

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 と合わせて行くとともに、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 5 km、鉛直層数 96 層の非静力学モデル asuca (気象庁予報部 2014; Ishida et al. 2022) により 1 日 8 回運用されている。予報時間は 00UTC、12UTC 初期値については 78 時間、その他の初期値からの予測は 39 時間である。メソ数値予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。

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 5 km、鉛直層数は 96 層である。アンサンブル予報のための初期

値や側面境界値の摂動は特異ベクトル法（SV 法）を用いて与えている。

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 2 km、鉛直 76 層の非静力学モデル asuca により、1 日 24 回毎正時を初期値に運用されている。予測時間は 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC 初期値では 18 時間、その他の初期値からの予測は 10 時間である。この 3 時間ごとの 18 時間予測は、半日前からの線状降水帯予測に資するために、2024 年 3 月の第 11 世代スーパーコンピュータシステム導入に合わせて延長されたものである。データ同化手法には初期時刻の 3 時間前から 3 次元変分法（3DVar）による同化と 1 時間予測を繰り返す手法（Rapid Update Cycle）を用いている。この 3DVar によるデータ同化では、予測誤差として気候学的に事前に見積もった値とアンサンブル手法から算出した気象場に応じた値を考慮するハイブリッ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 の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、1 km 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 1 km のモデルのリアルタイムシミュレーション実験を、実行頻度を 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 2 km から 1 km へ）に伴う特性変化の把握や計算安定性の確認等を行った。「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 2 km、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 2 km の水平解像度、鉛直 76 層（地上～約 21.6 km）で解析を行っている。

ウィンドプロファイラから得られる風のデータ、アメダスと航空機から得られる風と気温のデータに加えて、地上気象レーダーから得られるドップラー速度や、ひまわりから得られる大気追跡風など高頻度・高密度な観測データを利用してプロダクト作成を行う。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).
- 気象庁情報基盤部, 2023: 「線状降水帯予測スーパーコンピュータ」を稼動開始します. 令和 5 年報道発表資料, 気象庁情報基盤部, 2, (Available online at https://www.jma.go.jp/jma/press/2302/24b/20230224_press.pdf).
- 気象庁情報基盤部, 2024: 新しいスーパーコンピュータシステムを運用開始します. 令和 6 年報道発表資料, 気象庁情報基盤部, 3, (Available online at https://www.jma.go.jp/jma/press/2402/21a/20240221_press.pdf).
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 151.
- 経田正幸, 2016: 全球アンサンブル予報システムの運用に向けた取り組み. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 52–57.
- 新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1–8.
- 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）

