

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、統合型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。

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 (2022) 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、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 2023 年 1 月現在、水平解像度約 20 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。

2022 年 6 月には、全球データ同化システムにおいて、欧州の極軌道衛星 Metop の観測データから算出される大気追跡風 (AMV) の利用を開始した。これにより GSM の対流圏中層のジオポテンシャル高度予測の精度が改善した。また、衛星輝度温度データ同化のための放射伝達モデルを RTTOV-10 から RTTOV-13 へ更新し、地表面射出率データセットの更新等を行った。

GSM は、2022 年度中に水平解像度を現状の約 20 km から約 13 km に強化する計画である。この改良と合わせて解像度に応じた各種物理過程（雲放射、地形性抵抗、非地形性重力波、地形オリジナルデータセット更新）の改良等を取り込む計画である。また、全球データ同化システムにおける積雪深解析の 1 日 1 回から 4

回への高頻度化や、米国の極軌道衛星 Suomi-NPP や NOAA20 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 NOAA20 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」では、台風防災に資するための台風の進路予測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。2023 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、水平解像度を約 40 km から約 27 km (18 日先まで)、約 55 km から約 40 km (34 日先まで) に強化した。また、モデルの地形性抵抗や雲放射等の物理過程の改良を GSM に先行して行った。これについては、数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.1 節 (気象庁 2022b) を参照されたい。さらに、海面水温 (SST) について、2 段階 SST 法 (高倉・小森 2020) による、季節アンサンブル予報システムで予測された SST の利用方法の改良を行った。これは、2022 年 2 月の季節予報アンサンブル予報システムの更新 (数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.11 節 (気象庁 2022a) 参照) による予測 SST の精度向上に合わせ

て、GEPS で予測 SST を利用する予測時間を 11 日目以降から 6 日目以降に前倒したものである。これらの変更により、より細かい地形などの地域特性が精緻に表現され、高精度の海面水温を考慮した予測が可能となった。

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 (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、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 2023 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。

2022 年 3 月に鉛直層数増強（76 から 96 層）や台風強度予測に影響を与える海面水温の変化を考慮するため海洋混合層モデルの導入を行い、境界層・乱流、雲物理・積雲、放射の各種物理過程の改良を含むシステム更新を行った。2022 年 6 月から 00UTC、12UTC 初期値からの予測について予報時間を 78 時間に延長したことでメソモデルによって、台風や梅雨前線の停滞などに伴う 3 日先までの雨量予測が行えるようになった。また、メソデータ同化システムで Suomi-NPP 及び NOAA-20 搭載のマイクロ波センサ ATMS の観測データの利用を開始するとともに JAXA と NASA が共同で開発した GPM 主衛星に搭載された二周波降水レーダー DPR の利用方法を改良した。これらの変更により MSM の降水予測の精度が改善した。

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相関の情報が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。

観測データについては、全球数値予報システムでは導入済だがメソ数値予報システムで導入されていない観測データの導入を目指した開発を進めている。重要なものとして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データの利用開発がある。また、大きな課題としてマイクロ波輝度温度データの全天同化の導入があり開発を進めている。

中長期的には 3 日先までの予測をより精度よく行うため計算領域拡張を検討している。これについては将来のスーパーコンピュータシステムのスペックに応じて改めて検討する計画である。

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」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、2023 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。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。

2022 年度末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) を新たに導入する予定である。

中長期的には計算領域の拡張を MSM に準じて行う計画である。

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」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 2023 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。2022年3月から、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。

観測データの同化に関して2022年8月には局地データ同化システムでSuomi-NPP及びNOAA-20搭載のATMSの観測データの利用を開始した。この変更によりLFMの降水予測の精度が改善した。LFMについては、令和4年度末に雲物理・放射・境界層の物理過程を改良するとともに地形性乱流による形状抵抗の効果を導入する計画である。

更にLFMについては半日先までの大雨予測に資するための予報時間の延長と、積乱雲予測の改善のための高解像度化を計画している。これらの計画について、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開発計画を前倒しして開発を進めている。2023年度末には予報時間の延長(10時間から18時間)、2025年度末には高解像度化を行い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」を活用した開発として令和4年6月1日から10月31日まで、1km解像度18時間予測を西日本の狭領域を対象にリアルタイムの実験を1日2回実施した。

