ISSN 2758-1357

数値予報開発センター年報

2023（令和5）年

令和6年4月
April 2024

気象庁 数値予報開発センター

はじめに

数値予報開発センター年報は、前年の１月から 12 月までの１年間に数値予報開発センターで行われた開発等の活動や成果を網羅的にまとめて年度末に報告するもので、数値予報開発センターが発足した令和２年度より毎年刊行している。

令和５年度の数値予報開発センター年報では、業務概要や沿革等を紹介する「数値予報開発センターの概要」に続き、数値予報の開発に関する話題を「数値予報システムの概要と今後の開発計画」「数値予報システムの開発成果」「数値予報システムの開発進捗」の３つの章で紹介する。それぞれ、全球、メソ、局地数値予報システム（数値予報モデル及びデータ同化システム）及びそれらのアンサンブル予報システム、局地モデルの予測結果と観測結果を活用して三十分ごとの大気場の解析を行う三十分大気解析、各数値予報システムの予測結果を利用して後処理を行うガイダンス、大気海洋結合モデルにより構成される季節アンサンブル予報システム、長期再解析を含む長期的に同じシステムで全球の大気解析を継続的に実施する気候データ同化システム、波浪や高潮の予測を行う波浪・高潮モデル、海流や海氷、海水温等の監視・予測を行う海況監視予測システム、黄砂・紫外線・大気汚染に関する解析・予測を行う物質循環システムなど、多様なシステムに関する開発計画や開発成果、開発進捗について報告する。続いて、開発以外の関連活動として「数値予報開発センターにおける成果発表」「連携・共同研究の報告」「受賞・研究交流」「委員・専門家等」について報告する。「連携・共同研究の報告」では、研究者の協力を得て実施している「富岳」政策対応枠に関する話題についても取り上げる。専門家・研究者のみなさまにおかれては、数値予報開発センターにおける活動について、本年報を通して理解いただくと共に、他機関と実施している共同研究等を参考に当センターとの連携について検討いただきたく、よろしくお願いしたい。

また、数値予報課では「数値予報解説資料集（以下、解説資料集）」を別途刊行している。解説資料集は「基礎編」「応用編」「事例解析編」「資料編」で構成され、数値予報に関する基礎知識から応用知識までを体系的に理解できるようにしている。解説資料集は気象庁のホームページに掲載されている[1] ので、数値予報について体系的に知りたい方は、まずは解説資料集からご覧になることをお勧めしたい。

佐藤芳昭 数値予報モデル基盤技術開発室長（現 数値予報課長）

[1] https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html

数値予報開発センター年報

目 次

第 1 章　数値予報開発センターの概要　1

1.1　業務概要 …… 1
1.2　沿革 …… 2
1.3　組織 …… 2

第 2 章　数値予報システムの概要と今後の開発計画　3

2.1　全球数値予報システム …… 3
2.2　全球アンサンブル予報システム …… 3
2.3　メソ数値予報システム …… 4
2.4　メソアンサンブル予報システム …… 4
2.5　局地数値予報システム …… 4
2.6　局地アンサンブル予報システム …… 5
2.7　三十分大気解析 …… 5
2.8　短期予報ガイダンス …… 8
2.9　季節アンサンブル予報システム …… 11
2.10　気候データ同化システム …… 11
2.11　波浪モデル …… 11
2.12　高潮モデル …… 12
2.13　海況監視予測システム …… 12
2.14　物質循環システム …… 12

第 3 章　数値予報システムの開発成果　16

3.1　開発成果一覧 …… 16
3.2　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 …… 17
3.3　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 …… 30
3.4　メソ数値予報システムで利用する全球積雪深解析の変更 …… 34
3.5　メソアンサンブル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入 …… 36
3.6　局地モデルの物理過程改良 …… 40
3.7　ハイパースペクトル赤外サウンダの全球解析における利用改良およびメソ・局地解析における新規利用 46
3.8　全球解析における大気追跡風 (AMV) の利用拡充 …… 53
3.9　船舶 GNSS 観測データのメソ解析での利用改良および局地解析における新規利用 …… 56
3.10　メソ解析および局地解析におけるアメダス湿度計データの新規利用 …… 60
3.11　局地解析における衛星搭載マイクロ波散乱計データの新規利用 …… 63
3.12　全球波浪モデルの高解像度化および延長予報の頻度増強 …… 66
3.13　気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算完了 …… 67

第 4 章　数値予報システムの開発進捗　83

4.1　全球モデルの開発進捗 …… 83
4.2　全球アンサンブル予報システムの開発 …… 91
4.3　観測データの新規導入と利用方法の改良 …… 93
4.4　水蒸気観測データの数値予報での利用に関する開発 …… 97
4.5　局地モデルによる大雨発生確率ガイダンス …… 99
4.6　季節アンサンブル予報システムの開発 …… 102
4.7　波浪モデル …… 107
4.8　高潮モデル …… 107

4.9　物質循環システムの開発 …… 108
4.10 WGNE 熱帯低気圧検証 …… 111

第 5 章　成果発表 115
5.1　論文・報告 …… 115
5.2　国際会合 …… 117
5.3　国内会合 …… 119
5.4　数値予報課コロキウム …… 120

第 6 章　連携・共同研究 121
6.1　気象研究所との開発連携 …… 121
6.2　気象衛星センターとの共同研究 …… 122
6.3　共同研究一覧 …… 122
6.4　「富岳」政策対応枠「豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発」 …… 125

第 7 章　受賞・研究交流 129
7.1　受賞 …… 129
7.2　研究者来訪 …… 129
7.3　当センター共催研修 …… 129

第 8 章　委員・専門家等 130
8.1　国際機関の委員・専門家等 …… 130
8.2　国内機関の委員・専門家等 …… 131

付録 A　略語表 132

第１章　数値予報開発センターの概要

1.1　業務概要

2020 年 10 月、茨城県つくば市の高層気象台庁舎内に数値予報開発センター（以下、「開発センター」と表記）が設立された。開発センターは気象庁情報基盤部数値予報課の「数値予報モデル基盤技術開発室」、「数値予報モデル技術開発室」、「地球システムモデル技術開発室」の 3 室で構成されている。

開発センター設立の約 2 年前の 2018 年 8 月に交通政策審議会気象分科会の提言「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方[1]」に示された気象・気候分野に関する技術開発の現状と課題を踏まえ、防災分野をはじめ社会における情報サービスの基盤である数値予報の技術開発を強力かつ着実に推進していくため、同年 10 月に「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画[2]」（以下「重点計画」という）が策定された。重点計画の数値予報に関する気象庁のビジョンでは、「数値予報は、気象・気候予測の根幹であり、安全・安心で豊かな生活に不可欠な社会基盤」とされている。防災をはじめ社会の様々なサービスの充実・発展に、気象庁がより効果的に貢献するためにも、数値予報の高度化・精度向上が必要である。2030 年に向けて掲げた 4 つの重点目標、「豪雨防災」、「台風防災」、「社会経済活動への貢献」、「温暖化への適応策」を達成するため、予測精度向上の鍵となる「次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用」、「日本の気象を世界最高の精度と解像度でシミュレーション」、「確率予測と AI 技術の融合による意思決定支援」について、技術革新を重点的に推進し、同時に「幅広い連携の推進」、「開発者の育成と確保」、「研究・開発基盤の整備」といった開発マネ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。

このように数値予報のさらなる高度化・精度向上が強く求められる中、2020 年 10 月の気象庁組織再編に伴い、「数値予報開発センター」を設置し、これまで全球モデル、メソモデル、局地モデル、季節予報モデル、海洋モデル、物質輸送モデルなど予測対象等によって部署ごとに分かれていた数値予報モデルの開発部門を統合して分野横断的に開発できる体制を整備し、一体的に数値予報モデルの開発を進めることにした。また、開発センターを茨城県つくば市に設置することで、気象研究所や筑波研究学園都市の大学等研究機関と、より密接に連携して開発に取り組んでいる。

数値予報モデル基盤技術開発室は、基盤開発管理係と評価チーム、システム・サポートチーム、ガイダンスチーム、次世代 AI 活用チームの 1 係 4 チームで構成され、数値予報モデルの精度検証・評価や数値予報実験システムや開発管理システム等の基盤システムの開発・管理、数値予報成果の応用（ガイダンス）に関する技術開発、次世代ガイダンスを含む数値予報の様々な分野での AI を活用するための技術開発支援に取り組むとともに数値予報モデル開発を効率よく進めるために開発センター内の調整・運営、また数値予報課本課との調整を行っている。

数値予報モデル技術開発室は、全球モデルチーム、全球同化・EPS チーム、メソモデルチーム、メソ同化・EPS チーム、アクティブセンサデータ利用チーム、輝度温度データ利用チームの 6 チームで構成され、警報・注意報等の防災気象情報や航空気象情報、短期から週間天気予報の基礎資料となる全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、30 分大気解析の開発に取り組んでいる。

地球システムモデル技術開発室は、2021 年度までは結合モデルチーム、再解析チーム、海洋モデルチーム、大気化学モデルチームの 4 チーム体制であったが、2022 年度から、結合モデルチーム、気候データ同化チーム、高潮・波浪モデルチームの 3 チーム体制となった。季節アンサンブル予報システム、長期再解析 (JRA)、波浪モデル、高潮モデル、海況監視予測システム、黄砂解析予測システム、紫外線予測システム、大気汚染気象予測システムといった気候、海洋、環境気象に関する様々な数値予報モデルの開発に取り組んでいる。

---
[1] https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_teigen.pdf
[2] https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html

1.2　沿革

2020 年	10 月	組織再編に伴い、茨城県つくば市に数値予報開発センターを設置。
2022 年	4 月	地球システムモデル技術開発室のチーム体制を変更。

1.3　組織

数値予報開発センターは、「数値予報モデル基盤技術開発室」、「数値予報モデル技術開発室」、「地球システムモデル技術開発室」の 3 室から構成され、以下の通り、さらに各チームに分かれて、開発を行っている。

数値予報モデル基盤技術開発室	:	基盤開発管理係
	:	評価チーム
	:	システム・サポートチーム
	:	ガイダンスチーム
	:	次世代 AI 活用チーム
数値予報モデル技術開発室	:	全球モデルチーム
	:	全球同化・EPS チーム
	:	メソモデルチーム
	:	メソ同化・EPS チーム
	:	アクティブセンサデータ利用チーム
	:	輝度温度データ利用チーム
地球システムモデル技術開発室	:	結合モデルチーム
	:	気候データ同化チーム
	:	高潮・波浪モデルチーム

第 2 章　数値予報システムの概要と今後の開発計画

第 2 章では、数値予報開発センターで開発を行っている各数値予報システムの概要と今後の開発計画について報告する。全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析について、開発計画の線表を図 2.7.1 に示し、第 2.1 節から第 2.7 節で述べる。ガイダンス、マルチモデルガイダンスについて、開発計画の線表を図 2.8.2、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、その時々の気象条件に応じた背景誤差の情報が十分活用できていないことから、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考慮する改良を行った。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.
髙倉寿成, 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.

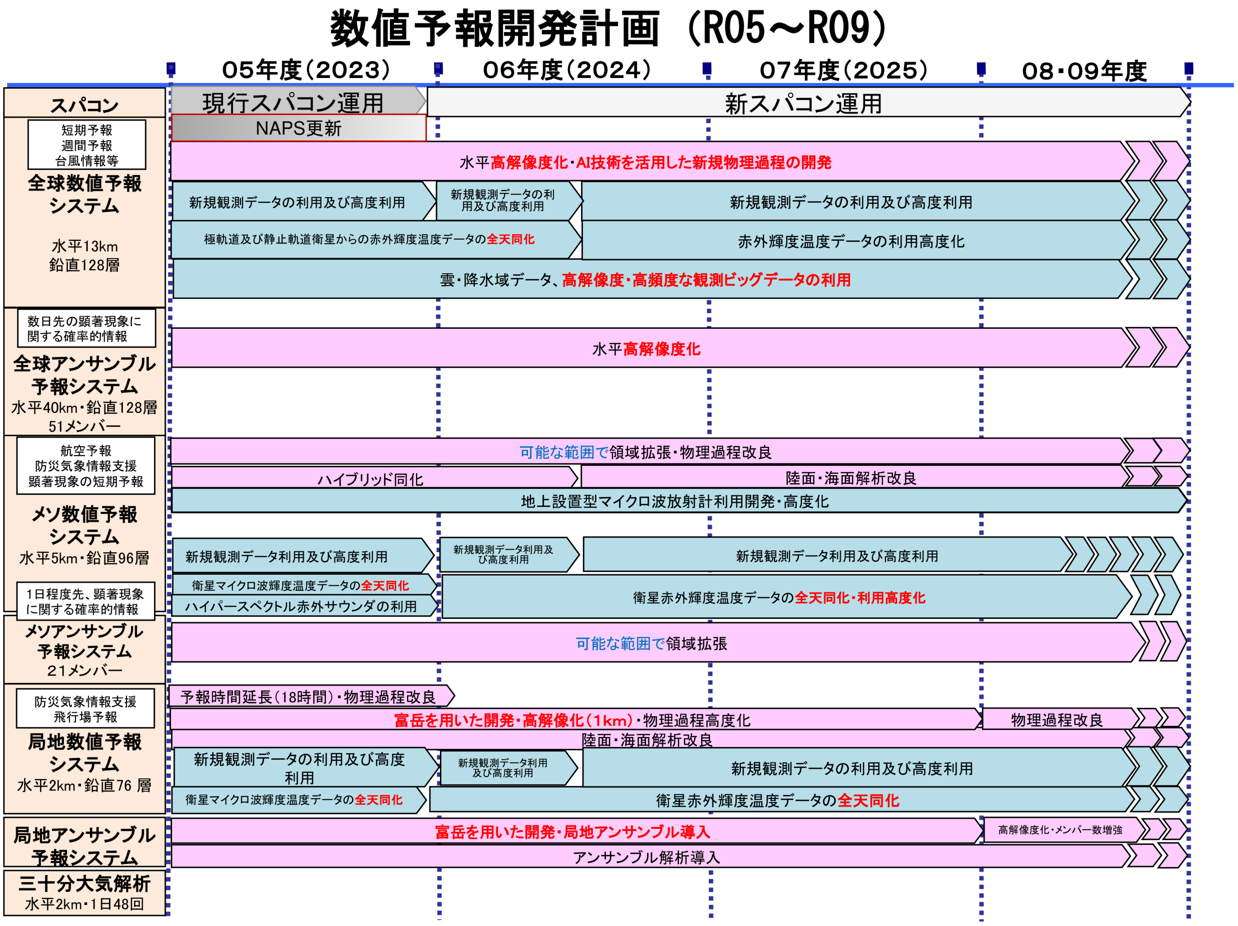

図 2.7.1　数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析)

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) をご覧いただきたい。

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統合型の「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2.8.2 をご覧いただきたい。

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。

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

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

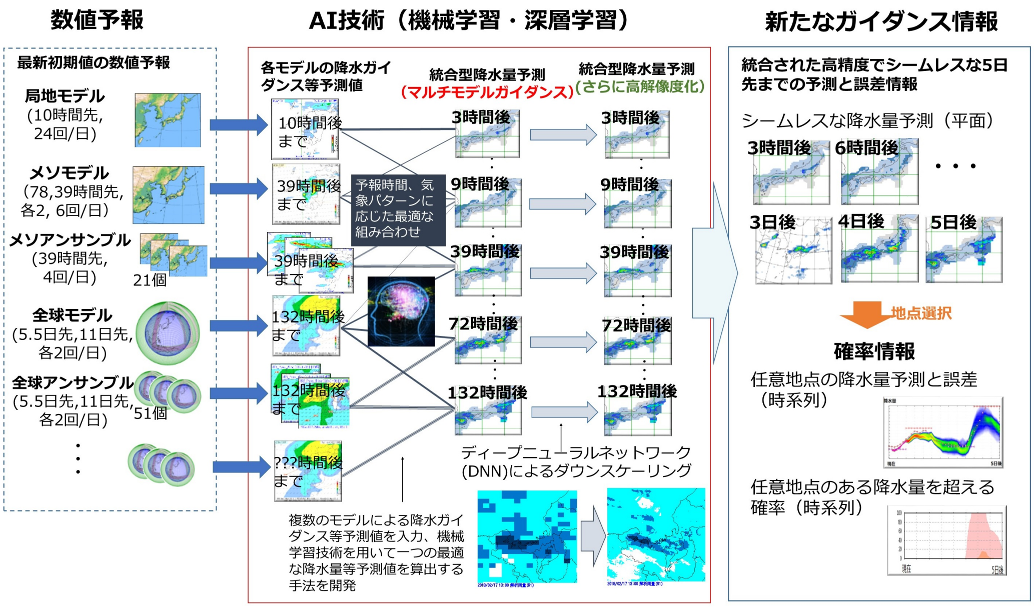

図 2.8.1　マルチモデルガイダンスの模式図

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

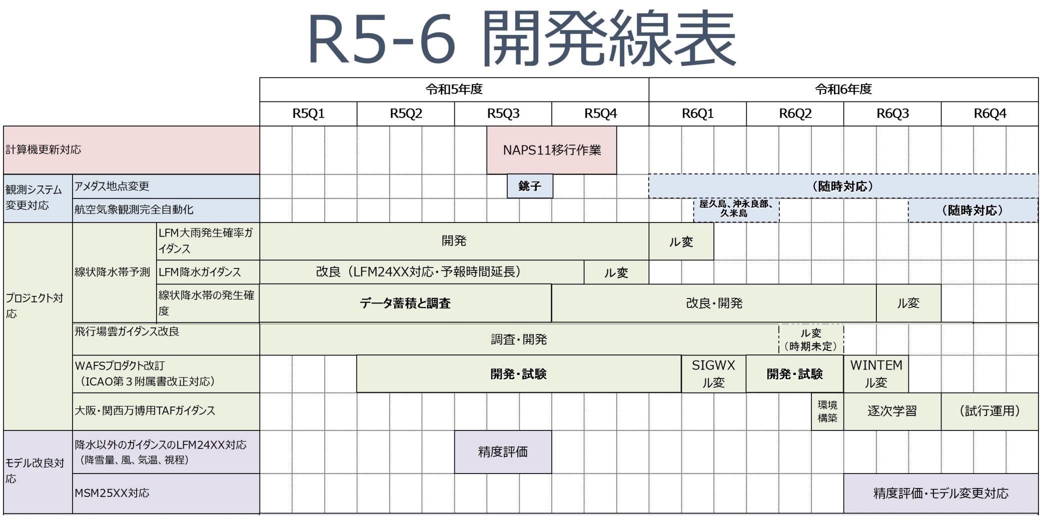

図 2.8.2　ガイダンス開発計画

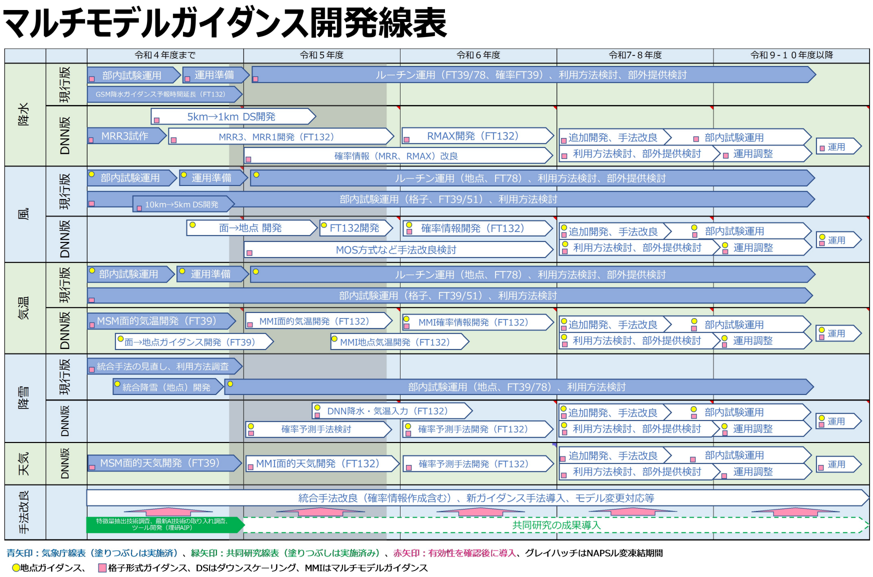

図 2.8.3　マルチモデルガイダンス開発計画

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 (Tsujino 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、更に海氷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。

[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

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ボーガス手法の改善、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、台風ボ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・海氷の変動など社会・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 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) と全球エーロゾルモデル 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ーロゾルの 3 次元分布から計算したエーロゾル光学的厚さ (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、エー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ー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ー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 CO_2 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.

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. 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. Tokuhiro, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109, doi:10.2151/jmsj.2024-004.

Maki, T., K. Kondo, K. Ishijima, T. T. Sekiyama, K. Tsuboi, and T. Nakamura, 2023: Independent Bias Correction Method for Satellite Observation Data Introduced to CO_2 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.

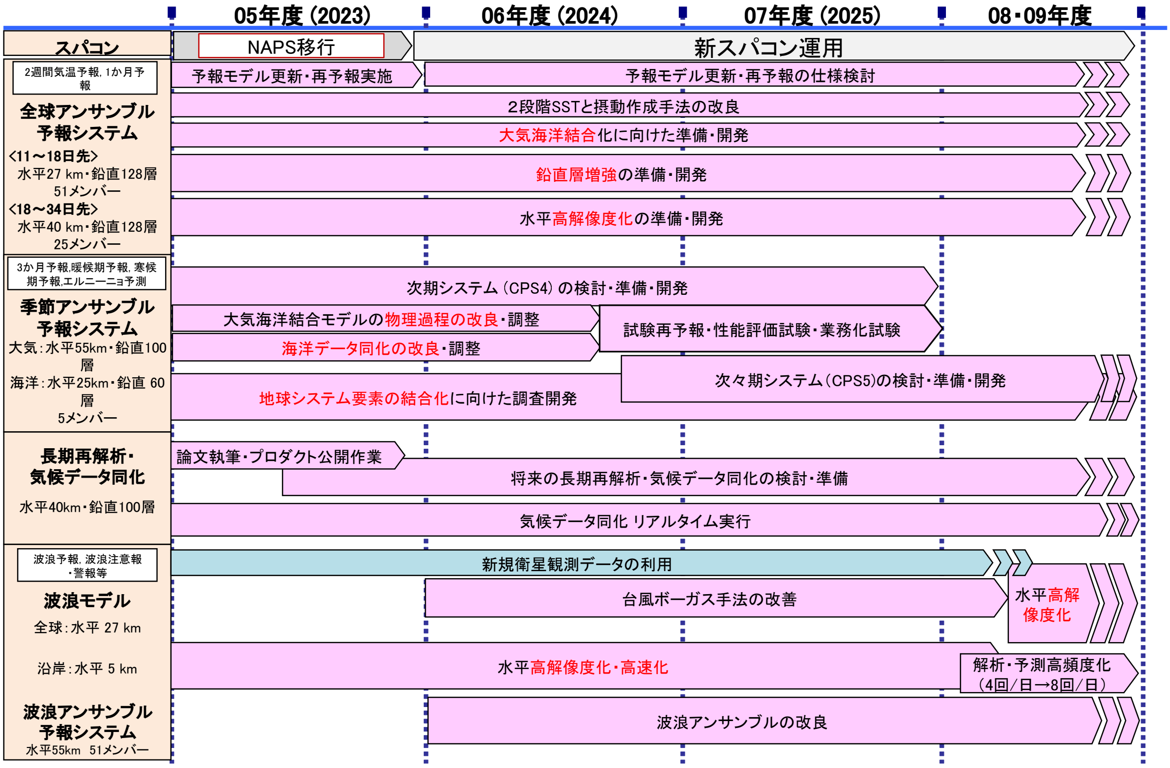

図 2.14.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデルの開発計画

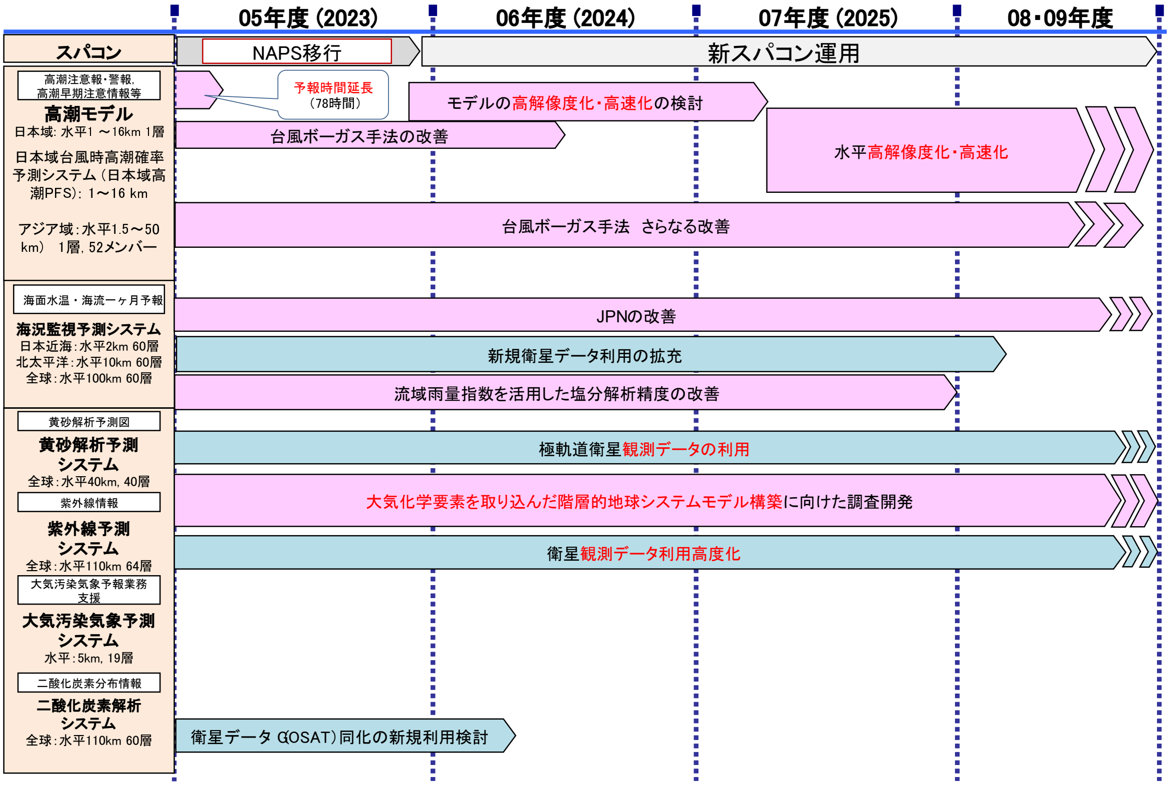

図 2.14.2 高潮モデル、海況監視予測システム、物質循環システムの開発計画

第３章　数値予報システムの開発成果

3.1　開発成果一覧

表 3.1.1　2023 年 1 月から 2023 年 12 月までに数値予報システムに導入した開発成果

節	表題	日時
3.11	全球波浪モデルの高解像度化と延長予報の頻度増強	1 月 31 日
年報 (令和 4 年) 4.14	日本沿岸海況監視予測システムの改良	2 月 9 日
3.2, 3.6, 3.7, 4.2	全球数値予報システムと全球アンサンブル数値予報システムの改良	3 月 14 日
3.3, 3.4, 3.6, 3.8, 3.9	メソ数値予報システムとメソアンサンブル予報システムの改良	3 月 28 日
3.5, 3.6, 3.9, 3.10	局地数値予報システムの改良	3 月 28 日
2.12	高潮予測 GPV の予報時間延長	7 月 24 日
4.3	メソ、局地解析における沖縄・松江のレーダーデータの利用再開	11 月 8 日

3.2 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

3.2.1 はじめに

全球数値予報システムは、天気予報や週間天気予報、台風予報での利用、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数値予報システムである。気象庁では、スーパーコンピュータシステムの更新とともに、全球数値予報システムの分解能の向上や計算手法の精緻化などの改良を通して予測精度の向上を進めてきた。第10世代スーパーコンピュータシステムにおいては、鉛直、水平解像度の増強や物理過程の精緻化等を通じた全球モデル (GSM) や全球解析 (GA) の改良を開発計画 (本田 2018) に沿って進め、令和4年度（2022年度）末の段階で、概ね計画通りの改良を実施した。

2023年3月14日に実施した全球数値予報システムの更新では、GSMの水平解像度を20 kmから13kmに増強するとともに、高解像度化に合わせた力学過程の改良、地形性抵抗過程、非地形性重力波過程、放射過程、湖の扱い等物理過程の改良、全球解析及び積雪深解析の高度化を行った。あわせて、モデル標高の作成に用いる標高オリジナルデータセットをより高精度のものに更新した。これらの更新により、循環場・気温等の誤差減少、前線や細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上を通じて、北半球500 hPa高度予測精度、台風進路予測精度、日本付近の降水予測精度などが改善した。本稿では、その改良内容と予測精度の評価結果及び予測特性の変化について報告する。以下では、第3.2.5項に示すGSMのバージョンの命名規則に沿い、本稿で示す改良を総称してGA/GSM2303と呼ぶ。

3.2.2 変更概要

ここでは、GA/GSM2303における変更の概要やその狙いについて示す。各変更の詳細や個々の変更のインパクトについては、気象庁 (2022a)、気象庁 (2022b)、気象庁 (2023) を参照されたい。

(1) 水平高解像度化と高解像度化に合わせた力学過程改良

GSMの格子点数を増強すると同時に格子点数と切断波数の関係の見直しを行った。さらに、モデル標高に施すフィルタや大気モデルの数値拡散の見直しを行った。これらにより、GSMの水平解像度を約20 kmから約13 kmに向上させた。

前者について、格子数を増強するとともに、信頼可能スケール（エイリアシング[1]、フィルタ処理、離散化誤差のいずれにも大きく影響されない空間スケール）をより高波数域まで拡大させる（実効解像度を向上させる）ことを目的に、水平格子系を1次格子から2次格子に変更した。この際、切断波数は959のままとした。この変更により、東西格子数（赤道付近）・南北格子数はそれぞれ1.5倍、全球としては格子点数が約2倍になり、水平格子間隔は約13kmとなる。また、2次格子を採用することで、非線型項に伴うエイリアシングが軽減され、実効解像度が向上する。以下では、1次格子、2次格子による波数切断を表す場合、切断波数をxxxとして、それぞれ”TLxxx”、”TQxxx”と表記する[2]。

後者について、2次格子の採用によりエイリアシングが軽減されることを踏まえ、計算安定性向上やエイリアシング、ギブス現象の抑制を目的としたモデル標高（平均標高）の平滑化関数や予報変数に対するフィルタ処理（数値拡散）の見直しを行った。この変更により、中高波数成分の減衰を弱めることで、実効解像度を更に向上させた。

(2) 地形性抵抗過程の改良

下部成層圏における西風の弱風バイアスの減少、データ同化サイクルにおける上部成層圏での第一推定値と衛星観測データの整合性向上、北半球における対流圏の循環場の予測精度向上を目的に、Lott and Miller (1997) に基づくサブグリッド地形による重力波抵抗（Gravity Wave Drag, 以下GWD）とBeljaars et al. (2004) に基づく地形性乱流形状抵抗（Turbulent Orographic Form Drag, 以下TOFD）のパラメータを調整した。具体的には、GWDにおいて、サブグリッドスケールの運動量フラックスがより上方に伝播するよう、飽和フラックス[3]の振幅が大きくなるようにパラメータを調整した。また、GWDのパラメータ調整に合わせる形で、GWDのパラメータ変更により対流圏中下層での東西風減速を弱めることを補完し、北半球の循環場の精度を維持するために、TOFDによる東西風減速の振幅を更新前の2倍に強めるように調整した。

(3) 非地形性重力波過程の改良

成層圏の気温や風速のバイアス軽減、及びデータ同化サイクルにおける衛星観測と第一推定値の整合性向上を目的に、非地形性重力波過程における射出高度での運動量フラックス（射出フラックス）の緯度依存性の精緻化と、安定時の鉛直拡散係数の調整を行った。射出フラックスについては、全体的にフラックスの大きさが精緻化前よりも小さくなるようにするとともに、高緯度側でフラックスが精緻化前よりも特に小さくなるようにした。非地形性重力波過程の精緻化とあわせ

[1] 高波数の波を少ない格子点数でサンプリングした際に、本来高波数成分であるものが低波数成分として「化けて」出てくる現象でノイズやスペクトラルブロッキングの原因となる。エイリアシングとスペクトラルブロッキングの関係の解説については氏家ほか (2019) を参照。

[2] それぞれLinear, Quadraticの頭文字を取る

[3] 飽和フラックスを超えた分の運動量フラックスは環境場に返される。GWDの場合は、環境場に返された運動量は、水平風を減衰させるよう働く。

て、成層安定時における局所渦スキーム (Han and Pan 2011) による拡散係数を成層圏ではより小さくなるよう調整を行った。

(4) 放射過程の改良

大気上端上向き長波放射フラックスの過剰バイアスの軽減とそれによる対流圏の低温バイアスの減少を狙い、雲放射過程における雲氷有効サイズ診断式について、Wyser (1998) の手法から、熱帯・中緯度の両方で適用可能な Sun (2001) の手法に精緻化した。これは、気象研究所で開発中の雲氷光学特性および有効サイズの診断式改良 (Nagasawa 2021) のうち、雲氷有効サイズ診断式を先行的に採用し、今後の Nagasawa (2021) による手法の取り込みに備える狙いもある。

成層圏の気温予測精度向上を目的に、放射過程で利用するオゾン濃度の 3 次元気候値について気象研究所化学輸送モデル MRI-CCM1(Shibata et al. 2005) を用いて作成されたものから、気象庁第 3 次長期再解析（JRA-3Q, Kosaka et al. 2024）向けに整備された、MRI-CCM2(Deushi and Shibata 2011) に基づくオゾン再解析から作成したものに更新した。ただし、1 hPa より上層では SPARC プロジェクトによる衛星観測に基づく帯状平均月別気候値 (Randel et al. 1998) で補正したものを用いる点は変更しない。

高解像度モデルと低解像度モデルのバイアス特性の差を小さくすること、予測対象や時間スケールに依存しない部分について GSM と季節予報システム (CPS3) で仕様を共通化しコード維持管理性を向上させることを目的に、CPS3 で導入済の太陽天頂角計算高度化 (Hogan and Hirahara 2016) と地表面アルベド計算の空間高解像度化 (Hogan and Bozzo 2015) を GSM にも導入した[4]。

(5) 湖の扱いの改良

GA/GSM2303 より前の GSM では、湖等の陸水は海格子として扱われており、モデル内で海と湖の区別はなかった。GA/GSM2303 では、対流圏下層気温を中心とした予測精度向上を狙い、湖の扱いの精緻化を行った。湖格子における湖面温度については、MODIS[5]の地表面温度プロダクトから作成した湖面温度月別気候値を与えるとともに、湖氷密接度については、湖面温度気候値の関数として診断するように変更した。ただし、五大湖、バイカル湖、ラドガ湖等、海面水温・海氷解析の対象である大きな湖では、従来と同様、気象庁作成の全球日別海面水温解析値 (栗原ほか 2006) 及び海氷解析値を使う。また、海面過程における凝固点及びバルク法による潜熱フラックスの計算に用いる水面の比湿についても、海と湖で扱いを分けるようにした。海格子では凝固点は-1.64°C、水面温度と地表面気圧から計算した飽和比湿の 0.98 倍（塩分濃度約 3.7% に相当）を水面の比湿としているところを、湖格子では凝固点は 0°C、水面温度と地表面気圧のもとでの飽和比湿を水面の比湿（淡水を仮定）とした。

(6) 全球解析の改良

LETKF で用いる観測空間での鉛直局所化で用いるガウス関数の局所化スケールの種類について、維持管理の観点から整理を実施した。GA/GSM2303 より前は、衛星観測輝度温度データに対しては荷重関数の 2 乗と $0.6\sqrt{2}$ スケールハイトを局所化スケール[6]としたガウス関数のうち大きい値で構成される関数を用いていた。従来型観測に対しては 1.2（地上気圧・地上 GNSS 天頂大気遅延量）または 0.6（その他従来型観測）スケールハイトを局所化スケールとするガウス関数を局所化関数として使用しているため、合計 3 種類の局所化スケールが存在していた。GA/GSM2303 では、衛星観測輝度温度データに適用するガウス関数についても地上気圧等と同様、1.2 スケールハイトを局所化スケールとするガウス関数に変更し、ガウス関数を用いる場合の局所化スケールを 0.6 スケールハイト、1.2 スケールハイトの 2 種類に整理した。

(7) 積雪深解析の改良

積雪分布をより適切に初期値に反映させ、対流圏下層を中心とした予測精度向上を狙い、積雪深解析の改良を実施した。GA/GSM2303 では、積雪深解析の頻度を 1 日 1 回（18UTC）から 4 回（00, 06, 12, 18UTC）に高頻度化し、観測データがより早期に反映されるようにした。また、モデル予測値と衛星から推定した積雪域を組み合わせる第一推定値作成処理の改良もあわせて実施した。この改良では、衛星積雪域の誤判定（見逃し）の影響緩和のため、衛星からの推定で積雪なしと判定されてもただちに積雪深の第一推定値を 0 cm とはせず、積雪深予測値の大小に応じて次第に第一推定値を 0 cm に近づけるようにした。

(8) 標高オリジナルデータセットの更新

高解像度化の効果をより引き出すことや、地形に関わる表現の精緻化を通じた北半球の循環等の予測精度向上を目的に、GSM で用いる標高オリジナルデータセットとして用いる数値標高モデル (digital elevation model; DEM) を GTOPO30(Gesch et al. 1999) から更新した。GA/GSM2303 で新しく利用する主要な DEM として、GTOPO30 よりも高精度・高解像度である MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) を採用した。MERIT DEM には南緯 60 度以南が含まれていないため、南極域については RAMP2 (Liu et al. 2015)

---

[4] GSM の放射過程では、計算コスト削減のために経度方向に 4 格子で平均した場で放射計算を行っている。ここで示した改良は、地表面アルベド計算のみ元の格子の解像度で計算するもの。

[5] MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (Terra 衛星および Aqua 衛星に搭載されている中分解能撮像分光放射計)

[6] 値が $e^{-0.5}$ となる距離。

と合わせることで全球 DEM を構成する。

3.2.3　検証結果

GA/GSM2303 の現業導入に際して実施した、予測精度を検証するための業務化試験[7]等の結果に基づき、予測精度の変化の概要を示す。

(1)　実験設定

対照実験には 2022 年 7 月時点の現業数値予報システムを用いた。以下では、対照実験を CNTL、CNTL に第 3.2.2 項で示した変更と第 3.7 節、第 3.8 節で示す観測データ利用改良を取り込んだ実験を TEST と呼ぶ。なお、ここで示す予測特性の変化については、GA/GSM2303 の影響が主であることを事前の個別の実験等で確認している。実験期間は北半球における夏冬の 2 期間を対象としており、ここではそれぞれ夏期間、冬期間と呼ぶ。実験の解析と予報は以下の期間について実施した。

- 夏期間
  - 解析: 2021 年 6 月 10 日 ∼2021 年 10 月 11 日
  - 予報: 2021 年 6 月 20 日 ∼2021 年 10 月 11 日
- 冬期間
  - 解析: 2021 年 11 月 10 日 ∼2022 年 3 月 11 日
  - 予報: 2021 年 11 月 20 日 ∼2022 年 3 月 11 日

現業運用されている全球解析には、予測を決められた時刻までに提供するための速報解析と、解析値の品質を維持するために観測データの入電を十分待ってから行うサイクル解析の 2 種類があり、業務化試験では現業運用に準じて両方の解析を行う。上の実験期間の解析とはサイクル解析を意味し、速報解析の実施期間は予報と同一になる。なお、両解析と予報の間のデータフローなど、気象庁の全球数値予報システムの全体像については JMA (2023) を参照されたい。

検証対象期間は各予報期間最初の 10 日間を除く期間とした。また、台風検証以外の検証では最後の 11 日間の予報も検証には用いておらず月末日を検証期間の終わりにしている。

(2)　北半球 500 hPa 高度場の予測

図 3.2.1 に北半球 500 hPa 高度の予測の二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) について TEST から CNTL を引いたものを示す。夏期間は 3 日先まで、冬期間は 5 日先までそれぞれ、統計的に有意な改善が見られた。夏期間・冬期間合わせた平均での 2 日先の RMSE の改善幅は約 0.29 m であった。この改善は、実況（解析値）に対して予測でのリッジやトラフの振幅の誤差のパターンが小さくなった結果であった。TEST は CNTL に対して 500 hPa 高度が系統的に大きい/小さいということはなく、CNTL で実況より振幅が浅い場合・深い場合いずれにおいても、TEST ではより適切にトラフの振幅を表現する事例が多く見られた。例として、図 3.2.2 に GSM が予測するトラフの振幅が実況よりも浅かった場合、深かった場合両方の事例での CNTL、TEST の予測結果を示す。2021 年 12 月 8 日 12UTC の事例では、日本付近のトラフが CNTL の予測では実況より浅かったものの、TEST ではその誤差が軽減された。2021 年 12 月 12 日 12UTC の事例では、沿海州にあるトラフの後面の振幅を CNTL は実況より深く予測していたが、TEST ではその誤差を軽減させていた。この図で示した事例のように、誤差のパターンは変わらないが、TEST では CNTL よりも誤差の振幅が減少する事例が多く見られ、そのことが RMSE の減少に繋がっていた。500 hPa 高度の振幅表現改善は、地形性抵抗の改良や標高データセットの更新の個々の変更単独の試験でも確認されており、これらの改良の効果が大きいと考えられる。

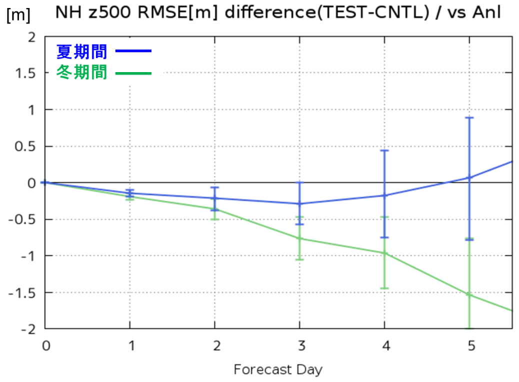

図 3.2.1　北半球 (20°N 以北) での 500 hPa 高度場の解析値に対する RMSE [m] について、TEST から CNTL を引いたもの（縦軸）。横軸は予測時間 [day]。緑線が冬期間で青線が夏期間。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味する。エラーバーは、ブートストラップ法（リサンプル数 10000）で見積もった 95%信頼区間を表す。

(3)　台風予測

図 3.2.3 に実験期間（夏期間及び冬期間）における台風進路予測の平均誤差を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。図に示すように、TEST は CNTL に対して一貫して進路予測誤差が小さく、FT=0 から FT=72 までで、平均して約 6%の改善が見られた。個々の台風毎に見ても TEST は CNTL に対して進路予測誤差が減少する例が多く、特に進路予測誤差の大きかった 2021 年台風第 6 号、14 号、19 号で大きな改善が見られた（図略）。さらに、台風第 14 号の進路予測改善は降水予測改善にも波及していた。この点については、第 3.2.3 項 (4) で改めて示す。台風の強度予測について、図 3.2.4 に中心気圧の散布図（横軸：実況（気象庁ベストトラック）、縦軸：48 時間予測値）を示す。CNTL では、散布図が対角線よりも上寄りに分布しており、予測が実況よりも浅い傾向が目立つことを示し

[7] 業務化試験の位置付け・内容については (石田 2017) を参照。

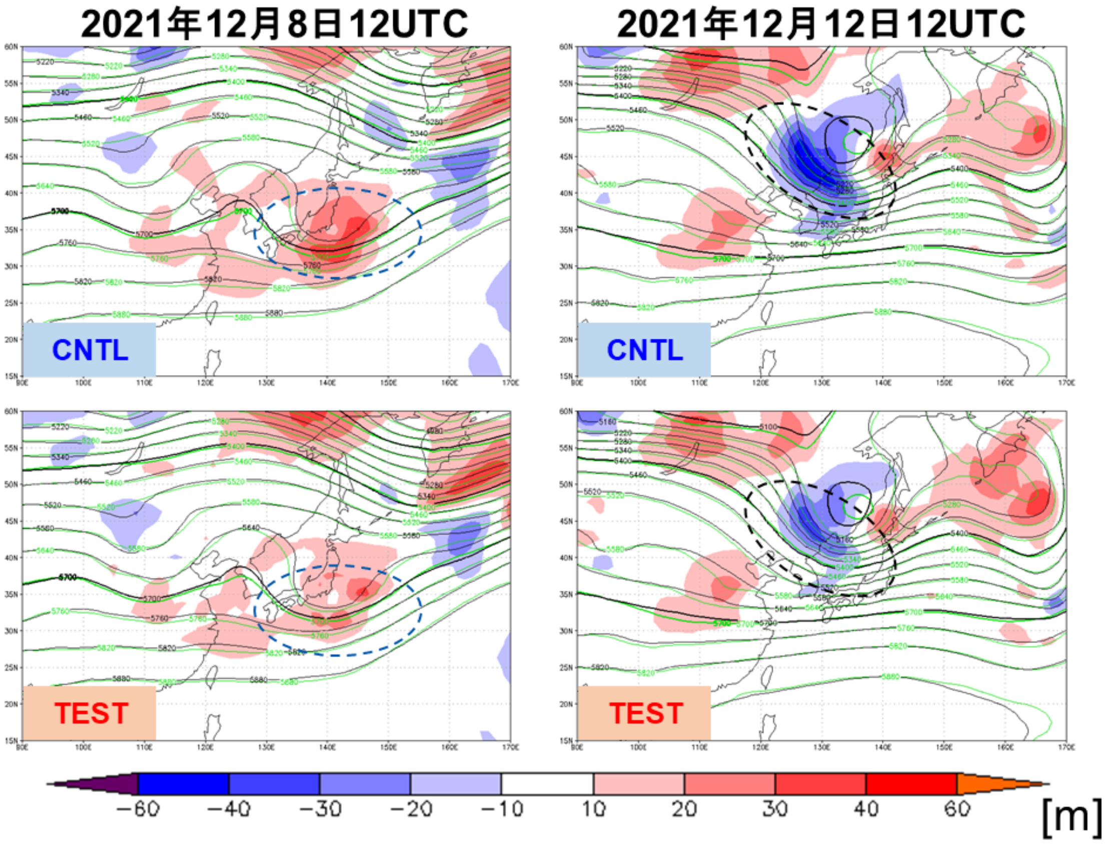

図 3.2.2　（左）2021 年 12 月 8 日 12UTC、（右）2021 年 12 月 12 日 12UTC を対象とした、日本周辺の 500 hPa 高度 [m] の 48 時間予測値（等値線：黒）、解析値（等値線：緑）、48 時間予測値の対解析誤差（カラー）。（上）CNTL、(下)TEST。

ている。それに対し、TEST では CNTL より散布図が対角線に近づいた。これは、台風中心気圧が CNTL より深まることで実況との整合性が向上していることを示している。一方で、散布図の左下にある実況よりも発達している台風については、発達の程度が大きくなる。すなわち、CNTL で過発達する台風については、TEST ではその傾向が強まることを示している。なお、急発達時にその表現が不十分である点や、成熟期や衰退期に発達を続けたり衰弱が遅れるといったこれまでの GSM に見られる特徴は継続して見られた（図略）。

(4)　日本付近の降水予測

ここでは解析雨量を参照値とした降水予測検証結果について示す。図 3.2.5 は、夏期間における 10 mm/3h を閾値とした降水予測のエクイタブルスレットスコア (ETS) を示す。予報時間を通じて TEST は CNTL よりも ETS が大きく、改善傾向を示している。降水量の閾値別に見た、降水頻度の予測については図 3.2.6 に示すように、TEST では弱い降水（たとえば 1 mm/3h）の頻度が減少し、強い降水（たとえば 10 mm/3h）の頻度が増加することで、バイアススコア (BI) が 1 に近づくようになった。冬期間の降水については、図 3.2.7 に示す通り、24 時間予測までは ETS はやや改悪するが、その後は改善に転じ、132 時間予測まで改善が維持された。この予報初期の ETS 改悪は海上主体であり、高解像度化等で降水表現がよりシャープになったことが影響している[8]と考えられる。なお、陸上のアメダス降水量と比較した統計検証では改悪は見られなかった（図略）。開発中に行った実験の結果からは、これらの夏期間の ETS 及び BI の改善や、冬期間の降水予測特性の変化は、特に高解像度化による影響が大きいことがわかっている。

台風進路予測の改善が日本付近の降水予測を改善した例として、図 3.2.8 に 2021 年台風第 14 号に伴う降水予測事例を示す。この事例では、台風第 14 号は実況では福岡県に上陸したのち、9 月 17 日の夜に中国地方にも降水をもたらしていたが、CNTL は実況（ベストトラック）よりも進路を北に予測し、中国地方には強い降水（たとえば 20 mm/3h 以上）をもたらさない予測

[8] 高解像度化や降水過程の精緻化で降水がよりシャープになると、位置ずれの影響が出やすく、ETS では不利になる場合（いわゆる「ダブルペナルティ」の問題）がある。ダブルペナルティの問題についての解説は幾田 (2010) などを参照されたい。

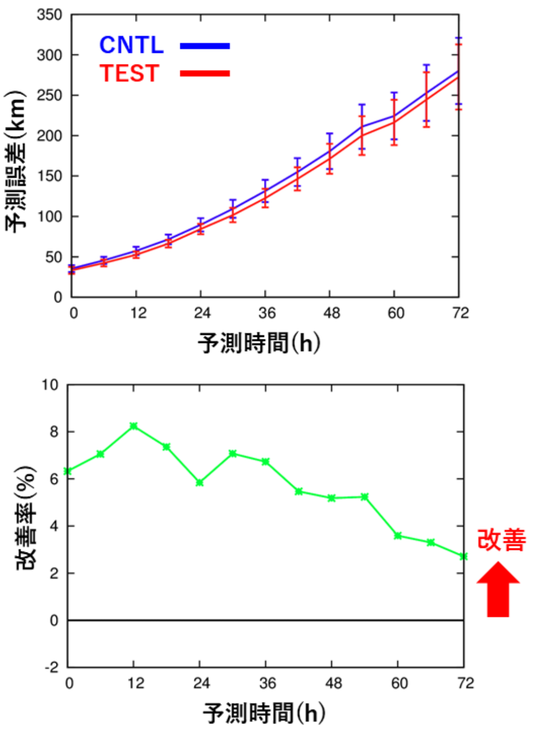

図 3.2.3　夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした台風進路予測の（上）平均誤差 [km]（赤線：TEST、青線：CNTL)、(下）平均誤差の TEST の CNTL に対する改善率 [%] 。改善率は（CNTL の平均誤差 −TEST の平均誤差）/（CNTL の平均誤差）×100 で定義する。

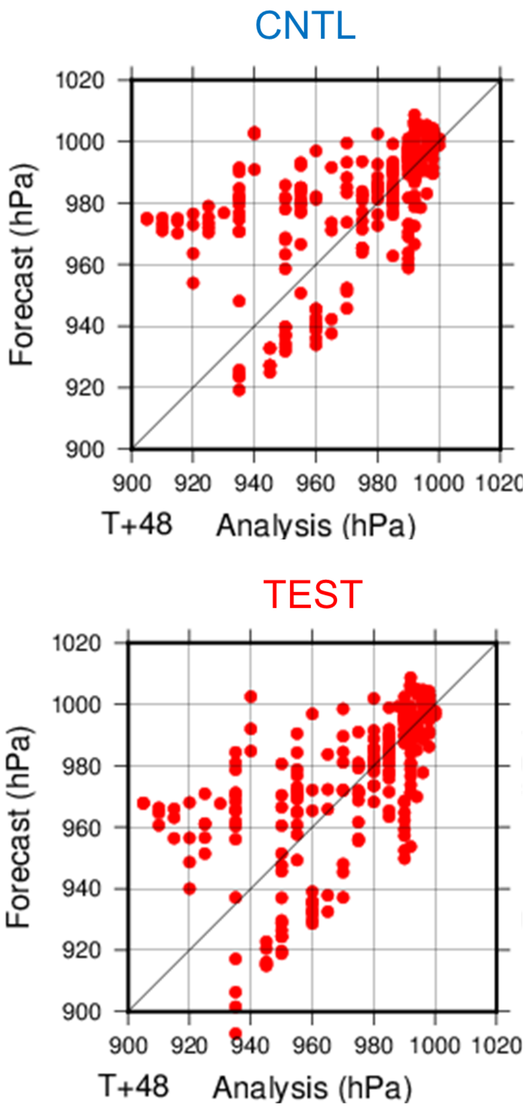

図 3.2.4　夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした中心気圧 [hPa] の散布図。横軸：実況（気象庁ベストトラック)、縦軸：48 時間予測値。(上）CNTL、(下）TEST。

になっていた。TEST は CNTL よりも実況に近い進路を予測しており、中国地方を中心に強い降水を予測し、降水予測も実況に近いものとなっていた。また、この事例では、TEST は CNTL よりも中高緯度のジェットの強度やその位置を適切に表現していた（図略）ほか、降水量自体も TEST のほうが実況により近かった。高解像度化や物理過程改良による総観規模の現象の予測改善と、より細かいスケールの降水の表現向上の両方が降水予測改善に寄与したと考えられる。

(5)　各種統計検証スコア（冬期間）

図 3.2.9 及び図 3.2.10 に、冬期間について解析値とラジオゾンデ観測値を参照値として、代表的な要素の予測を領域ごとに検証した結果を示す。検証は、アノマリー相関係数 (ACC: Anomaly Correlation Coefficient) またはラジオゾンデ観測に対しては相関係数 (CC: Correlation Coefficient)、RMSE、平均誤差 (ME: Mean Error) とその変化の有意性についてのものである。

冬期間では、対初期値検証・対ラジオゾンデ検証ともに多くの要素で予測時間前半を中心に有意な改善が見られた。特に、北半球での 500 hPa 高度場や 850 hPa 気温、850 hPa や 250hPa の風といった、中高緯度での総観規模擾乱の表現に関わる要素での, RMSE の改善が大きい。

(6)　各種統計検証スコア（夏期間）

図 3.2.11 及び図 3.2.12 に、夏期間について解析値とラジオゾンデ観測値を参照値として、冬期間と同様に代表的な要素を領域ごとに検証した結果を示す。

夏期間についても、冬期間同様、北半球での 500 hPa 高度場や 850 hPa 気温、850 hPa や 250hPa の風等の RMSE の改善が見られた。北半球での 500 hPa 高度の対解析 ME や熱帯での 700 hPa 相対湿度の対ラジオゾンデ観測 RMSE 等、一部の要素で改悪は見られるものの、全体としては有意な改善が卓越している。

3.2.4　まとめと今後の開発

2023 年 3 月 14 日に実施した全球数値予報システムの更新では、GSM の水平解像度を 20 km から 13km に増強、高解像度化にあわせた力学過程の改良、各種物

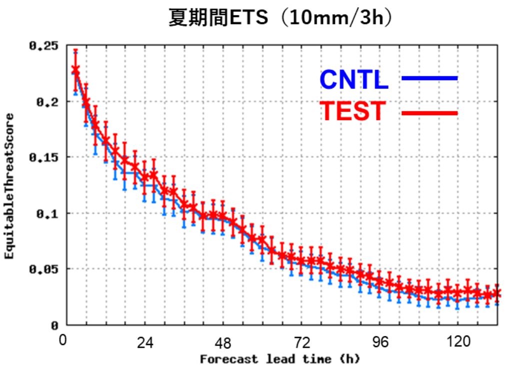

図 3.2.5 夏期間における、閾値 10mm/3h の降水に対する解析雨量を参照値としたエクイタブルスレットスコア（ETS、縦軸）。横軸は予報時間 [ht]。赤線が TEST で青線が CNTL。

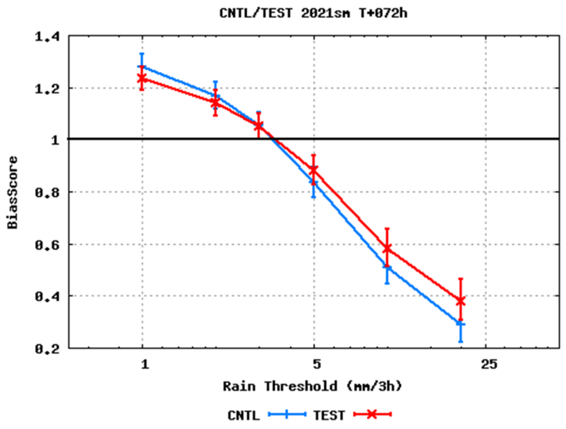

図 3.2.6 夏期間における、3 時間降水量の 72 時間予測の解析雨量を参照値としたバイアススコア（BI、縦軸）。横軸は降水量の閾値 [mm/h]。赤線が TEST で青線が CNTL。

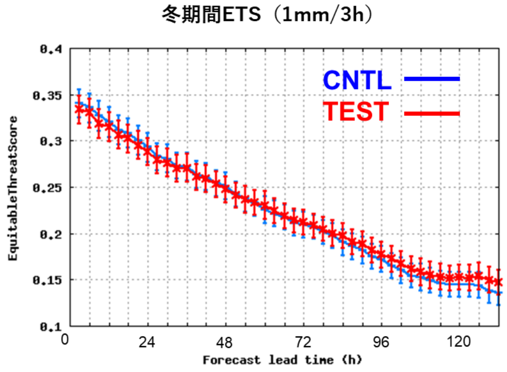

図 3.2.7 図 3.2.5 と同じ。ただし、冬期間における閾値 1 mm/3h の降水について。

理過程の改良、全球解析及び積雪深解析の高度化を行った。また、モデル標高の作成に用いる標高オリジナルデータセットをより高精度のものに更新した。これらの更新により、北半球 500 hPa 高度予測精度、台風路予測精度、日本付近の降水予測精度などが改善した。北半球 500 hPa 高度については、2 日予測誤差（RMSE）が約 0.29 m 減少した。これは、地形性抵抗や標高オリジナルデータセットの改良により、誤差のパターンの振幅が小さくなったことによる効果が大きかった。台風予測について、3 日先の進路予測誤差が約 6 %減少したほか、高解像度化により台風中心気圧は全般的に深くなる傾向が見られた。日本付近の降水予測については、夏期間の 10mm/3h 以上の降水等、降水量の多い事例を中心に精度の改善が見られた。さらに、台風進路予測精度の改善や降水の表現能力向上に伴い、2021 年台風第 14 号等、日本付近の降水予測が大きく改善した例も見られた。

第 10 世代スーパーコンピュータシステム上での GSM の更新は GSM2303 が最後となるが、今後は次期（第 11 世代）スーパーコンピュータシステム上での GSM の改良を目指し、引き続き雲・積雲・放射・海面過程等の物理過程の改良を行う。また、重点計画で示した方向性である、GSM の水平解像度 10 km 以下への高分解能化や全球 10 km メッシュの高解像度海面水温解析値の利用の実現に向けた開発も並行して進めている。前者については計算機の性能向上上だけに頼らずに、数値予報モデルを将来の計算機の構成に適合させる形で高速化することが重要となる。後者については、高解像度海面水温解析の運用準備ができ次第速やかに数値予報で利用できるよう、海面温度解析値がデータ同化サイクルを含む全球数値予報システムの予測精度に与える影響を予め把握することが重要となる。これらの開発や調査の進捗については、第 4.1 節で報告する。

3.2.5 補足：全球モデル (GSM) の仕様

GSM2303 について、力学過程及び物理過程の仕様を表 3.2.1 にまとめる。各過程の詳細については JMA (2023) もあわせて参照されたい。表におけるアウターモデル及びインナーモデルとは、データ同化プロセスにおいて 4 次元変分法やアンサンブル予報の中で用いられるモデルであり、アウターモデルは解析における第一推定値の計算に用いるモデルを、インナーモデルは解析修正量を求める計算やアンサンブル予報に用いるモデルを指す。ただし、4 次元変分法で用いるインナーモデルの物理過程にはバージョンの古いものや簡略化したものが含まれている。

表 3.2.2 に、GSM の水平・鉛直の分解能等の基本仕様の向上や、力学・物理過程の改良についての更新履歴を示す。表の左列に示すように、GSM にはバージョン名が付けられており、変更に伴い改定されている。バージョン名の形式は、全球数値予報システムに改良を導入した西暦の下二桁と月を「GSM」の後ろに付けたもので、例えば、2023 年 12 月時点での最新 GSM のバージョン名は、本稿で示す 2023 年 3 月に運用を開始

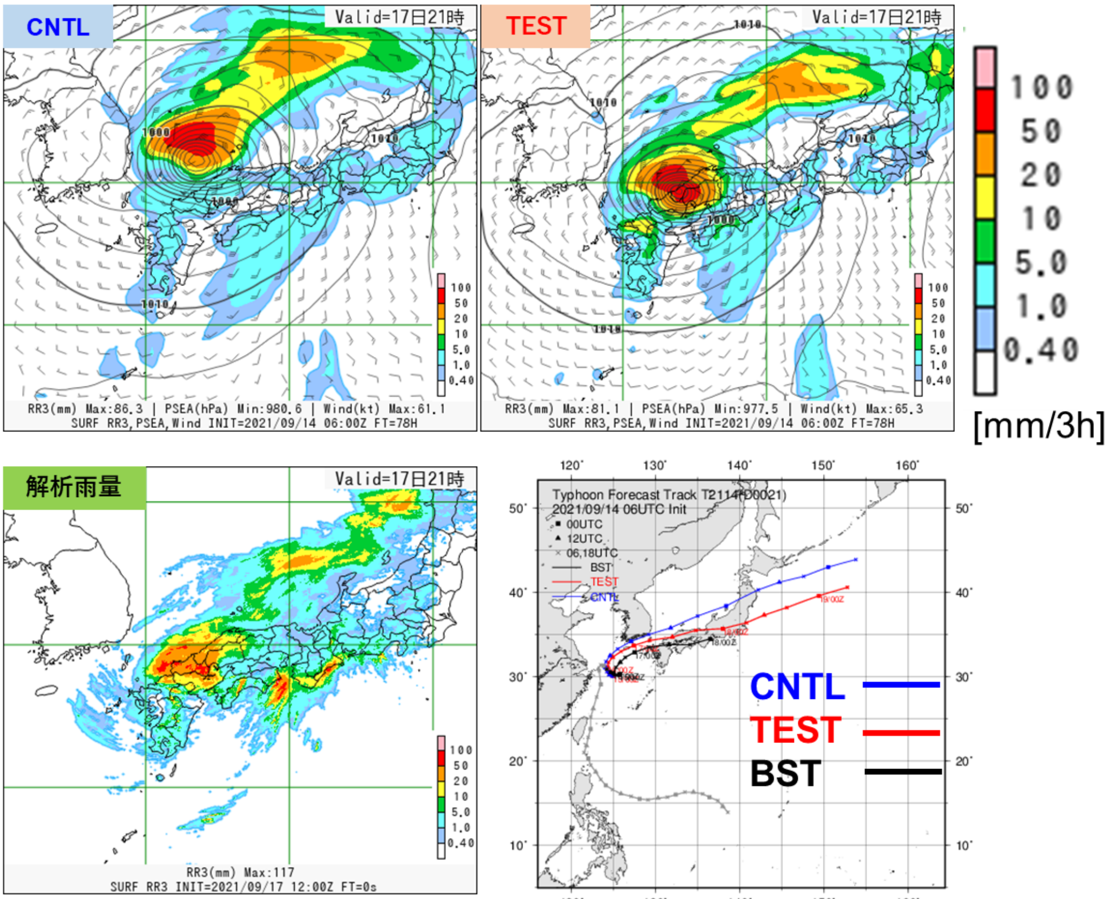

図 3.2.8 2021 年 9 月 17 日 21JST を対象とした、CNTL（左上）、TEST（右上）における 3 時間降水量（カラー、mm/3h)。CNTL、TEST の初期値は 2021 年 9 月 14 日 06UTC。（左下）2021 年 9 月 17 日 21JST における前 3 時間解析雨量 [mm/3h]。（右下）2021 年 9 月 14 日 06UTC 初期値における、CNTL（青線）、TEST（赤線）の台風進路予測。黒線は気象庁ベストトラック。

したものであり、「GSM2303」と呼ぶ。表の中の分解能の表記について、はじめの T,TL もしくは TQ は三角形波数切断を意味し、その後の数字は切断波数を表す。T または TQ の場合は 2 次格子[9]、TL の場合は 1 次格子を意味する。また、その後の L は鉛直層を意味し、直後の数字は層数を表す。

[9] T または TQ の場合で数学的な意味に違いはないが、実効解像度を向上させることを目的に 2 次格子を採用している場合は TQ で表記している

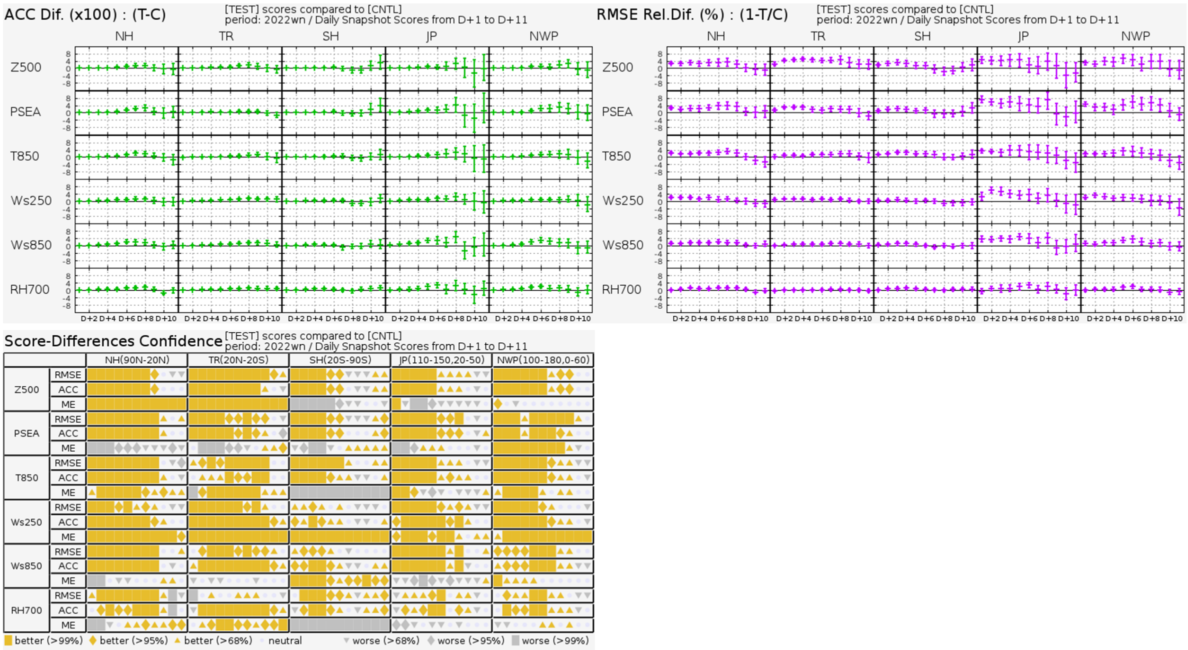

図 3.2.9　冬期間における対流圏主要要素の ACC の改善幅（左上図)、RMSE の改善率（右上図）と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定（左下図：スコアカード)。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S-20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺（110°E-150°E, 20°N-50°N）、NWP が北西太平洋領域（100°E-180°E, 0°-60°N）を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、ACC、ME について、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

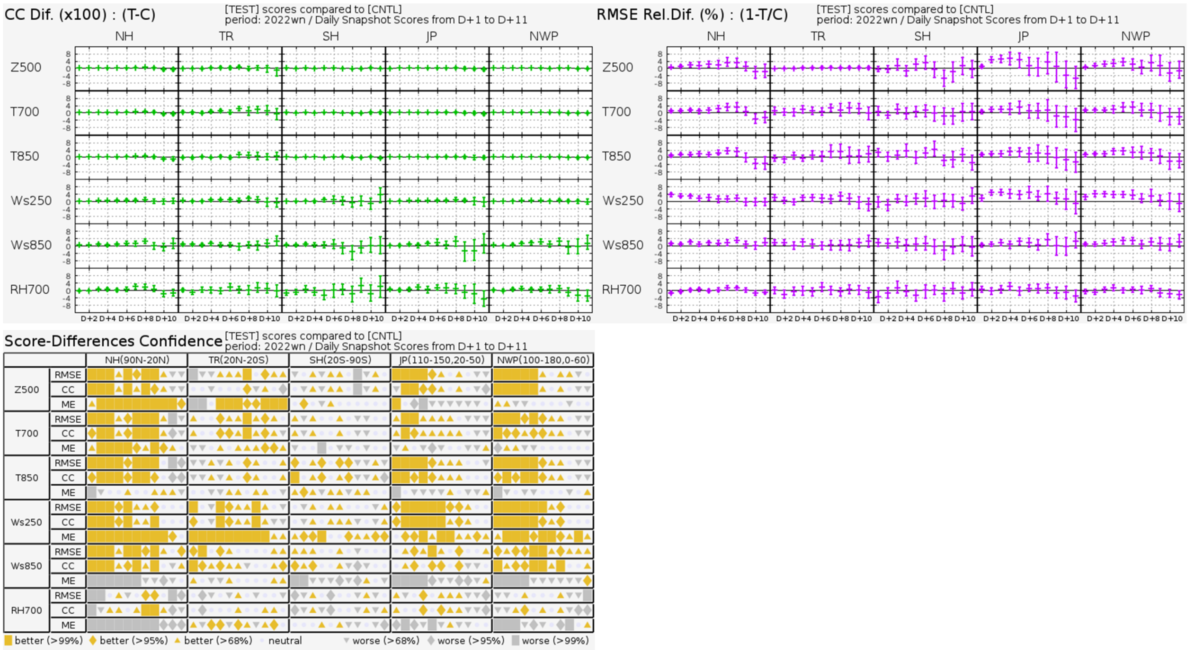

図 3.2.10　冬期間における対流圏主要要素の CC の改善幅（左上図)、RMSE の改善率（右上図）と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定（左下図：スコアカード)。ラジオゾンデを参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S-20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺（110°E-150°E, 20°N-50°N）、NWP が北西太平洋領域（100°E-180°E, 0°-60°N）を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、700 hPa 気温 (T700)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、CC、ME について、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

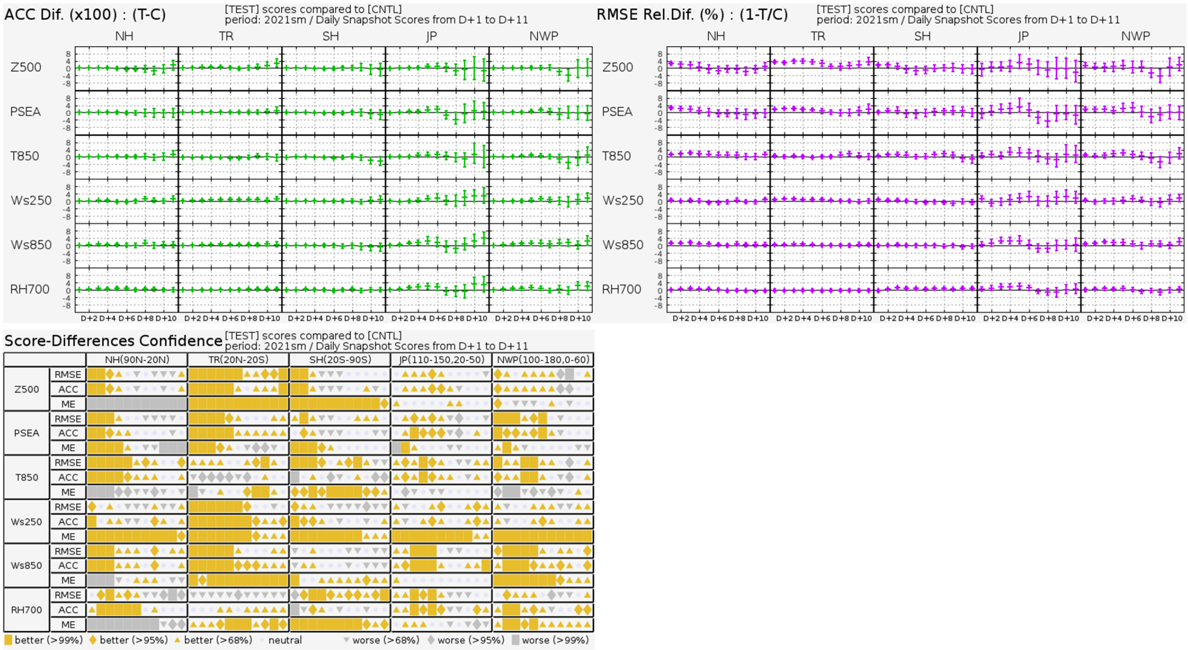

図 3.2.11　夏期間についての解析値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.9 と同じ。

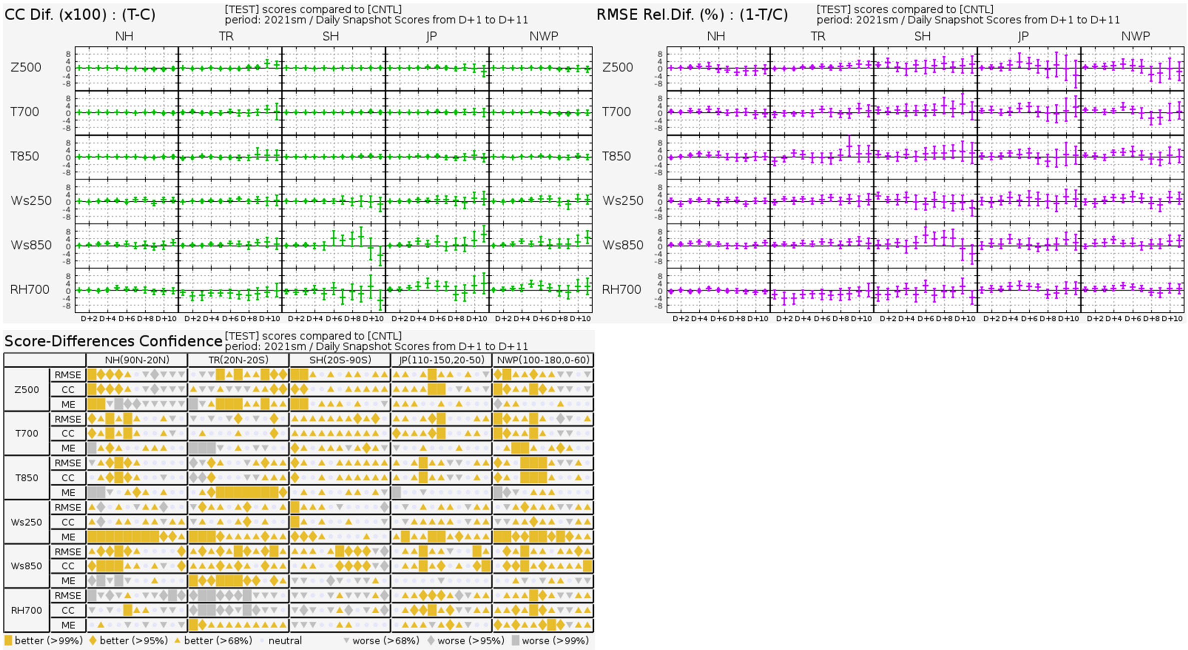

図 3.2.12　夏期間についてのラジオゾンデ観測値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.10 と同じ。

表 3.2.1 GSM の仕様（2023 年 3 月時点）

力学過程		
支配方程式		プリミティブ方程式系
予報変数		東西風、南北風、気温、比湿、雲水量、地上気圧の対数
離散化		水平：球面調和関数を基底関数としたスペクトル法、鉛直：有限差分法
水平格子系		適合ガウス格子 (宮本 2005)
水平分解能		予報モデル及びアウターモデル：TQ959（格子間隔約 13 km : 0.125 度）、インナーモデル：TL319（格子間隔約 55 km : 0.5625 度）
鉛直座標系		$\sigma - p$ ハイブリッド座標 (Simmons and Burridge 1981)
層数（最上層）		128 層 (0.01 hPa)
移流＋時間積分		2 タイムレベル　セミインプリシット - セミラグランジアン法 (Yukimoto et al. 2011)
積分時間間隔		300 秒 (TQ959)、600 秒 (TL319)
数値拡散		4 次の線形水平拡散を渦度、発散、仮温度に適用。スポンジ層として 2 次の線形水平拡散を 30 hPa より上層で発散に適用。
物理過程		
放射	長波	2 方向吸収近似 (Yabu 2013) による放射伝達、大気分子による吸収は 2 種類の k–分布法で評価 (Fu and Liou 1992; Chou et al. 2001)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップ (Geleyn and Hollingsworth 1979) を仮定。光学特性は、水雲は Lindner and Li (2000)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
	短波	δ–Eddington 法による散乱・吸収計算 (Joseph et al. 1976; Coakley et al. 1983)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップを仮定し、Collins (2001) に基づく簡略化した独立カラム近似を適用。光学特性は、水雲は Dobbie et al. (1999)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
積雲対流		予測型クロージャーを用いるスペクトル型マスフラックススキーム (Arakawa and Schubert 1974; Moorthi and Suarez 1992; Randall and Pan 1993)。雲モデルには氷相を考慮した簡易な雲微物理過程を用いる。
雲		確率密度関数に基づいた凝結スキーム (Smith 1990) を基本に、雲水から降水への変換や再蒸発、雪の融解などの簡単化した雲微物理過程、及び雲氷と雪の落下スキームを含む。また、層積雲に関する診断的スキーム (Kawai and Inoue 2006) を使用。
境界層		乱流エネルギークロージャ型 (Mellor and Yamada 1974, 1982) と K クロージャ型 (Han and Pan 2011) のハイブリッドスキーム。
地形性抵抗		Lott and Miller (1997) のスキームに Wells and Vosper (2010) 及び Vosper (2015) に基づく改良を加えたもの。 Beljaars et al. (2004) のスキームにより乱流地形抵抗を扱う。
非地形性重力波		緯度依存性を持つ定数励起源によるスペクトルパラメタリゼーション (Scinocca 2003)。
地表面		Monin–Obukhov 相似則に基づくバルク式、安定度関数は Beljaars and Holtslag (1991) を用いる。開水面と海氷面は Best et al. (2004) の手法により混在格子として扱う。
陸面	植生	Sellers et al. (1986) によるスキームを改良した手法でモデル化。
	積雪	体積、密度、アルベド、温度等の変化を予測。部分積雪を扱う。
	土壌	熱伝導はフーリエの法則に従い、水分の移動及び凍結・融解が考慮される。
海氷		体積・形状・密度不変で物性が一様の熱伝導体として扱う。内部の熱伝導はフーリエの法則に従い、表面では放射と乱流フラックスの上部境界条件、及び融解を考慮する。
化学過程		成層圏での簡易な診断型メタン酸化及び光乖離スキーム (Untch and Simmons 1999)。
海面水温		時間発展は、全球海面水温解析値の平年偏差を、予測時間により季節変動する気候値に加える。
海氷分布		時間発展は、南北半球ごとの全球海氷密接度解析値の海氷面積平年偏差を維持するように、海氷密接度の初期偏差固定予測値を気候値で修正する手法で扱う。

参考文献

Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674–701.

