

2030年に向けた数値予報 技術開発重点計画

～国民一人一人の安全・安心を守り、活力ある社会を
実現する数値予報イノベーション～

平成30年10月

気 象 庁

はじめに

我が国は、「平成 30 年 7 月豪雨」などに見られる気象災害の激甚化、進行する地球温暖化とその適応、少子高齢化・人口減少など、多くの社会的課題に直面しています。こうした状況にあって、AI（人工知能）やスーパーコンピュータなどの科学技術イノベーションの活用を通じて、様々な社会的課題を解決し、我が国の目指すべき未来社会の姿として、一人一人が快適で活躍できる社会を構築する「Society 5.0 超スマート社会」が提唱されているところです。

平成 30 年 8 月に交通政策審議会気象分科会から「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」についてご提言をいただきました。そこでは、安全、強靱で活力ある社会の実現のため、気象情報・データが、社会の様々な場面で必要不可欠なソフトインフラ、国民共有の財産として活用されていくように、技術開発と気象情報・データの利活用促進を「車の両輪」として推進していく方向性が示されています。

この提言の技術開発における気象・気候予測について、このたび、その根幹である数値予報のイノベーションを推進する計画として、「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定しました。

気象庁は、この重点計画において、数値予報の高度化・精度向上について、現在の技術水準に立てば野心的とも言える目標を掲げています。これらの目標を達成し、数値予報が防災・減災や生産性革命など様々な分野で活用され、来るべき 2030 年の超スマート社会を支える大きな柱・国民共有の新たな財産となるよう、関係者の皆さま

まのご理解とご協力を得て、取り組みを強力に推し進めてまいります。

本計画の策定に当たり、国際的な科学技術の動向を分析し、併せて関連する分野の専門家によるご検討もいただきました。本計画が、この分野を担う次世代の皆さまの道標ともなることを期待するとともに、関連する課題・研究に取り組まれている大学等研究機関の皆さまと気象庁の一層の連携を進めてまいります。

平成 30 年 10 月

気象庁長官 橋田 俊彦

目次

要旨	i
第1章 数値予報における技術開発戦略	1
1 気象業務を巡る現状認識	1
1.1 自然災害の変化	1
1.2 社会情勢の急速な変化	2
1.3 科学技術の飛躍的發展	3
2 数値予報に関する気象庁のビジョン	5
3 2030年に向けた重点目標	5
4 技術革新の推進	7
4.1 次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用	7
4.2 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	9
4.3 確率予測とAI技術の融合による意思決定支援	10
5 開発マネジメントの強化	11
5.1 幅広い連携の推進	11
5.2 開発者の育成と確保	13
5.3 研究・開発基盤の整備	15
第2章 重点目標の達成へ向けた開発計画	17
1 これまでの気象庁の取り組み	17
1.1 系統的な開発の推進	17
1.2 科学的方法の重視	18
1.3 開発支援基盤の整備	19
2 更なる開発の推進	20
2.1 気象庁の開発指針	20
2.2 モデル開発におけるフレームワークの整備	21
3 重点目標ごとの開発計画	23
3.1 豪雨防災	23
3.2 台風防災	27
3.3 社会経済活動への貢献	31
3.4 温暖化への適応策	35
おわりに	38
謝辞	39

要旨

気象災害の防止・軽減、社会経済活動における生産性向上に資するよう、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」に示された方向性に基づき、防災分野を始め社会における情報サービス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、「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定する。

1 気象業務を巡る現状認識

自然災害の変化

我が国では、「平成29年7月九州北部豪雨」や「平成30年7月豪雨」など、集中豪雨による災害が相次いで発生している。また、今後、戦後相次いで襲来したカスリーン台風や伊勢湾台風クラスの台風が襲来すれば、人命や財産の喪失だけでなく、長期間の都市機能のまひなど深刻な被害が想定される。

近年、顕著な気象による自然災害が激甚化しており、今後更に、地球温暖化に伴い、災害が深刻化するおそれが懸念されている。気象災害の防止と軽減のため、信頼性の高い防災気象情報を提供することが強く求められている。

社会情勢の急速な変化

我が国では、少子高齢化・人口減少社会が本格的に到来し、地域社会で防災の担い手が減少するとともに、防災に関する要配慮者も増加するなど、地域防災力の低下が懸念される。また、生産年齢人口減を踏まえ、生産性の向上が強く求められている。

同時に、IoT（モノのインターネット）やAIなど、ICT（情報通信技術）の普及と利用が急速に進み、様々な状況において気象情報・データの更なる利用が見込まれている。

こうしたなか、気象情報・データには、防災情報のみならず、国民一人一人の生活における活用や、産業界における意思決定や業務プロセスの改善に資するなど、超スマート社会（Society 5.0）の基盤情報として、社会・経済への貢献が強く期待されている。

科学技術の飛躍的發展

数値予報は、観測データ収集から予測シミュレーションまで、大気の状態を物理学や化学の方程式を用いた様々な計算により未来を予測する。近年、スーパーコンピュータやシミュレーション技術など、数値予報を支える科学技術が飛躍的に発展している。加えて、多種多様なセンサの発展と普及により、観測ビッグデータ時代が到来しつつあり、地球の現在の状態を更に高い精度で把握することが可能になりつつある。

各国の気象機関も、数値予報の技術開発に関して、必要な人材や予算の確保、スーパーコンピュータの整備を精力的に進めるなど、技術開発の国際競争は急激に加速している。同時に、世界気象機関（WMO）や各地域の枠組みにおいて、各国に共通する開発を推進するための国際連携も大きく発展し続けている。

2 数値予報に関する気象庁のビジョン

気象業務を巡る現状認識を踏まえ、数値予報に関する気象庁のビジョンとして、「国民一人一人の安全・安心を守り、活力ある社会を実現する数値予報イノベーション」を掲げる。

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である。この高度化・精度向上を強力に押し進めて、防災を始め社会のニーズに応える水準を達成することで、数値予報を、2030年の来るべき安全、強靱で活力ある社会を実現するための大きな柱・国民共有の新たな財産とする。

3 2030年に向けた重点目標

数値予報に関するビジョンの実現に向けて、自然災害や社会情勢の変化と科学技術の発展を踏まえ、2030年に向けた重点目標を掲げる。

豪雨防災

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する。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にする。

台風防災

台風や前線に伴う大雨などの予測精度を向上し、大規模風水害や高潮災害に対して、数日前からの広域避難に関する防災行動の確実な実行を可能にする。

社会経済活動への貢献

半年先までの気象予測の高度化・精度向上により、気候リスク軽減や流通・生産計画の最適化を始め、社会経済活動における生産性向上へ貢献する。

温暖化への適応策

関係機関との連携のもと、地球温暖化について、より高解像度かつ我が国として統一的な予測を提供し、自治体や民間における温暖化適応策の策定に資する。

4 技術革新の推進

2030年に向けた重点目標を達成するため、予測精度向上の鍵となる以下の3つの項目について、技術革新を重点的に推進する。

次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用

線状降水帯を生み出す環境場の湿った空気の動態や、台風を取り巻く大気や海洋の状態などについて、次世代のセンサやその利用技術により衛星データ等の観測ビッグデータを活用して“地球の現在を的確に捉え”、高精度の予測を可能にする。

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

最新のスーパーコンピュータとシミュレーション技術により、熱波・寒波などの大規模な現象から、台風や線状降水帯を構成する積乱雲まで、詳細かつ高精度に“日本の気象を予測”することを可能にする。

確率予測とAI技術の融合による意思決定支援

集中豪雨時の避難から地球温暖化の適応策まで、その予測情報に加えて予測の不確実性を利用者に分かりやすく伝え、“意思決定に寄与”できる技術を実現する。

5 開発マネジメントの強化

技術革新の実現に向けて、開発マネジメントを強化して開発を力強く推進する。

幅広い連携の推進

産学官オールジャパンの連携を実現するとともに、国際的な連携も強化し、数値予報に関する研究と開発を力強く推進する。

開発者の育成と確保

世界最先端の科学技術に基づいた開発を実現するため、多様な人材の活躍を推進し、高度な専門家や開発をけん引できるリーダーを育成する。

研究・開発基盤の整備

スーパーコンピュータ、AI等基盤ソフトウェア、衛星等の観測基盤、開発フレームワークなど、研究と開発を支える最先端のハードウェア・ソフトウェアを重点的に強化する。

6 開発計画

気象庁の開発指針

数値予報を実際に行うためのソフトウェアは、数値予報モデル(以下「モデル」という。)と呼ばれる。モデルの開発は、数値予報の発展と直結しており、その推進こそが、数値予報の革新を実現するための中核である。

モデルは、高度な科学技術に基づく巨大かつ複雑なソフトウェアの集合体であり、その開発を推進するためには、開発に携わる一人一人が、ビジョンと重点目標のみならず、以下に示す開発指針を共有することが重要である。

プライオリタイゼーション

目標達成に資する開発を重点化するため、開発や運用のコストを踏まえつつ、先行研究・開発の分析に基づき、開発の優先順位を設定して共有する。

実証的根拠に基づく開発

実証的根拠と科学的議論を重視することを基本とし、開発内容のトレーサビリティを確保する。また、共通の評価手法に基づいた体系的な開発を推進する。

開発全体の最適化

開発を支える基盤ソフトウェアの整備や、開発環境の確保などにより、開発全体を最適化・強化して、研究・開発を推進する。

重点目標達成に向けた開発計画

重点目標の達成に向け、現状と課題、及び開発の方向性を示す。

豪雨防災

現状と課題

- 最も解像度の高い局地モデルでも、線状降水帯を半日程度前から時間と場所を絞って予測することは依然困難であり、予測の不確実性が高い。
- 個々の積乱雲を表現するには、現状の水平 2 km の格子間隔では解像度が不足。また、高い解像度に適した物理過程が必要。
- 海上の水蒸気量や風について初期状態の精度が不十分。

