

数値予報開発センター一年報

(令和4年)

令和5年3月
March 2023

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4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」「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、部内外の専門家との連携に活用している数値予報資料共有 Web の改良に関する話題や、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、よろしく願いたい。

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

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	11
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	全球アンサンブル予報システムの改良	17
3.3	メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長	21
3.4	局地解析へのハイブリッド同化手法の導入、局地モデルの物理過程改良	25
3.5	日本域高潮モデルの予報時間延長	29
3.6	日本域台風時高潮確率予報システムの導入	31
3.7	アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入	34
3.8	全球解析における観測データ利用手法の改良	37
3.9	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	42
3.10	メソ解析における GPM/DPR の利用方法の変更	48
3.11	メソモデルガイダンスの改良と予報時間延長	51
3.12	局地モデルによる気温、降雪、風、視程ガイダンス	56
第4章	数値予報システムの開発進捗	62
4.1	全球モデルの物理過程改良	62
4.2	全球アンサンブル予報システムの改良	71
4.3	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	76
4.4	局地モデルの改良	81
4.5	観測データの新規導入と利用方法の改良	85
4.6	FSOI (Forecast Sensitivity Observation Impact)	93
4.7	水蒸気観測データの数値予報での利用に関する開発	99
4.8	線状降水帯の発生確度	103

4.9	統合型ガイダンス	106
4.10	季節アンサンブル予報システムの開発	112
4.11	気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗と品質評価	120
4.12	波浪モデル	128
4.13	高潮モデル	130
4.14	日本沿岸海況監視予測システムの開発	131
4.15	物質循環システムの開発	133
4.16	線状降水帯予測の2022年事例における検証	139
4.17	台風進路予測の現状と誤差分析	142
第5章	成果発表	145
5.1	学術論文	145
5.2	国際会合	147
5.3	国内会合	149
5.4	数値予報課コロキウム	150
第6章	連携・共同研究	153
6.1	気象研究所との開発連携	153
6.2	気象衛星センターとの共同研究	154
6.3	共同研究一覧	155
6.4	数値予報資料共有 Web の改良	157
6.5	「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」	159
第7章	受賞・研究交流	163
7.1	当センター主催会議等	163
7.2	研究者来訪	163
7.3	受賞	163
7.4	学位取得	163
第8章	委員・専門家等	164
8.1	国際機関の委員・専門家等	164
8.2	国内機関の委員・専門家等	165
付録 A	略語表	166

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/knownow/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、統合型ガイダンスについて、開発計画の線表を図 2.8.2、図 2.8.3 に示し、第 2.8 節で述べる。季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデル、海況監視予測システム、高潮モデル、黄砂解析 予測システム、紫外線予測システム、大気汚染気象予測システム、二酸化炭素解析システムについて、開発計画の線表を図 2.14.1、図 2.14.2 に示し、第 2.9 節から第 2.14.4 項で述べる。

2.1 全球数値予報システム

全球数値予報システムは、天気予報や週間予報、台風予報などでの利用に加え、メソ数値予報システムへの境界値提供をはじめ多くの役割を担う基盤システムである。システムの全体像については JMA (2022) を参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、特に台風防災に資するため、台風進路に関する予測誤差を 3 日先の予測で 100 km 程度にするといった飛躍的な改善が必要であるとしている。

全球数値予報システムは、初期値を作成する全球データ同化システム（全球解析）及び予測計算を行う全球モデル GSM により構成されている。GSM は 2023 年 1 月現在、水平解像度約 20 km、鉛直層数 128 層の構成で運用されている。全球データ同化システムは、4 次元変分法を基本とし、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF, Hunt et al. 2007) で作成される背景誤差の情報を考慮するハイブリッド 4 次元変分法を用いている。全球数値予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。

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

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

回への高頻度化や、米国の極軌道衛星 Suomi-NPP や NOAA20 搭載の可視赤外イメージャ VIIRS から算出された極域の AMV の利用や、ハイパースペクトル赤外サウンダ (Metop 搭載の IASI 及び NOAA20 搭載の CrIS) の水蒸気に感度のある観測チャンネルの利用を計画している。

中長期的にはスーパーコンピュータシステムのスペックに応じて GSM の水平解像度を 10km 以下まで強化し、詳細な予測値をメソモデルへ引き継ぐと共に、台風の進路予測精度を飛躍的に向上させることを目指している。

2.2 全球アンサンブル予報システム

全球アンサンブル予報システム (GEPS) は GSM による予測に対して信頼度や不確実性等の情報を与えることに加え、より長い 2 週間から 1 か月先までの確率的予測での利用も目的として運用されている。システムの詳細については経田 (2016) や新保 (2017) などを参照頂きたい。また、最新の開発の成果や進捗の詳細については第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風防災に資するための台風の進路予測に関する不確実性の情報や、社会経済活動への貢献に資するため 2 週間及び 1 か月先までの顕著現象予測の精度向上が必要であるとしている。

GEPS に利用される数値予報モデルは基本的に低解像度版の GSM である。2023 年 1 月現在、18 日予測までは水平解像度約 27 km、それより先の 34 日目までは約 40 km と予報時間の途中で解像度を切り替える仕様となっている。鉛直層数は GSM と同様 128 層である。アンサンブルメンバー数は、18 日目までは 51、19 ~ 34 日目までは 25 である。アンサンブル予報のための初期摂動については LETKF と特異ベクトル法 (SV 法) により与えている。また数値予報モデルの不確実性を考慮するため、確率的物理過程強制法 (米原 2010) を採用している。

2022 年 3 月に、水平解像度を約 40 km から約 27 km (18 日先まで)、約 55 km から約 40 km (34 日先まで) に強化した。また、モデルの地形性抵抗や雲放射等の物理過程の改良を GSM に先行して行った。これについては、数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.1 節 (気象庁 2022b) を参照されたい。さらに、海面水温 (SST) について、2 段階 SST 法 (高倉・小森 2020) による、季節アンサンブル予報システムで予測された SST の利用方法の改良を行った。これは、2022 年 2 月の季節予報アンサンブル予報システムの更新 (数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.11 節 (気象庁 2022a) 参照) による予測 SST の精度向上に合わせ

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

今後も GSM の改良と共に確率的予測の改善を目指した開発に取り組む。中長期的には GSM 同様にスーパーコンピュータシステムのスペックに応じた解像度のさらなる強化を検討しており、18 日目までの予測については 20 km 以下、それ以降の予測についても 30 km 以下の解像度で運用することを目指している。さらに、大気海洋の相互作用の取り扱いの精緻化に向けた調査開発も進めていく。

2.3 メソ数値予報システム

メソ数値予報システムは、主に天気予報や防災気象情報、航空気象情報の作成支援に利用されている。システムの全体像については JMA (2022) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風防災及び豪雨防災に資するため、台風に伴う 3 日先までの降水量予測や、線状降水帯の発生・停滞等による集中豪雨の予測のため予測時間の延長や顕著現象の降水量等の定量的予測の精度向上が必要であるとしている。

メソ数値予報システムは初期値を作成するメソデータ同化システム（メソ解析）とメソモデル MSM により構成されている。MSM は 2023 年 1 月現在、水平解像度 5 km、鉛直層数 96 層の非静力学モデル asuca(気象庁予報部 2014) により 1 日 8 回運用されている。予報時間は 00UTC、12UTC 初期値については 78 時間、その他の時刻からの予測は 39 時間である。メソ数値予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。

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

さらに、現行のデータ同化システムは 4 次元変分法を採用しているものの、その時々気象条件に応じた背景誤差相関の情報が活用できていないことから、ハ

イブリッドデータ同化手法導入も課題となっている。

観測データについては、全球数値予報システムでは導入済だがメソ数値予報システムで導入されていない観測データの導入を目指した開発を進めている。重要なものとして極軌道衛星に搭載されたハイパースペクトル赤外サウンダデータの利用開発がある。また、大きな課題としてマイクロ波輝度温度データの全天同化の導入があり開発を進めている。

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

2.4 メソアンサンブル予報システム

メソアンサンブル予報システム (MEPS) は、MSM の予測に対して信頼度や不確実性の情報を付加する目的で運用されている (河野ほか 2019)。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、豪雨防災に資するため特別警報級の大雨となる確率情報の精度向上のための予測精度向上が必要であるとしている。

MEPS に用いる数値予報モデルは基本的に MSM と同一であり、2023 年 1 月現在の水平解像度は 5 km、鉛直層数は 96 層である。アンサンブル予報のための初期値や側面境界値の摂動は SV 法を用いて与えている。メソアンサンブル予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第 3 章、第 4 章を参照頂きたい。今後 MSM の更新に合わせた改良に加えて、確率的予測の改善を目指した機能拡充を行う。

2022 年度末に確率的な予測の精度向上を目指し、初期値・側面境界値の摂動に加え、モデル由来の摂動を考慮するため確率的物理過程強制法 (SPPT 法) を新たに導入する予定である。

中長期的には計算領域の拡張を MSM に準じて行う計画である。

2.5 局地数値予報システム

局地数値予報システムは、防災気象情報や航空気象情報、降水短時間予報等の作成支援での利用のため、空間・時間スケールの小さい現象を予測することを目指して運用されている。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では局地的な大雨の半日前の予測に資するため、積乱雲等の予測を行えるよう、更なる高度化・高解像度化が必要であるとしている。

局地数値予報システムは、初期値を作成する局地データ同化システム（局地解析）と局地モデル LFM により構成されている。LFM は 2023 年 1 月現在、水平格子間隔 2 km、鉛直 76 層の非静力学モデル asuca により予測時間 10 時間で 1 日 24 回（毎正時）運用されている。データ同化手法には初期時刻の前 3 時間を 1 時間

毎に予測と3次元変分法(3DVar)による同化を繰り返す手法を用いている。2022年3月から、この3DVarによるデータ同化では、予測誤差として気候学的に事前に見積もった値とアンサンブル手法から算出した気象場に応じた値を考慮するハイブリット同化を行っている。局地数値予報システムについての開発の成果や進捗の詳細は第3章、第4章を参照頂きたい。

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

更にLFMについては半日先までの大雨予測に資するための予報時間の延長と、積乱雲予測の改善のための高解像度化を計画している。これらの計画について、近年、線状降水帯などに伴う集中豪雨による災害が多発しており、豪雨防災に早期に資するため開発計画を前倒しして開発を進めている。2023年度末には予報時間の延長(10時間から18時間)、2025年度末には高解像度化を行い1km程度の水平解像度による予測を達成できるように開発を進めている。なお、本開発計画に資する活動として、スーパーコンピュータ「富岳」を活用した開発として令和4年6月1日から10月31日まで、1km解像度18時間予測を西日本の狭領域を対象にリアルタイムの実験を1日2回実施した。

2.6 局地アンサンブル予報システム

「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」では豪雨防災のための予測に資するため、確率的予測を行うための局地アンサンブル予報システム(LEPS)の開発が課題となっている。LEPSの開発の方向性として、高解像度モデルによる予測の不確実性を表現するため、高解像度化された局地モデルと同じ解像度のモデルを利用し、より整合的な予測の不確実性情報を作成することとしている。また、計算機資源の増加にあわせてメンバー数の増強を行い、顕著現象の確率予測を高度化する計画である。

近年、線状降水帯などに伴う集中豪雨による災害が多発しており、その豪雨防災のための予測に早期に資するため、開発計画を前倒しして、昨年度から「富岳」を用いた局地アンサンブル予報システムの開発に取り組んでいる。2025年度末を目標に水平解像度2km、予報時間18時間のシステムを構築する計画である。メンバー数は、利用可能な計算資源等を踏まえて最適な構成を検討中である。

2025年度末以降のシステム強化の方向性として、高解像度化とメンバー数増強が考えられるが、両者は計算機資源の観点でトレードオフの関係にあり、限られ

た資源において豪雨防災のための予測に資するために、どちらをより重視すべきかについては調査が必要である。将来のスーパーコンピュータの性能も勘案して強化の方向性を検討していく予定である。

2.7 三十分大気解析

三十分大気解析は、航空気象情報などの作成支援のため、大気の実況監視を目的として風と気温について1日48回、3次元変分法を用いた客観解析により毎三十分実行されている。

2022年12月にそれまでのMSMを第一推定値とした5kmの水平解像度での毎時大気解析(室井ほか2008)からLFMを第一推定値とする2kmの水平解像度で三十分毎に解析を行う三十分大気解析に変更した。ウィンドプロファイラから得られる風のデータ、アメダスと航空機から得られる風と気温のデータに加えて、地上レーダーから得られるドップラー速度や、人工衛星ひまわりから得られる大気追跡風など高頻度・高密度な観測データを利用してプロダクト作成を行う。

参考文献

- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112–126.
- JMA, 2022: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 246 pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-nwp/index.htm>).
- 河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2019: メソアンサンブル予報システム. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–15.
- 気象庁, 2022a: 季節アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 122–132.
- 気象庁, 2022b: 全球モデルの水平解像度向上、物理過程改良に向けた開発. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 66–75.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第60号, 気象庁予報部, 151.
- 経田正幸, 2016: 全球アンサンブル予報システムの運用に向けた取り組み. 数値予報課報告・別冊第62号, 気象庁予報部, 52–57.
- 室井ちあし, 藤田匡, 石川宜広, 2008: 気象庁毎時大気解析. *天気*, **43**, 43–50.
- 新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概

要. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-8.

高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2 段階 SST 法の詳細と導入事例紹介. 令和 2 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, **32**, 2-8.

米原仁, 2010: 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62-65.

数値予報開発計画 (R04~R08)

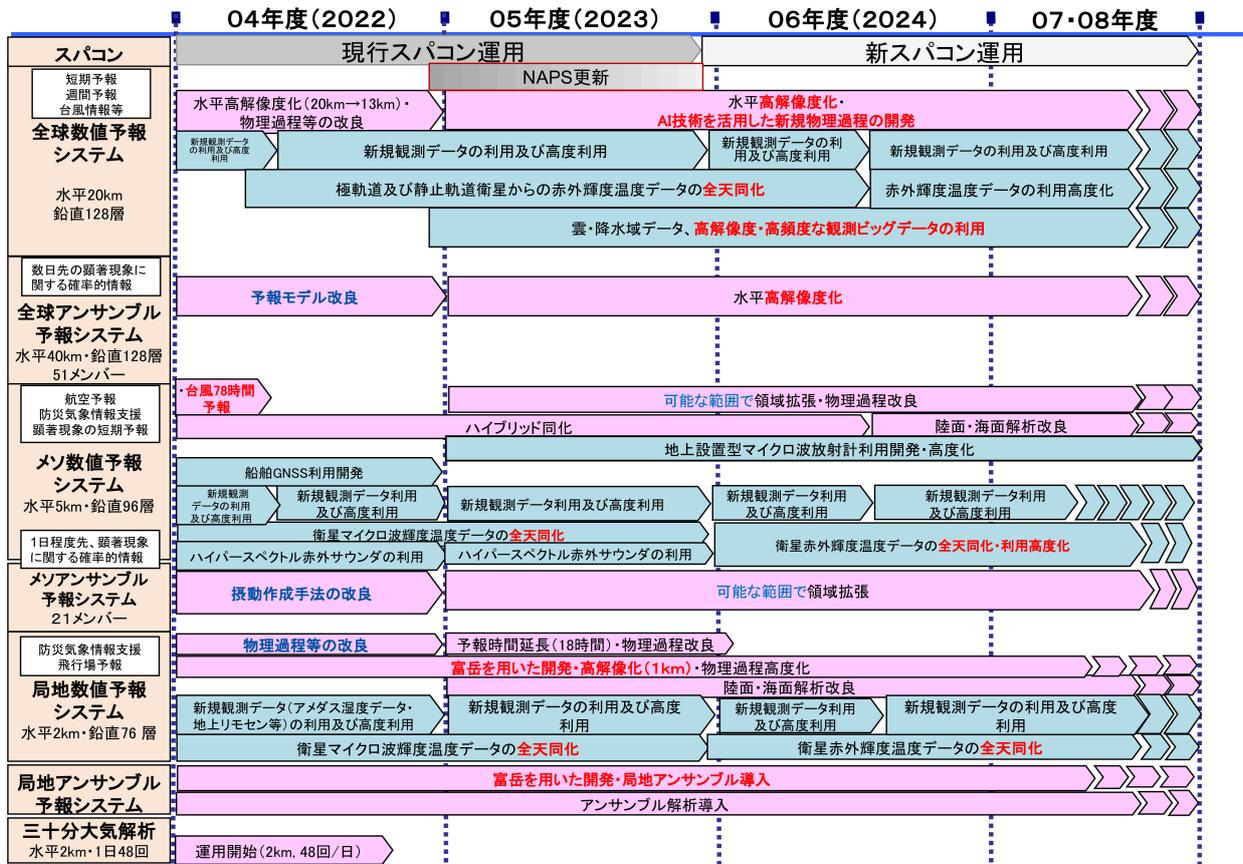


図 2.7.1 数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、三十分大気解析)

2.8 短期予報ガイダンス

2.8.1 はじめに

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

ガイダンスは、数値予報の応用プロダクトの一つであり、数値予報で出力される地上気温や風など様々な予測値を補正してその誤差を軽減したり、数値予報が直接出力しない天気などの要素を作成したりすることによって予報作業を支援するものである。現在、ガイダンスについては、様々な気象要素に対して、単一の数値予報モデルやアンサンブル予報システムを用いてプロダクトを作成する個別のガイダンスと複数のガイダンス等を統合して単一のガイダンスを作成する統合型ガイダンス(仮称)の開発を行っている。本節ではそれぞれの計画について簡単に述べる。なお、開発計画の線表については図 2.8.2 をご覧ください。

2.8.2 ガイダンス

ガイダンスは、数値予報モデルの系統誤差等を、統計的な手法により補正して軽減することにより、予測精度を向上させるものである。ガイダンスの開発においては、数値予報モデルの出力データと予測対象である実況の観測データを用いて、統計手法により予測式を作る(高田 2018a)。ここで作られた予測式は、数値予報モデルの特性に大きく依存するため、数値予報モデルの改良が行われて、その特性が変わる際にはそれに応じた対応が必要となる。具体的には、予め改良された数値予報モデルの出力データをガイダンスの予測式に与えて予測精度を評価し、精度が悪化すると見込まれる場合には再学習を行って予測式を改良後の数値予報モデルの特性に適するように変更するなどの対応を行う(高田 2018b)。そのため、今後も GSM、GEPS、MSM、MEPS、LFM の改良のタイミングに合わせて、各モデルを入力としているガイダンスの評価および必要に応じて再学習を行う。また観測データが、観測測器の追加や観測場所の変更等により変わる場合にも対応が必要となる。数値予報モデルの改良への対応と同様に、観測測器や観測場所の変更後にその観測で得られるデータを予測するガイダンスの精度を事前に評価した上で、必要に応じて再学習の実施などの対応を行う(高田 2018c)。たとえばアメダスの測器追加や地点変更が行われる場合は、その変更計画に応じて随時対応する。また、航空気象観測については完全自動化が様々な空港で進められており、これが実施されることで、視程・雲の観測特性が変わることから、その特性変更に応じるための再学習等の対応を随時行う。

気象庁の様々な情報発信に資するため、新たなガイダンスの開発も実施している。令和 4 年 6 月には MSM

および MEPS の予測情報をベースとした大雨発生確率ガイダンス(特別警報級の大雨確率メッシュ情報)の運用を開始した。これは、平成 30 年 8 月にとりまとめられた交通政策審議会気象分科会提言「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」に記載されている「概ね 3~5 年後に、半日程度先までに特別警報級の大雨となる確率のメッシュ情報の提供」に応じて開発したものである。さらに、よりきめ細かな予測が可能な LFM の予測情報をベースとした大雨発生確率ガイダンスについても必要性が認識されており、令和 5 年度末の運用を目指して開発を行う。

近年注目されている線状降水帯については、その発生予測に資するため、「線状降水帯の発生確度」を開発し、令和 4 年 6 月より部内での試験運用を実施している。本プロダクトについては継続的に改良を実施していく必要があり、引き続き、その予測性能や予測特性等を確認中である。

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

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

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

2.8.3 統合型ガイダンス

数値予報課では平成 30 年度から、全球モデル、メソモデル、局地モデル等の複数の数値予報結果を AI 技術の活用によって統合し、単一の予測結果を出力する「統合型ガイダンス」の開発を行っている(図 2.8.1)。これにより、各ガイダンスの予測を統合することで、ランダム誤差を軽減して予測精度の向上が見込まれる(高田 2018d) ほか、予報時間に対してシームレスな予測情報を提供したり、確率情報を作成・提供したりすることが可能となる。平成 31 年 1 月から、理化学研究所革新知能統合研究センター(理研 AIP)との共同研究を開始して、連携して開発に取り組んでいる。複数のガイダンスを統合する際に各ガイダンスの予測特性の得意・不得意にあわせて最適な組み合わせを選択すると精度向上を見込むことができる。

現在、統合型ガイダンスの降水(平均降水量、最大降水量、確率情報)、風(地点形式、格子形式)、気温(地点形式、格子形式)、降雪量(地点形式)について

AI技術の活用による統合型ガイダンス

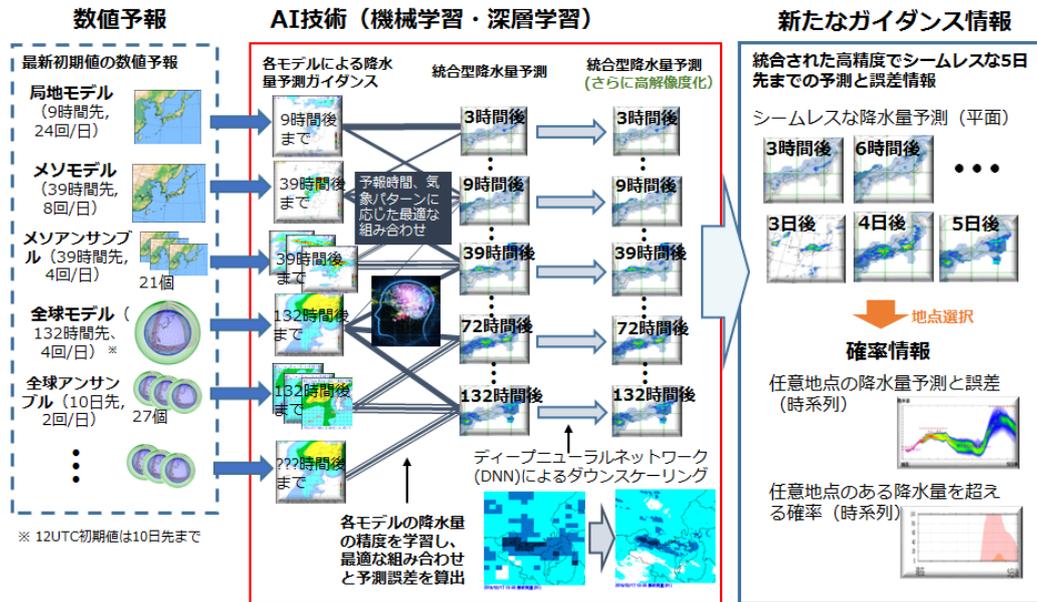


図 2.8.1 統合型ガイダンスの模式図

は部内における試験運用を開始している。また、理研AIPはAI技術の専門家として、様々な知見やツールを有していることから、本共同研究では当庁での開発に有益な様々な知見が得られている。ここで得られた知見を踏まえ、最新AI技術やツールについての利用可能性に関する調査を実施したところ、各モデルのガイダンスの出力結果を統合するのではなく、各モデルの出力を直接、深層学習（DNN: Deep Neural Network）技術を用いて統合することにより、ガイダンスの精度が大きく向上する可能性があることがわかった（Kudo 2022）。このような調査結果に基づき今後の開発計画についても見直しを行い、これまで開発した成果については部内試験運用を継続、その活用方法検討を進める一方で、更なる改良のため開発は、DNN技術を用いた新たな手法を中心に進めていくこととした。ただし、このような新たな手法を用いたガイダンスの開発には一定程度時間がかかると見込まれており、現在のところ令和10年頃の導入を目指すとしている。

参考文献

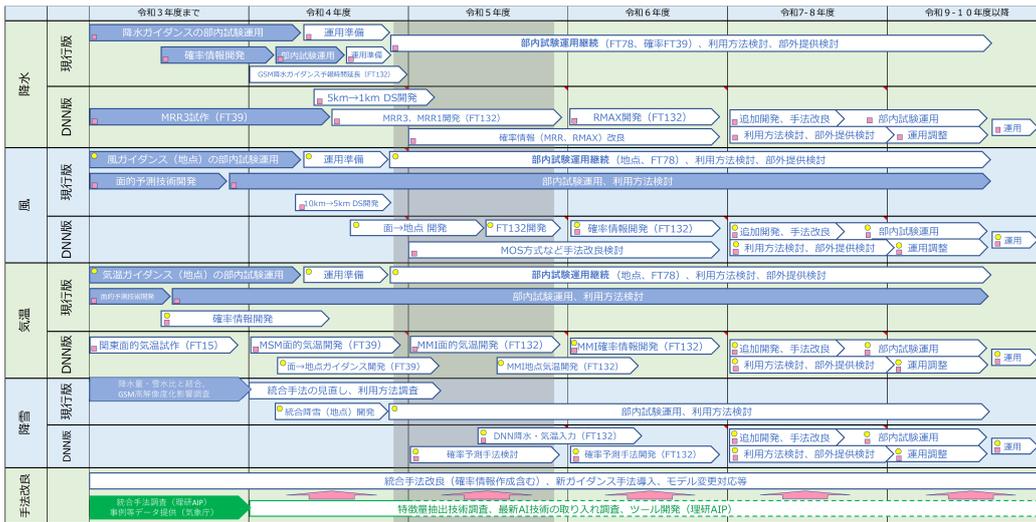
- 計盛正博, 石川宣広, 片山桂一, 2019: 数値予報システムおよびガイダンスの概要一覧表. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 116-143.
- 気象庁予報部, 2018: ガイダンスの解説. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 248pp.
- Kudo, A., 2022: Statistical Post-Processing for Gridded Temperature Prediction Using EncoderDecoder-Based Deep Convolutional

Neural Networks. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 219-232.

- 高田伸一, 2018a: ガイダンス概論. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 3-8.
- 高田伸一, 2018b: モデル更新への対応. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 88-90.
- 高田伸一, 2018c: 観測所の移設等の影響と対応. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 91-93.
- 高田伸一, 2018d: ガイダンスの今後. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 233-236.

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

図 2.8.2 ガイダンス開発計画



再入力: 気象庁発表 (塗りつぶしは実施済)、緑矢印: 共同研究発表 (塗りつぶしは実施済み)、赤矢印: 有効性を確認後に導入
 ● 地点ガイダンス、■ 格子形式ガイダンス、DSはタウンスケリング、MMはマルチモデル融合、MRRは平均降水量ガイダンス、RMAXは最大降水量ガイダンス

図 2.8.3 統合型ガイダンス開発計画

2.9 季節アンサンブル予報システム

季節アンサンブル予報システム（季節 EPS）は、3 か月予報、暖・寒候期予報、エルニーニョ予測の基礎資料として利用されている。季節 EPS の予測モデルは、季節予報のために改良・調整を加えた GSM の低解像度版に気象研究所共用海洋モデル MRI.COM (Tsuji et al. 2017) を結合した大気海洋結合モデルを用いている。ルーチンの大気初期値には全球大気解析、再予報の大気初期値には気候データ同化システム（第 2.10 節参照）、海洋初期値にはルーチン・再予報共に全球海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM) (Fujii et al. 2023) を使用している。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、社会経済活動への貢献に資するため、エルニーニョなどの日本域への影響も大きい熱帯起源の大気海洋現象の再現性などの向上が求められている。

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

中長期的には、大気海洋結合モデルの改善・高度化や地球システム要素の結合化に向けた調査開発を進め、階層的²な地球システムモデルを使用した季節 EPS の構築をめざす。

2.10 気候データ同化システム

気候データ同化システムは、長期再解析と同じシステムで計算するデータ同化サイクルを現在まで延長したもので、気候系監視、季節 EPS の初期値、モデルの評価検証などに利用されている。現仕様は、2018 年 12 月時点の現業全球データ同化システムに準拠した解析システムを用いて計算を実施した気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) と同じシステム（水平分解能 40 km、鉛直層数 100 層）である。また、2009 年時点の現業シ

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

² ターゲットとする予測の精度向上に有効で、かつ、現実的に運用可能なコストで導入できる地球システム要素を段階的に取り込む

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

JRA-3Q については、1947 年 9 月から現在までの対象全期間の計算、及び北西太平洋以外の領域における熱帯低気圧解析の品質改善のための再計算（2013 年 5 月～2021 年 12 月）が完了している。JRA-3Q では、JRA-55 と比較して、水平方向の高解像度化（55 km から 40 km へ）、鉛直層数の増強（60 層から 100 層へ）や境界条件として利用する海面水温データの品質向上を図るとともに、JRA-55 実施以降の観測データの利用拡充を含む現業全球データ同化システムの開発成果も取り入れることにより、より高品質なデータが作成されている。今後、気候データ同化システムの更なる高度化及びそれをういた次期気象庁長期再解析の実施に向けて、調査・検討を行う計画である。

2.11 波浪モデル

波浪モデル及びその初期値を作成する波浪客観解析には、地球全体を対象とする全球（水平分解能 55 km）と日本近海を対象とする沿岸（同 5 km）の 2 種類の対象領域を設けている。全球波浪モデルは外洋波浪図や外洋域を航行する船舶向けの波浪情報、沿岸波浪モデルは波浪警報・注意報や日本周辺の波浪予報の発表に利用されている。また、全球波浪モデルを使用する波浪アンサンブル予報システムは、2 日先から 5 日先までの早期注意情報（警報級の可能性）の発表に利用されている。仕様の詳細については 竹内ほか (2012) や JMA (2022) などを参照頂きたい。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風防災に資するため、沿岸域などの高波をより精緻に表現することが求められている。

全球波浪モデルについては水平解像度の高解像度化（55 km から 27 km へ）、初期時刻 00UTC の予報時間延長（132 時間から 264 時間へ）を 2022 年度内に予定している。沿岸波浪モデルについては、次期スーパーコンピュータシステム期間中に水平解像度高解像度化（5 km から 1.7 km へ）や高頻度化（4 回/日から 8 回/日へ）を計画している。中長期的には、スーパーコンピュータシステムの仕様に応じた高解像度化を検討している。

2.12 高潮モデル

高潮モデルは、高潮注意報・警報の発表で利用する日本域（水平分解能 沿岸部 1 km～沖合 16 km）と、台風委員会メンバー（国・地域）への高潮情報提供を目的とするアジア域（同 3.7 km）の 2 種類の対象領域を設けている。仕様の詳細について、日本域高潮モデルは 林原 (2011) など、アジア域高潮モデルは Hasegawa

et al. (2017)などを参照頂きたい。「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風防災に資するため、台風に伴う高潮をより高い精度で予測することが求められている。

日本域・アジア域の高潮モデルに関しては、高潮に関する早期注意情報（警報級の可能性）の発表の開始に向けて2022年8月に更新を行った。日本域高潮モデルについては、00, 12UTC 初期時刻の予報時間を39時間から78時間へ延長した。また、5日先までの台風予報の信頼度も考慮した高潮予測に関する基礎資料とするため、日本域台風時高潮確率予報システム（日本域高潮 PFS）を開発、運用を開始した。アジア域高潮モデルについては、沿岸部の解像度を3.7 kmから約1.5 kmへ向上させるとともに、全球アンサンブル予報システムの51メンバー全てと全球決定論モデルを用いた52メンバーによるアンサンブル予報化、台風ポーガス手法への陸域の影響による減衰の効果の導入により、予測精度を改善した新アジア域高潮アンサンブル予報システムを開発し、運用を開始した。中長期的には、日本域高潮モデルの台風ポーガス手法のさらなる改善、スーパーコンピュータシステムの仕様に応じた高速化と高解像度化を検討している。

2.13 海況監視予測システム

日本沿岸海況監視予測システム(MOVE/MRI.COM-JPN)は、海面水温や海流の1か月予報などの発表に利用されている。本システムは、全球（水平解像度100 km、鉛直層数60層）－北太平洋（同10 km、60層）－日本近海（同2 km、60層）の3段階の海洋モデルと変分法データ同化システム(NPR-4DVAR及びGLB-3DVAR)から構成される。仕様の詳細についてはHirose et al. (2019)やSakamoto et al. (2019)などを参照頂きたい。「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、海況要因による水位上昇など沿岸防災に資する現象や、黒潮流路・海水の変動など社会・経済的に影響の大きい現象の再現性の向上が求められている。

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

2.14 物質循環システム

2.14.1 黄砂解析予測システム

黄砂解析予測システムは黄砂情報の発表に利用されている。本システムでは、気象研究所の大気大循環モデルMRI-AGCM3(Yukimoto et al. 2019)と全球エロゾルモデルMASINGAR mk-2(Yukimoto et al. 2019)を結合させたモデル（水平分解能40 km、鉛直層数40層）を用いている。本システムでは、モデルで予測するエロゾルの3次元分布から計算したエロゾル光学的厚さ(Aerosol Optical Thickness, AOT)と気象衛星ひまわりの観測データからリトリーブされたAOTを2次元変分法(Yumimoto et al. 2018)を用いてデータ同化することで観測情報を取り込んでいる。仕様の詳細については田中・小木(2017)、小木ほか(2022)などを参照頂きたい。「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、黄砂プロダクトの高度化のため、エロゾルの予測精度向上が求められている。2022年度には、データ同化に利用しているひまわりエロゾルプロダクトについて、ひまわり8号から9号への切り替えを行う。中長期的な課題としては、衛星観測データ利用の高度化や他の予測システムでのエロゾル解析値の利用などがある。

2.14.2 紫外線予測システム

紫外線予測システムは紫外線情報の発表に利用されている。本システムでは、大気大循環モデルMRI-AGCM3(Yukimoto et al. 2019)と化学輸送モデルMRI-CCM2.1(Deushi and Shibata 2011; Yukimoto et al. 2019)（水平分解能110 km、鉛直層数64層）を用いており、即時的に利用可能な衛星データ(オゾン全量)でナッジングすることで観測情報を取り込んでいる。仕様の詳細についてはJMA(2022)などを参照頂きたい。「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、紫外線プロダクトの高度化のため、オゾンの予測精度向上が求められている。2022年度には、データ同化に利用しているオゾン衛星観測データについて、Suomi-NPP/OMPSからNOAA-20/OMPSへの切り替え対応を計画している。中長期的な開発課題としては、衛星観測データ利用の高度化などがある。

2.14.3 大気汚染気象予測システム

大気汚染気象予測システムは大気汚染気象予報の支援を目的としている。本システムのモデルは、気象研究所で開発された領域化学輸送モデルNHM-Chem(Kajino et al. 2019, 2021)を基にしており、アジア域の領域化学輸送モデル（水平分解能20 km、鉛直層数18層）と東日本や西日本を対象とする高解像度版領域化学輸送モデル（水平分解能5 km、鉛直層数19層）の2種類を運用している。アジア域の領域化学輸送モデルは大気モデルJMA-NHMと組み合わせて使用しており、即

時的に利用可能な環境省大気汚染物質広域監視システムによる地上観測オゾン濃度データでナッジングすることで観測情報を取り込んでいる。仕様の詳細について、池上ほか (2015) などを参照頂きたい。

高解像度版領域化学輸送モデルは、大気モデル asuca (気象庁予報部 2014; Ishida et al. 2022) と組み合わせて使用している。2022 年度にはアジア域モデルと同様にオゾン濃度地上観測データのナッジング手法による取り込みを行った。また、高解像度版領域化学輸送モデルをアジア域の領域化学輸送モデルと統合できるように領域を拡張する開発を行った。この領域拡張版の高解像度版領域化学輸送モデルは 2022 年度中の運用開始を予定している。「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、大気汚染プロダクトの高度化のため、大気汚染物質の予測精度向上が求められている。

2.14.4 二酸化炭素解析システム

二酸化炭素解析システムは二酸化炭素分布情報 (池上ほか 2009) の発表に利用されている。本システムでは、全球モデル GSM に二酸化炭素の輸送過程を組み込んだモデル GSAM-TM (Nakamura et al. 2015) とベイズ統合逆解析による二酸化炭素の放出・吸収量の補正を組み合わせた手法を用いている。現在の GSAM-TM は水平分解能 110 km、鉛直層数は 60 層で運用している。2022 年度には温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT による CO₂ 観測データを逆解析に導入する予定である。

参考文献

Deushi, M. and K. Shibata, 2011: Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-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., N. Kohno, M. Higaki, and M. Itoh, 2017: Upgrade of JMA's Storm Surge Prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS). *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **19**, 26–349.

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

Hirahara, S., Y. Kubo, T. Yoshida, T. Ko-

mori, J. Chiba, T. Takakura, T. Kanehama, R. Sekiguchi, K. Ochi, H. Sugimoto, Y. Adachi, I. Ishikawa, and Y. Fujii, 2023: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System Version 3 (JMA/MRI-CPS3). *J. Meteor. Soc. Japan*, doi:doi:10.2151/jmsj.2023-009, accepted.

Hirose, N., N. Usui, K. Sakamoto, H. Tsujino, G. Yamanaka, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Fujii, and N. Kohno, 2019: Development of a new operational system for monitoring and forecasting coastal and open-ocean states around Japan. *Ocean Dynamics*, **69**, 1333–1357, doi:10.1007/s10236-019-01306-x.

池上雅明, 藤田建, 平原隆寿, 竹内綾子, 須田一人, 眞木貴史, 森一正, 2009: 二酸化炭素分布情報について. *測候時報*, **76**, 4–6, URL <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/76/vol76p221.pdf>.