Beljaars, A., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1327–1347.

Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.

Best, M. J., A. C. M. Beljaars, J. Polcher, and P. Viterbo, 2004: A proposed structure for coupling tiled surfaces with the planetary boundary layer. *J. Hydr. Meteorol.*, **5**, 1271–1278.

Chou, M.-D., M. J. Suarez, X.-Z. Liang, and M. M.-H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *Technical report series on global modeling and data assimilation, Vol. 19, NASA Goddard Space Flight Center*, 56pp.

Coakley, J. A., R. D. Cess, and F. B. Yurevich, 1983: The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: a parameterization for climate models. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 116–138.

Collins, W. D., 2001: Parameterization of Generalized Cloud Overlap for Radiative Calculations in General Circulation Models. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3224–3242.

Deushi, M. and K. Shibata, 2011: Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model version 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **62**, 1–46.

Dobbie, J. S., J. Li., and P. Chýlek, 1999: Two-and four-stream optical properties for water clouds and solar wavelengths. *J. Geophys. Res.*, **104**, 2067–2079.

Ebert, E. E. and J. A. Curry, 1992: A parameterization of ice cloud optical properties for climate models. *J. Geophys. Res.*, **97**, 3831–3836.

Fu, Q. and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139–2156.

Geleyn, J.-F. and A. Hollingsworth, 1979: An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contrib. Atmos. Phys.*, **52**, 1–16.

Gesch, D. B., K. L. Verdin, and S. K. Greenlee, 1999: New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos Trans. AGU*, **80**, 69.

表 3.2.2　GSM の主な更新履歴

バージョン	主な変更内容
GSM8803	運用開始。仕様は T63L16、最上層 10 hPa
GSM8911	T106L21 へ仕様向上、ハイブリッド座標系と新陸面過程の導入
GSM9603	T213L30 へ仕様向上、新積雲対流過程の導入
GSM9912	雲水スキームの導入、積雲対流過程と放射過程の改良
GSM0103	T213L40・最上層 0.4 hPa へ仕様向上、積雲対流過程の改良
GSM0305	積雲対流過程の改良、及び雪の近赤外アルベドの調整
GSM0407	層積雲スキームの導入、雲氷落下・積雲対流過程の改良、氷床アルベドの調整
GSM0412	晴天放射スキームの改良
GSM0502	TL319L40 へ仕様向上、セミラグランジュ移流スキームの導入
GSM0507	放射過程における雲の取扱いの改良、オゾン気候値の改定
GSM0711	TL959L60・最上層 0.1 hPa へ仕様向上、時間積分の 2 タイムレベル化、エーロゾル気候値の改定
GSM0801	積雲対流過程の改良
GSM0808	力学過程の改良、適合ガウス格子の採用
GSM1212	層積雲スキームの改良
GSM1304	放射過程（エーロゾル気候値、水蒸気吸収係数）の改良
GSM1403	TL959L100・最上層 0.01 hPa へ仕様向上、放射・境界層・重力波・積雲過程の改良、陸面初期値利用の改良
GSM1603	積雲対流・雲・陸面・放射・海氷・海面過程、及び力学過程の改良
GSM1705	積雲対流・雲・陸面・放射・海氷過程、及び力学過程の改良
GSM2003	地形性抵抗・非地形性重力波・境界層・陸面・雲・海氷過程の改良
GSM2103	TL959L128 へ仕様向上、積雪、土壌水分初期値利用の改良
GSM2303	TQ959L128 へ仕様向上、地形性抵抗・非地形性重力波・放射過程の改良、地形オリジナルデータセットの更新

Han, J. and H.-L. Pan, 2011: Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*, **26**, 520–533.

Hogan, R. J. and A. Bozzo, 2015: Mitigating errors in surface temperature forecasts using approximate radiation updates. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **7**, 836–853.

Hogan, R. J. and S. Hirahara, 2016: Effect of solar zenith angle specification in models on mean shortwave fluxes and stratospheric temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 482–488.

本田有機, 2018: NAPS10 における改良計画. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2–5.

幾田泰酵, 2010: 高分解能モデルの降水予報精度評価に適した検証手法. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–17.

石田純一, 2017: 数値予報システム開発のプロセス. 数値予報課報告・別冊第 63 号, 気象庁予報部, 4–10.

JMA, 2023: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency.* Japan, 252 pp., (Available online at `http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2023-nwp/index.htm`).

Joseph, J. H., W. J. Wiscombe, and J. A. Weinman, 1976: The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2452–2459.

Kawai, H. and T. Inoue, 2006: A Simple Parameterization Scheme for Subtropical Marine Stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17–20.

気象庁, 2022a: 全球モデルの水平分解能向上、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, 2022b: 全球解析システムの改良. 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, 76–83.

気象庁, 2023: メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長. 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, 21–24.

Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa, T. Y.Tanaka, T. Tokuhiro, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**.

栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計，衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, 気象庁, **73 特別号**, S1–S18.

Lindner, T. H. and J. Li, 2000: Parameterization of the Optical Properties for Water Clouds in the Infrared. *J. Climate*, **13**, 1797–1805.

Liu, H., K. Jezek, B. Li, and Z. Zhao, 2015: *Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model, Version 2.* NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.

Lott, F. and M. J. Miller, 1997: A new subgrid-scale orographic drag parametrization : Its formulation and testing. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 101–127.

Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.

Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.

宮本健吾, 2005: 適合ガウス格子. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 39–42.

Moorthi, S. and M. J. Suarez, 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 978–1002.

Nagasawa, R., 2021: Impact of ice cloud treatment on the OLR in the radiation calculation of JMA global NWP model. *WGNE. Res. Activ. Earth. Sys. Modell.*, **51**, 4.13–4.14.

Randall, D. and D.-M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. *The representation of cumulus convection in numerical models, AMS Meteorological Monograph Series*, **46**, 137–144.

Randel, W. J., F. Wu, J. M. Russell, A. Roche, and J. W. Waters, 1998: Seasonal Cycles and QBO Variations in Stratospheric CH4 and H2O Observed in UARS HALOE Data. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 163–185.

Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.

Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505–531.

Shibata, K., M. Deushi, T. T. Sekiyama, and . Yoshimura, 2005: Development of an MRI Chemical Transport Model for the Study of Stratospheric Chemistry. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **55**, 75–119.

Simmons, A. J. and D. M. Burridge, 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758–766.

Smith, R. N. B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435–460.

Sun, Z., 2001: Reply to comments by Greg M. McFarquhar on 'Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations'. (October B, 1999, 125, 3037–3055). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 267–271.

氏家将志, 堀田大介, 黒木志洸, 2019: 離散化の見直し及び高速化. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 25–38.

Untch, A. and A. J. Simmons, 1999: Increased stratospheric resolution in the ECMWF forecasting system. *ECMWF Newsletter*, **82**, 2–8.

Vosper, S. B., 2015: Mountain waves and wakes generated by South Georgia: Implications for drag parametrization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 2813–2827.

Wells, H. and S. B. Vosper, 2010: The accuracy of linear theory for predicting mountain-wave drag: Implications for parametrization schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 429–441.

Wyser, K., 1998: The Effective Radius in Ice Clouds. *J. Climate*, **11**, 1793–1802.

Yabu, S., 2013: Development of longwave radiation scheme with cosideration of scattering by clouds in JMA global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **43**, 4.07–4.08.

Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates, 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5844–5853.

Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) –Model Description–. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **64**, 1–83.

3.3　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

3.3.1　変更の概要

2023 年 3 月 14 日に全球アンサンブル予報システム (GEPS: Global Ensemble Prediction System) の改良を行った。本稿では、その改良内容と予測精度の評価結果、予測特性の変化について報告を行う。

GEPS は、台風進路予報、週間天気予報、2 週間気温予報、早期天候情報及び 1 か月予報に使用しているアンサンブル予報システム (EPS: Ensemble Prediction System) である。このシステムは数値予報課が運用していた週間・台風 EPS と気候情報課が運用していた 1 か月 EPS を統合したもので、2017 年 1 月 19 日に週間・台風 EPS に代わって運用を開始し、同年 3 月 23 日に 1 か月先までの延長予報を開始した (山口 2017; 新保 2017)。

以下に今回の各変更項目の概要を記す。変更内容の詳細については数値予報開発センター年報（令和 4 年）第 4.2 節 (気象庁 2023b) に記載があるので参照いただきたい。

予報モデルの更新

GEPS では、予報モデルに気象庁全球モデル (GSM: Global Spectral Model) の低分解能版を用いている。今回の GEPS の改良では使用するモデルについて、数値予報開発センター年報（令和 4 年）第 4.1 節 (気象庁 2023c) に記述された、GSM の改良（非地形性重力波過程の改良、標高オリジナルデータセットの更新）を採用した。

2 段階 SST 法の適用範囲の拡大

2 段階 SST 法で外力として使用する現業季節アンサンブル予報システム (JMA/MRI-CPS3: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System version 3) の SST 予測値について、適用領域を低緯度域中心から全球域に拡大した。

3.3.2　業務化試験

変更の効果については、令和 4 年の数値予報開発センター年報 (気象庁 2023b) で総合性能評価試験の結果について報告した。ここでは、実際の現業利用に即した設定での試験 (業務化試験) の結果について記す。総合性能評価試験では (1) コントロールメンバーを計算する初期値をサイクル解析から作成、(2) 初期時刻は 12UTC のみ、(3) 再予報型実験の実行頻度は月 1 回 としていたのに対し、業務化試験では (1) 速報解析から作成、(2)1 日 4 初期時刻 (00, 06, 12, 18UTC)、(3) 月 2 回 としている。なお、以下の文章および図説における CNTL は比較対象となる GEPS2203(気象庁 2023a) による予測実験、TEST は今回の改良を加えたシステムによる予測実験を表す。

(1)　連続初期日型実験

実験の設定

- 実験期間
  - 2021 年 11 月 21 日から 2022 年 3 月 11 日 (冬)
  - 2021 年 6 月 21 日から 10 月 11 日 (夏)
- 検証対象：00UTC と 12UTC を初期時刻とする 264 時間予測 (台風検証については 06UTC と 18UTC 初期値を加えて 132 時間までの検証を行う)
- メンバー数：51
- 初期値に用いる解析：TEST は 2023 年 3 月に現業化されたシステムによる全球速報解析、CNTL はそれ以前のシステムによる全球速報解析を使用した。

主要要素の確率予測

図 3.3.1 に冬期間について 11 日先までの予報時間ごとの CRPS[1]を示す。いずれの要素・検証領域においてもおおむね中立から改善となっており、夏期間についても同様のことが言える (図略)。モデルの改良の効果が現れたものと考えられる。

日本付近の降水確率予測

図 3.3.2 に日本の降水予測について解析雨量に対して検証した結果を示す。ブライアスキルスコア (BSS: Brier Skill Score) は 1 mm/24hr 及び 5 mm/24hr の閾値について、夏期間はほぼ中立、冬期間はやや改善傾向となっている。これもモデルの改良によるものである。

台風進路予測

図 3.3.3 に予報時間ごとのアンサンブル平均台風進路予測誤差を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。予報後半で若干改善しているように見えており、GSM2303 についての試験結果第 3.2 節と整合している。なお、台風接近確率の BSS、信頼度曲線や予測頻度に大きな変化はなかった。

(2)　再予報型実験

予測 12 日以降の評価のための実験として、再予報型実験を実施した。CNTL、TEST ともに大気初期値は JRA-3Q を用い、1991 年〜2020 年での月 2 回（15 日と月末の 12UTC 初期値）の予測のみを対象とした 13 メンバーで評価した。

まず、地上気温に対する予測 2 週目のアノマリー相関係数 (図 3.3.4) の水平分布を確認すると、夏初期日と冬初期日ともに中高緯度の海上で改善していることが分かる。これは 2 段階 SST 法の全球域への拡大によるものと考えられる。

---

[1] Continuous Ranked Probability Score の略で、閾値 t 以下となる確率予測に対するブライアスコアを $\int_{-\infty}^{\infty} dt$ で積分したもの。値が小さいほど精度が高いことを意味する。

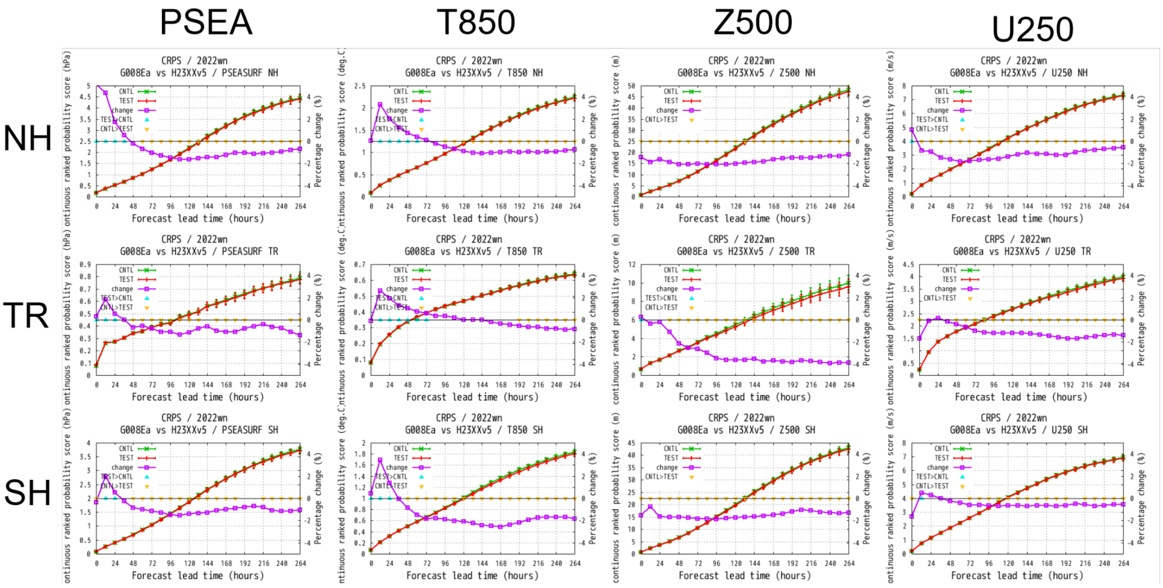

図 3.3.1　冬期間における、主要要素に対する領域別の CRPS。要素は左から順に海面更正気圧 [hPa]、850hPa 気温 [K]、500 hPa 高度場 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (90 °N – 20 °N)、熱帯 (20 °N – 20 °S)、南半球 (20 °S – 90 °S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 ((TEST−CNTL)/CNTL[%]、右縦軸)。ブートストラップ法による判定で、CNTL と TEST の差が有意水準 5 % で有意である場合に ▽(CNTL>TEST) ないし △(TEST>CNTL) をプロットしている。

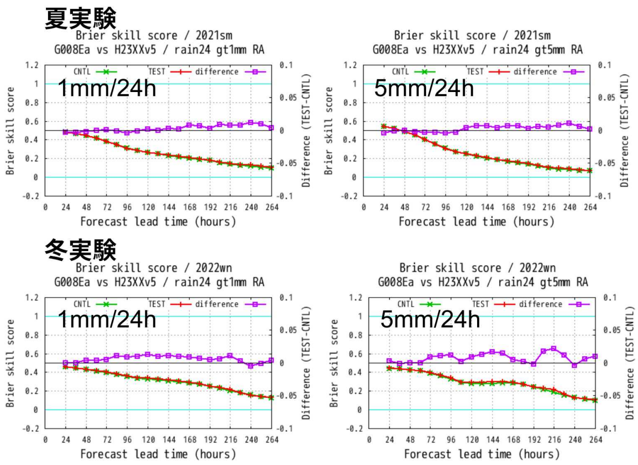

図　3.3.2　対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は夏期間、下段は冬期間。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST−CNTL、右縦軸)。

次に、図 3.3.5 と図 3.3.6 に熱帯域と北半球におけるアンサンブル平均予測のアノマリー相関係数の差をそれぞれ示す。どちらも中立の要素・季節が多いが、熱帯域では冬と夏の CHI200 が改善傾向、北半球では冬の PSI200 が改善傾向であったことが確認できる。

3.3.3　おわりに

GEPS について、予報モデルを更新したほか、SST 予測値を適用する領域を拡大した。これらの変更は 2023 年 3 月 14 日に現業システムへ導入されている。

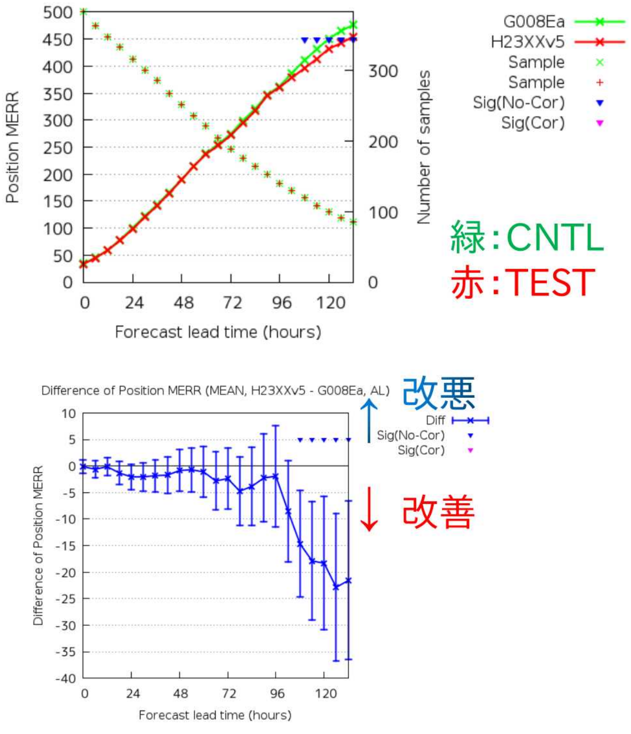

図 3.3.3　アンサンブル平均の台風進路予測平均誤差。上段：CNTL は緑、TEST は赤。× と実線が平均誤差 [km](左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクと青の ▽ はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5 % の有意水準で差が有意であることを示す。下段：TEST の誤差から CNTL の誤差を差し引いたもの。負値が改善を意味する。

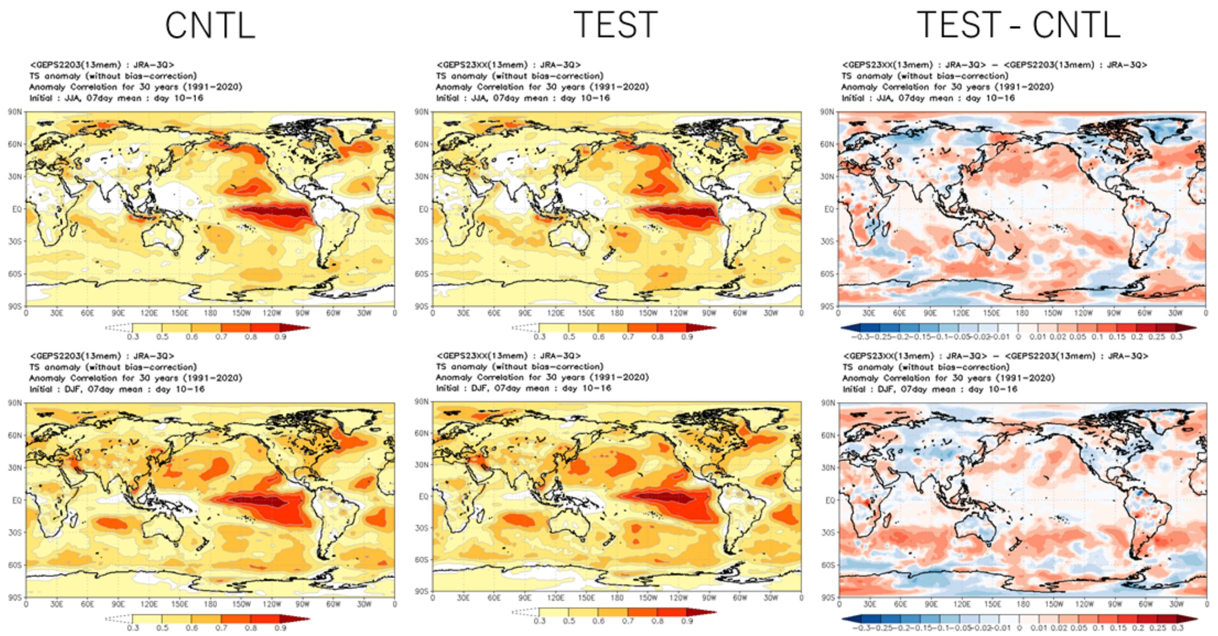

図 3.3.4 地上気温に対する予測 2 週目のアノマリー相関係数。上段：夏初期日、下段：冬初期日。左から CNTL、TEST、TEST-CNTL（暖色系が改善、寒色系が改悪）の結果。

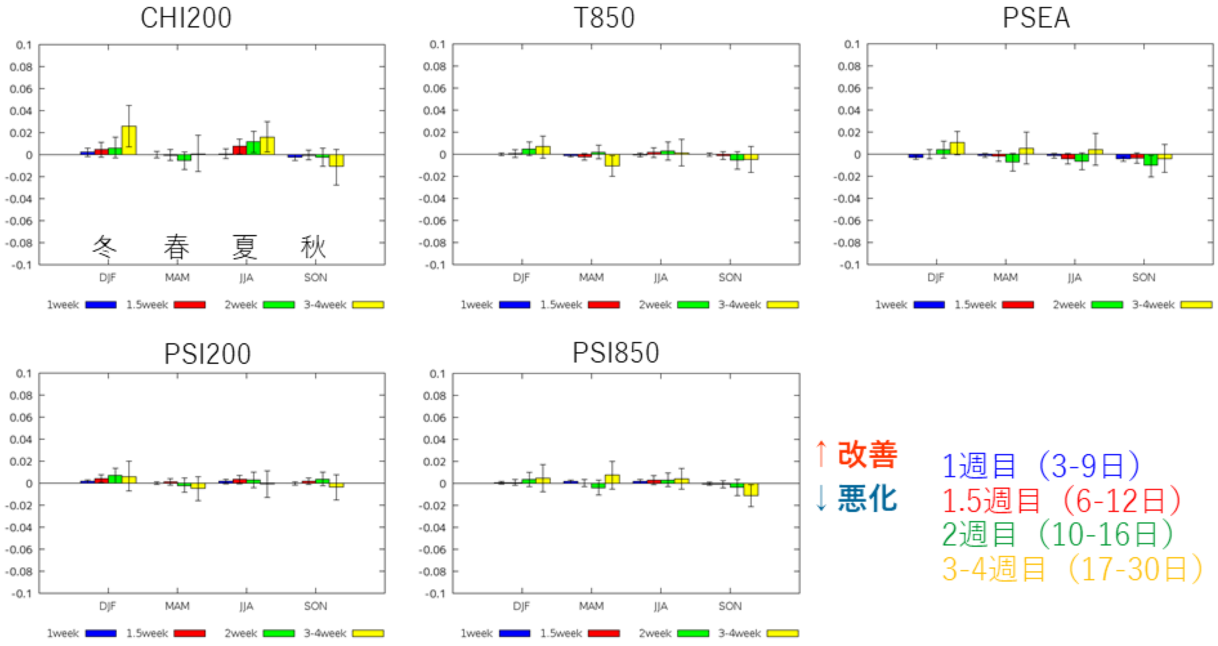

図 3.3.5 再予報（1991～2020 年）による 13 メンバーアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差（TEST-CNTL）。熱帯域で平均した結果であり、上段は左から 200hPa 速度ポテンシャル、850hPa 気温、海面更正気圧、下段は左から 200hPa 流線関数、850hPa 流線関数。それぞれの図は左から順に冬、春、夏、秋の並びとなっており、青は 1 週目（予測 3～9 日）、赤は 1.5 週目（予測 6～12 日）、緑は 2 週目（予測 10～16 日）、黄は 3～4 週目（予測 17～30 日）を表す。

この改良により、確率予測情報についてはモデルの改善の効果により、いずれの要素・検証領域においてもおおむね中立から改善となった。

台風進路予測の精度は全体としては中立であるが、予報後半の進路予測が若干改善しており、GSM2303 の試験結果と整合的であった。

さらに 30 年間の再予報型実験では、2 段階 SST の適用領域を拡張した中高緯度の海上において改善が確認でき、また、アンサンブル平均予測のアノマリー相関係数は中立～改善傾向であった。

参考文献

気象庁, 2023a: 全球アンサンブル予報システムの改良（第 3.2 節）. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）,

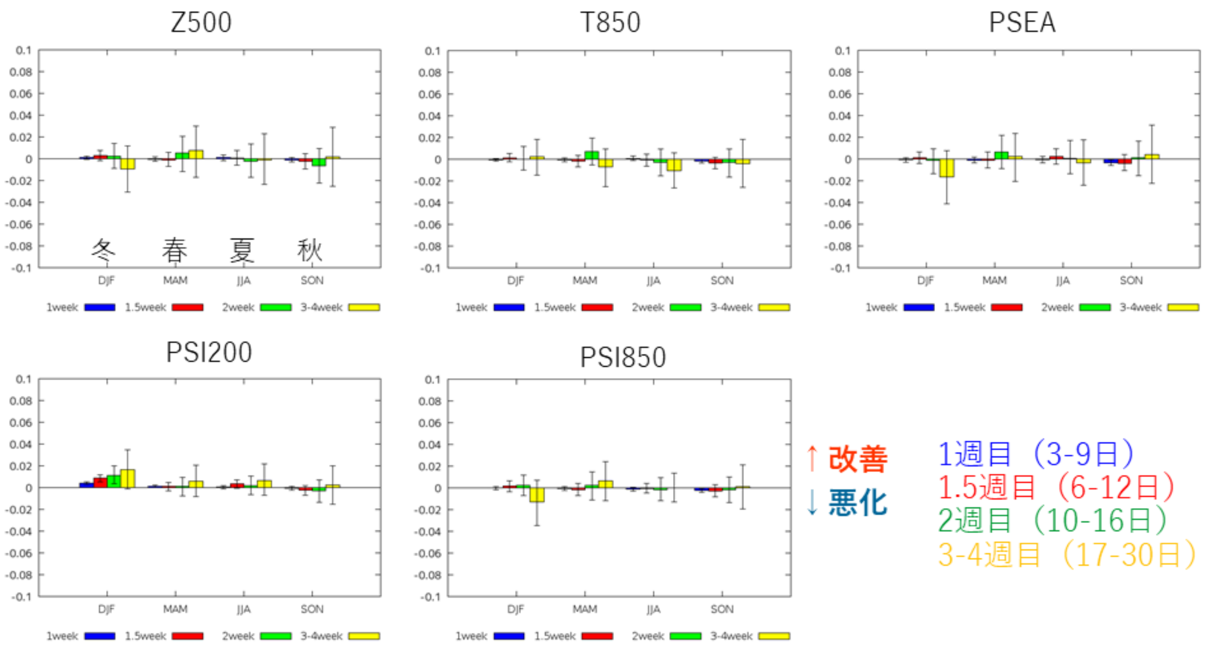

図 3.3.6　図 3.3.5 と同じ。ただし、北半球で平均した結果であり、上段の左図は 500hPa 高度。

気象庁 数値予報開発センター, 17–20.

気象庁, 2023b: 全球アンサンブル予報システムの改良（第 4.2 節）. 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, 71–75.

気象庁, 2023c: 全球モデルの物理過程改良. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 62–70.

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.

山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35–41.

3.4　メソ数値予報システムで利用する全球積雪深解析の変更

3.4.1　はじめに

メソモデル（MSM）の初期値を作成するメソ解析において、日本域外の積雪分布初期値は「全球積雪深解析」[1]から作成している。全球積雪深解析は、近年、その高度化が進んでおり、全球解析では 2021 年 3 月からは新しい手法による積雪深解析の実施を開始し (気象庁 2022)、2023 年 3 月には高頻度化などの改良を導入した（第 3.2 節）。2023 年 3 月の改良に合わせて、メソ解析の積雪分布初期値（メソ積雪分布初期値）作成において利用する全球積雪深解析も新しい高度化された全球積雪深解析を利用するように変更した。

この変更は、全球積雪深解析の高頻度化等の改良を含む全球数値予報システムの改良（第 3.3 節）、メソ解析における観測データ利用の高度化（第 3.7 節、第 3.9 節、第 3.10 節）とともに 2023 年 3 月に現業化された。本節では、メソ積雪分布初期値作成に利用する全球積雪深解析の変更の概要を説明し、性能評価試験における検証結果を報告する。メソ積雪分布初期値作成手法の詳細については草開 (2015) を参照いただきたい。

3.4.2　メソ積雪分布初期値作成手法と変更の概要

メソ積雪分布初期値は次のように作成する (草開 2015)。まず、大気の情報（気温、湿度、風、気圧、放射、降水（雨・雪））を入力にして積雪物理量を計算できる陸面モデルを用いて積雪深予測値を作成する。大気の情報は MSM 予測値と解析雨量を用いる。次に、日本域では、この予測値を第一推定値として、アメダス積雪深観測を用いて最適内挿法により積雪深分布を作成する（メソ積雪深解析）。日本域外では全球積雪深解析から作成する。日本域外では解析雨量が使えないので陸面モデルによる積雪深予測精度が十分でなく、また、アメダス積雪深観測による修正も得られないためである。最後に、解析した積雪深に対して閾値（5 cm）以上の格子を「積雪あり」と分類し、積雪分布初期値を作成する。

本変更は、日本域外で利用する全球積雪深解析の変更である。全球解析における積雪深解析は、2021 年 3 月に衛星観測データから算出した衛星積雪域の利用等による高度化 (気象庁 2022)、2023 年 3 月には高頻度化などの改良を導入した（第 3.2 節）。メソ積雪分布初期値では、2021 年 3 月の高度化以前の旧来の全球積雪深解析 (JMA 2019) を利用していた[2]が、2023 年 3 月から新しい全球積雪深解析を利用するように変更した。

[1] 後で旧来の全球積雪深解析と新しい全球積雪深解析について述べるが、ここでは両者を含めた「全球域の積雪深解析」を意味する。

[2] メソ積雪分布初期値における新しい全球積雪深解析の利用の影響を確認するまでの間、旧来の全球積雪深解析の作成が維持されていた。

3.4.3　検証結果

メソ積雪分布初期値作成に利用する全球積雪深解析を変更した試験の検証結果について述べる。2022 年 3 月時点のルーチンシステム相当のメソ予報システム設定[3]の実験をコントロール (CNTL) とする。CNTL は 2021 年 3 月の高度化以前の旧来の全球積雪深解析を利用する。CNTL に対し、新しい全球積雪深解析（2023 年 3 月現業導入相当）を利用するよう変更した実験をテスト (TEST) とする。実験期間は、2019 年 12 月 23 日–2020 年 2 月 29 日を設定した。

図 3.4.1 に CNTL と TEST の積雪分布について実験期間中の積雪存在率を示す。新しい全球積雪深解析は 2021 年 3 月の高度化において高解像度化されているため、TEST は CNTL に比べて大陸上において解像度の高い分布になっている。TEST と CNTL の差を見ると、大陸内陸部では積雪分布の減少傾向、朝鮮半島付け根の領域では増加傾向が見られた。

積雪分布初期値の変化が MSM の予測にどのような影響を与えるか確認する。図 3.4.2（左）に 925 hPa の気温について TEST と CNTL の差（48 時間予測）を示す。大陸内陸部で高温化、朝鮮半島付け根の領域で低温化していることが分かる。この気温の変化を図 3.4.1 の積雪分布の変化と見比べると、高温（低温）化の領域が積雪分布の減少（増加）域と対応している。このことは「積雪があると大気が冷える」というプロセス（草開 (2015) に説明がある）と整合的である。大陸では、CNTL の低温誤差（図 3.4.2（中）の赤点線枠）が TEST では縮小した（図 3.4.2（右）の赤点線枠）。925 hPa の気温の予測精度向上は、図 3.4.3 の平均誤差（ME）と二乗平均平方根誤差（RMSE）の時系列に示すように予報時間全体に見られた。

3.4.4　まとめ

日本域外のメソ積雪分布初期値作成において、旧来の全球積雪深解析に代えて、新しい高度化された全球積雪深解析を利用するように変更した。この変更により、大陸の積雪分布は変更前に比べて解像度の高いものになる。大陸内陸部では実験期間において統計的に積雪面積が減少し、朝鮮半島付け根の領域では増加した。この積雪分布初期値を用いた MSM 予測においては、大陸上の対流圏下層気温の誤差縮小を確認した。この変更は、全球積雪深解析の高頻度化等の改良とともに 2023 年 3 月に現業化された。

本節で述べたとおり、日本域外では解析雨量が入力として使えないため陸面モデルによる積雪深予測精度が十分ではないこと、メソ積雪深解析では地上観測データのみを利用するため積雪観測点が少ない大陸上では積雪深第一推定値を十分に修正できないことから、日本域外の積雪分布は全球積雪深解析から作成している。

[3] ただし、側面境界値には 2023 年 3 月導入のルーチンシステム相当の水平解像度 13 km の全球モデルを用いた。

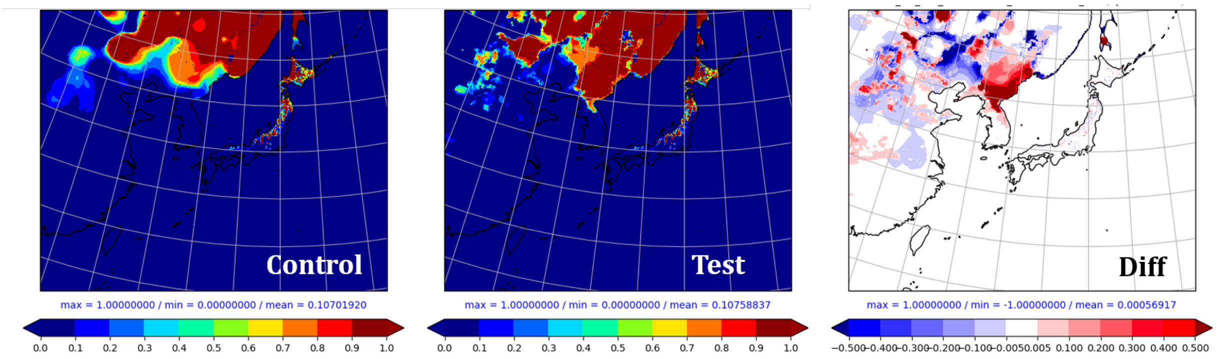

図 3.4.1　実験期間中の積雪存在率。（左）CNTL、（中）TEST、（右）TEST と CNTL の差。

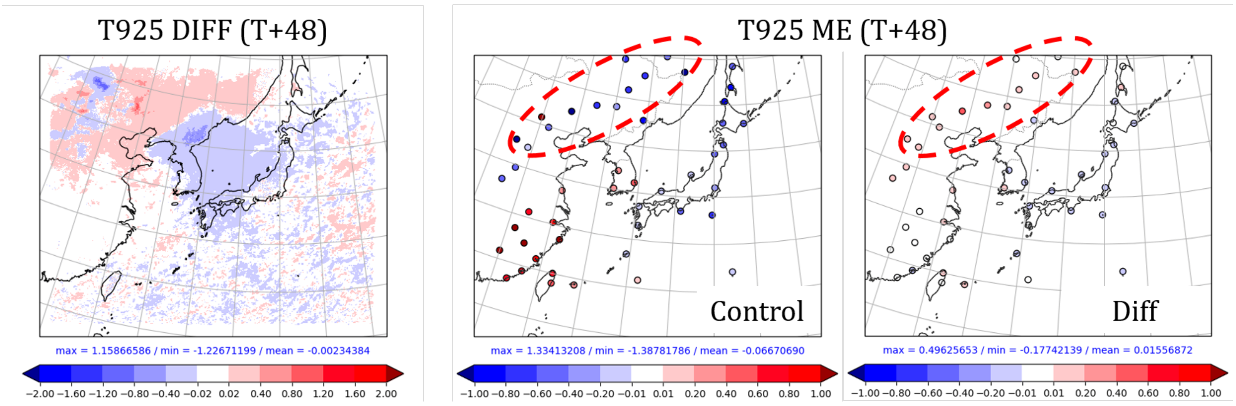

図 3.4.2　925 hPa 気温予測の変化。48 時間予測における期間平均。（左）TEST と CNTL の差、（中）CNTL の対ゾンデ観測の平均誤差、（右）対ゾンデ観測の平均誤差について TEST と CNTL の差。

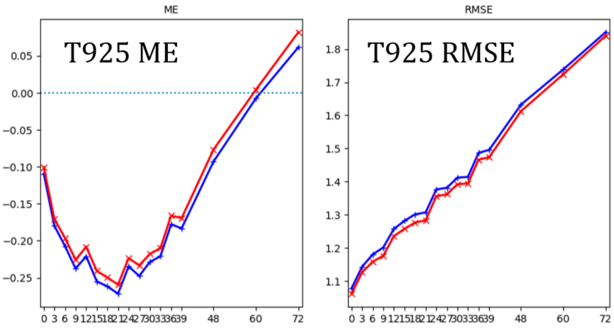

図 3.4.3　925 hPa 気温の予報時間別の対ゾンデ観測検証結果。（左）ME、（右）RMSE。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST をそれぞれ表す。

大陸上の積雪域の解析精度は、大陸起源の擾乱や冬型時の大陸の高気圧、寒気吹き出しの表現にも影響する可能性があり、その解析精度向上は引き続き開発課題の一つである。課題の優先度等を考慮しながら、今後は衛星観測などを利用したメソ積雪深解析も視野に入れていく予定である。

参考文献

JMA, 2019: *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, 229 pp., (Available online at `http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm`).

気象庁, 2022: 全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化、全球解析の高度化. 数値予報開発センター年報（令和 3 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 15–24.

草開浩, 2015: 積雪域解析の高度化. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 44-49.

3.5 メソアンサンブル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入

3.5.1 はじめに

メソアンサンブル予報システム (MEPS) は、メソモデル（MSM）の予測に対して信頼度や不確実性等の情報を付加することを目的に運用されており、MSM と合わせて防災気象情報、航空気象情報、天気予報等の作成を支援する資料として利用されている。

MEPS は 2019 年 6 月に運用を開始した (Ono et al. 2021)。國井・小野 (2020) は、MEPS の運用開始に至る開発経緯、仕様と狙いを述べるとともに今後の課題と展望を示した。これを踏まえ、数値予報開発センターでは MEPS の継続的な開発に取り組んでいる。2020 年 9 月には初期摂動と側面境界摂動を改良し (気象庁 2021)、2022 年 3 月には MSM の鉛直層増強と物理過程改良に追随して MEPS の設定を更新した (気象庁 2022)。また、國井・小野 (2020) が挙げた課題のうち、モデルアンサンブル手法の導入に向けた開発を進めてきた (気象庁 2023)。

令和 5 年の開発成果として、モデルアンサンブル手法の一つである確率的物理過程強制法（SPPT 法: Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies scheme; Buizza et al. (1999), Palmer et al. (2009)）による摂動を新たに導入し、併せて初期摂動の振幅調整を行い、2023 年 3 月に現業化した。本節では、これらにおける MEPS の変更点の概要を説明し、業務化試験における検証結果を報告する。

本開発については、数値予報開発センター年報（令和 4 年）第 4.3 節 (気象庁 2023)（以下、R04 第 4.3 節と呼ぶ）で進捗を報告しており、併せて参照いただきたい。

3.5.2 変更の概要

MEPS で捕捉すべき MSM の不確実性は本来、初期値、境界値のほか、数値予報モデルの不確実性にも帰せられる。変更前の MEPS は、初期摂動と側面境界摂動のみで MSM の不確実性を表現するシステムとなっており、数値予報モデルの不確実性を考慮していなかった。また、初期摂動が過大な傾向が見られていた。このような課題に対し、今回の変更では、SPPT 法の導入と初期摂動の振幅を小さくする調整を行った。ここでは、はじめに SPPT 法について、次に初期摂動の振幅調整について述べる。

(1) SPPT 法

SPPT 法は、物理過程の時間変化率に対して摂動を与えることで、数値予報モデルの物理過程の不確実性を表現することを狙った摂動手法である。摂動を与える前と与えた後の物理過程の時間変化率をそれぞれ X_c, X_p として、次のように摂動を与える。

$$X_p = (1 + r_X)X_c \qquad (3.5.1)$$

ここで、r_X は時空間に相関を持つガウス型の乱数を与える (Palmer et al. 2009)。時空間の相関スケールや振幅の大きさ[1] には任意性がある。検討の結果、乱数の振幅は 0.5、時間相関 6 時間、空間相関 500 km とした。また、計算安定性の観点から、積雲対流過程と放射過程の時間変化率にのみ摂動を与えることとした[2] 。

(2) 初期摂動の振幅調整

変更前の MEPS のスプレッドは、アンサンブル平均の RMSE と比べると特に日本域でスプレッドが過大な傾向にあった。また、SPPT 法を導入することで、数値予報モデル由来の摂動が新たに加わることになり、システム全体としてはスプレッドが増加する。これらのことから、SPPT 法の導入と併せて初期摂動の振幅を小さくした（変更前の MEPS の 95 %)。

3.5.3 検証結果

SPPT 法の導入と初期摂動の振幅調整による影響を確認し、現業化の可否を検討するための業務化試験の検証結果について述べる。R04 第 4.3 節で報告した性能評価試験とは実験期間が異なることに加え、同時期 (2023 年 3 月) に現業化された全球モデルとメソ解析の改良の効果が含まれた実験であることが異なる。

変更前の 2022 年 3 月時点のルーチンシステム相当の設定の実験をコントロール (CNTL) とし、CNTL に対し以下の変更を適用した実験をテスト (TEST) とする。

- 改良された全球モデル[3]を側面境界値に、改良されたメソ解析[4]を初期値に用いる。
- 前項の MEPS の変更

実験期間は、統計検証期間として夏期間:2021 年 6 月 26 日–7 月 31 日、冬期間:2022 年 1 月 1 日–1 月 31 日を設定した。また、強雨事例における降水確率予測の確認のため、西日本を中心に強雨が続いた 2021 年 8 月 10 日–15 日についても実験を行った。

(1) スプレッドの適正化

図 3.5.1 に 850 hPa 相当温位について FT=9 における CNTL と TEST のスプレッドとアンサンブル平均の RMSE の夏期間の平均を示す。基本的には初期摂動が支配的であるため、TEST のスプレッドの空間分布が CNTL から大きく変化するわけではないが、TEST と CNTL のスプレッドの差（左下）を見ると、TEST

[1] これらのパラメータについては Berner et al. (2015) を参照されたい。r_X は Berner et al. (2015) の A2–A4 式に基づいて実装した。

[2] 雲物理過程 (氏家 2020)、境界層過程 (西本 2020) ではインプリシットスキームを用いることで計算安定性を確保できる時間変化率を求めており、これらの時間変化率を (3.5.1) 式によって変更することは計算不安定につながる。

[3] 第 3.3 節、第 3.7 節、第 3.8 節を参照

[4] 第 3.4 節、第 3.7 節、第 3.9 節、第 3.10 節を参照

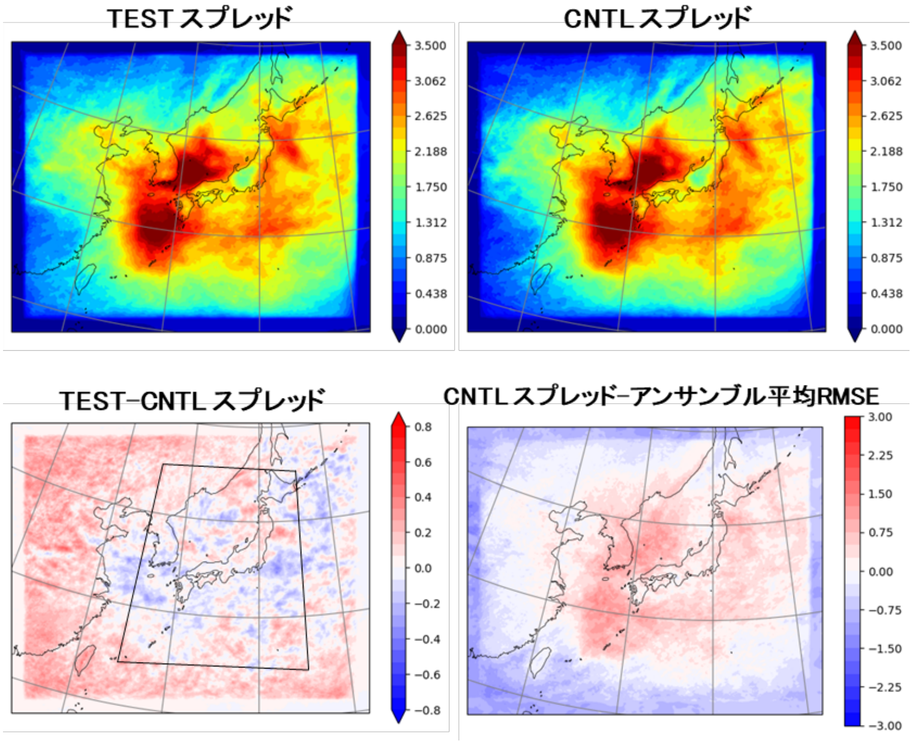

図 3.5.1　スプレッドおよびアンサンブル平均の RMSE の夏期間平均。850hPa の相当温位 [K]、FT=9。（左上）TEST のスプレッド、（右上）CNTL のスプレッド、（左下）TEST と CNTL のスプレッドの差、（右下）CNTL のスプレッドとアンサンブル平均の RMSE の差。左下図の黒枠は検証の日本域（125°–145°E,25°–45°N）を示す。

は CNTL と比べ、日本周辺域の初期摂動（主にメソ特異ベクトル）が入りやすい領域でスプレッドが小さくなり、それ以外の領域でスプレッドが大きくなる。このスプレッドの空間分布の変化は、初期摂動の振幅を小さくしたことによるスプレッドの減少が初期摂動の大きい領域で見られる一方、SPPT 法の導入によるスプレッドの増加は予報領域全体に初期摂動の分布よりも広く及ぶためであると考えられる。ここで、理想的なアンサンブル予報の性質として、スプレッドの大きさはアンサンブル平均の RMSE と同程度 (高野 2002) であることが望ましいので、CNTL のスプレッドとアンサンブル平均の RMSE との差（右下）においては、日本周辺等の初期摂動が入りやすい領域ではスプレッドが過大傾向、それ以外の領域ではスプレッドが過小傾向という課題があることが分かる。TEST へ変更したことによるスプレッドの変化（左下）は、これらの傾向を緩和する方向であることから、スプレッドが適正化する方向に変化していることが分かる。

図 3.5.2 は夏期間の 850 hPa 相当温位の予報時間別のスプレッドスキルである。左は予報領域全体（MSM 域と呼ぶ）、右は図 3.5.1 の黒枠で示した領域（「日本域」と呼ぶ、125°–145°E, 25°–45°N）について示した。日本域では予報前半のスプレッドの過大傾向が改善している。また、MSM 域では予報後半にかけてのスプレッドの過少傾向が改善していることが分かる。これらの変化は冬実験についても同様に見られた（図略）。

初期摂動の影響が大きい日本域のスプレッドの変化としては、夏期間、冬期間ともに 850 hPa の相当温位に見られるような予報前半の過大なスプレッドが抑制され適正化する要素がほとんどであった。予報後半にかけては、SPPT 法の導入によりスプレッドが増加して適正化する要素が多いが、下層の気温では過大傾向となった（図略）。一方、上層や地表面付近は初期摂動の影響が小さくスプレッドが不足していたが[5]、SPPT 法の導入によりスプレッドが大きくなり適正化した（図略）。これらは R04 第 4.3 節の結果と同様の変化傾向である。

(2)　降水確率予測

降水確率予測の変化を確認するため夏期間の 3 時間降水量のブライアスキルスコア (BSS) を図 3.5.3 に示す。気候値予測よりスキルがある閾値（15 mm/3h 以下）において CNTL に対して TEST が改善した。予報前半では改善は明瞭でなく、予報後半で改善傾向がより明瞭である（図 3.5.4）。冬実験については、気候値予測よりもスキルがある閾値（15 mm/3h 以下）において、ほぼ中立であったが（図略）、予報時間別にみると、弱雨の予報初期（FT=6 まで）において BSS が改悪となった（図 3.5.5）。これは、初期摂動の振幅を小さくしたことが影響したためと考えられる。

[5] メソスケール現象の予測に影響が大きい中下層における物理量の摂動を優先的に算出している (國井・小野 2020)。

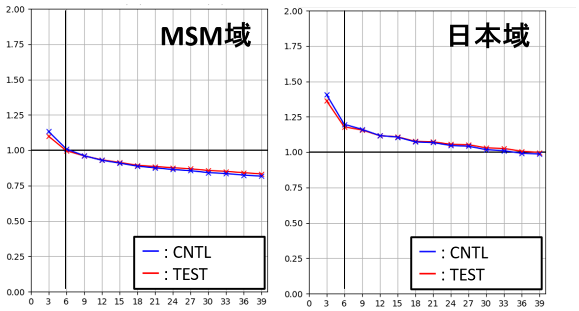

図 3.5.2　夏期間の 850hPa 相当温位 [K] の予報時間別のスプレッドスキル。青線が CNTL、赤線が TEST。検証領域は（左）MSM 域、（右）日本域。横軸は予報時間 [h] 。スプレッドスキルは 1 が最適であり、1 より大きい（小さい）とスプレッドが予測誤差に対して過大（過小）であることを意味する。

R04 第 4.3 節では、積雲対流過程に摂動を与えたことにより、積雲対流過程が寄与する領域付近の降水分布の表現のばらつきが大きくなる事例が見られ、このことが降水確率予測の改善に寄与していると考えられることを述べた。本試験においても同様の傾向により降水確率予測が改善したと考えられる事例として、図 3.5.6 に 2021 年 8 月 12 日の九州北部における線状降水帯事例を示す。この業務化試験では、降水確率予測の変化は、全球モデルおよびメソ解析の改良による効果と MEPS の変更による効果が合わさった変化として見ることができる。それぞれの効果が分かりやすいよう、全球モデルおよびメソ解析の改良の効果のみを CNTL に加えた実験を BASE として示す[6]。

図 3.5.6 は CNTL、BASE、TEST の 3 時間降水量について、全 21 メンバーの予測結果の最大値を格子ごとに抽出した「アンサンブル最大」および 30 mm/3h の超過確率を示した。まず、CNTL と BASE の比較により、全球モデルおよびメソ解析の改良 (観測データ利用拡充) の効果によって、九州北部の実況の強雨に対応した領域に強雨を表現するメンバーが増加し、超過確率の分布が東西の走行を示すようになり、全体的な降水予測位置の改善が確認できる。次に、BASE と TEST を比較すると、MEPS での SPPT 法の導入の効果により、降水表現のばらつきが大きくなり、九州の西海上から線状の強雨域を表現するメンバーや、地形風下の降水を表現するメンバーが増加し、実況の強雨と対応する領域で超過確率の増加が見られた。R04 第 4.3 節で述べた変化と同様の傾向であり、積雲対流過程に摂動を与えた効果と考えられる。

[6] なお、BASE と TEST の統計検証による比較も行っており、BASE に対し TEST は 3 時間降水量の BSS を改善することを確認している（図略）。

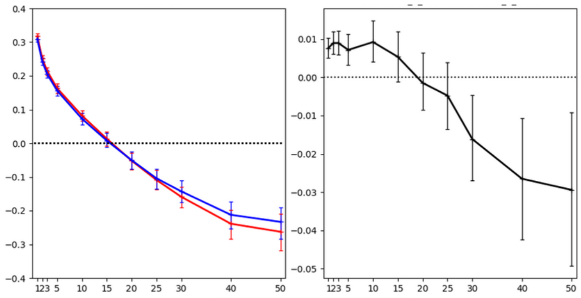

図 3.5.3　夏期間の 3 時間降水量の（左）ブライアスキルスコア、（右）TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は閾値 [mm/3h]。

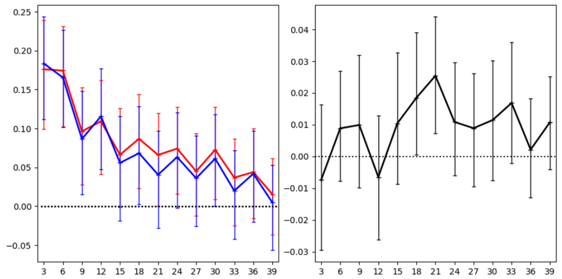

図 3.5.4　夏期間の閾値 10 mm/3h の（左）ブライアスキルスコア、（右）TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は予報時間 [h]。

3.5.4　まとめ

初期摂動と側面境界摂動のみを考慮してきた MEPS において、新たに数値予報モデルの不確実性を表現するため、SPPT 法の導入に向けた開発を進めた。SPPT 法を導入し、初期摂動の振幅を抑えたシステムにおいて、スプレッドの空間分布の適正化、降水確率予測の改善を確認した。これらの効果は、同時期に現業化予定であった全球モデル、メソ解析の変更と組み合わせた実験でも改善をもたらすことが確認できた。この結果を踏まえ、2023 年 3 月に MEPS に本変更を導入した。

今後の開発に向けて、今回適用できなかった物理過程（雲物理、境界層、地表面等）の不確実性を捕捉する手法の検討や、不確実性が小さいと考えられる晴天放射の時間変化率に摂動を与えない修正 (Lock et al. 2019)、

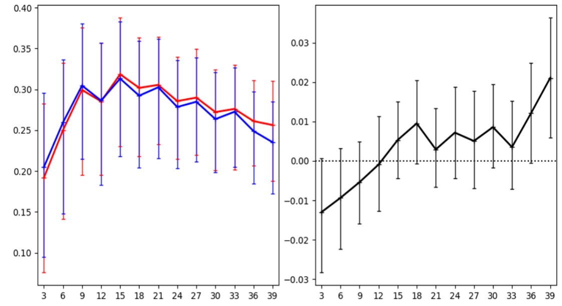

図 3.5.5　冬期間の閾値 2 mm/3h の（左）ブライアスキルスコア、（右）TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は予報時間 [h]。

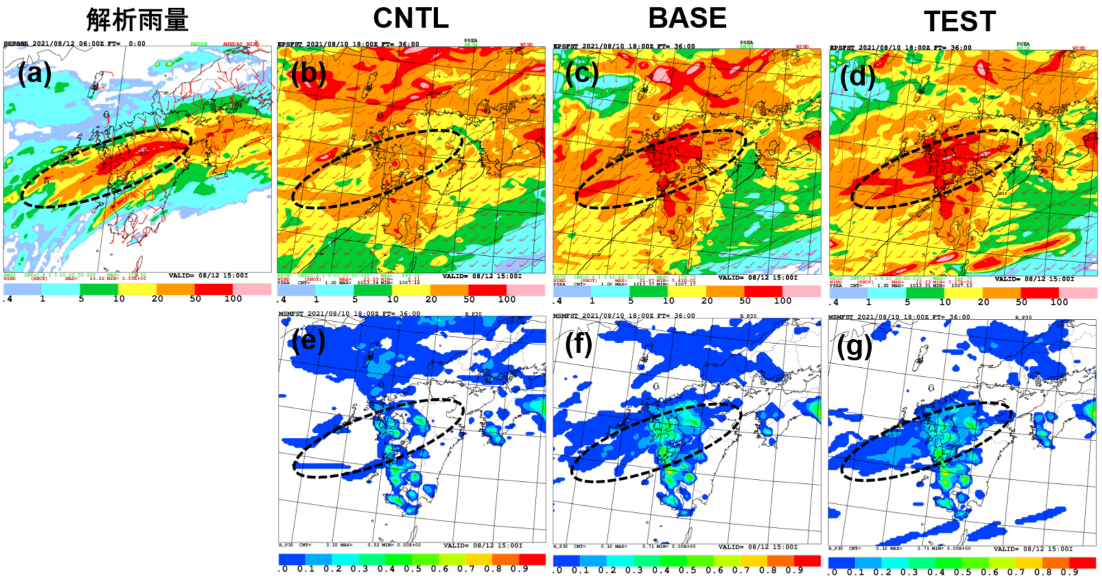

図 3.5.6 2021 年 8 月 12 日 15JST の 3 時間降水量について、上段の左から (a) 解析雨量、続いて (b)CNTL、(c)BASE、(d)TEST のアンサンブル最大降水量（全 21 メンバーの予測結果の最大値を格子ごとに抽出）、下段は左から (e)CNTL、(f)BASE、(g)TEST の 30 mm/3h 超過確率。予報値は 2021 年 8 月 10 日 18UTC 初期値の FT=36。

等が SPPT 法の改良課題として挙げられる。また、他のモデルアンサンブル手法との併用なども含め、MEPS における数値予報モデルの不確実性のより適切な表現を考えていく必要がある。さらには初期摂動や側面境界摂動の改良、下部境界摂動の導入も今後の MEPS の改良課題として重要であり、これらの課題の優先度等を検討しながら、引き続き MEPS の改良に取り組んでいく。

参考文献

Berner, J, K. R. Fossell, S.-Y. Ha, J. P. Hacker, and C. Snyder, 2015: Increasing the Skill of Probabilistic Forecasts: Understanding Performance Improvements from Model-Error Representations. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1295–1320.

Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887–2908.

気象庁, 2021: メソ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 2 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 66–73.

気象庁, 2022: メソアンサンブル予報システムの鉛直層増強と物理過程の改良. 数値予報開発センター年報（令和 3 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 100–101.

気象庁, 2023: メソアンサンブル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入. 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, 76–80.

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

Lock, S. J., S. T. Lang, M. Leutbecher, R. J. Hogan, and F. Vitart, 2019: Treatment of model uncertainty from radiation by the Stochastically Pertubed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme and associated revisions in the ECMWF ensembles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 75–89.

西本秀祐, 2020: 境界層. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 69–78.

Ono, K., M. Kunii, and Y. Honda, 2021: The regional model-based Mesoscale Ensemble Prediction System, MEPS, at the Japan Meteorological Agency. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **147**, 465–484.

Palmer, T. N., R. Buizza, F. Doblas-Reyes, T. Jung, M. Leutbecher, G. J. Shutts, and asn M. Steinheimer A. Weishemer, 2009: Stochastic parametrization and model uncertainty. *ECMWF Tech. Memo*, **598**, 42pp.

高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, **201**, 73–103.

氏家将志, 2020: 雲過程. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 45–55.