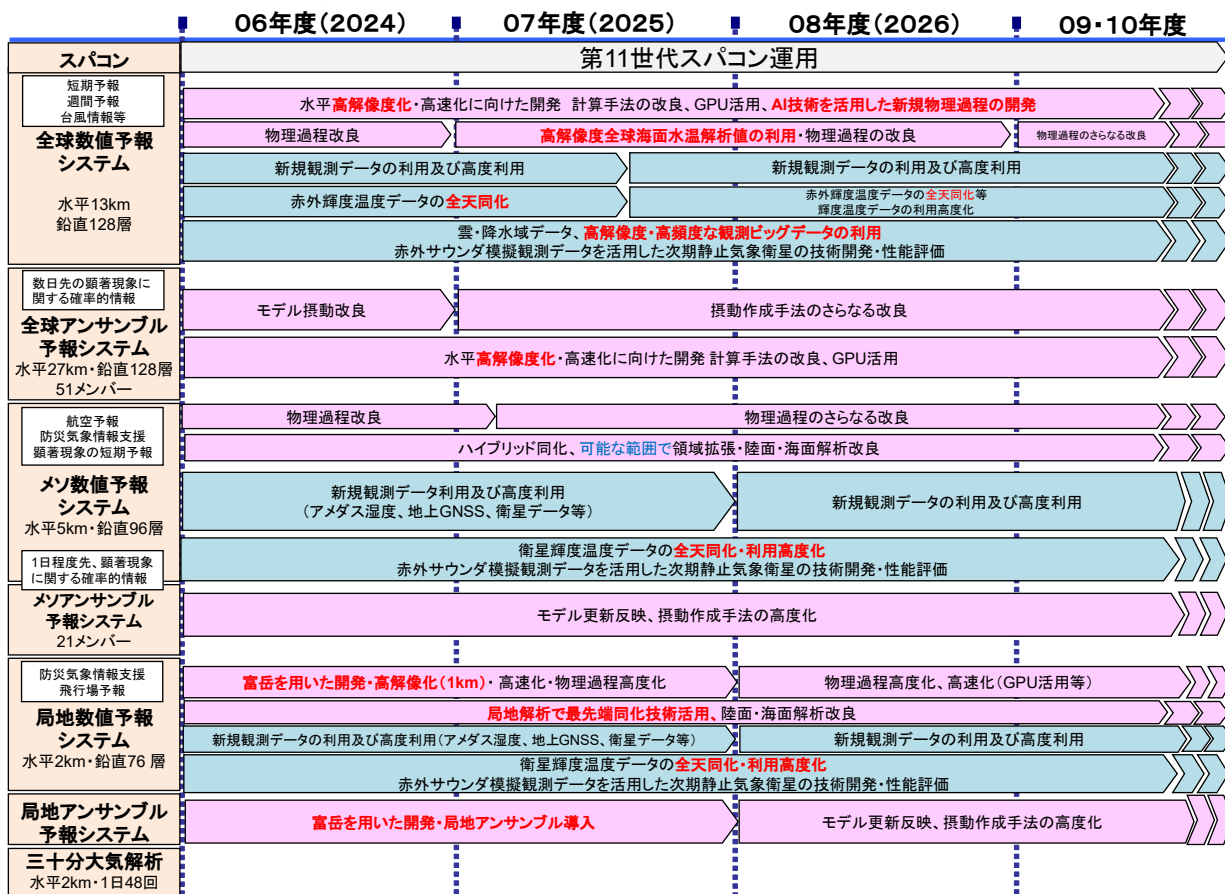


図 2.7.1 数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析)

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 月からの大阪・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 変更対応	アメダス地点変更	(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、沖永良部、久米島他			(随時対応)				(随時対応)
プロジェクト 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附属書改正対応)	SIGWX図	開発		ル変(描画様式変更等)	開発		ル変(データ形式変更)	
		WINTER図	開発					ル変(データ高解像度化)	
	HWIS (悪天情報サービス) データ開発	調査			開発			プロトタイプ序内共有	
モデル改良 対応	全球モデル系更新対応			精度評価					
	メノモデル系更新対応			精度評価					
	LFM高解像度化対応 (降雪量、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