開発の方向性

- 局地モデルを 1 km 以下に高解像度化、また、積乱雲に関する諸過程の改良。

- 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。
- 衛星、航空機、レーダー、船舶GNSS（Global Navigation Satellite System：全球測位衛星システム）、IoT化した多様なセンサなど最新の観測による、多くの観測種別を持ち、かつ、時間的、空間的に高密度な観測ビッグデータの更なる活用。
- 衛星データについて、雲や雨の影響を受ける領域も加えた利用、いわゆる全天候利用手法の開発。複数の手法を組み合わせた最先端の同化技術であるハイブリッド同化の導入、観測誤差相関の取り扱いなどの高度化。
- 豪雨事例等のメカニズム研究による、最新の科学的知見に基づく改良。

台風防災

現状と課題

- 台風に伴う豪雨・高潮の数日先の予測には、地球全体から日本周辺の詳細な予測まで、幅広いスケールを効率的に取り扱うことが必須。
- 環境指向流（台風の進路に影響する大気の流れ）と台風構造の両面から台風予測を改善し、進路予測の予測精度を飛躍的に向上することが必要。
- 特に、台風周辺の気象場について初期状態での精度が不十分。

開発の方向性

- 全球モデル、メソモデル、高潮等の海関連モデル、アンサンブル予報システムなどによる、最適な階層的システムの開発。

- 台風予測に用いる全球モデルの水平格子間隔を 10km 以下へ高解像度化。同時に、高解像度化したモデルに、より適した新しい物理過程の開発。
- 衛星観測によるマイクロ波放射輝度温度や赤外放射輝度温度データを全天候で利用。また、航空機、大気追跡風、GNSS、散乱計などを含む観測ビッグデータを更に高解像度かつ高頻度で利用する技術の開発。
- モデル内部のパラメータ最適化や、物理モデルの高速計算、観測データの品質管理などで活用可能な AI 応用技術の開発。
- 台風の移動や発達メカニズム研究による、最新の科学的知見に基づく改良。

社会経済活動への貢献

現状と課題

- 生産・流通計画の最適化を始め、社会経済活動において、半年程度先までの予測を本格的に利用するには精度が不十分。
- 予測対象とする現象に応じて、効率的・効果的に予測する技術が必要。特に 2 週間より先の予測では、大気海洋相互作用など地球システム（大気のみならず陸、海洋、海氷、オゾン、エアロゾルなどの地球を包括する自然システム）内の相互作用を適切に表現できるモデルが必須。

開発の方向性

- 熱波・寒波や海水温、日射量など、様々な現象・要素を高精度に予測し、かつ現業的に提供可能な、階層的な地球システムモデルの開発。
- 数か月先の予測に重要な、海洋の渦を精緻に表現することが可能な高解像度海洋モデルの開発。

- 陸、海洋、海氷、エアロゾルなど多様な観測データを地球システムのモデルと整合させて取り込むデータ同化手法の高度化。

温暖化への適応策

現状と課題

- 国や自治体で必要となるきめ細かな温暖化予測情報の作成には、関係機関と連携し、日本付近の高精度かつ詳細な予測を可能とすることが必要。
- 詳細な予測の基本となる、地球規模の温暖化予測の精度向上が必要。

開発の方向性

- 数 10 年から 100 年まで先の、温暖化に伴う台風・大雨などの極端現象や海水温・海面水位などの変化を予測する大気や海洋の高解像度地域気候モデル。
- 地球規模の温暖化を予測する地球システムモデルの高精度化。

第1章 数値予報における技術開発戦略

気象災害の防止・軽減、社会経済活動における生産性向上に資するよう、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」に示された方向性に基づき、「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」（以下「本計画」という。）を策定する。気象庁は、本計画に基づいて、防災分野を始め社会における情報サービス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。

1 気象業務を巡る現状認識

1.1 自然災害の変化

我が国では、集中豪雨、台風、豪雪、猛暑など、顕著な気象による甚大な災害が毎年のように発生している。近年、「平成29年7月九州北部豪雨」や「平成30年7月豪雨」などのように、雨の降り方は実感を伴って局地化・集中化・激甚化の様相を示しつつある。気象災害の防止や軽減のため、集中豪雨や台風など影響の大きな気象について、精度が高く使いやすい防災気象情報を提供し、防災行動を支援することが社会から強く求められている。

例えば、線状降水帯の発生・停滞による豪雨災害において、自治体や防災関係機関、高齢者や在留外国人を含む住民、訪日外国人旅行者等の各主体が的確な防災行動を確実にとれるよう、発災の半日程度前から、確度の高い降水予測を提供することが求められている。

また、伊勢湾台風やカスリーン台風などに匹敵する災害をもたらす台風が再来すれば、大規模水害や高潮災害などの発生により、長期間の都市機能のまひなど深刻な被害が想定される。加えて、「平成30年7月豪雨」のように、広域にわたって記録的な大雨が発生す

るような、梅雨前線に伴う顕著な現象への備えも必要である。その際、国や地方自治体などの防災対応において、大雨、暴風、高潮、波浪などについての高精度な予測シナリオが、発災の数日前から利用できることの意義は非常に大きい。

ほかにも、平成30年2月の強い冬型の気圧配置による大雪や平成30年夏の猛暑など、社会的影響が大きく、また人的被害にもつながる顕著現象に対し、自治体、企業、住民などが事前対策をとれるように、十分に早い段階から意思決定に寄与する予測情報を提供することへの社会的要望は大きい。

加えて、今後更に、地球温暖化に伴う気候変動により、極端な降水がより強くより頻繁となる可能性が非常に高いことが、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル）の報告書において示されており、国や自治体等における防災・社会インフラ整備等のハード対策の基礎情報となる地球温暖化予測情報についても更なる充実が必要となっている。

1.2 社会情勢の急速な変化

我が国の社会情勢は、少子高齢化の急速な進行や、人口減少により、大きく変化しつつある。その結果、高齢者等の災害時要配慮者の増加や、地域における防災の担い手が減少するなど地域防災力の低下、また生産年齢人口の減少や国内市場の縮小などの経済活動への影響が懸念されている。同時に、近年、IoTや新しい世代のAIなど、飛躍的に発展したICTの普及と利用が急速に進んでおり、今後の社会的課題を解決していく原動力として期待されている。

このような状況のなか、第5期科学技術基本計画において、目指すべき未来社会の姿として「Society 5.0 超スマート社会」が提唱され、その本格的な実現に向けて戦略的な取り組みが進められてい

る。Society 5.0 とは、最新の科学技術を活用し、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合したシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立することを目指すものである。気象情報・データは、まさに現実の気象状況をサイバー空間で表現したものであり、超スマート社会の基盤情報として、様々な状況において利用されることが期待されている。

数値予報は、物理学や化学の方程式によるシミュレーションに基づき、降水量、降雪量、気温、日射量など様々な気象要素を、要素間の整合性を保ちながら予測することが可能である。また、かつて経験したことがないような顕著現象も取り扱える。このように、数値予報は優れた特性を持つため、超スマート社会における不可欠な基盤情報として、防災・減災、国民一人一人の活力ある生活、経済活動におけるイノベーションに貢献していくため、更なる高精度化・高度化が望まれている。

1.3 科学技術の飛躍的發展

数値予報は、観測データ収集から予測シミュレーションまで、スーパーコンピュータを用いて様々な計算により未来を予測する。近年、スーパーコンピュータやシミュレーション技術など、数値予報を支える科学技術が飛躍的に発展している。同時に、多様なセンサの発展と普及による観測ビッグデータ時代が到来し、地球の現在の状態をより高い精度で把握することが可能になりつつある。

H P C (High-Performance Computing、スーパーコンピュータ技術を含む) は、科学の発展と技術革新を推進するための原動力であり、数値予報にとっても必要不可欠な基盤である。近年、H P C の状況は急速に変化し続けており、多数のコアによるピーク演算性能

の向上が見込まれつつも、演算加速器や高いメモリ帯域幅を持つ軽量コアなどの新しいアーキテクチャが絶え間なく出現している。

大気や陸、海洋などの予測シミュレーションを行うソフトウェアを予報モデルと呼ぶ。大気の予報モデルでは、HPCにおける性能向上を活かして解像度が向上し、また予報モデルの内部計算について精緻化が進み、気象をより現実的に表現することが可能になってきている。また、陸、海洋、海氷、植物、エアロゾルなど、大気以外についても観測技術やシミュレーション手法が発展し、これまで考慮できていなかった地球の要素を予報モデルに取り込むことが可能になりつつある。

リアルタイムの地球の観測データは、近年、ひまわり8号・9号などの衛星やレーダーなどによるリモートセンシングデータが大きく増加し、例えば、全球モデルで1日に利用されるデータの数は、ここ6年間で約4倍増加し1,000万に届こうとしている。更に、ひまわり8号・9号に続く新世代の静止衛星観測を始めとする、高解像度で高頻度かつ新しい観測要素を含む、これまでとは桁違いの情報量を持つ観測が登場し始めている。加えて、今後のIoT技術の発展と普及により、多様なセンサからの観測データが爆発的に増加する可能性がある。これら観測ビッグデータを取得し、高度に、あるいは新規に利用することは、数値予報の精度向上の鍵といえる。

AI技術については、これまでも数値予報の結果を用いたプログラムの作成で利用してきたが、近年の新世代技術の登場により、観測データの品質管理や予報モデルの内部パラメータ最適化に適用できる可能性が開けつつある。

各国の気象機関においても、数値予報の技術開発が年々加速しており、各国とも着実に予測精度を向上させている。気象庁の予測精

度は、これまでトップ集団に追隨してきたものの、近年その差は開きつつある。各国とも、それぞれの重点目標を定めて、その達成に向けた開発戦略を策定し、必要な人材や予算の確保、部外機関との連携強化、スーパーコンピュータの整備を精力的に進めている。同時に、WMOや各地域の枠組みにおいて、各国に共通する開発を推進するため、国際連携も大きく発展し続けている。

2 数値予報に関する気象庁のビジョン

気象業務を巡る現状認識を踏まえ、数値予報に関する気象庁のビジョンとして、「国民一人一人の安全・安心を守り、活力ある社会を実現する数値予報イノベーション」を掲げる。