3.6　局地モデルの物理過程改良

3.6.1　はじめに

局地数値予報システムは、時空間スケールの小さな現象の予測を迅速に提供することを目的として、水平格子間隔 2 km で 10 時間先までを予測するシステムとして運用しており、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な基盤システムの一つに位置づけられている。

「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、豪雨防災を重点目標の一つに掲げており、線状降水帯に代表される集中豪雨の発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現するために、局地モデルによる豪雨の予測精度向上が求められている。そのためには局地解析の改良による初期値の精度向上、局地モデルの改良による予測精度の向上を積み重ねていく必要がある。

局地数値予報システムは、2012 年 8 月に運用を開始した後、局地解析と局地モデルのそれぞれに対して、継続的に改良を加えてきた。本節では、2023 年 3 月に行った局地数値予報システムの更新の概要と、改良による予測特性の変化について報告する。

3.6.2　局地数値予報システム改良の概要

2023 年 3 月に行った局地数値予報システムの改良の概要は以下の通りである。詳細は 気象庁 (2023) を参照いただきたい。

- 局地解析および局地モデルで用いる格子平均標高の作成元データを、水平解像度約 1 km である米国地質調査所の GTOPO30 (Gesch et al. 1999) から、水平解像度約 90 m で、より高解像度・高精度である MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) に変更。
- 雲物理過程について、メソモデルで用いているスキーム (Ikuta et al. 2021) を導入した上で、混相雲の扱いの変更、雲氷の質量-粒径関係の変更、部分雲過程の見直し等の改良。
- サブグリッドスケールの地形の起伏によって生じる乱流による抵抗の効果（Turbulent Orographic Form Drag; TOFD）の新規導入。同スキームに必要なサブグリッドの地形に関する統計量も MERIT DEM から算出。
- 放射過程で用いる微量気体濃度（CO_2, N_2O, CH_4）を 2020 年の全球気候値 (WMO 2021) に更新。
- 境界層乱流スキームである MYNN スキーム (Nakanishi and Niino 2009) で用いられる、乱流混合や乱流エネルギー散逸を特徴づける長さスケールの定式化の改良。

3.6.3　予測特性の変化（統計検証結果）

前項の改良による予測特性の変化を調べるために行った試験の結果を示す。ここでは、改良前のルーチン相当の設定の実験をコントロール（CNTL）とし、上で述べた局地数値予報システムの改良を適用した実験をテスト（TEST）とした実験結果を示す。実験期間は、夏期間は 2020 年 7 月 2 日から 7 月 15 日まで、冬期間は 2020 年 1 月 11 日から 1 月 21 日までであり、1 日 24 回の実行を行っている。

図 3.6.1 は、夏期間における閾値 20 mm/h の降水についての予報時間毎の検証結果である。バイアススコアの図は、TEST は CNTL に対して降水頻度が増大し、特に予報時間 3 時間以降で過剰傾向であることを示している。しかしながら、空振り率はリードタイムが短く利用不可能な予測のごく初期に増大が見られる程度であり、見逃し率が大きく改善することでエクイタブルスレットスコアは改善している。図 3.6.2 は、冬期間における閾値 1 mm/h の降水についての予報時間毎の検証結果である。TEST は CNTL に対して、降水頻度が過剰となり、エクイタブルスレットスコアも全体的には中立から悪化の傾向である。雲物理過程の改良により、雲水の過小傾向が改善される一方で、あられの増加により降水頻度が増加することが原因と考えられる。夏期間、冬期間ともに降水頻度が過剰となっており、この改善は今後の課題である。

図 3.6.3 は夏期間の対ラジオゾンデによる鉛直プロファイル検証の結果であり、TEST は CNTL に対して、高度場や気温が全般的に改善した。図 3.6.4 は冬期間の検証結果であり、気温、風速の予測精度が全般に良くなり、特に下層の改善は顕著である。夏期間の上層の改善は、雲物理過程の改良により上層雲が減ったことで、雲放射を通じて対流圏上層の高温バイアスが減少したことが寄与したと考えられ、下層の改善は、主に TOFD の導入および境界層過程の改良によるものと考えられる。

図 3.6.5 および図 3.6.6 は、地上風速・地上比湿についての検証結果であり、それぞれ夏期間および冬期間のものである。これらの要素については、ほぼすべての予報時間について RMSE の減少がみられ、精度向上が確認できる。これらの改善は、主に TOFD の導入による効果であることが確認されている。

3.6.4　事例検証

第 3.6.2 項で述べた物理過程等の改良の効果が降水強度の面的分布にどのようなインパクトを与えるかを確認するため、性能評価試験の中からいくつかの事例を取り上げる。

図 3.6.7 は、令和 2 年 7 月豪雨の事例の 1 つである。解析雨量では、五島列島の西から熊本県にかけて広がった強雨域が見られる。CNTL（上段中央）では五島列島付近で橙・赤・桃色（20 mm/3 h 以上）で示される

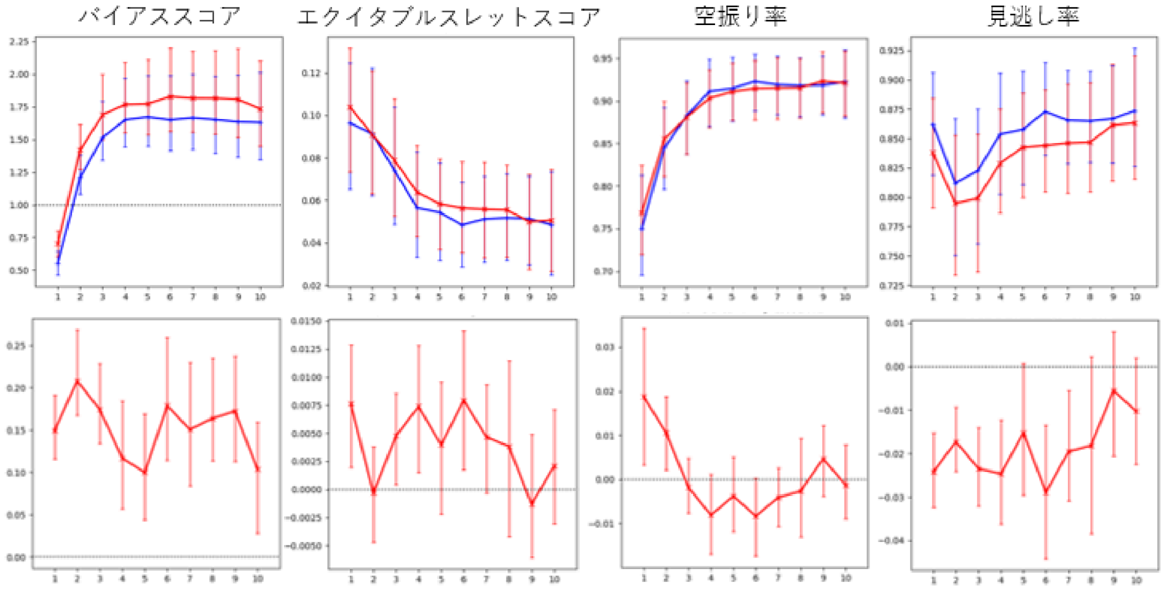

図 3.6.1　夏期間における 1 時間降水量 [mm/h]（検証格子 10 km）の閾値 20 mm/h の予報時間毎の対解析雨量検証結果（上段）と TEST と CNTL の差（下段）。横軸は予報時間、エラーバーは 95 %信頼区間。左からバイアススコア、エクイタブルスレットスコア、空振り率、見逃し率。上段の青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示している。

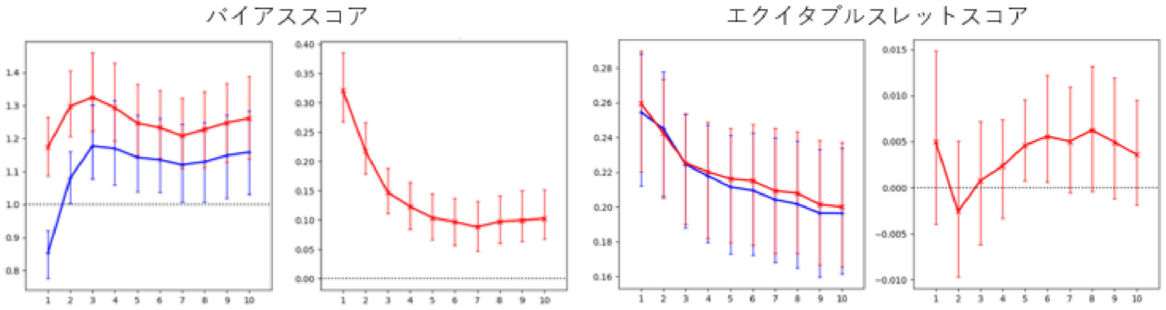

図 3.6.2　冬期間における 1 時間降水量 [mm/h]（検証格子 10 km）の閾値 1 mm/h の予報時間毎の対解析雨量検証結果。横軸は予報時間、エラーバーは 95 %信頼区間。左からバイアススコア、バイアススコアの差、エクイタブルスレットスコア、エクイタブルスレットスコアの差。線の種類は図 3.6.1 と同様。

降水域に抜けが見られ、図下段の四分割表では見逃しとなっている。一方、TEST（上段右）では橙色で示される降水域にしっかりと覆われており、解析雨量に近づいている。下段の図を見比べてみると、上で述べた五島列島付近で見逃しから的中に変わった領域が広がっている一方で、空振りの領域は全体に極端に増えていない。統計検証で見た空振りの領域が極端に増えていないという特徴が現れている事例である。

図 3.6.8 は 2020 年 7 月 6 日の沖縄付近の事例である。解析雨量で見られる弱い降水域について、CNTL では対応する降水域がはっきり見られないのに対し、TEST では降水域がよりはっきりしており、解析雨量に近づいている。AMSR2 の 36.5 GHz 帯チャンネルで観測された輝度温度では、沖縄付近で雲水の存在に対応する輝度温度の高い領域（238 K 以上）が見られる。モデルの予測結果をもとにシミュレートされた輝度温度の図を見ると、TEST では観測で見られた輝度温度の高い領域が CNTL よりも明瞭に表現されるようになることがわかる。これは、雲物理過程で部分雲過程を見直した効果であることがわかっている。

3.6.5　まとめ

2023 年 3 月に更新された局地数値予報システムでは、第 3.6.2 項で示した地形データの変更、モデルの物理過程の改良により、降水予測精度の改善や、下層を中心とする風速等の鉛直プロファイルの予測精度の改善、地上風速や地上比湿の予測精度の改善が確認された。今後も局地数値予報システムの改良を継続して進めていく。

参考文献

Gesch, D. B., K. L. Verdin, and S. K. Greenlee, 1999: New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos Trans. AGU*, **80**, 69.

Ikuta, Yasutaka, Masaki Satoh, Masahiro Sawada, Hiroshi Kusabiraki, and Takuji Kubota, 2021: Im-

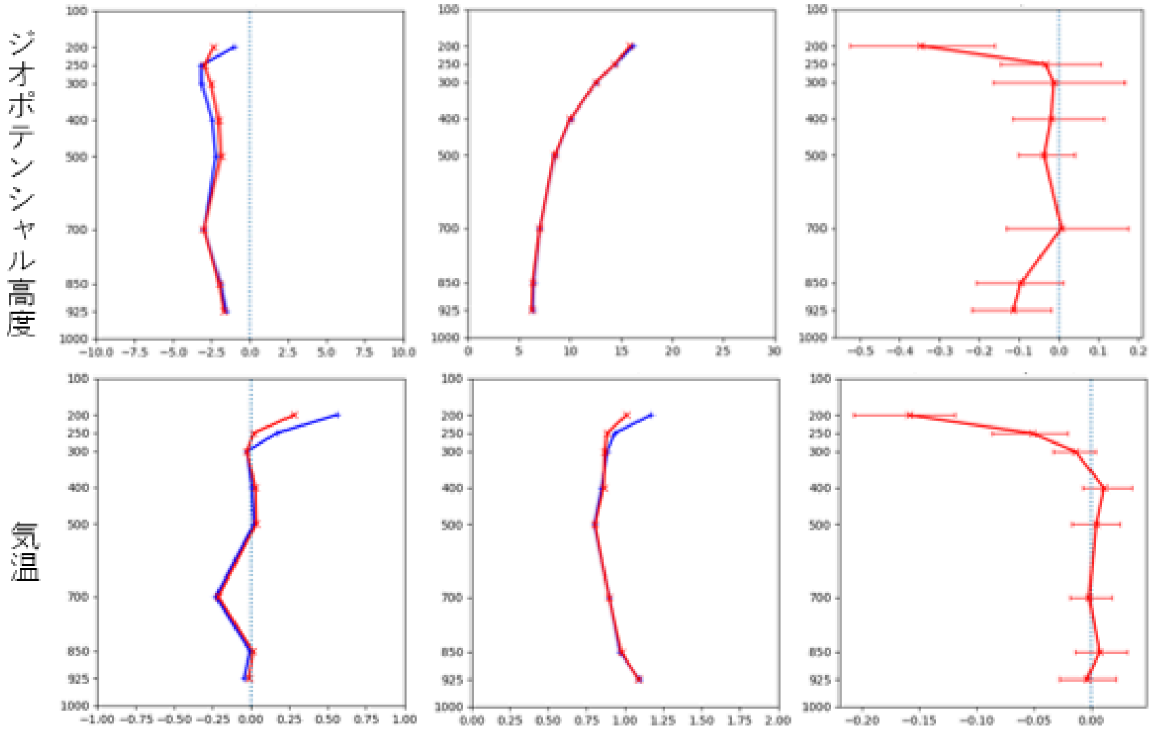

図 3.6.3　夏期間のジオポテンシャル高度（m, 上段）、気温（K, 下段）の予報時間 9 時間における対ラジオゾンデの検証結果。検証対象は局地モデル領域内の全ラジオゾンデ観測。左列が平均誤差、中央列が二乗平均平方根誤差（RMSE）、右列が RMSE の TEST と CNTL の差。縦軸は気圧（hPa）でエラーバーは 95 ％ 信頼区間を表す。平均誤差および二乗平均平方根誤差の図（左、中央）において、赤線は TEST、青線は CNTL。

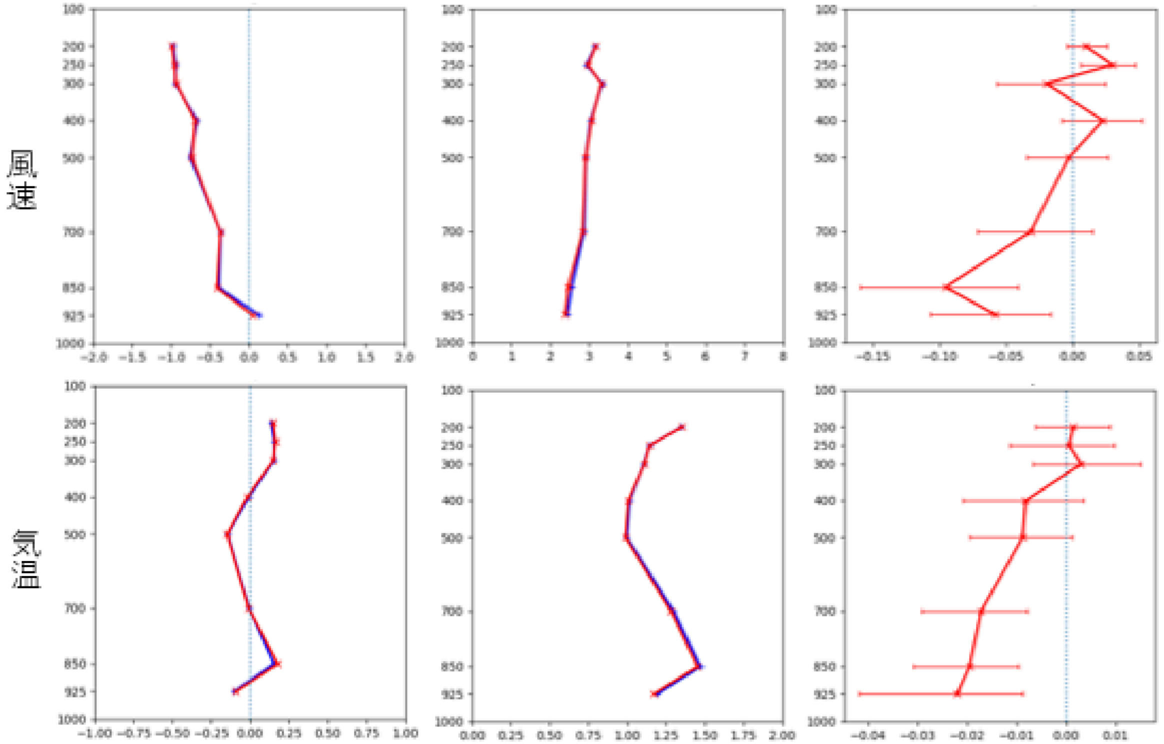

図 3.6.4　図 3.6.3 と同様。ただし、冬期間の風速（m/s, 上段）および気温（K, 下段）のもの。

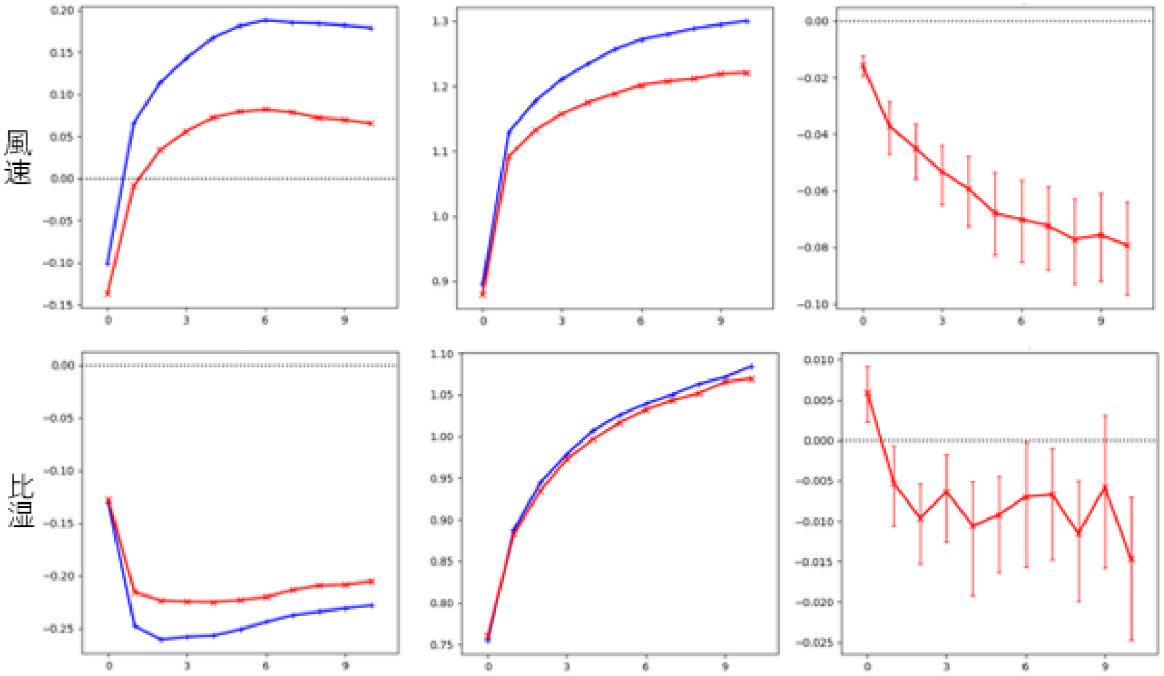

図 3.6.5　夏期間の地上風速（m/s, 上段）および地上比湿（g/kg, 下段）の予報時間毎の対地上観測検証の結果。左列は平均誤差、中央列は RMSE、右列は RMSE の TEST と CNTL との差。平均誤差および二乗平均平方根誤差の図（左、中央）において、赤線は TEST、青線は CNTL。エラーバーは 95 % 信頼区間を表す。

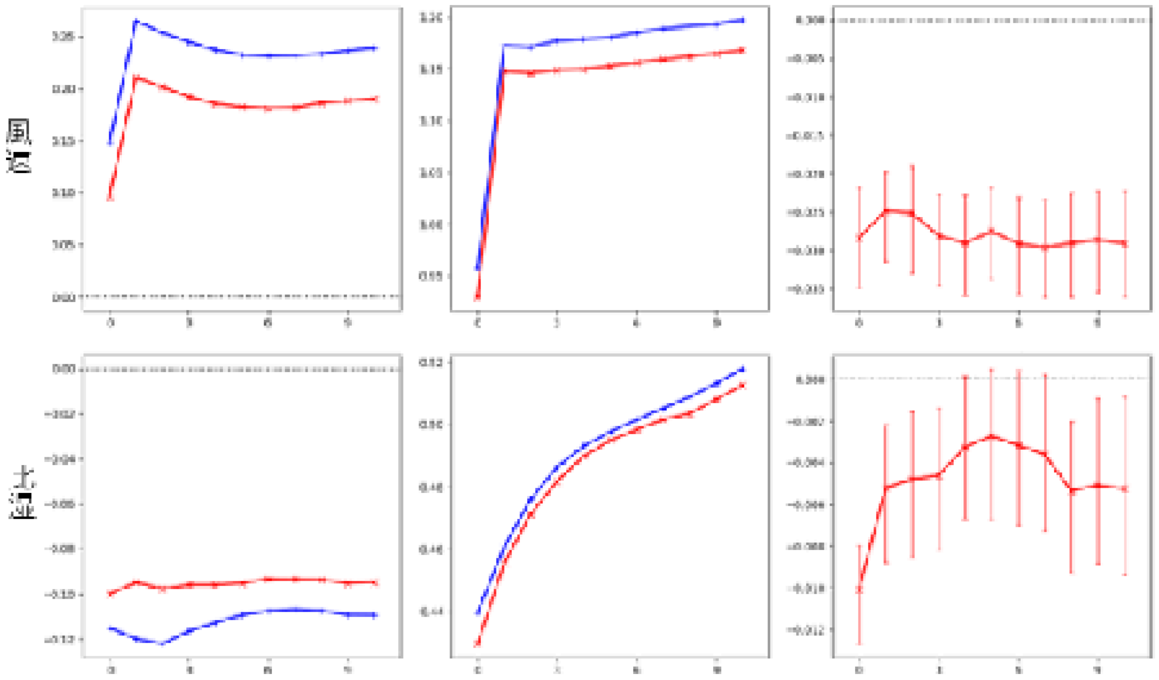

図 3.6.6　図 3.6.5 と同様。ただし、冬期間のもの。

provement of the Cloud Microphysics Scheme of the Mesoscale Model at the Japan Meteorological Agency Using Spaceborne Radar and Microwave Imager of the Global Precipitation Measurement as Reference. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3803 – 3819.

気象庁, 2023: 局地モデルの改良. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 81–84.

Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895–912.

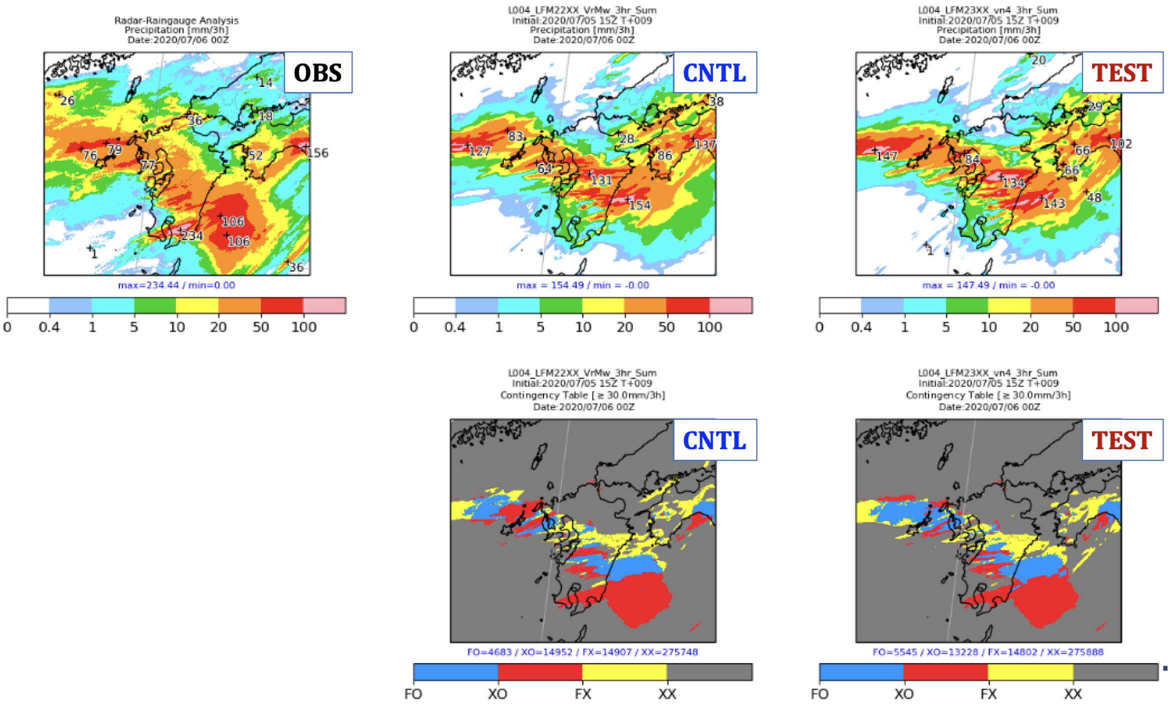

図 3.6.7 上段は 2020 年 7 月 6 日 00UTC を対象とする前 3 時間積算降水量 (mm/3 h) で、左は解析雨量、中央および右はそれぞれ CNTL および TEST の 9 時間予報値。下段はスレットスコア等を計算する際に用いる四分割表を閾値 30 mm/3 h 以上について描画したもので、青色が的中、赤色が見逃し、黄色が空振り、灰色が予測なし観測なし。中央が CNTL、右が TEST。

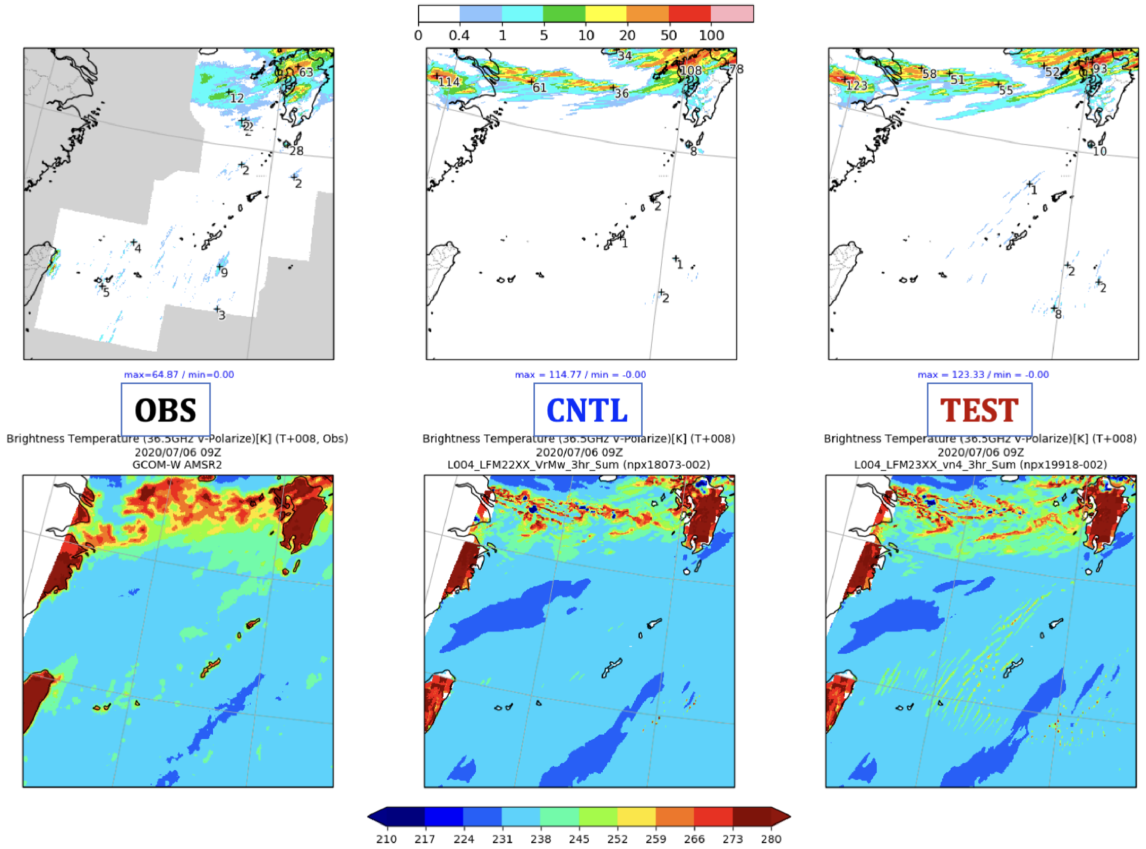

図 3.6.8 2020 年 7 月 6 日 09UTC を対象とする観測および予測結果。上段は、左が解析雨量、中央が CNTL の 1 時間降水量 (mm/h)、右が TEST の 1 時間降水量 (mm/h)。下段は左が GCOM-W の AMSR2 の 36.5 GHz 帯チャンネルで観測された輝度温度と、中央および右がそれぞれ CNTL および TEST の結果をもとにシミュレートした輝度温度。

WMO, 2021: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. *WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN*, **17**, 1–10.

Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates, 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5844–5853.

3.7 ハイパースペクトル赤外サウンダの全球解析における利用改良およびメソ・局地解析における新規利用

3.7.1 はじめに

ハイパースペクトル赤外サウンダ（以下「赤外サウンダ」）は、赤外の波長帯において高い波長分解能の多数のチャンネルを有しており、これらの観測データから気温や水蒸気量の鉛直分布に関する情報を得ることのできるセンサである。これまで当庁の現業数値予報システムにおいては、全球解析で気温に感度のあるチャンネル（以下「気温チャンネル」）のみを利用していた。その後開発を進め (気象庁 2022a, 2023)、全球解析では 2023 年 3 月 14 日に水蒸気チャンネルの追加利用を開始し、メソ・局地解析では 2023 年 3 月 28 日に赤外サウンダの新規利用を開始した。本稿では、これらの開発の概要を述べる。

3.7.2 全球解析における水蒸気チャンネルの利用

先に述べたように、これまで全球解析では赤外サウンダの気温チャンネルのみを利用してきた。その理由は、水蒸気に感度のあるチャンネル（以下「水蒸気チャンネル」）の利用には、気温チャンネルと比較してチャンネル間誤差相関が強いことや、気温にも感度があることから水蒸気の情報が気温に反映され気温の情報が損なわれる恐れがある（エイリアシング問題）といった難点があったためである (岡垣 2015)。これらの難点に留意し、以下のように水蒸気チャンネルを選択し、利用中の気温チャンネルに追加して利用することとした。

(1) 水蒸気チャンネルの選択

様々な高度の水蒸気情報を効率よく取得しながら、チャンネル間誤差相関を考慮していないことの悪影響を避けるよう、少ないチャンネルで同化による効果が十分に得られるようなチャンネル一式を検討する。対象とする赤外サウンダ IASI および CrIS について、まず、各センサの全チャンネルから利用候補となる水蒸気チャンネルを選択した。利用候補の選択では、輝度温度の同化に用いる放射伝達モデル RTTOV による Jacobian（図 3.7.1）の計算を用い、各高度における気温や水蒸気量、微量気体等の摂動によって生じる各チャンネルの輝度温度の応答特性を精査して、水蒸気情報の純度が低いチャンネルを棄却した。その上で、各チャンネルの水蒸気観測情報の自由度を算出し (Rodgers 2000; Rabier et al. 2002)、解析誤差をより減少させることが期待できるチャンネルを優先的に選択した。具体的には、以下の基準により同化利用チャンネルの選択を行った。

- 既に利用中の気温チャンネルは変更しないこととし、気温チャンネルを含む CO_2 帯（$< 725[cm^{-1}]$）を除く。
- RTTOV の計算精度の低い波数 $1600[cm^{-1}]$ 付近の水蒸気 Q 枝帯や、太陽光の影響がある短波長帯（$> 2030[cm^{-1}]$）は除く。
- 分布が局所的かつ変動する微量気体（O_3、N_2O、CH_4）に感度のあるチャンネルは誤差要因になるため除く。
- 対流圏の水蒸気を重視し、50hPa より上層に感度ピークをもつチャンネルを除く。
- 地表から大気上端までが光学的に厚い（$\tau > 35$）チャンネルを除く。（RTTOV の計算では $\tau = 50$ で飽和するため精度が低い。）
- チャンネル番号が近いチャンネル（チャンネル番号の違いが 2 つまで）は、観測原理や処理方法に起因するチャンネル間誤差相関があるため、1 つを残し取り除く。
- 取得している赤外サウンダデータのサブセット[1]に含まれるチャンネルを選択する。

次に、これらすべての水蒸気チャンネルの候補を同化した 2 週間程度の予備実験を実施し、Desroziers et al. (2005) の手法を用いてチャンネル間誤差相関を診断した（図 3.7.2）。この結果を踏まえ、荷重関数の重なり等も考慮し、誤差相関が強いチャンネルを排除しながら、互いに誤差相関の弱い複数チャンネルを選択した。最終的に IASI、CrIS ともに 9 個のチャンネルを選択した（図 3.7.3、表 3.7.1）。

(2) 性能評価試験

利用中の気温チャンネルに、上記で選択した水蒸気チャンネルを追加した効果を確認するため、同化サイクル実験によりその性能を評価した。追加した水蒸気チャンネルに対する品質管理や変分法バイアス補正の説明変数は気温チャンネルと同等 (岡垣 2015) で、品質管理手法に水蒸気チャンネルの追加に対応した変更はない。水蒸気チャンネルの観測誤差はグロスエラーチェック以外の品質管理を施した後の観測値と第一推定値の差の標準偏差をもとに設定し、観測誤差の膨張係数は気温チャンネルと同様の 3 倍とした。

2021 年 12 月時点の現業全球数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダの水蒸気チャンネルを同化する性能評価試験を実施した。実験期間は、夏実験では 2020 年 7 月 10 日～9 月 11 日、冬実験では 2020 年 12 月 10 日～2021 年 2 月 11 日であり、それぞれ 8 月および 1 月を検証期間とした。その結果、特に水蒸気に感度のある衛星観測データ（マイクロ波イメージャ、マイクロ波水蒸気サウンダ、静止衛星 CSR）において、観測値と第一推定値との整合性が向上していることを確認した（図 3.7.4）。これは第一推定値の水蒸気場の予測精度向上を示唆している。また、複数の外国数値予報センターの解析値を用いた予測値の検

[1] 数値予報での利用のため、全チャンネルではなく一部のチャンネル（IASI で 500、CrIS で 431 チャンネル）のみを格納したデータセットが配信されている。

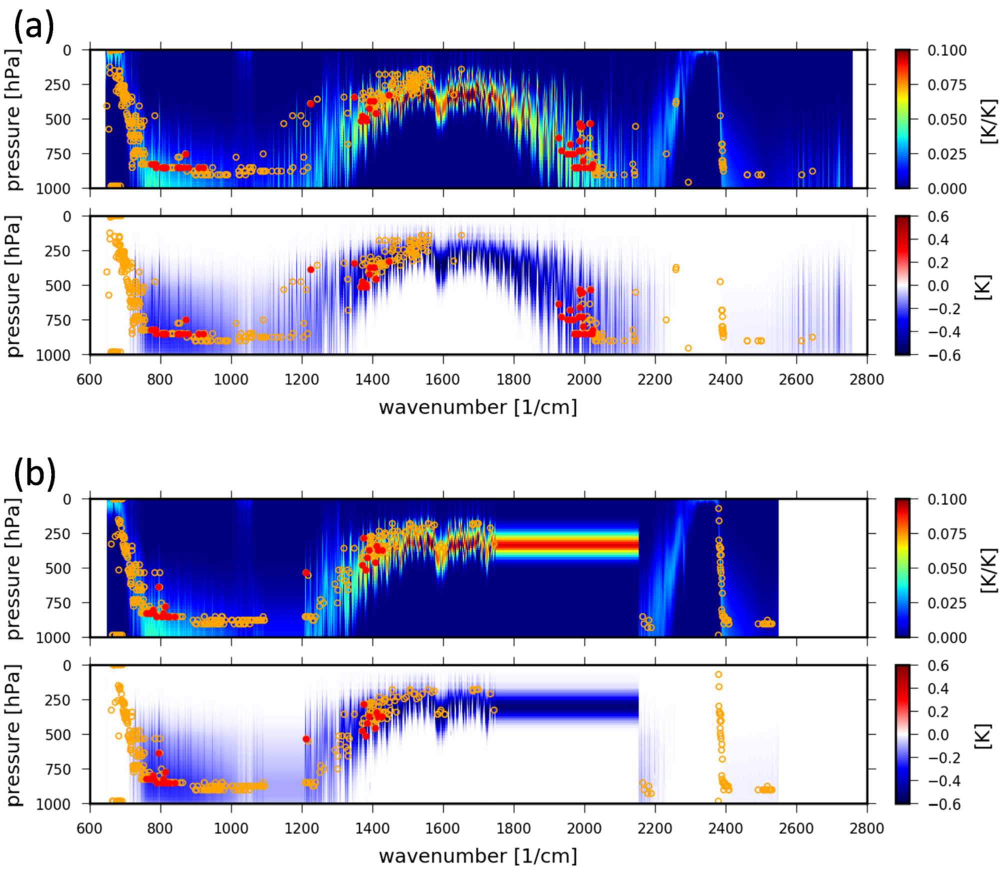

図 3.7.1　(a) IASI における Jacobian。横軸は波数 [cm^{-1}]、縦軸は気圧高度 [hPa]。上段：気温の Jacobian（気温 T を変化させたときの輝度温度 T_B の変化（$\frac{\partial T_B}{\partial T}$）。下段：水蒸気の Jacobian（比湿 q の対数を変化させたときの輝度温度 T_B の変化（$\frac{\partial T_B}{\partial(ln(q))}$）。橙○印はサブセットに含まれるチャンネルを、赤●印は候補として選択されたチャンネルを、それぞれ Jacobian のピーク高度に配置したもの。(b) CrIS における Jacobian。詳細は (a) と同様。

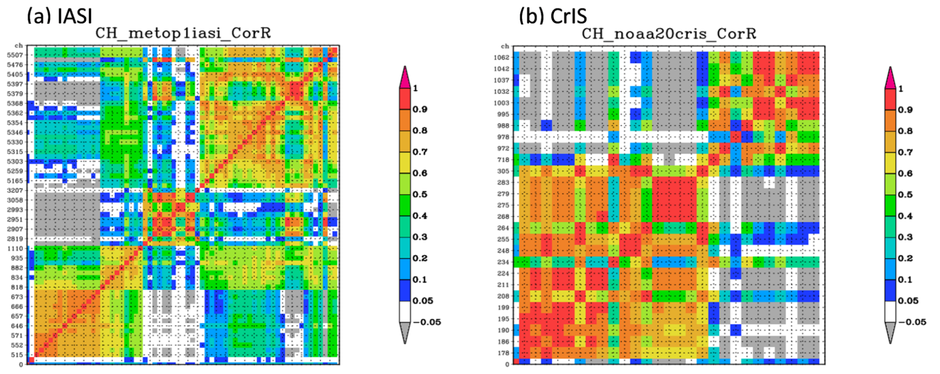

図 3.7.2　Desroziers et al. (2005) の手法を用いて診断した水蒸気チャンネルの候補に対するチャンネル間誤差相関。(a) IASI、(b) CrIS の診断結果。縦軸の数字はチャンネル番号を表す（横軸の番号は省略）。暖色ほど誤差相関が大きいことを示す。

証では、水蒸気場を中心に 3 日先程度まで RMSE が減少し、精度が向上することを確認した。

3.7.3　メソ解析における赤外サウンダの新規利用

メソ解析においては、以前まで独自のバイアス補正を行っていなかったことや、メソモデルの上端の高度が全球モデルと比較して低く放射伝達モデルによる輝度温度の計算に誤差が生じるなど課題があり、赤外サウンダの利用に向けた開発が進んでいなかった (岡本ほか 2020)。その後、2020 年の asuca-Var 導入 (Ikuta et al. 2021) により独自にバイアス補正ができるようになった他、メソモデルの上端の高度が衛星観測データの利用拡充を主な目的として引き上げられるなど (気象庁 2022b)、システムの改善により赤外サウンダの利

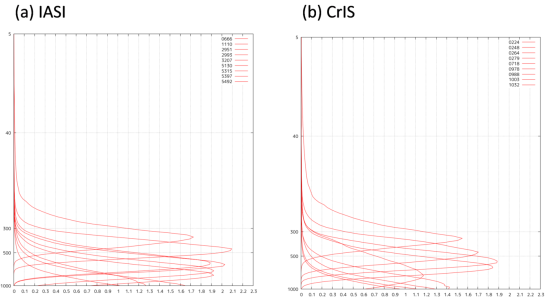

図 3.7.3　選択された水蒸気チャンネルの荷重関数。(a) IASI、(b) CrIS の結果。縦軸は気圧高度 [hPa]。

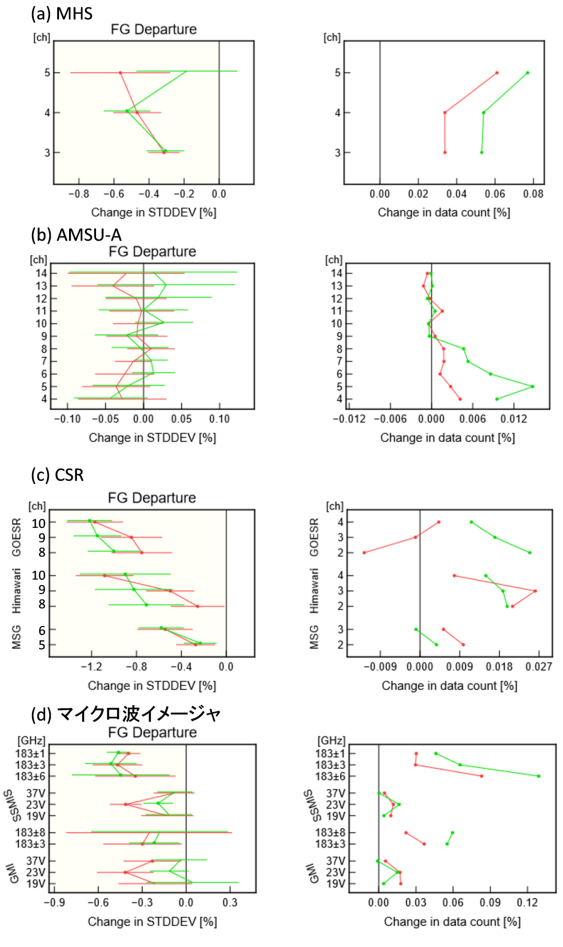

図 3.7.4　全球解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差（左列）と利用データ数（右列）の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、(b) マイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(c) 静止衛星 CSR、(d) マイクロ波イメージャ。縦軸は (a)(b)(c) はチャンネル番号、(d) は周波数 (GHz) および偏波。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合（改善）している場合、標準偏差の図では 0 線より左側にプロットされ、利用データ数の図では利用データが増加し 0 線より右側にプロットされる。

用が進めやすくなったことを受け、気温チャンネルおよび水蒸気チャンネルを新規に利用開始した。

(1)　チャンネルの選択

メソ解析で利用するチャンネルは、全球解析において利用するチャンネルに準じることとし、気温チャンネルおよび追加利用を開始する前述の水蒸気チャンネルを合わせた一式を元に、モデル上端高度（およそ 5hPa）よりも上部の大気に感度があり輝度温度の計算精度が低いチャンネルを除外するという方針で選択を行った。メソ解析や局地解析においては、放射伝達モデルに入力する気温や水蒸気の鉛直分布について、モデル上端高度よりも上部では標準大気の気温減率を元に外挿している（図 3.7.5）。そのため、外挿した鉛直分布の精度が十分ではなく、放射伝達モデルによる輝度温度の計算精度に悪影響を及ぼす。実際、荷重関数による主観的な判断によりチャンネルを選択し利用すると、モデル上端高度より上部への感度がわずかなチャンネルでも、その利用により解析値の精度に悪化が確認された。そこで、計算精度への影響の程度を客観的に判断するため、モデルの鉛直分布を十分上層まで入力できている全球解析と、輝度温度の計算精度を比較した。計算精度の比較には、観測値と第一推定値の差（O-B）のヒストグラムを用いてその形状に着目し、分布の幅が著しく異なるチャンネルは計算精度が不十分であると判断し除外した（図 3.7.6）。メソ解析で利用するチャンネルの一覧は表 3.7.1 に示した。なお、全球解析では地表面には感度がないとして陸上でも利用しているチャンネルは上記の判断により除外されるため、メソ解析では現在のところ海上のみでデータが利用される。

(2)　性能評価試験

メソ解析で赤外サウンダを利用するための品質管理処理や、スキャンバイアスならびに観測誤差等の設定については、全球解析に準じた。ただし、メソ解析における変分法バイアス補正（VarBC）の説明変数については、他の輝度温度センサ含め全球解析と統一されておらず、メソ解析における他の輝度温度センサと同様に、定数、衛星天頂角、海面水温を用いた[2]。また、間引き距離はメソ解析における他の輝度温度センサの利用に準じ 45km とした。メソ解析における赤外サウンダの利用データの分布を図 3.7.7 に示す。衛星の通過地方時により数の変動はあるものの、多くの解析時刻で赤外サウンダが利用されている。

2022 年 3 月時点の現業メソ数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダ同化の性能評価試験を実施した。実験期間は、夏実験では 2020 年 6 月 26 日〜7 月 31 日、冬実験では 2019 年 12 月 18 日〜2020

[2] 他の極軌道衛星搭載輝度温度センサでは軌道上昇下降フラグも用いているが、赤外サウンダでは上昇／下降軌道の違いによるバイアスの差異は顕著ではないと見られることから導入していない。

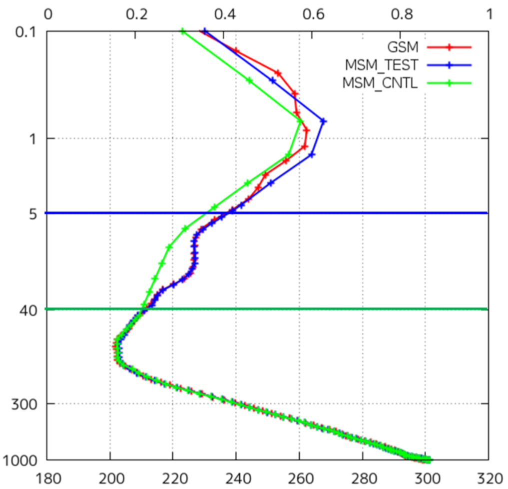

図 3.7.5　RTTOV に入力される気温鉛直分布の違いの例。赤線は全球モデル、青線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ後)、緑線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ前、局地モデルでの鉛直分布に相当）。青横線はメソモデル上端高度引き上げ後の上端（およそ 5hPa)、緑横線はメソモデル上端高度引き上げ前の上端（およそ 40hPa、局地モデルの上端に相当)。青線および緑線で示した鉛直分布は、それぞれのモデル上端高度より上部において標準大気の気温減率を元に外挿したもの。

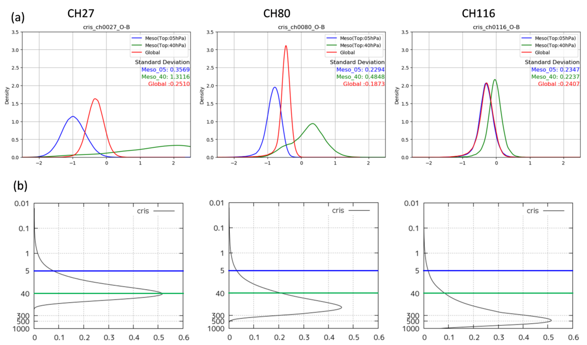

図 3.7.6　(a) 全球解析およびメソ解析における O-B ヒストグラム形状の差異。赤線は全球モデル、青線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ後)、緑線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ前、局地モデルでの鉛直分布に相当)。(b) 各チャンネルの荷重関数およびモデル上端高度。青横線、緑横線は図 3.7.5 に同じ。CrIS の ch27(666.25 cm^{-1})（除外)、ch80(699.375 cm^{-1})（除外）および ch116(721.875 cm^{-1})（選択）について示す。

年 1 月 31 日であり、それぞれ 7 月および 1 月を検証期間とした。その結果、主に水蒸気に感度のある衛星観測において、観測値と第一推定値との整合性の向上を確認した（図 3.7.8)。またラジオゾンデ観測を用いた予測値の検証では、対流圏中層付近における乾燥バイアスが改善することを確認した（図 3.7.9)。降水の予測については、夏実験において分布が改善する事例を確認した。

3.7.4　局地解析における赤外サウンダの新規利用

局地解析においてもこれまで赤外サウンダを利用していなかったが、VarBC 説明変数や間引き距離などの同化の設定はメソ解析に準じているため、メソ解析と合わせて利用に向けた開発を進めた。

(1)　チャンネルの選択

局地モデルの上端高度はメソモデルよりもさらに低く（およそ 40hPa)、局地解析では全球解析で利用している気温チャンネルは利用できないことが、メソ解析での利用チャンネルの検討の段階で判明していた。そのため、局地解析ではモデル上端高度より上空への感度が小さい水蒸気チャンネルのみを利用するようにした。局地解析で利用するチャンネルの一覧は表 3.7.1 に合わせて示した。

(2)　性能評価試験

2022 年 8 月時点の現業局地数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダ同化の性能評価試験を実施した。実験期間は、夏実験では 2021 年 7 月 1 日〜15 日、冬実験では 2022 年 1 月 1 日〜15 日である。メソ解析と同様に、主に水蒸気に感度のある衛星観測において、観測値と第一推定値との整合性の向上を確認した（図 3.7.10)。ラジオゾンデ観測や解析雨量、地上観測等を用いた予測精度の検証では、顕著な変化は見られず、概ね中立であった。

3.7.5　まとめと今後の課題

全球解析における赤外サウンダの水蒸気チャンネルの利用および、メソ・局地解析における赤外サウンダの新規利用について開発を進めた。それぞれの数値予報システムの性能評価試験では、水蒸気場の予測精度の改善が得られた。特に今回全球解析で新たに利用を開始した水蒸気チャンネルは、荷重関数の大部分が対流圏に分布することから、モデル上端高度の低いメソ・局地数値予報システムにおいても利用しやすく、精度改善への寄与が大きかった。この結果を踏まえ、全球解析では 2023 年 3 月 14 日に、メソ・局地解析では 2023 年 3 月 28 日に、それぞれ現業数値予報システムでの利用を開始した。

赤外サウンダ利用に関する今後の課題としては、チャンネル間誤差相関の考慮、利用チャンネルの拡充やさらなるチャンネル選択の最適化、地表面の影響を考慮した陸上での利用、雲判定の高度化、全天同化への移行などが挙げられる。赤外サウンダから得られる情報をより適切に解析値に反映できるように着実に開発していく必要があると考えている。また近年では衛星データ等から得られる観測データ量の増大によって、解析処理に必要な計算機資源が増大している。今後も観測機器の高度化によって更なるデータ量の増大が予想されるため、より効率よく赤外サウンダの情報を取り込むための開発にも取り組んでいく必要があると考える。

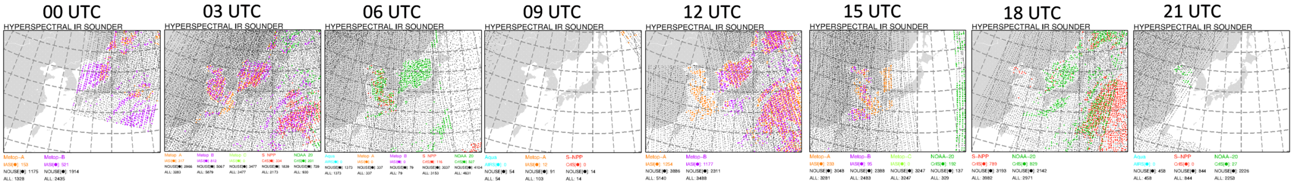

図 3.7.7 メソ解析における赤外サウンダのデータ分布の例（2020 年 7 月 1 日）。左列からそれぞれ、解析時刻 00,03,06,09,12,15,18,21UTC におけるデータの分布を示す。色の違いは衛星を示す。黒点は、雲域の除去等の品質管理や陸上で利用しない等の利用設定により、いずれのチャンネルも同化されなかった地点。

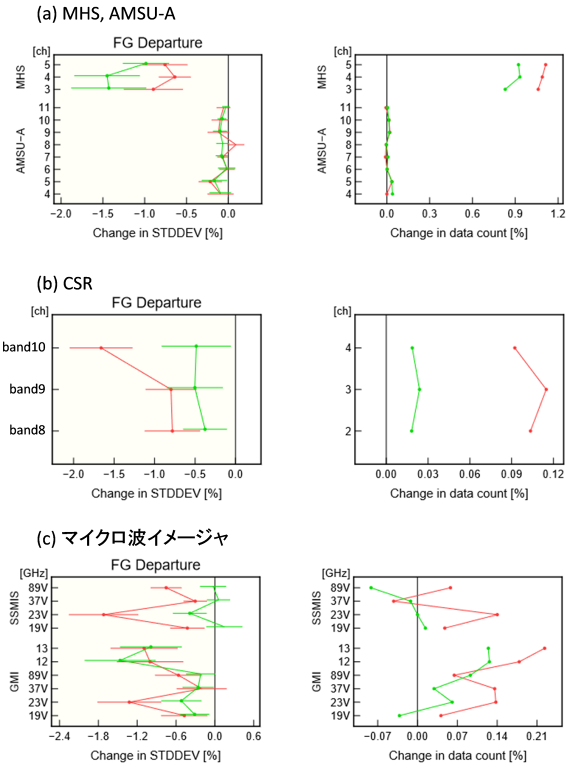

図 3.7.8 メソ解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差（左列）と利用データ数（右列）の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS およびマイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b) ひまわり CSR、(c) マイクロ波イメージャ。縦軸は (a)(b) はチャンネル番号、(c) は周波数 (GHz) および偏波。詳細は図 3.7.4 と同様。

メソ・局地数値予報システムにおける赤外サウンダの課題としては、モデル上端高度が低いことへの対処の方法を引き続き検討する必要がある。現在はモデル上端高度より上空への感度があるチャンネルを排除しているが、より多くのチャンネルの情報を活かすためには、上部境界値として全球モデルのプロファイルを用いてより上層のチャンネルも利用することや、1D-Var でリトリーブした気温や水蒸気のプロファイルを同化する方向性もあるため検討を進めている。

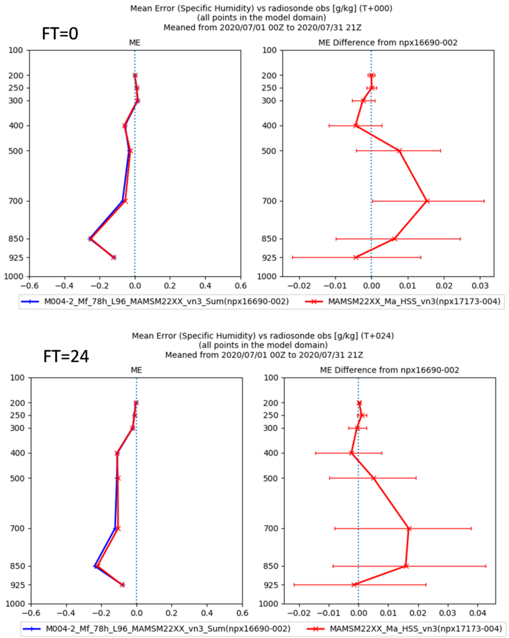

図 3.7.9 ラジオゾンデ観測に対する混合比のバイアス（ME）の変化。夏実験の結果（検証期間 2020 年 7 月）を示す。上段は解析値、下段は 24 時間予測の検証結果。左列は CNTL（青線）および TEST（赤線）の ME、右列は TEST と CNTL の差異。

参考文献

Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385–3396.

Ikuta, Yasutaka, Tadashi Fujita, Yukinari Ota, and Yuki Honda, 2021: Variational Data Assimilation System for Operational Regional Models at Japan Meteorological Agency. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 1563–1592.

気象庁, 2022a: メソ解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダの利用. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 111.

気象庁, 2022b: メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、物理過程の改良. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター,

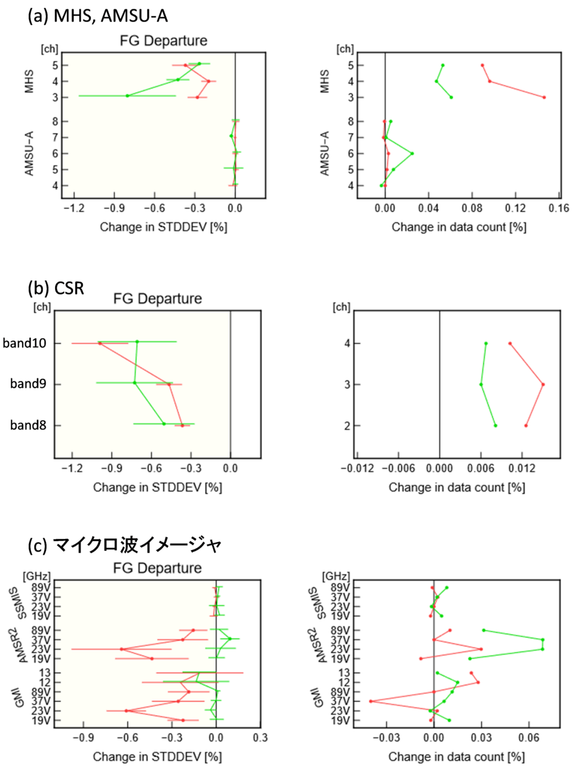

図 3.7.10　局地解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差（左列）と利用データ数（右列）の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS およびマイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b) ひまわり CSR、(c) マイクロ波イメージャ。縦軸は (a)(b) はチャンネル番号、(c) は周波数 (GHz) および偏波。詳細は図 3.7.4 と同様。

92–99.

気象庁, 2023: ハイパースペクトル赤外サウンダの全球解析における利用改良およびメソ・局地解析における新規利用. 令和 4 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 87–88.

岡垣晶, 2015: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 43–46.

岡本幸三, 大和田浩美, 藤田匡, 別所康太郎, 高橋昌也, 太田芳文, 計盛正博, 大塚道子, 瀬古弘, 石田春磨, 上清直隆, 石元裕史, 林昌宏, 安藤昭芳, 横田寛伸, 2020: ひまわり 8・9 号後継衛星検討のためのハイパースペクトル赤外サウンダの数値予報インパクト調査. 測候時報, **87**, 99–150.

Rabier, Florence, Nadia Fourrié, Djalil Chafäi, and Pascal Prunet, 2002: Channel selection methods for infrared atmospheric sounding interferometer radiances. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 1011–1027.

Rodgers, Clive D, 2000: *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice*, Vol. 2. World scientific.

表 3.7.1　全球解析、メソ解析、局地解析での同化チャンネル一覧。左：IASI、右：CrIS。「種類」には主に感度のある気温または水蒸気を記した。水蒸気チャンネルは今回選択されたもの。荷重関数ピークは米国標準大気における気圧高度の参考値。

IASI ch	波数 [cm^{-1}]	波長 [μm]	荷重関数ピーク [hPa]	全球	メソ	局地	種類
38	654.25	15.28	61.0	○	×	×	気温
49	657.00	15.22	39.3	○	×	×	気温
51	657.50	15.21	56.1	○	×	×	気温
55	658.50	15.19	39.3	○	×	×	気温
57	659.00	15.17	56.1	○	×	×	気温
61	660.00	15.15	39.3	○	×	×	気温
63	660.50	15.14	56.1	○	×	×	気温
70	662.25	15.10	56.1	○	×	×	気温
85	666.00	15.02	43.1	○	×	×	気温
87	666.50	15.00	43.1	○	×	×	気温
109	672.00	14.88	56.1	○	×	×	気温
116	673.75	14.84	56.1	○	×	×	気温
122	675.25	14.81	56.1	○	×	×	気温
128	676.75	14.78	56.1	○	×	×	気温
135	678.50	14.74	56.1	○	×	×	気温
141	680.00	14.71	61.0	○	×	×	気温
146	681.25	14.68	43.1	○	×	×	気温
148	681.75	14.67	56.1	○	×	×	気温
154	683.25	14.64	61.0	○	×	×	気温
159	684.50	14.61	56.1	○	×	×	気温
161	685.00	14.60	61.0	○	×	×	気温
167	686.50	14.57	71.5	○	×	×	気温
173	688.00	14.53	77.2	○	×	×	気温
180	689.75	14.50	77.2	○	×	×	気温
185	691.00	14.47	83.2	○	×	×	気温
187	691.50	14.46	83.2	○	×	×	気温
193	693.00	14.43	103.0	○	×	×	気温
205	696.00	14.37	142.4	○	×	×	気温
212	697.75	14.33	151.3	○	×	×	気温
217	699.00	14.31	151.3	○	×	×	気温
219	699.50	14.30	160.5	○	×	×	気温
224	700.75	14.27	170.1	○	×	×	気温
226	701.25	14.26	170.1	○	×	×	気温
230	702.25	14.24	170.1	○	×	×	気温
232	702.75	14.23	180.0	○	×	×	気温
236	703.75	14.21	260.0	○	×	×	気温
239	704.50	14.19	272.9	○	○	×	気温
243	705.50	14.17	286.3	○	×	×	気温
246	706.25	14.16	300.0	○	○	×	気温
249	707.00	14.14	300.0	○	○	×	気温
252	707.75	14.13	328.7	○	○	×	気温
256	708.75	14.11	300.0	○	×	×	気温
262	710.25	14.08	328.7	○	○	×	気温
265	711.00	14.06	359.0	○	○	×	気温
267	711.50	14.05	328.7	○	×	×	気温
269	712.00	14.04	328.7	○	×	×	気温
271	712.50	14.04	441.9	○	×	×	気温
273	713.00	14.03	374.7	○	×	×	気温
275	713.50	14.02	359.0	○	○	×	気温
278	714.25	14.00	515.7	○	○	×	気温
282	715.25	13.98	328.7	○	○	×	気温
284	715.75	13.97	515.7	○	○	×	気温
288	716.75	13.95	343.6	○	×	×	気温
292	717.75	13.93	478.0	○	×	×	気温
294	718.25	13.92	314.1	○	×	×	気温
296	718.75	13.91	272.9	○	×	×	気温
306	721.25	13.86	260.0	○	○	×	気温
308	721.75	13.86	515.7	○	○	×	気温
316	723.75	13.82	459.7	○	○	×	気温
320	724.75	13.80	683.7	○	○	×	気温
323	725.50	13.78	374.7	○	○	×	気温
327	726.50	13.76	617.5	○	○	×	気温
333	728.00	13.74	639.1	○	○	×	気温
347	731.50	13.67	374.7	○	○	×	気温
350	732.25	13.66	575.5	○	○	×	気温
354	733.25	13.64	343.6	○	○	×	気温
356	733.75	13.63	575.5	○	○	×	気温
360	734.75	13.61	343.6	○	○	×	気温
666	811.25	12.33	1070.9	○	○	○	水蒸気
1110	922.25	10.84	1013.9	○	○	○	水蒸気
2951	1382.50	7.23	617.5	○	○	○	水蒸気
2993	1393.00	7.18	459.7	○	○	○	水蒸気
3207	1446.50	6.91	359.0	○	○	○	水蒸気
5130	1927.25	5.19	802.4	○	○	○	水蒸気
5315	1973.50	5.07	1042.2	○	○	○	水蒸気
5397	1994.00	5.02	729.9	○	○	○	水蒸気
5492	2017.75	4.96	639.1	○	○	○	水蒸気

CrIS ch	波数 [cm^{-1}]	波長 [μm]	荷重関数ピーク [hPa]	全球	メソ	局地	種類
27	666.25	15.01	39.3	○	×	×	気温
31	668.75	14.95	5.9	○	×	×	気温
37	672.50	14.87	39.3	○	×	×	気温
51	681.25	14.68	39.3	○	×	×	気温
69	692.50	14.44	71.5	○	×	×	気温
73	695.00	14.39	77.2	○	×	×	気温
75	696.25	14.36	110.2	○	×	×	気温
79	698.75	14.31	110.2	○	×	×	気温
80	699.38	14.30	142.4	○	×	×	気温
81	700.00	14.29	117.8	○	×	×	気温
83	701.25	14.26	151.3	○	×	×	気温
85	702.50	14.23	160.5	○	×	×	気温
87	703.75	14.21	190.3	○	×	×	気温
88	704.38	14.20	260.0	○	×	×	気温
93	707.50	14.13	300.0	○	×	×	気温
96	709.38	14.10	328.7	○	×	×	気温
102	713.12	14.02	374.7	○	×	×	気温
106	715.62	13.97	441.9	○	×	×	気温
116	721.88	13.85	478.0	○	○	×	気温
123	726.25	13.77	617.5	○	○	×	気温
124	726.88	13.76	515.7	○	○	×	気温
125	727.50	13.75	596.3	○	○	×	気温
132	731.88	13.66	496.6	○	○	×	気温
136	734.38	13.62	535.2	○	○	×	気温
138	735.62	13.59	575.5	○	○	×	気温
142	738.12	13.55	555.2	○	○	×	気温
148	741.88	13.48	441.9	○	×	×	気温
224	789.38	12.67	1070.9	○	○	○	水蒸気
248	804.38	12.43	1070.9	○	○	○	水蒸気
264	814.38	12.28	958.6	○	○	○	水蒸気
279	823.75	12.14	1070.9	○	○	○	水蒸気
718	1212.50	8.25	753.6	○	○	○	水蒸気
978	1375.00	7.27	343.6	○	○	○	水蒸気
988	1381.25	7.24	639.1	○	○	○	水蒸気
1003	1390.62	7.19	459.7	○	○	○	水蒸気
1032	1408.75	7.10	555.2	○	○	○	水蒸気

3.8 全球解析における大気追跡風 (AMV) の利用拡充

3.8.1 はじめに

大気追跡風 (AMV: Atmospheric Motion Vector) は、衛星風とも呼ばれ、時間的に連続する複数枚の衛星画像から、雲や水蒸気パターンを追跡しその移動量を求め、さらにその高度を推定することで算出される風ベクトルである (山下・今井 2007)。

全球解析でデータ同化に利用している AMV として、静止気象衛星の AMV の他に、極軌道衛星の Terra や Aqua に搭載された MODIS、及び同じく極軌道衛星の NOAA や Metop に搭載された AVHRR の画像から算出される極域の AMV（以下、極域 AMV）がある (計盛 2015)。このうち MODIS は、既に 20 年以上運用されており、近い将来 MODIS から算出した AMV（以下、MODIS AMV）を利用できなくなることが予想される。このため、全球解析で利用する極域 AMV データについては早期の補完が必須となっており、EUMETSAT から配信されている Metop-B と Metop-C の 2 機の AVHRR の画像を使った AMV (Dual-Metop AMV) について、2022 年 6 月 30 日に現業利用を開始した (気象庁 2023)。

極域 AMV のさらなる利用拡充のため、既に現業的に利用可能な Suomi-NPP と NOAA-20 の VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite) から算出した AMV（以下、VIIRS AMV）について、利用に向けた調査・開発を行ってきた。VIIRS AMV は、2023 年 3 月 14 日より、全球解析でハイパースペクトル赤外サウンダ水蒸気チャンネル等（3.7 参照）と併せて利用開始した。本節では VIRRS AMV の利用に関する開発について報告する。

3.8.2 VIIRS AMV の概要

VIIRS は、JPSS (Joint Polar Satellite System) シリーズに搭載される可視赤外放射計で、現在 Suomi-NPP と NOAA-20 の VIIRS の画像から算出される AMV が NOAA/NESDIS から配信されている。

VIIRS AMV は、約 100 分間隔の連続した 3 枚の赤外画像を用いて、画像の重なる高緯度域（55° より極側）で算出される。また、AVHRR と同様に大気の窓バンド (10.8 μm) の赤外画像から NOAA/NESDIS で開発されたアルゴリズムにより算出され、個々の風ベクトルには高度情報と QI (Quality Indicator) と呼ばれる品質指標が付加されて配信されている (Daniels 2022)。

3.8.3 VIIRS AMV の品質管理

品質管理に用いる QI 及び、高度の閾値を決めるに際し、2020 年 7 月と 12 月のそれぞれ 1 か月間のデータにより VIIRS AMV の風速の東西成分、南北成分のそれぞれについて、GSM 初期値を第一推定値とした O-B 統計により特性を調査した。その結果、VIIRS AMV と第一推定値との風速差が、対流圏上層及び、陸域の下層で大きくなる傾向がみられたことから、これらのデータは使用しないこととした。また品質管理に用いる QI 閾値は、バイアスもしくは標準偏差と QI 値との間に相関がほとんど見られなかったため、最低限の設定（60 以上を利用）とした。Suomi-NPP と NOAA-20 の間では、AMV の特性の差異は見られなかったため、同じ品質管理を適用した。

今回の導入では数値予報で用いる計算機システム更新前に新規利用開始することを優先させるため、品質管理の設定については、従来から利用している AVHRR の AMV の利用方法 (山下・今井 2007; 山下 2015) を概ね踏襲した。VIIRS AMV に適用する品質管理の設定をまとめると以下の通り。

- 60°〜88° の高緯度域のデータを利用
- 300 hPa より下層のデータを利用
- 海上では 700 hPa より上層、陸上では 400 hPa より上層のデータを利用
- QI 値が 60 以上のデータを利用

なお、同一の間引き格子に複数の極域 AMV が存在した場合は、同じ処理センターから提供された AMV については QI 値や間引き格子点からの距離を考慮したデータ選択を行い、その上で算出に用いられる衛星画像の種類によって優先順位（MODIS、LEOGEO、Dual-Metop、VIIRS・AVHRR の順）を定めて利用する。

3.8.4 データの分布

図 3.8.1 に全球サイクル解析における極域 AMV の北半球のデータ分布図を示す。VIIRS AMV を利用することにより他の極域 AMV とともに北極域及び、南極域を観測データで広く覆うことができる。

3.8.5 VIIRS AMV 利用の影響評価

2022 年 7 月時点の現業全球数値予報システムと同等の実験をコントロール (CNTL) とし、MODIS AMV が利用できなくなった状況を想定し、CNTL から MODIS AMV を棄却したベースライン実験 (BASE) を実施した。その上で、BASE に Suomi-NPP と NOAA-20 の VIIRS AMV を追加したテスト実験 (TEST) を行い、BASE と TEST の結果を比較した。実験期間は、2021 年夏（7 月 10 日 ~9 月 11 日）、2021-2022 年冬（12 月 10 日 ~2 月 11 日）である。

図 3.8.2 に 500 hPa 高度の月平均解析場の TEST 及び、CNTL の BASE からの差を示す。北極域に着目すると、夏冬ともに 500 hPa 高度場に変化が見られた。冬実験では TEST、CNTL ともに同じような高度場の上昇傾向が見られた。夏実験では一部の領域で TEST と CNTL で異なる傾向が見られたものの、TEST での変化はごく小さく[1]、その他の部分では同じような高度場の変化傾向が見られた。

[1] MODIS AMV については、下層 (700~850 hPa) のデータも利用しているが、VIIRS AMV については 700 hPa 以下のデータを利用していないため、CNTL に比べると下層の

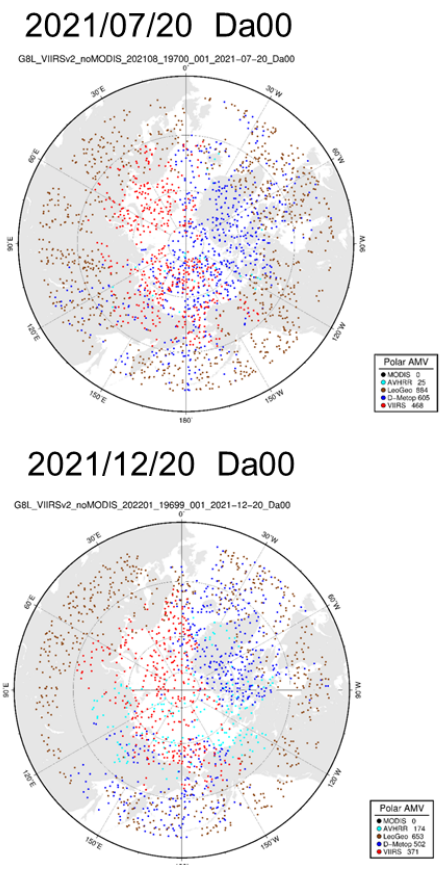

図 3.8.1 全球サイクル解析における極域 AMV の利用状況。点は観測データの位置を表す。赤色: VIIRS、水色: AVHRR、茶色: LEOGEO、青色: Dual-Metop による AMV を示す。解析時刻は上が 2021 年 7 月 20 日 00UTC、下が 2021 年 12 月 20 日 00UTC。

予測場に対する影響を確認するため、図 3.8.3 に ECMWF と気象庁の予測初期値を参照値とした予測高度場の BASE からの二乗平均平方根誤差 (RMSE) 改善率を示す。どちらの予測初期値を参照値とした場合でも、南北の中高緯度を中心に改善傾向が確認でき、気温や風速場についても同様に改善傾向であった。NCEP や UKMO など、他の海外数値予報センターの予測初期値を参照値とした場合でも同様の結果が見られた。なお、図 3.8.3 の TEST の夏実験では、北極域の予測高度場に改悪傾向が見られるが、予測時間の経過とともに改悪領域が拡大する傾向はなく、北半球 500 hPa 高度の RMSE の予測スコアにおいても有意な改悪とはなっていない（図 3.8.4）。

このように VIIRS AMV を利用することにより、MODIS AMV がない極域の観測を補い、中高緯度を中心とした予測場が全体として中立以上の改善傾向となった。

AMV の利用数が減少し、下層の風や気温場の修正が小さくなったことが影響していると考えられる。

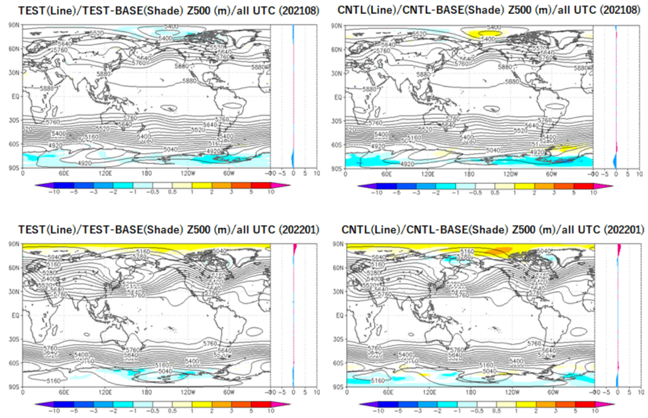

図 3.8.2 500 hPa のジオポテンシャル高度の TEST 及び、CNTL の平均解析場の BASE との差分。上段の 2 図は夏実験、下段の 2 図は冬実験の結果を示す。両実験とも左は TEST-BASE、右は CNTL-BASE の図を示す。

3.8.6 まとめ

Suomi-NPP と NOAA-20 に搭載された VIIRS から算出される極域 AMV について、全球解析での利用に向けた調査・開発を行った。特に MODIS AMV が利用できなくなった状況を想定した実験等を実施し、数値予報システムにおいて予測精度の改善傾向を確認した。このことから、ハイパースペクトル赤外サウンダの水蒸気チャンネル等と併せて、2023 年 3 月 14 日に現業利用を開始した。

今後は、早期に利用開始するために不使用とした下層データの利用の検討など、VIIRS AMV の情報を十分活用するための調査を引き続き行う予定である。

参考文献

Daniels, J. et.al, 2022: ”Enterprise Algorithm Theoretical Basis Document For Derived Motion Winds”, Ver.4.0, Feb. 2022.

