

# 数値予報開発センター一年報

## 2024（令和6）年

令和7年3月  
March 2025

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行われ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<sup>1</sup>。

令和6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）及び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・大気汚染に関する解析・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。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検討されることを期待したい。

また、数値予報課では「数値予報解説資料集（以下、解説資料集）」を別途刊行している。解説資料集は「基礎編」「応用編」「事例解析編」「資料編」で構成され、数値予報に関する基礎知識から応用知識までを体系的に理解できるようにしている。解説資料集は気象庁のホームページに掲載されている<sup>2</sup>ので、数値予報について体系的に知りたい方は、まずは解説資料集からご覧になることをお勧めしたい。

計盛正博 数値予報モデル基盤技術開発室長

<sup>1</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/npdc\\_annual\\_report.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/npdc_annual_report.html)

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

# 数値予報開発センター年報

## 目次

|  |           |
|--|-----------|
| <b>第1章 数値予報開発センターの概要</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1 業務概要   | 1         |
| 1.2 沿革   | 2         |
| 1.3 組織   | 2         |
| <b>第2章 数値予報システムの概要と今後の開発計画</b>                               | <b>3</b>  |
| 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   | 11        |
| 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  | 12        |
| <b>第3章 数値予報システムの開発成果</b>                                     | <b>17</b> |
| 3.1 開発成果一覧   | 17        |
| 3.2 局地モデルの予報時間延長と力学・物理過程の改良                                  | 18        |
| 3.3 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 | 29        |
| 3.4 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                      | 33        |
| 3.5 局地モデルによる大雨発生確率ガイダンス                                      | 36        |
| 3.6 降雪量ガイダンスの改良  | 39        |
| 3.7 全球化学輸送モデルのオゾン同化における観測データの品質管理強化                          | 42        |
| 3.8 気候データ同化システムの観測データ利用拡充                                    | 44        |
| <b>第4章 数値予報システムの開発進捗</b>                                     | <b>47</b> |
| 4.1 全球モデルの開発進捗   | 47        |
| 4.2 全球アンサンブル予報システムの開発  | 55        |
| 4.3 メソモデルの物理過程改良に向けた開発                                       | 60        |
| 4.4 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                     | 67        |
| 4.5 観測データの新規導入と利用方法の改良                                       | 72        |
| 4.6 マルチモデル天気ガイダンス  | 91        |
| 4.7 季節アンサンブル予報システムの開発  | 95        |
| 4.8 波浪モデル  | 110       |
| 4.9 高潮モデル  | 112       |
| 4.10 日本沿岸海況監視予測システムの開発                                       | 114       |
| 4.11 線状降水帯予測の検証  | 116       |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| <b>第5章 成果発表</b>                       | <b>119</b> |
| 5.1 論文・報告                             | 119        |
| 5.2 国際会議・会合                           | 120        |
| 5.3 国内会議・会合                           | 122        |
| 5.4 数値予報課コロキウム                        | 123        |
| <b>第6章 連携・共同研究</b>                    | <b>125</b> |
| 6.1 気象研究所との開発連携                       | 125        |
| 6.2 気象衛星センターとの共同研究                    | 126        |
| 6.3 共同研究一覧                            | 127        |
| 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」 | 130        |
| <b>第7章 受賞・研究交流</b>                    | <b>135</b> |
| 7.1 受賞                                | 135        |
| 7.2 当センター共催研究会・研修                     | 135        |
| <b>第8章 委員・専門家等</b>                    | <b>136</b> |
| 8.1 国際機関の委員・専門家等                      | 136        |
| 8.2 国内機関の委員・専門家等                      | 137        |
| <b>付録A 略語表</b>                        | <b>138</b> |
| <b>付録B 本報告で使用了表記と統計的検証に用いる代表的な指標</b>  | <b>145</b> |
| B.1 本報告で用いた表記                         | 145        |
| B.2 統計的検証に用いる代表的な指標                   | 145        |
| B.3 カテゴリー検証で用いる指標                     | 146        |
| B.4 確率予測に関する指標など                      | 147        |

# 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<sup>1</sup>」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<sup>2</sup>」（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、次世代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、次世代ガイダンスを含む数値予報の様々な分野でのAIを活用するための技術開発支援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。

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、三十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、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、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チーム体制となった。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、大気汚染気象予測システムといった気候、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。

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

<sup>2</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/tecdev/nwp\\_strategic\\_plan\\_towards\\_2030.html](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。

## 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         |
|                | : 次世代 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、海況監視予測システム、高潮モデル、黄砂解析 予測システム、紫外線予測システム、大気汚染気象予測システム、二酸化炭素解析システムについて、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 2.14.4 項で述べる。

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およ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。システムの全体像については JMA (2024) 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 2025 年 1 月現在、水平解像度約 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。

GSM は 2023 年 3 月に水平解像度を約 20 km から約 13 km に強化するとともに、高解像度化に合わせた力学過程の改良、物理過程の改良 (地形性抵抗、非地形性重力波、放射過程、湖の扱い等)、標高オリジナ

ルデータセットの更新を行った (気象庁 2024a)。また、全球データ同化システムにおける積雪深解析を 1 日 1 回から 4 回に高頻度化するとともに、米国の極軌道衛星 Suomi-NPP や NOAA-20 搭載の可視赤外イメージャ VIIRS から算出された極域の大気追跡風 (AMV) の利用 (気象庁 2024d) や、ハイパースペクトル赤外サウンダ (Metop 搭載の IASI 及び NOAA-20 搭載の CrIS) の水蒸気に感度のある観測チャンネルの利用を開始した (気象庁 2024c)。次いで、2023 年 5 月には AMV、晴天放射輝度温度 (CSR) について、GOES-17, Meteosat-11 から GOES-18, Meteosat-10 への切り替えを行い、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 CrIS による輝度温度観測データの新規利用を開始した。

2024 年度中に、全球モデルおよび 4 次元変分法の並列化手法の更新による高速化、物理過程 (放射過程・陸面過程等) 改良の現業導入を計画している。詳細は第 4.1 節を参照頂きたい。

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とともに、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 の水平解像度を 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共に、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 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 である。2025 年 1 月現在、18 日予測までは水平解像度約 27 km、それより先の 34 日目までは約 40 km と、予報時間の途中で解像度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。

2022年3月に、GEPSの数値予報モデルについて、いくつかの改良をGSMに先行して適用したが(気象庁2023)、モデルの非地形性重力波過程の改良、地形オリジナルデータセット更新などはGEPSに未適用であった。2023年3月の更新では、これらの改良をGSMと合わせて行うとともに、海面水温(SST)について、2022年3月に熱帯域において実施した2段階SST法(高倉・小森2020)の改良を全球域に拡張して適用した(気象庁2024b)。

2024年度中に、モデルアンサンブル手法の改良として確率的水蒸気プロファイル参照法(SHPC;第4.2.2項参照)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を適用した改良の現業導入を計画している。

今後もGSMの改良と共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(2024)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2025年1月現在、水平解像度5km、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。

2023年3月に、日本域の地上気象観測(SYNOP)およびアメダス観測による湿度データ、及び、欧米の極軌道衛星に搭載されたハイパースペクトル赤外サウンダ

の新規利用を開始し、船舶搭載GNSS観測装置による可降水量データの品質管理処理の改良を行った。また、メソ解析における積雪分布初期値作成において、日本域を除く領域で使用する全球積雪深解析を、高解像度化・高頻度化した全球積雪深解析へ変更する改良を行った。更に、気象レーダーの更新に伴い、ドップラー速度、及び、反射強度データの利用を一時休止し、品質に問題ないことを確認した上で、2023年11月に沖縄・松江の利用を再開した。さらに、2024年3月の第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(第3.3節,第3.4節)。2024年6月には、新凌風丸船舶GNSS観測データ利用、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。

2024年度末には、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計画している。また、2025年度初旬には、局地モデルに導入済みの地形効果や高速化等をMSMに導入する更新を計画している。

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、GPU利用、単精度化等による高速化も重要な課題である。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晴天放射輝度温度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、2025年1月現在の水平解像度は5km、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。

2023年3月に確率的な予測の精度向上を目指し、初期値・側面境界値の摂動に加え、モデル由来の摂動を考慮するため確率的物理過程強制法（SPPT法）を新たに導入した。2025年度初旬には、MSMの更新に合わせて、MEPSで用いるメソモデルの更新を計画している。

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2025年1月現在、水平格子間隔2km、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ト同化を行っている。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3章、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（第3.2節、第3.3節、第3.4節）。また、2024年11月には、気象レーダー更新に関して

新潟・名瀬・鹿児島レーダーの利用を再開した。

2024年度末には、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等の観測データ利用高度化を計画している。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の改善のための高解像度化を行い、1km程度の水平解像度による予測を達成できるように開発を進めている。

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、令和5年度に引き続いて全国を予報領域とした水平解像度1kmのモデルのリアルタイムシミュレーション実験を、実行頻度を1日2回から4回に増加して2024年6月6月から10月にかけて実施し、高解像度化（現行2kmから1kmへ）に伴う特性変化の把握や計算安定性の確認等を行った。「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。LEPSの開発の方向性として、計算機資源の増加にあわせて、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計画である。

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いる。「富岳」を用いたLEPSの方向性評価の結果をもとに、2025年度末時点で利用可能な計算資源等を踏まえた構成として、水平解像度2km、21メンバーのシステムを2025年度末を目標に構築する計画で開発を進めている。

## 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。2025年1月現在、LFMを第一推定値とする2kmの水平解像度、鉛直76層（地上～約21.6km）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。気象レーダーの更新に伴い、ドップラー速度、及び、反射

強度データの利用を一時休止し、品質に問題ないことを確認した上で、2023年11月には沖縄・松江のレーダーの利用を、2024年11月には新潟・名瀬・鹿児島  
のレーダーの利用を再開した。

## 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, 2024: *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/outline2024-nwp/pdf/outline2024-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, 2023: 全球アンサンブル予報システム. 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, 40–41.
- 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: ハイパースペクトル赤外サウンド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, 2024d: 全球解析における大気追跡風 (AMV) の利用拡充. 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, 53–55.
- 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](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](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](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.
- 高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2段階 SST 法の詳細と導入事例紹介. 令和2年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, **32**, 2–8.
- 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（R06～R10）

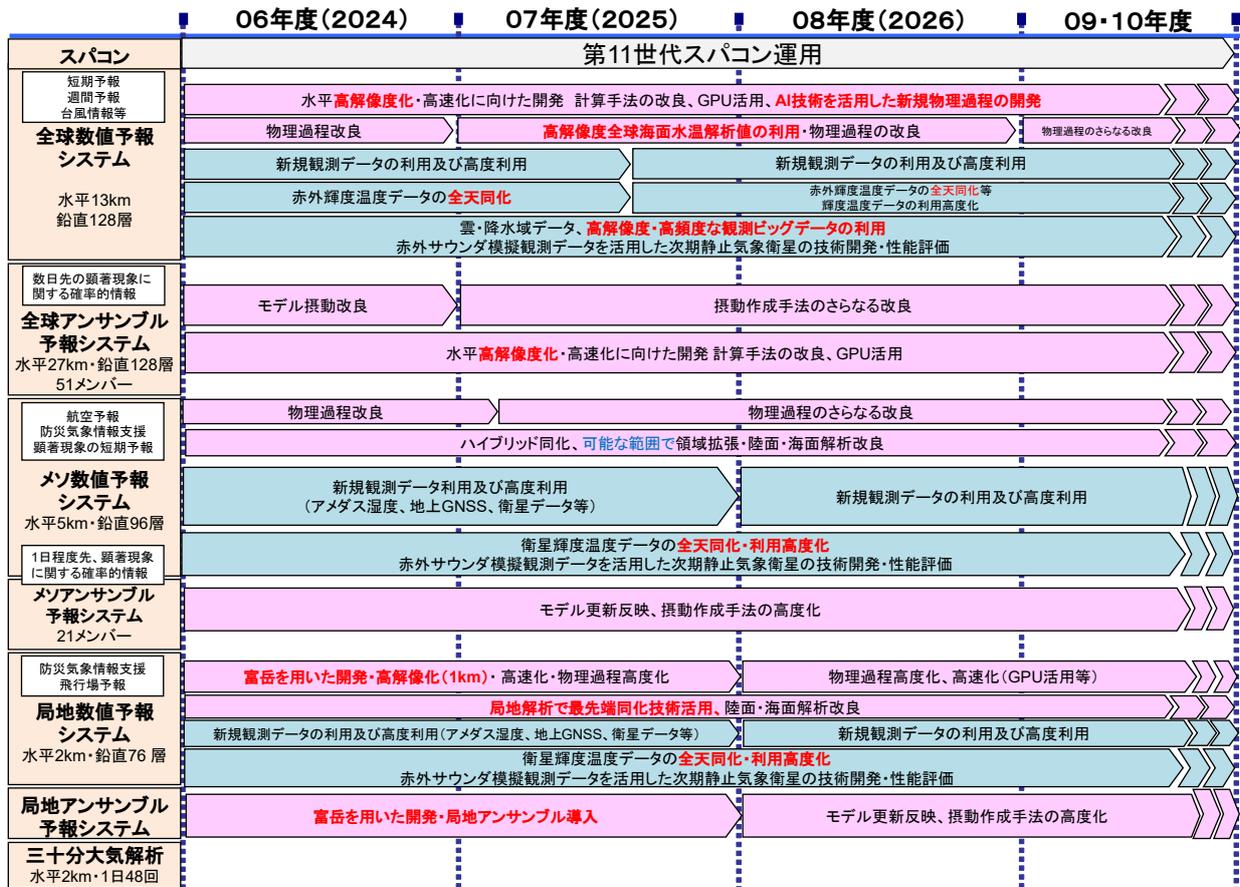


図 2.7.1 数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析)

## 2.8 短期予報ガイダンス

### 2.8.1 はじめに

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

ガイダンスは、数値予報の応用プロダクトの一つであり、数値予報で出力される地上気温や風など様々な予測値を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。現在、ガイダンスについては、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ダンスと、複数のガイダンスやモデルの出力値等を統合して単一のガイダンスを作成するマルチモデルガイダ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 ガイダンス

ガイダンスは、数値予報モデルの系統誤差等を、統計的な手法により補正して軽減することにより、予測精度を向上させるものである。ガイダ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ダ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ダ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ダ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 5 年度末に予報時間が 18 時間に延長され、ガイダ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 の降雪量ガイダンスについて計算手法の改良(第 3.6 節)を実施した。

その他、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(令和 7 年 1 月予定)に伴う対応、さらに令和 7 年 4 月から大阪・関西万博で計画されている「空飛ぶクルマ」の運行を支援するための飛行場予報(TAF)ガイダンス開発にも取り組んでいる。飛行場雲ガイダンスについては、低シーリング予想が過大なバイアスを軽減する改良を令和 6 年 5 月に実施した。

気象庁の様々な情報発信に資するため、新たなガイダンスの開発も実施している。令和 4 年 6 月には MSM および MEPS の予測情報をベースとした大雨発生確率ガイダンス(特別警報級の大雨確率メッシュ情報)の運用を開始した。これは、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」に記載されている「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」に応じて開発したものである。さらに、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ダンスについても必要性が認識され、令和 6 年 5 月より部内試験運用を開始して評価を行っている。

近年注目されている線状降水帯については、その発生予測に資するため、「線状降水帯の発生確度」を開発し、令和 4 年 6 月より部内での試験運用を実施している。本プロダクトについては継続的に改良を実施していく必要があり、引き続き、その予測性能や予測特性等を確認中である。

### 2.8.3 マルチモデルガイダンス

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、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、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・

|                |                             | 令和6年度                 |       |                    |             | 令和7年度  |         |             |      |
|----------------|-----------------------------|-----------------------|-------|--------------------|-------------|--------|---------|-------------|------|
|                |                             | R6Q1                  | R6Q2  | R6Q3               | R6Q4        | R7Q1   | R7Q2    | R7Q3        | R7Q4 |
| 観測システム<br>変更対応 | アマダ地点変更                     | (随時対応)                |       | 名瀬・花巻              | (随時対応)      |        |         |             |      |
|                | 航空気象観測完全自動化                 | ■ 屋久島、津水良部、久米島他       |       | (随時対応)             |             | (随時対応) |         | (随時対応)      |      |
| プロジェクト<br>対応   | 線状降水帯予測                     | LFM大雨発生確率ガイダンス        | ルーチン化 | 調査・開発 (LFM高解像度化対応) |             |        | 改修・精度評価 |             | ル変   |
|                |                             | LFM降水ガイダンス            |       | 調査・開発 (LFM高解像度化対応) |             |        | 改修・精度評価 |             | ル変   |
|                |                             | LEPSガイダンス (降水・大雨発生確率) |       | 調査・開発              |             |        | 改修・精度評価 |             | ル変   |
|                | 大阪・関西万博用TAFガイダンス            |                       |       | 環境構築 (学習・試行運用)     | 運用          |        |         |             |      |
|                | WAFSプロダクト改訂 (ICAO第3別属書改正対応) | SIGWX回                | 開発    |                    | ル変(構造様式変更等) | 開発     |         | ル変(データ形式変更) |      |
|                |                             | WINTEM図               | 開発    |                    |             |        |         |             |      |
|                | HWIS (悪天情報サービス) データ開発       | 調査                    |       |                    | 開発          |        |         | プロトタイプ内共有   |      |
| モデル改良<br>対応    | 全球モデル系更新対応                  |                       |       |                    | 精度評価        |        |         |             |      |
|                | メソモデル系更新対応                  |                       |       |                    | 精度評価        |        |         |             |      |
|                | LFM高解像度化対応 (降雲量、風、気温、視程)    |                       |       |                    |             |        | 改修・精度評価 | ル変          |      |

図 2.8.1 ガイダンス開発計画

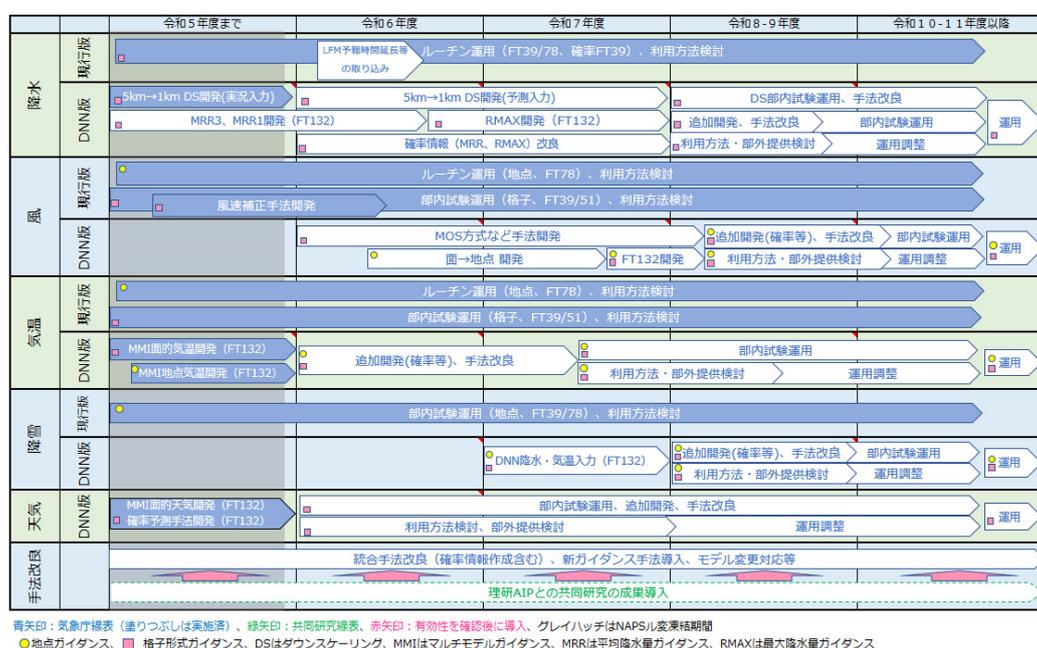


図 2.8.2 マルチモデルガイダンス開発計画

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<sup>1</sup>と題して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、各モデルのガイダ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: Deep Neural Network) 技術を用いて統合することにより、ガイダ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)。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 年頃の導入を目指すとしている。

DNN 技術を用いたガイダンスについては上記の各種気象要素のみならず、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。

### 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.

<sup>1</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/press/2306/30b/20230630\\_ai.html](https://www.jma.go.jp/jma/press/2306/30b/20230630_ai.html)

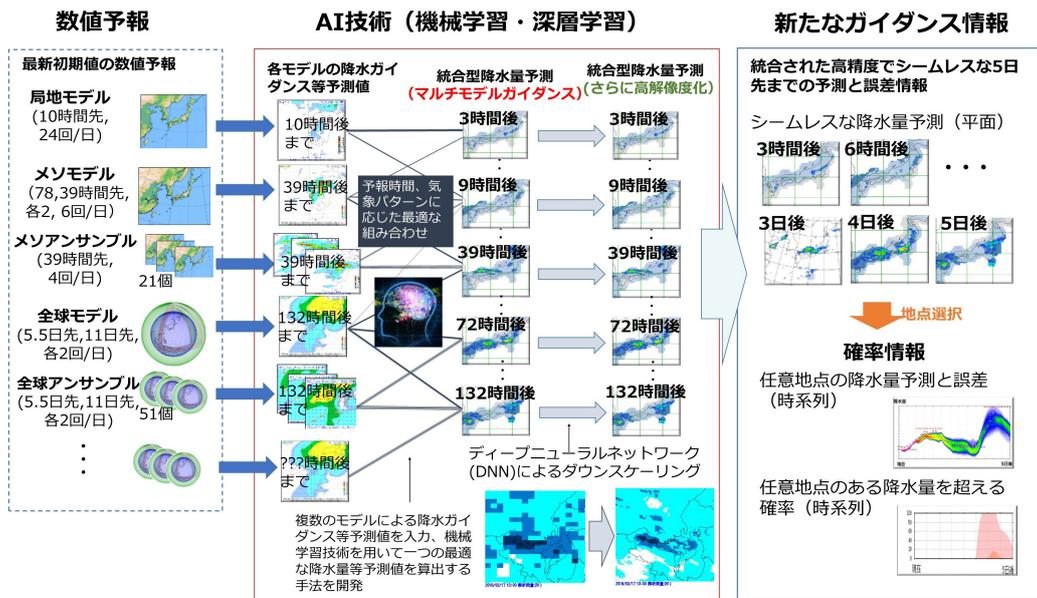


図 2.8.3 マルチモデルガイダンスの模式図

Kudo, A., 2022: Statistical Post-Processing for Gridded Temperature Prediction Using Encoder-Decoder-Based Deep Convolutional Neural Networks. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 219–232.

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 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<sup>1</sup>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<sup>2</sup>）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。

2024 年度は、2025 年度の季節 EPS 更新に向けて、大気モデルの鉛直高解像度化（128 層）、オゾンの予報変数化、雲スキームや積雪過程などの物理過程の改良、摂動作成手法の改良、高速化などの開発と評価を進めている。また、次期季節 EPS は 1 か月予報支援の役割を全球アンサンブル予報システム (GEPS) から引き継ぐ計画であり、プロダクト構成などの検討・調整も進めている。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結合化に向けた調査開発を進め、階層的<sup>3</sup>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。

<sup>1</sup> 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。

<sup>2</sup> 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。

<sup>3</sup> 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。また、2009 年時点の現業システムを基にした「気象庁第 2 次長期再解析 (JRA-55)」(Kobayashi et al. 2015) と同じ仕様のシステム（水平分解能 55 km、鉛直層数 60 層）は、2024 年 1 月まで運用した。

JRA-3Q は、北西太平洋以外の領域における熱帯低気圧解析の品質改善のための再計算（2013 年 5 月～2021 年 12 月）を含む 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。

2024 年度は、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 8 月に実施した。気象庁クラウドからの JRA-3Q 詳細データセットの提供を 2025 年 3 月末頃から開始すべく準備を進めた。また、第 6 回世界気候研究計画 (WCRP) 再解析国際会議を WCRP、気象庁、地域気象データと先端学術による戦略的社会共創拠点 ClimCORE、東京大学の共催により 2024 年 10 月 28 日から 11 月 1 日の日程で開催した。本会議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・検討に着手した。

## 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 (2024) 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。

2024 年度は、新規衛星観測データ利用、単精度化や格子系の改良等による高速化、全球・沿岸波浪モデル用の台風ボーガスの改良に向けた開発などを進めた。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、沿岸波浪モデルについては、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の運用を目標として水平高解像度化（5 km から 1.7 km へ）や高頻度化（4 回/日から 8 回/日へ）を計画している。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の陸域の影響による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。

2024 年度は、日本域高潮モデルの台風ボーガス起動条件について、00, 12UTC 以外の初期時刻についても 00, 12UTC と同様に、台風が 78 時間先までに日本沿岸に接近する場合とする変更を 10 月に導入した。また、アジア域高潮モデルの台風ボーガスについて、予報時間の途中で台風でなくなる場合に台風ボーガスを緩やかに消すよう変更する開発などを進めており、2024 年度末の導入を目指している。他にも、単精度化や格子系の改良等による高速化、vortex relocation による台風ボーガスの改良、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、日本域高潮モデルの高速化とそれに伴う高解像度化については 2027 年度、vortex relocation によ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。

2024 年度は、本システムの 2024 年度末の改良を目指し、数値計算の安定性向上や新しい衛星 (Sentinel-6 Michael Freilich) による海面高度データの利用に向けた開発を進めた。また、新しい衛星 (SWOT) の海面高度データ利用に向けた開発や、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、特別予測値の提供を念頭においた評価・検証なども進めている。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ロゾルの 3 次元分布から計算したエロゾル光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness, AOT) と気象衛星ひまわりの観測データからリトリーブされた 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、エロゾルの予測精度向上が求められている。

2024 年度は、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、ひまわりエロゾルプロダクト (可視・近赤外) に含まれる時間に依存するバイアスについての調査を行った。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) でナッジング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 JMA (2024) 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。

2024 年度は、システムの継続運用のための定数更新、観測データの品質管理へのグロスエラーチェックの導入、観測データの解像度変換処理の見直し、次期季節 EPS にオゾン初期値を提供するための出力追加等の変更を 11 月に導入した。また、データ同化手法の高度化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いる。本システムのモデルは、気象研究所で開発された領域化学輸送モデル asuca-Chem (Kajino et al. 2022) を基にしており、2023 年 2 月より水平分解能 5 km、鉛直層数 19 層のモデルを日本周辺を対象とした領域で運用している。それ以前は、NHM-Chem (Kajino et al. 2019, 2021) を基にした東アジア域を対象とするモデル (水平分解能 20 km、鉛直層数 18 層) と asuca-Chem を基にした東日本域・西日本域を対象

とするモデル (水平分解能 5 km、鉛直層数 19 層) で構成されるシステムによる運用であったが、単一のモデルによる運用となったことで維持管理コストの削減につながっている。データ同化として、即時的に利用可能な環境省大気汚染物質広域監視システムによる地上観測オゾン濃度データでナッジング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、池上ほか (2015) などを参照頂きたい。

大気汚染気象予報業務は 2025 年 1 月末に終了する計画である。大気汚染気象予測システムは他に用途がないことから、同業務終了後に運用を終了する計画である。

#### 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。

2024 年度は、気象研究所の支援により NAPS11 への移植作業と運用マニュアル作成が進められた。温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT による CO<sub>2</sub> 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-Climote 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 assimilation 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: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>.
- 池上雅明, 鎌田茜, 中務信一, 2015: 大気汚染気象予測モデル. 量的予報技術資料 (平成 26 年度予報技術研修テキスト), 133–140.
- JMA, 2024: *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/outline2024-nwp/index.htm>).
- Kajino, M., A. Kamada, N. Tanji, M. Kuramochi, M. Deushi, and T. Maki, 2022: Quantitative influences of interannual variations in meteorological factors on surface ozone concentration in the hot summer of 2018 in Japan. *Atmospheric Environment: X*, **16**, 100191, doi:10.1016/j.aeaoa.2022.100191, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590162122000454?via%3Dihub>.
- Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, A. Takami, A. Shimizu, S. Hatakeyama, Y. Sadanaga, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, and M. Mikami, 2019: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's Regional Meteorology – Chemistry Model: Model Evaluations toward the Consistent Predictions of the Chemical, Physical, and Optical Properties of Aerosols. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 337–374, doi:10.2151/jmsj.2019-020.
- Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, P. Khatry, A. Shimizu, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, and M. Mikami, 2021: Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. *Geosci. Model Dev.*, **14**, 2235–2264, doi:10.5194/gmd-14-2235-2021, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/14/2235/2021/>.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- 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, 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 CO<sub>2</sub> Flux Inversion. *SOLA*, **19**, 157–164, doi:10.2151/sola.2023-021.
- Nakamura, T., T. Maki, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, and Y. Niwa, 2015: Improvement of Atmospheric CO<sub>2</sub> 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.

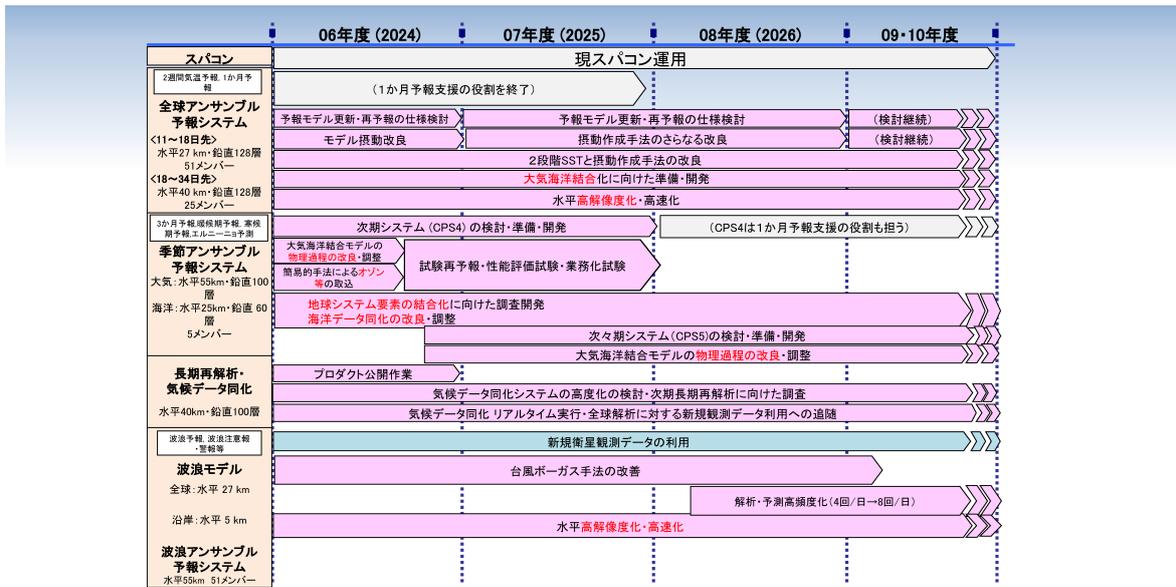


図 2.14.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデルの開発計画

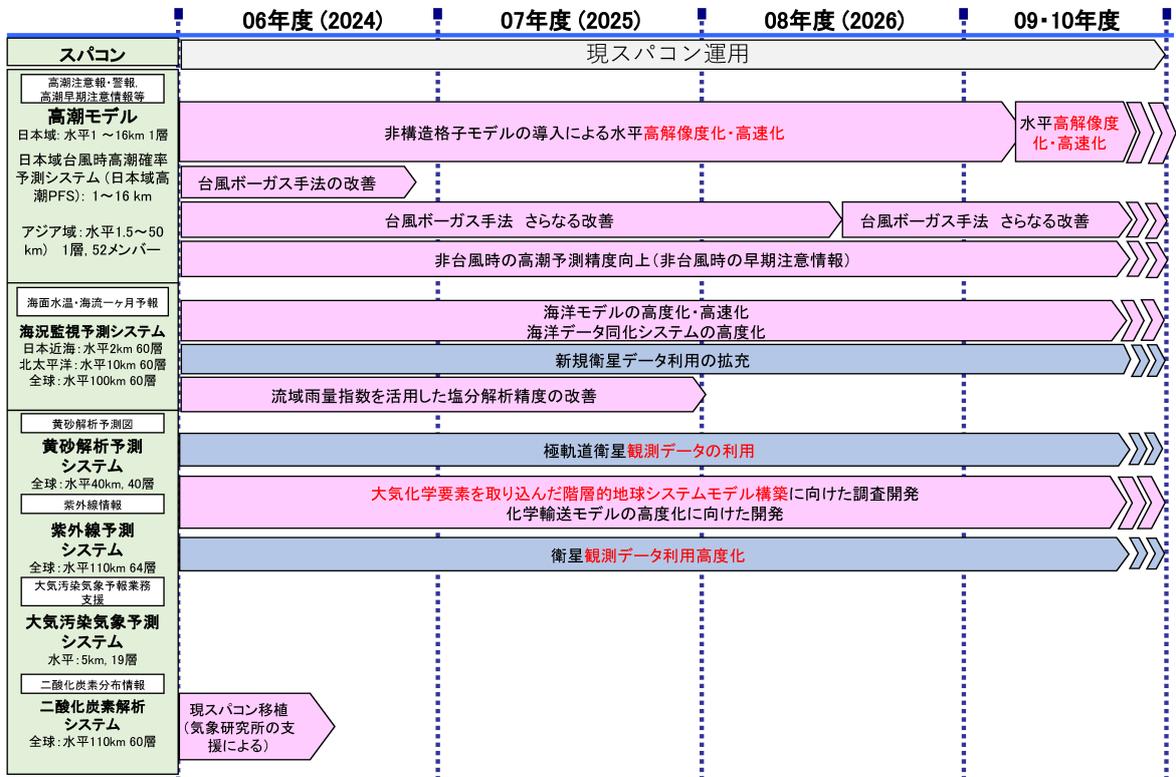


図 2.14.2 高潮モデル、海況監視予測システム、物質循環システムの開発計画

## 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 2024 年 1 月から 2024 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 | 局地モデルの予報時間延長と力学・物理過程の改良                                  | 3月5日   |
| 3.3 | 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 | 3月5日   |
| 3.4 | メソ解析および局地解析における地上設置マイクロ波放射計観測データの新規利用                    | 3月5日   |
| 3.5 | 局地モデルによる大雨発生確率ガイダンス                                      | 5月28日  |
| 3.6 | 降雪量ガイダンスの改良  | 12月17日 |
| 3.7 | 全球化学輸送モデルのオゾン同化における観測データの品質管理強化                          | 11月13日 |
| 3.8 | 気候データ同化システムの観測データ利用拡充                                    | 8月20日  |

## 3.2 局地モデルの予報時間延長と力学・物理過程の改良

### 3.2.1 はじめに

局地数値予報システムは、時空間スケールの細かな現象の予測を迅速に提供することを目的として、水平格子間隔 2 km, 10 時間予報のシステムとして運用しており、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な基盤モデルと位置づけられている。局地モデルは、「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」において、線状降水帯による大雨に対する半日程度前からの予測等、豪雨防災を支援するため、予報時間の延長や高解像度化等を計画している。こうした計画の下、2024 年 3 月には、局地モデルの予測時間を 18 時間に延長するとともに、力学過程・物理過程の改良を行った。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。

### 3.2.2 局地モデルの予報時間延長

局地モデルは、2014 年に 9 時間先までの予測を提供するモデルとして運用を開始した後、2019 年に予測時間を 10 時間に延長した。また、2024 年 3 月から、1 日 24 回の局地モデルの予測のうち 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC を初期値とする 8 初期値について、予測時間を 18 時間に延長した。

### 3.2.3 局地数値予報モデル改良の概要

本項では、2024 年 3 月に更新した局地モデルの変更の概要と、個々の変更を適用した場合の予測特性の変化を報告する。今回の変更では主に以下の 5 つの変更を行った。

- 力学過程において、split-explicit 法で用いる短い時間積分間隔 (松林ほか 2014) について、Wicker and Skamarock (2002) の 3 段の Runge-Kutta 法から SSP-RK 法 (Shu and Osher 1988) に変更
- 雲物理過程において、ライミング<sup>1</sup>による雪からあられへの変換過程の定式化を変更
- 雲物理過程において、拡散成長における潜熱補正係数を廃止し、インプリシット化
- 放射過程において、水雲の長波に関する光学特性診断式を変更
- 線状降水帯予測スーパーコンピュータ向け高速化  
これらについて、それぞれ内容およびインパクトについて述べる。

#### (1) SSP-RK 法の導入

asuca (Ishida et al. 2022) では、音波や重力波を安定に解くために split-explicit 法を用いており、通常の時間積分とは別に、音波・重力波の関連項のみを対象として短い時間積分間隔を用いた積分 (以下、短い時

間積分) を行っている。短い時間積分では、水平方向には陽解法、鉛直方向には陰解法を用いている<sup>2</sup>。

これまでは、通常の時間間隔での積分と短い時間積分に Wicker and Skamarock (2002) の 3 段 Runge-Kutta 法 (以下、WS02) を用いており、ある物理量  $f$  を時間積分する際に、 $df/dt = \varphi(f)$  として、次のような 3 段階での時間積分を行っていた。

$$\begin{aligned} f^{(1)} &= f^n + \frac{\Delta t}{3} \varphi(f^n) \\ f^{(2)} &= f^n + \frac{\Delta t}{2} \varphi(f^{(1)}) \\ f^{n+1} &= f^n + \Delta t \varphi(f^{(2)}) \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

ここで、上付き添字の  $n, n+1$  はタイムステップ  $n, n+1$  における値であり、(1), (2) は  $n, n+1$  間の仮積分値、 $\Delta t$  は時間積分間隔である。(3.2.1) 式からわかるように、WS02 では複数の段階の仮積分値を保持しておく必要がなく使用メモリ量が少ない、実装がわかりやすい、といったメリットがある。時間方向の精度は基本的には 2 次精度で、 $\varphi$  が  $f$  について線形の問題については 3 次精度となるという特徴を持つ。

一方で、短い時間積分では、音波等の相対的に重要でない項を解いており、計算精度よりも計算速度や計算安定性を重視するほうが総合的なメリットがありうる。そこで、以下の 3 段 2 次の SSP-RK 法 (Shu and Osher 1988) を導入した (Kimura et al. 2024)。

$$\begin{aligned} f^{(1)} &= f^n + \frac{\Delta t}{2} \varphi(f^n) \\ f^{(2)} &= f^{(1)} + \frac{\Delta t}{2} \varphi(f^{(1)}) \\ f^{n+1} &= \frac{1}{3} f^n + \frac{2}{3} f^{(2)} + \frac{\Delta t}{3} \varphi(f^{(2)}) \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

この手法は、時間方向には 2 次精度となり WS02 より精度は低いものの、WS02 よりも一般に計算安定性が高い。また (3.2.2) 式からわかるように、積分に必要な段数や使用メモリ量には変化がない。

新たに導入する SSP-RK 法の計算安定性を確認するため、asuca において短い時間積分が対象とする移流項と気圧傾度項について、水平 1 次元の浅水波方程式を用いて安定性解析を行った。asuca の移流スキームでは空間 3 次精度と 1 次精度の上流差分を組み合わせた Koren の流速制限関数を用いている。Ishida et al. (2022) の Appendix C と同様に、この組み合わせについて線形安定性解析を行ったところ、WS02 ではクーラン数 (CFL) がそれぞれ 1.61 および 1.25 まで安定であるのに対し、SSP-RK 法ではそれぞれ 1.25 および 2.0 まで安定であることが確認できた。CFL は値の小さい方による制約を受けるため、WS02 と SSP-RK 法

<sup>1</sup> 過冷却水滴が氷晶や雪片と衝突して、氷晶や雪片の質量が増加する過程。

<sup>2</sup> 水平方向のみ CFL 条件が満たされれば良い。鉛直方向では、モデル下層で格子間隔が小さく、CFL 条件を満たすことは現実的ではないため、陰解法を用いている。

は移流項に対してほぼ同程度の安定性であると言える。図 3.2.1 は気圧傾度力項についての安定性解析の結果で、横軸が波数、縦軸が CFL、シェード領域が不安定な領域である。WS02 が 1.06 程度で不安定になるのに対し、SSP-RK 法では 1.73 程度まで安定であることが確認でき、気圧傾度力項については SSP-RK 法の方が安定であることがわかった。このように、線形化した方程式系において SSP-RK 法のほうが WS02 より安定であることが解析的に示された。また、非線形なフルモデルである実事例を対象として、短い時間積分に関する CFL を変えながら計算を行ったところ、WS02 では CFL=1.0 程度までしか安定に積分できなかつたのに対し、SSP-RK 法では CFL=1.3 程度まで安定に積分できることも確認した。

## (2) 雪からあられへの変換の定式化の変更

局地モデルの雲物理過程は、LFM2303(気象庁 2023)において新しい雲物理スキームに更新した。この更新により、見逃し率の減少等の降水予測精度の改善が得られた一方で、レーダーシミュレータ検証の結果から、観測と比べてあられが過大となることが課題として残っていた。また、あられが生成される格子点で雪からあられへの変換過程を起因とする水物質混合比の数値振動が起きていることも確認された。これらの課題の解決を目指して、雪からあられへの変換について、定式化の見直しを行った。

雪がライミングにより密度を増してあられになる過程について、LFM2303 では Murakami (1990) に基づく定式化を用いた変換量と、Connolly et al. (2006) による発動条件により、時間変化率を計算している。この手法は、LFM2303 以前で利用していた雲物理スキームと比べて時間変化率が大きな値を取りやすくなっており、また、雪の量による一定の閾値を超えた場合のみ雪からあられへの変換が起こる定式化となっている。このことから、

- ライミングによって雪が成長して雪の量が増加する。
- 雪の量がしきい値を上回り、変換過程が発動。雪からあられへの変換が起こり、この時間変化率がライミングのそれを上回るため雪が減少に転じる。
- 雪の量がしきい値を下回り、変換過程が発動しなくなる。

というサイクルが繰り返され、時間変化率が振動していることが明らかになった。そこで、変換量についても Connolly et al. (2006) の定式化を用いるように変更した。この変更により、雪からあられへの変換量が減少することが期待できる。

以下に、LFM2303 に本変更を適用した際の予測への影響について示す。以下、LFM2303 設定の実験をコントロール (CNTL)、本変更を適用した設定の実験をテスト (TEST) と表記する。

図 3.2.2 は、2021 年 7 月 1 日 18UTC 初期値の実験結果について、地上レーダー (名瀬) の反射強度と、レーダーシミュレータによって算出した反射強度を比較した結果である。CNTL では融解層より上層に、過大なあられに対応する過大な反射強度がみられるが、TEST では緩和されていることがわかる。

図 3.2.3 は、1 格子点における水物質混合比および時間変化率の毎タイムステップの時系列と、CNTL の実験途中で設定を TEST に変更しリスタート実行した際の結果である。CNTL では、雪とあられの混合比および時間変化率がタイムステップ毎に振動している様子が見られる。一方、実験途中で設定を TEST に変えた実験では、CNTL でみられるような混合比とその時間変化率の振動が抑制されていることがわかる。

## (3) 雲物理過程の拡散成長における潜熱補正の変更

潜熱補正係数は、相変化に伴う熱の出入りに伴い飽和水蒸気量等の場が変化する効果を考慮することで、雲物理過程の素過程の時間変化率が抑えられる効果を考慮するための補正係数であるが、定式のインプリシット化によっても同様の効果が得られる<sup>3</sup>。以前の雲物理過程では、昇華・蒸発・融解のプロセスには、この潜熱補正とインプリシット化が同時に適用されて時間変化率が過剰に抑制されており、LFM2303 で新しい雲物理過程に更新した際にこの潜熱補正を廃止した。一方、拡散成長については、インプリシット化がなされていなかったため、今年度の開発では、計算安定性を向上させるためにインプリシット化を行い、それに伴って潜熱補正を廃止した。

図 3.2.4 はある大気プロファイルを入力とした際の、拡散成長の時間変化率を比較した結果である。前述の通り、潜熱補正は相変化に伴い場が変化する効果を見込んだ補正であることから、積分時間間隔を短くして、場を逐次更新してイクスプリシットに計算することで、潜熱補正を用いなくても精度良く計算することができる。このような形で計算した結果をここではリファレンスとする。変更前はリファレンス (潜熱補正を適用せず、時間積分間隔を短くしたもの) と比較してピークの位置、分布が異なっており、潜熱補正はこの点で適切でないことがわかる。緑は潜熱補正のみ除去したもので、ピークや分布はリファレンスに近づいているが、過大な時間変化率が計算されている。赤は補正を廃止してインプリシット化したもので、やや過小評価となっているものの、過大な時間変化率は計算されなくなり、ピークの位置、高度もリファレンスに近づいており、適切に時間変化率が計算できるようになっていることがわかる。

<sup>3</sup> 計算安定化のためインプリシットに解いた場合に、一般にイクスプリシットの場合と比べて時間変化率が小さく評価される (荒波ほか 2012)

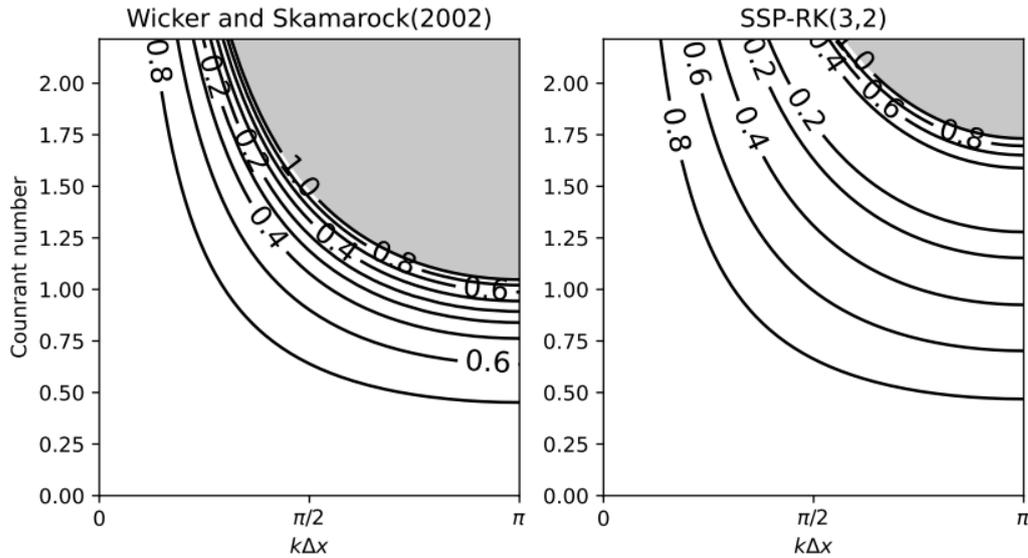


図 3.2.1 水平 1 次元の浅水波方程式における気圧傾度力項について asuca の離散化を適用した場合の増幅率。横軸は波数、縦軸はクーラン数でシェード領域は増幅率が 1 以上、すなわち不安定な領域を示している。左：WS02, 右：SSP-RK 法。

#### (4) 水雲粒に関する長波質量吸収係数診断式の変更

局地モデルにおいては、放射に対する雲の影響を考慮するため、雲粒の有効半径から吸収係数などの光学特性を診断している。これまでは、長波に対する水雲の吸収係数として、Hu and Stamnes (1993) に基づく定式化を利用していたが、より新しく定式化がシンプルな Lindner and Li (2000) の定式化を採用した。これは GSM の放射過程で用いられているものと同じである。Lindner and Li (2000) は、Hu and Stamnes (1993) と比較して、

- 精度はほぼ同じ
- 診断式の係数が水雲有効半径によらないため、パラメータの数が少ない
- 指数関数を使わないため、計算コストが低い

という特徴がある。また、これまでは吸収係数の代わりに消散係数の値が用いられており、吸収係数が過大評価されている実装上の問題があり、今回の変更にあわせて修正した。

図 3.2.5 は、大気上端での外向き長波放射 (OLR:Outgoing Longwave Radiation) および地上での下向き長波放射の変更前後での差分である。修正前に比べて吸収係数が減少するため、水雲による吸収・射出が減ることで上向きの長波放射フラックスが増加し、下向きの長波放射フラックスが減少する。そのため、OLR は増加し、地上の下向き長波放射は減少する。

#### (5) 線状降水帯予測スーパーコンピュータ向け高速化

2025 年度末の現業化を計画している水平解像度 1km の局地モデルは、スーパーコンピュータ「富岳」における政策対応枠も利用して開発を行っている。「富岳」は線状降水帯予測スーパーコンピュータと同じアーキテ

クチャを採用しており、「富岳」での開発成果は、容易に線状降水帯予測スーパーコンピュータに導入できるメリットがある。「富岳」での開発において、NAPS10 や NAPS11 と比較して物理過程、特に雲物理過程の実行性能が低いことが分かった。雲物理過程において指示行により高速な数学関数を適用することで、全体の 7% 程度の高速化が得られることが分かったため、LFM2403 への更新時に導入した。

#### 3.2.4 予測特性の評価

前項の改良による予測特性の変化を調べるために行った試験の結果を示す。ここでは、改良前のルーチン相当の設定で予測時間を 18 時間に延長したものをコントロール (CNTL) とし、上で述べた局地数値予報システムの改良を適用した実験をテスト (TEST) とした実験結果を示す。実験期間は、夏期間は 2023 年 6 月 28 日から 7 月 12 日まで、冬期間は 2023 年 1 月 1 日から 1 月 7 日および 1 月 23 日から 1 月 30 日までである。1 日 8 回の実行を行ったため、それぞれ 120 事例を実験の対象としている。

図 3.2.6 は、夏期間における閾値毎の降水についての対解析雨量の検証結果である。バイアスコアでは、TEST は CNTL に対して 5 mm/3h 以下では降水頻度が増大し、30 mm/3h 以上では降水頻度が大幅に減少していることを示している。また、10 mm/3h から 40 mm/3h の空振り率は有意に低下し、20 mm/3h までの見逃し率も有意に低下している。これらに対応して 40 mm/3h までのエクイタブルスコアは優位に改善している。夏期間の強雨予測頻度の低下は、主に雲物理過程の改良による。これは、雪からあられへの変換過程の改良により、あられが減少して雪が増加

し、落下速度が小さくなることで局所的な強雨が軽減されたこと、拡散成長の修正により雲氷・雪の成長が促されるため、弱～中程度の雨が多くなる傾向があることによると考えられる。また、SSP-RK法の導入も強雨予測頻度の低下に寄与していることを確認している。

図3.2.7は、冬期間における閾値毎の降水についての対解析雨量の検証結果である。TESTはCNTLに対して、降水頻度がやや過大となり、空振り率が増加することで、エクイタブルスレットスコアはやや低下している。

図3.2.8は、冬期間における固体降水の鉛直積算量のTESTとCNTLの差である。雲物理過程の変更により、あられの量が減って雪の量が増えていることがわかる。あられと雪では落下速度が異なりあられのほうが速く落下するため、沿岸部でのあられが減って、山間部での雪が増える変化が見られる。

図3.2.9は冬期間における18時間予測の気温の鉛直プロファイルについての対ラジオゾンデ検証結果で、中央が平均誤差、右が平均誤差のTESTとCNTLの差である。対流圏下層の925 hPaでTESTはCNTLに比べて有意に低温下していることが確認できる。図3.2.9左は925 hPaにおける気温の平均場のTESTとCNTLの差であり、南側の領域を中心に広く低温化していることがわかる。これらの結果は、あられが減少し雪が増加したことで、雪が落下する途中で融解した際の冷却の影響が大きくなったことと、水雲による長波吸収射出の減少が主な要因であると考えている。

図3.2.10は、閾値50 mm/3hの降水についての予報時間毎の対解析雨量の検証結果で、青がCNTL、赤がTEST、緑がMSMの結果である。強雨についての十分な事例数を確保するため、統計期間は2022年6月1日から8月31日の1日8回736事例を対象としている。バイアスコアは、MSMが降水頻度過少、LFMが降水頻度過多であることを示している。空振り率は同程度であるが、見逃し率は予報時間を通してMSMの方が大きくなっている。これらに対応してエクイタブルスレットスコアは予報時間を通してLFMの方が大きくなっている。TESTとCNTLの比較では、見逃し率は同程度であるものの空振り率がやや減少しており、これに対応してエクイタブルスレットスコアは期間を通してやや改善している。このことから、18時間先までの予測において、強雨の予測精度はMSMよりもLFMのほうが高いことがわかる。

図3.2.11は夏期間の予報対象時刻毎の対アメダス地上気温の検証結果で、上段が平均誤差(ME:左)とMEのTESTとCNTLの差(右)、下段が二乗平均平方根誤差(RMSE:左)とRMSEのTESTとCNTLの差(右)である。TESTではCNTLに比べて日中・夜間ともにRMSEの縮小が見られる。日中については、強雨頻度の低下と関連していると考えられ、夜間については、水雲からの長波射出減少により、地上気温が低

下したと考えられる。LFMは夏季夜間の地上気温について高温バイアスをもつため、この変化は系統誤差の縮小に寄与することになる。

最後に、2023年6月29日15時を対象とする変更前後の予測結果を示す。図3.2.12上段は、解析雨量、予報時間9時間でのCNTL、同時間のTESTの1時間積算降水量である。下段に同じ時刻を対象とした対アメダス気温誤差の分布を示す。CNTLは解析雨量に比べて強雨域が広すぎ、これと対応して、地上気温予測も観測に比べて低い地点が多い。TESTはCNTLに比べて強雨域が狭く、地上低温誤差も縮小している。雲物理過程の改良により、あられの生成が減少して融解による雨の生成が減少し、雨の蒸発冷却が弱まることにより、低温化が抑えられていると考えられる。

### 3.2.5 まとめ

2024年3月に更新された局地数値予報システムでは、SSP-RK法の導入や潜熱補正の廃止等、モデルの物理・力学過程を改良することによって、夏季の強雨頻度過多の緩和や地上気温誤差の縮小等の予測精度の改善を達成することができた。また、「富岳」の成果を一部導入することにより、高速化を達成した。この更新において、局地モデルの予報時間を18時間に延長したが、延長した11～18時間の予測についても、強雨を中心にMSMに対する予測精度の優位性が確認できた。2026年3月に局地モデルの水平格子間隔を1kmに高解像度化する計画としており、スーパーコンピューター「富岳」なども活用して開発を進めているところである。

### 参考文献

- 荒波恒平, 氏家将志, 原旅人, 2012: 物理過程の数値計算. 数値予報課報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 111-119.
- Connolly, P. J., T. W. Choullarton, M. W. Gallagher, K. N. Bower, M. J. Flynn, and J. A. Whiteway, 2006: Cloud-resolving simulations of intense tropical Hector thunderstorms: Implications for aerosol-cloud interactions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 3079-3106.
- Hu, X. and K. Stamnes, 1993: An Accurate Parameterization of the Radiative Properties of Water Clouds Suitable for Use in Climate Models. *J. Climate*, **6**, 728-742.
- 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.
- Kimura, T., K. Matsubayashi, K. Aranami, and Y. Kitamura, 2024: Strong Stability Preserving Runge-Kutta method in HE-VI and split-explicit

- short time step integration. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **45**, 09.03–09.04.
- 松林健吾, 河野耕平, 石田純一, 室井ちあし, 2014: 時間離散化. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 43–52.
- 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.
- Lindner, T. H. and J. Li, 2000: Parameterization of the optical properties for water clouds in the infrared. *J. Climate*, **13**, 1797–1805.
- Murakami, M., 1990: Numerical Modeling of Dynamical and Microphysical Evolution of an Isolated Convective Cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 107–128.
- Shu, Chi-Wang and Stanley Osher, 1988: Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes. *Journal of Computational Physics*, **77**, 439–471.
- Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time-Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes. *Monthly Weather Review*, **130**, 2088–2097.

2021/07/01 1800Z(T+10)

名瀬レーダー CFADs

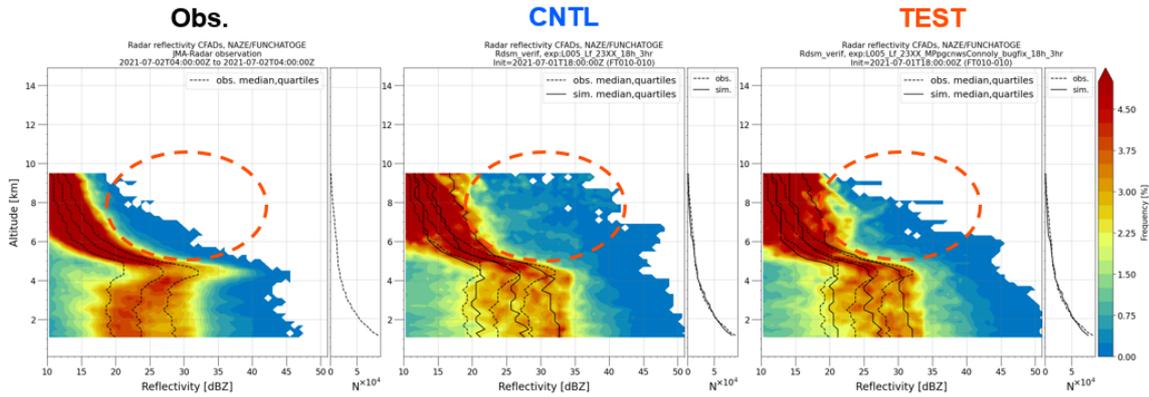


図 3.2.2 2021 年 7 月 2 日 04UTC を対象とする地上レーダー（名瀬）のレーダー反射強度 [dbZ] の CFADs (Contoured Frequency by Altitude Diagrams: 高度別頻度分布)。左は観測値、中央と右はそれぞれ 2021 年 7 月 1 日 18UTC を初期時刻とする CNTL, TEST の 10 時間後の予測結果。

冬型事例の1格子点（高度約1.5 km）のΔt毎の時系列

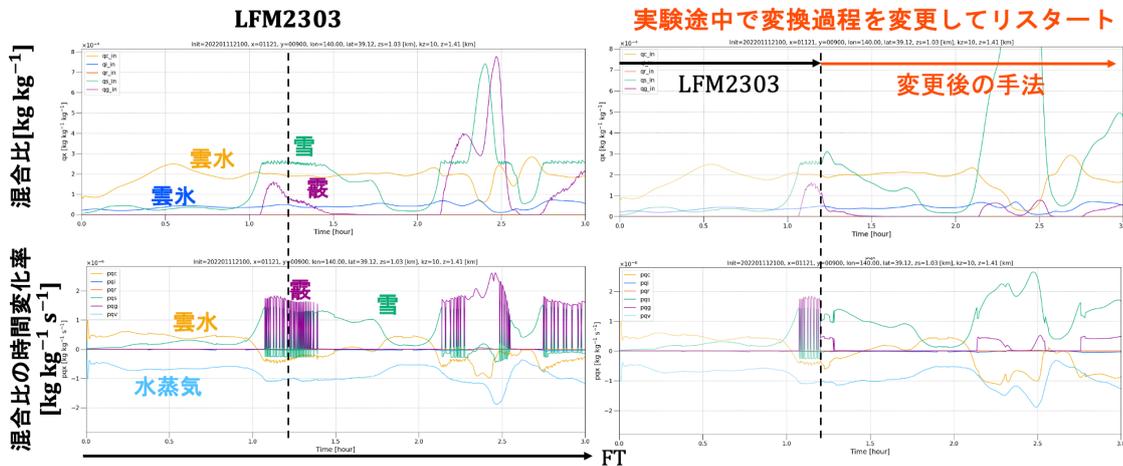


図 3.2.3 1 格子点における水物質混合比 [kg/kg]（上段）および時間変化率 [kg/kg/s]（下段）の毎タイムステップの時系列。左は CNTL、右は CNTL 実験の FT=1.2[h] において設定を TEST に変更しリスタート実行した実験の結果。黄色は雲水、青色は雲氷、赤色は雨、緑色は雪、紫色はあられ、水色是水蒸気を表す。

潜熱補正（LHC）除去によるインパクト

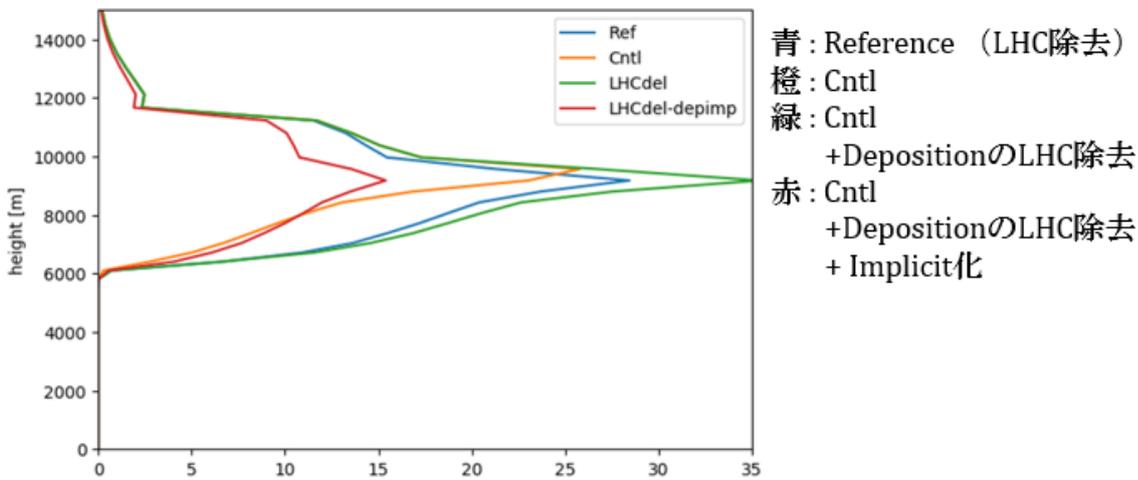


図 3.2.4 ある地点の物理量のプロファイルを入力として雲物理過程を実行した際に計算される、拡散成長による雲氷、雪、あられの時間変化率の合計について、潜熱補正を変更した場合のインパクト。青：潜熱補正を行わずに積分時間間隔を短くしたリファレンス、橙：変更前、緑：潜熱補正のみ除去したもの、赤：潜熱補正を除去した上でインプリシット化。

## 変更前後差分 (2021/7/1~7/15期間統計)

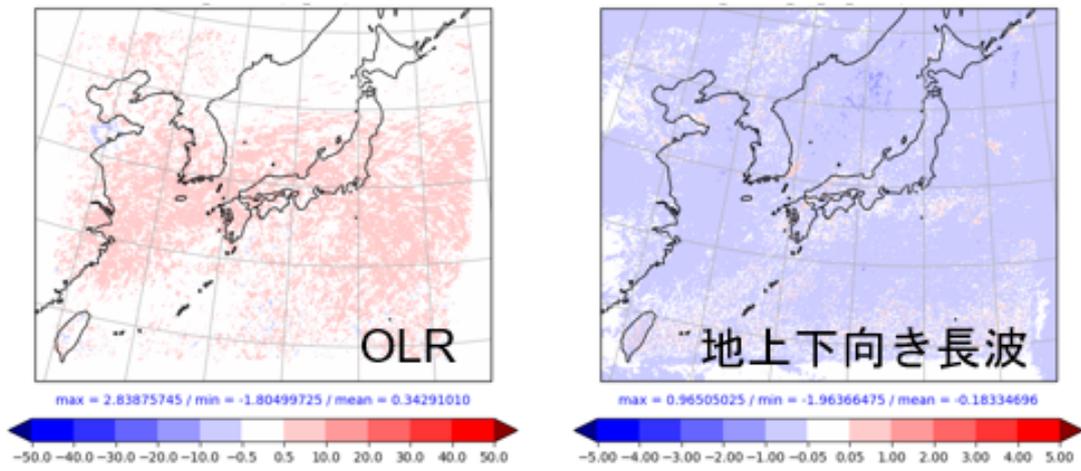
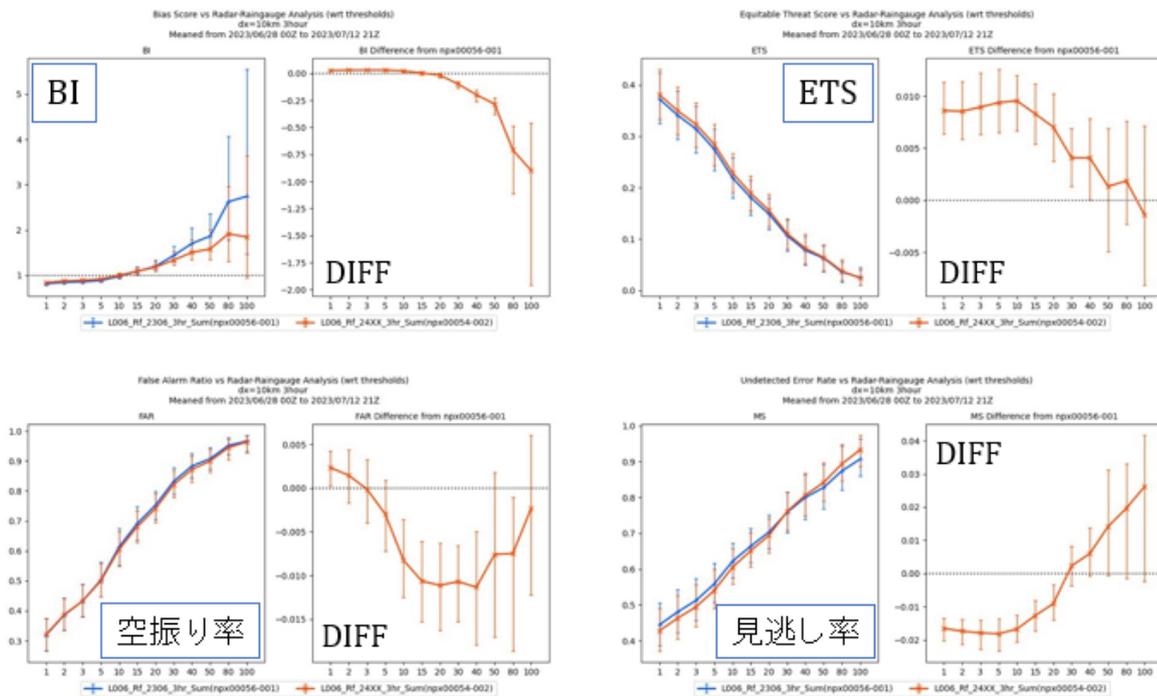
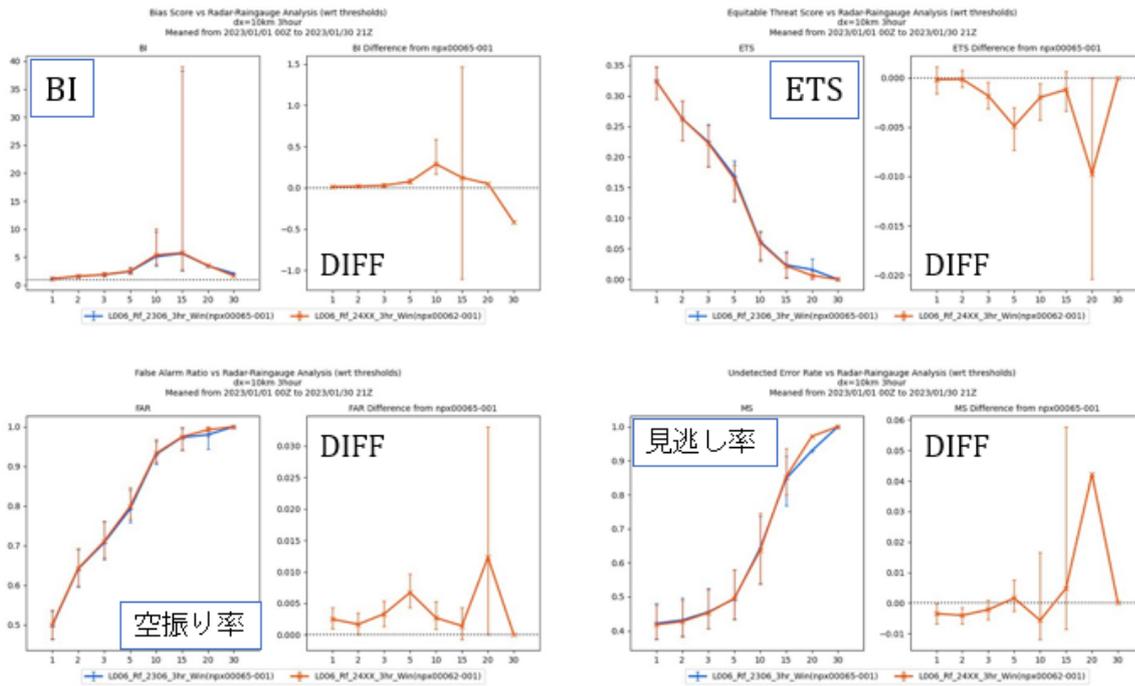


図 3.2.5 水雲に関する長波吸収係数診断式を変更した場合の夏期間を対象とするインパクト試験結果。OLR (左) および地上での下向き長波放射 (右) の変更前後の差分。