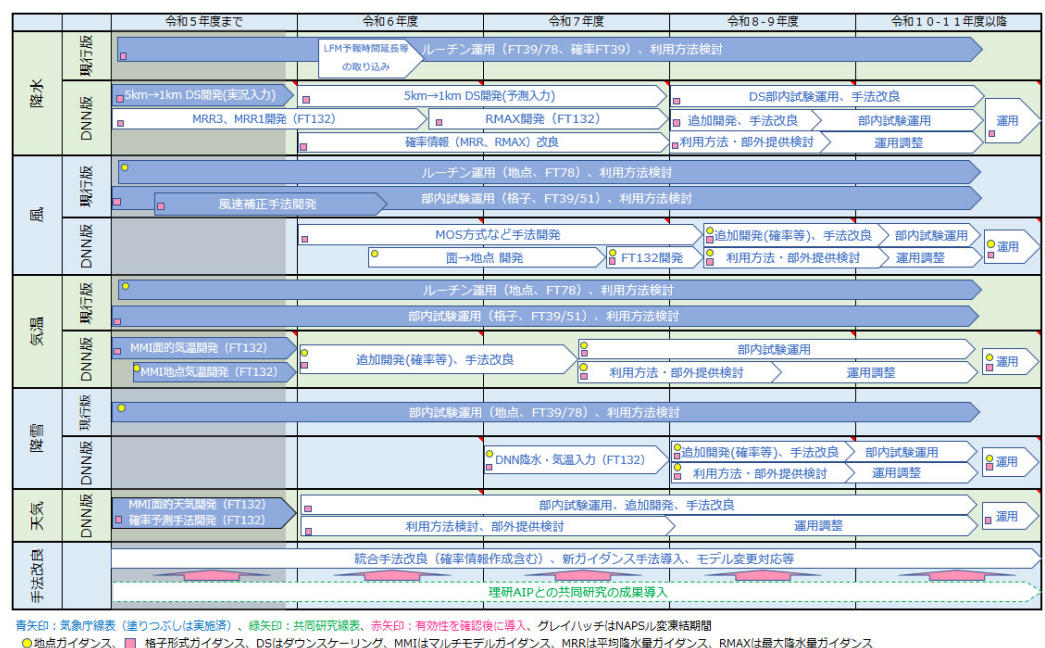


図 2.8.2 マルチモデルガイダンス開発計画

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¹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.

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

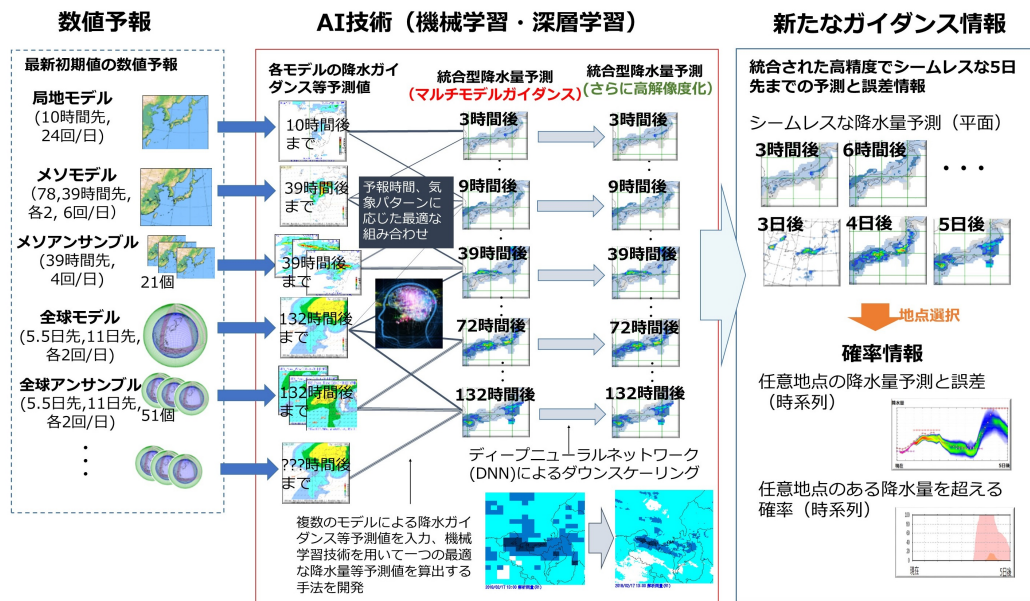


図 2.8.3 マルチモデルガイダンスの模式図

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¹の大気初期値には気候データ同化システム（第 2.10 節参照）、海洋初期値には数値予報ルーチン・再予報共に全球海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM) (Fujii et al. 2023) を使用している。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、社会経済活動への貢献に資するため、エルニーニョなどの日本域への影響も大きい熱帯起源の大気海洋現象の再現性などの向上が求められている。

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

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³な地球システムモデルを使用した季節 EPS の構築をめざす。