池上雅明, 鎌田茜, 中務信一, 2015: 大気汚染気象予測モデル. 量的予報技術資料 (平成 26 年度予報技術研修テキスト), 133–140.

Ishida, J., K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi, Y. Kitamura, and C. Muroi, 2022: ASUCA: The JMA Operational Non-hydrostatic Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 825–846, doi:10.2151/jmsj.2022-043.

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

Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, A. Takami, A. Shimizu, S. Hatakeyama, Y. Sadanaga, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, and M. Mikami, 2019: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's Regional Meteorology – Chemistry Model: Model Evaluations toward the Consistent Predictions of the Chemical, Physical, and Optical Properties of Aerosols. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 337–374, doi:10.2151/jmsj.2019-020.

Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching,

- A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, P. Khatri, A. Shimizu, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, and M. Mikami, 2021: Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. *Geosci. Model Dev.*, **14**, 2235–2264, doi: 10.5194/gmd-14-2235-2021, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/14/2235/2021/>.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 151pp.
- Nakamura, T., T. Maki, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, and Y. Niwa, 2015: Improvement of Atmospheric CO₂ Inversion Analysis at JMA. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, URL <https://agu.confex.com/agu/fm15/meetingapp.cgi/Paper/64173>, A31B-0033.
- 小木昭典, 松本隆則, 北島俊行, 田中泰宙, 弓本桂也, 関山剛, 眞木貴史, 2022: 気象庁全球黄砂解析予測モデルにおけるエーロゾルデータ同化手法の導入について. *測候時報*, **89**, 1–15.
- Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, N. Hirose, N. Usui, and G. Yamanaka, 2019: Development of a 2-km resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application. *Ocean Dynamics*, **69**, 1181–1202, doi:10.1007/s10236-019-01291-1.
- 竹内仁, 高野洋雄, 山根彩子, 松枝聡子, 板倉太子, 宇都宮忠吉, 金子秀毅, 長屋保幸, 2012: 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望. *測候時報*, **79**, S25–58.
- 田中泰宙, 小木昭典, 2017: 気象庁全球黄砂予測モデルの更新について. *測候時報*, **84**, 109–128.
- Tsujino, H., H. Nakano, K. Sakamoto, S. Urakawa, M. Hirabara, H. Ishizaki, and G. Yamanaka, 2017: Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4). *Tech. Rep. MRI*, **80**, doi: 10.11483/mritechrepo.80.
- Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 931–965, doi:10.2151/jmsj.2019-051.
- Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, M. Yoshida, M. Kikuchi, T. M. Nagao, H. Murakami, and T. Maki, 2018: Assimilation and Forecasting Experiment for Heavy Siberian Wildfire Smoke in May 2016 with Himawari-8 Aerosol Optical Thickness. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 133–149, doi: 10.2151/jmsj.2018-035.

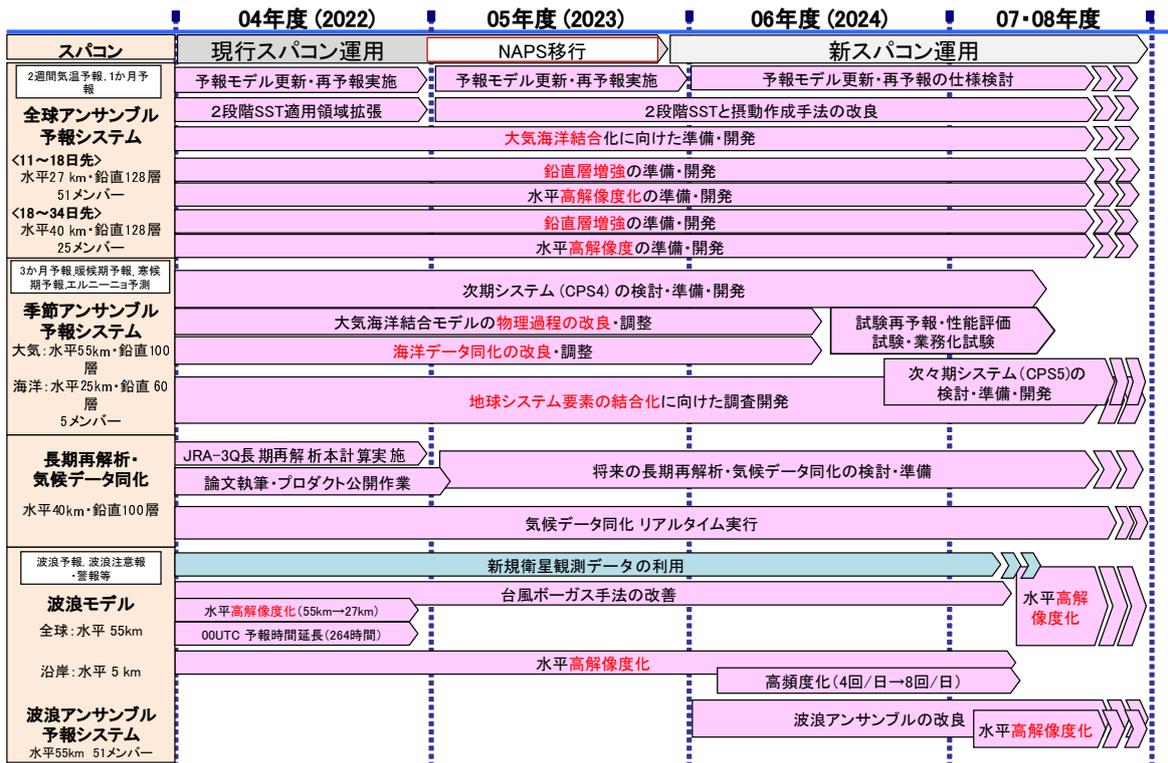


図 2.14.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデルの開発計画

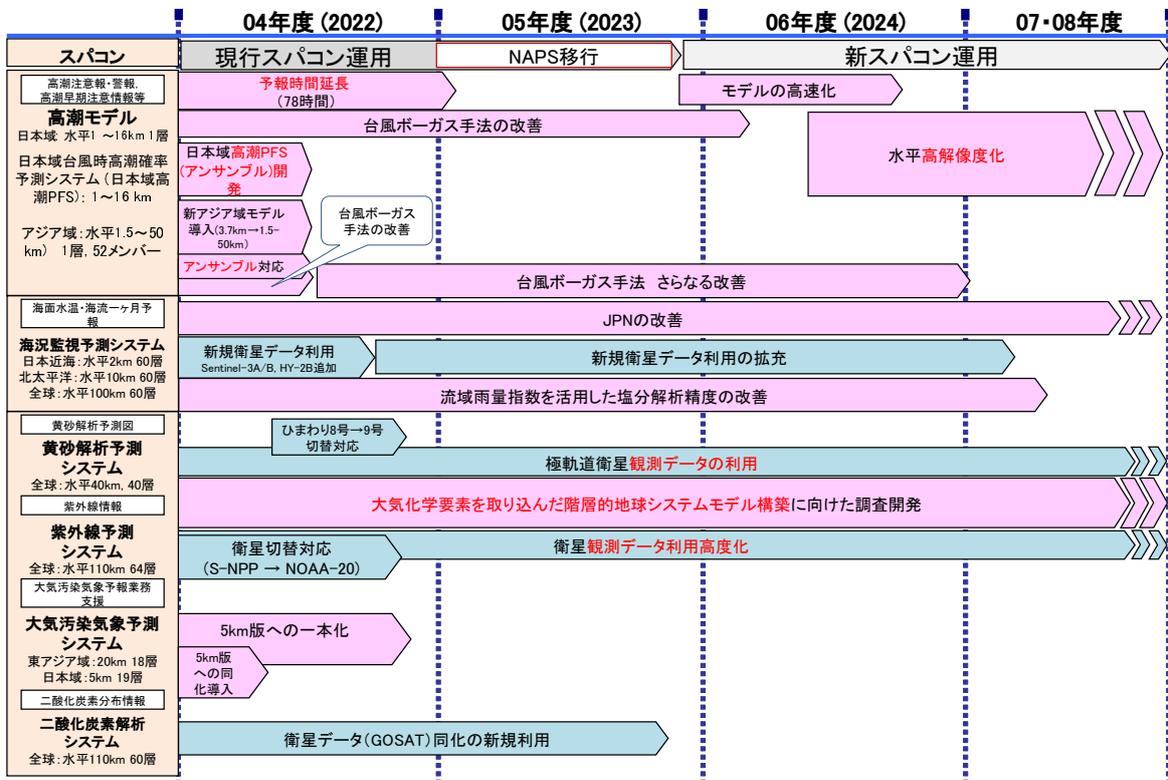


図 2.14.2 高潮モデル、海況監視予測システム、物質循環システムの開発計画

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 2022 年 1 月から 2022 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	運用開始日
年報（令和3年） 4.15	海況監視予測システムの改良	1月18日
年報（令和3年） 4.11	季節予報アンサンブル予報システムの改良	1月12日（システム更新） 2月14日（配信開始）
3.2	全球アンサンブル予報システムの改良	3月15日
3.3	メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長	3月22日（鉛直層増強） 6月9日（予報時間延長）
3.4	局地解析のハイブリッド同化の導入、局地モデルの物理過程改良	3月22日
3.5	日本域高潮モデル予報時間延長	8月4日（システム更新） 9月8日（運用開始）
3.6	日本域台風時高潮確率予報システムの導入	8月4日（システム更新） 9月8日（運用開始）
3.7	アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入	8月4日
3.8	全球解析における観測データの利用手法改良	6月29日
3.9	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 データ利用	6月30日（メソ解析） 8月9日（局地解析）
3.10	メソモデルガイダンスの改良と予報時間延長	6月9日（システム更新） 6月16日（配信開始）
3.11	局地モデルによる気温、降雪量、風、視程ガイダンス	2月24日（気温、降雪量） 10月17日（風、視程ガイダンス）

3.2 全球アンサンブル予報システムの改良

3.2.1 変更の概要

2022年3月15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)。

以下に今回の変更の各項目の概要を記す。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3年)第4.3節(気象庁 2022c)に記載があるので参照いただきたい。

モデルの更新と水平高解像度化

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3年)第4.1節(気象庁 2022d)に記述された物理過程の改良を採用するとともに、解像度を、18日先までの予測については約40 kmから約27 kmに、34日先までの予測については約55 kmから約40 kmにそれぞれ向上させた。

SVによる初期摂動の振幅調整

GEPSの初期摂動としては、特異ベクトル(SV: Singular Vector)法(Buizza and Palmer 1995)とLETKF(Local Ensemble Transform Kalman Filter; Hunt et al. 2007)を利用した初期摂動を組み合わせて¹用いている。両手法はお互いに補い合う関係にあり、SV法では予測時間が長くなるにつれて誤差の中で支配的になる成長率の高い摂動を捉え、LETKFでは予測時間の初期で特に重要な解析値のもつ不確実性を捉える。

SVによる摂動の振幅をどのような値にするかには理論的な制約はない。一般にアンサンブル予報システムでは、アンサンブル平均予報の二乗平均平方根誤差(RMSE)とスプレッドが同程度の値となることが望ましいので、本システムではこれを実現するための調整パラメタとしてSVによる摂動の振幅を用いている。今回は、アンサンブル平均予報の誤差が減少傾向となったことを反映し、スプレッドも小さくなるよう、SVによ

¹ SVを混ぜ合わせた50個(25個+逆符号の25個)の摂動と、LETKFのアンサンブルから抽出した50個の摂動を重みを付けて足し合わせて使用。

る摂動の振幅をより小さな値へと調整した。具体的には北半球と南半球²のSVによる摂動の振幅について、これまで500 hPa付近の気温の平均的な振幅が0.23 Kとなるように設定していたものを、0.21 Kへと変更した。

2段階SST法における参照システムの変更と適用期間の拡大

GEPSでは、限られた計算機資源で海洋の変動を考慮するため、(予測初期は偏差固定SSTのまま)で予測途中からは季節アンサンブル予報システム(CPS)で事前に予測された海面水温(SST)を用いる2段階SST法(高倉・小森 2020)を導入している。今回の変更では参照するSSTを、CPS2の予測結果から、令和4年2月の発表情報から運用が始まったCPS3(気象庁 2022a)の予測結果に変更した。さらに、この変更により予測SSTの精度が向上することから、偏差固定SSTからSST予測値への緩和期間を11-18日から6-11日へと変更した。

3.2.2 業務化試験

変更の効果については、令和3年の数値予報開発センター年報(気象庁 2022c)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)メンバー数は13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)メンバー数は51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GEPS2103(気象庁 2022b)による予測実験、TESTは変更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
 - 2019年11月22日から2020年3月11日(冬)
 - 2020年6月22日から10月21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: 2021年6月に現業化されたシステムによる全球速報解析³。これはCNTLとTESTで同じである。

² 全球アンサンブル予報システムでの北(南)半球とは緯度20度より高緯度の領域を指す。

³ 総合性能評価試験では解析に用いるモデルにも高解像度化と物理過程改良を加えていたが、ここではそれは行っていない。

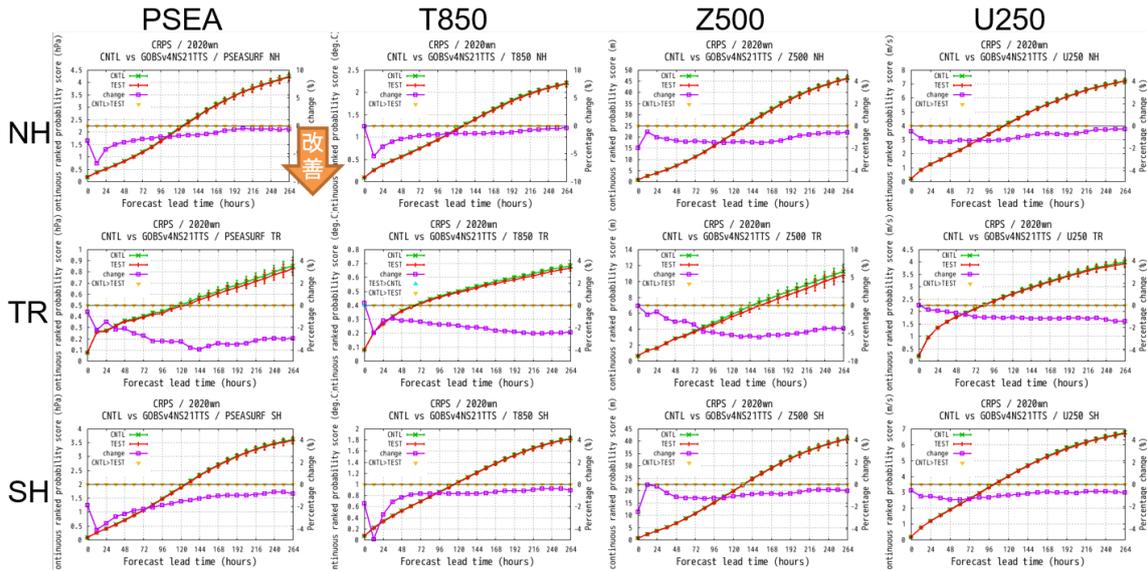


図 3.2.1 冬期間における、主要要素に対する領域別の CRPS。要素は左から順に海面更正気圧 [hPa]、850hPa 気温 [K]、500 hPa 高度場 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 ((TEST-CNTL)/CNTL[%]、右縦軸)。差に統計的な有意性がある場合に ▽(CNTL>TEST) ないし △(TEST>CNTL)(本図には無し) をプロットしている。

主要要素の確率予測

図 3.2.1 に冬期間について 11 日先までの予報時間ごとの CRPS⁴ を示す。海面更正気圧、850 hPa 気温、500 hPa 高度、250hPa 東西風について多くの検証領域で統計的に有意な改善が確認できる。夏期間についても同様のことが言える (省略)。モデルの改良と高解像度化が寄与している。

日本の降水予測

図 3.2.2 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、冬期間、夏期間とも中立から改善傾向である。これもモデルの改良と高解像度化によるものである。

高解像度化による降水予測の改善例を図 3.2.3 に示す。本実験では 5 mm/24hr よりも多い降水を高確率で予測する領域が拡がり、解析雨量に見られる降水域とよく合っている。高解像度化によって地形の表現が改善し、冬型の気圧配置による地形性降水がより適切に表現されるようになったためである。

台風進路予測

図 3.2.4 に予報時間ごとのアンサンブル平均台風進路予測誤差と、台風接近確率 (ここでは、FT=0-120 h の間に 120km 以内に台風中心が位置する確率) の予測の検証結果を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。図に示す通り、アンサンブル平均の台風進路予測の平均誤差に大きな変化はなかった。ま

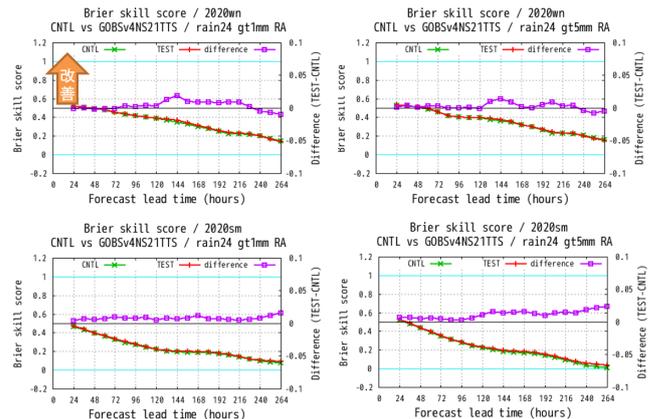


図 3.2.2 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は冬期間、下段は夏期間。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

た、台風接近確率の BSS はわずかに改善したが、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 を使い、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。なお、再予報の大気初期値を JRA-55 から JRA-3Q へ更新することによって、全般的に改善効果がもたらされることを別途確認している。

⁴ 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 $\int_{-\infty}^t dt$ で積分したもの。

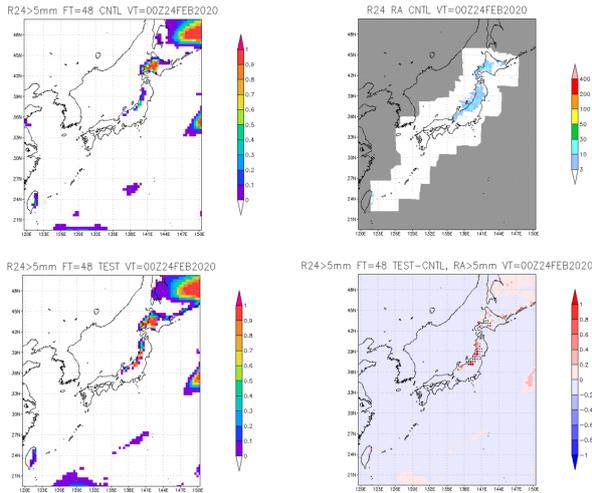


図 3.2.3 左列：2020 年 2 月 24 日 00UTC の前 24 時間降水量が 5mm より多くなる確率の分布。初期時刻は 2020 年 2 月 22 日。上段は CNTL の予測、下段は TEST の予測。右列：上段は 2020 年 2 月 24 日 00UTC の前 24 時間で積算した解析雨量。下段は確率値の TEST-CNTL の値。黒点は解析雨量が 5mm より多かった点を表す。

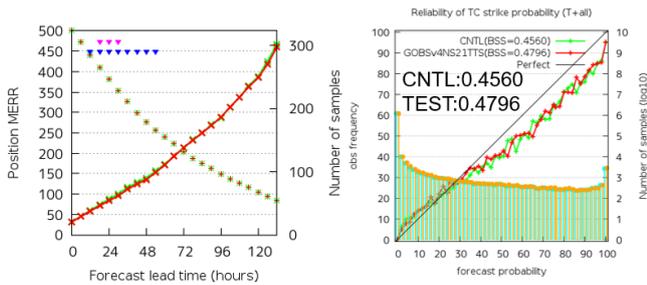


図 3.2.4 アンサンブル平均の台風進路予測平均誤差 (左) と台風接近確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (右)。CNTL は緑、TEST は赤。左図は × と実線が平均誤差 [km] (左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。右図は実線が信頼度曲線 (左縦軸)、水色とオレンジの棒グラフで CNTL と TEST の予報頻度 (右縦軸) を示す。また、CNTL と TEST のブライアスキルスコアの値を図中に示した。

アンサンブル平均予測

図 3.2.5 と図 3.2.6 にアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差 (TEST - CNTL) を示す。全球平均では予測精度が改善しており、特に予測後半ほどその改善傾向が明瞭であることが分かる。また熱帯では、SST と熱帯波動の予測表現改善を受けて (図省略)、下層気温や循環場を中心に大きく改善した。北半球では熱帯ほど顕著ではないが中立～改善傾向であり、北西太平洋域では予測前半で中立、後半で改善傾向が見られた。個別事例では、SST と熱帯波動の予測表現改善に合わせて、中緯度の下層気温や 500hPa 高度が改善している様子も確認できた (図省略)。

3.2.3 おわりに

GEPS について、予報モデルを更新すると共に、高解像度化した。また、初期摂動の振幅調整を行ったほか、SST を参照する季節予報システムの更新と予測 SST を参照する期間を拡大した。これらの変更は 2022 年 3 月 15 日に現業システムへ導入されている。この改良により、確率予測情報については日本の降水予測を含め、多くの要素で改善が見られた。また、台風進路予測の精度は中立であるが、接近確率には若干の改善が見られた。さらに 30 年間の再予報型実験では、特に熱帯域を中心に SST や熱帯波動の表現改善によって、予測後半ほど大きな改善が見られた。

参考文献

Buizza, R. and T. N. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434–1456.

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.

気象庁, 2022a: 季節アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 122–132.

気象庁, 2022b: 全球アンサンブル予報システムの改良 (第 3.3 節). 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, 25–28.

気象庁, 2022c: 全球アンサンブル予報システムの改良 (第 4.3 節). 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, 84–91.

気象庁, 2022d: 全球モデルの水平解像度向上、物理過程改良に向けた開発. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 66–75.

新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1–8.

高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2 段階 SST 法の詳細と導入事例紹介. 令和 2 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2–8.

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.

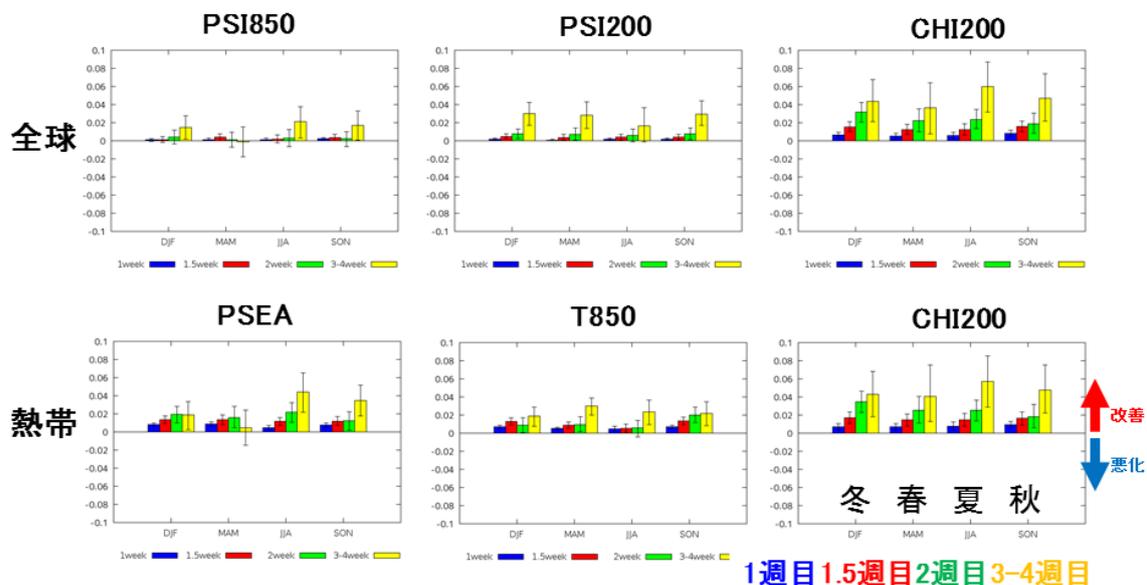


図 3.2.5 再予報 (1991~2020 年) による 13 メンバーアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差 (TEST - CNTL)。上から、全球、熱帯 (20°S - 20°N) でのバイアス補正なしの検証結果で、上段は左から 850hPa 及び 200hPa の流線関数、200hPa の速度ポテンシャル、下段は左から海面更正気圧、850hPa 気温、200hPa の速度ポテンシャル。それぞれの図は左から順に冬、春、夏、秋の並びとなっており、青は 1 週目 (予測 3~9 日)、赤は 1.5 週目 (予測 6~12 日)、緑は 2 週目 (予測 10~16 日)、黄は 3~4 週目 (予測 17~30 日) を表す。

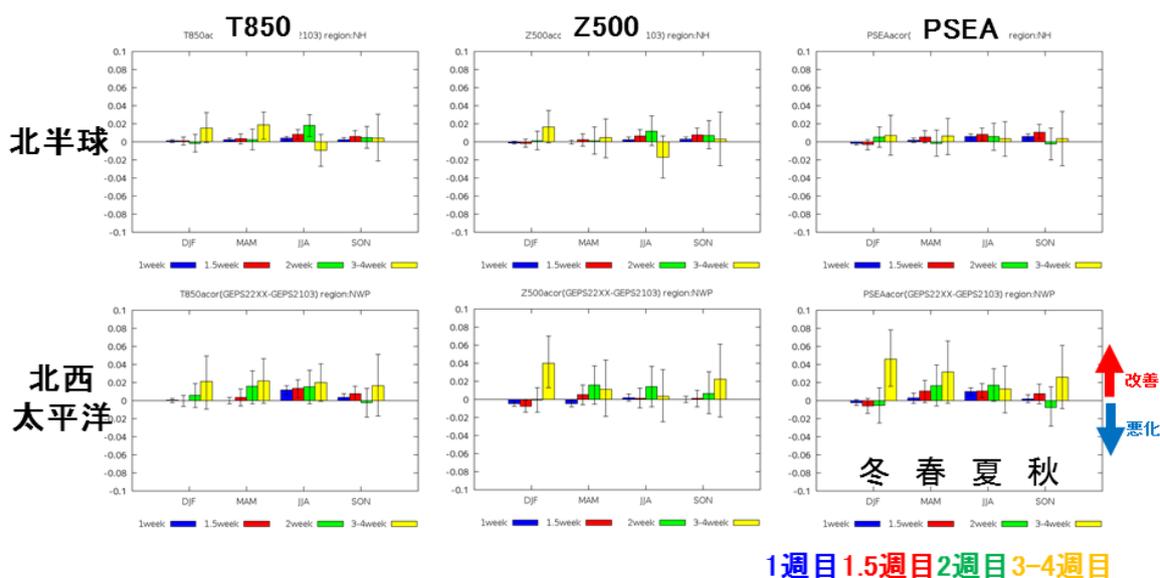


図 3.2.6 領域、要素を除き図 3.2.5 と同じ。領域は北半球 (上段、20°N 以北) と北西太平洋 (下段、100°E~180°E, 0°~60°N)、要素は上下段共に左から 850hPa 気温、500hPa 高度、海面更正気圧。

3.3 メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長

3.3.1 はじめに

メソモデル (MSM: Meso-Scale Model) は防災気象情報や航空気象情報の作成支援、降水短時間予報への入力を主な目的とした基盤モデルの一つと位置付けられている。日本域を予報領域とした水平解像度 5 km の予報モデルとなっており、2022 年 6 月より予報期間 78 時間 (00, 12UTC 初期値) または 39 時間 (03, 06, 09, 15, 18, 21UTC 初期値) で運用している。2001 年 3 月にメソ数値予報システムの現業運用が開始 (萬納寺 2000) されて以降、非静力学モデルの導入などシステム面の高度化がなされるとともに、予報時間の延長や計算領域の拡張が段階的に行われた。

2022 年の開発成果として、衛星観測の利用拡充を主な目的としてメソモデルの鉛直層数を 76 から 96 層に増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げた。あわせて、予測精度改善のために海洋混合層モデルの導入等物理過程の改良を行い、2022 年 3 月に現業化した。また、「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風が日本に接近する可能性がある場合等に 3 日先までの総雨量予測情報を提供することとしていることから、2022 年 6 月に 00, 12UTC 初期値の予報期間を 51 時間から 78 時間に延長した。本節では、2022 年に現業化したメソモデルの変更点の概要を紹介するとともに、業務化試験における検証結果について報告する。

3.3.2 変更の概要

2022 年のメソモデル更新における仕様上の変更は、前項で示した通り、モデルの鉛直層数を 76 から 96 層 (メソ解析のインナーモデルを 38 層から 48 層) としモデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げたことと、00, 12UTC 初期値の予報期間を 51 時間から 78 時間に延長したことである。地上から 76 層の層配置は更新前とほぼ同様とし、上部対流圏から下部成層圏にかけて感度のある衛星データの活用を目的に、鉛直層数の増強分はモデル上端高度の引き上げに充てた。モデル上端高度引き上げによる衛星データの新規活用については、数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.4 節 (気象庁 2022) を参照いただきたい。

以下に、仕様上の変更とあわせて実施したメソモデルの物理過程の改良項目を挙げる。改良項目には 2021 年 3 月に更新した局地モデルの改良をメソモデルに適用したものも含む。個別の詳細については、数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.4 節 (気象庁 2022) を参照されたい。

- 放射過程の短波水蒸気吸収係数を更新
- 雲物理の雲量診断で用いる臨界相対湿度の下限値を変更 (計算式の不具合修正も含む)
- 境界層モデルで用いる長さスケール診断方法を改良

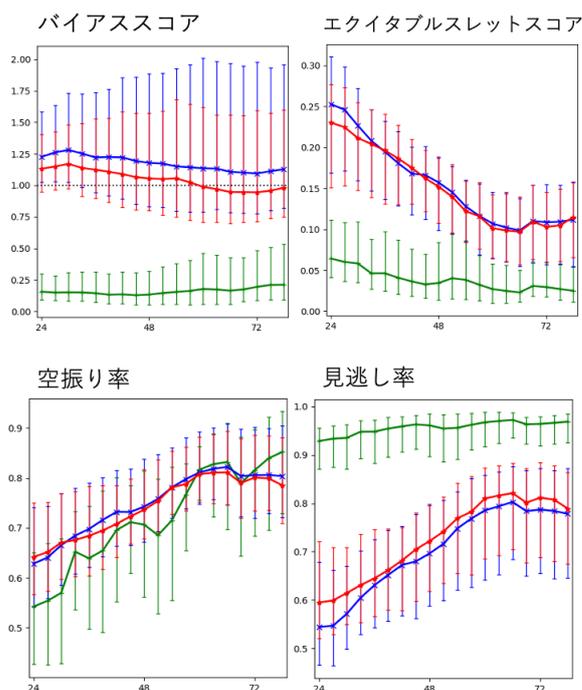


図 3.3.1 夏期間における前 24 時間積算降水量 (閾値 100 mm、検証格子 20 km) の予測時間別検証結果。バイアススコア (左上)、エクイタブルスレットスコア (右上)、空振り率 (左下)、見逃し率 (右下) で、横軸は予測時間、エラーバーは 95% 信頼区間を表す。緑線が 2021 年 3 月現業化時仕様の GSM、青線が CNTL、赤線が TEST の結果に対応する。

- 地表面フラックス診断で用いる安定時の接地層普遍関数を変更
- 陸面の蒸発散フラックス定式を改良
- 土壌水分初期値 (気候値) および地表面パラメータを更新 (地表面アルベド、熱粗度、LAI(Leaf Area Index) の導入、植生・都市被覆率の導入)
- 1 次元海洋混合層モデルとして PWP(Price-Weller-Pinkel) モデル (Price et al. 1986, 1994) を導入
- 海面の潜熱フラックスにおいて海塩による蒸発抑制効果を考慮

3.3.3 検証結果

本項では、現業化に向けて実施した業務化試験の検証結果について述べる。以下では、2020 年 3 月現業化相当の設定で 00, 12UTC 初期値を 78 時間予測に延長した実験をコントロール (CNTL) とし、前項で述べた改良を適用した設定の実験をテスト (TEST) と記す。境界値はいずれも 2021 年 3 月現業化時の GSM を用いる。実験期間は以下の通り。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.4 節 (気象庁 2022) で示した結果とは夏期間の実験期間が異なる。

- 夏期間: 2020 年 7 月 1 日~9 月 15 日
 - 冬期間: 2019 年 12 月 23 日~2020 年 2 月 29 日
- まず、降水特性の変化について大雨の予測に着目し

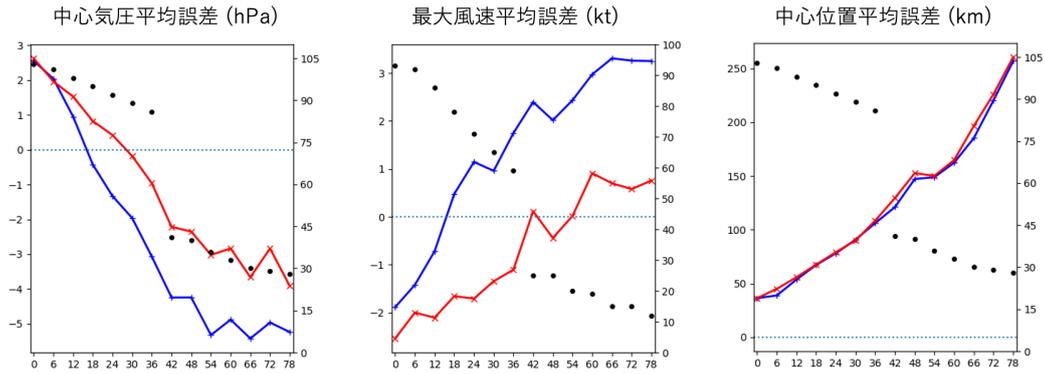


図 3.3.2 台風を中心気圧平均誤差 (左)、最大風速平均誤差 (中央)、中心位置平均誤差 (右) 予測時間別検証結果。黒点は検証事例数 (右側の縦軸) であり、42 時間以降は 00, 12UTC 初期値のみを検証対象としている。青線が CNTL、赤線が TEST の結果に対応する。

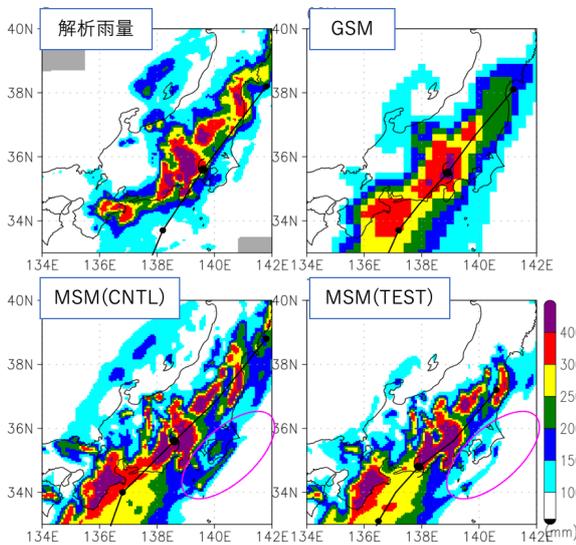


図 3.3.3 令和元年台風第 19 号を対象とした前 72 時間積算降水量 (シェード) および台風進路 (黒線)。左図は解析雨量およびベストトラックの結果を示す。対象時刻は 2019 年 10 月 12 日 15UTC (FT=75)。

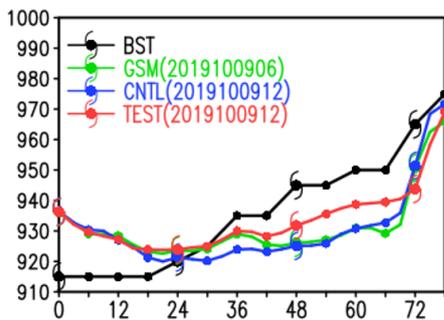


図 3.3.4 図 3.3.3 と同初期値 (2019 年 10 月 9 日 12UTC) の予測時間別台風中心気圧。黒線がベストトラック、緑線が GSM、青線が CNTL、赤線が TEST の結果にそれぞれ対応する。

て統計検証を行った。図 3.3.1 に夏期間を対象に閾値 100 mm とした前 24 時間降水量の検証結果を示す。こ

こでは全球モデル (GSM: Global Spectral Model) のみが参照可能だった 3 日先の降水に着目するため、GSM との比較に注目する。GSM ではバイアスコアが 1 より大幅に小さく大雨を十分に捕捉できていないのに対し、メソモデルでは 1 に近い値となっている。また、TEST は CNTL と比較してもバイアスコアが 1 に近づくことがわかる。空振り率は GSM よりも増えるものの見逃し率は大幅に下回っており、エクイタブルスレットスコアは MSM が GSM を上回る。エクイタブルスレットスコアについては、TEST と CNTL とでほとんど差は見られず中立である。これらの特性は 72 時間先でも変わらないことから、予報時間延長を実現したことで GSM のみが提供していた 3 日先の降水について MSM に基づく有益な情報を提供できるようになったといえる。