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」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、高解像度モデルによる予測の不確実性を表現するため、高解像度化された局地モデルと同じ解像度のモデルを利用し、より整合的な予測の不確実性情報を作成することとしている。また、計算機資源の増加にあわせてメンバー数の増強を行い、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、昨年度から「富岳」を用いた局地アンサンブル予報システムの開発に取り組んでいる。2025年度末を目標に水平解像度2km、予報時間18時間のシステムを構築する計画である。メンバー数は、利用可能な計算資源等を踏まえて最適な構成を検討中である。

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予定である。

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。

2022年12月にそれまでのMSMを第一推定値とした5kmの水平解像度での毎時大気解析(室井ほか2008)からLFMを第一推定値とする2kmの水平解像度で三十分毎に解析を行う三十分大気解析に変更した。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

- 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, 2022: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 246 pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-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, 2022a: 季節アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 122–132.
- 気象庁, 2022b: 全球モデルの水平解像度向上、物理過程改良に向けた開発. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 66–75.
- 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.
- 室井ちあし, 藤田匡, 石川宜広, 2008: 気象庁毎時大気解析. *天気*, **43**, 43–50.
- 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 (R04~R08)

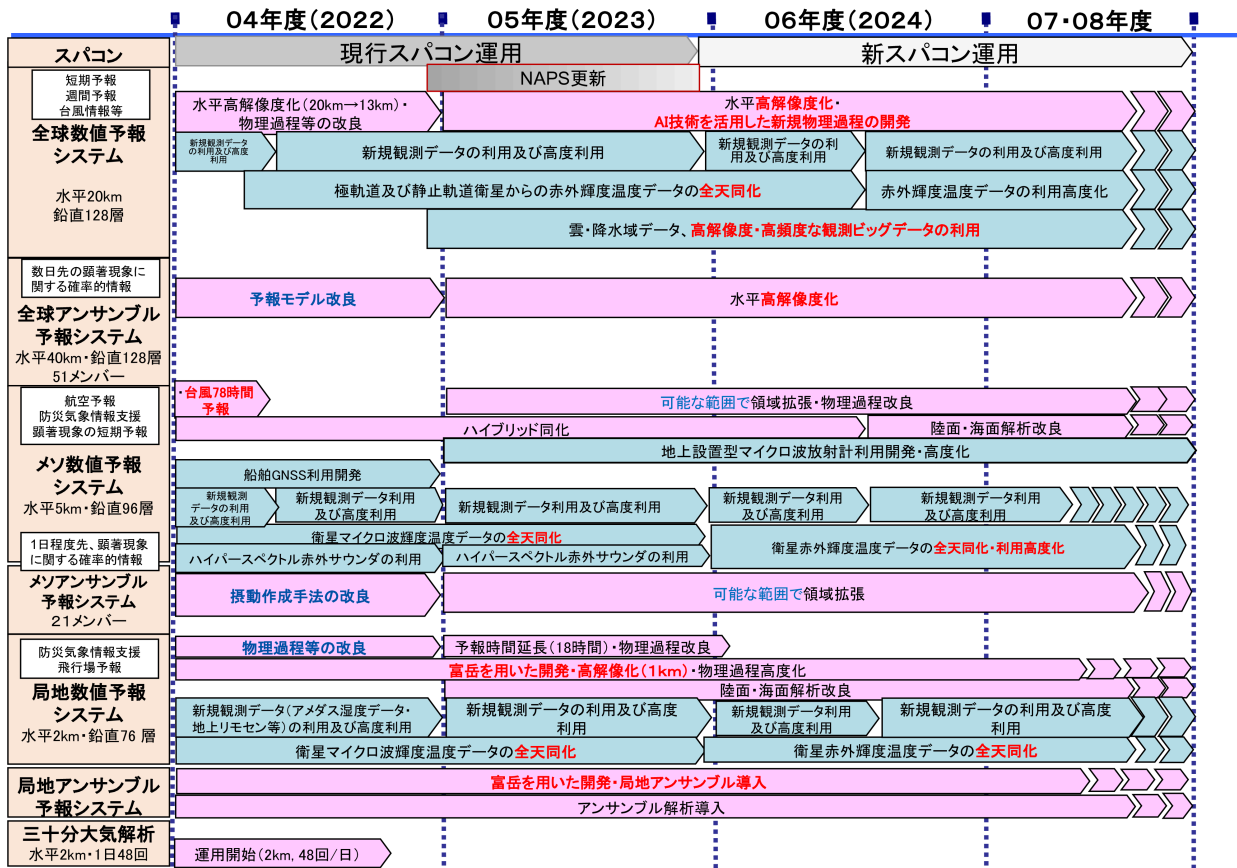


図 2.7.1 数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析)

