

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 2.8.2、図 2.8.3 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。

なお、2024 年 1 月現在、数値予報システムの現業運用は、気象庁が大型コンピュータを最初に導入してから第 10 世代となるスーパーコンピュータシステム（本田ほか 2018）で実施している。気象庁は、2023 年度中にスーパーコンピュータシステムを更新し、数値予報システムの現業運用を新しい第 11 世代のスーパーコンピュータシステムに移行する予定である。ただし、現業運用中の数値予報システムのうち、局地数値予報システム、三十分大気解析については、線状降水帯の予測精度向上のために 2023 年 3 月に整備した、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）に、2023 年度中に移行する予定である。

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 (2023) 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 2024 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。

2023 年 3 月には、GSM の水平解像度を約 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。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 AMV の利用や、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。次いで、2023 年 5 月には AMV, CSR について、GOES-17, Meteosat-11 から GOES-18, Meteosat-10 への切り替えを行った。

2023 年度中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 及びハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS による輝度温度観測データの利用を開始する予定である。

今後も GSM の精度向上に向けた物理・力学過程の開発を進める。また、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を進めている。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 10km 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 3 章、第 4 章を参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」（気象庁 2018）では、台風防災に資するための台風の進路予報に関する不確実性の情報や、社会経済活動への貢献に資するため 2 週間及び 1 か月先までの顕著現象予測の精度向上が必要であるとしている。

GEPS に利用される数値予報モデルは基本的に低解像度版の GSM である。2024 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。アンサンブルメンバー数は、18 日目までは 51、19～34 日目までは 25 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(米原 2010)を採用している。

2022年3月に、GEPSのモデルについて、いくつかの改良をGSMに先行して行ったが(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月にこれらの改良をGSMと合わせて行った。また、海面水温(SST)については、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。

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同様にスーパーコンピュータシステムのスペックに応じた解像度のさらなる強化を検討しており、18日目までの予測については20 km以下、それ以降の予測についても30 km以下の解像度で運用することを目指している。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、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(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」(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2024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)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、その他の時刻からの予測は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。これらの変更によりMSMの予報前半を中心に弱い降水の予測精度が改善した。また、沖縄・松江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て2023年11月に利用を再開した。

2023年度中のスーパーコンピュータシステム移行と同時に、地上設置型マイクロ波放射計による可降水量データやNOAA-21搭載測器(ATMS及びCrIS)による輝度温度観測データの新規利用を開始する予定である。

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。また、将来の計算機への対応を見据え、GPU利用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、ハイブリッドデータ同化手法導入も課題となっている。

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、2024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SV法を用いて与えている。メソアンサンブル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。

今後MSMの更新に合わせた改良に加えて、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、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。

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2024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

り予測時間 10 時間で 1 日 24 回（毎正時）運用されている。データ同化手法には初期時刻の前 3 時間を 1 時間毎に予測と 3 次元変分法（3DVar）による同化を繰り返す手法を用いている。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。

2023 年 3 月に LFM の雲物理・放射・境界層の物理過程を改良するとともに、標高オリジナルデータセットの更新、地形性乱流による形状抵抗の効果を検討する改良を行った。また、アメダス観測による湿度計データ、船舶搭載 GNSS 観測装置による可降水量データ、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による輝度温度データ、マイクロ波散乱計による海上風データの利用を開始した。さらに、沖縄・松江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て 2023 年 11 月に利用を再開した。

2023 年度中の線状降水帯予測スーパーコンピュータへの移行と同時に、半日先までの大雨予測に資するための予報時間の延長（10 時間から 18 時間）を行うとともに、力学過程、物理過程（雲物理過程、放射過程）の改良を行う予定である。また、地上設置型マイクロ波放射計による可降水量データ、NOAA-21 搭載測器（ATMS 及び CrIS）による輝度温度データの利用を開始する予定である。