図 3.3.2 に本実験期間での台風の統計検証結果を示す。中心気圧を見ると、予測後半になるにしたがって負のバイアス (過発達バイアス) が拡大する傾向がある。TEST でもこの傾向は残るものの、CNTL と比べると軽減することが確認できる。また、最大風速で見ても、CNTL は台風の過発達バイアスに対応した強風バイアスがあるが、TEST ではそれが改善する。CNTL では海面水温 (SST) は初期値に固定され時間変動しない仕様となっていたが、海洋混合層モデルの導入により、強風時に海水が鉛直混合する効果が表現できるようになり SST が低下するようになったことが台風過発達バイアスの軽減に寄与した。それに加え、海塩による蒸発抑制効果を考慮したことにより海面からの潜熱フラックスが減ったことも改善に寄与したと考えられる。一方、中心位置平均誤差は TEST は CNTL に対して中立であり、進路予測の改善は見られない。

2022 年のメソモデル更新の主要な目的である 3 日先までの総雨量予測情報の提供の観点から、業務化試験とは別に実施した令和元年台風第 19 号の事例を図 3.3.3 および図 3.3.4 に示す。解析雨量では前 72 時間積算降水量で 400 mm を超える地域が確認できるが、

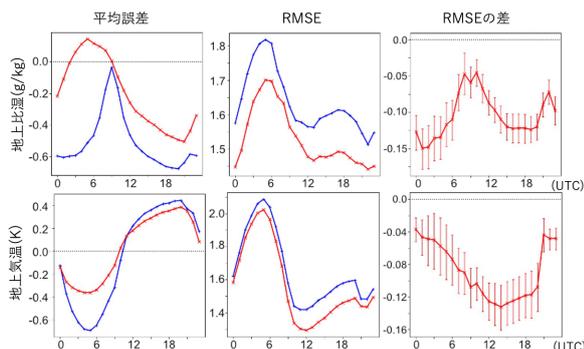


図 3.3.5 夏期間における地上比湿（上段）・気温（下段）の対象時刻別（横軸、UTC）検証結果。検証は全ての予測時間を対象とした。左から平均誤差、二乗平均平方根誤差 (RMSE)、RMSE の TEST から CNTL の差。平均誤差、RMSE の線種は図 3.3.2 と同様。

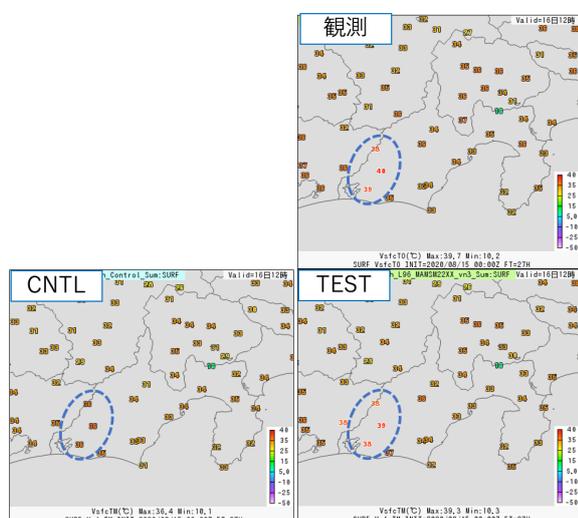


図 3.3.6 対象時刻 2020 年 8 月 16 日 12 時 (JST) における地点別地上気温。上段が観測値、左下が CNTL、右下が TEST で、FT=27 (2020 年 8 月 15 日 00UTC 初期値) の結果を示す。

GSM では全般的に雨量が過少で積算降水量 400 mm 以上の降雨域はほとんど表現できていない。CNTL では 400 mm を超える領域が見られるものの、全般的に降水域が実況よりも広く、房総半島で実況や GSM では見られない降水（図 3.3.3 中の楕円で囲まれた領域）が生じている。TEST では強雨域は CNTL と同様に見られる一方、CNTL と比べると降水域は狭く、房総半島の降水も実況に近い。CNTL・TEST とともに、紀伊半島の降水は過剰であることや、台風の進路がベストトラックと比較して西にずれているなど、予測精度上の課題も残る。台風中心気圧をベストトラックと比較すると（図 3.3.4）、FT=24 以降の台風の衰弱が GSM、MSM とともに十分に表現できていないが、統計検証結果（図 3.3.2）でも見られたように TEST は CNTL と比べると中心気圧が高くなっており、ベストトラックにより近い予測となった。

最後に、本更新による地上気象要素の改善について示す。図 3.3.5 は夏期間の地上比湿・気温の対象時刻別で見た対アメダス検証結果である。CNTL では地上比湿は全体的に乾燥バイアス、地上気温は日中に低温バイアス、夜間に高温バイアスであり、日較差が観測より小さい傾向にあることが確認できる。TEST ではこれらのバイアスが縮小しており、二乗平均平方根誤差 (RMSE) で見ても全ての対象時刻で有意に改善する。これらの地上気象要素の改善は冬期間においても確認された。数値予報開発センター年報（令和 3 年）第 4.4 節（気象庁 2022）にあるように、更新前のメソモデルでは土壌水分量が過少であったが、単に土壌水分量を増やすと日中の低温バイアスが拡大する特性があった。2022 年のメソモデル更新において、土壌水分量を見直すとともに蒸発散フラックス定式の改良を行うことで、地上比湿・気温双方のバイアスを軽減することが可能となった。

日中の地上気温の低温バイアスが改善した例として、浜松市で 41.1°C の最高気温を観測した 2020 年 8 月 16 日の事例を図 3.3.6 に示す。図に示した 12 時 (JST) 時点では浜松（図中楕円で囲んだ地点の南端に対応）で 39°C を観測しているのに対し、CNTL では 36°C と観測よりも低温となっている。他方 TEST では同地点で 38°C となり観測に近づくとともに、観測で見られる高温域（図中楕円）がよく再現されている。これまで、メソモデルで 35°C を超える地上気温を予測することが困難であったが、今般のモデル更新によりこのような高温域が表現できるようになった。このことは他の事例でも確認された。

3.3.4 まとめ

2022 年のメソモデル更新では、台風等を想定した 3 日先の総雨量予測や台風中心気圧・最大風速等の量的予測の向上を主な目的として、メソモデルの鉛直層増強によるモデル上端高度引き上げ、予報時間の延長を実施するとともに、予測精度向上のために物理過程を改良した。3 日先においても対 GSM で強雨予測が改善することが確認され、予報時間の延長は 3 日先予測の情報改善に資するものといえる。物理過程の改良を通じて台風過発達バイアスの軽減や地上気象要素の誤差の縮小が確認できた。ただし、台風の過発達傾向が依然として見られることや、台風進路予測において改善は見られなかったことは今後の課題である。下部境界だけでなく、台風の構造等をモデルが適切に表現できることが重要であり、そのためには積雲過程・雲物理など物理過程の全般的な改良が欠かせない。モデルバイアス軽減の観点から引き続き物理過程等の改良に取り組む計画である。

参考文献

- 気象庁, 2022: 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. 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, 92–99.
- 萬納寺信崇, 2000: 領域モデル (RSM, MSM, TYM). 平成 12 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23–27.
- Price, J. F., T. B. Sanford, and G. Z. Forristall, 1994: Forced Stage Response to a Moving Hurricane. *J. Phys. Ocean.*, **24**, 233–260.
- Price, J. F., R. A. Weller, and R. Pinkel, 1986: Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling. *J. Geophys. Res.*, **91**, 8411–8427.

3.4 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入、局地モデルの物理過程改良

3.4.1 はじめに

局地数値予報システム¹は、集中豪雨などの局地的な現象を主な予測対象として、水平格子間隔 2 km・10 時間予報のシステムとして運用されており、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な数値予報システムと位置付けられている。

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、局地モデルによる集中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向上を積み重ねていく必要がある。

本システムは 2012 年 8 月に運用を開始した後、局地解析と局地モデルそれぞれに継続的に改良を加えてきており、2021 年 3 月には局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良を行った(気象庁 2022b)。その後、2022 年 3 月には、局地解析の背景誤差共分散のハイブリッド化、メソ数値予報システムの更新(第 3.3 節)に伴う予報モデルの物理過程の改良を行った。本節では、2022 年 3 月の局地数値予報システム更新の概要と、改良による予測特性の変化について報告する。

3.4.2 局地数値予報システム改良の概要

本項では、局地数値予報システムの改良項目の概要を述べる。まず、局地解析について説明する。局地解析へのハイブリッド同化手法の導入に合わせて、気候学的背景誤差の修正、メソ解析との解析モジュール統一化のための変更を行ったので、合わせて 3 項目ある。続いて 4 つ目の項目として予報モデルの物理過程の改良の概要を述べる。局地解析の改良項目については数値予報開発センター年報(令和 3 年)第 4.6 節(気象庁 2022c)も参照されたい。

(1) ハイブリッド同化手法の導入

局地解析は、メソモデルの予報値(解析時刻 3 時間前)を出発点に、3 次元変分法(3DVar)による解析と 1 時間予報(水平格子間隔 5 km)を初期時刻を更新しながら 3 回繰り返した後、解析時刻で 3DVar を行う。改良前は、それぞれの 3DVar において、第一推定値の誤差を表現する背景誤差として、NMC 法(Parrish and Derber 1992)で作成された気候学的な背景誤差共分散行列 \mathbf{B}_c のみを利用していった。今回の改良では、解析時刻毎の場の流れに依存した背景誤差として、メソアンサンブル予報システム MEPS(水平格子間隔 5 km、摂動メンバー数 20)の予報値のアンサンブル平均からの

¹ 局地解析と局地モデル(予報モデル)を合わせて局地数値予報システムと表記する。

差(以下、MEPS 摂動)を用いて作成した誤差共分散行列 \mathbf{B}_e と \mathbf{B}_c を混ぜて用いるハイブリッド同化(Lorenc 2003)を局地解析に導入した。

今回導入したハイブリッド化した 3DVar (Hybrid-3DVar) は、下記の評価関数を最小化することによって解析インクリメント $\delta \mathbf{x}$ を得る。

$$J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d}) + J_{bc}$$

$$\delta \mathbf{x} \equiv \mathbf{B}^{1/2} \mathbf{v} \equiv \begin{pmatrix} \beta_c \mathbf{B}_c^{1/2} & \beta_e \mathbf{B}_e^{1/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_e \end{pmatrix} \quad (3.4.1)$$

ここで $\mathbf{d} = \mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)$ は観測値 \mathbf{y}^o の第一推定値 \mathbf{x}^b からの差(イノベーション)、 H と \mathbf{H} は観測演算子とその接線形、 \mathbf{R} は観測誤差共分散行列、 \mathbf{B}_c は気候学的な背景誤差共分散行列、 \mathbf{B}_e は MEPS 摂動から作成された誤差共分散行列、 \mathbf{v}_c と \mathbf{v}_e は制御変数、 J_{bc} はバイアス補正項である。 β_c と β_e はハイブリッドの重みであり、 $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0.5, 0.5)$ とした。

\mathbf{B}_e の作成にあたっては、誤差分散を \mathbf{B}_c と同程度の大きさにするために高度 5.5 km の温位の「(気候学的な誤差分散) / (MEPS 摂動の分散の水平平均)」を \mathbf{B}_e に乗じる誤差共分散膨張を導入した。さらにサンプリング誤差を軽減するために 5 つの異なる初期時刻の MEPS 摂動を用いてメンバー数を 100 にした上で、 \mathbf{B}_e には水平方向と鉛直方向の距離によってガウス型に減衰する関数に乗じる空間局所化を行った。空間局所化のスケール(局所化関数が $e^{-0.5}$ になる距離)は水平 100km、鉛直 0.5km とした。

(2) 気候学的背景誤差の修正

局地解析は、メソモデルの予報値を第一推定値とすることから、その気候学的背景誤差はメソモデル予報値を統計サンプルとして作成している²。この気候学的背景誤差について、 x 方向の風と y 方向の風の誤差分散の大きさがメソ解析と比較して大きく異なっていた(メソ解析の誤差分散と比べて、 x 方向の風については過大、 y 方向の風については過小)ことを把握したことから、その修正を行った³。

今回は大気中の制御変数(風、温位、地上気圧、偽相対湿度)の誤差分散を 2022 年 3 月に更新したメソ解析の気候学的背景誤差の誤差分散⁴に置き換えることとした。この変更で局地解析の性質(高解像度の解析イ

² その上で、下層の水平誤差相関を狭める等の調整を行っている(藤田・倉橋 2010)。

³ 作成手法がほぼ共通であるメソ解析の背景誤差と比較して、 x 方向と y 方向の風の誤差分散の大きさのバランスに極端な差があることから、本来の意図とは異なるものと判断した。

⁴ 2022 年 3 月に更新したメソモデルの予報値を統計サンプルとして作成したもの(気象庁 2022a)。

ンクリメントが入る)が大きく変わらないように、水平誤差相関と鉛直誤差相関は変えない。また、 $\mathbf{B}_c^{1/2}$ の定義を $\mathbf{B}_c^{1/2} = \mathbf{B}_v^{1/2} \mathbf{B}_h^{1/2}$ からメソ解析の設定に合わせて $\mathbf{B}_c^{1/2} = \mathbf{B}_h^{1/2} \mathbf{B}_v^{1/2}$ に変更する (\mathbf{B}_h と \mathbf{B}_v はそれぞれ水平、鉛直方向の気候学的な背景誤差共分散行列)。

(3) 局地解析とメソ解析の解析モジュール統一化のための変更

asuca-Var(Ikuta et al. 2021) のメソ解析への導入時に、局地解析に導入している asuca-Var モジュールは更新しなかったため、今回更新した。予測精度をほぼ変えない仕様変更である。例えば、観測演算子において観測相当量へ変換してから空間内挿していたところを、空間内挿してから観測相当量に変換するように変更する、 x, y 方向の風の制御変数の配置をスカラポイントからそれぞれ x, y 方向に半格子ずれた u, v ポイントに変更する、といった点である。いずれもメソ解析と同じ仕様にするもので、幾田 (2014) から Ikuta et al. (2021) への更新にあたる。

(4) 予報モデルの物理過程の改良

メソモデルの物理過程改良 (第 3.3 節) に合わせて、その改良の一部を局地数値予報システムの予報モデルに反映する。具体的には、以下の項目である。

- (a) 陸面の蒸発散フラックス定式を改良
- (b) 土壌水分初期値 (気候値) および地表面パラメータを更新 (地表面アルベド、熱粗度、LAI の導入、植生・都市被覆率の導入)
- (c) 放射過程の短波水蒸気吸収係数の更新

局地解析がメソモデルの予報値 (解析時刻 3 時間前) を第一推定値とすることを述べたが、局地数値予報システムとメソモデルとで用いる予報モデル設定や定数の性質等の違いが大きい場合、その差に起因して解析や予報の精度が悪化することがある。今回、メソモデルにおける (a),(b) の陸面過程の改良によって、局地解析の土壌水分量の第一推定値が大幅に増加し、従来の定式のままでは潜熱フラックスが過多となり予報精度が悪化することが分かった。そこで、局地数値予報システムにおいてもメソモデルにおける陸面過程の改良を反映することとした。また、(c) については、対流圏下層気温の予測精度向上に寄与することが確認できたことから局地モデルに反映した⁵。物理過程の個々の改良項目の詳細については数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.4 節 (気象庁 2022a) を参照いただきたい。

3.4.3 本改良による予測特性の変化

前項の改良による局地数値予報システムの予測特性の変化を述べる。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、改良を適用した現ルー

チン設定の実験をテスト (TEST) とする。実験に与える初期値・境界値は、CNTL では 2021 年 5 月時点のルーチン設定のメソモデルから作成し、TEST では第 3.3 節の改良を行った 2022 年 3 月時点のルーチン設定のメソモデルから作成した。実験期間は、夏は 2020 年 7 月 2 日-7 月 8 日、冬は 2020 年 1 月 11 日-1 月 21 日 (1 時間毎) である。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.6 節 (気象庁 2022c) で報告した実験と異なる点は、

- TEST の初期値・境界値として第 3.3 節の改良を行った 2022 年 3 月時点のルーチン設定のメソモデルを用いたこと、
 - メソモデルの改良に対応して、予報モデルの物理過程改良を行ったこと、
 - 検証期間を変えて 1 時間毎の実行としたこと、
- である。

図 3.4.1 は夏期間における地上比湿と地上気温の予報時間別の統計検証結果である。地上乾燥バイアスは縮小し、RMSE は改善した。地上気温についても RMSE が改善した。ハイブリッド同化の導入による効果に加え、予報モデルの物理過程の改良の効果が大きい。冬期間でも同様の改善が見られた (図略)。

図 3.4.2 には夏期間における閾値 10 mm/h の降水の検証結果を示す。予報前半を中心に空振りと見逃しが減少し、エクイタブルスレットスコア (ETS) が改善した。強雨を中心に閾値に依らず同様の改善が見られたが、閾値 1mm/h 程度の雨についてはバイアスコアが過小傾向となり、ETS は概ね中立の結果となった (図略)。基本的には数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.6 節 (気象庁 2022c) で報告と同様の改善傾向となっており、ハイブリッド同化の導入による効果と考えられる。冬期間では弱い雨について予報前半を中心に改善が見られた (図略)。

図 3.4.3 に示す、2020 年 7 月 3 日 12UTC 初期値の FT=7-10 の 3 時間降水量の予測では、TEST は CNTL に比べて、熊本県を中心とする線状降水帯をより実況に近い位置に表現することができた。図 3.4.4 に示すように、この初期値を作成するための解析では、ハイブリッド同化の導入によって、CNTL に比べて流れに依存した解析インクリメントが入るようになっていた。同図の黒丸で囲った領域では、第一推定値において線状降水帯付近へ暖気が流入しており (図略)、ハイブリッド同化の導入により線状降水帯付近への暖気の流入を強めていた。

3.4.4 まとめ

2022 年 3 月に更新された局地数値予報システムでは、局地解析について、MEPS 摂動を用いて作成した誤差共分散行列と気候学的な誤差共分散行列を混ぜて用いるハイブリッド同化を導入し (Hybrid-3DVar)、気候学的背景誤差の修正、メソ解析との解析モジュー

⁵ 今回導入した以外のメソモデルの物理過程改良 (第 3.3 節) の一部の項目についても、局地モデルに反映する開発に取り組んでいる (第 4.4 節)。

比湿(g/kg)の対地上観測誤差

気温(K)の対地上観測誤差

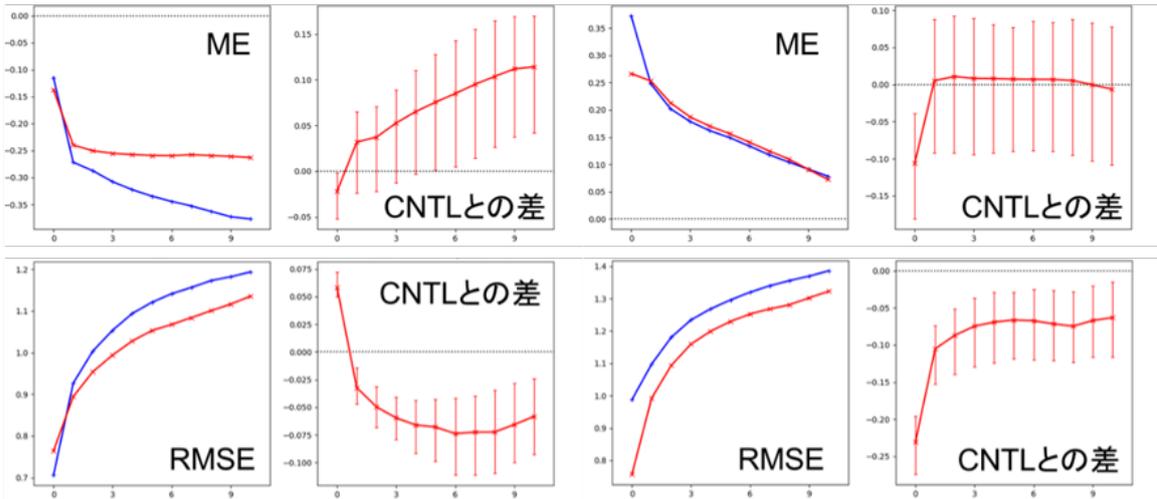
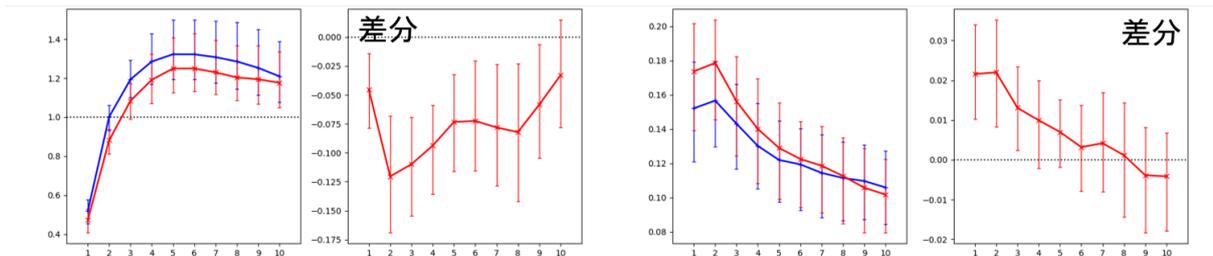


図 3.4.1 夏期間における（左）地上比湿、（右）気温の対地上観測検証結果。それぞれ上段に ME とその CNTL との差、下段に RMSE とその CNTL との差を示す。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示す。

バイアスコア

エクイタブルスレットスコア



空振り率

見逃し率

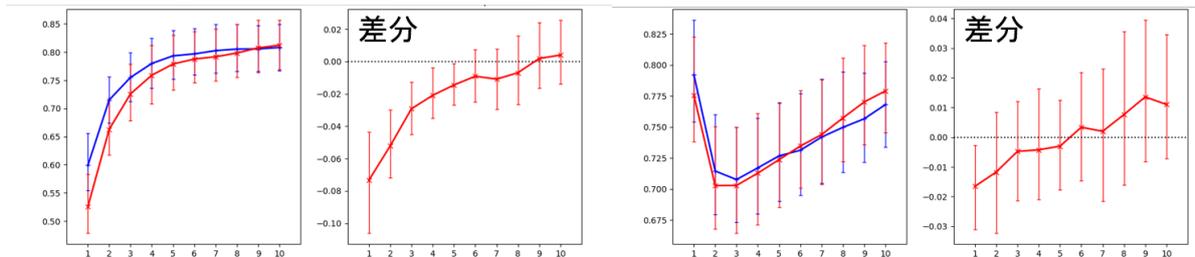


図 3.4.2 夏期間における 1 時間降水量 [mm/h]（検証格子 10 km）の閾値 10 mm/h の対解析雨量検証結果と TEST と CNTL の差。（左上）バイアスコア、（右上）エクイタブルスレットスコア、（左下）空振り率、（右下）見逃し率。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示す。

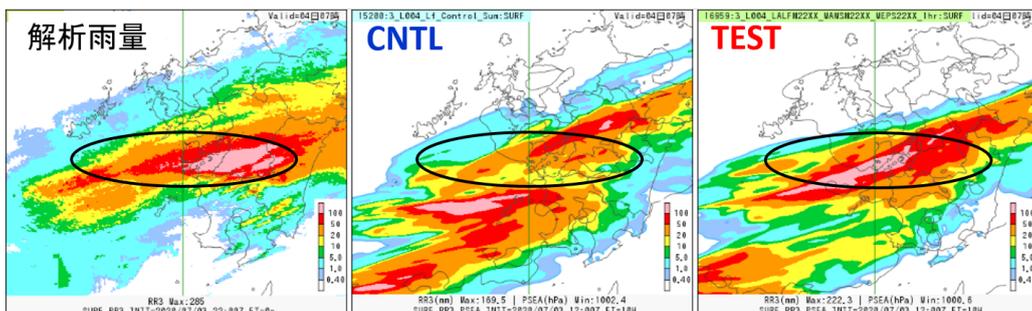


図 3.4.3 2020 年 7 月 3 日 22UTC の 3 時間降水量 [mm/3h] について、解析雨量（左）と CNTL（中）、TEST（右）の予測結果（2020 年 7 月 3 日 12UTC の FT=7-10）。

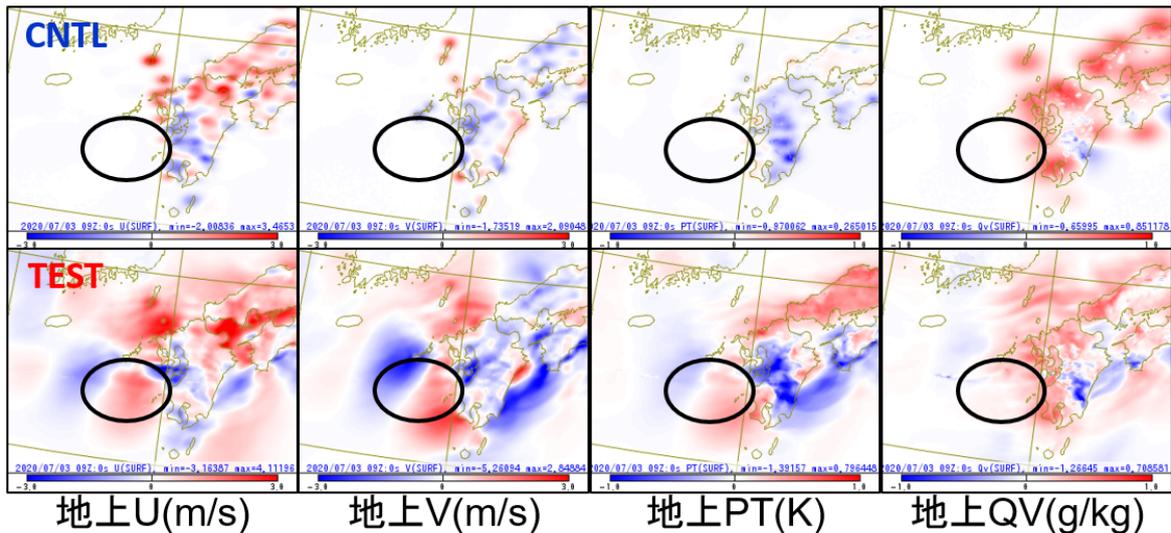


図 3.4.4 2020 年 7 月 3 日 12UTC の初期値作成までの 4 回の解析のうちの最初の解析 (09UTC) における解析インクリメント。上段に CNTL、下段に TEST を示し、それぞれ左から地上の x 方向の風 [m/s]、 y 方向の風 [m/s]、温位 [K]、比湿 [g/kg] について示す。

ル統一化のための変更も合わせて行った。また、メソ数値予報システムの更新 (第 3.3 節) に伴う予報モデルの物理過程の改良を行った。前ルーチンとの比較実験により、地上気象要素と予報前半の強雨を中心に予測精度が向上すること、強雨事例において流れに依存した解析インクリメントが得られ、それにより強雨の予測が改善していることを確認した。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.6 節 (気象庁 2022c) では、前ルーチンのメソモデルを初期値・境界値として用いた実験結果を示したが、本節では 2022 年 3 月に更新したメソモデルを用い、それに対応した物理過程の改良を合わせた実験結果を示した。実験設定の違いはあるものの、両者の比較では、ハイブリッド同化手法の導入による予測特性の変化は共通して確認された。また、物理過程改良により期待される効果も合わせて見られた。

はじめに述べたとおり、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、局地モデルによる集中豪雨の予測精度向上が求められている。そのためには今後も局地解析および局地モデルの改良を継続して進めていく必要がある。今年度実施しているこれらの開発の進捗については第 4 章の各節を参照いただきたい。

参考文献

藤田匡, 倉橋永, 2010: 局地解析. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 68–72.
 幾田泰醇, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91–97.

Ikuta, Y., T. Fujita, Y. Ota, and Y. Honda, 2021: Variational Data Assimilation System for Operational Regional Models at Japan Meteorological Agency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 1563–1592.
 気象庁, 2022a: 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. 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, 92–99.
 気象庁, 2022b: 局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良. 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, 29–33.
 気象庁, 2022c: 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入. 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, 102–105.
 Lorenc, A. C., 2003: The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—a comparison with 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3183–3203.
 Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center’s spectral statistical-interpolation system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.

3.5 日本域高潮モデルの予報時間延長

3.5.1 概要

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。日本域高潮モデルではこれまで1日8回39時間予測を行っていたが、気象庁が「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」で掲げている、台風が日本に接近する可能性がある場合等に3日先までの高潮予測情報を提供するとの目標¹に資するために、予報時間の延長が望まれていた。第3.3節で報告されているように、2022年6月に00, 12UTC初期時刻のMSMの予報時間が78時間に延長されたことから、この成果も活用し日本域高潮モデルの00, 12UTC初期時刻の予報時間を78時間に延長するための開発を進めてきた。高潮モデル78時間予測の業務化試験を行ったところ、78時間予測の精度はこれまでの39時間までの予測の精度から大きな乖離はなく、一定の精度があることを確認した。このことから2022年9月に日本域高潮モデルの予報時間延長を行った。本節では、今回の日本域高潮モデルの変更点及び業務化試験の検証結果について報告する。

3.5.2 日本域高潮モデルの改良項目

上で述べたように今回の主な改良項目は、00, 12UTC初期時刻の予報時間を78時間に延長にする点であるが、これに加えて以下の変更を適用した。

(1) 初期値作成時のMSMの大気要素の時間内挿方法を改善

日本域高潮モデルでは初期値を作成する際にデータ同化は行わず、MSMによる海上風、海面気圧を用いて前回初期値から高潮モデル計算を行い、初期値を作成している。これをハインドキャストと呼ぶ。これまで、MSMの3時間おきの解析による海上風、海面気圧を用いて、その間は時間方向に線形内挿を行っていた(図3.5.1上段)。この方法だと台風や低気圧の移動が速い場合などに気象の場の変化が十分に高潮モデル内で再現されず、ハインドキャストでの高潮の表現が過小となる場合があった。これを改善するために、ハインドキャストを行う際にMSMの3時間おきの解析値だけでなく、MSMの前回初期時刻での0~2時間予測も用いるように変更した(図3.5.1下段)。本手法導入によりハインドキャストでの高潮の再現精度は改善することを確認した(図略)。本変更は予測精度への影

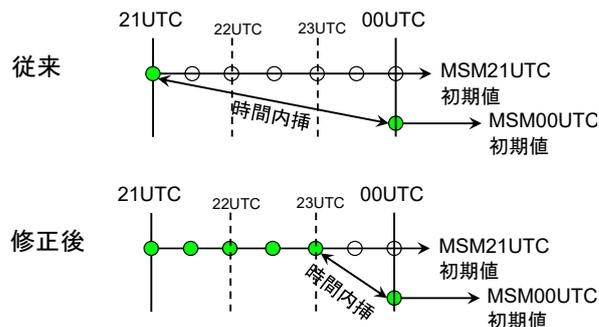


図 3.5.1 日本域高潮モデル初期値作成(ハインドキャスト)時のMSM大気要素時間内挿概念図。上段は従来の内挿方法、下段は改善後の内挿方法。この例では、00UTC初期時刻の日本域高潮モデルで初期値を作成する際のMSM大気予測の参照方法を示している。

響は小さいものの、ハインドキャスト結果は高潮モデル自体の精度の評価にも使用されることから、今回この改善を導入した。

(2) 台風ボーガス計算での台風位置内挿手法を球面スプラインに変更

日本域高潮モデルでは大気外力としてMSMを用いたメンバーに加えて、台風ボーガスを用いた予測計算も行う。この際、台風の位置・強度として気象庁が発表する熱帯低気圧情報を使用する。従来の台風ボーガス手法では、台風中心位置を時間内挿する際に二次元平面を仮定した3次スプライン内挿法を用いていた。予報時間が短く台風の影響を受ける範囲が狭い場合は二次元平面の仮定はある程度有効であるものの、今回のように予報時間を延長しようとする場合、球面との差が大きくなりえる。特に台風が高緯度にあるほど、二次元平面の仮定は球面からの乖離が大きくなる。このことから、今回高潮モデルでの台風中心位置の内挿手法を、より正確に球面上の曲線を内挿できる四元数(quaternion)を用いた球面スプライン(Nielson 2004)に更新した。

(3) 海面気圧平年値をJRA-25からJRA-3Qに変更

日本域高潮モデルでは、気圧による吸い上げ効果を計算する際に、各格子上で海面気圧予測値から海面気圧平年値を差し引いた気圧偏差を用いている。この海面気圧平年値としてこれまでではJRA-25長期再解析(Onogi et al. 2007)の結果を用いていたが、より新しい気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q; 第4.11節参照)が利用可能になったことから、JRA-3Qの海面気圧平年値を用いるように変更した。

3.5.3 日本域高潮モデル78時間予測の精度

日本域高潮モデルでの78時間予測の精度を確認するために、2019~2021年の6~11月の台風事例を対象とした業務化試験を実施した。業務化試験では大気外力として第3.3節のMSM業務化試験の結果を用いた。コ

¹ https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_2body.pdf

「3.2 台風防災メソモデル、メソアンサンブル予報システム及び高潮モデルについても、延長予測により3日先までの予測を可能にし、台風に伴う大雨や高潮などをより高い精度で予測する必要がある。」

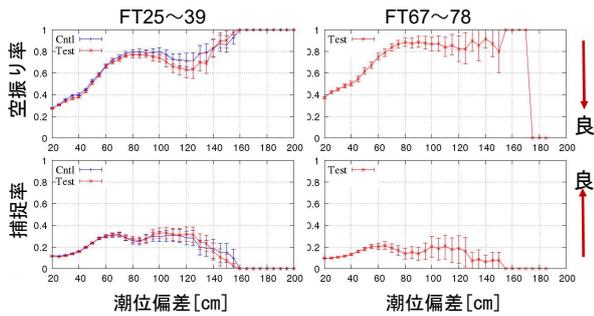


図 3.5.2 日本域高潮モデル検証結果。上段は空振り率、下段は捕捉率、左列は 25～39 時間予測、右列は 67～78 時間予測。横軸は潮位偏差の閾値、縦軸は各スコアを表す。図中、青線は CNTL、赤線が業務化試験 (TEST) を示す。

ントロール (CNTL) 実験としては、第 3.5.2 項の改良を適用前の高潮モデルに当時の現業 MSM 予測結果を与えた予測結果を用いた。また、上述の通り台風ポーガス進路の内挿手法の変更も行ったことから、MSM を外力としたメンバーに加えて台風ポーガス (予報円中心メンバー) の試験も行っている。業務化試験結果の精度検証では、気象庁をはじめ国・地方自治体等が運用している日本国内 207 の潮位観測点で観測された潮位偏差を真値として使用した。67～78 時間予測 (図 3.5.2 右列) は 25～39 時間予測 (図 3.5.2 左列) と比較して、空振り率の増加、捕捉率の低下等、検証スコアの若干の悪化は認められたものの、大きく乖離してはならず一定の精度が確保できている (図 3.5.2)。また、改善前の MSM で駆動した CNTL 実験結果と比較すると改善傾向が認められる。これは第 3.3 節の MSM の改善による効果も反映していると考えられる。台風ポーガスを用いたメンバーでの 78 時間予測のスコアについても予報時間の増加に伴う若干の悪化傾向はあるものの大幅な悪化はないことを確認した (図略)。

また、温帯低気圧による高潮の事例として 2021 年 2 月 16 日頃に発生した根室での高潮の例を図 3.5.3 に示す。この事例では根室にて 2 月 16 日 03JST (15 日 18UTC) 頃に警報基準に達する潮位が観測されている。2 日半 (約 60 時間) 前の 2 月 13 日 12UTC 初期時刻の日本域高潮モデルでは若干のピーク時刻の違いなどはあるものの警報基準程度の潮位を予測している。このように日本域高潮モデルの予報時間を延長することで、より長いリードタイムでの高潮の予測情報提供が可能となり、防災活動に資することが期待される。

3.5.4 まとめ

日本域高潮モデルの予報時間延長に向けた開発を行い、業務化試験を実施し精度を確認した。その結果、一定の精度が確認できたことから、2022 年 9 月に日本域高潮モデルの予報時間延長を現業化し、気象庁内での利用を開始した。また、気象庁外向けにも 78 時間延長予測期間の日本域高潮モデル GPV を気象業務支援セ

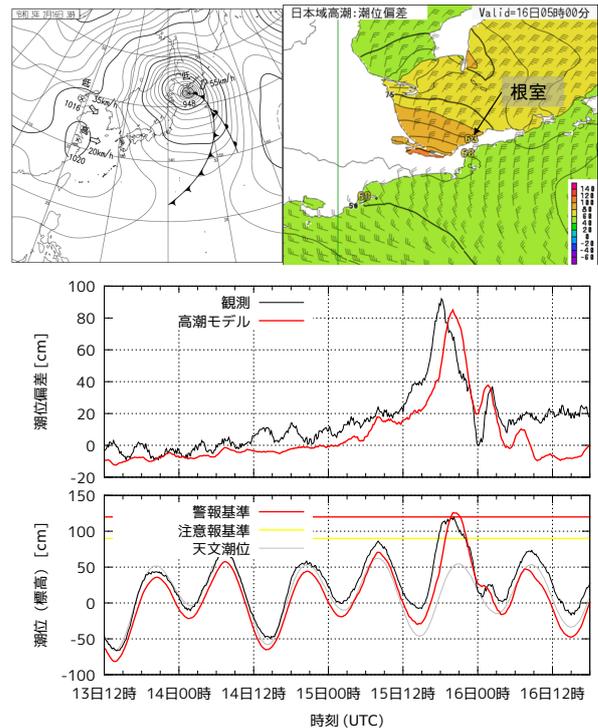


図 3.5.3 2021 年 2 月 16 日の根室の高潮事例 (上段左) 2 月 16 日 03JST の地上天気図。(上段右) 2 月 13 日 12UTC を初期時刻とした高潮モデル 56 時間予測 (予測対象時刻 2 月 16 日 05JST) 平面分布。値は潮位偏差。(中段) 潮位偏差時系列。図中黒線が観測、赤線が高潮モデル予測値。(下段) 潮位時系列。赤、黄の横線はそれぞれ高潮警報、注意報基準。

ンターを通じて提供する方向で現在準備中である。

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.
- Nielson, G. M., 2004: ν -Quaternion splines for the smooth interpolation of orientations. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, **10**, 224–229.
- 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.