計盛正博, 2015: 衛星観測データの利用の現状と課題. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 9–13.

気象庁, 2023: 全球解析における Dual-Metop AMV の利用に関する開発の背景. 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, 37–41.

山下浩史, 今井崇人, 2007: 大気追跡風 (AMV). 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 36–56.

山下浩史, 2015: 大気追跡風. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 70–77.

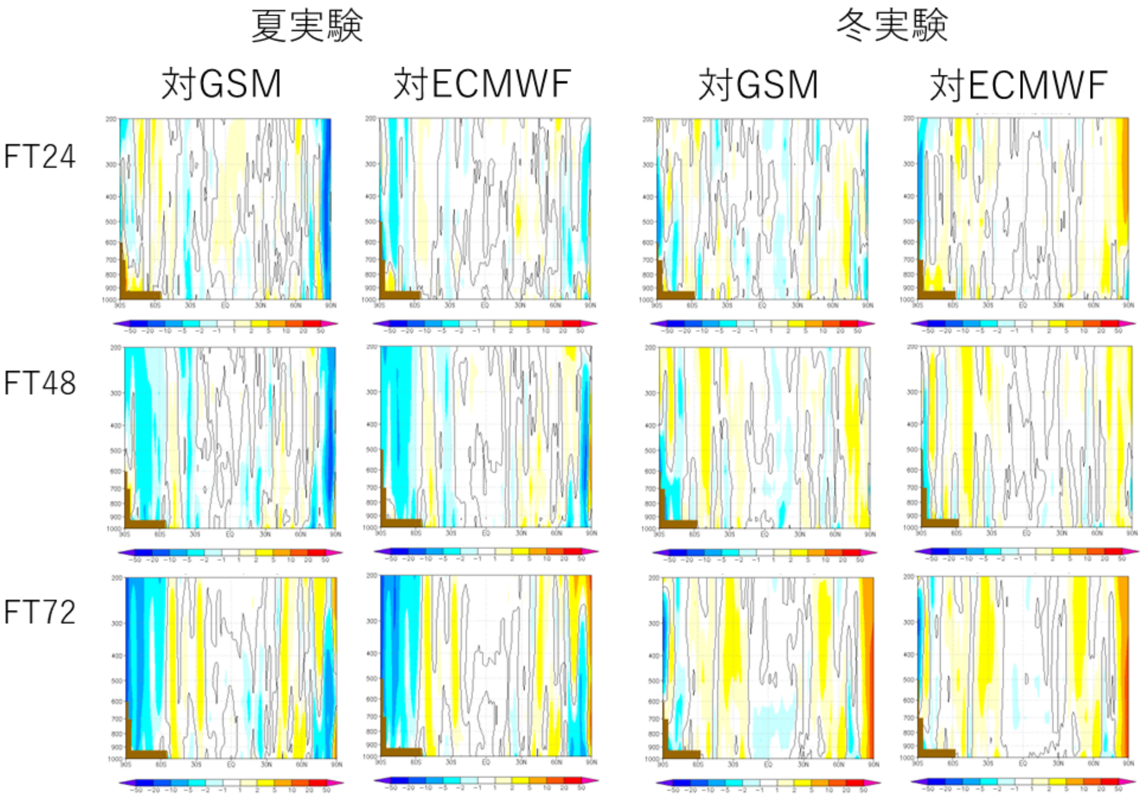

図 3.8.3　予測初期値を参照値とした予測高度場の RMSE 改善率 [%] の緯度帯平均。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°] である。左側の 2 列は夏実験、右側の 2 列は冬実験の 3 か月平均の対初期値検証の図であり、それぞれのパネルの左は JMA、右は ECMWF の予測初期値を参照値としている。上から 1 段目、2 段目、3 段目はそれぞれ、1 日目、2 日目、3 日目の予測精度の変化を示す。暖色系は改善、寒色系は改悪を示す。

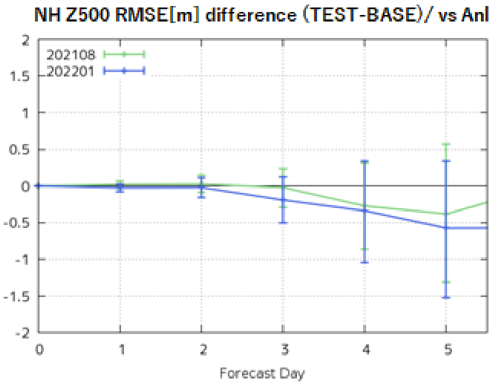

図 3.8.4　全球解析値を参照値とした、北半球の 500 hPa のジオポテンシャル高度予測精度の変化。縦軸は RMSE の TEST から BASE を引いた差分 [m]、横軸は予測時間 [日] である。青線は冬実験、緑線は夏実験を示す。エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示している。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味している。

3.9 船舶 GNSS 観測データのメソ解析での利用改良および局地解析における新規利用

3.9.1 はじめに

気象庁では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在り方」に基づき、線状降水帯の予測精度向上に向けた取り組みを進めている。令和 2 年 7 月豪雨を受け、これらの取り組みを加速させることを目的に気象庁内に線状降水帯予測精度向上タスクフォースが立ち上げられた (気象庁 2022)。

令和 2 年 7 月豪雨では発生要因の 1 つとして大気下層の水蒸気の流入が指摘されている。しかし特に海上においては大気下層の水蒸気観測データが不足している状況であることから、予報初期値の時点で水蒸気場の再現性に限界がある。そのため、線状降水帯の予測精度を向上させるためには、海上の水蒸気観測の強化とそのデータ同化での利用を通じて、より現実に即した水蒸気場を再現した予報初期値を作成することが重要である。可降水量を同化することで大気下層の水蒸気を同化することと同等の効果が期待できるため、船舶に搭載された全球測位衛星システム (GNSS:Global Navigation Satellite System) による可降水量観測をメソ解析で利用するための調査、開発に取り組んできた (気象庁 2022)。

令和 3 年 8 月 31 日には冬季以外での気象庁及び海上保安庁の船舶 GNSS 可降水量データのメソ解析での利用を開始し (気象庁 2022)、令和 4 年 4 月から通年での利用を開始した (気象庁 2023b)。

令和 3 年度から令和 4 年度にかけて、海上における水蒸気観測領域のさらなる拡充を目指して、合計 10 隻の旅客船や貨物船などの民間船舶への GNSS 受信機の設置を行った (気象庁 2023a)。これらの観測データは数値予報に利用する前に品質を調査して問題がないことを確認した上で、令和 4 年度中に順次同化利用を開始した。

船舶 GNSS 可降水量の利用について、メソ解析においては品質管理 (QC: Quality Control) の改良に向けた開発を行い、また局地解析においては本データの新規利用に向けた開発を行った。これらの開発成果はメソ解析・局地解析ともに 2023 年 3 月 28 日にルーチンに適用された。ここでは本開発の概要について述べる。

3.9.2 メソ解析での利用改良

(1) 品質管理について

メソ解析では、国土地理院の GNSS 電子基準点 GEONET（GPS Earth Observation NETwork system、以降、地上 GNSS とする）の可降水量を 2009 年 10 月から利用している。船舶 GNSS についても令和 3 年 8 月 31 日より可降水量の現業利用を開始している。船舶 GNSS の QC は基本的に石川 (2010) で述べられている地上 GNSS と同様の処理を採用しており、以下のチェックに該当するデータは同化に利用しないこととしている (気象庁 2022)。

(a) ブラックリストチェック
観測地点ごとの観測データ時系列図による監視などにより、品質に問題があることがわかっている地点

(b) 異常値チェック
可降水量観測値が 1 mm より小さい、または 90 mm より大きい地点

(c) グロスエラーチェック
観測値と第一推定値の差 (O−B: Observation−Background) の絶対値が 8 mm 以上

(d) 空間整合性チェック
周辺の可降水量の O−B 平均と空間整合性チェック対象観測点の O−B の差の絶対値が 5 mm 以上

空間整合性チェックの実行条件を満たさない場合、O−B の差の絶対値が 5 mm 以上のデータは同化に利用されない。さらに、30 km 間隔での空間間引き、1 時間間隔での時間間引き処理が行われ、残ったデータが同化に利用される。

令和 3 年の運用開始後、QC の改良に向けた調査を続けてきた。観測データの蓄積に伴い得られた知見から、今回新たに観測値と同時に通報される QC 用のパラメータ（衛星・解析時間）を利用した手法を導入した。ここでは新たに導入した手法について記載する。

(i) 陸付近で地上 GNSS を優先利用するための修正
船舶 GNSS 導入時の調査で、船舶 GNSS の O−B 平均の絶対値は地上 GNSS の O−B 平均の絶対値より大きかった。また、船舶 GNSS が陸付近や港で観測しているときは、マルチパスの効果（周囲の建物等からの反射）の影響や、点検、機器の更新などにより、沖合で観測している時よりも品質が悪い傾向がある。また船の停泊中には、点検や機器の更新などを行うこともある。以上のことを考慮して、陸付近において船舶 GNSS よりも地上 GNSS が利用されやすいようにするために、船舶 GNSS は地上 GNSS よりも優先度を下げて間引き処理をする設定とした。

(ii) GNSS 解析で用いた衛星の数の QC への導入
船舶 GNSS では、通常は 20 基前後の GNSS 衛星を使って可降水量を解析するが、衛星との位置関係が悪い等の理由で GNSS 解析に使われる衛星数が減少すると、解析精度は低下する。そのため、通報対象時刻の衛星数が 7 基未満のデータを利用しない処理を導入した。

(iii) 解析時間の QC への導入

船舶 GNSS による可降水量の解析には、通常は通報対象時刻の前 90 分のデータを使用している。点検直後やデータが断続的な場合は解析に使用するデータの時間（以後、解析時間）が 90 分よりも短くなり、観測データの品質が悪くなる。そのため解析時間が 30 分未満のデータを利用しない処理を導入した。

(iv) メソ領域の境界のデータ除去
現業監視や統計検証で確認したところ、メソ領域の側面境界付近の O−B の絶対値が大きくなっていたため、側面境界付近の解析格子 2 格子分のデータを利用しない処理を導入した。

(v) 動的 QC の導入
可降水量が急な変化をした場合に、観測値と第一推定値の差が大きくなり、正しいと思われる観測が QC 処理によって除去されてしまうことがある。特に船舶 GNSS は周囲に GNSS 観測点が少ないため空間整合性チェックの実行条件を満たしづらく、グロスエラーチェックでサスペクト判定になると、空間整合性チェックでの救済措置がほとんど行われずデータが除去されてしまう。
このようなデータの除去を避けるため、グロスエラーチェックの閾値として、第一推定値の時間・空間変化率に応じた閾値を設定する動的 QC(大野木ほか 1997) を導入した。

(2) 品質管理の改良の影響評価

2021 年 8 月 27 日時点の準ルーチンをベースに構築した実験を CNTL として、新たに検討した (i)∼(v) の品質管理処理を追加した試験を TEST とした。統計期間は 2021 年夏（7 月 1 日〜7 月 30 日)、2022 年冬（1 月 1 日〜1 月 30 日）である。

影響評価の結果について、まずは (i) の QC の導入により、利用されるデータが変化した。また、(ii)∼(v) の QC の導入による利用データが変化した事例もあり、例えば図 3.9.1 の 7 月 10 日 03UTC-12UTC のように (v) の動的 QC の導入により可降水量解析値が減少するタイミングが変化して、解析値が観測値に近づく事例はあったが、動的 QC が降水予測の変化に明瞭に寄与している実験期間中の事例は確認できなかった。

予測結果については概ね中立であったが、降水予測には改善傾向も確認できた。夏の評価期間中の 3 時間降水量の降水予測スコアを図 3.9.2 に示す。空振り率が 30 mm 以下、見逃し率が 20 mm 以下で減少していてエクイタブルスレットスコア (ETS: Equitable Threat Score) が改善した。また 5 mm 以下、および 30 mm 以上の正バイアスについて縮小する傾向が見られる。

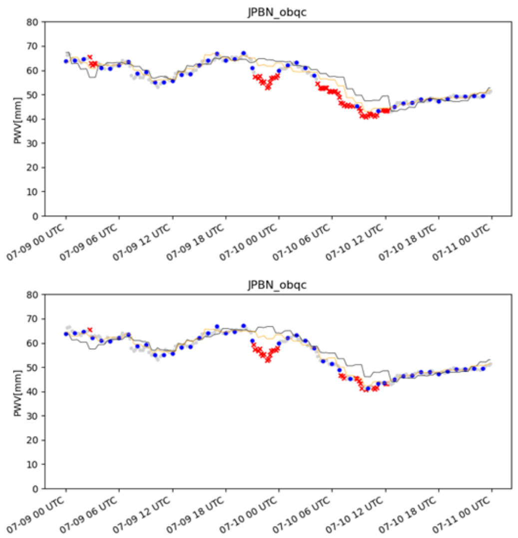

図 3.9.1 啓風丸の可降水量の時系列図。（灰色：QC で正常と判定された観測データ、赤色：QC で異常と判定された観測データ、青色：データ同化に使用したデータ、橙線：解析値、黒線：第一推定値）上図は CNTL、下図は TEST。

3.9.3 局地解析での新規利用

局地解析では既に地上 GNSS による可降水量データを現業利用しているが、船舶 GNSS データは未利用であった。線状降水帯の予測精度向上に向けた取り組みとして、局地解析への利用に向けた調査を行った。以下、調査の概要について記載する。

(1) 品質管理について

船舶 GNSS の QC ついては基本的には第 3.9.2 項に記載のあるメソ解析のものと同じである。以下、異なる点について記載[1]する。

- 空間間引き距離が小さい（メソ：30 km, 局地：20 km）
- 船舶 GNSS では正時のデータが利用できない場合に、メソ解析では正時 ±20 分のデータを利用できるが、局地では正時 ±10 分のデータを利用
- グロスエラーチェックに動的 QC を用いない

(2) 船舶 GNSS 利用の影響評価

2022 年 3 月 22 日時点のルーチンをベースに構築した実験を CNTL として、CNTL に船舶 GNSS を利用した試験を TEST とした。統計期間は 2021 年夏（7 月 1 日〜7 月 15 日)、2022 年冬（1 月 1 日〜1 月 15 日）で 3 時間ごとの実行である。また同化利用した船舶 GNSS の数は、夏は船舶 4 隻、冬は船舶 6 隻であった。

観測値と解析値の差 (O−A)、O−B の標準偏差の CNTL に対する変化を確認した結果、概ね中立〜やや

[1] 空間間引き距離、および正時のデータが利用できない場合に利用するデータの時間範囲については、局地解析がメソ解析より高解像度であるためメソ解析と異なる設定にしている。また早期利用開始することを優先して、動的 QC の導入は見合わせた。

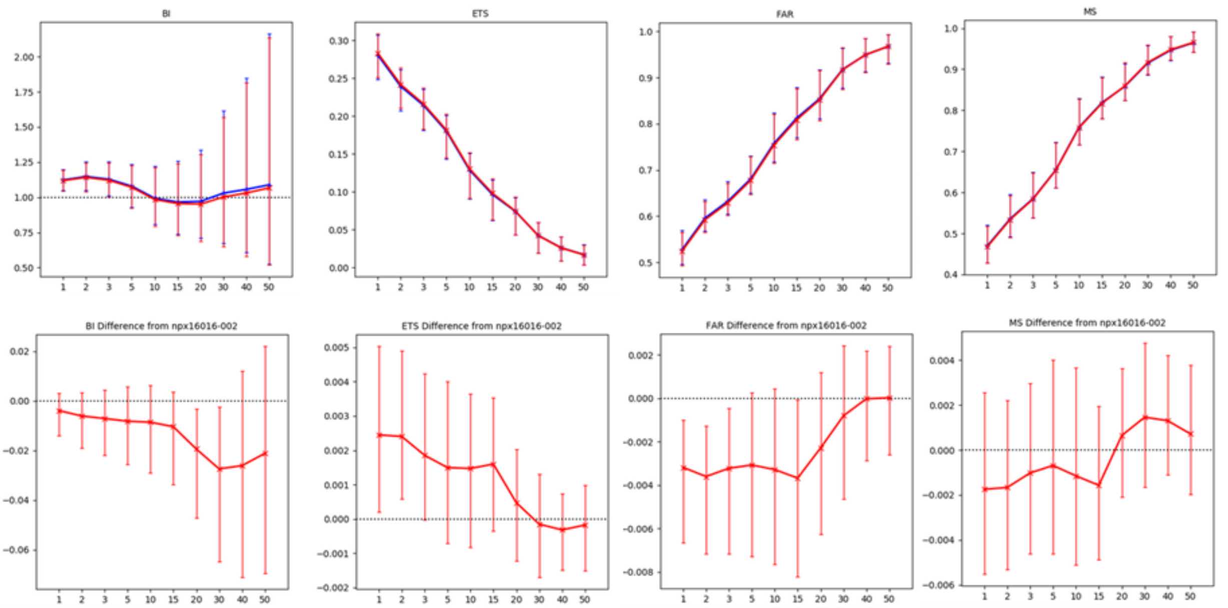

図 3.9.2　解析雨量を参照値とした 3 時間降水量別の降水予測スコア（20 km 平均）。左からバイアススコア、ETS、空振り率、見逃し率。上段は、CNTL（青）TEST（赤）のスコアを、下段は TEST-CNTL のスコアの差分を示しており、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。横軸は予測時間 [時間 (hour)]。統計期間は 2021 年 7 月 1 日から 2021 年 7 月 31 日。

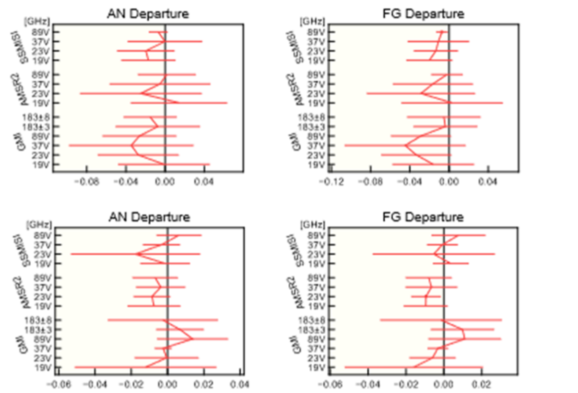

図 3.9.3　局地解析における観測値と解析値（左図：O−A）、観測値と第一推定値との差（右図：O−B） の標準偏差の TEST の CNTL に対する変化率 [%]。上段は夏季、下段は冬季。観測測器はマイクロ波イメージャで、縦軸に周波数 (GHz) および偏波を表す。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

改善であり、マイクロ波イメージャ等では改善であった（図 3.9.3）。降水検証は概ね中立となった（図略）。

図 3.9.4 は鹿児島・宮崎・熊本県の大雨事例であり、2021 年 7 月 9 日に東シナ海で GNSS 観測していた船舶が航行していた。予報対象時刻 2021 年 7 月 9 日 21UTC とした 9 時間予報では、可降水量の増加した領域（黒点線内）で、CNTL と比べると TEST では降水分布が広がり、解析雨量の分布に近づいていることが確認できる。

3.9.4　まとめ

線状降水帯予測精度向上の取り組みの一環として、船舶 GNSS 観測データのメソ解析における利用方法の改良、および局地解析での新規利用について開発、調査を進めてきた。その結果、数値予報システムに与える影響は概ね中立、もしくは、やや改善傾向であり、改善がみられる降水事例も確認できたため、2023 年 3 月 28 日より本変更を適用した。

参考文献

石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54–60.

気象庁, 2022: メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用. 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, 61–65.

気象庁, 2023a: 線状降水帯の予測精度向上に向けた取組の進捗状況について. 線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ（第 6 回）, 気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjoukousuitai_WG/part6/part6-shiryo1.pdf.

気象庁, 2023b: データ同化での船舶 GNSS 利用に関する開発. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 89–90.

大野木和敏, 高田伸一, 小室肇, 1997: データ品質管理と解析前処理. 数値予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 17–44.

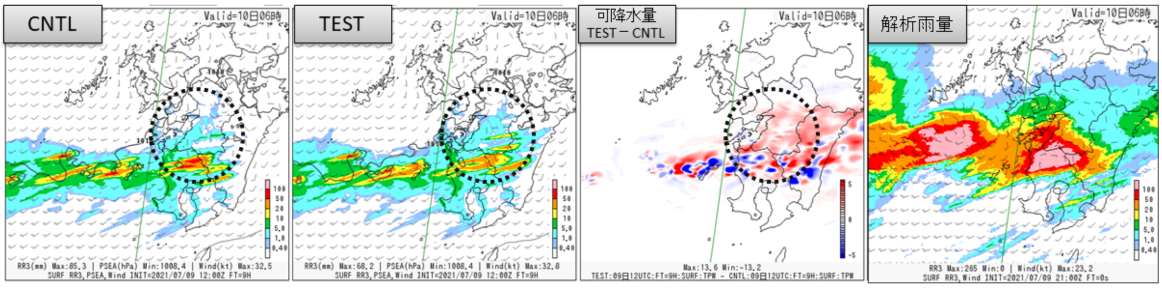

図 3.9.4　局地数値予報システムにおける降水の改善事例。2021 年 7 月 9 日 12UTC を初期値とした 9 時間予測（2021 年 7 月 9 日 21UTC）。左から CNTL での前 3 時間雨量、TEST での前 3 時間雨量、可降水量の TEST-CNTL の差分、3 時間積算解析雨量。

3.10 メソ解析および局地解析におけるアメダス湿度計データの新規利用

3.10.1 はじめに

線状降水帯などに伴う集中豪雨の予測精度の向上には大気下層の水蒸気の監視能力の強化及び、その観測のデータ同化での利用による予測精度の向上が重要であるため、令和 3 年 3 月以降、順次全国のアメダス観測所への湿度計の設置が進められている。令和 2 年度には 54 箇所、令和 3 年度には更に 103 箇所のアメダス観測所への湿度計の設置が完了しており、最終的には約 700 箇所のアメダス観測所に湿度計が設置される予定である。

既に局地解析では約 150 箇所の地上気象官署及び特別地域気象観測所で観測される相対湿度（以降、SYNOP 湿度とする）をデータ同化に利用している (永戸ほか 2013)。事前に行った棄却実験の結果からは、地上湿度を同化することにより、地上では高温・湿潤化して気圧が低下、降水が増加することが見込まれる。今回、この SYNOP 湿度データの利用処理をベースにアメダス湿度データの局地解析での新規利用に向けて開発を進めるとともに、メソ解析での日本の SYNOP 湿度、及びアメダス湿度の利用に向けた開発にも取り組み、令和 5 年 3 月 28 日にメソ解析、局地解析ともに運用を開始した。本節では運用に向けた調査結果について述べる。

3.10.2 開発の概要

(1) 相対湿度から地上比湿の算出手法

前述のように局地解析では SYNOP 湿度を利用しているが、相対湿度から比湿へ変換したうえで同化利用している。比湿への変換には地上気圧が必要となるが、SYNOP 地点では地上相対湿度と同時に地上気圧を観測しており、その観測データを利用している。一方、アメダス観測所では地上気圧は観測していない。そのため、メソ解析、局地解析とも、アメダスでは地上気圧として第一推定値をアメダス観測点に内外挿[1]した気圧（以下、推定気圧）を利用して相対湿度から比湿へ変換することとした (気象庁 2023)。

なお、今回導入した相対湿度計の測定誤差である ±0.8%（気温 23°C；比湿にして ±0.14 g/kg 程度）と比べて、以下のように局地解析の推定気圧を用いて変換した地上比湿（以下、推定比湿）の誤差は十分小さく、推定気圧の利用について問題はない。図 3.10.1 に局地解析で見積った誤差の見積もりを示す。

- 推定気圧の誤差：±1 hPa 程度
- 推定比湿の誤差：±0.02 g/kg 程度

[1] 比湿についてはアメダス観測点の値として計算されるが、モデル面への標高補正はしていない。

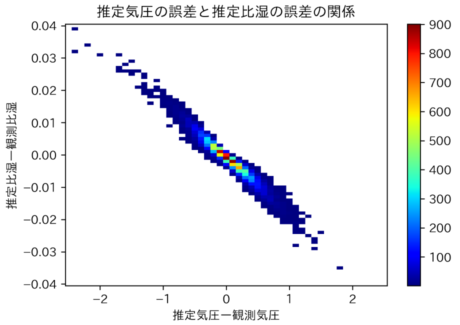

図 3.10.1 気圧と比湿の誤差の関係（SYNOP 観測による）。縦軸は局地モデルによる推定気圧を用いて変換した比湿と気圧観測値を用いて変換した比湿の差 [g/kg]、横軸は推定気圧と気圧観測値の差 [hPa]、カラーバーはサンプル数。実験期間は 2020 年 7 月 2 日から 2020 年 7 月 15 日。

(2) 品質管理処理の開発項目

品質管理処理については局地解析での SYNOP 湿度利用の処理をベースにしている。今回新たに追加した開発項目を以下に記載する。

(i) 空間整合性チェックの導入
モデルのバイアスが大きい時でも観測を利用できるようにするため、地上比湿にも空間整合性チェックを導入した。

(ii) 動的 QC の導入
周囲の湿度の変化が大きい時（特に前線通過時など）にはグロスエラーの基準値を緩くすることが望ましく、この基準値を第一推定値の空間変動率によって変える動的 QC(大野木ほか 1997) をメソ解析[2]について導入した。

(iii) 観測誤差・予報誤差の設定
地上比湿の観測誤差と空間整合性チェックで使用する地上比湿の予報誤差を Hollingsworth-Lönnberg 法 (Hollingsworth and Lönnberg 1986)[3]を用いて以下で設定した。

○ 局地解析[4]
- アメダス比湿の観測誤差：0.7g/kg
- SYNOP 比湿の観測誤差：0.7g/kg
- 地上比湿の予報誤差：0.7g/kg

○ メソ解析
- アメダス比湿の観測誤差：0.75g/kg

[2] アメダス湿度計データの早期利用開始を優先させたため、今回はメソ解析のみでの導入となった。
[3] 基本的には観測値と第一推定値の差 (O-B) の統計等に基づいている。統計期間は 2021 年 6 月 28 日〜2023 年 7 月 15 日。
[4] これまでは SYNOP 比湿の観測誤差を 0.8 g/kg にしていた。

- SYNOP 比湿の観測誤差：0.82g/kg
- 地上比湿の予報誤差：0.7g/kg

3.10.3　メソ数値予報システムへのインパクト

開発時点において最新である 2022 年 3 月時点の現業メソ数値予報システム相当の実験システムを用い、性能評価試験を実施した。当時の現業システム相当を CNTL とし、これに SYNOP 湿度、アメダス湿度を同化して新たな品質管理手法を追加した実験を TEST とした。実験期間は、冬季については 2021 年 1 月 1 日から 1 月 31 日、夏季については 2021 年 7 月 1 日から 7 月 31 日とした。

図 3.10.2 は地上湿度同化による地上湿度の解析値・予測値の精度検証であるが、地上湿度を同化すると予測前半で湿潤に変化し予測前半を中心に地上湿度の平均誤差、RMSE を改善する効果が見られた。

図 3.10.3[5] にメソ解析で地上湿度を同化に利用した場合の改善事例を示す。この事例では、地上湿度ありの方が地上湿度なしに比べて宮城県付近の降水を強め、3 時間積算降水量の予測が実況に近づいていることが分かる。アメダス及び SYNOP の地上湿度観測の同化によって初期時刻における静岡県付近の可降水量が増加したため、12 時間予測において風下にあたる宮城県付近の降水量が増加し、より実況に近づいたと考えられる。

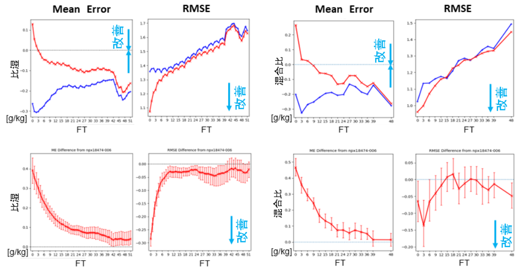

図 3.10.2　メソ数値予報システムにおける地上湿度同化による解析値・予測値の精度検証。左二列は地上観測比湿 [g/kg]、右二列はゾンデ 1000 hPa 観測混合比 [g/kg] を参照値とした平均誤差（左）と RMSE（右）。上段はそれぞれの計算値で赤が地上湿度同化あり、青が同化無しの結果、下段は上段の赤線-青線の差でエラーバーは有意検定 95% 信頼区間を示す。

3.10.4　局地数値予報システムへのインパクト

開発時点において最新である 2022 年 3 月時点の現業局地数値予報システム相当の実験システムを用い、性能評価試験を実施した。当時の現業システム相当を CNTL とし、これにアメダス湿度を同化し新たな品質管理手法を追加した実験を TEST とした。実験期間は、冬季については 2021 年 1 月 1 日から 1 月 31 日、夏季については 2021 年 7 月 1 日から 7 月 31 日とした。

[5] 本事例は 2022 年 7 月中旬から 9 月初めまで実施していた準リアルタイムでの実験環境での実行結果を示している。

図 3.10.4 は冬期間における 1 時間降水量 [mm/h]（検証格子 10 km）の閾値 10 mm/h の対解析雨量検証結果と TEST と CNTL の差である。見逃し率、空振り率がともに減少して ETS が増加しており、降水予測の改善が見られた。

図 3.10.5 に局地解析でアメダス湿度を同化に利用した場合の改善事例を示す。この事例では地上湿度を同化することにより全体的に湿度が増加している。特に図に示した予報時間 10 時間では、矢印で示した京都、伊豆、東京で雨が強まり、20 mm/h 以上の降水域が拡大して実況に近づいている。

3.10.5　まとめ

局地解析についてアメダス湿度データ導入、およびメソ解析での日本の SYNOP 湿度、及びアメダス湿度の利用のための同化システムを構築した。構築したシステムを用いて品質調査や同化実験等の調査を行い、同化処理の設定に問題ないことを確認するとともに、追加した地上湿度データによって数値予報システムの解析精度や予測精度が改善することを確認した。この結果を踏まえて令和 5 年 3 月 28 日にメソ解析、局地解析ともに運用を開始した。

今後の課題としては、令和 4 年度以降に整備された湿度計の導入がある。特に令和 4 年度に整備された湿度計は測器の型式が異なるため、事前に測定値の挙動の違いや誤差の傾向の違いを調べる必要がある。

参考文献

永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 日本域拡張・高頻度化された局地モデルの特性. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18–41.

Hollingsworth, A. and P. Lönnberg, 1986: The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part 1: The wind field. 111–136.

気象庁, 2023: アメダス湿度データ利用に関する開発. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 100–101.

大野木和敏, 高田伸一, 小室肇, 1997: データ品質管理と解析前処理. 数値予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 17–44.

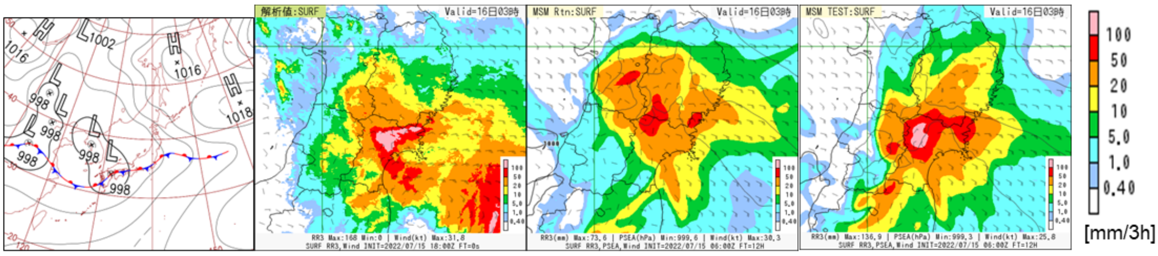

図 3.10.3　2022 年 7 月 16 日 3 時 (JST) における前 3 時間降水量 [mm/3h] の分布と天気図（同日 9 時）。左から天気図、解析雨量、CNTL のメソ予報予測値、TEST メソ予報予測値。予測値は 2022 年 7 月 15 日 15 時 (JST) 初期値から 12 時間後の予測。

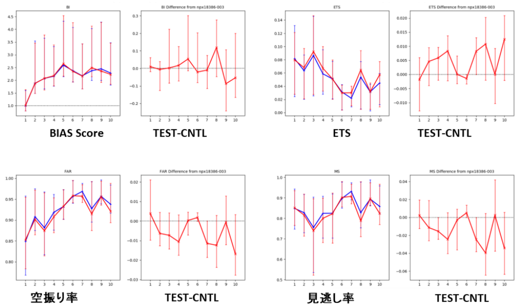

図 3.10.4　冬期間における 1 時間降水量 [mm/h]（検証格子 10 km）の閾値 10 mm/h の対解析雨量検証結果と TEST と CNTL の差で、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。（左上）バイアススコア、（右上）エクイタブルスレットスコア、（左下）空振り率、（右下）見逃し率でそれぞれ右に TEST-CNTL の図も併記。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示す。

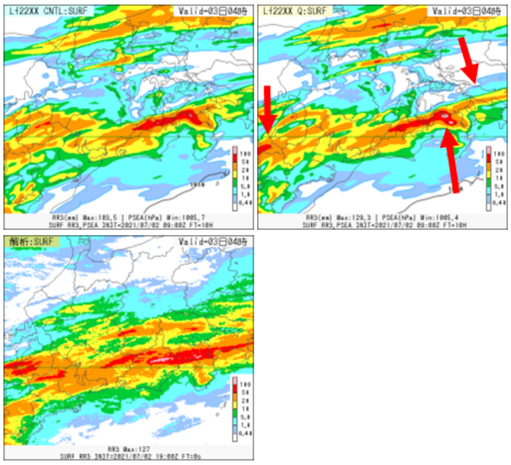

図 3.10.5　2021 年 7 月 3 日 4 時 (JST) における前 3 時間降水量 [mm/3h] の分布。上段左は CNTL の予測値、右は TEST 予測値。下段は解析雨量。予測値は 2021 年 7 月 2 日 18 時 (JST) 初期値の 10 時間予測。

3.11 局地解析における衛星搭載マイクロ波散乱計データの新規利用

3.11.1 はじめに

極軌道衛星などに搭載されたマイクロ波散乱計は、マイクロ波を海面に向けて照射し、海面の風浪に散乱されて戻ってくる散乱波の強さ（散乱断面積）を観測する能動型のセンサである。このセンサから得られる海上風は、数値予報の初期値解析、波浪の監視、天気図解析などに幅広く利用されている (大橋・今泉 2004)。全球・メソ解析いずれにおいても、海上風プロダクトを同化することにより風の場が現実に近づき、気圧場の分布や収束発散の再現性が向上することがこれまでの開発成果から判明している。局地解析においても、海上風プロダクトの同化を導入することで同様の効果が得られることが期待される。

全球解析では欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT) が運用する現業極軌道衛星 Metop-A に搭載された散乱計 ASCAT により観測され、オランダ王立気象研究所 (KNMI) により算出された海上風プロダクトについて 2009 年 7 月から現業利用を開始した。その後、2013 年 11 月から同じく極軌道衛星の Metop-B、2019 年 12 月からは Metop-C 搭載の散乱計 ASCAT を現業利用している (高橋 2010; 守谷ほか 2014; 守谷 2016)。

メソ解析でも Metop-A, B に搭載された散乱計 ASCAT の海上風プロダクトを 2015 年 12 月から現業利用している (守谷 2016)。2019 年 3 月からは、より解像度の高い ASCAT 海上風プロダクトの利用を開始した (太田ほか 2019)。更に 2021 年の 12 月から Metop-C/ASCAT 海上風データも現業利用を開始した。

Metop-A の運用は 2021 年 11 月 14 日に終了しており、現在 Metop シリーズについては Metop-B、Metop-C が運用中である。このように全球解析、メソ解析では既に Metop-B,C/ASCAT 海上風を利用している状況にあるが、局地解析でもこれらの衛星データの導入に向けた開発を進め、2023 年 3 月 28 日に局地解析での利用を開始した。本節では利用開始に向けた調査についてその概要を述べる。

3.11.2 性能評価試験

(1) 実験設定

開発時点において最新である 2021 年 5 月時点の現業局地数値予報システム相当の実験システムを用い、性能評価試験を実施した。当時の現業システム相当を CNTL とし、これに ASCAT 海上風プロダクトを追加した実験を TEST とした。実験期間と実験設定は、冬季については 2020 年 1 月 11 日から 1 月 21 日（Metop-A, B, C を同化）、夏季については 2020 年 7 月 2 日から 7 月 8 日（Metop-B, C を同化）とした。なお、局地解析に導入したマイクロ波散乱計海上風の QC 処理や観測誤差についてはメソ解析 (守谷 2016) と同様の設定で 0.5° 間隔での間引き、観測誤差は 3.0 m/s とした[1]。

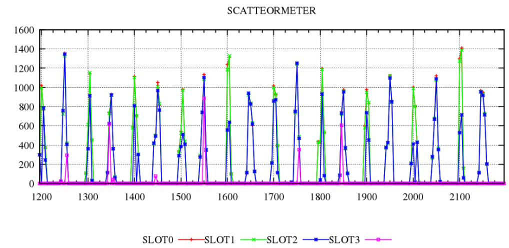

図 3.11.1 実験期間におけるデータ利用数時系列。縦軸はデータ利用数、横軸は実験期間の 2020 年の 1 月 12 日から 1 月 21 日までの期間である。なお局地解析では、解析対象時刻の 3 時間前を対象としたメソモデルの予測値を初期値とし、1 時間ごとに 3 次元変分法による解析（スロット）および 1 時間予測を 3 時間分繰り返し、解析値を得ている (永戸ほか 2012, 2013)。

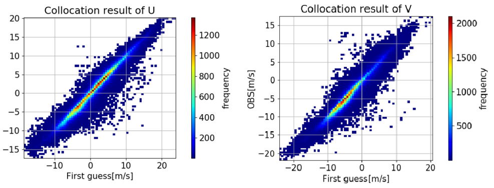

図 3.11.2 東西風（左）、南北風（右）について観測値と第一推定値の散布図（冬期間 2020 年の 1 月 12 日から 1 月 21 日）。縦軸は散乱計による観測値、横軸は第一推定値。単位は [m/s]。シェードはサンプル数を示し、暖色系ほどサンプル数が多い。

(2) データの特性

性能評価試験結果から ASCAT プロダクトの特性について調べた結果を示す。まずは各解析時刻における、散乱計のデータ利用状況を示す（図 3.11.1）。この図より、Metop 衛星が日本付近を通過する時刻に対応する 01UTC や 12UTC を中心に、2 つのピークがあることが分かる。

解析に用いられた ASCAT 海上風の観測値と第一推定値の差 (O−B) の標準偏差や平均値を確認した。O−B のヒストグラムについては正規分布に近かった（図略）。また第一推定値と観測値の散布図からも観測値は第一推定値と概ね整合的な分布をしていることがわかった（図 3.11.2）。更に、O−B 平均と標準偏差などの統計値はすでに利用開始している全球解析（O−B 平均 ±0.13 m/s、標準偏差 1.3 m/s 程度）、メソ解析（O−B 平均 −0.15 ∼ −0.3 m/s 程度、標準偏差 1.6 m/s 程度）とほぼ同程度となっており、風速毎に閾値を設けての比較でも極端な変動はみられなかった（表 3.11.1、表 3.11.2）。

[1] マイクロ波散乱計データの利用を早期に開始するため、局地解析向けの設定の最適化は実施しなかった。

表 3.11.1 局地解析におけるマイクロ波散乱計の東西風、南北風に関する O−B 統計（夏期間）。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	−0.262	−0.232
標準偏差	1.028	1.054
サンプル数	629527	629527

表 3.11.2 局地解析におけるマイクロ波散乱計の東西風、南北風に関する O−B 統計（冬期間）。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	−0.248	−0.417
標準偏差	1.323	1.305
サンプル数	155534	155534

(3) 実験結果の評価

図 3.11.3 に AMV 風速について O−B の標準偏差変化率の例を示すが、風の場については第一推定値に対して概ね中立であった。その他全般的にも統計検証の結果は中立であった（図略）。

予報実験の結果はおおむね中立〜改善で、地上の気温や比湿などにも改善効果がみられた（図略）。図 3.11.4 は冬期間における 1 時間積算降水量（検証格子 20 km）の閾値別検証結果であるが、特に降水量 5 mm 以上について統計的に有意ではないが改善傾向が見られていることが分かる。

2020 年 7 月 6 日の九州の豪雨事例において、散乱計海上風データを同化した実験では、前線に伴う降水帯の 3 時間最大降水量が解析雨量に近づくことが確かめられた。これは本データを同化したことによって風の分布が影響を受け、地上の収束発散場を改善したためと考えられる（図 3.11.5）。以上により、散乱計海上風の利用については特段問題ないことが確かめられた。

3.11.3 まとめ

局地解析におけるマイクロ波散乱計データの利用を早期に開始するために、QC 処理や観測誤差をメソ解析と同様の設定にして局地解析用のマイクロ波散乱計海上風のデータ同化システムを構築した。構築したシステムを用いてマイクロ波散乱計の東西風速、南北風速の O-B 平均、標準偏差や同化に使用されるデータの分布などを調査し、同化処理の設定に問題がないことを確認した。さらに同化実験の結果から下層風で中立、降水の改善等が見られた。この結果を踏まえ、2023 年 3 月 28 日に、局地解析での利用を開始した。

散乱計海上風についての今後の課題については、以下に挙げる通りとなっている。

一つ目は、中国が運用している極軌道衛星 HY-2 の同化利用開始である。HY-2 衛星については、2024 年 3 月の計算機更新後早期の利用に向けて、データ品質の確認やデータ同化実験などを開始している。

二つ目は、間引き間隔および観測誤差の最適化を含

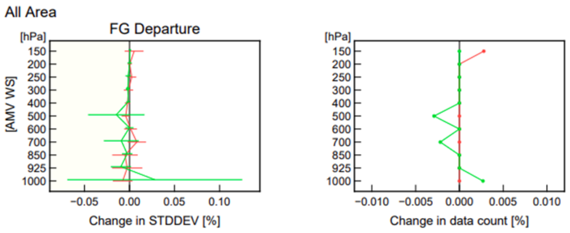

図 3.11.3 O−B の標準偏差（左）、データ利用数（右）の変化率（AMV 風速）。赤が夏期間、緑が冬期間のもの。

む高密度データの有効利用である。今回の海上風プロダクトの利用では間引き間隔は従来と同一にしたため、高密度データの大部分を利用できていない。観測誤差や間引き間隔の最適な設定値を得るための調査だけでなく、スーパーオブザベーションに代表されるような複数の観測データを空間平均化して同化する新たな手法の導入も視野に入れ、データを最大限に活かす改良が必要である。

三つ目は、EUMETSAT が提供している EARS-ASCAT[2] という速報性を重視した配信サービスのデータの利用である (小屋松 2020; 気象庁 2021)。局地解析では解析時刻の 30 分後、メソ解析は解析時刻の 50 分後までに入電したデータしか利用されないため、観測後できるだけ早くデータを入手する必要がある。EARS-ASCAT は観測から 30 分程度で配信されており、通常の配信までの時間（観測から 2 時間程度）と比較して早期にプロダクトが入手可能であり、既に全球解析では利用が開始されている。一方、メソ解析では同化ウインドウの一部が前解析時刻と重複していることから、前解析時刻で利用された EARS-ASCAT のデータと同一内容の通常配信データが重複して利用される問題が生じる (気象庁 2021) ため、これまでは利用を見送ってきた。今後メソ解析でも EARS-ASCAT の利用が可能になれば、より解析時刻に近い気象現象の情報を持つ観測データを局地解析やメソ解析へ反映することが期待されるので、メソ解析、局地解析での利用可能性について検討する。

四つ目は、ASCAT Coastal Wind の利用に関する海岸周りの処理の見直しである。現在の同化システムでは、 ASCAT 海上風について海岸付近ではモデル地形を用いることによる海陸境界の誤判定を避けるため、陸地から遠方のデータのみを使っている。しかし、現在の数値予報モデルは ASCAT 海上風が利用開始された時と比較して高解像度化されており、従前の処理を今後も続けるべきかどうかは検討の余地がある。特にメソ・局地解析では陸地に近いものを使っても問題ないかどうかを検討する必要があると考えられる。

[2] https://www.eumetsat.int/ears-ascat

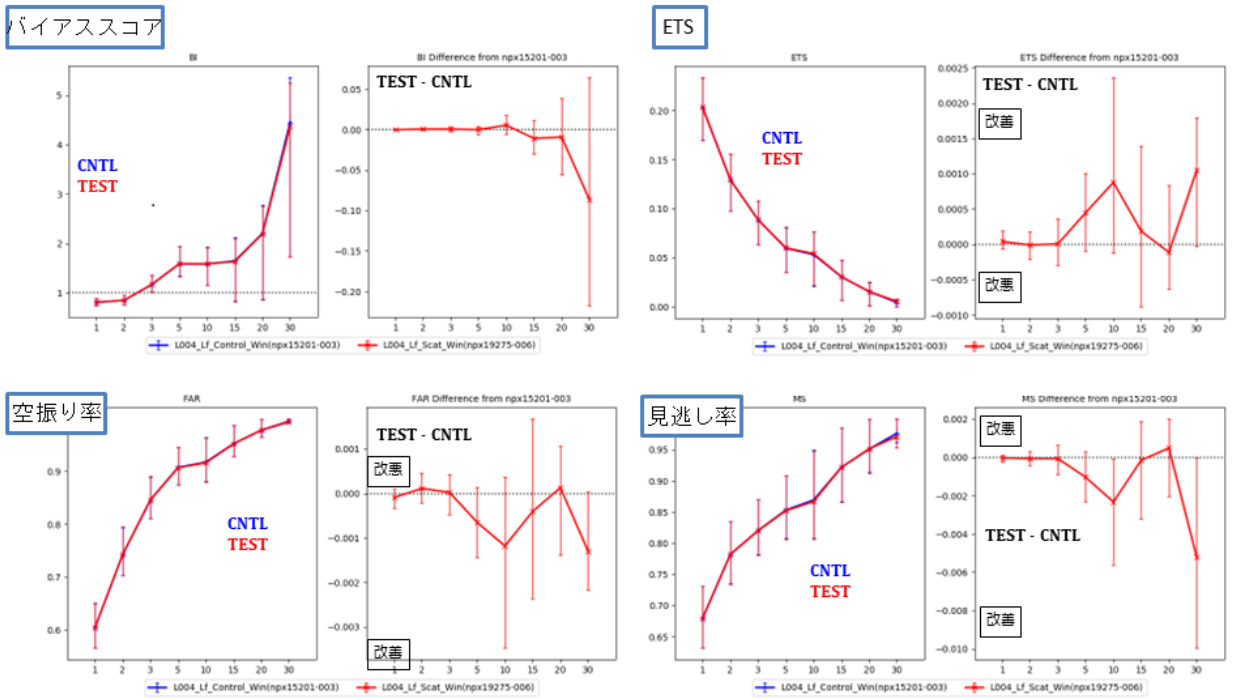

図 3.11.4 冬期間における 1 時間積算降水量（検証格子 2 km）の閾値別検証結果。左上：バイアススコア、右上：エクイタブルスレットスコア (ETS)、左下：空振り率、右下：見逃し率をそれぞれ表す。青線が CNTL、赤線が TEST の結果を示す。

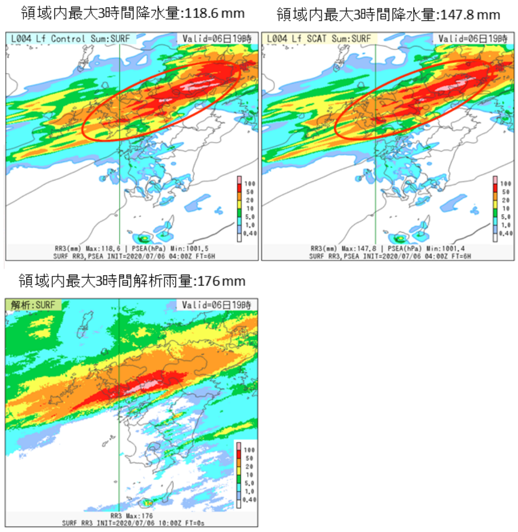

図 3.11.5 局地数値予報システムにおける降水の改善事例。2020 年 7 月 6 日 13JST を初期値とした 3 時間積算解析雨量の 6 時間後予測（2020 年 7 月 9 日 19JST）。上段左から CNTL、TEST、下段は解析雨量。

参考文献

永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 78–86.

永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 局地モデル運用の目的と仕様. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 78–86.

気象庁, 2021: ASCAT 早期配信データの利用. 数値予報開発センター年報（令和 2 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 30.

小屋松進, 2020: マイクロ波散乱計. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 124–128.

守谷昌己, 大和田浩美, 山下浩史, 江河拓夢, 2014: Metop-B データの利用開始. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 104–107.

守谷昌己, 2016: マイクロ波散乱計の全球解析での利用方法の変更及びメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55–57.

大橋康昭, 今泉孝男, 2004: メソ解析へのマイクロ波散乱計海上風の利用. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 66–70.

太田行哉, 岡部いづみ, 小屋松進, 西本秀祐, 谷寧人, 2019: メソ解析における観測データ利用の改良及びメソ数値予報システムにおける北西太平洋高解像度日別海面水温解析の利用開始. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61–67.

高橋昌也, 2010: マイクロ波散乱計 ASCAT データの全球解析での利用. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43–47.

3.12　全球波浪モデルの高解像度化および延長予報の頻度増強

3.12.1　概要

現在、気象庁では波浪注意報・警報のための基礎となる波浪予測を行うための決定論波浪モデルとして、全球波浪モデル (GWM) と沿岸波浪モデル (CWM) を運用している (竹内ほか 2012)。これら波浪モデルの精度向上のため、気象庁は 2023 年 1 月に、GWM の水平解像度高解像度化と、264 時間先までの延長予報頻度増強を実施した。前者は、「波浪モデルは、沿岸域などの高波をより精緻に表現するため、高解像度化などによる改善を図っていく必要がある」とした「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」に示された目標の一つである。変更の詳細や業務化試験による統計検証については、数値予報開発センター年報（令和 4 年）第 4.12 節 (気象庁 2023) を参照されたい。以下に概要を示す。

- GWM の水平解像度を 0.5°（約 55km）から 0.25°（約 27km）へ高解像度化した。業務化試験による統計検証では、従来 GWM と比較して概ね中立だったが、地形が高解像度化されることで島嶼・海峡等の周辺での波高表現に改善が認められた。
- GWM を側面境界条件として用いる CWM、全球波浪解析を初期値として用いる WENS（波浪アンサンブル予報システム）への影響評価を行ったところ、精度は概ね中立であった。
- 264 時間先までの延長予報の頻度を 1 日 1 回（12UTC 初期値）から 1 日 2 回（00,12UTC 初期値）に増強した。00UTC 延長予報は 12UTC と同様の精度であった。

3.12.2　今後

以上のように、2022 年度までに概ね開発が終了していた GWM 改善（高解像度化および延長予報の高頻度化）について、2023 年 1 月に現業化を行った。今後は GWM に引き続いて CWM の水平高解像度化による予測精度改善等に取り組む予定である。

参考文献

気象庁, 2023: 波浪モデル. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 128–129.

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.

3.13 気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算完了

3.13.1 はじめに

当庁はこれまで、第 1 次 (JRA-25: Japanese 25-year Reanalysis; Onogi et al. 2007)（2005 年度完成）及び第 2 次 (JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis; 古林ほか 2015)（2012 年度完成）長期再解析を実施してきた。長期再解析の目的は、季節アンサンブル予報システム (EPS: Ensemble Prediction System) 等の各種数値予報モデルの開発及び精度評価、地球温暖化等の気候監視や異常気象分析業務等に利用可能な、長期間の均質で高品質な気候データセットの作成及び提供である。

数値予報課では、長期再解析データの期間延長と品質向上を図るため、1947 年 9 月以降を対象とする気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century; Kosaka et al. 2024) を実施した。JRA-3Q では、JRA-55 以降の現業全球数値予報システム及び海面水温 (SST) 解析の開発成果や、国内外の気象機関等によるデータレスキュー、衛星運用機関による衛星データの再処理による過去の観測データ拡充の成果等を活用している。

JRA-3Q は、2014 年度から本計算に向けた準備（実行システム構築、観測データ取得・整備、予備実験等）を進め、2019 年 8 月から本計算を開始し、2022 年 11 月末に過去期間の全ての計算を完了した。品質評価については、気象研究所気候・環境研究部第一研究室と協力して行った。また、2021 年 10 月から JRA-3Q 版気候データ同化システムの準リアルタイム運用を開始している。

JRA-3Q データは、2022 年 2 月に運用開始した新しい季節 EPS や 2022 年 3 月に更新した全球 EPS の開発・精度評価、気候監視・異常気象分析（2023 年 5 月に JRA-55 データから JRA-3Q データに切替え）、過去の災害事例の調査、海況解析、温室効果ガス解析等、庁内の幅広い業務で活用されている。また、JRA-3Q データは気候変動の影響評価や再生可能エネルギー立地条件調査等の気候変動対策の分野をはじめ、様々な分野での活用が期待されることから、2023 年 3 月から民間気象業務支援センター等を通して社会に広く提供している[1]。

本稿では、JRA-3Q の仕様全般と基本特性について解説する。なお、本稿は日本気象学会・気象集誌第 102 巻第 1 号に発表した JRA-3Q 総合報告論文 (Kosaka et al. 2024) を和文で要約したもので、図表の出典は明示されているものを除き全て同論文である。但し、参考文献の一部を和文のものに変更してある。

[1] JRA-3Q データの取得方法については、JRA-3Q ホームページ（https://jra.kishou.go.jp/JRA-3Q/index_ja.html）を参照されたい。

3.13.2 データ同化システム

表 3.13.1 に JRA-3Q のデータ同化システムの概要と、比較のために JRA-55 のデータ同化システムの概要を合わせて示す。JRA-3Q は 2018 年 12 月時点の現業全球データ同化システム (JMA 2019) の低解像度（TL479 解像度）版に基づいており、JRA-55 実施以降の現業システムにおける開発成果が反映されている。予報モデルについては、物理過程の大幅な改良により放射収支、地表面顕熱・潜熱フラックス、降水分布等における系統誤差が縮小した気象庁の全球スペクトルモデル (GSM) が使用されている（表 3.13.2）。また、2018 年 6 月に更新されたスーパーコンピュータシステムにおける計算機資源増強により JRA-55 よりも高解像度化されている。

(1) 背景誤差共分散

JRA-3Q データ同化システムで用いている背景誤差共分散は、2018 年 12 月時点の気象庁現業システムのものと基本的に同じであり、JRA-55 と同じ静的な背景誤差共分散モデルに基づいている。この背景誤差共分散モデルは、NMC 法 (Parrish and Derber 1992) を用いて、2015 年の 1 年間の 24 時間予報と 48 時間予報との差から統計的に算出されたものである。

なお、(1) ラジオゾンデ定時観測の国際的ネットワーク確立前の 1957 年以前、(2) 衛星観測データ導入前の 1958〜1972 年、(3) 旧世代の衛星観測システムを用いる 1973 年 1 月〜1998 年 7 月の期間については、背景値の誤差が増加することを考慮するために、対数比湿以外の制御変数の背景誤差共分散をそれぞれ (1) 155%、(2) 50%、(3) 11%増加させている。これらのスケーリングファクターは、Desroziers et al. (2005) による観測空間での背景誤差の診断法を、1999/2000 年を対象にしてそれぞれ行った、(1) 1950 年代前半相当縮退観測システムインパクト実験、(2) 衛星排除インパクト実験、(3) TOVS ／改良型 TOVS (ATOVS) 衛星観測システム比較実験の D 値（観測値 − 背景値）に適用して得たものである。

(2) 陸面解析

JRA-55 ではオフライン版気象庁生物圏モデル (SiB) を大気モデルの出力で強制することにより陸面解析値を作成したが (古林ほか 2015)、観測に基づいた大気強制力を与えておらず、オフラインモデルを用いる利点が活用されていなかった。これを踏まえ、JRA-3Q では前のサイクルで作成された陸面予報値を基本的にそのまま予報初期値として利用することとした。ただし、毎日 18UTC の陸面解析値には積雪深解析の結果を反映させている。

(3) 積雪深解析

JRA-3Q では、JRA-55 と同様、積雪深解析の第一推定値を陸面過程の積雪深と衛星積雪域から作成し、

表 3.13.1　JRA-55 と JRA-3Q で用いたデータ同化システムの仕様。中黒の箇条書きは JRA-55 に対する JRA-3Q の優位点を表す。

	JRA-55	JRA-3Q
解析期間	1958 年以降	1947 年 9 月以降
基本システム	2009 年 12 月時点の気象庁現業システム (JMA 2007, 2013)	2018 年 12 月時点の気象庁現業システム (JMA 2019)
水平解像度	TL319（約 55km）	TL479（約 40km）
鉛直層	0.1hPa までの 60 層	0.01hPa までの 100 層
解析手法	4 次元変分法（インナー解像度 T106）	4 次元変分法（インナー解像度 TL319）
ラジオゾンデ気温観測バイアス補正	2006 年まで：RAOBCORE V1.4 (Haimberger et al. 2008) 2007 年以降：RAOBCORE V1.5 (Haimberger et al. 2012) ・ERA に基づいたバイアス推定	RISE(RICH with solar elevation dependent) v1.7.2 (Haimberger et al. 2012) ・周辺地点との比較に基づいたバイアス推定 ・季節依存性の考慮（1979 年以降）
衛星輝度温度	RTTOV-9.3 (Saunders 2008)	RTTOV-10.2 (Saunders et al. 2012) ・計算精度向上 ・温室効果ガス濃度変動の考慮
陸面解析	オフライン SiB	予報モデルの陸面予報値をサイクル
SST 及び海氷	COBE-SST（1 度格子） (Ishii et al. 2005)	1985 年 5 月まで：COBE-SST2（1 度格子） (Hirahara et al. 2014) 1985 年 6 月以降：MGDSST（0.25 度格子）（栗原ほか 2006）
オゾン	1978 年まで：気候値 1979 年以降：MRI-CCM1(T42L68) (Shibata et al. 2005)	MRI-CCM2(TL159L64) (Deushi and Shibata 2011) ・新しいモデルを用いて全期間作成

表 3.13.2　JRA-55 と JRA-3Q で用いた予報モデルの仕様。中黒の箇条書きは JRA-55 に対する JRA-3Q の優位点を表す。

	JRA-55 2009 年 12 月時点の気象庁 GSM (JMA 2007, 2013)	JRA-3Q 2018 年 12 月時点の気象庁 GSM (本田・坂本 2019)	改良の効果
長波放射	散光因子近似を用いたバンド射出率法 テーブル参照法（成層圏で重要な吸収体）	2 方向吸収近似 相関 k-分布法（成層圏で重要な吸収体）	・成層圏気温プロファイルの改善
雲放射	ランダムオーバーラップ（短波）	マキシマム・ランダムオーバーラップ（短波） 水雲粒光学特性の見直し 積雲上昇流域の雲量診断の導入	・放射収支の改善
エーロゾル	陸上型、海上型	硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩、砂塵	・放射収支の改善
積雲対流	Arakawa-Schubert スキーム	Arakawa-Schubert スキーム ・対流性上昇流内での降水変換率の導入 ・雲底以下の対流性上昇モデルの改良 ・融解・蒸発過程の精緻化	・加熱プロファイルの改善 ・降水分布の改善
雲	Smith スキーム 層積雲： 川合 (2004)	Smith スキーム：雲水量計算法の改良 層積雲：発動条件に相対湿度の閾値を追加 雲氷落下スキームの改良	・対流圏中層乾燥バイアスの軽減 ・過剰な層積雲を抑制 ・放射収支の改善
接地境界層	Monin-Obukhov 相似則 ・非反復解法 (Louis et al. 1982)	Monin-Obukhov 相似則 ・普遍関数法 (Beljaars and Holtslag 1991)	・顕熱・潜熱の過剰バイアスの緩和
非地形性重力波抵抗	Rayleigh 摩擦 （50hPa から上層）	Scinocca (2003)	・QBO の表現改善
陸面	生物圏モデル (SiB) (佐藤 1989) ・温度 1 層、水分 3 層 ・雪 1 層	改良型 SiB ・土壌層 7 層（温度・水分共通） ・積雪 4 層（最大）	・地上気温の日変化の表現改善
海氷	1 層海氷モデル 開水・海氷排他格子	4 層海氷モデル 開水・海氷混在格子	・極域の低温バイアスが改善

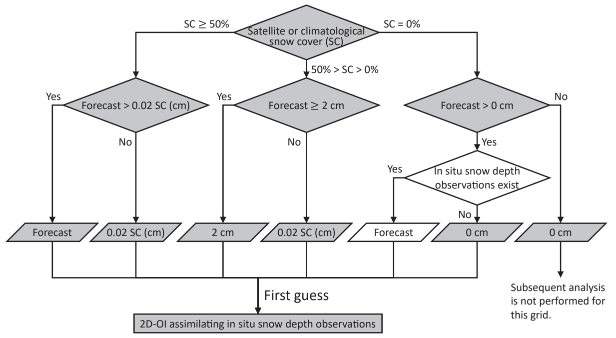

図 3.13.1　積雪深第一推定値作成処理のフローチャート。無地の記号で示された処理は JRA-55 以降に追加されたもの、陰影の記号で示された処理は JRA-55 で用いたものと同じものである。

その後、2 次元最適内挿法 (2D-OI) で SYNOP 積雪深観測を同化している (古林ほか 2015)。JRA-55 では積雪深解析処理における 2 つの不具合が見つかっている。1 つ目は、海岸部の積雪データの内挿処理の問題により海岸付近の積雪深が非現実的な値となる問題である (気象庁 2015)。JRA-3Q ではその様な問題が再発しないよう、不具合を修正するとともに、積雪深解析値に上限値 (5m) を設定している。2 つ目は、衛星積雪域に負バイアスがある領域（海岸付近等）で衛星積雪域が第一推定値として利用された場合に、2D-OI において正インクリメントがバイアス特性の異なる陸面解析積雪深を第一推定値とする周辺地域にまで広がり、周辺地域の積雪深解析値が過大となる傾向が見られることである。JRA-3Q ではこの欠点を改善するために、第一推定値の作成において衛星積雪域の利用可否を判定する際に SYNOP 積雪深観測も参照するよう変更している（図 3.13.1）。