## 閾値別対解析雨量スコア (3h)

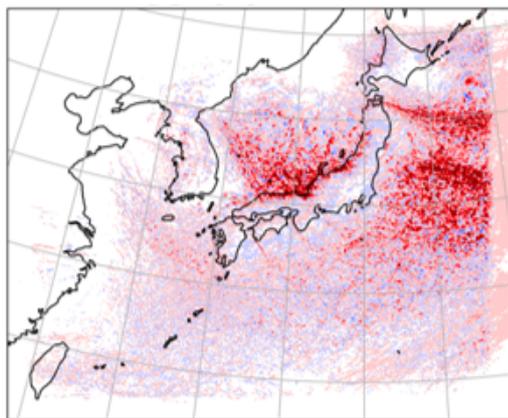
図 3.2.6 夏の期間を対象にした実験における閾値毎の対解析雨量の検証結果。検証格子は 20km。左上：バイアスコアとその差、右上：エクイタブルスレットスコアとその差、左下：空振り率とその差、右下：見逃し率とその差。スコアの図では赤線が TEST、青線が CNTL の仕様で予報時間を 18 時間に延長した結果。差の図では赤線が TEST と CNTL の差。



閾値別対解析雨量スコア (3h)

図 3.2.7 図 3.2.6 と同じ。ただし冬の期間を対象にした実験の検証結果。

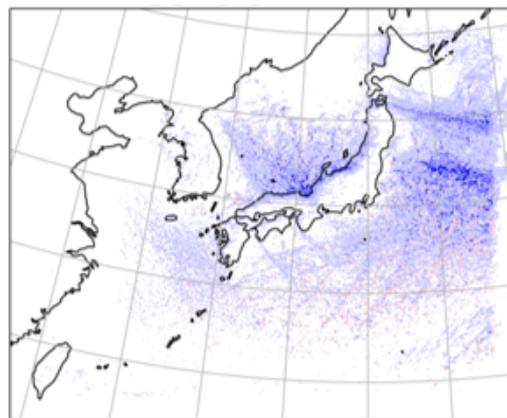
雪鉛直積算量の差分 (T+18)



max = 0.48285906 / min = -0.12533410 / mean = 0.00555622



霰鉛直積算量の差分 (T+18)



max = 0.07888001 / min = -0.20422894 / mean = -0.00212613



図 3.2.8 冬期間における 18 時間予報の固体降水についての TEST と CNTL の差。左：雪の鉛直積算量、右：あられの鉛直積算量。

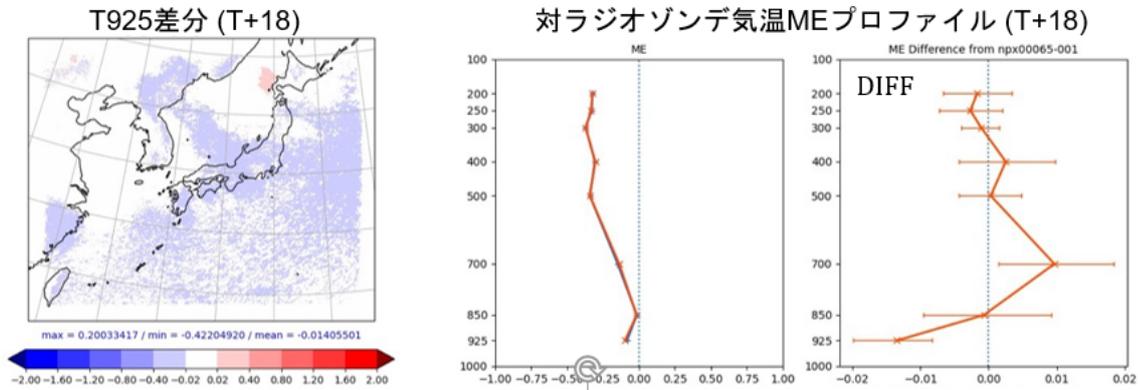


図 3.2.9 冬の期間を対象にした実験における気温の検証結果。左：925 hPa 面における TEST と CNTL の差。中央：気温の対ゾンデ平均誤差の鉛直プロファイル。右：気温の対ゾンデ平均誤差の差の鉛直プロファイル。中央の図で青線は CNTL の仕様で予報時間を 18 時間に延長した結果、赤線は TEST の結果。

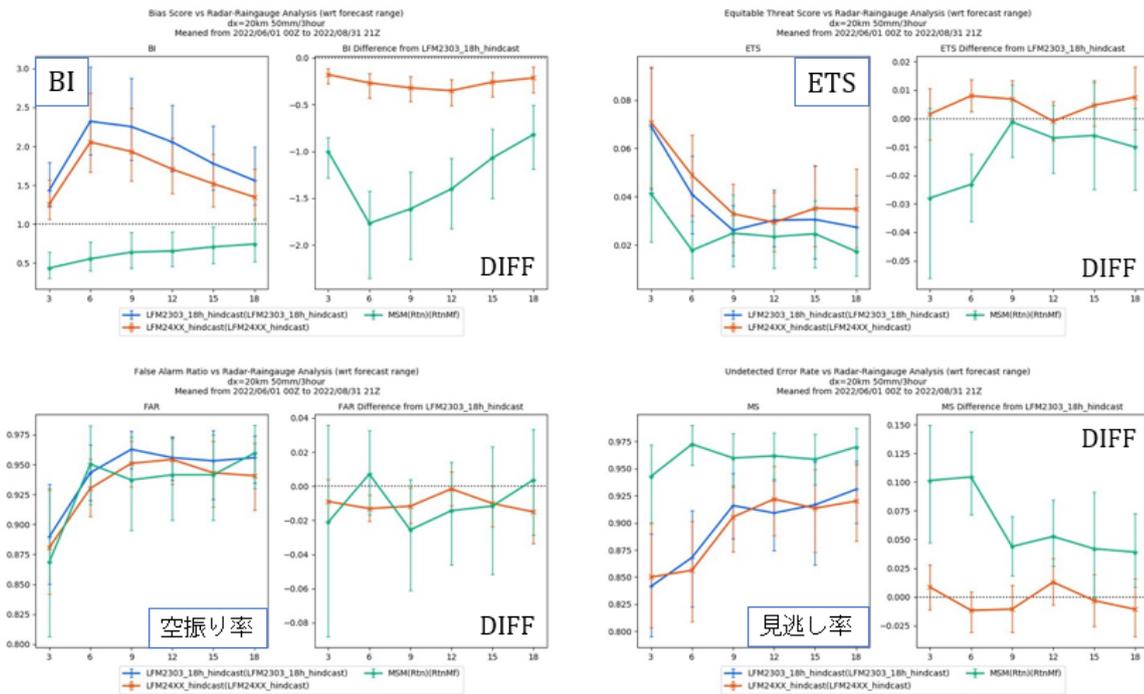


図 3.2.10 2022 年 6 月 1 日から 8 月 31 日の 736 事例を対象とした 50 mm/3h を閾値とする予報対象時刻毎の対解析雨量の各スコア。左上：バイアススコアとその差、右上：エクイタブルスレットスコアとその差、左下：空振り率とその差、右下：見逃し率とその差。スコアの図では赤線が TEST、青線が CNTL、緑線が MSM の結果。差の図では赤線が TEST と CNTL の差、緑線が MSM と CNTL の差。

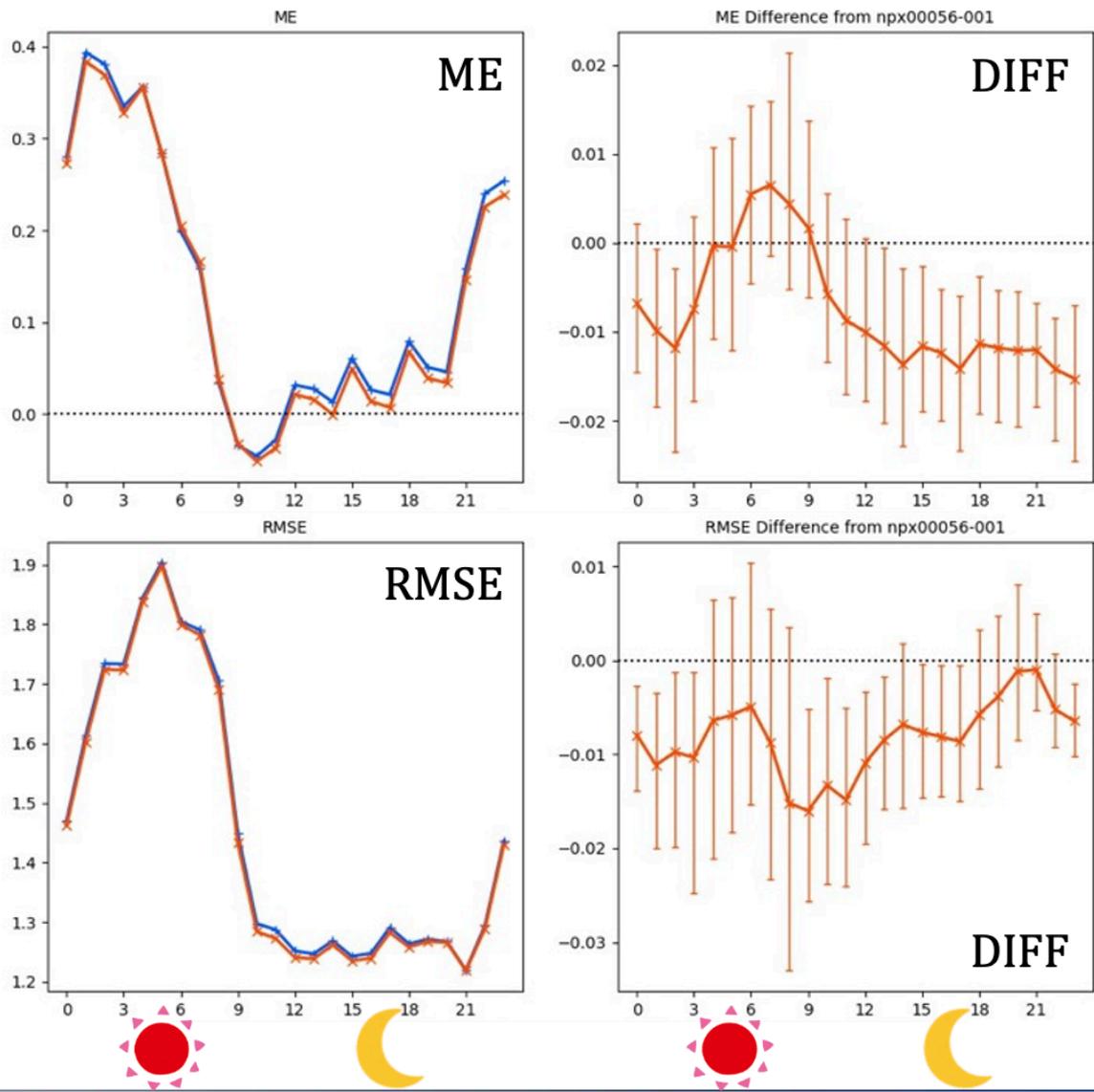


図 3.2.11 夏の期間を対象にした実験における予報対象時刻毎の地上気温の対アメダス検証結果。横軸は予報対象時刻。左上：平均誤差、右上：平均誤差の差、左下：二乗平均平方根誤差 (RMSE)、右下：RMSE の TEST と CNTL の差。左図で青線は CNTL の仕様で予報時間を 18 時間に延長した結果、赤線は TEST の結果。

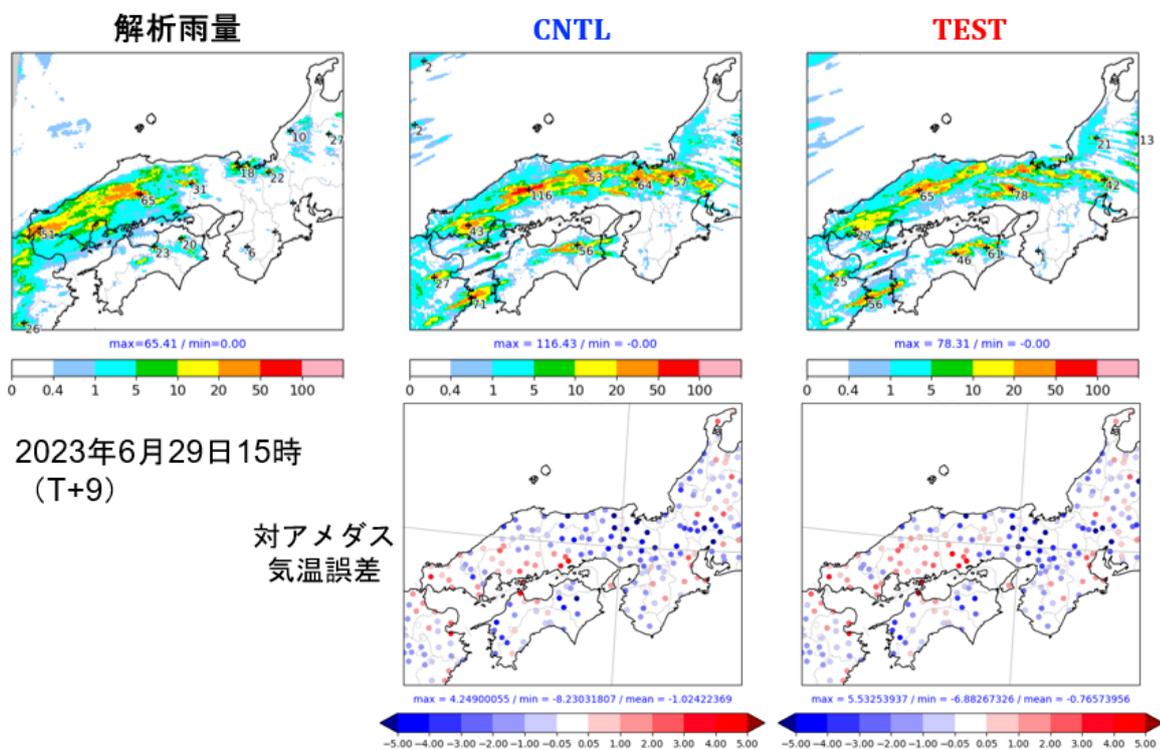


図 3.2.12 2023年6月29日15時を対象とした予測結果。左上：解析雨量、中央上：CNTLの9時間予報、右上：TESTの9時間予報。中央下：CNTLの同時刻の対アメダス気温誤差、右下：TESTの同時刻の対アメダス気温誤差。

### 3.3 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

#### 3.3.1 はじめに

NOAA-21 は、米国海洋大気庁 (NOAA) の次世代現業極軌道衛星 JPSS シリーズの 2 号機であり、2022 年 11 月 10 日に打ち上げられ、2023 年 3 月 30 日に現業衛星としての運用が宣言された。搭載されているセンサは JPSS シリーズの準備衛星である Suomi-NPP(2011 年 10 月 28 日打ち上げ) および 1 号機である NOAA-20(2017 年 11 月 18 日打ち上げ) と同様である。

気象庁では既に、Suomi-NPP および NOAA-20 搭載のマイクロ波サウンダ ATMS および、ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS の輝度温度データを全球、メソ、局地解析で利用しており、これらはモデル初期値の気温場や水蒸気場の精度維持に重要な役割を果たしている (平原 2017; 亀川・計盛 2017; 村田・亀川 2020; 気象庁 2023, 2024b)。

NOAA-21 についても ATMS および CrIS の輝度温度データの利用を早期に開始するべく、データ品質等に関する調査を進めた (気象庁 2024b)。その後の開発により、全球、メソ、局地解析において、2024 年 3 月 5 日のスーパーコンピュータシステム移行と同時に NOAA-21 搭載 ATMS, CrIS の輝度温度データを新規に利用開始した。ここでは、これらの開発の概要を述べる。

#### 3.3.2 データ品質および同化設定

NOAA-21 に搭載されている ATMS や CrIS の仕様は、既存の Suomi-NPP や NOAA-20 に搭載のものと同様であることから、基本的な品質が同程度であることを確認の上、既存衛星と同じ方法で同化利用する方針とした。

NOAA-21 のデータ品質については、全球数値予報システムを用いた計算輝度温度との比較により調査した。その結果、ATMS、CrIS とともにノイズは Suomi-NPP や NOAA-20 と同程度であり、観測誤差として既存衛星と同じ設定を用いて問題ないことを確認した。スキューンバイアス補正量 (観測視野ごとの補正量) については、衛星・センサ固有の値が必要なため、上記の調査結果から統計処理により求めた。

NOAA-21/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、2023 年夏季を対象に、全球、メソ、局地の各現業数値予報システム相当の同化実験を実施した。現業数値予報システム相当のコントロール実験 (CNTL)、CNTL に NOAA-21/ATMS および CrIS を追加した実験 (TEST)、並びに CNTL から Suomi-NPP および NOAA-20 のいずれの ATMS も CrIS も使用しない設定としたベース実験 (BASE) を実施した。BASE に対する CNTL、および BASE に対する TEST の変化を比較することで、ATMS および CrIS を追加

すること自体による基本的な性能を確認するとともに、NOAA-21 の追加利用による効果が既存衛星と同様であるかどうかを確認した。

#### 3.3.3 全球解析における利用

全球解析では、ATMS の水蒸気チャンネルについては雲や降水域も含めた全天同化で利用しており (気象庁 2022)、ATMS の気温チャンネルおよび CrIS については雲や降水の影響を受けていない晴天域のデータのみを同化している (平原 2017; 村田・亀川 2020; 気象庁 2024b)。

NOAA-21/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、2023 年 5 月末時点の現業全球数値予報システム相当の実験システムを用い、2023 年夏季を対象に CNTL、TEST、BASE の各実験を実施した。NOAA-21 の追加により、利用データ数は ATMS では 10%程度、CrIS では気温チャンネルで 10~35%程度、水蒸気チャンネルで 60%程度、それぞれ増加した (気象庁 2024a)。

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。気温に感度のあるマイクロ波サウンダ AMSU-A やハイパースペクトル赤外サウンダ IASI(気温チャンネル)、水蒸気に感度のある静止衛星晴天輝度温度やハイパースペクトル赤外サウンダ IASI(水蒸気チャンネル) などにおいて、追加した ATMS や CrIS が感度を持つ要素や高度に対応して、第一推定値が観測データにより近づき、整合性に向上が見られた (図 3.3.1)。これは気温や水蒸気的第一推定値として用いた短期予測 (3~9 時間) の精度が向上したことを示唆するものである。なお、別途実施した ATMS, CrIS をそれぞれ個別に同化した実験の結果から、CrIS が成層圏、ATMS が対流圏の気温場の予測精度改善に大きく貢献していることが分かっている。また、BASE に対する CNTL、BASE に対する TEST の検証結果を比較したところ、上記の改善傾向がはっきり確認でき、NOAA-21 の追加によりその傾向がさらに強められていることが確認できた (図 3.3.1)。

予測精度については、24 時間後予測など比較的予測時間の短い範囲で、対解析値検証や対ゾンデ検証に共通の傾向として、成層圏や熱帯域の対流圏を中心に気温や高度の場の改善が見られた (図 3.3.2)。

#### 3.3.4 メソ解析における利用

メソ解析では、ATMS については現在水蒸気チャンネルのみを利用している (気象庁 2023)。CrIS についてはモデル上端より上部に感度のない気温チャンネルおよび水蒸気チャンネルを利用している (気象庁 2024a)。いずれも雲や降水の影響を受けていない晴天域のデータを利用している。全球解析と同様に、NOAA-21/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、2023 年 5 月末時点の現業メソ数値予報システム相当の実験

システムを用い、2023年夏季を対象にCNTL、TEST、BASEの各実験を実施した。

NOAA-21の追加により、利用データ数はATMSでは4%程度、CrISでは気温チャンネルで30%程度、水蒸気チャンネルで60%程度、それぞれ増加した。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ところ、水蒸気に感度のあるIASIの水蒸気チャンネルやマイクロ波イメージャの183GHz帯のチャンネル等において整合性の向上が見られた(図3.3.3)。気温に感度のあるAMSU-A(図省略)やIASIの気温チャンネルに顕著な改善が見られないのは、メソ解析ではATMSの気温チャンネルを利用していないためと考えられる。また、BASEに対するCNTL、BASEに対するTESTの検証結果を

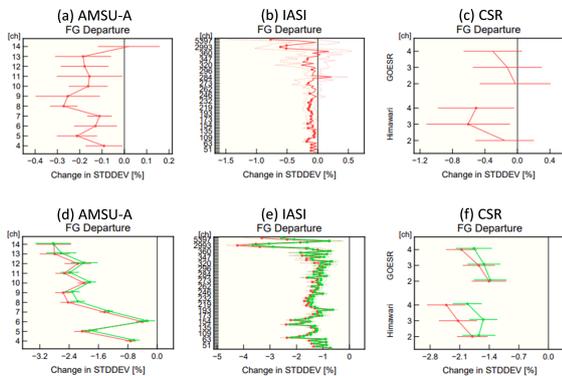


図 3.3.1 全球解析における、観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差の変化率[%]。上段はTESTのCNTLに対する変化率、下段はTEST(赤)およびCNTL(緑)のBASEに対する変化率を示す。(a)(d) マイクロ波気温サウンダAMSU-A、(b)(e) ハイパースペクトル赤外サウンダIASI、(c)(f) 静止衛星CSR。縦軸はチャンネル番号。IASIは上から9チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。標準偏差の図のエラーバーは95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合(改善)している場合、0線より左側にプロットされる。

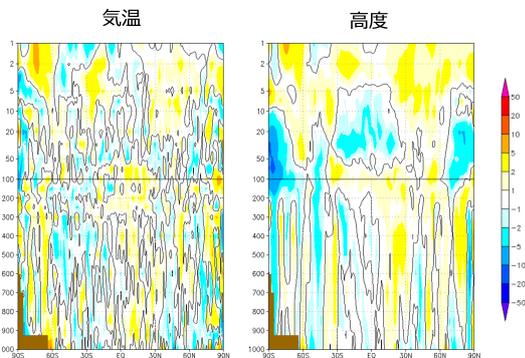


図 3.3.2 全球予報における、解析値を参照値としたTESTのCNTLに対する24時間後予測のRMSE改善率[%]の緯度帯平均。左図が気温、右図がジオポテンシャル高度の変化で、それぞれの図の縦軸は気圧[hPa]、横軸は緯度[°]。暖色系は改善、寒色系は改善を示す。

比較したところ、上記の改善傾向がはっきり確認でき、NOAA-21の追加によりその傾向がさらに強められていることが確認できた(図3.3.3)。TESTとCNTLの比較において不明瞭だったAMSU-AやIASI気温チャンネル等においても、それぞれにおいて若干の整合性の向上が確認できた。

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、観測の影響が出やすい3~9時間予測付近に注目すると、対流圏下層の高度場など一部の要素で若干の改善が見られた(図3.3.4)。

### 3.3.5 局地解析における利用

局地解析では、メソ解析同様ATMSについては現在水蒸気チャンネルのみを利用している(気象庁2023)。また、CrISについてはメソモデルよりモデル上端高度が低いことから水蒸気チャンネルのみを利用している(気象庁2024a)。いずれも雲や降水の影響を受けてい

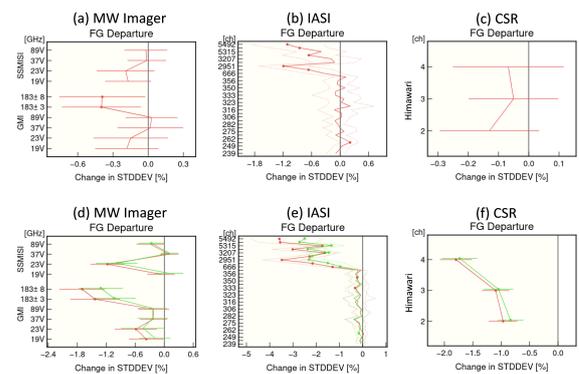


図 3.3.3 メソ解析における、観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差の変化率[%]。上段はTESTのCNTLに対する変化率、下段はTEST(赤)およびCNTL(緑)のBASEに対する変化率を示す。(a)(d) マイクロ波イメージャSSMIS、GMI、(b)(e) ハイパースペクトル赤外サウンダIASI、(c)(f) 静止衛星CSR。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。IASIは上から9チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。詳細は図3.3.1と同様。

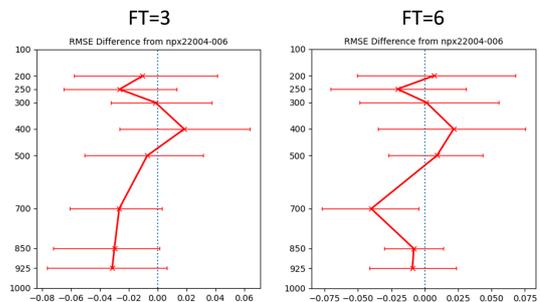


図 3.3.4 メソ解析・予報における、ラジオゾンデ観測に対するジオポテンシャル高度のバイアス(RMSE)のTESTのCNTLに対する変化。左図は3時間後予測値、右図は6時間後予測値の検証結果。

ない晴天域のデータを利用している。

全球解析やメソ解析と同様に、NOAA-21/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、2023 年 5 月末時点の現業局地数値予報システム相当の実験システムを用い、2023 年夏季を対象に CNTL、TEST、BASE の各実験を実施した。

NOAA-21 の追加により、利用データ数は ATMS で 4%程度、CrIS(水蒸気チャンネルのみ)で 50~60%程度、それぞれ増加した。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ところ、水蒸気に感度のあるマイクロ波イメージャや、ひまわり晴天輝度温度において整合性に向上が見られた(図 3.3.5)。また同様に、BASE に対する CNTL、BASE に対する TEST の検証結果を比較したところ、上記の改善傾向がはっきり確認でき、NOAA-21 の追加によりその傾向が強められていることが確認できた(図 3.3.5)。

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。

### 3.3.6 直接受信データの利用

現業システムにおいて観測データを利用するためには、迅速なデータの入手が求められる。特にメソ解析、局地解析においては観測から解析処理を開始するまでの時間が短いため、海外の衛星運用機関によって処理され、配信されているデータを利用するだけでなく、衛星から直接受信したデータを処理して利用することが効果的である。

気象衛星センターの極軌道衛星受信システムは、2023 年 6 月に更新されたことで NOAA-21 のデータを新規に受信できるようになった。気象衛星センターで受信

した NOAA-21 のデータは 2023 年 11 月から配信開始され、その結果、2024 年 3 月の現業利用開始時には、本節で示した実験に比べてさらに多くのデータが利用できるようになった。

局地解析では 1 時間ごとに 3 次元変分法による解析(各解析で利用する観測データを入れる 1 時間分の枠をこれ以降ではスロットと称す) および 1 時間予報を 3 時間分繰り返して解析値を得ているが(永戸ほか 2012, 2013)、観測データの打ち切り時間が最も短くなる解析対象時刻のスロットでは、全データに占める気象衛星センターでの受信データの割合が NOAA-21 搭載の ATMS では 48%、CrIS では 55%となっており、直接受信データが解析対象時刻の直近のデータ利用数増加に寄与していることが確認できる(図 3.3.6)。

### 3.3.7 まとめと今後

NOAA-21 に搭載されている ATMS および CrIS の輝度温度データを、全球、メソ、局地の各数値予報システムで追加利用するための調査を行った。NOAA-21 の ATMS および CrIS の品質は既存衛星と同程度であり、既存衛星の ATMS および CrIS の利用方法に準じた方法で利用することとした。NOAA-21 の追加により、利用データ数は増加し、既存衛星とともに利用することで初期値における気温や水蒸気の精度がさらに

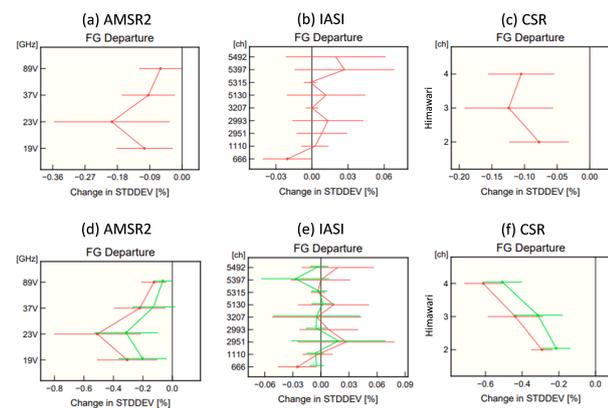


図 3.3.5 局地解析における、観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差の変化率 [%]。上段は TEST の CNTL に対する変化率、下段は TEST(赤) および CNTL(緑)の BASE に対する変化率を示す。(a)(d) マイクロ波イメージャ AMSR2、(b)(e) ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI、(c)(f) 静止衛星 CSR。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。IASI は水蒸気チャンネルのみ表示。詳細は図 3.3.1 と同様。

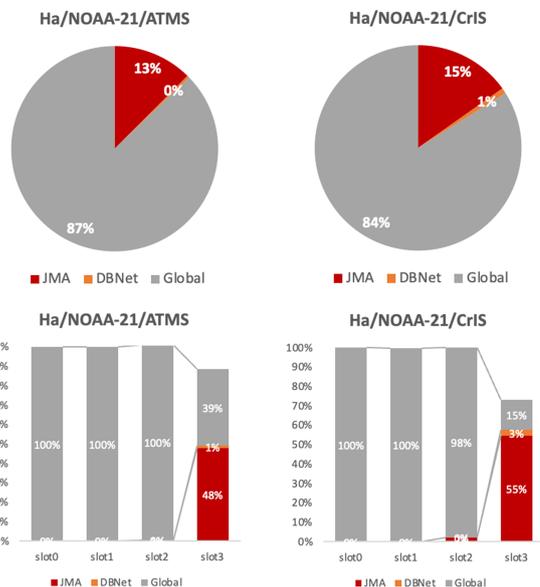


図 3.3.6 局地解析において利用された NOAA-21 のデータに占める直接受信データの割合 [%]。2024 年 3 月 11 日からの 10 日間を対象に集計した。上段は全スロット統合、下段はスロット別の集計結果で、横軸の slot0-3 はそれぞれ解析対象時刻の 3 時間前、2 時間前、1 時間前、解析対象時刻のスロットであることを示す。左列が NOAA-21 搭載 ATMS、右列が CrIS に関する集計結果で、灰色は衛星運用機関による配信データ、赤色は気象衛星センターでの直接受信データ、橙色はそれ以外の機関による直接受信データの割合。

向上することを確認した。これら結果や総合性能評価試験および業務化試験の結果を踏まえ、2024年3月5日のスーパーコンピュータシステム移行と同時に現業数値予報システムでの利用を開始した。

メソ、局地解析における ATMS の利用に関する今後の課題として、気温チャンネルの利用が挙げられる他、水蒸気チャンネルについては、より多くの観測情報を取り込むために、他のマイクロ波サウンダの水蒸気チャンネルやマイクロ波イメージャとともに、雲・降水域においてもデータを利用する全天同化に取り組む必要がある。CrIS に関しては、他の赤外サウンダとともに、より多くの観測情報を取り込むための開発として、観測誤差の最適化、観測誤差相関の考慮などの課題について取り組む必要がある。

## 参考文献

- 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 局地モデル運用の目的と仕様. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 20-22.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 78-86.
- 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, 70-72.
- 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, 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. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 40-43.
- 気象庁, 2023: 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. 令和 4 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 42-47.
- 気象庁, 2024a: NOAA-21 搭載 ATMS および CrIS 輝度温度データの新規利用. 令和 5 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 93-95.
- 気象庁, 2024b: 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. 令和 5 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 46-52.
- 村田英彦, 亀川訓男, 2020: NOAA-20 搭載 ATMS および CrIS 輝度温度データの利用開始. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58-60.

### 3.4 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

#### 3.4.1 はじめに

気象庁では、線状降水帯を引き起こす幅数百キロメートル規模の水蒸気の流入を捉えるため、水蒸気の高度分布を測定可能な地上マイクロ波放射計 (MWR: microwave radiometer) を令和 4 年度に西日本を中心に 17 箇所に設置した (気象庁 2023, 2024)。MWR は、大気からの放射の強度を複数の波長で測定することが可能で、主に水蒸気に感度のある 7 つのチャンネル (22~32 GHz) と、主に気温に感度のある 7 つのチャンネル (51~58 GHz) の計 14 チャンネルが搭載されている。気象技術開発室では、2ch 法 (Hogg et al. 1983) を用いて、水蒸気に感度のある 2 つのチャンネル (23.84 GHz, 27.84 GHz) で観測した輝度温度から、可降水量 (PWV: precipitable water vapor) を 10 分間隔で算出している。これまで、MWR の PWV データの数値予報システムでの利用に向けた開発に取り組み (気象庁 2023, 2024)、令和 6 年 3 月 5 日にメソ解析・局地解析での現業利用を開始した。本節では開発の概要について報告する。

#### 3.4.2 品質管理について

MWR から得られた PWV データを利用する際の品質管理は、既に数値予報システムでの PWV データの同化利用実績がある地上 GNSS を参考とした (石川 2010)。品質管理の前処理として、メソ・局地解析での同化スロットに合わせ、各観測点について同化するデータが 1 時間間隔となるよう時間間引きを行なっている。また、観測値とモデルの第一推定値を適切に評価するため、地上 GNSS と同様の手法を用い標高を補正している。品質管理項目は、開発過程でのデータ品質調査の結果に基づき下記の通りとした。

(a) 外れ値の除去

PWV の値が 1 mm 以下及び 90 mm 以上の場合は使用しない。

(b) グロスエラーチェック

PWV の O-B 値 (観測値とモデルの第一推定値との差) の絶対値が 5 mm 以上のデータは使用しない。

(c) 降水チェック

MWR に付属の感雨計で降水を検知するか、気象レーダーにより観測点周辺で降水が確認された場合の PWV データは使用しない。これは、MWR が観測するマイクロ波は降水の影響を受けるため、PWV データの品質が悪い可能性があるためである。

(d) 観測輝度温度チェック

各チャンネルの観測輝度温度が明らかな異常値を示した場合の PWV データは使用しない。

上記 (c),(d) の処理においては、気象技術開発室での品質管理で判定された情報を利用している。以上の品質管理を実施した上で、各観測地点毎にデータ品質を確認した。図 3.4.1 に平戸地点での O-B 値ヒストグラムを一例として示す。品質管理処理によりバイアスと標準偏差が大幅に減少し、現在気象庁で現業利用している地上 GNSS データと同程度の品質であることが確認できた (図 3.4.2)。他の地点についても、同様に同化利用可能なデータ品質であることを確認した。

#### 3.4.3 数値予報システムへの影響評価

MWR より得られた PWV データをメソ・局地の数値予報システムで同化利用した実験を行ったところ、線状降水帯を含めた降水予測が改善する事例がいくつか確認された。

ここではその一例を示す。2023 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) とし、CNTL に MWR を同化利用したテスト実験 (TEST) を行い、CNTL と TEST の結果を比較した。実験期間は 2023 年 5 月 26 日~8 月 9 日である。

降水予測の改善事例として、図 3.4.3 に 2023 年 7 月 10 日に福岡・佐賀・大分県で線状降水帯が発生し、福岡・大分県に大雨特別警報を発表した事例を示す。当時、梅雨前線が西日本から東北地方付近に停滞し、前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだため前線の活動が活発となっていた。九州北部地方や中国地方など西日本を中心に大雨となり、九州北部地方では線状降水帯が発生し猛烈な雨が降った。予報対象時刻を 2023 年 7 月 10 日 00UTC とした 6 時間前からの予測では、CNTL と比較し TEST では福岡県北九州地方から福岡地方にかけて 50 mm/3h 以上の降水域 (太い破線で囲んだ部分) が表現され、解析雨量の分布に近づいていることが確認できる。福岡県筑後地方・佐賀県南部・大分県西部での 100 mm/3h 以上の降水域 (細い破線で囲んだ部分) は TEST でも表現出来ていないが、対応する領域で TEST では CNTL と比較し PWV の増加が確認できる。また、山口県全域でも、CNTL では表現されていなかった 10 mm/3h 以上の降水域 (実線で囲んだ部分) が TEST では広く表現されており、対応する領域で TEST では CNTL と比較し PWV の増加が確認できる。初期時刻で九州地方では市来・大分・熊本の MWR データの同化利用があったことに加え、それまでの解析での MWR データの同化が繰り返されたことにより徐々に水蒸気の分布が修正された結果であると考えられる。

#### 3.4.4 まとめ

MWR から得られた PWV データについて、適切に品質管理を行い、数値予報システムに同化利用することで、降水予測が改善する事例を確認した。これらの結果から、令和 6 年 3 月 5 日より、MWR のデータの同

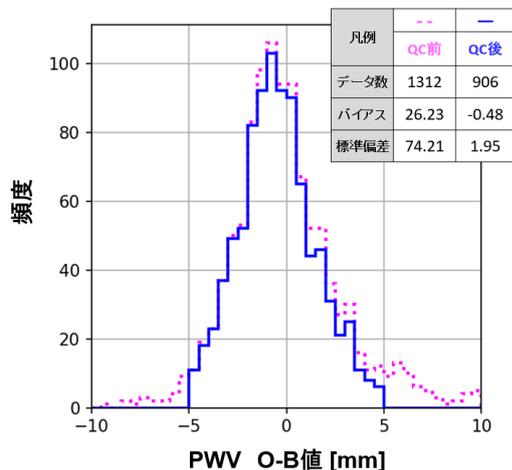


図 3.4.1 平戸に設置された MWR の 2ch 法による PWV とメソモデルの第一推定値との O-B 値ヒストグラム。横軸は PWV の O-B 値 [mm]、縦軸は頻度。時間間引き・標高補正後のデータで、品質管理前のデータを桃色点線、品質管理後のデータを青色実線で示している。統計期間は 2023 年 6 月 1 日から 2023 年 7 月 31 日。

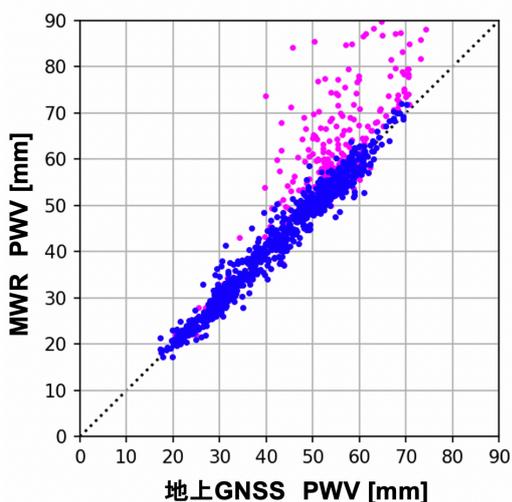


図 3.4.2 平戸に設置された MWR の 2ch 法による PWV と近隣の地上 GNSS による PWV の散布図。横軸は地上 GNSS の PWV [mm]、縦軸は MWR の PWV [mm]。品質管理処理を通過した MWR データを青色丸、品質管理を通過しなかった MWR データを桃色丸で示している。統計期間は 2023 年 6 月 1 日から 2023 年 7 月 31 日。

化利用を現業メソ・局地数値予報システムで開始した。今後は、MWR 観測から得られる情報を、同化利用だけでなく、他の観測データやモデルの検証にも利用していく予定である。

#### 参考文献

Hogg, D. C., F. O. Guiraud, J. B. Snider, M. T. Decker, and E. R. Westwater, 1983: A Steerable Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Water Vapor and Liquid in the Troposphere. *J. Appl. Meteor.*, **22**, 789–806.

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.  
 気象庁, 2023: 水蒸気観測データの数値予報での利用に関する開発. 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, 99–102.  
 気象庁, 2024: 水蒸気観測データの数値予報での利用に関する開発. 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, 97–98.

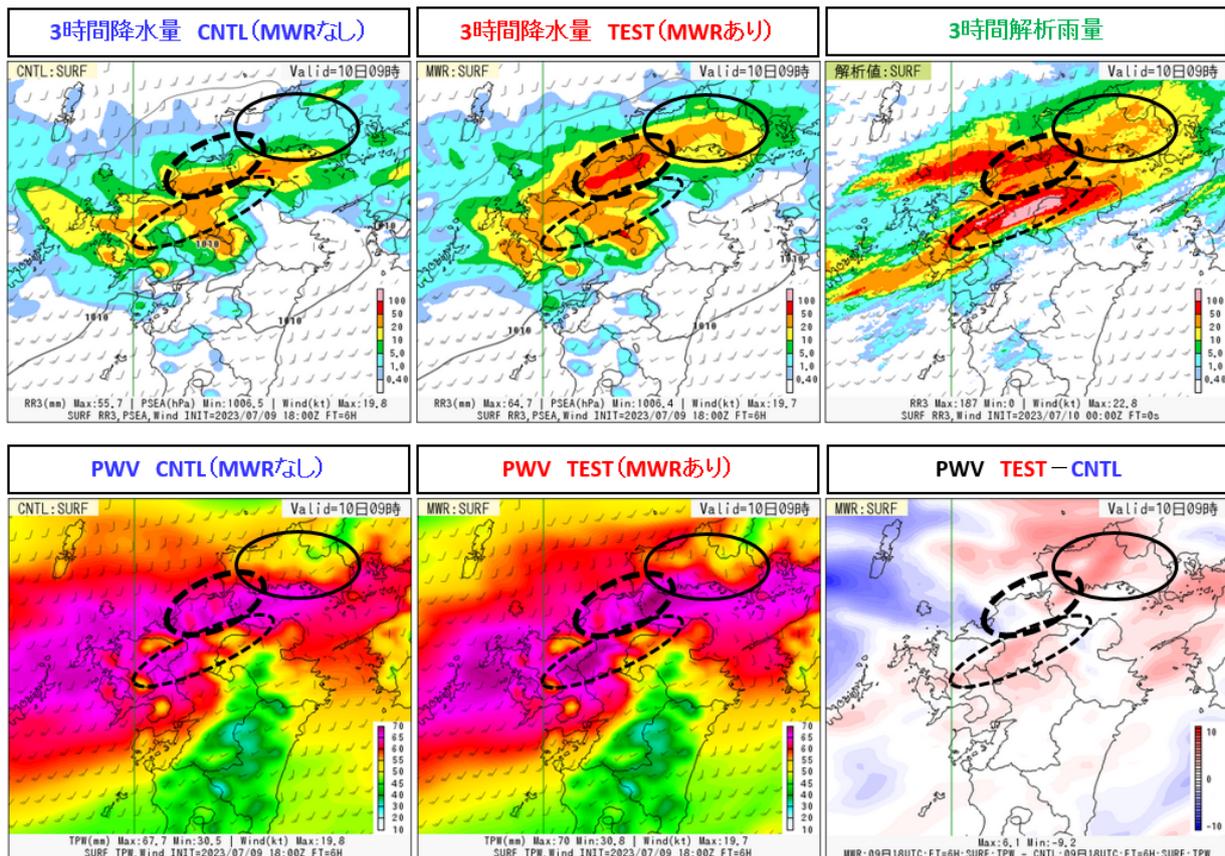


図 3.4.3 2023 年 7 月 10 日 00UTC を予報対象時刻とした予報初期時刻 2023 年 7 月 9 日 18UTC からのメソモデルの 6 時間先の予測の事例。上段の図のカラーは前 3 時間降水量 [mm]、等値線は海面更正気圧 [hPa] を示す。上段左は CNTL の予測、上段中央は TEST の予測、上段右は実況（解析雨量の 3 時間積算値）である。下段のカラーは PWV [mm]。下段左は CNTL の予測、下段中央は TEST の予測であり、下段右は TEST - CNTL で PWV の差分を示す。上下段とも矢羽根は地上風 [knot] を示す。破線・実線で囲んだ部分については本文参照。

### 3.5 局地モデルによる大雨発生確率ガイダンス

#### 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、すでに運用を開始していたメソモデル（MSM）、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ダンスに加え、局地モデル（LFM）を用いた大雨発生確率ガイダンスの部内運用を2024年5月28日に開始した。ここでは現時点でのLFM大雨発生確率ガイダンスの仕様や予測精度の概略を紹介する。

#### 3.5.2 仕様

LFM大雨発生確率ガイダンスの仕様を表3.5.1に示す。仕様はMSM/MEPS大雨発生確率ガイダンス（気象庁2022）をベースとしているが、以下の点で異なっている。

##### 初期時刻と予報時間

初期時刻は毎時。初期時刻00, 03, ..., 21UTCについては18時間先まで、それ以外の初期時刻では10時間先まで計算する。

##### 層別化

時刻に関する層別化は、予報対象時刻に対して行う（MSM大雨発生確率ガイダンスでは、初期時刻と予報時間に対して実施）。

##### 予測対象

予測対象となる降水量の値（閾値）に、3時間降水量120mmを追加する。

なお以下の点についてはMSM大雨発生確率ガイダンスと共通の仕様である。

- 作成手法はロジスティック回帰を採用
- 目的変数は当該の5km格子を中心とした55km四方のいずれかの格子での閾値以上の降水の有無
- 地域による層別化
- 説明変数（線状降水帯発生条件（加藤2017）を参考に、大雨の予測に特化した変数を採用）<sup>1</sup>

なお予測式の係数作成にあたっては、2020～2023年の夏期（5～9月）の説明変数、目的変数のデータを利用した。

#### 3.5.3 検証

LFM大雨発生確率ガイダンスの精度検証結果について、MSM大雨発生確率ガイダンスの比較という観点

<sup>1</sup> 個々の説明変数の算出方法には平滑化方法等細かな修正を加えているが、ここでは説明を省略する。

表 3.5.1 LFM 大雨発生確率ガイダンスの仕様

|            |  |
|------------|--|
| 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 | LFM  |
| 予測対象       | 3 時間降水量が 80, 100, 120, 150 mm 以上となる確率  |
| 作成手法       | ロジスティック回帰  |
| 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  | 初期時刻は毎時。FT=3～10 (00, 03, ..., 21UTC 初期値は FT=3～18) の 1 時間間隔                         |
| 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   | 予報対象時刻、地域（北日本、東日本、西日本、九州、南西諸島の 5 つ）  |

で紹介する。

図 3.5.1 には、2024 年夏期<sup>2</sup>を検証期間とした、全国での LFM 大雨発生確率ガイダンスの予報時間（FT）別のブライアスキルスコア（BSS）と信頼度曲線を、MSM 大雨発生確率ガイダンスを比較対象として示した。左図を見ると LFM 大雨発生確率ガイダンスの BSS は正となっており、確率予測として一定の有効性があることが示されている。また、LFM 大雨発生確率ガイダンスは予報時間（FT）の初期を中心にすべての FT で MSM 大雨発生確率ガイダンスの予測精度を上回っていることがわかる。右図の中には 2 本の直線が描かれている。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）。LFM 大雨発生確率ガイダンス、MSM 大雨発生確率ガイダンスともに、どの確率値においてもスキルの下限を上回り、確率予測として有効であることが分かる。また、LFM 大雨発生確率ガイダンスは、40% 付近までは対角線付近に位置し、20～40% の閾値では MSM 大雨発生確率に比べてより適切な予測頻度である。一方 50～80% の閾値では対角線の上方に位置しており、実況に比べ予測頻度が過小である傾向が確認できる。

図 3.5.2 には、LFM 大雨発生確率ガイダンス、MSM 大雨発生確率ガイダンスの 2024 年夏期の月毎の BSS を示した。検証領域や予報時間は先と同じである。これを見ると 5～7 月の梅雨期に LFM 大雨発生確率ガイダンスは MSM 大雨発生確率ガイダンスに比べて予測

<sup>2</sup> 2024 年 5 月 1 日～10 月 31 日

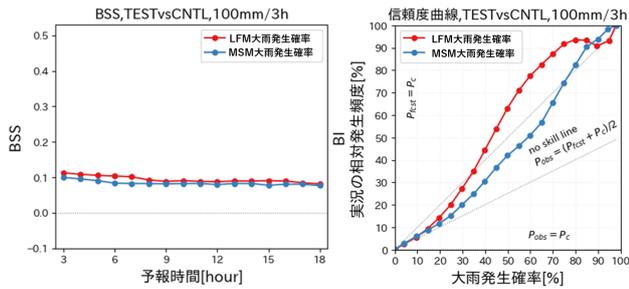


図 3.5.1 100 mm/3h 以上を対象とした、LFM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）、MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）の予報時間別のブライアスキルスコア（左図）と信頼度曲線（右図）。検証領域は全国、予報時間は 3～18 時間。グラフ中に示した  $P_c$ （大雨発生確率の気候値）は約 0.21 %。

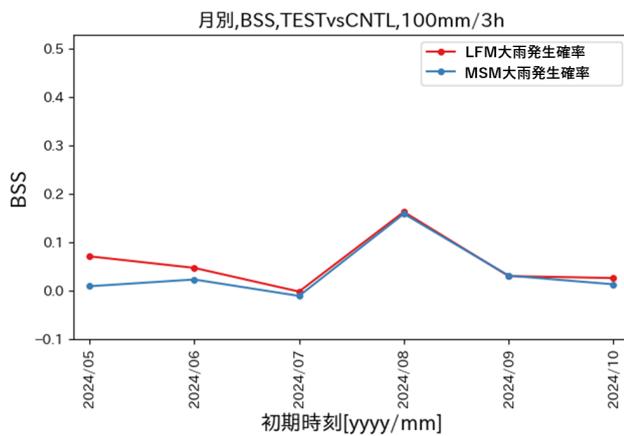


図 3.5.2 100 mm/3h 以上を対象とした、LFM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）、MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）の 2024 年夏季の月毎のブライアスキルスコア。検証領域は全国、予報時間は 3～18 時間。

精度が高い傾向であることが分かる。また、いずれのガイダンスも特に 8 月は予測精度が高い傾向にある。

図 3.5.3 は、同じく LFM 大雨発生確率ガイダンス、MSM 大雨発生確率ガイダンスの 2024 年夏期の月毎の BSS であるが、台風第 10 号の期間（2024 年 8 月 24 日～9 月 1 日）を除外している。この検証では 8 月は他の月に比べいずれのガイダンスも精度が低い。これは、台風事例では梅雨期よりも相対的にモデルの降水予測精度が高く、特定の事例により精度検証のサンプルに偏りが生じたことを示している。大雨のような発生頻度の低い事象についてはこういった偏りはしばしば生じるため、検証結果の解釈には注意が必要である。

なお、地域別に MSM 大雨発生確率ガイダンスと精度比較を行ったところ、四国・西日本・東日本の太平洋沿岸、および 2024 年に線状降水帯が発生した東北地方日本海側や石川県では LFM 大雨発生確率ガイダンスの BSS は MSM よりも上回る傾向が見られた。それ以外の地域では必ずしも LFM 大雨発生確率ガイダンスの優位性は明瞭ではなかった（図略）。

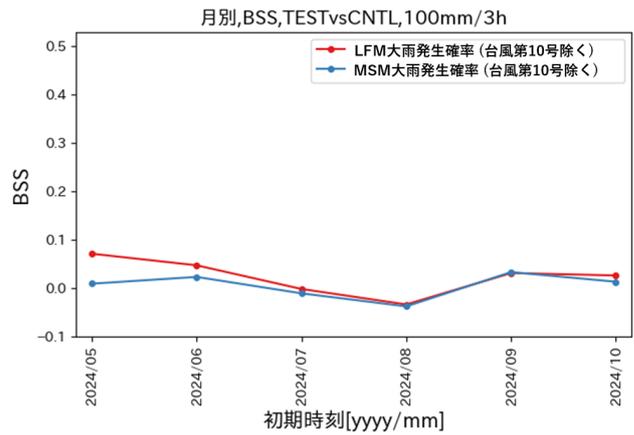


図 3.5.3 100 mm/3h 以上を対象とした、LFM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）、MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）の台風第 10 号の期間（2024 年 8 月 24 日～9 月 1 日）を除外した 2024 年夏季の月毎のブライアスキルスコア。検証領域は全国、予報時間は 3～18 時間。

### 3.5.4 事例

LFM 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 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を発表し、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した。図 3.5.5 の左図は、2024 年 9 月 21 日 10 時を対象とした 100 mm/3h 以上の LFM 大雨発生確率ガイダンスの  $FT=16$  の予測、中図は同じく MSM 大雨発生確率ガイダンスの同時刻の予測結果、右図は 11 時の前 3 時間解析雨量を示した。<sup>3</sup>

図を見ると、LFM 大雨発生確率ガイダンスは MSM 大雨発生確率ガイダンスに比べ、ピーク値の分布が能登半島付近に位置し、実況との対応がよい。これは、前線上の低気圧付近の表現について両モデルで差異があり、LFM では、低気圧付近のモデル降水量等の予測が MSM に比べてより実況に近かったことによる。ここで示した初期値以外についても、概ね LFM 大雨発生確率ガイダンスの方が予測確率、予測位置ともにより実況に近い予測結果であった（図略）。

### 3.5.5 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開発を行いつつ、あわせて高解像度化された局地モデ

<sup>3</sup> 大雨発生確率ガイダンスは、ある対象時刻とその前後 1 時間の 3 時間における確率値なので、それと比較する 3 時間降水量の積算時間は 1 時間後ろにずれる。

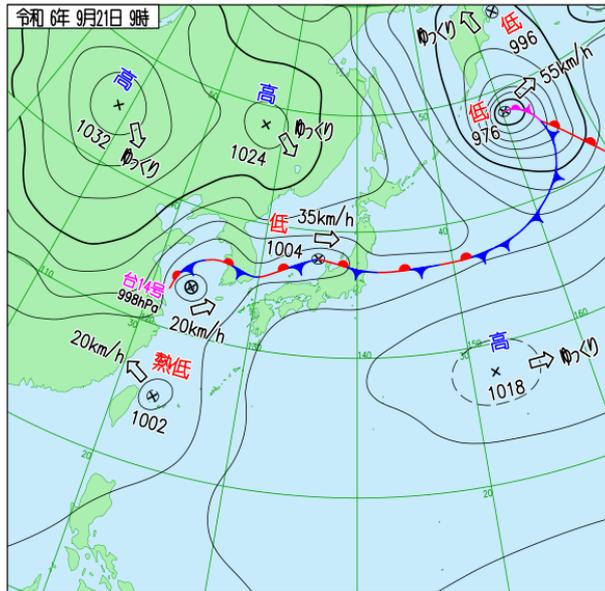


図 3.5.4 2024 年 9 月 21 日 09 時の地上天気図

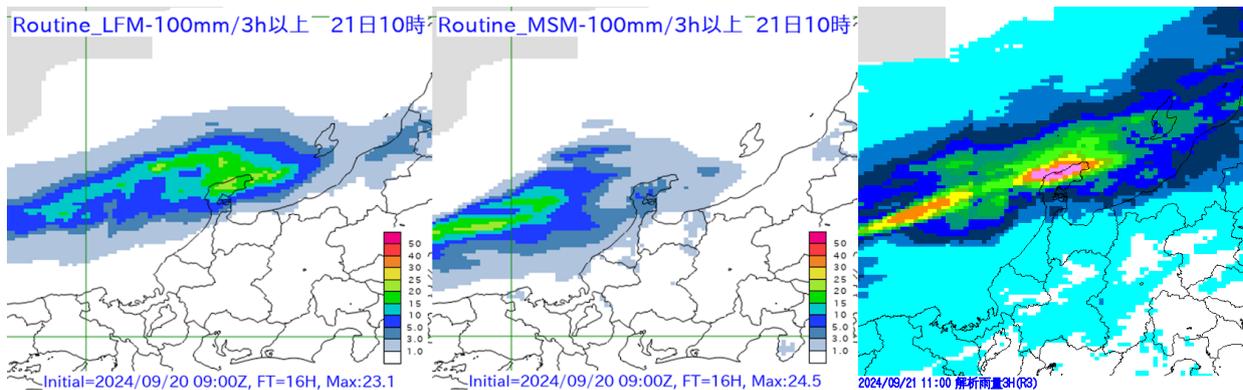


図 3.5.5 2024 年 9 月 21 日 10 時を対象とした（左図）LFM 大雨発生確率ガイダンス、（中央図）MSM 大雨発生確率ガイダンスの FT=16 の予測、（右図）同日 11 時の解析雨量の 3 時間積算値の分布。

ルおよび局地アンサンブル第 4.4 節を入力とした大雨発生確率ガイダンスの開発を進める。

#### 参考文献

- 加藤輝之, 2017: 図解説 中小規模気象学. 気象庁, 316 pp.
- 気象庁, 2022: 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 3 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 120–121.
- 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.

### 3.6 降雪量ガイダンスの改良

#### 3.6.1 はじめに

近年の大雪事例では、家屋の倒壊や農作物への被害の他、鉄道の立ち往生や車両の大規模滞留が繰り返し発生しており、ひとたび発生すると復旧とその解消には数日間に及ぶなど、社会的な影響が大きい。気象庁では、降雪量の予測としては、GSM, MSM, MEPS の各モデルを入力とした降雪量ガイダンスを運用しており、大雪の予測に活用してきた。今回、各降雪量ガイダンスの改良を行い精度向上が得られたので、2024年12月17日00UTCから改良したガイダンスの運用を開始した。ここでは、改良内容と予測精度の統計的な評価、改善事例について報告する。

#### 3.6.2 仕様

改良を行った各ガイダンスの仕様を表3.6.1に示す。作成手法については、改良前（旧版）では、予想される降水量に気温に応じた雪水比<sup>2</sup>を掛けて降雪量を見積もる雪水変換法（土田 2018）という診断的手法により算出していたが、改良版ではニューラルネットワーク（工藤 2018）及び頻度バイアス補正（高田 2018）という、機械学習を用いた手法に変更した。これにより、これまでは降水量の誤差に雪水比の誤差が加わって誤差が増幅していたが、直接降雪量を求めることによって誤差が軽減された。また、各格子で降雪量を求める際に、近隣地点の地点層別化したパラメータを用いることにより、従来の地域差による精度劣化が軽減された。さらに、ニューラルネットワークを使うことによって、その高度な非線形予測能力により、統計的により高精度な予測値が期待できる。

ニューラルネットワークは、まず積雪深計のある地点での6時間降雪量及び12時間降雪量を目的変数として予測を行う。ニューラルネットワークの仕様は表3.6.2のとおり。

表 3.6.1 GSM, MSM, MEPS 降雪量ガイダンスの仕様

|                   |  |
|-------------------|--|
| 作成対象              | 5 km 格子  |
| 作成方法              | ニューラルネットワーク+頻度バイアス補正   |
| 予報期間・<br>間隔       | GSM 降雪量ガイダンス：<br>FT=6~84 (00, 06, 12, 18UTC)<br>MSM 降雪量ガイダンス：<br>FT=3~78 (00, 12UTC) ,<br>FT=3~39 (03, 06, 09, 15, 18, 21UTC)<br>MEPS 降雪量ガイダンス：<br>FT=3~39 (00, 06, 12, 18UTC) |
| 予測要素 <sup>1</sup> | 3 時間降雪量、6 時間降雪量、12 時間降雪量、24 時間降雪量  |

<sup>1</sup> X 時間降雪量ガイダンスは GSM は FT=X+3 以降、MSM は FT=X 以降から予想を出力する。

<sup>2</sup> 降雪量 [cm]/降水量 [mm]。気温を説明変数とする非線形回帰式で算出。

表 3.6.2 ニューラルネットワークの主な仕様

|          |  |
|----------|--|
| 層数       | 3  |
| 入力層ユニット数 | 18 (説明変数) + 1 (定数項)  |
| 中間層ユニット数 | 34   |
| 活性化関数    | ロジスティックシグモイド関数 (中間層)、ReLU (出力層)  |
| 目的変数     | 積雪深計設置地点の 6, 12 時間降雪量  |
| 説明変数     | SRR (気温ガイダンスで層別化した雪水比にモデル降水量を乗じた降雪量)<br>SRR_TD (地上露点温度で層別化した雪水比にモデル降水量を乗じた降雪量)<br>モデル降水量<br>気温ガイダンス<br>地上相対湿度<br>925 hPa 風速<br>925 hPa 上昇流<br>925 hPa 気温と海面水温の差<br>925 hPa と 850 hPa 間の SSI<br>850 hPa 風向<br>850 hPa 風速<br>850 hPa 気温<br>700 hPa 風向<br>700 hPa 上昇流<br>700 hPa 気温<br>700 hPa 相対湿度<br>500 hPa 風向<br>500 hPa 高度 |
| 重み最適化法   | Adam (Diederik P. Kingma 2015)   |
| 逐次学習の有無  | 無し   |
| 層別化処理の対象 | 地点   |

ネットワークの構成についてはグリッドサーチ<sup>3</sup>を行い、最も精度のよかったものを採用した。説明変数は降雪のメカニズムを考慮した気象学の見地から候補となる説明変数をピックアップし、ニューラルネットワークの入力としてより高精度の予測値を算出する組み合わせを選択した（これらのうち最も予測への寄与が大きいのは SRR である）。ニューラルネットワークの学習に用いる訓練データは、降雪頻度の少ない地点では学習が十分に進まないため、近隣の降雪の傾向が類似している地点のデータセットを含めている。訓練データは 2017 年 12 月～2024 年 3 月までの GSM, MSM 予測値及びアメダス観測値のデータセットを利用したが、太平洋側の降雪頻度が低い地点では、2012 年 12 月～2017 年 3 月のデータセットも利用している。

上記ニューラルネットで得た予測値について、頻度バイアス補正を行う。これは、出現頻度の小さい大雪等の予測においては予測値が過小になる傾向があるため（機械学習での回帰予測において一般的に見られる性質）、統計的に求めた過去の観測データの出現頻度と同程度になるように予測値を調整する手法である。

<sup>3</sup> ニューラルネットワークの各種パラメータを段階的に変えて精度を調べる手法

降雪量ガイダンスは各格子を予測対象としているが、ニューラルネットワーク及び頻度バイアス補正の予測式が作成可能なのは観測データを利用できる積雪深計設置地点のみであるため、すべての格子で予測を行うために以下の処理を行う。まず、各格子に近い積雪深計設置地点を3地点選び、3つのニューラルネットワークに当該格子の説明変数を適用し、それぞれの出力値に頻度バイアス補正を行う。これによって3つの予測値が出力されるので、それを距離及び標高から計算した重み付けで平均する。これにより、すべての格子に対してその付近の予測特性を反映した予測値を得ることができる。

なお、最終的な予測にするために、続く以下の処理を行っている。

- (a) 予測対象期間のモデル降水量が0.01 mm未満、または気温ガイダンスが4.5℃以上で降雪量を0 cmとする（気温ガイダンスについては3.5℃から段階的に0 cmとする）
- (b) 求めた6, 12時間降雪量予測から、説明変数SRRに応じて3時間降雪量に分配する。複数の3時間降雪量が算出されるので、それらを平均化して3時間降雪量とする。この3時間降雪量から積算して6, 12, 24時間降雪量とする。
- (c) 2 cm以下の降雪量に関して降水量ガイダンス及び降水種別ガイダンスとの整合処理を行う。この整合処理は上記で求めた降雪量が、降水量ガイダンス及び降水種別ガイダンスから算出される降雪量より少ない場合に後者で置換える処理としている。

### 3.6.3 検証

改良した各降雪量ガイダンスの精度検証結果について、旧版との比較の観点で示す。改良版については、各年の検証時にはその年を抜いたデータセットで学習したネットワークを用いている（交差検証）。

図3.6.1には、2021年12月～2024年3月のGSM, MSMそれぞれの12時間降雪量ガイダンスのエクイタブルスコア(ETS)、バイアスコア(BI)を示した。検証図についてはどれも改良版を赤線、旧版を青線で表している。改良版のETSは40～50 cm/12hの高閾値を除いて大きく向上していることが分かる。また、BIについてはいずれも30 cm/12h付近までは改良前後で差は大きくないが、40 cm/12h以上では改良版はBIが小さい傾向がある。ここで高閾値の精度の傾向に着目する。改良版では50 cm/12hの大雪時で予測精度を示すETSが同程度であるものの、予測頻度を示すBIが減少しており、特にMSMではその傾向が顕著である。これは旧版に比べ空振りが減少していることを示している。旧版ではもともと予測精度が低い高閾値での過大な予測値による空振りのケースが多かったが、改良版ではそれを軽減した。ETSでは改良版、旧版ともに1 cm/12hの予測精度がより高閾値で

ある3 cm/12hに比べて低い傾向がある。この要因は弱雪の予想の難しさに加え、強風により付近に積もった雪が積雪深計の測定部付近に堆積することで1 cmの降雪が意図せず観測される、といった観測測器由来のものが原因の一部である。

図3.6.2には、2023年12月～2024年3月のMEPS12時間降雪量ガイダンスのアンサンブル平均によるETS, BI、および同ガイダンスの各メンバー予測値による20 cmを閾値とした超過確率<sup>4</sup>のブライアスキルスコア(BSS)を示した。ETS, BIについてはGSM, MSMと同様の傾向を示しており、ETSは30 cm/12hまでは大きく向上し、BIは高閾値ほどより予測頻度を抑える傾向である（アンサンブル平均では一般的に、頻度の少ない高閾値の予測頻度が過少傾向になることに留意）。超過確率については、旧版のBSSはいずれのFTでも負値になっており確率情報として気候値に劣っているが、改良版では旧版から大きく改善しすべてのFTで正值であり、確率情報としても有効性が示されている。

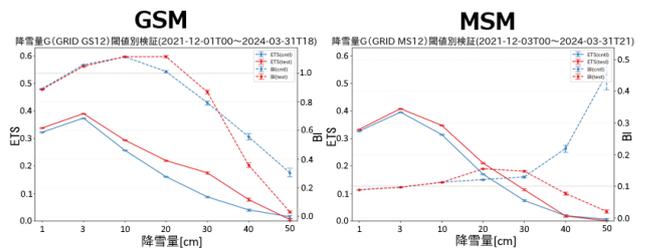


図 3.6.1 GSM 降雪量ガイダンス（左図）、MSM 降雪量ガイダンス（右図）のETS（実線）、BI（破線）比較。共に12時間降雪量予測の全国平均のスコア。改良版を赤線、旧版を青線で表示。

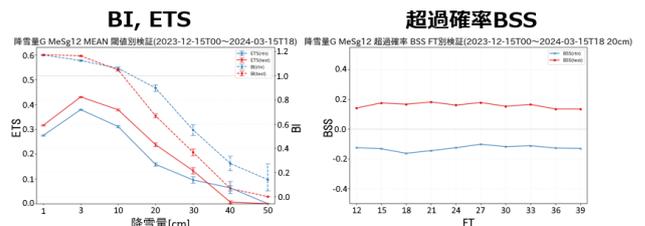


図 3.6.2 MEPS 降雪量ガイダンスのETS（実線）、BI（破線）比較（左図）および20 cmを閾値とした同超過確率のBSS比較（右図）。共に12時間降雪量予測の全国平均のスコア。改良版を赤線、旧版を青線で表示。

### 3.6.4 事例

ここでは2つの事例について、改良版と旧版の比較結果を示す。予測、観測はいずれも12時間降雪量を対象としている。

1つ目の事例として図3.6.3に2024年2月5日の関東地方の大雪事例のMSM降雪量ガイダンスの予測、観測結果を示す。この日は地上天気図にあるように、関

<sup>4</sup> ある閾値を超えるメンバーの割合を確率とみなしたもの

東の南海上を低気圧が東進し、低気圧北側の寒気の流入により関東地方に降雪がもたらされた。東京のアメダス地点で 9 cm/12h、その他平野部でも 10 cm/12h 前後の積雪を観測し、関東では広く大雪となった。ガイダンスの予測においては、旧版は赤丸で囲んだ付近の多くは 5 cm/12h 未満となっているが、改良版では 10 cm/12h 前後の降雪を広い範囲で予測しており、観測された降雪量に近い予測ができていた。また、GSM 降雪量ガイダンスでも同様に、旧版では過少な予測であったが改良版では観測に近い予測であった（図略）。

2 つ目の事例として図 3.6.4 に 2024 年 1 月 16 日の日本海側の大雪事例の MSM 降雪量ガイダンスの予測、観測結果を示す。この日は千島近海には発達した低気圧、中国付近には高気圧があり、日本付近は典型的な冬型の気圧配置となっており、日本海側では寒気の流入により広く降雪がもたらされた。ここでは新潟県と群馬県の県境付近（図中の赤丸）に注目する。観測では降雪は新潟県よりも更に内陸の群馬県北部等の関東側の山地でピークを示している。一方でガイダンスの予測では、旧版では新潟県側の山沿いで 30~40 cm/12h の大雪の予測範囲が広がっているが、改良版では群馬県境付近の山地で強い予測となっており、より観測に近い予測になっていることが分かる。旧版では、冬型の気圧配置において実際の降雪地点よりもやや風上側に降雪のピークを予想する傾向があったが、改良版ではこの傾向が解消され、より観測に近い予想になった。

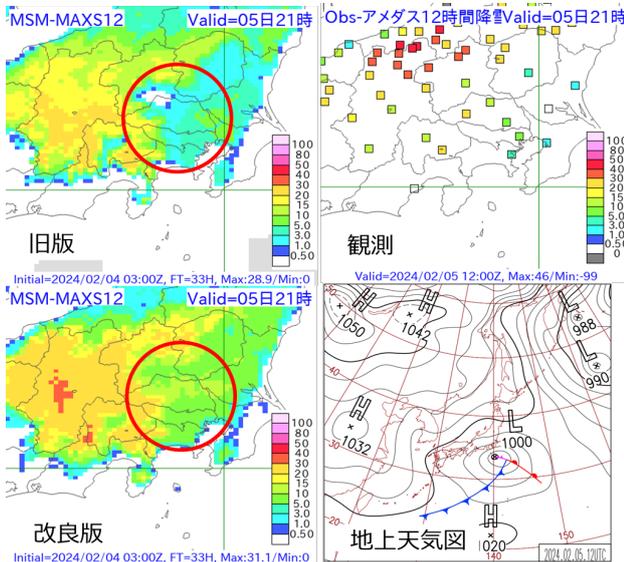


図 3.6.3 2024 年 2 月 5 日 21 時を対象とした、(左上) 旧版 MSM12 時間降雪量ガイダンス、(左下) 改良版 MSM12 時間降雪量ガイダンスの予測 (いずれも FT=33)、(右上) 前 12 時間降雪量 (アメダス観測及び部外観測)、(右下) 日本周辺域地上天気図。

### 3.6.5 今後

大雪による災害の被害軽減のため、引き続き降雪量予測の精度向上を図っていく。まずは複数のモデルを

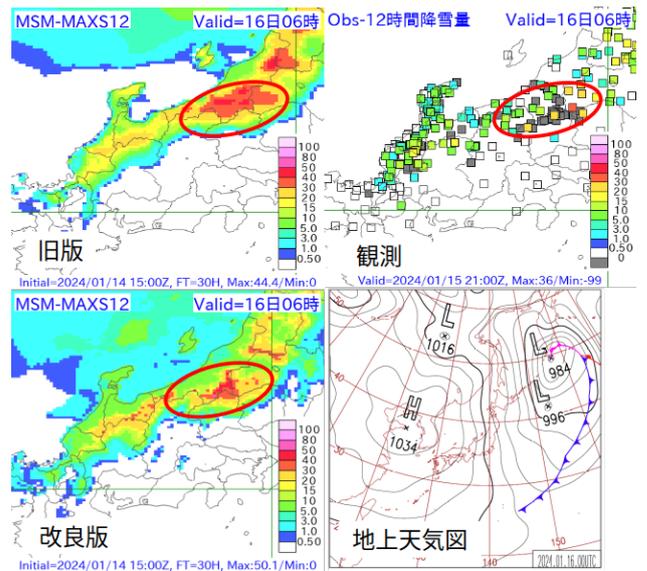


図 3.6.4 2024 年 1 月 16 日 06 時を対象とした、(左上) 旧版 MSM12 時間降雪量ガイダンス、(左下) 改良版 MSM12 時間降雪量ガイダンスの予測 (いずれも FT=30)、(右上) 前 12 時間降雪量 (アメダス観測及び部外観測)。(右下) 同日 09 時を対象とした日本周辺域地上天気図。

入力としてランダム誤差の軽減が期待される、より精度の高いマルチモデル降雪量ガイダンスに重点を置き、開発を進める予定である。

### 参考文献

Diederik P. Kingma, Jimmy Ba, 2015: Adam: A Method for Stochastic Optimization. *International Conference on Learning Representations 2015*.  
 工藤淳, 2018: ニューラルネットワーク. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 48-61.  
 高田伸一, 2018: 頻度バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 78-80.  
 土田尚侑, 2018: 降雪ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 119-131.