3.6 日本域台風時高潮確率予報システムの導入

3.6.1 概要

気象庁は、警報級の現象が5日先までに予想されるときにはその可能性を「早期注意情報（警報級の可能性）」として発表している（杉本・木下 2016）。早期注意情報はこれまで雨、雪、風、波を対象に発表されており、高潮についても対応が望まれていた。この高潮の早期注意情報に必要な5日先までの台風予報の信頼度も考慮した確率的高潮予測を行うため、気象庁では日本域台風時高潮確率予報システム（日本域高潮 PFS¹）の開発を行い、2022年9月に運用を開始した。本節では、日本域高潮 PFS の概要について述べる。

3.6.2 日本域高潮 PFS の概要

高潮の発生は台風進路のわずかな違いによって大きく異なることから、早期注意情報に求められる5日先の高潮予測を行うためには台風進路予報の不確実性を適切に考慮する必要がある。日本域高潮 PFS の開発においては、米国 NOAA ハリケーンセンターがハリケーン接近時の高潮確率予測を行うために運用している P-Surge (Taylor and Glahn 2008; Gonzalez and Taylor 2018) の手法を参考とした。P-Surge では、ハリケーンの進路・強度予報を元にハリケーンの進路・強度を少しずつ変えたアンサンブル高潮予測を行う。具体的には、台風進行方向に対して横方向 (cross track) に沿った位置、進行方向 (along track) に沿った位置、ハリケーンの高さ、強度それぞれに摂動を与える。

日本域高潮 PFS では、P-Surge を参考にしつつ、以下のような予測システムの構成とした。

- 気象庁が発表する台風予報に沿った高潮予測情報とするため、高潮モデルの外力として気象モデルの風・気圧の予測値は用いず、台風予報に基づいて作成される台風ボーガス (林原 2011) の風・気圧により高潮モデルを駆動する。
- 気象庁が発表する台風予報円の情報を元に、台風進行の横方向 (cross track) に進路を等間隔にずらした計 21 通りの台風進路を作成する (図 3.6.1)。予報円内に台風中心が入る確率は約 70% なので、予報円外に台風が進行する可能性も考慮し、予報円の外側にも左右 2 コースずつ進路計算を配置する。
- 上述の 21 通りの台風進路上に台風ボーガスを配置して 21 通りの高潮予測計算を実行する (図 3.6.2)。
- 台風進行速度の不確実性に伴う高潮予測への影響も考慮するため、21 メンバーの高潮モデル計算後の後続処理にて、それぞれの高潮予測結果の時間を台風進行速度に応じてずらす処理を実施する。この時間をずらす処理も cross track の各メンバーに対して 21 通りのメンバーを生成する。結果、cross track 方向 21 通り × along track 方向 21 通り = 441

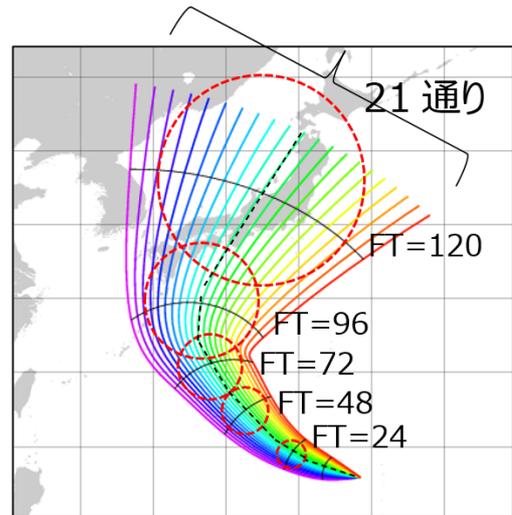


図 3.6.1 日本域高潮 PFS での 21 通りの台風進路の例。初期時刻は 2018 年台風第 21 号が日本に接近中の 2018 年 8 月 31 日 00UTC。図中赤い円は 24, 48, 72, 96, 120 時間台風予報の予報円。

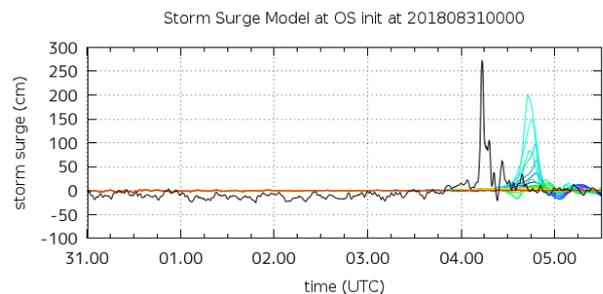


図 3.6.2 日本域高潮 PFS での 21 通りの高潮予測の例。大阪での高潮予報結果。初期時刻は 2018 年 8 月 31 日 00UTC。黒線は検潮所での潮位観測値、他の線は各進路に対応する予報であり、色は図 3.6.1 の台風進路の線と対応している。

通りの高潮予測が計算される。

- これら 441 通りの高潮（潮位偏差）予測に別途予測した天文潮位 (高佐ほか 2011) を加算し、標高を基準とした潮位予測値を得る (図 3.6.3)。
- この 441 通りの高潮予測から、警報などの基準値を超過する確率や、潮位予測パーセンタイル値等の確率予測を求めるためには、各メンバーの確率密度の値が必要である。日本域高潮 PFS においては、台風予報円に対して台風中心位置が取りうる確率密度分布として、図 3.6.4 のように二次元正規分布を仮定して、各メンバーの確率密度を計算する。
- この確率密度分布を、441 通りの高潮予測それぞれに与えることで、図 3.6.5 に示したような高潮警報基準超過確率等の確率予測プロダクトを作成する。

その他の高潮 PFS の仕様は以下の通りである。日本域高潮 PFS の予測時間は、早期注意情報の期間

¹ Probabilistic Forecast System

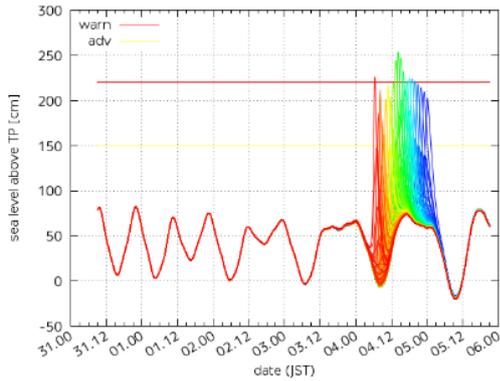


図 3.6.3 日本域高潮 PFS で台風進行速度の不確実性も考慮した 441 通りの予測例。地点、初期時刻は図 3.6.2 に同じ。図中、赤系統の色は台風の進行速度が速い場合、青系統の色は台風の進行速度が遅い場合に対応する。

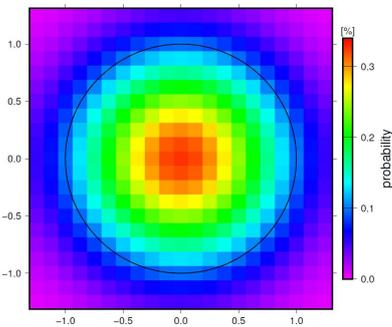


図 3.6.4 日本域高潮 PFS で仮定する台風予報円に対する台風中心通過位置の確率密度分布。図中の黒い円は台風予報円を表す。x 軸、y 軸のスケールは予報円半径で正規化した距離。予報円中心付近を通過するメンバーに高めの確率、円外では低い確率を与える。

5 日をカバーするため、台風 5 日予報が発表される 00,06,12,18UTC 初期時刻では 132 時間とした。加えて、24 時間先までの台風予報が更新される 03,09,15,21UTC 初期時刻では、最新の台風情報を高潮予測に反映するために 39 時間予測を実行する。同システムの実行条

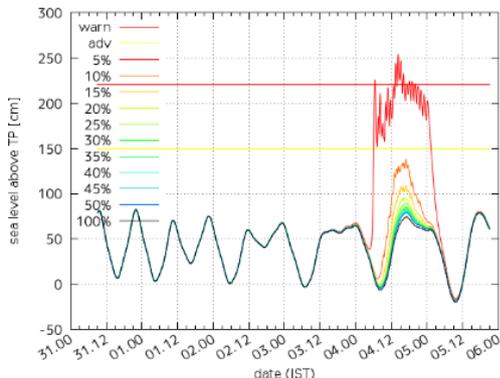


図 3.6.5 日本域高潮 PFS の 441 通りの高潮予測結果から予測潮位パーセンタイルを計算した例。地点、初期時刻は図 3.6.2 に同じ。図中、赤の横線は大阪における高潮警報基準、黄色の横線は高潮注意報基準を表す。

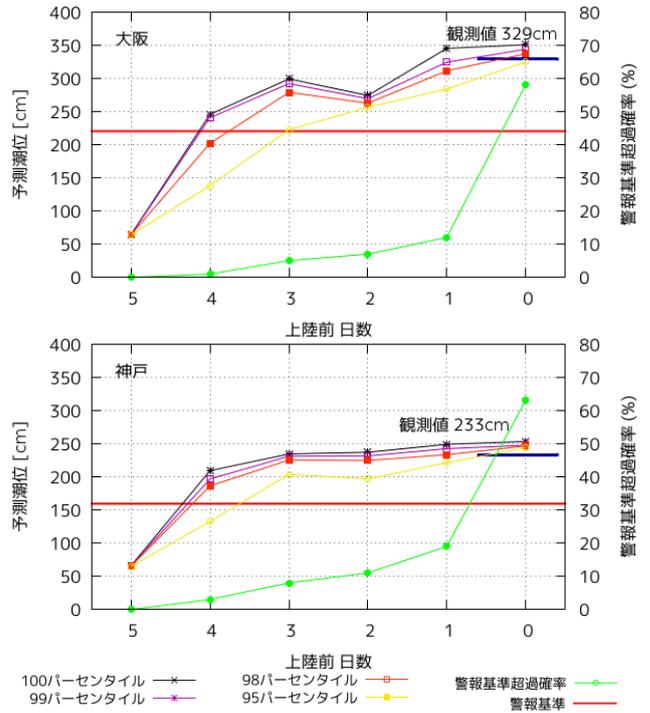


図 3.6.6 日本域高潮 PFS を 2018 年台風第 21 号に適用した場合の大阪・神戸での予測結果。上段が大阪、下段が神戸。横軸は台風上陸前の日数、縦軸は日最大予測潮位。黒、紫、赤、黄の線は 100, 99, 98, 95 パーセンタイル値を、緑線は警報基準を超過する確率を表す。赤の横線は高潮警報基準、紺色の横線は観測潮位。

件は、予測期間内に日本沿岸に暴風域がかかる可能性がある熱帯擾乱がある場合とし、条件を満たさない初期時刻では高潮 PFS は実行されない。高潮予測計算には、日本域高潮モデルと同じ高潮モデル（水平解像度沿岸域 1km～沖合 16km）を使用する。

3.6.3 日本域高潮 PFS の予測例

日本域高潮 PFS を用いて過去の実際の台風事例に適用した結果を以下に示す。ここでは顕著な高潮が発生した 2018 年台風第 21 号での大阪湾を例として、100, 99, 98 等のパーセンタイル潮位予測値を計算した結果を図 3.6.6 に示した。本結果では 100, 99 パーセンタイルなどの最悪想定シナリオが台風上陸の約 4 日前から大阪・神戸で警報基準を超過する可能性を予測しており、日本域高潮 PFS が高潮の警報級の可能性の捕捉に有効であることを示していると考えられる。

3.6.4 まとめ

高潮の早期注意情報（警報級の可能性）のための予測情報を提供するため、日本域高潮 PFS の運用を 2022（令和 4）年 9 月に開始した。今後は、P-Surge で考慮されているような台風強度、台風の大きさの摂動を導入する等の改善を検討していく予定である。

参考文献

- Gonzalez, T. and A. Taylor, 2018: Development of the NWS' Probabilistic Tropical Storm Surge Model. *Proceedings of the 33rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Ponte Vedra, FL, USA*, **11**.
- 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.
- 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.
- 高佐重夫, 近澤昌寿, 森裕之, 2011: 面的天文潮位の予測手法とその精度. *測候時報 (海洋気象特集)*, **78**, S33-42.
- Taylor, A. and B. Glahn, 2008: Probabilistic guidance for hurricane storm surge. *19th Conference on probability and statistics*, Vol. 74.

3.7 アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入

3.7.1 概要

気象庁は、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、2011 年よりアジア域高潮モデルを運用してきた (Hasegawa et al. 2012, 2017)。このモデルの予測結果は RSMC 東京台風センターの Numerical Typhoon Prediction (NTP) ウェブサイトを通じて、図情報として台風委員会加盟国へ提供されている。

台風委員会からは従来より高潮予測改善への期待があったことから、気象庁ではこのアジア域高潮モデルの改善に向け、水平高解像度化、アンサンブルメンバー数増強、予報時間延長等の様々な開発を行ってきた。特に高潮防災に有効な数日前からの高潮確率予測プロダクト提供に向けて、アンサンブルメンバー数を従来の 6 から 52 に増強する取り組みを行ってきた。これによって本格的なアンサンブル予報が可能となることから、システムの名称もこれまでの「アジア域高潮モデル」から「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)」に変更した。2022 年度にはこれらの開発成果を合わせた業務化試験を行い予測精度の改善が確認できたことから、2022 年 8 月にアジア域高潮 EPS の現業化を行った。本節ではこれらの改良について報告する。

3.7.2 アジア域高潮 EPS の改良項目

本項では従来のアジア域高潮モデルに対してのアジア域高潮 EPS の改良点を述べる。表 3.7.1 に新旧仕様比較表を示した。

(1) モデル高解像度化

従来のアジア域高潮モデルでは水平解像度は全域緯度経度 2' (約 4km) であったが、今回沿岸域での解像度を約 1.5km に高解像度化した。これによりモデル内での海陸分布の表現がより正確になり、高潮予測の精度向上につながる。

(2) モデル領域の拡張

今回のシステム更新では図 3.7.1 のようにモデル領域の拡張も行った。従来のモデル東側境界は東経 160°であったが、これを今回 180°まで拡張した。これにより、これまでモデル領域に含まれていなかったマーシャル諸島等が領域に含まれるようになり、RSMC 東京台風センター責任領域のほぼ全域をカバーできるようになった。

(3) アンサンブルメンバー数の増強

アジア域高潮モデルでは、RSMC 東京台風センターの責任領域に台風が存在する場合には、台風進路・強度予報の不確実性を考慮した高潮予測を行うために、全球モデル (GSM) と全球アンサンブル予報システム

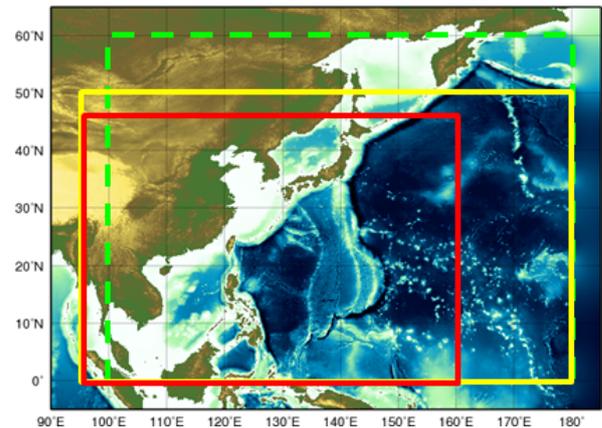


図 3.7.1 アジア域高潮 EPS モデル領域。黄色線がアジア域高潮 EPS のモデル領域、赤線が従来のアジア域高潮モデルの領域、緑破線は RSMC 東京台風センター責任領域。

(GEPS) の風・気圧予報結果を用いた複数シナリオの計算を行う。従来のアジア域高潮モデルでは計算機資源節減のため、GEPS の 51 アンサンブルメンバーから台風進路予報のクラスター解析により代表的な 5 メンバーを選び、これに GSM も加えて 6 通りの高潮予測を行っていた (Hasegawa et al. 2017)。この 6 メンバー予測では台風進路予報の不確実性に伴う高潮予測の不確実性をある程度知ることが可能であるものの、顕著な高潮の発生確率やパーセンタイル値といった定量的な確率的高潮予測情報を提供するには不十分であった。そこで今回の改良では、台風時には GEPS の 51 メンバー全てと GSM の予測結果を用いた計 52 メンバーの高潮アンサンブル予報を実行するように変更した。これにより、以下第 3.7.4 項で述べるような確率的高潮予測情報の提供が可能となった。

(4) 予報時間延長

上述の通り、従来のアジア域高潮モデルではメンバー数が 6 と限定されており数日先の高潮発生の不確実性を捉えるには十分とは言えなかった。そのことを考慮し、予報時間も 72 時間までと限定していた。今回アンサンブルメンバー数を増強することによって確率的予測情報が提供できるようになることから、それに合わせて予報時間も 132 時間に延長した。

(5) 台風ボーガス手法の改善

日本域高潮モデルでは、台風ボーガス手法に陸域の影響による風の減衰の効果 (Westerink et al. 2008) を 2021 年 4 月に導入することで、それまでの高潮予測の過大傾向を軽減させ、予測精度を改善した (気象庁 2022)。アジア域高潮 EPS でも同じ手法を今回導入し、これまで認められていた高潮予測の過大傾向を軽減させる改善を図った。

表 3.7.1 従来のアジア域高潮モデルと新アジア域高潮 EPS の仕様比較

システム	アジア域高潮モデル	アジア域高潮 EPS
水平解像度	2分 (約 4km)	約 1.5km (沿岸域) ~ 約 50km (外洋域)
モデル領域	0°~46°N, 95°~160°E	0°~50°N, 95°E~180°
予報時間	72 時間	132 時間
アンサンブルメンバー数	台風時 6 (GSM+GEPS×5 [※]) 非台風時 1 (GSM)	台風時 52 (GSM+GEPS×51) 非台風時 1 (GSM)
実行頻度	1日4回 (00,06,12,18UTC)	同左

※ 大気外力として GEPS 全メンバーからクラスター解析により選択した 5 メンバーと GSM を使用

3.7.3 アジア域高潮 EPS 業務化試験精度検証結果

アジア域高潮 EPS の精度を評価するため、2018~2020 年の 6~11 月を対象として業務化試験 (TEST) を実施した。アジア域高潮 EPS の利用用途を考えると本来は海外での高潮事例について精度検証を行うのが望ましいが、外国地点の潮位観測データは入手できる地点数が少なく、モデルの精度検証に十分な事例数が得られない。そのため、ここでは第 3.5 節と同様に日本の潮位観測データを用いて日本の高潮事例を対象に以下の検証を行った。対照実験 (CNTL) としては現業アジア域高潮モデルの結果を用いた。CNTL となる従来のアジア域高潮モデルは上述の通り 6 メンバーであり確率予測プロダクト作成は行っていなかったことから、ここでの TEST-CNTL 比較検証では GSM を外力として用いた決定論的予測同士の比較のみを行った。TEST は CNTL と比較して空振り率が減少する一方で、捕捉率は増加する等、各スコアにて改善傾向であることが確認された (図 3.7.2)。これらの改善は、前項で述べたモデル水平高解像度化や台風ボーガス手法改善の効果と考えられる。

3.7.4 アジア域高潮 EPS による確率予報プロダクト

従来のアジア域高潮モデルはメンバー数 6 と確率予測情報を提供するにはメンバー数が少なかったため、台風委員会加盟国向けに提供する資料では 6 つのシナリオの図情報を提供していた (図 3.7.3、図 3.7.4)。今回の改善で、台風時には 52 メンバーの高潮アンサンブル予報を行うことから、予測の信頼度を示す確率予測情報を提供することが可能となった。具体的には、図 3.7.5 のように最大潮位、1m 以上の高潮が発生する確率、第三四分位、アンサンブルスプレッドの平面図や、図 3.7.6 のように地点毎の時系列図として潮位予測の箱ひげ図や 1,2,3m 以上の高潮が発生する確率等を提供する。

3.7.5 まとめ

本節では、2022 年 8 月に現業化したアジア域高潮 EPS について説明した。従来のアジア域高潮モデルから、水平解像度の高解像度化、モデル領域の拡張、アンサンブルメンバー数増強、予報時間延長、台風ボー

ガス手法等の数多くの改善を行った。これにより、予測精度の改善と新たな確率的高潮予測情報の提供が可能となった。

参考文献

- Hasegawa, H., N. Kohno, and H. Hayashibara, 2012: JMA's Storm Surge Prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS). *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **14**.
- Hasegawa, H., N. Kohno, M. Higaki, and M. Itoh, 2017: Upgrade of JMA's Storm Surge Prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS). *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **19**.
- 気象庁, 2022: 日本域高潮モデル予報時間延長と台風ボーガス利用手法改善. 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, 32-35.
- Westerink, J. J., R. A. Luettich, J. C. Feyen, J. H. Atkinson, C. Dawson, H. J. Roberts, M. D. Powell, J. P. Dunion, E. J. Kubatko, and H. Pourtaheri, 2008: A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to southern Louisiana. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 833-864, doi:10.1175/2007MWR1946.1.

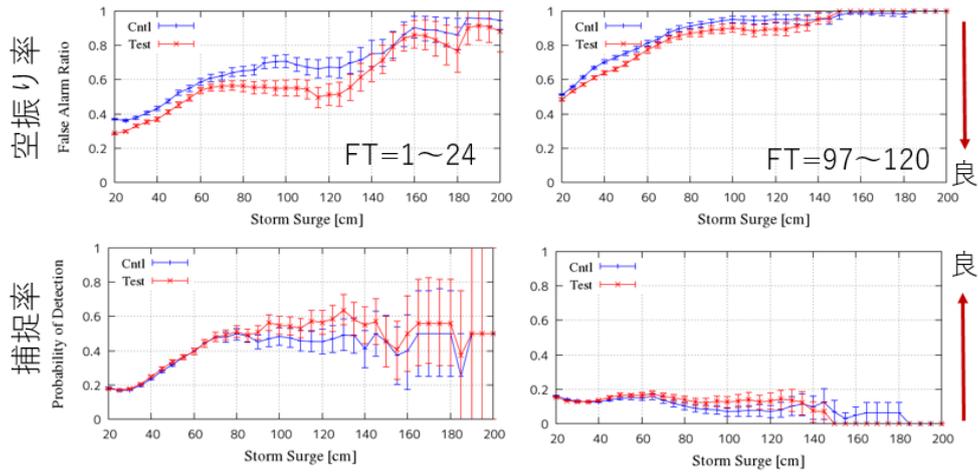


図 3.7.2 アジア域高潮モデル検証結果。上段は空振り率、下段は捕捉率、左列は1~24時間予測、右列は97~120時間予測。横軸は高潮の閾値、縦軸は各スコアを表す。図中、青線はCNTL、赤線がTESTを示す。

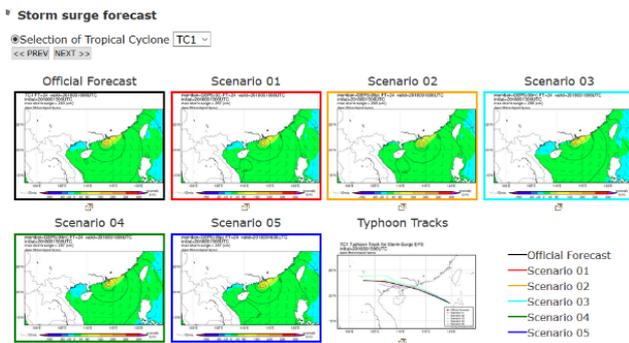


図 3.7.3 従来提供していた高潮予測平面図の例。6メンバーの高潮予測平面図を6枚並べて表示している。

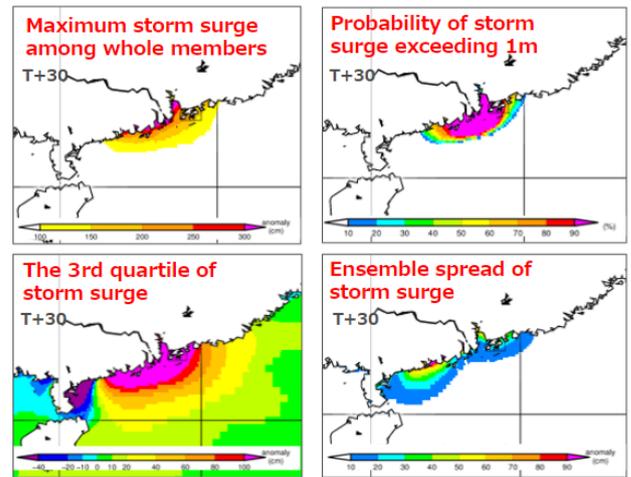


図 3.7.5 アジア域高潮 EPS 導入後の高潮予測平面図情報の例（左上）全メンバー中最大の高潮予測値（左下）第三四分位（75パーセントイル）高潮予測値（右上）1m以上の高潮が発生する確率（右下）アンサンブルスプレッド

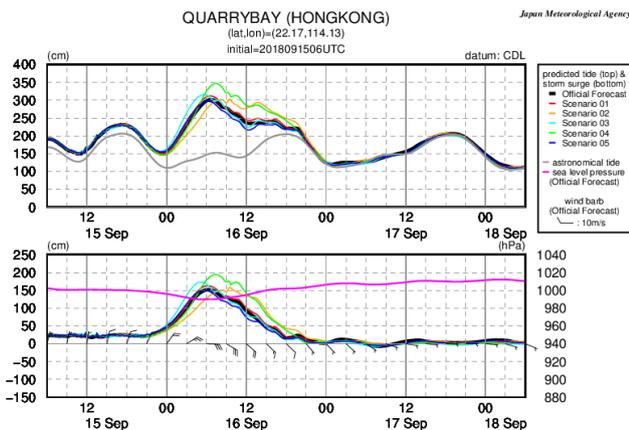


図 3.7.4 従来提供していた高潮地点時系列予測図の例。地点時系列の例。この例は香港 Quarry Bay 地点での高潮予測。上段に6メンバーの潮位予測値、下段に6メンバーの潮位偏差（平常の潮位からの差）の時間変化を示している。

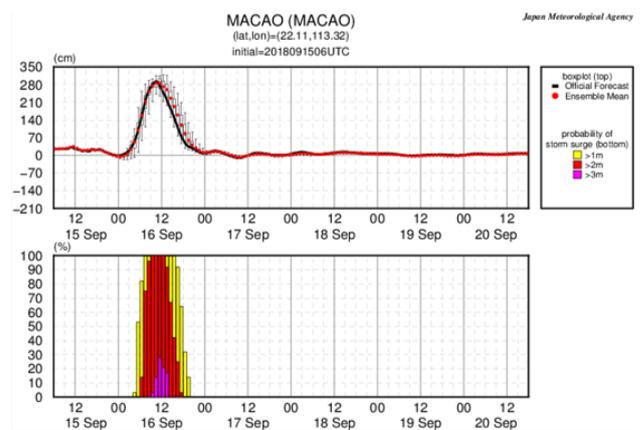


図 3.7.6 アジア域高潮 EPS 導入後の高潮地点時系列図情報の例（上段）地点時系列。赤線でアンサンブル平均、箱ひげ図でアンサンブルによる予測の幅を示している。（下段）基準以上の高潮が発生する確率の時系列図。黄、赤、紫はそれぞれ 1m, 2m, 3m 以上の高潮が発生する確率を示す。

3.8 全球解析における観測データ利用手法の改良

3.8.1 はじめに

大気追跡風 (AMV) は気象衛星から撮影された時間的に連続する複数の画像から雲や水蒸気のパターンの追跡を行い、風向、風速を算出するプロダクトである。

本節では、EUMETSAT の AMV プロダクトである Dual Metop global coverage wind (EUMETSAT (2016)、以降、Dual-Metop AMV とする) の全球解析での新規利用に関する開発について報告する。また、Dual-Metop AMV の全球解析での新規利用と、全球解析において衛星により観測された輝度温度データの同化に利用されている放射伝達モデル RTTOV(Eyre 1991) をバージョン 10.2 からバージョン 13 へ更新する開発とを組み合わせた業務化試験の結果についても報告する。なお、RTTOV 更新については第 4.5.2 項を参照頂きたい。

3.8.2 全球解析における Dual-Metop AMV の利用に関する開発の背景

全球解析では、Terra 衛星や Aqua 衛星に搭載された MODIS、NOAA 衛星や Metop 衛星に搭載された AVHRR から算出される極域の AMV をデータ同化に利用している。

Terra 衛星や Aqua 衛星は、設計寿命を超えて運用されており、近い将来 MODIS による AMV の配信終了が予想される。また、NOAA 衛星や Metop 衛星に搭載されている AVHRR による AMV は、米国環境衛星・資料情報局 (NOAA/NESDIS) による現行の算出システムでの配信終了が予定されているため、今後極域 AMV の利用数の減少による解析精度の悪化が懸念される。

このような状況から、EUMETSAT の AMV プロダクトの 1 つである Dual-Metop AMV の全球解析での利用に向けて開発を進めてきた。

3.8.3 EUMETSAT の Metop/AVHRR の AMV プロダクト

EUMETSAT が運用する Metop 衛星に搭載された AVHRR によって算出される AMV には以下のプロダクトがある。

- Single Metop polar wind
Metop-B₁-C それぞれの約 100 分間隔の連続する 2 枚の画像を使用して算出されるプロダクトで、高緯度において算出可能である。
- Dual Metop global coverage wind(Dual-Metop AMV)
Metop-B₁-C 2 機による約 50 分間隔の連続する 2 枚の画像から作成されるプロダクトであり、極域に限らず全球領域で AMV を算出可能である。
- Triplet mode polar wind
Metop-B₁-C 2 機による画像で作成されるプロダク

トで、約 50 分間隔の連続する 3 枚の画像から作成される。高緯度において算出可能なプロダクトである。

このうち、Metop-B の Single Metop polar wind に対応する気象衛星共同研究所¹(CIMSS) の AVHRR による AMV は現在同化に利用しているため、それに加えて 2 機の Metop を利用した Dual-Metop AMV を全球数値予報システムで新たに利用することにした。

Dual-Metop AMV は全球領域で算出されるプロダクトであるが、中・低緯度についてはより高頻度・多波長帯の画像を用いて算出される静止気象衛星の AMV をデータ同化に利用しており Dual-Metop AMV の新規利用による利点が少ないため、静止気象衛星の AMV が利用できない北 (南) 緯 50°以北 (南) の高緯度域でのみ利用する²。

3.8.4 Dual-Metop AMV の品質管理処理の検討

AMV の品質管理 (QC: Quality Control) 処理は山下・今井 (2007)、山下 (2015) に基づいて実行されているが、Dual-Metop AMV の観測値と第一推定値の差 (O-B) の統計結果 (図 3.8.1) から、最適な QI(Quality Indicator)³ 閾値の検討、及び同化に適さないデータ品質の悪い領域の調査を行い、Dual-Metop AMV に対して新たに以下の QC 処理を導入することとした。

- QI 閾値 85 以上のデータを利用
予報値チェックあり QI による QC により、負バイアスが大きな対流圏上層や、正バイアスの大きな対流圏下層のデータを排除する。図 3.8.1(a)、(c) 及び (b)、(d) の比較から、QI 閾値 85 以上のデータのみを利用した場合、これらのバイアスが軽減していることがわかる。
- 300 hPa より下層のデータを利用
図 3.8.1(a)、(b) から中・高緯度の 300 hPa より上層では 第一推定値に対して西風の弱風バイアスが見られる。図 3.8.1(c)、(d) から QI 閾値 85 以上のデータによる統計でもバイアスが見られ、QI による QC のみではこれらのバイアスを持ったデータを除去しきれないため、300 hPa より上層のデータは利用しない。
- 陸域では 700 hPa より上空のデータを利用
同様に、陸域の対流圏下層では QI による QC で除去しきれない、バイアスの大きなデータが存在するため、陸域では 700 hPa より下層のデータは利用しない。

¹ NOAA/NESDIS、米国航空宇宙局 (NASA)、米国ウィスコンシン大学により共同で運営されている。

² カナダ気象局や ECMWF では Dual-Metop AMV は MODIS 等の極域 AMV と静止気象衛星の AMV が利用できない北 (南) 緯 40°から 60°の緯度帯で利用されている。

³ 気象庁では、EUMETSAT で開発された予報値チェックあり QI を QC に利用している。

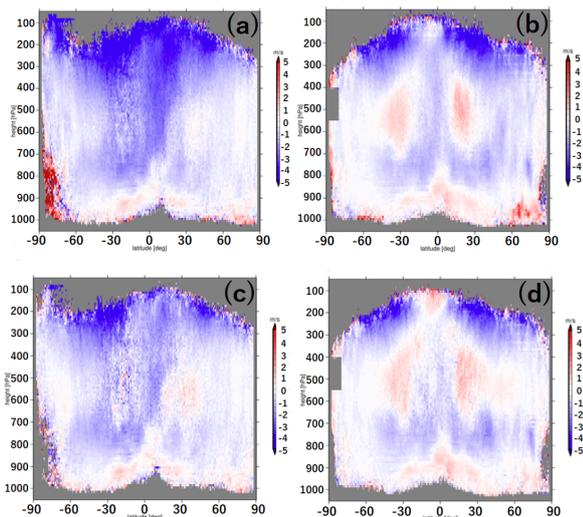


図 3.8.1 東西風速 U[m/s] の O-B 緯度帯平均。それぞれの図の縦軸は気圧高度 [hPa]、横軸は緯度 [°] である。(a)、(b) は予報値チェックあり QI 閾値 0 以上、(c)、(d) は予報値チェックあり QI 閾値 85 以上のデータの統計。(a)、(c) の統計期間は 2019 年 7 月 10 日から 2019 年 8 月 19 日、(b)、(d) の統計期間は 2019 年 12 月 10 日から 2020 年 1 月 31 日である。

なお、同じ領域に複数の極域 AMV が存在した場合、① MODIS、② LEOGEO⁴、③ Dual-Metop、④ AVHRR の順で優先してデータ同化に利用する。

3.8.5 Dual-Metop のデータ分布

図 3.8.2 に全球サイクル解析と全球速報解析⁵における極域 AMV のデータ分布を示す。全球サイクル解析では MODIS (灰色)、Dual-Metop (赤色) とともに多くのデータが観測データ打ち切り時間⁶に間に合うが、MODIS の優先度を Dual-Metop より高く設定しているため、Dual-Metop は MODIS による観測がない領域での利用となっている。一方、全球速報解析では観測データ打ち切り時間に間に合う MODIS は少ないが、多数の Dual-Metop が観測データ打ち切り時刻に間に合うため、Dual-Metop の利用により対流圏中層を中心に極域における AMV のデータ利用数が大幅に増加する。

3.8.6 Dual-Metop AMV 利用の影響評価

2020 年 9 月時点の現業に相当する全球数値予報システムから極域 AMV をすべて排除した実験 (CNTL) と、CNTL に Dual-Metop AMV を追加した実験 (TEST) を比較することにより他の AMV を利用しないという条件下で Dual-Metop AMV が全球数値予報システム

⁴ 低軌道衛星 (LEO) と静止衛星 (GEO) の合成画像から算出される AMV。

⁵ 気象庁のデータ同化システムの詳細については佐藤 (2011) を参照。

⁶ 解析時刻からデータ同化処理を開始するまでの時間。

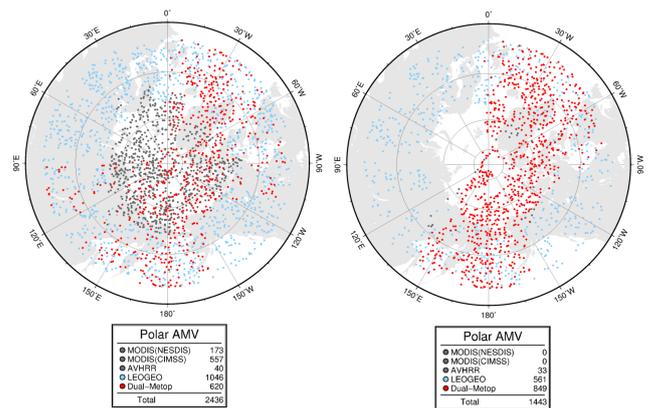


図 3.8.2 全球サイクル解析 (左図) 及び全球速報解析 (右図) における極域 AMV の利用状況。点は観測データの位置を表し、赤色、灰色、水色はそれぞれ、Dual-Metop、MODIS・AVHRR、LEOGEO による AMV を示す。解析時刻は 2020 年 7 月 1 日 00UTC。

に与える影響を調査した。統計検証期間は 2019 年 8 月と 2020 年 1 月である。

図 3.8.3 は 500 hPa のジオポテンシャル高度と 850 hPa の気温の平均解析場の TEST-CNTL の差分を示す。Dual-Metop AMV を利用することで北極域の対流圏中層を中心に西風を弱める変化が見られた。この変化によって、解析システム内の制御変数間の相関を通じて間接的に対流圏下層における南北の温度勾配が小さくなる方向に変化し、北極域では CNTL に比べて TEST の 850 hPa の気温が上昇し、500 hPa の高度が高くなった。これによって、ECMWF など、複数の海外数値予報センターの予測初期値との差が減少することを確認しており、極域における解析場の改善が示唆される結果である。

更に、Dual-Metop AMV の利用により、マイクロ波サウンダの輝度温度観測値と第一推定値の整合性の改善、及び海外数値予報センターの予測初期値を参照値とした予測精度検証において、極域における温度場や風速場の改善を確認した。