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、豪雨防災に早期に資するため LFM については開発計画を前倒しして開発を進めている。2025 年度末には積乱雲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」を活用した開発に取り組み、令和 5 年 6 月 1 日から 10 月 31 日まで、1 km 解像度 18 時間予測のリアルタイムの実験を 1 日 2 回、領域を昨年度の西日本から拡張して全国域を対象に実施した。「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）では豪雨防災のための予測に資するため、確率的予測を行うための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より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「富岳」を用いた LEPS の開発に取り組んでいる。2025 年度末を目標に水平解像度 2 km、21 メンバー、予報時間 18 時間のシステムを構築する計画で開発を進めている。水平解像度とメンバー数は、2025 年度末時点で利用可能な計算資源等を踏まえた構成である。

2025 年度末以降のシステム強化の方向性として、高解像度化とメンバー数増強が考えられるが、両者は計算機資源の観点でトレードオフの関係にあり、限られた資源において豪雨防災のための予測に資するために、どちらをより重視すべきかについては調査が必要である。将来のスーパーコンピュータの性能も勘案して強化の方向性を検討していく。

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。2024 年 1 月現在、LFM を第一推定値とする 2 km の水平解像度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、地上レーダーから得られるドップラー速度や、人工衛星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。

参考文献

- 本田有機, 坂本雅巳, 荒巻健智, 氏家将志, 河野耕平, 西本秀祐, 三戸洋介, 2018: 第 10 世代数値解析予報システム. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2-13.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112-126.
- JMA, 2023: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan, 251 pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2023-nwp/index.htm>).
- 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, 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（R05～R09）