### 3.7 全球化学輸送モデルのオゾン同化における観測データの品質管理強化

#### 3.7.1 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 2024)。また、衛星観測データを用いたオゾン全量の同化手法や観測データの品質管理などに関する開発を進めており、2024年11月に観測データの品質管理の強化および解像度変換処理の見直しなどの変更を現業化した。

#### 3.7.2 変更項目

観測データに関する変更として以下の2点の変更を行った。

- 品質管理にグロスエラーチェックを追加：気候学的には正常な値域であるものの第一推定値との乖離が大きい異常な観測値が空間的な広がりをもって現れることが年間数回程度の頻度であり (図 3.7.1 において議論)、既存の品質管理手法では排除することができていなかった。そのため、新たに観測値と第一推定値との差 (O-B) の絶対値が 50DU を超える観測を排除するようにした。
- 冗長な解像度変換処理の廃止：過去のシステムとの処理の互換性などの経緯で、0.25 度等緯度経度 (LL) 格子の観測データを 1.0 度 LL 格子へ変換後にモデル格子 (TL159；約 1.125 度) へ変換する多段階の処理を行っていた。この冗長な変換処理が原因で不要な内挿誤差が発生していることから、処理を見直し 0.25 度 LL 格子の観測データをモデル格子へ直接変換するようにした。

以上の変更は、前者は発生頻度が小さいこと、後者は変化量が小さいことから、長期間の統計検証においては解析・予測精度や予測特性への影響は軽微であることが想定される。

また、モデルの精度に関わらない維持管理に関する以下の変更も同時に適用した。

- 将来シナリオに基づいたガス排出量境界条件データを与える入力ファイルに 2025 年までのデータしか格納されていなかったため 2035 年まで期間を延長した。
- 次期季節予測システム (CPS4) のオゾン濃度の初期条件の作成に使用する予定の出力を追加した。
- モデルの計算結果を書き出して一度処理を終了し、その計算結果から再度計算を再開するリスタート機能の改修や、一部のサブルーチンの不具合修正を行った。

#### 3.7.3 試験結果

2023年6月から2024年5月の1年間を対象として、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) には 2024年3月時点の

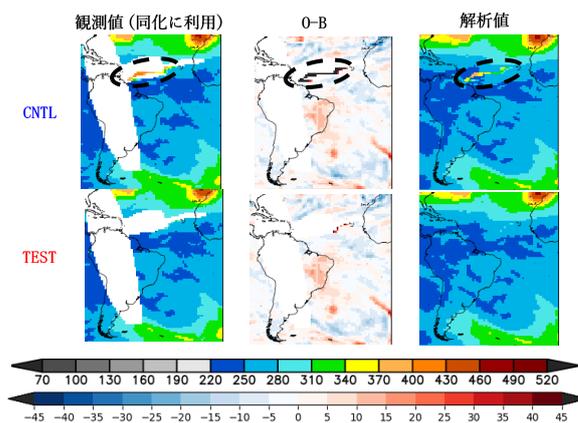


図 3.7.1 観測値の異常事例 (2024年3月22日)：(上) CNTL、(下) TEST の左からオゾン全量 [DU] の同化に利用した観測値、O-B、解析値。破線で囲った領域は CNTL で観測の異常値が同化された様子。TEST では O-B が 50DU を超えた観測は排除された。

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。

- 観測値の異常がみられた事例 (図 3.7.1) では、CNTL では黒破線の楕円で囲んだ領域の中央部にみられる異常な観測値を排除することができず、大きな O-B がみられたとともにそれらが同化されたために解析値にもその影響が表れていた。一方で、TEST ではグロスエラーチェックの追加により異常な観測値を除去できるようになった。
- 図 3.7.2 に実験期間の東西平均オゾン全量の O-B と解析値の時系列を示す。観測データの冗長な解像度変換が原因で、CNTL では南北勾配が大きな季節・領域の O-B に縞状のノイズがみられたが、TEST では解消した。解析値の変化は大きいところで 5DU 程度 (変化率は概ね 0.5% 以下) であり、変更内容から想定されるとおり変化は非常に小さかった。
- 図 3.7.3 に初期時刻の 12 時間前から 12 時間後 (初期時刻前は解析期間にあたる) までの日平均のオゾン全量を分光光度計観測で検証した結果を示す。変更内容から想定されるとおり精度は TEST と CNTL でほぼ変わらず、他の予報時間でも同様であった。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も解析・予測精度や予測特性はほぼ変わらなかった (図略)。

#### 3.7.4 まとめ

全球化学輸送モデルで利用している観測データの品質管理の強化および解像度変換処理の見直しなどの変更を加えて業務化試験を行った。その結果、これまで排除できていなかった観測異常値の混入事例に対して異常値の排除が可能になったことを確認した。また、変更内容から想定されるとおり解析・予測精度への影響は軽微であった。上記の改良を 2024年11月に現業化

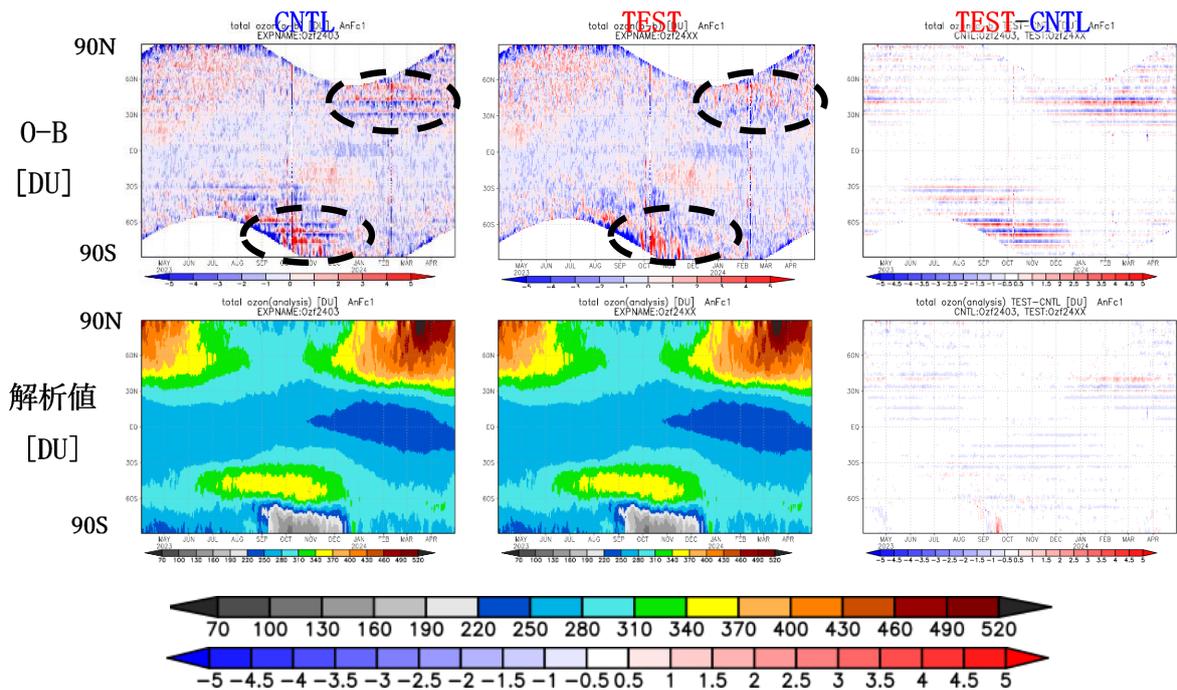


図 3.7.2 東西平均オゾン全量 [DU] の (上) O-B と (下) 解析値の時系列。左から CNTL、TEST、TEST-CNTL。破線で囲った領域で CNTL に縞状のノイズがあるが TEST では解消した。

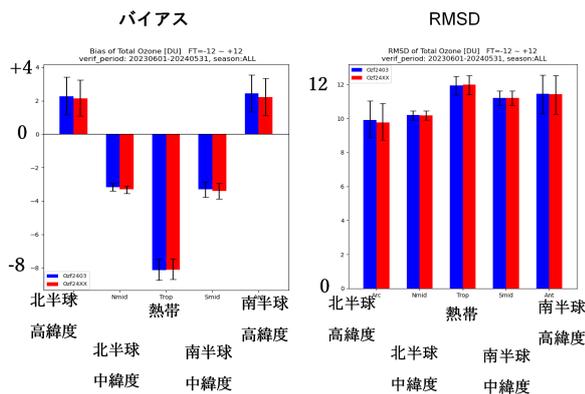


図 3.7.3 初期時刻の 12 時間前から 12 時間後までの日平均オゾン全量の対分光光度計検証結果。CNTL (青) と TEST (赤) に対するオゾン全量 [DU] の (左) バイアスと (右) 二乗平均平方根差の結果。エラーバーはブートストラップ法で見積もられた 95% 信頼区間。

した。

### 参考文献

JMA, 2024: *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/outline2024-nwp/index.htm>).

### 3.8 気候データ同化システムの観測データ利用拡充

#### 3.8.1 はじめに

長期再解析の目的は、季節アンサンブル予報システム等の各種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業務等に利用可能な、長期間の均質で高品質な気候データセットの作成及び提供である。2023年5月以降、当庁の業務では気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century; Kosaka et al. 2024) が利用されている。JRA-3Qは1947年9月以降を解析対象としており、気象庁第2次長期再解析 (JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis; 古林ほか 2015) 以降の現業全球数値予報システム及び海面水温 (SST) 解析の開発成果や、国内外の気象機関等によるデータレスキュー、衛星運用機関による衛星データの再処理による過去の観測データ拡充の成果等を活用することにより、JRA-55よりも品質が向上している。JRA-3Qは2019年8月から本計算を開始し、2022年11月末に過去期間のすべての計算を完了した。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開始している。

気候データ同化システムについて、2024年8月20日に観測データの利用拡充を行った。本節では、本変更の概要を説明する。

#### 3.8.2 観測データ利用拡充の概要と影響評価

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。今回の変更で導入した新規観測データは、Metop-CのIASI、GOES-18の晴天輝度温度 (CSR) と大気追跡風 (AMV)、Dual-Metop AMV、VIIRS AMV、及びNOAA-21のATMSとCrISである。

気候データ同化システムに新規観測データを導入することによる影響を調査するため、2023年12月10日～2024年2月11日を対象としてインパクト実験を行った。以下、当時の気候データ同化システム相当の実験をCNTL、CNTLに新規観測データを同化した実験をTESTと呼ぶ。

図3.8.1はO-B (観測値と第一推定値の差) の標準偏差のCNTLに対する変化率である。AMSU-A、MHS、ラジオゾンデの相対湿度、ラジオゾンデの東西風、航空機観測の東西風について、TESTの方がCNTLよりもO-Bの標準偏差が減少していることが分かる。これらの観測データの利用方法に変更はないことから、このことは解析値の精度が向上していることを示唆している。

図3.8.2、図3.8.3に2024年第6半旬 (1月26日～1月30日) におけるTESTとCNTLの差の半旬平均値、

及び参考のためJRA-3QとJRA-55の差の半旬平均値を示す。また、図3.8.4には2024年1月におけるTESTとCNTLの差の月平均値、及びJRA-3QとJRA-55の差の月平均値を示す。TESTとCNTLの差はJRA-3QとJRA-55の差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。

#### 3.8.3 今後の予定

気候データ同化システムについては、今後も定期的に観測データ利用拡充を行うことにより、解析値の精度維持に務める。

将来の課題としては、週間～季節予報を担う全球・季節アンサンブル予報システムの高度化には、2018年12月時点の全球現業データ同化システムに基づいて作成しているJRA-3Qよりも更に高品質な再解析データが必要不可欠である。このため、現在の現業数値予報システムに導入されているハイブリッド同化 (気象庁2021a) やアウトーループ、衛星輝度温度データの全天同化 (気象庁2021b) などを再解析にも反映させ、雲・降水域を含めより多くの観測情報を取り込むことにより、精度向上を図ることが必要と考えられる。また、大気・陸面・海洋データ同化の高度化や、気象研究所と連携した大気海洋結合同化の研究開発を行い、その有用性についてパイロット (試験的) 再解析をとおして評価することも計画している。

近年急速に発展している人工知能・機械学習における教師データ等としての利用の観点を含めて、再解析データの仕様に関しても拡充が求められる。第6回世界気候研究計画 (WCRP) 再解析国際会議 (令和6年10月) などを通じて得られた再解析の利活用状況に関する情報や計算機資源の状況も踏まえつつ、検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 気象庁, 2021a: ハイブリッド同化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, 18-22.
- 気象庁, 2021b: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトー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.
- 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,

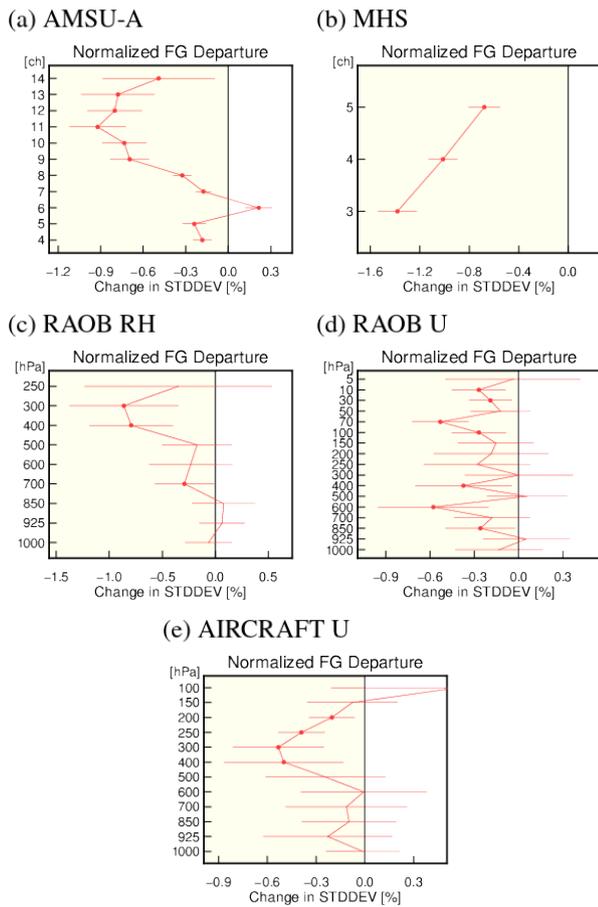
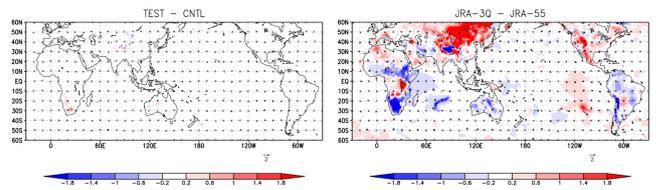


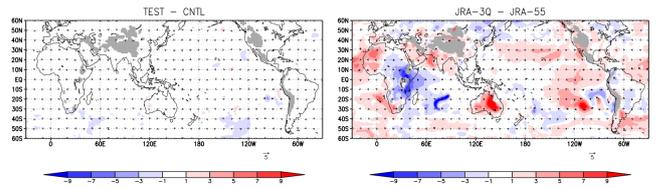
図 3.8.1 観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の TEST の CNTL に対する変化率 [%]。統計期間は 2023 年 12 月 21 日～2024 年 2 月 11 日。(a) マイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、(c) ラジオゾンデの相対湿度、(d) ラジオゾンデの東西風、(e) 航空機観測の東西風。縦軸は (a)(b) はチャンネル番号、(c)-(e) は気圧高度を表す。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

T. Tokuhira, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109.

(a) Psea and surface wind



(b) Geopotential height and wind at 850hPa



(c) Geopotential height and wind at 200hPa

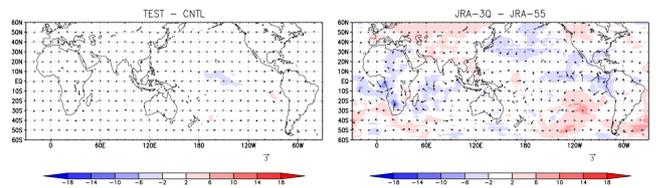
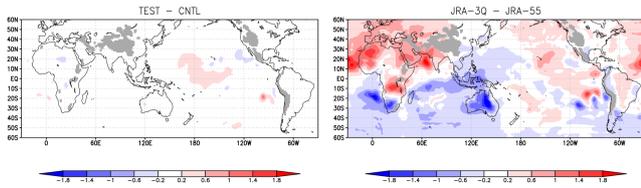
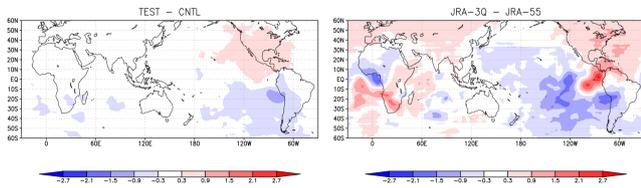


図 3.8.2 2024 年第 6 半旬 (1 月 26 日～1 月 30 日) における TEST と CNTL の差の半旬平均値 (左列)、及び JRA-3Q と JRA-55 の差の半旬平均値 (右列)。(a) 海面気圧 (陰影: hPa) と地上風 (ベクトル: m/s)、(b) 850hPa 高度 (陰影: gpm) と風 (ベクトル: m/s)、(c) 200hPa 高度 (陰影: gpm) と風 (ベクトル: m/s)。

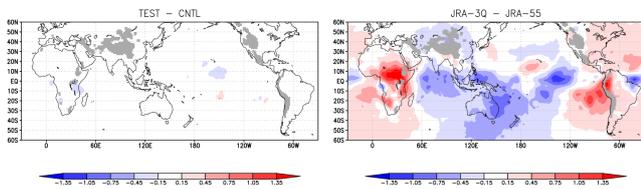
(a) Stream function at 850hPa



(b) Stream function at 200hPa



(c) Velocity potential at 850hPa



(d) Velocity potential at 200hPa

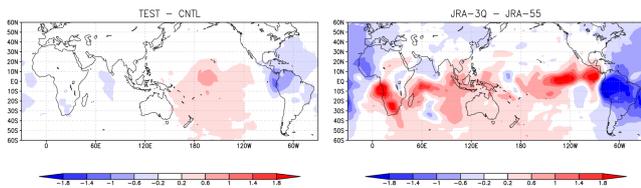
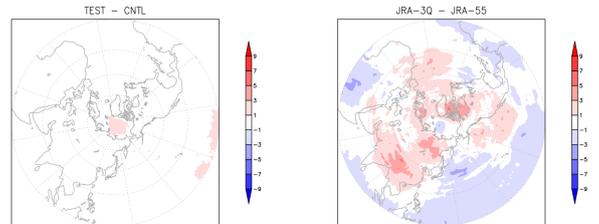
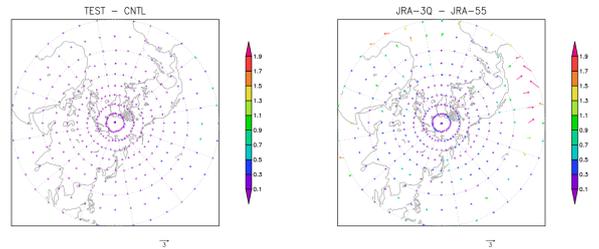


図 3.8.3 2024年第6半旬(1月26日~1月30日)における TEST と CNTL の差の半旬平均値(左列)、及び JRA-3Q と JRA-55 の差の半旬平均値(右列)。(a)850hPa 流線関数 ( $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ )、(b)200hPa 流線関数 ( $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ )、(c)850hPa 速度ポテンシャル ( $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ )、(d)200hPa 速度ポテンシャル ( $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ )

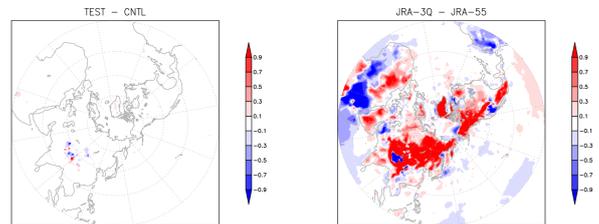
(a) Geopotential height at 500hPa



(b) Wind at 200hPa



(c) Psea



(d) Temperature at 850hpa

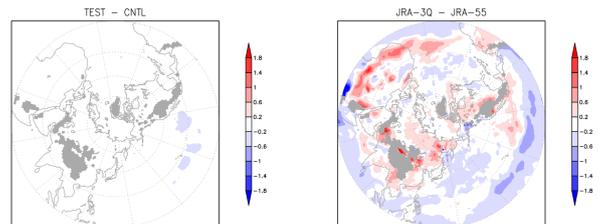


図 3.8.4 2024年1月における TEST と CNTL の差の月平均値(左列)、及び JRA-3Q と JRA-55 の差の月平均値(右列)。(a)500hPa 高度 (gpm)、(b)200hPa 風ベクトル (m/s)、(c)海面気圧 (hPa)、(d)850hPa 気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

## 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、平成30年に気象庁が策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」（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、全球モデル（GSM）の鉛直・水平解像度の増強、物理過程の継続的な改良を実施した（気象庁 2021; 気象庁 2022; 気象庁 2024a）。

令和6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物理過程開発を進めるとともに、数値予報モデルの構造を現在及び将来の計算機の構成や特性に適応させる形での高速化・省資源化も合わせて進める。令和6年度末に計画している GSM 更新では、前者の対応として陸面過程・放射過程における気候値更新、後者への対応として GSM のフレームの改良、放射過程の高速化・省メモリ化を導入すべく開発を進めている。

短期予報向けの数値予報モデルのように、植生の状態の変化や大気微量成分そのものを予測対象としない場合は、植生の状態やその物理的特性を表すパラメータ、放射計算の際に考慮する大気微量成分の濃度等について、直接観測値や衛星データからのリトリブに基づく気候値データセットを使用する。これら気候値データセットは、観測手法・データセット作成手法の高度化や、人間活動・気候変動による変化に合わせて、随時更新していくことが数値予報モデルの継続的な精度向上に必要となる。特に、陸面過程や放射過程は、入力に使う気候値データセットの種類が他の物理過程に比べて多く、これらが大気の大気温度や水蒸気の予測精度に与える影響も大きい。そのため、現在の気候状態をより適切に反映したデータセットの存在が重要になる。

重点計画で示した開発の方向性である GSM の高解像度化や精緻化を可能にするためには、計算機性能の向上だけに頼らずに、将来の計算機の構成や特性にモデルを適応させ高速化・省メモリ化することも重要となる。そのため開発として、通信の効率化や配列構造を計算機の特性に柔軟に対応させることを目的に GSM 全体のフレーム改良を進め、その効果を確認してきた（気象庁 2024b）。さらに、個別の過程に注目すると、放射過程は、計算量・メモリ使用量が多い過程のひとつとして知られている。したがって、放射過程を高速化・省メモリ化することは、モデル全体の高速化・省資源化にも資する。また、放射過程は大気の鉛直構造の表現等数値予報モデルの基礎的な性能を決める部分であるため、計算の精緻化・気候値更新等改良のための変

更頻度が多い過程でもある<sup>1</sup>。そのため、見通しが良く維持管理や改良がしやすい構造になっている等持続的な開発が可能なコードになっていることも重要である。

本節では、令和6年度末の GSM 更新に向けた改良項目のうち、陸面過程における葉面積指数 (Leaf Area Index; LAI)<sup>2</sup>気候値更新と、放射過程における二酸化炭素濃度気候値更新及び、高速化・省メモリ化を目的とした放射過程の再構築の進捗について報告する。

#### 4.1.2 陸面過程における LAI 気候値更新

GSM において、陸面過程は大気モデルの下部境界条件として潜熱・顕熱・運動量・放射の各フラックスを与える役割をもつ。これらの地表面フラックスは境界層過程を通じて対流圏下層の予測精度に大きく影響する。陸面過程では陸面の非一様性を表現するために種々のパラメータを利用しており、植生パラメータの1つに LAI がある。LAI は植生の粗密を表し、陸面過程内において植生の影響を表現するための重要なパラメータである。LAI の変化は潜熱・顕熱フラックスの予測に影響を与える。例えば、LAI が増加した場合、植生からの蒸散量が増えることで潜熱フラックスが増加、顕熱フラックスが減少する。このため、地域ごとの LAI 分布の特徴をより反映した気候値を利用することにより潜熱・顕熱フラックスの予測が改善され、これを通じて GSM の対流圏下層における水蒸気や気温の予測精度向上に繋がることが期待される。本項では、陸面過程における LAI 気候値の更新内容および更新による予測精度への影響について報告する。

##### (1) LAI 気候値について

2024年12月時点の GSM では、LAI 気候値に MODIS プロダクト (Myneni et al. 2002) に基づく緯度帯 (低緯度 (< 23.5°)・中緯度 (≥ 23.5°, < 55°)・高緯度 (≥ 55°) の3区分) および植生種別ごとの月別平均値を利用している。プロダクトのバージョンは v005 (水平格子間隔 1 km) で、気候値作成に利用したデータの期間は 2001 年から 2010 年である。本プロダクトは赤色光と近赤外光の反射率観測値と 3 次元植生放射伝達モデルから LAI を逆解析して作成されている。

現気候値には 2 つの課題が存在する。1 点目は気候値作成手法に関する課題である。現気候値では作成時に緯度帯・植生種別ごとで平均するため、同一緯度帯・植生種別における LAI の非一様性が反映されない。2 点目は利用プロダクトに関する課題である。現気候値の作成以降、作成元データセットが高精度化されたほか、気候変動に伴い LAI が変化している (全球的に増

<sup>1</sup> 気象庁 (2024a) の表 3.2.2 の通り、アルベド更新等も含めると、GSM の更新においてほとんどの場合で何らかの形で放射過程の変更が関わっている。

<sup>2</sup> 単位面積当たりの葉 (片面) 面積 [ $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ]。

加傾向 (Fang et al. 2019)) がこれらを反映できていない。これらの課題を解決して現在の気候状態をより反映した新気候値を作成し、対流圏下層の予測精度を向上させることを目的に、LAI 気候値の更新に関する開発を行った。

## (2) LAI 気候値の更新内容

ここでは気候値更新における各変更点の内容と更新による LAI 分布変化の特徴について述べる。

### 緯度帯・植生種別平均の見直し

新気候値では作成時に緯度帯・植生種別平均を行わず、各モデル格子の月別平均値を利用する。この見直しと合わせて、陸面過程の計算に必要な植生面積指数 (Plant Area Index; PAI) を算出する箇所も変更する。PAI は緑葉 LAI (緑葉のみを考慮した LAI)、枯葉 LAI、幹面積指数 (Stem Area Index; SAI) の合計であり、陸面過程の計算で最終的に必要とするパラメータである。現・新気候値は MODIS プロダクトの緑葉 LAI から計算される点は同じであるが、現気候値では緯度帯・植生種別平均時に PAI を求めるのに対し、新気候値では緑葉 LAI を陸面過程に入力し、陸面過程の中で格子点ごとに PAI を計算するように変更した。このとき、SAI は Sellers et al. (1996) に基づき植生種別ごとに与える。枯葉 LAI である  $LAI_{dead}$  [ $m^2 m^{-2}$ ] は以下の式から求める。

$$LAI_{dead} = \max(LAI_{prev} - LAI_{cur}, 0) \quad (4.1.1)$$

ここで、 $LAI_{prev}$ ,  $LAI_{cur}$  はそれぞれ、前月の緑葉 LAI [ $m^2 m^{-2}$ ]、当月の緑葉 LAI [ $m^2 m^{-2}$ ] である。

### 利用プロダクトと利用年代の更新

新気候値の作成には現気候値の作成元よりも新しいバージョンの MODIS プロダクト (v006, 水平格子間隔 500m) を用いた。v006 の解析アルゴリズムは v005 と同一であるが、精度は v006 のほうが良い (Yan et al. 2016a,b)。これは入力される観測データや土地被覆データが v005 に対して高解像度化されており、土地の詳細な特徴をより表現可能となっているためである。新気候値の作成に利用するデータの年代についても更新し、現気候値より新しい期間 (2010 年から 2019 年) を用いた。

### 高緯度域の常緑樹における補正処理の追加

高緯度域では冬季に太陽が当たらない時間が長いいため、プロダクト作成に可視光も利用する MODIS プロダクトは高緯度域において解析手法に起因する誤差が大きい。現気候値では緯度帯・植生種別平均を行うことで精度の悪い高緯度域のデータは穴埋めされていたが、平均処理の見直しによりこの特性が顕在化した。この問題に対応するため、Lawrence and Chase (2007) を参考にして高緯度における常緑樹域を対象に補正処理を追加した。常緑樹は年間での LAI 変化が小さいと考

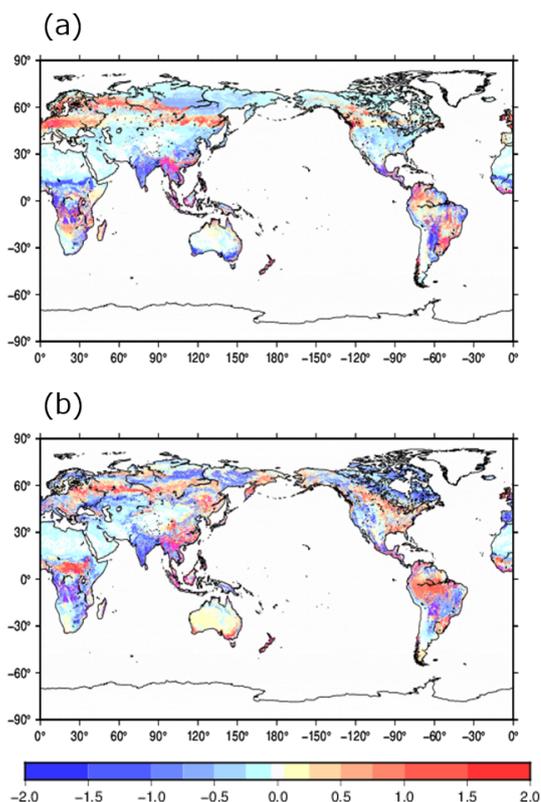


図 4.1.1 新気候値と現気候値の LAI の差 [ $m^2 m^{-2}$ ]、(a) 1 月、(b) 8 月。

えられるため、各格子の年最大値に基づく下限値を設ける。下限値  $LAI_{min}$  [ $m^2 m^{-2}$ ] は以下で表される。

$$LAI_{min} = fLAI_{anmax} \quad (4.1.2)$$

ここで、 $f$ ,  $LAI_{anmax}$  はそれぞれ、補正係数、LAI 年最大値 [ $m^2 m^{-2}$ ] である。陸面過程の植生種別で常緑樹を含むものは常緑広葉樹 (EBF)、常緑針葉樹 (ENF)、落葉広葉樹と常緑針葉樹の混合林 (MF) の 3 つである。EBF と ENF は Zeng et al. (2002) の値を採用し、それぞれ  $f = 0.8$ ,  $f = 0.7$  とした。MF は補正対象領域内の LAI 平均値を比較し、MF での補正による上昇量が ENF での上昇量の半分程度となるように調整して  $f = 0.3$  とした。

### 更新による変化

気候値更新による 1 月および 8 月の LAI の変化分布を図 4.1.1 に示す。両月とも地域ごとに LAI の増加・減少の傾向が分かれている。緯度帯・植生種別平均値ではなく各モデル格子の値を利用することで、熱帯や夏半球側の森林域で増加し、インドやユーラシア大陸内陸では減少する等、各地域の LAI 分布の特徴がより反映されるように変化した。また、更新による効果の一例として、現気候値で各緯度帯の境界に存在していた LAI 分布の不連続が新気候値では解消された (図 4.1.2 中赤丸)。

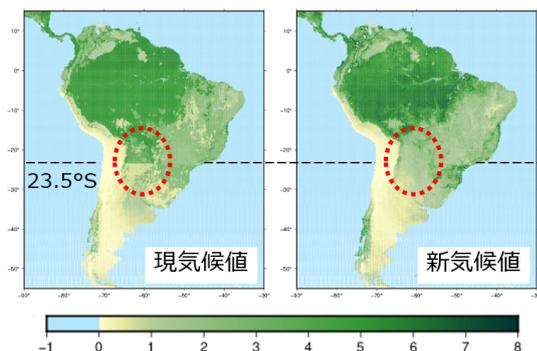


図 4.1.2 7月の南米域 (55°S–15°N, 90°W–30°W) における現気候値と新気候値の LAI 分布 [ $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ] の違い。図中の楕円については本文参照。

### (3) LAI 気候値更新による GSM 予測精度への影響

LAI 気候値更新による陸面モデル予測の変化や大気予測精度への影響を確認するため、オフラインモデル<sup>3</sup>を用いた実験と解析予報サイクル実験を行った。対照実験としては、2024年3月時点の全球数値予報システムの低解像度版 (水平格子間隔約 20 km(TI959L128)) を用いた。対照実験を  $\text{CNTL}_{(\text{LAI})}$ 、新気候値を利用した実験を  $\text{TEST}_{(\text{LAI})}$  と呼ぶ。

#### オフライン実験

オフライン実験では大気強制力に GSWP3 (Global Soil Wetness Project Phase 3) で使用されたデータ<sup>4</sup>(Kim 2017) を利用してオフラインモデルによる予測を行う。そして、6時間ごとに気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55; Kobayashi et al. 2015) の積雪深解析値で予測値を置換して次の予測計算の初期値とすることを繰り返す。図 4.1.3 はオフライン実験による 2000 年 8 月平均の潜熱・顕熱フラックス予測値 [ $\text{W m}^{-2}$ ] について、 $\text{TEST}_{(\text{LAI})}$  と  $\text{CNTL}_{(\text{LAI})}$  の差を示す。8 月における LAI の変化 (図 4.1.1(b)) と比べると、各地域の LAI 増加 (減少) に対応して潜熱フラックスが増加 (減少)、顕熱フラックスが減少 (増加) しており、LAI の変化に対して想定した方向への変化が見られた。また、CEOP(Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project; Roads et al. 2007) の観測データを用いた検証を行い、気候値更新によりオフライン実験の潜熱・顕熱フラックス予測値の平均誤差が複数地点で減少することを確認した (図略)。

<sup>3</sup> 大気モデルと切り離す代わりに、大気最下層の値を観測値や解析値等で与え、陸面モデル単体で予報するモデル (草開 2012)。

<sup>4</sup> NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (20CR) をベースとし、降水量・放射量・地上気温を衛星観測値等に基づき補正したデータ。

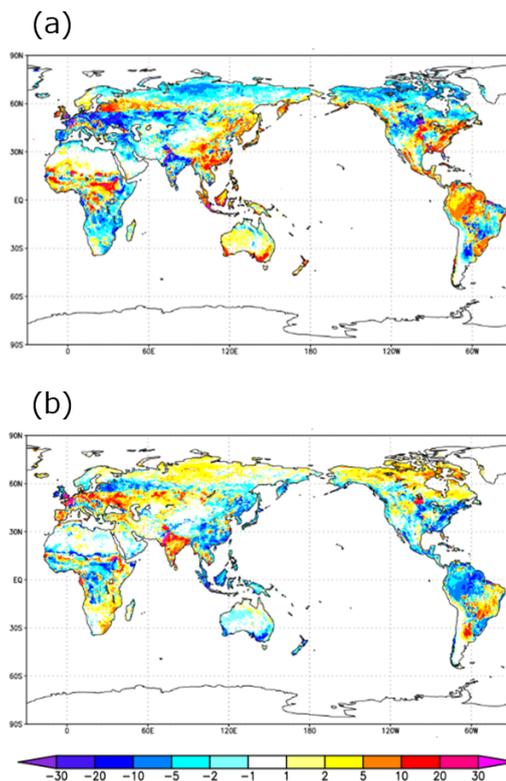


図 4.1.3 オフライン実験による 2000 年 8 月平均の (a) 潜熱フラックス、(b) 顕熱フラックスの 6 時間予測値の  $\text{TEST}_{(\text{LAI})}$  と  $\text{CNTL}_{(\text{LAI})}$  の差 [ $\text{W m}^{-2}$ ]。

#### 解析予報サイクル実験

LAI 気候値更新の全球数値予報システムにおける予測精度へのインパクトを確認するため、解析予報サイクル実験を実施した。実験は夏期実験として 2023 年 8 月、冬期実験として 2024 年 1 月の 2 期間を対象として行った。ここではより大きいインパクトが得られた夏期実験の結果を述べる。

図 4.1.4 は 2023 年 8 月平均の地上相対湿度および地上気温の 12UTC 初期値からの 24 時間予測値について、 $\text{CNTL}_{(\text{LAI})}$  の SYNOP 観測に対する平均誤差および  $\text{TEST}_{(\text{LAI})}$  と  $\text{CNTL}_{(\text{LAI})}$  の差を示す。ヨーロッパ域 (図中緑丸) では地上相対湿度予測の多湿バイアスおよび地上気温予測の低温バイアスが見られる (図 4.1.4(a)) が、 $\text{TEST}_{(\text{LAI})}$  では両要素ともそのバイアスを減少させる方向へと変化している (図 4.1.4(b))。ヨーロッパ域では気候値更新により東欧を中心に広範囲で LAI が減少しており、地上相対湿度と地上気温の変化傾向はオフライン実験で見られた LAI 減少に対応する潜熱・顕熱フラックスの変化傾向と整合的である。また、ヨーロッパ域における地上相対湿度および地上気温のバイアス減少は予報時間によらず見られた (図 4.1.5)。図 4.1.6 は 2023 年 8 月平均の北半球における相対湿度および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を示す。

各予報時間において CNTL<sub>(LAI)</sub> に見られた対流圏下層の相対湿度の多湿バイアスおよび気温の低温バイアスについて、TEST<sub>(LAI)</sub> ではそれぞれのバイアスが減少する方向へと変化した。対流圏下層では両要素の各予報時間での二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error; RMSE) も減少している (図略)。対流圏下層におけるこれらの改善は、気候値更新によるヨーロッパ等の地域における地表面の潜熱・顕熱フラックスの改善が境界層過程を通じて影響したものと考えられる。なお、気候値更新による対流圏中層以上の大気への予測精度の影響は小さく、主要予測スコアの変化はほぼ中立であった (図略)。

### 4.1.3 放射過程における改良

#### (1) 放射過程における二酸化炭素濃度気候値の更新

二酸化炭素は温室効果ガスの1つであり、放射過程における重要な大気微量成分である。GSM では大気中の二酸化炭素濃度として、近似的に全球一様・通年の気候値を採用している。定期的な二酸化炭素濃度の更新を行ってきており、近年では2004年と2016年に更新が行われている。現在のGSMで用いられている二酸化炭素濃度は2013年の観測値の396.0 ppmvである(関口ほか(2019))。しかし、年々の二酸化炭素濃度の上昇によりGSM内での二酸化炭素濃度と最新の濃度とは乖離が生じている。そこで、最新の二酸化炭素濃度として報告されている417.9 ppmv(2022年の観測値(WMO(2023)))にアップデートした際の予測精度へのインパクトを調査した。

一般に、二酸化炭素濃度が増加することで、長波放射と短波放射に対して以下に示すインパクトが予想される。大気の光学的厚さが増えることで、長波放射による射出・吸収、短波放射による吸収が増加する。これにより、対流圏では長波放射による冷却が弱まり、短波放射による加熱が強まることとなる。結果として、対流圏の気温は上がり、同時に地上気温も上昇し、地表面に届く短波放射の量は減少すると考えられる。また、成層圏から上層では主に長波放射による射出が卓越することで冷却が強まり、気温は下がることが知られており、対流圏よりも大きな変化が想定される(浅野(2011))。一方で、本稿で示す二酸化炭素濃度を踏まえると、対流圏での放射過程における二酸化炭素の影響と濃度の変更量が小さいことから、対流圏での直接的な加熱率の変化や地表面での放射フラックスの変化は小さく、主なインパクトは成層圏から上層での冷却と想定される。

これらの点を踏まえ、二酸化炭素濃度気候値の更新が全球数値予報システムにおける予測精度に与える影響を調べるために、解析予報サイクル実験を行い、二酸化炭素濃度更新前(396.0 ppmv, CNTL<sub>(CO<sub>2</sub>)</sub>)と更新後(417.9 ppmv, TEST<sub>(CO<sub>2</sub>)</sub>)の比較を行った。図4.1.7は、解析予報サイクル実験より得られた8月の月平均

解析気温の鉛直プロファイルを示している。二酸化炭素濃度気候値の増加により、成層圏から中間圏で放射過程による冷却の強まりが見られ、最大で1 K程度の気温の減少が見られた。対流圏ではごくわずかに加熱の傾向が見られたが、0.05 Kよりも小さい変化量であった。これらは前述した二酸化炭素濃度増加による気温の変化の想定と整合している。図4.1.8に、解析予報サイクル実験で得られた二酸化炭素気候値更新前後での地表と大気上端における放射フラックスの差を示している。いずれの放射フラックスも変化量は数 W m<sup>-2</sup>程度であることがわかる。また、緯度ごとの帯状平均を見ると、地表面下向き長波放射が増加、大気上端上向き長波放射と地表面下向き短波放射(晴天)が減少傾向であることがわかる。二酸化炭素濃度が増加することで大気が光学的に厚くなるため、長波放射は大気によく吸収・射出されるために下向きの長波放射フラックスが増加する。また、その分上向きの長波放射フラックスが減少することとなる。短波放射は光学的に厚い大気を通過するとより吸収が増えるため、地表面に届く短波放射は減少している。これらも前述の想定と整合的である。

図4.1.9は、解析予報サイクル実験で得られた2023年8月平均の北半球(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である。対流圏では平均誤差の違いはほぼ見られず、二酸化炭素濃度変更によるはっきりとした影響は見られなかった。一方で、成層圏において高温バイアスが減少する傾向が見られた。二酸化炭素濃度の増加に伴い成層圏での二酸化炭素による長波放射の冷却が卓越することで、高温バイアスが緩和されたと考えられる。その他、主要予測スコアは中立であった(図略)。また、夏実験の結果を示したが、冬実験においても夏実験と同様のインパクトの傾向が見られた(図略)。以上のことから、二酸化炭素濃度気候値の更新による想定されるインパクトが確認され、成層圏の高温バイアスを改善した。

#### (2) 高速化・省メモリ化を目指した放射過程の再構築

近年の計算機性能向上の鈍化に伴い、GSMにおける高速化・省メモリ化の重要度が増してきている。放射過程は計算量・メモリ使用量が多い過程であるため、それを高速化・省資源化することはGSM全体に対してメリットとなる。そこで、放射過程内で行っている計算方法は変えずに、コーディングのみを修正することで高速化・省メモリ化を行った。併せて、今後の開発の効率化のために見通しがよく可読性の高いコードとなるような修正も行った。

具体的に行った修正の一例として、オゾンやエロゾル気候値の内挿について説明する。オゾン濃度は3次元の月別気候値であり、気象研究所化学輸送モデルMRI-CCM2(Deushi and Shibata(2011))を用いて1981~2010年の30年間より作成され(水平格子間隔

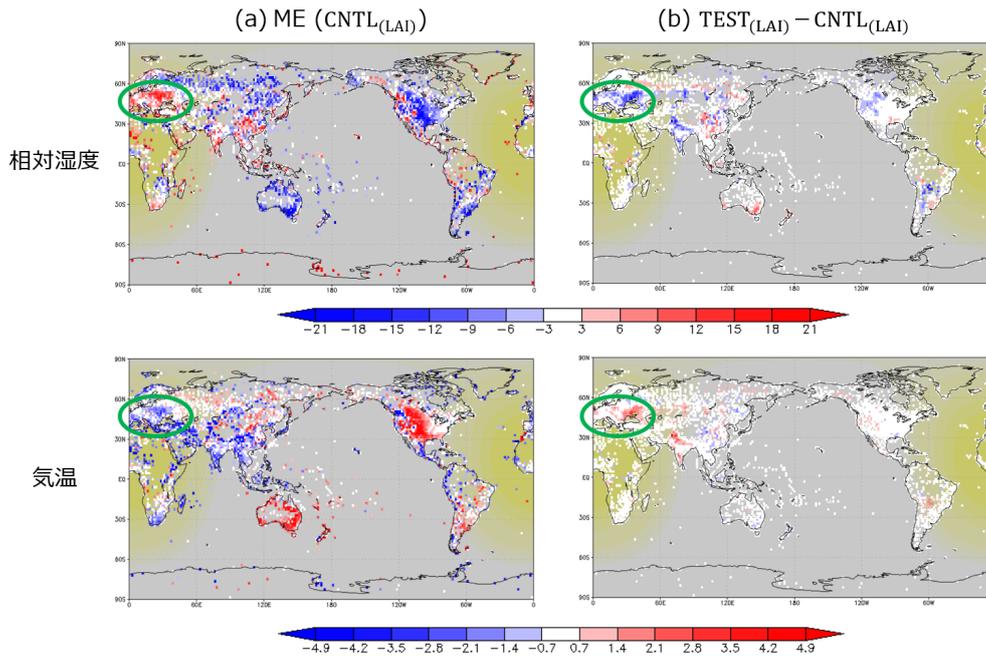


図 4.1.4 解析予報サイクル実験による 2023 年 8 月平均の (上) 地上相対湿度 [%]、(下) 地上気温 [K] の 12UTC 初期値からの 24 時間予測値。(a)  $CNTL_{(LAI)}$  の SYNOP 観測に対する平均誤差、(b)  $TEST_{(LAI)}$  と  $CNTL_{(LAI)}$  の差。黄色域は晴天日射分布。図中の楕円については本文参照。

約 110 km(T1159L64)、1 hPa より上層の気候値は SPARC プロジェクトによる衛星観測に基づく帯状平均月別気候値 (Randel et al. (1998)) を用いて分布が修正されている (関口ほか (2019))。エアロゾル濃度も 3 次元月別気候値であり、気象研究所全球エアロゾル輸送モデル MASINGAR(Tanaka et al. (2003)) を用いている (水平格子間隔約 270 km(T42L30))。GSM ではこれらの気候値を、GSM の格子に合うように経度・緯度・鉛直・時間方向に内挿を行っている。緯度方向の内挿において、現実装では緯度方向のすべての値を保持しながら線形内挿を行っている。しかし、線形内挿の計算においては内挿する点を挟む 2 点の値のみを保持すればよい。そこで、新実装では計算において不要な値を保持しないような修正を行った。他に、使用しなくなった割り付け配列の領域をこまめに解放する等を行い、省メモリ化を行った。可読性の向上の観点では気候値の処理の仕方やサブルーチン名の統一等を行った。さらに、放射過程の各計算を放射吸収気体・エアロゾル・雲による光学特性の計算と放射フラックス計算等に分類し、それぞれのパーツで該当の計算が行われるような整理も行った。

以上を踏まえ、高速化、省メモリ化が達成されているか、またコーディングの変更のみを行ったため予測精度に大きなインパクトがないかといった点について確認を行った。以下では、対照実験として放射過程の再構築前と再構築後の比較を行った。GSM の解像度は水平格子間隔約 13 km(Tq959L128)、並列設定は 966 MPI(うち 6 ランクは出力専用)・12 OpenMP スレッドとし、計

算機は Cray XC50 を使用した。図 4.1.10 は、ある初期値における放射過程の各過程 (気候値の読み込みと内挿・短波放射計算・長波放射計算・補正計算等のその他) の 132 時間予測での所要時間を示している。いずれの過程においても再構築後において所要時間が短くなっており、高速化が達成されていることがわかる。放射過程全体としては再構築前 26 秒程度だった所要時間が再構築後は 21 秒程度となり、おおよそ 20 % 所要時間が削減された。特に気候値の計算では所要時間が約半分となっている。これはオゾンとエアロゾルの気候値の内挿における修正によるものと考えられる。続いて、図 4.1.11 は、ある初期値での事例における MPI ランク 0(12 OpenMP スレッド平均)でのメモリ使用量の変化を示している。MPI のランク 0 は並列処理の制御や他ランクからの結果の集約等を行うため、ランク 0 でのメモリの値を代表的な値として示す。横軸は放射過程のソースコードにおける代表的な処理の前後等、使用メモリ量を測定した計 56 か所を示しており、横軸の値が大きくなるほど放射過程内での計算が進んでいることを示している。放射過程の初期化処理の後、放射過程のメイン処理となるが、メイン処理のはじめの部分において再構築前後で大きな差が生じている。ここはオゾン気候値の内挿処理に該当する部分であり、データの大きなオゾン気候値の処理を修正したことでメモリ使用量を抑えることができていることがわかる。また、解析予報サイクル実験では予測精度へのインパクトを調べた。いずれの要素においてもわずかな差が見られる程度で大きなインパクト、特定の変化傾向は見

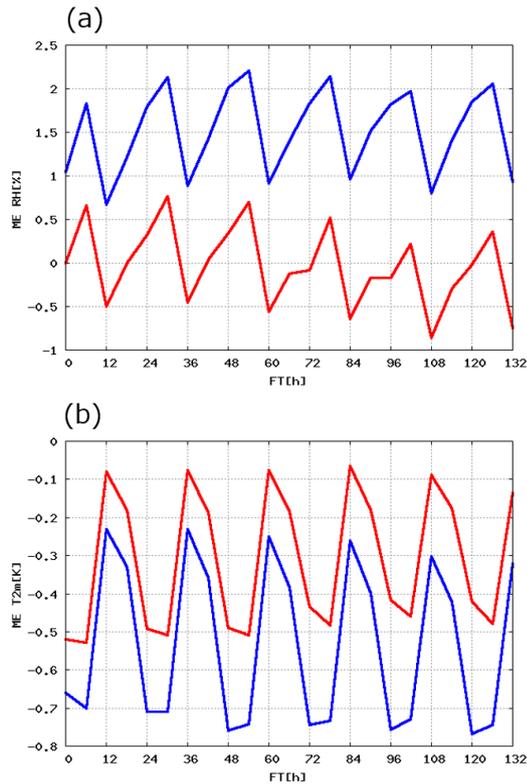


図 4.1.5 解析予報サイクル実験による 2023 年 8 月平均のヨーロッパ域 (WMO の定義における第 VI 地区に属する観測地点) における予測値の SYNOP 観測に対する平均誤差。(a) 地上相対湿度 [%]、(b) 地上気温 [K]。横軸は予報時間 [hour]。青は CNTL<sub>(LAI)</sub>、赤は TEST<sub>(LAI)</sub> を表す。

られず、また主要予測スコアも中立であった (図略)。これらは放射過程の再構築に伴い、計算順序の変更等に起因する浮動小数点レベルでの誤差に由来する差であり、放射過程の再構築は高速化・省メモリ化のみに寄与し予測結果には影響しないことを確認した。

#### 4.1.4 まとめと今後の予定

本節では、令和 6 年度末導入に向けた GSM の物理過程改良項目のうち、陸面過程における LAI 気候値更新と放射過程における二酸化炭素濃度気候値更新及び放射過程の再構築について示した。陸面過程の改良について、現在の気候状態をより反映した LAI 気候値への更新により、地上や対流圏下層を中心に相対湿度や気温のバイアスが複数地域で低減することを確認した。放射過程の改良について、二酸化炭素濃度気候値更新により二酸化炭素濃度増加に伴う対流圏のごくわずかな高温化と成層圏の低温化が見られ、対流圏の予測精度を維持しつつ GSM における成層圏の高温バイアスが低減されることを確認した。また、放射過程の再構築は、放射過程の高速化と省メモリ化を通じた GSM の省資源化に貢献することを確認した。

今後は、本節で示した改良と気象庁 (2024b) で報告したモデルフレーム改良を合わせた仕様での試験を実

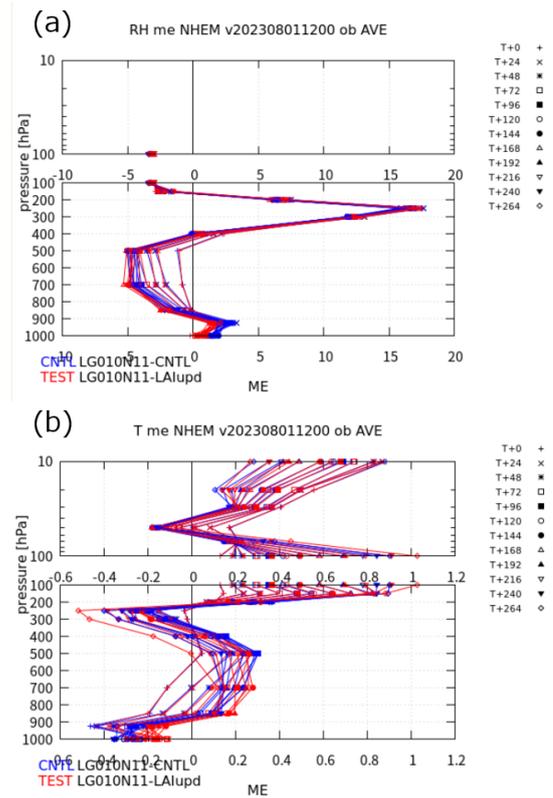


図 4.1.6 解析予報サイクル実験による 2023 年 8 月平均の北半球 (20°N-90°N) における予測値のラジオゾンデ観測に対する平均誤差の予報時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。(a) 相対湿度 [%]、(b) 気温 [K]。青は CNTL<sub>(LAI)</sub>、赤は TEST<sub>(LAI)</sub> を表す。

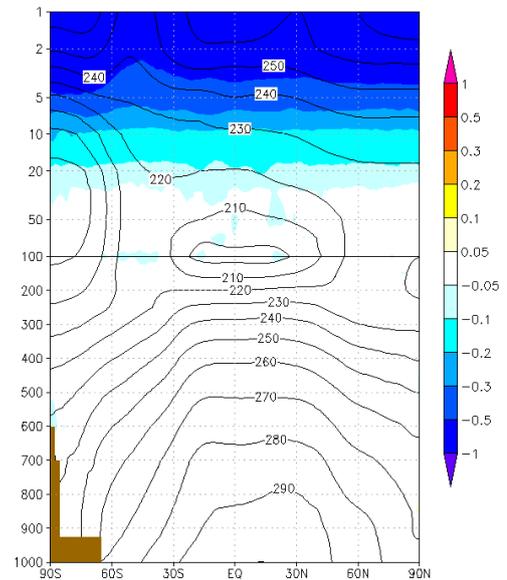


図 4.1.7 解析予報サイクル実験による 2023 年 8 月平均の解析気温 (帯状平均) の鉛直プロファイルの TEST<sub>(CO<sub>2</sub>)</sub> と CNTL<sub>(CO<sub>2</sub>)</sub> の差分 [K]。縦軸は気圧 [hPa]。

施し、改善の効果を確認したのち、令和 6 年度末に全球数値予報システムを更新する計画である。

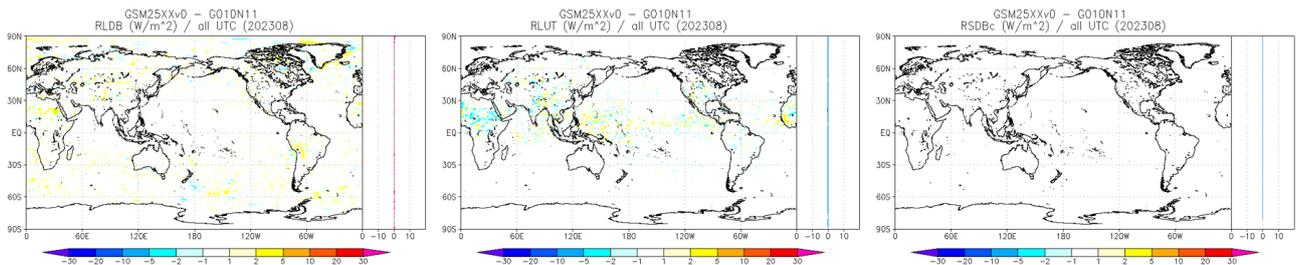


図 4.1.8 解析予報サイクル実験による 2023 年 8 月平均 (6 時間おきの初期時刻からの 6 時間予報の値の期間平均) の TEST(CO<sub>2</sub>) と CNTL(CO<sub>2</sub>) の各種放射フラックスの差 [W m<sup>-2</sup>]。 (左) 地表面下向き長波放射フラックス、(中) 大気上端上向き長波放射フラックス、(右) 地表面下向き短波放射フラックス (晴天)。

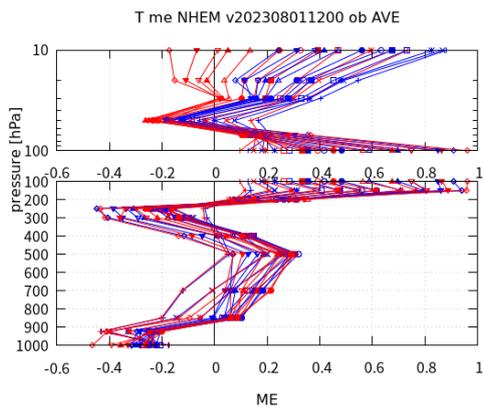


図 4.1.9 解析予報サイクル実験による 2023 年 8 月平均の北半球 (20°N-90°N) の気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差 [K] の予報時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。 (青) CNTL(CO<sub>2</sub>)、(赤) TEST(CO<sub>2</sub>)

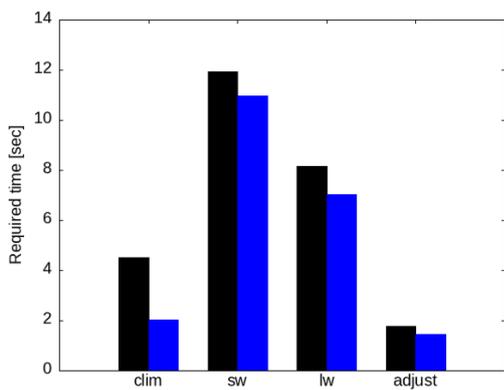


図 4.1.10 予測実験における、132 時間予測での放射過程の各過程の所要時間 [sec]。 clim が気候値の計算、sw が短波放射計算、lw が長波放射計算、adjust がその他 (補正計算) を示している。 (黒) 放射過程再構築前、(青) 放射過程再構築後

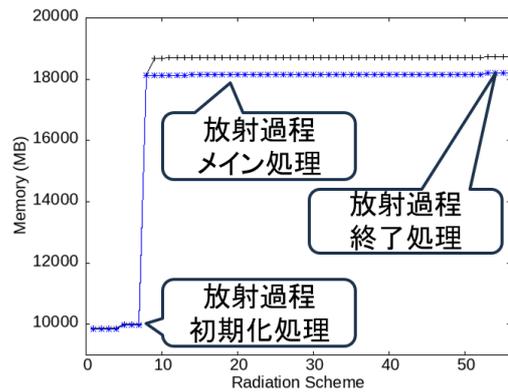


図 4.1.11 予測実験におけるメモリ使用量の変化 [MB]。 MPI ランク 0 を測定し、OpenMP12 スレッドの平均値を示している。 横軸は放射過程内におけるメモリ測定点であり、値が大きくなるほど放射過程での計算が進んでいくことを示している。 (黒) 放射過程再構築前、(青) 放射過程再構築後

## 参考文献

浅野正二, 2011: 大気放射学の基礎 (第 2 刷), 朝倉書店, 206-208.

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. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **62**, 1-46.

Fang, H., F. Baret, S. Plummer, and G. Schaepman-Strub, 2019: An Overview of Global Leaf Area Index (LAI): Methods, Products, Validation, and Applications. *Reviews of Geophysics*, **57**, 739-799.

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.

Kim, H, 2017: Global Soil Wetness Project Phase 3 Atmospheric Boundary Conditions (Experiment 1) [Data set]. *Data Integration and Analysis System (DIAS)*, URL <https://doi.org/10.20783/DIAS.501>.

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.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- 草開浩，2012: 地表面過程. 数値予報課報告・別冊第58号，気象庁予報部，29–41.
- Lawrence, P. J. and T. N. Chase, 2007: Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0). *J. Geophys. Res. Biogeo.*, **112**, G01023.
- 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.
- Randel, W. J., F. Wu, J. M. Russell, A. Roche, and J. W. Waters, 1998: Seasonal Cycles and QBO Variations in Stratospheric CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O Observed in UARS HALOE Data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **55**, 163–185.
- Roads, J., S. Benedict, T. Koike, R. Lawford, and S. Sorooshian, 2007: Towards a new Coordinated Energy and Water-Cycle Observations Project (CEOP): Integration of the Coordinated Enhanced Observing Period (formerly known as 'CEOP') and the GEWEX Hydrometeorology Panel (GHP). URL <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b2a36a515fd5f7a3cc74f4f562de730183d600fd>.
- 関口亮平，長澤亮二，中川雅之，藪将吉，2019: 放射. 数値予報課報告・別冊第65号，気象庁予報部，66–80.
- Sellers, P. J., C. J. Tucker, G. J. Collatz, S. O. Los, C. O. Justice, D. A. Dazlich, and D. A. Randall, 1996: A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMS. Part II: The Generation of Global Fields of Terrestrial Biophysical Parameters from Satellite Data. *J. Clim.*, **9**, 706–737.
- Tanaka, T. Y., K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba, and H. Tanaka, 2003: MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **53**, 119–138.
- WMO, 2023: The state of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, **19**, 1–11.
- Yan, K., T. Park, G. Yan, C. Chen, B. Yang, Z. Liu, R. R. Nemani, Y. Knyazikhin, and R. B. Myneni, 2016a: Evaluation of MODIS LAI/FPAR Product Collection 6. Part 1: Consistency and Improvements. *Remote Sens.*, **8**, 359.
- Yan, K., T. Park, G. Yan, Z. Liu, B. Yang, C. Chen, R. R. Nemani, Y. Knyazikhin, and R. B. Myneni, 2016b: Evaluation of MODIS LAI/FPAR Product Collection 6. Part 2: Validation and Intercomparison. *Remote Sens.*, **8**, 460.
- Zeng, X., M. Shaikh, Y. Dai, R. E. Dickinson, and R. Myneni, 2002: Coupling of the Common Land Model to the NCAR Community Climate Model. *J. Clim.*, **15**, 1832–1854.