3.8.7 RTTOV 更新と合わせた業務化試験の結果について

Dual-Metop AMV の利用、及び第 4.5.2 項に示すように RTTOV 更新に関する変更の問題がないことが確認できたため、これら 2 つの変更を合わせて現業利用に向けた業務化試験を実施した。業務化試験では、2021 年 12 月時点の現業全球数値予報システムをベースにした実験をコントロール実験 (CNTL) とし、CNTL に Dual-Metop AMV の新規利用と RTTOV 更新の 2 つの開発成果を導入した実験をテスト実験 (TEST) とし、これらを比較することにより影響評価を行った。評価期間は、2020 年 7 月から 2020 年 9 月と 2020 年 12 月から 2021 年 2 月の夏冬それぞれ 3 か月間である。以下では業務化試験の主な検証結果について紹介する。

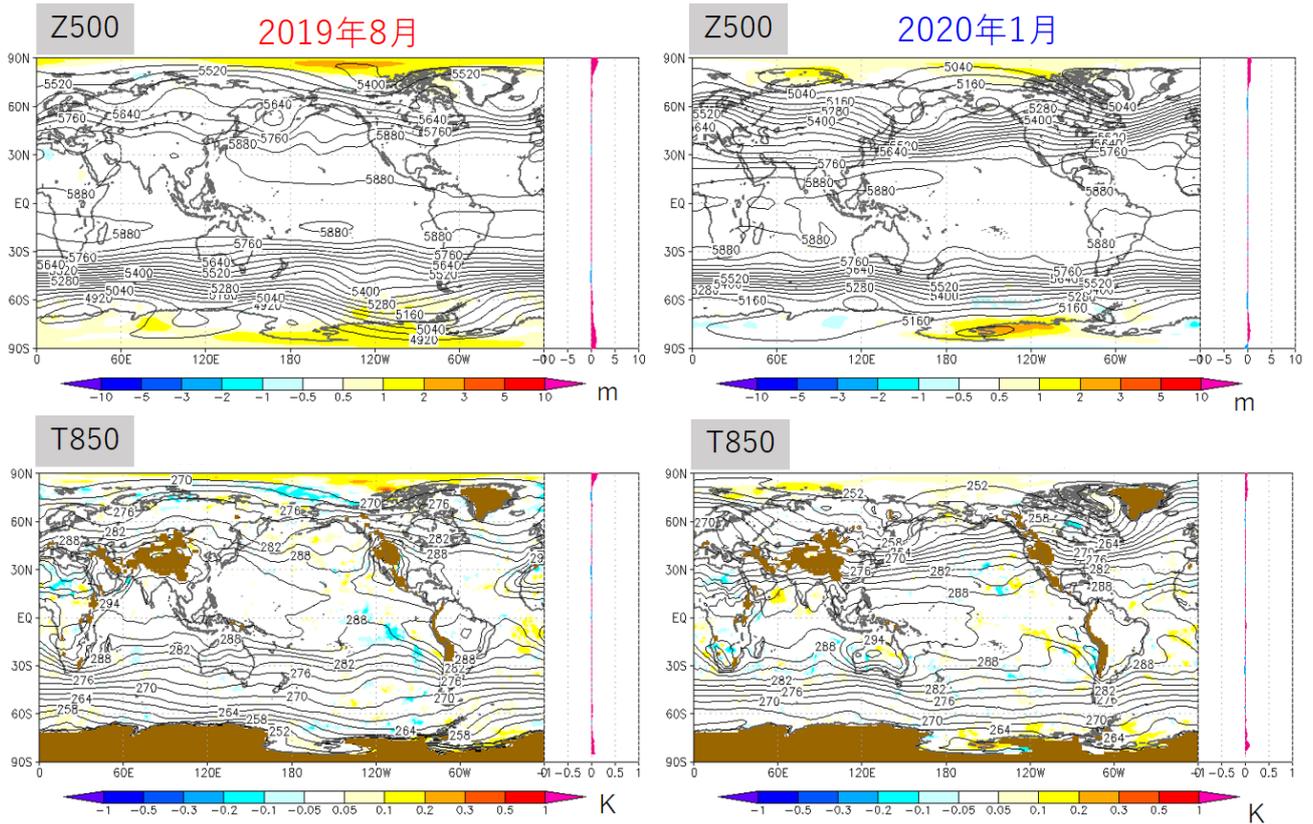


図 3.8.3 500 hPa のジオポテンシャル高度及び 850 hPa の気温の平均解析場の TEST-CNTL の差分。上段は 500 hPa のジオポテンシャル高度の差分、下段は 850 hPa の気温の差分であり、左列は夏実験、右列は冬実験の結果を示す。それぞれの図の右に帯状平均値を示している。

(1) 予測初期値に対する予測精度の変化

図 3.8.4 に ECMWF と気象庁の予測初期値を参照値とした東西風予測場の二乗平均平方根誤差 (RMSE) の改善率を示す。どちらの予測初期値を参照値とした場合でも、南北高緯度領域において改善が確認できる。NCEP や UKMO など、他の複数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。気温の予測場の RMSE の改善率についても同様に改善傾向であった。これらの改善は Dual-Metop AMV の利用、RTTOV 更新のそれぞれの性能評価試験で得られた実験結果との比較から主に Dual-Metop AMV 利用の効果であると考えられる。

(2) 500 hPa のジオポテンシャル高度予測への影響

北半球の 500 hPa のジオポテンシャル高度予測に与える影響を図 3.8.5 に示す。観測データ利用の効果が大きい 1 日目予測では、統計的に有意な改善が見られる。2 日目予測以降に関しては、統計的に有意ではないが改善傾向となっている。南半球でも同様であるが、夏実験については 3 日目予測以降、統計的に有意ではないが改悪傾向であった。対ラジオゾンデ検証では中立であった。

(3) 台風進路予測への影響

北西太平洋領域における台風進路予測の誤差統計検証結果を図 3.8.6 に示す。図から台風進路予測への影響は全体としては中立である。FT=120 以降の予測精度悪化は特定の事例の進路予測誤差の増大が影響していた。なお、他の海域の熱帯低気圧進路予測への影響について確認したところ、東太平洋域、大西洋域ではそれぞれ改悪、改善の傾向が見られた。今回の実験期間ではどちらの海域においても主に 30° N 以南の低緯度において熱帯低気圧の予測に変化が見られたが、高緯度域の Dual-Metop AMV の利用がこれらの熱帯低気圧に与える直接的な影響を確認することは出来なかった。

(4) 予測改善の事例

図 3.8.7 に 2020 年台風第 4 号の進路予測の改善事例を示す。この事例では、上流にあたる北緯 50 度付近のトラフ周辺で Dual-Metop AMV が利用されたことで、TEST の予測では CNTL に比べて中国東北部付近のトラフの東進速度が速くなった。その結果、図に示す日本海を通過して北東進する地上低気圧が上空のトラフの影響を受ける時刻が早ることによって地上低気圧の東進速度が加速され、より現実に近い進路予測となった。

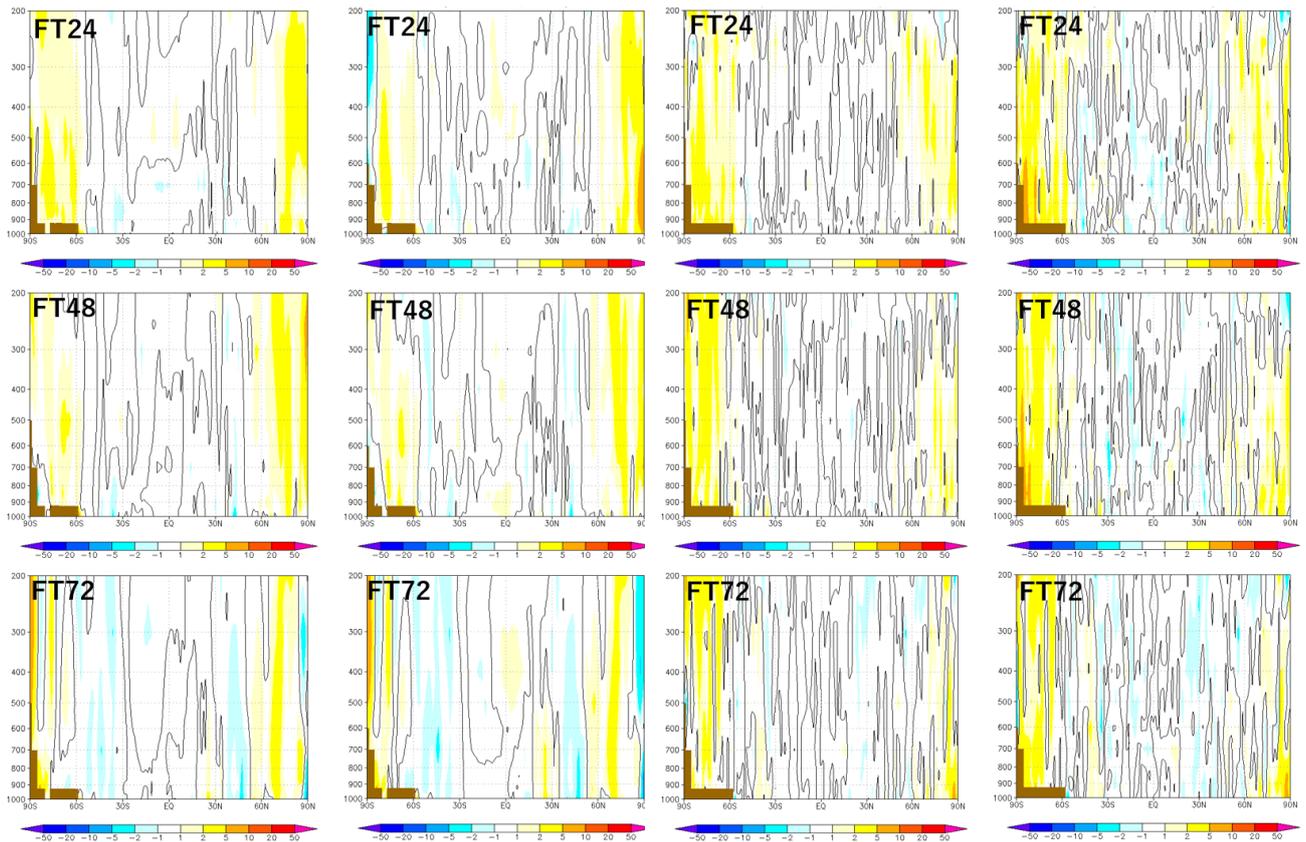


図 3.8.4 予測初期値を参照値とした東西風予測場の RMSE 改善率 [%] の緯度帯平均。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°] である。左側の 2 列は 2020 年 7 月から 9 月、右側の 2 列は 2020 年 12 月から 2021 年 2 月の 3 か月平均の対初期値検証の図であり、それぞれのパネルの左は ECMWF、右は JMA の予測初期値を参照値としている。上から 1 段目、2 段目、3 段目はそれぞれ、1 日目、2 日目、3 日目の予測精度の変化を示す。暖色系は改善、寒色系は改善を示す。

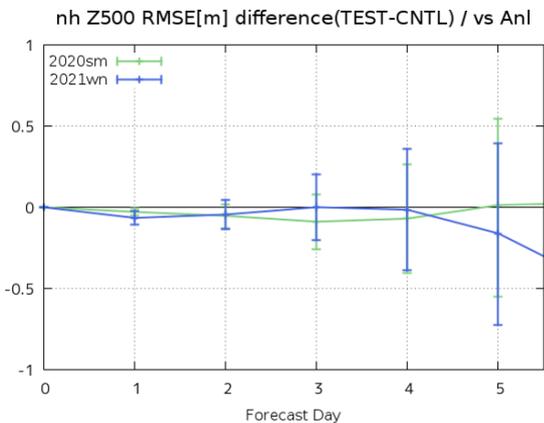


図 3.8.5 全球解析値を参照値とした、北半球の 500 hPa のジオポテンシャル高度予測精度の変化。縦軸は RMSE の TEST-CNTL の差分 [m]、横軸は予測時間 [日] である。青線は冬実験、緑線は夏実験を示す。エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示している。

3.8.8 まとめと今後

MODIS や AVHRR による極域 AMV の配信終了が予定されていることから、全球解析で利用する極域 AMV を速やかに補充する必要があるため、極域において Dual-Metop AMV を利用する開発を進めてきた。

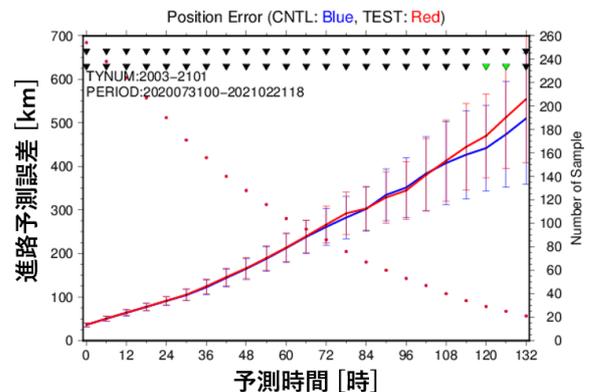


図 3.8.6 北西太平洋領域の台風進路予測の気象庁ベストトラックに対する誤差。青線は CNTL、赤線は TEST、赤点はサンプル数を示す。エラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間を表す。CNTL、TEST 両実験で熱帯低気圧の中心位置を追跡出来たものだけを検証サンプルとしている。左の縦軸は、進路予測誤差 [km]、右の縦軸はサンプル数である。図上部の▽は予測誤差の差の統計的な有意性を示すもので、上段が時間方向の相関を考慮した場合、下段は時間方向の相関を考慮せず独立と仮定した場合の有意判定結果を示し、緑は統計的に有意であること、黒は統計的に有意ではないことを示す。夏実験期間、冬実験期間に含まれるサンプルを統計対象としている。

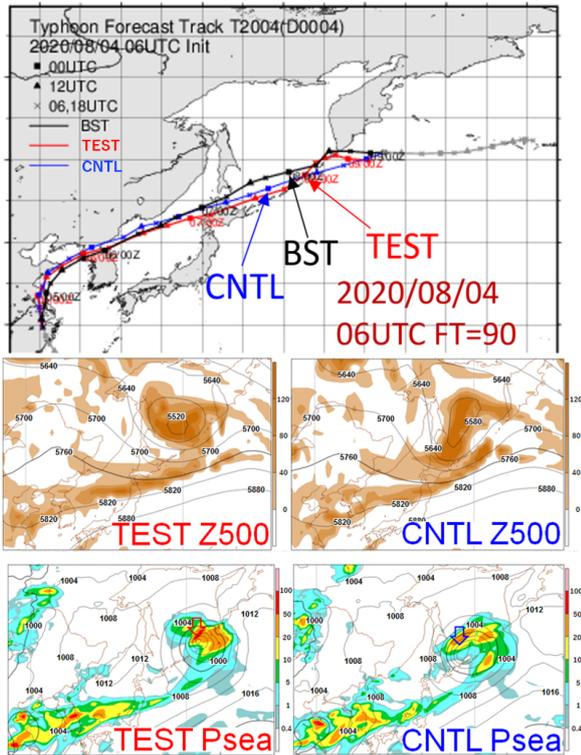


図 3.8.7 2020 年 8 月 4 日 06UTC 初期値における 2020 年台風第 4 号の 90 時間後の予測の比較。上段は TEST (赤線) と CNTL (青線) の進路予測を示している。BST (黒線) は気象庁ベストトラックである。中段は 500 hPa の FT=90 におけるジオポテンシャル高度 (等値線, 単位:m) と渦度 (カラー, 単位: s^{-1}) の予測、下段は海面更正気圧 (等値線, 単位:hPa) と前 6 時間降水量 (カラー, 単位:mm) の予測を示す。矢印は台風中心位置を示す。中段、下段ともに左は TEST、右は CNTL である。

また、第 4.5.2 項に示すように RTTOV を更新する開発を進めてきた。これら 2 つの開発を合わせて業務化試験を実施したところ、それぞれの個別の性能評価試験で得られたインパクトを反映し、想定通り全球数値予報システムの予測精度を向上させる結果が得られたため、2022 年 6 月に全球解析での現業利用を開始した。

極域衛星風については、さらなるデータ拡充を目指し、Suomi-NPP や NOAA20 に搭載されている VIIRS による極域 AMV の利用に関する開発を進めている。

参考文献

- EUMETSAT, 2016: AVHRR L2 Wind product ATBD. Tech. rep. <https://www.eumetsat.int/media/44490/>.
- Eyre, JR, 1991: A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. *ECMWF Tech. Memo* 176.
- 佐藤芳昭, 2011: 概論. 数値予報課報告・別冊第 57 号, 気象庁予報部, 1-6.
- 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.

3.9 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

3.9.1 はじめに

マイクロ波サウンダ ATMS は、米国大気海洋庁 (NOAA) が運用する次世代現業極軌道衛星 JPSS シリーズの Suomi-NPP および NOAA-20 に搭載されたセンサである (Goldberg et al. 2013)。ATMS は、米国の現業極軌道衛星シリーズ NOAA や欧州の現業極軌道衛星シリーズ Metop 等に搭載されたマイクロ波気温サウンダ AMSU-A およびマイクロ波水蒸気サウンダ MHS の後継センサで、AMSU-A および MHS と概ね対応する波長帯のチャンネルを合わせた 22 チャンネルで構成されている (表 3.9.1)。AMSU-A および MHS は、気温や水蒸気量の鉛直分布に関する情報を観測するセンサで、気象庁においては、全球解析やメソ解析および局地解析で利用している。ATMS の利用により、AMSU-A や MHS の利用と同様に、初期値における気温や水蒸気量の鉛直分布の精度向上が期待される。

ATMS の輝度温度データは、全球解析において同化利用しており (平原 2017; 村田・亀川 2020; 気象庁 2022b)、メソ解析や局地解析でも利用に向けた開発を進めた (気象庁 2021b)。その後の開発により、メソ解析では 2022 年 6 月 30 日に、局地解析では 2022 年 8 月 9 日に、それぞれ新規に利用を開始した。

ここでは、メソ解析および局地解析における ATMS の利用について概要を述べる。

3.9.2 メソ解析での利用

(1) 変更の概要

全球解析においては、MHS や ATMS の水蒸気チャンネル (183GHz 帯) は、雲・降水域も含めた全天同化により利用しているが (気象庁 2021a, 2022b)、メソ解析や局地解析においては、マイクロ波センサの全天同化は現在開発中であり (気象庁 2022a)、MHS は雲・降水の影響を受けない地点 (晴天域や薄い雲域) のデータのみを利用している。まずは早期に利用を開始するため、ATMS の水蒸気チャンネルについても、MHS と同様に雲・降水の影響を受けないデータのみを利用する。また、ATMS の気温チャンネルについては、メソ解析での利用においてバイアス補正に課題がみられるなど (気象庁 2021b)、引き続き開発を進める必要があることから、今回の変更では利用をしていない。つまり、メソ解析や後述する局地解析では、ATMS の水蒸気チャンネル (チャンネル 18~22) の雲・降水の影響を受けない地点のデータを同化する。ATMS の水蒸気チャンネルの利用方法は、次に示すように既に利用している MHS に準じた。

バイアス補正は、他の輝度温度データと同様、あらかじめスキャン位置ごとに見積もった固定のバイアスを取り除くスキャンバイアス補正と、観測条件やセン

サの経年変化等に応じて変化するバイアスを取り除く変分法バイアス補正の 2 段階で行う。スキャンバイアスは、衛星やセンサおよびチャンネルごとに異なる固有のものが大部分で、全球解析で使用している補正值と共通の値を用いて補正できることを確認している。変分法バイアス補正の説明変数は、他の輝度温度データと同様、地表面温度、軌道の上昇下降フラグ、衛星天頂角および定数を用いた。

観測誤差は、観測値と第一推定値の差異 (O-B) の標準偏差に応じて設定する。ATMS の O-B 標準偏差は、対応する MHS のチャンネルと比較し同程度であったことから、MHS と同じ設定値を用いた。MHS にはないチャンネルについては、O-B の標準偏差が概ね隣接する両チャンネルの中間程度の値であったことから、隣接する両チャンネルの中間値を設定した。

間引き距離は、MHS や他の輝度温度データと同様に 45km とした。

地表面や天候のタイプごとのデータの使用・不使用の設定も、MHS と同じ設定とし、雨域と判定された地点を除く、海上/海氷上/陸上/薄い雲域でデータを同化する。

(2) 性能評価試験

開発時点において最新の、2021 年 5 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の対照実験を CNTL とし、これに ATMS 水蒸気チャンネルの輝度温度データを同化した実験を TEST とした。実験期間は、夏季については 2020 年 6 月 26 日から 7 月 31 日、冬季については 2019 年 12 月 18 日から 1 月 31 日とした。

各解析時刻における、ATMS および MHS のデータ利用状況を示す (図 3.9.1)。MHS のデータが少ない 06UTC や 18UTC を中心に、ATMS のデータが利用されていることが確認できる。ATMS や MHS を搭載する極軌道衛星は、衛星が通過する地方時がほぼ同じになるような太陽同期軌道で運用されており、メソ解析では解析時刻によって利用できる衛星が概ね決まっている。ATMS を搭載する Suomi-NPP および NOAA-20 は、午後軌道 (日中は午後、夜間は未明に通過する) で運用されており、午前軌道で運用されている Metop などに搭載された MHS のデータが得られない時間帯においてデータが得られる。ATMS の利用により、解析時刻によらない安定的な解析・予測精度の維持が期待できる。

解析に用いられた ATMS 以外の各種観測データについて、O-B の標準偏差や利用データ数の CNTL に対する変化を確認した (図 3.9.2)。ATMS の水蒸気チャンネルと同様に対流圏中上層の水蒸気量に感度のある CSR や MHS について、O-B の標準偏差の減少や利用データ数の増加など、観測値と第一推定値との整合性

表 3.9.1 ATMS と AMSU-A および MHS のチャンネルの対応。左：ATMS、右：AMSU-A および MHS。

センサ	ch	中心周波数 (GHz)	センサ	ch	中心周波数 (GHz)
ATMS	1	23.8	AMSU-A	1	23.8
ATMS	2	31.4	AMSU-A	2	31.4
ATMS	3	50.3	AMSU-A	3	50.3
ATMS	4	51.76			
ATMS	5	52.8	AMSU-A	4	52.8
ATMS	6	53.596 ± 0.115	AMSU-A	5	53.596 ± 0.115
ATMS	7	54.4	AMSU-A	6	54.4
ATMS	8	54.94	AMSU-A	7	54.94
ATMS	9	55.5	AMSU-A	8	55.5
ATMS	10	f0 = 57.290344	AMSU-A	9	f0 = 57.290344
ATMS	11	f0 ± 0.217	AMSU-A	10	f0 ± 0.217
ATMS	12	f0 ± 0.3222 ± 0.048	AMSU-A	11	f0 ± 0.3222 ± 0.048
ATMS	13	f0 ± 0.3222 ± 0.022	AMSU-A	12	f0 ± 0.3222 ± 0.022
ATMS	14	f0 ± 0.3222 ± 0.010	AMSU-A	13	f0 ± 0.3222 ± 0.010
ATMS	15	f0 ± 0.3222 ± 0.0045	AMSU-A	14	f0 ± 0.3222 ± 0.0045
ATMS	16	88.2	AMSU-A	15	89.0
ATMS	17	165.5	MHS	1	89.0
ATMS	18	183.31 ± 7.0	MHS	2	157.0
ATMS	19	183.31 ± 4.5	MHS	5	190.311
ATMS	20	183.31 ± 3.0			
ATMS	21	183.31 ± 1.8	MHS	4	183.31 ± 3.0
ATMS	22	183.31 ± 1.0			
			MHS	3	183.31 ± 1.0

が向上した特徴がみられ、ATMS の水蒸気チャンネルの利用による第一推定値の精度向上を示す結果が得られた。また、冬季において、ラジオゾンデ観測に対する解析値および第一推定値の高度 700 hPa 付近の乾燥バイアスが減少（水蒸気量が増加）することが確認された。

予測精度について、解析雨量やラジオゾンデ、地上観測を用い、統計的な検証を実施した。TEST と CNTL の差異は顕著ではなく概ね中立の結果であったものの、夏実験については予測初期（～6 時間程度）において 500～300hPa の混合比の精度に改善の傾向が見られた。

(3) 業務化試験

本変更と同時期に現業化する全ての改良項目を組み合わせた業務化試験を実施し、現業システムにおける実際の運用を想定した総合的な改良の効果を確認した。同時期に現業化する改良項目として、メソ数値予報システムでは本変更の他、GPM/DPR の利用手法改良（第 3.10 節）および RTTOV 13 への更新（第 4.5.2 項）が含まれる。全球解析では、Dual-Metop AMV の利用（第 3.8 節）および RTTOV 13 への更新（第 4.5.2 項）があり、これらを組み合わせた全球数値予報システムの出力を、メソ数値予報システムの側面境界値として用いた。当時の現業システム相当の実験システムを CNTL（旧システム）とし、CNTL に上記改良を適用した実験システムを TEST（新システム）とする。実験期間は、夏季については 2020 年 6 月 26 日から 7

月 31 日、冬季については 2020 年 12 月 27 日から 1 月 31 日とした。

業務化試験においても本変更の性能評価試験と同様に、第一推定値における対流圏中上層の水蒸気量や、夏実験の予測初期における 500～300hPa の混合比などに精度の改善がみられることを確認した。これに加え、解析雨量を参照値とした検証により、夏実験の日本域における降水予測について、30～50mm/3h の降水に見逃し率や空振り率の減少、エクイタブルスレットスコアの増加などの改善傾向が確認された。この改善は、各改良項目別の性能評価試験や、境界値は変更せずにメソ解析の改良を全て組み合わせた総合性能評価試験ではみられなかったことから、改良を適用した全球数値予報システムを側面境界値として用いたことによる改善と考えられる。

図 3.9.3 に、2020 年 7 月 4 日の熊本・鹿児島での大雨特別警報事例における降水予測の改善を示す。本事例における気象状況は、梅雨前線が東シナ海から九州を通過して伊豆諸島に伸び、梅雨前線上の低気圧が 4 日明け方から昼前にかけて九州北部を通過した。その際、低気圧や前線に向かって暖かく湿った空気が入り込んで大気の状態が不安定となり、熊本県と鹿児島県境付近を中心に 6 回にわたり記録的短時間大雨情報が発表されたほか、4 日 4 時 50 分～11 時 50 分にかけて、熊本県と鹿児島県に大雨特別警報が発表された。

TEST では、解析雨量との比較では過小であるもの

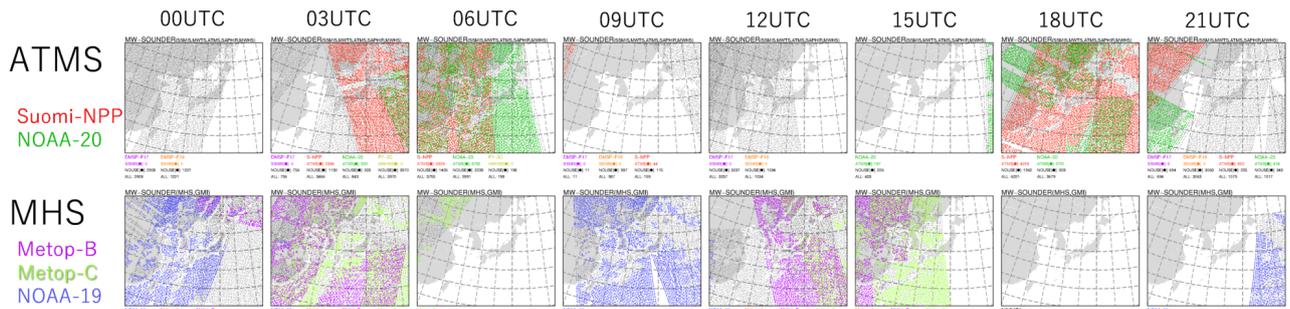


図 3.9.1 メソ解析で利用される ATMS および MHS の分布 (2020 年 6 月 26 日の例)。上段: ATMS、下段: MHS。左列からそれぞれ、解析時刻 00,03,06,09,12,15,18,21UTC におけるデータの分布を示す。色の違いは衛星を示す。

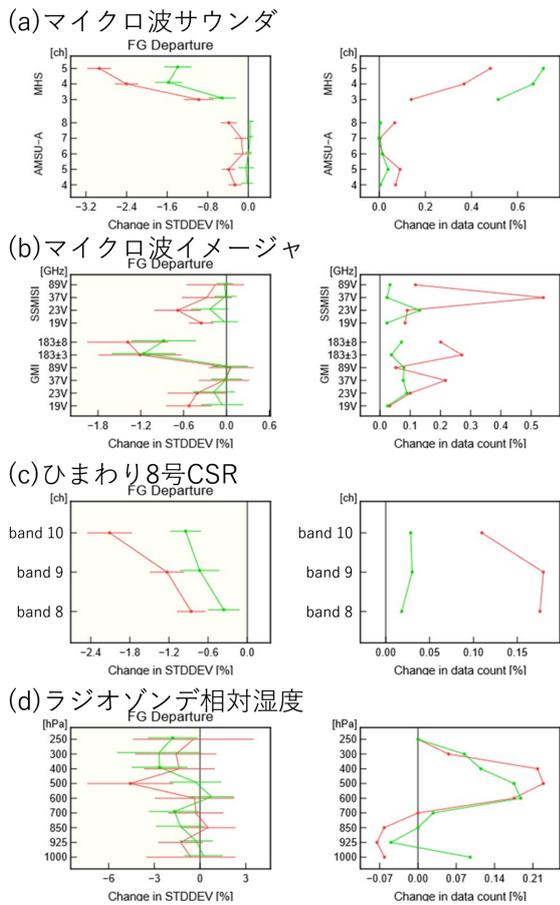


図 3.9.2 メソ解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差 (左列) と利用データ数 (右列) の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。 (a) マイクロ波サウンダ MHS および AMSU-A、(b) マイクロ波イメージャ、(c) ひまわり 8 号 CSR、(d) ラジオゾンデ相対湿度。縦軸は (a)(c) はチャンネル番号、(b) は周波数 (GHz) および偏波、(d) は気圧高度を表す。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。

差異は、境界値を変更していない総合性能評価試験との比較から、境界値として用いた全球数値予報システムの改良の効果であることを確認した。このことから、メソモデルの予測では、観測データの利用に加え、上流にあたる全球モデル境界値の影響も大きいことが示唆される。

3.9.3 局地解析での利用

(1) 変更の概要

メソ解析と同様に、局地解析においても ATMS の水蒸気チャンネルの雲・降水の影響を受けないデータを同化する改良を行った。手法や設定等についてもメソ解析と同様に、既に利用されている MHS に準じた。詳細は、前項のメソ解析での記述を参照されたい。

(2) 性能評価試験

開発時点において最新の、2022 年 3 月時点の現業局地数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに ATMS 追加利用の変更を加えた実験 (TEST) の比較を行った。実験期間は 2020 年 7 月 1 日から 7 月 15 日 (夏実験)、2020 年 1 月 10 日から 2020 年 1 月 21 日 (冬実験) とし、解析時刻間隔は 3 時間とした。

ATMS の観測データは、メソ解析と同様に、MHS の観測データが得られない時間帯に得られ、ATMS と MHS は相補的な関係であることを確認した。

解析に用いられた ATMS 以外の各種観測データについて、第一推定値との差異 (O-B) の標準偏差や利用データ数の CNTL に対する変化を確認した (図 3.9.4)。メソ解析と同様に、対流圏中上層の水蒸気に感度のある CSR や MHS を中心に、O-B の標準偏差の減少や利用データ数の増加など、観測値と第一推定値との整合性が向上した特徴がみられ、第一推定値の精度向上を示す結果が得られた。

予測精度については、解析雨量やラジオゾンデ、地上観測を用い、統計的な検証を実施した結果、概ね中立であった。

の、CNTL には見られなかった強雨域が線状に表現され、3 時間 100 mm 以上の降水を予測した。CNTL との差異として、九州西海上で可降水量が増加し、上層トラフが深くなっていることが確認された。これらの

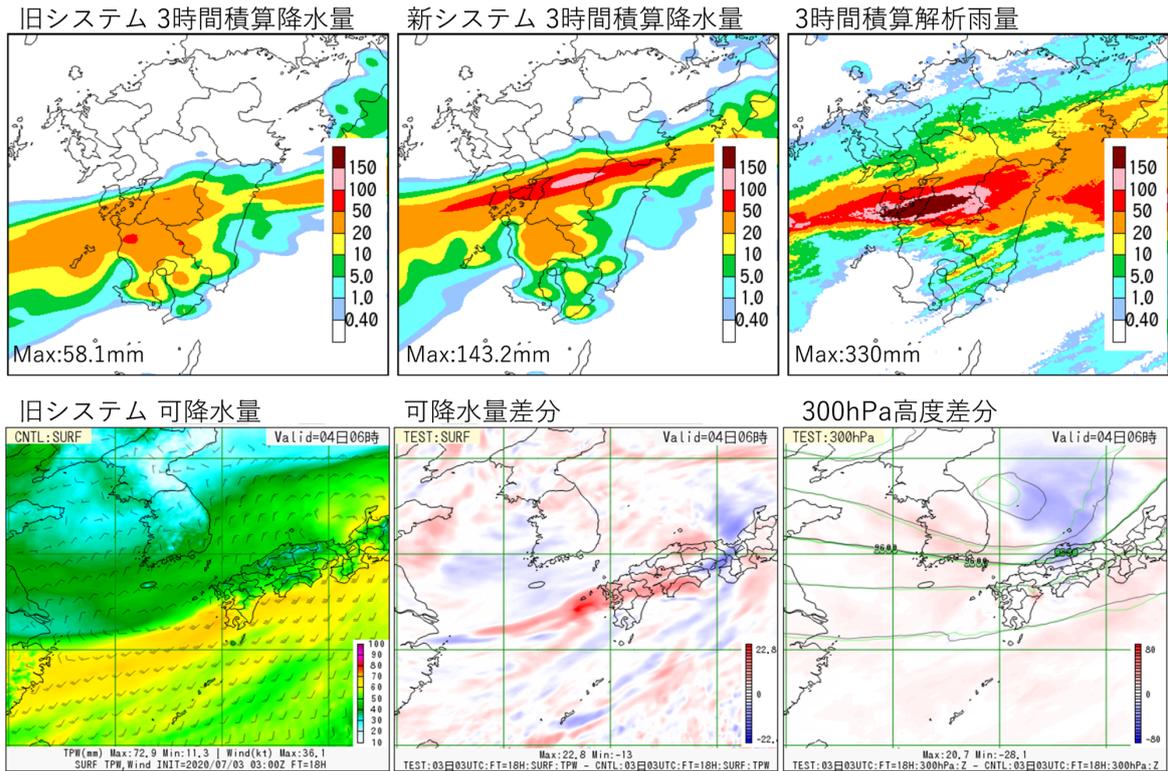


図 3.9.3 メソ数値予報システムにおける降水の改善事例。2020 年 7 月 3 日 03UTC を初期値とした 18 時間後予測（7 月 3 日 21UTC（4 日 06JST））。左上：CNTL（旧システム）における前 3 時間雨量、中央上：TEST（新システム）における前 3 時間雨量、右上：3 時間積算解析雨量、左下：CNTL における可降水量、中央下：TEST と CNTL の可降水量の差、右下：TEST と CNTL の 300 hPa 高度の差。

(3) 業務化試験

局地数値予報システムについてもメソ数値予報システムと同様に、実際の運用を想定した総合的な改良の効果を確認するため、同時期に現業化されるすべての改良を組み合わせた業務化試験を実施した。局地解析においては、本変更の他、RTTOV 13 への更新（第 4.5.2 項）が含まれる。局地解析の変更の現業化時期は、全球解析およびメソ解析の変更から約 1 か月後であるが、一連の変更として同時期とみなし、前項の全球解析およびメソ解析の変更を含めて評価した。当時の現業システム相当の実験システムを CNTL（旧システム）とし、CNTL に上記改良を適用した実験システムを TEST（新システム）とする。全球解析およびメソ解析の変更内容については前項で述べた通りで、その変更を適用したメソ数値予報システムからの出力を局地数値予報システムでの第一推定値や境界値として用いた。なお、局地解析において気象場に依存した背景誤差に用いるメソアンサンブル予報システム（MEPS）の出力については、今回のメソ解析の変更（観測データの利用の変更）による特性への影響は小さいものとみなし、TEST においても CNTL と同じ設定とした。

業務化試験においても性能評価試験と同様に、第一推定値における対流圏中上層の水蒸気量に精度の改善がみられることを確認した。ただし、性能評価試験よ

り改善の程度が大きいことや、データを同化する前の第一推定値（スロット 0）の時点でも改善がみられたことから、前項で述べた主に ATMS の利用によるメソ解析の改善も大きく寄与していると考えられる。

図 3.9.5 に、2020 年 7 月 4 日の熊本・鹿児島での大雨特別警報事例における降水予測の改善を示す。熊本県南部の帯状の降水域は、CNTL では東西に分離しているが、TEST では東西に連続した一連の降水域となり実況に近づいた。TEST と CNTL の差異を確認したところ、対流圏中層の水蒸気量に差異が見られた。図中 600 hPa の相対湿度の分布には、相対湿度の少ないところではより水蒸気を少なく、多いところでは多くする変化が見られており、この変化が降水域の表現に改善をもたらしたと考えられる。この変化の起源を上流にさかのぼると、メソ解析における ATMS の同化によりもたらされていたことが確認された。メソ解析で ATMS の水蒸気チャンネルが同化されることで、上流で大気中層付近の水蒸気場が改善され、その効果が局地数値予報システムにも波及し、降水予測が改善したと考えられる。

3.9.4 まとめと今後の課題

メソ解析および局地解析において、マイクロ波サウンダ ATMS の水蒸気チャンネルを新規に利用し、効果について確認した。その結果、既に利用中の同種のセ

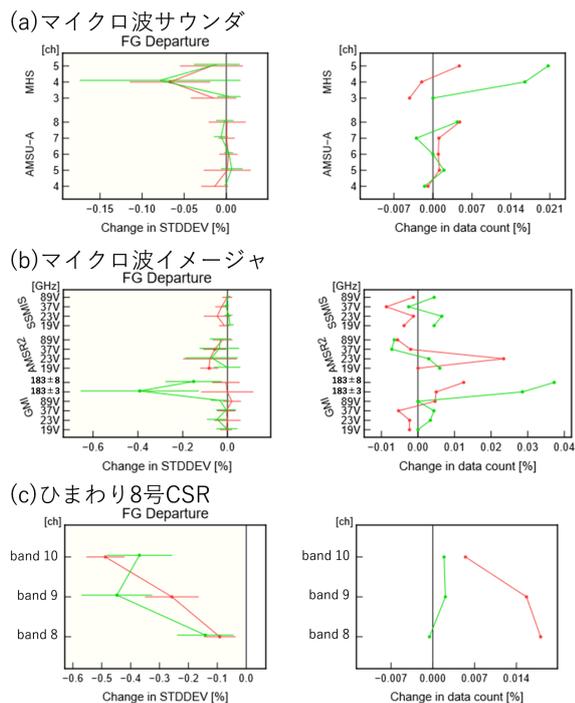


図 3.9.4 局地解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差 (左列) と利用データ数 (右列) の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。(a) マイクロ波サウンダ MHS および AMSU-A、(b) マイクロ波イメージャ、(c) ひまわり 8 号 CSR。縦軸は (a)(c) はチャンネル番号、(b) は周波数 (GHz) および偏波を表す。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。

ンサである MHS の観測データが得られない時間帯に観測データが得られることが確認された。ATMS 単体の新規利用による予測精度については、顕著な改善は見られず概ね中立であったものの、第一推定値については精度の向上が確認できた。また、側面境界値として利用する全球数値予報システムの改良も含めた、メソ数値予報システムでの試験、さらにメソ数値予報システムでの改良を反映した、局地数値予報システムでの試験を行ったところ、側面境界値の改善を通して線状降水帯の予測精度が改善する事例を確認した。メソ、局地の各数値予報システムの精度向上には、側面境界値を与える上流の数値予報システム (メソの場合は全球、局地の場合はメソ) の予測精度向上も重要であると言えよう。

この結果を踏まえ、メソ解析では 2022 年 6 月 30 日に、局地解析では 2022 年 8 月 9 に、それぞれ ATMS の利用を開始した。

ATMS の利用に関する今後の課題として、気温チャンネルの利用が考えられる。バイアス補正にみられる課題の調査や対処の検討、RTTOV の更新による改善の確認などを行う予定である。また、水蒸気チャンネルについては、マイクロ波センサの全天同化での利用

に向けて取り組んでおり (気象庁 2022a)、観測データの持つ情報をさらに引き出し、予測精度の向上をねらう開発を進める。

参考文献

- Goldberg, Mitchell D, Heather Kilcoyne, Harry Cikanek, and Ajay Mehta, 2013: Joint Polar Satellite System: The United States next generation civilian polar-orbiting environmental satellite system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 13–463.
- 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.
- 気象庁, 2021a: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトグループの全球解析への導入. 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, 23–28.
- 気象庁, 2021b: メソ解析におけるマイクロ波サウンダ ATMS 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, 106.
- 気象庁, 2022a: メソ解析におけるマイクロ波輝度温度の全天同化. 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, 110–111.
- 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. 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, 40–43.
- 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.

