荒天予測計画 (Severe Weather Forecasting Programme, SWFP) の枠組みで国外にも提供されている。2025 年は、GWM・CWM の 3 時間間隔の台風位置情報の利用に向けた開発や、未利用衛星データのデータ同化への利用に向けた開発のほか、CWM 高解像度化・高頻度化に向けた調査、より効率的な計算機資源の利用に向けた調査を進めた。CWM 高解像度化・高頻度化については、「波浪モデルは、沿岸域などの高波をより精緻に表現するため、高解像度化などによる改善を図っていく必要がある」とした「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」に示された目標の一つである。以下では、未利用衛星データのデータ同化への利用に関する開発進捗について報告する。

現在、波浪モデルのデータ同化で利用している衛星データは、EUMETSAT (欧州気象衛星開発機構) が提供する Level2 波高データである。ここでいう Level とは、データ処理のレベルであり、Copernicus Marine Service (もしくは Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS) からは衛星間の機差補正等が実施済みの Level3 波高データも提供されている。将来的に、波浪データ同化に使う衛星データを Level3 波高データに切り替え、併せて現在未利用の衛星データの利用も検討している (気象庁 2025)。

2025 年は、CMEMS から準リアルタイムで取得できる 8 衛星 (現在 Level2 データを利用中の Jason-3, Saral, Sentinel-3A/3B, 未利用の CFOSAT, Cryosat-2, Sentinel-6A, SWOT) の Level3 波高データを対象にデータ同化の過去実験を行い、現在の 4 衛星の Level2 波高データによる結果との比較検証を実施した。夏実験として 2024 年夏 (2024 年 6 月 25 日 12UTC~2024 年 10 月 21 日 18UTC 初期値)、冬実験として 2024 年冬 (2023 年 11 月 25 日 12UTC~2024 年 3 月 21 日 18UTC 初期値) と、夏冬それぞれ 4ヶ月程度を検証期間とし、Level3 波高データを真値とする有義波高の対観測検証を行った。

図 4.6.1 は、夏実験でデータ同化に利用された衛星観測データ数の分布を、4 衛星の Level2 データと 8 衛星の Level3 データとで比較したものである。8 衛星の Level3 データの方が全球的にデータ数が多いことが分かる。

図 4.6.2 は、GWM における全球 (極域は除く) お

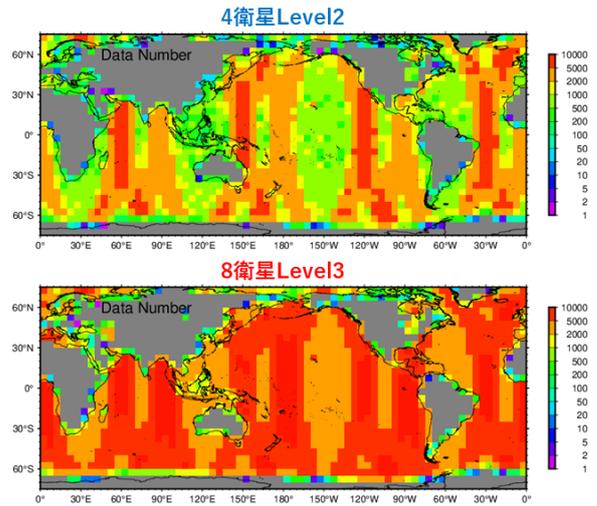


図 4.6.1 夏実験 (2024 年 6 月 25 日 12UTC~2024 年 10 月 21 日 18UTC 初期値) で同化に利用した衛星観測データ数分布。上図: 4 衛星の Level2 データ、下図: 8 衛星の Level3 データ。

よび日本近海を対象とする波高のバイアス¹の、予報時間に伴う変化を表している。全球のバイアスは予報時間が進むにつれて大きくなる傾向があるが、期間を通して Test (8 衛星の Level3 データ利用) の方が Cntl (4 衛星の Level2 データ利用) よりもゼロに近づいている。これは、利用する衛星数を揃えた図 4.6.3 (4 衛星 Level2 データ利用と 4 衛星 Level3 データ利用との比較) でも同様の傾向になっており、同化に利用する Level3 データと Level2 データの違いによるものと考えられる。図は省略するが、4 衛星 Level2 波高データを真値とした検証でも同様であった。ここで、Level3 データは衛星間の機差補正やブイ観測と調整済みの波高データであるのに対し、Level2 データはバンド・測定周波数ごとの波高観測データそのままであり、ユーザ側で衛星ごとに利用するバンド・周波数を選択し、観測データの QC を施す必要がある。これらの違いが Level3 データ同化と Level2 データ同化のバイアスの差に繋がっている可能性がある。なお、日本近海を対象としたバイアスでは、夏実験の予報時間前半について改善が見られる。

波高の予報誤差を表す Scatter Index²は、初期時刻ではほぼ全域で、特に図 4.6.1 上図で観測が少なかった経度帯 (30°E, 120°E, 150°W, 60°W) で、8 衛星 Level3 データによる同化の方が小さく (精度が良く) なっている (図 4.6.4)。図 4.6.5 で見ると、8 衛星 Level3 データによる同化では初期時刻で 4 衛星 Level2 データの同化に比べて 0.03 ポイント程度小さく (精度が良く) なるが、以降その差が小さくなり、8 衛星 Level3 データ同

¹ バイアスは予報の系統的な偏りを示す指標。

² Scatter Index は誤差の標準偏差を観測平均値で正規化した指標。波浪モデル検証で良く用いられる指標であり、WMO 国際波浪予報相互比較でも用いられている。

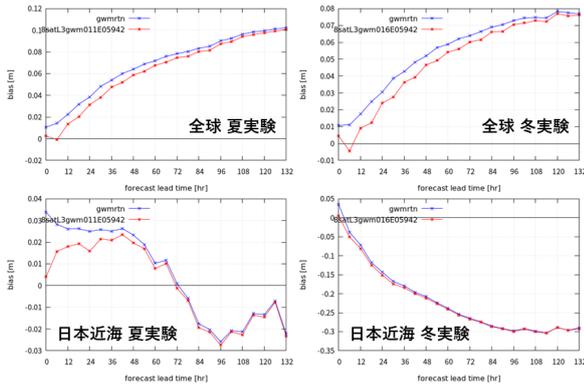


図 4.6.2 GWM における対 8 衛星 Level3 波高データのバイアス [m]。上段: 全球、下段: 日本近海。左列: 夏実験、右列: 冬実験。青線は Cntl (4 衛星 Level2 データ)、赤線は Test (8 衛星 Level3 データ) による結果。それぞれ縦軸のスケールが異なることに注意。

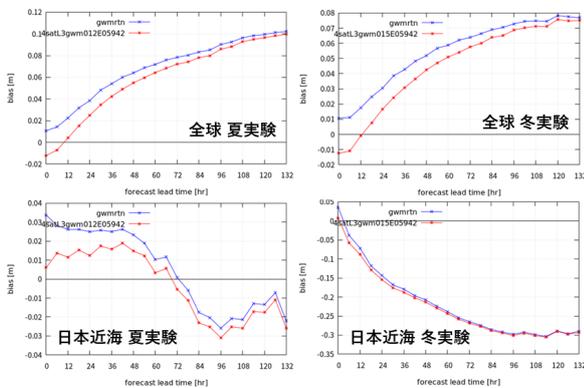


図 4.6.3 GWM における対 4 衛星 Level3 波高データのバイアス [m]。上段: 全球、下段: 日本近海。左列: 夏実験、右列: 冬実験。青線は Cntl (4 衛星 Level2 データ、図 4.6.2 の Cntl と同じもの)、赤線は Test (4 衛星 Level3 データ) による結果。それぞれ縦軸のスケールが異なることに注意。

化への切り替えの効果が認められるのは予報 18 時間くらいまでである。4 衛星 Level3 データと 4 衛星 Level2 データによる実験を比較した場合には初期時刻から両者の差は見られず、Level2 データから Level3 データへの切り替えそのものは Scatter Index に影響がないことが分かる (図略)。これらの結果は、波高の予報誤差の改善に関しては Level3 データの使用よりも利用する衛星数 (より具体的にはカバーする領域) の寄与の方が大きいことを意味していると考えられる。なお、Scatter index に関しては、日本近海を対象とする場合でも同様の傾向が見られる。以上より、8 衛星 Level3 データを同化に利用することによる波浪モデルの精度改善が確認できたので、令和 8 年度を目処に Level3 データおよび未利用衛星データを利用開始する計画である。

参考文献

気象庁, 2025: 波浪モデル。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, 110-111.

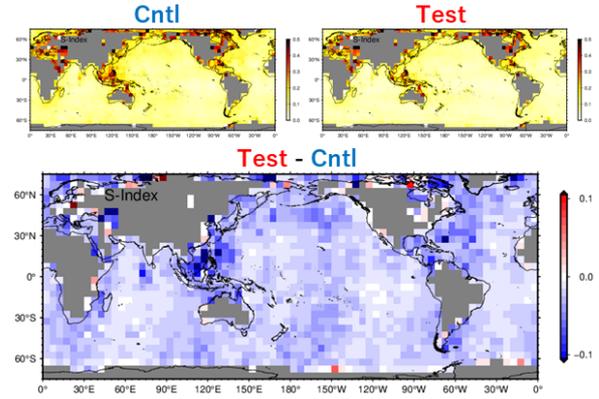


図 4.6.4 夏実験 (2024 年 6 月 25 日 12UTC~2024 年 10 月 21 日 18UTC 初期値) における、対 8 衛星 Level3 波高データの Scatter index の全球分布 (初期時刻)。左上図: Cntl (4 衛星 Level2 データ)、右上図: Test (8 衛星 Level3 データ) による結果、下図: Test-Cntl の差。

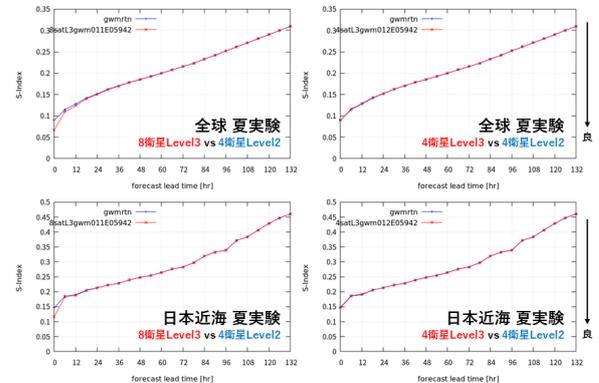


図 4.6.5 GWM における対 8 衛星 Level3 波高データの Scatter index (夏実験)。青線は Cntl、赤線は Test を表す。上段: 全球、下段: 日本近海。左列: 4 衛星 Level2 を Cntl、8 衛星 Level3 を Test としたものの、右列: 4 衛星 Level2 を Cntl、4 衛星 Level3 を Test としたものの。

竹内仁, 高野洋雄, 山根彩子, 松枝聡子, 板倉太子, 宇都宮忠吉, 金子秀毅, 長屋保幸, 2012: 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望. 測候時報, 79, S25-58.

4.7 高潮モデル

現行の日本域高潮モデル、アジア域高潮 EPS は共に、MSM や GSM 等大気モデルの解析・予測の風・気圧場で駆動するが、台風中心付近には台風予報に基づく台風ボーガス手法で作成したパラメトリックな風・気圧場を埋め込んでいる(気象庁 2024)。この際、大気モデル中の台風予測位置と台風予報での台風位置が大きく異なる場合には、あたかも台風が二つ存在するような気象場になることが起こり得る。これは予報時間が先になるほど起こりやすく、予報作業に支障をきたすことが以前から指摘されていた。これを避けるために vortex relocation(Kurihara et al. 1993, 1995) と呼ばれる手法の利用を検討している。この手法では、大気モデルの風・気圧場に対してフィルタ処理を適用して台風成分と環境場に分離し、環境場に対して台風ボーガスを埋め込むことで、上述のような台風が二つ存在する状況を防ぐことができる。

vortex relocation について、まずは 2026 年にアジア域高潮 EPS へ、次期 NAPS 移行後に日本域高潮モデルへと、段階的に導入することを計画している。また、この手法は台風ボーガスを用いている波浪モデルへの適用も可能であり、将来的には高潮モデル・波浪モデルで台風ボーガス手法を統一していくことを計画している。2025 年はアジア域高潮 EPS に導入することを念頭に vortex relocation の開発を継続し、リアルタイムでの実行試験や過去実験による長期検証を実施した。

まず、vortex relocation 導入前後での風速場の比較を示す。図 4.7.1 は、令和 6 年台風第 18 号時において、GSM の予測結果に台風ボーガスを埋め込んだ風速場の、現行アジア域高潮 EPS と vortex relocation 導入版との比較である(アジア域高潮 EPS のメンバー構成については気象庁(2023)を参照。以下、GSM を外力とするメンバーを決定論予報という)。現行アジア域高潮 EPS (左図) では、東シナ海に台風ボーガスによる強風域があるが、朝鮮半島付近にも GSM が予測した台風に伴う強風域が残っている。一方、vortex relocation 導入版(右図)では、朝鮮半島付近の強風域が除去されていることが分かる。図 4.7.2 は、山口県長府における潮位偏差の予測値と観測値の時系列を表している。現行アジア域高潮 EPS (青線) では、朝鮮半島付近の強風域に伴い、予報時間後半に不自然な潮位偏差のピークが見られる一方、vortex relocation 導入版(赤線)では、潮位偏差の高まりが緩和されていることが分かる。

次に、過去の長期計算による統計検証の結果を示す。図 4.7.3 は、現行アジア域高潮 EPS と vortex relocation 導入版との、内湾地点における 5 日目予報の潮位偏差の散布図比較である。現行アジア域高潮 EPS で見られていた過大評価傾向の一部が、vortex relocation 導入版では改善していることが分かる(図中赤丸)。検証ス

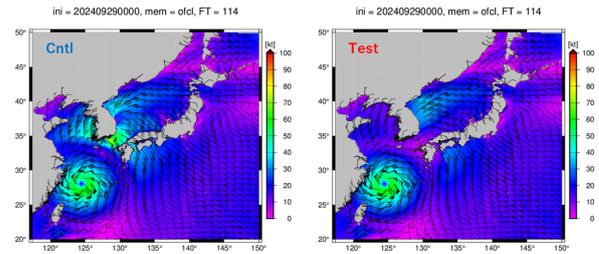


図 4.7.1 2024 年 9 月 29 日 00UTC 初期値の FT=114 における風分布。Cntl (左図) は現行アジア域高潮 EPS、Test (右図) は vortex relocation 導入版の決定論予報。カラーは風速 [kt]、矢羽は風向・風速を表す。

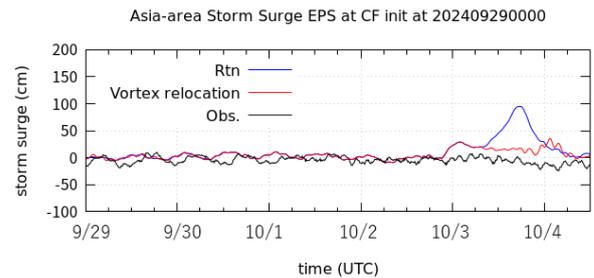


図 4.7.2 2024 年 9 月 29 日 00UTC 初期値の山口県長府における潮位偏差 [cm] 時系列。青線は現行アジア域高潮 EPS、赤線は vortex relocation 導入版の決定論予報。黒線は観測値。

コア(図 4.7.4)で見ると、5 日目予報ではわずかながら空振り率の改善がみられる。

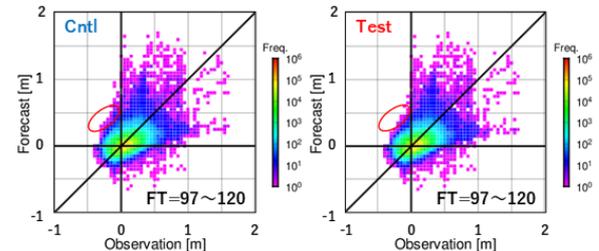


図 4.7.3 潮位偏差の散布図。Cntl (左図) は現行アジア域高潮 EPS、Test (右図) は vortex relocation 導入版の検証結果。統計期間は 2022~2024 年の台風事例。国内約 200 地点の潮位観測点(気象庁ほか、港湾局や海上保安庁、国土地理院が運用)の観測値を利用し、3 時間ごとの最大値で検証したもの。横軸は観測値、縦軸は予測値 [m]。FT=97~120 が対象。

一方、vortex relocation を適用しただけでは、精度が悪化する場合があることが分かっている。図 4.7.5 は、令和 5 年台風第 6 号時における、台風ボーガスを埋め込んだ風速場の、現行アジア域高潮 EPS と vortex relocation 導入版との比較である(図中、朝鮮半島付近の強風域が台風第 6 号によるもの)。この事例では、台風ボーガスと GSM とで台風位置の大きな違いはなかった。しかしながら、ルーチン版に比べて vortex relocation 導入版の方が台風第 6 号に伴う強風域が小さい、すなわ