## 4.2 全球アンサンブル予報システムの開発

### 4.2.1 はじめに

数値予報開発センターでは、全球に関する数値予報システム（全球モデル (GSM)、全球解析 (GA)、全球アンサンブル予報システム (全球 EPS)）の改良をなるべく同時に現業化できるよう開発を進めている。全球 EPS について、予報モデル本体に最新の GSM の改良を取り込むとともに、アンサンブル手法としての高度化の開発を進めており、GSM, GA の改良とともに 2025 年 3 月の現業化を目指している。

今回、全球 EPS の改良予定項目について性能を評価するための実験を行い、メモリ使用量削減や高速化による省資源化、熱帯の予測のばらつき適正化や確率予測精度の向上など想定した効果が得られることを確認した。本稿では、改良予定項目の概要と実験結果について述べる。

### 4.2.2 改良予定項目の概要

全球 EPS で使用する予報モデルを 2025 年 3 月に導入予定の GSM（変更点については第 4.1 節、気象庁 (2024a) 参照）に更新する。これにより全球 EPS と GSM の予測特性の整合性が維持され、GSM による予測に関する確率予測情報を適切に作成できることが期待される。また、モデルフレームの改良によりメモリ使用量が削減されることから、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狙う。モデルフレームの改良は解像度変換や特異ベクトル (SV) 計算にも適用し、GSM と揃えた。

加えて、全球 EPS 独自の変更として確率的水蒸気プロファイル参照 (SHPC) 法の導入と、それに合わせた熱帯の SV による初期摂動の振幅調整 (0.2 から 0.12 に変更)、海面水温 (SST) 摂動のリセンタリングの変更を行う。SHPC 法については以下で詳しく述べる。SST のリセンタリングの変更については気象庁 (2024b) を参照していただきたい。

確率的水蒸気プロファイル参照 (SHPC; Stochastic Humidity Profile for Convective parametrization) 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。Tompkins and Berner (2008) や米国環境予測センター (NCEP) で開発された SHUM (Stochastically perturbed boundary layer Humidity; Zhu et al. (2018)) を参考に開発を行った。具体的には、水平方向には確率的物理過程強制 (SPPT) 法で用いているような時空間相関を持った乱数パターンを用い、鉛直方向にはモデル最下層を振幅最大として上層は対数気圧で指数関数的に減少する形で、積雲対流過程の入力の相対湿度のプロファイルに摂動を加える。積雲対流過程から返ってくる時間変化率は摂動

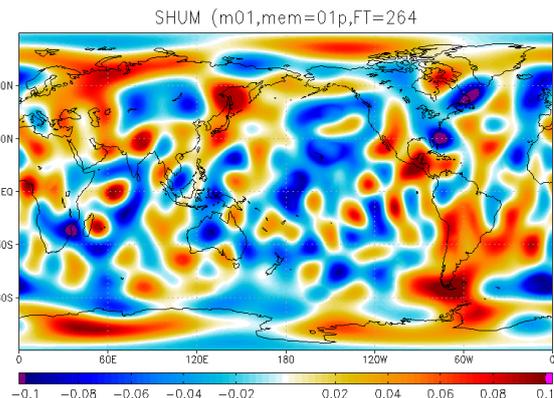


図 4.2.1 SHPC 法で用いる乱数パターンの例。

を加えていない元のプロファイルに足し込む。

図 4.2.1 に水平方向の乱数パターンの例を示す。球面調和関数の最大波数 20 までで乱数を生成し、時間方向の相関スケールは 72 時間、鉛直方向の減衰スケールは対数気圧で 0.8、振幅調整のパラメータは 0.005 (乱数の分散に比例するパラメータ。最下層の相対湿度の標準偏差に換算すると約 4 %となる)、摂動の最大値が  $\pm 0.1$  (10 %) となるようにした。最大波数と時間方向の相関スケールは全球 EPS が主にターゲットとする総観規模の現象の時空間スケールからおおよその値を決め、SHPC を適用したアンサンブル予報実験におけるスプレッドの成長を参考に鉛直方向の減衰スケールと摂動の振幅を決めた。摂動の振幅に関しては熱帯対流圏下層の相対湿度の解析値の気候学的な変動幅と比べて十分に小さいことも確認した (図略)。また、最大振幅の摂動を加えたときに相対湿度が 0 % から 100 % の範囲外にならないように振幅を縮小する。

本手法の狙いはスプレッドが不足している熱帯においてスプレッドを増加させるとともに、ばらつきの不足を補うために過剰に与えている熱帯 SV による初期摂動の振幅を小さくすることにより、熱帯の予測のばらつきを適正化し、確率予測精度を向上させることにある。このため、SHPC 法の導入に合わせて、熱帯 SV による初期摂動の振幅を現行の 60 % に縮小する変更を加えた。

本変更のインパクトを見るため、2024 年 3 月時点の現業システム相当の 12UTC の全球サイクル解析値を初期値とする 13 メンバーの全球 EPS 予測を CNTL 実験とし、これに対して SHPC 法の導入と熱帯初期摂動の振幅調整をした TEST 実験を行った。実験期間は 2021 年夏 (2021 年 7 月 21 日～2021 年 9 月 11 日初期値) と 2022 年冬 (2021 年 12 月 21 日～2022 年 2 月 11 日初期値) とした。

図 4.2.2 に検証結果の例を示す。スプレッドスキル<sup>1</sup>

<sup>1</sup>  $c \times (\text{スプレッド} / \text{アンサンブル平均 RMSE})^2$  で定義し、1

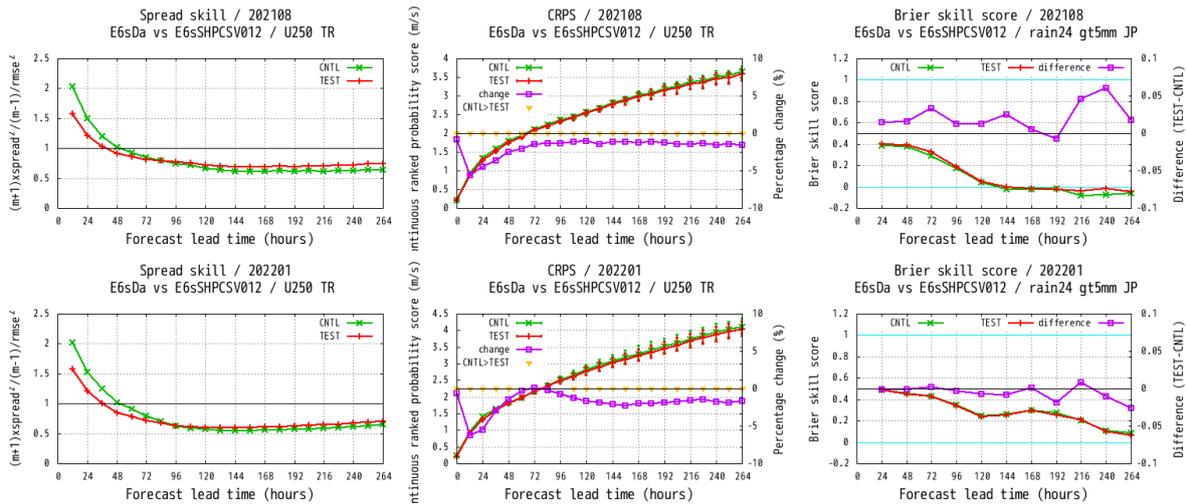


図 4.2.2 SHPC 法の適用と熱帯 SV の初期摂動振幅調整を行った実験における、熱帯 250 hPa の東西風のスプレッドスキル (左)、対解析値 CRPS[m/s] (中)、5 mm/24h を閾値とする降水確率予測の対アメダス観測値のブライアスキルスコア (BSS) (右)。上段が 2021 年夏、下段が 2022 年冬。横軸は予報時間で FT=264 まで示す。緑線が CNTL、赤線が TEST、紫線は中図が CRPS の変化率  $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL}[\%]$ 、右縦軸)、右図が BSS の TEST-CNTL (右縦軸)。中図の黄色  $\nabla$  は TEST が CNTL に対してブートストラップ法で有意水準 5% で有意に減少していることを示す。左図は 1 (黒線) が理想的なアンサンブルにおけるスプレッドの大きさ。

でみると熱帯域では予測初期の過剰なばらつきが軽減した一方で、FT=96 以降はスプレッドが拡大し、理想的なばらつきに近づいている。これに合わせて、対解析値の CRPS<sup>2</sup> も予報時間全体にわたって改善している。中高緯度については、CRPS はおおよそ中立から小幅な改善となった (図略)。日本付近の降水確率予測のブライアスキルスコア (BSS) も 2021 年夏で改善が見られる。これは降水予測がよりばらつきようになって信頼度が改善し、より実況を捕捉できるようになったためである (図略)。

### 4.2.3 総合性能評価試験

前項で説明した変更をすべて適用した総合性能評価試験を実施した。主に週間予報の時間スケールまでを対象とし、最新の夏期間、冬期間について実施する連続初期日型実験と、1 か月予報までの時間スケールを対象とし、過去 30 年の月末初期日について実施する再予報型実験を行い、それぞれ検証を行った。

#### (1) 連続初期日型実験

2024 年 3 月時点の現業の全球サイクル解析・全球 EPS 相当のシステムを用いた実験を CNTL 実験とし、これに第 4.2.2 項で示した変更を加え、2025 年 3 月に導入予定の GSM (変更点については第 4.1 節、気象庁 (2024a) 参照) の総合性能評価試験のサイクル解析値を用いた実験を TEST 実験とした。実験期間は以下の

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。

<sup>2</sup> Continuous Ranked Probability Score の略で、閾値  $t$  以下となる確率予測に対するブライアスコアを  $\int_{-\infty}^t dt$  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。

通り。

- 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
- それぞれ 12UTC 初期値の 51 メンバー、264 時間予測を実行した。

図 4.2.3 に夏実験における主要な要素のスプレッドスキルを示す。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。冬実験も同様であった (図略)。

図 4.2.4 に図 4.2.3 と同じ要素の夏実験の対解析値の CRPS 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)。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)。

図 4.2.5 に降水確率予測の対アメダス観測値の BSS を示す。夏実験では予測前半を中心に改善が見られる。冬実験はおおよそ中立である。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き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 4.2.6 に 2023 年 6 月 24 日 12UTC 初期値の FT=72 の前 24 時間降水量

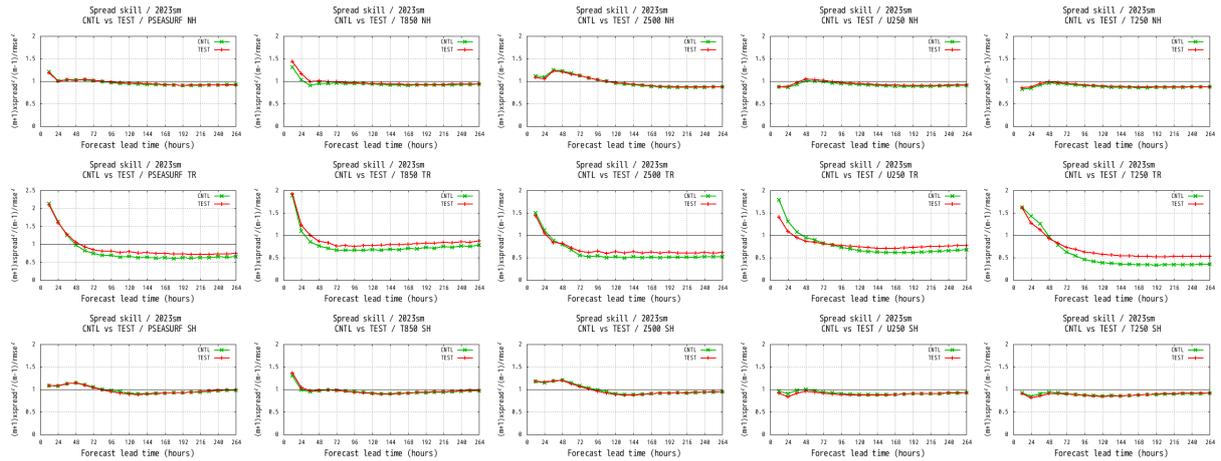


図 4.2.3 夏実験における予報時間ごとのスプレッドスキル。左から海面更正気圧、850 hPa 気温、500 hPa 高度、250 hPa 東西風、250 hPa 気温。上から検証領域が北半球 (90°N - 20°N)、熱帯 (20°N - 20°S)、南半球 (20°S - 90°S)。緑線が CNTL、赤線が TEST。1 (黒線) が理想的なばらつきを表す。

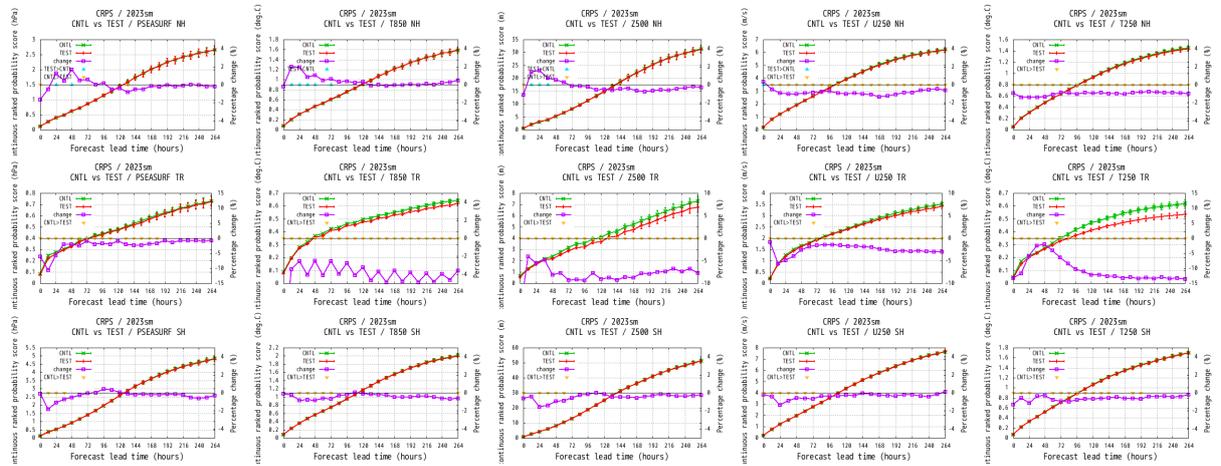


図 4.2.4 図 4.2.3 と同様、ただし対解析値の CRPS を表す。左から海面更正気圧 [hPa]、850 hPa 気温 [K]、500 hPa 高度 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]、250 hPa 気温 [K]。紫線は変化率  $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL}[\%])$ 、右縦軸で、水色の  $\Delta$ 、黄色の  $\nabla$  はそれぞれ、TEST が CNTL に対してブートストラップ法で有意水準 5% で有意に増加、減少していることを表す。

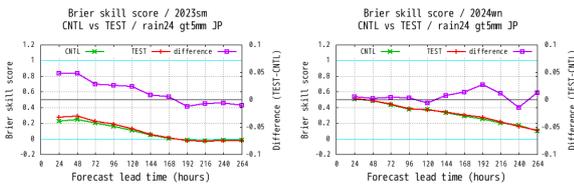


図 4.2.5 夏実験 (左)、冬実験 (右) における 5 mm/24h を閾値とする降水確率予測の対アメダス観測値の BSS。緑線が CNTL、赤線が TEST、紫線が TEST-CNTL (右縦軸) を表す。

予測の 1 mm/24h の超過確率と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 (赤丸) 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。

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)。台風の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で降水のつき方のメンバー間のばらつきが大きくなり、台風の発達の程度が変化したためと考えられる。

実行時間についてはモデルフレーム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 時間予測で 5 分程度 (15% 程度) 増加した。ただし、ルーチン実行上の提供目標時間には十分に間に合う見込みである。

## (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 とともに大気初期値は JRA-3Q を使い、1991 年~2020 年での月末の 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 4.2.7 (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プレッドの変化を示す。CNTL のスプレッドは予報開始から 4 日目にか

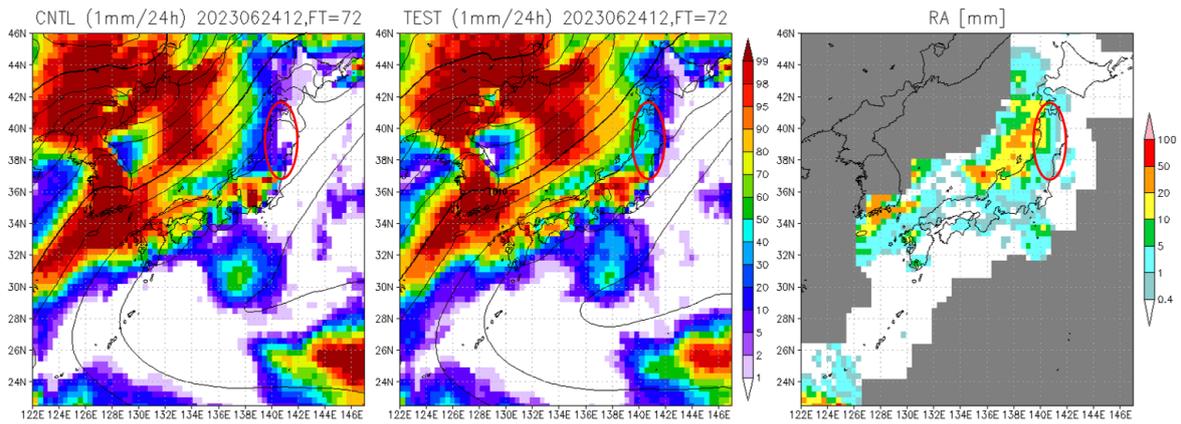


図 4.2.6 2023 年 6 月 24 日 12UTC 初期値の FT=72 の前 24 時間降水量予測の 1 mm/24h の超過確率（左：CNTL、中：TEST）と対応する時刻の解析雨量（右）。左図・中図の等値線はアンサンブル平均の海面更正気圧を表す。

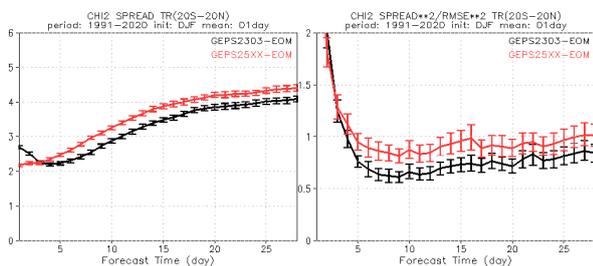


図 4.2.7 再予報型実験における熱帯域での 200hPa 速度ポテンシャルのスプレッド（左）とスプレッドスキル（右）の予報時間時系列。バイアス補正なし。冬初期日サンプルの結果。黒線は CNTL、赤線は TEST を表す。

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プレ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プレッドが増加している。さらに SHPC 法の導入により予報 4 日目以降では TEST の方が CNTL よりもスプレッドが大きい。図 4.2.7 (右) のスプレ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 4.2.8 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 流線関数ではやや改善傾向、夏の 850hPa 気温と 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)。

#### 4.2.4 まとめと今後の予定

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総合性能評価試験を実施した。モデルフレーム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下の下層気温の予測の変化が見られた。

いずれもそれぞれの変更点から想定される変化であり、総合的には予測精度の向上と省資源化が確認できた。今後はこれらの変更を適用した業務化試験を実施し、2025 年 3 月を目処に現業システムへ適用することを目指して開発を進める。

#### 参考文献

- 気象庁, 2024a: 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, 2024b: 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.
- Tompkins, A. M. and J. Berner, 2008: A stochastic convective approach to account for model uncertainty due to unresolved humidity variability. *J. Geophys. Res.*, **113**, D18101, doi:10.1029/2007JD009284.
- Zhu, Y., X. Zhou, W. Li, D. Hou, C. Melhauser, E. Sinsky, M. Peña, B. Fu, H. Guan, W. Kolczynski, R. Wobus, and V. Tallapragada, 2018: Toward the Improvement of Subseasonal Prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. *J. Geophys. Res.*, **123**, 6732-6745.

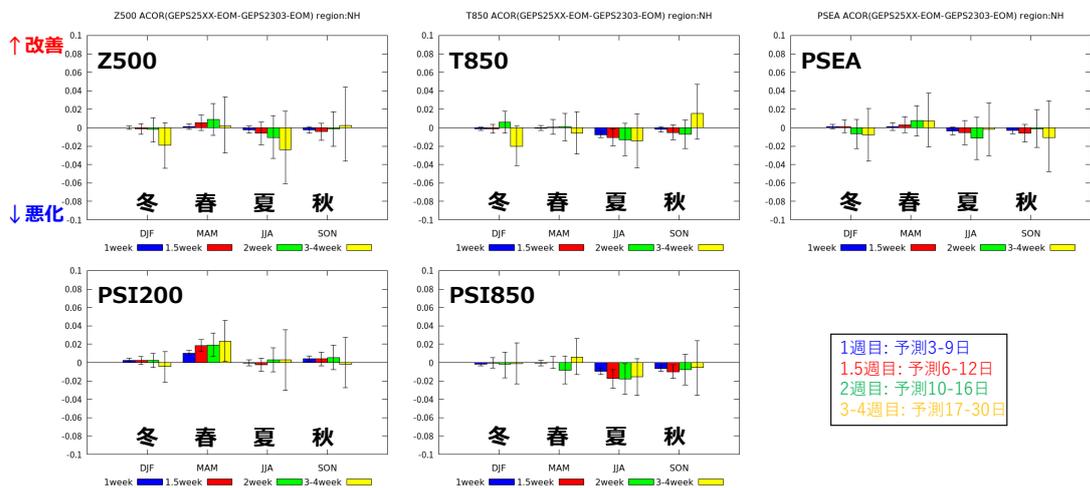


図 4.2.8 再予報型実験でのアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差 (TEST-CNTL)。北半球域、バイアス補正なし。上段は左から 500hPa 高度、850hPa 気温、海面更正気圧、下段は左から 200hPa 流線関数、850hPa 流線関数。各図内は左から冬、春、夏、秋でそれぞれ検証した結果を示す。検証の対象とした予報時間は図中の凡例を参照。

### 4.3 メソモデルの物理過程改良に向けた開発

#### 4.3.1 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。対流圏上部～成層圏下部の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 5 hPa) 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、陸面及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 年度出水期前更新予定のメソモデルの改良に向けた物理過程開発の概略とこれまでの検証実験で得られた予測特性の変化について報告する。

#### 4.3.2 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 (MYNN3; Nakanishi and Niino 2009) を利用している。計算安定性向上のための様々な改良がこれまでに行われており(西本 2020)、基本的に安定に計算が行うことができる一方で、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、稀に安定に計算が行えずに数値振動を起こすことがある。実際に数値振動が発生した事例における液水温位フラックスの高度時間断面を図 4.3.1 に示す。境界層で発生する数値振動は鉛直方向に 4 格子程度の波長を持ち、2 タイムステップ周期で振動しながら徐々に振幅を増やしていく特徴がある。今回の MSM 更新ではこの数値振動を抑えるための改良を計画している。

以下の式において、物理量  $\phi$  に対して  $\bar{\phi}$  はその格子平均値を、 $\phi'$  は格子平均からの変動量を表す。また説明のない変数の意味は西本 (2020) に従う。MYNN3 では液水温位  $\theta_1$  と総水混合比  $q_w$  に関する 3 つの 2 次モーメント<sup>1</sup>  $\theta_1'^2, \bar{q}_w'^2, \theta_1'q_w'$  の予報方程式を積分し、時間発展を計算する。また液水温位、総水混合比のフラックス

$\overline{w'\theta_1'}, \overline{w'q_w'}$  を次の式に従って診断する。

$$\overline{w'\theta_1'} = -q\ell S_{H2.5} \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial z} + \frac{\ell E_H}{q} \frac{g}{\Theta_0} \left\{ \beta_\theta \left( \bar{\theta}_1'^2 - \bar{\theta}_1'^2_{2.5} \right) + \beta_q \left( \bar{\theta}_1'q_w' - \bar{\theta}_1'q_w'_{2.5} \right) \right\} \quad (4.3.1)$$

$$\overline{w'q_w'} = -q\ell S_{H2.5} \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial z} + \frac{\ell E_H}{q} \frac{g}{\Theta_0} \left\{ \beta_\theta \left( \bar{\theta}_1'q_w' - \bar{\theta}_1'q_w'_{2.5} \right) + \beta_q \left( \bar{q}_w'^2 - \bar{q}_w'^2_{2.5} \right) \right\} \quad (4.3.2)$$

(4.3.1), (4.3.2) の右辺第 2 項は逆勾配項と呼ばれ、数値振動は逆勾配項に含まれる  $\bar{\theta}_1'^2 - \bar{\theta}_1'^2_{2.5}, \bar{q}_w'^2 - \bar{q}_w'^2_{2.5}, \bar{\theta}_1'q_w' - \bar{\theta}_1'q_w'_{2.5}$  という量が振動することによって発生する。これら 3 つの量の時間発展を近似的に表す方程式を導出して安定性解析を行うと、安定に計算が行える積分時間間隔の上限  $\Delta t_{\max}$  が存在することが示せる(西本 2024)。 $\Delta t_{\max}$  は次式で表される。

$$\Delta t_{\max} = \left\{ \frac{\ell E_H}{q} \frac{g}{\Theta_0} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} (\alpha_c S_{H2.5} B_2 \ell^2 m^2 - 1) \right\}^{-1} \quad (4.3.3)$$

$$\left( \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} = \beta_\theta \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial z} + \beta_q \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial z} \right)$$

ただし、 $m$  は数値振動の鉛直波数を表す<sup>2</sup>。また  $\alpha_c$  はリチャードソン数や乱流エネルギーから診断される係数である<sup>3</sup>。 $\Delta t_{\max}$  は成層の安定度が高い程小さい値を取る性質がある。

今回の MSM 更新では、 $\Delta t_{\max}$  が MSM の時間積分間隔  $\Delta t$  を下回った格子では、安定性条件を満たすように逆勾配項の係数  $E_H$  を  $\Delta t_{\max}/\Delta t$  倍に補正するように変更を行う予定である。ただし、乱流が発達しておらず計算安定性上の問題が発生しないような状況でも、成層の安定度が強い場合には  $\Delta t_{\max}$  が  $\Delta t$  を下回ることがある。逆勾配項の補正は計算安定性担保のための人為的な措置であることから、数値振動が起こっていない状況ではなるべく働かないよう、補正の発動条件に以下を追加する。

$$\left| \beta_\theta^2 \left( \bar{\theta}_1'^2 - \bar{\theta}_1'^2_{2.5} \right) + 2\beta_\theta\beta_q \left( \bar{\theta}_1'q_w' - \bar{\theta}_1'q_w'_{2.5} \right) + \beta_q^2 \left( \bar{q}_w'^2 - \bar{q}_w'^2_{2.5} \right) \right| > 2 \text{ [K}^2\text{]} \quad (4.3.4)$$

<sup>2</sup> 境界層過程内で実際に計算を行う際は鉛直層間隔  $\Delta z$  と経験的に定めた比例係数  $S = 0.225$  を用いて簡易的に

$$m = S \frac{2\pi}{\Delta z}$$

のように見積もる。

<sup>3</sup> 詳細は Nakanishi and Niino (2009) を参照。

<sup>1</sup> 変動量の  $n$  個の積の格子平均値を  $n$  次モーメントと呼ぶ。

(4.3.4) の左辺は  $\overline{w'\theta'_1}, \overline{w'q'_w}$  の逆勾配項に  $\beta_\theta, \beta_q$  をそれぞれ掛けて足し合わせた量に比例し、逆勾配項の大きさを表す指標の1つとみなすことができる。

図 4.3.1 の事例において、液水温位フラックスの数値振動が存在したタイムステップの数を図 4.3.2 に示す。また逆勾配項の補正が発動する条件を満たしたタイムステップの数を図 4.3.3 に示す。振動回数の多い場所と補正の発動条件を満たした場所はよく対応しており、補正の発動条件がある程度適切であることが確認できる。また図 4.3.1 の事例に対して FT=62 以降で今回の変更を適用した場合の結果を図 4.3.4 に示す。比較的弱い振動は変更を適用しても残ってしまう<sup>4</sup> 一方で、FT=63 (図中の 216 ステップ) 付近で見られていた強い振動が抑えられていることが確認できる。

これ以外の過去に強い数値振動が発生した事例についても今回の変更を加えることで振動が抑えられることを確認した。また MSM の予測精度に有意な変化が見られないことも確認した。

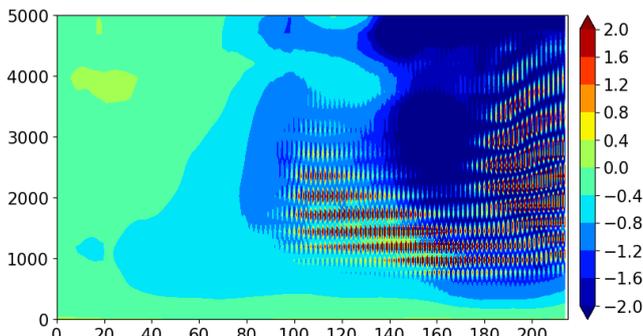


図 4.3.1 2022 年 9 月 26 日 00UTC 初期値の MSM で計算された台風第 17 号付近での FT=61~63 の液水温位フラックス [Kms<sup>-1</sup>] の高度時間断面。縦軸は高度 [m]、横軸は FT=61 からのタイムステップ数をそれぞれ表す。

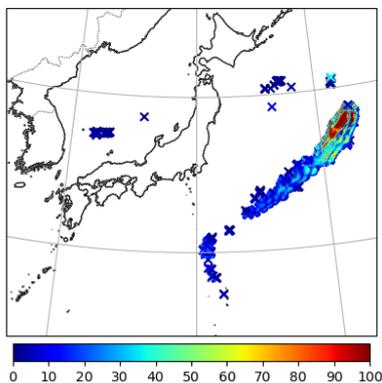


図 4.3.2 図 4.3.1 と同じ初期時刻の MSM78 時間予報で液水温位フラックスの振動が発生していたタイムステップの回数

<sup>4</sup> (4.3.3) を導出する過程で用いた近似の誤差や、補正の発動条件に加えた (4.3.4) の影響が原因として考えられる。

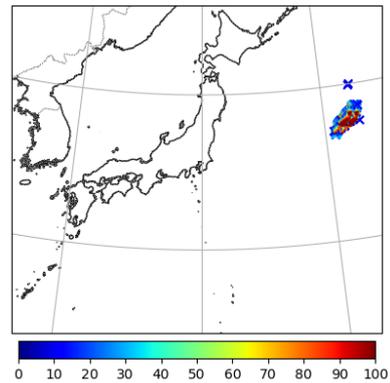


図 4.3.3 図 4.3.1 と同じ初期時刻の MSM78 時間予報で逆勾配項補正の発動条件を満たしたタイムステップの回数

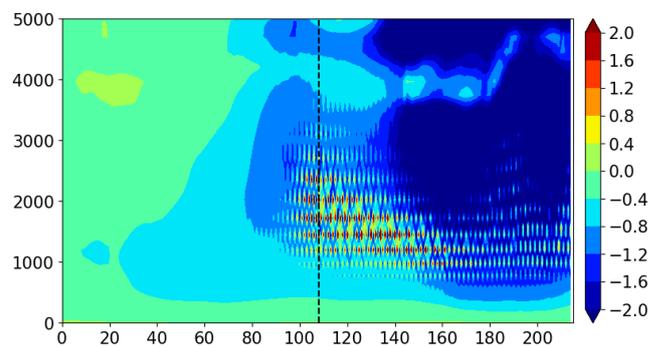


図 4.3.4 図 4.3.1 と同じ。ただし、FT=62 (破線で示した時刻) 以降で逆勾配項を補正する変更を加えている。

### 4.3.3 標高オリジナルデータセットの更新と地形性乱流形状抵抗の導入

#### 標高オリジナルデータセットの更新

2024 年 12 月現在の MSM では、モデルの地形作成に必要な標高オリジナルデータセットとして、水平解像度が約 1 km の GTOPO30 (Gesch et al. 1999) を利用している。次期 MSM 更新では、このデータセットをより高解像度 (水平解像度約 90 m) で高精度な MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) に置き換える予定である<sup>5</sup>。

MERIT DEM から新たに作成した MSM のモデル地形を GTOPO30 から作成した現ルーチンのモデル地形と比較すると、日本では中部山岳など山岳域で地形標高がやや高くなる特徴がみられた (図 4.3.5)。メソ解析を含めて地形データを MERIT DEM に変更した解析予報サイクル実験<sup>6</sup>では、元の地形の実験に比べて、冬期間の下層の高度や地上気圧を中心に予測精度の改善が確認された。

<sup>5</sup> LFM や GSM では 2023 年 3 月のモデル更新時に標高オリジナルデータセットを刷新し、既に MERIT DEM を利用したモデル地形に置き換えている (気象庁 2023a,b)。

<sup>6</sup> 検証期間 (予報モデルの実験期間) は 2023 年 7 月 1 日から 8 月 15 日まで (夏期間) と 2023 年 1 月 1 日から 2 月 28 日まで (冬期間) とした。

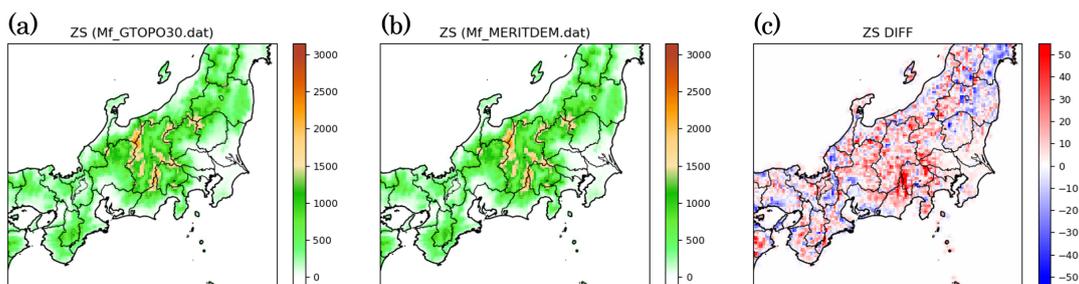


図 4.3.5 MSM のモデル地形の標高 [m]。(a) GTOPO30 から作成したモデル地形、(b) MERIT DEM から作成したモデル地形、(c) その差 (MERIT DEM 地形 - GTOPO30 地形)。

### 地形性乱流形状抵抗の導入

MSM 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。風は水蒸気の輸送に関わるため、降水の予測精度向上に対しても風速の系統誤差の縮小は必要と考えられる。現在の MSM ではサブグリッドの地形起伏の影響を考慮しておらず、強風バイアスの一因になっている可能性がある。そこで、サブグリッドスケールの地形性乱流による抵抗の効果を表現するために、Beljaars et al. (2004) の TOFD (Turbulent Orographic Form Drag) スキームを MSM に導入することを試みた<sup>7</sup>。なお、LFM への TOFD の導入 (気象庁 2023a) と同様に、モデル地形の標高オリジナルデータセットの更新にあわせて、サブグリッドの地形起伏を表現する各モデル格子の標高標準偏差は MERIT DEM から算出した。地形データに適用するバンドパスフィルタの値は、Beljaars et al. (2004) では解像度が約 1 km の GTOPO30 の利用を想定して 2 km–20 km とされているが、MERIT DEM ではより微細な地形構造を反映できることから、MSM の解像度も考慮して 400 m–10 km に設定した。この変更に伴い、フィルタ幅に依存する TOFD の係数の値も変更した。

MSM における TOFD 導入のインパクトを確認するため、解析予報サイクル実験での影響評価を実施した。この際、モデル地形を GTOPO30 から MERIT DEM に変更した実験を CNTL、その変更に伴って TOFD の導入を加えた実験を TEST とした<sup>6</sup>。このように実験設定することで、CNTL 及び TEST のモデル地形、TEST のサブグリッド地形を全て MERIT DEM に統一した条件で TOFD の効果を評価できるようにした。CNTL と TEST の対ラジオゾンデ検証の FT=24 における水平風速の鉛直プロファイルを図 4.3.6 (夏期間) と図 4.3.7 (冬期間) に示す。夏冬ともに下層の強風バイアスがやや縮小し、二乗平均平方根誤差 (RMSE) が減少していることがわかる。また、対アメダス検証においても、

夜間中心の地上の強風バイアスが軽減され、RMSE が改善していることを確認した。さらに、気温や水蒸気などの他の気象要素に対しても地上や下層を中心に改善傾向がみられ、対解析雨量検証では、見逃し率と空振り率の双方が低下しており、エクイタブルスレットスコア (ETS) がやや改善していることが確認できた。

次に、TOFD の導入によってメソスケールの気象場が改善した特徴的な事例を紹介する。2023 年 2 月 19 日 00UTC を対象とした関東地方の下層 (850 hPa) の風の分布を図 4.3.8 に、地上の気温と風の分布を図 4.3.9 に示す。MSM では、関東地方の地表付近の冷氣層に関連して形成される局地前線が実況よりも寒気側に予測される系統誤差が報告されており (原 2014; 河野ほか 2019; Suzuki et al. 2021)、本事例でも同様に局地前線が寒気側にずれて予測された。CNTL (図 4.3.9 (a)) と TEST (図 4.3.9 (b)) の地上気温を比較すると、東京都から千葉県、茨城県付近にかけて形成されている局地前線が TEST では CNTL より南の暖気側にシフトしており、位置ずれは依然残るものの、解析値 (図 4.3.9 (d)) の位置にやや近づいた。このように局地前線の位置ずれが縮小する変化は、他の初期時刻や他の事例でも確認できた。本事例では低気圧の接近に伴い、地上付近を除いた下層の広い範囲で南西風が強まっており (図 4.3.8)、関東平野内陸の冷氣層は山地の風下に位置していた。TEST では冷氣層上部の風速が弱まり、冷氣層の厚みが増加していた。モデルの各過程による温位の時間変化率を調べると、冷氣層付近の温位変化は境界層過程と力学過程が支配的であった。TEST では TOFD によって山地風下の風速が低下することで乱流混合と移流による加熱が弱まっていた。結果として、TEST では冷氣層が CNTL よりも維持されやすくなり、局地前線が寒気側に位置ずれする誤差が小さくなったと考えられる。なお、本事例において関東平野では降水はほとんどなく、降水蒸発などの影響は小さかった。

### 4.3.4 気孔抵抗最小値の調整

2022 年 3 月に更新した MSM では、陸面の蒸発散フラックス定式を改良したことにより、対流圏下層や地

<sup>7</sup> TOFD スキームは GSM には 2020 年 3 月 (気象庁 2021) に、LFM には 2023 年 3 月 (気象庁 2023a) にそれぞれ導入された。

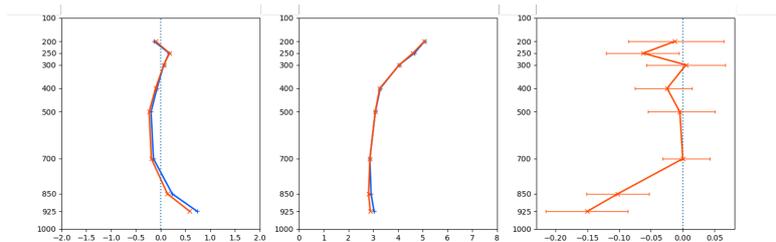


図 4.3.6 夏期間の対ラジオゾンデ観測の風速 [m/s] の検証結果 (FT=24)。左が平均誤差、中央が二乗平均平方根誤差 (RMSE)、右が RMSE の TEST と CNTL の差。縦軸は気圧 [hPa] でエラーバーは 95% 信頼区間を表す。平均誤差および RMSE の図 (左、中央) において、赤線は TEST、青線は CNTL。

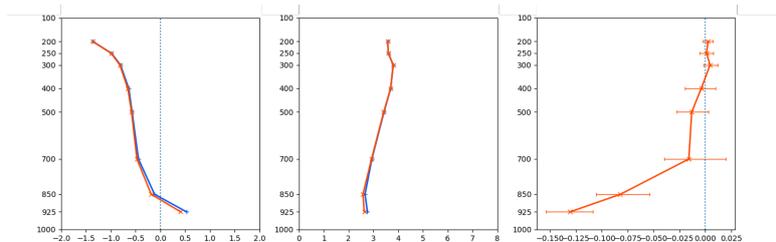


図 4.3.7 図 4.3.6 と同様。ただし、冬期間の検証結果。

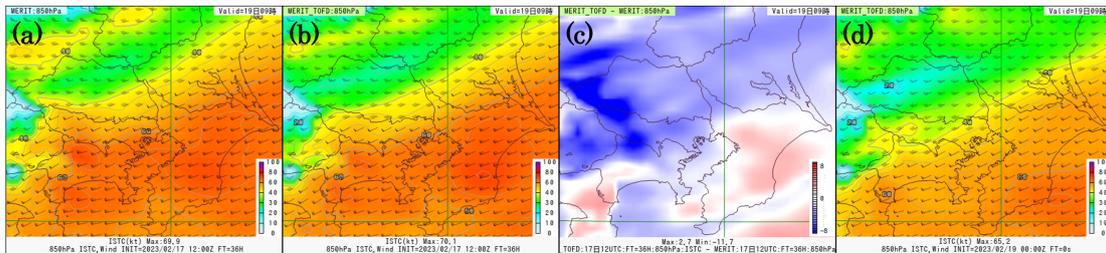


図 4.3.8 2023 年 2 月 19 日 00UTC を対象とする 850 hPa の風速 [kt]。(a) CNTL の予測値、(b) TEST の予測値、(c) TEST と CNTL の予測値の差、(d) TEST の解析値。ただし、(a), (b), (c) は 2023 年 2 月 17 日 12UTC 初期値の FT=36。

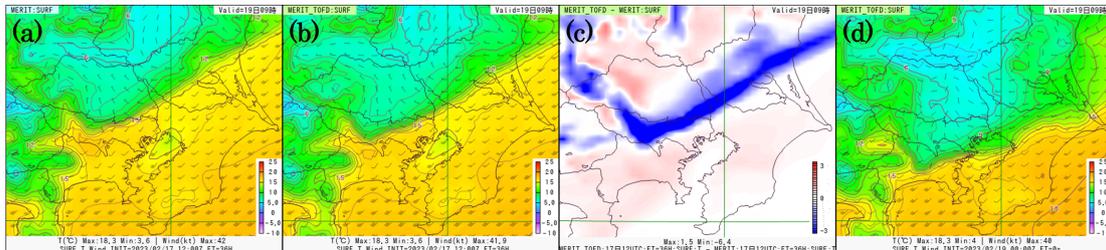


図 4.3.9 図 4.3.8 と同様。ただし、地上の気温 [C] (カラー及び等値線) と風速 [kt] (矢羽)。

上の気温・水蒸気量誤差を縮小した。一方で、中国大陸北部では夏に対流圏下層で高温バイアスがみられるようになった。今回の MSM 更新では、そのバイアスを軽減することを目的として、蒸発散フラックス定式に用いるパラメータのうち、気孔抵抗最小値 ( $r_{s,min}$ ) を調整した。

MSM では、潜熱フラックスに植生からの蒸散を考慮している。蒸散フラックス  $E_{tr}$  は以下のように表す。

$$E_{tr} = \rho_s(1 - f_{intc})f_{veg}\psi_{stm}C_hU_a(q_{sat}(T_s) - q_{v1}) \quad (4.3.5)$$

ここで、 $\rho_s$  は地表面付近の大気密度、 $f_{intc}$  は地表面保水 (植生による遮断降水など) の被覆率、 $f_{veg}$  は植

生被覆率、 $\psi_{stm}$  は植生からの蒸散を考慮するための係数、 $C_h$  は熱フラックスにおけるバルク係数、 $U_a$  は接地境界層内を代表する風速、 $q_{v1}$  はモデル大気最下層の比湿、 $q_{sat}(T_s)$  は地表面温度  $T_s$  における飽和比湿である。 $\psi_{stm}$  は以下のように表す。

$$\psi_{stm} = \frac{1}{C_hU_a + \frac{1}{r_s}} \quad (4.3.6)$$

$r_s$  は気孔抵抗で、Noilhan and Planton (1989) に基づき、日射量・土壌水分・飽差・気温に依存して以下の

ように決める。

$$r_s = \frac{r_{s,\min}}{\text{LAI}} F_1 F_2^{-1} F_3^{-1} F_4^{-1} \quad (4.3.7)$$

ここで、LAIは葉面積指数 (Leaf Area Index)、 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ はそれぞれ日射量・土壌水分・飽差・気温依存関数である。MSMでは $r_{s,\min}$ に全格子固定値 $250 \text{ s m}^{-1}$ を与えているが、Schulze et al. (1994)などでも述べられているように、植生種別や葉の分布、養分の利用可能性、生育状況などによって変化することが知られている。同様の気孔抵抗モデルを用いているECMWFの陸面モデルECLand(Boussetta et al. 2021)や米国で開発された陸面モデルNoah(Ek et al. 2003)では植生種別ごとに値を設定しており、大気モデルの更新とあわせてパラメータの調整が度々行われている。これらのモデルのパラメータ設定を参考に、MSMでも植生種別ごとに $r_{s,\min}$ を設定することとした。具体的には、GLCC(Global Land Cover Characteristics; Loveland et al. 2000)の植生区分に基づき、草原や農地などの低植生では $150 \text{ s m}^{-1}$ 、森林では $250 \text{ s m}^{-1}$ 、それらが混合する植生区分では $200 \text{ s m}^{-1}$ とした。ただし、日本域の陸格子については地上気温予測精度の観点から $250 \text{ s m}^{-1}$ のままとした。本変更のインパクトを調べるため、植生区別に $r_{s,\min}$ を調整したMSM予報実験(以降、RSMINと表す)を実施した。実験期間は2023年7月の1ヶ月間で、00, 12UTC初期値のみ(計62事例)実行した。なお、比較対象実験をCNTLと称する。図4.3.10はRSMIN実験における $r_{s,\min}$ の分布と、日平均地表面フラックスについてRSMINとCNTLの差を表したものである。 $r_{s,\min}$ を小さく設定した中国東北区や黄河下流域を中心に潜熱フラックスが増加し、これに対応して顕熱フラックスが減少している。これによって対流圏下層の加熱が弱まり、CNTLに比べて気温が低下した。対ラジオゾンデ925hPa気温誤差(図4.3.11)をみると、CNTLは大陸上で高温バイアスとなっているが、RSMINでは誤差の縮小が確認できた。

#### 4.3.5 放射微量気体濃度定数の変更

メソモデルでは、大気による日射の吸収や赤外線放射による大気や地面への加熱・冷却を考慮している。この大気に含まれる気体のうち、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ (微量気体)は予報領域一様の通年気候値を利用している。これらの気体濃度は全球平均でこの数十年間上昇傾向にあるが、現在のメソモデルでは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。そのため、これらの濃度を局地モデル同様に(気象庁2023a)、WMOが算出している2020年全球平均値(WMO 2021)に変更した場合の影響を調査した。変更前後の値は表4.3.1の通りである。いずれの気体も長波放射を吸収・放射し、また $\text{CO}_2$ は近赤外短波放射の吸収・散乱にも影響する。これらの気体濃度が上昇する

表 4.3.1 変更前後の気体の濃度 [ppmv]

| 種類                   | 変更前   | 変更後   |
|----------------------|-------|-------|
| $\text{CO}_2$        | 375.0 | 413.2 |
| $\text{N}_2\text{O}$ | 0.28  | 0.33  |
| $\text{CH}_4$        | 1.75  | 1.89  |

ことで、長波や近赤外の吸収・放射が増加して放射フラックスが変化し気温場に影響することが予想されるため、MSM予報実験によってそれらの評価を行った。実験期間は2023年6月1日から8月15日まで(夏期間)と2022年12月15日から2023年2月28日まで(冬期間)とし、各期間で00, 12UTC初期値の計152事例を実行した。

地上下向き放射について、長波放射は大気からの放射が増えることで夏期間は $0.2 \text{ W m}^{-2}$ 、冬期間は $0.4 \text{ W m}^{-2}$ 程度全体的に増加した。図4.3.12に、地上下向き長波放射の基準地上放射観測網(BSRN)観測値との比較を示す。変更後は、多くの地点で負バイアスを軽減していることが確認できる。一方、短波放射は変更前後の領域平均の差は $0.1 \text{ W m}^{-2}$ に満たなかった。大気上端上向き放射は、長波・短波とも大気での吸収が増加することで減少し、その差は $1 \text{ W m}^{-2}$ 程度であった。

気温場への影響について、対流圏下層や地上では長波の吸収増加によって気温が上昇した。地上気温の上昇幅はアメダス地点の平均で夏冬とも $0.1 \text{ K}$ 程度であった。他方成層圏では、太陽からの短波の吸収は増加するものの、地表面や対流圏下層からの長波が下層大気でより吸収されることで成層圏に到達する長波放射フラックスが減少し、平均的には気温が低下することが予想される。しかし実験の結果、100~300 hPaの等圧面気温の変化は、地上気温に比べて夏冬ともに小さく領域平均での差は $0.01 \text{ K}$ 未満であることを確認した。

#### 4.3.6 まとめと今後の予定

本節では、2025年度出水期前に予定しているメソモデルの更新について、物理過程改良に向けた開発とそれぞれの改良項目で得られた効果を述べた。境界層過程の計算安定性向上に向けた改良を導入することで、過去に強い数値振動を起こした事例において、数値振動が抑えられることを確認した。標高オリジナルデータセットをより高解像度で高精度なMERIT DEMに更新することで、冬期間の下層の高度や地上気圧を中心に予測精度が改善した。メソモデルで見られる対流圏下層や地上の強風バイアスの軽減を目的とした地形性乱流形状抵抗を考慮することで、対ゾンデ検証および対アメダス地上検証において、強風バイアスが軽減し、RMSEが小さくなることを確認した。メソモデルでは夏期間に中国大陸北部の対流圏下層で高温バイアスが見られたため、気孔抵抗最小値を調整することで、高温バイアスを軽減した。放射微量気体濃度定数は近

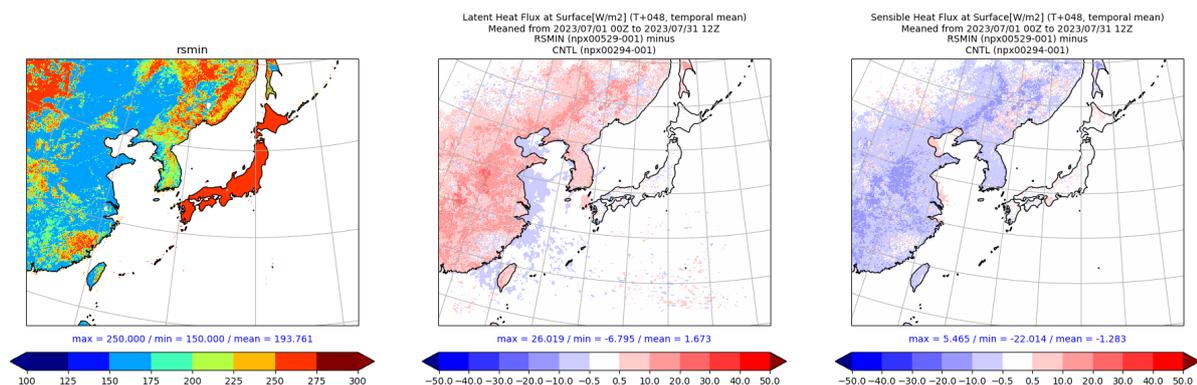


図 4.3.10 最小気孔抵抗値の分布 (左図) および 2023 年 7 月における予報 48 時間後の日平均地表面フラックス差分 (RSMIN - CNTL, 中図・右図)。中図は潜熱フラックス、右図は顕熱フラックスを表す。

年の観測値に基づいて更新することで、下向き長波放射の負バイアスを軽減した。

今後は、本節で示した改良と観測データ利用改良 (第 4.6 項)、全球モデルの改良 (第 4.1 項) に伴う側面境界の変更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 年度出水期前にメソ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.

Boussetta, S., G. Balsamo, G. Arduini, E. Dutra, J. McNorton, M. Choulga, A. Agustí-Panareda, A. Beljaars, N. Wedi, J. Muñoz-Sabater, de P. Rosnay, I. Sandu, I. Hadade, G. Carver, C. Mazzetti, C. Prudhomme, D. Yamazaki, and E. Zsoter, 2021: ECLand: The ECMWF Land Surface Modelling System. *Atmosphere*, **12**, doi:10.3390/atmos12060723.

Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JD003296.

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.

原旅人, 2014: 最近発生した顕著事例に関する検討. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 118–144.

河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2019: メソアンサンプル予報システム. 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, 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: 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, 2023a: 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, 2023b: 全球モデルの物理過程改良. 数値予報開発センター年報 (令和 4 年), 気象庁 数値予報開発センター, 62–70.

Loveland, T. R., B. C. Reed, J. F. Brown, D. O. Ohlen, Z. Zhu, L. Youing, and J. W. Merchant, 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1km AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, **21**, 1303–1330, doi:10.1080/014311600210191.

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.

西本秀祐, 2024: MYNN3 の計算安定性向上のための改良. 第 26 回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集.

Noilhan, J. and S. Planton, 1989: A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536–549, doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2.

Schulze, E.-Detlef, F. M. Kelliher, C. Körner, J. Lloyd, and R. Leuning, 1994: Relationships

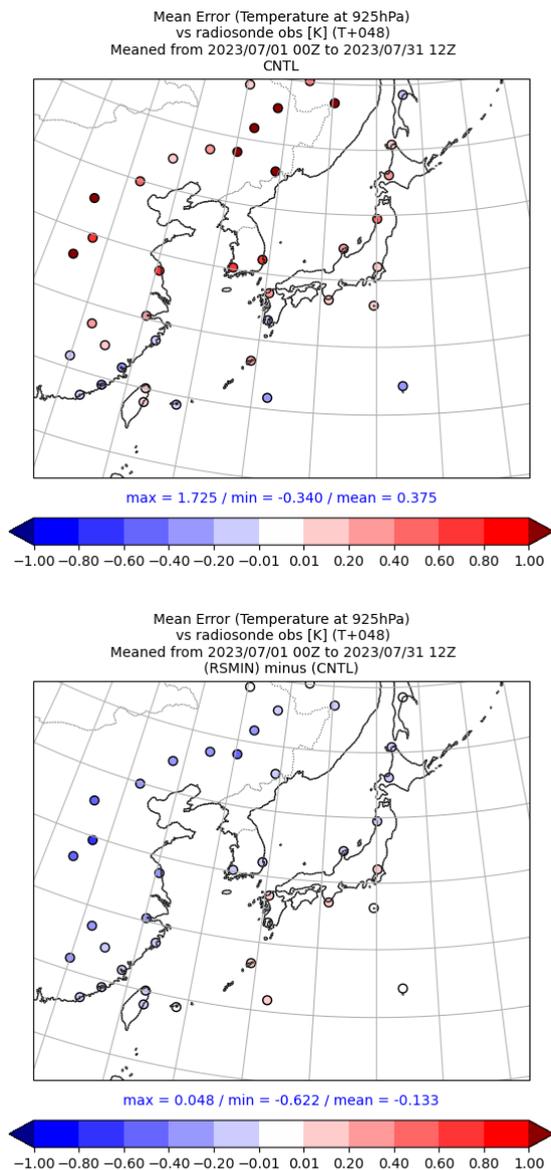


図 4.3.11 2023 年 7 月における対ラジオゾンデ 925hPa 気温平均誤差。左図は CNTL、右図は差分 (RSMIN - CNTL) を表す。

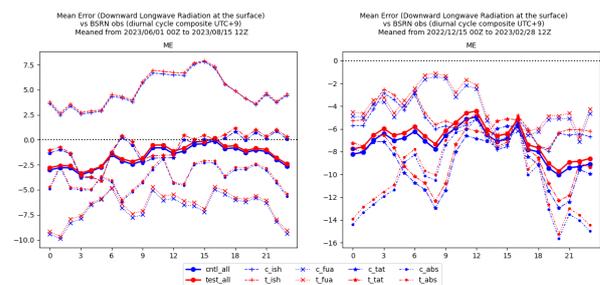


図 4.3.12 地上下向き長波の基準地上放射観測網 (BSRN) 各地点での予測対象時刻 [UTC] (横軸) 別の平均誤差 [ $W m^{-2}$ ]。+ : 石垣島、× : 福岡、★ : 館野、⋅ : 網走、● : 4 地点の平均、にそれぞれ対応する。左が夏期間、右が冬期間の検証結果である。変更前・変更後の結果はそれぞれ青線・赤線に対応する。

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.

Among Maximum Stomatal Conductance, Ecosystem Surface Conductance, Carbon Assimilation Rate, and Plant Nitrogen Nutrition: A Global Ecology Scaling Exercise. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **25**, 629–662, doi:10.1146/annurev.es.25.110194.003213.

Suzuki, K., T. Iwasaki, and T. Yamazaki, 2021: Analysis of systematic error in Numerical Weather Prediction of coastal fronts in Japan's Kanto Plain. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 27–47, doi:10.2151/jmsj.2021-002.

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

## 4.4 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

### 4.4.1 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) の改良を積み重ね決定論予測の精度向上を図るとともに、MSM をベースとするメソアンサンブル予報システム (MEPS) による確率予測の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; 水平格子間隔 2 km) の継続的な開発を進め、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た。しかし、局地的な強雨を時間と場所を特定して予測することは依然として困難な状況にあり、予測の不確実性が高い。

局地的な強雨等のメソスケール現象は予測可能性が本質的に低いこと (Zhang et al. 2003 など) を考慮すると、高解像度のアンサンブル予報によるメソスケール現象の予測不確実性の評価は有効なアプローチと考えられる。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「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」を挙げている。現在、気象庁では LFM の強雨の表現能力を活かし、より局地的な強雨の可能性を捕捉可能な、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) の開発を進めている。LEPS は 2025 年度末の運用開始を計画している。本節では、開発中の LEPS の強雨確率予測特性について、2020 年の強雨事例を対象とした服部ほか (2023) の報告も踏まえ、2024 年の強雨事例を対象に調査した結果を報告する。

### 4.4.2 開発中の LEPS 実験設定

LEPS の予報モデルは LFM (水平格子間隔 2km) 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 LFM に揃える。予報時間は 2024 年 3 月 5 日から予報時間を延長した LFM と合わせて 18 時間とした。本実験の LEPS のコントロールランは LFM と同じである。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。

本実験では、与える摂動は初期摂動のみで、MEPS の 6 時間予報値とその時刻のアンサンブル平均の差分を摂動として利用した。この摂動は、高度 5500 m の温位摂動の振幅が領域平均で基準値 (0.4 K) になるよう調整した上で、初期値 (局地解析) に加えた。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  $\alpha$  スケール、メソ  $\beta$  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 270km) 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)。したがって本実験の LEPS は、メソ  $\beta$  スケール以上の初期摂動を与え、その摂動を起因とする水平格子間隔 2km の LFM の振る舞いの違い (ばらつき) により、強雨予測の不確実性を捉えようとするものである。強雨予測において重要である発生環境場に起因する不確実性を捉えることが期待される。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であり、この初期摂動でどの程度、強雨の可能性を捉えられるかを事例調査の着目点とする。MEPS との比較の観点では、LFM の強雨表現能力により、服部ほか (2023) が 2020 年の事例について示した「LEPS は MEPS に比べ、より局地的な強雨の可能性を捕捉できる」点が期待できる。

なお、本設定は開発中のものであり、運用時の仕様は未定である。

### 4.4.3 事例調査

2024 年の顕著事例について実施した実験から明らかになった LEPS の強雨の確率予測の特徴を事例に基づいて示す。実験には、2024 年 4 月時点の現業数値予報システムの LFM、MEPS を利用した。

#### (1) MEPS と比較した強雨の可能性の捕捉能力

LFM が線状の強雨を表現しやすいことから、MSM をベースとする MEPS よりも線状降水帯による大雨の可能性を捕捉できるという観点で二つの事例を示す。いずれも「LFM と MSM の強雨予測の違い」を示し、その違いが「LEPS と MEPS の降水確率予測の違い」に現れることを説明する。

#### 解像度による強雨ピーク表現の違い、陸上で表現する降水形状の違い

図 4.4.1 に、九州の強雨事例について、LFM と MSM の強雨予測の関係と、LEPS と MEPS の強雨の確率予測 (50 mm/3h の超過確率) の関係が典型的であった事例を示す。この事例では、梅雨前線が九州の北側に位置し、九州へ下層暖湿気が流入する中、線状の強雨域が前線南側の局地的な収束場において発生した (図 4.4.1 上段 (左))。LFM は 50 mm/3h のような強雨を表現しやすい傾向があり、本事例でも位置ずれはあるものの 50 mm/3h 以上の線状の強雨域を予測した (図 4.4.1 上段 (中))。図 4.4.1 上段 (右) の MSM は、九州北部の強雨の可能性をある程度捉えているが、陸上では地形に沿った降水予測になりがち (成田・森安 2010) で線状の強雨域は表現しにくい傾向がこの事例でも見られる。解像度の違いに対応して、LFM に比べると強雨のピーク値が小さいことも一般的な傾向である。

図 4.4.1 下段に示した 50 mm/3h の超過確率は、モ

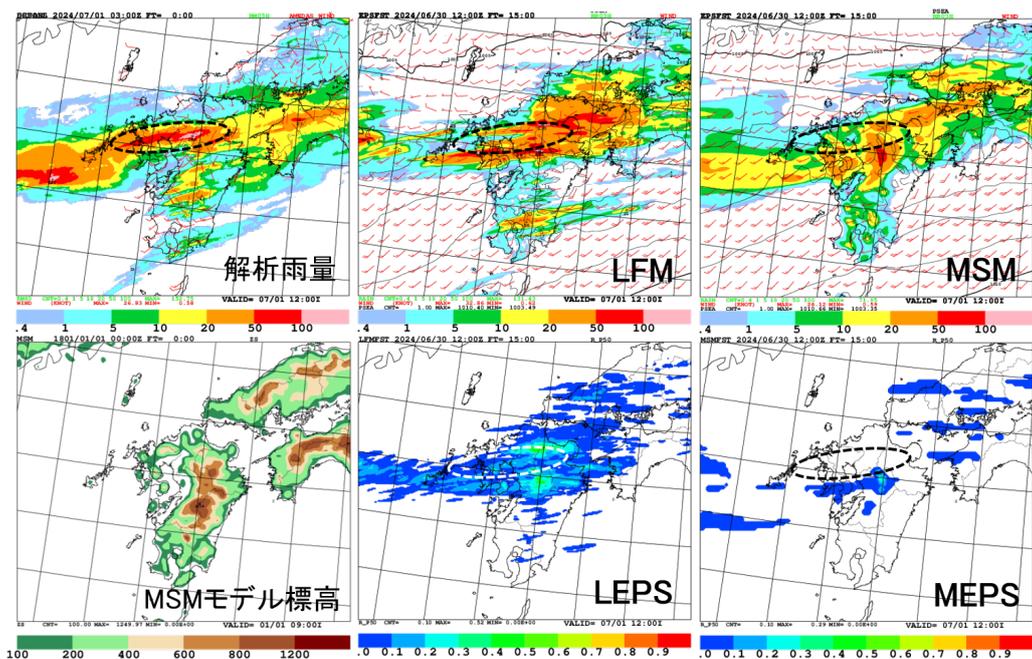


図 4.4.1 2024 年 7 月 1 日 12JST の 3 時間降水量 [mm/3h] について、上段：左から解析雨量、LFM 予測、MSM 予測、下段：左から MSM モデル標高 [m]、LEPS による 50 mm/3h の超過確率予測、同 MEPS 予測。予測値はいずれも 2024 年 6 月 30 日 12UTC 初期値の FT=15。

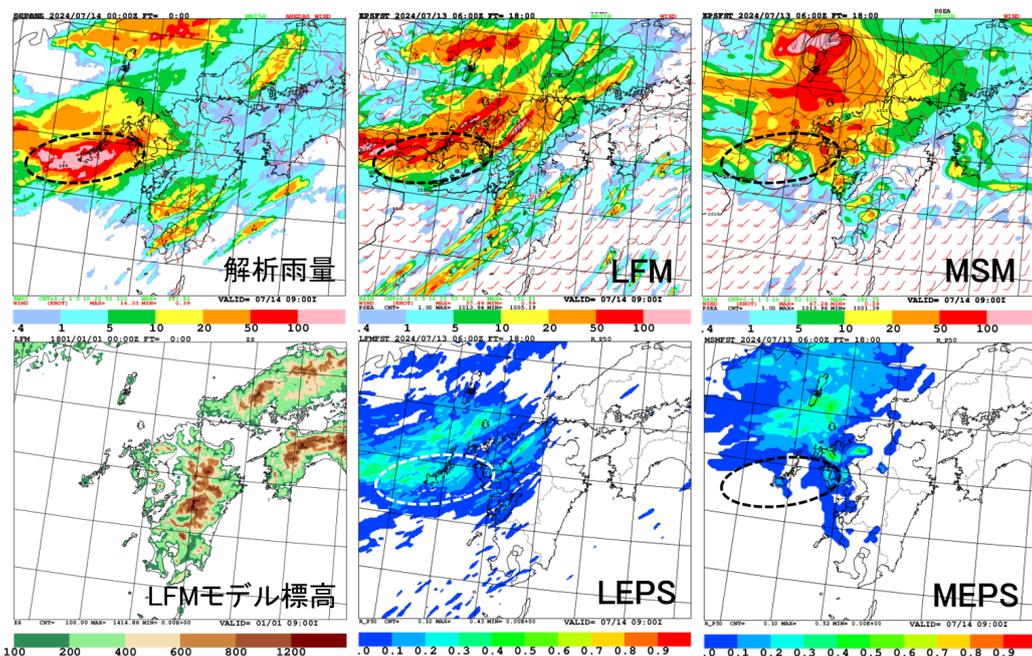


図 4.4.2 図 4.4.1 と同じ。ただし、2024 年 7 月 14 日 09JST の 3 時間降水量 [mm/3h] について。下段 (左) は LFM モデル標高 [m]。予測値はいずれも 2024 年 7 月 13 日 06UTC 初期値の FT=18。

デルの予測特性を反映したものになっている。LEPS は、各メンバーが LFM 同様に線状の強雨を表現することから、50 mm/3h 以上の強雨を高い確率で予測するポテンシャルを有する。図 4.4.1 下段 (中) の LEPS は、30~40%程度の確率のピーク域は実況の強雨域からは南と北にずれているものの、実況の強雨域の広がりを捕捉して、MEPS (図 4.4.1 下段 (右)) よりも高

い確率を示した。MEPS は実況の強雨域の南側に 5%程度の確率を予測 (1 メンバーが 50 mm/3h を予測) した。九州中央部の山岳 (地形は図 4.4.1 下段 (左) の MSM モデル標高を参照) では複数メンバーが強雨を予測したことにより局所的に 30%程度の確率が見られる点には、MSM の地形に沿った降水を表現しやすい特性が現れている。LEPS は MEPS に比べ、線状の強

雨を表現でき、より局地的な強雨の可能性を捕捉できるという特性は、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る。この強雨の確率予測特性は、図4.4.1以外の多くの事例においても概ね共通して見られた。

### 強雨予測位置の違い

図4.4.2に7月14日に長崎県五島付近で発生した線状降水帯事例を示す。梅雨前線が九州の北側に位置し、九州北部地方へ下層暖湿気が流入する中、線状降水帯は前線南側の局地的な収束場において発生した。図4.4.2上段(中)のLFMは五島付近で線状の強雨を予測した。ただし、降水強度は実況に比べると弱く、降水帯は実況よりもやや北寄りである。図4.4.2上段(右)のMSMは対馬付近の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、強雨域は低気圧中心及びその南西側に集中し、五島付近での強雨は予測できなかった。

図4.4.2下段(中)のLEPSによる50mm/3hの降水超過確率では、実況の50mm/3h以上の降水域を概ね捕捉し、五島付近で30~40%の確率を示した。コントロールラン(LFM)よりも南側に強雨を予測するメンバーが複数存在し、実況の捕捉に貢献した(図略)。この初期値の18時間予報の間、九州西海上ではいくつかの降水システムの形成・移動・衰弱が繰り返されており、与えた初期摂動による予報初期の振る舞いが、その後の時間発展の中で五島付近で強雨を予測しやすい環境を作り出した。ただし、これらのメンバーの初期時刻から18時間予報までの時間発展が一貫して実況を捉え続けているわけではない。また、これらのメンバーが18時間予報において実況を面的に全て正しく捉えているというわけではなく、南側に強雨域が広がりすぎるといった点も見られた。したがって特定のメンバーというよりは、アンサンブル全体で強雨の可能性を捉えたと見るのが適当である。MEPSの各メンバーの予測にはMSMで見られた小低気圧の過発達傾向や、それに伴う降水予測の傾向が反映され、MEPSの超過確率(図4.4.2下段(右))としても五島の北側で高い確率を示し、実況の五島付近の強雨の可能性を捉えきれなかった。この事例では、MSMと比べてLFMの強雨予測位置が適切だったこと、さらにコントロールラン(LFM)の若干の位置ずれや強雨域の狭さを補う摂動メンバーが複数存在したことによって、アンサンブル全体として実況を捕捉できたと言える。

### (2) アンサンブルでの強雨の可能性の捕捉

前項の長崎県五島の事例でも言及したが、アンサンブル予測全体を俯瞰的に見ることで、強雨の可能性を捉えることの有効性を示唆する事例を図4.4.3に示す。2024年7月1日の事例では、梅雨前線の南側での下層の暖湿気の流入により九州各地で様々な空間スケール

の線状の降水が複数発生した(図4.4.3左上の解析雨量の図中に示した黒点線楕円)。図4.4.3右上に示したコントロールランでは、実況をある程度よく捉え九州各地で複数の線状の降水域を表現した。しかしながら、一つ一つの降水域を実況と照らし合わせてみると、図中にa-gを付した降水域はコントロールランでは捉えられていないことが分かる。図4.4.3右下には、コントロールランで捉えられなかった降水域を比較的良く捉えた摂動ランを載せた。この摂動ラン(メンバー04)では、降水域a-gをある程度捉えた一方、降水域c内の東部分はコントロールランのほうが良く捉えている。また、このメンバー04やコントロールランでは捉えられていない降水域も存在する。個々のメンバーでは全て捉えることは難しい事例で、場所と時刻を決定論的に予測することが難しい中、アンサンブル全体で発生位置や時刻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。図4.4.3左下に示した20mm/3hの超過確率では、実況の降水域をアンサンブル全体としてある程度捉えていることが分かる。

図4.4.3左下の20mm/3hの超過確率の分布を詳細に確認すると、九州の陸上に比べ、その風上の九州西海上からの線状の降水域(甕島の北側の降水域dなど)が十分捉えられていない。海上では湿潤大気を持ち上げる強制力が明瞭でない点や、またLFMには対流発生の強制力の空間スケールが解像度以下の場合を中心に対流発生予測が遅れる傾向(永戸ほか2013)があり(対流雲が風で移動する場合は、より風下側に予測)、その傾向がLEPSの確率分布にも現れた可能性がある。摂動の観点では、本実験では考慮していない、対流発生に関する予報モデルの不確実性を捉えるモデル摂動等が有効な可能性もある。また、山陰地方では高い超過確率を示したが実況では強い降水はなく、空振りとなった。一つの事例だけでは確率予測の良し悪しの議論に十分ではないが、LFMは強雨予測の過大傾向があるため、その性質を受けてLEPSの強雨確率予測も過大傾向が見られる。

### (3) 予測の不確実性の大小の時間推移、現象発生の可能性の絞り込み

一般的には予報後半ほど予測の不確実性は高まるが、ある初期時刻からの予測対象とする大雨のステージ(環境場の推移)によっては予報後半のほうが領域が絞られる事例もある。図4.4.4には9月20日の秋田県での線状降水帯事例とその後に強雨域が山形県から新潟県へと南下する時間帯について、上段に実況(解析雨量)と下段に2024年9月19日12UTC初期値のLEPSの50mm/3hの超過確率を示す。図4.4.4(左)の秋田県で線状降水帯が発生した時刻(20日06JST)では、日本海海上からの線状の強雨が秋田県から山形県にかけて陸上にかかる可能性が示されている。山形県の暖湿気流入の領域ではスケールの小さな強雨が発生する可

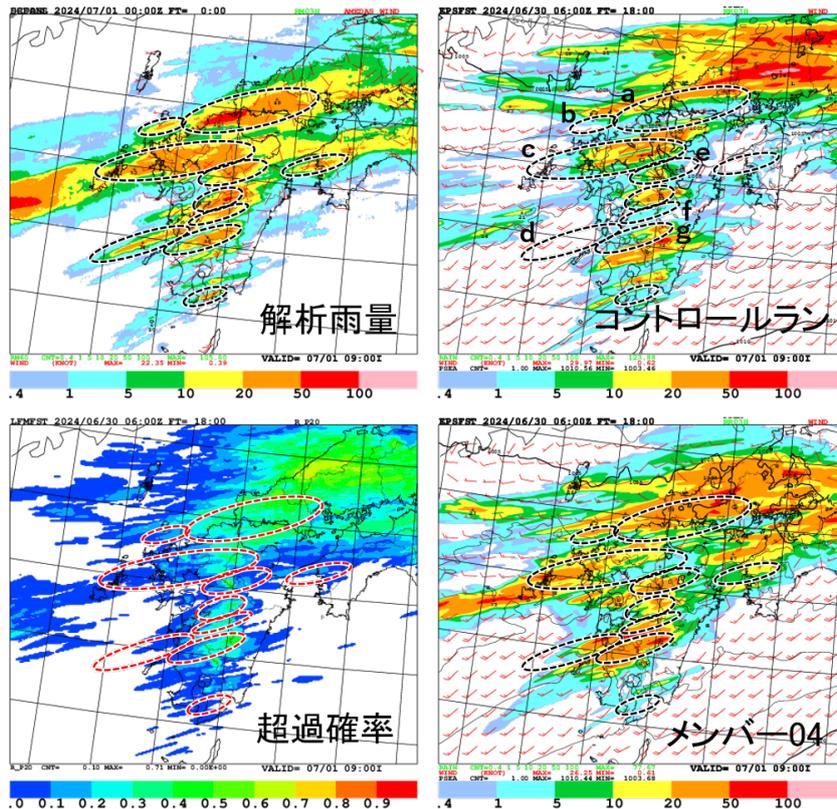


図 4.4.3 2024 年 7 月 1 日 09JST の 3 時間降水量 [mm/3h] について、(左上) 解析雨量、(左下) LEPS の 20 mm/3h の超過確率予測、(右上) LEPS コントロールラン予測、(右下) LEPS メンバー 04 予測。LEPS は 2024 年 6 月 30 日 06UTC 初期値の FT=18。

能性も見ることができる。図 4.4.4 (中) の実況で山形県・新潟県境付近に線状の強雨域がかかる時刻 (20 日 09JST) では、山形県から新潟県に広く強雨の可能性を示した。続く図 4.4.4 (右) の時刻 (20 日 12JST) では、実況の推移と対応して、山形県・新潟県境付近を中心に確率の高い領域が絞り込まれた。図 4.4.4 で示した時刻について、925 hPa の相当温位で下層の暖湿気の流入範囲を確認すると (図 4.4.5)、20 日 06–09JST の時間帯では 345 K 以上の相当温位が新潟県から山形県にかけて広く流入していたが (図 4.4.5 (左)、(中))、続く 12JST には高相当温位の流入範囲が新潟県に集中するような流れに変わっており (図 4.4.5 (右))、この状況を反映して図 4.4.4 下段 (右) の 50 mm/3h の超過確率において強雨が発生する可能性のある領域も絞り込まれていると考えられる。一般には、予測の不確実性は時間発展とともに拡大していく場合が多いが、この事例では、強雨が発生しうる下層暖湿気の流入範囲が予報後半に狭まるような環境場の推移により、後の時間帯のほうが強雨発生場所の不確実性は領域的には絞り込まれるように見える。環境場の時間推移から考えると、不確実性の大小の推移として妥当な振る舞いと考えられる。

#### 4.4.4 まとめ

開発中の LEPS による強雨の確率予測特性について、2024 年の事例を対象に調査した。LFM の線状の強雨を表現できる能力により、MSM をベースとする 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点について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。

MEPS 予報を利用した初期摂動のみを考慮した LEPS の実験であるが、2024 年の事例を確認した中では、多数の顕著事例において強雨の可能性を捕捉できたことを把握した。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。50 mm/3h の超過確率等の雨量の確率分布を計算することができ、アンサンブル予測全体を俯瞰的に見ることで、予測の不確実性の大小の把握や現象発生の可能性の絞り込みに利用できる。

MSM で解像・予測が難しい現象は MEPS でも捉えることが難しいが、LFM をベースとしたアンサンブルにより、より局地的な強雨の発生可能性を捉えることが可能となる。しかし当然のことながら、LFM で解像・予測が難しい現象は LEPS においても同様に難しい。LFM と同じ設定のモデルを用いているため、LFM

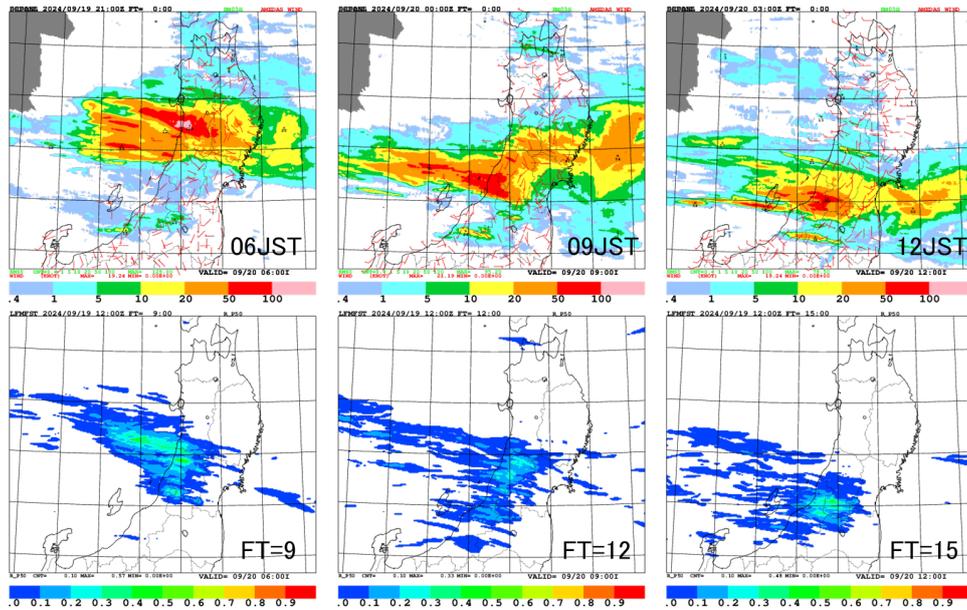


図 4.4.4 3 時間降水量 [mm/3h] の (上段) 解析雨量と (下段) LEPS による 50 mm/3h の超過確率予測。2024 年 9 月 20 日の (左) 06JST、(中) 09JST、(右) 12JST。LEPS は 2024 年 9 月 19 日 12UTC 初期値の (左) FT=9、(中) FT=12、(右) FT=15。

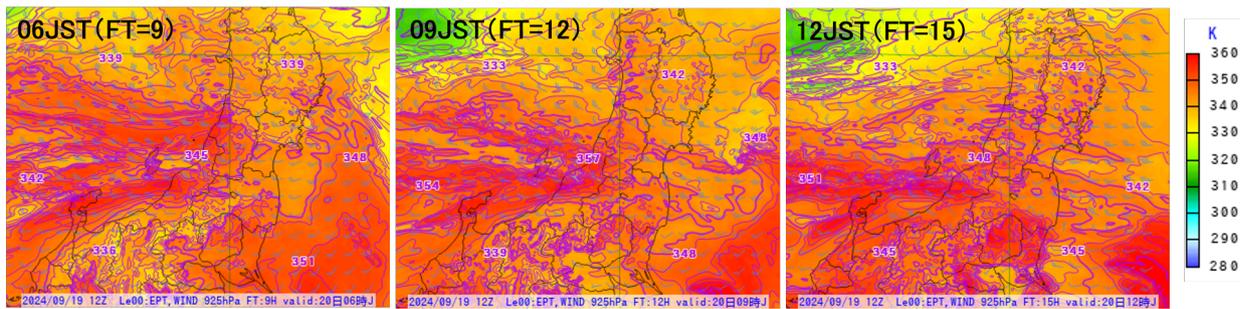


図 4.4.5 2024 年 9 月 19 日 12UTC 初期値の LEPS のコントロールランによる 925 hPa の相当温位 [K] の予測。対象時刻 (予報時刻) は 2024 年 9 月 20 日の (左) 06JST (FT=9)、(中) 09JST (FT=12)、(右) 12JST (FT=15)。

の系統誤差は LEPS にも含まれる。LEPS の利用において、これらの予測対象や誤差特性を踏まえる必要がある。

第 4.4.3 項 (2) の事例で見たような、海上からの線状の強雨形成といった小さなスケールの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。また、側面・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。このうち下部境界摂動としては海面水温摂動の開発を進めている (川田ほか 2024)。線状降水帯の予測の不確実性を捕捉するためにより適切な摂動を検討していくことが課題である。

#### 参考文献

永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 日本域拡張・高頻度化された局地モデルの特性. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18-41.  
服部宏紀, 川田英幸, 安西悠理, 河野耕平, 2023: 気象庁

における局地アンサンブル予報システムの開発. 2023 年度秋季大会講演予稿集, 124, D351.