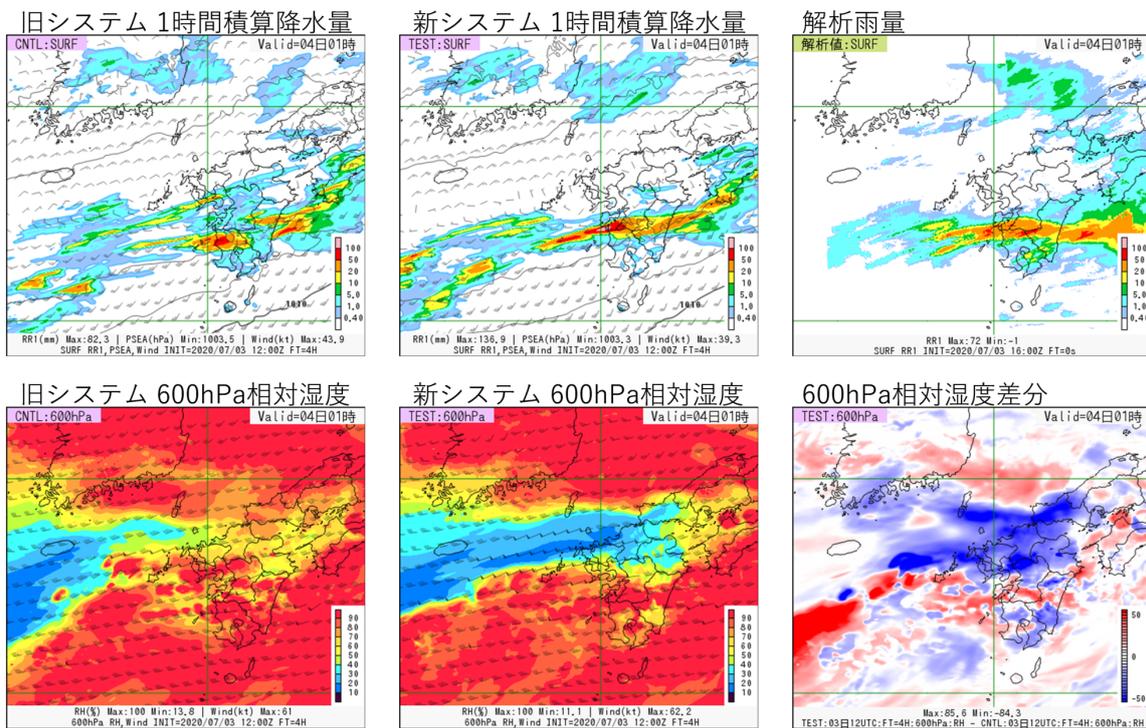


図 3.9.5 局地数値予報システムにおける降水の改善事例。2020年7月3日12UTCを初期値とした4時間予測(7月3日16UTC(4日01JST))。左上: CNTL(旧システム)における前1時間雨量、中央上: TEST(新システム)における前1時間雨量、右上: 解析雨量、左下: CNTLにおける600hPa相対湿度、中央下: TESTにおける600hPa相対湿度、右下: 600hPa相対湿度のTEST-CNTL。

3.10 メソ解析における GPM/DPR の利用方法の変更

3.10.1 GPM/DPR のスキャンパターン更新

日米を中心とした国際協力の下で進められている全球降水観測計画 (GPM) 主衛星に搭載された二周波降水レーダー (DPR) は Ku 帯 (13.6GHz、KuPR) と Ka 帯 (35.5GHz、KaPR) の二つの周波数帯で熱帯から中高緯度帯までの降水を観測することが可能である¹。KaPR には感度の異なる二周波観測 (KaMS) と高感度観測 (KaHS) があり、気象庁ではこれらの観測から得られる反射強度データをメソ解析で利用している (幾田 2016)。

2018 年 5 月 21 日以降、それまで 245km 観測幅の中心部の 125km 幅においてのみ実施していた Ku 帯と Ka 帯の 2 周波による降水観測を、245km の観測幅全体で実施するようにスキャンパターンが更新された。更新前は KaMS と KaHS の観測エリアが重なっていたため高感度の KaHS のみをデータ同化に利用していたが、新たに KaMS を利用することによりメソ解析の精度改善が期待できる。

本節では、GPM 主衛星に搭載された DPR のスキャンパターン更新に伴い、これまで利用していなかった KaMS の反射強度データの新規利用がメソ数値予報システムへ与える影響についての調査結果を報告する。

3.10.2 GPM/DPR の反射強度データの同化手法及び QC 処理について

気象庁では、以下の手順で GPM/DPR による反射強度データから推定した相対湿度 (以降、疑似相対湿度とする) を同化に使用している。同化手法については Ikuta et al. (2021) などを参照されたい。

- レーダーシミュレータで第一推定値の反射強度 (Ka 帯・Ku 帯) を推定²。
- 観測値をアウターモデル格子 (5km) で平均。
- 気温別に反射強度の D 値平均を計算して補正值とし、反射強度観測値から観測地点の気温に対応した補正值を差し引くことにより、バイアス補正を実施。
- 第一推定値の反射強度・相対湿度・気温の関係を用いて、カーネル密度推定に基づいた最尤推定によりバイアス補正済みの反射強度観測値から疑似相対湿度を算出。
- 水平 15km (インナーモデル格子の解像度)、鉛直 500m 間隔で疑似相対湿度を平均。
- QC 処理をパスした疑似相対湿度を疑似観測としてデータ同化に利用。

¹ 南北 65 度より高緯度は観測してない。

² 雨・雪・霰のみ計算対象としている。降雨減衰補正済みの観測値が通報されているため、降雨減衰補正は行っていない。また、メソモデルの水平解像度が 5km と粗いため、レーダービームの屈折や広がりには考慮していない。

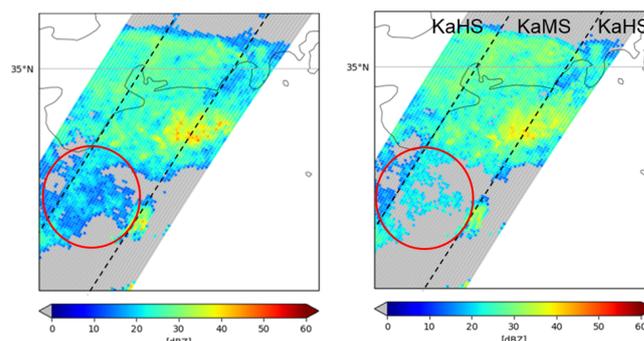


図 3.10.1 GPM/DPR の観測例。左は KuPR、右は KaPR によるレーダー反射強度の観測である。KuPR の観測をもとに、KaHS の観測と KaMS の観測に違いが見られる領域の例を赤丸で示す。

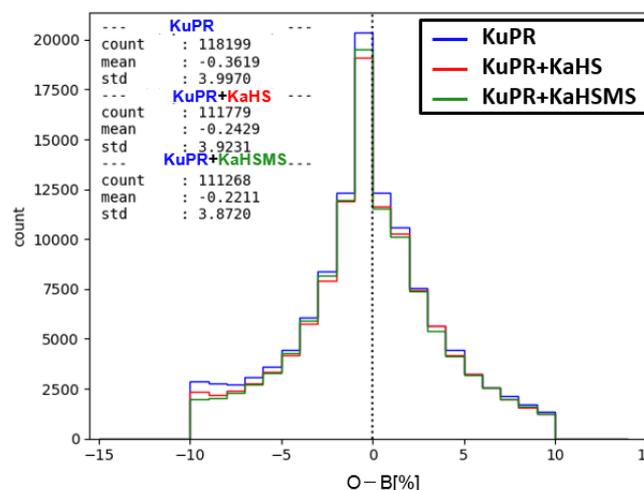


図 3.10.2 疑似相対湿度の D 値ヒストグラム。青線、赤線、緑線はそれぞれ KuPR のみ、KuPR と KaHS、KuPR、KaHS 及び KaMS を同化に利用した場合のヒストグラムである。統計期間は 2020 年 7 月 1 日から 2020 年 7 月 31 日。

なお、疑似相対湿度の観測誤差は 5% としている。GPM/DPR の反射強度データに対する QC 処理を以下に示す。

- 反射強度は観測値・第一推定値ともに、検出限界以下のノイズの利用を避けるため 15dBZ 未満のデータは使用せず、またクラッタの混入をさけるため 50dBZ より大きいデータも利用しない。
- 気温 0 度未満で算出された疑似相対湿度は利用しない³。
- D 値の絶対値が閾値より大きいものは利用しない⁴。
- 反射強度の D 値と疑似相対湿度の D 値が逆符号、または差が大きい場合は疑似相対湿度の精度が悪い可能性が考えられるため、利用しない。

³ 固相 (雪、霰) から求めた反射強度はモデルバイアスが大きい。

⁴ 反射強度については 30dBZ、疑似相対湿度については 10% を閾値としている。

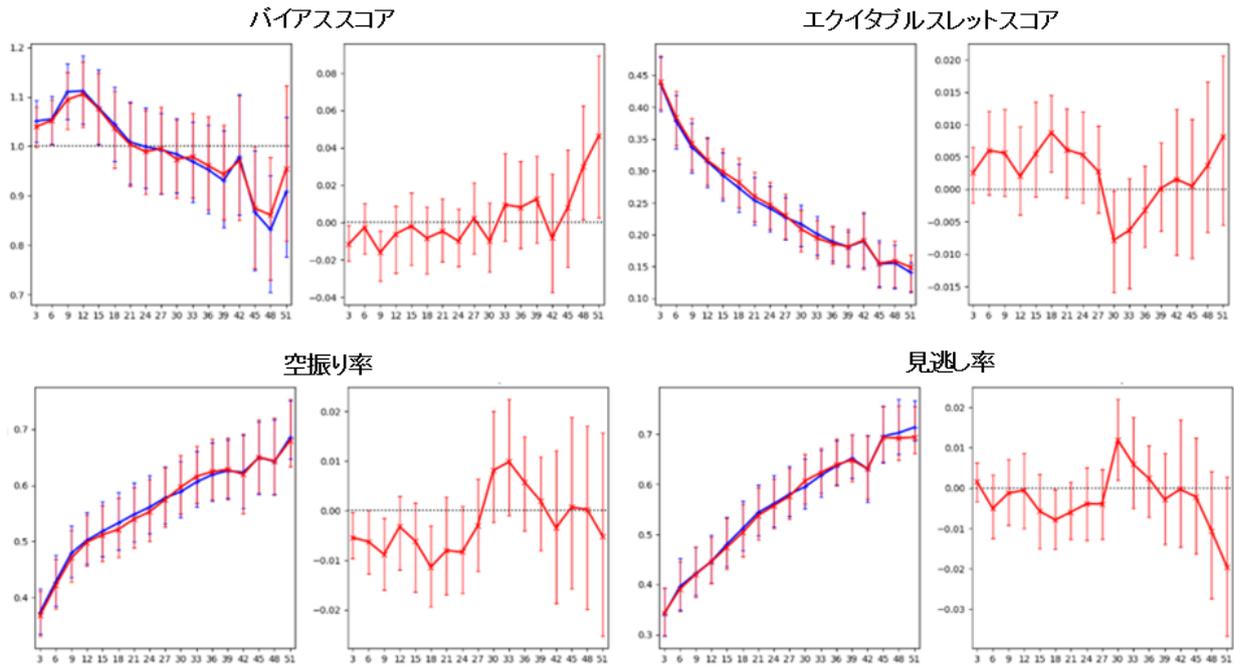


図 3.10.3 解析雨量を参照値とした予測時間別の 3 時間降水量 5 mm の降水予測スコア (20 km 平均)。上段左: バイアスコア、上段右: ETS、下段左: 空振り率、下段右: 見逃し率。各パネルの左は、KuPR (青) KaHSMS (赤) のスコアを、右は KaHSMS-KuPR のスコアの差分を示しており、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。横軸は予測時間 [hour]。統計期間は 2020 年 7 月 1 日から 2020 年 7 月 31 日。

これまで、KaMS は同化に利用されていなかったため QC を実施していなかった。KuPR, KaMS, KaHS、地上レーダー観測を比較して調査したところ (図 3.10.1)、弱い降水以外では KaHS と KaMS の強度や降水分布に特に違いは見られなかったため、Masaki et al. (2022) を参考に KaMS の利用下限値を 20dBZ に設定した。

下限値チェック QC 実施後は、KaHS と同様の QC 処理を KaMS に適用し、前述の同化手法におけるアウターモデル格子での平均処理についても KaMS, KaHS が混在する領域ではこれらをまとめて平均することとした。

3.10.3 性能評価試験

2021 年 5 月時点のメソ数値予報システムをベースにしたコントロール実験 (KuPR) に KaHS を追加した実験 (KaHS) と KaHS 及び KaMS を追加した実験 (KaHSMS) を実施して、性能評価試験を行った⁵。評価期間は 2020 年 7 月 1 日から 7 月 31 日である。

図 3.10.2 に KuPR, KaHS, KaHSMS の疑似相対湿度の D 値ヒストグラムを示す⁶。図から KaHS を利用する (赤) と、疑似相対湿度の負の大きな D 値が減少し

⁵ バイアス補正処理に関する不具合の修正も同時に導入した。修正の内容は、バイアス補正の際に観測値/第一推定値の平均値をかける処理となっていたところを、D 値平均値を引く処理にするというもの。

⁶ 降水領域のみでの観測であるため、観測値、第一推定値ともに相対湿度が 100 % に近い事例が多くなり、ガウス分布に比べ O-B=0 付近における頻度が多くなると考えられる。

ていることがわかる。この結果は Ikuta et al. (2021) と整合している。KaMS も利用する (緑) ことで疑似相対湿度の負の大きな D 値がさらに減少し、D 値平均と D 値標準偏差もやや減少することが確認できる。

評価期間中の KuPR と KaHSMS の降水予測スコアを図 3.10.3 に示す。バイアスコアは FT=24h くらいまで減少して、正バイアスが縮小傾向となっており、それ以降も負バイアスを縮小する傾向が見られる。更に、空振りと見逃しが減少することで、ETS が改善した。

3.10.4 まとめ

GPM/DPR のスキャンパターン更新を受け、これまで使用していなかった KaMS の反射強度データの新規利用を開始し、それに伴う QC 処理の見直しを行った。KaMS については、反射強度データの同化での利用下限値を 20dBZ に設定した。更に、下限値チェック後に KaHS と合わせてアウターモデル格子で平均するように処理を変更したところ、疑似相対湿度の推定精度が向上した。

反射強度バイアス補正の不具合を修正したうえで性能評価試験を実施したところ、予測前半を中心に降水予測スコアが改善するインパクトが確認できたことから令和 4 年 6 月にメソ解析における GPM/DPR の利用手法の変更を現業化した。

参考文献

幾田泰醇, 2016: GPM/DPR データの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, 51–53.

Ikuta, Y., K. Okamoto, and T. Kubota, 2021: One-dimensional maximum-likelihood estimation for spaceborne precipitation radar data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 858–875.

Masaki, T., T. Iguchi, K. Kanemaru, K. Furukawa, N. Yoshida, T. Kubota, and R. Oki, 2022: Calibration of the Dual-Frequency Precipitation Radar Onboard the Global Precipitation Measurement Core Observatory. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **60**, 1–16.

3.11 メソモデルガイダンスの改良と予報時間延長

3.11.1 はじめに

メソモデル (MSM2203) は 2022 年 3 月 22 日に鉛直層増強や物理過程の改良が、2022 年 6 月 16 日に予報時間 (FT) の延長が行われた (第 3.3 節)。メソモデルから算出される各ガイダンス (MSM ガイダンス) の作成においても、この新たなメソモデルの利用を開始し、初期時刻 00,12UTC の FT をこれまでの 51 時間までから 78 時間先まで延長した。また降水、視程ガイダンスについては要素の追加や精度改善のための改良も実施した。ここではこれらのガイダンスの変更内容と精度検証の結果を説明する。

3.11.2 降水ガイダンス

(1) 改良の概要

MSM 降水ガイダンスについては、3 時間平均降水量 (MRR3)、6 時間降水確率 (PoP6)、1, 3, 24 時間最大降水量 (RMAX31, RMAX33, RMAX24) の FT を 78 時間先まで延長するとともに、今回のモデル改良に伴って MRR3 の頻度バイアス補正の閾値の見直し、RMAX24 の線形重回帰係数の品質管理手法の改良と再計算を実施した。

また部内利用を目的として、新たに 48 時間最大降水量 (RMAX48)、72 時間最大降水量 (RMAX72) の作成を開始した。作成方法は、まず 3 時間平均降水量 (MRR3) を 48 時間、72 時間積算したものに対してそれぞれ頻度バイアス補正 (高田 2018) を行って 48 時間平均降水量 (MRR48)、72 時間平均降水量 (MRR72) を求め、得られた平均降水量を説明変数の一つとして線形重回帰によって最大降水量を算出する。この方法は 24 時間平均降水量 (MRR24) から RMAX24 を求める方法 (白山 2018) と同じであり、使用する他の説明変数も RMAX24 の予測に用いる変数と同一である。線形重回帰式の係数は 2019 年 7 月～2021 年 12 月の MSM2203 再予報結果を用いて決定した。

(2) 検証結果

2021 年 1 年間の MSM2203 の再予報結果を用いて、降水ガイダンスの統計検証を行った¹。ここでは各平均降水量ガイダンスの検証結果を紹介する。

図 3.11.1 に MRR3 の検証結果を、モデル 3 時間降水量の結果とともに示した。今回延長された FT=54～78 とそれより前とで MRR3 の BI や ETS の変化は滑らかであり、FT 延長に伴う不自然な精度変化は見られない。MRR3 の ETS は、閾値 1 mm ではモデル降水量の ETS を上回り、10 mm や 30 mm ではほぼ中立である。一方、BI は 1 mm、10 mm はほぼ中立、30 mm

¹ この期間は最大降水量ガイダンスの線形重回帰式の係数の計算期間と重複するが、最大降水量ガイダンスの統計検証 (本稿では結果の説明は省略) に関しては別途交差検証も行って、結果が信頼できることを確認した。

では予報期間後半で過少傾向が見られる。

同様に MRR24 の精度検証を行った結果を図 3.11.2 に示した。モデル降水量は 100 mm 以上の予測頻度が過多となっているが、ガイダンスの BI は概ね 1 となっており適正な頻度に修正できていることがわかる。ETS を見るとモデル降水量と比較して概ね同等、弱雨では若干の改善という結果となった。図 3.11.3 には MRR48 と MRR72 の検証結果をモデル降水量の結果とともに示した。ETS では降水量 100～200 mm を除き概ねモデル降水量を改善できている。またモデルで予測されている過大な降水量を、ガイダンスでは適切に修正できていることが確認できる。

図 3.11.4 には、日本の南海上の台風からの暖湿気の流入によって東日本から西日本にかけての太平洋側で大雨となった 2021 年 9 月 4 日の最大降水量ガイダンス (上段: RMAX72、下段: RMAX48) の予測事例を示した。実況の最大降水量の分布 (右列) と比べモデル最大降水量 (左列) はピークの値が過大であるが、最大降水量ガイダンス (中列) ではピークの値が抑えられ、より実況の雨量分布・強度に近いものへ修正されている。

3.11.3 視程ガイダンス (格子形式)

(1) 改良の概要

MSM 視程ガイダンス (格子形式) は、前 3 時間最小視程を格子点ごとに予測するガイダンスである。このガイダンスは MSM の雲水量や降水量などから計算した光消散係数による診断式を用いている (後藤 2018)。今回の MSM の更新とあわせて、2022 年 3 月に診断式の変更を、2022 年 6 月に FT の延長を行った。診断式の変更では、雲の消散係数の計算に用いる雲水量の積算を行う層を、従来は一律にモデル面第 2～9 層としていたが、無降水格子については第 2～5 層とした。また各光消散係数の計算に用いる定数の見直しを行って表 3.11.1 に記載のように修正した。従来の式 (気象庁 2022) から変更された箇所を赤字で示している。

(2) 検証結果

図 3.11.5 に陸上、海上それぞれでの視程ガイダンスの統計検証を行った結果を示す。検証期間は 2019 年 7 月 1 日～2021 年 6 月 30 日である。ただし、係数調整を行った期間 (夏: 2019 年 8 月 1 日～10 月 20 日、冬: 2019 年 12 月 23 日～2020 年 2 月 29 日) を除いている。検証では、陸上は航空気象定時観測気象報、航空気象特別観測気象報、航空気象観測所気象報の、海上は海上実況気象通報の視程観測値を用いた。今回の予測手法の変更によって、陸上は ETS、BI ともに改善している。また海上は一部改善しているが概ね中立となった。

図 3.11.6 には 2021 年 1 月から 12 月まで 1 年間の航空気象観測通報を用いた予報時間別の検証結果を示した。延長された FT に対して、51 時間までと予測の傾向に大きな違いはなく妥当な結果が得られている。また

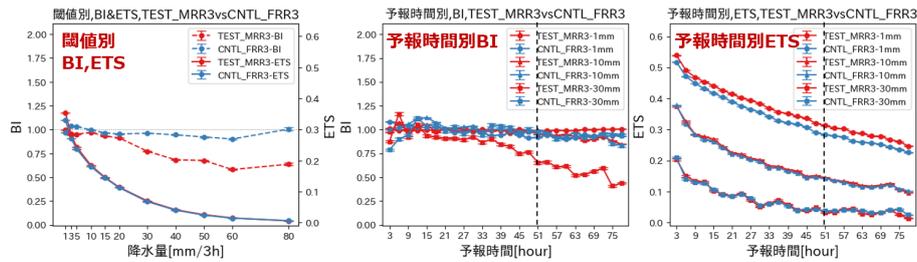


図 3.11.1 3 時間平均降水量ガイダンス（赤）と MSM3 時間平均降水量（青）の、2021 年 1 年間の統計検証。（左）降水量別の BI（破線）と ETS（実線）。（中）FT と降水量別の BI。（右）FT と降水量別の ETS。

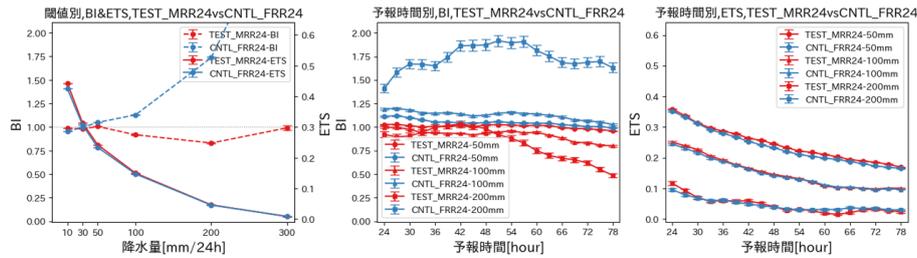


図 3.11.2 24 時間平均降水量ガイダンス（赤）と MSM24 時間降水量（青）の、2021 年 1 年間の統計検証。（左）降水量の閾値別の BI（破線）と ETS（実線）。（中）FT と降水量別の BI。（右）FT 別の ETS。

表 3.11.1 MSM 視程ガイダンス（格子形式）の計算に用いる光消散係数の計算式。今回変更された定数を赤字で示した。その他の変更内容については本文の説明を参照。

視程 $VIS = 3 / (\sigma_p + \sigma_c + \sigma_r + \sigma_s)$	
浮遊塵による光消散係数	
$\sigma_p = 0.35(1 - RH)^{-0.2}$	
雲粒による光消散係数	
$\sigma_c = \begin{cases} 8.0 \times QC^{0.9} & (\text{無降水格子}) \\ 5.0 \times QC^{0.9} & (\text{降水格子}) \end{cases}$	
雨粒による光消散係数	
$\sigma_r = 0.47 \times RAIN^{0.5}$	
雪による光消散係数	
$\sigma_s = 8.0 \times SNOW^{0.7} + 0.07 \times FF$	

説明変数

QC	雲水量の積算（無降水格子はモデル面第 2～5 層、降水格子は第 2～9 層）
RAIN	前 1 時間降水量（雨）
SNOW	前 1 時間降水量（雪、霰、雲氷）
RH	モデル面第 1 層の相対湿度
FF	モデル面第 1 層の風速

GSM 視程ガイダンスの検証結果と比較すると、MSM 視程ガイダンスは全ての FT で ETS が大きく、BI は 1 に近い値となっていることがわかる。

図 3.11.7 には茨城県南部から千葉県北部にかけて 200～300 m まで視程が低下した 2019 年 10 月 29 日 18:00UTC に対する新旧の診断式による視程ガイダンスの予想図を示した。診断式を改良した分布図は 800 m 以下の視程をより広い範囲で予測できていることがわかる。

3.11.4 その他の MSM ガイダンス

上記以外の MSM 気温（時系列、最高、最低）、風（定時風、最大風、最大瞬間風速）、発雷確率、降雪量、湿度（時系列、平均、実効、最小）、天気ガイダンスは、予測手法は変更せずに FT の延長を 2022 年 6 月に行った。FT により係数を層別化しているガイダンス（時系列気温、発雷確率、時系列湿度）については、MSM 再予報結果を用いて延長された FT の係数を求めた。最高、最低気温ガイダンスは、00UTC 初期値では翌々日の最高気温と 3 日後の最低気温を、12UTC 初期値では 3 日後の最低気温と最高気温の予測を開始した（表 3.11.2）。また平均、実効、最小湿度ガイダンスについては、00UTC 初期値では翌々日の、12UTC 初期値では 3 日後の予測を開始した（表 3.11.3）。

これらのガイダンスに対して、2021 年 1 月から 12 月までの 1 年間（降雪量ガイダンスは 2021 年 12 月から 2022 年 2 月の 3 か月間）の統計検証や事例検証を実施して精度の確認を行った。FT を延長した初期時刻 00,12UTC についての各ガイダンスの統計検証結果を図 3.11.8～図 3.11.13 に示す。延長された FT はそれ以前と比べて急激な精度の低下は見られず、それぞれ概ね妥当な結果となっている。

参考文献

- 後藤尚親, 2018: 視程ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 185–195.
- 気象庁, 2022: 視程ガイダンス. 令和 3 年度数値予報解説資料集, 気象庁情報基盤部, 540.
- 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 95–118.

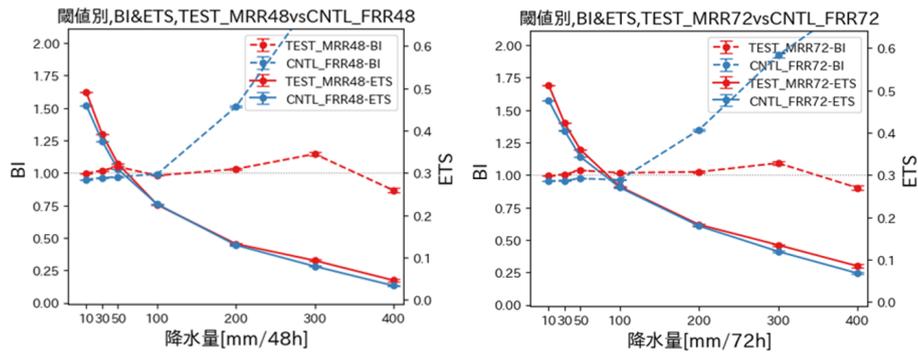


図 3.11.3 48 時間平均降水量（左）、72 時間平均降水量（右）の、2021 年 1 年間の統計検証。ガイダンス（赤線）と MSM の降水量（青線）。縦軸は BI（破線）と ETS（実線）。横軸は降水量。

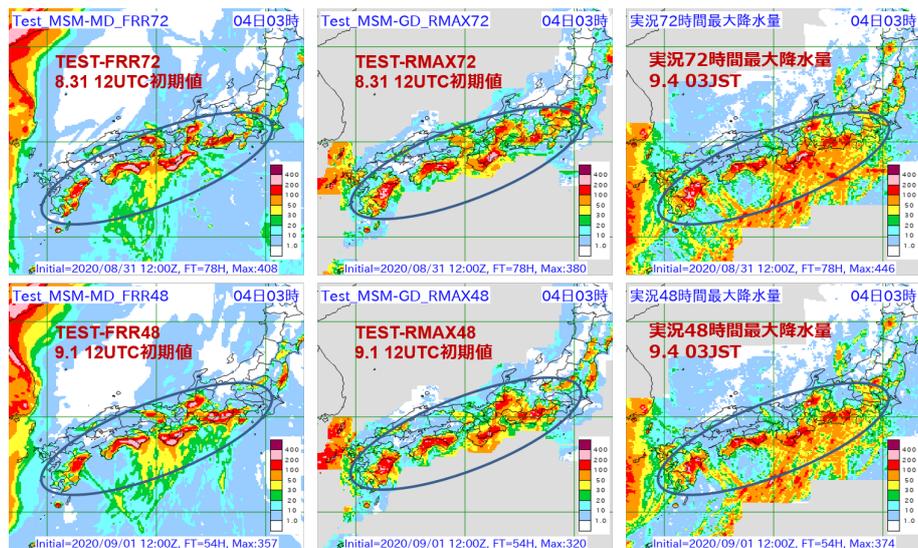


図 3.11.4 2021 年 9 月 4 日 03 時 JST を対象とした MSM 最大降水量（左列）、MSM 最大降水量ガイダンス（中列）、実況最大降水量（右列）の分布。上段が 72 時間積算 (FT=78)、下段が 48 時間積算 (FT=54)。

表 3.11.2 初期時刻別の MSM 最高、最低気温ガイダンスの予測対象。◎は今回の FT 延長に伴って追加された。“当日”、“翌日”等は日本時間による。

初期時刻	当日		翌日		翌々日		3日後	
	最高	最低	最高	最低	最高	最低	最高	最低
15UTC (00JST)	○	○	○					
18UTC (03JST)	○	○	○					
21UTC (06JST)	○	○	○					
00UTC (09JST)	○	○	○	○	◎	◎		
03UTC (12JST)		○	○					
06UTC (15JST)		○	○					
09UTC (18JST)		○	○	○				
12UTC (21JST)		○	○	○	○	◎	◎	

表 3.11.3 初期時刻別の MSM 平均、実効、最小湿度ガイダンスの予測対象。◎は今回の FT 延長に伴って追加された。“当日”、“翌日”等は日本時間による。

初期時刻	当日	翌日	翌々日	3日後
15UTC (00JST)	○			
18UTC (03JST)				
21UTC (06JST)		○ (*)		
00UTC (09JST)		○	◎	
03UTC (12JST)		○		
06UTC (15JST)		○		
09UTC (18JST)		○		
12UTC (21JST)		○	○	◎

* 初期時刻 21UTC は最小湿度のみ予測。

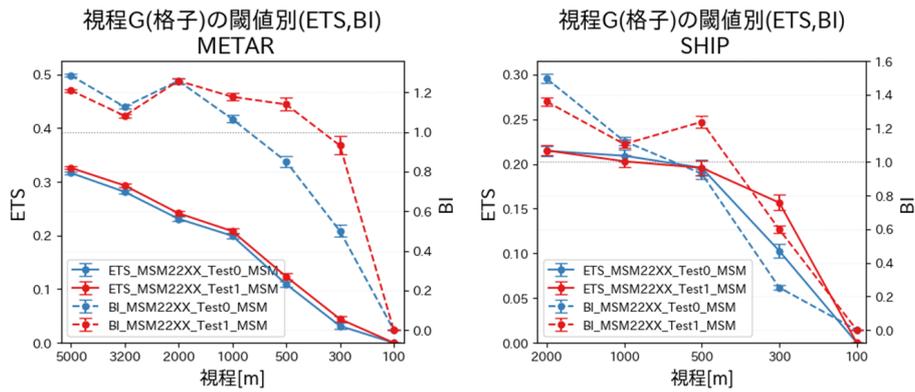


図 3.11.5 MSM 視程ガイドスによる前 3 時間最小視程の ETS (実線) と BI (破線)。青線は旧診断式、赤線は新診断式を用いた結果を示す。左図は陸上、右図は海上の視程観測で検証した結果。検証期間は 2019 年 7 月 1 日～2021 年 6 月 30 日。

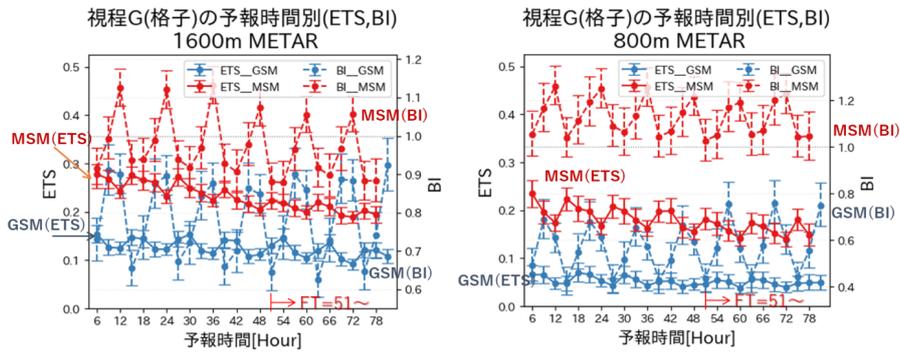


図 3.11.6 MSM (赤) と GSM (青) の視程ガイドスによる前 3 時間最小視程の ETS (実線) と BI (破線)。横軸は FT。左図は視程 1600 m 未満、右図は 800 m 未満の結果。

高田伸一, 2018: 頻度バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 78-80.