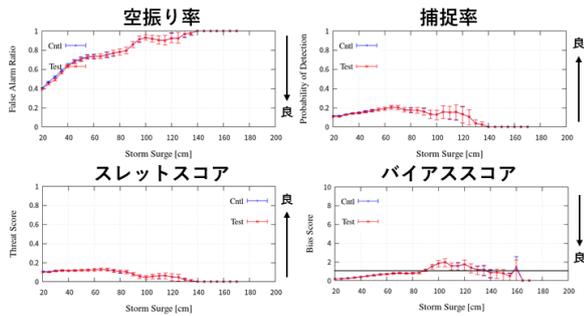


図 4.7.4 潮位偏差の検証スコア。Cntl (青線) は現行アジア域高潮 EPS、Test (赤線) は vortex relocation 導入版の検証結果。エラーバーは 95% の信頼区間を示す。統計期間と使用した観測データは図 4.7.3 と同じ。

ち台風周辺の風が弱いことが分かる。長府の潮位偏差時系列 (図 4.7.6) を見ると、これを反映して、vortex relocation 導入版は観測値に比べて過小評価が目立つ時間帯があることが分かる。これは、現行台風ボーガスにおける風分布の推定手法には、台風周辺域で弱風バイアス傾向があることに由来している。現行アジア域高潮 EPS では、GSM と台風ボーガスの風分布を加重平均するため (台風から離れるにつれ GSM の重みが大きくなる)、台風周辺域では GSM の風がある程度考慮されるが、vortex relocation 導入版では、GSM の風は除去されるため、台風周辺域における台風ボーガスの弱風バイアス傾向が反映されてしまう。

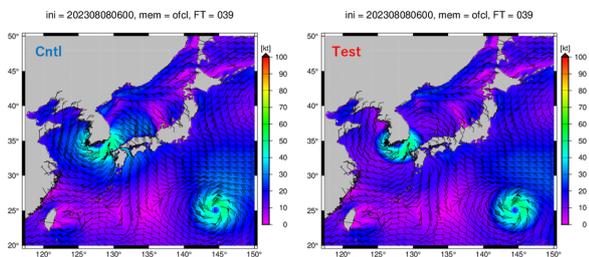


図 4.7.5 2023 年 8 月 8 日 06UTC 初期値の FT=39 における風分布。Cntl (左図) は現行アジア域高潮 EPS、Test (右図) は vortex relocation 導入版による結果。カラーは風速 [kt]、矢羽は風向・風速を表す。

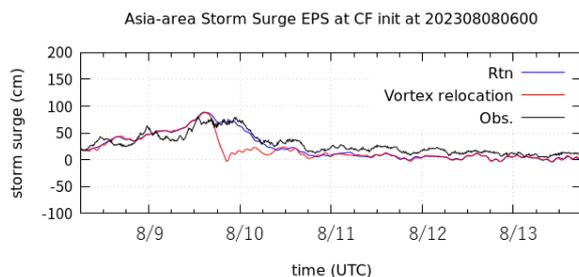


図 4.7.6 2023 年 8 月 8 日 06UTC 初期値の山口県長府における潮位偏差 [cm] 時系列。青線は現行アジア域高潮 EPS、赤線は vortex relocation 導入版による結果。黒線は観測値。

上記の問題を解決するため、台風ボーガスの風分布の推定手法の見直しを進めている。現行台風ボーガス手法では、風分布の対称成分を藤田の式 (Fujita 1952) と傾度風関係式から推定し、更に移動速度の影響を宮崎の式 (Miyazaki et al. 1961a,b) で評価・加算することで非対称性を表現している。この手法では台風中心付近と台風周辺域における風の表現の精度を両立させるのが難しいことが分かっている。そこで風分布の対称成分を求める手法として、Chavas et al. (2015) を参考に、台風の上昇流域 (inner region) と下降流域 (outer region) の絶対角運動量分布を 2 つの異なる物理モデルで記述し、両者を滑らかに繋ぐことで全体の分布を得る手法 (以下、CLE15 という) の導入を検討している。

また、台風の移動速度の影響の求め方も変更する方針である。現行の宮崎の式では、台風の移動速度の影響は台風中心から離れるにつれ指数関数的に減少していくと仮定している。この代わりに手法として、Lin and Chavas (2012) が提案した手法 (以下、LC12 という) の導入を検討している。LC12 は、台風の移動速度に対し、地表面との摩擦の影響を考慮して一定の減衰係数を乗じ、かつ台風中心に向かって一定の角度で吹き込ませることでその影響を評価する手法である。また、宮崎の式とは違い、台風領域内で移動速度の影響は一定であると仮定する (Lin and Chavas (2012) も、台風中心からの距離に応じて移動速度の影響が変化することを報告しているが、その変化は小さいため、簡易的に一定値にすることを提案している)。

CLE15 と LC12 を組み合わせることで、より台風予報と整合する風分布が作成される。図 4.7.7 は 2023 年 8 月 8 日 06UTC 初期値の、FT=0 における台風ボーガスの風速プロファイルを示している。現行手法による分布 (青線) と CLE15・LC12 による分布 (赤線) を比較すると、CLE15・LC12 による分布では台風予報の 30 kt 半径・50 kt 半径との整合をとりながら、台風周辺域における弱風バイアスが改善していることが分かる。

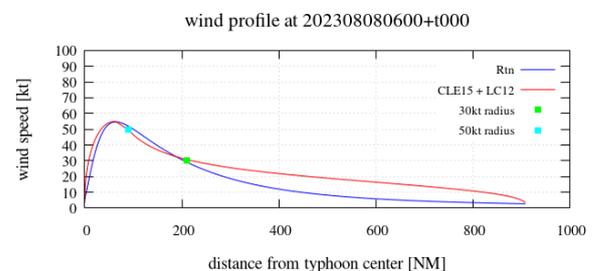


図 4.7.7 2023 年 8 月 8 日 06UTC 初期値の FT=0 における台風ボーガスの風速プロファイル。青線は現行台風ボーガス、赤線は CLE15 と LC12 に基づく風速プロファイル、青点 (緑点) は台風予報による 50(30) kt 半径を表す。横軸は台風中心からの距離 [NM]、縦軸は風速 [kt] を表す。

台風ボーガス手法に関する以上の変更は、2026 年に

アジア域高潮 EPS に導入する計画である。今後は詳細な影響評価を行った後、導入に向けた準備を進める方針である。また、日本域高潮モデルや波浪モデルへの導入に向けた開発も順次進めていく。

参考文献

- Chavas, D. R., N. Lin, and K. Emanuel, 2015: A Model for the Complete Radial Structure of the Tropical Cyclone Wind Field. Part I: Comparison with Observed Structure. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3647–3662.
- Fujita, T., 1952: Pressure distribution within typhoon. *Geophys. Mag.*, **23**, 437–451.
- 気象庁, 2023: 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.
- 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.
- Lin, N. and D. Chavas, 2012: On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling. *J. Geophys. Res.*, **117**, D09 120.
- Miyazaki, M., T. Ueno, and S. Unoki, 1961a: Theoretical investigations of typhoon surges along the Japanese coast. 気象庁 英文海洋報告, 気象庁, **13**, 51–75.
- Miyazaki, M., T. Ueno, and S. Unoki, 1961b: Theoretical investigations of typhoon surges along the Japanese coast (II). 気象庁 英文海洋報告, 気象庁, **13**, 100–117.
- 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.

4.8 気候データ同化システムの観測データ利用拡充

4.8.1 はじめに

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) は気象庁第2次長期再解析 (JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis; 古林ほか 2015) の後継として気象庁が実施した最新の全球大気再解析である。JRA-3Q の過去期間の計算は 2022 年 11 月に完了し、季節アンサンブル予報システム等の数値予報モデルの開発及び精度評価、地球温暖化等の気候監視や異常気象分析等の各種業務で利用されている。また、2021 年 10 月からは、JRA-3Q 版気候データ同化システム（以下、気候データ同化システムと呼ぶ）の準リアルタイム運用を行っている。

気候データ同化システムについては、2026 年 1 月に観測データの利用拡充を行う予定である。本節では、本変更の概要を説明する。

4.8.2 観測データ利用拡充の概要

解析値の精度を維持することを目的として、全球解析に導入された新規観測データを随時、気候データ同化システムにも導入している。今回、導入対象とした新規観測データは、Metop-C 衛星の GNSS 掩蔽観測、欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT) が処理した Metop-B・C 衛星の極域大気追跡風 (AMV) 観測である。なお、観測データ数の非常に多い COSMIC-2 衛星の GNSS 掩蔽観測の導入も検討したが、実験の結果、解析値の長期間の均質性に影響を及ぼす恐れがあることが判明したため、導入を見送ることとした。

GNSS 掩蔽観測の品質管理について、全球解析では以下の変更が行われている。（詳細は第 3.6 節を参照）

1. 観測誤差膨張の変更
2. 観測誤差鉛直プロファイルの調整
3. Metop 衛星観測データの利用下限高度の緩和

このうち、1 は COSMIC-2 衛星観測データの追加により GNSS 掩蔽観測の同化利用数が大幅に増加することを踏まえて導入されたものであることから気候データ同化システムには適用せず、2 と 3 のみを適用することとした。

4.8.3 影響評価実験

本変更による影響を調査するため、2024 年 7 月 10 日～2024 年 9 月 11 日を対象としてインパクト実験を行った。以下、2025 年 9 月時点の気候データ同化システムによる実験を CNTL、CNTL に新規観測データを同化した実験を TEST と呼ぶ。また、参考のため、TEST に COSMIC-2 衛星の GNSS 掩蔽観測を同化した実験 (TEST2) の結果も示す。

図 4.8.1 は全球のラジオゾンデ気温観測について、観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の CNTL に対

する変化率、及び O-B 及び観測値と解析値の差 (O-A) の平均を示したものである。TEST では、O-B の標準偏差の変化率は 0 に近く、また O-B 及び O-A の平均も CNTL と比べてほとんど変わらないことから、本変更を適用しても均質性が保たれていると言える。一方、TEST2 では、O-B の標準偏差が大きく減少しており、また O-B 及び O-A の平均も 0 に近づいていることから、精度が向上していると言えるが、O-B 及び O-A の平均が CNTL と比べて大きく変わっており、均質性に影響を与える恐れがある。

図 4.8.2～図 4.8.3 は 2024 年 8 月における TEST と CNTL の月平均値の差、2024 年 8 月における TEST2 と CNTL の月平均値の差、及び平年値期間 (1991 年～2020 年) における 8 月の JRA-3Q と JRA-55 の月平均値の差の二乗平均平方根 (RMS)、図 4.8.4 は 2024 年 8 月における TEST と CNTL の東西平均した月平均気温の差、2024 年 8 月における TEST2 と CNTL の東西平均した月平均気温の差、及び平年値期間における 8 月の JRA-3Q と JRA-55 の東西平均した月平均気温の差の RMS である。TEST と CNTL の差は JRA-3Q と JRA-55 の差の RMS よりも十分小さくなっており、循環場への影響は小さいことが分かる。このことから、解析値の長期間の均質性への影響は小さいと言える。一方、TEST2 と CNTL の差は 200hPa 高度や 200hPa 速度ポテンシャル等の要素で大きくなっており、循環場に影響を与える恐れがある。以上のことから、COSMIC-2 衛星の GNSS 掩蔽観測の導入は見送ることとした。

参考文献

- 古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌己, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66–115.
- 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. Tokuhiro, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109.

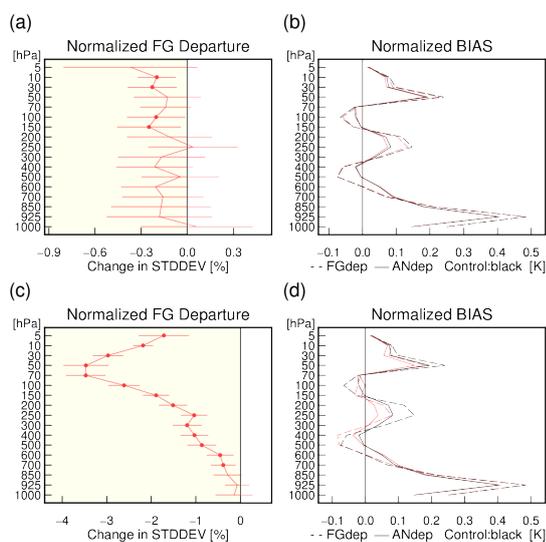


図 4.8.1 (a) 観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の TEST の CNTL に対する変化率 [%]、(b)O-B の平均 (破線) 及び観測値と解析値の差 (O-A) の平均 (実線) で、黒が CNTL、赤が TEST、(c)(a) と同じ。ただし、TEST ではなく TEST2 についてのもの、(d)(b) と同じ。ただし、TEST ではなく TEST2 についてのもの。全球のラジオゾンデ気温観測についての統計で、縦軸は気圧高度 (hPa) を表す。標準偏差の図のエラーバーは 95% 信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

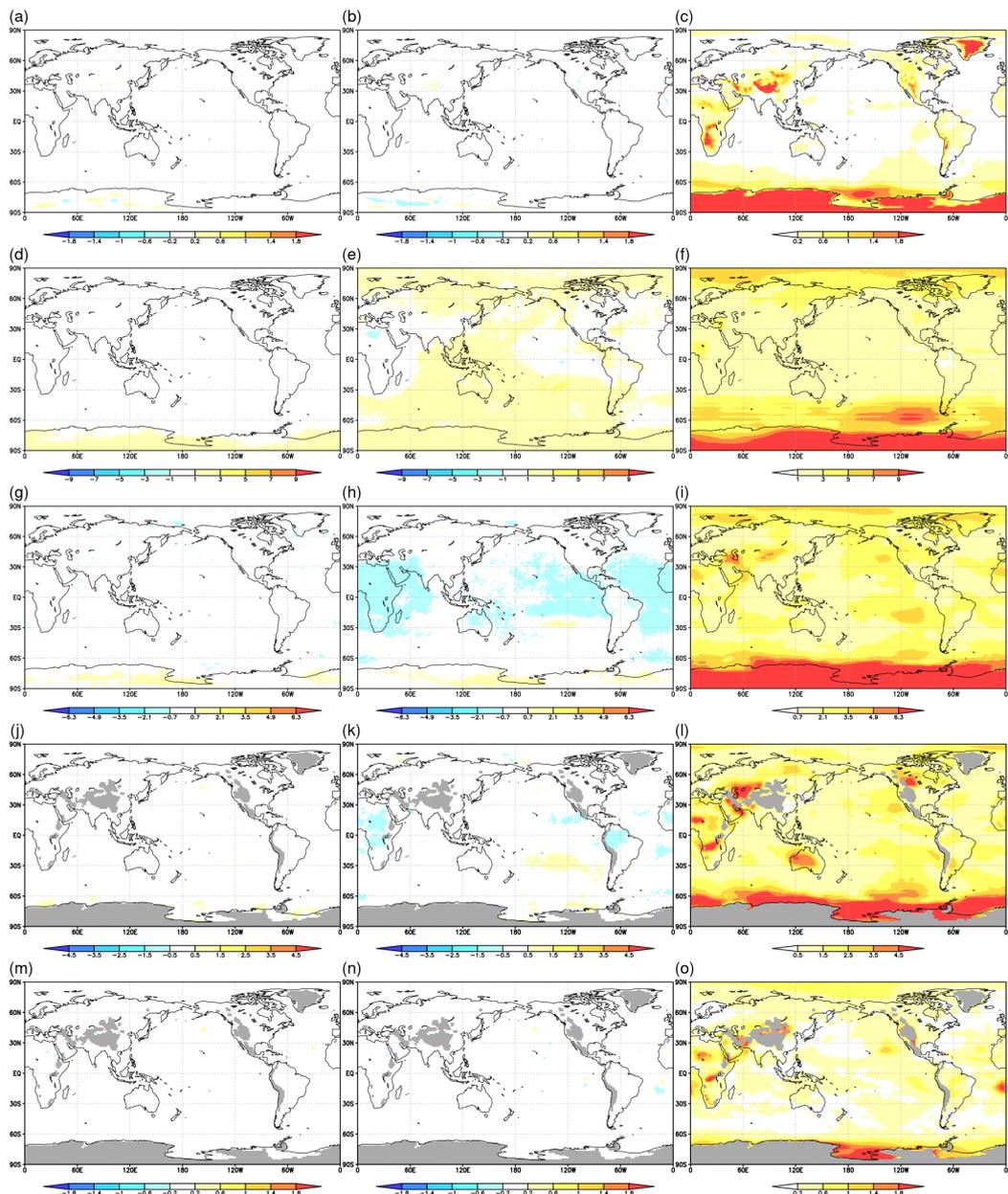


図 4.8.2 (a, d, g, j, m)2024 年 8 月における TEST と CNTL の月平均値の差、(b, e, h, k, n)2024 年 8 月における TEST2 と CNTL の月平均値の差、(c, f, i, l, o) 平年値期間における 8 月の JRA-3Q と JRA-55 の月平均値の差の RMS。(a, b, c) 海面気圧 [hPa]、(d, e, f)200hPa 高度 [gpm]、(g, h, i)500hPa 高度 [gpm]、(j, k, l)850hPa 高度 [gpm]、(m, n, o)850hPa 気温 [$^{\circ}$ C]。