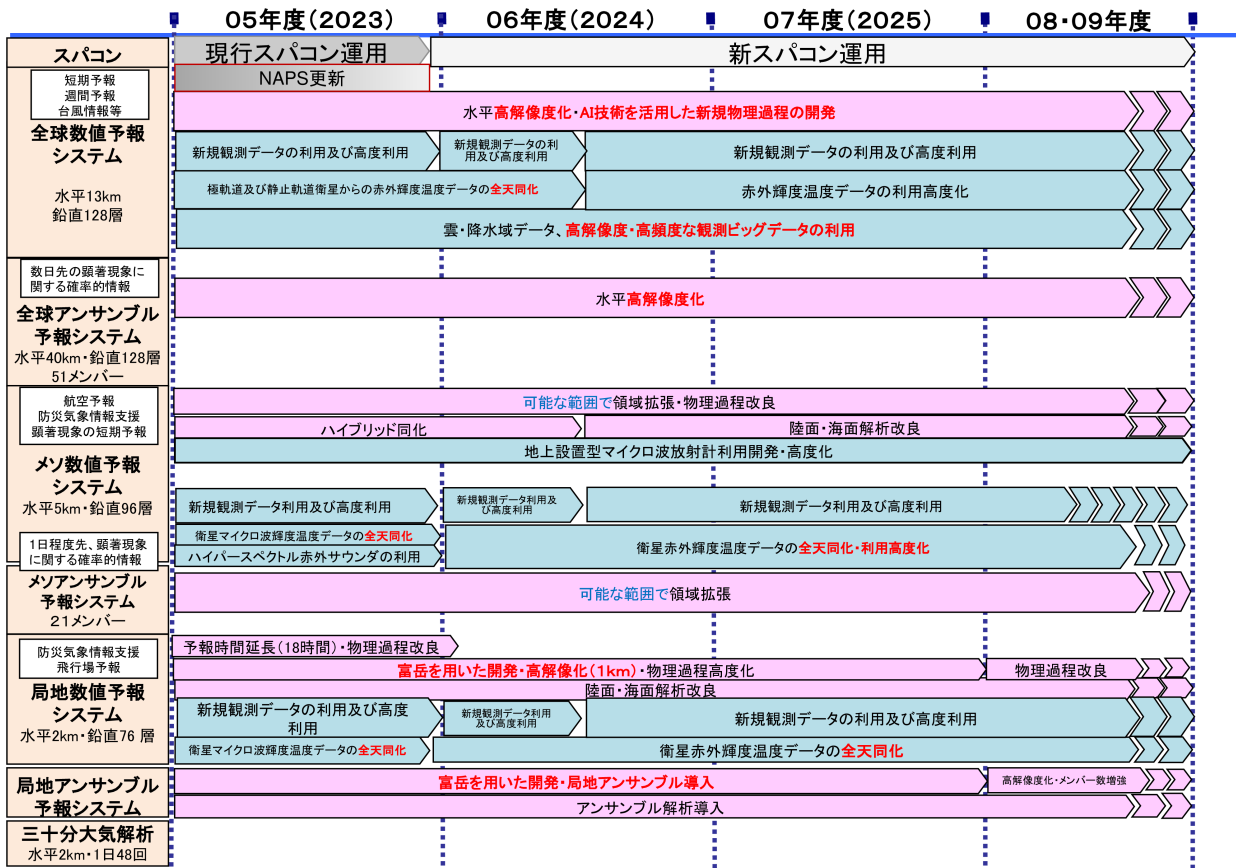


図 2.7.1 数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析)

2.8 短期予報ガイドランス

2.8.1 はじめに

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

ガイドランスは、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その誤差を軽減したり、数値予報が直接出力しない天気など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、ガイドランスについては、様々な気象要素に対して、単一の数値予報モデルやアンサンブル予報システムを用いてプロダクトを作成する個別のガイドランスと、複数のガイドランスやモデルの出力値等を統合して単一のガイドランスを作成する統合型の「マルチモデルガイドランス」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2.8.2をご覧ください。

2.8.2 ガイドランス

ガイドランスは、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。ガイドラ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、その特性が変わる際にはそれに応じた対応が必要となる。具体的には、予め改良された数値予報モデルの出力データをガイドラ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などの対応を行う(高田 2018b)。そのため、今後もGSM、GEPS、MSM、MEPS、LFMの改良のタイミングに合わせて、各モデルを入力としているガイドランスの評価および必要に応じて再学習を行う。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にその観測で得られるデータを予測するガイドランスの精度を事前に評価した上で、必要に応じて再学習の実施などの対応を行う(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、これが実施されることで、視程・雲の観測特性が変わることから、その特性変更に応じるための再学習等の対応を随時行う。

その他、飛行場雲ガイドランスの改良や、国際民間航

空機関(ICA O)の要請に伴う世界空域予報システム(WAFS)のプロダクト改訂に伴う対応、さらに大阪・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)ガイドランス開発にも取り組む計画である。

気象庁の様々な情報発信に資するため、新たなガイドラ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ドランス(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ドランスについても必要性が認識されており、令和6年度の出水期前までの部内試験運用開始を目指して開発を行っている(4.5)。

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。

また、LFMについては令和5年度末に予報時間が延長される計画であり、ガイドランスについてもこれに対応する開発を実施している。

2.8.3 マルチモデルガイドランス

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統合型の「マルチモデルガイドランス」の開発を行っている(図2.8.1)。なおこれまで、「マルチモデルガイドランス」については「統合型ガイドランス(仮称)」としてきたが、統合型ガイドランスは様々な要素を統合する型のガイドランスの総称的な表現であることから、令和4年度末より「マルチモデルガイドランス」の呼称を本件で開発しているガイドランスに用いることとした。マルチモデルガイドランスは、各ガイドラ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、マルチモデルガイドランスの降水(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。