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

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

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

2.10 気候データ同化システム

季節 EPS の初期値作成や、気候系監視、異常気象分析、数値予報モデルの評価検証等には、長期間にわたって時間的・空間的に均質かつ再現性の高い過去の大気状態のデータが必要である。このような目的のために、利用可能な過去の観測データを、最新かつ一貫したデータ同化システムで解析するのが再解析であり、これを行うシステムが気候データ同化システムである。現在の気候データ同化システムの仕様は、2018 年 12 月時点の現業全球データ同化システムに準拠した解析システムを用いて計算を実施した、「気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q)」(Kosaka et al. 2024) と同じシステム（水平分解能 40 km、鉛直層数 100 層）であり、「JRA-3Q 準リアルタイムデータ」として継続運用している。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) と全球エアロゾルモデル MASINGAR mk-2 (Yukimoto et al. 2019) を結合させたモデル (水平分解能 40 km、鉛直層数 40 層) を用いている。本システムでは、モデルで予測するエアロゾルの 3 次元分布から計算したエアロゾル光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness, AOT) と気象衛星ひまわりの観測データからリトリーブされた 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、エア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、ひまわりエアロゾルプロダクト (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アロゾル解析値の利用などがある。

2.14.2 紫外線予測システム

紫外線予測システムは紫外線情報の発表に利用されている。本システムでは、大気大循環モデル MRI-AGCM3 (Yukimoto et al. 2019) と化学輸送モデルを結合させたモデル MRI-CCM2.1 (Deushi and Shibata 2011; Yukimoto et al. 2019) (水平分解能 110 km、鉛直層数 64 層) を用いており、即時的に利用可能な衛星データ (オゾン全量) 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 CO₂ 観測データを逆解析へ導入する技術開発が気象研究所で行われており (Maki et al. 2023)、今後導入が検討されている。

参考文献

- Deushi, M. and K. Shibata, 2011: Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model version 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry. *Pap. Meteor. Geophys.*, **62**, 1–46, doi:10.2467/mripapers.62.1.
- Fujii, Y., T. Yoshida, H. Sugimoto, I. Ishikawa, and S. Urakawa, 2023: Evaluation of a global ocean reanalysis generated by a global ocean data 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. Khatrri, 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. Ebita, 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. Tokuhira, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109, doi:10.2151/jmsj.2024-004.
- Maki, T., K. Kondo, K. Ishijima, T. T. Sekiyama, K. Tsuboi, and T. Nakamura, 2023: Independent Bias Correction Method for Satellite Observation Data Introduced to CO₂ Flux Inversion. *SOLA*, **19**, 157–164, doi:10.2151/sola.2023-021.
- Nakamura, T., T. Maki, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, and Y. Niwa, 2015: Improvement of Atmospheric CO₂ Inversion Analysis at JMA. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, URL <https://agu.confex.com/agu/fm15/meetingapp.cgi/Paper/64173>, A31B-0033.
- 小木昭典, 松本隆則, 北島俊行, 田中泰宙, 弓本桂也, 関山剛, 眞木貴史, 2022: 気象庁全球黄砂解析予測モデルにおけるエ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.