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である。この高度化・精度向上を強力に押し進めることで、防災を始め社会の様々なサービスの充実・発展に、より直接に、より効果的に貢献できる。これについて、社会のニーズに応える水準を達成することで、数値予報が、2030年の来るべき安全、強靱で活力ある社会を実現する大きな柱・国民共有の新たな財産となることが、本計画で描くビジョンである。

3 2030年に向けた重点目標

ビジョンの実現に向けて技術開発を推進していくため、具体的な目標とマイルストーンを設定する。防災・減災、生産性革命、温暖化への適応策の重点分野において、達成すべき重点目標として以下を掲げる。

◇ 豪雨防災

- 「平成29年7月九州北部豪雨」や「平成30年7月豪雨」などの豪雨について、線状降水帯の発生・停滞に伴う集中豪雨

の予測精度向上により、12 時間前からの警戒と避難を可能にする。短期的には、12 時間先において、線状降水帯が停滞して特別警報級の大雨になる確率を予測する。また、長期的には、予測精度の大幅な向上により線状降水帯の発生と停滞を予測し、より確度の高い大雨の予測を可能にすることを目指す。

◇ 台風防災

- 台風の接近に伴う大雨などの予測精度を向上し、伊勢湾台風やカスリーン台風に匹敵する台風などがもたらす災害に対して、広域避難に関する数日前からの防災行動を確実に実行することを可能にする。短期的には、顕著な災害の発生する可能性がある場合に、流域雨量や高潮に関する詳細な予測情報を新たに作成する。また長期的には、台風の3日先の進路予測誤差を現在の1日先の誤差(約100km)程度にまで改善する。また、梅雨前線の停滞などに伴う3日先までの雨量予測精度を大幅に改善することを目指す。

◇ 社会経済活動への貢献

- 半年先までの気象予測の高度化と精度向上により、気候リスクの軽減や流通・生産計画の最適化を始め、社会経済活動における生産性向上に貢献する。短期的には、現象発生の直前から、数時間、数日、数週間、半年先とそれぞれの予測時間に応じて、詳細かつ高精度な予測情報をその信頼度も含めて提供する。また、長期的には、流通・生産計画の策定に特に役立つ3か月先までの冷夏・暖冬などの予測の精度を、現在の1か月前の予測程度に改善することを目指す。

◇ 温暖化への適応策

- 数10年から100年まで先の地球温暖化について、関係機関との連携のもと、より高解像度かつ我が国として統一的な予測を提供し、国や自治体、民間における温暖化適応策の策定に寄与する。具体的には、近未来の予測情報、台風・大雨など極端現象の頻度変化や海面上昇の見通しなどを含む、統一的かつ詳細な温暖化予測情報の提供を行うことを目指す。

4 技術革新の推進

重点目標を達成するため、その達成の鍵となる項目について技術革新を推進する。

4.1 次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用

質、量ともに増大する観測データを最大限活用するため、次世代技術を積極的に取り込むことによりデータ同化システムを高度化する。大気を始め地球の現在の状態を、スーパーコンピュータでシミュレーション可能なデータとして再現するデータ同化では、観測データの持つ情報を正しくより多く引き出すことが重要である。特に、激しい対流活動などの気象条件における初期値を改善することは、台風や集中豪雨などの予測精度の向上に直結する。

現行の手法では、気象状況により時々刻々と変化する、前回予報による第一推定値及び観測値それぞれの誤差の期待値を見積もることが困難であることや、大量の観測データの利用手法について課題がある。そのため、アンサンブルデータ同化手法と変分法のハイブリッド同化システムの導入や、観測データ誤差値の利用法の見直し、気象の非線形性への対応手法の導入などにより、増大する観測データのより有効な活用を図る。

また、陸の表層（陸面）、海洋、海氷などの地球システムの構成要素について、データ同化技術の開発に取り組む。特に、数日までの短い時間スケールを予測対象とするモデルにおいて、これらの構成要素に対するデータ同化手法は現時点では簡便な手法に基づいていることから、より高度な手法の開発を強化する。更に、これらの初期値を大気の初期値と整合させ、更なる精度向上を図るため、各要素を一体的に取り扱う結合データ同化システムの基礎開発を行う。

新世代の静止衛星観測、S S RモードS（Secondary Surveillance Radar Mode S）によってダウンリンクされる航空機観測、マルチパラメータレーダーやフェーズドアレイレーダーの観測など、その数と多様性が加速度的に増している地球の観測ビッグデータについて、その利用を積極的に進めていく。特に、台風や集中豪雨などの予測においては、大気を含む水蒸気の種類と分布を的確に把握し初期値に反映することが重要となる。日本の場合、特に海上で得られる観測を最大限活用することが重要である。

衛星観測データのなかでも、大気の大気温度や水蒸気の高密度かつ鉛直構造の情報が得られる、マイクロ波や赤外の鉛直探査計及び放射計データは、精度の高い初期値の作成に必須である。従来はほとんど晴天域のデータしか利用されてこなかったが、雲や降水の影響を受けた観測データを利用することは、前述のとおり集中豪雨や台風の予測精度向上の鍵であるため、重点的に取り組む。

また、集中豪雨などの直近の予測では、次世代静止気象衛星や航空機、マルチパラメータレーダーなどの地上リモートセンシングから得られる多くの観測種別を持ち、かつ、時間的、空間的に高密度なデータを積極的に利用して、風や気温、水蒸気の初期値の改善を

進める必要があり、これら観測データの利用手法を確立するための開発に取り組む。

4.2 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

最新のスーパーコンピュータとシミュレーション技術により、熱波・寒波などの大規模な現象から、台風や線状降水帯を構成する積乱雲まで、詳細かつ高精度に予測することを可能にする。

大気や海洋などの予報モデルでは、計算対象の空間を格子状に分割した各点で流体の運動を計算する、いわゆる力学過程の改良により、スーパーコンピュータの性能を引き出して更に高い解像度で計算を行う。

また、大気の予報モデルにおいて、太陽光などの放射や雲などを取り扱う、いわゆる物理過程に関しては、その技術が未成熟で不確実性は依然大きく、予測精度向上のボトルネックとなっている。今後、最新の研究成果による自然現象の理解に基づいて、物理過程を大きく改善することが必要である。そのため、物理過程の改良に役立つ、特別観測を行う研究プロジェクトへの参加や企画等をより推進していく。特に、放射、雲、積雲、乱流輸送、海面境界などの、激しい対流活動にかかわる物理過程に着目する。

近年、解像度が高い予報モデルにおいて、「グレーゾーン問題」と呼ばれる課題が世界的に認識されつつある。水平格子間隔が粗い予報モデルでは、積雲や積乱雲に伴う対流運動（積雲対流）は、水平格子間隔よりも空間スケールが小さい現象であり、パラメタリゼーションと呼ばれる手法により、物理過程として扱う対象である。一方で、水平格子間隔が数 km より小さい予報モデルでは、積雲対流などのスケールの小さな現象があらわに表現され始める。このとき、力学過程と物理過程の役割分担について、従来からの前提が成り立

たなくなり、高解像度化による精度向上を阻害する可能性が指摘されている。これが「グレーゾン問題」である。この挑戦的な課題に取り組み、詳細かつ高精度な予測を実現する。

更に、大気、陸面、海洋、海氷、波浪、オゾン、エアロゾルなど、地球システムを構成する様々な要素の諸プロセスについて、それらをモデル化したもの（以下「モデル要素」という。）を、モデル要素間の相互作用に着目しつつ開発する、いわゆる「地球システムモデリング」アプローチを重視する。その開発においては、幅広い連携により専門家の知見を結集し、先端技術を積極的かつ効率的に取り込むとともに、開発効率を高めるため、数値予報モデルの構造を適切に階層化する。

4.3 確率予測とAI技術の融合による意思決定支援

集中豪雨時の避難から地球温暖化の適応策まで、予測情報に加えて予測の不確実性を利用者に分かりやすく伝え、意思決定に貢献することが可能な技術を実現する。予測の不確実性を的確に表現するためには、異なる初期値を多数用意するなどして多数の予測を行う、いわゆるアンサンブル予報と、予報モデルの予測結果を統計的法則性に基づき修正、変換するアプリケーション（以下「ガイダンス」という。）を高度に組み合わせることが必要である。

物理法則に基づきシミュレーションを行う予報モデルは、与えられた初期条件、境界条件及び予報モデルで用いるパラメータやモデル化の方法により不確実性を含みながらも、気候変動による影響を含む様々な現象を原理的に取り扱うことができる利点がある。アンサンブル予報においては、予測の初期条件、境界条件及び予報モデルの不確実性を考慮して、様々な条件でシミュレーションを行うことで、対象とする現象の予測可能性が分かるが、これらの不確実性

を適切に捉えて表現する技術を更に高度化する。同時に、ガイダンスにおいては、これまで利用してきたAI技術に加えて、深層学習など新しい世代のAI技術を用いて、アンサンブル予報をより詳細で高精度、かつ利用者の利便性が高い情報へ、高速に変換可能な技術を開発する。

加えて、気象情報が、利用者のニーズに応じて意思決定に寄与するためには、利用者に気象情報を理解してもらうことが必須である。そのため、一般の方を含む利用者に対し、予測精度の評価結果を分かりやすく説明し、現状の数値予報の予測技術水準や改善の実績について正確な理解の普及に努めていく。同時に、利用者からのフィードバックを分析し、数値予報が意思決定に更に寄与できるようにプロダクトの利便性を継続的に改善する。

特に、集中豪雨などの現象は、自然現象の性質として確率的にしか予測できない不確実性を持つため、予測情報として確率的なプロダクトが有効であり、その利活用へ向けて社会的理解をより一層得るよう努める。

5 開発マネージメントの強化

重点目標の達成に向けて、技術革新を実現するためには、開発マネージメントを強化して開発を力強く推進する必要がある。近年、各国の気象機関でも、数値予報技術開発を戦略的に進めるため、マネージメント改革が行われている。各国の取り組みも参考にし、以下の方針をまとめた。