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

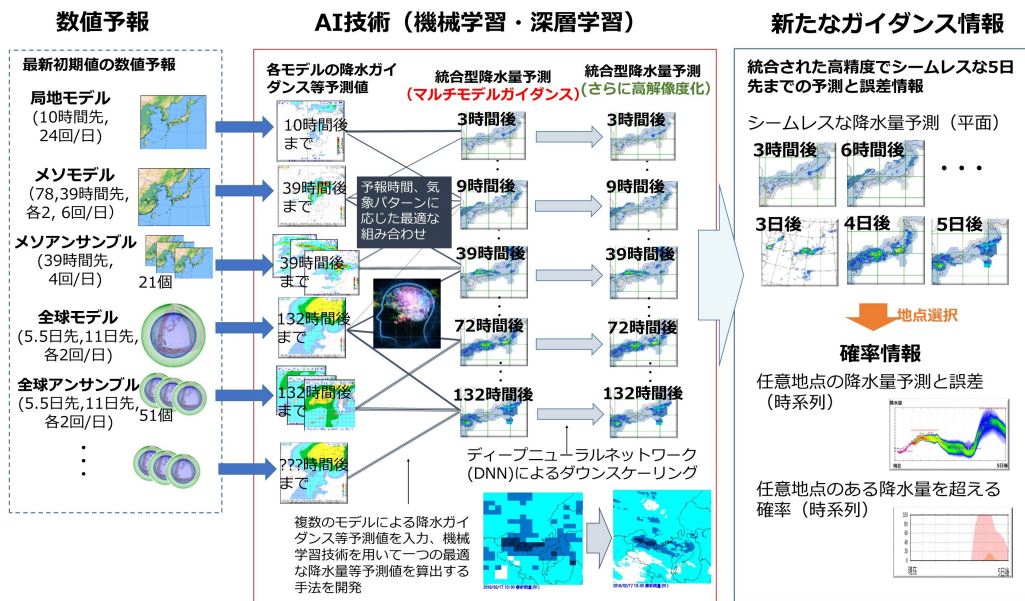


図 2.8.1 マルチモデルガイダンスの模式図

同研究を実施した。この成果は気象庁から「気象観測・予測への AI 技術の活用に向けた共同研究の成果について」¹と題して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 10 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いるところである。

参考文献

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

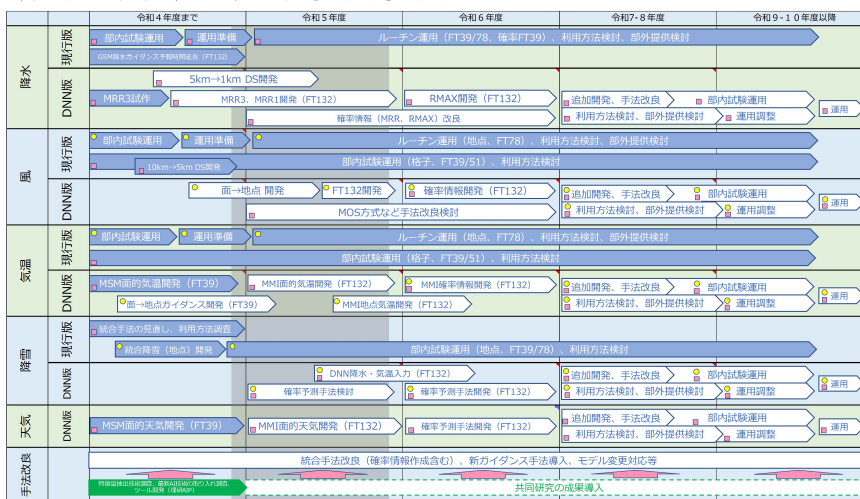
¹ https://www.jma.go.jp/jma/press/2306/30b/20230630_ai.html

R5-6 開発線表

	令和5年度				令和6年度			
	R5Q1	R5Q2	R5Q3	R5Q4	R6Q1	R6Q2	R6Q3	R6Q4
計算機更新対応			NAPS11移行作業					
観測システム変更対応	アメダス地点変更			銚子	(随時対応)			
		航空気象観測完全自動化			離久良、沖永良部、久米島		(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	開発		ル変			
		LFM降水ガイダンス	改良 (LFM24XX対応・予報時間延長)		ル変			
		線状降水帯の発生確度	データ蓄積と調査		改良・開発		ル変	
		飛行場雲ガイダンス改良	調査・開発				ル変 (時期未定)	
		WAFSプロダクト改訂 (ICAO第3附属書改正対応)	開発・試験			SIGWXル変	開発・試験	WINTEMル変
	大阪・関西万博用TAFガイダンス					環境構築	逐次学習	(試行運用)
モデル改良対応	降水以外のガイダンスのLFM24XX対応 (降雪量、風、気温、視程)		精度評価					
	MSM25XX対応						精度評価・モデル変更対応	