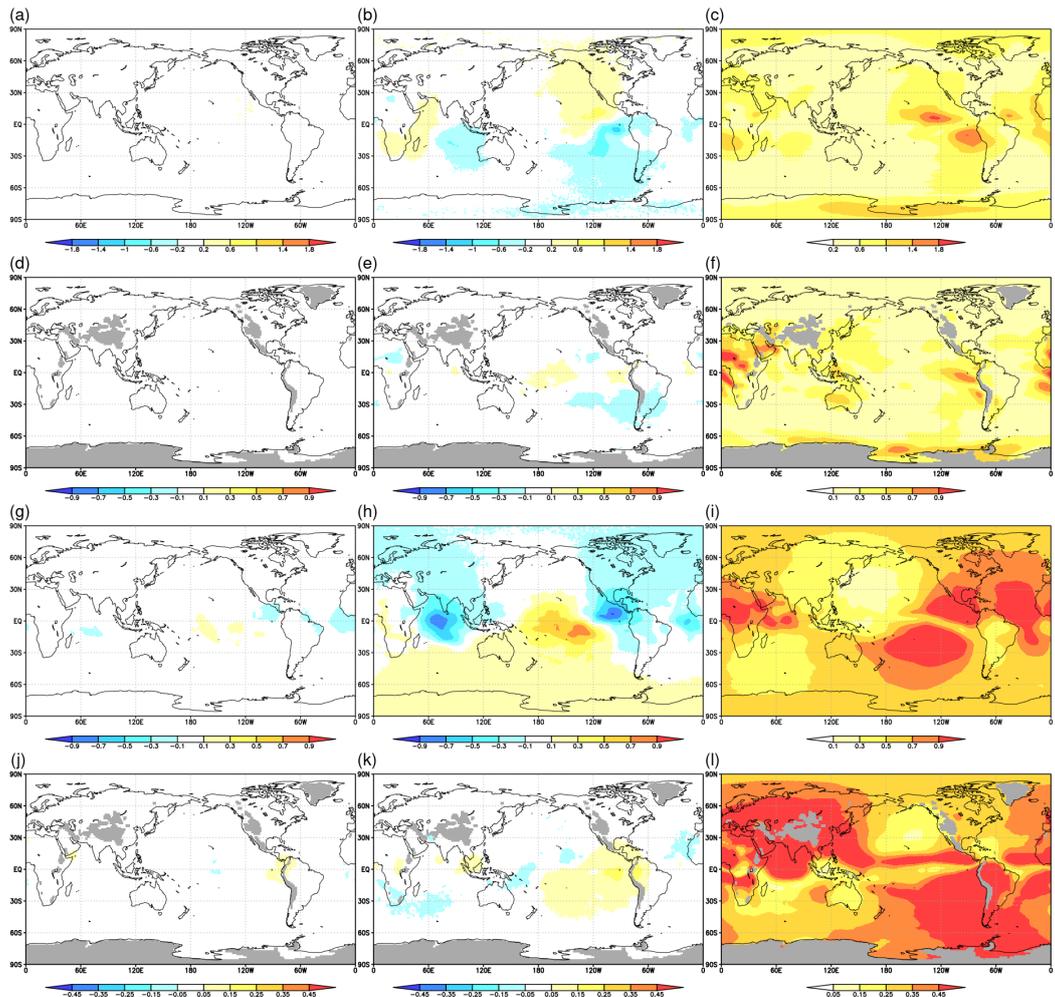


図 4.8.3 (a, d, g, j)2024 年 8 月における TEST と CNTL の月平均値の差、(b, e, h, k)2024 年 8 月における TEST2 と CNTL の月平均値の差、(c, f, i, l) 平年値期間における 8 月の JRA-3Q と JRA-55 の月平均値の差の RMS。(a, b, c)200hPa 流線関数 [$\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$]、(d, e, f)850hPa 流線関数 [$\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$]、(g, h, i)200hPa 速度ポテンシャル [$\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$]、(j, k, l)850hPa 速度ポテンシャル [$\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$]。

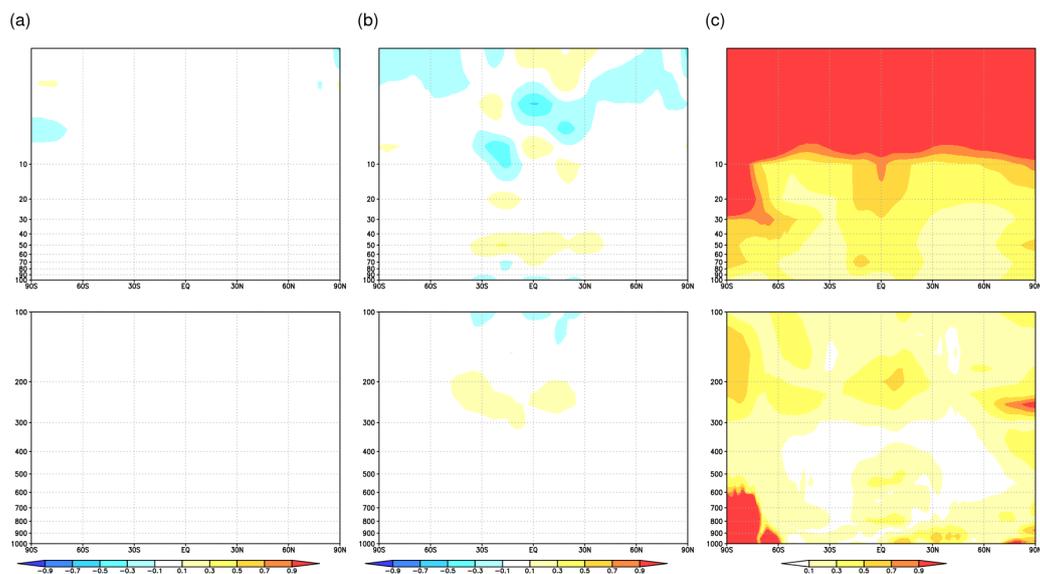


図 4.8.4 (a)2024 年 8 月における TEST と CNTL の東西平均した月平均気温 [$^{\circ}\text{C}$] の差、(b)2024 年 8 月における TEST2 と CNTL の東西平均した月平均気温 [$^{\circ}\text{C}$] の差、(c) 平年値期間における 8 月の JRA-3Q と JRA-55 の東西平均した月平均気温 [$^{\circ}\text{C}$] の差の RMS。縦軸は気圧高度 [hPa] を表す。

第5章 成果発表

5.1 論文・報告

2025年1月から12月までに掲載された、数値予報開発センターの職員が執筆した論文(共著も含む)を示す。

5.1.1 論文(査読有)

- Baba, Y. and M. Ujiie, Evaluation of JMA-GSM Typhoon Forecasts Using a New Spectral Cumulus Parameterization in Prapiroon (2018) and Hagibis (2019), *SOLA*, 21, 388-396, <https://doi.org/10.2151/sola.2025-047>.
- Kondo, M., P. K. Patra, J. G. Canadell, P. Ciais, R. A. Houghton, A. Ito, C. S. Deshmukh, T. Kumagai, X. Luo, U. Mishra, A. K. Jain, W. Li, G. Koren, S. Sitch, B. Poulter, H. Tian, A. Bastos, R. Lauerwald, J. A. Rosentreter, N. Chandra, T. Saeki, M. Saunois, I. T. Lujikx, T. Maki, T. Nakamura, K. Hirabayashi, T. Hirano, and N. Saigusa, The greenhouse gas budget of Southeast Asia for 2000-2019 and passways toward climate neutrality, *Global Biogeochemical Cycles*, 39, e2024GB008256, <https://doi.org/10.1029/2024GB008256>.
- Matsukawa, C., J. M. Rodriguez, and S. F. Milton, Process-based diagnostics using atmospheric budget analysis and nudging technique to identify sources of model systematic errors, *Weather and Climate Dynamics*, 6, 1539-1564, <https://doi.org/10.5194/wcd-6-1539-2025>.
- Nakamura, H., S. Kobayashi, M. A. Wanzala, F. Adloff, L. Cheng, A. Cobb, D. Dee, A. El Akkraoui, M. Fujiwara, H. Hersbach, H. Naoe, S. I. Rani, N. Rayner, A. Simmons, L. Slivinski, T. Tanaka, P. Thorne, C. Yang, Y. Yin, A. S. Ayinde, A. Banerjee, M. G. Bosilovich, L. C. M. Buela, B. Dong, S. Fukui, N. Hirose, H. Ikeuchi, N. Krakauer, A. Lenouo, B. Niraula, C. L. G. Oikonomou, S. Sekizawa, N. Sharma, A. Yamazaki, and T. Yoshida, Toward future reanalyses that meet evolving needs in science, public services, policymaking, and socioeconomic activity, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 106, E1445-E1453, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-25-0126.1>.
- Naoe, H., C. Kobayashi, S. Kobayashi, Y. Kosaka, and K. Shibata, Representation of quasi-biennial oscillation in JRA-3Q, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 103, 233-255, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2025-012>.
- Rancic, M., R. J. Purser, M. S. F. V. De Pondecá, T. Lei, and S. Yokota, Computational performance of the multigrid beta filter (MGBF) for covariance synthesis, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-24-0136.1>, in press.
- Yokota, S., J. R. Carley, S. Liu, C. Thomas, and D. T. Kleist, Development and case study evaluation of filtered ensemble-based tangent linear model for the operational EnVar data assimilation system, *Monthly Weather Review*, 153, 1451-1466, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-24-0134.1>.
- Yokota, S., M. Rancic, T. Lei, R. J. Purser, M. S. F. V. De Pondecá, Multigrid beta filter for faster computation of ensemble covariance localization, *Geoscientific Model Development*, 18, 7815-7829, <https://doi.org/10.5194/gmd-18-7815-2025>.

5.1.2 報告

- Adachi, Y., K. Ochi, S. Hirahara, Y. Kubo, and R. Sekiguchi, A Simplified Lake Model for Seasonal Prediction, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 4-47, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.
- Kawaguchi, M., T. Kinami, Y. Kuroki, N. Shimokawa, K. Sutou, H. Yonehara, and H. Yoshimura, Upgrade of JMA's Operational Global Numerical Weather Prediction System, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 3-32, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.

- Kubo, Y., K. Ochi, J. Chiba, T. Yoshida, T. Takakura, R. Sekiguchi, Y. Adachi, M. Deushi, and S. Hirahara, Upgrade of the JMA Sub-Seasonal and Seasonal Ensemble Prediction System (JMA/MRI-CPS4), *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 1-14, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.
- Ota, Y., Introduction of Stochastic Humidity Profile for Convective parametrization (SHPC) method in JMA's Global Ensemble Prediction System, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 3-34, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.
- Ota, Y., K. Ochi, J. Chiba, H. Oashi, T. Takakura, Upgrade of JMA's Global Ensemble Prediction System, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 3-36, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.
- Saito, R., and R. Toguchi, Updating Surface Humidity Observation Error in JMA's Regional NWP Systems, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 6-55, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.
- Shimizu, H., A. Ando, N. Kamekawa, K. Kondo, N. Kusano, H. Murata, M. Toyokawa, and T. Urata, Update of the Radiative Transfer Model to RTTOV-13 in JMA's NWP Systems, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 6-53, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.
- Urata, T., and H. Shimizu, Operational Use of AMSU-A and ATMS Window Channels in JMA's NWP Systems, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 55, 3-38, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17531927>.
- 山崎哲, 藤井陽介, 太田行哉, 岡本幸三, 吉村圭, 田上雅浩, 三好建正, 第8回 WMO 観測インパクトワークショップ参加報告, *天気*, 72, 5-13.

5.2 国際会議・会合

2025年1月から12月まで数値予報開発センターの職員が参加した国際会議¹を掲載する。会議・会合名、主催、開催期間、開催形式、発表者／参加者²、発表題名³、発表日⁴、発表形式の順で示している。

- 米国気象学会年次会合 2025 (米国気象学会、1/12-1/16 ハイブリッド)
 - － 住友雅司*、吉田拓馬、藤井陽介 (気象研究所) 「Development of a new 4DVAR Global Ocean Data Assimilation System (MOVE/MRI.COM-G4) and a new bias correction scheme in the Japan Meteorological Agency」 (1/13 ポスター)
 - － 越智健太*、足立恭将 (気象研究所)、千葉丈太郎、平原翔二 (気象研究所)、久保勇太郎、Naresh Ganeshi (気象研究所)、高谷裕平 (気象研究所) 「A Revised Snow Scheme and Its Performace in the Next Seasonal Prediction System at JMA (CPS4)」 (1/15 ポスター)
- 季節内から季節予測パネル電話会議第7回 (ECMWF、1/21 オンライン)
 - － 久保勇太郎
- WMO 現業天気予報システム専門家チーム (ET-OWFS) 会合 (WMO、2/20・5/8 オンライン、10/28-10/30 ハイブリッド)
 - － 太田洋一郎
- 国際掩蔽作業部会 (IROWG) 2回掩蔽データインパクト実験ワークショップ (CGMS/IROWG、2/25-2/27 ハイブリッド)
 - － 村上康隆 「Preliminary results from studying impact of ROMEX data on JMA Global NWP System」 (2/26 口頭)
- 国際海上風科学チーム (IOVWST) 会合 2025 (IOVWST、5/5-5/8 ハイブリッド)
 - － 井岡佑介 「Data denial experiments of scatterometer winds in the JMA's NWP Systems」 (5/6 ポスター)
- 国際鉛直探査計研究会議 (ITSC) 第25回会合 (CGMS/ITWG、5/8-5/14 対面)
 - － 草野直人*、Chris Burrows (ECMWF)、Guillaume Deschamps (EUMETSAT)、Pierre Dussarrat (EUMETSAT) 「Assimilation of GHIRS on-board FY-4B in the ECMWF IFS」 (5/8 口頭)
 - － 浦田知哉 「Preliminary studies for the assimilation of Himawari-10/GHMS in the JMA's NWP systems」 (5/8 ポスター)
 - － 清水宏幸*、村田英彦、可知美佐子 (JAXA) 「Development for better utilization of AMSR3 humidity sounding channels in JMA's global NWP system」 (5/12 ポスター)
 - － 村田英彦*、林昌宏、秋元銀河、豊川将一、當眞嗣淳、浦田知哉、西沢佳祐、清水宏幸 「Recent upgrades and progress of satellite radiance data assimilation at JMA」 (5/13 ポスター)
- 国際風ワークショップ (IWW) 第17回会合 (CGMS/IWWG、5/19-5/22 オンライン)
 - － 野中健一*、井岡佑介 「Recent Status of Satellite Derived Wind Usage in JMA's NWP Systems」 (5/21 口頭)
- 国際地表面作業部会 (IESWG) 第6回会合 (CGMS/IESWG、6/11-6/13 ハイブリッド)
 - － 越智健太*、太田洋一郎、國嶋雄一 「Recent and ongoing developments in global land data assimilation at JMA」 (6/11 口頭)
- 欧州気象衛星開発機構気象衛星会議 2025 (EUMETSAT 9/15-9/19)
 - － 浦田知哉 「Preliminary studies for the assimilation of Himawari-10/GHMS in the JMA's NWP systems」 (9/16 ポスター)
 - － 浦田知哉 「Assimilation of AMSU-A and ATMS window channels in the JMA's regional NWP systems」 (9/16 ポスター)
 - － 清水宏幸*、村田英彦、可知美佐子 (JAXA) 「Development for better utilization of AMSR3 humidity sounding channels in JMA's global NWP system」 (9/16 ポスター)
- WMO 熱帯低気圧標準検証作成に関するタスクチーム (TT-TCSV) 会合 (WMO、9/19・12/1 オンライン)

¹ 略号については付録を参照。

² 共著の場合、発表者には*をつけている。

³ 会議の場合は、発表題名がないこともある。

⁴ 開催期間が1日の場合、発表日は省略している。

- 太田洋一郎
- 欧州領域モデリング会合第 47 回及び短期数値予報会合第 32 回 (EUMETNET C-SRNWP、9/22-9/25 ハイブリッド)
 - 沢田雅洋*、松林健吾、草開浩、荻原弘堯、相河卓哉、田ノ下潤一、久保伸介、藤原智貴、奥川椋介、石田凌雅、河野耕平、川田英幸、服部宏紀、松葉史剛「Development of Limited-Area NWP Systems at JMA」(9/22 ポスター)
- 数値実験作業部会 (WGNE) 第 40 回会合 (WMO、11/3-11/7 ハイブリッド)
 - 氏家将志「Center Report From JMA」(11/4 口頭)
 - 氏家将志「WGNE inter-comparison of Tropical Cyclone Track forecast 2024」(11/5 口頭)
 - 氏家将志「Km-scale NWP at JMA」(11/6 口頭)
- 2025 KIAPS 国際シンポジウム (11/10-11/12 対面)
 - 田中泰宙「Current Status and Future Directions for Operational NWP Systems at JMA」(11/10 口頭)
- 非静力学モデルに関する国際ワークショップ第 7 回 (非静力学数値モデル研究連絡会、11/17-11/19 対面)
 - 服部宏紀*、川田英幸、松葉史剛、河野耕平「Development of the JMA's Local Ensemble Prediction System」(11/17 ポスター)
 - 木村翼 (大気海洋部予報課航空予報室)、松林健吾*、荒波恒平、北村祐二 (沖縄気象台)「Strong Stability Preserving Runge-Kutta method in HE-VI and split-explicit short time step integration」(11/17 口頭)
 - 松林健吾「A pressure drag approach to enhance the coexistence of grid- and sub-grid-scale convection in the gray zone」(11/17 ポスター)
- 米国地球物理学連合秋季大会 (AGU、12/15-12/19 対面)
 - 眞木貴史* (気象研究所)、中村貴「Bias Correction Method Development for Multi-Satellite Integration in Carbon Cycle Studies」(12/19 ポスター)

5.3 国内会議・会合

2025年1月から12月まで、数値予報開発センターの職員が口頭・ポスター発表した国内会合を掲載する。会合名¹、開催期間、開催形式、発表者²、発表題名、発表日³、発表形式の順で示している。