5.1 幅広い連携の推進

数値予報は、物理学、化学、応用数学、計算機科学、数値流体力学など、多くの分野にまたがる総合科学としての性格をますます強

めており、その開発においては各分野の専門家との連携を強化し、また、最新の研究成果を取り込むことがより重要になっている。同時に、モデルが取り扱う地球システムの構成要素は、大気、陸、海洋、雪氷、エアロゾルなどその数を増しており、各要素の専門家との連携も重要になっている。

こうした背景の下、各国の気象機関でも、数値予報技術開発を更に加速するため、関連分野の研究・開発コミュニティとの連携強化を進めている。我が国が参考にすべき取り組みとして、各国の気象機関では、より組織的に連携を行うため、研究・開発コミュニティの成果を取り込む専門の部署や組織が設けられている。また、数値予報に対して気象機関が求める要件や、研究・開発成果をモデルに取り込む場合の評価基準を明確かつオープンにしておくこと、モデル開発における標準ルールを研究・開発コミュニティと気象機関が共有していることなどがあげられる。

更に、我が国では、台風や梅雨前線など、世界的に見ても特徴的な現象が見られるため、国内の大学等研究機関における専門家と一層連携を進め、特有の現象を解明することを通じた予測精度向上も目指す必要がある。

気象庁は、平成 29 年度から、数値予報の予測精度向上に資することを目的として、大学等研究機関の専門家を委員とする「数値予報モデル開発懇談会」を開催している。数値予報モデル開発懇談会（第 2 回）の議論では、研究プロジェクトの計画段階から密接な連携が可能になるよう、気象庁から開発における課題をしっかりと大学等研究機関に提供し、また連携が機能する仕組みを構築していく必要性が指摘された。更に連携を推進するためには、大学等研究機関と気象庁の相互理解が必須である。今後、気象庁の側から、数値予報

の課題など、数値予報に関連する情報の発信をより積極的に行うことに努めていく。

ほかにも、より良いガイダンスを作成するためには、モデル開発とガイダンス開発の連携が必要となる。近年、気象庁ではモデル開発者とガイダンス開発者が情報を密に共有し、特に大きなモデル更新に際しては、モデルの特性変化に対応するなどの取り組みを実施しており、今後もその連携強化を進める。

また、数値予報モデルのリアルタイム運用に必要な観測データを、タイムリーに収集して効果的に利用するには、観測を実施している機関と密に連携することが重要である。例えば、今後打ち上げられる静止気象衛星や極軌道衛星の利用にあたっては、宇宙機関（衛星運用機関、衛星データ処理機関）などと引き続き積極的に連携していくことが不可欠である。特に、新規衛星計画の検討に当たっては、観測の設計などで協力し、また、打ち上げ後にはデータの早期入手や観測データの評価を行うことなどを通じて、数値予報での利用の観点から情報を発信していく。

そして、これら関係機関等との連携強化を戦略的に推進していくマネジメントの体制も強化を図っていく。

5.2 開発者の育成と確保

数値予報に関する開発者には、物理過程、HPCに基づく数値計算、開発基盤の整備などの各分野における専門性に加え、開発を見渡し計画と調整を行うマネージャ、国際的な観測データ取得の調整担当など様々な役割と立場が求められる。世界最先端の科学技術に基づいた技術開発を実現するためには、多様なバックグラウンドを持つ人材の活躍を推進し、高度な技術を持つ専門家や、各分野で数

値予報技術開発をけん引できるリーダーを育成することが必須である。

我が国において、少子高齢化が急速に進行し、人口減少社会が本格的に到来すると予測されているなか、高度な開発に貢献できる開発者の確保と、様々な役割と立場における開発者の育成について、継続的な取り組みを進めていくことが不可欠である。気象庁は、開発者の確保と育成について、様々な取り組みを力強く実施する。

育成においては、技術開発に必要なICTやAIを始めとする最新科学・技術の知識や、高度な技能を開発者が修得できるよう、より効果的な研修を実施するとともに、オン・ザ・ジョブ・トレーニングの強化などを行う。同時に、先進的な外国気象機関への派遣を継続するとともに、内外の研究機関等との人材交流の拡大を模索する。また、数値予報の更なる高度化と飛躍的な精度向上を目指すためには、個々の技術要素に精通した専門家の育成に加え、科学的、技術的視点に立脚しつつ、幅広い観点から現状分析や業務計画を立案し、また社会のニーズを適切に踏まえつつ、数値予報業務をけん引できる開発者やリーダー、マネージャの育成が必須である。そのため、適性のある開発者については、個々の分野に対する専門性の育成だけでなく、技術開発のリーダーシップを発揮するために必要な素養の習得を推進する。

同時に、数値予報分野に携わる人材の裾野を広げることも重要である。昨今の「数値予報モデル開発懇談会」も様々な機会の一つと捉え、研究・開発コミュニティとの連携を通じた人材育成に取り組むとともに、幅広く様々な場において数値予報に関するビジョンの発信や数値予報開発に関する講義を庁内外において実施するなど、

数値予報に関する興味・関心を高め、大学等研究機関も含めて数値予報分野全体を振興・強化していくことに努める。

5.3 研究・開発基盤の整備

数値予報の技術開発を加速し、重点目標の達成を確実なものとするためには、スーパーコンピュータとそのシステム環境に加え、開発を効率的に行うための指針やAIなどのライブラリ、実験システムなどのソフトウェア基盤も含む、ソフト、ハード両面での開発基盤の整備が不可欠である。

今後、開発計画を実施していくためには、十分な能力を持つスーパーコンピュータや通信インフラを、継続的かつ計画的に確保していくことは必須である。特に、今後はエネルギー効率と消費電力の問題がHPCにおける性能向上のボトルネックになると想定されるなか、最新の電力効率の良い計算機の採用だけでなく、スーパーコンピュータシステムの運用手法や、運用設備全体で、高い耐障害性を維持しつつ、電力使用効率を改善していくことが求められている。

スーパーコンピュータを有効に活用するためには、そのシステムでのプログラムの高速化（最適化）を実施することが必要である。特に、効率的に並列計算・処理を行う性能、すなわちスケーラビリティは、データ同化から予測、ガイダンス作成などのポストプロセス、ユーザへのプロダクト配信まで、数値予報にかかわるすべての処理で重要である。高解像度化し複雑化した予報モデル、大きなサイズのアンサンブル予報、増大する観測データなど、将来のモデルと周辺処理は指数関数的に巨大化し、今日よりもはるかに困難な課題に直面することが見込まれる。新たな計算機の性能を十分引き出すためには、計算機に関する情報収集、高速計算手法の調査、計算

ライブラリの整備を実施して開発を支援することが重要であり、その体制を強化する。

開発における情報共有手法、数値実験、検証手法を共通化・標準化して、情報共有と議論の効率化を推進する。そのため、現業モデルに基づいた、開発に必要な実験システムや、それらの実験に対応した検証システムの整備を引き続き進める。また、研究・開発コミュニティとの連携強化や、移植コストの低減のため、実験や検証システムが、気象庁の計算機だけでなく、他機関のスーパーコンピュータにおいて利用可能になるようポータビリティを高める開発を行い、大学等研究機関との共同作業を通じた幅広い連携を推進する。

加えて、観測データの品質管理は異常値検出の問題を含み、また、パラメタリゼーションの開発は最適化問題の一種であるため、品質が管理された過去の観測データセットや、品質の高い過去初期値データセットを土台に、最新のA I技術を利用し効率的なモデル開発を推進することが有効かつ重要と考えられる。今後、同分野の専門家と連携しつつ、開発基盤として利用可能なA Iライブラリなどを整備し、またその利用を支援していく。

第2章 重点目標の達成へ向けた開発計画

1 これまでの気象庁の取り組み

気象庁では、これまで数値予報の技術開発を精力的に進め、予測精度の向上に努めてきた。今後、数値予報技術開発をより加速していくため、近年気象庁が取り組んできた内容と直面している課題を整理した。

1.1 系統的な開発の推進

数値予報の役割は、予測精度の向上とともに年々拡大しており、気象庁が業務として気象情報作成のために利用するだけでなく、民間における高度利用も進みつつある。その結果、数値予報は、国民の生活を支える必要不可欠な社会基盤となっている。そのため、予測精度の向上への期待が更に高まると同時に、モデルを更新する場合には、その内容や予測特性の変化などの説明責任が増大しており、開発はより計画的かつ慎重に進められている。

モデル改良を始める場合、既存のモデルに見られる問題点、利用者からのニーズなどに基づき、先進技術の動向や国際的な情勢を踏まえて開発課題を設定している。近年は特に、予測結果を多様な検証手法により詳細に分析し、発見された問題点について、必要な開発項目を設定することを精力的に進めてきている。

また、基礎開発から運用への導入に向けた開発の手順について、段階を分けて試験と評価内容を定めるなどの、標準化を徐々に進めている。例えば、数日先までを予測対象とするモデルの開発では、そのコンポーネント単位での開発と評価から始まり、これらコンポーネントを組み合わせたモデルを用いて予測精度の確認試験を行い、最後に実際の運用と同等な試験で最終的な実用化の可否を判断、と

いった手順が確立されつつある。一方で、まだ開発手順の標準化が進んでいないモデルも多く、標準化の度合いはモデルごとに異なる状況である。また、検証項目や試験基準の整理も全体としては不十分である。引き続き、実験と検証項目、評価基準などを含む、開発手順の標準化、明確化を推進している。

1.2 科学的方法の重視

モデルの高度化と精緻化に伴い、モデルの細部まで、定式化、離散化、コーディング、コンポーネント間の相互作用などを十分に検討することが、予測精度向上を達成する上で重要になっている。特に、2つのモデル要素が正反対の予測誤差を生み出している場合、両者を組み合わせた結果、誤差がお互いに打ち消し合い隠れてしまうことがある。このとき、片方の精緻化や高度化だけでは、隠れた誤差が表に出てくるだけで予測精度が悪化してしまうため、開発を進める上での問題となっている。