図 2.8.2 ガイダンス開発計画

マルチモデルガイダンス開発線表



青矢印：気象庁発表（塗りつぶしは実施済み）、緑矢印：共同研究発表（塗りつぶしは実施済み）、赤矢印：有効性を確認後に導入、グレイハッチはNAPS11凍結期間
 ●地点ガイダンス、■格子形式ガイダンス、DSはダウンスケール、MMIはマルチモデルガイダンス

図 2.8.3 マルチモデルガイダンス開発計画

2.9 季節アンサンブル予報システム

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

季節 EPS の予測モデルについては、2022 年 2 月に JMA/MRI-CPS3 (Hirahara et al. 2023) へ大幅にバージョンアップしている。JMA/MRI-CPS3 では、大気及び海洋モデルの水平方向の高解像度化（大気：110 km から 55 km へ、海洋：渦非解像から渦許容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。2023 年度は JMA/MRI-CPS3 の評価と新スーパーコンピュータシステム (NAPS11) への移行を行いつつ、次期モデルへの開発調査に取り組んでいる。

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。

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

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

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、データ統合・解析システム DIAS からは 2022 年 12 月に一部期間、2023 年 8 月には対象全期間と準リアルタイム期間が公開されている。

今後、他のデータ提供協力機関からも JRA-3Q の提供開始が予定されている。また、2023 年度には JRA-3Q の仕様と品質評価結果を総合報告論文 (Kosaka et al. 2024) にまとめて出版したほか、JRA-3Q 版気候データ同化システムの NAPS11 への移行も行った。今後、気候データ同化システムの更なる高度化及びそれを用いた次期気象庁長期再解析の実施に向けて、調査・検討を行う計画である。

2.11 波浪モデル

波浪モデル及びその初期値を作成する波浪客観解析には、地球全体を対象とする全球（水平分解能 27 km）と日本近海を対象とする沿岸（同 5 km）の 2 種類の対象領域を設けている。全球波浪モデルは外洋波浪図や外洋域を航行する船舶向けの波浪情報の発表に利用されている。全球波浪モデルについては、2022 年度に水平解像度の高解像度化（55 km から 27 km へ）および初期時刻 00UTC の予報時間延長（132 時間から 264 時間へ）を実施している。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 (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、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。

2023年度は、全球・沿岸波浪モデル・波浪アンサンブル予報システムについての改善の調査を行うとともに、NAPS11への移行を行った。今後、全球及び波浪モデルについては台風ポーガス手法の改善、新規衛星観測データの利用を計画している。また沿岸波浪モデルについては、NAPS11期間中に水平解像度高解像度化（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、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）の発表の開始に向けて 2022 年 8 月に更新している。また、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）を開発し、2022 年 8 月より運用を開始している。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、台風ポーガス手法への陸域の影響による減衰の効果の導入により、予測精度を改善した新アジア域高潮アンサンブル予報システムを開発し、2022 年 8 月に運用を開始している。

2023 年度は高潮の各モデル・システムについて改善の調査を行うとともに、NAPS11 への移行を行った。また、日本域高潮モデルについては、00, 12UTC 初期時刻の予報時間を 39 時間 から 78 時間へ延長し、2023 年 7 月より配信を開始した。中長期的には、日本域高潮モデルの台風ポ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。

2022 年度には海面高度に関する衛星データ同化手法の改良 (Sentinel-3A/B 及び HaiYang-2B のデータ利用追加や海面高度補正手法の高度化)、より新しいバージョンの海洋モデルの導入と高速化、北海道野付湾における定着水の流出軽減などの開発を行い、これらを適用したモデルを 2023 年 2 月より運用を開始している。2023 年度は本システムの改善の調査を行うとともに、NAPS11 への移行を行った。中長期的には、流域雨量指数を活用した沿岸域の塩分の再現性向上や新規衛星観測データの同化利用など本システムのさらなる改善を行う計画である。