- シンポジウム「ポスト富岳で拓くアプリケーションの未来」(3/25 ハイブリッド)
 - － 計盛正博「『ポスト富岳』時代の天気予報」(口頭)
- 日本気象学会春季大会(5/14-5/17 ハイブリッド)
 - － 米原仁*、太田行哉、井藤智史、加藤成晃、石井優大、寺内俊平、山下翔大、松林健吾、田ノ下潤一、吉田拓馬「数値予報における AI 気象モデルの利用可能性調査」(5/14 ポスター)
 - － 足立恭将* (気象研究所)、渡辺泰士 (気象研究所)、越智健太、出牛真 (気象研究所)「地表面区分格子内タイリングの省資源化策の考案」(5/14 ポスター)
 - － 田中泰宙*、太田行哉、氏家将志、太田洋一郎、荒波恒平、河野耕平、村上康隆、村田英彦「気象庁現業数値予報システムの開発進捗と計画」(5/15 口頭)
 - － 服部宏紀*、川田英幸、欠畑賢之、松葉史剛、河野耕平「開発中の気象庁局地アンサンブル予報システムの検証と評価」(5/15 口頭)
- 衛星からの温室効果ガス観測に関するワークショップ(6/9-6/12 対面)
 - － 眞木貴史* (気象研究所)、中村貴「Development of the OCO-2 inverse analysis system introducing bias correction method using independent inverse analysis」(6/9-6/11 ポスター)
- 日本海洋学会 2025 年度秋季大会(9/21-9/25 対面)
 - － 久住空広* (気象研究所)、碓氷典久 (気象研究所)、広瀬成章 (気象研究所)、浅井博明、川上雄真 (気象研究所)、青木邦弘 (気象研究所)「CPS3 予報値を駆動外力とした黒潮長期予測実験」(9/22 口頭)
- 2025 年度 JAXA 地球観測ミッション合同 PI ワークショップ(10/20-10/24 ハイブリッド)
 - － 村田英彦*、林昌宏、秋元銀河、豊川将一、當眞嗣淳、浦田友哉、西沢佳祐、清水宏幸「Utilization of water vapor, clouds and precipitation information from space-based microwave observation in JMA operational numerical weather prediction systems」(10/20 口頭)
- 第 12 回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会(10/23-11/24 ハイブリッド)
 - － 課題代表者：佐藤芳昭、発表者：河野耕平*「豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発(「富岳」政策対応利用課題:hp240222)」(10/24 ポスター)
- 日本気象学会秋季大会(11/4-11/8、ハイブリッド)
 - － 高坂裕貴*、古林慎哉、原田やよい、小林ちあき「気象庁第 3 次長期再解析(JRA-3Q)の概要」(11/4 口頭)
 - － 原田やよい*、小林ちあき、古林慎哉、高坂裕貴「JRA-3Q 長期再解析の品質上の課題について」(11/4 口頭)
 - － 古林慎哉*、高坂裕貴、門脇隆志「気象庁長期再解析の更なる改善に向けて」(11/4 口頭)
 - － 眞木貴史* (気象研究所)、中村貴「軌道上炭素観測衛星 2 号機(OCO-2)と現地観測を組み合わせた二酸化炭素収支解析」(11/6 口頭)
 - － 久保勇太郎*、越智健太、千葉丈太郎、吉田拓馬、高倉寿成、関口亮平、足立恭将 (気象研究所)「次期季節アンサンブル予報システム JMA/MRI-CPS4」(11/6 ポスター)
 - － 瀬古弘* (気象研究所)、酒井哲 (気象研究所)、横田祥「メソアンサンブル予報を用いた豪雨の相関解析(その 2)」(11/7 口頭)
 - － 横田祥*、井岡佑介、清水宏幸、河野耕平、太田行哉「気象庁局地解析で 15 分間隔の観測を同化するための手法の検討」(11/8 口頭)
 - － 松川知紘*、José M. Rodriguez (Met Office)、Sean F. Milton (University of Leeds)「収支解析と解析値緩和実験を用いた全球 NWP 予測の系統誤差の診断」(11/7 口頭)
 - － 浦田知哉*、清水宏幸「ひまわり 10 号搭載赤外サウンダ GHMS の模擬観測データを用いた同化利用に関する調査」(11/8 口頭)
- 第 15 回計算力学シンポジウム(12/2 ハイブリッド)
 - － 沢田雅洋「線状降水帯に関するシミュレーション」(口頭)

¹ 略号については付録を参照。

² 共著の場合、発表者には*をつけている。

³ 開催期間が 1 日の場合、発表日は省略している。

- 第16回気象庁数値モデル研究会（12/12 ハイブリッド）
 - － 沢田雅洋「局地モデル高解像度化開発の成果と課題」（口頭）
 - － 河野耕平「局地アンサンブル予報システムの開発の成果と課題」（口頭）

5.4 数値予報課コロキウム

表 5.4.1: 2025 年 1 月から 12 月までに開催した数値予報課コロキウム

開催日	発表者	発表表題
01 月 07 日	清水宏幸	全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの利用手法改良 (性能評価試験報告)
01 月 09 日	浦田知哉	全球解析におけるマイクロ波気温サウンダ窓チャンネル利用 (性能評価試験報告)
01 月 10 日	久保勇太郎、越智健太、千葉丈太郎、吉田拓馬 (数値予報課)、足立恭将、平原翔二 (気象研究所)	次期季節予測システム JMA/MRI-CPS4 の性能評価試験報告
01 月 16 日	川田英幸、欠畑賢之、服部宏紀、松葉史剛、河野耕平	局地アンサンブル予報システムの部内試験運用に向けた性能評価試験報告
01 月 23 日	野中健一	全球解析における EUMETSAT の Metop 極域 AMV の利用について (性能評価試験報告)
01 月 28 日	村上康隆	全球解析における GNSS 掩蔽観測データの利用拡充
01 月 28 日	清水宏幸	全球解析における放射伝達モデル RTTOV の放射伝達計算用係数等の更新
02 月 06 日	草開浩	メソ数値予報システムの更新 (業務化試験報告)
02 月 10 日	秋元銀河、西沢佳祐、岡本幸三 (気象研究所)、岡部いづみ (気象研究所)	全球解析における静止衛星ひまわりの全天放射輝度温度同化 (性能評価試験報告)
02 月 20 日	藤田友香 (立正大学大学院)	日本付近で発生するトランスパースバンドに伴う乱気流の特徴と要因 - 雲頂に現れる波状模様の有無による比較 -
03 月 13 日	松川知紘	英国気象局派遣報告 (ナッジング実験と収支解析を用いた全球大気モデルの系統誤差の診断)
03 月 14 日	清水宏幸	全球解析における観測データ利用手法の改良 (総合性能評価試験報告)
03 月 14 日	白山洋平	MSM,MEPS 大雨発生確率ガイダンスの改良
04 月 17 日	松林健吾	MSM における対流性運動量輸送スキームの開発
05 月 08 日	長谷川寛	非台風時の高潮早期注意情報の高度化に向けた調査と開発方針
05 月 13 日	久保勇太郎、越智健太、千葉丈太郎、平原幹俊、浅井博明	次期季節予測システム JMA/MRI-CPS4 業務化試験報告
06 月 19 日	清水宏幸	全球解析における観測データ利用手法の改良 (業務化試験報告)
07 月 31 日	秋元銀河、田上雅浩	メソ解析におけるひまわり AHI の CO2 バンド晴天放射輝度の同化利用
08 月 07 日	浦田知哉	メソ解析および局地解析における ATMS 気温チャンネルの利用
08 月 07 日	清水宏幸	メソ解析および局地解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダデータの陸上での利用に関する開発
08 月 21 日	吉本浩一、澤田謙	局地解析における Metop-C 土壌水分プロダクトの新規利用について
08 月 28 日	中村佑希、吉本浩一、村上康隆	メソ解析における地上 GNSS データの利用高度化 (性能評価試験報告)
08 月 28 日	村上康隆	メソ解析における Metop-C の GNSS 掩蔽データの利用について (性能評価試験報告)
09 月 12 日	中村佑希、豊川将一	メソ解析における観測データ利用手法改良およびメソ解析システムの省資源化 (総合性能評価試験報告)

開催日	発表者	発表表題
09月18日	越智健太	全球積雪深解析およびGSMの積雪過程の改良に向けた開発進捗報告
10月02日	関口亮平、高倉寿成、山口春季 (数値予報課)、出牛真(気象研究所)	全球化学輸送モデルにおけるオゾン同化手法の改良について(業務化試験報告)
10月02日	千葉丈太郎(数値予報課)、足立恭将(気象研究所)	次々期季節アンサンブル予測システム(CPS5)に向けた雲過程の開発について
10月16日	清水宏幸、浦田知哉、豊川将一、吉本浩一	局地解析における観測データ利用手法改良(総合性能評価試験報告)
10月16日	草開浩、沢田雅洋、松林健吾、田ノ下潤一、奥川椋介、清水宏幸	局地モデルの水平高解像度化(性能評価試験および総合性能評価試験)
10月20日	川田英幸、服部宏紀、松葉史剛、河野耕平	局地アンサンブル予報システムの性能評価試験報告
11月06日	松林健吾	圧力抵抗パラメタリゼーションの導入によるグレーズーン対流スキームの改良
11月13日	清水宏幸、豊川将一	メソ解析における観測データ利用手法改良およびメソ解析システムの省資源化(業務化試験報告)
12月11日	横田祥、山口純平、河野耕平	メソ解析・局地解析のアジョイントコードの領域分割依存とループ運搬依存の解消
12月11日	草開浩、沢田雅洋、松林健吾、田ノ下潤一、奥川椋介、清水宏幸、豊川将一、諸田雪江	局地数値予報システムの更新(業務化試験結果報告)
12月15日	川田英幸、服部宏紀、松葉史剛、河野耕平	局地アンサンブル予報システムの業務化試験報告

第6章 連携・共同研究

6.1 気象研究所との開発連携

2025年1月から12月までの各モデル・システムにおける連携先の研究室とその内容を報告する。順に、課題名、内容、連携先を示す。

1. **課題名** 数値予報システム（全球）の予測精度向上
 - (a) **内容** 陸面データ同化システムの開発と精度評価等に関する最新の知見の共有
連携先 全球大気海洋研究部第一研究室、気象予報研究部第三研究室、気象観測研究部第一研究室
 - (b) **内容** 機械学習手法などを用いた高精度化・低計算コスト化などのデータ同化手法の高度化に関する基礎調査
連携先 気象観測研究部第一研究室
 - (c) **内容** 誤差共分散行列の最適化による観測情報の大幅拡充を最新全球解析システムへ導入するための評価、誤差の見直しについての協力・助言
連携先 気象観測研究部第一研究室
 - (d) **内容** 観測データのインパクト評価手法についての情報共有と助言
連携先 気象観測研究部第一研究室
 - (e) **内容** 高解像度モデルに適した物理過程開発と知見の共有、大気海洋相互作用の扱いや海面フラックスの診断方法などの知見の共有。力学過程高度化・モデル高速化に関する開発の情報共有
連携先 全球大気海洋研究部第四研究室、気象予報研究部第二研究室
2. **課題名** 波浪モデルの予測の改善精度向上
 - (a) **内容** 波浪モデルの高度化に向けた技術的な助言・支援
連携先 応用気象研究部第三研究室
3. **課題名** 季節予報システムの予測精度向上
 - (a) **内容** 将来の季節予報システムの研究開発
連携先 全球大気海洋研究部（第一研究室、第二研究室、第三研究室、第四研究室、第五研究室）、気象予報研究部第二研究室、気候・環境研究部第一研究室
4. **課題名** 気候データ同化の高度化
 - (a) **内容** 第3次長期再解析（JRA-3Q）の品質評価、及び、次期長期再解析に向けた検討への協力
連携先 気候・環境研究部第一研究室、全球大気海洋研究部第一研究室
 - (b) **内容** 次期長期再解析のデータ同化技術の開発・性能評価
連携先 全球大気海洋研究部第五研究室、気象観測研究部（第一研究室、第三研究室）
5. **課題名** 海況監視予測システムの予測精度向上
 - (a) **内容** 現業 JPN システムの安定運用のためのモデル改善・更新・維持管理のための開発・助言・支援。JPN 海水予測の改善に向けたシステム改良への支援。次世代海況監視予測システムに向けた同化スキームの研究開発。海洋モデルのさらなる高速化・精緻化のための研究開発
連携先 全球大気海洋研究部（第四研究室、第五研究室）
6. **課題名** 大気化学モデル及び観測データ利用の高度化
 - (a) **内容** 大気化学に関する現業システムの維持管理や安定運用に係る取組への協力
連携先 全球大気海洋研究部（第一研究室、第三研究室）
7. **課題名** 数値予報システム（メソ、局地）の予測精度向上
 - (a) **内容** 現業システムへの適用を意識したアンサンブルデータ同化手法の研究、知見の提供
連携先 気象観測研究部第三研究室、台風・災害気象研究部第二研究室
8. **課題名** 数値予報システム（メソアンサンブル）の予測精度向上、数値予報システム（局地アンサンブル）の開発と改良
 - (a) **内容** 初期値摂動、境界摂動、物理過程摂動の開発とアンサンブルのプロダクトの利用等に関する助言と最先端の知見の共有
連携先 気象観測研究部第三研究室、台風・災害気象研究部第二研究室
9. **課題名** 数値予報システム（局地）の予測精度向上
 - (a) **内容** 高分解能化への対応として「グレーゾーン」問題点の解決につながる最新の知見の共有

連携先 気象予報研究部（第一研究室、第二研究室）

- (a) **内容** キロメートル以下の高解像度局地モデルの開発に資する研究や集中豪雨のメカニズム解明に関する研究と知見の共有

連携先 気象予報研究部第一研究室

- (a) **内容** 接地境界層における陸面から大気への熱・水の乱流輸送過程の高度化に関する知見の共有

連携先 気象予報研究部（第一研究室、第二研究室）

10. **課題名** 数値予報システム（全球、メソ、局地）の予測精度向上

- (a) **内容** 高頻度・高解像度観測データの有効利用に向けた観測誤差相関（時間・空間・衛星チャンネル間）の取り扱い手法などの研究と助言

連携先 気象観測研究部（第一研究室、第三研究室）

- (b) **内容** 雲・降水域や陸域衛星輝度温度データ、ハイパースペクトル赤外サウンダデータ、静止衛星 CO2 バンド輝度温度データ、高解像度 AMV や衛星搭載レーダー・ライダー等、偏波パラメータ等のレーダーデータ、地上設置型ライダー等、観測ビッグデータの最新現業システムを用いたインパクト実験を含む観測データの効果的・効率的な利用の研究と知見の共有

連携先 気象観測研究部（第一研究室、第二研究室、第三研究室）

6.2 気象衛星センターとの共同研究

1. **課題名** 大気追跡風の精度向上へ向けての調査

内容 : 3D-Wind の調査

連携先 解析課

6.3 共同研究一覧

表 6.3.1: 開発センター職員が参加している共同研究（2025 年 12 月現在）
開発センター以外に所属する職員も含まれている。

研究名称	研究種別	期間 (年度)	共同研究機関	開発センター職員の研究分担等
日本域 4 次元高機能気象データの整備 及び気象データの利活用研究の推進	JST 共創の場形 成支援プログラム (共同研究契約)	2021-2025	東京大学	共同研究者: 根本昇 長谷川昌樹 沢田雅洋 田ノ下潤一 石田凌雅 河野耕平 横田祥 清水宏幸 山口純平 川田英幸 浦田知哉 下河邊明 神代剛 高橋由実子 林田和大 太田洋一郎 古林慎哉 高坂裕貴
アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化とデータ 同化手法の開発	東京大学大気海 洋研究所 (AORI) 「一般共同研究」	2025	東京大学	研究代表者: 下河邊明 共同研究者: 太田洋一郎 木南哲平 神代剛 金浜貴史 下川直史 高橋由実子 黒木志洸 林田和大 須藤康平
物理学的バイアス補正に基づく台風進 路予報改善	科研費基盤研究 (B)	2023-2026	京都大学 琉球大学 気象研究所	研究協力者: 氏家将志 沢田雅洋
対流圏ジェット変動の季節予測可能性 に対する熱帯と中緯度海洋からの影響 評価	科研費基盤研究 (C)	2024-2026	気象研究所	研究協力者: 山口春季
不連続を包含するデータ同化手法の創 出と大気海洋生態系結合過程の再現	科研費学術変革領 域研究 (A)	2024-2028	京都大学 海洋研究開発機構 九州大学 気象研究所	研究協力者: 小泉耕 高坂裕貴 住友雅司 吉田拓馬