また、科学技術の発展により、地球システムの構成要素を詳細にモデリングすることが可能になった。しかし、要素の増加や複雑化は、予測に必要な計算機資源の飛躍的な増加につながる。現業モデルでは、利用者に対して限られた時間内に予測結果を提供することが必須であるため、詳細なモデル要素をすべて導入することは不可能である。そのため、予測精度を向上させるためには、実証実験により様々な可能性を精査し、重要な要素を必要な複雑さでモデリングして導入することの重要性が高まっている。

これらの課題に対応するためには、精度向上のための作業仮説を立て検証するプロセスを繰り返すサイクル、いわゆる科学的方法の利用が有効である。近年、多種多様な観測データが増えてきたことや、特定の現象に着目した国際研究プロジェクトが実施されてきた

ことにより、個々のモデル要素について現実と詳細に比較して検証することが可能となってきた。また、検証等の開発手順や開発を支援する基盤の整備が進展している。その結果、科学的方法を用いたモデル開発を効率的に実践することが可能となっている。

1.3 開発支援基盤の整備

近年のモデルは、ソフトウェア・システムの集合体（System of Systems）であり、その規模は巨大化し、同時に一つ一つのコンポーネントは複雑化している。これら複雑なシステムの開発において、手戻りを減らし効率化を図るため、実行が容易な実験環境や検証ツールなどの、開発を支援する基盤の整備が進められてきた。これは、シンプルで高速に実行可能な理想条件下での実験から、実際の運用と同等な実験まで、階層的な複雑さを持った数値実験環境である。この基盤は、科学的なモデル開発を支援し、ひいては数値予報の改善に大きく貢献している。

更に、開発効率を高めてより多くの成果を出していくためには、開発者が「モデル開発における標準」を共有していることが重要である。この標準は、モデル開発におけるフレームワーク（以下「開発フレームワーク」という。）といえるもので、開発戦略や開発指針、ソフトウェア工学の範囲での様々な規約や指針、開発環境の利用規則などを含む体系化されたルールと、その下での開発を支援するツール群の集合である。気象庁において、開発フレームワークの整備が進められてきた成果は大きく、特に情報共有の円滑化や作業履歴の記録化などの進展により、開発効率は着実に向上している。

一方で、今後、モデルに関する科学技術の更なる発展や、観測データの増加により、モデルの更なる巨大化、複雑化が見込まれている。近年の取り組みを更に推し進め、数値実験環境の更なる整備や、

開発フレームワークの高度化と浸透を図ることで、戦略的に開発リソースの非効率な利用と分散を防ぐなど、効率的に開発を行うことが重要である。

2 更なる開発の推進

2.1 気象庁の開発指針

今後の開発において、限られた人的資源、計算機資源を有効に活用していくため、モデルに関する近年の情勢や、これまでの気象庁の取り組みを踏まえ、今後の開発における基本方針を、3つのキーワードに整理した。

プライオリタイゼーション (Prioritization)

本計画で掲げた重点目標を踏まえ、定量的な数値予報の評価指標を作成し、開発の進捗状況や課題を可視化する。モデルとガイダンス、地球全体を扱う全球モデルと領域を限定して詳細な計算を行うメソモデルなどの役割分担を整理した上で、重点目標の達成への貢献が明確になるようにアウトプットを定め、各モデルの開発項目を設定する。それぞれの開発項目について、先行研究などから想定される評価指標に対する改善への寄与の大きさと、開発と運用のコストを勘案し、開発の優先順位を整理して開発を推進する。

実証的根拠に基づく開発 (Evidence based development)

実証的な根拠、論理的な議論、及び重点目標を踏まえた評価指標に基づく開発を強化する。具体的には、開発プロセスにおいて、理論的整合性の重視、標準検証の共有、系統的な評価指標の利用などを通じて、開発者間のコンセンサス形成に向けた議論を推進する。また、そのために必要な実験手順の明確化、及び検証の標準化を推

進する。これらの取り組みは、改良効果を試験的に見積もる調査・研究において、プライオリタイゼーションをより効果的なものにする。

開発全体の最適化 (Emphasis on logistics)

重点目標の達成へ向けて、開発を進めると同時に、持続的な開発に重要な、計算機資源の確保や開発人員の確保と育成、開発の環境整備に努める。効率的な開発のため、実験システムや検証システムなどの共通基盤を整備する。これら開発管理の強化を含むロジスティクスの拡充により、開発内容の重複や非効率な資源利用を抑制しつつ、開発全体の最適化を進める。また、共通基盤の整備は、実証的根拠に基づく開発にも資する。

2.2 モデル開発におけるフレームワークの整備

本計画の戦略及び開発指針に基づき、開発フレームワークの整備を更に進めて、数値予報技術開発を力強く推進する。

気象庁では、様々な用途に対して、最適な複数のモデルを開発して運用している。これらのモデルの間で共有できるコンポーネントを増やすこと、またコンポーネント間でのデータのやり取りをスムーズに行えることは、開発効率の向上に重要である。そのため、モデル要素を始めとする、モデルのコンポーネントについてその設計方針を共通化し、コンポーネントの階層的な組み合わせや、モデルの入出力のスムーズな組み合わせを可能にする。また、開発の継続性を担保するとともに、科学的方法に基づいた開発を行うため、各モデル要素に対する検証手法と精度を系統的に記録して共有し、開発内容のトレーサビリティを確保する。加えて、それぞれの開発における検証結果を整理して、モデル間で共有すべきモデル要素とそうで

ないものの整理を進めて効率的に開発を行う。モデル要素の選択や設定に関する情報は、分かりやすく管理した上で、異なるモデルでも共通の試験が可能となるように努める。

コンポーネントの設計においては、複数のモデルで共有することを念頭におき、計算量と精度、機能のバランスを、要求要件に応じて選択可能なものを目指す。同時に、実行時間の制約の下、複数の解像度や取り扱うモデル要素数の異なるモデルにおいて利用を可能にするために、スケーラビリティの確保に努める。また、階層的な開発を支援するため、実行形態として、関連する処理から切り離して単体で実行する単独実行やいわゆるオフライン実行に対応する。

検証においては、更なる観測とシミュレーションによるビッグデータを活用したリファレンス（参照値）の追加や、検証項目の拡充と高度化に努める。検証には、重点目標の達成度を評価するための検証、技術開発成果の導入の可否を判断するための検証、個別の開発における精度検証等があるが、目的に応じてより適切な手法や指標を用いていく。

地球の観測ビッグデータは、初期値や予測結果の妥当性を確認する参照値としての役割も持つため、モデルの初期値作成で利用した後、更なる品質管理を施した観測データセットを作成することが重要である。また、この事後の品質管理は、これまで検証での利用に応じて非定常的に行われてきたが、品質情報のフィードバックを通じた観測データの品質の更なる向上を目指して、準リアルタイムに実施していく必要がある。

モデル開発における観測データ利用においては、データ活用やその品質管理、検証手法自体が研究の新たな対象であり、進展に応じてその内容が変わりえることから、硬直的になってはならないこと

に留意しつつ、モデルによる予測の妥当性確認と問題発見を可能にする検証手法の更なる充実を図る。

また、発生頻度の少ない顕著現象や長期の予測などについて、過去の様々な事例で予測実験が可能なことは予測手法の評価のために重要なだけでなく地域防災の基礎資料としての利用などにも有益であり、その実施のためにはより品質の高い過去の初期値が必要である。このことから、最新の数値予報技術に基づく高品質な初期値を、過去の期間について作成できる環境を整備していく。

このほか、観測データにかかわる開発における検証をより充実させるため、観測データが予測精度に与える影響を定量化する新しい指標である F S O I (Forecast Sensitivity to Observation Impact: 対観測予報感度) という技術を確立し、その利用を推進する。同時に、日々の予測において、観測データの利用状況や前回予報による第一推定値との差、初期値の修正量に関するモニタリングを強化することで、既存のデータ利用に関する問題点のより効果的な把握に努め、更なる高度利用に向けた開発に役立てることにより開発を加速する。

3 重点目標ごとの開発計画

3.1 豪雨防災

12時間前からの警戒や避難を可能にするため、局地モデルを高度化するとともに、AI技術などを活用して、線状降水帯の発生と停滞を捉えて集中豪雨を高い確度で予測する数値予報プロダクトを作成する。この目標を達成するには、局地モデルにおいて激しい降水をもたらす対流活動を高い精度で表現し、またそれらの現象が持つ不確実性をアンサンブル予報で適切に捉える必要がある。

現状と重点的に取り組むべき課題

線状降水帯は、連続して発生する発達した積乱雲が列をなし、数時間にわたってほぼ同じ場所を通過、又は停滞することで作り出される、線状にのびる強い降水を伴う雨域である。現在最も解像度の高い局地モデルでは、線状降水帯に伴う強い雨の領域を現実的に表現することがある程度可能になってきているが、半日程度前から時間と場所を絞った予測は困難な状況にある。線状降水帯について、その発生や停滞をよりの確に予測するためには、線状降水帯が発生する環境場を捉えた高精度な初期値と境界値、個々の積乱雲を表現する高解像度かつ精緻な予報モデル、そしてそれら予測の不確実性を捉えるアンサンブル予報システムが必要である。

環境場については、大気的不安定度、鉛直シア、水蒸気の流入量など、特に豪雨と関連が強いことが知られている気象要素について予測精度を向上させる必要がある。また、積乱雲を、同じ場所に次々と発生させる強制力となりえる局地的な前線、地形、冷氣プール、重力波などのスケールの小さい現象の構造が適切に表現されることも重要である。これら気象要素の予測精度向上には、予報モデルの表現性能と同時に、風上の海上における水蒸気量や風などを観測し、大気の初期値の精度を改善することが必須である。