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.

國井勝, 小野耕介, 2020: メソアンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 85-115.

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.

## 4.5 観測データの新規導入と利用方法の改良

### 4.5.1 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、予測精度向上には重要であり、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。

4.5.2 項及び 4.5.3 項では、全球・メソ・局地解析における輝度温度データの利用方法の改良として、放射伝達モデル RTTOV の更新、及び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について、それぞれ述べる。4.5.4 項から 4.5.6 項、並びに 4.5.8 項では、全球解析における観測データの利用方法の改良として、静止衛星全天放射輝度温度 (ASR) の利用、CO<sub>2</sub> バンドの晴天放射輝度温度 (CSR) の利用、マイクロ波水蒸気サウンダの利用高度化、極域 AMV の利用拡充について、それぞれ述べる。4.5.7 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、4.5.9 項では、メソ・局地解析における、アメダス地上湿度の観測誤差の調整について述べる。

### 4.5.2 放射伝達モデル RTTOV の放射伝達計算用係数および界面射出率モデルの更新

#### (1) 概要

数値予報システムにおける輝度温度データの同化には、観測演算子として EUMETSAT の NWP SAF で開発された高速放射伝達モデル RTTOV (Eyre 1991) を利用している。RTTOV は計算精度向上や機能追加、新規衛星への対応など常に改良が行われており、数年ごとに新しいバージョンがリリースされている。現在数値予報開発センターでは、RTTOV-10.2 から RTTOV-13.0 (Saunders et al. 2020) への更新作業を行っている。更新については大規模な変更を確実に実施するため二段階に分けて行っており、第一段階としてモジュールの差し替えや定数ファイル名の変更など RTTOV-13.0 が動作するための必要最低限の変更を、全球およびメソ解析については 2022 年 6 月 30 日に、局地解析については 2022 年 8 月 9 日に導入した (気象庁 2023b)。現在は RTTOV-13.0 のシステムへの組み込みによって利用可能となった、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や海面射出率モデルの導入に向けて開発を進めている。本項ではこれらの導入に向けた品質管理 (QC) の変更点やメソ・局地解析における数値予報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

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 以外の係数を更新する。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、今回は更新を見送ることとした。また CSR については、これまで微量気体としてオゾンのみを考慮した係数を利用してきたが、新しいバージョンの係数ではオゾンと二酸化炭素を考慮した係数が開発元から推奨される標準の係数となった。オゾンのみを考慮した係数と計算精度に大きな違いが無かったため、オゾンと二酸化炭素を考慮した係数を利用することにした。またこれまで利用してきた係数の水蒸気の単位について、マイクロ波は湿潤空気における体積混合比、赤外は乾燥空気における体積混合比を前提としたものであったところ、これまでの解析システムでは RTTOV には共通して湿潤空気における体積混合比を与えていたため、赤外のセンサでは不整合が生じていた。新しい係数ではマイクロ波、赤外ともに乾燥空気における体積混合比を前提として作られており、RTTOV へ乾燥空気における体積混合比を与える変更を加え、不整合を解消した。

海面射出率モデルとしてマイクロ波は FASTEM-6 (Kazumori and English 2015)、赤外は IREMIS が利用可能となった。FASTEM-6 では衛星のセンサから見た相対的な風向 (RWD: Relative Wind Direction) に依存して海面射出率が変化する特性を適切にモデル化している。これを利用することで RWD に依存する O-B のバイアスが解消することが期待される。全球解析において、データ同化サイクルを行わずに一定期間の QC 処理のみを行った実験結果より、当庁のシステムにおいてもマイクロ波イメージャについて RWD に依存したバイアスが縮小していることを確認した。一方で、メソ・局地解析で利用している FASTEM-4 から FASTEM-6 へ更新した場合、地上風速に依存するバイアスが拡大することが分かった。これはメソ・局地解析では変分法バイアス補正 (VarBC) の説明変数として地上風速を利用していない (全球解析では利用している) ことに起因すると考え、VarBC の説明変数に地上風速を追加した実験を実施したが、改善の効果が確認できなかった。そのためメソ・局地解析については FASTEM-6 の利用は見送ることとした。一方で、赤外の IREMIS を利用すると、海上における赤外サウンダの地表面に感度のあるチャンネルで、地上風速に依存して計算輝度温度が変化することが確認できた。IREMIS の利用に関して、想定通りの変化であったため、赤外では IREMIS を利用することとした。

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する。QC で利用しているパラメータのうち、計算輝度温度の統計等から作成したスキャンバイアス補正量、AMSU-A

の降水判別係数を今回の変更に合わせて更新した。スキャンバイアス補正量の更新については係数や海面射出率モデルの更新に伴う変化に加えて、経年変化によって補正が不十分になっているセンサもあるため、この機会に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することとした<sup>1</sup>。また AMSU-A については、主にスキャンバイアス補正量の更新に伴って、QC 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り、雲判定によって利用されないデータが増加した。利用されなくなったデータの O-B を確認したところ、雲域として過剰に取り除かれていると考えられたため、従来と利用されるデータ数が同程度になるように雲判定に用いる雲水量の閾値を 100 g/m<sup>2</sup> から 120 g/m<sup>2</sup> に変更することとした。

### (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。2024 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 とする実験を実施した。実験は夏実験として 2023 年 5 月 27 日から 8 月 15 日、冬実験として 2022 年 12 月 10 日から 2023 年 2 月 28 日の期間で実施した。

輝度温度データの利用率は AMSU-A や ATMS で減少し、MHS、CSR、赤外サウンダで概ね増加した。データ利用率の減少についてはスキャンバイアス補正量を更新したことによって、これまで適切に取り除けていなかった雲の影響を受けたデータが取り除けるようになった結果であることを確認した。MHS、CSR のデータ数増加については、変更による放射計算精度の向上に伴って QC をパスするデータが増加したこと、赤外サウンダについては海面射出率モデルの更新によって雲判定されるデータが減少したことが主な要因であることを確認した。他の独立な観測データの観測値と第一推定値との整合性の変化を確認したが、概ね中立の結果であった。

平均解析場の変化としては、メソモデルの領域南側で可降水量が減少し、北側で可降水量が増加する変化が見られた。これはマイクロ波イメージャの係数更新による計算輝度温度の変化に対応していたことを確認した。またラジオゾンデによる 850hPa の水蒸気混合比の検証結果より、この変化がモデルバイアスを解消させる変化であったことを確認した。

予報スコア (図 4.5.1) の変化を確認したところ、夏実験では概ね中立であった。冬実験では地上 1.5m 気温が悪化したが、ジオポテンシャル高度の予測精度が改善する結果であった。地上 1.5m 気温の悪化については、もともとあった大きな正バイアスがごく僅かに拡大した結果であり、深刻な悪化ではないことを確認した。

<sup>1</sup> ただし、補正量の見積もり時に利用が終了していたセンサなどについては据え置きとしている

### (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。2024 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 とする実験を実施した。実験は夏実験として 2023 年 7 月 23 日から 7 月 30 日、冬実験として 2023 年 1 月 23 日から 1 月 30 日の期間で実施した。

輝度温度データの利用率は AMSU-A や ATMS で減少し、MHS、CSR、赤外サウンダで概ね増加した。データ利用率の減少の原因としてはメソ数値予報システムと同様の理由で、適切な QC ができるようになった結果であることを確認した。他の独立な観測データの観測値と第一推定値との整合性の変化については概ね中立であった。

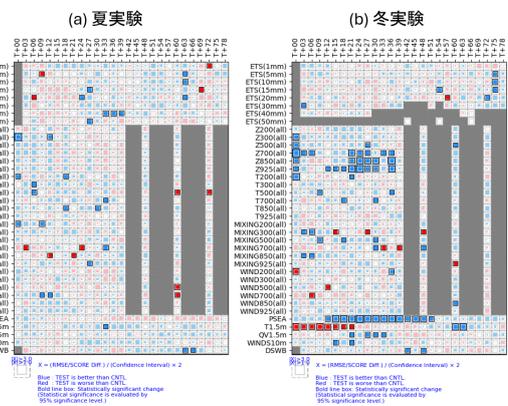


図 4.5.1 メソ数値予報システムにおける主要要素の対 CNTL 統計検証結果。降水量は解析雨量、高度場、気温、混合比、風速はラジオゾンデ、地上要素は SYNOP とアメダス観測を参照値としている。各行は統計検証要素、各列は予測時間に対応する。青が CNTL と比べて改善、赤が CNTL と比べて改悪を表しており、色付きの領域が各セルの内側の正方形以上の場合、統計的に有意であることを示す。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。

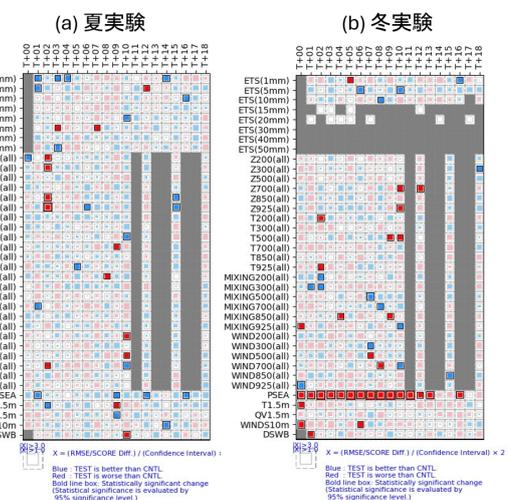


図 4.5.2 図 4.5.1 と同様。ただし、局地数値予報システムにおける検証結果。

平均解析場の変化についてもメソと同様であり、局地モデルの領域南側で減少し、北側で増加する傾向であった。予報スコア(図 4.5.2)について、夏実験は概ね中立の結果であった。冬実験については地上気圧が悪化した、それ以外は概ね中立であった。地上気圧の悪化については、もともとあった大きな正バイアスがごく僅かに拡大したことに起因するものであり、深刻な悪化では無いことを確認した。

#### (5) まとめと今後

RTTOV-13.0 の導入に伴って利用可能となった、最新の放射伝達計算用係数および海面射出率モデルの利用に向けて開発を進めており、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予測精度は概ね中立の結果であったが、経年変化によって不十分になっていたスキャンバイアス補正量を更新したことで、雲の影響を受けたデータが適切に取り除けるようになり、より適正な解析システムになったと考えられる。

今回の利用を見送った CrIS の放射伝達計算用係数や FASTEM-6 について、今後原因を詳しく調査し、可能であれば更新を目指して開発を進めていく予定である。また今後、全球数値予報システムにおける影響を調査する予定である。

### 4.5.3 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

#### (1) 概要

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ーで、全球、メソ、局地解析で同化利用している(岡本 2007; 平原 2017; 気象庁 2023a)。一方で、AMSU-A および ATMS には気温の鉛直分布に関する情報を観測するチャンネル(気温チャンネル)に加え、大気の透過率が高く、対流圏下層の水蒸気に感度のあるチャンネル(窓チャンネル)も搭載されている。現在、窓チャンネルは品質管理処理でのみ利用しているが、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、数値予報システムでの全球、メソ、局地解析における現業利用に向けた開発を進めている。本項ではその開発状況について述べる。

#### (2) 窓チャンネルの同化設定

新規利用する窓チャンネルは、23.8GHz(AMSU-A/ch1, ATMS/ch1) および 31.4GHz(AMSU-A/ch2, ATMS/ch2) のチャンネルとした。両センサには、同様に大気の透過率が高い 89GHz 帯 (AMSU-A/ch15, ATMS/ch16) のチャンネルも搭載されているが、高周波帯の輝度温度は雲氷や降水粒子による散乱の影響を受けやすいため、後述の品質管理(QC)処理がより複雑になることが判明し、今回は新規利用の対象外とした。なお、

表 4.5.1 窓チャンネルの観測誤差の設定値 [K]

| 衛星名/センサ名       | ch1  | ch2  |
|----------------|------|------|
| Metop-C/AMSU-A | 2.80 | 2.40 |
| NOAA-15/AMSU-A | 3.00 | 2.60 |
| NOAA-18/AMSU-A | 2.80 | 2.40 |
| NOAA-19/AMSU-A | 2.80 | 2.40 |
| Suomi-NPP/ATMS | 2.80 | 2.20 |
| NOAA-20/ATMS   | 3.00 | 2.70 |
| NOAA-21/ATMS   | 3.00 | 2.70 |

衛星やセンサに関する情報は WMO/OSCAR/Space<sup>2</sup> に詳細な情報が掲載されている。

同化手法は、気温チャンネルに倣って雲・降水の影響を受けない地点(晴天域や薄い雲域)のデータのみを利用する晴天同化とした。晴天域を抽出するための QC 処理について、リトリブした雲水量と散乱インデックスに対して複数の閾値を設けて調査したところ、下層気温に感度のあるチャンネルと同じ閾値(岡本 2007)を適用することで雲・降水の影響を受けたデータを十分に除去できることが分かったため、そのような処理とした。

また、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する。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、陸域や海氷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。また、さらに安全のため、観測視野が大きくなる端寄りの FOV(Field of view, 観測視野角)<sup>3</sup>のデータについては全て同化利用しないこととした。

観測誤差は、全球解析の 15 日間の統計から算出した観測値と第一推定値の差(O-B)の標準偏差をもとに衛星ごとに設定した(表 4.5.1)。観測誤差膨張係数は、窓チャンネルと近い周波数をもつマイクロ波イメージャ(AMSR2 等)に倣って、全球解析で 3 倍、メソ解析で 4 倍、局地解析で 6 倍とした。

これらの設定で、全球、メソ、局地の各数値予報システムにおいて性能評価試験を実施した。以降では、2024 年 7 月時点の現業数値予報システム相当の実験(CNTL)に対する、窓チャンネルを新規に同化利用した実験(TEST)の検証結果を示す。

#### (3) 全球数値予報システムにおける性能評価試験

実験の評価期間は、夏季については 2023 年 8 月、冬季については 2024 年 1 月とした。また、窓チャンネル

<sup>2</sup> <https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>

<sup>3</sup> AMSU-A および ATMS の走査方法として採用されているクロストラックスキャンの性質によるもの(気象庁 1999)。

の変分法バイアス補正の説明変数には、海面水温、海上風速、雲水量、軌道の上昇下降フラグ、衛星天頂角および定数を用いた。

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の整合性を確認したところ、TESTでは水蒸気に感度のあるマイクロ波イメージャMSR2やマイクロ波サウンダATMS(水蒸気チャンネル)などにおいて、整合性の向上が見られた(図4.5.3)。これは、第一推定値として用いられる短期予測(3~9時間)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。

予測精度については、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して、48時間後予測までの範囲で低中緯度を中心に対流圏下層の水蒸気場の改善がみられた(図4.5.6)。これは、GSMがもつ低中緯度帯における対流圏下層の湿潤バイアスが、窓チャンネルの新規利用によってわずかに軽減したことに起因すると考えられる。

#### (4) メソ数値予報システムにおける性能評価試験

実験の評価期間は、夏季については2023年7月、冬季については2024年1月とした。窓チャンネルの変分法バイアス補正の説明変数には、他の輝度温度データと同様、海面水温、軌道の上昇下降フラグ、衛星天頂角および定数を用いた。

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の整合性を確認したところ、TESTでは水蒸気に感度のあるAMSR2やATMS(水蒸気チャンネル)、およびハイパースペクトル赤外サウンダCrIS(水蒸気チャンネル)で整合性の向上が見られた(図4.5.4)。

予測精度については、3時間あたり5mmまでの比較的弱い雨の予測において、解析雨量に対する空振り率および見逃し率が減少した。複数の事例検証結果から、降水域周辺を通過したAMSU-AまたはATMSの

窓チャンネルがもつ下層水蒸気に関する情報が予報初期値に適切に反映され、降水域予測の精度向上に寄与していることが確認できた(図4.5.5)。

#### (5) 局地数値予報システムにおける性能評価試験

実験の評価期間は、夏季については2023年7月、冬季については2024年1月のそれぞれ1週間とした。窓チャンネルの変分法バイアス補正の説明変数は、メソ解析と同様とした。

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の整合性を確認したところ、メソ解析と同様に、TESTでは水蒸気に感度のあるAMSR2やATMS(水蒸気チャンネル)、CrIS(水蒸気チャンネル)で整合性の向上が見られた。

予測精度については、夏期間において、3時間あたり10mmまでの比較的弱い雨の予測において、空振り

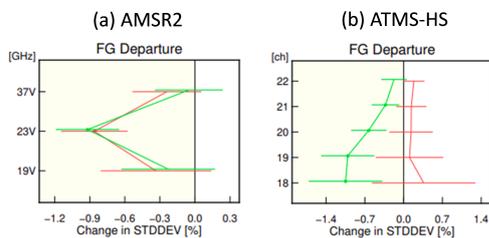


図 4.5.3 全球解析における、観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差の、TESTのCNTLに対する変化率[%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。(a)マイクロ波イメージャAMSR2、(b)マイクロ波サウンダATMS(水蒸気チャンネル)。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。標準偏差の図のエラーバーは95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合(改善)している場合、0線より左側にプロットされる。

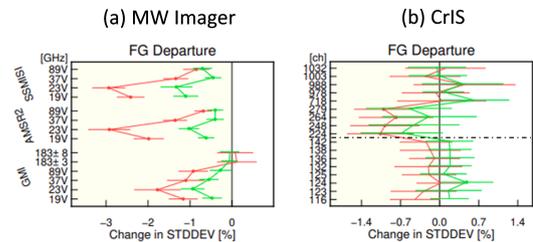


図 4.5.4 メソ解析における、観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差の、TESTのCNTLに対する変化率[%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。(a)マイクロ波イメージャGMI、AMSR2、SSMIS、(b)ハイパースペクトル赤外サウンダCrIS。CrISは上から9チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。標準偏差の図のエラーバーは95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合(改善)している場合、0線より左側にプロットされる。

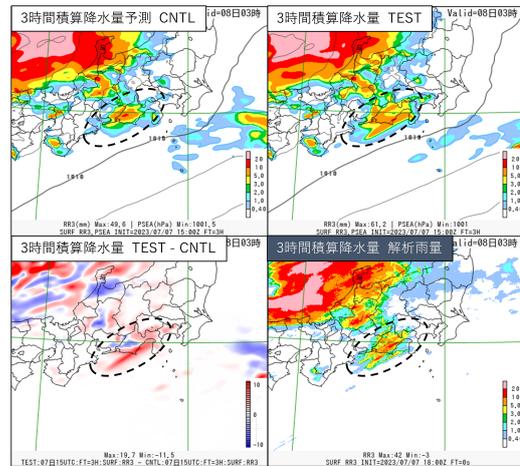


図 4.5.5 メソ予報における前3時間降水量の改善事例。2023年7月7日15UTCを初期値とした3時間後の予測(7月7日18UTC)。左上: CNTL、右上: TEST、左下: TESTとCNTLの差、右下: 解析雨量。

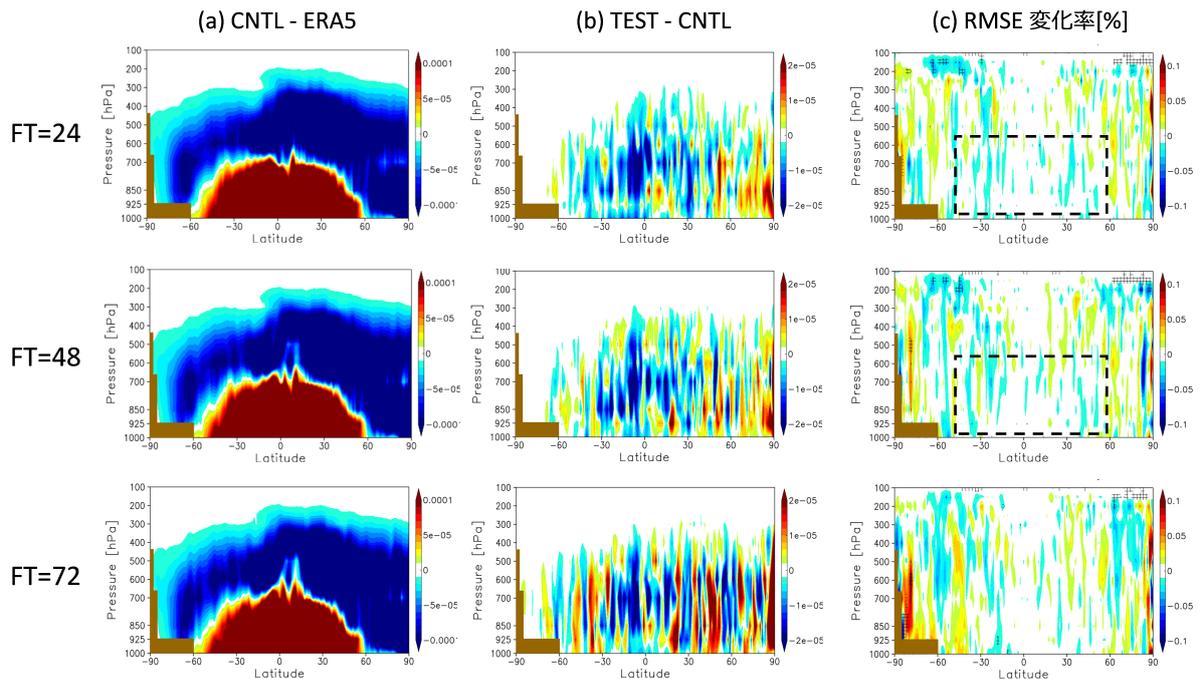


図 4.5.6 全球予報における、24 時間後 (上段)、48 時間後 (中段)、72 時間後 (下段) の比湿予測値の検証結果。夏期間の結果を示す。(a)CNTL の ERA5 からの差分の平均値 [kg/kg]、(b)TEST の CNTL に対する差分の平均値 [kg/kg]、(c)ERA5 を参照値とした TEST の CNTL に対する RMSE の変化率 [%]。(c)RMSE の変化率は、寒色系は改善、暖色系は改善を示す。

率および見逃し率の減少が見られた。冬期間に関しては概ね中立であった。

#### (6) まとめと今後

AMSU-A および ATMS に搭載されている窓チャンネルの輝度温度データを、全球、メソ、局地の各数値予報システムで新規利用するための調査を行った。実験結果から、予報初期における下層水蒸気場の予測精度が改善し、メソ、局地モデルでは比較的弱い降水域の予測精度が改善することが確認できた。

マイクロ波気温サウンダの利用に関する今後の課題としては、観測誤差設定の最適化や、全天同化 (晴天域だけでなく、雲域および降水域も含めた輝度温度データの同化利用) への移行などが挙げられる。マイクロ波気温サウンダから得られる情報は予測精度に与える改善インパクト (FSOI) が大きい (気象庁 2023c)、これらの情報をさらに適切に解析値に反映できるように開発を進めることが重要である。また、メソおよび局地解析では ATMS の気温チャンネルが未利用であるため (気象庁 2023a)、バイアス補正にみられる課題への対処や、RTTOV 係数の更新 (第 4.5.2 項) による効果の確認など、利用に向けた調査に引き続き取り組む予定である。

### 4.5.4 全球解析における静止衛星全天放射輝度温度 (ASR) の利用

#### (1) 概要

気象庁では「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」で目標に掲げられた豪雨防災と台風の予測精度向上に向けて、数値予報システムの改良を進めている。その一環として、精度の高い初期値作成のため、衛星による輝度温度データの利用高度化に取り組んでおり、雲や降水の影響を受けた観測データの利用の開発を進めている。本項では、全球解析において来年度の現業化を目標に進めている、静止気象衛星ひまわりに搭載された AHI の全天放射輝度温度 (ASR) の利用に向けた開発について述べる。

#### (2) 全天同化の開発状況と赤外放射での課題

衛星観測は現代の数値予報システムにおいて不可欠である。従来型観測は、陸上や航空路などまばらな地域での観測であるのに対し、衛星観測は、海洋上を含む全球的なカバレッジを有するため、予報精度の維持に大きく貢献している。

衛星放射観測のデータ同化の歴史を振り返ると、雲がない領域 (晴天域) のみの観測 (CSR: Clear Sky Radiance) に限定された同化が主流であった。これは雲が存在すると、雲の影響によって観測される放射輝度が複雑な特性を示し、モデルや観測演算子のバイアスや不確か性が増すことから同化が困難であったためである。しかし近年では、マイクロ波領域において雲や降水の

影響を受けた領域も含めて利用する全天同化の技術が確立され (Bauer et al. 2010; Geer and Bauer 2011)、気象庁を含めた世界の数値予報センターで現業利用されている。

一方、赤外領域での全天同化 (赤外 ASR) は依然として困難な課題である。赤外放射は雲物理やエアロゾル、地表面特性に敏感で、その放射伝達を正確にモデル化することは容易ではない (Geer 2019; Bormann et al. 2016)。また、雲や降水下での赤外観測は非線形性や誤差の非ガウス性が顕著であり、観測誤差共分散行列への非対角成分導入や品質管理 (QC) 強化など、いままで以上に高度な技術が必要となる。

現業数値予報センターの取り組みとしては、欧州中期予報センター (ECMWF) が IASI や CrIS などの先進的な赤外サウンダ観測を雲条件下で同化する試みを行ってきた (Bormann et al. 2016)。これらの研究は予報精度向上の可能性を示唆する一方、QC、放射伝達モデルの改良、雲のパラメタリゼーション、バイアス補正、計算コスト、さらには誤差モデルの高度化など、多くの技術的障壁が残されていることも明らかにしている。

気象研究所では赤外領域での ASR 同化手法の開発が進められており (Okamoto et al. 2023)、気象庁数値予報開発センターではその成果を受け、研究を現業システムへ組み込むべく、開発と検証を進めている。

### (3) 赤外 ASR の利用方法

ASR では、同化可能な観測数は従来の CSR の 2~3 倍程度に増加し (図 4.5.7)、熱帯域の水蒸気場を中心に予報の改善が期待される。

放射伝達計算には、引き続き欧州の NWP SAF が開発する RTTOV を用いる。RTTOV には雲粒子・降水粒子の散乱効果を考慮する機能が実装されており、これを活用することで雲条件下での放射をより適切に表現する。気象庁は RTTOV のバージョンを 10 から 13 へ更新を進めており (第 4.5.2 項参照) 赤外 ASR では 13 を使用する。これにより、雲域での放射計算を以前よりも精緻に行うことが可能になった。開発対象のバンドは CSR で使用実績のあるバンド 8, 9, 10 とする。

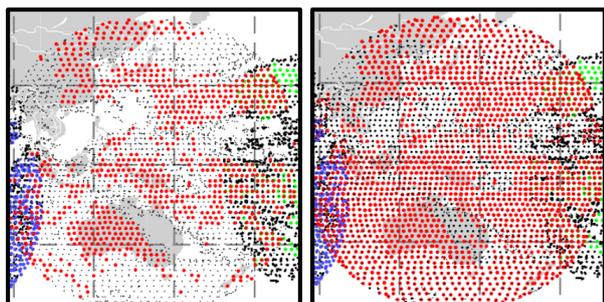


図 4.5.7 CSR(左図赤点)と ASR(右図赤点)で同化利用するひまわりの観測地点数の違い

ASR 同化では、観測とモデルの残差 (O-B) の分布が非対称的かつ外れ値を含みやすく、品質管理 (QC) の強化が不可欠である。対流圏や薄い上層雲下での観測除外などの QC を導入する。

さらに、雲や降水の影響下ではチャンネル間誤差相関が顕著になるため、観測誤差共分散行列の非対角項を考慮する必要がある (Geer et al. 2019; Weston et al. 2014)。このとき雲の影響に応じたパラメタリゼーションを導入し、観測誤差を層別化することで、実情に即した誤差モデルを構築する (Okamoto et al. 2023)。完全な誤差のモデリングは依然困難であり、現時点では誤差のインフレーションや使用チャンネルを限定するなど、現実的な対策を講じている。

### (4) まとめと今後

赤外 ASR の同化は先行研究から予報精度向上効果が期待される一方、モデル水平分解能の変更に伴う誤差特性の変化、長期的な安定性検証など、実運用への導入には様々な検証と最適化が求められる。また、エアロゾルや雲微物理の変更への対応、非ガウスの観測誤差分布への対処など、困難な課題も山積している。

2025 年度はひまわり衛星観測における赤外 ASR の導入を目指している。その後は GOES や Meteosat など、他の気象衛星のデータにも順次適用する計画を進めている。また、ハイパーサウンダの水蒸気チャンネルへ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報精度向上を目指している。

## 4.5.5 全球解析における CO<sub>2</sub> バンドの晴天放射輝度温度 (CSR) の利用

### (1) 概要

晴天放射輝度温度 (CSR: Clear Sky Radiance) とは、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。現在、全球解析、メソ解析及び局地解析では水蒸気バンドの CSR が現業利用されており、主に対流圏中上層の水蒸気場等の解析値と予測値の精度向上に貢献している (Kazumori 2018; 岡部 2019; 気象庁 2021b)。

CO<sub>2</sub> バンド<sup>4</sup>の CSR (以降、CO<sub>2</sub> バンド) は対流圏下層の気温や水蒸気に感度を持つため、CO<sub>2</sub> バンドから大気の情報適切に取り出すことで解析値や予測値の対流圏下層での精度向上が期待される。これまで全球解析における CO<sub>2</sub> バンドの同化利用に向けた開発が気象研究所で行われ (岡部・岡本 2020; 岡部ほか 2022; Okabe and Okamoto 2023)、熱帯から夏半球で解析値と予測値の精度が改善することが確認されている。

本項では、気象研究所での開発成果を受けて実施した、最新の現業数値予報システムにおける静止気象衛

<sup>4</sup> 中心波長 13 $\mu$ m 付近の二酸化炭素の吸収帯を含むバンド。雲頂高度及び有効雲量の推定等に活用されており (Menzel et al. 2008)、Himawari ではバンド 16 に搭載されている。

表 4.5.2 現在同化利用している水蒸気バンドと CO2 バンドの品質管理 (QC) の内容。

| 同化バンドの中心波長                    | 水蒸気バンド        |                                    |               | CO2 バンド                       |
|-------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------|
|                               | 約 6.2 $\mu$ m | 約 7.0 $\mu$ m<br>(Meteosat には搭載なし) | 約 7.3 $\mu$ m | 約 13.3 $\mu$ m                |
| 同化バンドの晴天率                     | 90%以上         |                                    |               | 90%以上                         |
| 同化バンドの輝度温度標準偏差                | 1.0K 以下       |                                    |               | 1.0K 以下<br>Meteosat は 0.5K 以下 |
| 同化バンドのグロスエラーチェック              | 3.0K 以下       |                                    |               | 3.0K 以下                       |
| 窓バンドの晴天率<br>(Meteosat では適用なし) | 55%以上         | 60%以上                              | 65%以上         | 65%以上                         |

星 (Himawari, GOES, Meteosat) の CO2 バンドの同化利用に関する開発状況について述べる。

## (2) 品質管理手法

CO2 バンドは大気透過率が比較的高く地表面の影響を受けやすい。そのため、地表面射出率や地表面温度の誤差に起因して誤ったインクリメントを与える可能性がある。特に地表面温度の誤差が地表面射出率の誤差よりも計算輝度温度の誤差への寄与が大きくなる (Okabe and Okamoto 2023)、CO2 バンドの計算輝度温度を求めるには精度の良い地表面温度を用いる必要がある。岡部 (2020) では、窓バンド<sup>5</sup>から地表面温度をリトリブすることで第一推定値よりも高精度な地表面温度として利用できることが示され、本開発においても CO2 バンドの輝度温度計算では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。

雲域が混入した CSR を同化すると、初期値の精度が悪化する要因となる。そのため、現在同化利用している水蒸気バンドでは主に雲域が混入した観測データを取り除く品質管理 (QC) として、同化バンドの晴天率チェック、窓バンドの晴天率チェック、輝度温度の標準偏差チェック、及びグロスエラーチェック (観測値と第一推定値の差 (O-B) が 3K 以下) を行っている (表 4.5.2)。CO2 バンドに対しても水蒸気バンドと同様の QC を適用し、雲域が混入した観測データを取り除く。ただし、Meteosat は、プロダクトの仕様の都合上、窓バンドの晴天率を使用した QC は適用できないため、代わりに輝度温度の標準偏差チェックの閾値を Himawari や GOES の 1.0K から 0.5K とより厳しく設定した。

## (3) 同化実験

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) に対する、CO2 バンド<sup>6</sup> を新規に同化利

用した実験 (TEST) の検証結果を示す。実験の評価期間は、夏季については 2023 年 8 月、冬季については 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の確認として、CNTL 実験からの O-B の標準偏差の変化を確認した (図 4.5.8)。CO2 バンドを利用することで、CO2 バンドが感度を持つ高度に対応し、対流圏の水蒸気に感度のある MHS や ATMS、CrIS の水蒸気チャンネルで標準偏差が小さくなった他、ラジオゾンデ観測で相対湿度の標準偏差が対流圏下層で小さくなった。第一推定値として用いた短期予測 (3~9 時間) について、特に水蒸気の精度が改善したことを示唆する結果が得られた。

平均解析場は、特に気温と水蒸気で熱帯を中心に、陸上で気温が上昇する場で水蒸気が減少し、反対に気温が低下する場では水蒸気が増加するように変化が見られた (図 4.5.9)。これらは、複数の海外数値予報センターの解析値との差異を概ね解消する方向へ変化しており (図略)、変化の方向としては妥当であると考えられる。冬期間の平均解析場についても同様な結果が得られた (図略)。

第一推定値と整合性向上が顕著に見られた MHS チャンネル 5 について、観測値と解析値の差 (O-A) の CNTL、及び CNTL と TEST の差を水平分布で確認したところ (図 4.5.10)、夏期間ではアフリカ北部や南アメリカで、元々のバイアスが解消する方向に変化していた。CO2 バンドを加えることにより、熱帯から夏半球の陸上を中心に精度が向上したことを示唆しており、前述の平均解析場の改善の結果とも整合的であった。冬期間ではアフリカ南部やオーストラリアで、バイアスが解消する変化が見られ、同様に精度が向上したと考える (図略)。

予測値について、海外数値予報センターの解析値を参照値とした検証を行った。緯度別平均した予報の改善率について、夏期間では北緯 30 度付近、冬期間では

<sup>5</sup> 中心波長 10~11 $\mu$ m の大気透過率の高いバンド。

<sup>6</sup> Himawari-9/AHI, GOES-16,-18/ABI, Meteosat-9,-10/SEVIRI に搭載された CO2 バンドを利用する。

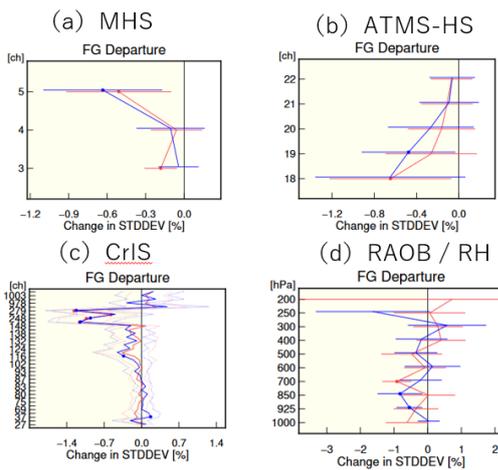


図 4.5.8 全球解析における、O-B の標準偏差の変化率 [%]。TEST の CNTL に対する変化率で、赤線は夏期間、青線は冬期間を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ、(b) マイクロ波サウンダ (水蒸気チャンネル)、(c) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS、(d) ラジオゾンデ (相対湿度)。縦軸はチャンネル番号、ラジオゾンデの場合は気圧高度 [hPa]。CrIS は上から 9 チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合 (改善) している場合、0 線より左側にプロットされる。

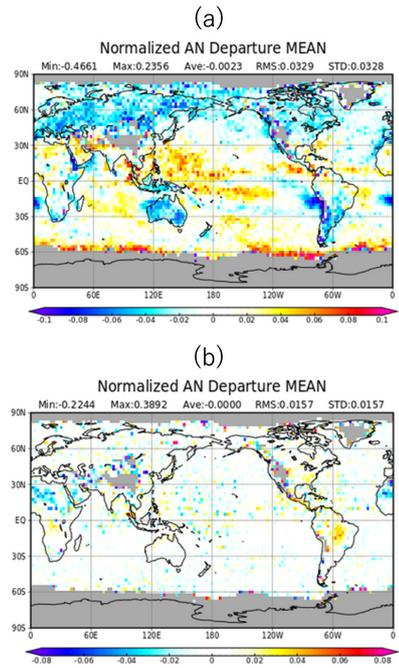


図 4.5.10 マイクロ波水蒸気サウンダ MHS チャンネル 5 の (a) 平均 O-A (CNTL) と (b) 変化 (TEST-CNTL)。夏期間。単位は K。

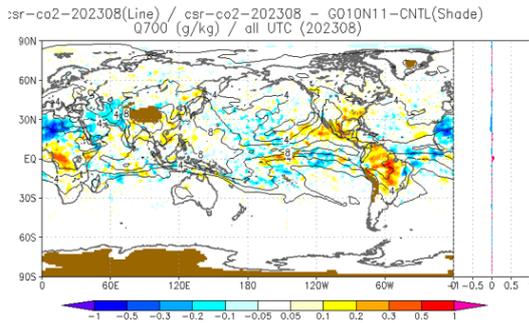


図 4.5.9 700hPa の比湿における平均解析場の変化 (TEST-CNTL)。夏期間。単位は g/kg。

南緯 30 度付近を中心に、それぞれ気温と水蒸気の予測精度に改善が見られた (図 4.5.11)。前述の陸上を中心とした解析値や第一推定値の精度向上に対応し、予測値の精度も向上していることが確認できた。

#### (4) まとめと今後

CO2 バンドの追加利用によって、熱帯から夏半球の対流圏下層で解析値と予測値の精度向上が確認できた。これまでの調査と同様の結果が、最新の数値予報システムを用いた実験においても得られたことから、2025 年度の全球解析における現業化を進める予定である。

今後の展望として、CO2 バンドのメソ解析や局地解析での利用が挙げられる。気象研究所では、メソ解析での利用に向けた開発を進めており、品質管理 (QC) の改良や同化実験による予測精度の評価が行われている。

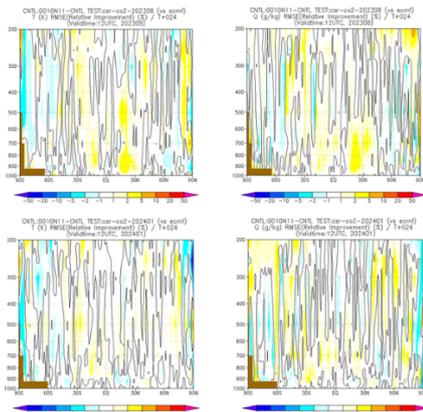


図 4.5.11 対 ECMWF 解析値検証における 24 時間予測値の改善率 [%] の緯度別鉛直分布。ECMWF の解析値を参照値とした二乗平均平方根誤差について、(CNTL-TEST)/CNTL を改善率とした。正の値 (暖色) は改善、負の値 (寒色) は改善を意味する。左から順に気温、比湿。上段は夏期間、下段は冬期間。縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度。黒曲線は、ゼロ値の等値線。茶色の部分はデータの無い南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。

### 4.5.6 全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの利用高度化

#### (1) 概要

マイクロ波水蒸気サウンダは、183GHz 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。全球解析においては、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)。

全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの利用

手法の改良として、動的射出率推定手法を利用した地表面に感度のあるデータの利用および、平滑化した水蒸気サウンダの同化利用の開発を行っている。本項ではその開発状況について述べる。

## (2) 動的射出率推定手法を利用した地表面に感度のあるデータの利用

### (2.1) はじめに

マイクロ波水蒸気サウンダは観測地点の水蒸気量が少ない場合、大気の透過率が高くなり、地表面への感度が高くなる。そのため地表面温度や地表面射出率の設定が計算精度に大きく影響する。現在、海上では比較的精度が良い地表面射出率モデルである FASTEM-5(Bormann et al. 2012) を使用している。一方、陸上では気候値である CNRM Atlas(Karbou et al. 2006, 2010) もしくは一定値を使用しているが、マイクロ波は地表面射出率が地表面の状態に強く依存するため、気候値もしくは一定値では同化に十分な精度が得られない。また海上では利用できる気候値データセットもないため、便宜的な一定値(0.9)を設定している。このような状況から、可降水量が5mm未満の場所では地表面射出率の精度が低い陸上や海上では同化利用しないようにしており(気象庁 2022)、この品質管理(QC)によって冬季ユーラシア大陸や海上では観測データの利用率が低い現状がある。

陸上や海上上の射出率を比較的精度良く得る方法として動的射出率推定手法(DE: Dynamic Emissivity)の有効性が先行研究により示されている(Karbou et al. 2006; Baordo and Geer 2016)。当庁においても同様の手法を取り入れ、地表面に感度のある状況下における水蒸気サウンダデータの利用可能性を調査した。

### (2.2) 変更点について

陸上では89GHz、海上上では165GHzの観測輝度温度からDEにより射出率を計算し、183GHzの射出率として利用することとした。射出率の周波数依存性を考慮すると165GHzの射出率を利用するのが適切だが、165GHzは水蒸気量が多いときは水蒸気の連続吸収の効果によって地表面の影響が小さくなり、射出率推定に適さなくなる。そのため乾燥していることが多い海上上では165GHzを利用し、陸上では水蒸気量が多い場合でも地表面への感度が比較的大きい89GHzを利用することとした。また今回導入したDEには雲の影響や地表面温度に伴う誤差が混入するため、DEで求めた射出率が現実的な値の範囲内(0.55~1)であることを、陸上では気候値との差が0.15より小さいことをチェックし、条件を満たさない場合は気候値を採用するQCを導入した。この閾値には、晴天域データだけを抽出した時のDEと気候値の差の標準の3倍を用いている。GMI、SSMIS、MWHS-2ではCNRM Atlasが利用できないため、気候値としてTELSEM2 Atlas(Wang et al. 2017)を利用することとした。これらの処理の考

え方についてはBaordo and Geer (2016)に準拠し、当庁のシステムでの調査に基づいて閾値を設定した。

これまで地表面に感度のある場合では、海上上で観測値と第一推定値の差(O-B)が負バイアス、ユーラシア大陸北部では正バイアスとなっていたところ、DEを利用することでバイアスを軽減することが確認できたため、可降水量が5mmより小さい場合もデータを利用するように変更した。しかしながら透過率が高い場合は依然としてO-Bのバイアスや標準偏差が大きいため、データの利用は透過率が0.4より低い場合に限定することとした。

### (2.3) 動的射出率推定手法を利用した地表面に感度のあるデータの同化実験

2022年の現業全球数値予報システム相当の実験をCNTLとし、本変更を加えた実験をTESTとする数値予報実験を実施した。本変更は特に冬季にデータ利用分布が変化するため、実験期間は2021年12月10日から2022年2月11日とし、2022年1月の検証を実施した。本実験では水蒸気サウンダATMSとSSMISにDEの導入とQCの変更を適用した。

今回の変更とは独立な観測値において、第一推定値との整合性の変化を確認したところ、マイクロ波気温サウンダAMSU-A、晴天放射輝度CSR、ラジオゾンデ相対湿度においてO-Bの標準偏差がCNTLよりも概ね小さくなっていった(図4.5.12)。これは第一推定値の気温場や水蒸気場が改善したことを示す結果である。また、AMSU-A/ch6、Himawari-CSR/ch3、850hPaのラジオゾンデ相対湿度ではユーラシア大陸や北極などの海水域を中心にO-Bのバイアスを解消する方向に変化していることが確認できた(図4.5.13)。これは北極周辺のモデルの高温バイアス、ユーラシア大陸上のモデルの乾燥バイアスを解消する方向へ変化したことを示す結果である。ECMWF解析値を用いた予測精度の検証では、特にユーラシア大陸や北極の海水周辺において水蒸気場がECMWF解析値に近づく変化をしたことが確認できた。

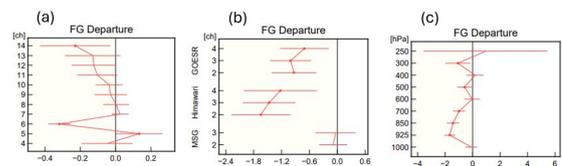


図 4.5.12 観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差の、TESTのCNTLに対する変化率[%]。(a)はマイクロ波気温サウンダAMSU-A、(b)は晴天放射輝度CSR、(c)はラジオゾンデ相対湿度について示す。縦軸はチャンネル番号または気圧高度。標準偏差の図のエラーバーは95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

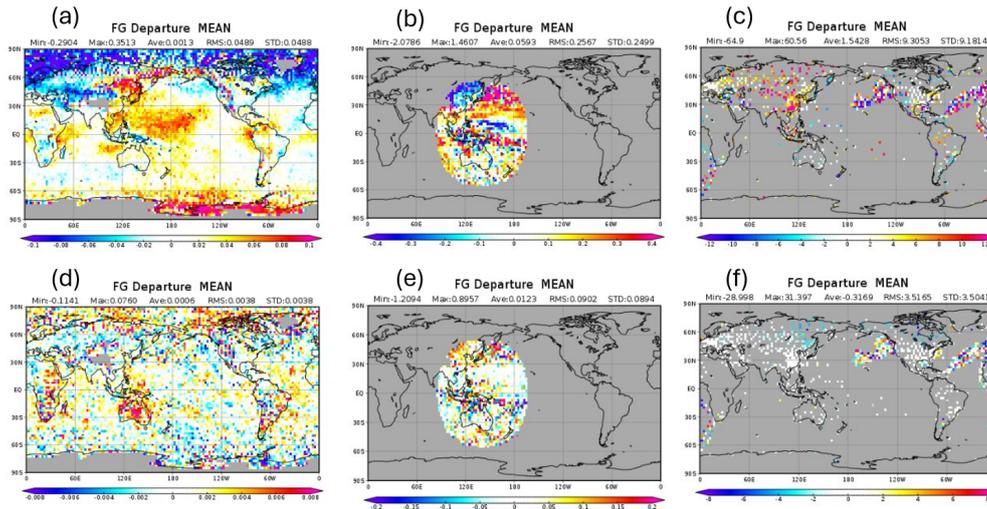


図 4.5.13 (a),(b),(c) は CNTL における観測値と第一推定値との差 (O-B) の実験期間平均。(d),(e),(f) は O-B の実験期間平均の TEST-CNTL の結果。(a),(d) はマイクロ波気温サウンダ AMSU-A/ch6、(b),(e) は晴天放射輝度 Himawari-CSR/ch3、(c),(f) は 850hPa ラジオゾンデ相対湿度について示す。

### (3) 平滑化した水蒸気サウンダの同化利用

#### (3.1) はじめに

水蒸気サウンダの観測データは QC での間引きによって、入電しているデータの 1% 程度のみを同化利用している。これはデータ同化において観測誤差の水平相関を考慮していないために水平相関が無視できる程度に間引く必要があること、計算機資源を節約することが理由である。もう一つの課題として、水蒸気サウンダの観測データは全天同化を行っているが、実際にはモデルと観測で雲の表現の乖離が大きいため、雲の影響を受けたデータの多くは QC で取り除いて利用しているという現状がある。この雲表現の乖離の原因の一つとして、代表性誤差に起因するものが考えられる。同じ全天同化をしているマイクロ波イメージャでは、代表性誤差の減少を狙って、全球モデルのインターモデル格子 (約 55km) に平滑化した輝度温度を同化しているが (気象庁 2021a)、水蒸気サウンダでは平滑化していない。また、Duncan et al. (2024) は水蒸気サウンダを平滑化して同化することで水蒸気サウンダの代表性誤差を減らし、データ同化の効果を高めることを示した。そこで当庁においても水蒸気サウンダに平滑化を導入し、より雲の影響を受けたデータの利用可能性を調査した。

#### (3.2) 変更点について

マイクロ波イメージャと同じ平滑化をマイクロ波水蒸気サウンダに適用した。マイクロ波水蒸気サウンダの多くはクロストラックスキャンであるため、スキャン位置に応じて観測視野の大きさやスキャン間隔が異なるが、これらに関しては今回考慮していない。

図 4.5.14 は雲の影響の指標である散乱インデックス SI (気象庁 2021a 参照) を観測値とモデル計算値の両方

で算出し、一定期間の頻度分布を描画したものである。値が大きいほど雲の影響が大きいことを示している。CNTL では観測に比べてモデルのほうが SI が大きいサンプルが少ないが、TEST ではその乖離が少なくなっていることが確認できる。このことから、平滑化によって観測とモデルの雲表現の乖離が小さくなることが確認できたため、雲に感度のあるデータをより利用できるように通常の O-B によるグロスエラーチェックではなく、観測誤差で規格化した O-B によるグロスエラーチェックに変更した。全天同化している水蒸気サウンダでは観測誤差が雲の影響に応じて大きくなるように設定しているため、雲の影響が大きくなるとグロスエラーチェックの閾値も大きくなり、観測とモデル間の雲の位置ずれによる大きな O-B のデータも許容するようになる変更である (マイクロ波イメージャでは既に導入済み)。ただし完全に乖離がなくなったわけではないため、観測とモデルの SI が 25 未満のデータのみを利用することにした。

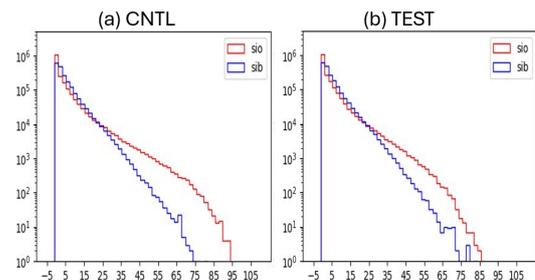


図 4.5.14 観測の SI (赤線) およびモデルの SI (青線) のヒストグラム。(a) は CNTL、(b) は TEST の結果を示す。

### (3.3) 平滑化した水蒸気サウンダの同化実験

平滑化した水蒸気サウンダデータの同化インパクトを調査するために、2023年3月時点の現業全球数値予報システム相当(CNTL)をベースに、利用している水蒸気サウンダ全て(ATMS、MWHS-2、MHS、GMI、SSMIS)に平滑化を適用した実験(TEST)を実施した。また、より雲の影響を受けたデータの利用に関するQC変更の効果を確かめるために、平滑化無しでQCのみを変更した実験(CNTL-CL)、平滑化した上でQCの変更も行った実験(TEST-CL)も実施した。実験期間は2023年6月10日～8月11日とし、7月の検証を実施した。

CNTLに対してTESTでは、CSRにおいてO-B標準偏差が減少傾向であった(図4.5.15(a))。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、ECMWFの再解析データであるERA5を比較対象とした検証では解析値における水蒸気混合比のRMSEが改善しており、水蒸気場の改善を示唆する結果であった(図4.5.15(b))。改善の効果はわずかであるものの、平滑化により同化利用する観測データの数を増やすことなく、効率良く観測データの持つ情報を引き出せるようになったと考えられる。なお、平滑化により水蒸気サウンダの代表性誤差が小さくなり、O-B標準偏差が小さくなったため、設定する観測誤差を小さくできる余地があっ

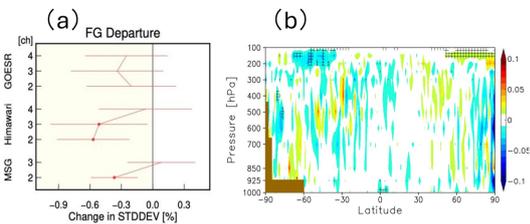


図 4.5.15 (a) 晴天放射輝度 CSR の観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差のTESTのCNTLに対する変化率。(b)ERA5を参照値とした解析値における水蒸気混合比の帯状平均のRMSE改善率。寒色は予測精度の改善、暖色は悪化を示す。網掛けは信頼区間95%で有意であることを示す。

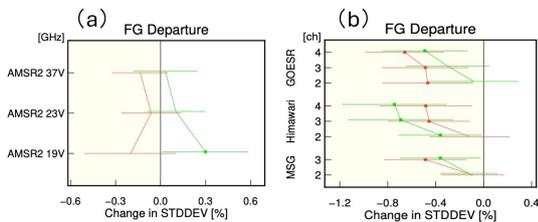


図 4.5.16 観測値と第一推定値との差(O-B)の標準偏差のCNTL-CLのCNTLに対する変化率(緑線)およびTEST-CLのTESTに対する変化率(赤線)。(a)はマイクロ波イメージャAMSR2、(b)は晴天放射輝度CSRについて示す。縦軸はチャンネル番号または周波数。標準偏差の図のエラーバーは95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

たが、平滑化の効果を切り分けて調査するために今回は観測誤差の変更は行わなかった。

次に雲の影響を受けたデータの利用に関するQC変更の効果を確認した。CNTLに対してCNTL-CLではAMSR2においてO-B標準偏差が大きくなっており、第一推定値の下層水蒸気場の悪化を示す結果であった。一方で、TESTに対してTEST-CLではAMSR2におけるO-B標準偏差に大きな変化は見られず、第一推定値の下層水蒸気場について中立を示す結果であった。また、CSRについては平滑化の有無に関わらずO-B標準偏差が減少しており、雲に感度のあるデータを増やしたことで第一推定値の中上層の水蒸気場が改善したことを示す結果となった(図4.5.16)。ERA5を用いた検証では、CNTLに対してCNTL-CLでは解析値における熱帯付近の500~200hPa高度場が悪化していたが、TESTに対してTEST-CLでは悪化が解消しており概ね中立であった(図4.5.17)。またラジオゾンデを用いた北半球の500hPa高度場の検証では、CNTLに対してCNTL-CLでは中立から若干の悪化であった一方、TESTに対してTEST-CLでは中立から改善の結果となった(図4.5.18)。以上から、平滑化による代表性誤差の減少及びQCの変更によって、より多くの雲の影響を受けたデータを利用できるようになることを確認できた。

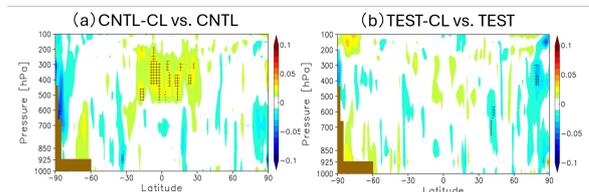


図 4.5.17 ERA5を参照値とした解析値におけるジオポテンシャル高度の帯状平均のRMSE改善率。寒色は予測精度の改善、暖色は悪化を示す。網掛けは信頼区間95%で有意であることを示す。(a)はCNTLに対するCNTL-CLの改善率、(b)はTESTに対するTEST-CLの改善率を示す。

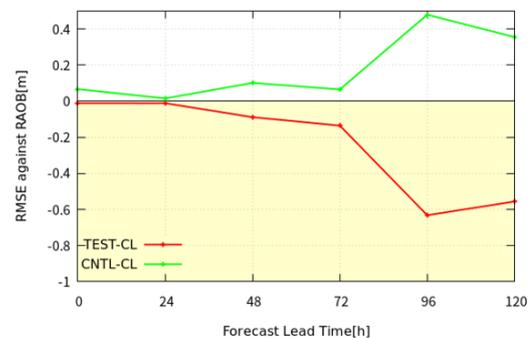


図 4.5.18 ラジオゾンデ観測を参照値とした北半球500hPa高度のRMSE変化。0より下でRMSEが減少し改善したことを示す。緑線は(CNTL-CL)-(CNTL)、赤線は(TEST-CL)-(TEST)の結果を示す。

#### (4) まとめと今後

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として開発している、動的射出率推定手法を利用した地表面に感度のあるデータの利用および、平滑化した水蒸気サウンダの同化利用についてそれぞれの性能評価を行った。

動的射出率推定手法を利用することで、これまでデータを利用できていなかった冬季ユーラシア大陸上や海水上においても観測データが利用できるようになり、当該領域において下層水蒸気場が改善する結果が得られた。

平滑化した水蒸気サウンダの同化は水蒸気場の予測精度改善に寄与した。また平滑化することで、観測とモデルの雲表現の乖離が小さくなり、雲に感度のあるデータを利用した際に見られていた下層水蒸気場や高度場の悪化が解消し、中上層の水蒸気場の改善のみが得られるようになった。

今後、現実化に向けて両者を合わせた実験を実施し、平滑化した状態での動的射出率推定手法の有効性を調査する予定である。

#### 4.5.7 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

2029 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(Geostationary HiMawari Sounder) 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。

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、技術開発を進めている。本項ではその開発状況について報告する。

##### (2) 開発方針

気象庁では、赤外サウンダの利用技術開発のため、ひまわり 10 号が東経 140 度の静止軌道から GHMS による観測を行った場合を想定した模擬観測データを作成した。模擬観測データは ECMWF の再解析データである ERA5 を入力し、放射伝達モデル RTTOV で輝度温度を計算して作成されている。数値予報開発センターでは、この模擬観測データを用いて、観測システムシミュレーション実験 (OSSE: Observation System Simulation Experiment, 石橋 2013) を実施することとした。

ひまわり 10 号搭載赤外サウンダによる予測精度改善効果の検証を目的とした OSSE は岡本ほか (2020) で既に実施済みであるが、本調査では、GHMS の現業利用に向けた衛星データ同化システムの高度化を目的とし

て OSSE を再度実施する。OSSE によって得られる解析値および予測値を、模擬観測データ作成時に真値とみなした ERA5 と比較することによって、観測データの情報をより適切に解析値に反映できるような QC および同化処理の設定を精査することが主な狙いである。

岡本ほか (2020) との実験設定の違いは、模擬観測データに対しても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じ設定で QC 処理を行う点<sup>7</sup>、全球解析だけでなく、メソ、局地解析においても輝度温度データを晴天域で直接同化する点<sup>8</sup>などが挙げられる。

本調査で用いた模擬観測データの具体仕様については、上述の別所ほか (2024) を参照されたい。

##### (3) 開発進捗

OSSE を構築するにあたって、まずは同化利用するチャンネルを選択した。気温、水蒸気、オゾンおよびその他の大気分子への鉛直方向の感度を示すヤコビアンや、チャンネルの持つ情報の自由度 (DFS: Degree of Freedom for Signal, Cardinali et al. 2004) を参照し、Collard (2007) の手法で気温または水蒸気に感度のあるチャンネルを合計 86 個選択した。同化システムに与える観測誤差は、観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差や極軌道衛星搭載の赤外サウンダでの現在の設定値をもとに決定した。

その後、2024 年 7 月の現業全球数値予報システムに対して OSSE を実施した。実験期間は 2021 年 7 月 10 日から 9 月 11 日の 2ヶ月間とした。以降では、ルーチン相当の実験 (CNTL) に対する OSSE の検証結果を示す。

予測精度について、CNTL および模擬観測データの入力元である ERA5 のいずれからも独立していると考えられる NCEP の全球数値予報モデル GFS の予報初期値を参照値とした検証結果では、少なくとも 3 日先までの予測において、低中緯度域の気温場や水蒸気場の予測精度が改善することが確認できた (図 4.5.19)。

GHMS の模擬観測データに含まれる情報が解析値および予測値に与えた影響を詳細に調査するため、ERA5 を参照値とした検証を行ったところ、OSSE では多くの領域で GSM と ERA5 の差を打ち消す方向に解析値および予測値が変化していることが確認できた (図 4.5.20)。一方で、南半球の低中緯度域では、GSM と ERA5 の差が拡大する方向に解析値が変化している領域が見られた (同図の破線枠内)。

この領域について詳しく調べたところ、低層雲が存在する観測シーンにおいて、CO2 Slicing 法による晴

<sup>7</sup> 岡本ほか (2020) では、雲がないと仮定して計算した晴天の輝度温度観測値 (現実の同化処理においては得られない) を、晴天判定処理や同化に用いている。

<sup>8</sup> 岡本ほか (2020) では、メソ解析では ERA5 の気温および水蒸気の鉛直プロファイルを同化している。局地解析では OSSE を実施していない。

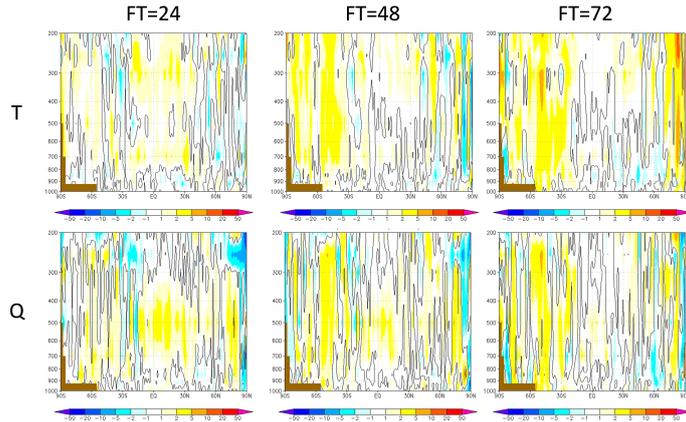


図 4.5.19 全球予報における NCEP/GFS 解析値を参照値とした OSSE の CNTL に対する RMSE 改善率。上段が気温 [K]、下段が比湿 [kg/kg] の改善率で、左から順に、24 時間予測、48 時間予測、72 時間予測を示す。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°]。暖色系は改善、寒色系は改善を示す。