研究名称	研究種別	期間(年度)	共同研究機関	開発センター職員の研究分担等
黒潮大蛇行と海洋極端現象の過去・現在・未来：予測可能性と海洋生物資源への影響	科研費学術変革領域研究(A)	2024-2028	気象研究所 理化学研究所 水産研究・教育機構 海洋研究開発機構 東京大学	研究協力者： 浅井博明
変調するモンスーンと日本周辺における極端気象の予測可能性	科研費学術変革領域研究(A)	2024-2028	北海道大学 海洋研究開発機構 気象研究所 東京都立大学 東京大学 筑波大学	研究協力者： 越智健太
SWOT衛星による高解像度海洋予測の実現とその台風等大気変動への影響の解明	科研費基盤研究(B)	2025-2028	気象研究所 海洋研究開発機構 北海道大学 京都大学	研究協力者： 浅井博明
解析誤差と成長モードを考慮したアンサンブル予測による線状降水帯の高精度確率予測	科研費基盤研究(C)	2023-2025	気象研究所	研究協力者： 横田祥 川田英幸 服部宏紀
積雲対流スキーム改良を通じた気象庁全球スペクトルモデルGSMの予測精度向上に関する研究	海洋研究開発機構	2024-2025	海洋研究開発機構	共同研究者： 計盛正博 田中泰宙 笹川悠 氏家将志
台風防災に資する気象庁全球スペクトルモデルGSMの改良に関する研究	共同研究契約	2025-2026	京都大学	共同研究者： 田中泰宙 中川雅之 萩谷聡 氏家将志 下河邊明 太田洋一郎
高速性と移植性を両立する数値予報モデルの開発研究	共同研究契約	2024-2026	理化学研究所	共同研究者： 田中泰宙 中川雅之 萩谷聡 森安聡嗣 沢田雅洋 田ノ下潤一 石田凌雅
グローバル河川モデルと地球システムモデルの結合による気象・気候予測の高度化	鹿島財団国際共同研究援助	2025-2026	生産技術研究所 芝浦工業大学 筑波大学	共同研究者： 草開浩

研究名称	研究種別	期間(年度)	共同研究機関	開発センター職員の研究分担等
宇宙からのマイクロ波放射観測から得られる水蒸気、雲、降水に関する情報の気象庁現業数値予報システムでの利用研究	第4回地球観測研究公募	2025-2027	宇宙航空研究開発機構	研究代表者： 村田英彦 研究協力者： 林昌宏 秋元銀河 豊川将一 當眞嗣淳 浦田知哉 西沢佳祐 清水宏幸
集中豪雨の予測精度向上に資する晴天放射輝度のキャラクターゼーション	「富岳」政策対応枠	2023-2025	千葉大学	田中泰宙 根本昇 中川雅之 村田英彦 林昌宏 秋元銀河
二重偏波気象ドップラーレーダーを用いた動径風の品質管理法と観測誤差推定法の開発	「富岳」政策対応枠	2023-2025	防災科学技術研究所	田中泰宙 根本昇 中川雅之 村上康隆 石井恭介
深層学習を使った気象場ダウンスケーリングと大気環境予測	科研費基盤研究(B)	2021-2025	気象研究所	研究協力者： 藤兼典史 井上卓也 山下翔大 田中一輝

6.4 「富岳」政策対応枠「豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発」

6.4.1 はじめに

台風や線状降水帯による災害は近年、毎年のように発生している。このような災害の被害軽減を図るためには予測情報の精度向上が必要であり、その予測情報の基盤である数値予報の精度向上は喫緊の課題である。気象庁は、平成30年（2018年）に数値予報技術開発重点計画を策定し、豪雨防災や台風防災に重点的に取り組んでいる。この取り組みの更なる加速化を図るため、「富岳」政策対応枠¹に「豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発」とした課題で応募、令和3年度（2021年度）より採択されている。

本課題においては、豪雨防災課題として局地アンサンブル予報システムの方向性評価、台風防災課題として高解像度全球数値予報モデルの開発を、2021年度より実施している。また、2022年度からは豪雨防災課題に水平解像度1kmの局地モデルのリアルタイム実行（計算領域は西日本領域）などの課題を加えた。2023年度は、このリアルタイム実行の仕様を拡張（計算領域を全国領域に拡充）するとともに、観測データの利用高度化に向けた大学や研究機関との3年計画での共同研究を開始した。2024年度は、局地モデルのリアルタイム実行の実行頻度を1日4回（2023年度は1日2回）に拡充して、2025年度末の現業導入に向けた準備を進めた。そして2025年度は、これまでの開発成果を反映し、局地アンサンブル予報システムのリアルタイム実行を実施し、2025年度末の現業導入に向けた準備を進めた。

本節ではこれまでの取り組みと今後の計画について概説する。第6.4.6項の2026年度以降の計画は、「富岳」政策対応枠への申請が採択された場合に実施予定のものを記述している。

6.4.2 局地アンサンブル予報システムのリアルタイム実行

線状降水帯は、次々と発生した積乱雲により構成された線状の降水域が数時間にわたってほぼ同じ場所に停滞することで、大雨をもたらすものである。線状降水帯の予測精度向上に向けて、予測モデルを高解像度化することや、高解像度のアンサンブル予報システム（EPS: Ensemble Prediction System）を開発することは欠かすことができない課題としている（第1回線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ²）。このため、

線状降水帯の予測計算を行う局地数値予報モデルの高解像度化及び確率的予測（アンサンブル手法）の強化に取り組んでいる。しかし、高解像度化と予測シナリオ（メンバー）の増加は計算機資源においてトレードオフの関係があり、気象庁で運用できる限られた計算機資源で線状降水帯の予測精度向上を達成するためには、最適な構成を検討する必要がある。

そこで本課題では、局地モデルの高解像度化と予測シナリオの増加の2つの方向（もしくはその中庸）の強化の可能性について実験を実施し、方向性に関する知見を得る計画としてきた。まず2022年10月までに、解像度2kmの局地モデルによる21メンバーアンサンブル予報を行う実験を複数事例に対して実施した。この局地モデルによるEPSを局地EPS（LEPS: Local EPS）と呼ぶ。この際のEPSメンバーの初期値及び境界値には、気象庁で現在運用している局地解析とメソ予報を用い、初期摂動にはメソEPS（MEPS: Mesoscale EPS、解像度5kmのモデルによる21メンバーのアンサンブル）で作成した値を用いた。また、2023年10月までに、メンバー数を21のままとして、モデルをより高解像度の1kmにする実験を実施し、これらの有効性の比較調査も実施した。さらに、上記の21通りの初期値にモデルアンサンブル手法を加えることで、解像度2kmのまま、より多数のメンバー（101メンバー）のアンサンブル予報実験も実施した。これらの調査の結果と運用にかかる計算機資源量増加を考慮して、2025年度末に2km21メンバーでLEPS運用開始を目指す方針を確定した。2024年は、本仕様で2023年度末に現業化された局地数値予報モデルLFMの2kmをベースに21メンバーのアンサンブル予報での最適な摂動の与え方についての調査を実施した。これまで考慮していた初期摂動に加え、側面境界摂動を考慮して線状降水帯発生時の環境場の不確実性を表現できるかについて、多くの線状降水帯事例において確認した。

2025年は、2025年度末の運用開始を見据え、より実運用に近い条件で評価を実施するべく、出水期（6月～10月）に1日あたり2回の実行頻度でLEPSのリアルタイムシミュレーション実験を実施した。これにより、実運用を想定した計算の安定性や処理時間、予測特性について継続的に確認を行うとともに、線状降水帯事例を含む豪雨事例に対する確率的予測情報の有用性評価を進めた。開発の詳細は第4.3節を参照されたい。

予測結果の事例として、図6.4.1に、2025年8月10日0時頃に福岡県で発生した線状降水帯を対象とした15時間前からの結果を示す。図6.4.1(a)の楕円の位置に発生した線状降水帯について、(b)のLFMは観測に対応する線状の強雨を表現している。しかしながら、観測に比べるとやや北寄りな狭い予測となっている。この事例において、MEPSによる3時間降水量が50mmを超過する確率（図6.4.1(d)）は各メンバーの予測雨量が少なめで、観測に比べ全体的に北寄りの傾向である

¹ 「スーパーコンピュータ「富岳」利活用促進の基本方針」（令和2年（2020年度）7月17日文科科学省通知）において定められている政策的に重要または緊急と認められる課題がより柔軟に利用できる「富岳」の利用枠

² https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjokousuitai_WG/part1/part1-gijigaiyou.pdf

のに対し、LEPS (図 6.4.1(c)) は豪雨の可能性をよく捕捉していることがわかる。

このリアルタイム実験を通じて、線状降水帯の高い捕捉率を持ち、安定的に運用可能な局地アンサンブル予報システムの 2025 年度末での現業化の目途をつけることができた。他の事例においても、MEPS と比べて線状降水帯に代表される強雨を高い確率で補足可能なこと、LFM だけでは捉えきれない強雨の可能性を補足できることを確認した。

6.4.3 水平解像度 1 km 版局地モデルの開発

上述の通り、線状降水帯の予測精度向上に向けた課題として、積乱雲を表現できるよう予測モデルを高解像度化するなどにより、予測モデルの性能を高めることが挙げられている。これに向けて、現在気象庁で運用している最も分解能の高い局地数値予報モデル (LFM、解像度 2 km、18 時間予報) をさらに高解像度にした場合に、予測性能がどのようになるか、どのような課題があるかを見極める必要がある。

このような調査を行う観点から、2022 年度は、6 月から 10 月までの期間、西日本を中心とした 1400 km × 1400 km の限定された領域でリアルタイムに 1 km LFM の 18 時間予報実験を実施するとともに、「富岳」向けの最適化・高速化開発を行った。2023 年度は、これらの開発成果により、現在気象庁が 2 km LFM を運用している全国領域でも 1 km LFM の予報が実行できるようになったことから、6 月から 10 月までの期間は全国領域で 18 時間予報実験を実施した。また、「富岳」による開発により得られた高速化と物理過程に関する知見は、2023 年度末に、現業運用する解像度 2 km のモデルに予報時間を 18 時間に延長 (これ以前は 10 時間先までの予報) することで取り込んだ (気象庁情報基盤部 2024)。2024 年度は、解像度 1 km のモデルの力学過程及び物理過程等の改良を進め、そのインパクトを確認した。地形作成に関するパラメータや地形による抵抗を扱う過程のパラメータの調整を行うことで、下層の風速が改善されることを確認した。高速化についても引き続き開発を継続し、高速化前と比べて処理全体の実行時間が概ね半減するなどの成果を得た。また、2025 年度末に迫った現業運用に向けて、より実運用に近い条件で評価を実施するべく、1 日あたりの実行頻度を増やして (1 日 2 回 → 4 回) 夏期間にリアルタイムシミュレーションを実施した。

2025 年度は、水平解像度 1 km の局地モデルについて、モデル改良を継続し、2025 年度末の現業導入を見据えた最終的な評価段階として、長期間にわたる再予報実験を行い、予測特性への影響や計算安定性に関する調査を進めている。局地モデルの開発項目に関しては第 4.2 節を参照されたい。再予報実験の結果は、現業導入に向けた最終的な精度及び計算安定性の確認に用いるとともに、1 km LFM を用いた各種ガイダンス

の学習用データとして活用する。

6.4.4 高解像度全球数値予報モデルの開発

数日先までの気象現象予測、とりわけ国民生活に影響の大きい台風予測のため、気象庁では、地球全体を予測対象とした全球数値予報モデル GSM を運用している。2026 年 1 月現在の GSM の水平解像度は約 13 km であり、台風中心部で発達する積乱雲などを正確に再現するためには解像度が十分とは言えない。このため、その予測精度向上のために水平解像度 10 km 以下への高解像度化が必要である。現行の GSM が採用する計算手法 (スペクトル法) では、将来的に水平解像度 10 km 以下の高解像度 GSM にする際に、球面調和関数の数値計算精度や、計算量やノード間通信量の増加の面で課題があることが分かっている。この課題を解決するため、本課題では富岳を活用して将来の高解像度 GSM でも利用可能な計算手法の開発を行う。

2023 年 10 月までに開発を進め、10 km ばかりでなく 5 km の解像度での予測実験を実施することも可能となっている。2024 年度は、解像度 10 km、5 km 全球モデルにおける雲や積雲対流過程や海面の扱いの精緻化が、台風の発達や、豪雨をもたらす環境場の一因である台風からの湿潤な空気の流れこみの予測に与える影響を確認した。その結果、積雲対流過程の設定を修正すること、台風による海のかき混ぜに伴う海面水温低下を考慮することで、10 km、5 km 全球モデルで見られた台風の過発達や台風周辺での降水の過度な集中が緩和される事例が見られることを確認した。また、時間ステップを長くした場合でもモデルがより安定に実行できるよう力学過程の計算手法の改良の検討を進めた。小スケールの数値ノイズを除去する高次のフィルターの導入と移流計算の精緻化を組み合わせることにより、長いタイムステップでのより安定な時間積分が可能になることが示唆された。さらに、これまで得られた高速化の成果のうち、並列計算手法の改良については、令和 7 年 3 月の全球モデル更新時に導入した (第 3.2 節)。

2025 年度は、解像度 10 km 以下への高解像度化の現業化を見据えて、全球モデルによる台風の発達や台風からの湿潤な空気の流れこみの予測における雲や積雲対流過程や海面の扱いの精緻化の影響を整理し、改良の方向性を検討した。またスペクトル変換の単精度化に関して精度劣化を防ぐ手法の調査・開発を行うとともに、長いタイムステップでの実行に関する調査等、高速化に関する開発を進めた。

6.4.5 学官連携による観測データの利用高度化

数値予報システム改良の加速化を図るためには、観測データの利用手法や数値予報モデルの各種過程等に専門知識のある大学や研究機関等の研究者の技術や知見を取り込むことが重要である。一方、このような活

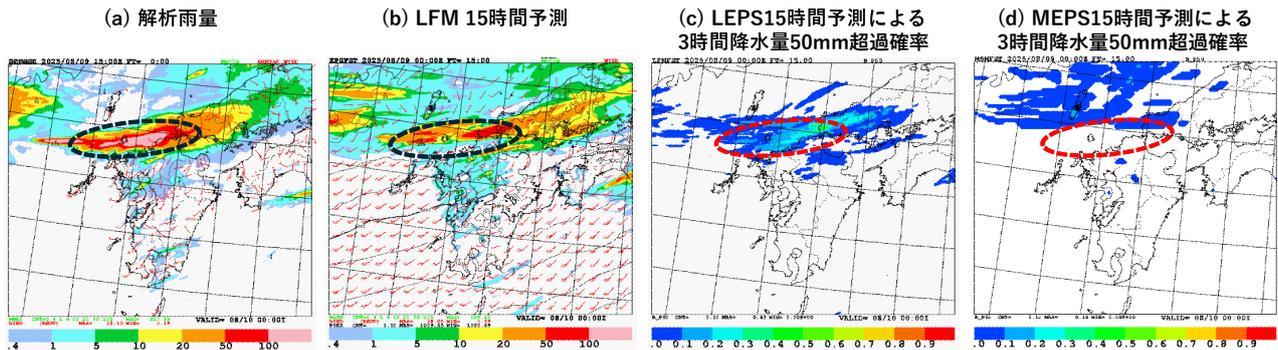


図 6.4.1 局地アンサンブル予報システム (LEPS) の 2025 年 8 月 10 日の線状降水帯事例の予測結果。(a) 解析雨量、(b) LFM による 15 時間予測、(c)LEPS の 15 時間予測で 3 時間降水量が 50mm 以上のメンバーの割合、(d) MEPS の 15 時間予測で 3 時間降水量が 50mm 以上のメンバーの割合

動のためには、共同で開発を行うため、数値予報の実験を行う開発基盤が必要である。

気象庁では、数値予報システムに対して何らかの改良を施す際に、極端事例のみならず平常時も含めた一定期間の客観解析（データ同化）と予報の実験を行い、その改良版数値予報システムの総合的な性能評価を実施している。その開発基盤として、数値予報システムを模擬する「数値解析予報サイクル実験システム NAPEX(原 2017)」を整備、活用している。大学等の研究者とともに多様な観測データの利用手法改善等に取り組む開発基盤とするため、2023 年夏までにこの NAPEX に準じたメソ数値予報システムの実験システムを「富岳」に構築した。

このシステム構築を契機として、2023 年に現在気象庁で運用、数値予報でデータを取得・活用しているもののうち、更なる利用手法改良が見込まれる、ひまわり及び二重偏波ドップラー気象レーダーの利用手法高度化を目指して共同研究提案を募り、共同研究を開始した。2025 年度は千葉大学、防災科学技術研究所との共同研究を継続した。琉球大学の研究提案については、琉球大学において研究継続が困難となり共同研究としての実施には至らなかったものの、実施に向けて議論する過程で故・山田広幸教授より頂いたご示唆を踏まえ、当庁にて技術開発を継続した。これらの共同研究の開始から数えて 3 か年計画（2023～2025 年度）の最終年度として、現業利用を見据えた技術開発成果の整理・仕様検討を重点的に進めた。

(1) 「集中豪雨の予測精度向上に資する晴天放射輝度のキャラクタリゼーション」

千葉大学との共同研究により、メソ解析に用いるインナーモデル格子解像度（約 15 km）に整合させて高解像度化した晴天放射輝度（CSR）の同化について適切な設定の調査等を実施した。高解像度化した CSR は、現行と同じ観測誤差や間引き距離の設定による同化利用であっても解析・予報の総合的な精度が改善する他、観測誤差の変更により CSR の観測情報をより反映させることで水蒸気場の第

一推定値が改善することを確認した（図 6.4.2）。また、観測誤差及び間引き距離に関する感度実験と理論的評価を組み合わせることで検討を行い、観測誤差は現行の 0.5～1.0 倍、間引き距離は約 45 km とする設定が、高解像度 CSR 同化において安定かつ効果的であることを示した。一方、冬季の予測悪化要因への対策として、積雪面かつ高湿潤条件下で雲の影響を受けたデータを除去する雲の品質管理手法を導入することで強い降水と下層気温の予測悪化が緩和されることを確認した。さらに、千葉大学が作成したひまわり地表面温度プロダクトを用いた調査により、地表面温度の日変化に関するバイアスの把握やモデル検証に資する有用な知見が得られた。これらの成果により、高解像度 CSR を用いた同化技術の実用性と課題が明確化し、将来の現業数値予報システム改良及び集中豪雨予測精度向上に資する成果を得た。