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等を統合して単一のガイダンスを作成する統合型ガイダンス(仮称)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、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ダ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ダ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。

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ており、令和 5 年度末の運用を目指して開発を行う。

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、分科会提言に同様に記載されている「概ね 3 年後に、台風が日本に接近する可能性がある場合には、メソモデルによる雨量予測を 39 時間先から 78 時間先まで延長し、3 日先までの総雨量予測情報の提供を行う」に応じて、令和 4 年 6 月に MSM の予測時間延長が実施され、この予測時間を延長した MSM による 48 時間および 72 時間平均降水量、最大降水量ガイダンスの部内運用も開始した(第 3.11 節)。

その他、LFM 視程ガイダンス、LFM 風ガイダンス、LFM 気温ガイダンスおよび LFM 降雪量ガイダンスの開発を行い、部内運用を開始している(第 3.12 節)

加えて、これまでガイダンスは Fortran を用いてプログラミングされてきたが、最新の AI 技術を活用するため、ライブラリの豊富な Python を用いるよう移行を進めている。

2.8.3 統合型ガイダンス

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「統合型ガイダンス」の開発を行っている(図 2.8.1)。これにより、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。平成 31 年 1 月から、理化学研究所革新知能統合研究センター(理研 AIP)との共同研究を開始して、連携して開発に取り組んでいる。複数のガイダンスを統合する際に各ガイダンスの予測特性の得意・不得意にあわせて最適な組み合わせを選択すると精度向上を見込むことができる。

現在、統合型ガイダンスの降水(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

AI技術の活用による統合型ガイダンス

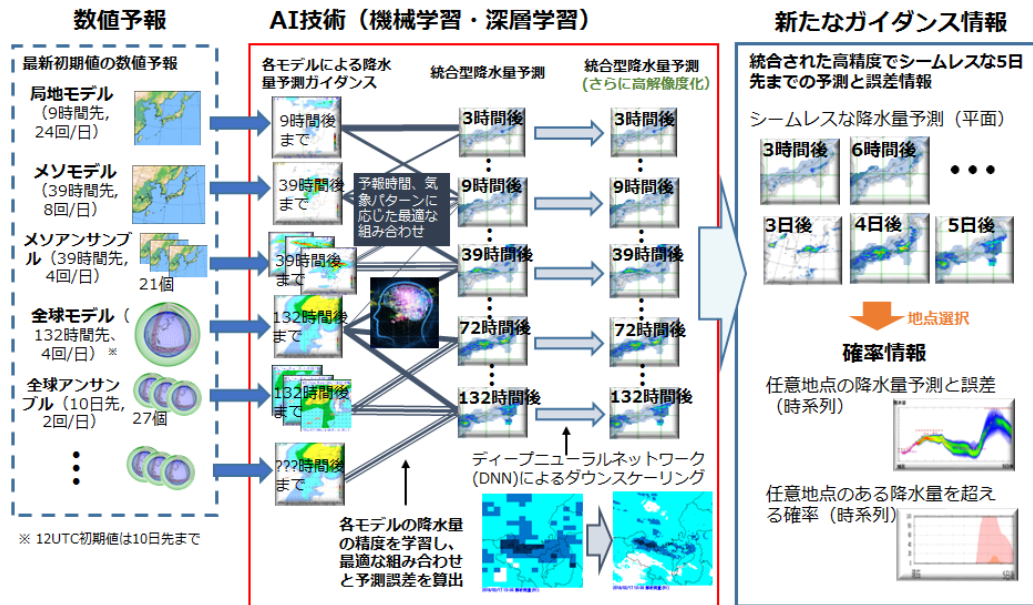


図 2.8.1 統合型ガイダンスの模式図

は部内における試験運用を開始している。また、理研AIPはAI技術の専門家として、様々な知見やツールを有していることから、本共同研究では当庁での開発に有益な様々な知見が得られている。ここ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。