天域判定 (亀川・計盛 2017) で対流圏下層に感度のあるチャンネルが棄却され、対流圏中上層に感度のあるチャンネルのみが同化された結果、対流圏下層に関する情報が中上層に比べて不足し、中上層での解析インクリメントが下層にまで影響している可能性があることが分かった。この問題への対処として、CO<sub>2</sub> Slicing 法で設定しているパラメータを再設定することで、下層の解析値への影響を軽減できることを確認している。中長期的な対処案としては、雲域での赤外サウンダデータの取り扱いを高度化し、対流圏下層に感度のあるチャンネルを含めより多くのデータを同化利用することなどが挙げられる。

また、メソ数値予報システムにおいても OSSE を実施した。実験構築にあたっては、気象庁 (2024a) に倣って、メソモデルのモデル上端高度 (約 5hPa) より上層に感度のある GHMS のチャンネルを除いて、気温または水蒸気に感度のある計 55 チャンネルを選択した (図 4.5.21)。実験結果については現在確認中である。

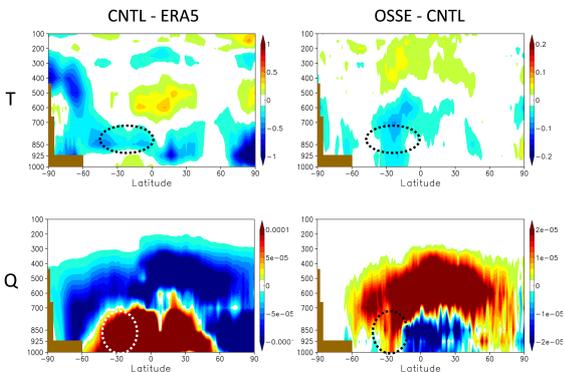


図 4.5.20 全球予報における予報初期値と ERA5 の比較。上段が気温 [K]、下段が比湿 [kg/kg] で、左図は CNTL と ERA5 の差分、右図は OSSE と CNTL の差分を示す。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°]。

#### (4) まとめと今後

赤外サウンダの利用技術開発のために整備された GHMS の模擬観測データを用いて、全球数値予報システムにおいて OSSE を実施した。実験結果から、雲域での赤外サウンダデータの取り扱いに改良の余地があることが示唆され、課題への対処に取り組んでいる。メソおよび局地数値予報システムにおいては、各システムの特徴を踏まえた OSSE の実施と検証を今後予定している。

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 年打ち上げ予定の欧州の静止気象衛星 MTG-S1 搭載の赤外サウンダ IRS の観測データを用いた調査も実施予定である。模擬観測データでは観測器の雑音特性等が考慮されていないため、これら実観測データを用いた調査も重要である。

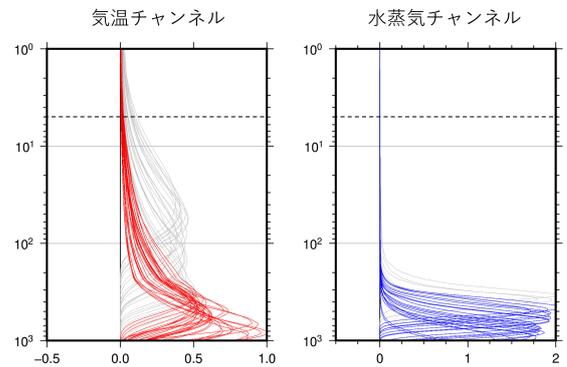


図 4.5.21 OSSE で同化利用した GHMS の各チャンネルの荷重関数。左図に気温に感度のあるチャンネル、右図に水蒸気に感度のあるチャンネルを示す。灰色線が全球解析でのみ同化利用したチャンネル、赤色線または青色線が全球およびメソ解析で同化利用したチャンネルを示す。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa] で、横点線はメソモデルの上端高度 (約 5hPa) を示す。

#### 4.5.8 全球解析における極域 AMV の利用拡充

##### (1) 極域 AMV について

大気追跡風 (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。AMV は、ひまわり 8 号・9 号をはじめ、様々な衛星の観測画像を利用して各国の衛星運用機関や研究機関で作成されており、従来型観測のように観測データが乏しい海洋上などにも多くのデータが存在するため、これらを数値予報システムに同化利用することで、広範囲に風の観測情報を取り込むことができる。

一方、極域を含む高緯度域については、ひまわり 8 号・9 号のような静止気象衛星による観測が困難であるため、NOAA や Metop といった極軌道衛星の赤外画像が AMV の算出に用いられ、単一の極軌道衛星が観測する画像であっても、極域については時間的に連続した画像の間に観測領域の重なりが存在するため、この領域で AMV を算出することができる (以下、極域 AMV)。

北極海や南極付近の上空では航空機や高層観測データが非常に少ないため、極域 AMV を GSM の初期値解析で利用することにより、対流圏内の風や気温を中心に高緯度域の解析場を改善する効果が得られ、気象庁の数値予報システムの予測精度向上に寄与している。

図 4.5.22 に、現在全球解析で現業利用している AMV の分布を示す。全球解析では、概ね 60° より低緯度では静止気象衛星の AMV、高緯度では極域 AMV を利用している。

本項では、全球解析における極域 AMV の利用拡充に向けた開発について報告する。

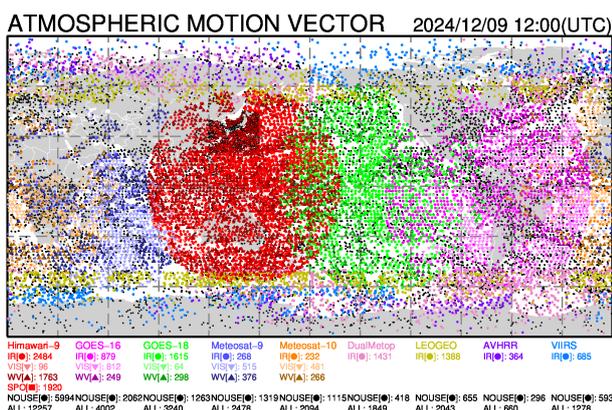


図 4.5.22 全球解析で利用している AMV の分布。

##### (2) 新規に利用する極域 AMV データ

GSM の初期値解析では、従来から Terra や Aqua に搭載された MODIS や NOAA・Metop 衛星に搭載された AVHRR の赤外画像から算出される極域 AMV を利用している (山下 2015)。最近では、2 機の Metop

衛星 (Metop-B 及び Metop-C) で得られる約 50 分間隔の AVHRR の赤外画像から算出される AMV (Dual-Metop AMV) と米国の Suomi-NPP や NOAA-20 の VIIRS の赤外画像から算出される AMV を、それぞれ 2022 年 6 月 30 日と 2023 年 3 月 14 日に極域 AMV として現業利用を開始した (Nonaka 2023; 気象庁 2024b)。

現在 GSM の初期値解析で利用している極域 AMV の衛星の中には、設計寿命を大きく超えて運用されているものがあり、米国の NOAA-15,18,19 については 2025 年 9 月までの運用とされ (2024 年 12 月現在)<sup>9</sup>、NOAA/NESDIS でこれらの衛星から算出される AMV は、2024 年 4 月に配信が終了した。また、欧州の Metop-B についても打ち上げから 10 年以上経過しており、Metop-B から算出される現在利用中の極域 AMV には、単独の Metop-B で CIMSS で作成している AMV と EUMETSAT で作成している Dual-Metop AMV があるが、これらは近い将来に利用できなくなることが予想される。このため、GSM 初期値の解析精度を維持・改善するためには、継続して新規の極域 AMV を追加・拡充しておくことが重要である。

現在、新規に利用できる極域 AMV としては、EUMETSAT より配信されている Metop-B,C/AVHRR の AMV (以下、Metop AMV) と NOAA/NESDIS より配信されている NOAA-21/VIIRS の AMV が挙げられる。Metop AMV については、2025 年 9 月の利用開始を目標に現在開発を進めているところである。NOAA-21 の AMV は、すでに全球解析で利用している Suomi-NPP や NOAA-20 の AMV と同様のアルゴリズムにより算出され、2024 年 3 月より配信されている。これについても品質を確認した上で順次利用する計画としている。

次に、Metop AMV の全球解析での利用に向けた開発状況について簡単に報告する。

##### (3) Metop AMV の利用に向けた開発状況

Metop AMV は、Metop-B,C それぞれの衛星で観測された約 100 分間隔の 2 枚の AVHRR の赤外画像を使って算出される (Hautecoeur and Borde 2017)。Metop-B と Metop-C の AMV の算出には、ともに EUMETSAT で開発された同じアルゴリズムが用いられており、配信データの品質に衛星間の差異は見られなかったことから、Metop-C だけでなく Metop-B の AMV についても同じ品質管理 (QC) を適用し、あわせて利用開始する予定である<sup>10</sup>。

Metop AMV は、図 4.5.23 に示すように、北極海や南極海付近で対流圏上層から下層まで広くデータが分布しており、これらの領域で利用する観測データの拡

<sup>9</sup> [https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/noaa\\_15](https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/noaa_15)

<sup>10</sup> 2025 年に打ち上げが計画されている Metop の後継機 (Metop-SG) が正式に運用されるまで、Metop-B は 2026 年以降も運用が継続される可能性がある。

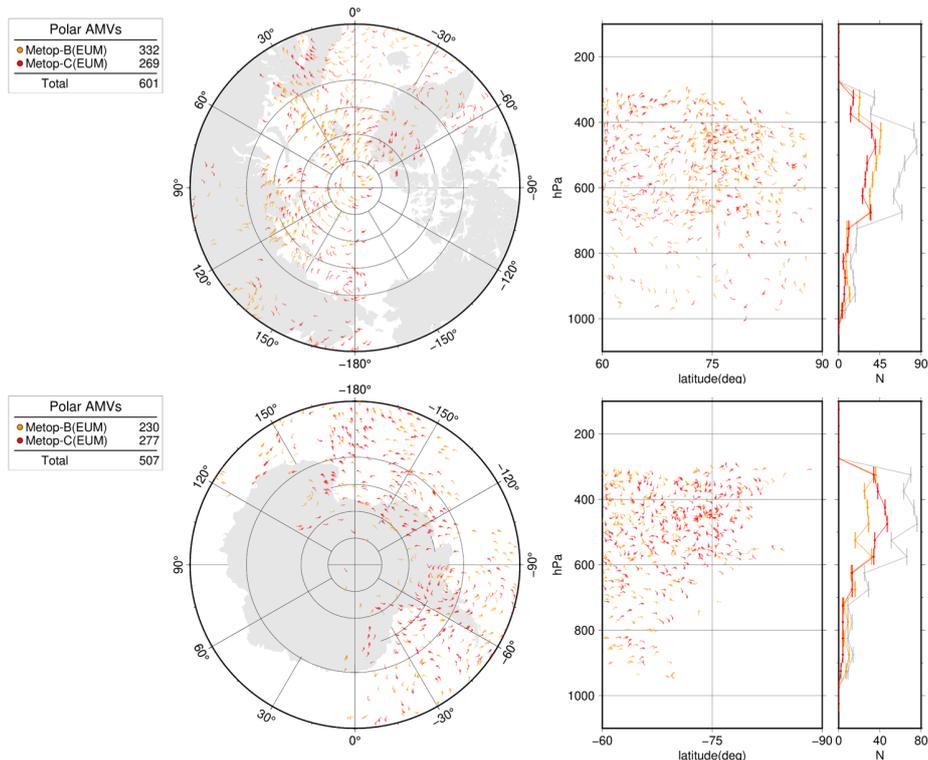


図 4.5.23 2023 年 8 月 1 日 12UTC の全球解析で利用される Metop AMV の分布。開発中の QC 及び間引き処理を適用した後のもの。橙色と赤色はそれぞれ Metop-B と Metop-C の AMV を示している。左から順に水平分布、緯度高度別の分布、高度別の頻度分布を示している。上段は 60°N 以北、下段は 60°S 以南の分布。

充が期待できる。

Metop AMV の新規利用による GSM の解析場や予測場への効果を確認するため、2023 年 3 月時点の現業全球数値予報システムを使い、全ての極域 AMV を棄却した実験をコントロール (CNTL)、CNTL に Metop AMV (Metop-B と Metop-C の両方) を追加した実験をテスト (TEST) として性能評価試験を実施した。2022 年 12 月 10 日から 2023 年 2 月 11 日までを冬実験、2023 年 6 月 10 日から 2023 年 8 月 11 日までを夏実験として解析予報サイクルを行い、それぞれ 2023 年 1 月と 2023 年 7 月を対象として 12UTC 初期値の予測について検証を行った。

図 4.5.24 は、GSM 初期値を参照値とした CNTL に対する東西風の予測値の RMSE 改善率 ( $\frac{CNTL-TEST}{CNTL} \times 100$  [%]) の東西带状平均を示している。南北の高緯度域で RMSE が減少しており、Metop AMV を利用することにより予測初期の対流圏内の風速場が改善していることがわかる。

#### (4) まとめと今後

現在全球解析で利用している極域 AMV については、衛星の運用終了などにより利用データ数の減少が予想され、利用する極域 AMV を拡充しておく必要がある。このため、EUMETSAT の配信している Metop AMV を新規利用するための開発を行っている。Metop AMV を GSM の初期値解析で利用することにより、他の極

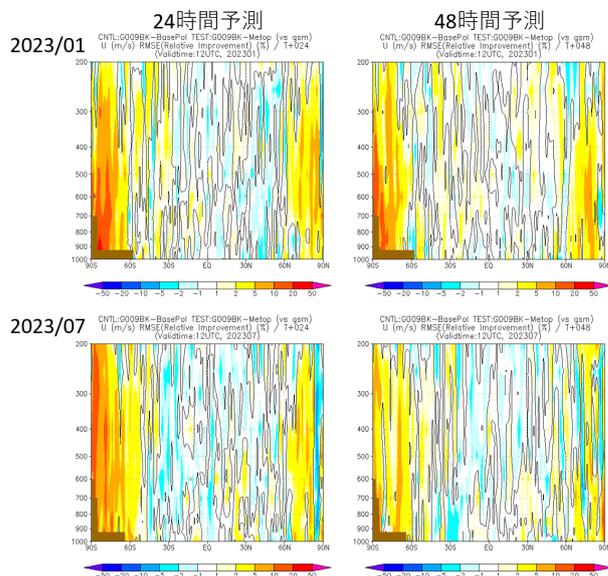


図 4.5.24 Metop AMV を利用した場合 (TEST) の CNTL に対する 24 時間と 48 時間の東西風の予測値の東西带状平均 RMSE 改善率 [%]。図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°] である。暖色系は改善、寒色系は改善を示している。上段は 2023 年 1 月、下段は 2023 年 7 月の期間の検証結果。

域 AMV と同様に高緯度域の解析場を改善し、予測精度向上が期待できる結果が得られた。今後さらに利用方法について検討を行い、現業化に向けた試験を実施する方向で開発を進めている。

#### 4.5.9 アメダス湿度計データの観測誤差の調整(メソ解析・局地解析)

##### (1) 概要

線状降水帯などに伴う集中豪雨の予測精度の向上には大気下層の水蒸気の監視能力の強化及び、その観測のデータ同化での利用による初期値の精度向上が重要である。そのため、2020年3月以降、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おり、最終的には約700地点のアメダス観測所に湿度計が設置される予定である。整備されたアメダス湿度計は、現業メソ解析や現業局地解析で2023年3月に同化利用開始されており、2024年6月には、2023年7月までに整備された433地点のアメダス湿度計が同化利用されている。また、アメダスに設置された湿度計では相対湿度(RH: Relative Humidity)を観測しているが、メソ解析・局地解析においては地上比湿に変換して同化利用している(気象庁2024c)。

アメダス湿度計は整備時期によって異なる2種類の型式の測器が整備されている。両者の整備が進み、数百地点規模、年単位の時間スケールで詳細な統計調査が可能になったことから、それぞれの特性の統計的な調査を行った結果、それぞれの測器の特性の違いから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ために高湿時の地上比湿の観測誤差を大きく設定した。本項では、湿度計のデータ品質及び観測誤差の調査内容とそのメソ・局地数値予報システムへのインパクトについて報告する。

##### (2) 湿度計のデータ品質

アメダスにはこれまでに rotronic MP-102H と VAISALA HMP155 の2種類の湿度計が整備されている。HMP155にはヒーターがついているなどの測器の構造やそれに伴う内部処理アルゴリズムの違いのためMP-102HとHMP155の測定特性が異なっている。

- rotronic MP-102H
  - ヒーターなし
  - 測定誤差:  $\pm 0.8\%RH(23^{\circ}C、0-100\%$ で結露なきこと)
- VAISALA HMP155
  - ヒーターあり
  - 測定誤差:  $\pm 1\%RH(15-25^{\circ}C、0-90\%)$   
 $\pm 1.7\%RH(15-25^{\circ}C、90-100\%)$
- (参考)VAISALA HMT333
  - ヒーターなし
  - 測定誤差:  $\pm 1\%RH(15-25^{\circ}C、0-90\%)$   
 $\pm 1.7\%RH(15-25^{\circ}C、90-100\%)$
  - (地上気象官署及び特別地域気象観測所で使用)

図4.5.25にアメダス湿度計の観測値、地上気象官署及び特別地域気象観測所の湿度計の観測値、局地解析

の第一推定値における相対湿度の頻度分布を示す。これらと比較すると、90%以下では測器・モデルともに同じような頻度分布であるが、MP-102Hは100%を観測する割合が極端に多い。一方でHMP155は加温しているため100%をほとんど観測せず、95%付近に他の測器の頻度分布よりも大きなピークがある。

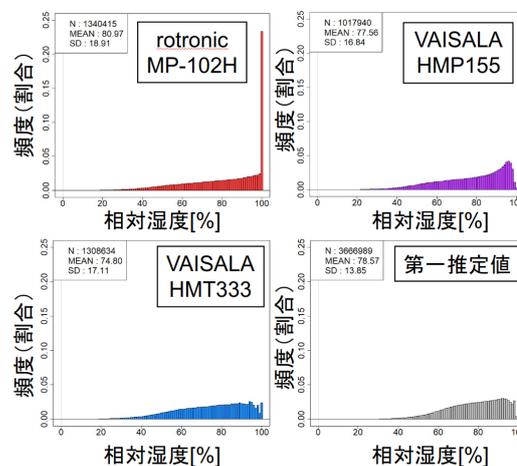


図4.5.25 2023年3月10日から2024年2月29日の相対湿度観測、第一推定値の頻度分布。左上はrotronic MP-102H、右上はVAISALA HMP155、左下はVAISALA HMT333、右下は地上湿度観測点における局地解析の第一推定値の頻度分布を表す。縦軸は頻度(割合)を、横軸は相対湿度[%]を示す。

次に地点ごとの観測時系列を確認した。MP-102Hは夜間に100%を観測することが多かったものの、相対湿度の増加はほとんど夜間の気温低下で説明できる程度であった。また、100%を観測する割合が極端に多い観測点は水田の近隣など、夜間以外でも湿度が高いと考えられる地点であった。これに対してHMP155は雨が降り続けているときや水田の近くであっても97%程度までしか湿度が上がらなかった。晴れている日の日中など、低湿度環境においては両測器の特性の差は小さかった。

以上の調査からアメダス湿度計は90%以上の高湿域で測器ごとのデータ特性が異なり、乾燥時よりも観測誤差が大きいことが示唆される。

##### (3) 開発の内容

前述したアメダス湿度計の特性調査の通り、アメダス湿度計は高湿時は乾燥時よりも相対的に観測精度が落ちるという特性が確認された。しかし、高湿時でもある程度高湿であるという情報を持っており、欠測扱いとするよりも観測精度の低下を考慮して利用すべきだと考えられるため、90%以上を観測した場合は地上比湿の観測誤差を増加させて対処した。

現在のアメダス地上比湿の観測誤差は、メソで0.7g/kg(RHに換算して25°Cで3.6%に相当)、局地で0.75g/kg(同じく、3.8%)と設定している。また、メソ解析において、モデル面第1層の気候学的予報誤差標

準偏差は、夏の陸上ではRHに換算して5%程度となっている。高湿域では観測誤差が大きいと考えられるので、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モデルの2倍程度、すなわち現状の3倍とした。90%までは従来どおりの観測誤差、90%から100%までは、90%で現状の1倍、100%で現状の3倍となるように線型に増加させた。

#### (4) メソ・局地数値予報システムへのインパクト

メソ解析において、2023年3月時点の現業メソ数値予報システム相当にNOAA-21/ATMS・CrIS及び2022年度以降に整備された整備のアメダス湿度計データを追加したものをCNTL、CNTLに上記の高湿時の観測誤差調整を行ったものをTESTとして、2023年6月26日から2023年7月25日までの期間で性能評価試験を行った。

図4.5.26に観測誤差調整による比湿の解析値・予測値の予報時間ごとの精度検証を示す。高湿域の観測誤差を増加させることで、予測初期の地上比湿の高湿バイアスが改善しRMSEが改善することを確認した。また、水蒸気が減って地上下向き長波放射が減ることで、地上気温は高温バイアスが改善されて平均誤差、RMSEのどちらも予測初期を中心に改善することを確認した(図略)。

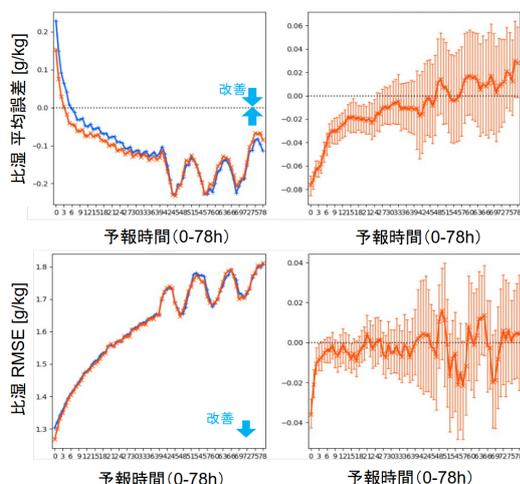


図 4.5.26 メソ数値予報システムの性能評価試験における比湿の解析値・予測値の予報時間ごとの精度検証(対地上気象官署及び特別地域気象観測所の湿度計)。上段左から平均誤差の推移、平均誤差の変化量、下段左からRMSEの推移、RMSEの変化量を示す。誤差の推移図では青線は観測誤差調整なし、赤は観測誤差調整ありを示し、変化量図では観測誤差調整ありから観測誤差調整なしを引いたものを示す。縦軸は平均誤差 [g/kg]、RMSE [g/kg] を示し、横軸は予報時間 (0-78h) を示す。

降水予測については弱い雨の空振りが減り、ETSが改善した(図略)。図4.5.27に九州南部の梅雨前線近傍で176 mm/3hの降水を解析した2023年7月3日18時の3時間前からの予測事例について示す。この事例では九州南部で同化した地上湿度観測値の観測誤差を

大きくしたことや、サイクルによる影響で地上比湿の第一推定値が乾燥したことで降水域付近の水蒸気量を少なく解析したことにより、CNTLで見られた宮崎県での空振りをTESTでは改善することを確認した。

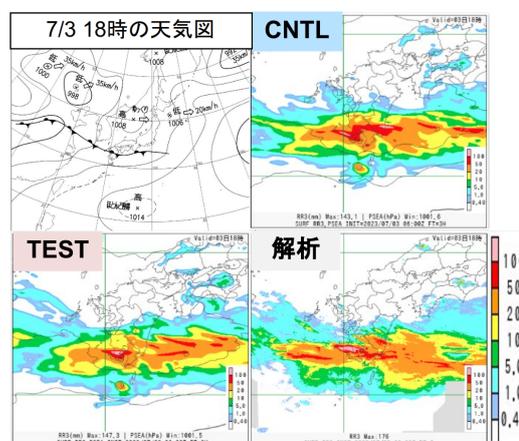


図 4.5.27 2023年7月3日18時における前3時間降水量 [mm/3h] の分布と天気図。上段左から天気図、観測誤差調整なしのメソ予報予測値、下段左から観測誤差調整ありメソ予報予測値、解析雨量を示す。予測値は2023年7月3日15時初期値の3時間予測。

局地数値予報システムにおいては予測初期において地上比湿の乾燥バイアスが改善するものの、雨やその他の要素は変化が小さいことを確認した(図略)。

#### (5) まとめと今後

アメダス湿度計は整備時期により異なる種類の測器が整備されている。今回の検証から測器の特性の違いにより高湿時の測定誤差が大きいことが示唆されたため、アメダス地上比湿の観測誤差を大きく設定して対応した。メソ解析・局地解析において観測誤差の調整をしたところ、予測初期の湿潤バイアスやRMSEが改善した。また、メソ解析の空振り事例について、降水域付近の水蒸気量を少なく解析したことにより空振りが改善する事例を確認できた。これらの結果から、高湿時におけるアメダス地上比湿の観測誤差調整について、2025年2月に現業化をする予定である。

#### 参考文献

Baordo, F. and A. J. Geer, 2016: Assimilation of SS-MIS humidity - sounding channels in all-sky conditions over land using a dynamic emissivity retrieval. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 2854-2866.

Bauer, P., A. J. Geer, P. Lopez, and D. Salmond, 2010: Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances: Part I. Implementation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1868-1885.

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.

Bormann, N., A. J. Geer, and S. English, 2012:

- Evaluation of the microwave ocean surface emissivity model FASTEM-5 in the IFS. *ECMWF Tech. Memo.*, **667**, 18pp.
- Bormann, N., M. Bonavita, R. Dragani, R. Eresmaa, M. Matricardi, and A. McNally, 2016: Enhancing the impact of IASI observations through an updated observation error covariance matrix. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 1767–1780, doi:10.1002/qj.2774.
- Cardinali, C., S. Pezzuli, and E. Andersson, 2004: Influence matrix diagnostic of a data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 2767–2786.
- Collard, A. D., 2007: Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 1977–1991.
- Duncan, D. I., N. Bormann, A. J. Geer, and P. Weston, 2024: Superobbing and Thinning Scales for All-sky Humidity Sounder Assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **152**, 1821–1837, doi:10.1175/MWR-D-24-0020.1.
- Eyre, J. R., 1991: A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. *ECMWF Tech. Memo.*, **176**, 28pp.
- Geer, A. J. and P. Bauer, 2011: Observation errors in all-sky data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 2024–2037.
- Geer, A. J., S. Migliorini, and M. Matricardi, 2019: All-sky assimilation of microwave humidity sounders sensitive to mid/upper tropospheric moisture and cloud. *Atmospheric Measurement Techniques*, **12**, 4903–4929, doi:10.5194/amt-12-4903-2019.
- Geer, A. J., 2019: Correlated observation error models for assimilating all-sky infrared radiances. *Atmospheric Measurement Techniques*, **12**, 3629–3657.
- Hautecoeur, O. and R. Borde, 2017: Derivation of Wind Vectors from AVHRR/MetOp at EUMETSAT. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **34**, 1645–1659.
- 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, 70–72.
- 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.
- 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.
- Karbou, F., E. Gérard, and F. Rabier, 2006: Microwave land emissivity and skin temperature for AMSU-A and -B assimilation over land. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2333–2355, doi:10.1256/qj.05.216.
- Karbou, F., E. Gérard, and F. Rabier, 2010: Global 4DVAR assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part I: Impacts of various land surface emissivity parameterizations. *Wea. Forecasting*, **25**, 5–19.
- Kazumori, M. and S. J. English, 2015: Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1354–1375, doi:10.1002/qj.2445.
- Kazumori, M., 2018: Assimilation of Himawari-8 Clear Sky Radiance Data in JMA's Global and Mesoscale NWP System. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 173–192.
- 気象庁, 1999: 衛星測器. 数値予報課報告・別冊 45 号付録, 気象庁予報部, 117–120.
- 気象庁, 2021a: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトー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, 2021b: 局地解析におけるひまわり 8 号 CSR データ利用拡大. 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, 60–61.
- 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ター, 40–43.
- 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: 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, 2023c: 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, 2024a: 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, 2024b: 全球解析における大気追跡風 (AMV) の利用拡充. 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, 53–55.
- 気象庁, 2024c: メソ解析および局地解析におけるアメダス湿度計データの新規利用. 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, 60–62.
- Menzel, W. P., R. A. Frey, H. Zhang, D. P. Wylie,

- C. C. Moeller, R. E. Holz, B. Maddux, B. A. Baum, K. I. Strabala, and L. E. Gumley, 2008: MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: Algorithm description and results. *J. Appl. Meteor. Climat.*, **47**, 1175–1198, doi:10.1175/2007JAMC1705.1.
- Nonaka, K., 2023: Operational use of Dual-Metop AMVs at high latitudes in JMA’s global NWP system. *WGNE. Res. Activ. Earth Sys. Modell.*, **53**, 1.09.
- 岡部いづみ, 2019: ひまわり 8 号のバンド 9, 10 の CSR データの追加利用. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61.
- 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.
- 岡部いづみ, 岡本幸三, 2020: 気象庁全球解析システムを用いた静止気象衛星 CO2 バンドの晴天放射輝度温度データ同化インパクト調査. 日本気象学会 2020 年度春季大会予稿集, 304.
- 岡部いづみ, 岡本幸三, 石橋俊之, 2022: リトリーブ地表面温度を用いた静止気象衛星 CO2 バンドの晴天放射輝度温度データ同化. 日本気象学会 2022 年度春季大会予稿集, 199.
- Okabe, Izumi and Kozo 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.
- 岡本幸三, 2007: ATVOS 直接同化. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58–70.
- 岡本幸三, 大和田浩美, 藤田匡, 別所康太郎, 高橋昌也, 太田芳文, 計盛正博, 大塚道子, 瀬古弘, 石田春磨, 上清直隆, 石元裕史, 林昌宏, 安藤昭芳, 横田寛伸, 2020: ひまわり 8・9 号後継衛星検討のためのハイパースペクトル赤外サウンダの数値予報インパクト調査. 測候時報第 87 号, 気象庁, 99–150.
- 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.
- 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](https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/rtm/docs_rttov13/rttov13_svr.pdf).
- Wang, D., C. Prigent, L. Kilic, S. Fox, R. C. Harlow, C. Jimenez, F. Aires, C. Grassotti, and F. Karbou, 2017: Surface emissivity at microwaves to millimeter waves over Polar Regions: parameterization and evaluation with aircraft experiments. *Atmos. and Oceanic Tech.*, **34**, 1039–1059, doi:10.1175/JTECH-D-16-0188.1.
- Weston, P., W. Bell, and J. R. Eyre, 2014: Accounting for correlated error in the assimilation of high-resolution sounder data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 2420–2429.
- 山下浩史, 2015: 大気追跡風. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 70–77.

## 4.6 マルチモデル天気ガイダンス

### 4.6.1 はじめに

数値予報開発センターでは、高精度でシームレスな5日先までの予測と誤差情報の作成を目的として、複数の数値予報結果や観測データをAI技術の活用によって最適に組み合わせるマルチモデルガイダンスの開発を2018年度から行っている(気象庁2021)。天気ガイダンスについては、Deep Neural Network(DNN)を用いて複数の数値予報結果を組み合わせるガイダンスの開発を2022年度に開始した。既存のガイダンスを上回る予測精度を持つことが確認できたため、2024年4月にマルチモデル天気ガイダンスの部内試験運用を開始した。ここではマルチモデル天気ガイダンスの仕様と作成手法、検証結果等を述べる。

### 4.6.2 仕様

表4.6.1にマルチモデル天気ガイダンスの仕様を示す。マルチモデル天気ガイダンスは日本周辺の海上も含めた5km格子で3時間毎の天気(晴れ、曇り、雨、雨または雪、雪)を予測する。マルチモデル天気ガイダンスはGSM, MSM, LFMを入力としており、1日12回、GSMとMSMの初期値更新の都度、その時点で最新のモデルを用いて実行する。ただし、LFMについてはMSMと同じ初期時刻を用いる。

以下では初期値の区別のため、00UTC初期値のGSM作成後に実行したマルチモデルガイダンスを00g初期値、03UTC初期値のMSM作成後に実行したマルチモデルガイダンスを03m初期値などと呼ぶ。

### 4.6.3 作成手法

マルチモデル天気ガイダンスは、GSM, MSM, LFMの気温(SURF, 925, 850, 700 hPa)、湿数(SURF, 925, 850, 700, 500, 400, 300 hPa)、前3時間降水量を入力として、DNN(ResNet)を用いて天気を分類する(図4.6.1)。格子毎に各天気(晴れ、曇り、雨、雨または雪、雪)の確率を計算し、最も確率の高い天気をその格子の天気として出力している。ネットワークの学習には推計気象分布(天気)を用いた。FT=9まではGSM, MSM, LFMを利用して、FT=39(00,12UTCはFT=78)まではGSM, MSMを利用して、FT=132まではGSMのみを利用してネットワークを作成している。また、FT=132までの全ての予報時間でGSMのみを利用したネットワークと、FT=39(00,12UTCはFT=78)までの全ての予報時間でMSMのみを利用したネットワークも作成し、単独のモデルでのDNN天気ガイダンスも作成できるようにしている。

表4.6.2に学習時のハイパーパラメータを示す。ネットワークの学習用には2017~2019年、検証用には2020年、最終的なモデルの予測精度を確認するためのテスト用には2021年のデータを用いた。天気分類では晴

表 4.6.1 マルチモデル天気ガイダンスの仕様

|         |   |
|---------|---|
| 予測領域    | 日本周辺の格子間隔 5 km の 484 × 604 格子   |
| 予測要素    | 晴れ、曇り、雨、雨または雪、雪の天気分類  |
| 初期時刻    | 全 12 初期値 (00m, 00g, 03m, 06m, 06g, 09m, 12m, 12g, 15m, 18m, 18g, 21m)   |
| 予報時間と間隔 | FT=132 まで 3 時間間隔 (ただし 00m, 06m, 12m, 18m は FT=126, 03m, 09m, 15m, 21m は FT=129 まで)  |
| 説明変数    | GSM, MSM, LFM の以下の予測値<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• 気温 (SURF, 925, 850, 700 hPa)</li> <li>• 湿数 (SURF, 925, 850, 700, 500, 400, 300 hPa)</li> <li>• 前 3 時間降水量</li> </ul> |
| 目的変数    | 推計気象分布 (天気)   |
| 層別化     | FT=9 までは GSM, MSM, LFM を、FT=39 (00,12UTC は FT=78) までは GSM, MSM を、FT=132 までは GSM のみを利用したネットワークを使用。   |

表 4.6.2 学習時のハイパーパラメータ

|           |                     |
|-----------|---------------------|
| 学習用期間     | 2017~2019 年         |
| 検証用期間     | 2020 年              |
| テスト用期間    | 2021 年              |
| 損失関数      | Class-Balanced Loss |
| 最適化アルゴリズム | Adam                |
| 学習率       | 1e-3                |
| バッチサイズ    | 64                  |
| エポック数     | 50                  |

れや曇りの事例が多く、雪は事例が少ないなど、データ数に偏りがあるため、損失関数には Class-Balanced Loss を用いた。最適化アルゴリズムは Adam で、学習率は 1e-3 とした。バッチサイズは 64、エポック数は 50 で、検証用データに対する損失関数が最小となったエポック時点でのパラメータを採用した。

### 4.6.4 検証結果

マルチモデル天気ガイダンスの検証結果を示す。検証期間は 2021 年の 1 年間で、推計気象分布を利用した面的検証と、地上実況気象通報の天気を利用した地

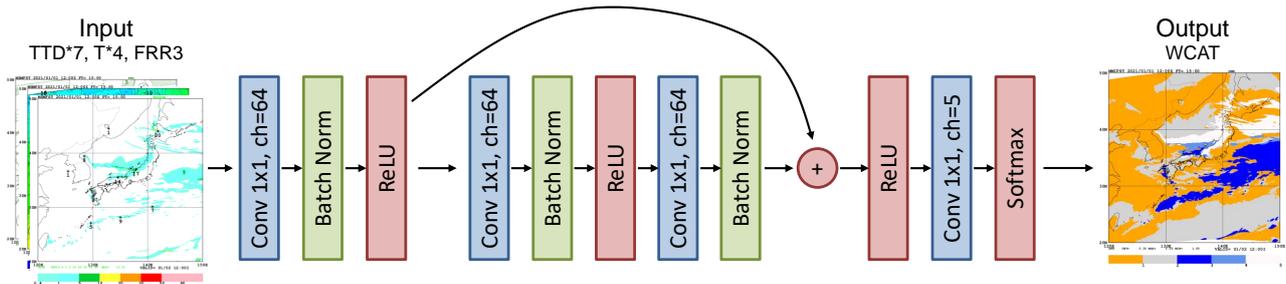


図 4.6.1 DNN 天気ガイダンスの作成手法。畳み込み層 (CONV) のカーネルサイズは  $1 \times 1$  で、バッチノーマライゼーション (Batch Norm) を行う。中間層の活性化関数には ReLU を用いて、出力層は確率値を予測するため Softmax を用いる。出力のチャンネル数を「ch=」で示し、途中の中間層を飛び越える矢印はスキップコネクションを示す。

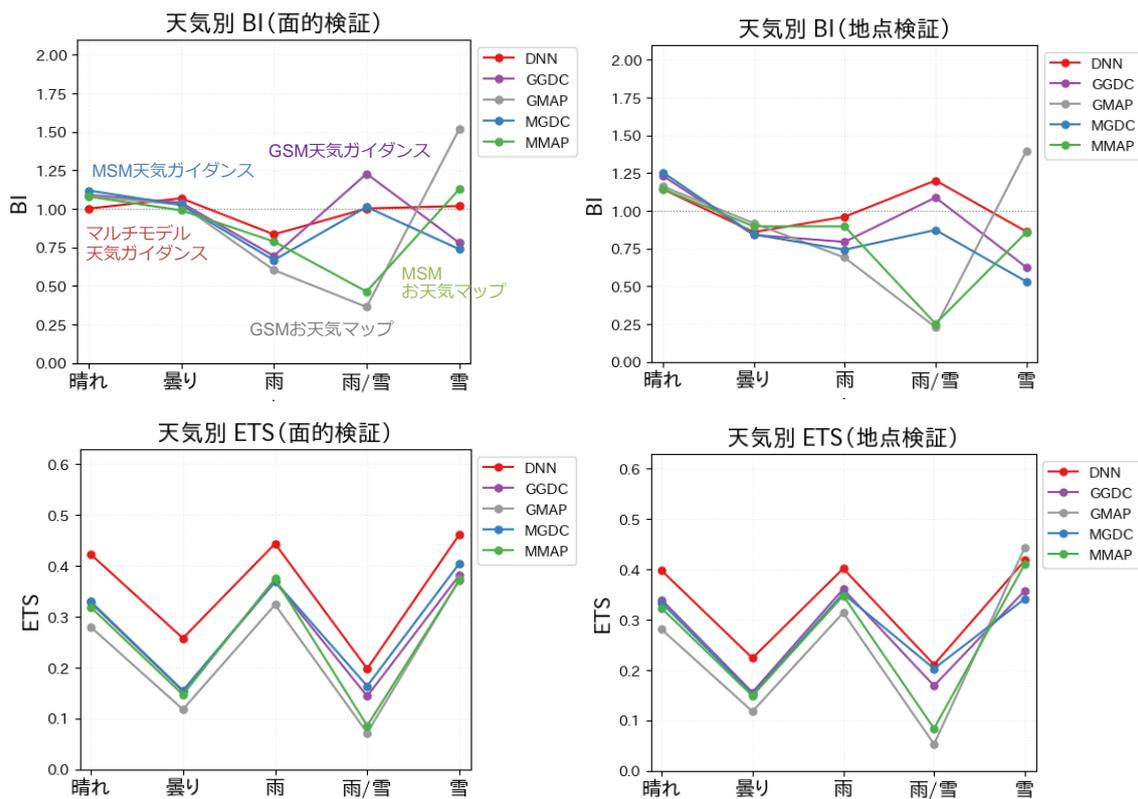


図 4.6.2 天気別の BI (上段) と ETS (下段)。左：面的検証、右：地点検証の結果。赤線はマルチモデル天気ガイダンス、紫線は GSM 天気ガイダンス、青線は MSM 天気ガイダンス、灰線は GSM お天気マップ、緑線は MSM お天気マップの検証結果を示す。

点検証を実施した<sup>1</sup>。比較対象として、数値予報ルーチンの GSM 天気ガイダンスと MSM 天気ガイダンスや、GSM お天気マップと MSM お天気マップの検証結果も示す<sup>2</sup>。図 4.6.2 に天気別のバイアススコア (BI) とエクイタブルスレットスコア (ETS) を示す。予報時間は FT=6~39 での検証結果。面的検証、地点検証ともにマルチモデル天気ガイダンスの BI が概ね 1 に近づいている。特に現ルーチンの GSM, MSM 天気ガイダンス

はともに晴バイアスがやや大きいですが、マルチモデル天気ガイダンスでは適切な予測頻度となっている。また、ETS も概ね全ての天気でマルチモデル天気ガイダンスが高くなっている。

図 4.6.3 にマルチモデル天気ガイダンスの確率予測について、予報時間別のブライアスキルスコア (BSS) と信頼度曲線を示す。予報時間は FT=3~84 での検証結果。BSS は雨または雪のスコアが低いものの、FT=84 までは 0 以上で気候値予報を上回っている。雨については予報時間が先になるほどスコアが大きく下がっているが、これは梅雨前線や夏季の不安定性降水など予測が難しい現象の雨のスコアの影響と考えられる。信

<sup>1</sup> マルチモデル天気ガイダンスは推計気象分布を目的変数としていて有利となるため、地点検証も実施した。

<sup>2</sup> 天気ガイダンスやお天気マップについては小林 (2018) を参照。

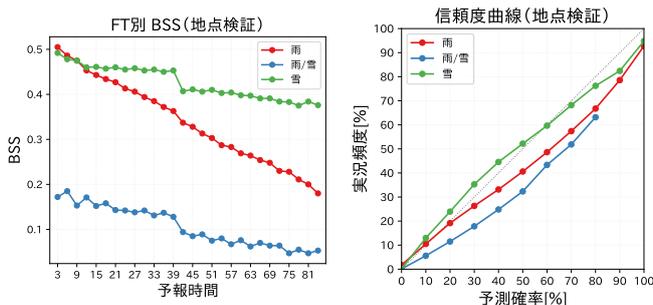


図 4.6.3 予報時間別の BSS (左) と信頼度曲線 (右)。赤線は雨、青線は雨または雪、緑線は雪の検証結果を示す。

信頼度曲線については、雪はおおむね理想直線に近く適切な予測となっているが、雨や雨または雪は実況の出現頻度より高めの確率となっているため、学習時の損失関数のハイパーパラメータを調整するなど、今後改善を図りたい。

#### 4.6.5 事例

図 4.6.4 に 2021 年 5 月 7 日 12g 初期値の FT=15 の天気予測と実況を示す。衛星画像から、中・上層雲が西日本から関東甲信越にかけて広がっており、推計気象分布でも対応する地域の天気は曇りとなっている。現ルーチンの MSM 天気ガイダンスは大部分で晴れを予測し、MSM お天気マップも薄曇りの地域が多くなっている。一方でマルチモデル天気ガイダンスは曇りの地域が多く、実況に近い予測となっている。現ルーチンの天気ガイダンスは日照率ガイダンスを用いて間接的に晴れ・曇り判別を行っている<sup>3</sup>が、マルチモデル天気ガイダンスは推計気象分布の天気を直接学習しているため、適切に晴れ・曇りを予測できる事例が多くなっている。

図 4.6.5 に 2024 年 3 月 27 日 00g 初期値<sup>4</sup>の FT=30 のマルチモデル天気ガイダンスの予測と実況を示す。地上天気図では東シナ海に停滞前線が解析されており、推計気象分布では対応する雨域が西日本を中心に解析されている。マルチモデル天気ガイダンスでも雨域を予測しているが、推計気象分布に比べると東側への拡がり弱く、四国東部や近畿南部などでは広範囲の雨域は予測できていない。一方でマルチモデル天気ガイダンスの雨確率を見ると、四国東部や近畿南部でも 30～40%程度の比較的高い確率を予測しており、ある程度雨の可能性も高いことが分かる。マルチモデル天気ガイダンスの確率情報も用いることで、最終的な天気予測だけでは分からない不確実性も考慮することができる。

<sup>3</sup> 日照率ガイダンスの曇天率 (=1-日照率) が 0.5 より大きければ曇り、0.5 以下なら晴れとしている (小林 2018)。

<sup>4</sup> 2021 年の検証期間後も、日々の事例を確認していて気付いた事例。

#### 4.6.6 まとめと今後の課題

DNN を用いたマルチモデル天気ガイダンスの開発を行い、既存のガイダンスを上回る予測精度を持つことを確認した。今後は学習に利用している推計気象分布の改良が予定されており、晴れ曇り判別や降水判定がより精緻化される予定である。このため、マルチモデル天気ガイダンスでは改良された推計気象分布を用いて再学習を行う予定である。今後も適宜改良や事例検証などを行い、精度向上や予測特性の把握に努めていきたい。

#### 参考文献

- 気象庁, 2021: 統合型ガイダンス. 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, 107-110.
- 小林大輝, 2018: 天気ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 154-164.

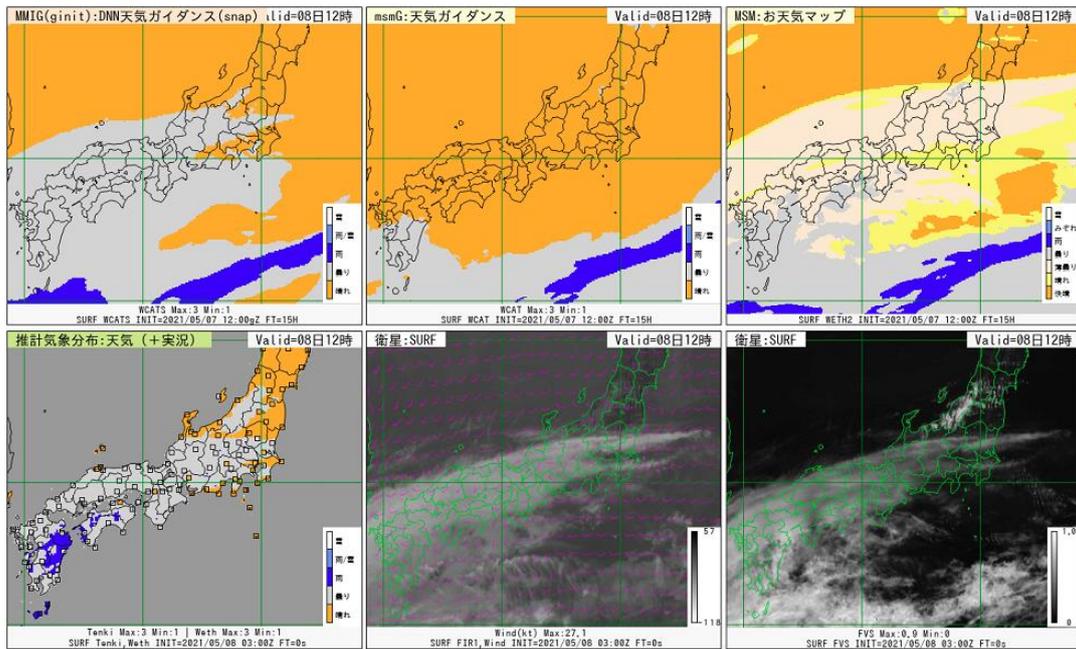


図 4.6.4 2021 年 5 月 7 日 12g 初期値の FT=15 の天気予測と実況。上段は左からマルチモデル天気ガイダンス、MSM 天気ガイダンス、MSM お天気マップで、下段は左から推計気象分布と地上実況気象通報の天気、衛星赤外画像、衛星可視画像。橙色は晴れ、灰色は曇り、青色は雨の領域を示す。

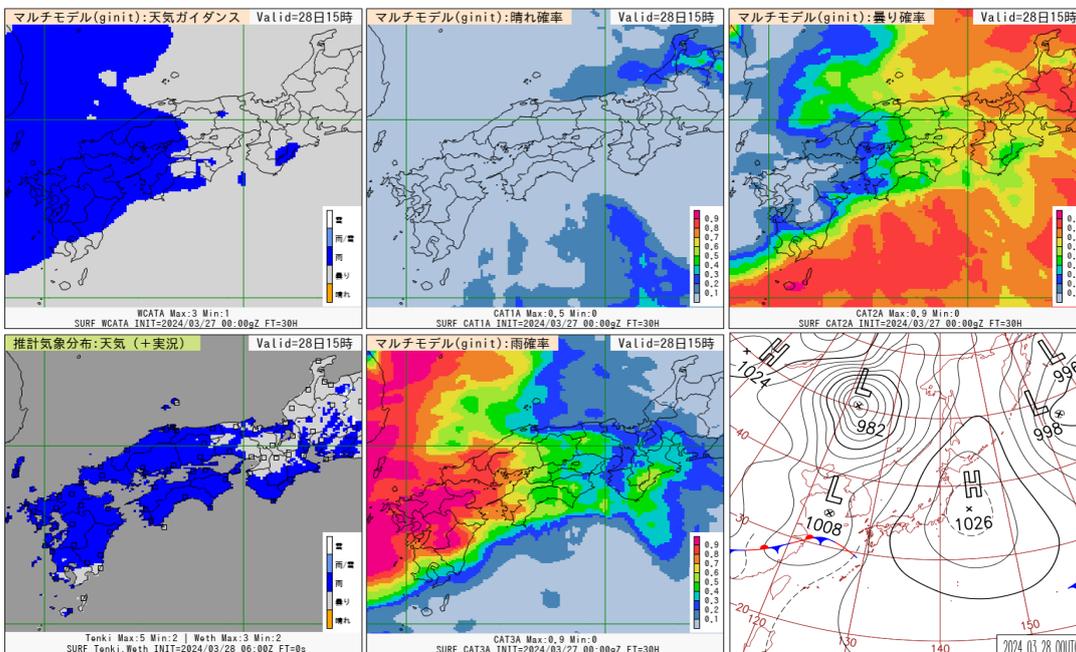


図 4.6.5 2024 年 3 月 27 日 00g 初期値の FT=30 のマルチモデル天気ガイダンスの予測と実況。上段は左からマルチモデル天気ガイダンスの天気予測、晴れ確率、曇り確率で、下段は左から推計気象分布と地上実況気象通報の天気、マルチモデル天気ガイダンスの雨確率、地上天気図。

## 4.7 季節アンサンブル予報システムの開発

### 4.7.1 次期全球海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-G4 の開発

数値予報課では、季節予報モデルの海洋・海水初期値及びエルニーニョ等に関する海洋内部の監視資料提供のための全球海洋データ同化システムとして、2022年2月に更新された MOVE/MRI.COM-G3 (以下 MOVE-G3) を運用している (Fujii et al. 2023; JMA 2023)。また、準リアルタイムの海洋データ同化と極力一貫した品質を持つ過去期間の監視資料及び再予報初期値を作成するため、更新に先駆けて 1947 年以降を対象とする海洋 4D-Var 再解析及び 1990 年以降を対象とする力学的ダウンスケーリングを行った。ここでは、次期全球海洋データ同化システム MOVE-G4 に向けた開発について報告する。なお、MOVE-G4 は CPS4 (第 4.7.2 項) とは異なるタイミングでの現業化を目指している。

#### (1) 全球 0.25° 4D-Var の開発

表 4.7.1 に、運用中の MOVE-G3 及び現時点で想定している MOVE-G4 の主な仕様についてまとめる。

MOVE-G3 は、低解像度モデルによる 4D-Var (G3A) と、高解像度モデルへの力学的ダウンスケーリング (G3F) という 2 つの部分からなる。G3F では予報モデルと同じ水平解像度 0.25° のモデルを利用しているものの、その水温・塩分場は G3A のそれに強く拘束されており実効解像度が低いことが分かっている。そこで MOVE-G4 では水平解像度 0.25° のモデルで直接 4D-Var を実行することを目指している。

MOVE-G3 は 5 日サイクルであるが、海洋・海水初期値を毎日作成するため、現業では互いに独立な解析サイクルを 1 日ずつずらして 5 本運用している。MOVE-G4 ではこれを 1 日サイクルに変更することにより簡潔かつ効率的な実行形態を目指す。また、海洋モデルの前方・後方積分を伴う 4D-Var の反復数を絞ることで省資源化を試みる<sup>1</sup>。

以下では、2006 年から 2015 年の 10 年間を対象とした開発中の MOVE-G4 による再解析実験の結果を報告する。ここで用いた MOVE-G4 には、背景誤差共分散を表現する領域分割の精緻化、背景誤差共分散の相関距離の縮小、一部観測の重みの縮小など、水平解像度及び解析サイクルの変更に合わせてチューニングが加えられているが、詳細は省略する。

図 4.7.1 に、両システム及び Copernicus Marine Service (もしくは Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS) による客観解析<sup>2</sup>の日平均海

面高度の例を示す。(a) の G3F は (c) の客観解析に対して細かい構造に欠け、滑らかすぎる場になっているのに対し、(b) の MOVE-G4 ではメキシコ湾流の蛇行や中規模渦といった構造がより適切に表現され、期待通り客観解析の振幅に近づいている。

図 4.7.2 には、同化に用いていない観測に対する RMSE の分布を示す。100m 深水温については、中緯度で誤差が縮小した一方で、熱帯や南極の海水縁で誤差が増加しており、全体としては中立になっている。100m 深塩分については熱帯や南極の海水縁での誤差増加が勝り、全体としてやや改悪となっている。改悪が見られている領域に関連し、図 4.7.3 に赤道における経度-深度断面の水温バイアスを示す。MOVE-G4 では太平洋と大西洋において、水温躍層の上で冷たく下で温かいバイアスが生じており、鉛直水温勾配が弱まっていることが分かる。このような熱帯での問題は解析の高頻度化に伴って顕在化しており、解析インクリメントに伴い生じている偽の振動や偽の鉛直混合によるものとみられる。これらの問題に対しては、今後特定の観測の同化を止めることによる切り分け実験を行った上で、インクリメントを小さくする方向の更なるチューニングを検討している。

図 4.7.4 には、格子面積当たり海水体積の分布を示す。比較対象として CMEMS による GLORYS12 (Lellouche et al. 2021) の解析値を載せている。MOVE-G3 (G3A) の海水は南極海で他の再解析と比べて薄い傾向があり、MOVE-G4 においても同様である。また、(g) ではウェッデル海 (図中では南極点から 5 時の方向) において偽のポリニヤ (海水の無い場所) が生じ、それを同化で埋め戻した様子が見られる。このようなポリニヤは正の海水密度度インクリメントに伴う海洋上層からの淡水除去、密度成層弱化和鉛直混合によるものと考えられており、海水修正時の塩分の取り扱いを中心に調整に取り組んでいる。

#### (2) モデルバイアス補正スキームの精緻化

現在運用中の MOVE-G3 では、MOVE-G2 で導入されたモデルバイアスのオンライン補正スキームを用いている (Balmaseda et al. 2007; Fujii et al. 2012; 石川 2015)。ここでは MOVE-G4 に向けて開発を行っているバイアス補正スキームの精緻化について述べる。

バイアス補正值は、水温・塩分に対する解析インクリメントを複数のウィンドウで平滑化してランダム成分を取り除くことで作成する。ある解析ウィンドウ  $n$  を対象とする海洋モデル予報値  $x_n^f$  があり、また前のウィンドウで計算済みのバイアス補正值  $b_n$  が存在するとき、バイアスを補正された背景値を

$$x_n^b = x_n^f + b_n \quad (4.7.1)$$

とする。この背景値  $x_n^b$  に任意の方法で観測を同化す

<sup>1</sup> MOVE の 4D-Var では 3D-Var with First Guess at Appropriate Time (3D-Var-FGAT) の解析結果を 4D-Var の最小値探索の起点として使うことで収束前の精度を担保している。なお、4D-Var の評価関数に現れる背景値はそのウィンドウの観測と独立なままである。

<sup>2</sup> <https://doi.org/10.48670/moi-00148>

表 4.7.1 MOVE-G3 の仕様及び MOVE-G4 の実験仕様。IAU は Incremental Analysis Update (Bloom et al. 1996) の略。MGDSST については栗原ほか (2006) を参照。

|                     | MOVE-G3  |                                | MOVE-G4  |
|---------------------|--|--------------------------------|--|
|                     | G3A (同化)   | G3F (初期値化)                     |  |
| 水平解像度               | 東西 1° × 南北 0.5°<br>(赤道付近のみ南北 0.3°)                   | 0.25°                          | 0.25°  |
| 鉛直層数                | 60 + 下部境界層   | 60                             | 60   |
| 水温・塩分同化手法           | 4D-Var+IAU<br>イテレーション上限 30 回                         | G3A 解析場を IAU で<br>力学的ダウンスケーリング | 4D-Var+IAU<br>イテレーション上限 10 回を<br>想定 (今回は 3 回で実験)     |
| 海水密度同化手法            | 3D-Var+IAU   | 3D-Var+IAU                     | 3D-Var+IAU   |
| 解析サイクル<br>(同化ウィンドウ) | 5 日  | 5 日                            | 1 日  |
| 同化される観測             | 水温・塩分 現場観測<br>MGDSST (L4)<br>海面高度計 (L3)<br>海水密度 (L4) | 海水密度 (L4)                      | 水温・塩分 現場観測<br>MGDSST (L4)<br>海面高度計 (L3)<br>海水密度 (L4) |

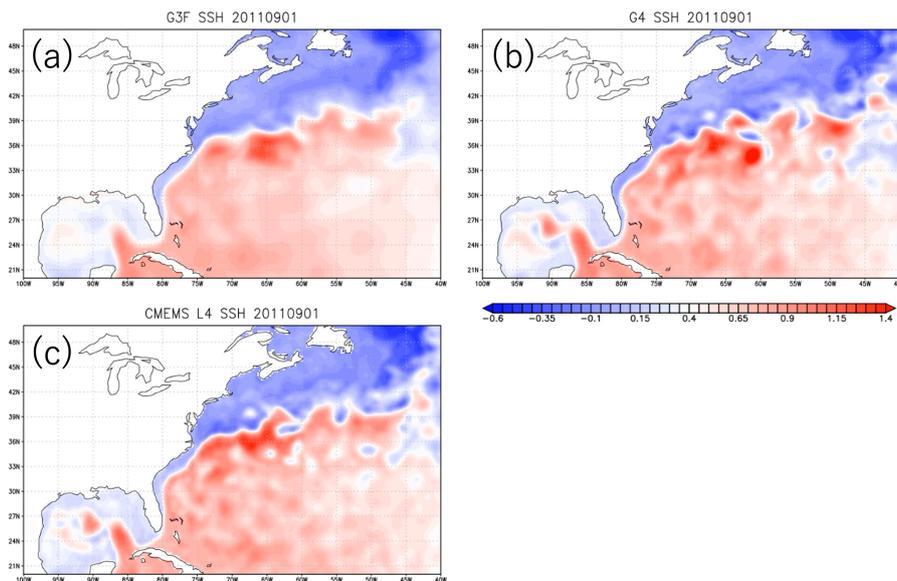


図 4.7.1 2011 年 9 月 1 日のメキシコ湾・北大西洋西部周辺の日平均海面高度 [m]。(a) MOVE-G3 (G3F), (b) MOVE-G4, (c) CMEMS による客観解析。MOVE-G3, MOVE-G4 では表現できない淡水増加等の効果を勘案して (a, b) には 0.45m を加算してから描画している。

ることで、解析値  $x_n^a$  を計算する。このとき

$$\begin{aligned} dx_n &= x_n^a - x_n^f \\ &= x_n^a - x_n^b + b_n \end{aligned} \quad (4.7.2)$$

をここでの (バイアスを含む) 解析インクリメントと呼ぶ。最後に適当な時定数  $r$  を用い、

$$b_{n+1} = (1 - r)b_n + r \cdot dx_n \quad (4.7.3)$$

でバイアス補正値を更新する。5 日サイクルの MOVE-G3 の場合、2 年に相当する時定数  $r = 5/(365 \times 2)$  を

用いている。なお、高緯度域では海水場の再現性を優先するため水温・塩分のバイアス補正を行っていない。以上が MOVE-G3 で用いているオンラインモデルバイアス補正スキームの概要である。

現行のバイアス補正スキームは、海洋モデルの時間積分中に生じるバイアスのうち定常成分と経年変動成分を表現できる一方で、時定数より短い変動を表現できない。しかし、そのような変動のうち季節に依存して毎年繰り返し生じるものは事前に推定できる見込みが高い。そこで、同じ海洋同化システムにより行われ

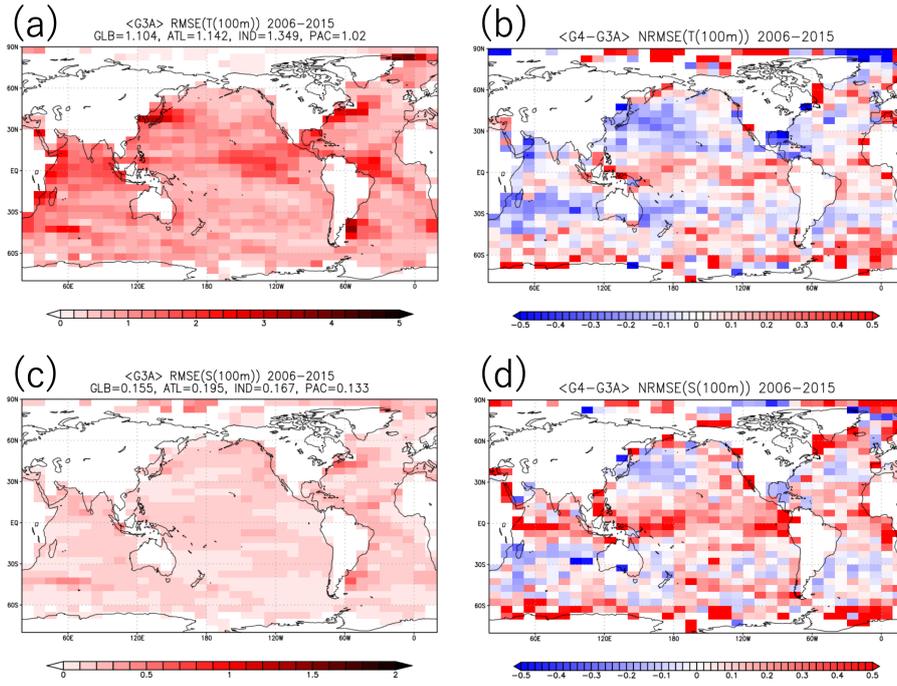


図 4.7.2 2006 年から 2015 年における、同化していない Argo フロートに対する 100m 深の RMSE 分布。上段: 水温、下段: 塩分。(a, c) MOVE-G3 (G3A) の RMSE [K または psu]、(b, d) MOVE-G4 の MOVE-G3 に対する RMSE 変化率。負の変化率は MOVE-G3 と比べて MOVE-G4 の誤差が縮小していることを示す。

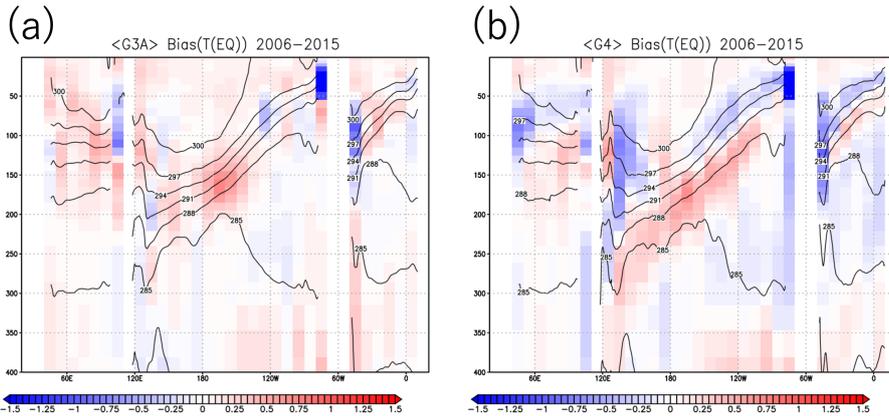


図 4.7.3 2006 年から 2015 年における赤道の水温分布。色は同化していない Argo フロートに対する水温バイアス [K] を南緯 5 度から北緯 5 度の範囲で平均したもの、等値線は各解析の赤道における平均水温 [K] を示す。(a) MOVE-G3 (G3A)、(b) MOVE-G4。

た再解析が予め存在するときに、その解析インクリメントからモデルバイアスの季節変動成分を見積もることを考える (Balmaseda et al. 2013)。具体的には、 $m$  番目の通年半旬 ( $m = 1, 2, \dots, 73$ ) について、既に存在する  $NY$  年分の再解析の解析インクリメントを平均する。

$$\hat{b}_m = \frac{1}{NY} \sum_{iy=1}^{NY} [x_{iy,m}^a - x_{iy,m}^f] \quad (4.7.4)$$

こうして得られた  $\hat{b}_m$  から定常成分にあたる全 73 半旬の平均を差し引き、またサンプリングノイズを軽減するために前後の半旬 (ここでは 25 日間に相当する前後

2 半旬) で平均したものをバイアス気候値  $\bar{b}_m$  とする。改めて再解析を行う場合には、(4.7.3) 式を

$$b_{n+1} = (1 - r)b_n + r \cdot dx_n + \bar{b}_{m(n+1)} - \bar{b}_{m(n)} \quad (4.7.5)$$

のように変更してオンラインバイアス補正を行う。ここで、 $m(n)$  は  $n$  に対応する半旬の番号である。以上の方法によりバイアスの季節変動成分が新たに補正可能になる。

1991-2020 年を対象とした再解析実験を行って解析精度に対する影響を調査した。コントロール実験は、MOVE-G3 と同様のオンラインバイアス補正 (4.7.3 式)

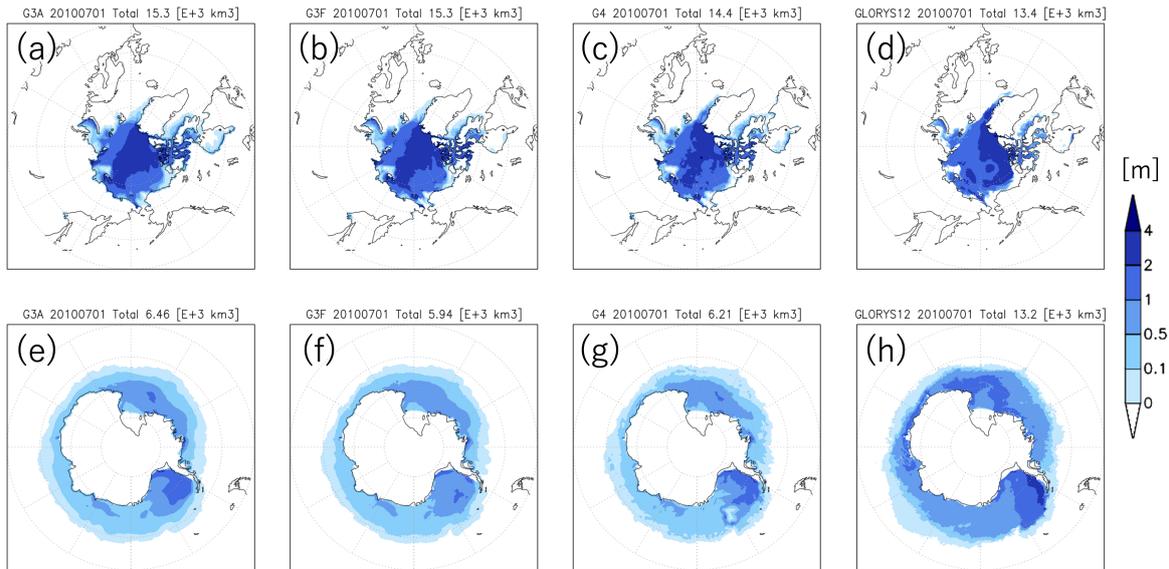


図 4.7.4 2010 年 7 月 1 日における格子面積当たり海水体積の分布。厚みの次元 [m] を持つ。上段: 北極海、下段: 南極海。(a, e) MOVE-G3 (G3A)、(b, f) MOVE-G3 (G3F)、(c, g) MOVE-G4、(d, h) GLORYS12 の解析値。

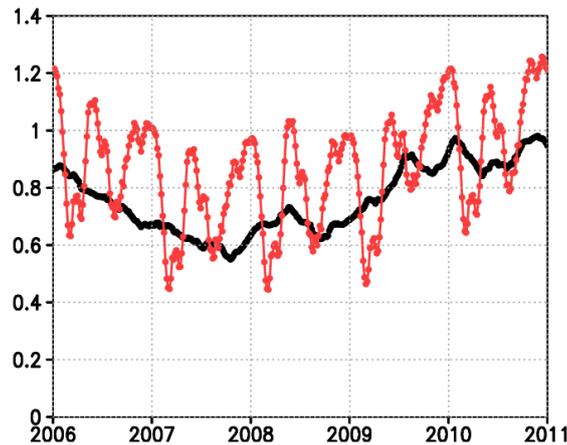


図 4.7.5 東インド洋 (90° E, 0° N) の 100m 深水温に対するバイアス補正値の時系列 (2006~2010 年)。黒線はコントロール実験、赤線はテスト実験を表す。