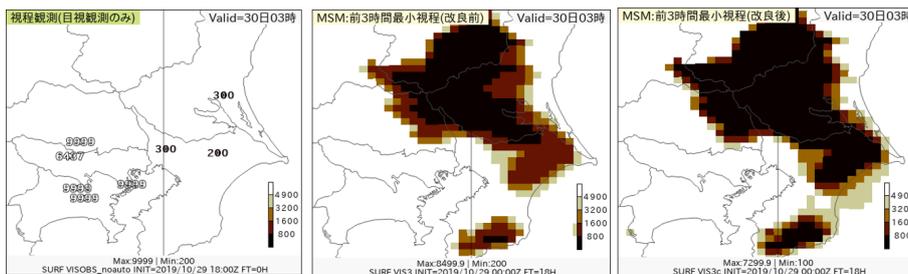


図 3.11.7 左図:2019年10月29日18:00UTCの航空気象観測通報の視程観測値。中央図、右図:それぞれ同時刻の旧診断式、新診断式によるMSM視程ガイダンスによる前3時間最小視程予測 (FT=18)の水平分布。

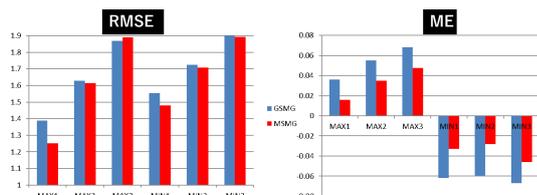


図 3.11.8 最高・最低気温のMSMガイダンス(赤)のRMSE(左図)とME(右図)。MAX1~MAX3, MIN1~MIN3は、00UTC初期値ではそれぞれ当日~翌々日の最高気温と翌日~3日後の最低気温を、12UTCでは翌日~3日後の最高・最低気温の予想値を表す。参考としてGSMガイダンス(青)の結果も示した。

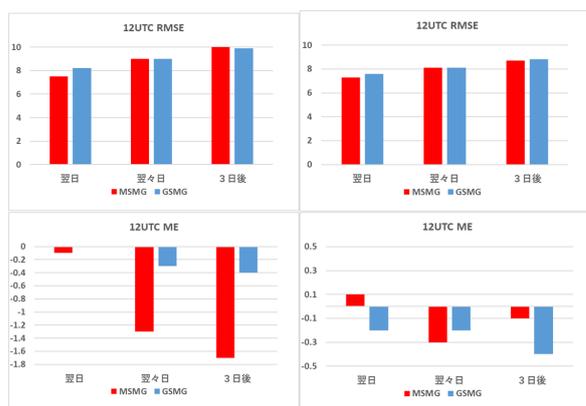


図 3.11.12 暖候期(左列)と寒候期(右列)における初期時刻12UTCのMSM最小湿度ガイダンス(赤)とGSM最小湿度ガイダンス(青)のRMSE(上図)とME(下図)。単位は%。

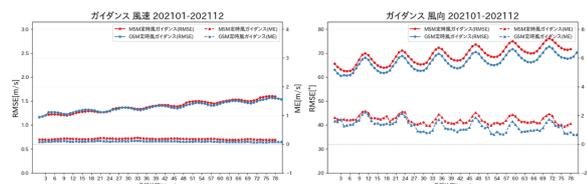


図 3.11.9 MSM定時風ガイダンス(赤)とGSM定時風ガイダンス(青)のRMSE(実線)とME(破線)。風速(左図)と風向(右図)。横軸はFT。

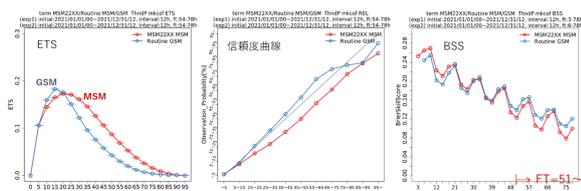


図 3.11.10 MSM(赤)とGSM(青)の発雷確率ガイダンスのFT=54~78に対するETS(左図;横軸は確率)と信頼度曲線(中図;縦軸は実況確率、横軸は予想確率)。右図はBSS(横軸はFT)。

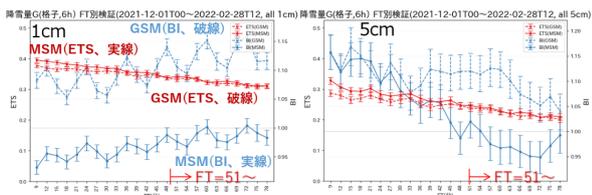


図 3.11.11 MSM(実線)とGSM(破線)の降雪量ガイダンス(格子形式)による6時間降雪量のETS(赤)とBI(青)。横軸はFT。左図は降雪量1cm以上、右図は5cm以上の結果。

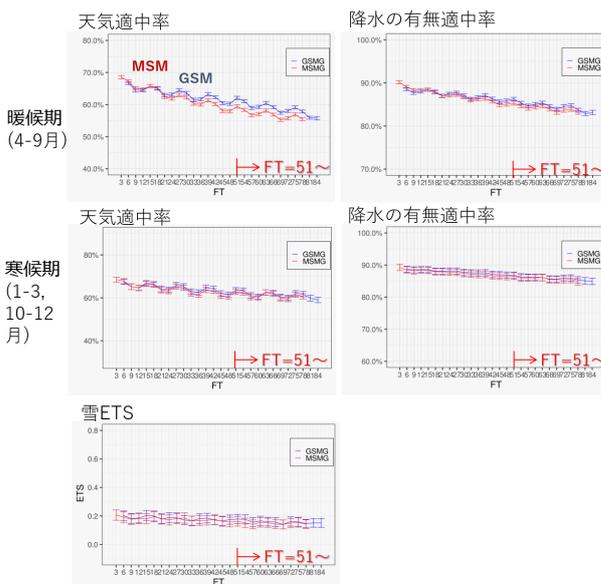


図 3.11.13 暖候期(上段)と寒候期(中・下段)におけるMSM天気ガイダンス(赤)とGSM天気ガイダンス(青)の天気適中率、降水有無適中率、雪ETS。

3.12 局地モデルによる気温、降雪、風、視程ガイダンス

3.12.1 はじめに

数値予報開発センターでは、複数のモデルによるガイダンスを最適に組み合わせることで精度向上を目指した統合型ガイダンスの開発を行っている(気象庁 2021)。統合型ガイダンスの入力値とするとともに予報業務での活用を目的として局地モデル(LFM)によるガイダンスの開発を進めており、2022年3月に気温ガイダンスと降雪ガイダンスの部内運用を、2022年10月に風ガイダンスの部内運用をそれぞれ開始した。また航空気象予報業務での利用を目的として、2022年10月にLFMによる視程ガイダンスの部内運用を開始した。ここではこれらのLFMガイダンスの概要を説明する。

3.12.2 LFM 気温ガイダンス

(1) 作成方法

LFM 予測値を用いて、時系列気温ガイダンスと格子形式気温ガイダンスの2種類の気温ガイダンスの運用を開始した。LFM 時系列気温ガイダンスの仕様を表 3.12.1 に示した。毎正時を初期時刻とする LFM モデルの予測値を用いて、FT(予報時間)=1~10 まで1時間毎の気温を予測する。作成手法は MSM 時系列気温ガイダンス(三戸 2018)と同様にカルマンフィルタを用いて行い、使用する係数は逐次学習により更新する。また説明変数も MSM 時系列気温ガイダンスと同じである。作成対象はアメダス地点である。

表 3.12.2 には LFM 格子形式気温ガイダンスの仕様を示す。作成方法は MSM 格子形式気温ガイダンスと同じで、前記の各アメダス地点の LFM 時系列気温ガイダンスの予測でのモデル気温修正量から推定したその周囲の各格子点におけるモデル気温修正量を用いて、格子点の気温予測値を求める(詳細は三戸(2018)参照)。計算する格子間隔は 2 km (MSM 格子形式気温ガイダンスは 5 km) である。

表 3.12.1 LFM 時系列気温ガイダンスの仕様

作成対象	アメダス地点
入力モデル	LFM
初期時刻	毎正時
予報時間	FT=1~10 まで 1 時間間隔
説明変数	モデル予測値(地上気温、風速、雲量、気温減率、降水量など)
層別	地点、初期時刻、FT、季節

(2) 検証結果

2020年6月5日~2021年6月4日の1年間の全アメダス地点のデータを用いて、LFM 時系列気温ガイダンスと LFM 格子形式気温ガイダンスの統計検証を行った。

表 3.12.2 LFM 格子形式気温ガイダンスの仕様

作成対象	2 km 格子
入力モデル	LFM
初期時刻	毎正時
予報時間	FT=1~10 まで 1 時間間隔
作成手法	各格子のモデル地上気温を時系列気温ガイダンスとモデル海陸比で補正

図 3.12.1 には、LFM 時系列気温ガイダンスの FT 別の RMSE と ME を、LFM モデル地上気温の RMSE とともに示した¹。参考として、MSM 時系列気温ガイダンスや MSM のモデル地上気温も示している。なお LFM 時系列気温ガイダンスは初期時刻 1 時間毎に計算されるが、ここでは MSM 時系列気温ガイダンスとの比較のため 3 時間毎の初期時刻の結果のみ用いた。また実際の予報作業でガイダンスが利用可能となる時間差を考慮し、LFM 時系列気温ガイダンスの初期時刻から 3 時間前の初期時刻の MSM 時系列気温ガイダンスと比較している。

左列は通年の検証結果である。RMSE で見ると LFM 時系列気温ガイダンスは LFM モデル地上気温を大きく改善している。MSM 時系列気温ガイダンスと比べると優位なのは FT=3 までであり、ME は全 FT で中立か微小な改善となった。

夏の日中の最高気温、冬の朝の最低気温の時間帯の検証のため、同図の中央列、右列には、夏期(6月~8月)の初期時刻 00UTC、冬期(12月~2月)の初期時刻 15UTC の検証結果も示した。夏期、冬期ともに、LFM モデル気温の RMSE を大きく改善していることがわかる。MSM 時系列気温ガイダンスとの比較では、夏期は RMSE, ME とともに全 FT で優っている。冬期は RMSE は予報期間の初めを除きやや劣り、ME はやや優るといった結果となった。

時系列気温ガイダンスと同じ方法によって、LFM 格子形式気温ガイダンスの統計検証を行った結果を図 3.12.2 に示した。図 3.12.1 と同様に、LFM モデル気温や、MSM 格子形式気温ガイダンス、MSM モデル気温の結果も示している。

通年の検証では、LFM 格子形式気温ガイダンスは MSM 格子形式気温ガイダンスに比べ、精度は同程度かやや改善という結果となった。また、夏期(初期時刻 00UTC)、冬期(初期時刻 15UTC)については、MSM 格子形式気温ガイダンスに比べて ME は若干劣るものの、RMSE は全 FT で中立~改善となった。

¹ モデル地上気温はアメダス地点周辺 4 格子の値を内挿したうえで、モデルとアメダス地点との標高差をあらかじめ補正して使用した。

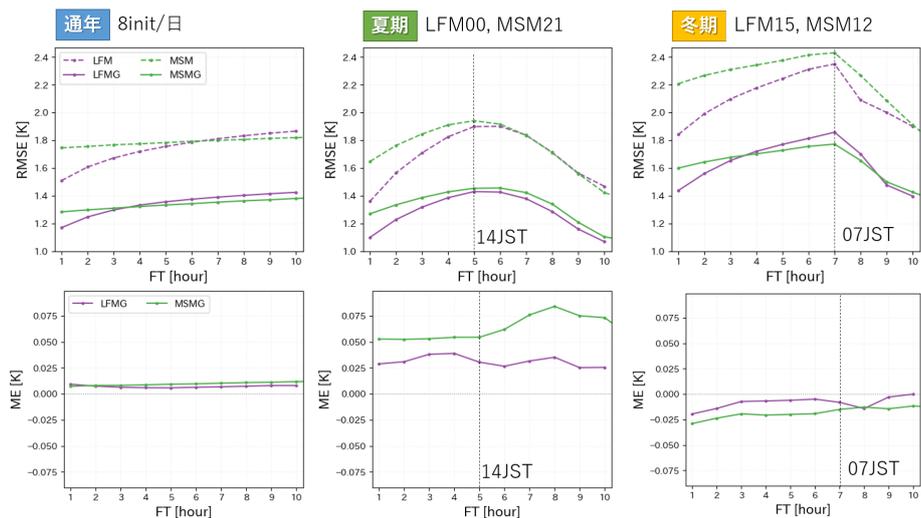


図 3.12.1 LFM, MSM 時系列気温ガイダンスの FT 別の RMSE (上段) と ME (下段)。紫は LFM、緑は MSM。上段の破線は LFM, MSM 気温予測の RMSE。なお MSM は LFM に対して 3 時間前の初期時刻を検証対象とするために FT を 3 時間ずらし FT=4~14 の値をプロットしている。左図は通年 (LFM の初期時刻 00,03,...,21UTC)、中央図と右図はそれぞれ夏期 (LFM 初期時刻 00UTC)、冬期 (LFM 初期時刻 15UTC) の検証結果。

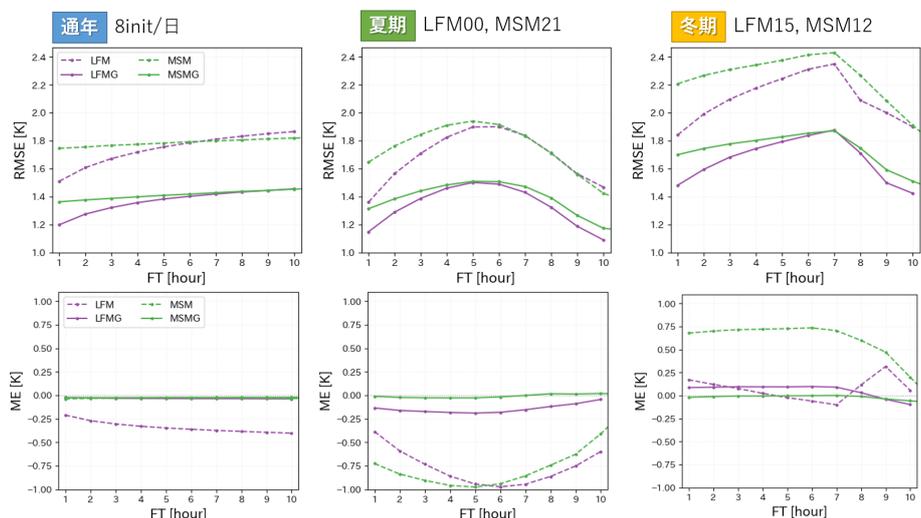


図 3.12.2 LFM, MSM 格子形式気温ガイダンスの FT 別 RMSE と ME。図の形式は図 3.12.1 と同様。

3.12.3 LFM 降雪ガイダンス

(1) 作成方法

LFM による格子形式の降雪ガイダンス (降雪量ガイダンス) の開発を行い運用を開始した。表 3.12.3 に LFM 降雪量ガイダンスの仕様を示した。MSM 降雪量ガイダンスと同様に雪量変換法 (土田 2018) によって、1,3,6 時間降雪量を予測する。計算で使用する降水量は LFM1 時間平均降水量ガイダンス (白山 2018) を、気温は前項で説明した LFM 格子形式気温ガイダンスを使用する。格子間隔は 2.5 km (MSM 降雪量ガイダンスは 5 km) であり、毎正時を初期時刻として FT=10 まで 1 時間間隔で予測する。

(2) 検証結果

図 3.12.3 に LFM 降雪量ガイダンスの閾値別の検証結果 (ETS、BI、捕捉率、誤検出率) を、MSM 降雪量ガイダンスの結果とともに示した。2018~2020 年度の冬季 (11 月~翌 3 月)、全国の積雪深計設置地点の降雪量観測と、その最近接格子点のガイダンス予想値 (FT=6, 9) を比較検証した結果である。なおここでは前項と同様に、MSM ガイダンスは LFM ガイダンスに対して 3 時間前の初期時刻の結果により比較を行った。ETS を見ると 8 cm/6h 以上のやや強い雪で MSM ガイダンスを上回っている。BI については弱い雪で予測がやや過多となったが、20 cm/6h 以上の閾値において MSM ガイダンスの過少傾向を改善できている。15 cm/6h 以上の降雪で捕捉率が MSM ガイダンスを上回り、誤検出率は下回った。図 3.12.4 は、MSM 降雪量

ガイダンスとの ETS の差の分布である。閾値 10 cm/6h では概ね全域で LFM ガイダンスの ETS が MSM ガイダンスを上回っていることがわかる。閾値 1 cm/6h では明瞭な分布の特徴は見られないが LFM ガイダンスが MSM ガイダンスを上回る地点が多い。

表 3.12.3 LFM 降雪量ガイダンスの仕様

作成対象	2.5 km 格子 (緯度経度)
入力モデル	LFM
初期時刻	毎正時
予報時間	FT=1~10 まで 1 時間間隔
作成手法	LFM 降水量ガイダンスの 1 時間平均降水量と雪水比の積により 1 時間降雪量を算出。雪水比は LFM 格子形式気温ガイダンスの予想気温を入力とするロジスティック回帰で計算。3, 6 時間降雪量は 1 時間降雪量を積算して算出。

3.12.4 LFM 風ガイダンス

(1) 作成方法

MSM 風ガイダンス (松本 2018) と同様に、カルマンフィルタと頻度バイアス補正によって、LFM の予想値から 1 時間ごとのアメダス地点の定時風、前 1 時間最大風、前 1 時間最大瞬間風の各予測値を計算する。説明変数 (モデルの風の東西成分、南北成分、地上風速の前 1 時間最大値、境界層最大風速) や層別化 (地点、初期時刻、予報対象時刻、風向) の方法は MSM 風ガイダンスと同じである。

(2) 検証結果

図 3.12.5 には、LFM 風ガイダンスの定時風について、2021 年 1 月~12 月の統計検証結果を MSM 定時風ガイダンスの結果とともに示した。なおここではガイダンスの配信時刻を考慮し、MSM ガイダンスは LFM ガイダンスに対して 1 時間前の初期時刻の結果により比較している。

予報対象時刻別の風速の RMSE を見ると日中は LFM ガイダンスの方が小さく、夜間は同程度である。また FT 別では全 FT で MSM ガイダンスより小さい。ME は予報対象時刻別、FT 別のいずれも常に LFM の方がより適切な予測であることを示している。風速別の ETS は MSM ガイダンスと比べて同等かやや大きい。BI は同程度である。FT 別に風向の RMSE を見ると、FT=5 までは LFM ガイダンスが優位でそれ以降は同等であり、ME は全 FT でより適切となっている。

図 3.12.6 は、定時風速について、LFM ガイダンスと MSM ガイダンスとの統計検証結果の違いを地点分布の形で示したものである。左図には MSM ガイダンスを基準にした RMSE 改善率を示した。ここで改善率とは MSM ガイダンス、LFM ガイダンスの RMSE を

それぞれ R_M, R_L とするとき $(R_M - R_L)/R_M$ と定義する。中央図には MSM ガイダンスと LFM ガイダンスの ME の差を、右図には定時風速の大外し事例数の差を示した。RMSE の改善率では、全国的に LFM ガイダンスの方が RMSE が小さい地点が多い。また ME は MSM, LFM ガイダンスともに正である (図 3.12.5) が、LFM ガイダンスがそれを抑制する (青色) 地点が多いことがわかる。大外し事例の総数は LFM ガイダンスは 90667、MSM ガイダンスは 93455 となり、やや LFM ガイダンスの方が少なかったが、差分の分布に地域的な特徴は見られない。

3.12.5 LFM 視程ガイダンス

(1) 作成方法

LFM の予測値から格子点での前 1 時間最小視程を予測する視程ガイダンス (格子形式) を開発した。LFM 視程ガイダンス (格子形式) の作成手法は MSM 視程ガイダンス (格子形式) と同様 (後藤 2018) であり、格子点毎、1 時間毎に浮遊塵、雲粒、雨粒、雪による光消散係数を、LFM モデル予測値 (相対湿度、雲水量、雨、雪、気温、風速) を説明変数とする診断式によって求め、前 1 時間最小視程に換算する。診断式の係数は MSM 視程ガイダンス (格子形式) の係数を参考に、2021 年 3 月 31 日~8 月 24 日と LFM2103 業務化試験時の 2020 年 11 月 1 日~2021 年 2 月 4 日の期間のモデル予測値を使い、飛行場での視程観測値と比較して決定した。なお MSM 視程ガイダンス (格子形式) では雲粒による光消散係数の計算を降水格子と無降水格子で別式としている (第 3.11.3 項) が、LFM 視程ガイダンス (格子形式) では単一式である。LFM 視程ガイダンス (格子形式) で使用する診断式を表 3.12.4 に示した。

(2) 検証結果

図 3.12.7 は 2021 年 8 月 25 日~2022 年 6 月 13 日の期間の航空気象観測通報の視程観測値を用いた天気別の検証結果である。比較として、同期間データによる MSM による前 1 時間最小視程ガイダンス (格子形式) の検証結果も示した。

全事例についての結果 (左上図) を見ると、MSM ガイダンスと比べて閾値 600 m 以下においては LFM ガイダンスの ETS が上回り、BI もより適正な値となっている。天気別に見ると、無降水時 (右上図) や降雨時 (左下図) で、LFM ガイダンスの ETS は MSM ガイダンスと同程度かやや上回っている。BI についても、降雨時の 1600 m 以上の閾値の場合を除き、総じて LFM ガイダンスの方が 1 に近い。降雪時 (右下図) については、MSM ガイダンスと比べ ETS は総じてやや小さいが、閾値 400 m 以下では同程度である。図 3.12.8 には事例解析の一例として、2021 年 12 月 15 日 4 時 JST に対する LFM ガイダンス、MSM ガイダンスの視程分布 (FT=10) を示した。MSM ガイダンスは茨城県南部

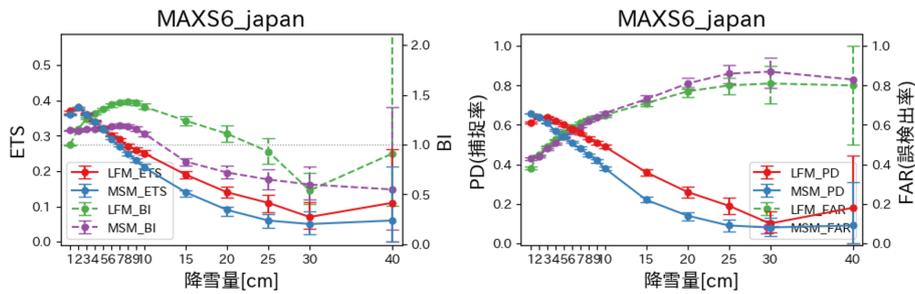


図 3.12.3 LFM, MSM 降雪量ガイダンスによる 6 時間降雪量予測の閾値別の検証結果。左図：ETS（実線）と BI（破線）。右図：捕捉率（実線）と誤検出率（破線）。

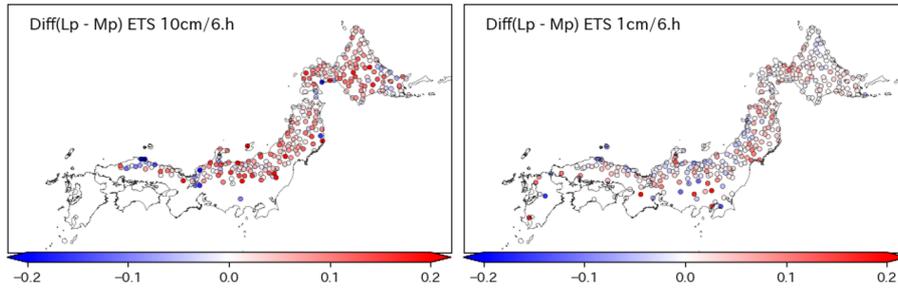


図 3.12.4 MSM 降雪量ガイダンスの ETS と LFM 降雪量ガイダンスから求めた地点予想値の ETS との差。赤色（青色）の地点は LFM ガイダンスの ETS が MSM ガイダンスよりも高い（低い）ことを示す。左図は閾値 10 cm/6h、右は 1 cm/6h の結果。

表 3.12.4 LFM 視程ガイダンス（格子形式）における視程の計算式

視程 $VIS = 3 / (\sigma_p + \sigma_c + \sigma_r + \sigma_s)$	
浮遊塵による光消散係数	$\sigma_p = 0.3(1 - RH)^{-0.2}$
雲粒による光消散係数	$\sigma_c = 4.0 \times QC^{1.5}$
雨粒による光消散係数	$\sigma_r = 0.47 \times RAIN^{0.5}$
雪による光消散係数	$\sigma_s = 8.0 \times SNOW^{0.75} + 0.07 \times FF$

説明変数

QC	雲水量の積算（モデル面第 2~9 層）
RAIN	前 1 時間降水量（雨）
SNOW	前 1 時間降水量（雪、霰、雲氷）
RH	モデル面第 1 層の相対湿度
FF	モデル面第 1 層の風速

から千葉県北東部にかけて発生した放射霧を予測できなかったが、LFM ガイダンスでは低視程域の広がりを予測できていることがわかる。

3.12.6 まとめ

数値予報開発センターでは、LFM による気温ガイダンス、降雪ガイダンス、風ガイダンス、視程ガイダンスを開発し部内運用を開始した。気温、降雪、風ガイダンスは今後の統合型ガイダンスの開発で活用していく。また、いずれのガイダンスも予報業務での利用が期待できることから、引き続き精度向上を図っていく

たい。

参考文献

- 後藤尚親, 2018: 視程ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 185-195.
- 気象庁, 2021: 統合型ガイダンス. 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, 107-110.
- 松本智文, 2018: 風ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 144-153.
- 三戸洋介, 2018: 気温ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 132-143.
- 白山洋平, 2018: LFM 降水量ガイダンスの開発. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 22-31.
- 土田尚侑, 2018: 降雪ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 119-131.

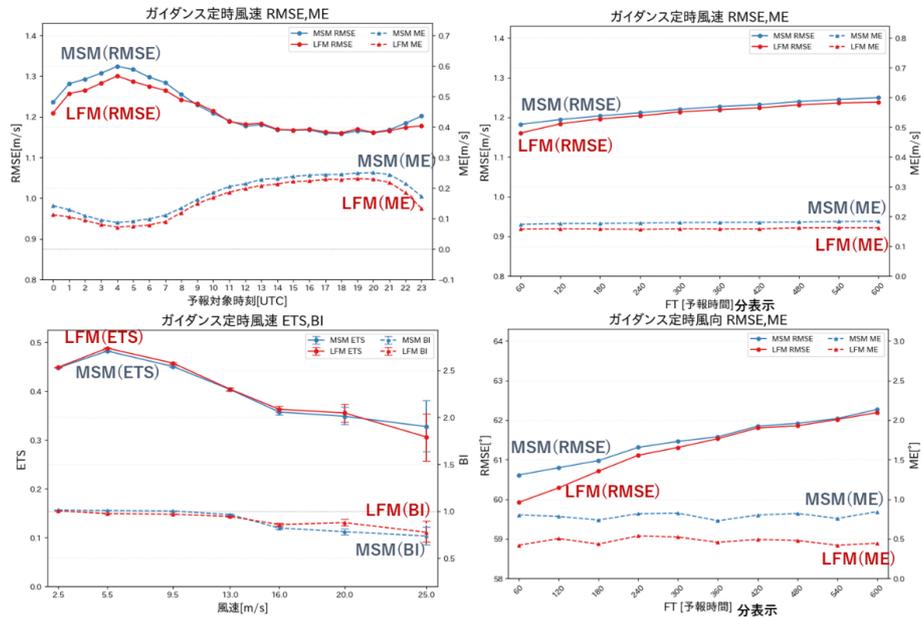


図 3.12.5 LFM 定時風ガイダンス (赤) と MSM 定時風ガイダンス (青) の RMSE, ETS (実線) と ME, BI (破線)。(左上图) 予報対象時刻別の風速精度、(右上図) FT (分単位) 別の風速精度、(左下図) 風速別の風速の精度、(右下図) FT (分単位) 別の風向精度の検証結果。

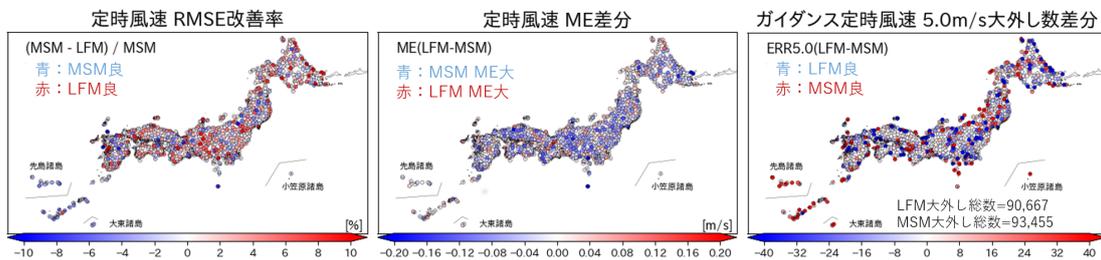


図 3.12.6 定時風速についての LFM,MSM ガイダンスの統計指標の分布。(左図) RMSE 改善率 (赤色なら MSM より改善)、(中央図) ME 差分、(右図) 大外し数差分 (青なら MSM より改善)。ここで大外しとは風速誤差が 5 m/s 以上を指す。

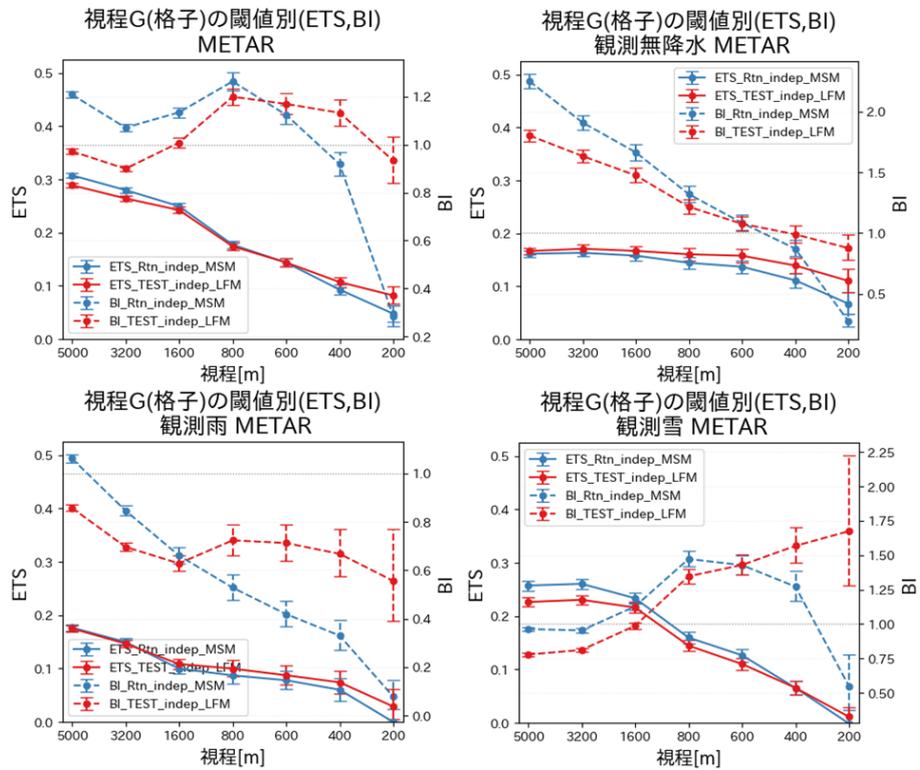


図 3.12.7 LFM (赤) と MSM (青) 視程ガイダンス (格子形式) の、視程閾値ごとの ETS (実線) と BI (破線)。(左上図) 全事例、(右上図) 無降水事例のみ、(左下図) 降雨事例のみ、(右下図) 降雪事例のみの検証結果。

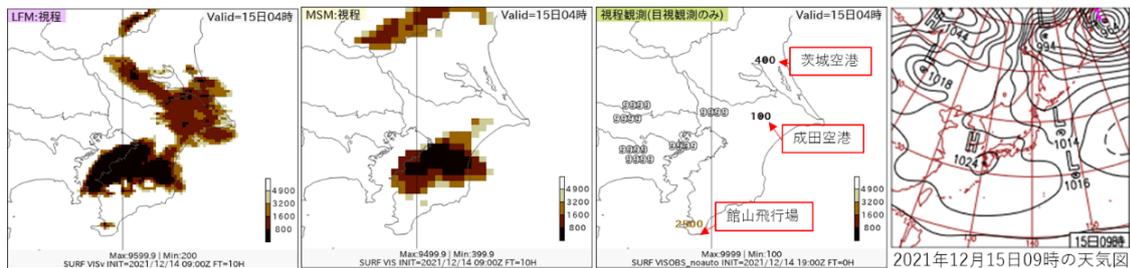


図 3.12.8 左から2枚の図は、2021年12月15日4時JSTに対するLFM視程ガイダンス(格子形式)、MSM視程ガイダンス(格子形式)の予測分布(FT=10)。3枚目の図は同時刻の航空気象観測通報による実況値、4枚目は同日9時JSTの地上天気図。

第4章 数値予報システムの開発進捗

4.1 全球モデルの物理過程改良

4.1.1 はじめに

気象庁では、第10世代スーパーコンピュータシステムにおける数値予報システムの開発計画(本田 2018)及び「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018)に沿い、全球数値予報システムの開発を進めている。

昨年度(令和3年度)は、前線や細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上や系統誤差の軽減を通じた循環場や気温等の予測精度向上を目的に、気象庁全球モデル(GSM)の水平格子間隔の20 kmから13 kmへの高解像度化、地形性抵抗過程や湖の扱い、雲氷有効サイズの診断式の改良、オゾン気候値の更新といった物理過程の改良の開発を進めた(気象庁 2022a)。また、全球解析においては、積雪深解析の1日1回から4回実施への高頻度化や、局所アンサンブル変換カルマンフィルタにおける局所化スケールの見直しの改良も進めた(気象庁 2022b)。その後、令和4年度末の全球数値予報システムの更新を目指し、これら全球モデルと全球解析の改良を組み合わせた仕様での準リアルタイム実行による確認を令和4年2月から開始した。準リアルタイム実行結果では、500 hPa 高度や850 hPa 気温等標準的な要素のスコア改善(図 4.1.1)や、日本域の降水の細かい表現の向上等、これまでの開発で得られた実験結果と統合的なインパクトを確認している。

令和4年度は、準リアルタイム実行と並行して、モデル更新時の更なる予測精度向上を目的に、非地形性重力波過程の改良や、標高オリジナルデータセットの更新といった開発を進めた。非地形性重力波過程は、主に成層圏の循環場へのインパクトが主となるが、衛星観測と第一推定値の整合性向上などの初期値改善を通じて対流圏の短期予測精度にも影響する。また、標高オリジナルデータセットは、モデル標高や、地形性抵抗過程で用いられるモデル格子間隔より小さい空間スケールの地形の分散等の統計量の精緻化を通じて、特に北半球の循環場の予測精度に大きく影響する。全球モデル高解像度化の効果を引き出すための地形表現の精緻化という観点でも、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することは重要となる。

本節では、これら過程の改良に向けた開発状況について報告する。特に、それぞれの開発において、非地形性重力波過程の改良では成層圏の気温や風速のバイアス軽減や衛星観測と第一推定値の整合性向上が得られたこと、標高オリジナルデータセットの更新では北半球の循環場の予測精度向上が得られたことについて示す。

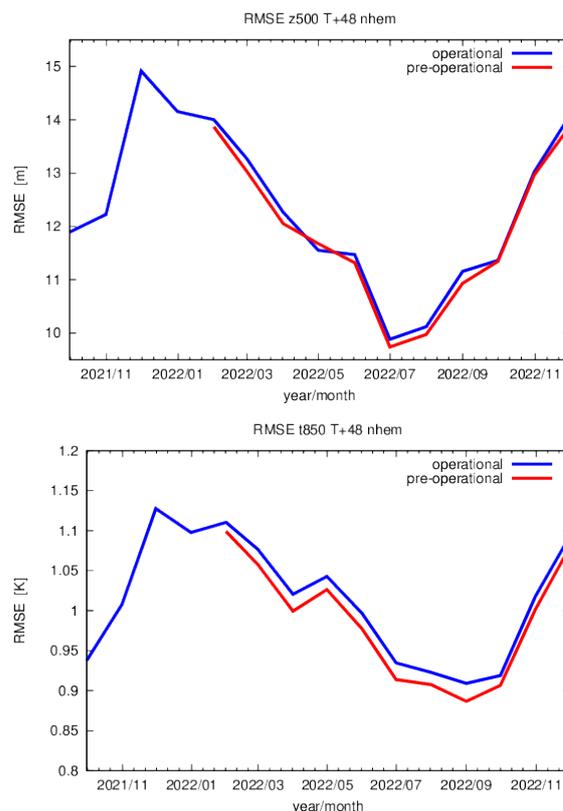


図 4.1.1 北半球域(20°N–90°N)、48時間予測における(上)500 hPa 高度[m]、(下)850 hPa 気温[K]の月平均RMSEの2021年10月から2022年12月までの時系列。青:現GSM、赤:準リアルタイム実行のGSM。準リアルタイム実行は2022年2月から表示。

4.1.2 非地形性重力波過程の改良

GSMでは、力学過程が解像できない空間スケール(以下、サブグリッドスケール)の現象はパラメタリゼーションで表現している。サブグリッドスケールの重力波による運動量輸送のうち、積雲対流活動や前線及びジェット近傍などで励起される、地形に起因しない重力波による効果は、非地形性重力波過程としてScinocca(2003)に基づくパラメタリゼーションで表現している。Scinocca(2003)に基づく手法は、2014年3月からGSMに導入され(Yonehara et al. 2014)、中層大気の気温や風の系統誤差減少、予測精度の向上、熱帯下部成層圏における準2年周期振動(QBO: Quasi-biennial Oscillation)の再現性向上に貢献した。一方で、成層圏では、冬(夏)半球高緯度域で東西風の負(正)バイアス・気温の正(負)バイアスや、QBOの周期が現実よりも短い等の系統誤差は未だ残っている。特に、東西風や気温のバイアスは予測の時間スケールを問わず見られる。また、QBOは周期の長い現象であるものの、その再現性はデータ同化サイクルを通じて、短期予測の精度にも影響する。本項で述べる改良では、これら系統