参考文献

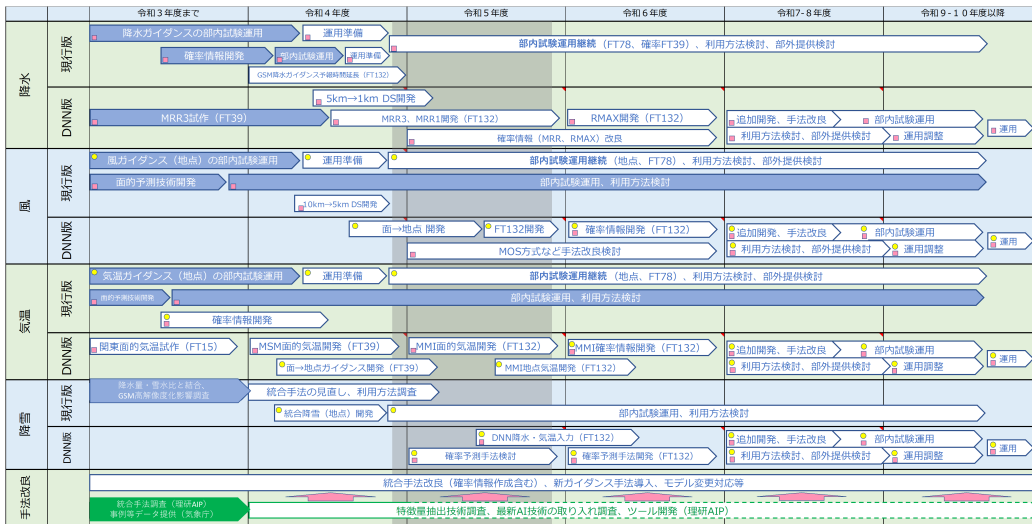
- 計盛正博, 石川宣広, 片山桂一, 2019: 数値予報システムおよびガイダンスの概要一覧表. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 116-143.
- 気象庁予報部, 2018: ガイダンスの解説. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 248pp.
- Kudo, A., 2022: Statistical Post-Processing for Gridded Temperature Prediction Using EncoderDecoder-Based Deep Convolutional

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.

		令和4年度				令和5年度			
		R4Q1	R4Q2	R4Q3	R4Q4	R5Q1	R5Q2	R5Q3	R5Q4
モデル改良 対応	GSM		GSM23XX (高解像度化・物理改良)			計算機更新対応作業実施 モデル開発計画に応じて計画			
	GEPS		GEPS23XX (物理改良)						
	MSM	予報時間延長							
	MEPS		MEPS23XX (摂動改良)						
	LFM		LFM23XX (物理改良)						
観測システム 変更対応	アメダス地点変更					随時対応			
	航空観測自動化					随時対応			
	空港追加・廃止					随時対応			
ガイダンス開 発・改良	大雨発生確率	試験運用・改良				本運用			
	線状降水帯発生確度	試験運用・改良				LFM版大雨発生確率の開発			
	LFMガイダンス	開発				視程 (格子)、風 (地点) 部内運用			
	降水量ガイダンス					各種改良・調査			
ガイダンス共通基盤		共通DB化・python化							

図 2.8.2 ガイダンス開発計画



再入力: 気象庁発表 (塗りつぶしは実施済)、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
 ● 地点ガイダンス、■ 格子形式ガイダンス、DSはダウンスケーリング、MMはマルチモデル融合、MRRは平均降水量ガイダンス、RMAXは最大降水量ガイダンス

図 2.8.3 統合型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 et al. 2017) を結合した大気海洋結合モデルを用いている。ルーチンの大気初期値には全球大気解析、再予報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) への大幅なバージョンアップを行った。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¹）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。

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²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