3.13.3　境界条件及び強制場

(1)　SST 及び海氷

1985 年 6 月以降については、西岸境界流付近の SST の急峻な水平勾配が大気境界層に与える影響をより適切に表現できるよう、衛星観測に基づく 0.25 度解像度の MGDSST (栗原ほか 2006) を利用している。1985 年 5 月以前については、現場観測データが少ない海域における SST の時間・空間変動特性の表現改善のためのリコンストラクション手法、及び、品質の向上した海氷データを用いた、現場観測に基づく 1 度解像度の COBE-SST2 (Hirahara et al. 2014) を利用している。なお、1985 年 6 月から 1990 年 12 月の期間については COBE-SST2 を用いたプロダクト (JRA-3Q-COBE) も作成しており、SST データセットの違いが大気解析に与える影響等を調査することが可能となっている。

(2)　オゾン

JRA-3Q では、予報モデルの放射過程及び、衛星赤外測器輝度温度同化における放射伝達計算の入力データとして、下部成層圏のオゾン濃度ピークの過小バイアスが改善した MRI-CCM2.1 (Deushi and Shibata 2011; Yukimoto et al. 2019) を用いて作成されたオゾン再解析データを使用している。MRI-CCM2.1 を駆動する気象場として、1958 年以降の期間は JRA-55 データを利用し、1957 年以前の期間は JRA-3Q 予備実験データを利用した。衛星オゾン全量観測データのナッジングにおいては、Level 2 データを新たに取得して地上からのオゾン全量観測値で衛星間のバイアスを補正することで独自に均質化したものを 1979 年以降の期間に利用している (Naoe et al. 2020)。一方、1978 年以前は利用可能な衛星観測データがないためナッジングを行っていない。このため、1978 年以前のオゾン再解析データについては、1980〜1984 年の衛星オゾン全量観測ナッジング有無実験から算出した補正値を用いてオゾン混合比のバイアス補正を行っている。また、1957 年以前のオゾン再解析データについては、気象場を切り替えた影響を考慮するために、1961〜1965 年の気象場切替え実験から算出した補正値を用いてオゾン混合比のバイアス補正を行っている。さらに、1hPa より上層については、1991〜1997 年のオゾン混合比平均値と SPARC の HALOE ／ MLS 月別気候値 (Randel et al. 1998) からバイアス補正を行っている（全期間）。

3.13.4　観測データ

1957 年以前の期間については、気象庁再解析では初めて対象とする期間であることから、同期間の本計算実施に向けて以下のデータソースから観測データの収集・整備を行った（表 3.13.3）。

地上観測については、ハドレーセンター地上観測データセット HadISD v3.1.0.201911p (Dunn 2019) から取得した。このデータセットは、米国環境情報センター (NCEI) の地上観測データセット ISD (Smith et al. 2011) から長期間観測を行っている地点を抽出し、品質管理が行われたものである。海上観測については、包括的海洋-大気データセット ICOADS リリース 3.0 (Freeman et al. 2017) から取得した船舶及びブイによる海上気象観測データを利用した。加えて、米国海洋大気庁 (NOAA) ／環境科学共同研究所 (CIRES) の 20 世紀再解析等の入力データとして利用されている地表面気圧観測データバンク ISPD バージョン 4 (Compo 2019) も取得した。

高層観測については、NCEI が収集・整備を行っている全球ラジオゾンデアーカイブ IGRA バージョン 2 (Durre et al. 2016) から取得した。加えて、国際地球観測年（1957〜1958 年）以前の期間の高層観測データをデータレスキューによりデジタル化して収録した CHUAN バージョン 1.7 (Bronnimann and Stickler 2013) も取得したが、IGRA バージョン 2 との重複データの特定・除去が困難であることが分かったため、重複がないことを確認できた日本の地点のみを利用す

ることとした。

これらのデータセットに収録されている国内観測地点数は、特に1950年代初頭以前において非常に少ないことから（例えば、日本の高層観測は1947年には10を超える地点で開始されていたが、IGRA バージョン2で1947年まで遡れるのは2地点のみ）、気象研究所で観測原簿からデジタル化された日本の9地点の地上観測データ及び館野のラジオゾンデ観測データを追加した。加えて、利根川・荒川決壊で東京など関東平野に大きな被害をもたらしたことで知られるカスリーン台風（1947年9月）について、本事例の調査・研究に資するよう解析精度向上を図るため、前後の期間（1947年9月～10月）の日本のラジオゾンデ観測を高層月報 (Central Meteorological Observatory 1948) からデジタル化して追加した。

1958年以降の期間の観測データは、JRA-55で整備した観測データセット (古林ほか 2015) を基本としつつ、再較正により均質性が向上した衛星データ等、JRA-55実施以降に新たに利用可能となった観測データセットを可能な限り収集して利用している（表3.13.3、表3.13.4、図3.13.2）。例えば大気追跡風 (AMV) については、気象庁気象衛星センターがひまわり8号用のAMV導出アルゴリズムをひまわり5号 (GMS-5) からひまわり7号 (MTSAT-2) に適用して新たに作成した再処理AMVを利用している (Abe et al. 2021)。

JRA-3Qで用いる熱帯低気圧ボーガスについては、JRA-55と異なり、気象庁の台風ボーガス作成手法 (JMA 2019) を用いて全領域で熱帯低気圧ボーガスを自主作成し利用している。熱帯低気圧ボーガスの作成に必要な熱帯低気圧情報（中心位置、中心気圧、強風半径等）については、北西太平洋領域においては、1950年以前の期間はベストトラック・データベース (IBTrACS; Knapp et al. 2010)、1951年以降の期間は気象庁熱帯低気圧情報を利用している。北西太平洋以外の領域においては、2021年までIBTrACS、2022年以降は国際民間航空機関 (ICAO) に指名された熱帯低気圧アドバイザリーセンターから受信した熱帯低気圧電文を利用している。

上記に加えて、JRA-55実施以降に現業システムで利用開始された新しい観測システムである全球航法衛星システム (GNSS) 地上観測網の天頂遅延量と高波長分解能赤外探査計の輝度温度をJRA-3Qでは利用している。地上GNSS天頂遅延量については、1994～2014年の期間は気象研究所作成の再処理データを、それ以降の期間は現業取得データを利用している。

3.13.5　データ同化システムの基本性能

(1)　2日予報スコア

データ同化システムで用いているものと同じ予報モデルによる延長予報の対初期値検証スコアを比較することにより、各データ同化システムにおける解析値・

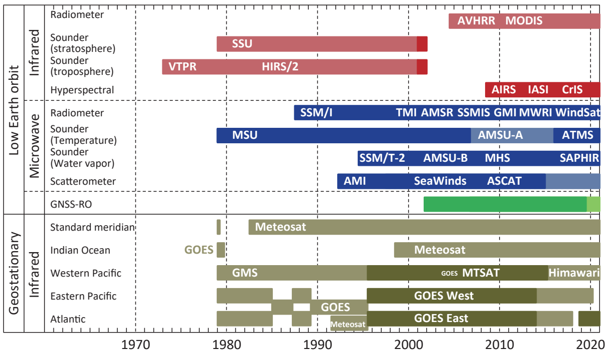

図 3.13.2　JRA-3Qで用いた衛星観測データ。濃い陰影はJRA-55からの追加期間及び再較正・再処理データによる更新期間を表す。

予報値の整合性、観測システムの変遷の影響、プロダクトの時間的均質性等を推察できる。

図3.13.3と図3.13.4はそれぞれ、北半球及び南半球の中・高緯度500hPa高度2日予報と熱帯域対流圏上層及び下層の風ベクトル2日予報について、JRA-3Q、JRA-55、JRA-25及び現業全球データ同化システムの二乗平均平方根 (RMS: Root-mean-square) 誤差を示している。予報スコアの良い順にJRA-3Q、JRA-55、JRA-25となっており、データ同化システムの着実な性能向上の効果が認められる。また、再処理衛星データの取得・利用等による観測データの拡充・品質向上も予報スコア向上に寄与している。特に、JRA-3Qでは1990年代の南半球中・高緯度の500hPa高度RMS誤差が大きく改善した結果、他の期間・領域との予報スコアの差が縮小しており、プロダクトの均質性が向上していると言える。これは、TIROS実用型鉛直サウンダ (TOVS: TIROS Operational Vertical Sounder) 輝度温度の間引き間隔縮小（JRA-55では250kmのところをJRA-3Qでは125kmに変更）及び背景誤差共分散の調整（第3.13.2項 (1)）の効果と考えられる。

他方、前衛星期間（1972年以前）の南半球中・高緯度及び熱帯においては、JRA-55と同様に観測システムの拡充に反して予報スコアが徐々に悪化する傾向が見られる。再解析対象期間当初、これらの領域においてRMS誤差が小さいのは観測データによる拘束が不十分であるためと考えられ、この期間の観測システムのもとでのデータ同化システムの性能には依然として課題があることを示唆している。

(2)　ラジオゾンデ観測データに対する背景値の適合度

対背景値D値（観測値–背景値）からは、予報モデルの性能や観測データのバイアス等の評価に有益な情報を得ることができる。ここでは、JRA-3Q、JRA-55及びJRA-25で使用したラジオゾンデ気温観測の対背景値D値の全球平均及びRMSの時系列の比較を行う。

対流圏におけるラジオゾンデ気温観測との整合性については、JRA-3Qは1980年代以降においてJRA-55

表 3.13.3　JRA-3Q で用いた観測データソース（従来型データ、熱帯低気圧情報、地上 GNSS 天頂遅延量）。無地のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものから新たに追加、又は再較正・再処理されたもの、陰影のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものと同じものである。

データ提供元	データ種別、及びデータ提供元による識別名	利用期間	備考
従来型データ			
NOAA/NCEI	ICOADS R3.0	1947 年 9 月～1957 年 12 月	Freeman et al. (2017)
	IGRA V2	1947 年 9 月～1957 年 12 月	doi:10.7289/V5X63K0Q
NOAA/CIRES	ISPD V4	1947 年 9 月～1957 年 12 月	doi:10.5065/9EYR-TY90
ハドレーセンター	HadISD v3.1.0.201911p	1947 年 9 月～1957 年 12 月	Dunn (2019)
NCAR	CHUAN V1.7（国内地点のみ利用）	1947 年 9 月～1957 年 12 月	doi:10.5065/AHPM-FC10
	積雪深（米国）	1957 年 11 月～2011 年 8 月	doi:10.5065/B6MM-RS76
ECMWF		1958 年 1 月～2002 年 8 月	Uppala et al. (2005)
気象庁		1961 年 1 月～	
	ラジオゾンデ（国内地点）	1947 年 9 月～10 月	高層月報 (Central Meteorological Observatory 1948) からデジタル化
	ドロップゾンデ（伊勢湾台風周辺）	1959 年 9 月 21 日～26 日	JMA (1961) からデジタル化
	GAME 及び SCSMEX	1998 年 4 月～1998 年 10 月	Lau et al. (2000), Yasunari (2001)
気象研究所石井正好氏	地上観測（稚内、札幌、函館、新潟、東京、神戸、潮岬、福岡、鹿児島）	1947 年 9 月～1957 年 12 月	観測原簿からデジタル化
気象研究所釜堀弘隆氏	ラジオゾンデ（館野）	1947 年 9 月～1949 年 12 月	科研費基盤研究 S 26220202 観測原簿からデジタル化
山中大学氏	ラジオゾンデ（インドネシア）	1991 年 11 月～1999 年 5 月	Okamoto et al. (2003)
RIHMI	積雪深（ロシア）	1950 年 1 月～2008 年 12 月	http://meteo.ru/english/climate/snow.php
中国地面気象記録月報	積雪深（中国）	1971 年 1 月～2006 年 12 月	印刷物からデジタル化
IMH	積雪深（モンゴル）	1975 年 1 月～2007 年 12 月	
熱帯低気圧情報			
NOAA/NCEI	IBTrACS v03r05	1947 年 9 月～2012 年 12 月	Knapp et al. (2010)
	IBTrACS v04	2013 年 5 月～2021 年 12 月	
気象庁	北西太平洋ベストトラック	1951 年 2 月～2012 年 12 月 2013 年 5 月～2021 年 12 月	https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html
	北西太平洋熱帯低気圧情報	2012 年 12 月～2013 年 4 月 2022 年 1 月～	
	TCAC（ホノルル、レユニオン、マイアミ、ナンディ、ニューデリー）及び TCWC（メルボルン）熱帯低気圧電文	2012 年 12 月～2013 年 4 月 2022 年 1 月～	https://community.wmo.int/en/activity-areas/aviation/hazards/tropical-cyclones https://community.wmo.int/en/tropical-cyclone-regional-bodies
地上 GNSS 天頂遅延量			
気象研究所小司禎教室長	再処理地上 GNSS 天頂遅延量	1995 年 1 月～2014 年 8 月	
気象庁		2014 年 9 月～	

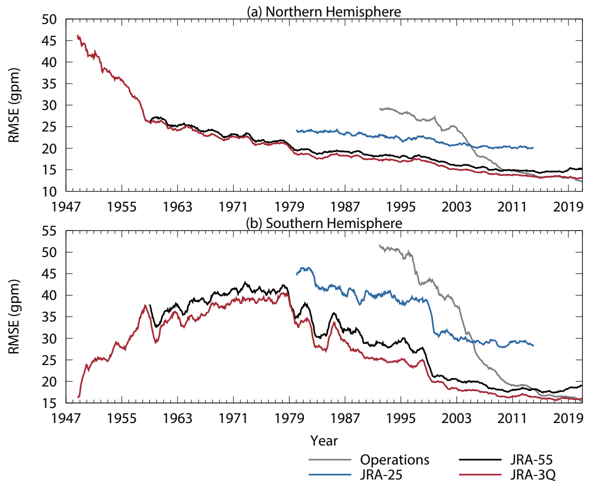

図 3.13.3　JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの 500hPa 高度 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a) 北半球中・高緯度（90°–20°N）、(b) 南半球中・高緯度（20°–90°S）。

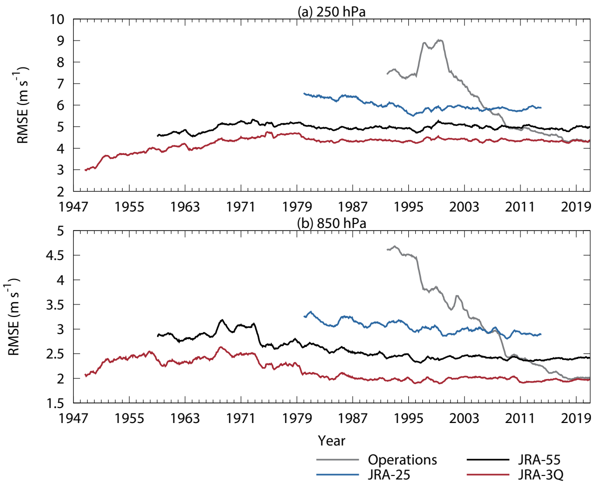

図 3.13.4　JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの熱帯域（20°N–20°S）風ベクトル 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a) 250hPa、(b) 850hPa。

と比べて非常に良くなっている。具体的には、250hPa 付近の D 値時系列では、JRA-55 の対流圏上層に高温

表 3.13.4 JRA-3Q で用いた観測データソース（衛星輝度温度、AMV、散乱計海上風、GNSS-RO 屈折角）。無地のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものから新たに追加、又は再較正・再処理されたもの、陰影のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものと同じものである。

データ提供元	データ種別、及びデータ提供元による識別名	利用期間	備考
衛星輝度温度			
ECMWF	VTPR	1973 年 1 月〜1979 年 2 月	Uppala et al. (2005)
	HIRS 及び SSU	1978 年 11 月〜2001 年 12 月	
	AMSU-A	1998 年 8 月〜2003 年 5 月	
NOAA/NCDC	SSM/I	1987 年 6 月〜2004 年 12 月	
NOAA/NCEI	MSU CDR V1.0	1978 年 11 月〜2006 年 12 月	doi:10.7289/V51Z429F
NOAA/CLASS	AMSU-A	1998 年 8 月〜2012 年 12 月	https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/search?datatype_family=TOVS
	SSM/I	1987 年 7 月〜2012 年 12 月	https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/search?datatype_family=DMSP
気象庁	AIRS	2008 年 7 月〜2020 年 12 月	
	IASI	2008 年 7 月〜	
	CrIS	2015 年 5 月〜	
	SSM/I	2006 年 3 月〜2021 年 4 月	
	SSMIS	2012 年 6 月〜	
	AMSR2	2016 年 9 月〜	
	GMI	2017 年 5 月〜	
	MWRI	2016 年 11 月〜2019 年 8 月	
	WindSat	2020 年 9 月〜2020 年 10 月	
	AMSU-A 及び MHS	2003 年 6 月〜	
	ATMS	2016 年 11 月〜	
	SAPHIR	2014 年 7 月〜2022 年 1 月	
	CSR	2005 年 6 月〜	
気象庁気象衛星センター	GMS-5、GOES 9、MTSAT-1R 再処理 CSR	1995 年 7 月〜2009 年 12 月	
宇宙航空研究開発機構	再較正 TMI V05A（8 相当）	1998 年 2 月〜2015 年 4 月	https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/en/archives_v6.html
	再較正 AMSR-E V4.400.400	2002 年 6 月〜2011 年 10 月	https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/tb/index_en.html
	再較正 AMSR2 V2.220.220	2012 年 7 月〜2016 年 8 月	https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/tb/index_en.html
	再較正 GMI V05A	2014 年 3 月〜2017 年 5 月	https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/en/archives_v6.html
EUMETSAT	SSM/T-2, AMSU-B, MHS FCDR v4.1	1994 年 7 月〜2017 年 12 月	Hans et al. (2019)
	再処理 Meteosat CSR	2000 年 5 月〜2000 年 12 月	https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MFG:CSR1
	Meteosat CSR	2001 年 1 月〜2009 年 8 月	https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MFG:CSR-IODC https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MSG:CSR
EUMETSAT CM SAF	SSM/I, SSMIS FCDR E3	1987 年 7 月〜2015 年 12 月	doi:10.5676/EUM_SAF_CM/FCDR_MWI/V003
AMV			
ECMWF	Meteosat, GMS, GOES	1979 年 1 月〜1996 年 1 月	Uppala et al. (2005)
気象庁	Meteosat, GOES, Himawari	2001 年 1 月〜	
	AVHRR, MODIS	2004 年 6 月〜	
気象庁気象衛星センター	再処理 GMS	1979 年 1 月〜1979 年 11 月	
	再処理 GMS-3〜-4	1987 年 3 月〜1995 年 6 月	
	再処理 GMS-5、GOES 9、MTSAT	1995 年 6 月〜2015 年 7 月	Abe et al. (2021)
EUMETSAT	再処理 Meteosat-2〜-7	1982 年 5 月〜2000 年 12 月	van de Berg et al. (2001)
	Meteosat-5〜-7	2001 年 1 月〜2001 年 2 月	
CIMSS	再処理 GOES	1995 年 1 月〜2015 年 7 月	Wanzong et al. (2014)
散乱計海上風			
EUMETSAT OSI SAF	ERS/AMI CDR	1992 年 3 月〜2001 年 1 月	doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0009
	QuikSCAT/SeaWinds CDR	1997 年 7 月〜2009 年 11 月	doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0002
	Metop-A/ASCAT CDR	2007 年 1 月〜2014 年 3 月	doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0006
気象庁	Metop/ASCAT	2014 年 4 月〜	
GNSS-RO 屈折角			
EUMETSAT ROM SAF	CHAMP CDR v1.0	2001 年 9 月〜2008 年 9 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0004
	COSMIC CDR v1.0	2006 年 4 月〜2016 年 12 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0003
	Metop CDR v1.0	2006 年 10 月〜2016 年 12 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0002
	Metop ICDR	2017 年 1 月〜2019 年 7 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0006
	GRACE CDR v1.0	2007 年 2 月〜2016 年 12 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0005
気象庁	COSMIC, Metop, GRACE, TerraSAR-X, TanDEM-X	2017 年 1 月〜	

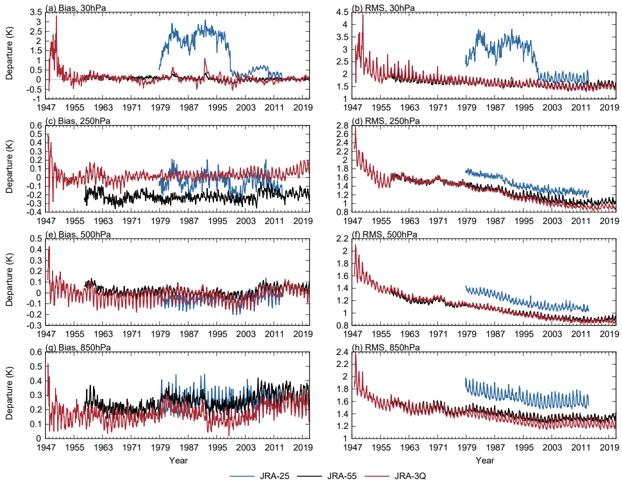

図 3.13.5　JRA-3Q、JRA-55 及び JRA-25 で使用したラジオゾンデ気温観測対背景値 D 値の全球平均、及び RMS の時系列

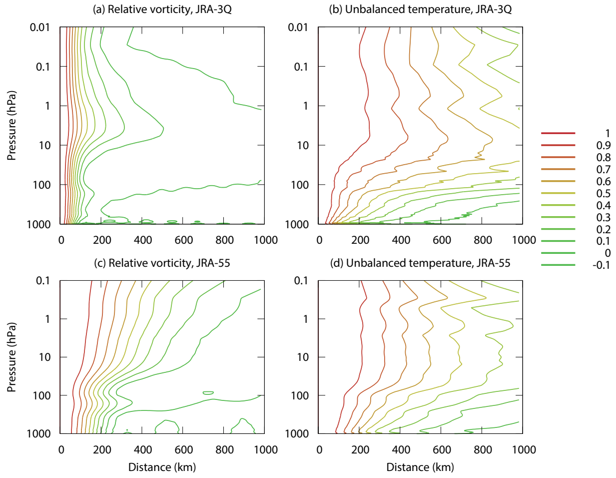

図 3.13.6　(a, b) JRA-3Q 及び (c, d) JRA-55 で利用した背景誤差共分散の水平相関の距離・高度断面図。(a, c) 相対渦度及び (b, d) 非バランス気温（風の場と統計的に独立な気温成分）の背景誤差共分散の水平相関。相対渦度、非バランス気温等、変分法の制御変数の詳細は (竹内 2002) を参照。

バイアスがあったことを示している（図 3.13.5 (c)）。一方、JRA-3Q では、対流圏上層の高温バイアスが大幅に解消しており、ラジオゾンデ気温観測との整合性が非常に良くなっていることが分かる。また、850hPa 付近では、JRA-25、JRA-55、JRA-3Q ともに D 値平均値が正の方向にシフトしており、対流圏下層の低温バイアスを示唆しているが、JRA-3Q では D 値平均値が減少しており、低温バイアスが緩和していることが分かる（図 3.13.5 (g)）。

他方、30hPa 付近では、JRA-3Q の RMS は JRA-55 と同程度であるが、D 値平均値は特に大規模火山噴火後の 1982 年（エルチチョン火山）や 1991 年（ピナツボ火山）に増大しており、成層圏の昇温の表現が弱いことを示唆している（図 3.13.5 (a), (b)）。火山性エーロゾルの年々変動については、JRA-25、JRA-55、JRA-3Q のいずれの予報モデルでも考慮されていないことから、昇温量の表現の違いは主にラジオゾンデ観測データのインパクトの違いと考えられる。また、対流圏中層においては、1970 年代以前のラジオゾンデ気温観測との整合性に JRA-55 と比べて若干の改悪が見られる。これらの要因としては、JRA-3Q では現在の充実した観測システムに対して最適化された水平相関距離が短い背景誤差共分散を利用しているため（図 3.13.6）、観測データの少ない過去期間においてモデルバイアスを十分に拘束できない場合があり得ることが推測される。水平相関距離の違いがデータ同化における観測データのインパクトに及ぼす影響については、今後、詳細な調査が必要と考えられる。

1940 年代は D 値平均値・RMS ともに大きいが、この期間の観測データ数が非常に少なく、特に高層観測が北半球の一部地域しか存在しないことにより、背景値の精度が低いことに加え、統計的ばらつきが大きいことも要因の一つと考えられる。

3.13.6　JRA-55 からの改善点

(1)　全球エネルギー収支

地球規模のエネルギー循環は、温室効果ガスの増加やエーロゾルの変化、それに伴うフィードバックによって変化しており、水循環の強さや時間変化とともに、大きな関心がもたれている。大気再解析では、データ同化により解析インクリメントが生じることから、エネルギーの時間保存性が担保されていない。しかし、再解析のエネルギー収支の評価を行うことは、データ同化システム、特に予報モデルの物理過程の性能評価になるとともに、海洋・陸面モデルの駆動データとしての性能を示すことになる。近年の衛星観測の充実により、大気上端における放射は正確に測定されるようになってきている。一方、気候系内部や地表面でのエネルギーの流れは、衛星による直接測定ができないため、大気上端と比べ不確実性が大きい。Wild et al. (2013) は、大気上端と地表面におけるエネルギー収支を、衛星観測と地表の観測データと第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) のシミュレーション結果を用いて推定した。この推定値やその改訂版 (Forster et al. 2021; Wild et al. 2015, 2019, 以下 W19 と表記) の値、推定の際に用いられた衛星観測に基づく放射エネルギーフラックスデータセット (CERES-EBAF Edition 4.0; Loeb et al. 2018; Kato et al. 2018)、大気海洋間のフラックスデータセット OAflux (Yu 2019) を用い、JRA-3Q の各種エネルギーフラックスの評価を行った。

表 3.13.5 は、大気上端における再解析 (JRA-25, JRA-55, JRA-3Q, ECMWF 再解析 ERA5 (Hersbach et al. 2020)) と CERES-EBAF の 2002 年から 2008 年の年平均全球エネルギーフラックス及び W19 の現在

気候の見積りを示している。大気上端における JRA-3Q の全球平均短波放射入射量、短波放射反射量はともに W19 の誤差幅の範囲内であり、正味の短波放射入射量は JRA-55 よりも 3 W m^{-2} 多くなっている。一方、JRA-3Q の外向き長波放射は W19 と比べ 10 W m^{-2} 程度多く、JRA-55 と同程度だった。結果として、大気上端における JRA-3Q の全球平均正味エネルギーフラックス（下向き正）は JRA-55 の約半分の-5.5 W m^{-2} となった。この点では JRA-55 から改善されたと言えるが、依然として負値であり地球の冷却傾向を意味する。衛星観測による見積りや ERA5 ではわずかな温暖化傾向を示しており、今後の再解析では、外向き長波放射量の改善とともに正味のエネルギーフラックスの改善も課題である。

表 3.13.6 は、陸上、海上を含めた地表面における再解析および CERES-EBAF の年平均全球平均エネルギーフラックス（2002 年～2008 年平均）と W19 の見積りを示している。JRA-3Q の全球平均各放射フラックスは、いずれも W19 の誤差幅の範囲内にほぼ収まっている。顕熱フラックスも W19 とほぼ同じであったが、潜熱フラックスは約 7 W m^{-2} 過剰となった。この結果、JRA-3Q の地表面における正味のエネルギーフラックス (下向き正) は、-4.4 W m^{-2} となり、W19 とは約 5 W m^{-2} の差がみられた。また、海面上のみの正味のエネルギーフラックス（下向き正）は-6.5 W m^{-2} であり、JRA-55 の-15.9 W m^{-2} から大きく変わったが、依然として負の値を示している。この量は、海洋が温暖化していれば正になる量であり、Wild et al. (2015) の推定では+0.8 W m^{-2} を示す。Valdivieso et al. (2017) によれば、海洋／結合再解析相互比較プロジェクトに参加している多くの再解析システムは正値を示しており、不確実性の幅は大きいが全球海洋の温暖化を示している。今後の再解析ではエネルギーインバランスの再現の改善も考慮すべき課題である。

(2)　熱帯低気圧

JRA-55 では、JRA-25 に比べて全般的な熱帯低気圧の検出率は向上したものの、現実にはない長期的な弱化傾向がみられることが指摘された (古林ほか 2015)。この課題に対処するため、JRA-3Q では、JRA-55 まで利用されていた熱帯低気圧周辺風の算出方法から変更し、気象庁現業システムに基づく熱帯低気圧ボーガスデータ作成手法を採用した。

図 3.13.7 に Hatsushika et al. (2006) の手法を基に計算した JRA-3Q および JRA-55 の熱帯低気圧検出率を示す。上述の通り、JRA-55 は 1980 年代後半以降、検出率の低下傾向がみられる一方、JRA-3Q は、JRA-55 でみられた弱化傾向は解消され、期間を通して概ね 90 % を超える値を示している。このような改善には、気象庁のボーガス算出手法に変更したことにより、熱帯低気圧の空間構造をより適切に捉えた熱帯低気圧ボーガスの利用が可能になったことの寄与が大きいと考えられる。

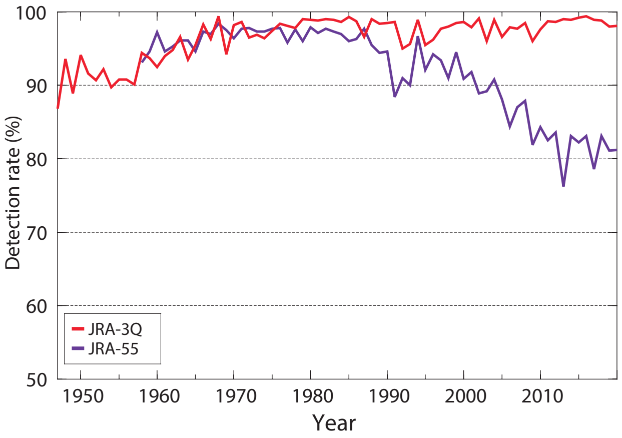

図 3.13.7　JRA-3Q 及び JRA-55 における熱帯低気圧の全球検出率

3.13.7　JRA-3Q の基本特性

(1)　気温解析値の時間均質性

近年の再解析データセットにおける長期変化傾向の再現性については、衛星輝度温度のバイアス補正手法の高度化等により、旧世代のものと比べて概ね改善している (例えば、 Simmons et al. 2014, 2017)。他方、現在の充実した観測システムに対して最適化されたデータ同化システム（特に背景誤差共分散）を観測データの少ない過去期間に適用した場合に、モデルバイアスを十分に拘束できず、時間的均質性が損なわれる事例も報告されている (例えば、 Simmons et al. 2020)。JRA-3Q データは数十年規模変動や気候変化に関する研究を含む幅広い分野において利用が期待されるため、その時間的均質性を評価しておくことは非常に重要である。ここでは、JRA-55 及び独立した観測データセットで再現されている長周期変動や長期変化傾向との比較を行う。

地上

図 3.13.8 は、全球平均地上気温について、JRA-3Q の月別時系列と、JRA-55、ERA5 及び独立な観測データセットとの比較を示している。独立な観測データセットとして、ここでは、ハドレーセンター／気候研究ユニットの全球気温データセット HadCRUT5 (Morice et al. 2021)，NOAA 全球地上気温データセット (NOAA-GlobalTemp: NOAA Global Surface Temperature Dataset; Huang et al. 2020)、ゴダード宇宙科学研究所地上気温データセット (GISTEMP: Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature; Lenssen et al. 2019), Berkeley Earth データセット (Rohde and Hausfather 2020) を用いる。なお、JRA-55 と JRA-3Q の全球平均地上気温を算出する際、海上においては、船舶の気温観測のバイアスによる影響 (Simmons et al. 2004)

表 3.13.5　大気上端の年平均全球エネルギーバランス (W m^{-2})。再解析 (JRA-25, JRA-55, JRA-3Q, ERA5) 及び CERES-EBAF の値は 2002〜2008 年の期間平均である。W19 の値は Forster et al. (2021) 及び Wild et al. (2015, 2019) によるもので、21 世紀初頭における現在気候を代表しており、括弧内の値は不確実性の幅を表している。

大気上端	W19	JRA-25	JRA-55	JRA-3Q	ERA5	CERES-EBAF
太陽放射入射量	340 (340, 341)	341	341	341	340	340
太陽放射反射量	100 (96, 100)	95	100	97	98	99
正味太陽放射吸収量		246	241	244	243	241
外向き赤外放射	239 (236, 242)	255	251	250	242	240
正味放射（下向き）(R_T)	0.7 (0.5, 0.9)	-7.9	-10.0	-5.5	0.7	0.8

表 3.13.6　地表面の年平均全球エネルギーバランス (W m^{-2})。再解析 (JRA-25, JRA-55, JRA-3Q, ERA5) 及び CERES-EBAF の値は 2002〜2008 年の期間平均である。W19 の値は Forster et al. (2021) 及び Wild et al. (2015, 2019) によるもので、21 世紀初頭における現在気候を代表しており、括弧内の値は不確実性の幅を表している。最後の行は全球海上平均正味エネルギーフラックスを表している。

地表面	W19	JRA-25	JRA-55	JRA-3Q	ERA5	CERES-EBAF
下向き太陽放射	185 (179, 189)	197	189	190	188	187
上向き太陽放射	25 (22, 26)	25	26	23	24	23
正味太陽放射（下向き）	160 (154, 166)	172	164	166	164	164
太陽放射吸収量（大気）	80 (74, 91)	75	77	78	79	77
下向き赤外放射	342 (338, 348)	327	338	340	340	345
上向き赤外放射	398 (394, 400)	399	400	400	398	399
正味赤外放射（上向き）		72	62	60	58	53
顕熱フラックス	21 (15, 25)	20	20	21	17	
潜熱フラックス	82 (70, 85)	91	93	89	85	
正味エネルギーフラックス（下向き）(F_S)	0.6 (0.2, 1.0)	-11.6	-11.2	-4.4	4.1	
正味大気吸収（全エネルギ入力=R_T−F_S）		3.7	1.2	-1.1	-3.3	
正味海上エネルギーフラックス（下向き）	0.8 (0.4, 1.2)	-17.0	-15.9	-6.5	5.5	

を受けていると考えられる解析値の代わりに、背景値を利用している（陸上においては解析値)。

JRA-3Q、ERA5、及び、GISTEMP を除く観測データセットにおける最も気温の高い年の上位 3 位は 2016、2020、2019 年の順で一致している。その他のデータセットにおいても上位 3 位の年は同じだが順番が異なり、JRA-55 では 2016、2019、2020 年、GISTEMP では 2020、2016、2019 年の順となっている。JRA-3Q と JRA-55 の最も気温の高い年の順番の違いは、主に極域とアフリカにおける偏差の違いによるもので、特に北極海では JRA-55 において 2019 年に大きな正偏差となっていた。また、1970 年代以前においては、データセット間に比較的大きな差が見られる。これは主に、観測データの少ない海氷域及び南極大陸における気温推定値の差によるものと考えられる。JRA-55 と JRA-3Q の差については、予報モデルにおける開水・海氷排他格子から開水・海氷混在格子への改善に伴い (米原 2019)、海氷密接度の変動の影響が海氷域の気温推定値に表れやすくなったことも要因の一つとして考えられる。従って、海氷域において気温の長周期変動の再現性を向上させるためには、海氷密接度データの時間的均質性の向上が非常に重要と考えられる。

対流圏下層から下部成層圏

図 3.13.9 は、対流圏下層から下部成層圏までの 4 層の全球平均気温偏差について、JRA-3Q の月別時系列と JRA-55 及び独立な観測データセットのものとの比較を示している。独立な観測データセットとして、ここでは、ハドレーセンターのラジオゾンデ気温プロダクト HadAT2 (Thorne et al. 2005) と、マイクロ波探査計 (MSU: Microwave Sounding Unit) 及び 改良型マイクロ波探査計 (AMSU: Advanced Microwave Sounding Unit) プロダクト NOAA v4.1 (Zou and Wang 2011), UAH v6.0 (Spencer et al. 2017), RSS v4.0 (Mears and

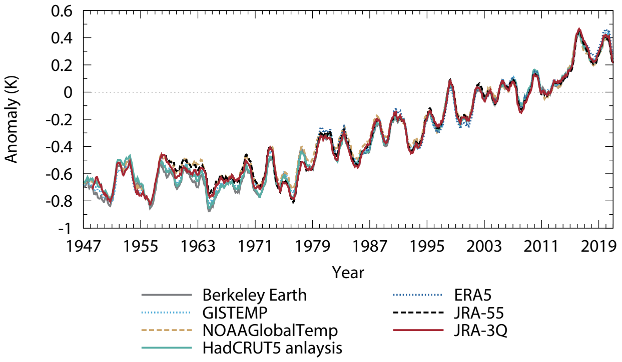

図 3.13.8 JRA-3Q、JRA-55、ERA5、HadCRUT5、NOAAGlobalTemp、GISTEMP、Berkeley Earth の全球平均地上気温の 12 か月移動平均値。JRA-55 と JRA-3Q の全球平均地上気温を算出する際、海上においては背景場を利用している（陸上においては解析値)。偏差はそれぞれのデータセットの 1991〜2020 年の期間の気候値に対して計算されている。

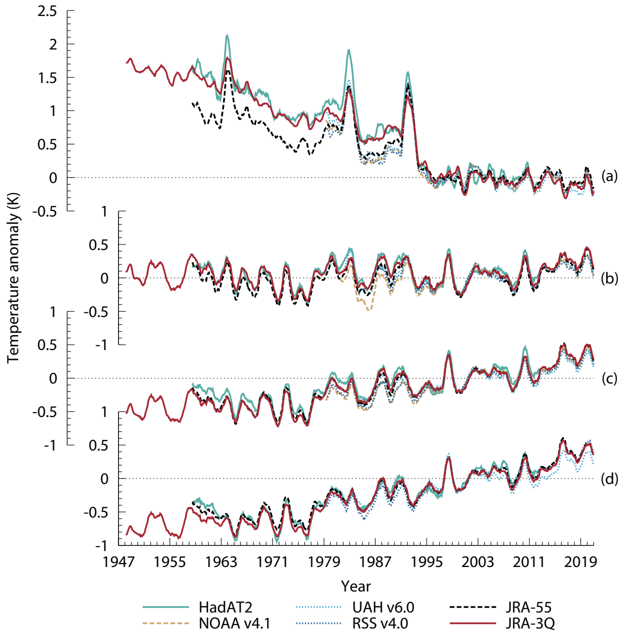

図 3.13.9 (a) 下部成層圏、(b) 対流圏上層、(c) 対流圏中層、(d) 対流圏下層の全球平均気温偏差の 12 か月移動平均値の時系列。RSS v4.0、UAH v6.0、NOAA v4.1 の時系列は MSU チャンネル 4、3、2 の観測値とその対流圏下層への外挿値であるのに対し、JRA-3Q、JRA-55、HadAT2 の時系列は気温から計算した MSU 等価量である。偏差はそれぞれのデータセットの 1995～2005 年の期間の気候値に対して計算されている。

Wentz 2016, 2017) を用いる。

JRA-3Q の全球平均気温では、第 3.13.5 項 (2) で述べた要因により、大規模火山噴火後の成層圏の昇温量が小さい傾向はあるが、その他の点では、ラジオゾンデ気温プロダクトやマイクロ波探査計気温プロダクトと非常によく似た変動が再現されている。特に、JRA-55 では過少だった下部成層圏気温の下降トレンドが JRA-3Q では HadAT2 とほぼ同等になっている（図 3.13.9 (a)）。その要因の一つとしては、JRA-55 では 1978 年以前のオゾンデータが月別気候値であったのに対し、JRA-3Q では全期間について気象研究所化学気候モデル MRI-CCM2.1 (Deushi and Shibata 2011) により作成されたオゾン再解析データを利用していることが考えられる。また、JRA-55 で 2006 年以前のラジオゾンデ気温観測のバイアス補正に用いた RAOBCORE (Radiosonde Observation Correction using Reanalyses) V1.4 については、下部成層圏で下降トレンドが小さいことが指摘されており (Haimberger et al. 2012)、JRA-3Q では RISE (RICH with Solar Elevation Dependent) v1.7.2 に更新したことも要因として考えられる。

中部成層圏から成層圏上端

図 3.13.10 は、中部成層圏、上部成層圏、成層圏上端の全球平均気温偏差について、JRA-3Q の月別時系列と JRA-55 及び独立な観測データセットのものとの比較を示している。旧バージョンの成層圏探査計 (SSU: Stratospheric Sounding Unit) データに基づく衛星観測データセットについては、大きな不確実性があることが指摘されていたほか (Thompson et al. 2012)、同測器による観測が終了した 2006 年半ば以降のデータを得ることができなかった。その後、SSU データの再処理により不確実性の低減が図られているとともに、新しい衛星測器による成層圏気温データとの接続により 2006 年以降のデータが利用可能となっている (Maycock et al. 2018)。ここでは、最新の独立な観測データセットとして、米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) の SSU 及びマイクロ波リムサウンダ (MLS: Microwave Limb Sounder) 成層圏気温プロダクト (Randel et al. 2016) と NOAA の SSU 及び AMSU-A 成層圏気温プロダクト NOAA v3.0 (Zou and Qian 2016) を用いる。

JRA-3Q の長期変化傾向については、1980 年代以降において概ね衛星観測に基づく成層圏気温プロダクトのものと整合しているとともに、1970 年代以前においても 1980 年代以降とほぼ同等な長期変化傾向が表現されている。JRA-55 の時系列では、特に成層圏上端において、1950 年代末から 1960 年代にかけて気温が上昇する不自然な変動が見られていたが、これは、この期間において 10hPa 及びそれより上層に到達するラジオゾンデ観測が非常に少なかったことにより生じた低温バイアスによるものと考えられる。JRA-3Q では、予報モデルにおける成層圏の低温バイアスの低減が、このような不自然な変動の解消に寄与したものと考えられる。

他方、JRA-3Q の長周期変動の表現は衛星観測に基づく成層圏気温プロダクトのものと比べてかなり小さく、JRA-55 のものと比べても弱まっている。これは、JRA-55、JRA-3Q ともに予報モデルにおいて、火山性エーロゾル、太陽定数、成層圏水蒸気量の年々変動が考慮されていないことが原因と考えられる。これに加えて、第 3.13.5 項 (2) で述べたように、JRA-3Q では現在の充実した観測システムに対して最適化された水平相関距離が短い背景誤差共分散を利用しているため、観測データの少ない過去期間においてモデルバイアスを十分に拘束できていないことも原因と考えられる。成層圏気温の変動の再現性向上には、予報モデルに現在考慮されていない前述の要因を取り入れるとともに、観測システムの変遷に応じた背景誤差共分散の最適化が必要と考えられる。

(2) カスリーン台風（1947 年 9 月）の表現

JRA-3Q の 1957 年以前の期間は気象庁再解析では初めて解析対象とした期間である。この期間は、日本で大きな被害をもたらした災害がいくつも発生している点で重要である。一方、ラジオゾンデ定時観測の国際的なネットワークが確立されていない期間でもあるため、利用できる観測データが乏しい。従って、利用

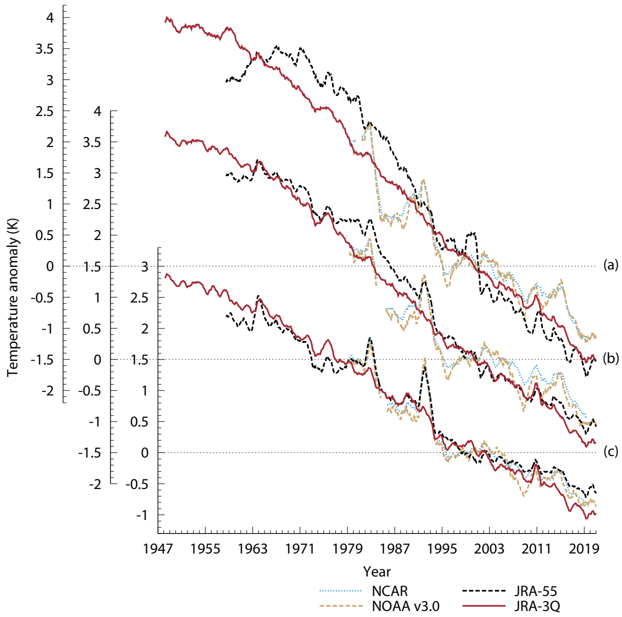

図 3.13.10　(a) 成層圏上端、(b) 上部成層圏、(c) 中部成層圏の全球平均気温偏差の 12 か月移動平均値の時系列。NOAA v3.0 と NCAR の時系列は SSU チャンネル 3、2、1 の観測値であるのに対し、JRA-3Q と JRA-55 の時系列は気温から計算した SSU 等価量である。偏差はそれぞれのデータセットの 1995〜2005 年の期間の気候値に対して計算されている。

にあたっては綿密な品質確認を行うことが重要である。本節では、国際地球観測年以前の期間における代表的な顕著現象として、1947 年 9 月のカスリーン台風の事例を例に挙げ、JRA-3Q における再現性を見ていく。

カスリーン台風は 1947 年 9 月 8 日にマリアナ諸島の東で発生し、紀伊半島の南海上を北上した後、9 月 15 日に北緯 32 度を超えてから北東に進路を変え、同日夜に房総半島の南端をかすめて、16 日には三陸沖に進んだ。台風が日本に接近した時は衰弱しており、強風による被害は少なかった。しかし、台風により日本付近に停滞していた前線の活動が活発化し、関東地方と東北地方では大雨となった。関東南部では利根川と荒川の堤防が決壊し、埼玉県東部から東京で多くの家屋が浸水した。この水害は、首都圏の治水政策を論ずる際には今なお言及されている (例えば、 Cabinet Office 2021)。

図 3.13.11 にカスリーン台風が日本に接近した 1949 年 9 月 14 日 06UTC における JRA-3Q, 20CRv3 (Slivinski et al. 2019), CERA-20C (Laloyaux et al. 2018) の各再解析の海面更正気圧と当時の天気図を示す。JRA-3Q, 20CRv3 共に当時の天気図とほぼ同じ位置にカスリーン台風が表現されていることが分かる。一方、CERA-20C ではカスリーン台風に対応する低圧部の表現が弱くなっており、位置も当時の天気図と比べて南にずれている。この原因としては、CERA-20C において、熱帯低気圧のベストトラックデータが品質管理によって排除された可能性が考えられる。

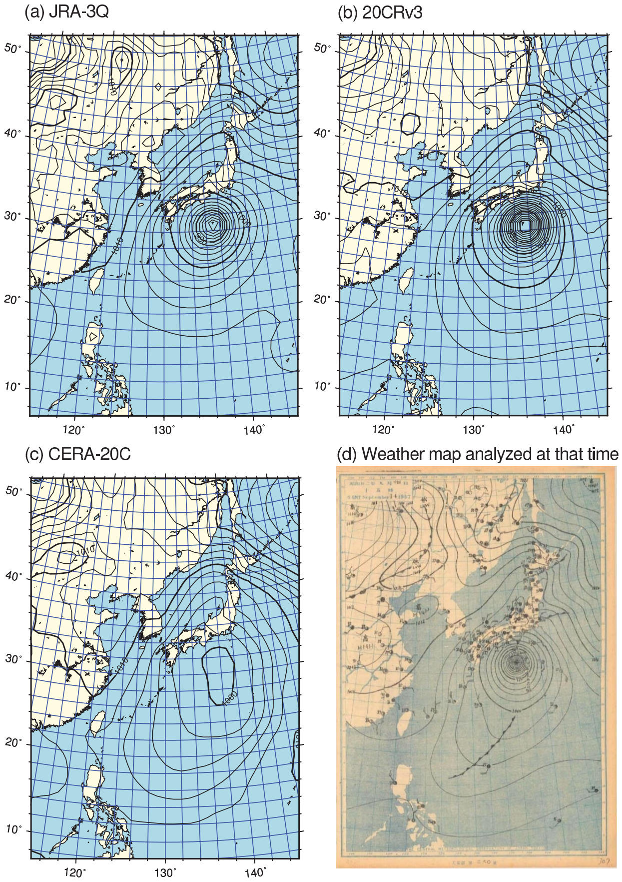

図 3.13.11　1947 年 9 月 14 日における (a) JRA-3Q、(b) 20CRv3、(c) CERA-20C の海面更正気圧解析値 (hPa) と (d) 当時の天気図（気象庁提供）

3.13.8　まとめ

長期再解析データの期間延長と品質向上を図るため、1947 年 9 月以降を対象とする JRA-3Q 長期再解析を実施した。JRA-3Q では、JRA-55 以降の現業全球数値予報システム及び SST 解析の開発成果や、国内外の気象機関等によるデータレスキュー、衛星運用機関による衛星データの再処理による過去の観測データ拡充の成果等を活用している。これらの成果の活用により、JRA-55 から更にプロダクトの品質が向上していることが、2 日予報スコア及びラジオゾンデ観測データに対する背景値の適合度による評価等により示された。

JRA-55 の課題の一つであった大気上端及び地表面における全球正味エネルギーフラックスの大きな上向きバイアスは大幅に減少し、JRA-55 と比べて観測に基づく見積りに近づいた。この改善は、予報モデルにおける各種物理過程の全般的な改良によるものと考えられる。しかしながら、自然及び人為的な外部強制に対する気候システムの応答に関する理解を深めるには依然として観測に基づく見積りからの差は大きく、エネルギー・水収支の更なる改善が必要と考えられる。JRA-55 で見られた熱帯低気圧検出率の偽の低下傾向については、

気象庁現業システムに基づく熱帯低気圧ボーガスデータ作成手法の利用により解消した。下部成層圏気温の長期変化傾向の表現も改善しており、MRI-CCM2.1 を用いて全期間のオゾン再解析データを作成し利用していること、ラジオゾンデ気温観測のバイアス補正が改善していることが主な要因と考えられる。また、対流圏上層における高温バイアスは大幅に解消し、対流圏下層における低温バイアスも緩和した。気象庁再解析としては初めて解析対象とした 1957 年以前の期間においては、カスリーン台風のような大きな被害をもたらした台風が JRA-3Q の海面更正気圧場に明瞭に表現されており、当時作成された天気図とも概ね整合している。

他方、いくつかの問題点も明らかになっている。大規模火山噴火後の成層圏の昇温量が小さい傾向があり、予報モデルにおいて火山性エーロゾルの年々変動が考慮されていないことが主要因と考えられる。加えて、JRA-3Q では現在の充実した観測システムに対して最適化された水平相関距離が短い背景誤差共分散を利用しているため、観測データの少ない過去期間においてモデルバイアスを十分に拘束できない場合があり得ることも推測される。後者の要因については、1970 年代以前の対流圏中層のラジオゾンデ気温観測との整合性が JRA-55 と比べて若干改悪していることの主な原因とも考えられる。実際の年々変動に則した放射強制力の導入と観測システムの変遷に応じた背景誤差共分散行列の調整は今後の課題である。

将来の再解析の課題としては、現在の現業数値予報システムで用いられているハイブリッド同化やアウターループ、衛星輝度温度データの全天同化等を導入し、雲・降水域を含めより多くの観測情報を解析に反映させることが挙げられる。また、海面や陸面、雪氷域での下部境界条件をより現実的に解析するため、陸面や海洋データ同化の高度化も必要と考えられる。

参考文献

Abe, M., K. Shimoji, Y. Kosaka, and S. Kobayashi, 2021: AMV reprocessing activity for JRA-3Q at MSC/JMA. *Proceeding of 15th International Winds Workshop*, 12–16.

Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.

Bronnimann, S. and A. Stickler, 2013: *The Comprehensive Historical Upper Air Network.* Research Data Archive at NCAR, Computational and Information Systems Laboratory, doi:10.5065/AHPM-FC10, Accessed 29 Aug 2017.

Cabinet Office, 2021: *White Paper Disaster Management in Japan.* Cabinet Office, Japan, 258 pp., https://www.bousai.go.jp/en/documentation/white_paper/pdf/2021/R3_hakusho_english.pdf.

Central Meteorological Observatory, 1948: *Aerological data of Japan.*

Compo, et al., G. P., 2019: *The International Surface Pressure Databank version 4.* Research Data Archive at NCAR, Computational and Information Systems Laboratory, doi:10.5065/9EYR-TY90, Accessed 17 Mar 2020.

Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385–3396.

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.

Dunn, R. J. H., 2019: HadISD version 3: monthly updates. Hadleycentre tech. note, Met Office, 8 pp., Exeter, UK. https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/publications/science/climate-science-technical-notes.

Durre, I., X. Yin, R. S. Vose, S Applequist, and J. Arnfield, 2016: *Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA), Version 2.* NOAA NCEI, doi:10.7289/V5X63K0Q, Accessed 29 Jul 2017.

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D. J. Lunt, T. Mauritsen, M. D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V. and P. Zhai and A. Pirani and S. L. Connors and C. Péan and S. Berger and N. Caud and Y. Chen and L. Goldfarb and M. I. Gomis and M. Huang and K. Leitzell and E. Lonnoy and J. B. R. Matthews and T. K. Maycock and T. Waterfield and O. Yelekçi and R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 923–1054.

Freeman, E., S. D. Woodruff, S. J. Worley, S. J. Lubker, E. C. Kent, W. E. Angel, D. I. Berry, P. Brohan, R. Eastman, L. Gates, W. Gloeden, Z. Ji, J. Lawrimore, N. A. Rayner, G. Rosenhagen, and S. R. Smith, 2017: ICOADS Release 3.0: A major update to the historical marine climate record.

Int. J. Climatol., **37**, 2211–2237.

Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka, 2008: Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records–Some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data. *J. Climate*, **21**, 4587–4606.

Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka, 2012: Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations. *J. Climate*, **25**, 8108–8131.

Hans, I., M. Burgdorf, S. A. Buehler, M. Prange, T. Lang, and V. O. John, 2019: An uncertainty quantified fundamental climate data record for microwave humidity sounders. *Remote Sens.*, **11**, 548, doi:10.3390/rs11050548.

Hatsushika, H., J. Tsutsui, M. Fiorino, and K. Onogi, 2006: Impact of wind profile retrievals on the analysis of tropical cyclones in the JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 891–905.

Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, de P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thépaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049.

Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, **27**, 57–75.

本田有機, 坂本雅巳, 2019: 全球モデル (GSM) の概要. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 136–155.

Huang, B., M. J. Menne, T. Boyer, E. Freeman, B. E. Gleason, J. H. Lawrimore, C. Liu, J. J. Rennie, C. Schreck, F. Sun, R. Vose, C. N. Williams, X. Yin, and H.-M. Zhang, 2020: Uncertainty estimates for sea surface temperature and land surface air temperature in NOAAGlobalTemp version 5. *J. Climate*, **33**, 1351–1379.

Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the KOBE collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865–879.

JMA, 1961: *Official Report of Typhoon Vera.*

JMA, 2007: *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 System and Numerical Weather Prediction.* Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 194 pp., `https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/nwp-top.htm`.

JMA, 2013: *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 System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research.* Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 188 pp., `https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/nwp-top.htm`.

JMA, 2019: *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 System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research.* Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 229 pp., `https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/nwp-top.htm`.

Kato, S., F. G. Rose, D. A. Rutan, T. J. Thorsen, N. G. Loeb, D. R. Doelling, X. Huang, W. L. Smith, W. Su, and S.-H. Ham, 2018: Surface irradiances of Edition 4.0 Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) energy balanced and filled (EBAF) data product. *J. Climate*, **31**, 4501–4527.

川合秀明, 2004: 雲水過程. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 72–80.

気象庁, 2015: JRA-55 の積雪深解析の不具合について. 気象庁地球環境・海洋部, 18 pp. `https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_ja.html#quality`.

Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 363–376.

古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌己, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66–115.

Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi,

H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa; T. Y.Tanaka, T. Tokuhiro, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109.

栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計，衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, S1–S18.

Laloyaux, P., de E. Boisseson, M. Balmaseda, J.-R. Bidlot, S. Broennimann, R. Buizza, P. Dalhgren, D. Dee, L. Haimberger, H. Hersbach, Y. Kosaka, M. Martin, P. Poli, N. Rayner, E. Rustemeier, and D. Schepers, 2018: CERA-20C: A coupled reanalysis of the twentieth century. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **10**, 1172–1195.

Lau, K. M., Y. Ding, J.-T. Wang, R. Johnson, T. Keenan, R. Cifelli, J. Gerlach, O. Thiele, T. Rickenbach, S.-C. Tsay, and P.-H. Lin, 2000: A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1261–1270.

Lenssen, N. J. L., G. A. Schmidt, J. E. Hansen, M. J. Menne, A. Persin, R. Ruedy, and D. Zyss, 2019: Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **124**, 6307–6326.

Loeb, N. G., D. R. Doelling, H. L. Wang, W. Y. Su, C. Nguyen, J. G. Corbett, L. S. Liang, C. Mitrescu, F. G. Rose, and S. Kato, 2018: Clouds and the earth's radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) top-of-atmosphere (TOA), edn.-4.0 data product. *J. Climate*, **31**, 895–918.

Louis, J.-F., M. Tiedtke, and J.-F. Geleyn, 1982: A short history of the operational PBL-parameterization at ECMWF. *Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization*, Reading, UK, ECMWF, 59–79, `https://www.ecmwf.int/en/publications`.

Maycock, A. C., W. J. Randel, A. K. Steiner, A. Y. Karpechko, J. Christy, R. Saunders, D. W. J. Thompson, C.-Z. Zou, A. Chrysanthou, N. L. Abraham, H. Akiyoshi, A. T. Archibald, N. Butchart, M. Chipperfield, M. Dameris, M. Deushi, S. Dhomse, G. D. Genova, P. Jöckel, D. E. Kinnison, O. Kirner, F. Ladstädter, M. Michou, O. Morgenstern, F. O'Connor, L. Oman, G. Pitari, D. A. Plummer, L. E. Revell, E. Rozanov, A. Stenke, D. Visioni, Y. Yamashita, and G. Zeng, 2018: Revisiting the mystery of recent stratospheric temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 9919–9933.

Mears, C. A. and F. J. Wentz, 2016: Sensitivity of satellite-derived tropospheric temperature trends to the diurnal cycle adjustment. *J. Climate*, **29**, 3629–3646.

Mears, C. A. and F. J. Wentz, 2017: A satellite-derived lower-tropospheric atmospheric temperature dataset using an optimized adjustment for diurnal effects. *J. Climate*, **30**, 7695–7718.

Morice, C. P., J. J. Kennedy, N. A. Rayner, J. P. Winn, E. Hogan, R. E. Killick, R. J. H. Dunn, T. J. Osborn, P. D. Jones, and I. R. Simpson, 2021: An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **126**, e2019JD032 361, doi:10.1029/2019JD032361.

Naoe, H., T. Matsumoto, K. Ueno, T. Maki, M. Deushi, and A. Takeuchi, 2020: Bias correction of multi-sensor total column ozone satellite data for 1978–2017. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 353–377.

Okamoto, N., M. D. Yamanaka, S.-Y. Ogino, H. Hashiguchi, N. Nishi T. Sribimawati, and A. Numaguchi, 2003: Seasonal variations of tropospheric wind over Indonesia: comparison between collected operational radiosonde data and NCEP reanalysis for 1992-99. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 829–850.

Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.

Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.

Randel, W. J., A. K. Smith, F. Wu, C.-Z. Zou, and H. Qian, 2016: Stratospheric temperature trends over 1979–2015 derived from combined SSU, MLS, and SABER satellite observations. *J. Climate*, **29**, 4843–4859.

Randel, W. J., F. Wu, J. M. Russell III, A. Roche, and J. W. Waters, 1998: Seasonal cycles and QBO variations in stratospheric CH4 and H2O observed in UARS HALOE data. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 163–185.

Rohde, R. A. and Z. Hausfather, 2020: The Berkeley Earth land/ocean temperature record. *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 3469–3479.

佐藤信夫, 1989: 生物圏と大気圏の相互作用. 数値予報課報告・別冊第 35 号, 気象庁予報部, 4–73.

Saunders, R, 2008: RTTOV-9 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, 74 pp. `https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/rttov/`.

Saunders, R., J. Hocking, P. Rayer, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, P. Brunel, F. Karbou, and F. Aires, 2012: RTTOV-10 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, 31 pp. `https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/rttov/`.

Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.

Shibata, K., M. Deushi, T. T. Sekiyama, and H. Yoshimura, 2005: Development of an MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry. *Pap. Meteor. Geophys*, **55**, 75–119.

Simmons, A, C. Soci, J. Nicolas, B. Bell, P. Berrisford, R. Dragani, J. Flemming, L. Haimberger, S. Healy, H. Hersbach, A. Horányi, A. Inness, J. Munoz-Sabater, R. Radu, and D. Schepers, 2020: Global stratospheric temperature bias and other stratospheric aspects of ERA5 and ERA5.1. ECMWF Technical Memorandum 859, ECMWF, 38 pp., Reading, UK. doi:10.21957/rcxqfmg0.

Simmons, A. J., P. Berrisford, D. P. Dee, H. Hersbach, S. Hirahara, and J.-N. Thépaut, 2017: A reassessment of temperature variations and trends from global reanalyses and monthly surface climatological datasets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 101–119.

Simmons, A. J., P. Poli, D. P. Dee, P. Berrisford, H. Hersbach, S. Kobayashi, and C. Peubey, 2014: Estimating low-frequency variability and trends in atmospheric temperature using ERA-Interim. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 329–353.

Simmons, A. J., P. D. Jones, da V. Costa Bechtold, A. C. M. Beljaars, P. W. Kållberg, S. Saarinen, S. M. Uppala, P. Viterbo, and N. Wedi, 2004: Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature. *J. Geophys. Res.*, **109**, D24 115, doi:10.1029/2004JD005306.

Slivinski, G. P. Compo, L. C., J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, B. S. Giese, C. McColl, R. Allan, X. Yin, R. Vose, H. Titchner, J. Kennedy, L. J. Spencer, L. Ashcroft, S. Brönnimann, M. Brunet, D. Camuffo, R. Cornes, T. A. Cram, R. Crouthamel, F. Domínguez-Castro, J. E. Freeman, J. Gergis, E. Hawkins, P. D. Jones, S. Jourdain, A. Kaplan, H. Kubota, F. L. Le Blancq, T.-C. Lee, A. Lorrey, J. Luterbacher, M. Maugeri, C. J. Mock, G. W. K. Moore, R. Przybylak, C. Pudmenzky, C. Reason, V. C. Slonosky, C. A. Smith, B. Tinz, B. Trewin, M. A. Valente, X. L. Wang, C. Wilkinson, K. Wood, and P. Wyszyński, 2019: Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 2876–2908.

Smith, A., N. Lott, and R. Vose, 2011: The Integrated Surface Database: Recent developments and partnerships. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 704–708.

Spencer, R. W., J. R. Christy, and W. D. Braswell, 2017: UAH Version 6 global satellite temperature products: Methodology and results. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 121–130.

竹内義明, 2002: 全球 3 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 17–36.

Thompson, D. W. J., D. J. Seidel, W. J. Randel, C.-Z. Zou, A. H. Butler, C. Mears, A. Osso, C. Long, and R. Lin, 2012: The mystery of recent stratospheric temperature trends. *Nature*, **491**, 692–697.

Thorne, P. W., D. E. Parker, S. F. B. Tett, P. D. Jones, M. McCarthy, H. Coleman, and P. Brohan, 2005: Revisiting radiosonde upper-air temperatures from 1958 to 2002. *J. Geophys. Res.*, **110**, D18 105, doi:10.1029/2004JD005753.

Uppala, S. M., P. W. Kållberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. Van De Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, and J. Woollen, 2005: The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961–3012.

Valdivieso, M., K. Haines, M. Balmaseda, Y. Chang, M. Drevillon, N. Ferry, Y. Fujii, A. Köhl, A. Storto, T. Toyoda, X. Wang, J. Waters, Y. Xue, Y. Yin,

B. Barnier, F. Hernandez, A. Kumar, T. Lee, S. Masina, and K. A. Peterson, 2017: An assessment of air-sea heat fluxes from ocean and coupled reanalyses. *Clim. Dyn.*, **49**, 983–1008.

van de Berg, L., J. Gustafsson, and A. Yildirim, 2001: Reprocessing of atmospheric motion vectors from Meteosat image data. *ECMWF ERA-40 Project Report Series 3, ECMWF*, 159–168, `https://www.ecmwf.int/en/publications`.

Wanzong, S., D. Santek, C. S. Velden, J. Daniels, D. Stettner, W. C. Bresky, and A. Bailey, 2014: Historical GOES AMV reprocessing. *Twelfth International Winds Workshop*, Copenhagen, Denmark, `https://cimss.ssec.wisc.edu/iwwg/iwwg_meetings.html`.

Wild, M., D. Folini, C. Schär, N. Loeb, E. G. Dutton, and G. König-Langlo, 2013: The global energy balance from a surface perspective. *Clim. Dyn.*, **40**, 3107–3134.

Wild, M., M. Z. Hakuba, D. Folini, P. Dörig-Ott, C. Schär, S. Kato, and C. N. Long, 2019: The cloud-free global energy balance and inferred cloud radiative effects: an assessment based on 3 direct observations and climate models. *Clim. Dyn.*, **52**, 4787–4812.

Wild, M., D. Folini, M. Z. Hakuba, C. Schär, S. I. Seneviratne, S. Kato, D. Rutan, C. Ammann, E. F. Wood, and G. König-Langlo, 2015: The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. *Clim. Dyn.*, **44**, 3393–3429.

Yasunari, T. (ed.), 2001: Special Issue: GEWEX Asian monsoon experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79B**, 605 pp.

米原仁, 2019: 海氷及び海面. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 93–95.

Yu, L., 2019: Global air-sea fluxes of heat, fresh water, and momentum: energy budget closure and unanswered 5 questions. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **11**, 227–248.

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.

Zou, C.-Z. and H. Qian, 2016: Stratospheric temperature climate data record from merged SSU and AMSU-A observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **33**, 1967–1984.

Zou, C.-Z. and W. Wang, 2011: Intersatellite calibration of AMSU-A observations for weather and climate applications. *J. Geophys. Res.*, **116**, D23 113, doi:10.1029/2011JD016205.