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。2022 年度には、データ同化に利用しているひまわりエロゾルプロダクトについて、ひまわり 8 号から 9 号へ切り替えている。2023 年度は本システムの改善の調査を行うとともに、NAPS11 への移行を行った。中長期的な課題としては、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 (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、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。2022 年度には、データ同化に利用しているオゾン衛星観測データについて、Suomi-NPP/OMPS から NOAA-20/OMPS への切り替え対応を行った。2023 年度は本システムの改善として、二次元変分法 (2D-Var) によるデータ同化の導入試験と、観測データの作成・QC 手法の見直しを行った場合の影響調査を行うとともに、NAPS11 への移行を行った。中長期的な開発課題としては、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 NHM-Chem (Kajino et al. 2019, 2021) を基にしている。2022 年度には、アジア域の領域化学輸送モデル (水平分解能 20 km、鉛直層数 18 層) と東日本や西日本を対象とする高解像度版領域化学輸送モデル (水平分解能 5 km、鉛直層数 19 層) の 2 種類のモデルを高解像度版領域化学輸送モデルの領域を拡張することで統合し、2023 年 2 月より運用を開始した。高解像度版領域化学輸送モデルは、大気モデル asuca (気象庁予報部 2014; Ishida et al. 2022) と組み合わせて使用している。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。

2023 年度は本システムの NAPS11 への移行を行った。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、大気汚染プロダクトの高度化のため、大気汚染物質の予測精度向上が求められている。

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。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-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/vol176p221.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.
- 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, 2023: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan, 252pp pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2023-nwp/index.htm>).
- 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. Khatri, 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/>.
- 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, 151pp.
- 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. 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.