また、個々の積乱雲の振る舞いを予測するには、高解像度の予報モデルとそれに適した物理過程が必要である。水平格子間隔を1 km程度まで高解像度化した局地モデルにおいても、対流パラメタリゼーションを用いることが想定されるが、1 km程度の格子間隔では従来のパラメタリゼーション手法の前提が成り立たないなど、グレーゾーン問題が存在する。今後、局地モデルの高解像度化を進めつつ、同時にグレーゾーン問題に対応した研究を推進し、その成果を開発

に取り込む必要がある。ほかにも、雲水や雲氷、雪、あられなどの取り扱いと、それらの相変化に伴う熱の吸収・放出など、激しい対流活動にかかわる雲物理過程を精査し、予測精度向上に必要なプロセスを精緻化していく必要がある。

同時に、線状降水帯は、自然の持つ基本的な性質としてカオス的（確率的）な挙動が強く、半日程度先の短い予測時間についても、予測が非常に難しい。このため、アンサンブル予報やAI技術による確率的な予測を行い、予測の不確実性を評価してそれを利用者に伝えることが不可欠である。

開発の方向性

線状降水帯の発生と停滞を的確に表現するため、局地モデルの高解像度化と物理過程の精緻化による積乱雲の構造の表現向上、局地アンサンブル予報システムの導入による予測の不確実性の捕捉を行う。加えて、半日先の予測プロダクトを作成するため、局地モデルの予報時間を12時間以上先まで延長する。

線状降水帯の環境場について予測精度を向上するため、成層の不安定度や風の鉛直シアの改善を重点的に行う。例えば、環境場の形成にかかわる積雲、放射などによる非断熱加熱の鉛直構造や、地形を起源とする摩擦効果の改良、力学と物理過程の相互作用の改良を行う。また、海面からの水蒸気供給の精度を向上させるため、海面過程の高度化を行う。

積乱雲の表現性能を向上するため、スーパーコンピュータの更新に伴う計算機資源の増加や、高解像度モデル向けの積雲対流パラメタリゼーション研究の進展などグレーゾン問題への対応状況に応じて、高解像度化を進めていく。併せて、高解像度モデルに適した複数の物理過程の開発を行う。特に、雲水、雲氷、雪などの形成と

成長（エアロゾルの効果の導入も検討）、それに伴う加熱や冷却、局地的な循環との相互作用など、激しい対流にかかわる物理過程を改善する。

既存の観測データについての利用を維持・改良することに加えて、次世代の静止気象衛星、航空機、最新レーダー、船舶GNSS観測、IoT化した多様なセンサから得られる、多くの観測種別を持ち、かつ、時間的、空間的に高密度なデータの利用や、悪天候域での衛星データの利用を進める。これらの改良により、海上の水蒸気、気温、風、エアロゾルなどの初期値精度を大幅に向上し、線状降水帯をもたらす環境場の予測について精度を向上させる。観測ビッグデータの利用においては、AI技術に基づいた異常値検出などの品質管理手法の利用を推進する。

また、データ同化手法の改良、特にハイブリッド同化の導入により、強い降水の存在する周辺などで観測データからの情報をより多く利用し、線状降水帯が発生し始めた直後からその構造を捉え、線状降水帯の停滞による集中豪雨を的確に予測する。一方で、対象としている現象の予測可能性が低いことを考慮すると、高速かつ高精度なデータ同化技術で予測を高頻度に更新する手法が有効な可能性もあるため、その有効性評価も推進する。

アンサンブル予報システムでは、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、より統合的な予測の不確実性情報を作成する。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。更に、アンサンブル予報と最新のAI技術を併用することで、より高精度の確率プロダクトを作成する。

また、半日より先の予測についても、その可能性をより早期に捉えるため、メソアンサンプル予報システムを更に高度化する。

日本の気象・気候的な特性として、暖候期には南の海上からの湿った空気の流入が大きいこと、台風が梅雨前線に影響を及ぼすなど、特徴的な地域性が見られる。このため、我が国における独自の研究からの知見が重要となる。今後、大学等研究機関と連携を強化しつつ、最新の知見を導入するとともに、モデルの検証結果に基づく問題点を積極的に大学等研究機関と共有しながら、開発を進めていく。連携を進めるなかで、豪雨事例の観測に基づくメカニズム分析や、モデルによる予測実験の結果から、線状降水帯の予測を成功させるための鍵となるプロセスを洗い出していくことが特に重要である。

また、観測データの利用高度化にあたっては、どのような観測データが精度向上に資するのかを、特別観測などを通じて明らかにしていく研究が重要となる。更に、発生がまれである極端現象の検証手法など、新たな科学的知見に基づく検証項目の拡充も、数値予報の更なる発展には重要である。研究・開発コミュニティにおける議論を重ね、また先進的な取り組みを支援していく。

3.2 台風防災

台風や前線による災害発生の3日前から、河川流域の雨量、高潮などの見通しを把握して的確な広域避難を可能にするため、雨量分布や高潮などについて詳細で高精度、かつ全体として整合性を持った数値予報プロダクトを作成する。台風や前線による大雨・強風・高潮・波浪などの予測には、大気現象を予測する全球モデルやメソモデル、高潮や波浪モデルを組み合わせることが合理的である。加えて、最新のAI技術を用いたガイダンスにより、更に高精度かつ利用者にとって利便性の高い数値予報プロダクトを作成する。更に、

利用者の意思決定を的確に支援するために、アンサンブル予報により予測の持つ不確実性を定量的に示したプロダクトを作成する。

現状と重点的に取り組むべき課題

台風は、水平規模が数 100km から 1000km 程度の現象であり、その多くは熱帯の海上で発生したのち、熱帯・亜熱帯の偏東風や高気圧の縁辺流、中緯度の偏西風などの影響を受けつつ移動する。台風及びそれを取り巻く風（環境指向流）は空間的な規模が大きい現象であるため、3日先までを予測するためには地球全体を取り扱う全球モデルが必須である。しかし、全球モデルは広い領域の予測が可能である一方で、計算量の制限から水平格子間隔は粗くなるため、詳細な降水や風、地上気圧の分布を予測することが難しい。このため、全球モデルによる予測を入力とするメソモデルを用いて、降水や風、地上気圧について、高解像度かつ高精度な予測を行う必要がある。また、高潮や波浪は海上風や地上気圧に強く依存するため、その予測精度の向上には、メソモデルによる風や地上気圧の予測精度が重要となる。

メソモデルによる台風位置の予測は、その環境場を与える全球モデルの予測結果に強く束縛されるため、全球モデルを改良してその台風進路予測の精度を大幅に向上する必要がある。その上で、メソモデルを用いて台風構造を精緻に表現し、雨や風、気圧の分布についての精度の高い予測を可能にすることが重要になる。全球モデルには、台風の位置を始めとする大規模場や、メソモデルへ与える境界値の水蒸気量などについて、予測精度を向上することが求められる。

台風の進路予測改善のためには、環境指向流と台風の構造の両面から、予測精度を向上することが必要である。環境指向流について

は、熱帯（偏東風など）と中緯度（偏西風、高気圧縁辺流など）の流れについての改善が求められる。特に、全球モデルの進路予測には、転向が遅れる、転向後の進行速度が遅いといった傾向が見られるため、上空の気圧の谷と、台風との位置関係を改善することも課題と考えられる。また台風の構造については、台風の規模や台風自身が生み出す流れなど、台風の移動に影響を与える要素の予測精度向上が重要である。

メソモデル、メソアンサンプル予報システム及び高潮モデルについても、延長予測により3日先までの予測を可能にし、台風に伴う大雨や高潮などをより高い精度で予測する必要がある。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。同時に、波浪データ同化について、観測データの情報をより多く取り込める高度な手法を用いて、初期値の精度改善を進める必要がある。

開発の方向性

重大な災害が発生するおそれが存在する場合には、メソモデルとメソアンサンプル予報システムに基づき3日より先までを予測する。同時に、台風に伴う大雨や風、気圧を高精度に予測するため、積雲対流を始めとする、強い降水にかかわる物理過程を改善する。加えて、メソモデルとメソアンサンプル予報システムによる予測結果を入力として実行する高潮・波浪モデルについては、効率的な計算手法を導入しモデルの高解像度化を行いつつ、データ同化手法の改良等も加えて、予測精度を改善する。

関連するモデルを効率的に開発するため、それらモデルが担う役割を明確化し、かつ最適な組み合わせで階層的に用いるとともに、共通の開発フレームワークのもとで、精度向上に向けた精緻化や高度

化を行う。更に、アンサンブル予報や最新のA I技術も活用して、雨や風、高潮、波浪などについて詳細かつ一貫したプロダクトを作成する。

全球モデルは、計算機性能の向上に応じて、水平格子間隔を10kmよりも高解像度化してより詳細な予測値をメソモデルへ引き継ぐ。台風進路予測の不確実性を捉えるための全球アンサンブル予報システムは、これまでと同様に全球モデルの半分の水平解像度を想定する。

また、全球モデルによる台風の進路や内部構造の予測を改善するために、乱流、積雲対流、雲などに関する物理過程の抜本的見直し、運動量輸送に関連する物理過程の高度化、高解像度化とそのために必要な力学過程と物理過程及び両者の相互作用の改良を行う。これらの改良により、環境指向流、台風構造の両面から予測表現を改善する。予報モデルの開発では、個々のモデル要素に対する改良を基本にしつつ、モデル要素間の相互作用の表現が改善されていることを慎重に検討しながら改良を積み重ねていく。また、モデルが持つパラメータの最適化では、最新のA I技術の活用も推進する。

全球モデルとメソモデルにおいて、ハイブリッド同化の導入に向けた開発を実施して導入する。また、データ同化において重要な4次元変分法は予報モデルを利用した手法であり、予報モデルの性能も初期値の精度に重要であるため、データ同化で用いる予報モデルも継続的に改良する。同時に、アンサンブル同化手法についても、継続的に改良を進めていく。