第4章　数値予報システムの開発進捗

4.1　全球モデルの開発進捗

4.1.1　はじめに

平成30年に気象庁が策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」(以下、重点計画) では、台風防災への貢献に向けたGSM開発の方向性として、GSMの水平解像度10 km以下への高分解能化を挙げている。また、台風予測に重要となる海面水温について全球10 km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、メソモデルの海面水温に関する効果の取扱手法を精緻化し、ガイダンスも活用しつつ強度予測精度を向上させることを挙げている。この点で、GSM2303 (第3.2.1項) における水平解像度の20 kmから13 kmへの向上、及びGSM2303に先立ち実施したMSM2203(気象庁 2023a) における鉛直層増強、予報時間延長及び物理過程の改良は、台風防災への貢献に向けたステップという意味も持つ。重点計画で示した方向性に沿った開発をさらに進める上では、将来の計算機を見越した対応や、海面水温の全球数値予報システムの予測へ与える影響把握に現段階から取り組む必要がある。

全球モデルの高解像度化には多くの計算機資源を要する一方で、今後の計算機性能向上がこれまでのペースを維持することは困難になると言われている (たとえば姫野 2016)。これは、演算性能向上に関する経験則である「ムーアの法則」[1]が限界に近づいていることや、メモリバンド幅やノード間通信の性能向上が緩やかであること、消費電力の制限といったことが背景にある。そのため、高解像度化を検討するためには、計算機性能の向上だけに頼らず、将来の計算機の構成 (アーキテクチャやメモリバンド幅、ノード間通信性能、I/O性能等) や特性にモデルを適応させることや、モデルの高速化も重要となってくる。特に、GSMはスペクトル変換とセミラグランジュ移流の計算においてノード間 (MPIプロセス間) での全対全通信を実施しており、実行時間全体における通信の寄与が大きい。また、現在のGSMの配列構造はOpenMP等によるスレッド並列を前提としたものであるが、今後はベクトル化機能活用 (例えばSIMD命令など) が高速化において重要な計算機を利用する可能性も想定される。通信の効率化及びそれを可能にする領域分割手法と、配列構造を計算機の特性に柔軟に対応させることが、GSMの高速化の大きな鍵となる。

全球10 kmメッシュ海面水温データの作成に関しては、全球0.1° メッシュ日別海面水温解析値として気象庁大気海洋部で開発に取り組んでおり、全球数値予報システムでは、その海面水温解析値を利用することを計画している。海面水温解析の利用開発を速やかに進めるためには、海面水温解析自体の開発と並行して、海面水温の違いが予測結果のどの部分に影響を与えるかを予め把握しておくことが肝要となる。全球予報における台風予測や他の予測要素への海面水温の直接の影響の把握に加えて、解析予報サイクルを通じた影響の把握が必要となる。これは、海面水温は全球予報計算の下部境界条件だけでなく、全球解析の第一推定値作成における全球モデルの下部境界条件、衛星輝度温度品質管理における放射伝達モデル計算での下部境界条件としても利用されるためである。

本節では、これらの点を踏まえて進めている、全球モデルのフレーム改良に関する開発進捗と海面水温解析値が全球数値予報システムの予測精度に与える影響調査について報告する。

4.1.2　モデルフレーム改良の開発

本項では、今後の高解像度化に向けた高速化、特性の異なる計算機への移植性向上等を目的として取り組んでいる、モデルフレーム改良 (領域分割手法、空間ループ構造の改良) の進捗を報告する。なお、本項の開発は、気象研究所の協力の下で取り組んでいる。

(1)　領域分割手法の改良

GSMは分散メモリ型並列計算機上での実行を想定したプログラムであり、MPIを用いた分散メモリ型の並列計算 (プロセス並列化) を行っている。各MPIプロセスへの処理の分配は、データ並列 (2次元領域分割) を基本とする。このようなプログラムでは、各MPIプロセスの計算負荷をなるべく均一にすること、MPIプロセス間のデータ交換 (通信) をなるべく減らすこと等が実行効率を高めるうえで重要となる。

2024年3月現在のGSMの領域分割の実装は宮本 (2009) に詳しい。現在のGSMでは、各主要過程 (スペクトル法、移流過程、物理過程等) について、異なる形式の領域分割を利用する手法を採用している。領域分割を決めるうえでの制約となる条件 (他格子の参照状況、計算負荷の地域依存性など) の異なる各過程について、それぞれに適した形式の領域分割を導入することで、計算部分を最大限に高速化することを狙っている。一方で、この方式では、各過程間の遷移の際に、領域分割変更に伴う通信が生じる。この通信は、各MPIプロセスの担当データの総交換 (格子点数規模の全対全通信) に相当し、効率的に処理するためには、計算機側の高い通信性能が必要となる。通信の最小化よりも、計算部分の高速化を優先した設計であり、通信よりも計算が律速となる計算機向けに最適化された

[1] 元来は「集積回路の集積度は約2年で2倍になる」というものであるが、「トランジスタの微細度が上がると性能も向上する」というデナード則と併せることで演算能力向上の経験則の意味としても引用される。

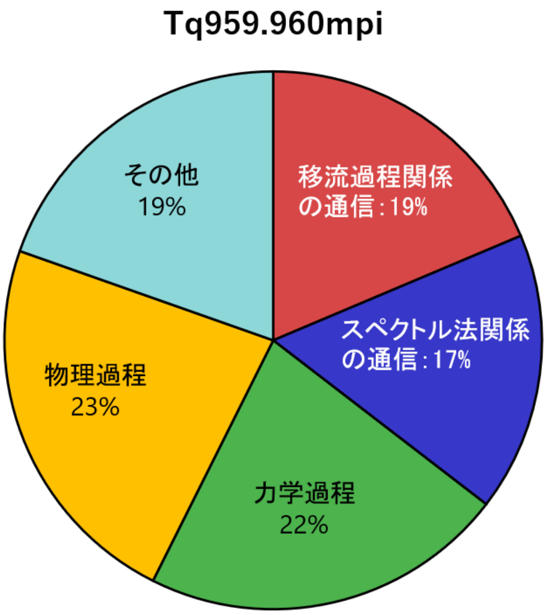

図 4.1.1 第 10 世代スーパーコンピュータシステム（Cray XC50）における、GSM の実行時間に占める主要処理の内訳（比率）。モデルのバージョンは GSM2303 であり、解像度は TQ959L128、予測期間は 5.5 日、MPI 並列数は 960、OpenMP スレッド数は 12 とした場合の計測値。赤色が移流過程（セミラグランジュ移流スキーム）に伴う通信処理の所要時間、青色がスペクトル法に伴う通信処理の所要時間、緑色が力学過程計算（スペクトル法、移流過程等）の所要時間、黄色が物理過程計算の所要時間、水色がその他（初期化、入出力など）に対応する。

手法と言える。

第 10 世代スーパーコンピュータシステム（Cray XC50）にて現在現業運用中の設定の GSM での、実行時間に占める各主要処理の内訳を図 4.1.1 に示す。図の「移流過程関係の通信」「スペクトル法関係の通信」が領域分割切替えの所要時間の割合である。領域分割切替えの所要時間は実行時間全体の約 4 割を占めており、現在の GSM における主要なボトルネックとなっている。現領域分割手法が導入された時点では、領域分割切替えの所要時間は 2 割程度であったが（宮本 (2009) の図 2.2.5 等）、現在は導入当初の 2 倍近くに伸びている。これは、計算機のノード間通信性能向上の停滞や、高解像度化（128 層化、13km 化）による通信量の増大、高並列計算機向け・高解像度実行向けに高並列化が進んだことによる集団通信効率の悪化等に由来する。今後、更なる GSM の高解像度化を行う際には、通信量増加・高並列化により更に通信所要時間が増大し、致命的なボトルネックとなることが懸念される。

通信律速傾向の軽減策として、領域分割の種類を減らす（領域分割切替えの回数を減らす）方向での、領域分割手法の見直しを現在検討している。領域分割手法見直しの概念図を図 4.1.2 に示す。現手法では、格子空間の領域分割について、物理過程用と移流過程用の 2 種類の領域分割を利用している。物理過程を計算する際は、鉛直一次元モデルの計算が基本であること（基本的に他水平格子を参照しないこと）や、計算負荷の地域依存性が大きいこと（積雲スキームの発動有無、陸海等）を踏まえ、負荷分散効率の改善を狙い、分散割当形式[2]の領域分割を利用している（図 4.1.2 (a)、東西・南北分割[3]）。移流過程（セミラグランジュ移流スキーム）を計算する際は、上流点値の参照に伴い近隣格子の参照が必要となるので、近隣格子参照の効率化として、ブロック割当形式[4]の領域分割を利用している（図 4.1.2 (b)、南北・鉛直分割）。物理過程・移流過程以外の格子空間の処理（力学過程の非線形項計算等）は、基本的に他水平格子を参照しない処理であるので、物理過程用と同じ領域分割にて計算している。新手法では、物理過程用に分散割当形式の領域分割を利用することをやめ、格子空間のすべての処理を同一のブロック割当形式の領域分割で計算するように変更する（図 4.1.2 (c)、東西・南北分割）。現手法では移流過程に伴い領域分割切替えと袖通信（袖領域のデータ交換）の 2 種類の通信が必要となるが、新手法では袖通信のみとなるため、現手法に対し通信量・通信回数とも大幅な削減が可能となる[5]。物理過程の計算コスト（負荷分散効率）と、移流過程の通信コストとのトレードオフに近い変更であるが、近年の通信律速な状況下では、新手法の方が高い実効効率を得られることが期待される。

(2) 空間ループ構造（配列格納方式）の改良

GSM では、MPI による分散メモリ形式の並列化を行った後、並列処理される各 MPI プロセスに対し OpenMP による共有メモリ形式の並列化（スレッド並列化）を行っている（MPI・OpenMP ハイブリッド並列）。また、近年の計算機は、CPU コア自身がベクトル化機能（SIMD 命令）を備えているものが多く、各スレッド単位でも並列的に計算が実行される。計算機の性能を十分に引き出すためには、これら各階層での並列化が適切に実施されるようにプログラムを設計することが重要となる。

GSM の各 MPI プロセスでは、格子空間の処理の多くを、外側から順に南北・鉛直・東西の 3 階層の空間ループで処理するように実装している。格子空間の空間ループの多くは、鉛直方向には運搬依存性があるが、水平方向には独立であるものが多いため、基本的には水

[2] 各 MPI プロセスが、様々な地域の格子点を担当するようにする領域分割の手法。サイクリック方式、ラウンドロビン方式などがある。負荷の地域依存性の大きい処理の実行効率に優れる。
[3] なお、実装の単純化として、南北方向のみを分散割当形式とし、東西方向についてはブロック割当形式としている。
[4] 各 MPI プロセスが、地理的に近い格子点を担当するようにする領域分割の手法。近隣格子参照を伴う処理の実行効率に優れる。
[5] 全体の水平格子点数 N、MPI 並列数 M に対し、領域分割切替えの全対全通信は通信量 $\mathcal{O}(N)$、通信回数 $\mathcal{O}(M^2)$ であるが、袖通信は通信量 $\mathcal{O}(\sqrt{NM})$、通信回数 $\mathcal{O}(M)$ である。

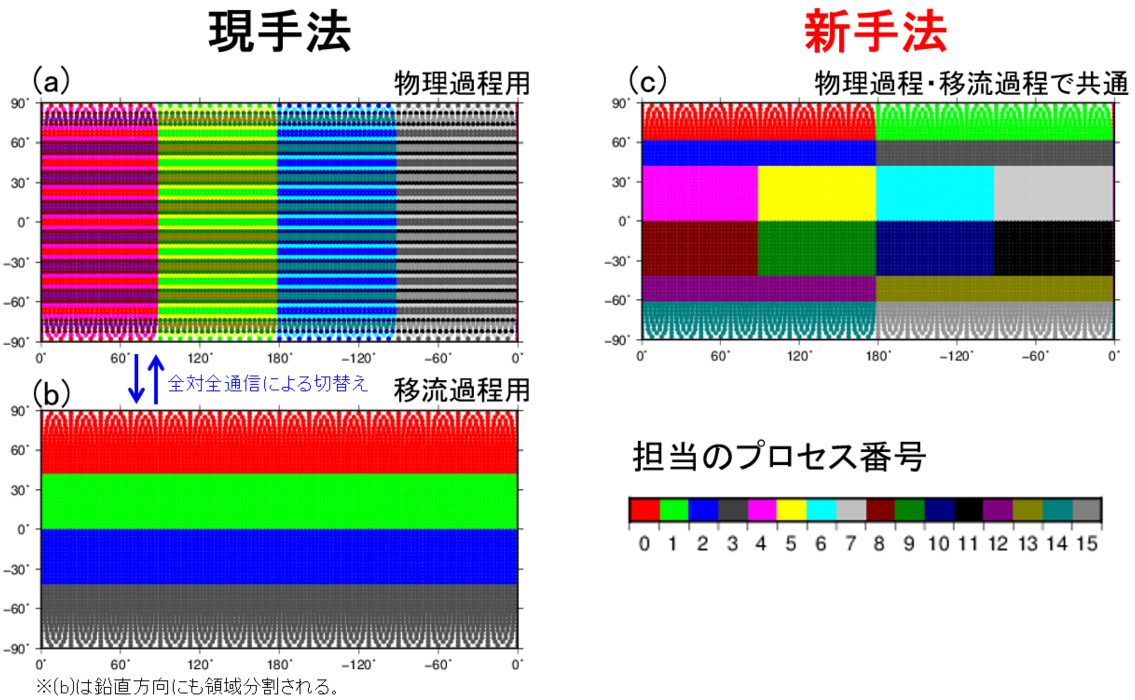

図 4.1.2　領域分割手法見直しの概念図（TL63L128、MPI 並列数 16 での例）。(a)〜(c) は、GSM の各水平格子点が割り当てられる MPI プロセスの番号を色分けで示した図であり、それぞれ、(a) が現手法にて物理過程（および移流過程以外の格子空間の処理）を計算する際に利用する領域分割（東西・南北の 2 次元領域分割；東西はブロック割当形式、南北は分散割当形式）、(b) が現手法にて移流過程を計算する際に利用する領域分割（南北・鉛直の 2 次元領域分割；南北・鉛直ともブロック割当形式）、(c) が新手法にて格子空間の処理全般（物理過程・移流過程共通）で利用する領域分割（東西・南北の 2 次元領域分割；東西・南北ともブロック割当形式）である。現手法では (a),(b) の形式を併用するのに対し、新手法では (c) の形式に一本化される。

平格子ループ（南北・東西ループ）が並列化の対象となる。並列化の階層としては、OpenMP によるスレッド並列化は外側のループに適用することが効果的であり、一方で、CPU のベクトル化による並列化は再内ループへの適用が基本となる。これらスレッド並列化・ベクトル化の両者の効果を十分に得ることを狙い、並列化可能な水平成分を内側・外側の両方に配置する設計としている。3 次元要素の配列格納順序は、メモリアクセス効率の観点から、空間ループの順番とは反対の、東西・鉛直・南北の順となる。一般に、このような配列格納方式・空間ループ構造の設計方法は、(i,k,j)-ordering と呼ばれる。

(i,k,j)-ordering の内側/外側成分について、現在は領域分割された東西/南北格子をそのまま利用しているが、これを、東西・南北格子を共通の水平インデックス化したうえで任意配分で割り振るように拡張することを現在検討している。本変更を導入することで、計算機特性を踏まえた空間ループ構造の調整が柔軟にできるようになり、スレッド並列化効率・ベクトル化効率の向上や、特性の異なる他計算機への移植性向上等の改善が期待される。なお、次項で示す第 10 世代スーパーコンピュータシステム、およびスーパーコンピュータ「富岳」での動作確認においては、OpenMP スレッド並列化効率の改善を狙い、外側成分により多くのデータを割り当てる設定とした。

(3)　変更のインパクト

第 10 世代スーパーコンピュータシステムにおける、本変更での GSM の実行時間・プロファイルの変化を図 4.1.3 に示す。移流過程に伴う通信の所要時間は約 226 秒から約 40 秒へ大幅に削減される。これは、移流過程に伴う通信が、領域分割切替えから袖通信に変わることで、通信量・通信回数とも大幅に削減されたことに由来する。物理過程計算の所要時間は約 279 秒から約 314 秒に増加する。これは、分散割当形式の廃止による計算効率の悪化（負荷分散効率の悪化）と、空間ループ構造の見直しによる計算効率の改善（スレッド並列化効率の改善等）のバランスであり、若干前者の影響が大きいため増加傾向となっている。全体としては、移流過程に伴う通信が軽量化されることの寄与が大きく、変更前後で約 1211 秒から約 1026 秒へ実行時間が削減される（約 15%の実行時間削減）。

続いて、異なる計算機上や並列規模を変えた場合での影響評価として、GSM をスーパーコンピュータ「富岳」に移植し、様々な並列設定を対象として、本変更の影響を確認した結果を図 4.1.4 に示す。どの並列規模

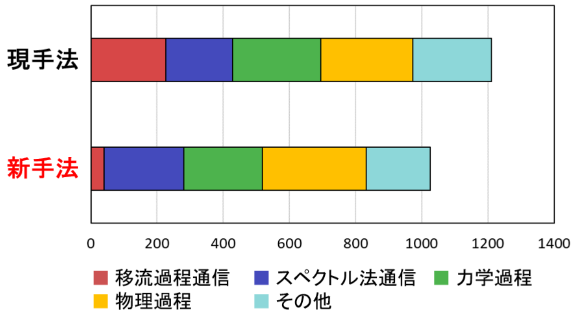

図 4.1.3 第 10 世代スーパーコンピュータシステム（Cray XC50）における、現手法・新手法での、GSM の実行時間と主要処理の内訳（積み上げ棒グラフ形式）。モデルのバージョンは GSM2303 であり、解像度は TQ959L128、予測期間は 5.5 日、MPI 並列数は 960、OpenMP スレッド数は 12 とした場合の計測値。各色が対応する処理は図 4.1.1 と同じ。横軸の単位は秒。

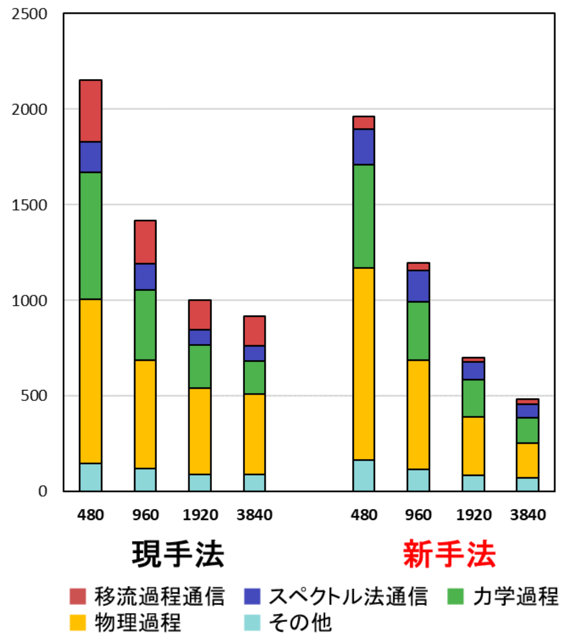

図 4.1.4 スーパーコンピュータ「富岳」における、現手法・新手法での、GSM の実行時間と主要処理の内訳（積み上げ棒グラフ形式）。モデルのバージョンは GSM2303 であり、解像度は TQ959L128、予測期間は 5.5 日。現手法・新手法について、それぞれ MPI 並列数を 480, 960, 1920, 3840 とした場合（OpenMP スレッド数はいずれも 12）の計測値を横軸に並べている。各色が対応する処理は図 4.1.1 と同じ。縦軸の単位は秒。

でも新手法は現手法に対し高速化される傾向であるが、高速化の程度やプロファイルの変化傾向は並列規模に依り大きく異なる。移流過程の通信負荷軽減の効果は、どの並列規模でも概ね一定の割合の所要時間削減として寄与する。一方で、物理過程計算は、並列規模の小さい設定では遅くなる傾向だが、並列規模が大きい設定では速くなる傾向となっている。これは、高並列設定ほど空間ループ構造見直しの効果が大きくなることに由来する。結果として、より高並列の設定ほど本変更による実行時間削減の効果は大きくなり、3840MPI 実行の場合は約 917 秒から約 484 秒へ短縮される（約 47%の実行時間削減）。

以上の計測結果の通り、近年の計算機・実行設定では、移流過程の通信負荷軽減や、空間ループ構造の見直しが計算効率の改善に有効であり、新手法の導入により、より高速にモデルを実行できるようになる。

4.1.3 海面水温解析値が全球数値予報システムの予測精度に与える影響調査

全球数値予報システムにおいて、海面水温（以下、SST: Sea Surface Temperature）は、下部境界条件として利用される。そのため、高精度な SST の利用は台風の強度予測など大気の予測精度向上には重要である。

気象庁全球数値予報システムでは、全球 0.25° メッシュ日別海面水温解析値である MGDSST（栗原ほか 2006）を下部境界条件として用いている。MGDSST は気象庁大気海洋部が作成しているが、重点計画を受け、より高解像度である全球 0.1° メッシュ日別海面水温解析値（以下、全球 HIMSST）の開発にも取り組んでいる。全球 HIMSST は、MGDSST に対して高解像度であるだけでなく、MGDSST では解析手法の影響でフィルターされている短周期の変動成分（周期 10 日～27 日）が考慮される予定である。全球数値予報システムにおいても、全球 HIMSST の利用によって短期間での SST 変化による影響が大気の解析や予測に表現されることが期待できるため、その利用を今後計画している。全球 HIMSST の利用に向けた開発に先立ち、海面水温解析値の特性の違いが全球数値予報システムに与える影響を把握しておくことが効率的に開発を進める上で重要となる。英国気象局が作成する OSTIA（Good et al. 2020）は、全球 0.05° メッシュの日別海面水温解析値であり、全球 HIMSST と同様に、MGDSST より高解像度であることに加え、より短周期の変動成分（周期 1 日～27 日）を含む。そのため、OSTIA が全球数値予報システムの予測精度に与える影響を把握することは、全球 HIMSST 利用に向けた予備調査となる。本項では、OSTIA を用いて調査した、海面水温解析値の特性の違いが全球数値予報システムに与える影響について報告する。調査においては、SST の違いが全球予報計算の下部境界条件として台風予測などに直接的に与える影響だけでなく、解析予報サイクルを通じて解析値及び予測値の精度に与える影響にも着目した。

(1) 全球数値予報システム及び全球モデルでの SST の扱われ方

全球数値予報システムでは、SST は全球予報計算及び全球解析における第一推定値計算での下部境界条件、衛星輝度温度品質管理における放射伝達モデル計算での下部境界条件として利用される。SST の精度向上により、全球予報における下部境界条件の精度向上を通

じた大気予測の精度向上だけでなく、解析予報サイクルを通じた大気解析値の精度向上及びそれを通じた予測精度の向上が期待される。

GSM では、数 m 程度の深さでの SST (bulk SST) の初期値として海面水温解析値を用い、bulk SST の予測時間における変化は、気候値成分のみを考慮する。そのため、ほぼ初期の値（海面水温解析値）が予測時間の間利用されることとなる。海面における顕熱・潜熱フラックスの計算に必要な海面の極薄い表層での SST (skin SST) に関しては、bulk SST を元に、日射による日変化成分を考慮したスキームで診断する。

(2) MGDSST と OSTIA の比較

ここでは、MGDSST と OSTIA の違いについて述べる。OSTIA は MGDSST に対してより短周期の変動成分を含むが、この違いは特に台風通過領域での SST の差として顕著に見られる。これは、台風直下では海洋表層の混合効果及び湧昇効果により SST が短期間で急激に低下するためである。図 4.1.5 は、台風事例における日本周辺での OSTIA と MGDSST の差を示す。台風通過による SST 低下の応答は OSTIA の方が MGDSST より早いため、台風が通過した東シナ海上において、SST の差が拡大する様子が確認できる。GSM では、予測時間における SST の変化として気候値成分のみ考慮するため、このような海面水温解析値の違いは台風強度予測に大きな影響を及ぼす。図 4.1.6 は、2019 年 7 月から 9 月までの 3ヶ月間で平均した OSTIA と MGDSST の差を示す。特に、北極海や、SST 勾配が大きく海洋中小規模擾乱が見られる中緯度帯で大きな差が見られる。また、夏半球（北半球）では広範囲で OSTIA の方が MGDSST より低い。これは、OSTIA は日変化しない深さ（10 m 程度）での SST (foundation SST) であるのに対し、MGDSST は数 m 程度の深さでの SST (bulk SST) であり、OSTIA の方がより深い場所の SST を解析対象としているためと考えられる。なお、本調査は全球 HIMSST 利用に向けた予備調査であり、OSTIA を気象庁全球数値予報システムで利用するための調査ではないため、skin SST を診断するスキームにてこの解析対象とする深さの違いは考慮せず、OSTIA も bulk SST として扱う[6]。

(3) OSTIA を用いたインパクト実験

海面水温解析値の特性の違いが全球数値予報システムにおける予測精度に与えるインパクトを確認するため、解析予報サイクル実験を実施した。対照実験としては、2022 年 2 月時点で準リアルタイム実行 (気象庁 2023b) の水平解像度 13 km の全球数値予報システムを用いた。以下では、対照実験を CNTL、用いる海面水温解析値を MGDSST から OSTIA に変更した実験を TEST と呼ぶ。なお、OSTIA に関しては解像度を 0.05° から 0.25° に変換したものを用いた。実験は夏期実験として 2019 年 8 月、冬期実験として 2020 年 1 月の 2 期間で実施した。ここでは、より大きいインパクトが得られた夏期実験の結果を述べる。

図 4.1.7 は、2019 年 8 月で期間平均した潜熱フラックスの TEST と CNTL の差を示す。図 4.1.6 の SST の差に対応した変化が見られ、全体的に潜熱フラックスは減少する。顕熱フラックスに関しても同様の変化が見られた（図略）。図 4.1.8 は、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A 及びマイクロ波水蒸気サウンダ MHS の輝度温度について、観測値と第一推定値の差 (O−B) の標準偏差の変化率を示す。対流圏下層の気温に感度のある AMSU-A の ch4 や ch5 について、観測値と第一推定値の整合性向上が見られる。AMSU-A の ch4 について図 4.1.9 の水平分布で見ると、特に北極海や熱帯東部太平洋上で観測値と第一推定値の整合性が向上している。これは、より短周期の変動成分を含む海面水温解析値を利用することで、SST の影響を強く受ける対流圏下層の気温の第一推定値がより現実に近いものになるためと考えられる。図 4.1.10 は、2019 年 8 月における 850 hPa 気温の 5 日予測での RMSE の差の分布を示している。北半球の海上では改善が目立ち、海面水温解析値の差が顕著な領域と下層気温の改善が見られる領域の対応が良い。

図 4.1.11 は、2019 年 8 月における CNTL 及び TEST の台風中心気圧の対気象庁ベストトラックの ME を示す。全予報時間において、TEST の方が CNTL より ME が大きくなっており、台風の中心気圧が浅くなる方向に変化している。特に、FT=0–36 において台風の発達が抑えられている。これは、北西太平洋において OSTIA の方が MGDSST より低いことに加え、より短周期の変動成分を含むことで、台風通過に伴う SST 低下の効果が反映されるためと考えられる。FT=0–84 において、平均的に TEST は CNTL に対して ME の絶対値が増加しており、改悪傾向である。ただし、個別の事例で見ると、短周期の変動成分が考慮された海面水温解析値を利用することで台風の過発達が抑制され、予測が改善する事例も見られた。その一例として、令和元年台風第 10 号の予測について、TEST と CNTL 間での違いを示す。図 4.1.12（上）は 2019 年 8 月 10 日 18UTC を初期値とする台風第 10 号の中心気圧の予測を示す。特に FT=0–36 において TEST は CNTL と比較し台風の発達が抑えられており、最大発達時の強度では過発達が改善され実況程度になっている。これは、初期値として利用される 2019 年 8 月 10 日 18UTC の SST に関して、日本の南海上に存在する台風第 10 号の周辺では OSTIA の方が MGDSST よりも低かったためである（図 4.1.12（下））。なお、台風進路予測については大きな差は見られなかった（図略）。

以上の結果の通り、OSTIA を利用することで、台風の強度予測への影響だけでなく、解析予報サイクルを

[6] OSTIA (foundation SST) を bulk SST として扱うことの妥当性については議論の対象としない。

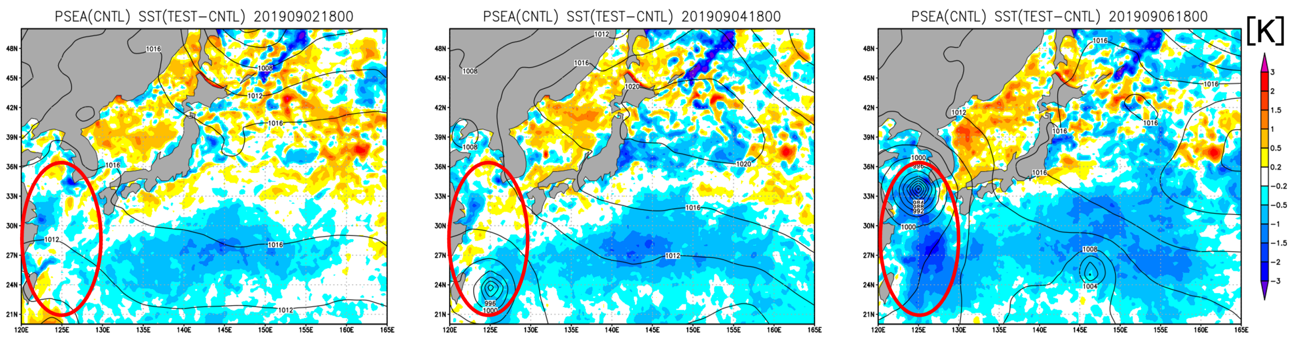

図 4.1.5 （左）2019 年 9 月 2 日 18UTC、（中）2019 年 9 月 4 日 18UTC、（右）2019 年 9 月 6 日 18UTC における日本周辺での SST [K] の差 (OSTIA (TEST) −MGDSST (CNTL)) 。OSTIA については解像度を 0.05° から 0.25° に変換したものを描画している。等値線は 2022 年 2 月時点で準リアルタイム実行の全球数値予報システムを用いた実験における海面更正気圧 [hPa] の解析値、赤丸は台風通過領域を表す。

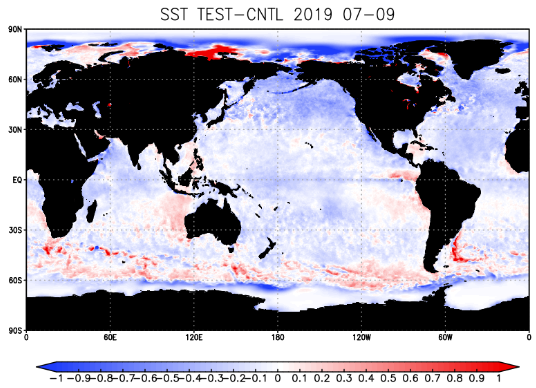

図 4.1.6 2019 年 7 月から 9 月で期間平均した SST [K] の差 (OSTIA (TEST) −MGDSST (CNTL)) 。OSTIA については解像度を 0.05° から 0.25° に変換したものを描画している。

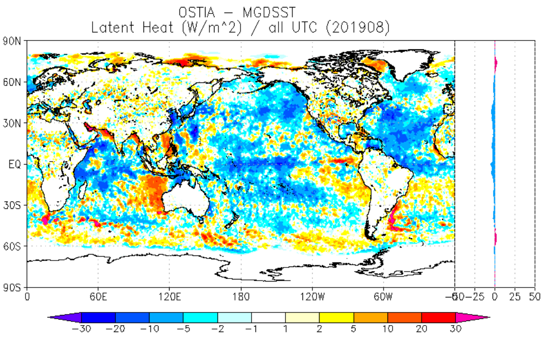

図 4.1.7 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月平均の潜熱フラックス [W m^{-2}] の差 (TEST−CNTL) とその帯状平均値。

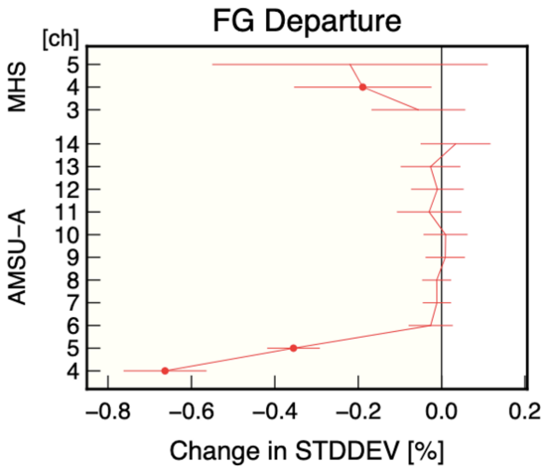

図 4.1.8 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における全球平均のマイクロ波気温サウンダ AMSU-A 及びマイクロ波水蒸気サウンダ MHS の観測値と第一推定値との差の標準偏差の変化率 [%]。負の値は TEST の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表し、エラーバーは 95%信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意であることを表す。

通じた解析値の精度向上が示唆された。解析値の精度向上を通じた予測精度改善も見られており、より短周期の変動成分を含む海面水温解析値を利用することが、全球数値予報システムにおいても予測精度向上に重要であることが示された。

4.1.4 まとめと今後の予定

重点計画で示した開発の方向性である、GSM の水平解像度 10 km 以下への高分解能化に向けたモデルフレーム改良の開発進捗、全球 10km メッシュの高解像度海面水温データ（全球 HIMSST）の利用に向けた予備調査結果について示した。モデルフレームについては、通信量・通信頻度を削減するための領域分割手法の改良と、特性の異なる計算機に柔軟に対応可能なループ構造の改良を進めた。第 10 世代スーパーコンピュータシステムのような現業運用中のスーパーコンピュータのみならず、スーパーコンピュータ「富岳」といったフラッグシップマシン上でも、改良されたフレームは現フレームよりも高速かつ高い並列化効率で GSM を実行させることが可能であることがわかった。SST が全球数値予報システムに与える影響の予備調査とし

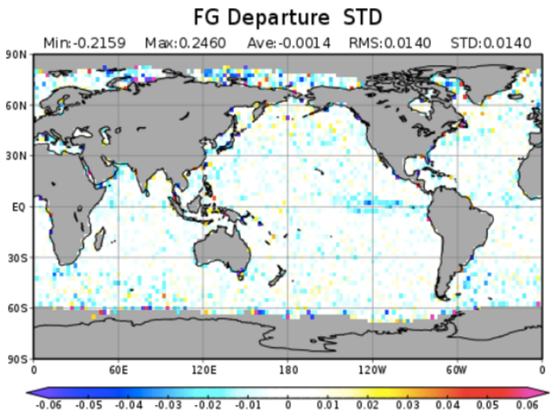

図 4.1.9　解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における AMSU-A (ch4) の観測値と第一推定値との差の標準偏差の差 [K]。負の値は TEST の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表す。

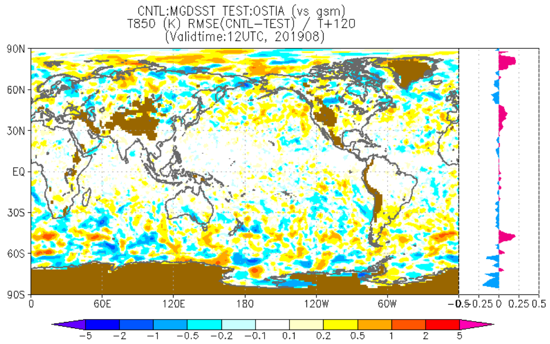

図 4.1.10　解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における 850 hPa 気温の 5 日予測での対解析 RMSE の差 [K] とその帯状平均値。正の値は TEST が CNTL に対して改善していることを表す。

ては、MGDSST よりも高解像度かつ短周期成分の変動を考慮した SST 解析値である OSTIA を用いたインパクトを確認した。予備調査を通じて、SST の短周期成分の考慮は、台風通過後の SST 低下を捉えることで

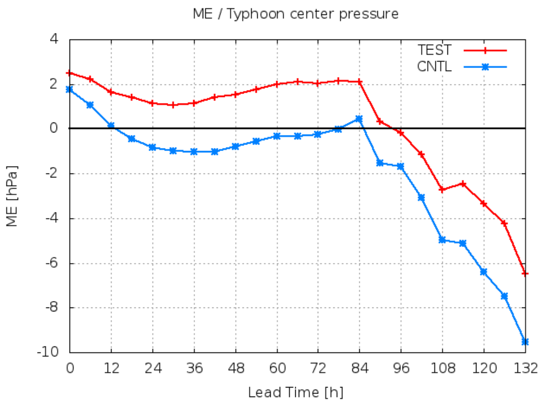

図 4.1.11　解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における台風中心気圧の対気象庁ベストトラック ME [hPa]。横軸は予報時間 [hour]。青は CNTL、赤は TEST を表す。

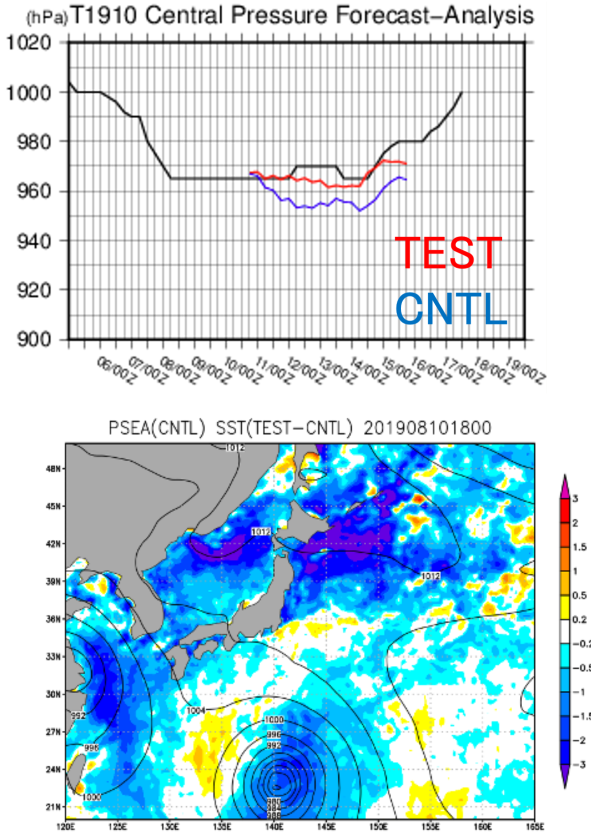

図 4.1.12　（上）2019 年 8 月 10 日 18UTC を初期時刻とする台風第 10 号の中心気圧 [hPa] の予測。横軸は日時。黒は気象庁ベストトラック、青は CNTL、赤は TEST を表す。（下）2019 年 8 月 10 日 18UTC における日本周辺での SST [K] の差 (OSTIA−MGDSST) 。等値線は CNTL の海面更正気圧 [hPa]。

台風の強度予測に直接影響することを確認した。さらに、解析予報サイクルを通じて全球数値予報システム全体の精度向上に寄与することがわかった。

今後は第 11 世代スーパーコンピュータシステム運用開始後、早い段階での改良版のフレーム導入を目指す。全球 HIMSST の利用については、本節で示した調査で得られた知見を踏まえ、評価用のデータセットができ次第速やかに評価を進める計画である。全球 HIMSST の運用開始後、可能な限り速やかに全球数値予報システムの下部境界として利用することを目指す。

謝辞

本調査結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」を利用して得られたものです（課題番号：hp210250）。

参考文献

Good, S., E. Fiedler, C. Mao, M. J. Martin, A. Maycock, R. Reid, J. Roberts-Jones, T. Searle, J. Waters, J. While, and M. Worsfold, 2020: The Current Configuration of the OSTIA System for Oper-

ational Production of Foundation Sea Surface Temperature and Ice Concentration Analyses. *Remote Sensing*, **12(4)**.

姫野龍太郎, 2016: スーパーコンピュータ：今後の速度向上の課題と利用者側で考えるべきこと. 応用数理, **26**, 38–42.

気象庁, 2023a: メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長. 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, 21–24.

気象庁, 2023b: 全球モデルの物理過程改良. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センタ ー, 62–70.

栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計、衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, S1–S18.

宮本健吾, 2009: 適合ガウス格子版全球モデル. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 27–49.

4.2　全球アンサンブル予報システムの開発

4.2.1　SST 摂動リセンタリング処理の変更

はじめに

気象庁が運用している全球アンサンブル予報システム（GEPS）では、下部境界条件として与える海面水温（SST）の作成手法として 2 段階 SST 法 (Takakura and Komori 2020) を採用している。2 段階 SST 法では、初期時刻の対気候値偏差を予測期間において固定して気候値変動分のみを時間変化として扱う偏差固定 SST から、季節アンサンブル予報システムの大気海洋結合モデルで別途計算された予測 SST に予測期間中に切り替えている。さらに、SST の不確実性を表現するために SST 摂動 (Hotta and Ota 2019) を導入しており、過去のランダムな初期日の偏差固定 SST の対解析誤差を相殺するような摂動を各メンバーに与えている。この摂動はランダムに選ばれており、アンサンブル平均値としては意味を持たないため、全メンバー（1 初期値あたり 51 メンバー）のアンサンブル平均 SST をコントロールメンバー（摂動なし）の SST と一致させるようにリセンタリング処理を行っている。

一方で、GEPS 全 51 メンバー（1・2 週目）のうち 25 メンバーのみを利用する 1 か月予報（3・4 週目）では、利用した 25 メンバーのアンサンブル平均 SST はコントロールメンバー（摂動なし）の SST と一致しておらず、1・2 週目と異なりランダムなノイズが足されコントロールメンバーの SST からずれた状態になっている。また、GEPS の再予報においても、51 メンバーで作成した SST のうち 13 メンバーのみを利用しているため、同様の問題がある。このため、一部のメンバーだけを利用する場合でもアンサンブル平均 SST とコントロールメンバーの SST が一致するように、リセンタリング処理を変更することを検討している。

リセンタリング処理変更の効果

GEPS の再予報実験を行い、上記のリセンタリング処理変更の効果を確認した。再予報実験仕様については、Yamaguchi et al. (2023) と同様だが、初期日は 1、2、6、7、8、12 月の月末初期日のみとした。リセンタリング処理変更適用なしの CNTL 実験と変更適用ありの TEST 実験を行い、結果を比較した。

図 4.2.1 に、SST と 2m 気温の予測 2 週目のアノマリー相関係数（ACC）の差分（TEST − CNTL）を示す。まず、SST については全球的な ACC の改善が見られており、リセンタリング処理を変更した効果が明瞭に見られている。また、SST で ACC の改善幅が比較的大きな夏半球側の海上では、2m 気温の ACC でも改善が見られた。冬半球と比べて夏半球の方が海洋混合層が薄く SST の変動も大きいため、SST 摂動も大きく、リセンタリング処理が不十分な場合のランダムノイズも大きかったと考えられる。なお、下層気温以外の要素への影響は小さかったものの（図略）、大気予測の改善に寄与していることも分かった。

今後は、さらに事例数を増やした実験を行い、結果をより詳細に確認していく予定である。

参考文献

Hotta, D. and Y. Ota, 2019: Statistical generation of SST perturbations with spatio‐temporally coherent growing patterns. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 1660–1673.

Takakura, T. and T. Komori, 2020: Two-tiered sea surface temperature approach implemented to JMA ’s Global Ensemble Prediction System. *WGNE. Res. Activ. Earth Sys. Modell.*, **50**, 6.15–6.16.

Yamaguchi, H., J. Chiba, Y. Ichikawa, and T. Takakura, 2023: Hindcast verification of JMA’s GEPS for one-month prediction with a globally expanded two-tiered sea surface temperature approach. *WGNE. Res. Activ. Earth Sys. Modell.*, **53**, 6.13–6.14.

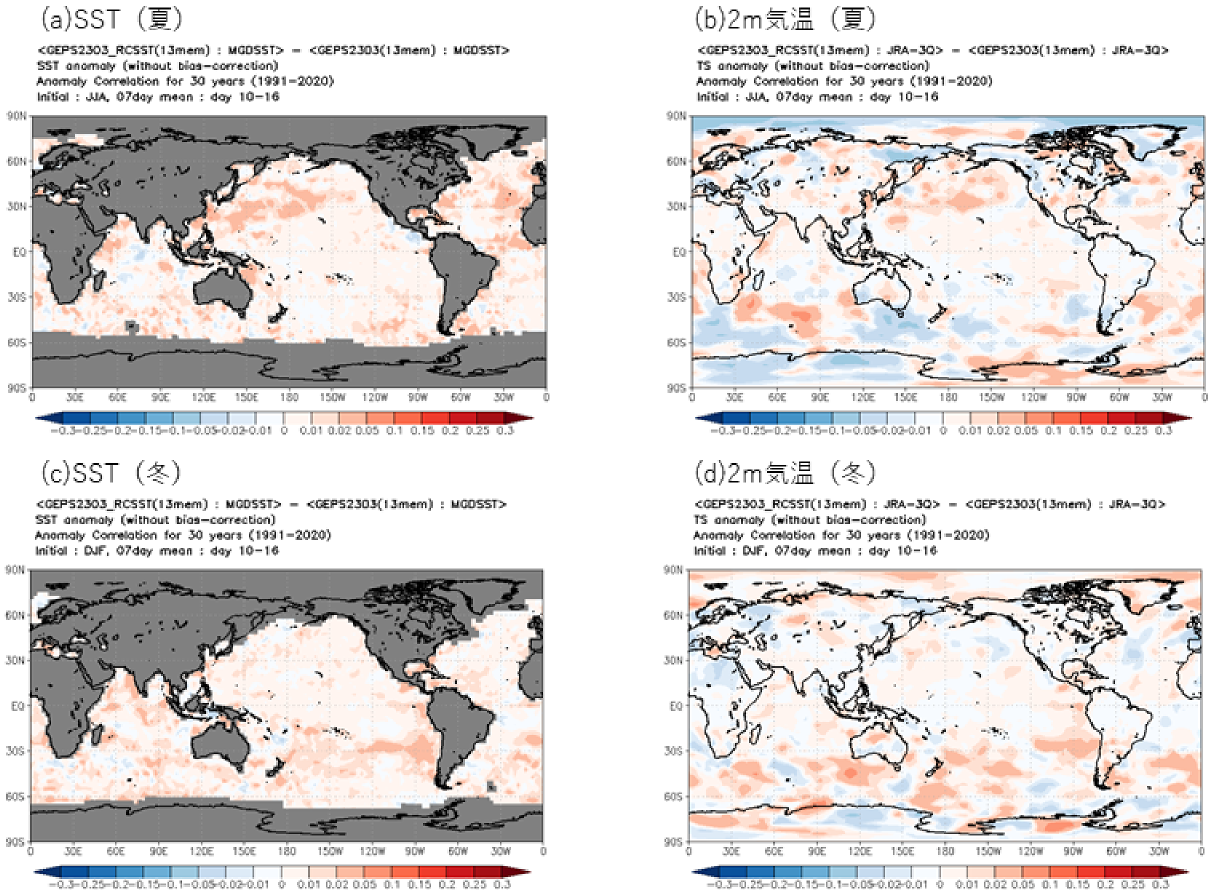

図 4.2.1　再予報実験予測 2 週目のアノマリー相関係数の差分（TEST − CNTL）。(a)(b) 夏期間（6、7、8 月）と (c)(d) 冬期間（1、2、12 月）の (a)(c)SST と (b)(d)2m 気温。

4.3　観測データの新規導入と利用方法の改良

4.3.1　はじめに

気象庁の数値予報システムでは、初期値解析において様々な観測データが同化されている。初期値精度の向上は予測精度向上に重要であり、新規観測データの導入や観測データの利用方法の改良が継続的に進められている。本節では、新規観測データの導入や観測データの利用方法の改良に関して、現在進められている主な開発の進捗を報告する。

4.3.2　NOAA-21 搭載 ATMS および CrIS 輝度温度データの新規利用

(1)　NOAA-21 の概要

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

気象庁では既に、Suomi-NPP および NOAA-20 搭載のマイクロ波サウンダ ATMS および、ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS の輝度温度データを全球、メソ、局地解析で利用し、初期値の気温場や水蒸気場の精度を向上させている (平原 2017; 亀川・計盛 2017; 村田・亀川 2020; 気象庁 2023a)(第 3.7 節)。NOAA-21 についても ATMS および CrIS の輝度温度データの利用を 2023 年度末に開始するべく開発を進めている。ここではその開発状況について概要を述べる。

(2)　データ品質および同化設定

NOAA-21 に搭載されている ATMS や CrIS の仕様は、既存の Suomi-NPP や NOAA-20 に搭載のものと同一であることから、基本的な品質が同程度であることを確認の上、既存衛星と同じ方法で同化利用する方針とした。

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

NOAA-21/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、全球、メソ、局地の各システムに共通の試験として、現業数値予報システム相当の実験システムを用い、2023 年夏季を対象に同化実験を実施した。現業数値予報システム相当のコントロール実験（CNTL）、CNTL に NOAA-21/ATMS および CrIS を追加した実験（TEST）、並びに CTNL から Suomi-NPP および NOAA-20 のいずれの ATMS も CrIS も使用しない設定としたベース実験（BASE）を実施した。BASE に対する CNTL、および BASE に対する TEST の変化を比較することで、ATMS および CrIS を追加すること自体による基本的な性能を確認するとともに、NOAA-21 の追加利用による効果が既存衛星と同様であるかどうかを確認した。

(3)　全球解析における利用

全球解析では、ATMS の水蒸気チャンネルについては雲や降水域も含めた全天同化で利用しており (気象庁 2022b)、ATMS の気温チャンネルおよび CrIS については雲や降水の影響を受けていない晴天域のデータを同化している (平原 2017; 村田・亀川 2020)。NOAA-21/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、2023 年 5 月末時点の現業全球数値予報システム相当の実験システムを用い、2023 年夏季を対象に上記の CNTL、TEST、BASE の各実験を実施した。

NOAA-21 の追加による利用データ数は、ATMS では 10%程度、CrIS では気温チャンネルで 10～35%程度、水蒸気チャンネルで 60%程度、それぞれ増加した。単純に 50%増加（2 衛星から 3 衛星で 1.5 倍）にならないのは、同種の観測データが過度に利用されることを避けるため、Suomi-NPP や NOAA-20 の観測と重複する領域において、いずれかの衛星のデータのみを使用するという間引きを適用した結果である。なお、CrIS の水蒸気チャンネルで増加幅が大きいのは、Suomi-NPP/CrIS の水蒸気チャンネルが故障しているためである。

様々な種類の観測データについて、解析処理における観測値と第一推定値との整合性を確認したところ、気温に感度のあるマイクロ波サウンダ AMSU-A やハイパースペクトル赤外サウンダ IASI（気温チャンネル）、水蒸気に感度のある静止衛星晴天輝度温度やハイパースペクトル赤外サウンダ IASI（水蒸気チャンネル）などにおいて、追加した ATMS や CrIS が感度を持つ要素や高度に対応して整合性に向上が見られた（図 4.3.1）。これは気温や水蒸気の第一推定値として用いた短期予測（3～9 時間）の精度が向上したことを示唆するものである。また、BASE に対する CNTL、BASE に対する TEST の検証結果を比較したところ、上記の改善傾向がはっきり確認でき、NOAA-21 の追加によりその傾向がさらに強められていることが確認できた（図 4.3.1）。

予測精度については、24 時間後予測など比較的予測時間の短い範囲で、対解析値検証や対ゾンデ検証で共通し、熱帯域を中心に気温や高度の場の改善がみられた。

(4)　メソ解析における利用

メソ解析では、ATMS については現在水蒸気チャンネルのみを利用している (気象庁 2023a)。CrIS についてはモデル上端より上部に感度のない気温チャンネルおよび水蒸気チャンネルを利用している（第 3.7 節)。いずれも雲や降水の影響を受けていない晴天域のデータを利

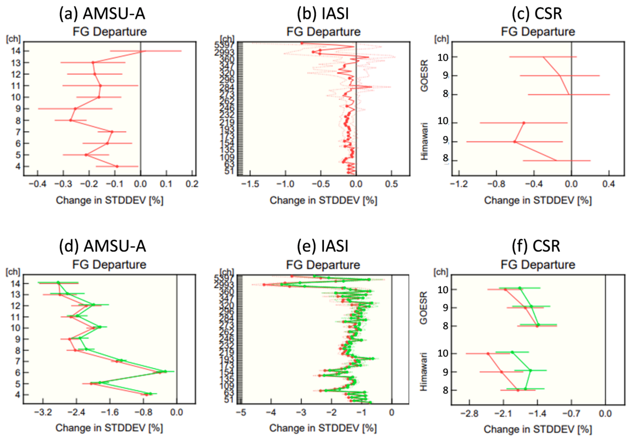

図 4.3.1　全球解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の変化率 [%]。上段は TEST の CNTL に対する変化率、下段は TEST（赤）および CNTL（緑）の BASE に対する変化率を示す。(a)(d) マイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b)(e) ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI、(c)(f) 静止衛星 CSR。縦軸はチャンネル番号。IASI は上から 9 チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合（改善）している場合、0 線より左側にプロットされる。

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

NOAA-21 の追加による利用データ数は、ATMS では 4%程度、CrIS では気温チャンネルで 30%程度、水蒸気チャンネルで 60%程度、それぞれ増加した。様々な種類の観測データについて、解析処理における観測値と第一推定値との整合性を確認したところ、水蒸気に感度のある IASI の水蒸気チャンネルやマイクロ波イメージャの 183GHz 帯のチャンネル等において整合性に向上が見られた。気温に感度のある AMSU-A や IASI の気温チャンネルに顕著な改善が見られないのは、メソ解析では ATMS の気温チャンネルを利用していないためと考えられる。また、BASE に対する CNTL、BASE に対する TEST の検証結果を比較したところ、上記の改善傾向がはっきり確認でき、NOAA-21 の追加によりその傾向がさらに強められていることが確認できた。TEST と CNTL の比較において不明瞭だった AMSU-A や IASI 気温チャンネル等においても、それぞれにおいて若干の整合性の向上が確認できた。

予測精度については、ラジオゾンデや解析雨量、地上観測を参照値として検証した結果、概ね中立で、観測の影響が出やすい 3〜9 時間予測付近に注目すると、高度場など一部要素で若干の改善が見られた。

(5)　局地解析における利用

局地解析では、メソ解析同様 ATMS については現在水蒸気チャンネルのみを利用している (気象庁 2023a)。また、CrIS についてはメソモデルよりモデル上端高度が低いことから水蒸気チャンネルのみを利用している（第 3.7 節）。いずれも雲や降水の影響を受けていない晴天域のデータを利用している。

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

NOAA-21 の追加による利用データ数は、ATMS で 4%程度、CrIS（水蒸気チャンネルのみ）で 50〜60%程度、それぞれ増加した。様々な種類の観測データについて、解析処理における観測値と第一推定値との整合性を確認したところ、水蒸気に感度のあるマイクロ波イメージャや、ひまわり晴天輝度温度において整合性に向上が見られた。また同様に、BASE に対する CNTL、BASE に対する TEST の検証結果を比較したところ、上記の改善傾向がはっきり確認でき、NOAA-21 の追加によりその傾向が強められていることが確認できた。

予測精度については、ラジオゾンデや解析雨量、地上観測を参照値として検証した結果、概ね中立であった。

(6)　まとめと今後

NOAA-21 に搭載されている ATMS および CrIS の輝度温度データを、全球、メソ、局地の各数値予報システムで追加利用するための調査を行った。NOAA-21 の ATMS および CrIS の品質は既存衛星と同程度であり、既存の衛星の ATMS および CrIS の利用方法に準じた方法で利用することとした。NOAA-21 の追加により、利用データ数は増加し、既存の衛星により得られていた初期値における気温や水蒸気の精度向上が、より強められていることを確認した。この結果を踏まえ、2023 年度末の現業利用に向けて準備を進めている。

現業システムにおいて ATMS や CrIS の観測データを利用するためには、迅速なデータの入手が求められる。特にメソ解析、局地解析においては観測から解析処理を開始するまでの時間が短いため、衛星運用機関がデータを処理して配信するデータを利用するだけでなく、衛星から直接受信したデータを処理して利用することが効果的である。気象衛星センターにおいて 2023 年 6 月に更新された極軌道衛星受信システムでは、衛星からの配信の仕様がアップデートされた NOAA-21 のデータを受信できるようになった。2023 年度末の利用開始時には、この直接受信データを利用することで、今回示した結果より多くのデータが利用できるようになる見込みである。

ATMS および CrIS に関する今後の課題として、メソ、局地解析においては、ATMS の気温チャンネルの

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

4.3.3 二重偏波化された沖縄・松江のレーダーデータの利用

全国 20 地点の一般気象レーダーの反射強度とドップラー速度、9 地点の空港気象ドップラーレーダー (DRAW: Doppler Radar for Airport Weather) のドップラー速度は、メソ解析、局地解析でデータ同化に利用されている[1]。2023 年 6 月時点における気象庁の一般気象レーダーと DRAW の二重偏波レーダーへの更新状況を表 4.3.3 に示す。

これまで二重偏波レーダーの更新の際には、いったん数値予報での観測データの利用を中止してデータ品質及び数値予報システムへのインパクトを確認した後に、利用を再開している (気象庁 2021, 2022a, 2023b)。

本項では 2022 年 7 月[2]以降に更新された沖縄・松江（以下、新規更新レーダーとする）の反射強度とドップラー速度のメソ・局地数値予報システムでの利用を開始するため、それぞれの数値予報システムにおいてデータ品質及びこれらのデータが解析値と予測値に与えるインパクトの調査結果について報告する。なお、レーダーデータの同化手法及び品質管理 (QC: Quality Control) 処理は更新前（石川 (2015)、幾田 (2015) などを参照されたい）と同様である。

表 4.3.1 気象庁の一般気象レーダーと DRAW の二重偏波レーダーへの更新状況。赤字で示されているレーダーは本報告においてメソ解析、局地解析での利用を開始した新規更新レーダーである。「-」は未更新であることを示す。

一般気象レーダー				DRAW	
地点名	二重偏波運用開始日	地点名	二重偏波運用開始日	地点名	二重偏波運用開始日
札幌	-	福井	2020.11.05	新千歳	2020.10.29
釧路	2021.12.23	大阪	2020.12.18	成田	2016.12.01
函館	-	松江	2023.06.01	羽田	2016.03.01
秋田	-	広島	2021.02.26	中部	2019.11.28
仙台	2021.06.11	室戸岬	2022.06.02	関西	2016.03.03
新潟	-	福岡	2021.01.14	大阪	2022.03.10
長野	-	種子島	2022.04.28	福岡	2020.03.19
東京	2020.03.05	名瀬	-	鹿児島	-
静岡	-	沖縄	2023.04.28	那覇	2018.12.13
名古屋	2021.02.26	石垣島	-		

[1] ドップラー速度については三十分大気解析でも利用されている。
[2] 昨年度導入したレーダーのうち最後に更新した地点が室戸岬で 6 月運用開始。

表 4.3.2 局地解析における新規更新レーダーの更新前後の疑似相対湿度の O−B 値統計。統計期間について更新前は 2022 年 6 月 1 日から 2022 年 6 月 30 日、更新後は 2023 年 6 月 1 日から 2023 年 6 月 15 日。

サイト名	平均 (%)	標準偏差 (%)
松江（更新前）	0.092	6.521
松江（更新後）	−0.492	7.994
沖縄（更新前）	−0.844	7.593
沖縄（更新後）	−1.882	6.054

表 4.3.3 局地解析における新規更新レーダーの更新前後のドップラー速度の O−B 値統計。統計期間について更新前は 2022 年 6 月 1 日から 2022 年 6 月 30 日、更新後は 2023 年 6 月 1 日から 2023 年 6 月 15 日。

サイト名	平均 (m/s)	標準偏差 (m/s)
松江（更新前）	−0.187	2.267
松江（更新後）	−0.075	2.461
沖縄（更新前）	−0.193	2.045
沖縄（更新後）	−0.144	2.201

局地解析で同化された新規更新レーダーの疑似相対湿度[3]とドップラー速度について、観測値と第一推定値の差 (O−B: Observation−Background) の平均及び標準偏差をそれぞれ表 4.3.2 と表 4.3.3 に示す[4]。新規更新レーダーの疑似相対湿度とドップラー速度のデータ品質は、更新前のレーダーのデータ品質と概ね同等[5]であり、問題がないことを確認した。同様にメソ解析においても新規更新レーダーのデータ品質に問題がないことを確認した。図 4.3.2 は局地数値予報システムにおいて新規更新レーダーの疑似相対湿度とドップラー速度を同化に利用しない実験 (CNTL)、利用した実験 (MfCNTL)、および MfCNTL に第一推定値と境界値に新規更新レーダーを同化したメソ予報を利用した実験 (TEST) について、1 時間降水予測スコア（10 km 検証格子平均）を示している。データカバレッジ拡大の影響を受けて、見逃し、空振りが改善したことにより、エクイタブルスレットスコア (ETS: Equitable Threat Score) でも予測期間を通して改善が見られる。改善傾向は MfCNTL より TEST の方が大きく、メソ解析での新規更新レーダー利用による効果が見られる。

他にも、メソ解析において対流圏中・下層を中心に航空機等による風の観測値と第一推定値の整合性、および降水予測スコアで弱い雨の改善等が確認できたことから、令和 5 年 11 月にメソ数値予報システム及び局地数値予報システムにおいて新規更新レーダーの利用を開始した。

令和 6 年度についても二重偏波レーダーへの更新が予定されており、更新の完了後に同様に影響を確認し

[3] 反射強度から推定した相対湿度。
[4] 更新前後ではデータの同時取得ができないため統計期間が異なっている。
[5] 過去の調査では局地解析の疑似相対湿度の O−B 平均はおおよそ −2∼0。今回の更新での沖縄の値もこの範囲で収まっている。

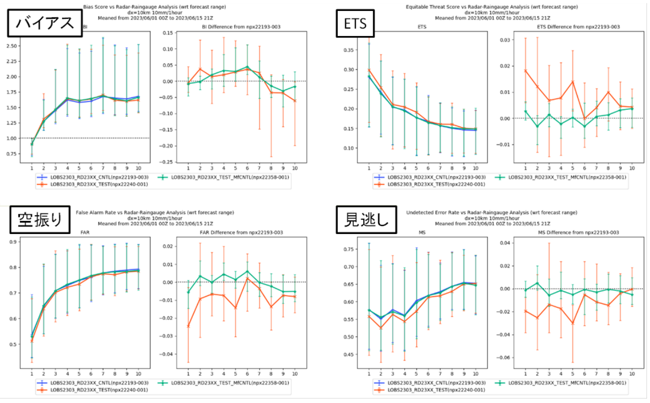

図 4.3.2　解析雨量を参照値とした予測時間別の 10 mm/h の降水予測スコア（10 km 平均）。上段左：バイアススコア、上段右：ETS、下段左：空振り率、下段右：見逃し率。青線は CNTL、緑線は MfCNTL、橙線は TEST のスコアを示しており、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。各統計指標について、左図がスコア、右図は MfCNTL、TEST について CNTL からの差を示している。横軸は予測時間 [hour]。統計期間は 2023 年 6 月 1 日から 2023 年 6 月 15 日。

たうえで順次現業利用を開始する。

参考文献

平原洋一, 2017: 全球解析における Suomi-NPP/ATMS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 70–72.

幾田泰酵, 2015: レーダー反射強度. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 40–42.

石川宜広, 2015: ドップラーレーダーのドップラー速度データの数値予報での利用. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 29–35.

亀川訓男, 計盛正博, 2017: 全球解析における Suomi-NPP/CrIS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 73–74.

気象庁, 2021: レーダー更新に伴う品質調査. 数値予報開発センター年報（令和 2 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 105.

気象庁, 2022a: メソ解析・局地解析における二重偏波レーダーの利用. 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, 112–116.

気象庁, 2022b: 全球解析における全天同化マイクロ波水蒸気サウンダデータ利用の拡充. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 40–43.

気象庁, 2023a: メソ解析および局地解析におけるマイクロ波サウンダ ATMS の利用. 令和 4 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 42–47.

気象庁, 2023b: 二重偏波化された釧路・種子島・室戸岬・大阪 DRAW のレーダーデータの利用再開. 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, 88–89.

村田英彦, 亀川訓男, 2020: NOAA-20 搭載 ATMS および CrIS 輝度温度データの利用開始. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58–60.

4.4 水蒸気観測データの数値予報での利用に関する開発

4.4.1 はじめに

気象庁では、線状降水帯の予測精度向上の早期実現に向け、「観測の強化」、「予測の強化」、「情報の改善」に関する取り組みの加速化を進めている (気象庁 2021, 2022)。このうち「観測の強化」では、「アメダスへの湿度計導入」、「気象レーダーの更新強化」、「洋上の水蒸気等の観測の強化」、「マイクロ波放射計の整備等」、「高層気象観測の強化」、「気象衛星観測の強化」の各項目を実現するべく施策を進めている。

「洋上の水蒸気等の観測の強化」として整備された船舶による GNSS 観測データについては数値予報システムへの導入に向けた開発を完了（本報告 3.9 参照）し、令和 4 年度末より現業での利用を開始した。また、アメダス湿度計データ利用に関する開発については、令和 3 年度までに整備された湿度計のデータについて数値予報システムへの導入を完了（本報告 3.10 参照）しており、現在は令和 4 年度以降に整備された湿度計のデータについて新規利用に向けて同化実験などを実施している。

本節では、令和 4 年度より予報作業での参考利用を目的としてメソ数値予報システムでリアルタイムで試験的に同化利用しつつ、メソ及び局地数値予報システムでの現業化に向けた準備を進めている地上設置型マイクロ波放射計の開発の進捗について報告する。

4.4.2 地上設置型マイクロ波放射計の利用に関する開発

(1) 地上設置型マイクロ波放射計データについて

気象庁では、線状降水帯を引き起こす幅数百キロメートル規模の水蒸気の流入を捉えるため、水蒸気の高度分布を測定可能な地上設置型のマイクロ波放射計（以降、MWR とする）を令和 4 年度に西日本を中心に 17 箇所に設置した (気象庁 2023)。最初に設置された名瀬の MWR による観測が令和 4 年 7 月から開始、その後令和 5 年 3 月までにすべての地点で MWR の設置が完了している。

MWR は大気中の水蒸気や雲水等が射出する輝度温度を観測する測器である。数値予報システムでは、MWR で観測した輝度温度に基づき気象技術開発室が推定した可降水量を同化することとし、品質管理や同化手法は地上 GNSS(石川 2010) と概ね同様の処理を実装している。MWR が観測する輝度温度は降水の影響を受けるため、降水の有無を判定する処理等を追加している。

(2) MWR データの現業導入に向けた作業

現業化にあたっては、データ品質が安定していることを確認する必要があることから、全 17 箇所の可降水量データの品質を一定期間に渡って調査した。調査は MWR 観測値と第一推定値・地上 GNSS 観測値を比較することにより行った。相対的に品質が低い地点について気象技術開発室とともにパラメータの妥当性を調査し、パラメータの変更による可降水量データの改良につなげた。また、現業数値予報システム相当の実験システムを用いた同化実験を実施した。これらの作業により、最終的には全地点において同化利用可能なデータ品質であることを確認している。

同化実験の検証結果では、観測値と第一推定値の比較から水蒸気場の解析値が改善するなど期待していた効果も見られた。また予測事例として図 4.4.1 にてマイクロ波放射計データ利用の有無の違いによる降水予測結果を示す。MWR 利用有 (TEST) では MWR 利用無し (CNTL) と比べ予測された降水域が解析雨量に近づいていて、本データによる下層水蒸気分布の変化に伴い降水予測の改善する事例を確認できた。

4.4.3 まとめと今後の予定

線状降水帯の予測精度向上の早期実現に向けた取り組みとして本節では主に地上設置型マイクロ波放射計データの開発状況について報告した。本データについては令和 5 年度末の現業利用開始に向けた準備を進めている。

今後も、順次整備が進められているアメダス湿度計を始めとする水蒸気観測データの速やかな利用拡充にに向けて調査・開発を進める。

参考文献

石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54–60.

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

気象庁, 2022: 線状降水帯の予測精度向上に向けた取組の進捗状況について. 線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ（第 4 回）, 気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjoukousuitai_WG/part4/part4-shiryo1.pdf.

気象庁, 2023: 水蒸気観測データの数値予報での利用に関する開発. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 99–102.