気候データ同化システムは、長期再解析と同じシステムで計算するデータ同化サイクルを現在まで延長したもので、気候系監視、季節 EPS の初期値、モデルの評価検証などに利用されている。現仕様は、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) と同じシステム（水平分解能 40 km、鉛直層数 100 層）である。また、2009 年時点の現業シ

¹ 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 parameterising : 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。

² 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

ステムをベースとして計算を実施した気象庁第 2 次長期再解析 (JRA-55) と同じ仕様のシステム（水平分解能 55 km、鉛直層数 60 層）も継続運用している。

JRA-3Q については、1947 年 9 月から現在までの対象全期間の計算、及び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）が完了している。JRA-3Q では、JRA-55 と比較して、水平方向の高解像度化（55 km から 40 km へ）、鉛直層数の増強（60 層から 100 層へ）や境界条件として利用する海面水温データの品質向上を図るとともに、JRA-55 実施以降の観測データの利用拡充を含む現業全球データ同化システムの開発成果も取り入れることにより、より高品質なデータが作成されている。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う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 55 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、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、全球波浪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 (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、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。

全球波浪モデルについては水平解像度の高解像度化（55 km から 27 km へ）、初期時刻 00UTC の予報時間延長（132 時間から 264 時間へ）を 2022 年度内に予定している。沿岸波浪モデルについては、次期スーパーコンピュータシステム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 3.7 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. (2017)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月に更新を行った。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時間へ延長した。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、運用を開始した。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から約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、運用を開始した。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氷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2022年度中に運用開始予定である。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号への切り替えを行う。中長期的な課題としては、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(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、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計画している。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)を基にしており、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種類を運用している。アジア域の領域化学輸送モデルは大気モデルJMA-NHMと組み合わせて使用しており、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。

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。2022 年度にはアジア域モデルと同様にオゾン濃度地上観測データのナッジング手法による取り込みを行った。また、高解像度版領域化学輸送モデルをアジア域の領域化学輸送モデルと統合できるように領域を拡張する開発を行った。この領域拡張版の高解像度版領域化学輸送モデルは 2022 年度中の運用開始を予定している。「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。2022 年度には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に導入する予定である。

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., N. Kohno, M. Higaki, and M. Itoh, 2017: Upgrade of JMA's Storm Surge Prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS). *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **19**, 26–349.

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. Ko-

mori, 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.

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, 2022: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 246pp pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-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.
- 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.