今後、増加が見込まれる高密度かつ高頻度な観測データに対して、現在のデータ同化システムには、データを大きく間引いて利用しな

なければならない制限がある。この制限を乗り越えるため、観測誤差相関があるデータを取り扱える手法を導入する。

現在、衛星観測によるマイクロ波放射輝度温度や赤外放射輝度温度データは、モデルのバイアスなどが原因で、晴天域でしか利用できていない。しかし、台風や低気圧などの雲を伴う現象の周辺で、初期値の精度を向上させるためには、晴天域以外で観測データを利用する技術の開発が必要である。これらの開発を早急に進め、マイクロ波放射輝度温度について早期の導入を進めるとともに、より困難な赤外放射輝度温度についても開発を継続する。

また、観測データの利用に関しては、航空機、大気追跡風、GNSS、散乱計、従来型観測などのデータ利用の高度化や、変分法QC（Quality Control：品質管理）導入などの課題にも取り組み、初期値の改善を通じて環境指向流の予測精度の向上を目指す。

加えて、台風予測に重要となる海面水温について、全球10kmメッシュの高解像度海面水温データを作成すると同時に、全球モデルとメソモデルの海水温に関する効果の取り扱い手法を精緻化し、またガイダンスも活用しつつ、台風の強度予測の精度を向上させる。これ以外にも、モンスーンの予測に重要な、陸面過程及び陸面データ同化システムや、衛星観測データから情報を引き出すために用いる、放射伝達計算に影響を与えるオゾンやエアロゾル初期値など、データ同化に関する開発を推進する。

台風の予測結果の評価に関して、内部構造の再現性は重要なものの一つである。そのため、高密度の観測データやそれを利用した観測プロダクトを用いて、予報モデルによる台風の内部構造の再現性を検証する取り組みを、研究・開発コミュニティで連携して進める。

3.3 社会経済活動への貢献

数日から数か月先までの気象予測技術の高度化により、社会的に影響の大きい気象を高精度に予測し、事前対策や経済分野での生産性向上へ貢献する。自然の性質として、現象ごとに予測可能である時間が異なるため、その特性に応じた詳細さと精度を持つ、確率予測情報を作成する。この目標を達成するため、それぞれの予測時間において重要となる現象を表現することが可能な複数のモデルを、共通の開発フレームのもとで効率的に開発する。また、予測対象となる要素は、顕著な高温や低温、降水などの一般的な気象要素に留まらず、紫外線量や大気汚染物質など多岐にわたるため、複数のモデルを利用することが必須となる。これらについても、モデルの種類が多くなりすぎないように留意しつつ、複数のモデルを組み合せ、階層的な予測システムを構築する。

現状と重点的に取り組むべき課題

社会経済に影響する気象は、例えば顕著な高温の場合、地形の影響や地表面状態などのスケールの小さいものから、地球規模の循環場の変動による1週間以上にわたる高温の継続など、非常に広範な時間、空間スケールにわたっている。また、海洋の現象や海氷、オゾン、エアロゾルなども気象と影響しあう。

これらの現象について、予測精度を保てる予測時間の限界は、おおまかには空間スケールが大きい現象ほど長く、また大気よりも海洋の予測時間の限界が長い。このため、数日先までの短い予測時間を対象とする場合は、スケールの小さい現象を精緻に扱うことが重要であり、数か月先などの長い予測時間を対象とする場合は、スケールの大きな大気現象、海洋、海氷などの相互作用を適切に取り扱うことが重要になる。

現在、気象庁では、対象とする予測時間と空間スケールに応じて、局地モデル、メソモデル、メソアンサンブル予報システム、全球モデル、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を使い分けて運用している。また、予測の対象とする気象要素の違いに応じて、高潮モデル、波浪モデル、海況モデル、化学輸送モデル、移流拡散予測モデルなどを使い分けている。これらの予測システムの高度化では、各モデルの改良や初期値を改善することに加え、モデル要素の共有を進めて、各モデルの予測結果の整合性を向上させることが課題となる。そのため、地球システムについて階層的なモデリングやデータ同化開発を進め、効率的な開発を推進する必要がある。

また、日本付近の気象予測において、2週間程度より長い予測時間では、中緯度の低気圧や高気圧などの現象が持つ予測可能性がかなり低下するため、そのほかの予測可能性の高い現象に着目しつつ開発を進める必要がある。具体的には、1か月程度の時間スケールでは、熱帯から北西太平洋の大規模な対流活動やそれと相互に影響する季節内振動、それより更に長い時間スケールでは、陸面や海水のゆっくりとした変化、エルニーニョ・南方振動を始めとした熱帯起源の大気海洋現象の再現性などが日本の天候へ大きく影響する。このため、これらの予測精度向上へ向けたモデル開発が必要となる。

開発の方向性

局地モデル、メソモデル、メソアンサンブル予報システム、全球モデル、高潮や波浪モデル等の海関連モデルなど、1週間先程度までの予測時間を主な対象とするモデルや、1か月先までの予測も対象とする全球アンサンブル予報システムについては、豪雨防災や台風防災に関する重点目標の達成へ向けた開発成果により、様々な気

象要素の予測精度向上を目指す。これらの開発においては、開発フレームワークの高度化と浸透を進めることや、階層的な地球システムのモデリングの推進により、開発の効率化を図りつつ予測精度を改善する。

1 か月先までの予測も対象とするアンサンブル予報システムについては、集中豪雨や台風予測に関する重点目標の達成に向けた開発による成果の活用に加えて、大気海洋結合の効果を活用するための開発にも取り組むことにより、日本の2週間から1か月先の予測に重要な、熱帯の季節内振動などの現象の予測精度改善も目指す。

より長い予測時間を対象とする、季節アンサンブル予報システムについては、日本の天候へ影響し、かつ予測可能性の高い現象の再現性を向上させるため、予報モデルの高解像度化や物理過程の高度化を行う。特に、海洋との相互作用による予測可能性が重要なことから、全球海洋モデルの水平解像度を0.25度に高解像度化し、熱帯海洋における現象の再現精度を向上する。大気モデルについても、水平格子間隔を約55kmに高解像度化し、鉛直層も増強する。また、初期値作成に関して、海氷密接度を同化することにより、海氷初期値の高度化を図る。加えて、海洋については、データ同化手法に4次元変分法を導入し、観測時刻の問題でこれまで有効に利用できていなかったデータの利用を始め、観測情報の更なる活用を図る。

その上で、海洋の中緯度における渦の再現性向上を目指し、全球海洋モデルを更に高解像度化することや、大気の再現性向上を目指した大気モデルの高解像度化、大気と海洋の初期値精度向上を目指した大気海洋結合同化システムの導入や海洋内部のより詳細な観測データの利用、オゾンやエアロゾルなど、ほかの地球システムを構

成する要素と大気との相互作用を直接考慮するための開発を推進する。

日本周辺の海水温・海流・海氷などを予報する海況モデルについては、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・海氷の変動など社会・経済的に影響の大きい現象の再現性を向上するため、モデルの高速化を図りつつ、高解像度化や物理過程の高度化を行う。

化学物質の輸送を取り扱うモデルについては、気候変動予測を行う研究用途の予報モデルともモデル要素を共有しつつ高度化し、エアロゾル、オゾン、光化学オキシダントなどの予測精度向上を通じて、黄砂、紫外線、大気汚染などの予測プロダクトを高度化する。また、化学物質の初期値作成について、アンサンブルデータ同化手法の導入などの高度化、気象衛星ひまわり8号・9号や極軌道衛星GCOM-Cの観測データの利用などにより予測精度の向上を図る。

航空路火山灰情報及び降灰予報などに用いられている、移流拡散モデルについては、精緻な火山噴煙の3次元数値シミュレーションなどに基づく、科学的知見の進捗に応じて、凝集や再飛散などに関する力学と物理過程の改良を随時適用していく。

3.4 温暖化への適応策

数10年から100年まで先の地球温暖化について、より高解像度な予測を提供し、国や自治体、民間における適応策策定に資するため、気候変動を予測するモデルの高度化を共通の開発フレームワークのもとで行う。また、関係機関と連携して、自治体単位の予測情報、近未来の予測情報、大雨など極端現象の頻度変化の見通しなどを含む、温暖化予測に関する統合的な見解を提供する。

現状と重点的に取り組むべき課題

既に温暖化の影響が顕在化しつつある現状において、気候変動適応法が平成 30 年 6 月に成立した。気象庁は、温暖化予測情報の提供により、国や自治体、民間における具体的な適応策の策定や実施を支援していく。

平成 31 年度から、気象庁と文部科学省が共同で統一的な温暖化予測情報のためのシナリオの作成に取り組む計画であり、十数年先までの近未来について、自治体単位で確度の高い予測情報を提供していくことが求められている。このため、日本国内の解像度の高い予測を行う地域気候モデルの高度化が必須である。

同時に、地域気候モデルに大規模場のデータを与える、全球の気候変動を予測する地球システムモデルについても、気候変動の再現性を向上させるため、モデルの高度化を図っていく必要がある。地球システムモデルについては、これまで IPCC の枠組みに基づき開発が進められてきているが、その予測の不確実性は大きく、過去から現在気候までの再現性改善を通じた将来気候予測の信頼性向上が求められる。

開発の方向性

目標を達成するため、信頼性の高い地域気候モデルと地球システムモデルを、共通の開発フレームワークのもとで効率的に開発する。その開発においては、大気、海洋、エアロゾル、温室効果ガスなど地球システムを構成する様々な要素について、要素間の相互作用を精緻化しつつ、要素の経年変化についてもより適切に考慮することを目指す。

自治体単位の適応策策定に向けて、現実により近い地形に基づいた地域固有の豪雨、局地風などのスケールの小さい顕著現象に対す

る温暖化の影響や、温暖化に伴う積雪の変化などを適切に評価するため、地域気候モデルの水平格子間隔を 5 km から更に高解像度化する。また、大気境界層や陸面などの物理過程を精緻化する。温暖化による海水の熱膨張や偏西風の変化などの地球システムモデルによる全球的な将来変化予測に基づき、海洋についても、地域の海水温や海面水位など、海洋の将来変化を見積もる高解像度（水平格子間隔 10km 以下）の地域気候モデルを開発する。