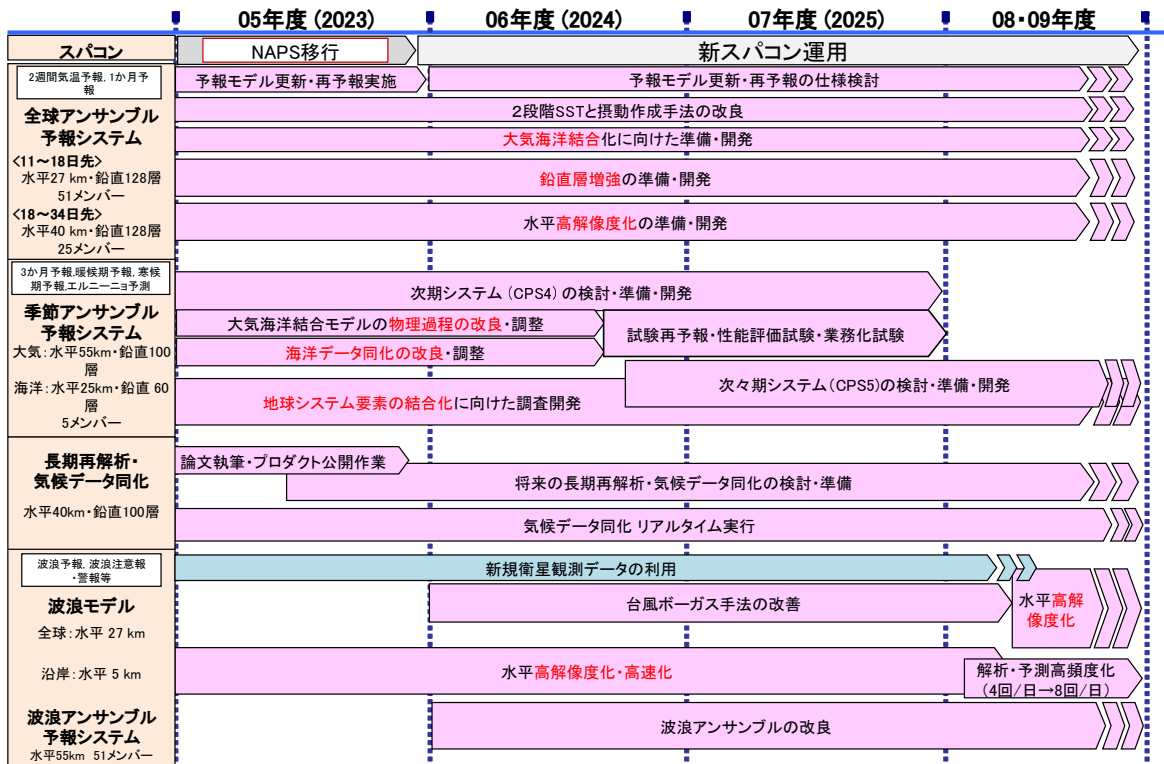


図 2.14.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデルの開発計画

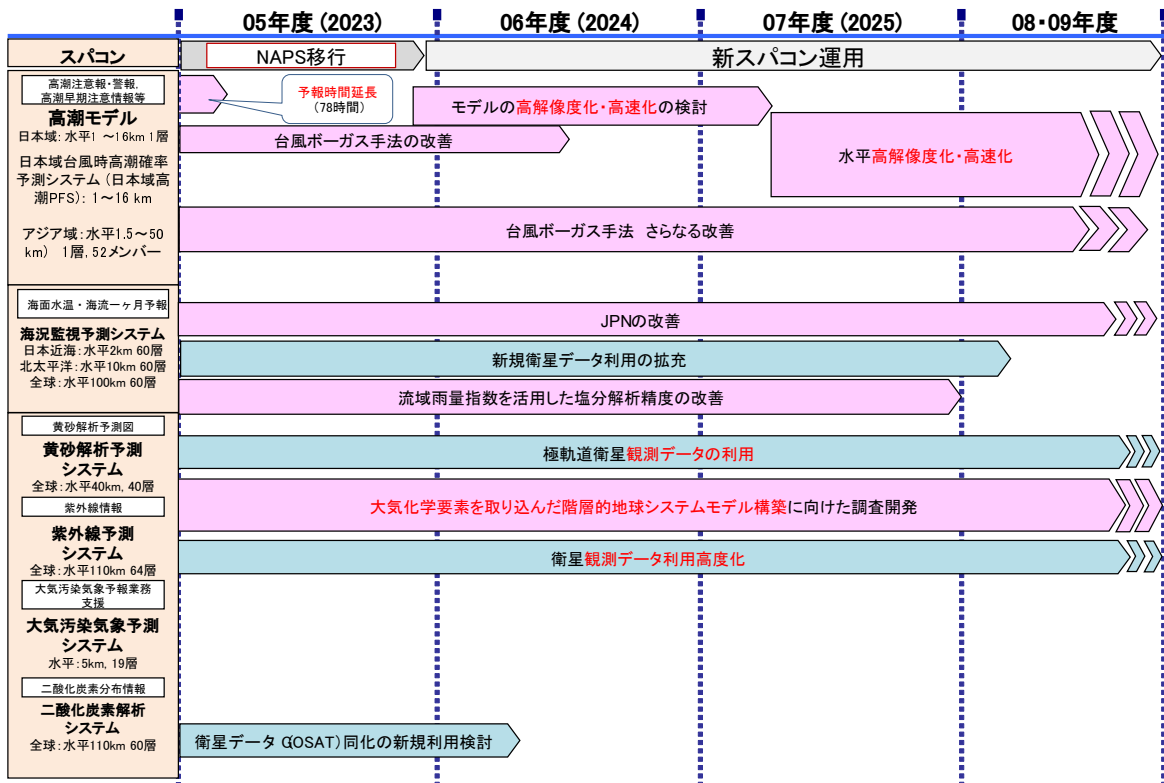


図 2.14.2 高潮モデル、海況監視予測システム、物質循環システムの開発計画