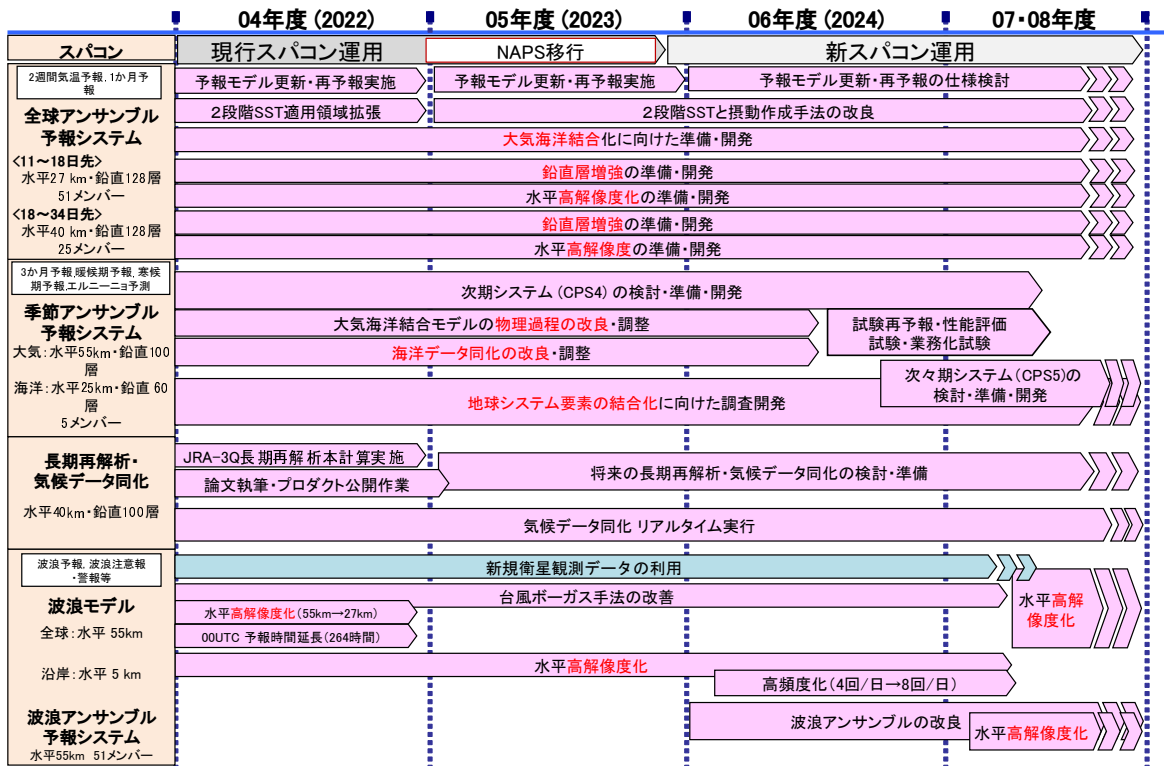


図 2.14.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデルの開発計画

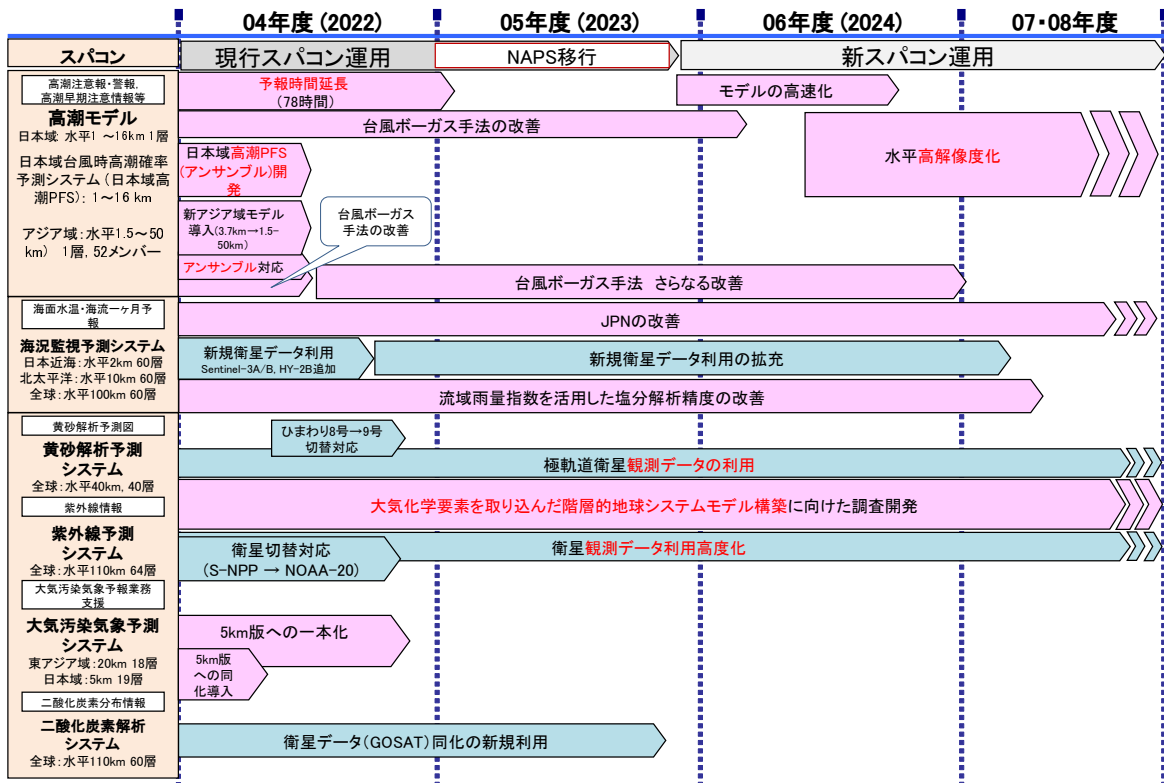


図 2.14.2 高潮モデル、海況監視予報システム、物質循環システムの開発計画