地球システムモデルにおいては、系統誤差を小さく抑えることが重要であるため、影響の大きい海洋の取り扱いの精緻化を始め、雪氷、陸面、エアロゾルや大気・海洋の炭素循環などの各プロセス及びそれらの相互作用をより詳細に取り扱い、また放射や雲物理、境界層など各種物理過程の高度化を通し、系統誤差を低減する。

また、予測の信頼性に関する資料を作成して利用者に提供するため、各種観測研究に基づいた物理過程の検証を行うとともに、過去の気候データを用いた現在までの気候の再現実験によるモデルの系統誤差の検証を行う。

おわりに

イギリスのリチャードソンが、電子計算機がまだ誕生していない1920年頃に数値予報を夢みてからおよそ100年、また、気象庁が1959年に我が国の政府機関として初めて大型電子計算機を導入して数値予報を開始してから60年が経とうとしている。この間、計算機能力の飛躍的向上、気象衛星等の新たな観測によるデータの充実など、関連する分野の発展にも支えられて、数値予報技術は着実に向上してきた。

今日では、数値予報は安心・安全で豊かな社会を支える社会基盤としての役割を果たすまでに進歩した。そして、2015年に従来の約50倍のデータ量を観測する新世代の衛星ひまわり8号、2018年に従来の約10倍の能力を持つスーパーコンピュータの運用を開始したことなどとも併せて、更なる高度化・精度向上が進んでいる。

本計画は、気象庁が行う数値予報技術開発の、この先10年の取り組みをまとめたものである。ただしこの計画は、従来の取り組みの単なる延長ではない。新しい視点、すなわち「安全、強靱で活力ある社会」という社会の将来像と、そこで求められるニーズを出発点として策定し、技術的な観点では野心的とも言える目標を掲げた。目標の達成は決して容易ではないが、気象庁は、この取り組みが我々の見据える将来の社会にとって不可欠なものを作り上げるという認識のもと、あらゆる努力を払って計画を推し進めていく所存である。

謝辞

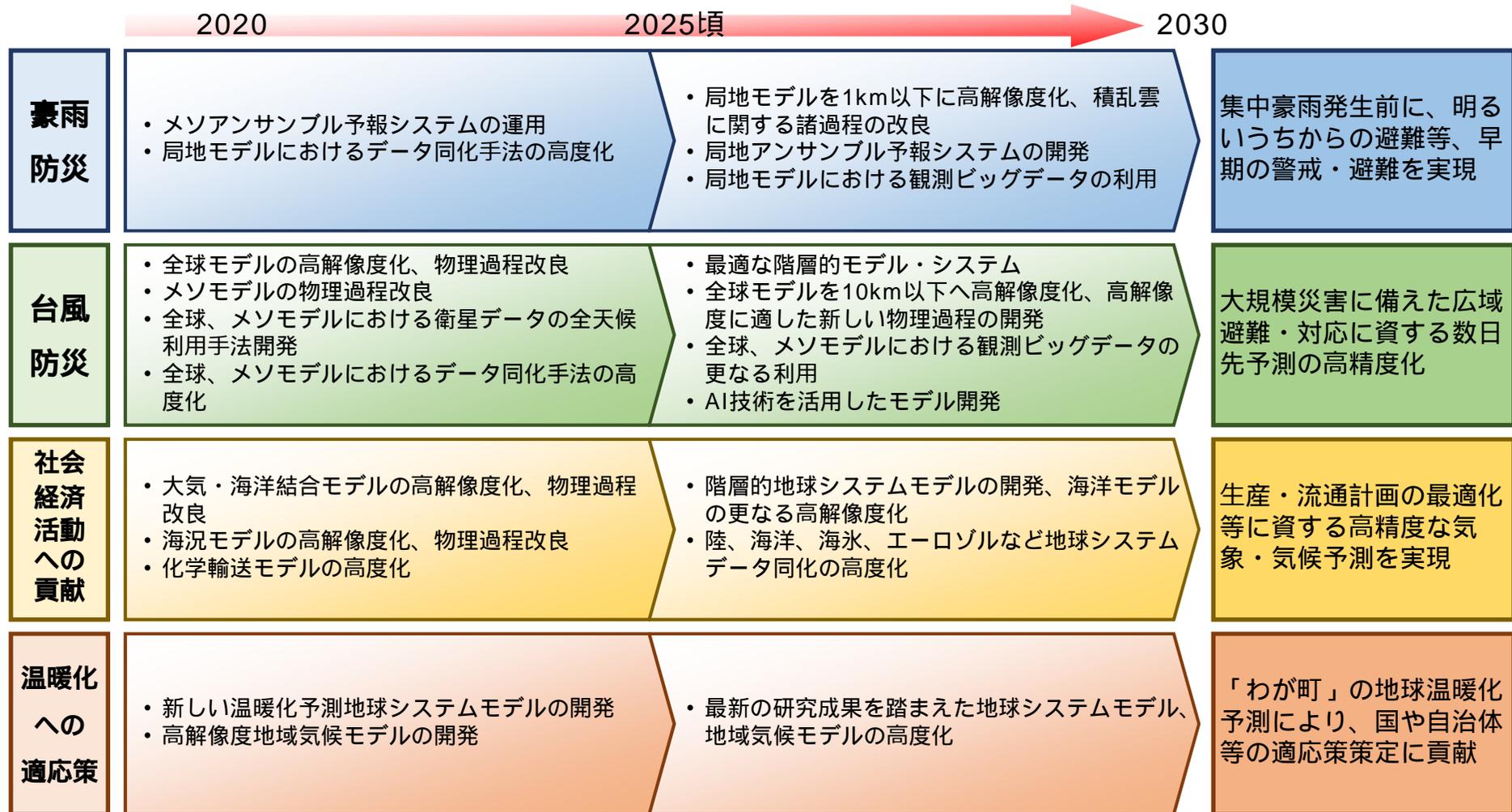
本計画は、気象庁が作成し、内容に関する検討は、新野宏 東京大学名誉教授を会長とする数値予報モデル開発懇談会の協力を得た。

数値予報モデル開発懇談会

- | | |
|---------|---|
| 青木 尊之 | 東京工業大学学術国際情報センター 教授 |
| 沖 理子 | 宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門地球観測研究センター研究領域上席 |
| 佐藤 正樹 | 東京大学大気海洋研究所海洋地球システム研究系 教授、同研究所地球表層圏変動研究センター教授・センター長 |
| 竹見 哲也 | 京都大学防災研究所気象・水象災害研究部門 准教授 |
| 坪木 和久 | 名古屋大学宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンター 教授・センター長 |
| 会長 新野 宏 | 東京大学 名誉教授 |
| 堀之内 武 | 北海道大学地球環境科学研究院地球圏科学部門 准教授 |
| 増永 浩彦 | 名古屋大学宇宙地球環境研究所気象大気研究部 准教授 |
| 三好 建正 | 理化学研究所計算科学研究センター データ同化研究チームリーダー |
| 渡部 雅浩 | 東京大学大気海洋研究所気候システム研究系 教授 |

(敬称略)

2030年に向けた数値予報技術開発重点計画 主な開発項目等



気象庁で運用している数値予報モデル（平成30年9月現在）

数値予報予報モデルの種類	モデルを用いて発表する予報	計算領域と水平分解能	予測時間（初期時刻）	実行回数
局地モデル	航空気象情報、 防災気象情報、 降水短時間予報	日本周辺 2キロメートル	9時間 (毎時)	1日24回
メソモデル	防災気象情報、 降水短時間予報、 航空気象情報	日本周辺 5キロメートル	39時間 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21時)	1日8回
全球モデル	分布予報、時系列予報、 府県天気予報、台風予報、 週間天気予報	地球全体 20キロメートル	132時間(03, 09, 15時) 264時間(21時)	1日4回
全球アンサンブル予報システム	台風予報、週間天気予報、 異常天候早期警戒情報、 1か月予報	地球全体 18日先まで 40キロメートル 18～34日先まで 55キロメートル	11日間(09, 21時) 5.5日間(03, 15時：台風予報用)	1日最大4回
			18日間† 34日間†	それぞれ 週4回
季節予報モデル (季節アンサンブル予報システム)	3か月予報、 暖候期・寒候期予報、 6か月先までのエルニーニョ現象等の見通し	地球全体 大気 110キロメートル 海洋 50～100キロメートル	7か月間	月1回
全球波浪モデル	外洋波浪予想(波浪図)	極域を除く地球全体 55キロメートル	132時間(03, 09, 15時) 264時間(21時)	1日4回
沿岸波浪モデル	波浪予報	日本周辺 5キロメートル	132時間 (03, 09, 15, 21時)	1日4回
波浪アンサンブルモデル	週間天気予報(波浪)	極域を除く地球全体 140キロメートル	264時間(09, 21時)	1日2回
日本域高潮モデル	高潮情報(警報・注意報)	日本周辺沿岸部 1キロメートル	39時間 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21時)	1日8回
アジア域高潮モデル	高潮情報(アジアの気象局で利用)	北西太平洋 3.7キロメートル	72時間 (03, 09, 15, 21時)	1日4回
海況モデル	海面水温・海流1か月予報	北西太平洋 10キロメートル	35日間	1日1回
海氷モデル	海氷予報	オホーツク海南部 12.5キロメートル	168時間(09時)	週4回
黄砂予測モデル	黄砂情報	地球全体 40キロメートル	120時間(21時)	1日1回
全球化学輸送モデル	紫外線情報	地球全体 110キロメートル	120時間(21時)	1日1回
領域大気汚染気象予測モデル	スモッグ気象情報 全般スモッグ気象情報	東アジア領域 20キロメートル	72時間(21時)	1日1回
温暖化予測モデル	IPCCへの報告等	地球全体 大気 110キロメートル 海洋 50～100キロメートル	将来予測	随時
地域気候モデル	地球温暖化予測情報	日本周辺 5キロメートル	将来予測	随時

† 毎週2日、それぞれ1日2回の11日間予報から続く延長予報を実施