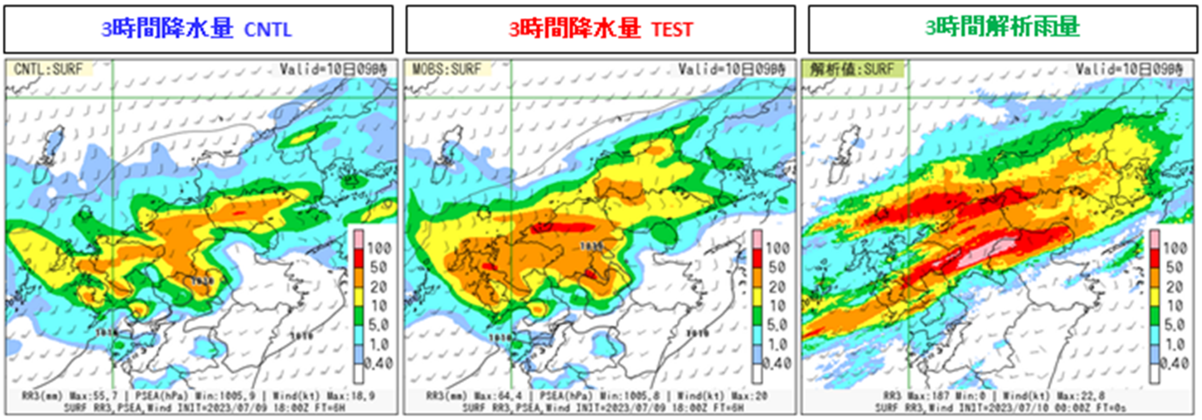

図 4.4.1　2023 年 7 月 9 日 18UTC 初期値の 6 時間予測。左から CNTL、TEST、解析雨量で前 3 時間降水量 [mm] を示す。また矢羽は地上風 [knot] を示す

4.5 局地モデルによる大雨発生確率ガイダンス

4.5.1 はじめに

近年、線状降水帯による甚大な大雨災害が発生しており、線状降水帯の発生予測技術を確立することは気象庁の急務となっている。気象庁では、令和 4 年度出水期より、半日程度前から線状降水帯による大雨への警戒を呼びかける情報の提供を行っている。その業務に資するため数値予報開発センター（数値予報モデル基盤技術開発室）では、令和 2 年度に「大雨発生確率ガイダンス」の開発に着手し、令和 4 年 6 月にはメソモデル (MSM) 、メソアンサンブル予報システム (MEPS) による大雨発生確率ガイダンスの提供を開始した。線状降水帯発生の予測はさらに高精度化することが求められていることから、現在、局地モデル (LFM) を用いた大雨発生確率ガイダンスの開発を行っている。ここでは現時点での LFM 大雨発生確率ガイダンスの仕様や予測精度の概略を紹介する。

4.5.2 仕様

LFM 大雨発生確率ガイダンスの本稿執筆時点（2023 年 12 月時点）での仕様を表 4.5.1 示す。仕様は MSM/MEPS 大雨発生確率ガイダンス (気象庁 2022) をベースとしているが、以下の点で異なっている。

初期時刻と予報時間

初期時刻は毎時。初期時刻 00, 03, . . . , 21UTC については 18 時間先まで、それ以外の初期時刻では 10 時間先まで計算する。令和 6 年 3 月に LFM の予報時間 (FT) を 18 時間先まで延長することが計画されており当ガイダンスはそれを活用する。

層別化

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

予測対象

予測対象となる降水量の値（閾値）に、3 時間降水量 120 mm を追加する。

なお以下の点については MSM 大雨発生確率ガイダンスと共通の仕様である。

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

本稿執筆時点では、2020 年〜2023 年の夏期の説明変数、目的変数のデータを用いて予測式の係数を計算している。

表 4.5.1 LFM 大雨発生確率ガイダンスの仕様

作成対象	5 km 格子（等緯度経度格子）
作成対象とするモデル	LFM
予測対象	3 時間降水量が 100, 120, 150 mm 以上となる確率
作成手法	ロジスティック回帰
予測対象時間単位	3 時間（対象時刻及び前後 1 時間）
予測期間と時間間隔	初期時刻は毎時。FT=3〜10（00, 03, . . . , 21UTC 初期値は FT=3〜18）の 1 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	3 時間降水量、500 m 高度水蒸気フラックス、500 m 高度相当温位、地形性上昇流×比湿、700 hPa 上昇流
目的変数	対象とする 5 km 格子を含む周囲 11 × 11 格子（55 km 四方）の範囲のどこかで 3 時間降水量が閾値以上となるか否か。
層別化処理の対象	予報対象時刻、地域（北日本、東日本、西日本、九州、南西諸島の 5 つ）

4.5.3 検証

LFM 大雨発生確率ガイダンスの本稿執筆時点での精度検証結果を紹介する。図 4.5.1 には、2021〜2023 年の夏期[2]を検証期間とした、全国での LFM 大雨発生確率ガイダンスの予報時間別のブライアスキルスコア (BSS) と信頼度曲線を、MSM 大雨発生確率ガイダンスを比較対象として示した。ここでは 2021 年〜2023 年の各年を除いたデータで係数を作成し、除いた年のデータで検証を行った交差検証の結果を示している。

予報時間別に見ると、閾値 100 mm/3h 以上、150 mm/3h 以上の LFM 大雨発生確率ガイダンスの BSS は共に正となっており（赤線）、確率予測としてある程度の有効性があることが示されている。また、どちらの閾値でも LFM 大雨発生確率ガイダンスは MSM 大雨発生確率ガイダンスを上回る予測精度があることがわかる。また信頼度曲線の図では、閾値 150 mm/3h の高確率の場合を除いて、曲線が概ね右肩上がりで、高確率ほど大雨が発生する確率が高くなっており、MSM 大雨発生確率ガイダンスに比べて実況と予測の頻度の対応が良いことが確認できる。

なお、この信頼度曲線の図中には 2 本の直線が描かれている。このうち原点を通る対角線は、信頼度曲線がこれに近いほど確率予測の精度が高いことを示す。また、もう一方の直線は確率予測が予測スキルを持つ下限を示している (気象庁 2023)。100 mm/3h ではどの確率値においても LFM 大雨発生確率ガイダンスは確率予測として有効である一方で、150 mm/3h では

[1] 個々の説明変数の算出方法には細かな修正を加えているが、ここではその説明は省略する。

[2] 2021 年 7 月 1 日〜8 月 15 日、2022 年 6 月 1 日〜8 月 31 日、2023 年 6 月 1 日〜9 月 30 日。

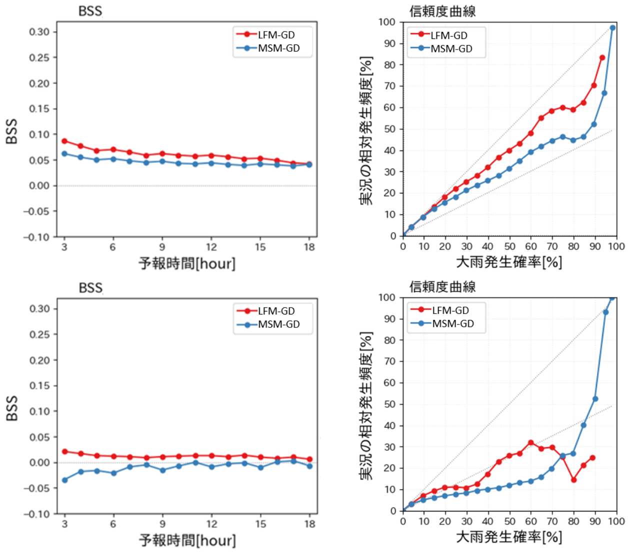

図 4.5.1　LFM 大雨発生確率ガイダンス（赤線）、MSM 大雨発生確率ガイダンス（青線）の予報時間別のブライアスキルスコア（左列）と信頼度曲線（右列）。上段が 100 mm/3h 以上、下段が 150 mm/3h 以上の確率のスコア。検証領域は全国、予報時間は 3〜18 時間、交差検証によるスコア。

LFM 大雨発生確率ガイダンスが確率予測として有効なのは 20%程度までということが言える。

なお、閾値 100 mm/3h、150 mm/3h について地域別に MSM 大雨発生確率ガイダンスと精度比較を行ったところ、大雨が多く発生する九州、西日本では LFM 大雨発生確率ガイダンスの BSS はいずれの閾値も MSM 大雨発生確率ガイダンスを上回っていたが、それ以外の地域では必ずしも LFM 大雨発生確率ガイダンスの優位性は明瞭ではなかった（図略）。

4.5.4　事例

LFM 大雨発生確率ガイダンスの例として、2023 年 6 月 2 日の大雨事例を示す。この日は東シナ海から近畿地方北部、関東地方へ伸びる梅雨前線に向かって、沖永良部島付近の台風第 2 号から暖湿気が流入し、九州地方から関東地方の太平洋側を中心に大雨となった。8 時 10 分には高知県西部に対し、線状降水帯が発生し災害発生の危険度が急激に高まったことをお知らせする「顕著な大雨に関する気象情報」[3]が発表され、その後も日中から夜のはじめ頃にかけて和歌山県、奈良県、三重県、愛知県、静岡県に対して次々と同情報が発表された。

図 4.5.2 左列は、2023 年 6 月 2 日 9 時（日本時間）を対象とした 100 mm/3h 以上、150 mm/3h 以上の LFM 大雨発生確率ガイダンスの FT=9 の予測である。中央列は同じ時刻の MSM 大雨発生確率ガイダンスを、右列には目的変数（表 4.5.1）を示した。また図 4.5.3 には、解析雨量から算出した 2023 年 6 月 2 日 10 時まで[4]の 3 時間降水量を示した。

この事例では、九州南東部〜近畿地方へ伸びる降水域が LFM, MSM ともにモデルの降水量分布は実況よりもやや北偏していた（図略）ため、大雨発生確率ガイダンスのピークもやや北にずれているものの、どちらも四国地方における大雨の可能性を予測できていた。特に LFM 大雨発生確率ガイダンスは、MSM 大雨発生確率ガイダンスに比べて九州地方南東部のピークの表現がやや強すぎるものの、四国地方南部の線状に伸びる高確率域が明瞭であり、ピークもより際立っていた。

4.5.5　今後

線状降水帯等による大雨の発生予測が災害軽減に果たす役割は大きい。この LFM 大雨発生確率ガイダンスが線状降水帯予測業務で活用されることを目指して、引き続き精度向上を目指した開発を行っていく。

参考文献

加藤輝之, 2017: 図解説　中小規模気象学. 気象庁, 316 pp.

気象庁, 2022: 大雨発生確率ガイダンス. 数値予報開発センター年報（令和 3 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 120–121.

気象庁, 2023: 確率値別出現率図. 令和 4 年度数値予報解説資料集, 気象庁情報基盤部, 528.

[3] `https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/kishojoho_senjoukousuitai.html#b`

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

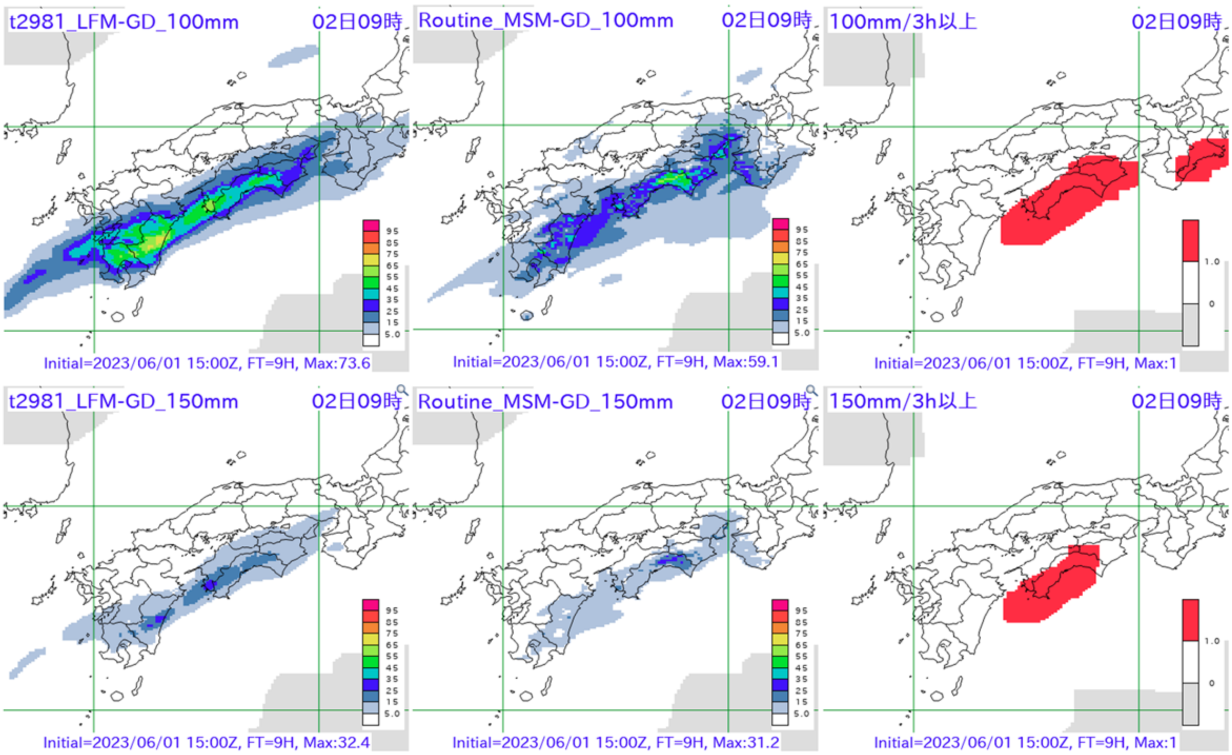

図 4.5.2　2023 年 6 月 2 日 9 時を対象とした（左列）LFM 大雨発生確率ガイダンス、（中央列）MSM 大雨発生確率ガイダンスの FT=9 の予測、（右列）同時刻に対する目的変数の分布。閾値は上段が 100 mm/3h、下段が 150 mm/3h。

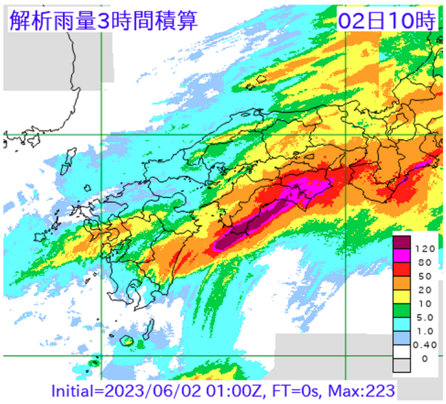

図 4.5.3　2023 年 6 月 2 日 10 時までの解析雨量の 3 時間積算値の分布。

4.6　季節アンサンブル予報システムの開発

4.6.1　オゾンの予報変数化

はじめに

気象庁が運用している季節アンサンブル予報システム（CPS）は、気象庁の季節予報やエルニーニョ監視速報などに用いられており、季節内〜季節のスケールの現象を対象とした予測を行っている。季節内〜季節予測においては、境界値や外力の持つ情報による予測可能性（第 2 種予測可能性）の寄与が相対的に大きく、成層圏は対流圏にとっての予測可能性のソースの一つであることが知られている。特に成層圏突然昇温などの成層圏の極渦が平年時よりも大きく変動している際には、成層圏の時間方向に緩やかな変動が成層圏対流圏結合を介して対流圏に影響を与えることがある (Baldwin and Dunkerton 1999, 2001)。したがって、成層圏を精度良く予測することは、対流圏の予測に対しても重要である。

成層圏にその約 90%が存在するオゾンは、紫外線を吸収して大気を加熱するので、地球の気候に大きく関わる重要な大気微量成分の一つである。また、オゾンは極渦の状態などに影響を受けて大きく変動することがあるため、そのようなオゾンの変動が成層圏の予測や対流圏への下方伝搬の予測に影響を与えることが最近の研究で報告されている (Oehrlein et al. 2020; Haase and Matthes 2019)。しかしながら、CPS では放射過程で利用するオゾン濃度として気候値を利用しており、オゾンの変動による大気場への影響を正しく表現できていない。そこで、CPS のオゾン予報変数化を行い、大気予測への影響について調査した。

オゾンの予報変数化（線形オゾンスキーム）

一般に、オゾンは様々な大気微量成分と反応して生成・消滅するために、オゾンを予報するには様々な大気微量成分の大気輸送過程や詳細な化学過程について計算する必要がある。このような化学反応の詳細な計算を行うモデルをフル化学モデルと呼ぶ。しかしながら、フル化学モデルの実行には多くの計算機資源が必要となる。一方で、簡易的に化学過程を扱うことで計算機資源を抑えた手法も提案されており、その一つが線形オゾンスキーム (Cariolle and Déqué 1986) である。線形オゾンスキームは、オゾンのみの大気輸送過程と線形近似により簡易化された化学過程の計算を行うので、フル化学モデルの利用と比較して計算機資源を大きく節約できる。また、オゾンホールの形成期のような非線形性が大きい現象を除けば、オゾンの化学的な変動は多くの場合で線形的であることが知られているため、線形近似の妥当性も高い。線形オゾンスキームは、欧州中期予報センター（ECMWF）やアメリカの国立環境予測センター（NCEP）の現業数値予報モデルで利用実績があり、フランス気象局（Meteo-France）や韓国気象局（KMA）でも現業数値予報モデル向けに開発が行われている。CPS のオゾン予報変数化においては、計算機資源や他の現業機関での利用実績を考慮して線形オゾンスキームを採用することを検討しており、気象研究所で線形オゾンスキームの開発が行われた。

ここでは、CPS に適用した線形オゾンスキームによるオゾンの化学過程の計算について説明する。線形オゾンスキームでは、オゾンの生成・消滅による時間変動をテイラー級数の第 1 近似の形で以下のように表現される。

$$\frac{\partial O_3}{\partial t} = \overline{P-L} + \overline{\frac{\partial(P-L)}{\partial O_3}}(O_3 - \overline{O_3}) + \overline{\frac{\partial(P-L)}{\partial T}}(T - \overline{T}) + \overline{\frac{\partial(P-L)}{\partial CO_3}}(CO_3 - \overline{CO_3}) \tag{4.6.1}$$

ここで、O_3 はオゾン濃度、T は気温、CO_3 は直上オゾン量、P はオゾン生成量、L はオゾン消滅量であり、オーバーラインが付いたものは月別気候値を表す。右辺第 1 項はオゾン正味生成量の気候値であり、右辺第 2〜4 項がオゾン正味生成量の各要素への依存性を線形近似で表現している。式中の月別気候値については、フル化学モデルを利用した複数年の定数作成実験から事前に作成する定数であり、この定数が線形オゾンスキームの特性を概ね決定する。$\overline{P-L}$、$\overline{O_3}$、$\overline{T}$、$\overline{CO_3}$ は、定数作成実験から月別気候値を求め、$\overline{\partial(P-L)/\partial O_3}$、$\overline{\partial(P-L)/\partial T}$、$\overline{\partial(P-L)/\partial CO_3}$ は、定数作成実験の化学過程計算の 1 タイムステップ毎に O_3、T、CO_3 の摂動を与えたときの応答から月別に線形回帰して求める。また、単純にフル化学モデルを利用した場合は、フル化学モデルのバイアスの影響を大きく受けた定数が作成される可能性があることから、フル化学モデルを組みこんだ解析システムを利用して定数を作成した方が、バイアスの影響を極力抑えた定数を作成することができる。CPS の線形オゾンスキーム用の定数については、気象庁第 3 次長期再解析（JRA-3Q; Kosaka et al. (2024)）用オゾン再解析システムを用いて気象研究所で作成された定数を利用することを検討している。この JRA-3Q 用オゾン再解析システムは、フル化学モデルとして MRI-CCM2(Deushi and Shibata 2011) を用いている。

オゾンの予測特性の確認

線形オゾンスキームのオゾンの予測特性を確認するために、現在現業運用中の CPS3(Hirahara et al. 2023) に線形オゾンスキームを適用した長期積分実験（CPS3LO 実験）を実施した。線形オゾンスキームの定数は気象研究所の地球システムモデルである MRI-ESM2.0(Yukimoto et al. 2019) の 1999 年の 1 年フリーランから作成された試行版を利用した。また、別途に JRA-3Q 用オゾン再解析システムの 2010 年の 1 年解析

サイクルから作成された試行版の定数を利用した実験として、気象研究所の地球システムモデル向けに開発中の大気モデル（MRI-AGCM4）に線形オゾンスキームを適用した実験（MRI-AGCM4LO 実験）の実験データを気象研究所から提供いただいた。積分期間は、CPS3LO は 1990 年 1 月から 2020 年 12 月までの 31 年間（1990 年はスピンナップ）であり、MRI-AGCM4LO は 1978 年 1 月から 2014 年 12 月までの 37 年間（1978 年はスピンナップ）である。オゾンの検証値として、JRA-3Q 用オゾン再解析データを用いた。

まず、オゾン全量の各月毎の平均値と標準偏差について確認した（図 4.6.1）。平均値を見ると、再解析値と比べて CPS3LO では過大であり、MRI-AGCM4LO では解析値と同程度であることが分かる。これは、CPS3LO ではフル化学モデルのフリーランから定数を作成しているために、フル化学モデルのオゾン過大バイアスの影響を受けた結果である。一方で、MRI-AGCM4LO ではフル化学モデルの解析サイクルから定数を作成したことで、フル化学モデルのバイアスの影響を抑制できている。MRI-AGCM4LO では、オゾン全量の平均的な季節変化の様子や南極オゾンホールも良く表現できており、CPS3LO でも解析サイクルから作成された定数を利用すれば、同程度の表現が可能であると考えられる。標準偏差については、CPS3LO と MRI-AGCM4LO のどちらも解析値と比べて全球的に過小であるが、平均値として南極オゾンホールを表現できていた MRI-AGCM4LO の方が南極オゾンホール付近の変動の大きさが改善している。また、同じように、オゾンの鉛直分布の表現についても確認した。また、オゾンの平均値や標準偏差の鉛直分布についてもオゾン全量と同様な傾向であった（図略）。

次に、極渦の強さに応じたオゾン変動の表現を確認するために、極渦が強い場合と弱い場合のコンポジット解析を行った。極渦の強さの指標としては、北半球環状モード（NAM）指数を用いた。NAM 指数は NAM パターンと日別高度偏差との内積で表され、NAM パターンは 1958/59～2012/13 年 11～4 月の 20°N 以北における月平均高度偏差の EOF 第 1 モードで定義した。また、10hPa の NAM 指数が 1.5 より大きい（-2.5 より小さい）日が 3 日以上続いた日の初日を day0 として、極渦が強い場合（弱い場合）のコンポジット解析を行った。図 4.6.2 に CPS3LO とオゾン再解析の極渦が強い場合と弱い場合のオゾン体積混合比（60°N～90°N 平均）の合成図を示す。一般に、極渦が弱いとき（例えば成層圏突然昇温が発生したとき）は、主に成層圏の力学的な輸送の変化を通してオゾンが変動する。一方で、極渦が強い時で特にオゾンホールのような顕著なオゾン極小域が形成される場合には力学的な輸送の変化に加えて、化学的な寄与も重要になってくる。CPS3LO は極渦が強い場合と弱い場合のどちらのオゾン変動も偏差は過小ではあるが、傾向としては良く再現していることが分かる。今回利用した線形オゾンスキーム用の定数は、1 年分のデータから作成されており、さらに長期間の実験から定数を作成することで表現が改善される可能性がある。

成層圏突然昇温時の事例解析

オゾンの変動が大きい成層圏突然昇温時における大気予測へのオゾン予報変数化の影響を調査するために、2022 年 3 月中旬に発生した成層圏突然昇温を対象として事例解析を行った。現在現業運用中の CPS3 を利用した実験（CPS3 実験）と線形オゾンスキームを適用した実験（CPS3LO 実験）の 2 つを実施した。線形オゾンスキームの定数は MRI-ESM2.0 の 1999 年の 1 年フリーランから作成された試行版を利用した。また、今回は成層圏突然昇温後の下方影響に対するインパクトを調査するために、昇温の予測が揃ってきた成層圏突然昇温直前の 3 月 15 日～3 月 20 日の 00UTC 初期日を選んだ。メンバー数は 1 初期値あたり 5 メンバーの合計 30 メンバーである。線形オゾンスキーム用のオゾン濃度初期値としては、紫外線情報などで利用されている現業オゾン解析値を利用した。

まず、成層圏突然昇温も含めた成層圏の北極域の気温予測としては、どちらの実験も成層圏突然昇温とその後の高温偏差の持続を良く予測できていた（図略）。CPS3LO のオゾン予測（図 4.6.3）について確認すると、成層圏突然昇温時に北極域のオゾン量が大きく増加し、その後も正偏差が持続したことを良く予測できている。また、CPS3 実験ではオゾン気候値を利用しているので、図 4.6.3(a) はオゾン量の実験間差分も表す。図 4.6.4 の北極域における実験間差分（CPS3LO－CPS3）を見てみると、成層圏のオゾン量の差分に応じた短波加熱率の差分が見られ、それが気温の差分にも寄与していることが分かる。また、予測 3 週目以降から気温、高度、東西風で成層圏の差分が対流圏にも影響している様子が見られた。図 4.6.5 で NAM 指数についても確認してみると、どちらの実験も下部成層圏まで負の NAM 指数の領域が到達しているが、CPS3LO の方がより強く、解析値の値に近い。また、CPS3 では対流圏を正の NAM 指数で予測していたのに対し、CPS3LO では負の方向（成層圏と同じセンス）に寄せている。解析値では対流圏は負の NAM 指数の期間が多かった傾向があり、その点では CPS3LO の方が解析値に近い。CPS3LO では、現実的なオゾンの変動を考慮したことにより、成層圏突然昇温のシグナルが強まり、それに伴う対流圏への下方伝播の影響をより強く表現したと考えられる。

まとめ

CPS に対して線形オゾンスキームを利用したオゾン予報変数化を行い、オゾン予測の妥当性と大気予測への影響について調査した。線形オゾンスキームはオゾンの生成・消滅に関して簡易的な計算を行っているが、

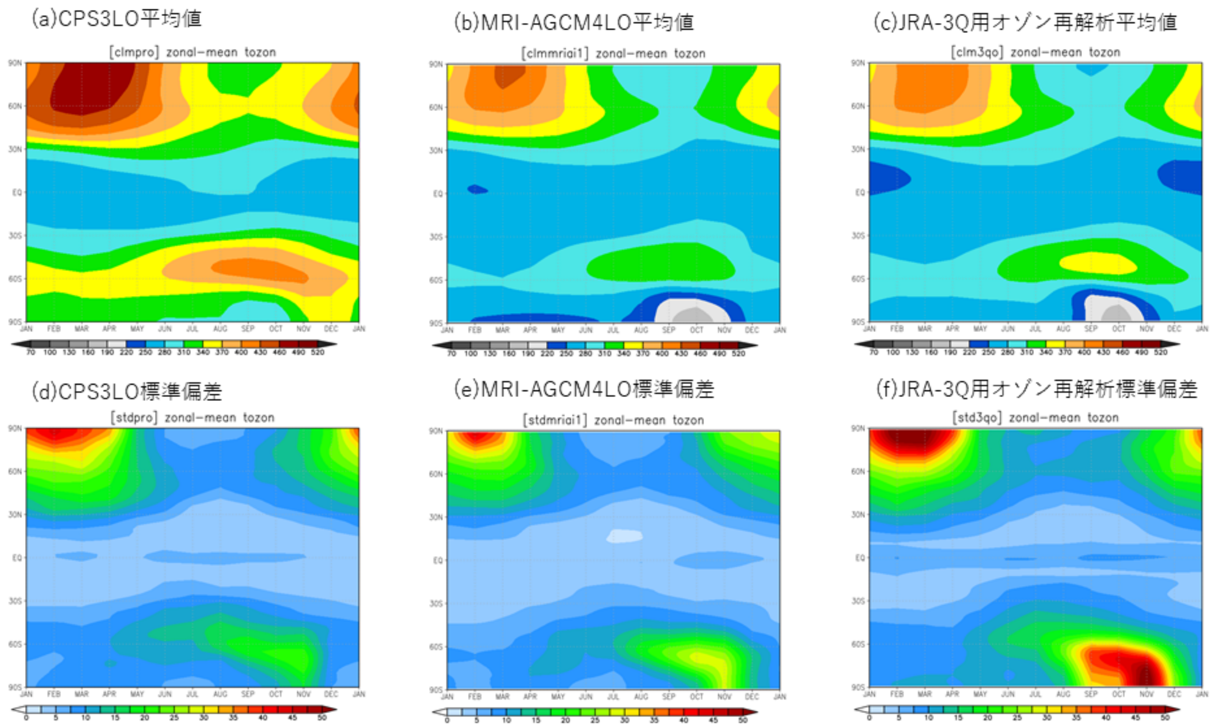

図 4.6.1　各長期積分実験と再解析におけるオゾン全量の平均値（上段）と標準偏差（下段）の東西平均値 [DU]。CPS3LO 実験の (a) 平均値と (d) 標準偏差、MRI-AGCM4 実験の (b) 平均値と (e) 標準偏差、JRA-3Q 用オゾン再解析の (c) 平均値と (f) 標準偏差。CPS3LO 実験と JRA-3Q 用オゾン再解析は 1991 年 1 月から 2020 年 12 月までの 30 年分の月別値から計算し、 MRI-AGCM4LO 実験は 1979 年 1 月から 2014 年 12 月までの 36 年分の月別値から計算した。

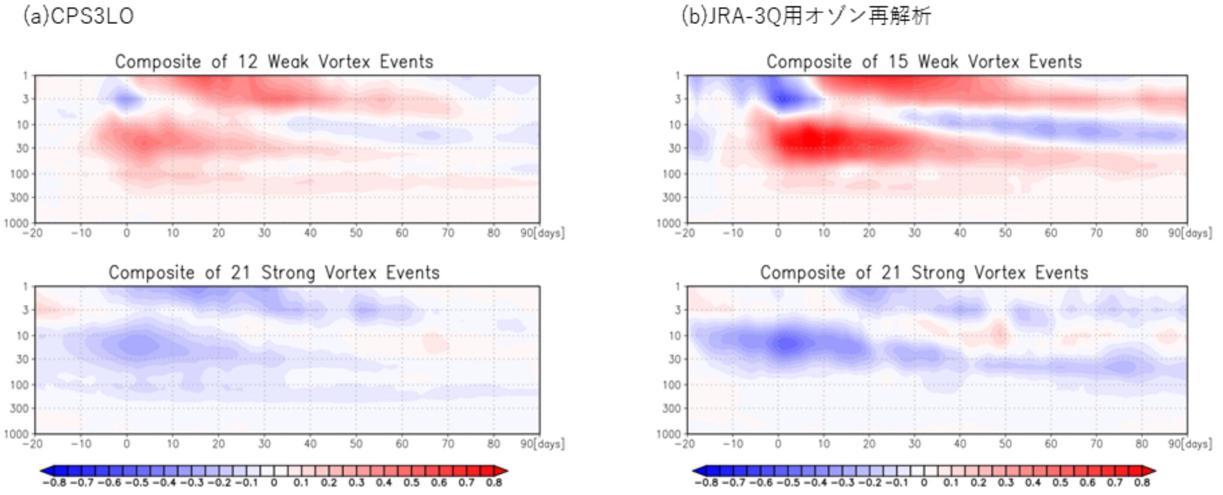

図 4.6.2　北極域（60°N〜90°N）平均のオゾン体積混合比平年偏差の極渦強度別合成図 [ppmv]。縦軸は気圧面 [hPa]。上段（下段）は、北半球環状モード指数が-2.5 を下回った（1.5 を上回った）日が 3 日以上続いた場合の初日を day0 として極渦が弱い（強い）場合の合成図を作成。 (a)CPS3LO と (b) JRA-3Q 用オゾン再解析の 1991 年 1 月から 2020 年 12 月までの日別値を利用し、それぞれの 30 年平均値からの差を偏差とした。

現実的なオゾン量の季節進行や極渦の強さに応じた変動を表現可能であることが分かった。また、線形オゾンスキームにとって、定数作成の手法は重要であり、オゾンの解析値から定数を作成することでオゾンの予測バイアスを大きく減少させることができる。一方でオゾンの変動の大きさは過小であった。オゾン予報変数化の大気予測への影響としては、成層圏突然昇温のシグナルが強まり、それに伴う対流圏への下方伝播の影響をより強く表現する傾向が事例解析で見られた。

今後も気象研究所と連携しながら調査を継続していく予定である。特に、今回の調査で利用した線形オゾンスキーム定数は 1 年分の実験から作成された試行版であったため、今後は長期間の実験からより精緻な定数を作成する必要がある。また、大気予測への影響の

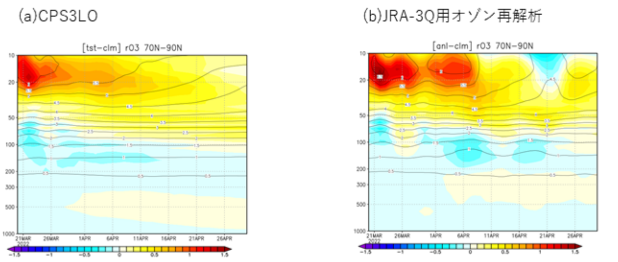

図 4.6.3　北極域（70°N〜90°N）平均のオゾン体積混合比 [ppmv] の時系列。縦軸は気圧面 [hPa]。(a)CPS3LO の 30 メンバーアンサンブル平均と (b) JRA-3Q 用オゾン再解析のオゾン体積混合比（線）とその偏差（陰影）。偏差は JRA-3Q 用オゾン再解析の 1991 年〜2020 年の月別平均値からの差として計算。

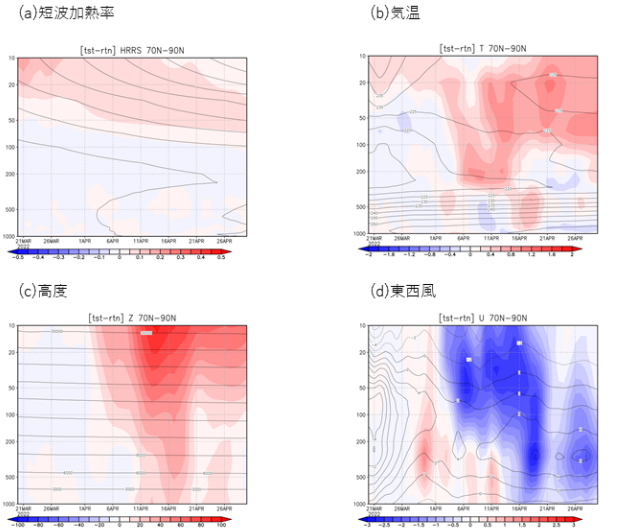

図 4.6.4　北極域（70°N〜90°N）平均の実験間差分（CPS3LO − CPS3）の時系列。縦軸は気圧面 [hPa]。(a) 短波加熱率 [K/day]、(b) 気温 [K]、(c) 高度 [m]、(d) 東西風 [m/s] の CPS3LO と CPS3 のアンサンブル平均の差分（陰影）と CPS3 のアンサンブル平均（線）。

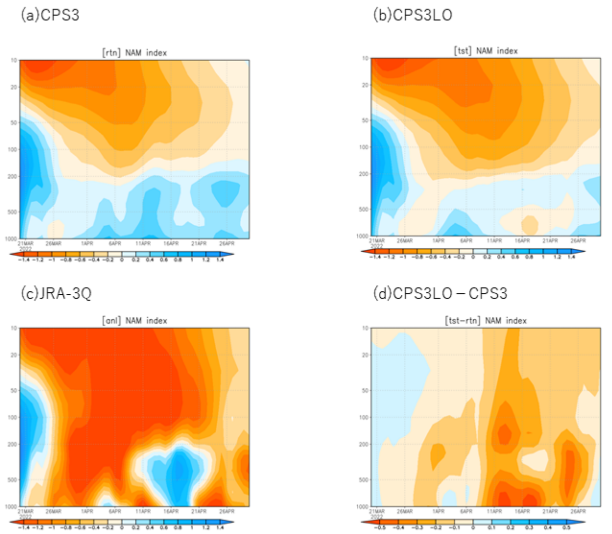

図 4.6.5　北半球環状モード (NAM) 指数の時系列。縦軸は気圧面 [hPa]。(a)CPS3 アンサンブル平均、(b)CPS3LO アンサンブル平均、 (c)JRA-3Q、(d)CPS3LO アンサンブル平均と CPS3 アンサンブル平均の差分。

評価についても、事例数を増やしつつ成層圏突然昇温やその下方影響へのインパクトを詳細に検証していく必要がある。

参考文献

Baldwin, M. P. and T. J. Dunkerton, 1999: Propagation of the arctic oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30 937–30 946.

Baldwin, M. P. and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581–584.

Cariolle, D. and M. Déqué, 1986: Southern hemisphere medium-scale waves and total ozone disturbances in a spectral general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **91**, 10 825–10 846.

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.

Haase, S. and K. Matthes, 2019: The importance of interactive chemistry for stratosphere-troposphere coupling. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 3417–3432.

Hirahara, S., Y. Kubo, T. Yoshida, T. Komori, J. Chiba, T. Takakura, T. Kanehama, R. Sekiguchi, K. Ochi, H. Sugimoto, Y. Adachi, I. Ishikawa, and Y. Fujii, 2023: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 3 (JMA/MRI-CPS3). *J. Meteor. Soc. Japan*, **101**, 149–169.

Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H.Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa, T. Y. Tanaka, T. Tokuhiro, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, accepted.

Oehrlein, J., G. Chiodo, and L. M. Polvani, 2020: The effect of interactive ozone chemistry on weak and strong stratospheric polar vortex events. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 10 531–10 544.

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 In-

stitute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 931–965.

4.7　波浪モデル

波浪モデルは、大気モデルの解析・予測の風の場で駆動するが、台風中心付近には台風予報に基づく台風ボーガス手法で作成したパラメトリックな風の場を埋め込んでいる。2023 年 1 月に実施した GWM 高解像度化後、この手法の改善に向けた調査に着手した。

現状の波浪モデルにおける台風ボーガス手法にはいくつかの課題があり、複数の改善策が必要である。まず、気象庁の台風予報の 12 時間ごとの予報円中心の緯度・経度や強度情報のみを用いてモデル内の台風進路・強度を内挿して決定しているため、その間に実際の台風進路・強度が急激に変わるケースでは、その変化を十分に表現できず、波浪予報の誤差に繋がる。これを改善するため、例えば初期値から 3 時間後や 6 時間後の台風予報の情報も用いることを検討している。具体的には、高潮モデルの台風ボーガス手法では、既に細かい時間間隔で台風予報の情報を取り込んでいるため、これを参考に波浪モデルの台風ボーガス手法も改善できないか、事前調査を開始した。

また、台風ボーガス手法では、大気モデルで計算した台風位置と、気象庁の台風予報での台風位置が大きく異なる場合、あたかも台風が二つ存在するような気象場になる場合がある。これは高潮モデルにおける台風ボーガス手法でも問題となっており、NAPS11 で取り組むべき課題の一つである。これについても、高潮モデルの改善を参考に、波浪モデルの台風ボーガス手法改善に向けた調査を進める方針である。

ほか、CWM 高解像度化・高頻度化に向けた調査や、計算効率の良い波浪モデルの開発に向けた調査、波浪データ同化における新規衛星波浪観測の利用可能性調査を進めている。

4.8　高潮モデル

気象庁は、高潮注意報・警報等の防災情報提供のために、台風や発達した温帯低気圧によって引き起こされる高潮を予測する日本域高潮モデル (林原 2011) を運用しているほか、2022 年 8 月からは、「高潮早期注意情報（警報級の可能性）」(杉本・木下 2016) に必要な 5 日先までの確率的高潮予測を行うための日本域台風時高潮確率予報システム（日本域高潮 PFS）の運用を開始した (気象庁 2023c)。また、WMO の高潮監視スキーム (Storm Surge Watch Scheme) の枠組みで ESCAP/WMO 台風委員会加盟国気象機関に高潮予測情報を提供するため、アジア域高潮アンサンブル予報システム（アジア域高潮 EPS）を運用している (気象庁 2023a)。

2023 年は、NAPS11 における高潮モデル改善に向けて、台風ボーガスの改善や水平高解像度化、高速化等の調査・開発を進めたほか、非台風時の高潮早期注意情報に向けた調査や潮汐スキームの導入可能性調査を行った。台風ボーガスの改善については、昨年度に引き続き vortex relocation (気象庁 2023b) に関する調査・開発を行い、コードの試作や動作確認を開始した。また、台風ボーガス改善の一環として、台風ボーガス起動条件の統一について検討・調査したので、以下で解説する。

日本域高潮モデルの台風ボーガス計算起動条件は、「予報時間内に熱帯擾乱が日本付近を通過する場合」である。日本域高潮モデルの予報時間は、00,12UTC 初期値が 78 時間、03,06,09,15,18,21UTC 初期値が 39 時間と異なるため、初期値によって台風ボーガス計算が行われる場合と行われない場合があり、予報作業における混乱の元になっている。このため、全初期値で「78 時間以内に熱帯擾乱が日本付近を通過する場合」に、台風ボーガス計算が起動するように変更予定である。

過去数年分について、台風ボーガス計算起動条件を統一したところ、従来の条件に比べて約 2 割程度台風事例が増えることが分かった。今後は適切なタイミングで、上記変更を数値予報ルーチンに適用する予定である。

参考文献

林原寛典, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて. 天気, **58**, 235–240.

気象庁, 2023a: アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入. 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, 34–35.

気象庁, 2023b: 高潮モデル. 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 130.

気象庁, 2023c: 日本域台風時高潮確率予報システムの導入. 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, 31–33.

杉本悟史, 木下信好, 2016: 「警報級の可能性」の経緯と目的. 量的予報技術資料（平成 27 年度予報技術研修テキスト）, 気象庁予報部, 61–62.

4.9　物質循環システムの開発

4.9.1　紫外線予測システムの同化手法高度化

はじめに

気象庁が運用している紫外線予測システムでは、気象研究所で開発された全球化学輸送モデル（MRI-CCM2; (Deushi and Shibata 2011)）を用いてオゾンの予測と解析を行っている。紫外線予測システムの計算結果は、紫外線情報の作成に利用されるだけでなく、大気汚染気象予測を行う領域化学輸送モデルの境界値や大気解析の計算輝度温度の推定にも利用されている。また、現在季節アンサンブル予報システムではオゾンの予報変数化の開発も進められており、そのオゾン濃度初期値として紫外線予測システムの解析値利用も検討されている。一方で、オゾン同化の手法としては最も簡便なナッジングを採用しており、観測データの作成・品質管理（QC）手法にも課題があることから、同化手法高度化と観測データの作成・QC 手法の見直しを行うことを検討している。

オゾン同化手法高度化

現在の同化手法としては、オゾン全量に対して NOAA-20/OMPS の衛星観測データでナッジングを行っており、オゾン全量のインクリメントが各鉛直層のオゾン濃度に一定比率で分配される。オゾン全量の同化は 1 時間毎に行っているが、L3 観測データを経度 15 度毎に区切ったデータを利用しており、衛星の軌道は考慮されていない。また、ナッジングの重みは一定で、その時の場の誤差特性を考慮することができていない。このような課題を踏まえて、現業黄砂解析予測システムの同化手法として採用されている 2D-Var(Yumimoto et al. 2017) に同化手法を変更することを検討している。ナッジングでは定数であった重みが、2D-Var では背景誤差分散行列と観測誤差分散行列に応じて計算されるようになることで、解析値の精度向上が期待できる。また、2D-Var の計算プログラムの高速化を行ったことでナッジングと比較して実行時間の増加もほとんどない点や、現業黄砂解析予測システムと一体的な維持管理が可能である点で都合が良い。背景誤差分散と背景誤差相関は、Yumimoto et al. (2017) と基本的に同じ手法を用いているが、オゾン同化向けに細かなパラメータの調整を行った。観測誤差相関はないと仮定し、観測誤差分散については、後述の手法 (Miyazaki et al. 2012) で計算した観測誤差の 2 乗とした。

観測データの作成・QC 手法の見直し

現在の同化用 L3 観測データ作成時には、L3 データの格子毎に L2 データを一つ選別することで等緯度経度格子データを作成し、さらに等緯度経度格子から全球化学輸送モデルのモデル格子に内挿を行っている。L2 データ選別時には、太陽が真上に近い観測の方が質が良いとして太陽天頂角が小さい L2 データを優先する仕様になっているが、太陽天頂角が小さいのは基本的に低緯度側であるために、低緯度側のデータが優先されている。この仕様により、バイアスが生じるという課題がある。また、最終的にモデル格子への内挿時には保存内挿を用いているが、内挿前と内挿後の水平解像度が同程度であるために最近傍内挿のような挙動になっており、この仕様によってもバイアスが生じていた。そこで、2D-Var 用の L3 観測データは、L2 観測データをモデル格子毎に平均した super-observation として作成した。この方法を用いることで上記の課題を解消でき、観測演算子を簡略化可能なメリットもある。super-observation は、Miyazaki et al. (2012) の手法に沿って作成する。

観測データの QC 手法についても、現在は観測データが持つ情報のみを利用して行う内的 QC のみ行っており、QC が不十分な場合があることが課題だった。この問題に対処するために、観測値と第一推定値の差（D 値）がある値より大きい観測データを棄却するグロスエラーチェックの導入を検討している。また、内的 QC についても Naoe et al. (2020) 等を参考に再検討を行った。内的 QC は基本的に現手法よりも厳しめになるように見直したが、太陽天頂角に基づく QC は緩和してより極夜域側の観測が利用されるようにした。これは、観測値が入らない極夜域はモデルのバイアスが顕在化しやすい領域であるためである。

解析予報サイクル実験

同化手法高度化と観測データの作成・QC 手法の見直しの影響を確認するために、解析予報サイクル実験を行った。ルーチンと同じ仕様で実行した CNTL 実験と同化手法高度化と観測データの作成・QC 手法の見直しを適用した TEST 実験を約 2 年分行った。

図 4.9.1 に CNTL と TEST の解析インクリメントの例を示す。CNTL では衛星軌道に沿った同化となっておらず、誤差相関も考慮されていないために、解析インクリメントは狭い範囲に限定されている。一方、TEST では衛星軌道に沿った同化を行いつつ、解析インクリメントは空間的な広がりを持っていることが分かる。東西平均した D 値の絶対値の時系列（図 4.9.2）を比較してみると、CNTL より TEST の方が明瞭に小さい値を示しており、モデルの第一推定値と観測値の整合性が大きく改善していることが分かる。2020 年 1 月中旬ごろに CNTL で異常に大きな D 値が見られるのは NOAA-20 の観測値が全球的に異常値だったからであり、TEST ではグロスエラーチェックの導入で異常な観測値を棄却できている。また、オゾンゾンデを用いてオゾン濃度の鉛直プロファイルを検証した結果（図 4.9.3）を確認すると、特に極域で RMSD(Root Mean Square Difference) の改善が見られており、誤差相関を考慮したことで極夜域側にも解析インクリメントがより入るようになったことや、太陽天頂角の QC を緩和

して極夜域周辺により多くの観測を入れるようにしたことが影響していると考えられる。

まとめ

紫外線予測システムのオゾン同化における同化手法をナッジングから 2D-Var に変更し、観測データの作成・QC 手法の見直しを行った場合のインパクトについて調査した。その結果、第一推定値と観測値の整合性の改善や対地上観測検証での改善が確認できた。今後は、後続のシステムへの影響も確認しつつ、同化での複数衛星の利用なども検討していく予定である。

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.

Miyazaki, K., H. J. Eskes, and K. Sudo, 2012: Global NOx emission estimates derived from an assimilation of OMI tropospheric NO_2 columns. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 2263–2288.

Naoe, H., T. Matsumoto, K. Ueno, T. Maki, M. Deushi, and A. Takeuchi, 2020: Bias correction of multi-sensor total column ozone satellite data for 1978-2017. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 353–377.

Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, N. Oshima, and T. Maki, 2017: JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 3225–3253.

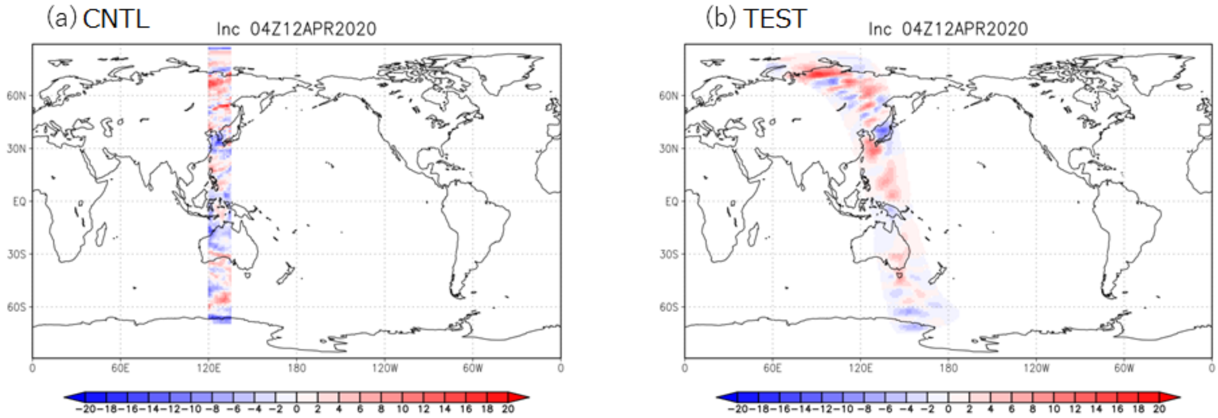

図 4.9.1　2020 年 4 月 12 日 04UTC の (a)CNTL と (b)TEST の解析インクリメント [DU]。

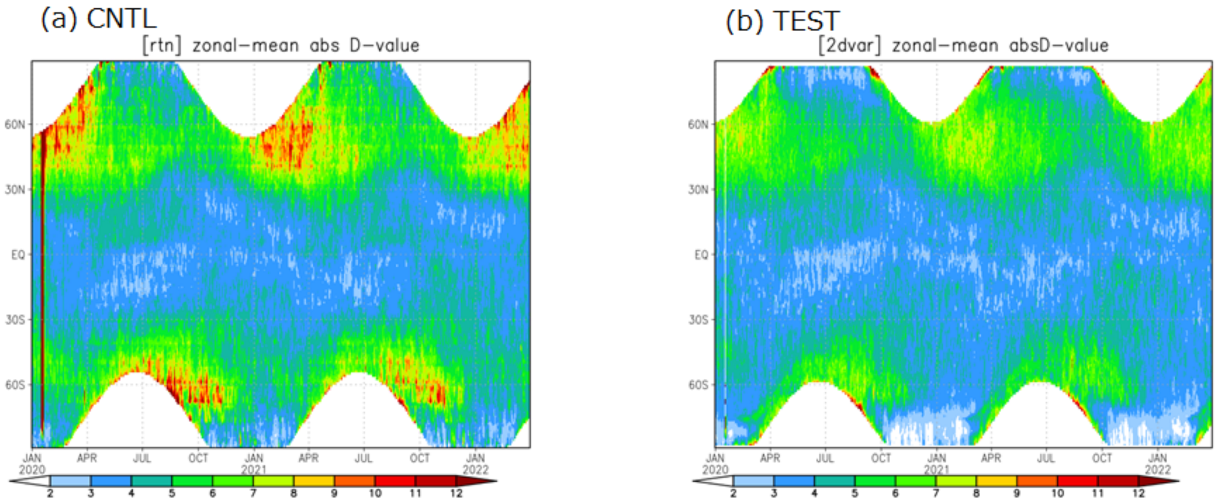

図 4.9.2　(a)CNTL と (b)TEST の東西平均した D 値の絶対値の時系列 [DU]。2020 年 1 月 1 日から 2022 年 3 月 31 日までの期間を示す。

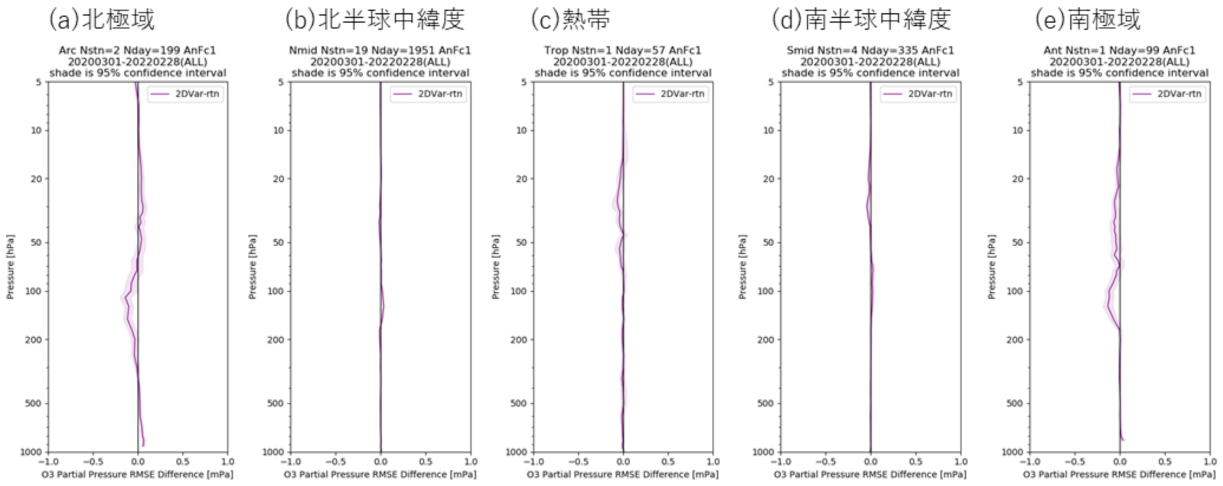

図 4.9.3　オゾンゾンデに対する解析値の RMSD の実験間差分（TEST − CNTL）[mPa]。(a) 北極域 (60°N〜90°N)、(b) 北半球中緯度 (20°N〜60°N)、(c) 熱帯 (20°S〜20°N)、(d) 南半球中緯度 (60°S〜20°S)、(e) 南極域 (90°S〜60°S) で 2020 年 3 月 1 日から 2022 年 2 月 28 日までの期間の全 27 地点のオゾンゾンデを利用して検証。

4.10 WGNE 熱帯低気圧検証

4.10.1 はじめに

気象庁は数値実験作業部会 (WGNE) [1]の枠組みの中で、現業数値予報センターの全球モデルによる熱帯低気圧予測の国際相互比較検証を 1991 年から実施しており、毎年開催される WGNE 会合にて当庁から熱帯低気圧予測の相互比較検証を報告している。本項では、WGNE 第 38 回会合[2] で報告した 2022 年の熱帯低気圧予測の検証結果の概略について述べる。

4.10.2 熱帯低気圧検証に用いた数値予報センターの予測データと検証手法

2022 年の熱帯低気圧予測の国際比較に参加した数値予報センターはオーストラリア気象局 (BoM)、カナダ気象センター (CMC)、ドイツ気象局 (DWD)、欧州中期予報センター (ECMWF)、フランス気象局 (FRN)、韓国気象庁 (KMA)、米国環境予測センター (NCEP)、インド国立中期予報センター (NCMRWF)、米国海軍研究所 (NRL)、英国気象局 (UKMO) に気象庁 (JMA) を加えた 11 センターである。表 4.10.1 に WGNE 熱帯低気圧予測の国際相互比較検証に参加した数値予報センターとその予測データの仕様を示す。

WGNE 熱帯低気圧予測の検証には梅津・森安 (2013) に述べられた手法を採用している。主な手法は以下のとおりである。

- 北西太平洋、北東太平洋、北大西洋、北インド洋、南インド洋、オーストラリアの 6 領域別に検証する。
- モデル予測値における熱帯低気圧の中心は、海面更正気圧の極小値を追跡することから求める。
- 地区特別気象センター (RSMC) が作成したベストトラックデータを参照値として、進路予測誤差、強度予測誤差を算出する。

4.10.3 熱帯低気圧検証の結果

WGNE 熱帯低気圧検証結果から、北西太平洋域を対象とした検証結果の一部を示す。はじめに、図 4.10.1 に予測時間別の進路予測誤差を示す。比較のため、2022 年の結果と併せて 2021 年の結果を示す。北西太平洋域には 2022 年は 25 個、2021 年は 22 個の熱帯低気圧が存在していた。2022 年は予報初期時刻 (FT=0) を除き、どの予測時間でも ECMWF の予測誤差が最も小さかった。72 時間予測 (FT=72) で見ると、JMA は 2021 年は KMA や CMC と共に 7–9 番目の集団の中に入っていたが、2022 年は JMA は UKMO や DWD と同等の予測精度で 2–4 番目の集団の中に入っていた。図 4.10.2 は 72 時間進路予測誤差の経年変化図である。2021 年はほぼ全ての数値予報センターで FT=72 の進路予測誤差が増大したが、2022 年は誤差が増大するセンターと減少するセンターに分かれた。JMA は 2022 年は数値予報モデルの大きな更新はなかったものの、20%以上誤差が減少している。これは 2022 年は 2021 年と比較して、JMA で予測誤差が比較的大きくなる傾向がある転向を伴う北向きに進む台風事例が減少したことの影響が考えられる。また、近年は ECMWF, UKMO, NCEP などの先進的な数値予報センターの進路予測誤差の減少が停滞気味であることが気象庁 (2021) で示されており、その傾向が継続している。特に ECMWF の誤差はこの 10 年間で約 200 km からほぼ変化していない。

次に、強度予測について述べる。予報初期時刻における中心気圧の散布図（図 4.10.3）から、BoM、UKMO は予報初期時刻とベストトラックとの対応が良い一方で、JMA を含めた多くの数値予報センターで中心気圧が低い熱帯低気圧ほど予報初期時刻でベストトラックよりも中心気圧が高くなる傾向が見られた。72 時間予測（図 4.10.4）では、CMC、UKMO は全般的に中心気圧の予測値がベストトラックよりも高い傾向を示した。その他の数値予報センターは ECMWF、FRN の予測値がベストトラックよりやや高めの傾向が見られるものの、概ね対角線付近にばらついており、強度予測のバイアスは比較的小さかった。ただし、NRL はベストトラックの中心気圧が低い事例に対して中心気圧を過剰に低く予測する事例が見られた。

4.10.4 まとめ

WGNE 第 38 回会合で 2022 年の熱帯低気圧予測の相互比較検証結果を報告した。進路予測の単年の数値予報センター間比較では、ECMWF の進路予測精度が最も良く、2022 年は JMA は UKMO や DWD と同等で 2–4 番目の集団の中に入っていた。進路予測の経年変化では、近年は ECMWF 等の先進的な数値予報センターの進路予測精度の向上が鈍化する傾向が継続していた。

強度予測では、JMA を含めた多くの数値予報センターで中心気圧が低い熱帯低気圧ほど予報初期時刻でベストトラックよりも中心気圧が高くなる傾向が見られた。72 時間予測では、CMC、UKMO は全般的に中心気圧の予測値がベストトラックより高い傾向を示し、NRL はベストトラックの中心気圧が低い事例に対して中心気圧を過剰に低く予測する事例が見られた。

---

[1] 数値予報モデルと気候モデルを用いた数値実験に関わる研究開発を推進するため、世界気候研究計画 (WCRP) 合同科学委員会 (JSC) と世界気象機関 (WMO) 研究評議会 (Research Board) の合同部会として設置されている専門部会

[2] https://wgne.net/meetings/

表 4.10.1　WGNE 熱帯低気圧予測の国際相互比較検証に参加した数値予報センターと予測データの仕様。

数値予報センター	検証参加開始年	検証に利用したデータの水平解像度（経度 x 緯度 （単位 °））	数値予報モデルの解像度[c] (km はおおよその水平格子間隔、L は層数を示す)
BoM	2003	0.176 x 0.117	12 km L70
CMC	1994	1.0 x 1.0	15 km L84
DWD	2000	0.25 x 0.25	13 km L90
ECMWF	1991	0.125 x 0.125	T_{Co}1279L137 (9 km)
FRN	2004	0.1 x 0.1	T_L1798C2.2L105 (5 km–24 km)
JMA	1991	0.25 x 0.25	T_L959L128 (20 km)
KMA	2010	0.125 x 0.125	12 km L91
NCEP	2003	0.5 x 0.5	C768L64 (13 km)
NCMRWF	2020	0.18 x 0.12	12 km L70
NRL	2006	0.5 x 0.5	T681L60 (19 km)
UKMO	1991	0.1406 x 0.094	10 km L70

[c] 数値予報モデルの解像度で記された T, T_L, T_{Co} は三角形波数切断を意味し、直後の数字は切断波数を表す。T の場合は二次格子、T_L の場合は線形格子、T_{Co} は ECMWF で採用された三次八面体格子を意味する。C は NCEP で採用された立方体格子 (https://www.gfdl.noaa.gov/fv3/fv3-grids/) を意味し、直後の数字は立方体の各面における X 方向、Y 方向の格子数を表す。FRN の C2.2 は可変格子で最も高解像度となる欧州付近の解像度を 2.2 倍とする係数 (Courtier and Geleyn 1988) を意味する。また、L は鉛直層を意味し、直後の数字は層数を表す。

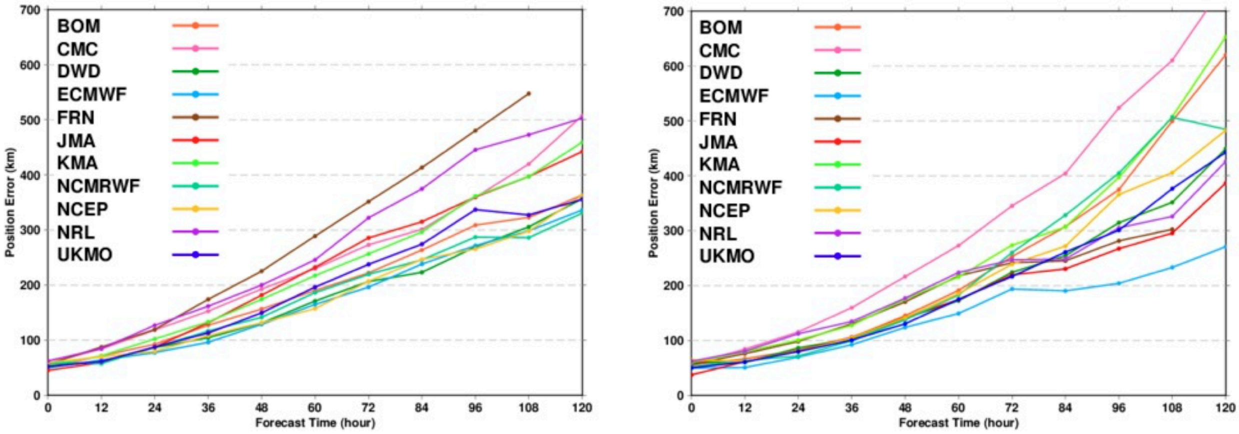

図 4.10.1　北西太平洋域における熱帯低気圧の予測時間別進路予測誤差。左が 2021 年、右が 2022 年を示す。

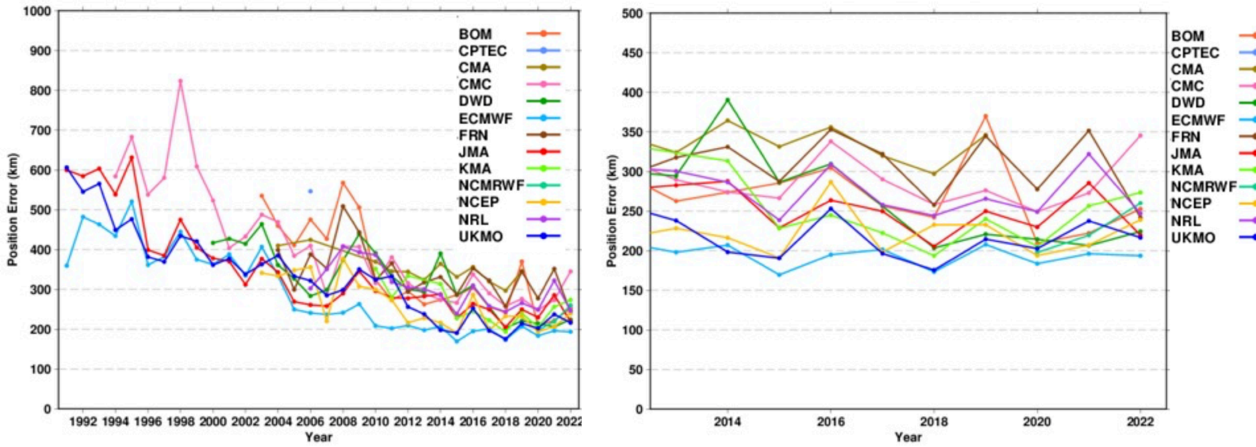

図 4.10.2　北西太平洋域における熱帯低気圧の 72 時間進路予測誤差の経年変化。左が 1991 年から 2022 年までの期間、右が 2013 年から 2022 年までの期間の結果を示す。

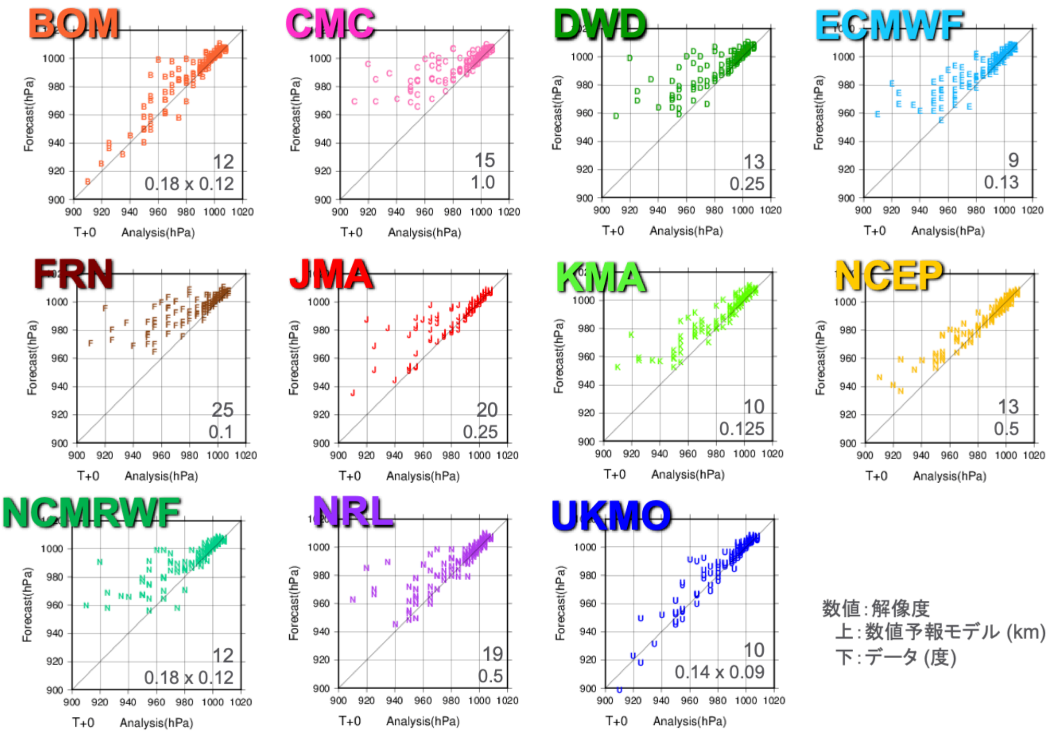

図 4.10.3　北西太平洋域における予報初期時刻での熱帯低気圧中心気圧の散布図。2022 年の結果を示す。横軸にベストトラック、縦軸に予報初期時刻での中心気圧 [hPa] をとり、対角線より下にプロットされている場合は、予報初期時刻の中心気圧がベストトラックより過剰に低い事例、対角線より上にプロットされている場合は、過剰に高い事例を示す。各図右下の数値は上は数値予報モデルの解像度 [km]、下は検証に用いたデータの水平解像度 [度] を示す。

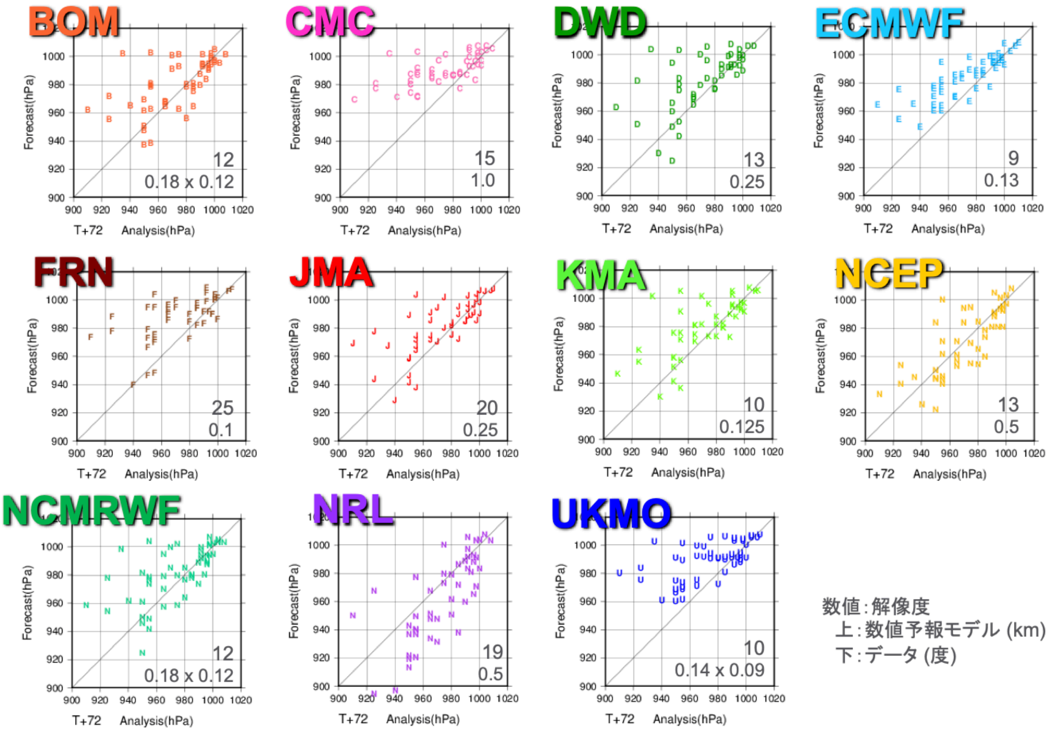

図 4.10.4　北西太平洋域における 72 時間予測での熱帯低気圧中心気圧の散布図。2022 年の結果を示す。横軸にベストトラック、縦軸に 72 時間予測での中心気圧 [hPa] をとり、対角線より下にプロットされている場合は、中心気圧の予測値がベストトラックより過剰に低い事例、対角線より上にプロットされている場合は、過剰に高い事例を示す。各図右下の数値は上は数値予報モデルの解像度 [km]、下は検証に用いたデータの水平解像度 [度] を示す。

参考文献

Courtier, P. and J-F. Geleyn, 1988: A global numerical weather prediction model with variable resolution: Application to the shallow-water equations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **114**, 1321–1346.

気象庁, 2021: WGNE 熱帯低気圧検証. 数値予報開発センター年報（令和 2 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 130–132.

梅津浩典, 森安聡嗣, 2013: WGNE 熱帯低気圧検証. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 98–111.

第5章　成果発表

5.1　論文・報告

2023年1月から12月までに掲載された、数値予報開発センターの職員が執筆した論文 (共著も含む) を示す。

5.1.1　論文 (査読有)

Adachi, Y., H. Naoe, Y. Kubo, 2023: Impact of the SST-Front on Subseasonal Predictions of North Atlantic Winter Circulation Using the JMA Operational Seasonal Prediction System, *SOLA*, **19**, 282-288 `https://doi.org/10.2151/sola.2023-037`

Eugenia Kalnay, Travis Sluka, Takuma Yoshida, Cheng Da, Safa Mote, 2023: Review article: Towards strongly coupled ensemble data assimilation with additional improvements from machine learning, *Nonlinear Processes in Geophysics*, **30**, 217-236 `https://doi.org/10.5194/npg-30-217-2023`

Fujii Y., T. Yoshida, H. Sugimoto, I. Ishikawa, S. Urakawa, 2023: Evaluation of a global ocean reanalysis generated by a global ocean data assimilation system based on a four-dimensional variational (4DVAR) method, *Frontiers in Climate*, **4**, 1-20 `https://doi.org/10.3389/fclim.2022.1019673`

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), *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **101**, 149-169, `https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-009`

Hotta, D., T. Kadowaki, H. Yonehara, T. Ishibashi, 2023: Twin-analysis verification: A new verification approach to alleviate pitfalls of own-analysis verification, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **149**, 924-932 `https://doi.org/10.1002/qj.4441`

Maki, T., K. Kondo, K. Ishijima, T. T. Sekiyama, K. Tsuboi, and T. Nakamura, 2023: Independent Bias Correction Method for Satellite Observation Data Introduced to CO_2 Flux Inversion, *SOLA*, **19**, 157-164, doi:10.2151/sola.2023-021.