(2) 「二重偏波気象ドップラーレーダーを用いた動径風の品質管理法と観測誤差推定法の開発」

防災科学技術研究所との共同研究による、地表に近い領域を観測するレーダー動径風の品質管理手法を検討した。このため、地形によるレーダーボリュームの遮蔽の有無や、地表面からの距離に応じた動径風の特長や偏波パラメータの分布を調査した。調査の結果、偏波パラメータにてグラウンドクラッターと示唆されないデータでも地形による遮蔽の影響を受けたものが存在し、偏波パラメータとレーダーボリュームの遮蔽の影響を組み合わせることで品質を評価していくことの重要性を確認した。さらに、レーダー動径風の詳細なインパクト調査を実施したところ、冬季日本海側の混合対流雲の雲頂付近の動径風データが予測精度の低下をもたらしていることが判明した。このため、水平風の鉛直シアが大きく、レーダーボリューム内が非一様な観測データの品質管理手法の検討を行った。これらの結果により、現業数値予報システムにおけるレーダー動径風のインパクトへの理解を深め

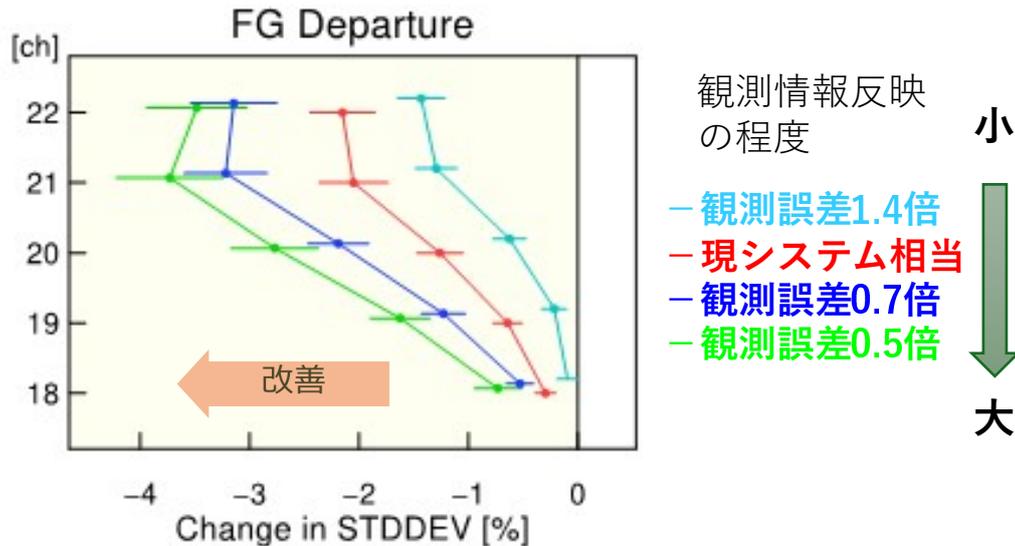


図 6.4.2 メソ解析において、高解像度化した CSR を同化した際の、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の、現システム相当の CSR を同化した場合に対する変化率 [%]。標準偏差の減少は第一推定値の精度向上を示唆する。マイクロ波サウンダ ATMS についての結果。縦軸はチャンネル番号。いずれも対流圏中上層の水蒸気に感度のあるチャンネル。線の色の違いは、高解像度化した CSR に設定した様々な観測誤差の違いを示す。エラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

るとともに、偏波パラメータ利用に向けた仕様の検討に資する成果を得た。

(3) 「沖縄レーダーの観測範囲に出現する「メソ対流系」に伴う偏波パラメータの鉛直構造の解析と現業メソ予報モデルとの比較」

雲相別擬似相対湿度の推定精度について、ゾンデ観測およびレーダー偏波情報を用いた調査を実施した。レーダー反射強度から推定・同化利用している擬似相対湿度について、ゾンデによる直接観測とモデルの予測値とを比較したところ、擬似相対湿度の推定精度は、モデルとレーダー観測の雲の非一様性の違いによって異なることを確認した。加えて、擬似相対湿度の推定精度の気象場依存性について調査を進め、レーダー反射強度の利用手法高度化に資する知見を得た。

2025 年度は以上のとおり、3 か年計画の最終年度として、各共同研究の成果を取りまとめ、現業システムへの適用可能性や仕様に関する検討を重点的に実施した。

6.4.6 2026 年度以降の「富岳」政策対応枠で申請する開発計画

2026 年度以降の「富岳」政策対応枠では、豪雨防災及び台風防災のための予測精度の更なる向上を目的として、物理法則にもとづく従来の数値予報モデル技術に加えて、先端 AI 技術を活用した研究開発を推進する計画を申請したい。この計画において、豪雨防災分野では、2025 年度末に現業導入を予定している 1 km 解像度の局地モデル及び局地アンサンブル予報システムを基盤とし、それらの性能を最大限に引き出すため、物理過程の精緻化、観測データ利用の高度化、ならび

に線状降水帯予測の不確実性を適切に捉える摂動作成手法の改良に重点的に取り組む。また、将来的な更なる高解像度化の実現可能性についても検討を行う。台風防災分野では、階層的な数値予報・解析システムの高度化を進め、台風進路予測の精度向上とともに、降水・風・気圧分布といった防災情報に資する詳細な予測情報の提供を可能とする数値予報基盤の構築を目指す。特に、全球・メソ解析システムを用いて、先端 AI 技術を活用した気象予測に必要な高解像度・高精度な解析データの作成・蓄積を進める。これらの取組を通じて、将来的な AI 気象モデルの活用も視野に入れつつ、物理モデルと AI を併用した数値予報技術基盤の整備を行う。

参考文献

原旅人, 2017: 数値解析予報実験システム (NAPEX). 数値予報課報告・別冊第 63 号, 気象庁予報部, 62-63.
気象庁情報基盤部, 2024: 局地モデルの改良及び予報時間延長部分の予測特性並びに全球・メソ・局地解析における新規観測データの利用開始について. 配信資料に関する技術情報第 621 号, URL <https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/621.pdf>.

第7章 受賞・研究交流

7.1 受賞

2025年は該当なし

7.2 当センター共催研究会・研修

数値予報モデル開発者特別研修

目的	数値予報モデル技術の開発に必要な知識・技術の習得
期間	前期：2025年7月7日から9日(3日間)、後期：2025年9月8日から11日(4日間)
開催形式	対面・オンライン併用
正規研修生	数値予報開発センター：6名、気象衛星センター：1名、大気海洋部：3名
特別聴講生	他省庁：6名、大学等研究機関：4名
講師	気象庁職員(数値予報課、気象研究所)
内容	前期：数値ルーチンの説明・プログラミング、後期：数値予報モデルの諸過程

今年度より本研修は数値予報課が主催している。また、上記受講者のほか、庁内の100名以上の職員がオンライン・オンデマンドで聴講した。

第16回気象庁数値モデル研究会

テーマ	線状降水帯予測精度向上に向けた数値予報システムの高度化
期間	2025年12月12日
開催形式	対面・オンライン併用
参加者	約144名(大学・研究機関等約74名、庁内約70名(気象研究所含む))

第8章 委員・専門家等

8.1 国際機関の委員・専門家等

- WMO インフラ委員会 (INFCOM)
 - － WMO 統合処理・予報システム常設委員会 (SC-WIPPS)
 - * 観測データ品質監視システムに関する専門家チーム (ET-ODQMS)：太田行哉（メンバー）
 - * 数値予報標準検証見直しに関するタスクチーム (TT-NWPSV)：松川知紘¹（メンバー）
 - * 現業天気予報システム専門家チーム (ET-OWFS)：太田洋一郎（メンバー）
 - * 熱帯低気圧標準検証作成に関するタスクチーム (TT-TCSV)：太田洋一郎（メンバー）
- WMO 研究評議会 (Research Board)
 - － 数値実験作業部会 (WGNE)：氏家将志（部会員）
- 海面高度科学チーム (OSTST)：浅井博明（メンバー）
- 季節内から季節予測 (S2S) アーカイブ
 - － S2S パネル：久保勇太郎（メンバー）
- WMO 全球大気監視計画 (GAW)
 - － モデル応用科学諮問部会 (SAG Applications)：田中泰宙（メンバー）

¹ 2025年4月より現任。

8.2 国内機関の委員・専門家等

- 公益社団法人日本気象学会
 - － 日本気象学会第 43 期委員講演企画委員会委員：川口真司
 - － 日本気象学会第 43 期委員「天気」編集委員会委員：沢田雅洋
 - － 日本気象学会第 43 期委員国際学術交流委員会事務局：小田真祐子
 - － 日本気象学会第 43 期委員広報委員会副委員長：田中泰宙
- 気象庁・公益社団法人日本気象学会
 - － 気象研究コンソーシアム運営委員：田中泰宙
- 宇宙航空研究開発機構
 - － 「AMSR 分科会委員」「地球観測に関する科学アドバイザー委員会 AMSR 分科会」：村田英彦
 - － 「SGLI 分科会委員」「地球観測に関する科学アドバイザー委員会 SGLI 分科会」：田中泰宙
 - － 「衛星搭載風ライダー (DWL) 分科会メンバー」：野中健一

付録 A 略語表

略語	原語	訳または意味
2D-OI	2 Dimensional Optimal Interpolation	2次元最適内挿法
3D-Var	3 Dimensional Variational method	3次元変分法
4DEnVar	4 Dimensional Ensemble Variational method	4次元アンサンブル変分法
4D-Var	4 Dimensional Variational method	4次元変分法
ASR	All-Sky Radiance	全天放射輝度温度
ABI	Advanced Baseline Imager	GOES-16, 17 に搭載されているイメージャ(ひまわり 8, 9 号に搭載の AHI と同じシリーズ)
ACC	Anomaly Correlation Coefficient	アノマリー相関係数
AD	ADjoint Model	随伴モデル
AGCM	Atmospheric General Circulation Model	大気大循環モデル
AHI	Advanced Himawari Imager	ひまわり 8 号, 9 号に搭載されているイメージャ
AI	Artificial Intelligence	人工知能
AIREP	AIRcraft REPorts	航空機実況気象通報
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder	大気赤外サウンダ (Aqua 衛星に搭載)
AMDAR	Aircraft Meteorological DATA Relay	航空機観測データ中継装置
AMI	Active Microwave Instrument	能動型マイクロ波観測装置 (ERS 衛星に搭載)
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer-2	高性能マイクロ波放射計 2
AMSR3	Advanced Microwave Scanning Radiometer-3	高性能マイクロ波放射計 3
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS	高性能マイクロ波放射計 (Aqua 衛星に搭載)
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A	改良型マイクロ波気温サウンダ (NOAA, Aqua, Metop 衛星に搭載)
AMSU-B	Advanced Microwave Sounding Unit-B	改良型マイクロ波水蒸気サウンダ (15~17 号の NOAA 衛星に搭載)
AMV	Atmospheric Motion Vector	大気追跡風
AOPC	Atmospheric Observation Panel for Climate	気候のための大気観測パネル (GCOS の専門委員会)
AORI	Atmosphere and Ocean Research Institute	東京大学大気海洋研究所
AOT	Aerosol Optical Thickness	エアロゾルの光学的厚さ
Aqua	Aqua	米国の午後軌道地球観測衛星
ASCAT	Advanced SCATterometer	改良型散乱計
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	資源探査用将来型センサ
asuca	Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere	気象庁 MSM, LFM に用いるモデル
asuca-Var	asuca Variational data assimilation system	asuca に基づく変分法データ同化システム
ATMS	Advanced Technology Microwave Sounder	改良型マイクロ波サウンダ (JPSS 衛星に搭載)
ATOVS	Advanced TOVS	改良型 TOVS
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	改良型高分解能放射計 (NOAA 衛星等に搭載)
BFGS	Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm	非制限非線形最適化問題に対する反復的解法の一つ。
BGM 法	Breeding of Growing Modes 法	成長モード育成法
BI	Bias score	バイアススコア
BoM	Bureau of Meteorology	オーストラリア気象局
BSS	Brier Skill Score	確率予測に関する統計指標の一つ
CAPE	Convective Availabel Potential Energy	対流有効位置エネルギー
CAMEL	Combined ASTER and MODIS Emissivity over Land	ASTER と MODIS による合成陸上射出率
CBS	Commission for Basic Systems	基礎システム委員会
CCM	Chemistry-Climate Model	化学気候モデル
CDR	Climate Data Record	気候データレコード
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System	地球放射収支計 (TRMM 衛星などに搭載)
CERES-EBAF	CERES-Energy Balanced And Filled	CERES によるフラックスデータセット
CERES-SSF	CERES-Single Scanner Footprint	CERES による単独衛星フラックス
CFOSAT	Chinese-French Oceanography Satellite	中仏海洋衛星
CHAMP	CHallenging Mini-satellite Payload	ドイツ・米国の GNSS 掩蔽観測衛星
CHUAN	Comprehensive Historical Upper-Air Network	歴史的な高層観測データセット

略語	原語	訳または意味
CIMSS	Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies	(米国ウィスコンシン大学の) 気象衛星研究共同研究所
CIRES	Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences	米国の環境科学共同研究所
CLASS	Comprehensive Large Array-data Stewardship System	包括的大規模配列データ管理システム (NOAA の衛星データ提供システム)
CM SAF	Satellite Application Facility on Climate Monitoring	気候監視に関する衛星データ処理研究拠点
CMA	China Meteorological Administration	中国気象局
CMC	Canadian Meteorological Centre	カナダ気象センター
CMEM	Community Microwave Emission Modelling	ECMWF のマイクロ波放射モデル
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project	結合モデル相互比較プロジェクト
CNRM	Centre National de Recherches Meteorologiques	フランス気象局国立気象研究センター
COBE-SST	Centennial in situ Observation-Based Estimates Sea Surface Temperature	現場観測データのみによる気象庁の全球海面水温解析 (値)
CONSEO	Consortium for Satellite Earth Observation	衛星地球観測コンソーシアム
CoMorph	Convection Morph	UKMO の新しい対流スキーム
Coriolis	Coriolis	米国の極軌道衛星。海上風観測を目的とする。
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate	米国と台湾との協力による 6 機の GNSS 掩蔽観測用小型衛星群からなる観測システム
CPS	Coupled Prediction System	季節アンサンブル予報システム
CrIS	Cross-track Infrared Sounder	走査型赤外サウンダ (JPSS シリーズに搭載)
CRPS	Continuous Ranked Probability Score	確率予測に関する統計指標の一つ
CryoSat	CryoSat	ESA の地球観測衛星。極地の氷を観測対象とする。
CSR	Clear Sky Radiance	晴天放射輝度温度
DE	Dynamic Emissivity	動的にマイクロ波射出率を推定する手法
DEM	Digital Elevation Model	数値標高モデル
DFS	Degree of Freedom for Signal	情報の自由度
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program	米空軍の軍事気象衛星
DPR	Dual-frequency Precipitation Radar	二周波降水レーダー
DRAW	Doppler Radar for Airport Weather	空港気象ドップラーレーダー
DWD	Deutscher WetterDienst (ドイツ語)	ドイツ気象局
DWL	Doppler Wind Lidar	ドップラー風ライダー
EARS	EUMETSAT Advanced Retransmission Service	EUMETSAT 拡張再配信サービス。元々は EUMETSAT ATOVS Retransmission Service の略であったが、対象データの拡張に伴い名称が改められた。
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	欧州中期予報センター
EDA	Ensemble of Data Assimilations	データ同化アンサンブル
EDSR	Enhanced Deep Super-Resolution network	深層学習を利用した超解像手法の一つ
ENSO	El Niño-Southern Oscillation	エルニーニョ・南方振動
EOS	Earth Observing System (NASA)	NASA の地球観測衛星
EPS	Ensemble Prediction System	アンサンブル予報システム
ERA	ECMWF ReAnalysis	ECMWF 再解析
ERS	European Remote Sensing satellite	欧州リモートセンシング衛星
ESCAP	United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific	国連アジア太平洋経済社会委員会
ET-OCPS	Expert Team on Operational Climate Prediction System	現業気候予測システム専門家チーム
ET-OWFS	Expert Team on Operational Weather Forecasting System	現業天気予報システム専門家チーム
ETS	Equitable Threat Score	エクイタブルスレットスコア
EUMETSAT	EUropean organisation for the exploitation of METeorological SATellites	欧州気象衛星開発機構
FAR	False Alarm Rate	誤検出率
FASTEM	Fast Microwave Ocean Emissivity Model	海面射出率高速計算モデル
FCDR	Fundamental Climate Data Record	基本気候データレコード
FG	First Guess	第一推定値
FOV	Field Of View	観測視野