を用いた 5 日サイクル、水平解像度  $1^\circ \times 0.5^\circ$  の 4D-Var による再解析である。テスト実験は (4.7.5) 式の方法を用いる以外はコントロール実験と同じである。なお、テスト実験に必要なバイアス気候値  $\bar{b}_m$  は 3D-Var-FGAT を用いた予備再解析 (1991-2020 年、 $NY = 30$ ) から求めた。再解析実験及び予備再解析の同化対象から WMO ID の下一桁が 8 と 9 の Argo フロートを省き、同化に利用していない独立なデータとして後の検証に利用した。

図 4.7.5 に、両実験で利用された、東インド洋 (90° E, 0° N) の 100m 深における水温バイアス補正値の時系列を示す。黒線のコントロールが 2 年の時定数を反映してゆっくりとした変動のみを捉えているのに対し、赤線のテストはそれに加えてバイアスの季節変動を表現しているのが分かる。この海域のバイアスは、定常成分が支配的であり、季節変動成分の振幅はその 3 割

程度となっている。

図 4.7.6 に、同化に利用していない Argo フロートに対する解析 RMSE の分布を示す。(a) の鉛直分布からは、元々 RMSE の大きな 100m 深前後を中心に RMSE が減少していることが分かる。(b) の平面分布を見ると、熱帯や南極環流をはじめ多くの海域で RMSE が縮小している。北極海の一部で RMSE が増加しているが、同海域で検証に用いられた観測は少なく、また両実験ともバイアス補正の対象領域外であることに注意が必要である。

### (3) まとめ

0.25° 4D-Var による 1 日サイクルの再解析実験では、期待通り実効解像度の向上が見られている一方で、熱帯の解析精度をはじめとして多くの課題が残っている。バイアス補正スキームの精緻化では、予見積もられ

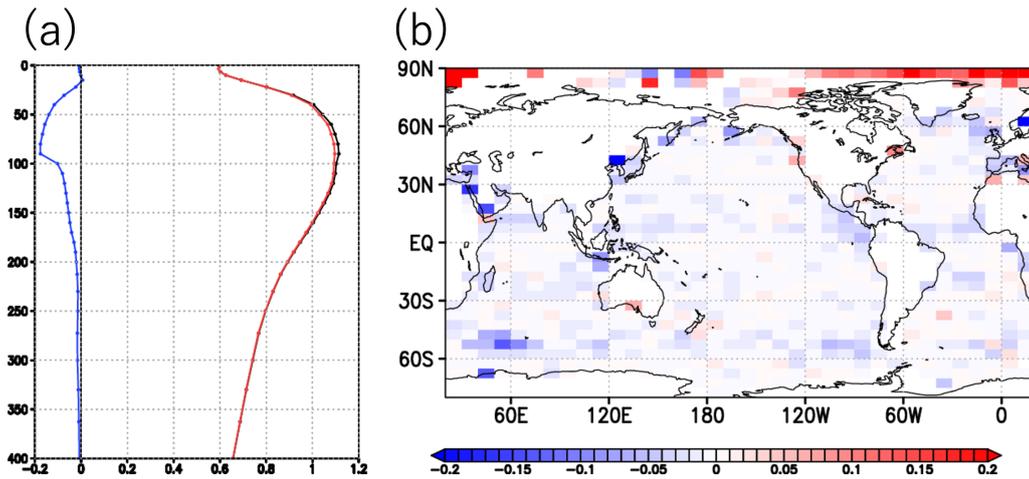


図 4.7.6 同化に利用していない Argo フロートで検証した解析値の水温 RMSE。(a) 全球平均した RMSE 鉛直プロファイル。縦軸は深度 [m]、横軸は RMSE [K]。黒線はコントロール実験、赤線はテスト実験、青線は両者の差を 10 倍した値を表す。負の差分はコントロール実験に対してテスト実験の誤差が縮小していることを示す。(b) コントロール実験の RMSE で規格化した 100m 深の RMSE の変化率。負の変化率はコントロール実験に対してテスト実験の誤差が縮小していることを示す。

たバイアス気候値を取り入れることにより、バイアスの季節変動が考慮可能となり、解析値の RMSE が縮小することを示した。今後は、現業海洋データ同化及び海洋再解析の総合的な改善のため、ここに記した既知の課題に取り組むとともに、海面水温同化手法の改良や省資源化等に向けた取り組みも進める予定である。

#### 4.7.2 次期季節アンサンブル予報システム (JMA/MRI-CPS4) の開発

##### (1) はじめに

気象庁では 3 か月予報、暖・寒候期予報、エルニーニョ監視速報の基礎資料の作成、及び全球アンサンブル予報システム (全球 EPS) への海面水温 (SST) の提供のために、大気海洋結合モデルを使った季節アンサンブル予報システム (Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System: JMA/MRI-CPS: CPS) を運用している。現システムは 2022 年 2 月より運用を開始した JMA/MRI-CPS3(CPS3; Hirahara et al. 2023; 気象庁 2022) である。

「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、CPS に求められる役割として、「社会経済活動への貢献のため、気候リスク軽減、生産性向上に資する半年先までの予測精度向上」が挙げられている。予測精度向上のためには、モデルの総合的な性能向上、特にバイアスの軽減、年々変動の適切な再現等が必要である。このため、次期季節アンサンブル予報システム (JMA/MRI-CPS4: CPS4) では、バイアス軽減や年々変動、スプレッドスキルの関係の改善を狙って、各種物理過程、アンサンブル手法の改良の開発を進めてきた。

また、重点計画では、開発の方向性として「地球システムモデリングの推進」、「1 か月先の予測精度向上に資するための大気海洋結合効果の活用」が示されて

いる。CPS4 では、前者はオゾン等の地球システム内の相互作用の考慮、後者は全球 EPS が担っている 1 か月予報の基礎資料も CPS で担うことを想定して開発を進めてきた。

本稿では CPS4 に向けた開発項目について述べるとともに、性能評価試験の検証結果についても報告する。

##### (2) システムの概要

表 4.7.2 に、CPS4 の仕様の概要を CPS3 と比較して示す。大気モデルの鉛直層数は 100 層から 128 層に高解像度化させる。前述の通り、CPS4 では 1 か月予報の基礎資料も担うことを想定している。このため、毎週火・水曜初期日は現行の全球 EPS と同様、1 か月先まで 25 メンバーで実行し、それ以外はこれまでと同様に毎日 5 メンバーのみ予報計算を実行する予定である。

##### (3) 検証に用いる指標

検証に用いる指標は同じ名称であってもいくつかの定義が存在するため (Takaya et al. 2018)、ここで明示する。本稿での指標の定義は Fortin et al. (2014) や Takaya et al. (2018) と同様とした。すなわち、アノマリー相関は

$$ACC = \frac{\sum_{n=1}^N w_n \sum_{t=1}^T (f_{n,t}^- - \bar{f}_n)(x_{n,t} - \bar{x}_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N w_n \sum_{t=1}^T (f_{n,t}^- - \bar{f}_n)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N w_n \sum_{t=1}^T (x_{n,t} - \bar{x}_n)^2}} \quad (4.7.6)$$

RMSE は

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^N w_n \sum_{t=1}^T (f_{n,t}^- - x_{n,t})^2} \quad (4.7.7)$$

表 4.7.2 新旧システムの仕様比較

|             | JMA/MRI-CPS3 (2022 年 2 月-)  | JMA/MRI-CPS4 (2025 年度後半予定)  |
|-------------|---|---|
| 大気モデル       | GSM2003C*<br>解像度: TL319L100 (~55km)<br>モデルトップ: 0.01hPa                                  | GSM2003C*<br>解像度: TL319L128 (~55km)<br>モデルトップ: 0.01hPa                                  |
| 海洋モデル       | MRI.COM v4.6<br>0.25° (東西) × 0.25° (南北) L60   | MRI.COM v5.0<br>0.25° (東西) × 0.25° (南北) L60   |
| 初期条件        | 大気: JRA-3Q (再予報)、全球速報解析 (現業運用時)<br>陸面: オフライン地表面解析値<br>海洋: MOVE/MRI.COM-G3<br>海水: 3D-Var | 大気: JRA-3Q (再予報)、全球速報解析 (現業運用時)<br>陸面: オフライン地表面解析値<br>海洋: MOVE/MRI.COM-G3<br>海水: 3D-Var |
| 初期摂動        | 大気: 熱帯・北半球・南半球 BGM<br>海洋: 海洋解析誤差摂動  | 大気: 熱帯・北半球・南半球 SV、LETKF (現業運用時)<br>海洋: 海洋解析誤差摂動   |
| モデル摂動       | 確率的物理過程強制法 (大気のみ)   | 確率的物理過程強制法 (大気のみ)<br>確率的水蒸気プロファイル参照法  |
| アンサンブルメンバー数 | 5 メンバー/日  | 25 メンバー/毎週火・水曜初期日 (~1 か月)<br>5 メンバー/日 (1 か月以降)  |

\*GSM2003C は GSM2003 に対して季節予報用の改良・調整を加えたもの  
\*\*CPS3 からの変更点には下線を引いている

スプレッドは

$$Spread = \sqrt{\frac{M+1}{M(M-1)T} \sum_{n=1}^N w_n \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (f_{m,n,t} - \bar{f}_n)^2} \quad (4.7.8)$$

とし、スプレッドスキルの関係は  $Spread^2/RMSE^2$  として計算した。ここで、 $T$  は事例数、 $M$  はメンバー数、 $N$  は格子数、 $w_n$  は緯度重み、 $f_{m,n,t}$  は各アンサンブルメンバー、 $\bar{f}_n$  はアンサンブル平均、 $x_{n,t}$  は解析値、 $\bar{x}_n$  はモデル平年値、 $\bar{x}_n$  は解析平年値である。

#### (4) 大気・陸面モデルの変更点

CPS の大気・陸面モデルは GSM をベースとしている。CPS4 では季節予報向けに GSM2003(Yonehara et al. 2020) から改良を行った CPS3 のモデルをベースに、雲・層積雲・積雲対流スキーム、積雪・湖モデルの改良を行った。オフライン地表面解析に用いる陸面モデルには、予報計算に用いるモデルとの仕様の違いに起因するイニシャルショックを軽減するため、予報モデルと同様の積雪・湖モデルの改良を適用した。

雲スキームでは、格子内の部分雲を表現するため、水蒸気と雲水の空間不均質性を仮定した確率密度関数 (PDF) に基づくスキーム (Smith 1990) を採用している。CPS3 ではトップハット型 (矩形分布) の PDF を仮定しているが、CPS4 では湿潤時に逆 L 字型 (高湿度側に偏った分布) の PDF をとり得るように変更した。この変更により、湿潤時に雲が増え、結果として対流圏下層気温が低下する。また、CPS3 では積雲からデトレインされた雲水は PDF に含めて計算しているが、CPS4 ではデトレインメントによる雲を Tiedtke (1993) を参考に別途計算するように変更した。この変更と併せて PDF のゆらぎ幅を調整することにより、中高緯度海上の下層雲の過剰傾向が緩和し、SST の低温バイアスが軽減した。

CPS3 の層積雲スキームの発動条件に利用する指数は Kawai et al. (2017) に基づいている (Chiba and Kawai 2021; 気象庁 2022)。CPS3 では、観測と比べて雲の分布と境界層上端の対応が悪く、高度 1000m 付近の雲が少ないという問題がある。その結果、特にペルー沖で下向き短波放射フラックスが過剰となり、SST の高温バイアスの要因となっている。対策として、スキームの適用高度上端を 924hPa から 700hPa に変更し、併せてスキームの発動条件のしきい値も見直した。変更により、高度 1000m 付近の雲量が増加し、ペルー沖の下向き短波放射フラックスや SST の高温バイアスが改善した。

積雲対流パラメタリゼーションは Arakawa and Schubert (1974) に基づいており、CPS3 の積雲のエントレインメント率の計算では経験的な高度・湿度依存性を考慮している (Bechtold et al. 2008; Komori et al. 2020)。対流圏中層が乾燥している環境場で深い積雲が抑制される観測事実をよりよく表現できる一方、乾燥時と湿潤時のメリハリが過剰傾向であり、アジアモンスーンが強い等、熱帯循環場のバイアスの要因となっている。このため、環境場がある程度乾燥している場合の対流強制を強化する変更を行った。変更により、アジアモンスーン循環や熱帯収束帯 (ITCZ) での降水過剰傾向等が改善した。また、CPS3 では、西ガーツ山脈やアラカン山脈の西等で、地形性降水が過剰なバイアスがある。このバイアスは、最下層上昇流による対流強制と密接に関わっているため、対流強制を緩和する変更を行った。変更により、西ガーツ山脈やアラカン山脈の西の降水過剰バイアスが改善した。

積雪モデルには、積雪深予測値が過大、冬の積雪域縁辺でアルベド過小、春の積雪域縁辺でアルベド過大、北方林域でアルベド過大のバイアスがある。また、これらのバイアスは冬～春の下層気温のバイアスにも影響している。このため、主にアルベドの改善のために、積

雪被覆率の診断式の変更、風による森林（キャノピー）積雪の落下効果 (Roesch et al. 2001) の導入、積雪アルベドの変更を行った。また、主に積雪深・密度の改善のために、陸面モデルにおける雨雪比診断式の変更、積雪密度の変質効果・融雪効果の変更、積雪の熱伝導率診断式の変更 (Calonne et al. 2011) を行った。図 4.7.7 に、これらの変更による ESM-SnowMIP (Krinmer et al. 2018; Ménard et al. 2019) に基づく地点オフライン実験の結果を示す。積雪アルベド、積雪密度、積雪深のいずれも、変更後（赤線）の方が変更前（青線）よりも観測（黒線）に近く、誤差が軽減していることがわかる。また、フルモデルによるインパクト実験を行い、春のアルベドの正バイアスや地上低温バイアス等が軽減することを確認した。

地表面周辺の年々変動の影響をより表現するため、CPS3 では水温 2 層（第 3 層は湖底で気候値）、湖水 4 層、雪 1 層の鉛直 1 次元での時間発展を計算する湖モデルを採用している。CPS3 の湖モデルでは、湖水の密接度が小さく、冬季の高緯度の下層気温に高温バイアスが存在する。このため、湖底水温気候値の調整を行うとともに、水温第 2-3 層間の拡散係数に影響する季節振幅（定数）が大きくなるよう変更した。これらの変更により、北半球冬季の寒冷地を中心に、湖面水温が低下、湖水密接度が増加し、対流圏下層気温の高温バイアスが軽減した。

#### (5) 線形オゾンスキームの導入

成層圏に多く存在するオゾンは、紫外線を吸収して大気を加熱すること等により大気場にも影響する。CPS3 の放射過程で利用するオゾン濃度は気候値を利用しているため、CPS3 ではオゾンの変動による大気場への影響を正しく再現できない。このため、気象研究所で開発された、簡易的に化学過程を扱う線形オゾンスキームを CPS4 で導入することとした。気象庁 (2024) では線形オゾンスキームを CPS に導入し、オゾン量の季節進行や極渦の強さに応じた変動を再現できることを示した。一方、線形化学過程による時間変化の計算に用いる気候値として、気象研究所で開発された地球システムモデル (MRI-ESM2.0; Yukimoto et al. 2019) の 1999 年の 1 年フリーランから作成した定数を試行的に用いており、オゾン量が予測と共に増加する MRI-ESM2.0 の化学モデルのバイアスに起因して、下部成層圏で高温バイアスとなっていた。このため、JRA-3Q (Kosaka et al. 2024) 向けに作成したオゾン再解析のうち、2010-2019 年を対象とした気候値を利用するよう変更した。変更により、オゾン量のドリフトが改善し、成層圏の高温バイアスも解消した。また、この変更等を適用した上で線形オゾンスキーム導入の有無によるインパクト実験を行い、成層圏気温の年々変動が改善することを確認した (図 4.7.8)。

#### (6) 海洋モデル、海洋同化の変更点

CPS の海洋・海水モデルは、気象研究所で開発された MRI.COM をベースとしている。MRI.COM の基本バージョンを CPS3 の MRI.COMv4.6 (Tsuji no et al. 2017) から v5.0 (Sakamoto et al. 2023) に更新した。

v5.0 では、時間積分法が Leap-Frog+松野スキームから 3 次の Leap Frog+Adams-Moulton (LFAM3; Shchepetkin and McWilliams 2005, 2009) に変更された。LFAM3 では安定性解析により、傾圧タイムステップを Leap Frog 法よりも長くとることができるため、計算コスト削減を図ることができる。また、時間スキームの精度が 2 次から 3 次に向し、波の位相誤差が減少する他、どのタイムステップからでもリスタート接続計算が可能となる。CPS4 では、海洋モデルのタイムステップを CPS3 の 2 倍に延ばすことで計算コストが削減されること、計算安定性に問題がないことを確認した。

CPS3 予報モデルの海洋初期値は、G3A の水温・塩分の解析場を、IAU で力学的にダウンスケーリングしたものを利用している。しかし、G3A 解析場 (水平解像度  $1^\circ \times 0.5^\circ$ ) と G3F 背景場 (水平解像度  $0.25^\circ$ ) の解像度の違いに起因する細かな構造のインクリメントが求めた結果、ダウンスケーリングにより G3F のモデルが持つ細かな構造をインクリメントが潰しているという問題がある。この対策として、G3A の 1 格子分のスケールで G3F 背景場と G3A 解析場<sup>3</sup>に空間フィルタを適用した。図 4.7.9 に、OSCAR 解析値 (水平解像度  $0.25^\circ$ ; Bonjean and Lagerloef 2002)、GLORYS12 解析値 (水平解像度  $1/12^\circ$ )、及び変更前後の G3F 解析値の 15m 深の流速を示す。解析に比べて振幅の大きさが小さいものの、変更後は変更前に比べて振幅が大きくなり、改善していることがわかる。

#### (7) アンサンブル手法の変更点

CPS3 の大気初期摂動は、摂動の時間発展計算とリスケールを繰り返し、初期時刻までに成長する摂動を求める BGM 法 (Breeding of Growing Mode 法; Toth and Kalnay 1993; Chikamoto et al. 2007) を採用している。BGM 法では摂動の成長率が低い傾向にあるため、十分なスプレッドを得るために施した CPS3 の初期摂動の振幅の設定が予測 1~2 週目で RMSE に対して過大なスプレッドとなっている。対策として、全球 EPS で計算された特異ベクトル (Singular Vector: SV; Buizza and Palmer 1995) 法と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (Local Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF; Hunt et al. 2007) を組み合わせた摂動を用いるよう変更した。これにより、予測誤差を効率的に

<sup>3</sup> フィルタの空間スケールが G3A と同程度の場合、G3A 解析場にフィルタをかけなくても、解析場におけるパワースペクトルはほぼ変わらない。G3F 背景場と同じフィルタをかけることで、アルゴリズムの汎用性、解析値と第一推定値の前処理の整合性を持たせた。

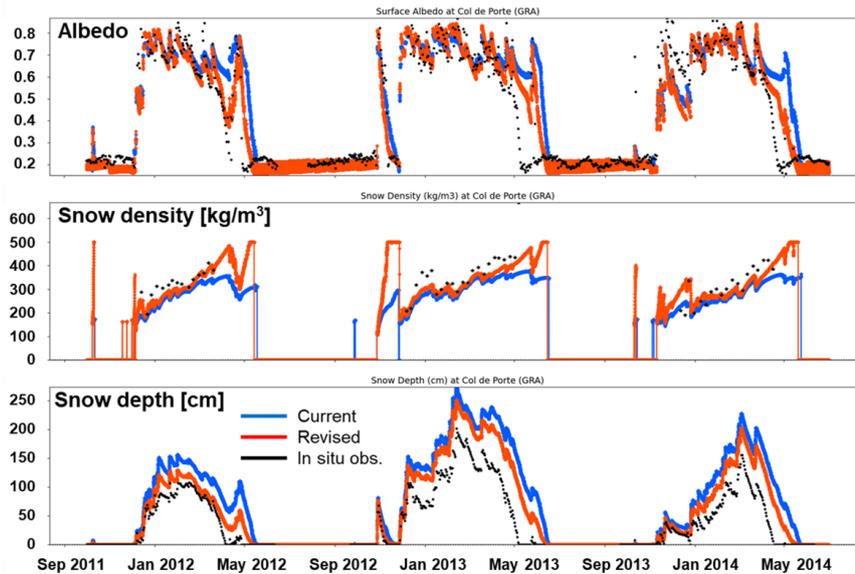


図 4.7.7 Col de Porte (フランス南東部のアルプス山脈の麓) における地点オフライン実験の結果。上段：アルベド (1)、中段：積雪密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、下段：積雪深 (cm)。青線：変更前、赤線：変更後、黒線：観測。

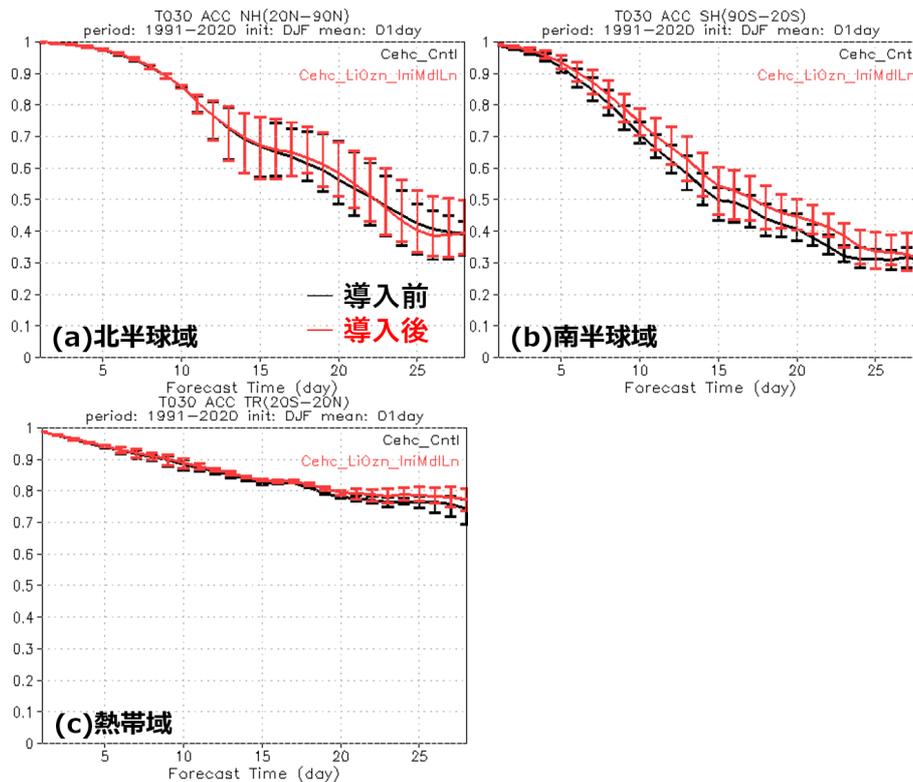


図 4.7.8 1991~2020 年の 12/27,1/16,1/31 初期日の各 5 メンバーに基づく 30hPa 気温のアノマリー相関係数の時系列。対 JRA-3Q。赤線：線形オゾンスキーム導入後、黒線：導入前。エラーバーはリサンプリング回数 1000 回の bootstrap による 95%信頼区間。

捉えるだけでなく、流れ依存を考慮した観測誤差を考慮することができるようになった。また、全球 EPS と整合した仕様となり、計算機資源の効率的な利用にも寄与することになる。導入により、予測 1~2 週目のスプレッドスキルの関係が改善することを確認した。詳細は気象庁 (2023) も参照されたい。

CPS3 では熱帯のスプレッドが RMSE に対して過小傾向である。次期全球 EPS に導入予定のモデルアンサンブル手法である確率的水蒸気プロファイル参照法 (SHPC; 詳細は第 4.2 節を参照) では、積雲対流スキームの入力となる下層の水蒸気プロファイルを揺らすことで、積雲対流の発動の有無や発動の程度の不確実性

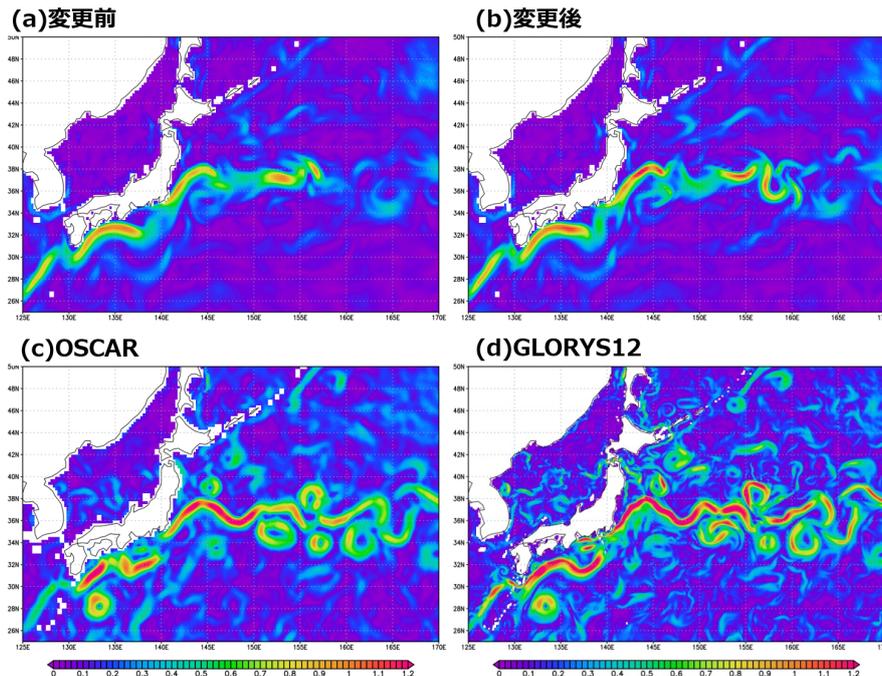


図 4.7.9 2021 年 1 月 1 日の 15m 深の日平均流速 (m/s)。(a)：空間フィルタ適用前、(b)：適用後、(c)：OSCAR 解析値、(d)：GLORYS12 解析値。

を扱うことができる。このため、SHPC を CPS4 にも導入することとした。導入により、熱帯域のスプレッドスキルの関係、熱帯域の確率予測精度が改善することを確認した。

#### (8) 性能評価試験の仕様

CPS4 の性能を評価するため、1991-2020 年を対象とする再予報実験を実施した。季節予測の検証では、1,4,10 月の月末半旬初日とその 15 日前の 00UTC から予測を開始した各 5 メンバーの実験結果について、各月（本文ではそれぞれ 2,5,11 月初期月と呼ぶ）2 初期日を合わせて合計 10 メンバーの LAF(Lagged Average Forecast; Hoffman and Kalnay 1983) アンサンブルを構成して用いた。季節内予測の検証では、1~12 月の各月の月末半旬初日の 00UTC から予測を開始した各 5 メンバーの実験結果を利用した。CPS4 では 1 か月予報の基礎資料を担う予定であるため、次期全球 EPS(第 4.2 節を参照) との比較も行った。全球 EPS と CPS の再予報では、初期日・初期時刻・メンバー数がそれぞれ異なるが、CPS となるべく同じ仕様で次期全球 EPS と比較できるようにするため、全て CPS と同じとした。検証データには、JRA-3Q、MGDSST(栗原ほか 2006)、NOAA OLR(Liebmann and Smith 1997) および GPCP v2.3(Adler et al. 2018) を利用した。

#### (9) 季節予測検証

図 4.7.10 に、夏季と冬季の CPS4 と CPS3 の SST バイアスを示す。以下の改善および特性の変化が見られた。

- 太平洋赤道域の中部から東部にかけて、西に拡大している SST 低温（冷舌）バイアスが CPS4 では軽減している。積雲対流スキームの改良により ITCZ への過剰な降水・強い下層風の収束が改善していることから、対応して強い赤道偏東風の改善、太平洋東部の過剰な冷水湧昇の改善、熱帯太平洋における水温躍層の改善に繋がったものと推測される。
- 北半球夏季の中・高緯度の低温バイアスに改善がみられる。地表面下向き短波放射フラックスの過小が改善したことと整合的であり、過大傾向であった下層雲が雲スキームの改良により減少したと考えられる。
- 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ている。層積雲スキームの改良により下層雲が増加し、地表面下向き短波放射フラックスの過大傾向が改善したことに対応していると考えられる。
- CPS3 では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 バイアスがみられるが、CPS4 では軽減している。このバイアスは ECMWF の季節予報モデルである SEAS5 や UKMO の GloSea 等の多くのモデルで存在しており (Johnson et al. 2017, 2019; Martin et al. 2021)、Mayer et al. (2024) では熱帯インド洋の下層東風バイアスと関連していることを示唆している。CPS4 ではインドモンスーン循環が強いバイアスも改善しており、Mayer et al. (2024)

の示唆と整合的である。

図 4.7.11 に、夏季と冬季の 2m 気温の CPS4 と CPS3 のバイアスを示す。以下の改善および特性の変化が見られた。

- 北半球夏季の陸上の高温バイアスが改善傾向である。雲スキームの改良、特に PDF の変更で環境場の湿潤時に雲が増えたことに対応していると考えられる。
- 北半球冬季シベリアや北米東部の高温バイアスが改善した。湖モデルの改良により、冬季の湖面水温の低下、湖水密度度が増加したことや、積雪モデルの改良により降雪期～積雪期の積雪被覆率が大きくなったことと整合的である。
- カスピ海に見られるインパクトは湖モデルの改良の寄与が大きい。

気象庁では、エルニーニョ・ラニーニャ現象の監視・予測に、NINO.3(150° W-90° W, 5° S-5° N) 領域で平均した SST 偏差<sup>4</sup>を利用している。図 4.7.12 に、2 月初期月の NINO.3 領域に対する予測と解析の SST 偏差を示す。エルニーニョ・南方振動 (ENSO) の成熟期からの衰弱・遷移期への予測は、CPS3 に引き続き概ね予測できている。また、CPS4 では SHPC 導入等による熱帯のスプレッドの増加と関連して、スプレッドが増加傾向である。一方、エルニーニョ・ラニーニャ現象が発生していないニュートラルな時期<sup>5</sup>を中心に、解析とアンサンブル平均の対応が悪化傾向である。メンバー数不足によるサンプリング誤差の可能性も考えられるが、原因は分かっていない。

#### (10) 季節内予測検証

図 4.7.13 に、北半球 500hPa 高度 (Z500) と熱帯 200hPa 速度ポテンシャル (CHI200) のスプレッドスキルの関係を示す。中高緯度の Z500 を見ると、予報 2 週目程度までの RMSE に対する過大なスプレッドが CPS4 で改善している。この改善には初期摂動を SV 法に変更したことが一因と考えられる。スプレッドスキルの関係は CPS4 と次期全球 EPS ではほぼ同等となっている。また、熱帯の CHI200 を見ると、予報 3 日程度よりも先で RMSE に対する過小なスプレッドが CPS4 で改善している。この改善には SHPC を新たに導入したことが寄与していると考えられる。予報 2 日目程度までは、CPS4 も次期全球 EPS も RMSE に対してスプレッドが過大であるが、CPS4 の方が相対的に小さい。この違いは、CPS4 では次期全球 EPS よりも熱帯の SV の振幅を小さく設定しているためである。

図 4.7.14 に、Madden-Julian 振動 (MJO) に伴う対

<sup>4</sup> 本稿で用いる NINO.3 の定義は実際のエルニーニョ監視速報で用いるものと若干異なる。後者の定義は中村・岩崎 (2024) を参照。

<sup>5</sup> 大気海洋相互作用が相対的に弱い春にかけての予測はスプリングバリアと呼ばれ、予測可能性が相対的に低下する時期である。

流活発域が初期値にインド洋に存在する時の、大気上端外向き長波放射フラックス (OLR) 偏差のラグ時間合成図を示す。CPS4 も CPS3 と同様、予報時間が進むとともに、解析のように対流活発/不活発域が東進する傾向を概ね再現できているが、CPS4 の振幅は CPS3 や解析に比べてやや過小傾向である。次期全球 EPS は解析に比べて振幅が過小傾向にある。

#### (11) まとめと今後の予定

CPS4 に向けた開発項目、及びそれらを取り込んだ性能評価試験の結果について報告した。CPS4 の各過程の変更点について、概ね狙い通りの挙動やインパクトであることを確認した。また、性能評価試験の結果から、CPS3 に比べてバイアス軽減や年々変動、スプレッドスキルの関係の改善等、想定した効果が得られていること、次期全球 EPS と比べても概ね良好であることを確認した。

今後は、現業に相当する構成での評価、具体的には各月中旬初期値も含めて事例数を増やした評価、また、1 か月予報においては全球 EPS 更新時の評価方法に合わせた 13 メンバーとし、さらに初期時刻の違いも含めた評価等を行う予定である。これらの評価の結果、問題がなければ、2025 年度後半に CPS を更新する計画である。

#### 参考文献

- Adler, R., M. Sapiiano, G. Huffman, J.-J. Wang, G. Gu, D. Bolvin, L. Chiu, U. Schneider, A. Becker, E. Nelkin, P. Xie, R. Ferraro, and D.-B. Shin, 2018: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation. *Atmosphere*, **9**, 138.
- 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.
- Balmaseda, M. A., D. Dee, A. Vidard, and D. L. T. Anderson, 2007: A Multivariate Treatment of Bias for Sequential Data Assimilation: Application to the Tropical Oceans. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 167–179.
- Balmaseda, M. A., K. Mogensen, and A. T. Weaver, 2013: Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 1132–1161.
- Bechtold, P., M. Köhler, T. Jung, F. Doblas-Reyes, M. Leutbecher, M. J. Rodwell, F. Vitart, and G. Balsamo, 2008: Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1337–1351.

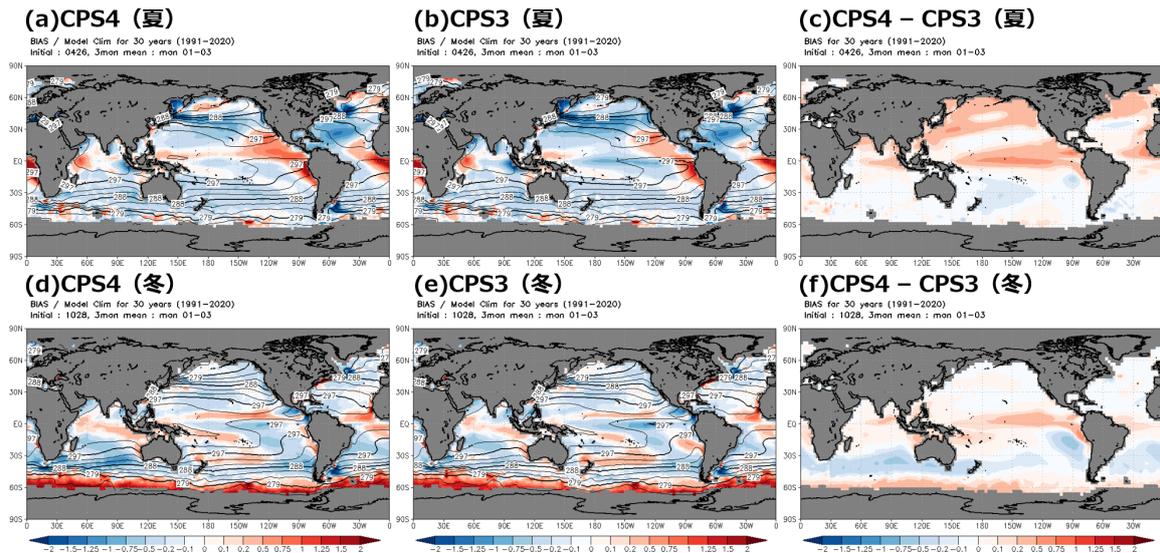


図 4.7.10 1991 年～2020 年の北半球夏季（5 月初期月 6～8 月対象；上段）と冬季（11 月初期月 12～2 月対象；下段）の SST のモデル気候値とバイアス。左列：CPS4、中列：CPS3、右列：CPS4 と CPS3 の差。カラー：バイアス（ただし、右列は CPS4 と CPS3 との差）、等値線：モデル気候値。単位は K。

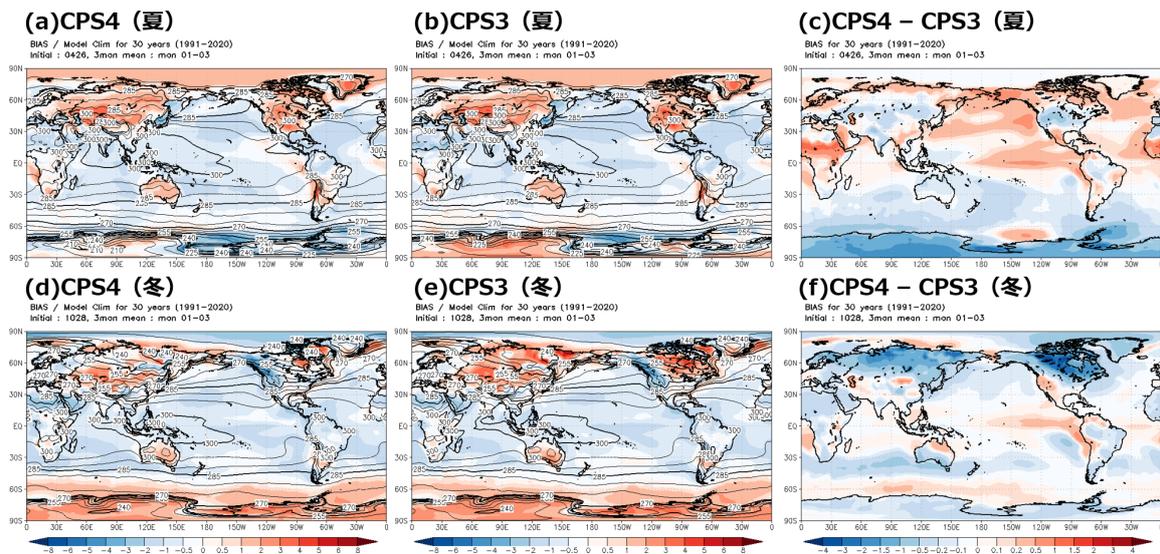


図 4.7.11 図 4.7.10 と同じ。ただし、2m 気温。

Bloom, S. C., L. L. Takacs, da A. M. Silva, and D. Ledvina, 1996: Data Assimilation Using Incremental Analysis Updates. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1256–1271.

Bonjean, F. and G. S. E. Lagerloef, 2002: Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2938–2954.

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

Calonne, N., F. Flin, S. Morin, B. Lesaffre, du S. Rol-

land Roscoat, and C. Geindreau, 2011: Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L23 501.

Chiba, J. and H. Kawai, 2021: Improved SST–shortwave radiation feedback using an updated stratocumulus parameterization. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 7–03.

Chikamoto, Y., H. Mukougawa, T. Kubota, H. Sato, A. Ito, and S. Maeda, 2007: Evidence of growing bred vector associated with the tropical intraseasonal oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04 806.

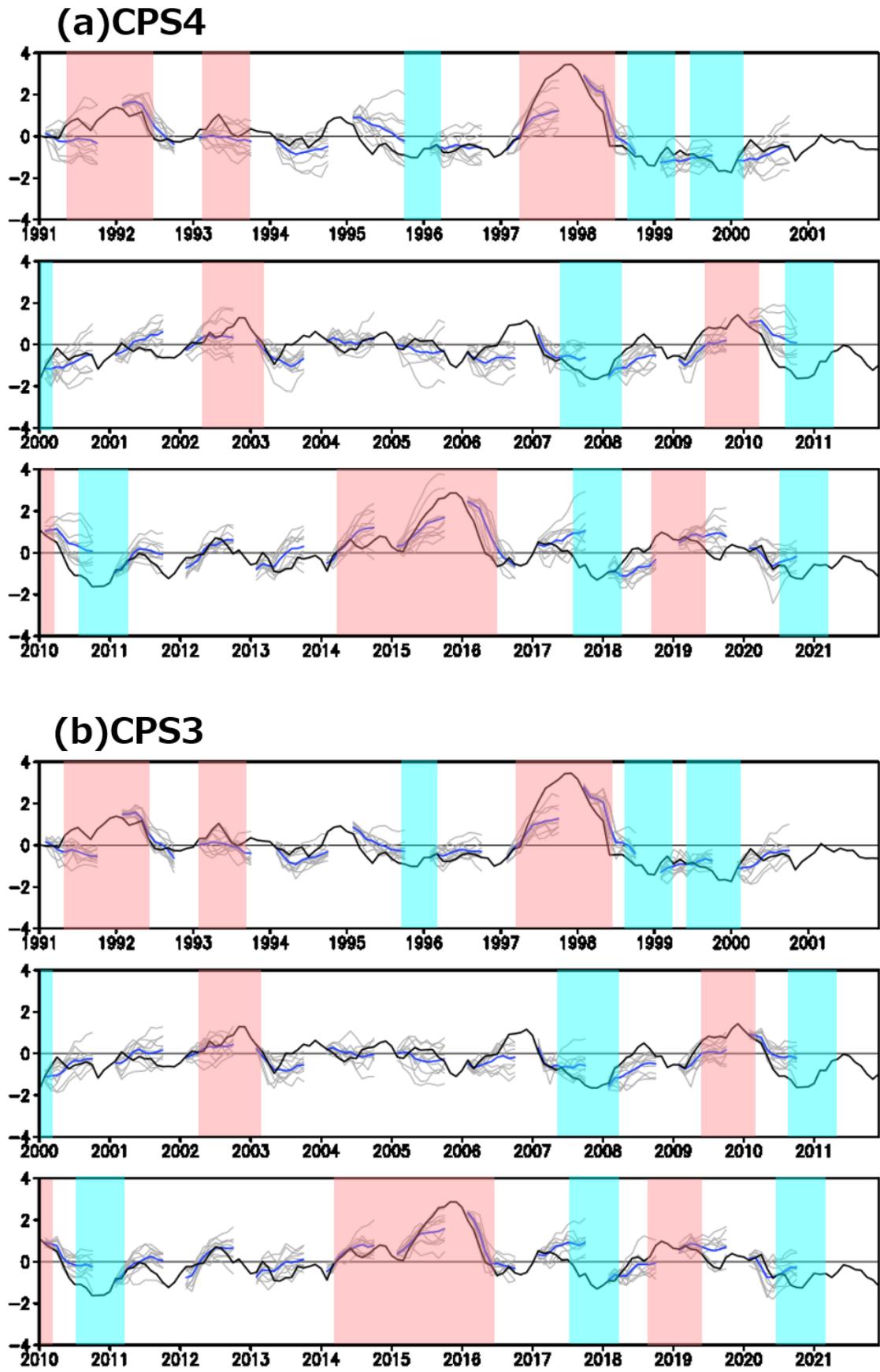


図 4.7.12 各年 2 月初期月の NINO.3 領域平均 SST 偏差時系列。(a) : CPS4、(b) : CPS3。黒線：MGDSST、青線：10 メンバーアンサンブル平均、灰色細線：各アンサンブルメンバー。赤背景：エルニーニョ現象発生期間、青背景：ラニーニャ現象発生期間。上段・中段・下段で、のりしろとして 2 年分重複して描いている。

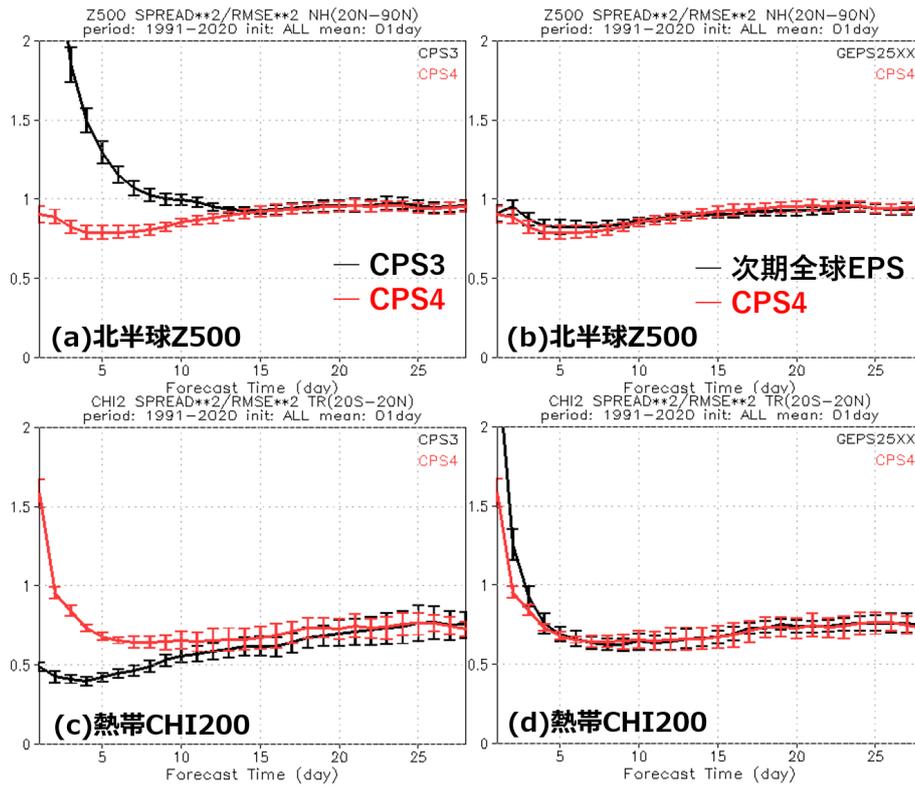


図 4.7.13 (a,b) 北半球 500hPa 高度と (c,d) 熱帯 200hPa 速度ポテンシャルのスプレッドスキルの関係。(a,c)CPS4 と CPS3 の比較。(b,d)CPS4 と次期全球 EPS の比較。エラーバーはリサンプリング回数 1000 回の bootstrap 法による 95%信頼区間。

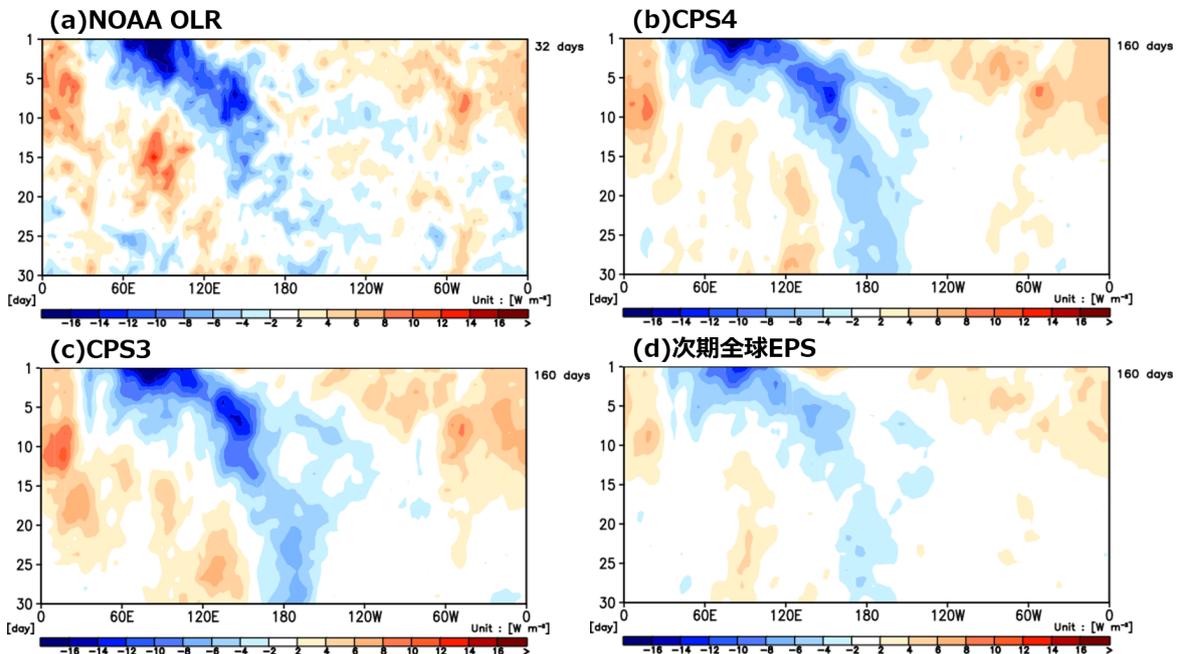


図 4.7.14 予報開始時のインド洋域 (phase3) に MJO の対流活発域があるときの OLR 偏差のラグ時間合成図。(a) : NOAA OLR 解析値、(b) : CPS4、(c) : CPS3、(d) : 次期全球 EPS。図中右の日数は合成に用いた事例の合計日数。横軸：経度、縦軸：予報時間 (日)。MJO 指数の定義は Wheeler and Hendon (2004) を参照。

Fortin, V., M. Abaza, F. Anctil, and R. Turcotte, 2014: Why Should Ensemble Spread Match the RMSE of the Ensemble Mean? *J. Hydrometeorol.*, **15**, 1708–1713.

Fujii, Y., M. Kamachi, S. Matsumoto, and S. Ishizaki, 2012: Barrier Layer and Relevant Variability of the Salinity Field in the Equatorial Pacific Estimated in an Ocean Reanalysis Experiment. *Pure Appl. Geo-*

- phys.*, **169**, 579–594.
- Fujii, Y., T. Yoshida, H. Sugimoto, I. Ishikawa, and S. Urakawa, 2023: Evaluation of a global ocean reanalysis generated by a global ocean data assimilation system based on a four-dimensional variational (4DVAR) method. *Frontiers in Climate*, **4**.
- 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*, **101**, 149–169.
- Hoffman, R. N. and E. Kalnay, 1983: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A*, **35A**, 100–118.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112–126.
- 石川一郎, 2015: 海洋データ同化システム. 平成 27 年度季節予報研修テキスト, **28**, 10–15.
- JMA, 2023: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. URL <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2023-nwp/index.htm>.
- Johnson, S. J., A. Turner, S. Woolnough, G. Martin, and C. MacLachlan, 2017: An assessment of indian monsoon seasonal forecasts and mechanisms underlying monsoon interannual variability in the Met Office GloSea5-GC2 system. *Climate Dynamics*, **48**, 1447–1465.
- Johnson, S. J., T. N. Stockdale, L. Ferranti, M. A. Balmaseda, F. Molteni, L. Magnusson, S. Tietsche, D. Decremet, A. Weisheimer, G. Balsamo, S. P. E. Keeley, K. Mogensen, H. Zuo, and B. M. Monge-Sanz, 2019: SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 1087–1117.
- Kawai, H., T. Koshiro, and M. J. Webb, 2017: Interpretation of factors controlling low cloud cover and low cloud feedback using a unified predictive index. *J. Climate*, **30**, 9119–9131.
- 気象庁, 2022: 季節アンサンブル予報システムの改良. 気象庁数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 122–132.
- 気象庁, 2023: 季節アンサンブル予報システムの開発. 気象庁数値予報開発センター年報 (令和 4 年), 112–119.
- 気象庁, 2024: 季節アンサンブル予報システムの開発. 気象庁数値予報開発センター年報 (令和 5 年), 102–106.
- Komori, T., S. Hirahara, and R. Sekiguchi, 2020: Improved representation of convective moistening in JMA's next-generation coupled seasonal prediction system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4–05.
- 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. Tokuyoshi, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109.
- Krinner, G., C. Derksen, R. Essery, M. Flanner, S. Hagemann, M. Clark, A. Hall, H. Rott, C. Brutel-Vuilmet, H. Kim, C. B. Ménard, L. Mudryk, C. Thackeray, L. Wang, G. Arduini, G. Balsamo, P. Bartlett, J. Boike, A. Boone, F. Chéruy, J. Colin, M. Cuntz, Y. Dai, B. Decharme, J. Derry, A. Ducharne, E. Dutra, X. Fang, C. Fierz, J. Ghattas, Y. Gusev, V. Haverd, A. Kontu, M. Lafaysse, R. Law, D. Lawrence, W. Li, T. Marke, D. Marks, M. Ménégoz, O. Nasonova, T. Nitta, M. Niwano, J. Pomeroy, M. S. Raleigh, G. Schaedler, V. Semenov, T. G. Smirnova, T. Stacke, U. Strasser, S. Svenson, D. Turkov, T. Wang, N. Wever, H. Yuan, W. Zhou, and D. Zhu, 2018: ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 5027–5049.
- 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, **73**, S1–S18.
- Lellouche, J.-M., E. Greiner, R. Bourdallé-Badie, G. Garric, A. Melet, M. Drévillon, C. Bricaud, M. Hamon, O. Le Galloudec, C. Regnier, T. Candela, C. E. Testut, F. Gasparin, G. Ruggiero, M. Benkiran, Y. Drillet, and P.-Y. Le Traon, 2021: The Copernicus global 1/12° oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis. *Front. Earth Sci.*, **9**, 1–27.
- Liebmann, B. and C. A. Smith, 1997: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275–1277.
- Martin, G. M., R. C. Levine, J. M. Rodriguez, and M. Vellinga, 2021: Understanding the development of systematic errors in the Asian summer monsoon. *Geosci. Model Dev.*, **14**, 1007–1035.

- Mayer, M., M. A. Balmaseda, S. Johnson, and F. Vitart, 2024: Assessment of seasonal forecasting errors of the ECMWF system in the eastern Indian Ocean. *Climate Dynamics*, **62**, 1391–1406.
- Ménard, C. B., R. Essery, A. Barr, P. Bartlett, J. Derry, M. Dumont, C. Fierz, H. Kim, A. Kontu, Y. Lejeune, D. Marks, M. Niwano, M. Raleigh, L. Wang, and N. Wever, 2019: Meteorological and evaluation datasets for snow modelling at 10 reference sites: description of in situ and bias-corrected reanalysis data. *Earth System Science Data*, **11**, 865–880.
- 中村哲, 岩崎聡子, 2024: エルニーニョ・ラニーニャ現象と天候の特徴. 令和5年度季節予報技術資料, **1**, 12–48.
- Roesch, A., M. Wild, H. Gilgen, and A. Ohmura, 2001: A new snow cover fraction parametrization for the ECHAM4 GCM. *Climate Dynamics*, **17**, 933–946.
- Sakamoto, K., H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Kawakami, H. Tsujino, and G. Yamanaka, 2023: Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 5 (MRI.COMv5). *Tech. Rep. MRI*, **87**.
- Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams, 2005: The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, **9**, 347–404.
- Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams, 2009: Computational kernel algorithms for finescale, multiprocess, longtime oceanic simulations. *Handb. Numer. Anal.*, **14**, 121–183.
- 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.
- Takaya, Y., S. Hirahara, T. Yasuda, S. Matsueda, T. Toyoda, Y. Fujii, H. Sugimoto, C. Matsukawa, I. Ishikawa, H. Mori, R. Nagasawa, Y. Kubo, N. Adachi, G. Yamanaka, T. Kuragano, A. Shimpo, S. Maeda, and T. Ose, 2018: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): atmosphere–land–ocean–sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting. *Clim. Dyn.*, **50**, 751–765.
- Tiedtke, M., 1993: Representation of Clouds in Large-Scale Models. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3040–3061.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317–2330.
- 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**.
- 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.
- Yonehara, H., C. Matsukawa, T. Nabetani, T. Kanehama, T. Tokuhiko, K. Yamada, R. Nagasawa, Y. Adachi, and R. Sekiguchi, 2020: Upgrade of JMA’s operational global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6–19.
- 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.

## 4.8 波浪モデル

### 4.8.1 はじめに

現在、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。2024 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。

### 4.8.2 台風ポーガスの改善

GWM・CWM は、大気モデルの解析・予測の風の場で駆動するが、台風中心付近には気象庁が発表する台風予報に基づく台風ポーガス手法で作成したパラメトリックな風の場を埋め込んでいる。現状の波浪モデルにおける台風ポーガス手法にはいくつかの課題があり、改善が必要である。台風予報の 12 時間ごと (24 時間以降は 24 時間ごと) の予報円中心の緯度・経度や強度情報のみを用いてモデル内の台風進路・強度を内挿して決定しているため、その間に台風進路・強度が急激に変わるケースではその変化をモデルが十分に表現できず、波浪予報の誤差に繋がる。これを改善するためには、3 時間ごとの台風予報の情報を利用することが必要であり、既にこれらの情報を利用している高潮モデルの台風ポーガス手法を参考に、波浪モデルの台風ポーガス手法の改修作業を進めている。また、現状の波浪モデルの台風ポーガス手法は、格子ごとに GSM か台風ポーガスによる風かを選択する手法であり (気象庁 2024)、波浪モデルに入力される風の分布が不自然になりやすいという課題がある。高潮モデルの台風ポーガス手法は、この課題にも対応可能である。今後は、長期間の統計検証を行い、本改修の有効性を確認したのち、ルーチン変更に向けた準備を進める計画である。また、現状の台風ポーガス手法では、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、あたかも台風が二つ存在するような気象場になる場合がある。これは高潮モデルにおける台風ポーガス手法でも問題となっており、引き続き開発を進めているところである (第 4.9 節)。これについ

ても、高潮モデルの改善を参考に、波浪モデルの台風ポーガス手法改善に向けた調査を進める方針である。

### 4.8.3 利用衛星データの品質向上と未利用衛星データの利用

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<sup>1</sup>。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。2024 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 波高データの結果との比較を進めている。図 4.8.1 は、現行ルーチンによる 4 衛星の Level2 波高データ及び利用検討中の 8 衛星の Level3 波高データによる波浪データ同化の結果である。利用衛星数が増えることでデータ同化結果が大きく変わることが分かる。データを Level3 に切り替え、利用する衛星データを増やすことは、データ同化に利用する衛星データを継続的・安定的に確保することに繋がり、また、波浪モデルの予測精度向上に繋がると期待される。

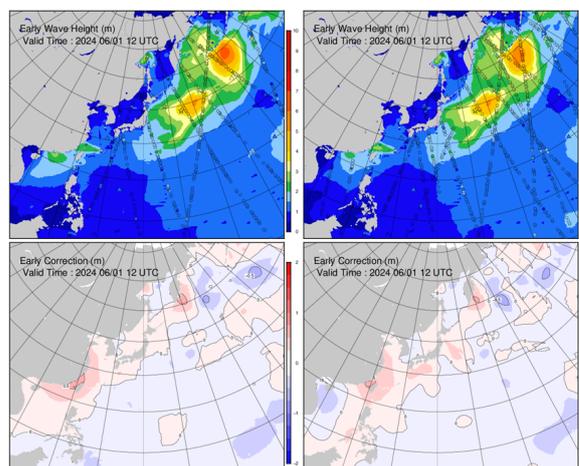


図 4.8.1 2024 年 6 月 1 日 12UTC における 4 衛星 Level2 波高データ (左列) と 8 衛星 Level3 波高データ (右列) による波浪データ同化結果の比較。上段は同化された有義波高 (カラー) と衛星による観測値 (丸印)、下段は同化による波高修正量 (カラー) を示す。

<sup>1</sup> [https://data.marine.copernicus.eu/product/WAVE\\_GLO\\_PHY\\_SWH\\_L3\\_NRT\\_014\\_001/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/WAVE_GLO_PHY_SWH_L3_NRT_014_001/description)

## 参考文献

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.

気象庁, 2024: 波浪モデル (全球・沿岸) . 数値予報解説資料集 (令和5年度) , 気象庁 情報基盤部, 173-184.

## 4.9 高潮モデル

### 4.9.1 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 2023)。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 2023)。2024年は、台風ポーガスの改善や水平高解像度化・高速化、潮汐スキームの導入に向けた開発を進めたほか、非台風時の高潮早期注意情報に向けた調査を行った。以下では、2024年の進捗の一部を紹介する。

### 4.9.2 Vortex relocation

2024年は、台風ポーガス改善の一環として、台風ポーガス起動条件の統一の変更を行った(2章)。ここでは昨年から継続している vortex relocation の開発進捗について解説する。現行の日本域高潮モデル、アジア域高潮 EPS は共に、GSM や MSM 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ポ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ポ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(図 4.9.1)。2024年までに vortex relocation 手法の試作版を開発し、実際の台風事例に適用して動作確認している。

### 4.9.3 非構造格子有限体積法モデル

現状の日本域高潮モデルや日本域高潮 PFS では、アダプティブメッシュという格子系を採用している(気象庁 2024)。この格子系では、沿岸付近を高解像度、外洋で低解像度で高潮計算を行うことにより、計算機資源を節約することができる(図 4.9.2 上段)。一方で、アダプティブメッシュでは、格子サイズが不連続に変化するため、その境界上で数値振動を抑えるための処理が必要になるほか、MPI化による高速化が難しいとい

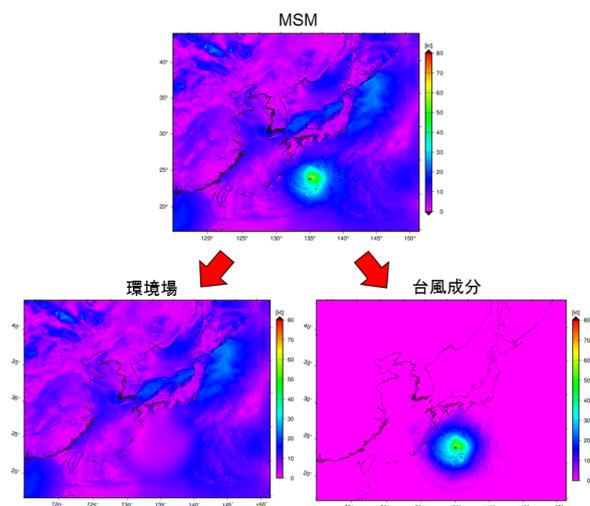


図 4.9.1 Vortex relocation の例。ここでは MSM の地上風速の場 [kt] を台風成分と環境場に分離している。

うデメリットがある。これらへの対応策として、非構造格子有限体積法モデルの開発を進めている。図 4.9.2 の下段に示すのは、日本域を対象に開発中の非構造格子有限体積法モデルの格子である。モデル領域は有限個の三角形で分割され、各三角形に対し有限体積法を適用して予報方程式を解くというものである。三角形の形状や大きさは柔軟に変えることが可能で、沿岸域は高解像度で計算しつつ、外洋に向かって連続的に低解像度にすることができる。また、非構造格子の MPI 化は、アダプティブメッシュに比べて容易であるというメリットがある。この非構造格子有限体積法モデルを日本域高潮モデルや日本域高潮 PFS に導入するため、試作版の開発や動作確認を行っているところである。

### 4.9.4 潮汐スキーム

現行の気象庁高潮モデルでは、天文潮位を別途計算し、予測される潮位偏差(高潮)に加算して潮位を算出している。しかし、実際は天文潮位が高潮に影響を与えるため、現象によっては線形に足し合わせるのでは良い近似とならない場合がある。この相互作用は、高潮モデルに潮汐スキームを導入し、潮汐を直接計算することにより取り込むことができる。潮汐の計算は高潮計算と同じく、基礎方程式は浅水長波方程式であり、外力として起潮力と Self-Attraction and Loading (SAL) 項<sup>1</sup>を入力し、領域モデルの場合は別の潮汐モデルで計算された潮汐を側面境界から与えることで計算することが可能である。2023年は潮汐スキームの導入可能性調査を行った。2024年はスキームの開発や動作確認に着手した。図 4.9.3 は、大浦(有明海)における天文潮位計算の例で、潮汐スキームにより計算した天文潮位が実際の天文潮位を概ね良く表現していることが分かる。ここでは SAL 項及び潮汐の側面境界値と

<sup>1</sup> 海水の荷重による海底変形とそれに伴う質量分布変化・重力変化、海水の自己重力の効果を表す。

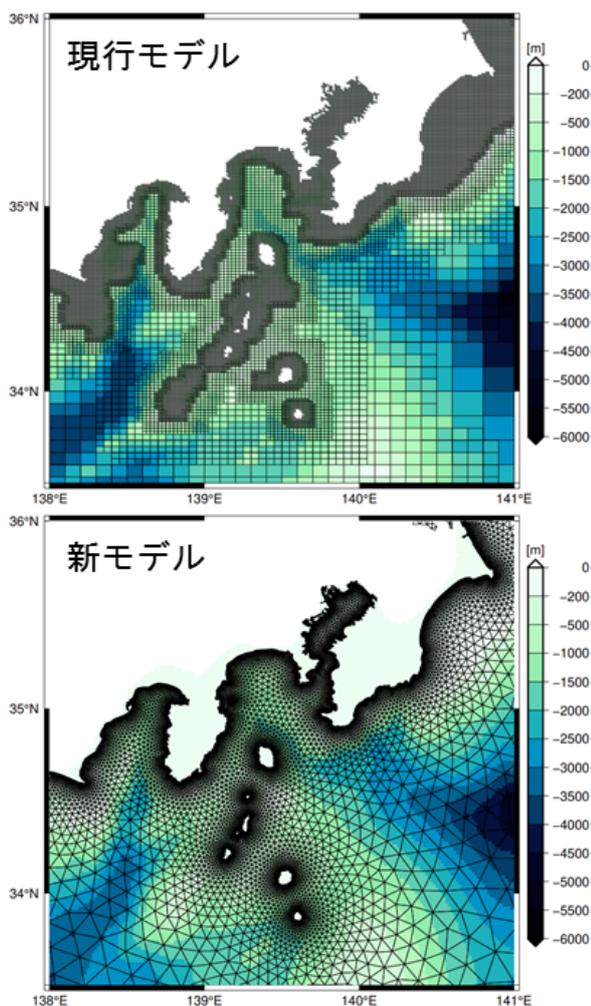


図 4.9.2 ルーチン高潮モデル（上）と非構造格子高潮モデル（下）の格子比較。カラーは水深 [m] を表す。

して FES2022<sup>2</sup>を使用した。

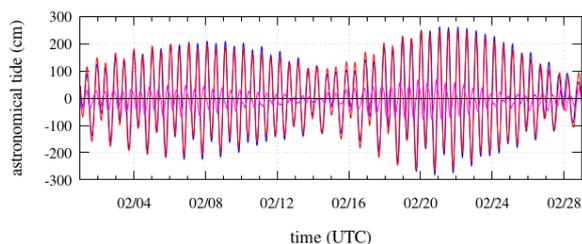


図 4.9.3 大浦（有明海）における観測潮位 [cm]（青線）と潮汐スキームにより計算された天文潮位 [cm]（赤線）。マゼンタの線は後者-前者の差。SAL 項及び側面境界値には FES2022 による主要 8 分潮と 11 種類のマイナー分潮を利用。

<sup>2</sup> "The FES2022 Tide product was funded by CNES, produced by LEGOS, NOVELTIS and CLS and made freely available by AVISO". CNES, 2024. FES2022 (Finite Element Solution) Tidal model (Version 2024) [Data set]. CNES. <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2024.004>

## 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, 2023: 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.
- 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.
- 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.