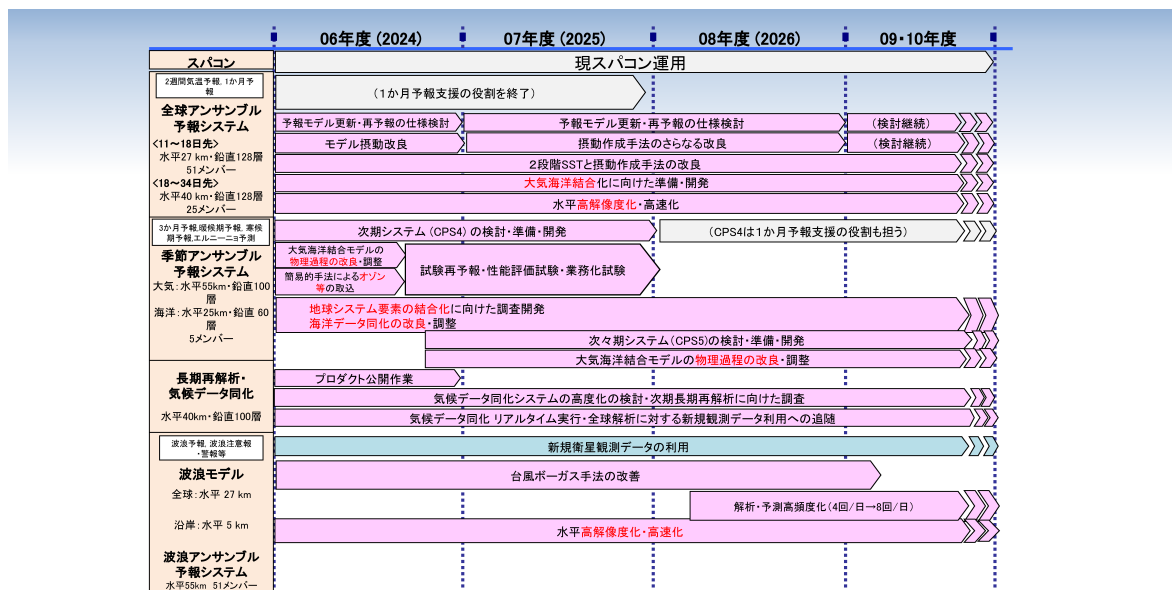


図 2.14.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデルの開発計画

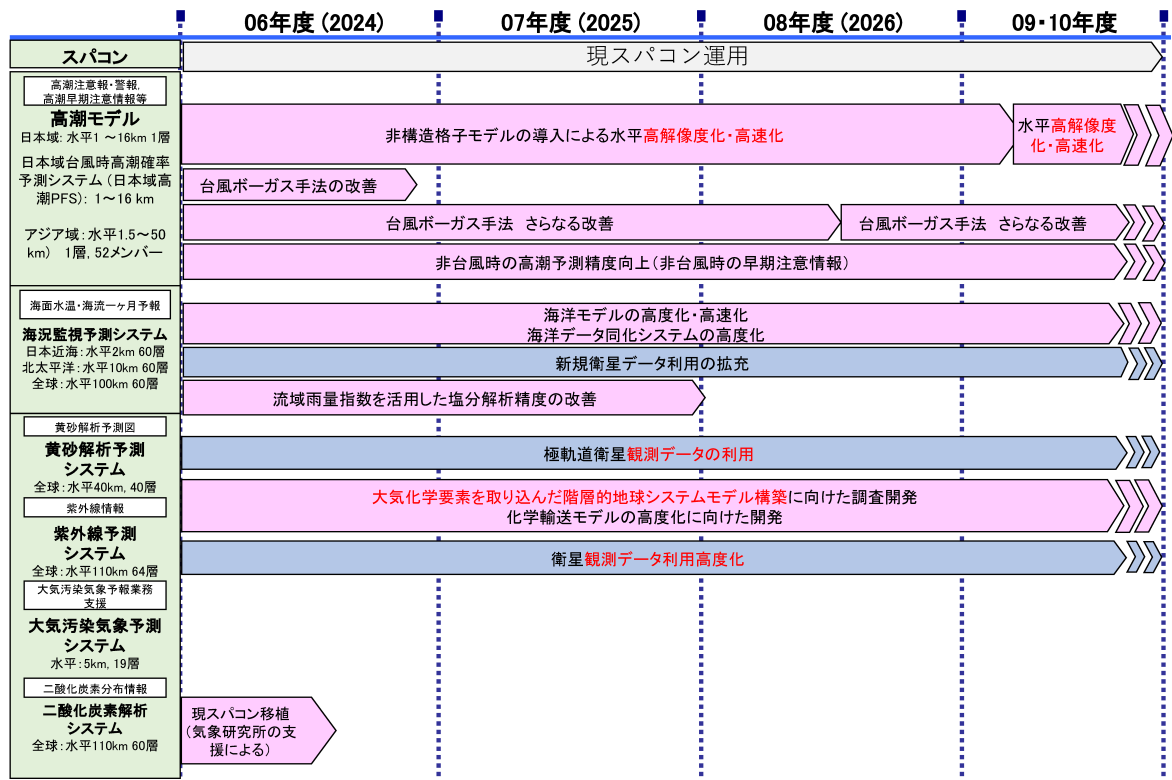


図 2.14.2 高潮モデル、海況監視予測システム、物質循環システムの開発計画