略語	原語	訳または意味
FSOI	Forecast Sensitivity Observation Impact	同化した観測データが予報に与えるインパクトを定量的に評価する手法
FT	Forecast Time	予報時間
FY	Feng Yun	中国の気象衛星「風雲」
GA	Global Analysis	全球解析
GAME	GEWEX Asia Monsoon Experiment	GEWEX アジア・モンスーン実験
GCOM-C	Global Change Observation Mission-Climate	地球環境変動観測ミッション計画において、気候変動に関する観測を担当する衛星 (和名「しきさい」)
GCOM-W	Global Change Observation Mission-Water	地球環境変動観測ミッション計画において、水循環変動に関する観測を担当する衛星
GCOS	Global Climate Observing System	全球気候観測システム
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans	大洋水深総図
GEONET	GNSS Earth Observation Network System	GNSS 連続観測システム
GEPS	Global Ensemble Prediction System	気象庁の全球アンサンブル予報システム
GEWEX	Global Energy and Water cycle EXperiment	全球エネルギー・水循環実験計画
GFS	Global Forecast System	NCEP の全球数値予報モデル
GHMS	Geostationary HiMawari Sounder	赤外サウンダ (ひまわり 10 号に搭載)
GIIRS	Geostationary Interferometric Infrared Sounder	静止干渉赤外サウンダ (FY-4 衛星に搭載)
GLCC	Global Land Cover Characterization	全球土地被覆分類
GMI	GPM Microwave Imager	GPM マイクロ波イメージャ
GMS	Geostationary Meteorological Satellite	日本の静止気象衛星
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球航法衛星システム
GNSS-RO	GNSS - Radio Occultation	GNSS 掩蔽観測
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite	米国の静止気象衛星
GOSAT	Greenhouse gases Observing SATellite	日本が打ち上げた温室効果ガス観測技術衛星。和名は「いぶき」
GPM	Global Precipitation Measurement	全球降水観測計画
GPV	Grid Point Value	格子点値 (grid data)
GPU	Graphics Processing Unit	画像描写を行う際に必要となる計算処理を行う半導体チップ
GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment	米国・ドイツの重力気候実験衛星
GSAM-TM	Global Spectral Atmosphere Model - Transport Model	GSM を用いた大気輸送モデル
GSHHG	Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database	全球高解像度地形 (海岸線、湖沼) ベクトルデータ
GSM	Global Spectral Model	気象庁の全球スペクトルモデル
HadAT	HADley Centre's rAdiosonde Temperature product	ハドレーセンターのラジオゾンデ気温プロダクト
HadISD	HADley Integrated Surface Dataset	ハドレーセンターの地上観測データセット
HALOE	HALogen Occultation Experiment	ハロゲン掩蔽実験
HIRS	High resolution Infrared Radiation Sounder	高分解能赤外放射サウンダ (NOAA, Metop 衛星に搭載)
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer	赤外大気探査干渉計 (Metop 衛星に搭載)
IAU	Incremental Analysis Update	同化による修正量を強制力として一定の割合で与え続ける手法
IBTrACS	International Best Track Archive for Climate Stewardship	気候管理に関する国際ベストトラックアーカイブ
ICAO	International Civil Aviation Organization	国際民間航空機関
ICOADS	International Comprehensive Ocean-Atmosphere DataSet	包括的的海洋-大気データセット
IGRA	Integrated Global Radiosonde Archive	全球ラジオゾンデアーカイブ
ICDR	Interim Climate Data Record	気候データレコード
IFS	Integrated Forecast System	欧州中期予報センターの全球数値予報システム
IMH	Institute of Meteorology and Hydrology (Mongolia)	モンゴルの気象水文研究所
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
INFCOM	INFrastructure COMmission	WMO インフラ委員会
IROWG	International Radio Occultation Working Group	国際掩蔽作業部会

略語	原語	訳または意味
IOVWST	International Ocean Vector Winds Science Team	国際海上風科学チーム
IROWG	International Radio Occultation Working Group	国際遮蔽作業部会
IREMIS	new physically-based IR sea surface EMISsivity model	物理学に基づく新しい赤外海面射出率モデル
IRS	the Infra-Red Sounder	赤外サウンダ (MTG 衛星に搭載)
ISD	Integrated Surface Database	NCEI の地上観測データセット
ISPD	International Surface Pressure Databank	国際地上気圧観測データバンク
ISRO	Indian Space Research Organisation	インド宇宙研究機関
ITCZ	Intertropical Convergence Zone	熱帯収束帯
Jason	Jason	欧米共同運用の海面高度観測衛星
JAXA	The Japan Aerospace Exploration Agency	宇宙航空研究開発機構
JMA	Japan Meteorological Agency	気象庁
JMA-NHM	JMA Non-Hydrostatic Model	気象庁非静力学モデル
JNoVA	JMA Non-hydrostatic model based Variational data Assimilation system	気象庁非静力学モデルに基づいた変分法データ同化システム
JPSS	Joint Polar Satellite System	米国の次世代現業極軌道衛星 (NOAA 衛星の後継計画)
JRA-25	Japanese 25-year ReAnalysis	JRA-25 長期再解析
JRA-3Q	Japanese ReAnalysis for Three Quarters of a century	気象庁第3次長期再解析
JRA-55	Japanese 55-year ReAnalysis	気象庁 55 年長期再解析
JSC	Joint Scientific Committee	合同科学委員会
JST	Japan Standard Time	日本標準時
KF	Krain and Fritsch scheme	ケイン・フリッチ積雲対流スキーム
KIAPS	Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems	韓国数値予報モデル開発事業団
KMA	Korea Meteorological Administration	韓国気象庁
LAF 法	Lagged Average Forecast 法	時間ずらし平均法
LAI	Leaf Area Index	葉面積指数
LEPS	Local Ensemble Prediction System	気象庁の局地アンサンブル予報システム
LES	Large Eddy Simulation	ラーゼエディ (大渦) シミュレーション
LETKF	Local Ensemble Transform Kalman Filter	局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
LFM	Local Forecast Model	気象庁の局地モデル
MA	Meso Analysis	メソ解析
MASINGAR	Model of Aerosol Species IN the Global AtmospheRe	気象研究所全球エアロゾル輸送モデル
ME	Mean Error	平均誤差
Megha-Tropiques	Megha-Tropiques	フランス・インドの地球観測衛星
MEPS	Meso-scale Ensemble Prediction System	気象庁のメソアンサンブル予報システム
MERIT DEM	Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM	複数誤差成分の分離・除去による全球高精度標高データセット
Meteosat	Meteorological Satellite	EUMETSAT の静止気象衛星
Metop	Meteorological operational satellite	EUMETSAT の極軌道気象現業衛星
MGDSST	Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperature	気象庁の全球日別海面水温解析 (値)
MHS	Microwave Humidity Sounder	マイクロ波水蒸気サウンダ (NOAA, Metop 衛星に搭載)
MJO	Madden Julian Oscillation	マッデン - ジュリアン振動
MLS	Microwave Limb Sounder	マイクロ波リムサウンダ
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer	中分解能撮像分光放射計 (Aqua, Terra 衛星に搭載)
MOVE	Meteorological Research Institute Multivariate Ocean Variational Estimation	気象研究所開発の海洋データ同化システム
MRI.COM	Meteorological Research Institute Community Ocean Model	気象研究所共用海洋モデル
MSM	Meso-Scale Model	気象庁のメソモデル
MSU	Microwave Sounding Unit	マイクロ波探査計 (14 号以前の NOAA 衛星に搭載)
MTG	Meteosat Third Generation	EUMETSAT の第三世代静止気象衛星

略語	原語	訳または意味
MTSAT	Multi-functional Transport SATellite	(日本の) 運輸多目的衛星
MWHS	MicroWave Humidity Sounder	マイクロ波水蒸気サウンダ (FY-3 衛星に搭載)
MWRI	Micro-Wave Radiation Imager	マイクロ波イメージャ (FY-3 衛星に搭載)
MYNN	Mellor-Yamada Nakanishi-Niino scheme	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino 境界層スキーム
NASA	National Aeronautics and Space Administration	米国航空宇宙局
NCAR	National Center for Atmospheric Research	米国大気研究センター
NCDC	National Climate Data Center	米国気候データセンター
NCEI	National Centers for Environmental Information	米国環境情報センター
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	米国環境予測センター
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	正規化植生指数
NEAR-GOOS	North-East Asian Regional - Global Ocean Observing System	北東アジア地域海洋観測システム
NESDIS	National Environmental Satellite, Data, and Information Service	米国環境衛星・資料情報局
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	米国海洋大気庁
NRL	Naval Research Laboratory	米国海軍研究所
NuSDaS	NWP Standard Dataset System	数値予報標準データセットシステム
NWP SAF	The Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction	数値予報に関する衛星データ処理研究拠点
OFS-WG	Working group on Ocean Forecasting System	海洋予測システム作業部会 (NEAR-GOOS の作業部会)
OMI	Ozone Monitoring Instrument	オゾンモニタリング装置
OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite	オゾン全量と鉛直プロファイル観測装置
OLR	Outgoing Longwave Radiation	大気上端上向き長波放射
OSCAR	Observing Systems Capability Analysis and Review Tool	観測システム能力分析・レビューツール
OSCAT	OceanSat Scatterometer	インドの極軌道衛星搭載のマイクロ波散乱計
OSISAF	Satellite Application Facility on Ocean and Sea Ice	海洋・海氷に関する衛星データ処理研究拠点
OSSE	Observing System Simulation Experiment	観測システムシミュレーション実験
OSTST	Ocean Surface Topography Science Team	海面高度科学チーム
QBO	Quasi-Biennial Oscillation	成層圏準2年周期振動
QC	Quality Control	品質管理
QI	Quality Indicator	品質指標
QuikSCAT	Quick SCATterometer	米国の散乱計衛星
RAOBCORE	RAdiosonde OBServation COrrrection using RE-analyses	再解析を用いたラジオゾンデ観測補正
RH	Relative Humidity	相対湿度
RICH	Radiosonde Innovation Composite Homogenization	ラジオゾンデイノベーションの合成による均質化
RIHMI	All-Russian Research Institute for Hydrometeorological Information	全ロシア水文気象学情報研究所
RISE	RICH with Solar Elevation dependent	太陽高度依存を考慮した RICH
RMS	Root Mean Square	二乗平均平方根
RMSD	Root Mean Square Deviation	二乗平均平方根偏差
RMSE	Root Mean Square Error	二乗平均平方根誤差
ROMSAF	Satellite Application Facility on Radio Occultation Meteorology	掩蔽気象学に関する衛星データ処理研究拠点
RSMC	Regional Specialized Meteorological Centre	地域特別気象中枢
RSS	Remote Sensing Systems	リモートセンシングシステムズ (マイクロ波衛星観測データの処理を行う米国の民間調査会社)
RTTOV	Radiative Transfer for TOVS	高速放射伝達モデル
S2S	Subseasonal-to-Seasonal Prediction Project	季節内から季節予測プロジェクト
SAF	Satellite Application Facility	衛星データ処理研究拠点
SAPHIR	Soundeur Atmospherique du Profil d'Humidite Intertropicale par Radiometer	マイクロ波水蒸気探査計 (Megha-Tropiques 衛星に搭載)
Saral	Satellite with ARGOS and ALtiKa	インドの太陽同期準回帰ダウンダスク軌道海洋観測衛星
SCAN	Soil Climate Analysis Network	米国の土壌観測ネットワーク

略語	原語	訳または意味
ScatSat	ScatSat	インドの海洋観測用極軌道衛星
SC-ESMP	Standing Committee on Data Processing for Applied Earth System Modelling and Prediction and Projection	地球システムモデリング予測常設委員会
SC-IMT	Standing Committee on Information Management and Technology	情報管理・技術常設委員会
SCSMEX	South China Sea Monsoon EXperiment	南シナ海モンスーン実験
SEKF	Simplified Extended Kalman Filter	簡略化した拡張カルマンフィルタ
Sentinel	Sentinel	欧米共同運用の海面高度観測衛星
SGLI	Second-generation Global Imager	気候変動観測衛星 GCOM-C1 に搭載された「多波長光学放射計」
SHEBA	the Surface HEat Budget of the Arctic Ocean	北極海表面熱収支観測計画
SHPC	Stochastic Humidity Profile for Convective parametrization	確率的水蒸気プロファイル参照法
SI	Scattering Index	散乱インデックス
SI	Similarity index	類似度
SiB	Simple Biosphere (model)	生物圏モデル
SLA	Sea Level Anomaly	海面高度偏差
SPARC	Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate	成層圏・対流圏の諸過程と気候影響研究 (WCRP の4つのコアプロジェクトの1つ)
SPPT	Stochastically Perturbed Parametrization (Physics) Tendency または Stochastic Perturbation of Parametrization (Physics) Tendency	確率的物理過程強制法
SSI	Showalter Stability Index	ショワルター安定指数
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager	マイクロ波放射計 (15号以前の DMSP 衛星に搭載)
SSM/T-2	Special Sensor Microwave Water Vapor Profiler	マイクロ波水蒸気サウンダ (15号以前の DMSP 衛星に搭載)
SSMIS	Special Sensor Microwave Imager Sounder	マイクロ波イメージャの機能を持つチャンネルとサウンダの機能を持つチャンネルを搭載した放射計
SST	Sea Surface Temperature	海面水温
SSU	Stratospheric Sounding Unit	成層圏探査計 (14号以前の NOAA 衛星に搭載)
Suomi-NPP	Suomi National Polar-orbiting Partnership	米国海洋大気庁が運用する極軌道衛星
SV	Singular Vector	特異ベクトル
SWFP	Severe Weather Forecasting Programme	荒天予測計画
SYNOP	surface SYNOPTic observations	地上実況気象通報式
TanDEM-X	TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement	TerraSAR-X の同型衛星
TCVitals	Tropical Cyclone Vitals Database	NCEP による熱帯低気圧データベース
TE	Total Energy	全エネルギー
TELSEM	a Tool to Estimate Land Surface Emissivities at Microwave frequencies	マイクロ波周波数帯における地表面射出率推定ツール
TEMP	TEMP	高層実況気象通報式
Terra	Terra	米国の午前軌道地球観測衛星
TerraSAR-X	TerraSAR-X	ドイツの商業合成開口レーダー衛星
TIRA	Task Team for Intercomparison of ReAnalyses	WCRP の再解析相互比較タスクチーム
TIROS	Television and InfraRed Observation Satellite	可視赤外観測衛星
TL	Tangent Linear Model	接線形モデル
TMI	TRMM Microwave Imager	TRMM マイクロ波観測装置 (TRMM 衛星に搭載)
TOFD	Turbulence Orographic Form Drag	乱流地形抵抗
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder	TIROS 実用型鉛直サウンダ (14号以前の NOAA 衛星に搭載)
TPW	Total Precipitable Water	可降水量
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission	熱帯降雨観測計画
TRMM-LBA	TRMM Large Scale Biosphere - Atmosphere Experiment in Amazonia	TRMM アマゾン大規模生物圏-大気実験
TT-WDQMS	Task Team on WIGOS Data Quality Monitoring System	WIGOS データ品質監視システムに関するタスクチーム
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research	米国の大気研究大学連合

略語	原語	訳または意味
UGROW	Understanding systematic error GROWth from hours to seasons ahead	数時間から季節に至るまでの系統的誤差成長の理解 (ECMWF 内部のプロジェクト)
UKMO	United Kingdom Met Office	英国気象局
USGS	United States Geological Survey	米国地質調査所
UTC	Coordinated Universal Time または Temps Universel Coordonné (フランス語)	協定世界時
VarBC	Variational Bias Correction	変分法バイアス補正
VTPR	Vertical Temperature Profile Radiometer	赤外気温サウンダ (5号以前の NOAA 衛星に搭載)
VIIRS	Visible Infrared Imager Radiometer Suite	可視赤外放射計
WCRP	World Climate Research Programme	WMO の世界気候研究計画
WDAC	WCRP Data Advisory Council	WCRP データ諮問会議
WDCGG	World Data Centre for Greenhouse Gases	温室効果ガス世界資料センター
WENS	Wave ENsemble prediction System	波浪アンサンブル予報システム
WGNE	Working Group on Numerical Experimentation	世界気象機関大気科学委員会 (WMO/CAS) の数値実験作業部会
WIGOS	WMO Integrated Global Observing System	WMO 統合全球観測システム
WindSat	Wind Satellite	海上風測定用の多偏波マイクロ波イメージャ
WMO	World Meteorological Organization	世界気象機関
WWRP	World Weather Research Programme	世界天気研究計画
理研 AIP	RIKEN Center for Advanced Intelligence Project	理化学研究所革新知能統合研究センター

付録 B 本報告で使用した表記と統計的検証に用いる代表的な指標

本報告で使用した表記と統計的検証に用いる代表的な指標などについて以下に説明する。

B.1 本報告で用いた表記

B.1.1 分解能の表記について

本報告では、全球モデルの分解能について、xx を水平方向の切断波数、yy を鉛直層数として、「TxxLyy」と表記する。また、セミラグランジアンモデルで線形格子 (北川 2005) を用いる場合は「TLxxLyy」、二次格子 (氏家ほか 2019) を用いる場合には「TQxxLyy」と表記する。北緯 30 度において、TQ959 は約 13km 格子、TL959 は約 20km 格子、TL479 は約 40km 格子、TL319 は約 55km 格子、TL159 は約 110km 格子、TQ479 は約 27km 格子、TQ319 は約 40km 格子に相当する。

B.1.2 時刻の表記について

本報告では、時刻を表記する際に、通常国内で用いられている日本標準時 (JST: Japan Standard Time) のほかに、協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) を用いている。数値予報では国際的な観測データの交換やプロダクトの利用などの利便を考慮して、時刻は UTC で表記されることが多い。JST は UTC に対して 9 時間進んでいる。また、単に「時」を用いる場合は、日本標準時を意味する。