Yokota, S., T. Banno, M. Oigawa, G. Akimoto, K. Kawano, and Y. Ikuta, 2024: JMA operational hourly hybrid 3DVar with singular Vector-based Mesoscale Ensemble Prediction System, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **102** `https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-006`

5.1.2　報告

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**.

Hirabara, M., H. Asai, N. Usui, 2023: Improvement in JMA ’s Ocean Data Assimilation and Prediction System for the Seas Around Japan (JPN system), *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 8-03.

Kamada, A., H. Yamaguchi, M. Kajino, 2023: Domain expansion and nudging method of JMA’s Local Chemical Transport Model, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 9-05.

Kanehama, T., H. Yonehara, M. Ujiie, 2023: The impact of a high-accuracy high-resolution digital elevation model on numerical weather predictions, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 6-05.

Kawada, H., T. Kakehata, K. Kawano, 2023: Implementation of the SPPT scheme in JMA’s Mesoscale Ensemble Prediction System, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 5-11.

Kubo, Y. and M. Sumitomo, 2023: Major upgrade of JMA prediction system for S2S Project based on a coupled model, S2S Newsletter, **22**, 15-17, `http://www.s2sprediction.net/file/newsletter/S2S%20Newsletter%2022_Apr%202023_.pdf`

Nonaka, K., 2023:Operational use of Dual-Metop AMVs at high latitudes in JMA ’s global NWP system, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 1-09.

Ota, Y., J. Chiba, Y. Ichikawa, H. Oashi, T. Takakura, H. Yamaguchi 2023: Upgrade of JMA's Global Ensemble Prediction System, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 6-11.

Shimizu, H., 2023: Operational use of hyper spectral infrared sounder radiance data in JMA ' s meso-scale NWP syste, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 1-23.

Toguchi, R., T. Iriguchi, 2023: Operational Use of Surface Humidity Observations in JMA's Mesoscale NWP Systems, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 1-25.

Yamasaki, Y., H. Kusabiraki, 2023: Improving the representation of topographic effects in JMA's regional NWP model, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 4-13.

Yonehara, H., Y. Kuroki, M. Ujiie, C. Matsukawa, T. Kanehama, R. Nagasawa, K. Ochi, M. Higuchi, Y. Ichikawa, R. Sekiguchi, S. Hirahara, 2023: Upgrade of JMA ' s Operational Global Numerical Weather Prediction System, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 6-15.

Yamaguchi, H., J. Chiba, Y. Ichikawa, T. Takakura, 2023: Hindcast verification of JMA's GEPS for one-month prediction with a globally expanded two-tiered sea surface temperature approach, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **53**, 6-13.

5.2 国際会合

2023 年 1 月から 12 月まで数値予報開発センターの職員が参加した国際会合[1]を掲載する。会議名、主催、開催日時、参加者、発表した場合は題目、発表日、発表形式の順に示している。

- 米国気象学会第 103 回年次会合 (AMS、1/8 - 1/12)
  - 井上卓也「Development of a Temperature Prediction Method Combining Deep Neural Networks and a Kalman Filter」(1/12 口頭)
  - 千葉丈太郎「Seasonal Prediction Skill of the Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System Version3」(1/12 ポスター)
- 季節内から季節予測プロジェクト技術委員会議 (WCRP/WWRP、2/28, 3/2)
  - 住友雅司
- 国際鉛直探査計研究会議 (ITSC) 第 24 回会合 (CGMS/ITWG、3/16 - 3/22)
  - 草野直人*、村田英彦、清水宏幸「Update of the radiative transfer model to RTTOV-13 at JMA」(3/16 ポスター)
  - 村田英彦*、近藤圭一、亀川訓男、草野直人、清水宏幸、安藤慧、浦田知哉「Recent upgrades and progresses of satellite radiance data assimilation at JMA」(3/17 ポスター)
  - 清水宏幸*、計盛正博、可知 美佐子「Development for all-sky assimilation of JAXA's future microwave sensor AMSR3 in the JMA's NWP system」(3/20 ポスター)
- 国際風ワークショップ (IWW) 第 16 回 (5/8 - 5/12)
  - 野中健一「Upgrades of polar AMVs use in JMA's global NWP system」(5/9 口頭)
- WCRP/WWRP S2S サミット 2023 (7/3 - 7/7)
  - 住友雅司*、久保勇太郎、山田崇「New JMA forecast data for S2S Project based on a coupled model」(7/4 口頭)
- 宇宙からの温室効果ガス観測ワークショップ第 19 回 (LSCE(フランス気候環境科学研究所)・CNES (フランス国立宇宙研究センター)、7/4 - 7/6)
  - 眞木貴史*、石島健太郎、関山剛、坪井一寛、近藤圭一、中村貴「Impact of independent satellite bias correction method」(7/6 ポスター)
- 非静力学モデルに関する国際ワークショップ第 6 回 (8/31 - 9/2)
  - 石田凌雅「GPU porting of ASUCA using OpenACC directives」(8/31 口頭)
  - 田ノ下潤一*、松林健吾「Evaluation of vertical transport of cumulus convection parametrization using LES」(9/1 口頭)
- ECMWF 年次セミナー (9/4 - 9/8)
  - 高坂裕貴「The JRA-3Q reanalysis」(9/4 ポスター)
- 欧州気象学会 (EMS) 年次会合
  - 千葉丈太郎「Toward improvement of cloud representation in the continental interiors in JMA/MRI-CPS」(9/7 ポスター)
- 欧州気象衛星開発機構気象衛星会議 2023 (EUMETSAT, 9/11 - 9/15)
  - 清水宏幸*、計盛正博、可知美佐子 (JAXA)「Development for assimilation of AMSR3 humidity-sounding channels over land and sea ice using a dynamic emissivity retrieval」(9/13, 口頭)
- 欧州領域モデリング会合第 45 回及び短期数値予報会合第 30 回 (9/25 - 9/28)
  - 荒波恒平「Development of Limited-Area NWP Systems at JMA」(9/26, ポスター)
- 国際地表面作業部会会合第 5 回 (IESWG-5) (9/26 - 9/28)
  - 近藤圭一「Impact of microwave radiance assimilation over land using dynamic emissivity in the global NWP system of JMA」(9/27 口頭)
- 波浪・高潮・沿岸災害に関する国際ワークショップ第 3 回 (米国ノートルダム大学、10/1 - 10/6)
  - 菅野淳平「Recent upgrades of operational storm surge models in Japan Meteorological Agency」(10/3 口頭)
- 世界気候研究計画公開科学会議第 2 回 (ルワンダ環境管理庁、10/09 - 10/27)

[1] 略号については付録を参照。

- 久保勇太郎*、千葉丈太郎、平原翔二、吉田拓馬、小森拓也、高倉寿成、杉本裕之、足立恭将、石川一郎、藤井陽介 「The systematic errors of the Indian Ocean Dipole in the JMA seasonal prediction system (CPS3)」 (10/11 ポスター)

- アジア・オセアニア気象衛星利用者会議 (AMOSUC) 第 13 回 (韓国気象庁、11/5 - 11/10)
  - 浦田知哉 「Assimilation of NOAA-21/ATMS and CrIS in the JMA's NWP systems」 (11/8 口頭)
- 数値実験作業部会 (WGNE) 第 38 回会合 (11/27 -12/1)
  - 氏家将志 「WGNE inter-comparison of Tropical Cyclone Track forecast 2022」 (11/28 口頭)

5.3 国内会合

2023 年 1 月から 12 月まで、数値予報開発センターの職員が口頭・ポスター発表した国内会合を掲載する。「会合名」「開催期間」「開催形式」「発表者[1]」「発表題名」「発表日[2]」「発表形式」の順で示している。

- 「気象・気候アプリケーション分野の調査研究」会合 (1/19 - 1/20 ハイブリッド)
  - 雁津克彦*「asuca/asuca-Var、GSM　気象庁モデル開発と「富岳」の活用」(1/19 口頭)
- GPM および衛星シミュレータ合同研究集会 (3/23 - 3/24 ハイブリッド)
  - 浦田知哉*、清水宏幸「気象庁数値予報システムにおける衛星搭載マイクロ波気温サウンダの同化利用チャンネル拡大に向けた調査」(3/23 口頭)
- 日本気象学会計算科学研究連絡会 (5/9 オンライン)
  - 林田和大「気象庁全球モデルにおけるスペクトル変換過程の GPU 対応について」(5/9 口頭)
- 日本気象学会春季大会 (5/16 - 5/20 オンライン)
  - 高坂裕貴*、古林慎哉、千葉丈太郎、田中泰宙「JRA-3Q における国際地球観測年以前の大気の表現」(5/18 口頭)
- 日本気象学会春季大会 (5/16 - 5/20 オンライン)
  - 川口真司*、米原仁「気象庁全球モデルにおける海面水温の扱いおよび海面過程に関する調査」(5/16 口頭)
- 日本気象学会春季大会 (5/16 - 5/20 オンライン)
  - 浦田知哉*、清水宏幸「気象庁数値予報システムにおける衛星搭載マイクロ波気温サウンダの同化利用チャンネル拡充に向けた調査」(5/18 口頭)
- 日本地球惑星科学連合 2023 年大会 (5/21 - 5/26 ハイブリッド)
  - 金浜貴史*、松川知紘、米原仁「Short-range Stratosphere-Troposphere coupling in a data-assimilation cycle and its benefit for numerical weather prediction」(2023/5/25 ポスター)
- 日本地球惑星科学連合 2023 年大会 (5/21 - 5/26 ハイブリッド)
  - 赤見彰一*、近藤圭一、梶野瑞王、田中博「Parameter Estimation of Local Particle Filter by Bayesian Optimization」(5/22 ポスター)
- 日本地球惑星科学連合 2023 年大会 (5/21 - 5/26 ハイブリッド)
  - 清水宏幸*、計盛正博、可知美佐子「Development for assimilation of AMSR3 humidity-sounding channels over land and sea ice using a dynamic emissivity retrieval」(5/26 口頭)
- 日本気象学会秋季大会 (10/23 - 10/26 ハイブリッド)
  - 米原仁*、川口真司、金浜貴史、氏家将志「気象庁全球モデルによる 2023 年台風第 2 号予測に関するインパクト実験」(10/23 口頭)
- 日本気象学会秋季大会 (10/23 - 10/26 ハイブリッド)
  - 服部宏紀*、川田英幸、安西悠理、河野耕平「気象庁における局地アンサンブル予報システムの開発」(10/25 口頭)
- 日本気象学会秋季大会 (10/23 - 10/26 ハイブリッド)
  - 近藤圭一*、大和田浩美、石橋 俊之、岡本幸三「気象庁全球数値予報システムにおけるひまわり 10 号の観測データインパクト」(10/25 口頭)
- 日本気象学会秋季大会 (10/23 - 10/26 ハイブリッド)
  - 近藤圭一*、藤井秀幸、岡本幸三、入口武史、青梨和正「気象庁全球数値予報システムを用いた陸域マイクロ波輝度温度同化における地表面射出率と地表面温度の同時推定手法」(10/26 口頭)
- JAXA 第 3 回地球観測研究公募 PI ワークショップ (11/6 - 11/9 ハイブリッド)
  - 村田英彦*、近藤圭一、草野直人、豊川将一、當眞嗣淳、安藤慧、浦田知哉、清水宏幸「Utilization of water vapor, clouds and precipitation information from space-based microwave observation in JMA operational numerical weather prediction systems」(11/8 口頭)

[1] 共著の場合、発表者には*をつけている。
[2] 開催期間が 1 日の場合、発表日は省略している。

5.4 数値予報課コロキウム

表 5.4.1: 2023 年 1 月から 12 月までに開催した数値予報課コロキウム

開催日	発表者	発表表題
1 月 26 日	關澤偲温、岡島悟、宮本歩、宮坂貴文、中山盛雄、中村尚（東京大学先端科学技術研究センター）	夏季北海道南東方沖における下層雲の気象庁メソモデルでの再現性・予測精度の検証
3 月 9 日	安藤慧、野中健一	全球解析における GOES-18 AMV・CSR の利用について
3 月 16 日	林田和大	GPU による気象庁全球モデルの高速化に向けて
3 月 17 日	中村佑希	メソ解析における地上設置型マイクロ波放射計データの新規利用（開発経過報告）
3 月 30 日	黒木志洸、吉村裕正（気象研究所）、門脇隆志	GSM の通信削減に向けた開発: セミラグランジュ移流スキムの通信負荷軽減に向けた MPI 分割手法の見直しの検討
5 月 11 日	宮坂貴文、隈健一（東京大学先端科学技術研究センター）	地域気象データと戦略的社会共創拠点 (ClimCORE) プロジェクトによる日本域気象再解析（RRJ-ClimCORE）作成の進捗報告
7 月 20 日	浦田知哉、清水宏幸、當眞嗣淳	NOAA-21/ATMS,CrIS 輝度温度データの同化利用に向けた調査（進捗報告）
9 月 5 日	中村佑希	メソ・局地解析における地上設置型マイクロ波放射計データの新規利用（性能評価試験報告）
9 月 7 日	木村翼、北村祐二	音波等を対象とする時間積分スキームの見直しによる安定性の向上および音波ループ削減による高速化
9 月 7 日	奥川椋介	asuca の雲物理過程における霰生成過程の見直し
9 月 21 日	草開浩およびメソモデルチーム	局地モデルの改良および予報時間延長について
9 月 28 日	高倉寿成、出牛真（気象研究所）	季節アンサンブル予報システムのオゾン予報変数化と全球化学輸送モデルのオゾン同化手法高度化（開発経過報告）
10 月 10 日	浦田知哉	全球解析における NOAA-21/ATMS,CrIS の利用について（性能評価試験報告）
10 月 10 日	木村翼	音波等を対象とする時間積分スキームに SSP-RK を用いた時の計算安定性の追加調査
10 月 19 日	下川直史・米原仁（数値予報課）、長澤亮二（気象研究所）	気象庁全球モデルの放射過程で用いる二酸化炭素濃度気候値の更新と放射過程のコードリファクタリングによる高速化・省メモリ化
12 月 13 日	浦田知哉	NOAA-21/CrIS 輝度温度データの正式版の品質に関する調査
12 月 13 日	中村佑希・浦田知哉	メソ解析における観測データ利用手法の改良（業務化試験報告）
12 月 13 日	草開浩・中村佑希・浦田知哉	局地数値予報システムの更新（業務化試験結果報告）
12 月 14 日	井藤智史・飯塚義浩・齊藤陸・住友雅司 (基盤室)、安斎太朗 (モデル室)、亀川訓男 (気象技術開発室)、森脇健 (地震火山技術・調査課)	次世代 AI 基礎研修実施報告

第 6 章　連携・共同研究

6.1　気象研究所との開発連携

2023 年 1 月から 12 月までの各モデル・システムにおける連携先の研究室とその内容を報告する。

(i) 数値予報システム（全球）の予測精度向上

(a) **内容** 高解像度モデルに適した物理過程開発と知見の共有、大気海洋結合モデル開発や海面フラックスの診断方法等の知見の共有。力学過程の高度化開発の情報共有

連携先 全球大気海洋研究部第一研究室, 気象予報研究部第二研究室, 気象予報研究部第四研究室, 気象観測研究部第四研究室

(b) **内容** 陸面データ同化システムの開発と精度評価等に関連する最新の知見の共有

連携先 全球大気海洋研究部第一研究室, 気象予報研究部第四研究室

(c) **内容** ハイブリッド同化の次のデータ同化手法の候補に関しての基礎調査

連携先 気象観測研究部第三研究室, 気象観測研究部第四研究室

(d) **内容** 誤差共分散行列の最適化による観測情報の大幅拡充を最新全球解析システムへ導入するための評価、誤差の見直しについての協力・助言

連携先 気象観測研究部第三研究室

(e) **内容** 観測データのインパクト評価手法についての情報共有と助言

連携先 気象観測研究部第三研究室

(ii) 数値予報システム（局地）の予測精度向上

(a) **内容** 高分解能化への対応として「グレーゾーン」問題点の解決につながる最新の知見の共有

連携先 気象予報研究部第一研究室, 気象予報研究部第二研究室

(b) **内容** キロメートル以下の高解像度局地モデルの開発に資する研究や集中豪雨のメカニズム解明に関する研究と知見の共有

連携先 気象予報研究部第一研究室

(c) **内容** 接地境界層における陸面から大気への熱・水の乱流輸送過程の高度化に関する知見の共有

連携先 気象予報研究部第三研究室

(iii) 数値予報システム（メソ、局地）の予測精度向上

(a) **内容** 現業システムへの適用を意識したアンサンブルデータ同化手法の研究、知見の提供

連携先 気象予報研究部第一研究室, 台風・災害気象研究部第一研究室

(iv) 数値予報システム（メソアンサンブル）の予測精度向上、数値予報システム（局地アンサンブル）の開発と改良

(a) **内容** 初期値摂動、境界摂動、物理過程摂動の開発とアンサンブルのプロダクトの利用等に関する助言と最先端の知見の共有

連携先 気象観測研究部第四研究室

(v) 数値予報システム（局地アンサンブル）の開発と改良

(a) **内容** 局地アンサンブルからメソアンサンブルへ確率情報等のプロダクトをシームレスに作成できる両システムの最適仕様作成についての助言

連携先 気象観測研究部第四研究室, 台風・災害気象研究部第一研究室

(b) **内容** 富岳政策対応枠で実施予定の「局地アンサンブル強化の方向性評価」への協力

連携先 気象観測研究部第四研究室

(vi) 数値予報システム（全球、メソ、局地）の予測精度向上

(a) **内容** 高頻度・高解像度観測データの有効利用に向けた観測誤差相関（時間・空間・衛星チャンネル間）の取扱い手法などの研究と助言

連携先 気象観測研究部第三研究室, 気象観測研究部第四研究室

(b) **内容** 雲・降水域や陸域衛星輝度温度データ、ハイパースペクトル赤外サウンダデータ、静止衛星 CO2 バンド輝度温度データ、高解像度 AMV や衛星搭載レーダー、ライダー等、 航空機データ mode-S や WAM、 船舶 GNSS データ、 民間事業者の地上気象観測データ、偏波パラメータ等のレーダーデータ、地上設置型ライダー・マイクロ波放射計等の最新現業システムを用いたインパクト実験を含む観測データ利用の研究と知見の共有

連携先 気象観測研究部第二研究室, 気象観測研究部第三研究室, 気象観測研究部第四研究室

(vii) AI 技術
  (a) **内容** ダウンスケーリング等、AI 技術の知見の共有
  連携先 全球大気海洋研究部第三研究室
(viii) 数値予報システム（メソ、局地）の予測精度向上、ガイダンスの高度化
  (a) **内容** 今後のモデル開発に資する線状降水帯の検証に関する知見の情報共有
  連携先 台風・災害気象研究部第二研究室
(ix) 季節予報システムの予測精度向上
  (a) **内容** 将来の季節予報システムの研究開発
  連携先 全球大気海洋研究部第一研究室, 全球大気海洋研究部第二研究室, 全球大気海洋研究部第三研究室, 全球大気海洋研究部第四研究室, 全球大気海洋研究部第五研究室, 気象予報研究部第二研究室, 気候・環境研究部第一研究室, 気候・環境研究部第三研究室
(x) 気候データ同化の高度化
  (a) **内容** 第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) の品質評価への協力及び観測データに関する情報提供
  連携先 気象観測研究部第二研究室, 気象観測研究部第三研究室, 気候・環境研究部第一研究室
(xi) 波浪モデルの予測の改善精度向上
  (a) **内容** 波浪モデルの高度化に向けた技術的な助言・支援
  連携先 全球大気海洋研究部第五研究室
(xii) 解像度 5km 程度で実行可能な全球モデル GSM の開発
  (a) **連携先** 全球大気海洋研究部
(xiii) 高解像度狭領域 LFM(1km) の開発
  (a) **連携先** 全球大気海洋研究部

6.2 気象衛星センターとの共同研究

(i) 大気追跡風の精度向上へ向けての調査
  (a) **内容** IASI の L2 プロダクトから導出される 3D-Wind の調査
  連携先 解析課

6.3 共同研究一覧

表 6.3.1: 開発センター職員が参加している共同研究（2023 年 12 月現在）

研究名称	研究種別	期間 (年度)	共同研究機関	開発センター職員の研究分担等
日本域 4 次元高機能気象データの整備及び気象データの利活用研究の推進	JST 共創の場形成支援プログラム（共同研究契約）	2021-2025	東京大学	共同研究者: 雁津克彦 北村祐二 沢田雅洋 河野耕平 清水宏幸 古林慎哉 千葉丈太郎
今後の高性能計算機の動向を見据えた気象庁数値予報モデルの性能評価		2023-2025	理化学研究所	共同研究者： 佐藤芳昭 雁津克彦 荒波恒平 氏家将志 河野耕平

研究名称	研究種別	期間 (年度)	共同研究機関	開発センター職員の研究分担等
温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究	環境研究総合推進費	2021-2023	国立環境研究所 気象研究所 海洋研究開発機構 千葉大学	研究協力者: 中村貴
顕著現象予測精度向上を目指した粒子フィルタによるハイブリッドデータ同化手法の構築	科研費若手研究	2021-2024	気象研究所	研究代表者： 近藤圭一
高解像度波浪再解析による日本沿岸長期変動特性の解明	科研費基盤研究(C)	2022-2024	気象研究所	研究協力者: 櫻木智明
宇宙からのマイクロ波放射観測による水蒸気、雲、降水情報の気象庁現業数値予報システムでの利用研究	第 3 回地球観測研究公募	2022-2024	JAXA	研究代表者: 村田英彦 研究協力者： 近藤圭一 草野直人 豊川将一 當眞嗣淳 安藤慧 浦田知哉 清水宏幸
積雲対流スキーム改良を通じた気象庁全球スペクトルモデル GSM の予測精度向上に関する研究	海洋研究開発機構	2022-2023	海洋研究開発機構	共同研究者: 佐藤芳昭 計盛正博 氏家将志
集中豪雨の予測精度向上に資する晴天放射輝度のキャラクタリゼーション	「富岳」政策対応枠	2023-2023	千葉大学	佐藤芳昭 雁津克彦 藤田匡 村田英彦 近藤圭一 安藤慧
アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化とデータ同化手法の開発	東京大学大気海洋研究所気候システム研究系特定共同研究	2023-2023	東京大学	氏家将志 米原仁 金浜貴史 木南哲平 高橋由実子 齊藤慧 黒木志洸 林田和大 須藤康平
台風防災に資する気象庁全球スペクトルモデル GSM の改良に関する研究	共同研究契約	2023-2024	京都大学	佐藤芳昭 藤田匡 笹川悠 小泉耕 氏家将志
雲・エアロゾルを介した中緯度大気海洋相互作用	科研費新学術領域研究	2020-2023	東京大学 東北大学 名古屋大学 気象研究所 海洋研究開発機構	研究協力者： 千葉丈太郎

研究名称	研究種別	期間 (年度)	共同研究機関	開発センター職員の研究分担等
二重偏波気象ドップラーレーダーを用いた動径風の品質管理法と観測誤差推定法の開発	共同研究契約	2023-2023	防災科学技術研究所	佐藤芳昭 雁津克彦 藤田匡 村上康隆 石井恭介

6.4 「富岳」政策対応枠「豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発」

6.4.1 はじめに

台風や線状降水帯による災害は近年、毎年のように発生している。このような災害の被害軽減を図るためには予測情報の精度向上が必要であり、その予測情報の基盤である数値予報の精度向上は喫緊の課題である。気象庁は、平成 30 年（2018 年）に数値予報技術開発重点計画を策定し、豪雨防災や台風防災に重点的に取り組んでいる。この取り組みのさらなる加速化を図るため、「富岳」政策対応枠[1] に「豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発」とした課題で応募、令和 3 年度（2021 年度）より採択されている。

本課題においては、豪雨防災課題として局地アンサンブル予報システムの方向性評価、台風防災課題として高解像度全球数値予報モデルの開発を、2021 年度より実施している。また、2022 年度からは豪雨防災課題に水平解像度 1km の局地モデルのリアルタイム実行などの課題を加えた。2023 年度はこのリアルタイム実行の仕様を拡張するとともに、観測データの利用高度化に向けた大学や研究機関との共同研究を開始した。

本節ではこれらの課題に関する取り組みについて概説する。

6.4.2 局地アンサンブル予報システムの方向性評価

線状降水帯は、次々と発生した積乱雲により構成された線状の降水域が数時間にわたってほぼ同じ場所に停滞することで、大雨をもたらすものである。線状降水帯の予測精度向上に向けて、予測モデルを高解像度化することや、高解像度のアンサンブル予報システム（EPS: Ensemble Prediction System）を開発することは欠かすことができない課題とされており、また線状降水帯が発生する環境場として、水蒸気の流入を正確に把握することが重要とし、現在利用していない衛星データの利用技術をすすめることも重要としている。（第 1 回線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ[2]）。このため、線状降水帯の予測計算を行う局地数値予報モデルの高解像度化及び確率的予測（アンサンブル手法）の強化に取り組んでいる。しかし、高解像度化と予測シナリオの増加は計算機資源においてトレードオフの関係があり、気象庁で運用できる限られた計算機資源で線状降水帯の予測精度向上を達成するためには、最適な構成を検討する必要がある。

そこで本課題では、局地モデルの高解像化と予測シナリオの増加の 2 つの方向（もしくはその中庸）の強化の可能性について実験を実施し、方向性に関する知見を得る計画としている。

本課題では、2022 年 10 月までに、解像度 2km の局地モデルによる 21 メンバーアンサンブル予報を行う実験を複数事例に対して実施した。この局地モデルによる EPS を局地 EPS（LEPS: Local EPS）と呼ぶ。この際の EPS メンバーの初期値及び境界値には、気象庁で現在運用している局地解析とメソ予報を用い、初期摂動にはメソ EPS （MEPS: Mesoscale EPS、解像度 5km のモデルによる 21 メンバーのアンサンブル）で作成した値を用いた。また、2023 年 10 月までに、メンバー数を 21 のままとして、モデルをより高解像度の 1km にする実験を実施し、これらの有効性の比較調査も実施した。さらに、上記の 21 通りの初期値にモデルアンサンブル手法を加えることで、解像度 2km のまま、より多数のメンバー（101 メンバー）のアンサンブル予報実験も実施した。本調査の結果、1km21 メンバー実験では線状降水帯事例において空間的によりメリハリのある確率分布の表現が可能になること（図 6.4.1）、2km101 メンバー実験では空間的により連続的な確率分布表現が可能になること（図 6.4.2）を確認した。他方、2km 21 メンバーの仕様でも線状降水帯の確率予測がある程度可能であり、MEPS よりも高い確率で線状降水帯による大雨の可能性を捕捉する傾向を確認した。このため、運用にかかる計算機資源量増加も踏まえ、まずは 2025 年度末に 2km21 メンバーで LEPS 運用開始を目指す方針を確定した。今後は本仕様で、初期値摂動の作成手法改良、側面・下部境界値摂動の導入、物理過程摂動の導入により、よりメリハリのある確率分布を表現できないか、さらに検討を進める。

なお、さらなる高解像度化やさらなるメンバー数増強の効果については、摂動作成手法の改良や高解像度モデルの予測精度向上により、将来的に現時点で確認したよりもさらに大きな効果が得られるようになる可能性がある。当面は 2km21 メンバーの仕様で改良を進める一方、仕様拡張に向けての方向性については、将来的に継続的に調査を行うこととする。

6.4.3 水平解像度 1km 版局地モデルのリアルタイム実行

上述の通り、線状降水帯の予測精度向上に向けた課題として、積乱雲を表現できるよう予測モデルを高解像度化するなどにより、予測モデルの性能を高めることがあげられている。これに向けて、現在気象庁で運用している最も分解能の高い局地数値予報モデル（LFM、解像度 2km、10 時間予報）をさらに高解像度にした場合、また、この高解像度モデルの予測時間を延長した場合、予測性能がどのようになるか、どのような課題があるかを見極める必要がある。

[1] 「スーパーコンピュータ「富岳」利活用促進の基本方針」（令和 2 年（2020 年度）7 月 17 日文部科学省通知）において定められている政策的に重要または緊急と認められる課題がより柔軟に利用できる「富岳」の利用枠

[2] https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjoukousuitai_WG/part1/part1-gijigaiyou.pdf

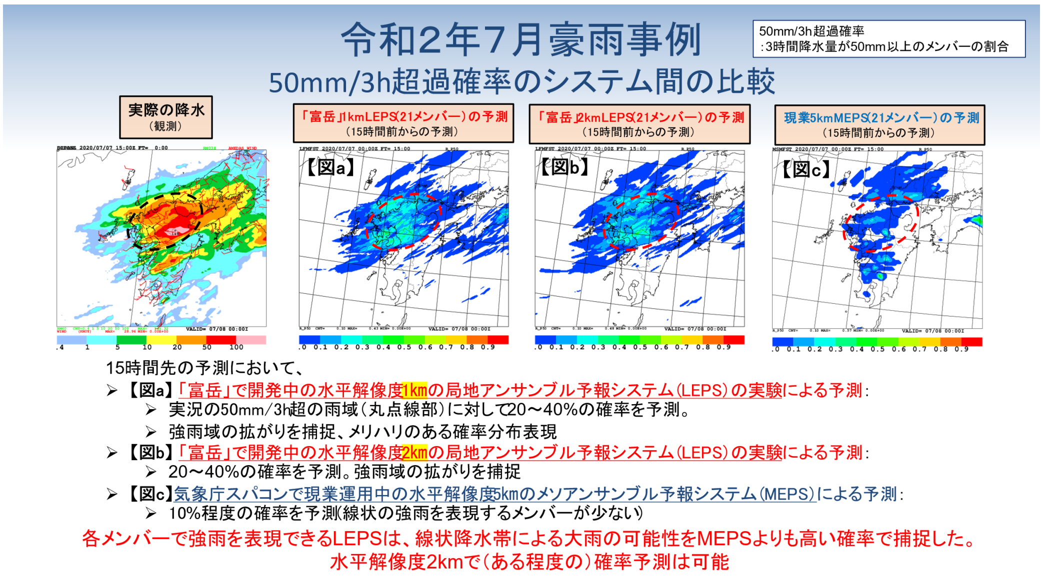

図 6.4.1　水平解像度 1km,2km の局地アンサンブル予報システム及び同 5km のメソアンサンブル予報システムの予測事例比較

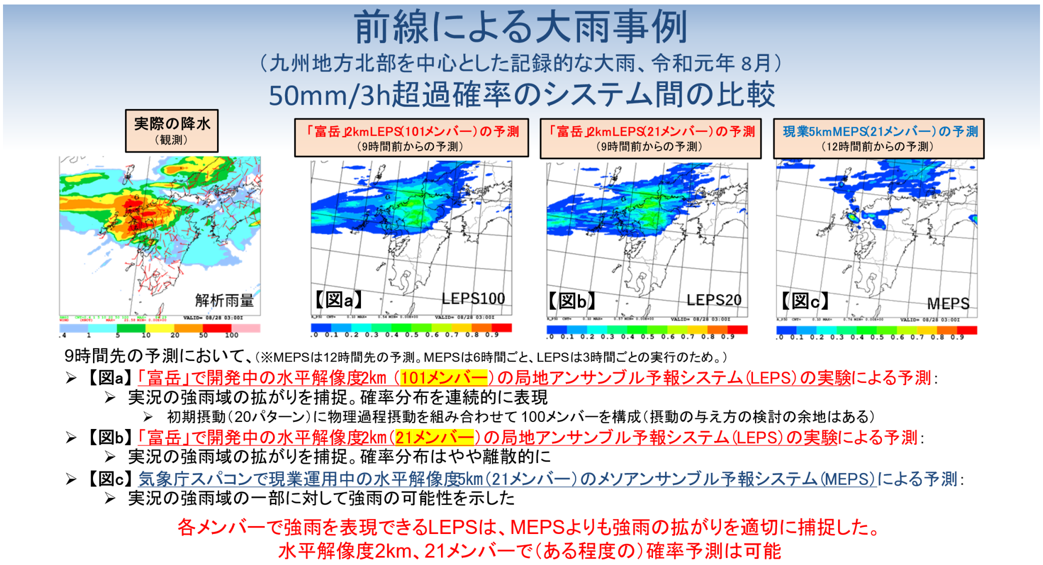

図 6.4.2　メンバー数 101 及び 21 の局地アンサンブル予報システムの予測事例比較

このような調査を行う観点から、2022 年度は、6 月から 10 月までの期間、西日本を中心とした 1400km × 1400km の限定された領域でリアルタイムに 1km LFM の 18 時間予測実験を実施するとともに、「富岳」向けの最適化・高速化開発を行った。2023 年度は、この開発成果により、現在気象庁が 2kmLFM を運用している全国領域でも 1km LFM の予報が実行できるようになったことを受けて、6 月から 10 月までの期間は全国領域で 18 時間予測実験を実施した。図 6.4.3 にこの実験の仕様についてまとめている。

この実験では、昨年度同様、現在 10 時間より先の予測に用いることが出来るメソ数値予報モデル（MSM）の予測と比べて、より実況に近しい強雨を予測した事例を多く確認した。その中には、昨年度の実行領域では側面境界付近となってしまい、十分な予測が困難となる北陸地方での大雨事例もあった（例えば図 6.4.4）。

このように大雨の半日前予測には高解像度モデルの予測時間延長が効果的であることが確認できた一方、1kmLFM を現業運用するためには実行時間を大幅に短縮する必要がある等の課題があるため、まずは 2023 年度末に解像度の 2km の現行 LFM の予測時間を 10 時間から（00,03,06,09,12,15,18,21UTC 初期値において）18 時間に延長し、1km モデルへの高解像度化は 2025 年度末に実施する段階的な計画として引き続き開発を進める。

今後、この 2025 年度末の LFM 高解像度化を目指し、引き続き実行時間の短縮、各種解像度依存する物理過程等の最適化、安定運用を担保するための夏季以外の

富岳1kmLFMの仕様

	富岳1kmLFM (R5)	富岳1kmLFM (R4)	2km LFM （気象庁スパコンで現業運用中）	MSM （気象庁スパコンで現業運用中）
水平解像度	1km	1km	2km	5km
領域	日本域	西日本狭領域	日本域	日本と周辺海域
水平格子数	3161 x 2601	1400 x 1400	1581 x 1301	817 x 661
予報時間	18時間	18時間	10時間	78時間(最大)
実行頻度	2回/日 (03, 15 UTC)	2回/日 (03, 15 UTC)	24回/日	8回/日

令和5年度は、
令和5年3月に2kmLFMに適用された改良も反映した仕様で運用。
モデル本体、初期値、境界値は2km LFMと同一設定。

図 6.4.3　富岳 1kmLFM の仕様

季節を含む様々な予測事例等の検証を実施していく計画である。

6.4.4　高解像度全球数値予報モデルの開発

数日先までの気象現象予測、とりわけ国民生活に影響の大きい台風予測のため、気象庁では、地球全体を予測対象とした全球数値予報モデル GSM を運用している。2023 年 10 月現在の GSM の水平解像度は約 13km であり、台風中心部で発達する積乱雲などを正確に再現するためには解像度が十分とは言えない。このため、その予測精度向上のために水平解像度 10km 以下への高解像度化が必要である。現行の GSM が採用する計算手法（スペクトル法）では、将来的に水平解像度 10km 以下の高解像度 GSM にする際に、球面調和関数の数値計算精度や、計算量やノード間通信量の増加の面で課題があることが分かっている。この課題を解決するため、本課題では富岳を活用して将来の高解像度 GSM でも利用可能な計算手法の開発を行う。

2023 年 10 月までに開発を進め、10km ばかりでなく 5km の解像度での予測実験を実施することも可能となっている。このうち 5km の GSM による令和 5 年（2023 年）台風第 2 号の予測実験では、台風の発達ピーク時の中心気圧予測については 13kmGSM と同程度である一方、気圧が深まるタイミングが早くなり、急発達に関する予測可能性向上が期待される結果が得られている（図 6.4.5）。

今後、気象庁のシステムで運用可能にするための更なる高速化、大気現象の再現性向上を目指し、詳細な解析を継続して進める計画である。

6.4.5　その他の活動

数値予報システム改良の加速化を図るためには、観測データの利用手法や数値予報モデルの各種過程等に専門知識のある大学や研究機関等の研究者の技術や知見を取り込むことが重要である。一方、このような活動のためには、共同で開発を行うため、数値予報の実験を行う開発基盤が必要である。

気象庁では、数値予報システムに対して何らかの改良を施す際に、極端事例のみならず平常時も含めた一定期間の客観解析（データ同化）と予報の実験を行って、その改良版数値予報システムの総合的な性能評価を行う。その開発基盤として、数値予報システムを模擬する「数値解析予報サイクル実験システム NAPEX(原 2017) 」を整備、活用している。大学等の研究者とともに多様な観測データの利用手法改善等に取り組む開発基盤とするため、2023 年夏までにこの NAPEX に準じた実験システムを「富岳」に構築した。

このシステム構築を契機として、2023 年に現在気象庁で運用、数値予報でデータを取得、活用しているものの、さらなる利用手法改良が見込まれる、ひまわり及び二重偏波ドップラー気象レーダーの利用手法高度化を目指し、本実験システムを用いた共同研究の研究提案を広く募った。その結果、千葉大学、琉球大学及び防災科学技術研究所から研究提案が示され、以下の共同研究を実施することとし、研究開発を進めている。

- 「集中豪雨の予測精度向上に資する晴天放射輝度のキャラクタリゼーション」（千葉大学）
- 「二重偏波気象ドップラーレーダーを用いた動径風の品質管理法と観測誤差推定法の開発」（防災科学技術研究所）
- 「沖縄レーダーの観測範囲に出現する「メソ対流系」に伴う偏波パラメータの鉛直構造の解析と現業メソ予報モデルとの比較」（琉球大学）

観測データに知見のある研究者と数値予報開発を専門とする当数値予報開発センターとの共同研究による今後の開発加速化を期待している。

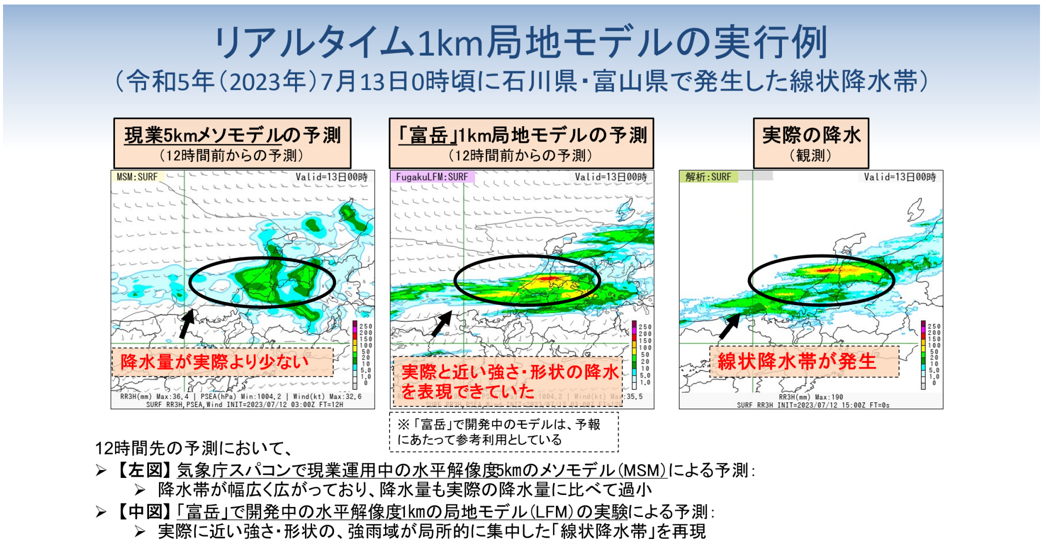

図 6.4.4　リアルタイム 1km 局地モデルの実行例

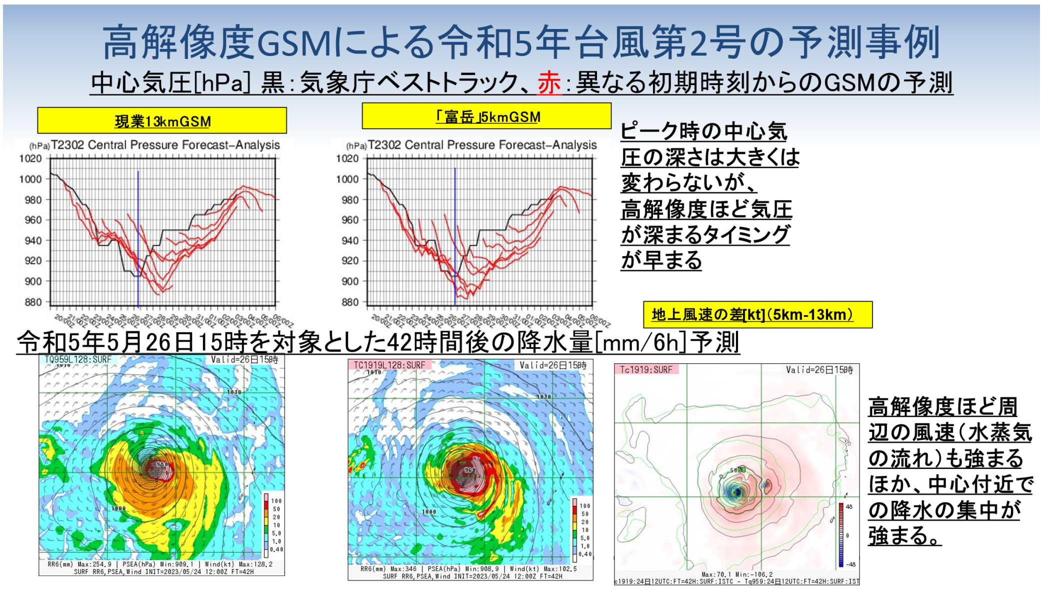

図 6.4.5　高解像度 GSM による令和 5 年台風第 2 号の予測事例

参考文献

原旅人, 2017: 数値解析予報実験システム (NAPEX). 数値予報課報告・別冊第 63 号, 気象庁予報部, 62–63.

第 7 章　受賞・研究交流

7.1　受賞

対象者 Oshima, N., S. Yukimoto, S., M. Deushi, T. Koshiro, H. Kawai, Tanaka, T. Y., and Yoshida, K.
賞名 日本大気化学会論文賞
内容 Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0, Progress in Earth and Planetary Science, 7, 38, `https://doi.org/10.1186/s40645-020-00348-w`.

対象者 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
賞名 気象集誌論文賞
内容 Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System version 3 (JMA/MRI-CPS3). J. Meteor. Soc. Japan, 101, 149-169.

対象者 Kosaka Yuki, S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa, T. Y. Tanaka, T. Tokuhiro, Y. Sato, Y. Matsushita, K. Onogi,
賞名 日本気象学会気象集誌 Editors' Highlight
内容 The JRA-3Q Reanalysis. Journal of the Meteorological Society of Japan, 102, doi: 10.2151/jmsj.2024-004.

対象者 Yokota Sho, T. Banno, M. Oigawa, G. Akimoto, K. Kawano, Y. Ikuta
賞名 日本気象学会気象集誌 Editors' Highlight
内容 JMA Operational Hourly Hybrid 3DVar with Singular Vector-based Mesoscale Ensemble Prediction System, J. Meteor. Soc. Japan , 102, doi: 10.2151/jmsj.2024-006

対象者 気象庁情報基盤部数値予報課・気象研究所気象予報研究部 全球数値予報システム・全球アンサンブル予報システム開発チーム
賞名 気象庁長官表彰
内容 全球数値予報システム・全球アンサンブル予報システムの開発により台風予報・天気予報の大幅な予測精度向上に寄与した功績

7.2　研究者来訪

氏名 宮坂貴文、隈健一（東京大学先端科学技術研究センター）
内容 地域気象データと戦略的社会共創拠点 (ClimCORE) プロジェクトによる日本域気象再解析（RRJ-ClimCORE）作成の進捗報告 (2023 年 5 月 11 日コロキウムで講演)

7.3　当センター共催研修

数値予報モデル開発者特別研修

目的	数値予報モデルの開発に必要な知識・技術の習得。
期間	前期：2023 年 7 月 3 日から 5 日 (3 日間)、後期：2023 年 9 月 11 日から 14 日 (4 日間)。
開催形式	対面・オンライン併用。
受講者	数値予報開発センター：10 名、気象衛星センター：2 名、他省庁：2 名、大学：8 名。
講師	気象庁職員 (数値予報課、気象研究所)
内容	前期：数値ルーチンの説明・プログラミング、後期：数値予報モデルの諸過程。

本研修は当センターと企画課技術開発推進室の共催である。

第 8 章　委員・専門家等

8.1　国際機関の委員・専門家等

- WMO インフラ委員会 (INFCOM)
  - 管理部会 (MG)：佐藤芳昭 (連携に関するコーディネイター)
  - 情報管理・技術常設委員会 (SC-IMT)
    - WMO 統合全球観測システム (WIGOS) データ品質監視システムタスクチーム (TT-WDQMS)：太田行哉 (メンバー)
  - 地球システムモデリング予測常設委員会 (SC-ESMP)
    - 現業気候予測システム専門家チーム (ET-OCPS)：小森拓也 (メンバー)
    - 現業気候予測システム専門家チーム (TT-CliRen)：古林慎哉 (メンバー)
    - 数値予報標準検証見直しに関するタスクチーム (TT-NWPSV)：平原洋一（メンバー）
- WMO 研究評議会 (Research Board)
  - 数値実験作業部会 (WGNE)：氏家 将志 (部会員)
- WMO 第二地区 (RA II)
  - インフラ作業部会 (WG-Infrastructure)：佐藤芳昭 (議長)
- 海面高度科学チーム (OSTST)：浅井博明 (メンバー)
- 北東アジア地域海洋観測システム (NEAR-GOOS)
  - 海洋予測システム作業部会 (OFS-WG)：平原幹俊 (メンバー)
- 世界天気研究計画 (WWRP)/世界気候研究計画 (WCRP)
  - 季節内から季節予測 (S2S) プロジェクト技術委員会：久保勇太郎 (委員)
- WMO 全球大気監視計画 (GAW)
  - モデル応用科学諮問部会 (SAG Applications)：田中泰宙 (メンバー)

8.2　国内機関の委員・専門家等

- 公益社団法人日本気象学会
  - 日本気象学会第 42 期役員候補者選挙管理委員会委員：西本秀祐
  - 日本気象学会第 42 期委員教育と普及委員会委員：樋口真悠子
  - 日本気象学会第 42 期委員講演企画委員会委員：西本秀祐
  - 日本気象学会第 42 期委員「天気」編集委員会委員：沢田雅洋
  - 日本気象学会第 42 期委員国際学術交流委員会委員：小田真祐子
  - 日本気象学会第 42 期委員 電子情報委員会副委員長：田中泰宙
- 気象庁・公益社団法人日本気象学会
  - 気象研究コンソーシアム運営委員：佐藤芳昭
- 文部科学省
  - 「統合的気候モデル高度化研究プログラム」「全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発」運営委員会委員：佐藤芳昭
- 宇宙航空研究開発機構
  - 「AMSR 分科会委員」「地球観測に関する科学アドバイザリ委員会 AMSR 分科会」：村田英彦
  - 「SGLI 分科会委員」「地球観測に関する科学アドバイザリ委員会 SGLI 分科会」：田中泰宙

付録 A　略語表

略語	原語	訳または意味
2D-OI	2 Dimensional Optimal Interpolation	2 次元最適内挿法
3D-Var	3 Dimensional Variational method	3 次元変分法
4DEnVar	4 Dimensional Ensemble Variational method	4 次元アンサンブル変分法
4D-Var	4 Dimensional Variational method	4 次元変分法
ASR	All Sky Radiance	全天放射輝度温度
ABI	Advanced Baseline Imager	GOES-16, 17 に搭載されているイメージャ(ひまわり 8, 9 号に搭載の AHI と同じシリーズ)
ACC	Anomaly Correlation Coefficient	アノマリー相関係数
AD	ADjoint Model	随伴モデル
AGCM	Atmospheric General Circulation Model	大気大循環モデル
AHI	Advanced Himawari Imager	ひまわり 8 号、9 号に搭載されているイメージャ
AI	Artificial Intelligence	人工知能
AIREP	AIRcraft REPorts	航空機実況気象通報
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder	大気赤外サウンダ（Aqua 衛星に搭載）
AMDAR	Aircraft Meteorological DAta Relay	航空機観測データ中継装置
AMI	Active Microwave Instrument	能動型マイクロ波観測装置（ERS 衛星に搭載）
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer-2	高性能マイクロ波放射計 2
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS	高性能マイクロ波放射計（Aqua 衛星に搭載）
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A	改良型マイクロ波気温サウンダ（NOAA, Aqua, Metop 衛星に搭載）
AMSU-B	Advanced Microwave Sounding Unit-B	改良型マイクロ波水蒸気サウンダ（15〜17 号の NOAA 衛星に搭載）
AMV	Atmospheric Motion Vector	大気追跡風
AOPC	Atmospheric Observation Panel for Climate	気候のための大気観測パネル (GCOS の専門委員会)
AORI	Atmosphere and Ocean Research Institute	東京大学大気海洋研究所
AOT	Aerosol Optical Thickness	エーロゾルの光学的厚さ
Aqua	Aqua	米国の午後軌道地球観測衛星
ASCAT	Advanced SCATterometer	改良型散乱計
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	資源探査用将来型センサ
asuca	Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere	気象庁 MSM, LFM に用いるモデル
asuca-Var	asuca Variational data assimilation system	asuca に基づく変分法データ同化システム
ATMS	Advanced Technology Microwave Sounder	改良型マイクロ波サウンダ（JPSS 衛星に搭載）
ATOVS	Advanced TOVS	改良型 TOVS
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	改良型高分解能放射計（NOAA 衛星等に搭載）
BFGS	Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algorithm	非制限非線形最適化問題に対する反復的解法の一つ。
BGM 法	Breeding of Growing Modes 法	成長モード育成法
BI	BIas score	バイアススコア
BoM	Bureau of Meteorology	オーストラリア気象局
BSS	Brier Skill Score	確率予測に関する統計指標の一つ
CAPE	Convective Availabel Potential Energy	対流有効位置エネルギー
CAMEL	Combined ASTER and MODIS Emissivity over Land	ASTER と MODIS による合成陸上射出率
CBS	Commission for Basic Systems	基礎システム委員会
CCM	Chemistry-Climate Model	化学気候モデル
CDR	Climate Data Record	気候データレコード
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System	地球放射収支計（TRMM 衛星などに搭載）
CERES-EBAF	CERES-Energy Balanced And Filled	CERES によるフラックスデータセット
CERES-SSF	CERES-Single Scanner Footprint	単独衛星フラックス
CFOSAT	Chinese-French Oceanography Satellite	中仏海洋衛星
CHAMP	CHAllenging Mini-satellite Payload	ドイツ・米国の GNSS 掩蔽観測衛星
CHUAN	Comprehensive Historical Upper-Air Network	歴史的高層観測データセット
CIMSS	Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies	（米国ウィスコンシン大学の）気象衛星研究共同研究所

略語	原語	訳または意味
CIRES	Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences	米国の環境科学共同研究所
CLASS	Comprehensive Large Array-data Stewardship System	包括的大規模配列データ管理システム（NOAA の衛星データ提供システム）
CM SAF	Satellite Application Facility on Climate Monitoring	気候監視に関する衛星データ処理研究拠点
CMA	China Meteorological Administration	中国気象局
CMC	Canadian Meteorological Centre	カナダ気象センター
CMEM	Community Microwave Emission Modelling	ECMWF のマイクロ波放射モデル
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project	結合モデル相互比較プロジェクト
CNRM	National Centre for Meteorological Research	フランス国立気象研究所
COBE-SST	Centennial in situ Observation-Based Estimates Sea Surface Temperature	現場観測データのみによる気象庁の全球海面水温解析（値）
CoMorph	Convection Morph	UKMO の新しい対流スキーム
Coriolis	Coriolis	米国の極軌道衛星。海上風観測を目的とする。
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate	米国と台湾との協力による 6 機の GNSS 掩蔽観測用小型衛星群からなる観測システム
CPS	Coupled Prediction System	季節アンサンブル予報システム
CrIS	Cross-track Infrared Sounder	走査型赤外サウンダ（JPSS シリーズに搭載）
CRPS	Continuous Ranked Probability Score	確率予測に関する統計指標の一つ
CryoSat	CryoSat	ESA の地球観測衛星。極地の氷を観測対象とする。
CSR	Clear Sky Radiance	晴天放射輝度温度
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program	米空軍の軍事気象衛星
DPR	Dual-frequency Precipitation Radar	二周波降水レーダー
DRAW	Doppler Radar for Airport Weather	空港気象ドップラーレーダー
DWD	Deutscher WetterDienst（ドイツ語）	ドイツ気象局
DWL	Doppler Wind Lidar	ドップラー風ライダー
EARS	EUMETSAT Advanced Retransmission Service	EUMETSAT 拡張再配信サービス。元々は EUMETSAT ATOVS Retransmission Service の略であったが、対象データの拡張に伴い名称が改められた。
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	欧州中期予報センター
EDA	Ensemble of Data Assimilations	データ同化アンサンブル
EDSR	Enhanced Deep Super-Resolution network	深層学習を利用した超解像手法の一つ
ENSO	El Niño-Southern Oscillation	エルニーニョ・南方振動
EOS	Earth Observing System (NASA)	NASA の地球観測衛星
EPS	Ensemble Prediction System	アンサンブル予報システム
ERA	ECMWF ReAnalysis	ECMWF 再解析
ERS	European Remote Sensing satellite	欧州リモートセンシング衛星
ESCAP	United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific	国連アジア太平洋経済社会委員会
ET-OCPS	Expert Team on Operational Climate Prediction System	現業気候予測システム専門家チーム
ETS	Equitable Threat Score	エクイタブルスレットスコア
EUMETSAT	EUropean organisation for the exploitation of METeorological SATellites	欧州気象衛星開発機構
FAR	False Alarm Rate	誤検出率
FASTEM	Fast Microwave Ocean Emissivity Model	海面射出率高速計算モデル
FCDR	Fundamental Climate Data Record	基本気候データレコード
FG	First Guess	第一推定値
FT	Forecast Time	予報時間
FY	Feng Yun	中国の気象衛星「風雲」
GA	Global Analysis	全球解析
GAME	GEWEX Asia Monsoon Experiment	GEWEX アジア・モンスーン実験
GCOM-C	Global Change Observation Mission-Climate	地球環境変動観測ミッション計画において、気候変動に関する観測を担当する衛星 (和名「しきさい」)
GCOM-W	Global Change Observation Mission-Water	地球環境変動観測ミッション計画において、水循環変動に関する観測を担当する衛星
GCOS	Global Climate Observing System	全球気候観測システム

略語	原語	訳または意味
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans	大洋水深総図
GEONET	GNSS Earth Observation Network System	GNSS 連続観測システム
GEPS	Global Ensemble Prediction System	気象庁の全球アンサンブル予報システム
GEWEX	Global Energy and Water cycle EXperiment	全球エネルギー・水循環実験計画
GLCC	Global Land Cover Characterization	全球土地被覆分類
GMI	GPM Microwave Imager	GPM マイクロ波イメージャ
GMS	Geostationary Meteorological Satellite	日本の静止気象衛星
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球航法衛星システム
GNSS-RO	GNSS - Radio Occultation	GNSS 掩蔽観測
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite	米国の静止気象衛星
GOSAT	Greenhouse gases Observing SATellite	日本が打ち上げた温室効果ガス観測技術衛星。和名は「いぶき」
GPM	Global Precipitation Measurement	全球降水観測計画
GPV	Grid Point Value	格子点値 (grid data)
GPU	Graphics Processing Unit	画像描写を行う際に必要となる計算処理を行う半導体チップ
GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment	米国・ドイツの重力気候実験衛星
GSAM-TM	Global Spectral Atmosphere Model - Transport Model	GSM を用いた大気輸送モデル
GSHHG	Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database	全球高解像度地形（海岸線、湖沼）ベクトルデータ
GSM	Global Spectral Model	気象庁の全球スペクトルモデル
HadAT	HADley Centre's rAdiosonde Temperature product	ハドレーセンターのラジオゾンデ気温プロダクト
HadISD	HADley Integrated Surface Dataset	ハドレーセンターの地上観測データセット
HALOE	HALogen Occultation Experiment	ハロゲン掩蔽実験
HIRS	High resolution Infrared Radiation Sounder	高分解能赤外放射サウンダ（NOAA, Metop 衛星に搭載）
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer	赤外大気探査干渉計（Metop 衛星に搭載）
IAU	Incremental Analysis Update	同化による修正量を強制力として一定の割合で与え続ける手法
IBTrACS	International Best Track Archive for Climate Stewardship	気候管理に関する国際ベストトラックアーカイブ
ICAO	International Civil Aviation Organization	国際民間航空機関
ICOADS	International Comprehensive Ocean-Atmosphere DataSet	包括的海洋-大気データセット
IGRA	Integrated Global Radiosonde Archive	全球ラジオゾンデアーカイブ
ICDR	Interim Climate Data Record	気候データレコード
IFS	Integrated Forecast System	欧州中期予報センターの全球数値予報システム
IMH	Institute of Meteorology and Hydrology (Mongolia)	モンゴルの気象水文研究所
IMS	Interactive Multi-sensor Snow and Ice Mapping System	米国海洋大気庁国立気象衛星データ情報サービス作成の積雪域プロダクト
INFCOM	INFrastructure COMmission	WMO インフラ委員会
ISD	Integrated Surface Database	NCEI の地上観測データセット
ISPD	International Surface Pressure Databank	国際地上気圧観測データバンク
ISRO	Indian Space Research Organisation	インド宇宙研究機関
ITCZ	Intertropical Convergence Zone	熱帯収束帯
Jason	Jason	欧米共同運用の海面高度観測衛星
JAXA	The Japan Aerospace Exploration Agency	宇宙航空研究開発機構
JMA	Japan Meteorological Agency	気象庁
JMA-NHM	JMA Non-Hydrostatic Model	気象庁非静力学モデル
JNoVA	JMA Non-hydrostatic model based Variational data Assimilation system	気象庁非静力学モデルに基づいた変分法データ同化システム
JPSS	Joint Polar Satellite System	米国の次世代現業極軌道衛星（NOAA 衛星の後継計画）
JRA-25	Japanese 25-year ReAnalysis	JRA-25 長期再解析
JRA-3Q	Japanese ReAnalysis for Three Quarters of a century	気象庁第 3 次長期再解析

略語	原語	訳または意味
JRA-55	Japanese 55-year ReAnalysis	気象庁 55 年長期再解析
JSC	Joint Scientific Committee	合同科学委員会
JST	Japan Standard Time	日本標準時
KF	Krain and Fritsch scheme	ケイン・フリッチ積雲対流スキーム
KMA	Korea Meteorological Administration	韓国気象庁
LAF 法	Lagged Average Forecast 法	時間ずらし平均法
LAI	Leaf Area Index	葉面積指数
LEPS	Local Ensemble Prediction System	気象庁の局地アンサンブル予報システム
LES	Large Eddy Simulation	ラージエディ（大渦）シミュレーション
LETKF	Local Ensemble Transform Kalman Filter	局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
LFM	Local Forecast Model	気象庁の局地モデル
MA	Meso Analysis	メソ解析
MASINGAR	Model of Aerosol Species IN the Global AtmospheRe	気象研究所全球エーロゾル輸送モデル
ME	Mean Error	平均誤差
Megha-Tropiques	Megha-Tropiques	フランス・インドの地球観測衛星
MEPS	Meso-scale Ensemble Prediction System	気象庁のメソアンサンブル予報システム
Meteosat	Meteorological Satellite	EUMETSAT の静止気象衛星
Metop	Meteorological operational satellite	EUMETSAT の極軌道気象現業衛星
MGDSST	Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperature	気象庁の全球日別海面水温解析（値）
MHS	Microwave Humidity Sounder	マイクロ波水蒸気サウンダ（NOAA, Metop 衛星に搭載）
MJO	Madden Julian Oscillation	マッデン - ジュリアン振動
MLS	Microwave Limb Sounder	マイクロ波リムサウンダ
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer	中分解能撮像分光放射計（Aqua, Terra 衛星に搭載）
MOVE	Meteorological Research Institute Multivariate Ocean Variational Estimation	気象研究所開発の海洋データ同化システム
MRI.COM	Meteorological Research Institute Community Ocean Model	気象研究所共用海洋モデル
MSM	Meso-Scale Model	気象庁のメソモデル
MSU	Microwave Sounding Unit	マイクロ波探査計（14 号以前の NOAA 衛星に搭載）
MTSAT	Multi-functional Transport SATellite	（日本の）運輸多目的衛星
MWHS	MicroWave Humidity Sounder	マイクロ波水蒸気サウンダ（FY-3 衛星に搭載）
MWRI	Micro-Wave Radiation Imager	マイクロ波イメージャ（FY-3 衛星に搭載）
MYNN	Mellor-Yamada Nakanishi-Niino scheme	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino 境界層スキーム
NASA	National Aeronautics and Space Administration	米国航空宇宙局
NCAR	National Center for Atmospheric Research	米国大気研究センター
NCDC	National Climate Data Center	米国気候データセンター
NCEI	National Centers for Environmental Information	米国環境情報センター
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	米国環境予測センター
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	正規化植生指数
NEAR-GOOS	North-East Asian Regional - Global Ocean Observing System	北東アジア地域海洋観測システム
NESDIS	National Environmental Satellite, Data, and Information Service	米国環境衛星・資料情報局
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	米国海洋大気庁
NRL	Naval Research Laboratory	米国海軍研究所
NuSDaS	NWP Standard Dataset System	数値予報標準データセットシステム
OFS-WG	Working group on Ocean Forecasting System	海洋予測システム作業部会 (NEAR-GOOS の作業部会)
OMI	Ozone Monitoring Instrument	オゾンモニタリング装置
OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite	オゾン全量と鉛直プロファイル観測装置
OLR	Outgoing Longwave Radiation	大気上端上向き長波放射
OSCAT	OceanSat Scatterometer	インドの極軌道衛星搭載のマイクロ波散乱計

略語	原語	訳または意味
OSISAF	Satellite Application Facility on Ocean and Sea Ice	海洋・海氷に関する衛星データ処理研究拠点
OSTST	Ocean Surface Topography Science Team	海面高度科学チーム
QBO	Quasi-Biennial Oscillation	成層圏準 2 年周期振動
QC	Quality Control	品質管理
QI	Quality Indicator	品質指標
QuikSCAT	Quick SCATterometer	米国の散乱計衛星
RAOBCORE	RAdiosonde OBservation COrrection using RE-analyses	再解析を用いたラジオゾンデ観測補正
RH	Relative Humidity	相対湿度
RICH	Radiosonde Innovation Composite Homogenization	ラジオゾンデイノベーションの合成による均質化
RIHMI	All-Russian Research Institute for Hydrometeorological Information	全ロシア水文気象学情報研究所
RISE	RICH with Solar Elevation dependent	太陽高度依存を考慮した RICH
RMS	Root Mean Square	二乗平均平方根
RMSD	Root Mean Square Deviation	二乗平均平方根偏差
RMSE	Root Mean Square Error	二乗平均平方根誤差
ROMSAF	Satellite Application Facility on Radio Occultation Meteorology	掩蔽気象学に関する衛星データ処理研究拠点
RSMC	Regional Specialized Meteorological Centre	地域特別気象中枢
RSS	Remote Sensing Systems	リモートセンシングシステムズ（マイクロ波衛星観測データの処理を行う米国の民間調査会社）
RTTOV	Radiative Transfer for TOVS	高速放射伝達モデル
SAF	Satellite Application Facility	衛星データ処理研究拠点
SAPHIR	Soundeur Atmospherique du Profil d'Humidite Intertropicale par Radiometer	マイクロ波水蒸気探査計（Megha-Tropiques 衛星に搭載）
Saral	Satellite with ARgos and ALtiKa	インドの太陽同期準回帰ダウンダスク軌道海洋観測衛星
SCAN	Soil Climate Analysis Network	米国の土壌観測ネットワーク
ScatSat	ScatSat	インドの海洋観測用極軌道衛星
SC-ESMP	Standing Committee on Data Processing for Applied Earth System Modelling and Prediction & Projection	地球システムモデリング予測常設委員会
SC-IMT	Standing Committee on Information Management and Technology	情報管理・技術常設委員会
SCSMEX	South China Sea Monsoon EXperiment	南シナ海モンスーン実験
SEKF	Simplified Extended Kalman Filter	簡略化した拡張カルマンフィルタ
Sentinel	Sentinel	欧米共同運用の海面高度観測衛星
SGLI	Second-generation Global Imager	気候変動観測衛星 GCOM-C1 に搭載された「多波長光学放射計」
SHEBA	the Surface HEat Budget of the Arctic Ocean	北極海表面熱収支観測計画
SI	Scattering Index	散乱インデックス
SI	Similarity index	類似度
SiB	Simple Biosphere (model)	生物圏モデル
SLA	Sea Level Anomaly	海面高度偏差
SPARC	Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate	成層圏・対流圏の諸過程と気候影響研究（WCRP の 4 つのコアプロジェクトの 1 つ）
SPPT	Stochastically Perturbed Parametrization (Physics) Tendency または Stochastic Perturbation of Parametrization (Physics) Tendency	確率的物理過程時間変化率摂動法
SSI	Showalter Stability Index	ショワルター安定指数
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager	マイクロ波放射計（15 号以前の DMSP 衛星に搭載）
SSM/T-2	Special Sensor Microwave Water Vapor Profiler	マイクロ波水蒸気サウンダ（15 号以前の DMSP 衛星に搭載）
SSMIS	Special Sensor Microwave Imager Sounder	マイクロ波イメージャの機能を持つチャンネルとサウンダの機能を持つチャンネルを搭載した放射計
SST	Sea Surface Temperature	海面水温
SSU	Stratospheric Sounding Unit	成層圏探査計（14 号以前の NOAA 衛星に搭載）
Suomi-NPP	Suomi National Polar-orbiting Partnership	米国海洋大気庁が運用する極軌道衛星

略語	原語	訳または意味
SV	Singular Vector	特異ベクトル
SWFP	Severe Weather Forecasting Programme	荒天予測計画
SYNOP	surface SYNOPtic observations	地上実況気象通報式
TanDEM-X	TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement	TerraSAR-X の同型衛星
TCVitals	Tropical Cyclone Vitals Database	NCEP による熱帯低気圧データベース
TE	Total Energy	全エネルギー
TEMP	TEMP	高層実況気象通報式
Terra	Terra	米国の午前軌道地球観測衛星
TerraSAR-X	TerraSAR-X	ドイツの商業合成開口レーダー衛星
TIRA	Task Team for Intercomparison of ReAnalyses	WCRP の再解析相互比較タスクチーム
TIROS	Television and InfraRed Observation Satellite	可視赤外観測衛星
TL	Tangent Linear Model	接線形モデル
TMI	TRMM Microwave Imager	TRMM マイクロ波観測装置（TRMM 衛星に搭載）
TOFD	Turbulence Orographic Form Drag	乱流地形抵抗
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder	TIROS 実用型鉛直サウンダ（14 号以前の NOAA 衛星に搭載）
TPW	Total Precipitable Water	可降水量
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission	熱帯降雨観測計画
TRMM-LBA	TRMM Large Scale Biosphere - Atmosphere Experiment in Amazonia	TRMM アマゾン大規模生物圏-大気実験
TT-WDQMS	Task Team on WIGOS Data Quality Monitoring System	WIGOS データ品質監視システムに関するタスクチーム
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research	米国の大気研究大学連合
UGROW	Understanding systematic error GROWth from hours to seasons ahead	数時間から季節に至るまでの系統的誤差成長の理解 (ECMWF 内部のプロジェクト)
UKMO	United Kingdom Met Office	英国気象局
USGS	United States Geological Survey	米国地質調査所
UTC	Coordinated Universal Time または Temps Universel Coordonn'e（フランス語）	協定世界時
VarBC	Variational Bias Correction	変分法バイアス補正
VTPR	Vertical Temperature Profile Radiometer	赤外気温サウンダ（5 号以前の NOAA 衛星に搭載）
VIIRS	Visible Infrared Imager Radiometer Suite	可視赤外放射計
WCRP	World Climate Research Programme	WMO の世界気候研究計画
WDAC	WCRP Data Advisory Council	WCRP データ諮問会議
WDCGG	World Data Centre for Greenhouse Gases	温室効果ガス世界資料センター
WENS	Wave ENsemble prediction System	波浪アンサンブル予報システム
WGNE	Working Group on Numerical Experimentation	世界気象機関大気科学委員会 (WMO/CAS) の数値実験作業部会
WIGOS	WMO Integrated Global Observing System	WMO 統合全球観測システム
WindSat	Wind Satellite	海上風測定用の多偏波マイクロ波イメージャ
WMO	World Meteorological Organization	世界気象機関
WWRP	World Weather Research Programme	世界天気研究計画
理研 AIP	RIKEN Center for Advanced Intelligence Project	理化学研究所革新知能統合研究センター