## 4.10 日本沿岸海況監視予測システムの開発

### 4.10.1 はじめに

数値予報課では、日本周辺の詳細な海況・海水情報提供のため日本沿岸海況監視予測システム（以下、MOVE-JPN。JMA 2024）を現業運用している。現在、海面高度偏差同化での新規衛星 Sentinel-6 Michael Freilich の追加、海面フラックス計算の修正、解析システムの北太平洋モデルで水温・塩分の移流スキームにより夏季の長江河口で水温が異常に低下する不具合の修正、予測システムの全球・北太平洋モデルの双方向ネスティング境界での海水移流の見直しと日本近海モデルの非現実的な外部重力波の発生を抑えるための順圧計算の見直しの対処を計画している。今般、これらの変更を合わせた業務化試験を行った。ここではその概要を報告する。

### 4.10.2 改良・変更項目

#### 解析システム

- 海面高度偏差同化で利用する衛星高度計の観測データを継続して安定的に確保するため新規衛星 Sentinel-6 Michael Freilich（別名 Sentinel-6A）を追加（現ルーチンでは Cryosat-2、Jason-3、SARAL、Sentinel-3A/B、HaiYang-2B を利用）
- 北太平洋モデルで水温・塩分の移流スキームにより夏季の長江河口で水温が異常に低下する不具合を修正するため、流入する河川水の淡水フラックスが大河川でみられる 0.002cm/s を超える格子では移流スキームを QUICK 法<sup>1</sup>から上流差分に切り替えるように変更
- 海面フラックス計算について、大気強制力として与える海上気温・比湿の高度を 10m として扱っていたものを 2m へ修正、及び全球予報の 1 時間平均短波・長波放射フラックスをそのまま 3 時間平均値として扱っていたものを前 3 時間の 1 時間平均値を用いて 3 時間平均値へ変換するように修正

#### 予測システム

- 全球・北太平洋モデルの双方向ネスティング境界での海水移流で、保存性を満たすため海水の量が微小な負として求めた際に 0 に置き換える処理について処理が不足していた点の改修等により計算安定性を改善
- 日本近海モデルでの非現実的な外部重力波の発生を抑えるため、順圧計算で与える鉛直積算流速時間変化率として時間補外値の利用をやめ現在値を使用するように変更し計算安定性を改善
- 海面フラックス計算の修正（解析システムと共通）

<sup>1</sup> 上流側 2 点と下流側 1 点の計 3 点を使用する高次差分スキーム

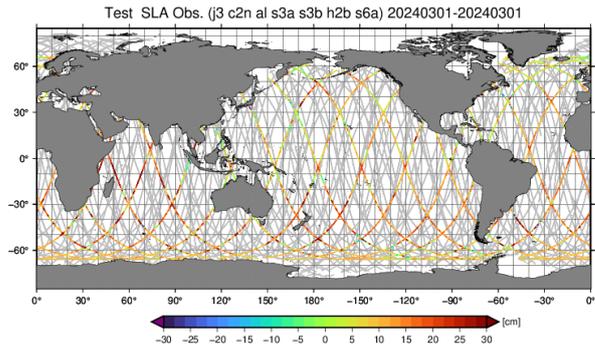


図 4.10.1 2024 年 3 月 1 日を対象とした衛星高度計のカバレッジマップ。カラーは Sentinel-6 Michael Freilich の観測データ（海面高度偏差、単位は cm）。灰色は現ルーチンですでに利用している衛星高度計の観測データ。

### 4.10.3 試験結果

2023 年 4 月から 2024 年 3 月を対象期間として解析システムと予測システムの業務化試験（TEST）を実行した。現ルーチン相当の実行結果（CNTL）に対して以下の改善が見られた。

#### 解析システム

- Sentinel-6 Michael Freilich の追加によって TEST の衛星高度計観測データのカバレッジは CNTL に対して 10%程度広がった（図 4.10.1）。
- 北太平洋モデルの夏季の長江河口で水温が異常に低下する不具合が解消された（図 4.10.2）。この不具合による低温化の影響は河口近傍にとどまっており、周囲の海域への影響は限定的だと考えられる。
- 北太平洋モデル計算領域全体を対象とした現場観測水温（単位は °C）に対する検証では、1m 深では TEST と CNTL の MSE の差は最大で 0.01 程度と小さく解析精度は中立であった（図略）。また 100m 深と 400m 深では MSE の変化はそれぞれ最大で 0.08、0.02 程度で、春から夏にかけて悪化、秋から冬に改善し年間では中立であった（図略）。

#### 予測システム

- 日本近海モデルの計算安定性について、潮汐による水位変化を除外した傾圧 1 ステップあたりの海面水位変化の絶対値を確認したところ、CNTL では非現実的な外部重力波が卓越した事例で 200cm を超過したが、TEST では実験期間中に最大でも 60cm 程度にまで抑制された（図 4.10.3）。
- 北太平洋モデルの 31 日予測において海面の現場観測水温に対する高温バイアスが低減し、TEST の誤差は CNTL より減少した（図 4.10.4）。これには海面フラックス計算の修正が主に寄与していると考えられる。100m 深の水温への影響は中立であった（図略）。

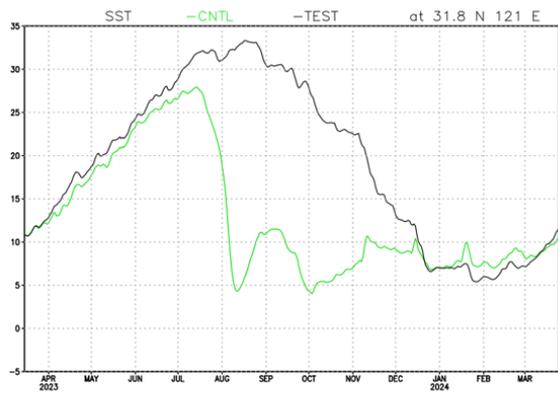


図 4.10.2 解析システム（北太平洋モデル）の長江河口にあたる格子点における、実験期間中の 1m 深水温（単位は °C）の時系列。TEST は黒線、CNTL は緑線。CNTL では夏から秋にかけて異常な水温の低下がみられるが、TEST にはみられない。

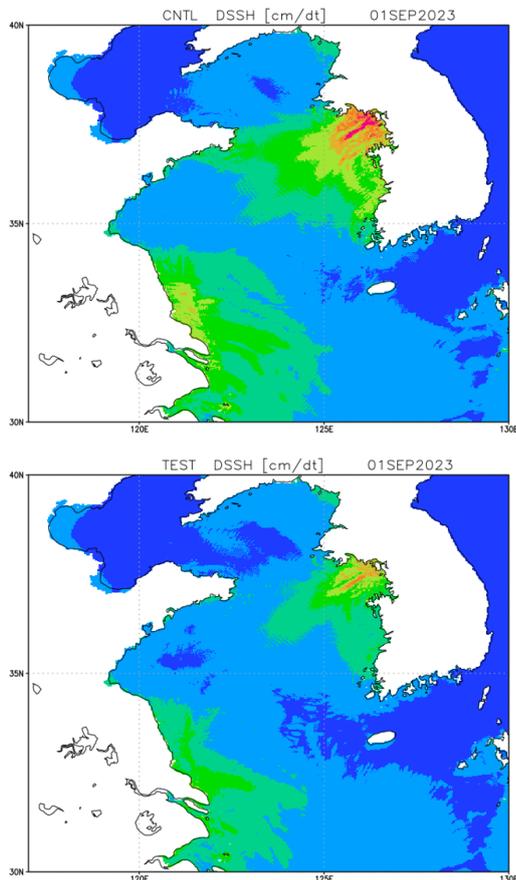


図 4.10.3 CNTL で黄海において非現実的な外部重力波が卓越した事例（2023 年 9 月 1 日）の、傾圧 1 ステップあたりの海面水位変化の絶対値の日最大値（単位は cm）。予報時刻はインクリメンタル解析更新（IAU）法が適用される解析期間内の 1 日予報。上図は CNTL、下図は CNTL と同じ初期値から TEST の改良を適用した予測システムを実行した結果。CNTL では特に朝鮮半島の沿岸で値が大きく、非現実的な外部重力波に対応している。TEST の改良を適用することにより値が抑えられている。

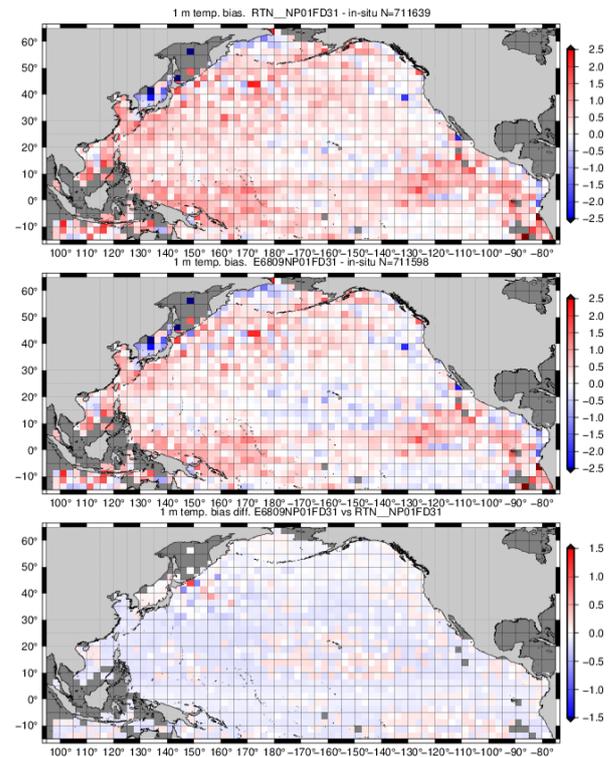


図 4.10.4 予測システム（北太平洋モデル）の 31 日予報について、海面の現場観測水温に対する検証結果（実験期間平均）。上から CNTL のバイアス（°C）、TEST のバイアス（°C）、TEST のバイアスの絶対値から CNTL のバイアスの絶対値を差し引いたもの（°C）。下段は青がバイアスの改善、赤が悪化を意味する。

#### 4.10.4 まとめ

MOVE-JPN に対して、海面高度偏差同化での衛星高度計の追加、計算安定性の向上や不具合の修正を行った結果、現ルーチンと比べて同程度以上の精度であることが確認できた。このことから、上記の改良の現実化を令和 6 年度中に行う予定である。

#### 参考文献

JMA, 2024: *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/outline2024-nwp/index.htm>).

## 4.11 線状降水帯予測の検証

### 4.11.1 はじめに

我が国では、線状降水帯による大雨によって甚大な災害が毎年のように発生している。平成30年8月の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、2030年を目標として、半日程度前から線状降水帯の発生・停滞等に伴う集中豪雨をより高い精度で予測することが示された。気象庁は本提言に沿って、平成30年10月に「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定し、線状降水帯の発生・停滞の予測精度向上により、集中豪雨の可能性を高い確度で予測し、特に、明るいうちからの避難など、早期の警戒と避難を可能とすることを重点目標の一つとした。その中で、令和2年7月豪雨(気象庁2020)では線状降水帯が九州で多数発生し、甚大な被害が生じた。気象庁は線状降水帯の予測精度向上を喫緊の課題として認識し、設定された目標を達成できるよう、できる限りの方策を立てて、全庁的な体制で開発を加速させて取り組んでいくこととした(気象庁2021)。

このような状況下において、気象庁は気象庁業務評価レポート(令和4年度版)<sup>1</sup>において、数値予報における線状降水帯の予測精度を客観的に測定する指標として「線状降水帯予測の捕捉率」を新たな業績指標として登録し、数値目標の達成に向けて数値予報システムの改善等の取り組みを鋭意進めている。

線状降水帯予測の業績評価の指標では、数値予報による線状降水帯の予測について「条件<sup>2</sup>を満たす降水域の出現の有無」に注目した検証を実施している。一方で、「外れ(現象あり、予測なし)」とされる事例でも、「降水量が閾値未満」、「形状が条件を満たさない」、「検証対象時刻と異なる予報時間に線状降水帯を予測」など、予測が外れたとする理由は様々である。線状降水帯の条件を満たさないとしても周辺には強い降水を予測していることも考えられる。数値予報の現状・課題を多面的に把握するためには、線状降水帯の出現の有無に加え、線状降水帯予測で注目したい要素(線状降水帯の実況との距離、降水量の差など)を考慮した客観的な指標を用いて、数値予報モデル間の性能比較や誤差特性を把握することも重要である。

本節では、線状降水帯予測の評価の一環として検討している降水の位置ずれを考慮した評価指標およびそれを用いた検証結果の例について報告する。

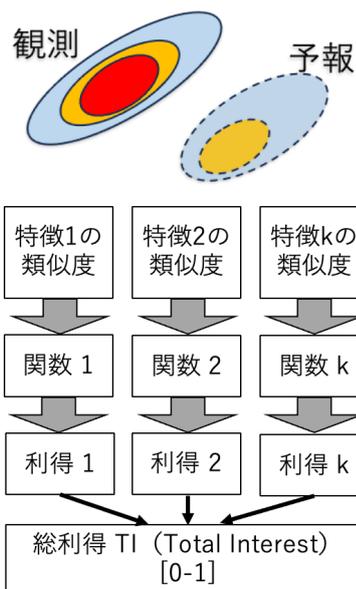


図 4.11.1 MODE 法に基づいた検証手法の概要。

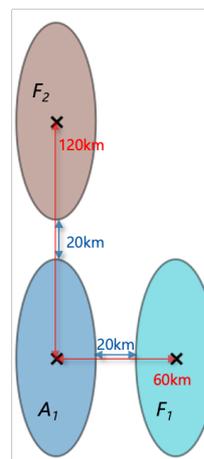


図 4.11.2 仮想的な線状降水帯の観測 ( $A_1$ ) および予測 ( $F_1$ ,  $F_2$ ) の位置関係の例。青色矢印は観測と予測の最短距離、赤色矢印は観測と予測の重心間距離を示す。

### 4.11.2 線状降水帯の位置ずれを考慮した評価指標

本節で示す評価指標においては、「線状降水帯」とは以下に示すような様々な特徴量をもった降水イベントとみなす。

- 降水強度(最大降水量、平均降水量など)
- 時間的特徴(発生時刻、持続時間など)
- 空間的特徴(面積、中心位置、重心位置、長さ、アスペクト比など)

ここでは、これらの特徴量を用いて総合的な類似度をスコア化し、検証に用いるオブジェクトベースの代表的な評価手法であるMODE(Method for Object-based Diagnostic Evaluation)法(Davis et al. 2009)を参考に、降水の位置ずれの影響について着目した指標を作成した(星野2024)。検証手法の概要を図4.11.1に示す。具体的な手順は以下の通りである。

<sup>1</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/hyouka/hyouka-report/r04report/r04report\\_index.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/hyouka/hyouka-report/r04report/r04report_index.html)

<sup>2</sup> 前3時間降水量が100mm以上の降水域で、面積が500km<sup>2</sup>以上、長軸短軸比(アスペクト比)2.5以上、前3時間積算降水量最大値が150mm以上となるものを条件としている。

- (a) 観測値／予報値の降水量分布から、条件にあった降水域を抽出し、それぞれ  $A_i, F_j (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m)$  とする。ここで、 $A$  は観測による降水域、 $F$  は予報による降水域を示し、 $n$  は条件に合った観測による降水域の総数、 $m$  は条件に合った予報による降水域の総数を示す。
- (b)  $A_i, F_j$  の組み合わせに対して、距離や降水量の差などの注目したい要素ごとに、その値から類似度を表す利得 (Interest)  $I_p (p = 1, \dots, k)$  を算出する。ここで、 $k$  は利得を算出する要素の総数を示す。 $I_p$  は  $[0,1]$  の範囲をとり、 $I_p$  の算出には両者の適合度が高くなると 1 に近づくような利得関数を設計して用いる。
- (c)  $I_p (p = 1, \dots, k)$  それぞれについて設定した重み  $C_p (p = 1, \dots, k)$  をかけた値を積算し、その総和を  $A_i$  と  $F_j$  の総利得 (Total Interest;  $TI_{ij}$ ) とする。
- (d)  $TI_{ij}$  が別途設定した閾値を超えた場合、 $A_i$  と  $F_j$  は対応 (適中) しているとみなす。

今回作成した指標では位置ずれに着目した。図 4.11.2 に示す仮想的な線状降水帯の例において、観測と予測の降水域の最短距離は予測  $F_1$ 、予測  $F_2$  ともに 20 km と等しい一方で、重心間距離は予測  $F_1$  で 60 km、予測  $F_2$  で 120 km であり、位置関係からは予測  $F_1$  の方が適中度高くなる指標が望ましい。このような状況を考慮のうえ、予測を適切に評価可能とする要素として、降水域間の最短距離、降水量の重心間距離などの要素を選択し、スコア算出における重み付けを考慮した。今回作成した指標に用いた要素と重みを表 4.11.1 に示す。ここで、指標に用いた要素の一つである IOU (Intersection Over Union) は、2つの領域 (ここでは観測と予測) がどれだけ重なっているかの指標値 (0-1) である (図 4.11.3)。指標の算出に用いる利得関数は図 4.11.4 の通りとし、 $TI$  の閾値 (適中とみなす値) は 0.5 に設定した。関数、閾値は従来の業績指標による捕捉率の結果と比較し調整した。図 4.11.2 の例で  $F_1$  及び  $F_2$  の  $TI$  を計算すると、それぞれ式 (4.11.1)、式 (4.11.2) のとおりとなる。

| 要素        | 値の有効範囲              | 重み  |
|-----------|---------------------|-----|
| 最短距離      | 0-100[km]           | 0.4 |
| 降水量の重心間距離 | 0-150[km]           | 0.5 |
| IOU       | 0-1 (0.5 以上は 1 とする) | 0.1 |

$$IOU = \frac{\text{観測と予測の領域の共通部分}}{\text{観測と予測の領域の和集合}}$$

IOU = 0.24 / 2.24 = 0.11      共通部分=0.24 和集合=2.24

図 4.11.3 指標算出に用いる要素 IOU (Intersection Over Union) の計算例。

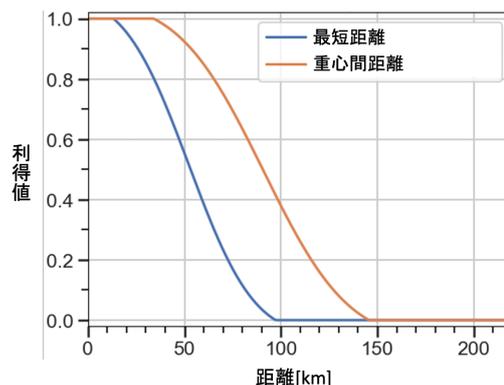


図 4.11.4 指標算出に用いる最短距離、降水量の重心間距離それぞれに対応する利得関数。

$$\begin{aligned}
 TI(F_1) &= I_1 \times C_1 + I_2 \times C_2 + I_3 \times C_3 \\
 &= 0.96 \times 0.4 + 0.85 \times 0.5 + 0 \times 0.1 \\
 &= 0.809
 \end{aligned}
 \tag{4.11.1}$$

$$\begin{aligned}
 TI(F_2) &= I_1 \times C_1 + I_2 \times C_2 + I_3 \times C_3 \\
 &= 0.96 \times 0.4 + 0.17 \times 0.5 + 0 \times 0.1 \\
 &= 0.469
 \end{aligned}
 \tag{4.11.2}$$

ここで、 $I_1$  は最短距離の利得値、 $C_1$  は最短距離に対する重み、 $I_2$  は重心間距離の利得値、 $C_2$  は重心間距離に対する重み、 $I_3$  は IOU の利得値、 $C_3$  は IOU に対する重みである。 $TI$  の閾値 (適中) とみなす値を 0.5 に設定した場合、予測  $F_1$  ( $TI = 0.809$ ) は適中、予測  $F_2$  ( $TI = 0.469$ ) は外れとなる。

### 4.11.3 検証結果の例

4.11.2 節で定義した指標を用いての  $TI$  算出例を図 4.11.5 に示す。この例では、観測された線状降水帯  $A_1$  に対して、MSM による予測 ( $M_1$ ) および LFM による予測 ( $L_1$ ) の  $TI$  はそれぞれ 0.590 および 0.400 で、観測と予測の類似度は  $M_1$  の方が高い。また、 $TI$  が適中とみなす閾値を 0.5 と設定した場合、 $M_1$  は適中となる一方、 $L_1$  は観測と対応しないものとみなされる。このように、評価指標  $TI$  を用いることにより、線状降水帯予測の数値予報モデル間の性能比較を客観的に行うことが可能となる。

その他の検証例として、数値予報モデルによる線状降水帯予測の位置ずれをどの程度許容するかにより、線状降水帯予測の捕捉率がどのように変わりうるかを図 4.11.6 に示す。また、線状降水帯の条件を満たさないとしても周辺には強い降水を予測しているような状況も考慮し、線状降水帯の検出条件のうち、最大降水量を 150 mm/3h から 130 mm/3h、面積を 500 km<sup>2</sup> か

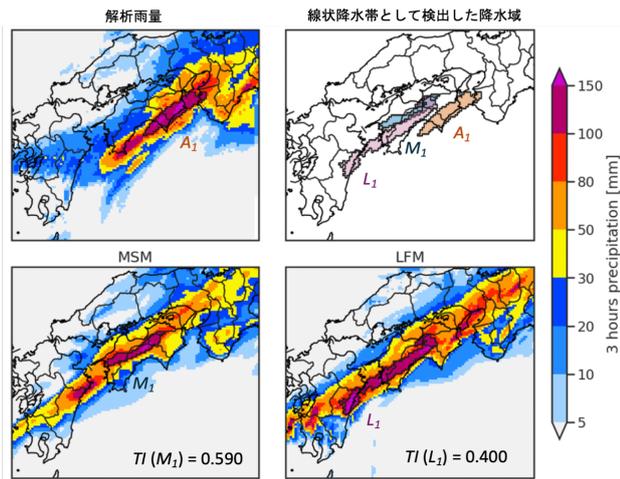


図 4.11.5 線状降水帯予測の  $TI$  算出例。対象時刻は 2023 年 6 月 2 日 12 時の実況資料と  $FT=12$  の予測結果を示す。左上は解析雨量、左下は MSM、右下は LFM の前 3 時間降水量を示し、それぞれの図で  $A_1$ ,  $M_1$ ,  $L_1$  で示した降水水域は線状降水帯として検出した降水域を示す。右上は線状降水帯として検出した降水域をまとめて示す。また左下、右下の図では、 $M_1$ ,  $L_1$  で示した降水域の予測についての  $TI$  値を示す。

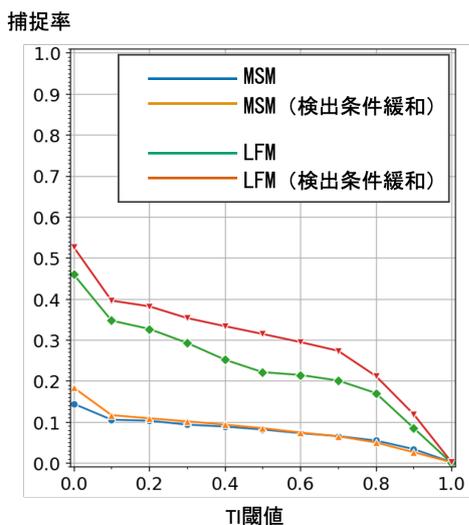


図 4.11.6  $TI$  の閾値を変えた場合の捕捉率の変化 ( $FT=15$ )。検証期間は MSM は 2014 年-2024 年の 5-10 月、LFM は 2023 年 6-10 月および 2024 年 5-10 月。MSM、LFM それぞれについて、最大降水量、面積およびアスペクト比の線状降水帯検出条件を緩和した場合の結果も示す。

ら  $450 \text{ km}^2$ 、アスペクト比を 2.5 から 2.3 に引き下げ、条件を緩和した場合の結果も参考として併せて示す。 $TI$  の閾値設定によって幅はあるものの、 $TI$  閾値 0.5 あたりでみると、今回用いた設定では MSM の捕捉率は 0.1 程度、LFM の捕捉率は 0.2 から 0.3 程度であることが分かる。

#### 4.11.4 まとめ

本節では線状降水帯予測の評価の一環として検討中の、降水の位置ずれを考慮した評価手法の内容とその検証結果の例について示した。今回示した検証手法は考慮に入れる要素の選択や利得関数の設定などに任意性があるものの、線状降水帯予測の数値予報モデル間の性能比較を位置ずれを考慮の上で客観的に行うことが可能となる。今後、検証事例をさらに蓄積するとともに、線状降水帯予測の時刻ずれの考慮やアンサンブル予報の検証への応用など、数値予報モデルの特性把握に有用な評価手法の検討を引き続き進めていく。

#### 参考文献

Davis, Christopher A., Barbara G. Brown, Randy Bullock, and John Halley-Gotway, 2009: The Method for Object-Based Diagnostic Evaluation (MODE) Applied to Numerical Forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Weather and Forecasting*, **24**, 1252 – 1267, doi:10.1175/2009WAF2222241.1.

星野俊介, 2024: 位置ずれ等を考慮した線状降水帯予測の検証. 日本気象学会 2024 年度 秋季大会予稿集, A366.

気象庁, 2020: 令和 2 年 7 月豪雨. 災害をもたらした気象事例 令和 2 年 8 月 11 日, (Available online at [https://www.data.jma.go.jp/stats/data/bosai/report/2020/20200811/jyun\\_sokuji20200703-0731.pdf](https://www.data.jma.go.jp/stats/data/bosai/report/2020/20200811/jyun_sokuji20200703-0731.pdf)).

気象庁, 2021: 線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ (第 1 回会合). 線状降水帯の予測精度向上に向けた取組み状況と課題, (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjokousuitai.WG/part1/part1-shiryo3.pdf>).

## 第5章 成果発表

### 5.1 論文・報告

2024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)

Lock, A. P., M. Whittall, A. J. Stirling, K. D. Williams, S. L. Lavender, C. Morcrette, K. Matsubayashi, P. R. Field, G. Martin, M. Willett, J. Heming, The performance of the CoMorph-A convection package in global simulations with the Met Office Unified Model, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 3527-3543,

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, The JRA-3Q reanalysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 102, 49-109.

Okamoto, K., T. Ishibashi, I. Okabe, H. Shimizu, Extension of all-sky radiance assimilation to hyperspectral infrared sounders, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 5472-5497, <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.4883>.

Yokota, S., Jacob R. Carley, Ting Lei, Shun Liu, Daryl T. Kleist, Yongming Wang, Xuguang Wang, Scale- and Variable-Dependent Localization for 3D-EnVar Data Assimilation in the Rapid Refresh Forecast System, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16, e2023MS004098, <https://doi.org/10.1029/2023MS004098>

Baba, Y., M. Ujiie, Y. Ota, H. Yonehara, Implementation and evaluation of a spectral cumulus parameterization for simulating tropical cyclones in JMA-GSM, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 2045-2068, <https://doi.org/10.1002/qj.4689>

#### 5.1.2 報告

Nakamura, Y., K. Yoshimoto, K. Yamamoto, Operational Use of Ground-based Microwave Radiometer Data in JMA's Regional NWP Systems, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 54, 6-09.

Kimura, T., K. Matsubayashi, K. Aranami and Y. Kitamura, Strong Stability Preserving Runge-Kutta method in HE-VI and split-explicit short time step integration, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 54, 9-03.

Nakagawa, M., H. Yoshimura, K. Matsubayashi, Testing a Cumulus Parameterization Scheme for the Convective Gray Zone in JMA's Global Model, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*, 54, 4-07.

Ingleby, B., G. Arduini, G. Balsamo, S. Boussetta, K. Ochi, E. Pinnington, P. Rosnay, Improved two-metre temperature forecasts in the 2024 upgrade, *ECMWF Newsletter*, 178, 24-29. <http://dx.doi.org/10.21957/1a8466ec2f>

Zuo, H., M. A. Balmaseda, E. Boisséson, P. Browne, M. Chrust, S. Keeley, K. Mogensen, C. Pelletier, P. Rosnay, T. Takakura, ECMWF's next ensemble reanalysis system for ocean and sea ice: ORAS6, *ECMWF Newsletter*, 180, 30-36, <http://dx.doi.org/10.21957/hd38w19ab6>

横田祥, メソ気象を対象とするデータ同化の展望, 月刊海洋, 56, 735-740.

## 5.2 国際会議・会合

2024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<sup>1</sup>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<sup>2</sup>、発表題名<sup>3</sup>、発表日<sup>4</sup>、「発表形式」の順で示している。

- 季節内から季節予測パネル電話会議第6回（ECMWF、2/27、オンライン）
  - － 久保勇太郎
- 観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ第8回（WMO・スウェーデン気象・水文研究所、5/27 - 5/30、対面）
  - － 太田行哉\*、村上康隆、宮岡健吾、近藤圭一、村田英彦「Expanding the assimilation of humidity」（5/30 口頭）
- 大気トレーサー輸送モデル相互比較計画ワークショップ（米国大気研究センター、5/28、ハイブリッド）
  - － 眞木貴史\*、近藤圭一、石島健太郎、関山剛（以上 気象研究所）、坪井一寛（気象庁大気海洋部）、中村貴「Introduction of independent satellite bias correction on CO2 flux inversion」（5/28 口頭）
- 国際海上風科学チーム会議2024（IOVWST、5/29 - 5/31、対面）
  - － 井岡佑介「Impact study of scatterometer winds on heavy rain forecast in the JMA's regional forecast model」（5/29 ポスター）
- 二酸化炭素国際会議第11回（ブラジル国立宇宙研究所、7/29 - 8/2、対面）
  - － 眞木貴史\*、近藤圭一、石島健太郎、関山剛（以上 気象研究所）、坪井一寛（気象庁大気海洋部）、中村貴「Impact of independent satellite bias correction method on CO2 flux inversion」（8/2、ポスター）
- 全球気象予報診断ワークショップ（ECMWF、9/9 - 9/12、対面）
  - － 千葉丈太郎\*、久保勇太郎、越智健太、足立恭将、平原翔二、小森拓也「Study on Subtropical Marine Stratocumulus toward JMA/MRI-CPS4」（9/10 ポスター）
  - － 松川知紘\*、J. M. Rodriguez, S. F. Milton「Process-based diagnostics using atmosphere budget analysis and nudging technique to identify sources of model systematic errors in global MetUM」（9/10 口頭）
- 国際掩蔽作業部会ワークショップ第10回（IROWG、9/12 - 9/18、ハイブリッド）
  - － 村上康隆「Altitude dependency of GNSS RO data assimilation impact on JMA's Global NWP system」（9/17 ポスター）
- 欧州気象衛星開発機構気象衛星会議2024（EUMETSAT、9/30 - 10/4、対面）
  - － 浦田知哉「Preliminary studies on the assimilation of Himawari-10/GHMS in the JMA's NWP system using its simulation data」（10/3 口頭）
  - － 清水宏幸\*、村田英彦、可知美佐子（JAXA）「Development for assimilation of superobbed AMSR3 humidity sounding channels in the JMA's global NWP system」（10/1 ポスター）
- 欧州領域モデリング会議第46回・短期数値予報会議第31回（EUMETNET C-SRNWP、9/30 - 10/3、ハイブリッド）
  - － 河野耕平\*、荒波恒平、沢田雅洋、松林健吾、草開浩、安齋太郎、西本秀祐、田ノ下潤一、奥川椋介、木村翼、川田英幸、欠畑賢之、服部宏紀、松葉史剛、安西悠理「Development of Limited-Area NWP Systems at JMA」（9/30 ポスター）
- 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）会議（WMO）
  - － 太田行哉（9/10, 11/26）
  - － 太田行哉「STATUS UPDATE ON WDQMS -JMA-, Current status of Lead Centre JMA for land surface observation in RA II」（10/15-17 口頭）
- 国際データ同化シンポジウム第10回（理化学研究所、10/21 - 10/25、対面）
  - － 横田祥\*、畔野貴弘、石川宜広、河野耕平「Hybrid 4DVar with Mesoscale Ensemble Prediction System for JMA's Mesoscale Analysis」（10/21 ポスター）
- WCRP 再解析国際会議第6回（WCRP・気象庁・ClimCORE・東京大学、10/28 - 11/1、ハイブリッド）
  - － 古林慎哉「Reanalysis: How it has evolved and what lies ahead」（10/28 口頭）

<sup>1</sup> 略号については付録を参照。

<sup>2</sup> 共著の場合、発表者には\*をつけている。

<sup>3</sup> 会議の場合は、発表題名がないこともある。

<sup>4</sup> 開催期間が1日の場合、発表日は省略している。

- 高坂裕貴\*、古林慎哉、千葉丈太郎、田中泰宙、原田やよい、小林ちあき、直江寛明「The JRA-3Q reanalysis」(10/28 口頭)
- 吉田拓馬\*、藤井陽介、住友雅司、杉本裕之「Development of a Quarter-Degree 4D-Var Reanalysis of Global Ocean (MOVE/MRI.COM-G4)」(10/28 口頭)
- 台風委員会気象作業部会 (WGM) 会議第 7 回 (ESCAP/WMO, 10/30 -10/31、ハイブリッド)
  - 福浦崇史\*、久保川陽呂鎮、管野淳平、長谷川寛「AOP5: Storm Surge Watch Scheme」(10/31 口頭)
- KIAPS 国際シンポジウム 2024 (KIAPS, 11/4 - 11/6、対面)
  - 計盛正博「Current status and future developments for operational NWP systems in JMA」(11/04 口頭)
- 数値実験作業部会 (WGNE) 第 39 回会議 (WMO, 11/4 - 11/8、ハイブリッド)
  - 氏家将志「Center report from JMA」(11/5 口頭)、「WGNE inter-comparison of Tropical Cyclone Track forecast 2023」(11/6 口頭)
- OceanPredict シンポジウム 2024 (OceanPredict・UNESCO-IOC、11/18 - 11/22、ハイブリッド)
  - 吉田拓馬\*、藤井陽介、住友雅司、石川一郎「Development of the Four-Dimensional Variational Global Ocean Data Assimilation System for Coupled Predictions in Japan Meteorological Agency」(11/18、口頭)
  - 浅井博明\*、平原幹俊、吉田拓馬「Assessing the impact of assimilating high-resolution SLA fields (SWOT) into MOVE/MRI.COM-JPN」(11/18、ポスター)

### 5.3 国内会議・会合

2024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<sup>1</sup>、主催、開催期間、開催形式、発表者<sup>2</sup>、「発表題名」「発表日<sup>3</sup>」「発表形式」の順で示している。

- GOSAT-GW シンポジウム (JAXA、3/13、対面)
  - － 村田英彦「気象庁の業務への AMSR シリーズの貢献」(口頭)
- メソ気象研究会第 57 回 (日本気象学会、5/20、ハイブリッド)
  - － 横田祥「メソ気象を対象とするデータ同化の展望」(口頭)
- 日本気象学会春季大会 (5/21 - 5/25、オンライン)
  - － 太田洋一郎「気象庁全球アンサンブル予報システムにおける SHUM の試行」(5/21 口頭)
  - － 奥川棕介\*、沢田雅洋、草開浩、西本秀祐「近年の気象庁局地モデルにおける雲物理過程の改良」(5/21 口頭)
  - － 荒波恒平\*、藤田匡、門脇隆志、氏家将志、小泉耕、河野耕平、宮岡健吾、村田英彦「気象庁現業数値予報システムの開発」(5/21 口頭)
  - － 澤田謙「非ガウス型誤差分布の導入に向けた調査」(5/22 口頭)
  - － 横田祥\*, Jacob Carley, Ting Lei, Shun Liu, Catherine Thomas, Daryl Kleist, Yongming Wang, Xuguang Wang「Scale/Variable-Dependent Localization を用いた EnVar によるレーダー反射強度の直接同化」(5/22 口頭)
- 地球惑星科学連合 2024 大会 (5/26 - 5/31、ハイブリッド)
  - － 清水宏幸「Development for assimilation of superobbed AMSR3 humidity sounding channels in the JMA's global NWP system」(5/27 ポスター)
- 非静力学モデルに関するワークショップ第 26 回 (9/19 - 9/20、対面)
  - － 西本秀祐「MYNN3 の計算安定性向上のための改良」(9/19 口頭)
  - － 荻原弘堯\*、荒波恒平、相河卓哉「asuca の高速化に向けた単精度化調査」(9/19 口頭)
  - － 川田英幸\*、服部宏紀、欠畑賢之、松葉史剛、河野耕平「局地アンサンブル予報システムにおける SST 摂動の開発」(9/20 口頭)
- CONSEO マイクロ波放射観測 WG 第 1 回 (9/26、オンライン)
  - － 村田英彦「気象庁でのマイクロ波放射計の利用」(口頭)
- 大気化学討論会第 29 回 (10/9 - 10/11、対面)
  - － 眞木貴史\* (気象研究所)、中村貴「衛星観測二酸化炭素観測データの特徴について」(10/9 口頭)
- 気候変動シリーズ第 4 回 気候変動の最新科学研究 (CONSEO、10/23、対面)
  - － 計盛正博「気象予報における衛星の役割」(口頭)
- 日本気象学会秋季大会 (11/12 - 11/15、対面)
  - － 眞木貴史\* (気象研究所)、中村貴「独立逆解析を用いた軌道上炭素観測衛星 2 号機 (OCO-2) のバイアス評価」(11/13 口頭)
  - － 高橋由実子\*、黒木志洗、氏家将志「気象庁全球モデルの高速化に向けた浮動小数点数単精度化の調査」(11/15 ポスター)
- 地球観測ミッション合同 PI ワークショップ (JAXA、11/18 - 11/21、ハイブリッド)
  - － 村田英彦\*、近藤圭一、草野直人、豊川将一、當眞嗣淳、安藤慧、浦田知哉、清水宏幸「Utilization of water vapor, clouds and precipitation information from space-based microwave observation in JMA operational numerical weather prediction systems」(11/20 口頭)
- 陸モデル開発検討会 2024 年度 (11/28 - 11/29、対面)
  - － 須藤康平\*、米原仁、氏家将志、草開浩「気象庁全球モデルにおける陸面過程開発の進捗状況」(12/29 口頭)
- 数値モデル研究会第 15 回 (気象庁、12/16、ハイブリッド)
  - － 林昌宏「赤外サウンダ利用の現状と課題 一次期ひまわり赤外サウンダ利用に向けて-」
  - － 村上康隆「地上からの水蒸気観測データ利用の現状と課題」

<sup>1</sup> 略号については付録を参照。

<sup>2</sup> 共著の場合、発表者には\*をつけている。

<sup>3</sup> 開催期間が 1 日の場合、発表日は省略している。

## 5.4 数値予報課コロキウム

表 5.4.1: 2024 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  |
|-----------|---|---|
| 3 月 14 日  | 高坂裕貴・古林慎哉（数値予報課）、藤井陽介（気象研究所）、池内光希・中村尚（東京大学先端科学技術研究センター） | ECMWF 年次セミナー（Earth System Reanalysis、2023 年 9/4-8 英国レディング開催）報告会 |
| 3 月 21 日  | 秋元銀河  | ECMWF 派遣報告（データ同化を用いた物理過程の最適化）                                   |
| 3 月 21 日  | 越智健太  | ECMWF 派遣報告（積雪データ同化の開発）  |
| 3 月 25 日  | 大井川正憲、畔野貴弘、石川宜広、河野耕平                                    | メソ解析へのハイブリッド同化手法の導入に向けた開発進捗報告                                   |
| 3 月 27 日  | 平井陸也、氏家将志、米原仁、下川直史、原政之                                  | 気象庁全球モデルにおける寒候期での過度な低温予測事例の調査と、極端な静穏時における気温時系列飛び跳ねの原因調査         |
| 5 月 7 日   | 太田洋一郎   | 気象庁全球アンサンブル予報システム（GEPS）におけるモデルアンサンブル手法の高度化の開発（その 1）             |
| 5 月 16 日  | 横田祥   | NCEP 派遣報告（メソ同化の背景誤差の改良）   |
| 7 月 11 日  | 須藤康平  | 気象庁全球モデルの陸面過程における LAI（葉面積指数）気候値データの更新                           |
| 7 月 18 日  | 清水宏幸  | メソ・局地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                         |
| 7 月 25 日  | 浦田知哉  | メソ・局地解析におけるマイクロ波気温サウンダ窓チャンネルの利用                                 |
| 9 月 4 日   | 清水宏幸、浦田知哉、渡口椋、豊川将一                                      | メソ・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）                              |
| 9 月 5 日   | 高橋由実子、黒木志洸  | 気象庁全球モデルの高速化に向けた浮動小数点数単精度化の進捗状況と問題事例紹介                          |
| 9 月 17 日  | 川口真司、太田洋一郎  | 次期全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システムの総合性能評価試験報告                          |
| 9 月 26 日  | 石井恭介  | 新潟・名瀬・鹿児島 DRAW のレーダー利用再開（性能評価試験報告）                              |
| 10 月 4 日  | 関口亮平、久保勇太郎、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のオゾン同化に関する改良について（業務化試験報告）                              |
| 10 月 4 日  | 久保勇太郎、越智健太、千葉丈太郎、吉田拓馬、関口亮平（数値予報課）、足立恭将、出牛真、平原翔二（気象研究所）  | 次期季節予測システム JMA/MRI-CPS4 の開発進捗                                   |
| 10 月 7 日  | 米原仁、数値予報課 AI 気象モデルの利用可能性調査 WG                           | 数値予報課における AI 気象予測の利用可能性調査                                       |
| 10 月 10 日 | 横田祥、畔野貴弘、石川宜広、河野耕平                                      | メソアンサンブル予報システムを用いたメソ解析へのハイブリッド同化手法の導入の検討                        |
| 10 月 18 日 | 高田伸一  | 降雪量ガイダンスの改良   |
| 10 月 31 日 | 久保川陽呂鎮、福浦崇史、菅野淳平、長谷川寛                                   | アジア域高潮アンサンブル予報システムの台風ポーガス改善                                     |
| 11 月 8 日  | 清水宏幸、浦田知哉、渡口椋、豊川将一                                      | メソ・局地解析における観測データ利用手法改良（業務化試験報告）                                 |
| 11 月 28 日 | 當眞嗣淳  | 全球解析における静止気象衛星の CO2 バンド CSR の利用                                 |

| 開催日    | 発表者                          | 発表表題  |
|--------|------------------------------|---|
| 12月5日  | 久保川陽呂鎮                       | アジア域高潮アンサンブル予報システムの台風ボーガス改善（業務化試験報告）について                |
| 12月6日  | 草開浩、西本秀祐                     | メソ数値予報システムの更新（性能評価試験報告）・メソ解析インターモデルにおける境界層過程の計算安定性向上の改良 |
| 12月17日 | 米原仁、太田洋一郎、諸田雪江               | 次期全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システムの業務化試験報告                     |
| 12月19日 | 吉田拓馬、住友雅司（数値予報課）、藤井陽介（気象研究所） | 次期全球海洋データ同化システム（MOVE/MRI.COM-G4）の開発進捗                   |

## 第6章 連携・共同研究

### 6.1 気象研究所との開発連携

2024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。

- (a) 数値予報システム（全球）の予測精度向上  
**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等の知見の共有。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
- (b) 波浪モデルの予測の改善精度向上  
**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
- (c) 季節予報システムの予測精度向上  
**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、第三研究室）
- (d) 気候データ同化の高度化
  - (a) **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
  - (b) **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
- (e) 海況監視予測システムの予測精度向上  
**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 海氷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。海洋モデルの更なる高速化・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）
- (f) 大気化学モデルおよび観測データ利用の高度化  
**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三研究室
- (g) 数値予報システム（メソ、局地）の予測精度向上  
**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
- (h) 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  
**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
- (i) 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** 局地アンサンブルからメソアンサンブルへ確率情報等のプロダクトをシームレスに作成できる両システムの最適仕様作成についての助言  
**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
  - (b) **内容** 富岳政策対応枠で実施予定の「局地アンサンブル強化の方向性評価」への協力  
**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
- (j) 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、気象予報研究部第二研究室
  - (b) **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
  - (c) **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、気象予報研究部第二研究室

(k) 数値予報システム（全球、メソ、局地）の予測精度向上、ガイダンスの高度化

**内容** 今後のモデル開発に資する線状降水帯の検証に関する知見の情報共有、AI 気象モデルについての知見の情報共有

**連携先** 台風・災害気象研究部第二研究室, 気象観測研究部第三研究室

(l) AI 技術

**内容** ダウンスケーリング等、AI 技術の知見の共有

**連携先** 全球大気海洋研究部第三研究室

## 6.2 気象衛星センターとの共同研究

(a) 大気追跡風の精度向上へ向けての調査

**内容** IASI の L2 プロダクトから導出される 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（2024 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<br>及び気象データの利活用研究の推進                 | JST 共創の場形成<br>支援プログラム<br>(共同研究契約) | 2021-2025 | 東京大学   | 共同研究者:<br>根本昇<br>長谷川昌樹<br>荒波恒平<br>沢田雅洋<br>河野耕平<br>清水宏幸<br>浦田知哉<br>古林慎哉<br>高坂裕貴  |
| 今後の高性能計算機の動向を見据えた<br>気象庁数値予報モデルの性能評価                    |                                   | 2023-2025 | 理化学研究所 | 共同研究者:<br>佐藤芳昭<br>雁津克彦<br>荒波恒平<br>氏家将志<br>河野耕平                                  |
| 高解像度波浪再解析による日本沿岸長期<br>変動特性の解明                           | 科研費基盤研究<br>(C)                    | 2022-2024 | 気象研究所  | 研究協力者:<br>櫻木智明  |
| 宇宙からのマイクロ波放射観測による<br>水蒸気、雲、降水情報の気象庁現業数<br>値予報システムでの利用研究 | 第 3 回地球観測研<br>究公募                 | 2022-2024 | JAXA   | 研究代表者:<br>村田英彦<br>研究協力者:<br>近藤圭一<br>草野直人<br>豊川将一<br>當眞嗣淳<br>安藤慧<br>浦田知哉<br>清水宏幸 |
| 顕著現象予測精度向上を目指した粒子<br>フィルタによるハイブリッドデータ同<br>化手法の構築        | 科研費若手研究                           | 2021-2024 | 気象研究所  | 研究代表者:<br>近藤圭一  |
| 集中豪雨の予測精度向上に資する晴天<br>放射輝度のキャラクターゼーション                   | 「富岳」政策対応<br>枠                     | 2023-2024 | 千葉大学   | 研究代表者:<br>村田英彦<br>共同研究者:<br>林昌宏<br>秋元銀河   |
| 台風防災に資する気象庁全球スペクト<br>ルモデル GSM の改良に関する研究                 | 共同研究契約                            | 2023-2024 | 京都大学   | 共同研究者:<br>佐藤 芳昭<br>藤田匡<br>笹川悠<br>小泉耕<br>氏家将志                                    |

| 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  |
|---|----------------------------|-----------|--|---|
| 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<br>琉球大学<br>気象研究所                                | 研究協力者：<br>氏家将志<br>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：<br>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<br>海洋研究開発機構<br>九州大学<br>気象研究所                    | 研究協力者：<br>小泉耕<br>高坂裕貴<br>住友雅司<br>吉田拓馬   |
| 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<br>理化学研究所<br>水産研究・教育機構<br>海洋研究開発機構<br>東京大学     | 研究協力者：<br>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<br>海洋研究開発機構<br>気象研究所<br>東京都立大学<br>東京大学<br>筑波大学 | 研究協力者：<br>越智健太  |
| 高解像度・大アンサンブルシミュレーションを用いた線状降水帯に寄与する環境場の解明      | 科研費基盤研究 (C)                | 2021-2024 | 気象研究所  | 研究協力者：<br>横田祥   |
| 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：<br>川田英幸<br>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：<br>計盛正博<br>田中泰宙<br>笹川悠<br>氏家将志   |
| 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気候システム研究系特定共同研究 | 2023-2024 | 東京大学   | 研究代表者：<br>氏家将志<br>研究協力者：<br>米原仁<br>金浜貴史<br>木南哲平<br>高橋由実子<br>齊藤慧<br>黒木志洸<br>林田和大<br>須藤康平 |

| 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                      |
|---|---------------|-----------|-----------|-------------------------------------|
| 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<br>枠 | 2023-2024 | 防災科学技術研究所 | 佐藤芳昭<br>雁津克彦<br>藤田匡<br>村上康隆<br>石井恭介 |

## 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。この取り組みのさらなる加速化を図るため、「富岳」政策対応枠<sup>1</sup>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。

本節ではこれらの課題に関する取り組みについて概説する。2025年度の計画は、「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方向性評価

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<sup>2</sup>）。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いる。

本課題では、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。令和6年7月14日9時頃に長崎県で発生した線状降水帯の事例を図6.4.1に示す。LEPSにより、ある閾値を超える超過確率として降水予測の不確実性が表現できていることがわかる。今後は、2025年度末の運用開始に向けて、リアルタイムシミュレーション実験を1日2回（出水期（6月～10月））実施する。これにより実運用前の計算安定性や予測精度を確認し、最終的な準備を行う。また、運用開始以降の改良も見据え、線状降水帯の予測の不確実性を捉えるのにより適した摂動手法検討を行うため、多数回の試行を行う。

### 6.4.3 水平解像度1km版局地モデルのリアルタイム実行

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あげられている。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2km、18時間予報）をさらに高解像度にした場合、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。

<sup>1</sup> 「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

<sup>2</sup> <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjokousuitai.WG/part1/part1-gijigaiyou.pdf>

## 局地アンサンブル予報システム（LEPS）による予測例 （令和6年7月14日9時頃に長崎県で発生した線状降水帯）

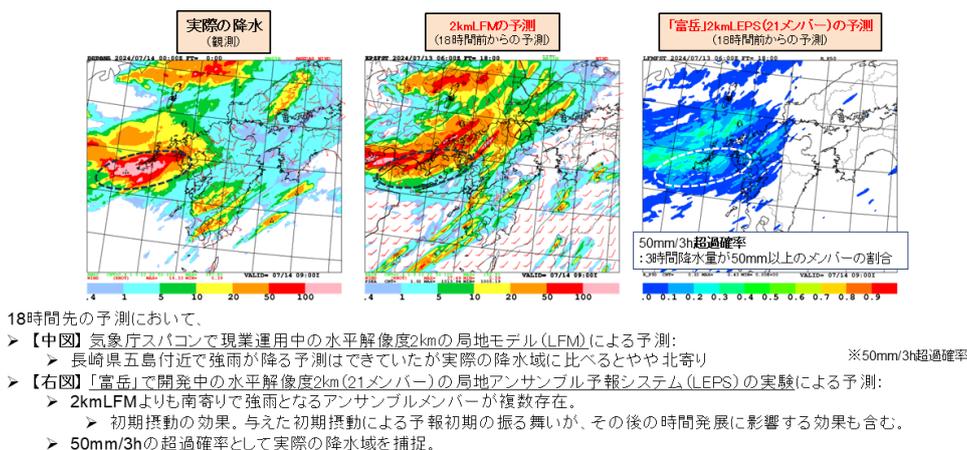


図 6.4.1 局地アンサンブル予報システム（LEPS）の予測例

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1400km×1400kmの限定された領域でリアルタイムに1km LFMの18時間予測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、この開発成果により、現在気象庁が2km LFMを運用している全国領域でも1km LFMの予報が実行できるようになったことを受けて、6月から10月までの期間は全国領域で18時間予測実験を実施した。「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2km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（第3.2節）。2024年度は、解像度1kmのモデルの力学過程、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。図6.4.2に、2024年に発生した線状降水帯事例を対象とした予測結果の例を示す。これとは別に、計算安定性や予測精度の確認のために、冬期間を含む1年分のシミュレーションも非リアルタイムで実施した。図6.4.3にこれまでの富岳1km LFMの実験の仕様についてまとめている。2025年度は、2024年度の開発成果を活かし、2025年度末の解像度1km局地モデルの運用開始に向けて、予測特性を調査しつつモデル改良を継続する。改良したモデルを用いて、長期間（1年程度）の予報試験を実施し、運用開始前の最

終的な精度や計算安定性の確認を行うとともに、LFMガイダンス用の学習用教師データとする。

### 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。2024年12月現在のGSMの水平解像度は約13km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10km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10km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、10kmばかりでなく5km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10km、5km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、10km、5km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（図6.4.4）。

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

## リアルタイム1km局地モデル(LFM)の実行例 (令和6年(2024年)6月21日5時頃に鹿児島県で発生した線状降水帯)

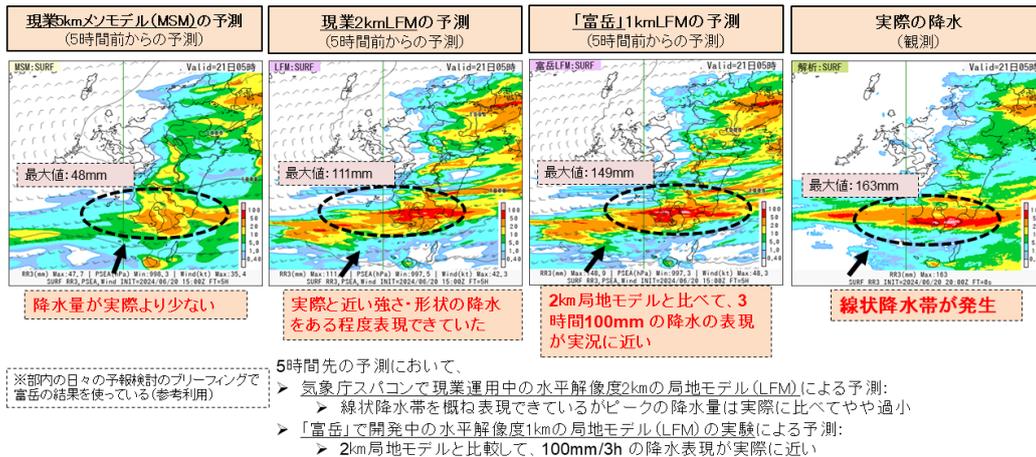


図 6.4.2 リアルタイム 1km 局地モデル (LFM) の実行例

## 富岳1kmLFMの仕様



令和5年および6年の領域  
(本運用で想定する予報領域と同じ)

|       | 富岳<br>1kmLFM<br>(R6)     | 富岳<br>1kmLFM<br>(R5) | 富岳<br>1kmLFM<br>(R4) | 2km LFM<br>(気象庁スパ<br>コンで現業運<br>用中) | MSM<br>(気象庁スパ<br>コンで現業運<br>用中) |
|-------|--------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 水平解像度 | 1km                      | 1km                  | 1km                  | 2km                                | 5km                            |
| 領域    | 日本域                      | 日本域                  | 西日本狭領域               | 日本域                                | 日本と周辺海域                        |
| 水平格子数 | 3161 x 2601              | 3161 x 2601          | 1400 x 1400          | 1581 x 1301                        | 817 x 661                      |
| 予報時間  | 18時間                     | 18時間                 | 18時間                 | 18時間 (最大)                          | 78時間(最大)                       |
| 実行頻度  | 4回/日(03, 09, 15, 21 UTC) | 2回/日(03, 15 UTC)     | 2回/日(03, 15 UTC)     | 24回/日                              | 8回/日                           |

赤字は令和6年から新しくしたもの。  
モデル本体、初期値、境界値は2km LFMと同一設定。

図 6.4.3 富岳 1kmLFM の仕様

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気象庁の現業数値予報システムでの実用化に向けた準備を進め(気象庁 2024)、2024年度末の全球モデル更新において導入される計画である。

2025年度は、高解像度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ひの精緻化の影響を整理し、改良の方向性を固める。また、物理過程の精緻化に係る成果の現業全球数値予報システムへの導入に向けて、全ての計算の単精度化・長いタイムステップでの安定実行等、引き続き高速化に関する開発を進める。

### 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

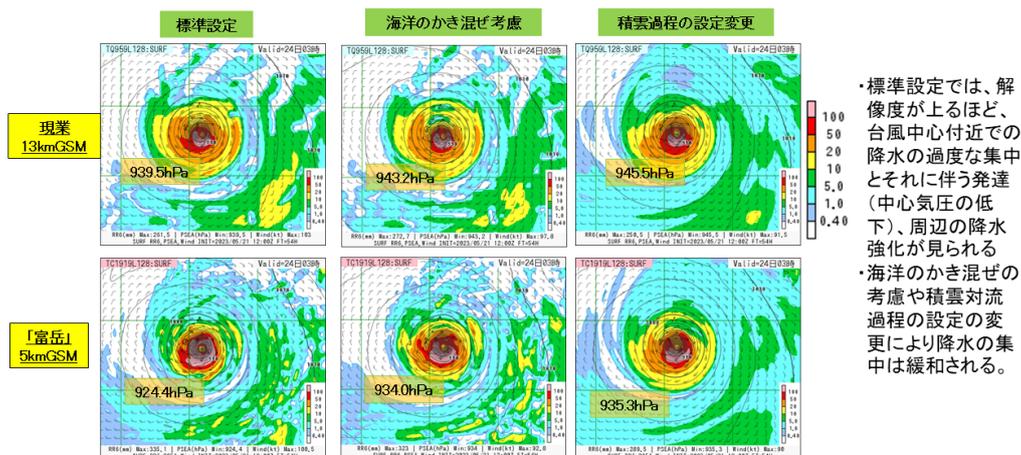
専門知識のある大学や研究機関等の研究者の技術や知見を取り込むことが重要である。一方、このような活動のためには、共同で開発を行うため、数値予報の実験を行う開発基盤が必要である。

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)と予報の実験を行って、その改良版数値予報システムの総合的な性能評価を行う。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

## 高解像度GSMによる令和5年台風第2号の予測事例

令和5年5月24日3時を対象とした54時間後の降水量[mm/6h]予測



・標準設定では、解像度が上がるほど、台風中心付近での降水の過大な集中とそれに伴う発達（中心気圧の低下）、周辺の降水強化が見られる  
 ・海洋のかき混ぜの考慮や積雲対流過程の設定の変更により降水の集中は緩和される。

図 6.4.4 高解像度 GSM による令和 5 年台風第 2 号の予測事例

庁で運用、数値予報でデータを取得、活用しているものの、さら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、本実験システムを用いた共同研究の研究提案を広く募った。その結果、千葉大学、琉球大学及び防災科学技術研究所から研究提案が示され、以下の3件の共同研究を実施することとし、研究開発を進めている。

(a) 「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」

気象衛星ひまわりの晴天放射輝度データについて、高解像度化の効果や地表面の影響等を考慮した利用方法高度化を目指し、2023年度に高解像度化のインパクトの調査、観測誤差設定の見直しを目的とした観測誤差感度調査、千葉大学国際地上リモートセンシング観測網の観測データとの比較調査（キャラクタリゼーション）、JAXA地球観測衛星による地表面の影響調査等を進めた。その結果、晴天放射輝度データの平均化サイズを高解像度化することで解析や予測の精度が向上し水蒸気の分布をより詳細に捉えた可能性が示唆された他、観測誤差設定の見直しにより高解像度化の効果を向上できるなどの知見が得られた。2024年度は、高解像度化された晴天放射輝度データを高密度に同化し、解析の水蒸気分布がさらに改善する結果を得た（図 6.4.5）。一方、予報精度が悪化する事例も見られた他、雪水域において品質の悪いデータが利用されている可能性があることが分かった。

2025年度はこれらの調査をさらに進めるとともに、得られた知見をもとに品質管理手法の開発及びその同化インパクトの調査を実施し、データの利用高度化に向け現業システムでの実装方法を検討する計画である。

(b) 「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」

メソ数値予報システムに同化している液相域のレーダー反射強度から推定した相対湿度の推定精度向上に資する知見を得るべく、現状のモデル気温を用いた融解層除去手法とレーダーデータから推定した手法の比較検証を実施するとともに、偏波パラメータから推定される粒子判別とモデル・観測の水蒸気・気温の関係を調査した。

2025年度は、これらの知見を用いて、偏波パラメータを活用したレーダーによる相対湿度の推定手法の改良案を検討する。

(c) 「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」

現在は利用していない低風速の動径風データの利用に向けて、2024年度は、防災科学技術研究所が作成したレーダービームの地形による遮蔽領域を判定するプログラムも活用して低風速データの割合が大きい低高度データの品質管理手法の開発を進めるとともに、地形影響を受けたデータの予測精度へのインパクト試験を実施した。地形による影響を受けたデータを適切に除去することによってデータ品質及び予測精度が向上することを確認するとともに、偏波パラメータを活用することで更なる改善を図ることができている可能性があることがわかった（図 6.4.6）。

2025年度は、防災科学技術研究所との共同研究を継続し、偏波パラメータも活用した品質管理手法を開発し、地表の影響を受けたデータの数値予報システムへのインパクトを調査する。

2025年度も引き続き、観測データに知見のある研究者と数値予報開発を専門とする当数値予報開発センター

## ひまわりデータの利用高度化 (千葉大学との連携)

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

- 概要：ひまわりの晴天放射輝度（CSR）データについて、高解像度化の効果や地表面の影響等を考慮した利用方法高度化を目指す。
- 高解像度化CSRの間引き距離変更による高密度同化および観測誤差設定の調査を実施
  - 高密度同化、観測誤差設定を調整することでモデル水蒸気場表現の改善を示唆
- 積雪面などの地表面状態がCSRに及ぼす影響について、JAXAが運用するGCOM-C衛星観測などを利用して調査を実施中

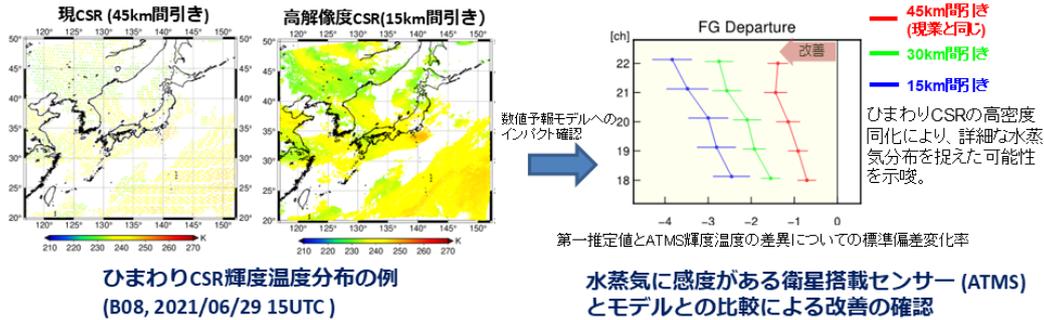
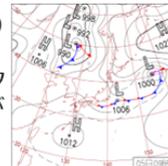


図 6.4.5 ひまわりデータの利用高度化

## レーダー動径風の品質管理手法の高度化

(防災科研との連携)

- 目的：気象庁メソ数値予報システムにおける動径風データの利用手法を高度化
- 低風速の動径風は主に地表付近にて観測される。レーダービーামが地形により遮蔽される影響を受ける場所もある。
- 防災科研の先行研究によるツール・知見を活用し、遮蔽の影響を受けたデータの品質調査を実施。遮蔽に加え偏波パラメータを活用することでデータ品質が向上する可能性を確認。



例) 北寄りの風が吹いている場にて地形遮蔽によって動径風が小さく観測された事例。  
高仰角 (1.3度) では北寄りの風。遮蔽の影響を受ける低仰角では弱風又は南寄りの風

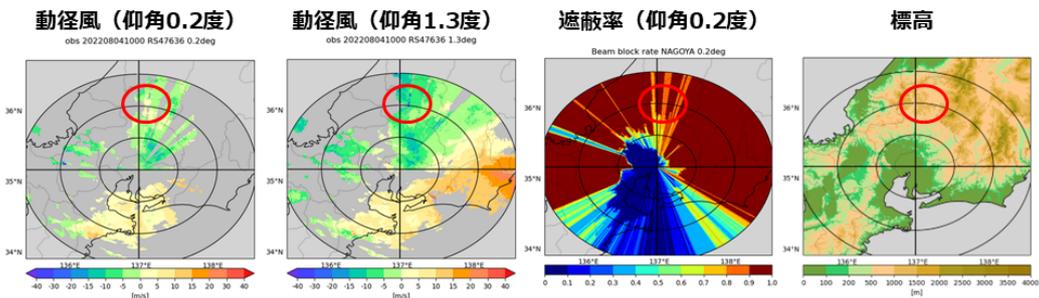


図 6.4.6 レーダー動径風の品質管理手法の高度化

との共同研究による開発加速化を進めていく。

ンター年報 (令和 5 年), 気象庁 数値予報開発センター, 83-90.

### 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, 2024: 全球モデルの開発進捗. 数値予報開発セ

## 第7章 受賞・研究交流

### 7.1 受賞

**対象者** Yuki KOSAKA, Shinya KOBAYASHI, Yayoi HARADA, Chiaki KOBAYASHI, Hiroaki NAOE, Koichi YOSHIMOTO, Masashi HARADA, Naohika GOTO, Jotaro CHIBA, Kengo MIYAOKA, Ryohei SEKIGUCHI, Makoto DEUSHI, Hirotaka KAMAHORI, Toshiyuki NAKAEGAWA, Taichu Y. TANAKA, Takayuki TOKUHIRO, Yoshiaki SATO, Yasuhiro MATSUSHITA, and Kazutoshi ONOGI

**賞名** 気象集誌論文賞

**内容** The JRA-3Q Reanalysis. Journal of the Meteorological Society of Japan, 102, doi: 10.2151/jmsj.2024-004.

**対象者** Shimada, U., M. Hayashi, and A. Mouche

**賞名** 日本気象学会気象集誌 Editors' Highlight

**内容** A comparison between SAR wind speeds and western North Pacific tropical cyclone best track estimates, Journal of the Meteorological Society of Japan, 102, doi: 10.2151/jmsj.2024-031.

**対象者** 気象庁情報基盤部、気象庁大気海洋部、気象研究所、気象衛星センター 気象庁第3次長期再解析開発チーム及び利用調整ワーキンググループ

**賞名** 気象庁長官表彰

**内容** 気象庁第3次長期再解析の実施及び利活用の推進により気候系監視及び季節予報などの高度化に貢献した功績。

### 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** 数値予報モデルの開発に必要な知識・技術の習得  
**期間** 前期：2024年7月1日から3日(3日間)、後期：2024年9月9日から12日(4日間)  
**開催形式** 対面・オンライン併用  
**受講者** 数値予報開発センター：4名、気象衛星センター：1名、地震火山部：1名、他省庁：2名、大学：1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

本研修は当センターと企画課技術開発推進室の共催である。今年度から、地震火山部からも受講生を応募するようになった。

#### 気象庁数値予報モデル研究会第15回

**テーマ** 数値予報モデルにおける観測データの効果的な利用方法について  
**期間** 2024年12月16日  
**開催形式** 対面・オンライン併用  
**参加者** 約120名(大学・研究機関等約15名、庁内約105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)
  - － 管理部会 (MG)：佐藤芳昭<sup>1</sup>(連携に関するコーディネイター)
  - － 情報管理・技術常設委員会 (SC-IMT)
    - \* WMO 統合全球観測システム (WIGOS) データ品質監視システムタスクチーム (TT-WDQMS)：太田行哉 (メンバー)
  - － WMO 統合処理・予報システム常設委員会 (SC-WIPPS)
    - \* 現業気候予報システム専門家チーム (ET-OCPS)：小森拓也<sup>2</sup>(メンバー)
    - \* 気候再解析タスクチーム (TT-CliRen)：古林慎哉 (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)：平原洋一 (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)
- WMO 研究評議会 (Research Board)
  - － 数値実験作業部会 (WGNE)：氏家将志 (部会員)
- WMO 第二地区 (RA II)
  - － インフラ作業部会 (WG-Infrastructure)：佐藤芳昭 (議長)
- 海面高度科学チーム (OSTST)：浅井博明 (メンバー)
- 北東アジア地域海洋観測システム (NEAR-GOOS)
  - － 海洋予報システム作業部会 (OFS-WG)：平原幹俊 (メンバー)
- 季節内から季節予報 (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)

---

<sup>1</sup> 2024 年 1 月まで数値予報開発センターに在籍。以下同じ。

<sup>2</sup> 2024 年 3 月まで数値予報開発センターに在籍。

## 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 期役員候補者選挙管理委員会委員：西本秀祐
  - － 日本気象学会第 43 期委員講演企画委員会委員：西本秀祐
  - － 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委員：小田真祐子
  - － 日本気象学会第 43 期委員 電子情報委員会副委員長：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：佐藤芳昭・計盛正博
- 文部科学省
  - － 「統合的気候モデル高度化研究プログラム」「全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発」運営委員会委員：佐藤芳昭・計盛正博
- 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  |
| 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   |
| 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                             |

| 略語       | 原語  | 訳または意味  |
|----------|---|---|
| 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  |
| 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  |
| 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  |

| 略語      | 原語   | 訳または意味   |
|---------|--|--|
| 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   |
| 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   |

| 略語              | 原語  | 訳または意味                                |
|-----------------|---|---------------------------------------|
| 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                      |
| 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   | ラージエディ (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                    |
| 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 の第三代静止気象衛星                   |
| 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                            |

| 略語        | 原語   | 訳または意味                                       |
|-----------|--|--|
| 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・海水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                                |
| 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                                 |

| 略語         | 原語  | 訳または意味  |
|------------|---|---|
| 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                                   |
| 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 Coordonn'e (フランス語)   | 協定世界時   |
| VarBC      | Variational Bias Correction   | 変分法バイアス補正                                     |

| 略語      | 原語   | 訳または意味                                |
|---------|--|---------------------------------------|
| 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<br>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、TQ9 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 Time<sup>1</sup>) 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。 $\sigma_e$  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 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を示す指標であり、次式で定義される。

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

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

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

で定義されるアンサンブル平均である。

<sup>1</sup> 英語圏では Forecast Range などと記述されることも多い。

### 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場合が多い。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。

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

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。

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

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。

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

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。

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

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)。

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

(B.3.10)

ただし、

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

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。

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

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。

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

ただし、

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

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

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。

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

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

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

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  $BS_c$ 、気候値予測によるブライアスコア  $BS_c$  を用いて

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

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。

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

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。

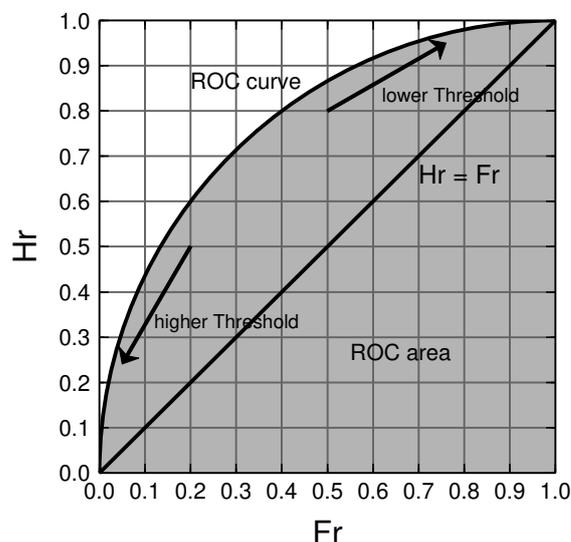


図 B.4.1 ROC 曲線の模式図。横軸は  $F_r$ 、縦軸は  $H_r$  である。灰色の領域の面積が ROC 面積である。

#### 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.