B.1.3 予測時間の表記について

数値予報では、統計的な検証や事例検証の結果を示す際に、予報対象時刻のほかに、初期時刻からの経過時間を予報時間 (FT: Forecast Time¹) として表記している。

本報告では、予報時間を

「予報時間」= 「予報対象時刻」- 「初期時刻」

で定義し、例えば、6 時間予報の場合、FT=6 と表記しており、時間の単位 [h] を省略している。

B.1.4 アンサンブル予報の表記について

アンサンブル予報では、複数の予測の集合 (アンサンブル) を統計的に処理し、確率予測などの資料を作成する。本報告では、予測の集合の平均を「アンサンブル平均」、個々の予測を「メンバー」と呼ぶ。また、摂動を加えているメンバーを「摂動ラン」、摂動を加えていないメンバーを「コントロールラン」と呼ぶ。全メンバーの数に対する、予測がある閾値を超える (または下回る) メンバーの数の割合を超過確率と呼ぶ。

B.1.5 緯度、経度の表記について

本報告では、緯度、経度について、アルファベットを用いて例えば「北緯 40 度、東経 130 度」を「40°N, 130°E」、「南緯 40 度、西経 130 度」を「40°S, 130°W」などと略記する。

B.2 統計的検証に用いる代表的な指標

B.2.1 平均誤差、二乗平均平方根誤差、誤差の標準偏差、改善率

予測誤差を表す基本的な指標として、平均誤差 (ME: Mean Error、バイアスと表記する場合もある) と二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) がある。これらは次式で定義される。

$$ME \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i) \quad (B.2.1)$$

$$RMSE \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2} \quad (B.2.2)$$

ここで、 N は標本数、 x_i は予測値、 a_i は実況値である。ME は予測値の実況値からの偏りの平均であり、0 に近いほど実況からのずれが小さいことを示す。RMSE は最小値の 0 に近いほど予測が実況に近いことを示す。

RMSE は ME の寄与とそれ以外を分離して、

$$RMSE^2 = ME^2 + \sigma_e^2 \quad (B.2.3)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i - ME)^2 \quad (B.2.4)$$

と表すことができる。 σ_e は誤差の標準偏差である。

本報告では、予測に改良を加えた際の評価指標として、RMSE の改善率 (%) を用いる場合がある。RMSE の改善率は次式で定義される。

$$RMSE \text{ 改善率} \equiv \frac{RMSE_{\text{cntl}} - RMSE_{\text{test}}}{RMSE_{\text{cntl}}} \times 100 \quad (B.2.5)$$

$$(RMSE \text{ 改善率} \leq 100)$$

ここで、 $RMSE_{\text{cntl}}$ は基準となる予測の、 $RMSE_{\text{test}}$ は改良を加えた予測の RMSE である。

B.2.2 スプレッド

スプレッドは、アンサンブル予報のメンバーの広がり示す指標であり、次式で定義される。

$$\text{スプレッド} \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_{mn} - \bar{x}_n)^2 \right)} \quad (B.2.6)$$

¹ 英語圏では Forecast Range などと記述されることも多い。

ここで、 M はアンサンブル予報のメンバー数、 N は標本数、 x_{mn} は m 番目のメンバーの予測値、 \bar{x}_n は

$$\bar{x}_n \equiv \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_{mn} \quad (\text{B.2.7})$$

で定義されるアンサンブル平均である。

B.2.3 アノマリー相関係数

アノマリー相関係数 (ACC: Anomaly Correlation Coefficient) とは、予測値の基準値からの偏差 (アノマリー) と実況値の基準値からの偏差との相関係数であり、次式で定義される。

$$\text{ACC} \equiv \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(A_i - \bar{A})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2}} \quad (-1 \leq \text{ACC} \leq 1) \quad (\text{B.2.8})$$

ただし、

$$X_i = x_i - c_i, \quad \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (\text{B.2.9})$$

$$A_i = a_i - c_i, \quad \bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (\text{B.2.10})$$

である。ここで、 N は標本数、 x_i は予測値、 a_i は実況値、 c_i は基準値である。基準値としては気候値を用いることが多い。アノマリー相関係数は予測と実況の基準値からの偏差の相関を示し、基準値からの偏差の増減のパターンが完全に一致している場合には最大値の 1 をとり、相関が全くない場合には 0 をとり、逆に完全にパターンが反転している場合には最小値の -1 をとる。なお、アノマリー相関係数や ME, RMSE の解説は、梅津ほか (2013) を参照していただきたい。

B.3 カテゴリー検証で用いる指標

カテゴリー検証では、まず、対象となる現象の有無を予測と実況それぞれについて判定し、その結果により標本を分類する。そして、それぞれのカテゴリーに分類された事例数を基に、予測の特性を検証するという手順を踏む。

B.3.1 分割表

分割表は、カテゴリー検証においてそれぞれのカテゴリーに分類された事例数を示す表 (表 B.3.1) である。付録 B.3.2 から B.3.12 に示す各スコアは、表 B.3.1 に示される各区分の事例数を用いて定義される。また、以下では全事例数を $N = \text{FO} + \text{FX} + \text{XO} + \text{XX}$ 、実況「現象あり」の事例数を $M = \text{FO} + \text{XO}$ 、実況「現象なし」の事例数を $X = \text{FX} + \text{XX}$ と表す。

表 B.3.1 カテゴリー検証で用いる分割表。FO, FX, XO, XX はそれぞれの事例数を示す。

		実況		計
		あり	なし	
予測	あり	適中 (FO)	空振り (FX)	FO+FX
	なし	見逃し (XO)	適中 (XX)	XO+XX
計		M	X	N

B.3.2 適中率

適中率は、予測が適中した割合であり、次式で定義される。

$$\text{適中率} \equiv \frac{\text{FO} + \text{XX}}{N} \quad (0 \leq \text{適中率} \leq 1) \quad (\text{B.3.1})$$

最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示す。

B.3.3 空振り率

空振り率は、予測「現象あり」の事例数に対する空振り (予測「現象あり」かつ実況「現象なし」) の割合であり、次式で定義される。

$$\text{空振り率} \equiv \frac{\text{FX}}{\text{FO} + \text{FX}} \quad (0 \leq \text{空振り率} \leq 1) \quad (\text{B.3.2})$$

最小値の 0 に近いほど空振り率が小さいことを示す。本報告では分母を FO+FX としているが、代わりに N として定義する場合もある。

B.3.4 見逃し率

見逃し率は、実況「現象あり」の事例数に対する見逃し (実況「現象あり」かつ予測「現象なし」) の割合であり、次式で定義される。

$$\text{見逃し率} \equiv \frac{\text{XO}}{M} \quad (0 \leq \text{見逃し率} \leq 1) \quad (\text{B.3.3})$$

最小値の 0 に近いほど見逃し率が小さいことを示す。本報告では分母を M としているが、代わりに N として定義する場合もある。

B.3.5 捕捉率

捕捉率 (H_r : Hit Rate, POD (Probability Of Detection) と呼ばれる) は、実況「現象あり」のときに予測が適中した割合であり、次式で定義される。

$$H_r \equiv \frac{\text{FO}}{M} \quad (0 \leq H_r \leq 1) \quad (\text{B.3.4})$$

最大値の 1 に近いほど見逃し率が小さいことを示す。捕捉率は、ROC 曲線 (付録 B.4.3) のプロットに用いられる。

B.3.6 体積率

体積率 (V_r : Volume Ratio) は、全事例のうち予測の「現象あり」の事例の割合を示す。

$$V_r \equiv \frac{\text{FO} + \text{FX}}{N} \quad (\text{B.3.5})$$

複数の予測の捕捉率が等しい場合、体積率が小さい予測ほど空振り率が小さい良い予測と言える。

B.3.7 誤検出率

誤検出率 (F_r : False Alarm Rate) は、実況「現象なし」のときに予測が外れた割合である。空振り率 (B.3.2) 式とは分母が異なり、次式で定義される。

$$F_r \equiv \frac{FX}{X} \quad (0 \leq F_r \leq 1) \quad (\text{B.3.6})$$

最小値の 0 に近いほど、空振り率が小さく予測の精度が高いことを示す。誤検出率は捕捉率 (付録 B.3.5) とともに ROC 曲線 (付録 B.4.3) のプロットに用いられる。

B.3.8 バイアスコア

バイアスコア (BI: Bias Score) は、実況「現象あり」の事例数に対する予測「現象あり」の事例数の比であり、次式で定義される。

$$BI \equiv \frac{FO + FX}{M} \quad (0 \leq BI) \quad (\text{B.3.7})$$

予測と実況で「現象あり」の事例数が一致する場合に 1 となる。1 より大きいほど予測の「現象あり」の頻度が過大、1 より小さいほど予測の「現象あり」の頻度が過小であることを示す。

B.3.9 気候学的出現率

現象の気候学的出現率 P_c は、標本から見積もられる「現象あり」の平均的な出現確率であり、次式で定義される。

$$P_c \equiv \frac{M}{N} \quad (0 \leq P_c \leq 1) \quad (\text{B.3.8})$$

この量は実況のみから決まり、予測の精度にはよらない。予測の精度を評価する際の基準値の設定にしばしば用いられる。

B.3.10 スレットスコア

スレットスコア (TS: Threat Score) は、予測または実況で「現象あり」の場合の予測適中事例数に着目して予測精度を評価する指標であり、次式で定義される。

$$TS \equiv \frac{FO}{FO + FX + XO} \quad (0 \leq TS \leq 1) \quad (\text{B.3.9})$$

出現頻度の低い現象 ($N \gg M$ 、したがって、 $XX \gg FO$, FX , XO となって、予測「現象なし」による寄与だけで適中率が 1 に近い現象) について XX の影響を除いて検証するのに有効である。本スコアは最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示す。なお、スレットスコアは現象の気候学的出現率の影響を受けやすく、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予測の精度を比較するには適さない。この問題を緩和するため、次項のエクイタブルスレットスコアなどが考案されている。

B.3.11 エクイタブルスレットスコア

エクイタブルスレットスコア (ETS: Equitable Threat Score) は、前項のスレットスコアが現象の気候学的出現率の影響を受けやすいため、気候学的な確率で「現象あり」が適中した頻度を除いて求めたスレットスコアであり、次式で定義される (Schaefer 1990)。

$$ETS \equiv \frac{FO - S_f}{FO + FX + XO - S_f} \quad \left(-\frac{1}{3} \leq ETS \leq 1\right) \quad (\text{B.3.10})$$

ただし、

$$S_f = P_c(FO + FX) \quad (\text{B.3.11})$$

である。ここで、 S_f は「現象あり」をランダムに $FO+FX$ 回予測した場合 (ランダム予測) の「現象あり」の適中事例数である。本スコアは、最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示す。また、ランダム予測で 0 となり、 $FO=XX=0$, $FX=XO=N/2$ の場合に最小値 $-1/3$ をとる。

B.3.12 スキルスコア

スキルスコア (Skill Score) は気候学的確率などによる予測の難易を取り除いて、予測の技術力を評価する指数であり、一般に次式のように定義される。

$$\text{スキルスコア} \equiv \frac{S_{\text{fcst}} - S_{\text{ref}}}{S_{\text{pfct}} - S_{\text{ref}}} \quad (\text{B.3.12})$$

ここで、 S_{fcst} , S_{pfct} , S_{ref} は、評価対象の予測・完全予測・比較の基準となる予測 (気候学的確率など) の各スコア (適中率) である。本スコアは、最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示し、比較の基準となる予測よりも精度が劣る場合、負の値となる。

代表的なスキルスコアは Heidke のスキルスコア (HSS: Heidke Skill Score) で、気候学的な確率で「現象あり」および「現象なし」が適中した頻度を除いて求める適中率であり、次式で定義される。

$$HSS \equiv \frac{FO + XX - S}{N - S} \quad (-1 \leq HSS \leq 1) \quad (\text{B.3.13})$$

ただし、

$$S = P_c(FO + FX) + P_x(XO + XX),$$

$$P_x = \frac{X}{N} \quad (\text{B.3.14})$$

である。ここで、 P_x は「現象なし」の気候学的出現率、 S は「現象あり」を $FO+FX$ 回 (すなわち、「現象なし」を残りの $XO+XX$ 回) ランダムに予測した場合 (ランダム予測) の適中事例数である。HSS は、最大値の 1 に近づくほど精度が高く、ランダム予測で 0 となり、 $FO=XX=0$, $FX=XO=N/2$ の場合に最小値 -1 をとる。前項のエクイタブルスレットスコアもスキルスコアの一つで、Gilbert Skill Score とも呼ばれている。

B.4 確率予測に関する指標など

B.4.1 ブライアスコア

ブライアスコア (BS: Brier Score) は、確率予測の統計検証の基本的指標である。ある現象の出現確率を対象とする予測について、次式で定義される。

$$BS \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - a_i)^2 \quad (0 \leq BS \leq 1) \quad (\text{B.4.1})$$

ここで、 p_i は確率予測値 (0 から 1)、 a_i は実況値 (現象ありで 1、なしで 0)、 N は標本数である。BS は完全に適中する決定論的な ($p_i=0$ または 1 の) 予測 (完全予測と呼ばれる) で最小値の 0 をとり、0 に近いほど予測の精度が高いことを示す。また、現象の気候学的出現率 P_c ((B.3.8) 式) を常に確率予測値とする予測 (気候値予測と呼ばれる) のブライアスコア BS_c は

$$BS_c \equiv P_c(1 - P_c) \quad (\text{B.4.2})$$

となる。ブライアスコアは、現象の気候学的出現率の影響を受けるため、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予測の精度を比較するのには適さない。例えば上の BS_c は P_c 依存性を持ち、同じ予測手法 (ここでは気候値予測) に対しても P_c の値に応じて異なる値をとる (Stanski et al. 1989)。この問題を緩和するため、次項のブライアスキルスコアが考案されている。

B.4.2 ブライアスキルスコア

ブライアスキルスコア (BSS: Brier Skill Score) は、ブライアスコアに基づくスキルスコアであり、通常気候値予測を基準とした予測の改善の度合いを示す。本スコアは、ブライアスコア BS、気候値予測によるブライアスコア BS_c を用いて

$$BSS \equiv \frac{BS_c - BS}{BS_c} \quad (BSS \leq 1) \quad (\text{B.4.3})$$

で定義され、完全予測で 1、気候値予測で 0、気候値予測より誤差が大きいと負となる。

B.4.3 ROC 曲線、ROC 面積、ROC 面積スキルスコア

現象の予測出現確率にある閾値を設定し、これを予測の「現象あり」「現象なし」を判定する基準とすることが可能である。様々な閾値それぞれについて作成した分割表を基に、閾値が変化したときの F_r - H_r 平面上の軌跡をプロットしたものが ROC 曲線 (ROC curve: Relative Operating Characteristic curve、相対作用特性曲線) である (図 B.4.1 参照、高野 2002 などに詳しい)。平面内の左上方の領域では $H_r > F_r$ であり、平面の左上側に膨らんだ ROC 曲線特性を持つ確率予測ほど精度が高いものと見なせる。したがって、ROC 曲線から下の領域 (図 B.4.1 灰色の領域) の面積 (ROCA: ROC

Area、ROC 面積) は、情報価値の高い確率予測ほど大きくなる。ROC 面積スキルスコア (ROCASS: ROC Area Skill Score) は、情報価値のない予測 ($H_r = F_r$) を基準として ROC 面積を評価するものであり、次式で定義される。

$$ROCASS \equiv 2(ROCA - 0.5) \quad (-1 \leq ROCASS \leq 1) \quad (\text{B.4.4})$$

本スコアは、完全予測で最大値の 1 をとる。また、情報価値のない予測 (例えば、区間 [0, 1] から一様ランダムに抽出した値を確率予測値とする予測など) では 0 となる。

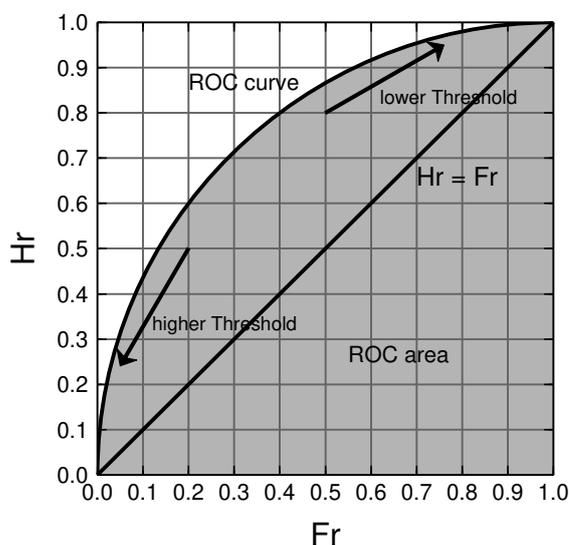


図 B.4.1 ROC 曲線の模式図。横軸は F_r 、縦軸は H_r である。灰色の領域の面積が ROC 面積である。

参考文献

- 北川裕人, 2005: 全球・領域・台風モデル. 平成 17 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 38-43.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Stanski, H. R., L. J. Wilson, and W. R. Burrows, 1989: Survey of common verification methods in meteorology. *Research Rep.*, **89-5**, Forecast Research Division, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 114 pp.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, **201**, 73-103.
- 氏家将志, 堀田大介, 黒木志洸, 2019: スペクトラルブロッキングの軽減. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 25-29.

梅津浩典, 室井ちあし, 原旅人, 2013: 検証指標. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 6-15.