誤差の減少やそれを通じた予測精度向上を目的に、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。

(1) 射出フラックスの緯度依存性の精緻化

Scinocca (2003) の非地形性重力波パラメタリゼーションによる水平風の時間変化率は、水平運動量フラックスの鉛直収束として、以下の式で表される。

$$\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\right)_{\text{NGW}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial z} \quad (4.1.1)$$

ここで、 \mathbf{u} , \mathbf{F} , ρ はそれぞれ、水平風ベクトル [m/s]、パラメタライズされた水平運動量フラックス [Pa]、大気の密度 [kg m^{-3}] である。各高度における \mathbf{F} は、散逸過程として振幅飽和とクリティカルレベルフィルタリングを考慮して計算される。振幅飽和について、射出高度から射出された運動量フラックスは、重力波の振幅が小さい場合はフラックスを保存させながら鉛直伝播する。一方、鉛直伝播に伴って振幅が大きくなり飽和に達した場合は、重力波の位相速度と方位角の関数として定式化された飽和フラックスを超えた分を環境場に返し、環境場を加速または減速させる。クリティカルレベルフィルタリングについて、流れに対して位相速度がゼロになる高度（クリティカルレベル）に到達すると、重力波はそれより上方に伝播できないという性質がある。Scinocca (2003) のスキームでは、その性質を考慮しており、クリティカルレベルに到達すると運動量フラックスをすべて環境場に返し、それより上方に伝播するフラックスを 0 として扱う。振幅飽和及びクリティカルレベルフィルタリングの定式化の詳細は Scinocca (2003) 及び金浜・山田 (2019) を参照されたい。

Scinocca (2003) のスキームにおいて、運動量フラックスが射出される高度（GSM では 450 hPa で固定）やその大きさは、予測結果に大きな影響を持ち、誤差や不確実性のソースでもある。本節で示す改良では、この射出高度におけるフラックスの大きさの定式化を精緻化する。これは、射出フラックスの大きさは、子午面循環を通じて、現在の GSM に見られる東西風や気温の系統誤差に影響していると考えられるためである。射出フラックスが大きくなると、一般には、成層圏での東西風の変化が早まる。このことは QBO の周期を短くしたり、冬半球の極渦を弱める他、上部成層圏～中間圏での夏半球から冬半球への子午面循環を強めるように働く¹。また、子午面循環に伴う冬半球側での下降流の強化は断熱昇温を強めるため、冬半球側を高温化させるように働く。これらの効果は現在の GSM で見られる系統誤差と整合しており、射出フラックス

¹ 冬半球の西風の減速とバランスさせるため、南北風に伴うコリオリ力による西風加速が必要になる。

が過大であることが現在の誤差のソースになっていると考えられる。

射出フラックスの定式化の変更

2022 年 12 月時点での GSM では、射出高度における位相速度、方位角で積分した射出フラックスの大きさ F_0 は緯度 $y[^\circ]$ の関数として、以下の式で定式化されている。

$$F_0 = \rho_0 F_{\text{launch}} \eta \quad (4.1.2)$$

$$\eta = 1 - (1 - A) \exp\left(-\left(\frac{y}{2w}\right)^2\right) \quad (4.1.3)$$

ここで、 $\rho_0 F_{\text{launch}} = 3.5 \times 10^{-3}$ Pa, $A = 0.55$, $w = 10^\circ$ である。

本節で示す改良では、 F_0 の緯度依存性を以下のように変更する。

$$F_0 = \rho_0 F_{\text{launch,bs}} \eta \quad (4.1.4)$$

$$\eta = 1 - (1 - B) \exp\left(-\left(\frac{y}{2w_{\text{eq}}}\right)^2\right) - (1 - C) \exp\left(-\left(\frac{y - 90 \text{sgn}(y)}{2w_{\text{pl}}}\right)^2\right) \quad (4.1.5)$$

$$B = \frac{\rho_0 F_{\text{launch,eq}}}{\rho_0 F_{\text{launch,bs}}} \quad (4.1.6)$$

$$C = \frac{\rho_0 F_{\text{launch,pl}}}{\rho_0 F_{\text{launch,bs}}} \quad (4.1.7)$$

ここで、 $\rho_0 F_{\text{launch,bs}} = 3.2 \times 10^{-3}$ Pa, $\rho_0 F_{\text{launch,eq}} = 1.8 \times 10^{-3}$ Pa, $\rho_0 F_{\text{launch,pl}} = 0.6 \times 10^{-3}$ Pa, $w_{\text{eq}} = 10^\circ$, $w_{\text{pl}} = 7.5^\circ$ である。

図 4.1.2 は変更前後の射出フラックスの緯度依存性を表したものである。改良後は赤道付近では $\rho_0 F_{\text{launch,eq}}$ 、中緯度では $\rho_0 F_{\text{launch,bs}}$ 、高緯度では $\rho_0 F_{\text{launch,pl}}$ に近づくような分布をしており、全体的に改良前よりも射出フラックスは小さく、特に高緯度で射出フラックスが小さくなるように調整されている。本改良は系統誤差を小さくするための調整の側面もあるが、物理過程におけるパラメータの不確実性の範囲内の調整であると考えられる。また、水平解像度が高くなるほど格子スケールで解像する重力波の寄与が大きくなると考えられるため、サブグリッドスケールでの射出フラックスを小さくする変更は高解像度化で向かうべき変化と整合していると考えられる。中緯度から極にかけての射出フラックスの減少は、ジェット・前線等の空間的分布に伴う重力波発生源の偏りを簡便な形で考慮していると解釈できる。

(2) 安定時の鉛直拡散係数の調整

GSM の境界層過程では、Mellor and Yamada (1974) のレベル 2 スキームに基づくものと局所渦スキームのハイブリッドアプローチを採用しており、両者のうち拡散係数が大きい方を計算に用いる (米原 2019)。ま

た、GSMの境界層過程は大気境界層に限らず、モデル大気全体で計算されている。成層安定な対流圏上層や成層圏では局所渦スキームによる拡散係数が主に適用されており、自由大気において予測精度や計算安定性維持のために微小な鉛直拡散をかける役割を果たしている。一方で、対流圏上部や下部成層圏で鉛直拡散をかけることは、風速の鉛直シアを過剰に弱めることにもなる。これは、重力波が鉛直伝播する過程でクリティカルレベルに遭遇しにくくなるという点で非地形性重力波過程とも関連があり、水平風の減速やQBOの再現性にも影響を及ぼしうる。そのため、局所渦スキームで求まる拡散係数の計算における安定時の安定度関数について、ある気圧（以下、遷移気圧）より上層で徐々に小さくなるような減衰係数をかけて拡散係数を減衰させている（気象庁 2021）。本節で示す改良では、非地形性重力波過程における射出フラックスの改良と併せて、遷移気圧をより下層に設定し成層圏では鉛直拡散の影響が小さくなるよう、調整を行った。具体的には、現在のGSMでは600 hPaから50 hPaの間で気温の鉛直勾配が -2K km^{-1} より大きく、かつ比湿が 0.02 g kg^{-1} より小さい最も高度の低い層を遷移気圧²としていたものを、下層側にさらに100 hPaずらすように変更した。

(3) 改良の効果

射出フラックスの精緻化及び安定時の鉛直拡散係数の調整（以下、まとめて「非地形性重力波過程の改良」と呼ぶ）の効果を確認するため、AMIP³型実験によるQBO再現性の検証、解析予報サイクル実験による予測精度へのインパクトの検証を行った。対照実験としては、2022年2月に準リアルタイム実行を開始した水平解像度が13 kmに増強された全球数値予報システム及びその予報モデルの低解像度版を用いた。以下では、対照実験をCNTL、非地形性重力波過程の改良を適用したものをTESTNGWと呼ぶ。

AMIP型実験

水平解像度約80 kmのGSMを用いてAMIP実験を実施し、解析予報サイクル実験のみでは検証が困難であるQBOの再現性を評価した。積分期間は1990年1月から2020年12月までの31年間である。最初の1年はスピンアップとして、積分開始2年目以降の期間を評価した。下部境界値としては、気象庁海洋気象情報室によって整備されたMGDSST再解析値（栗原ほか2006）及び、海水解析値データセット（Ishii et al. 2005; Matsumoto et al. 2006）の日別解析値を時間内挿して与えた。

² 両者の条件を満たさなかった場合は350 hPaを遷移気圧とする。

³ Atmospheric Model Intercomparison Projectの略で、観測された月別海面水温・海水分布を境界条件に与えて積分した過去実験の結果をモデル間で比較する、大気モデル相互比較プロジェクト（Gates 1992; Gates et al. 1999）。

図4.1.3は、 5°N - 5°S で平均した、AMIP実験期間の最後の10年間における帯状平均東西風[m/s]の時間-高度断面図を表している。欧州中期予報センターが作成した再解析であるERA5(Hersbach et al. 2020)では、100 hPaから5 hPaにおいて、東西風の正負が約2年ごとに入れ替わるQBOに対応する変動が見られるのに対し、CNTLではその周期がERA5よりも短い。TESTNGWでは、熱帯域での射出フラックスが減少したことに伴い、成層圏に伝播する運動量フラックスも減少したことで、東西風の変化がよりゆっくりとなる。その結果、QBOの周期が伸び、ERA5とより整合するようになる。また、TESTNGWでは、100 hPaから50 hPa付近の東西風の振幅が大きくなり、ERA5とより整合するようになる。振幅の増加については、下部成層圏の安定時鉛直拡散係数が小さくなったことで、西風位相の表現が改善されたことに起因する。

解析予報サイクル実験

非地形性重力波過程の改良の全球数値予報システムにおける予測精度への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。実験は夏期実験として2020年8月、冬期実験として2020年1月の2期間を実施した。夏期実験と冬期実験で主なインパクトは共通しているため、ここでは、冬期実験の結果の主なインパクトのみ述べる。

図4.1.4（上）は、CNTLにおけるマイクロ波気温サウンダであるAMSU-Aの輝度温度について、特に成層圏の気温に感度のあるch13による観測値と第一推定値の差(O-B)を示したものである。ch13のO-Bでは、北半球と南半球にそれぞれについて負バイアス、正バイアスが顕著に見られる。これは成層圏の気温の第一推定値が北半球（冬半球）で高温、南半球（夏半球）で低温バイアスを持つことに対応する。図4.1.4（下）で示すO-BのTESTNGWとCNTLの差で見ると、TESTNGWは南北両半球で見られるバイアスを軽減するように変化する。またバイアスだけでなく、O-Bの標準偏差についてもTESTNGWはCNTLよりも小さくなった（図略）。これらのことから、成層圏の気温に感度のある衛星観測について、観測値と第一推定値の整合性は向上したと言える。更に、成層圏の風の第一推定値についても、熱帯を中心に観測値との整合性が向上した。図4.1.5は、熱帯域におけるラジオゾンデ東西風O-Bの標準偏差の変化率を示している。対流圏上層から下部成層圏にあたる100 hPaから50 hPa付近を中心に、TESTNGWは、CNTLに対してO-Bの標準偏差の大幅な減少が見られる。

予測においても、成層圏の気温や東西風の誤差の減少が見られた。図4.1.6は、2020年1月で期間平均した帯状平均東西風及び気温の5日予測値のCNTLのMEおよびTESTNGWとCNTLの差、RMSE改善率を示している。図4.1.6(a)で示すとおり、CNTLで

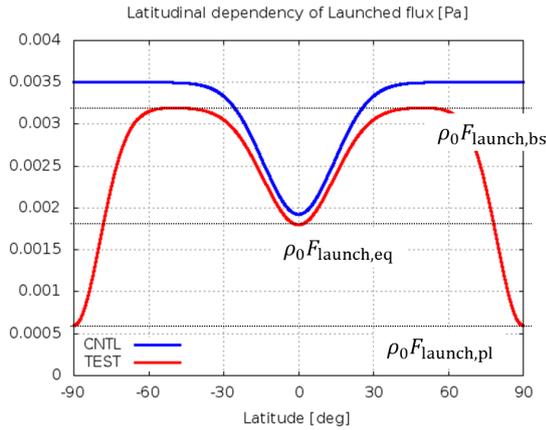


図 4.1.2 射出フラックスの緯度依存性。縦軸は射出フラックス F_0 [Pa]、横軸は緯度 [°]。青：改良前、赤：改良後。

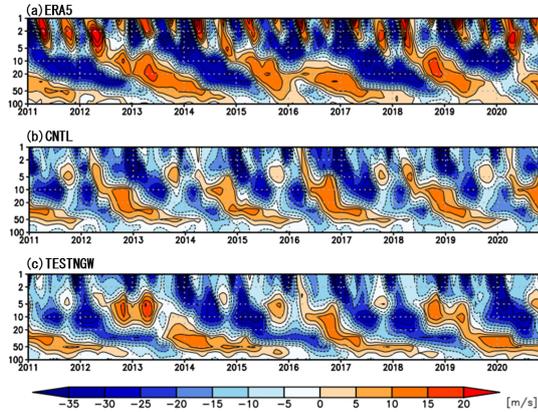


図 4.1.3 AMIP 実験における、5°N-5°S で平均した 2011 年から 2020 年までの帯状平均東西風 [m/s] の時間-高度断面図。縦軸は気圧 [hPa]。(a)ERA5、(b)CNTL、(c)TESTNGW。

は、成層圏において北（南）半球高緯度で東西風の負（正）バイアス、気温の正（負）バイアスが見られるが、TESTNGW ではその誤差が減少する（図 4.1.6(b)）。解析予報サイクル実験で見られた、東西風と気温の変化は、第 4.1.2 項 (1) で述べた、射出フラックスが変化することに伴う子午面循環の変化の仕組みと整合的である。なお、TESTNGW における成層圏の東西風や気温のバイアス減少は、AMIP 実験においても見られており、モデルの解像度や予測の時間スケールを問わず改善した（図略）。また、南半球の高緯度においては、東西風と気温ともに TESTNGW での RMSE の減少も顕著であった（図 4.1.6(c)）。さらに、熱帯の東西風や気温では対流圏界面付近を除き、RMSE の減少が見られた。

4.1.3 標高オリジナルデータセットの更新

GSM では、地形の効果の大気現象への影響を力学過程、物理過程それぞれで考慮している。力学過程におい

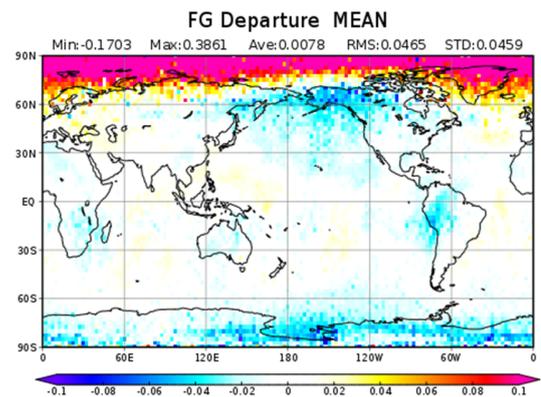
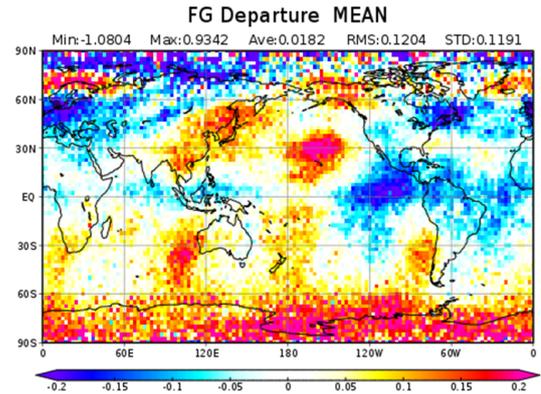


図 4.1.4 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の AMSU-A ch13 輝度温度の (上)CNTL における観測値と第一推定値 (O-B) の差 [K]、(下)O-B の TESTNGW と CNTL の差 [K]

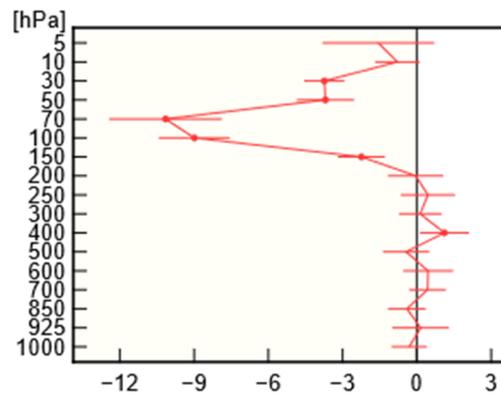


図 4.1.5 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月の熱帯域 (20°N-20°S) 平均のラジオゾンデ東西風観測値と第一推定値の差の標準偏差の変化率 [%]。負の値は TESTNGW の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表している。

ては、プリミティブ方程式系における下部（地表面）境界条件として地形の存在を考慮している。時空間方向に離散化したプリミティブ方程式系を数値的に解く際には、モデルの各格子点でその格子を代表する標高（以下、モデル標高）やその水平勾配を与える。物理過程に

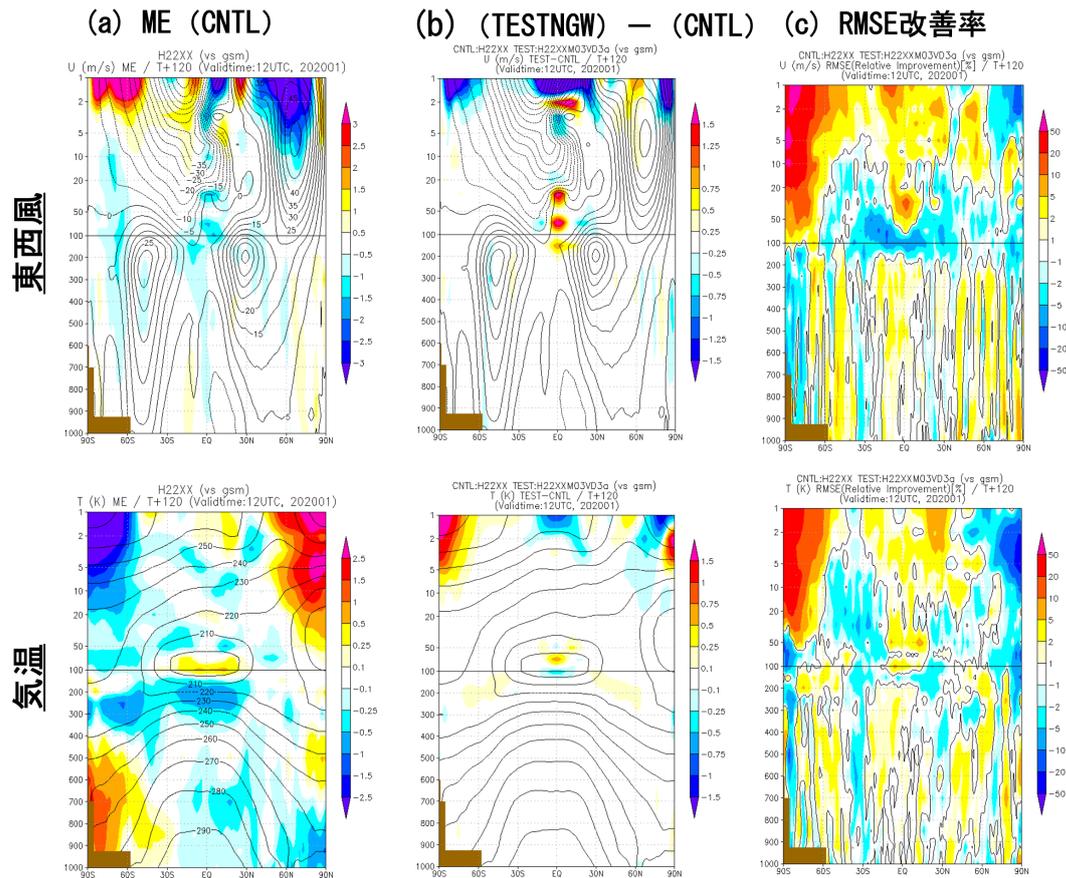


図 4.1.6 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の帯状平均 (上) 東西風 [m/s]、(下) 気温 [K] の 5 日予測値。(a)CNTL の対解析 ME、(b)TESTNGW と CNTL の差、(c) 対解析 RMSE の改善率 [%]。改善率は CNTL と TESTNGW の RMSE の変化率 $\times 100$ で定義し、正の値は TESTNGW が CNTL に対して改善していることを表す。

おいては、GSM では、サブグリッドスケールの地形による運動量輸送のパラメタリゼーションとして、地形性重力波やブロック流抵抗 (Lott and Miller 1997; Vosper 2015)、乱流性地形形状抵抗 (Beljaars et al. 2004) を考慮している (以下、まとめて「地形性抵抗過程」と呼ぶ)。これら地形性抵抗過程では、入力データとして、格子内の標高の分散や、格子内の地形を楕円近似した際の偏角やアスペクト比といった、サブグリッドスケールの地形の統計量 (以下、サブグリッド地形統計量) を用いる。

これらモデル標高やサブグリッド地形統計量を作成するために、GSM では、標高オリジナルデータセットとして、数値標高モデル (digital elevation model; DEM) を用いる。2022 年 12 月時点の GSM では、標高オリジナルデータセットとして GTOPO30 (Gesch et al. 1999) を用いている。GTOPO30 は米国地質調査所が作成・公開している全球 30 秒 (水平解像度約 1 km) データセットであり、多くの現業数値予報モデルでの利用実績がある (Elvidge et al. 2019)。GTOPO30 は、作成された当時としては高精度であったが、現在ではその品質に関する問題点も指摘されるようになった。た

例えば、GTOPO30 にはベネズエラに現実よりも遥かに標高の高い山岳があり (Iwao et al. 2008)、GSM のモデル標高にも反映されてしまっている。また、観測技術の高度化や、計算資源の増大による大容量のデータの取り扱い、種々の誤差を特定し除去するためのアルゴリズム開発の進展を背景に、GTOPO30 が作成された以降も、より高精度・高解像度の DEM が多数作成されるようになった。

地形に関わる表現の精緻化は現在の数値予報モデルの予測精度向上に大きな影響を及ぼすことが近年の研究 (Kanehama et al. 2019) や GSM 開発 (気象庁 2021; 気象庁 2022a) でも示されている。今後、GSM の高解像度化やその後の改良を進めるにあたっては、高解像度化の効果をより引き出すという観点で、標高オリジナルデータセットの更新も重要な課題のひとつとなる。

これらのことから、GSM に用いる標高オリジナルデータセットの更新に関する開発を行った。新しく利用する主要な DEM には、MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) を採用した。MERIT DEM は、南北 60 度までを SRTM (Farr et al. 2007)、北緯 60 度以北に

AW3D (Tadono et al. 2015)、欠損域の補完に VFP-DEMs と複数の DEM を利用し、更に種々のバイアスを除去した高精度・高解像度の DEM である。図 4.1.7 で示すとおり、MERIT DEM では、前述の GTOPO30 に見られるベネズエラ付近の偽の山岳は見られないほか、領域全体にわたり高精度の DEM であることが衛星レーザー高度計での観測結果に対する検証により示されている (Yamazaki et al. 2017)。また、解像度も全球 3 秒 (約 100 m) であり、GTOPO30 と比較して 10 倍の解像度がある。MERIT DEM には南緯 60 度以南が含まれていないため、南極域の DEM である RAMP2 (Liu et al. 2015) と合わせることで全球 DEM を構成する。

(1) モデル標高、サブグリッド地形統計量の標高オリジナルデータセットによる違い

ここでは、水平解像度 13 km の GSM について、モデル標高やサブグリッド地形統計量の標高オリジナルデータセットによる違いについて述べる。2022 年 2 月以降準リアルタイム実行されている GSM では、モデル標高は気象庁 (2022a)、サブグリッド地形統計量は JMA (2022) に基づいて作成しており、標高オリジナルデータセット更新にあたってはこれらの手法を継続して採用する。

図 4.1.8(a), (b) はそれぞれ、全球域での MERIT DEM と RAMP2 から作成したモデル標高とその GTOPO30 からの差を示す。GTOPO30 から作成したモデル標高との差は、全球域に渡って見られ、特に、グリーンランド、カナダ、南米、アフリカ、オーストラリアなどで差が大きい。これら差が大きい領域は、GTOPO30 のオリジナルデータソースの違いの分布 (図 4.1.8(c)) とも対応しており、GTOPO30 の品質が地域によって異なることが反映されていると考えられる。サブグリッド地形統計量について、サブグリッド地形の標高の分散についても、GTOPO30 のデータソースの違いの分布に対応した差が見られた他、ユーラシア大陸で分散がやや小さくなる傾向が見られた (図略)。図 4.1.9(a),(b) は、図 4.1.8(a),(b) を日本とその周辺に拡大して示したものである。この領域では、標高オリジナルデータセットの違いによるモデル標高の差は比較的小さく、日本では中部山岳付近で最大 20 m 程度の差である。なお、水平解像度 20 km と 13 km でのモデル標高の差は日本付近で最大 200 m 程度であり、水平解像度の差は標高オリジナルデータセットの違いによる差よりも大きい (図略)。

(2) 標高オリジナルデータセット更新のインパクト

標高オリジナルデータセット更新の全球数値予報システムにおける予測精度への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。対照実験は第 4.1.2 項 (3) で示した TESTNGW 相当の設定で、以下では CNTLDDEM と呼ぶ。CNTLDDEM に対して標高オリジ

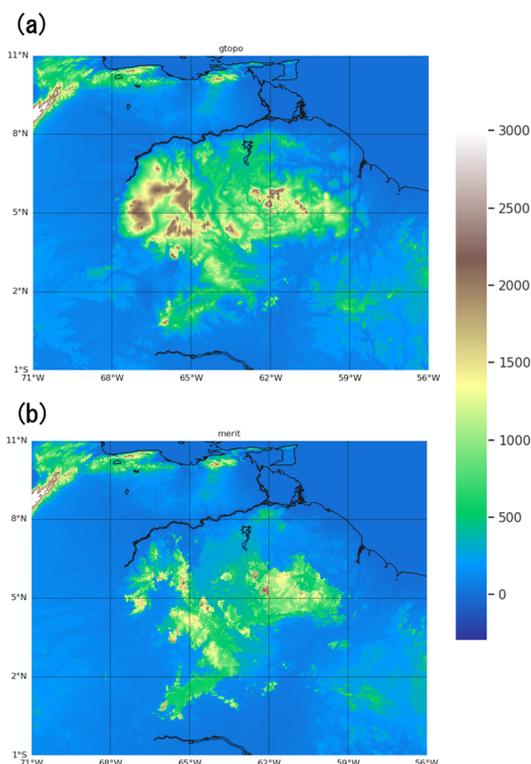


図 4.1.7 南米ベネズエラ付近 (1°S – 11°N, 71°W – 56°W) における標高 [m] の DEM による違い。(a) GTOPO30, (b) MERIT DEM。GTOPO30, MERIT DEM ともに 30 秒格子で表示。

ナルデータセットの更新を適用したものを TESTDEM と呼ぶ。実験は夏期実験として 2020 年 8 月、冬期実験として 2020 年 1 月の 2 期間を実施した。ここでは、より大きいインパクトが得られた冬期実験の結果を述べる。

図 4.1.10(a) は SYNOP 地上気温について、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。SYNOP 地上気温は、全球解析では同化されていないため、図 4.1.10 は、地上気温の第一推定値の精度の独立観測データによる検証結果でもある。北半球、熱帯、南半球いずれも TESTNGW は CNTLNGW よりも観測値と第一推定値の整合性向上が見られ、特に南半球で整合性向上が顕著である。図 4.1.10(b) の水平分布でも、オーストラリアや南アメリカで、整合性向上が大きい領域が見られる。これは、標高オリジナルデータセットが高精度化されたことにより地形の表現が改善され、標高の影響を強く受ける地上気温の第一推定値がより観測に近づいたためと考えられる。図 4.1.11 は、2020 年 1 月平均 500 hPa 高度の予測の RMSE の、TESTDEM の CNTLDDEM に対する 2 日予測改善率の分布を示している。熱帯域では全般的に改善を示しているほか、北半球では、特に、北太平洋東部で改善が目立つ。北太平洋域は、海上であるため標高データセット更新の直接の影響は小さいことから、この改善は、解

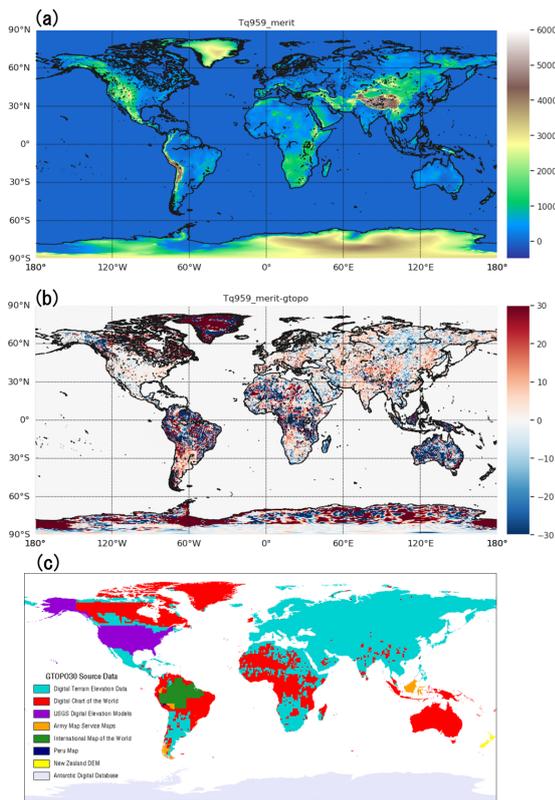


図 4.1.8 水平解像度 13 km における (a)MERIT DEM+RAMP2 から作成したモデル標高 [m]、(b) モデル標高の MERIT DEM+RAMP2 と GTOPO30 の差 [m]、(c)GTOPO30 のデータソースの分布。(c) は米国地質調査所のホームページ (<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30>) から引用。

析予報サイクルや予報モデルによる時間積分を通じて改善が伝播した結果であると考えられる。特に、中緯度総観規模の流れにおいて北太平洋域の上流にあたるユーラシア大陸や極東域での地形の表現の改善が影響していると考えられる。図 4.1.12 は、2020 年 1 月平均の北半球における 500 hPa 高度の予測の RMSE について、TESTDEM と CNTLDEM の差を示したものである。2 日予測から 5 日予測まで、TESTDEM では、CNTLDEM に対する改善傾向が見られる。日々の誤差の分布で見ると、標高オリジナルデータの更新によるバイアスの増減や誤差のパターンに大きな変化はない(図略)が、誤差が少しずつ小さくなった結果、RMSE の減少につながっている。

4.1.4 まとめと今後の予定

令和 4 年 12 月現在準リアルタイム実行中の水平高解像度版全球モデルの更なる予測精度向上を目的に、非地形性重力波過程の改良とそれに合わせた鉛直拡散係数の調整、標高オリジナルデータセット更新の開発を進めてきた。非地形性重力波過程の改良について、

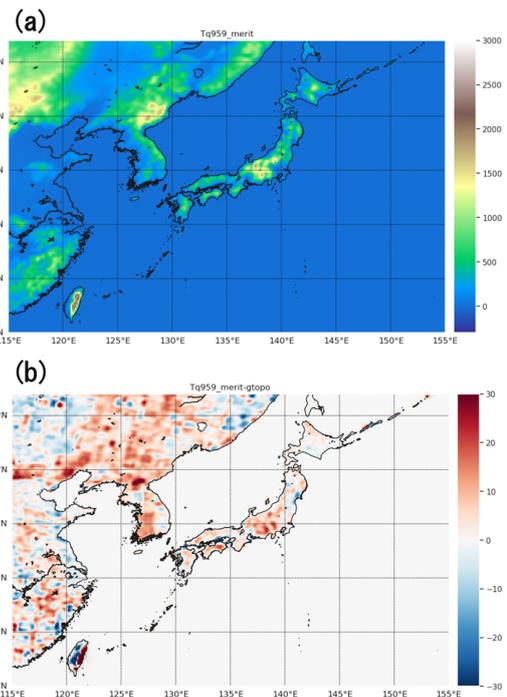


図 4.1.9 図 4.1.8(a),(b) と同じ。ただし、日本とその周辺域について。

重力波の射出フラックスの緯度依存性を精緻化することと安定時の鉛直拡散係数を見直すことで、成層圏の気温や東西風のバイアスの低減、AMSU-A 等気温サウンダの成層圏チャンネルの観測と第一推定値の整合性向上を通じた予測精度改善を確認した。標高オリジナルデータセットの更新について、現在使用している GTOPO30 から、60 °S 以北は MERIT DEM、以南は RAMP2 に更新することで、GTOPO30 に見られる地形表現の問題(偽の山岳や DEM 作成に用いるデータソースの違いによる品質の不連続の問題等)が解消されること、冬季北半球において、地上気温の第一推定値や 500 hPa 高度等の予測精度が改善することを確認した。

今後は、準リアルタイム実行の仕様に、本節で示した改良と観測データ利用改良(第 4.5.3 項; 第 4.5.7 項、(注) GOBS23XX 開発の節番号を secref)を合わせた仕様での試験を実施し、改善の効果を確認したのち、令和 4 年度末に全球数値予報システムを更新する計画である。

参考文献

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.
 Elvidge, A. D., I. Sandu, N. Wedi, S. B. Vosper, A. Zadra, S. Boussetta, F. Bouyssel, van A. Niek-

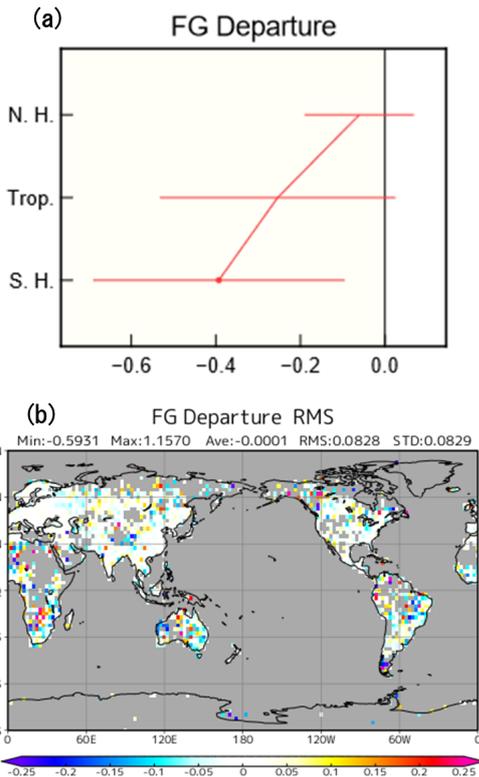


図 4.1.10 (a) 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の SYNOP 地上気温の北半球域 (N.H. と表記、 20°N – 90°N)、熱帯域 (Trop. と表記、 20°S – 20°N)、南半球域 (S.H. と表記、 90°S – 20°S) 平均の観測値と第一推定値の差 (O–B) の標準偏差の変化率 [%]。負の値は TESTDEMの方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表している。(b) O–B の標準偏差の TESTDEM と CNTLDEM の差 [K]。

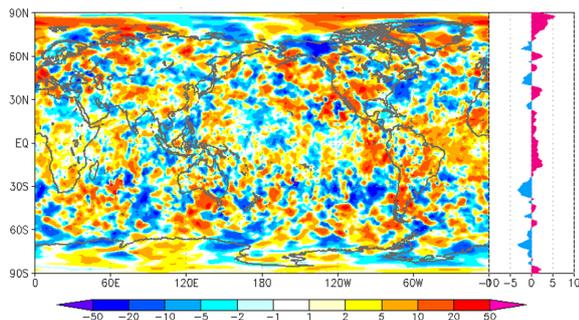


図 4.1.11 解析予報サイクル実験による、2020 年 1 月平均の 500 hPa 高度の 2 日予測の対解析 RMSE の改善率 [%] の分布とその帯状平均値。改善率は CNTLDEM と TESTDEM の RMSE の変化率 $\times 100$ で定義し、正の値は TESTDEM が CNTLDEM に対して改善していることを表す。

erk, M. A. Tolstykh, and M. Ujiie, 2019: Significant uncertainty in the representation of orography in numerical weather prediction and implications for atmospheric drag and circulation. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 2567–2585.

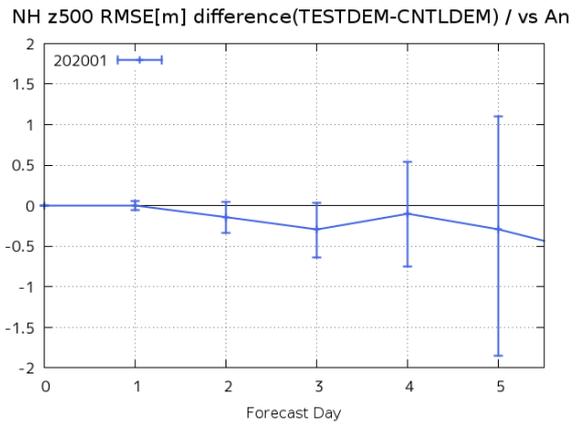


図 4.1.12 2020 年 1 月における、北半球 (20°N – 90°N) での 500 hPa 高度場の対解析 RMSE [m] について、TESTDEM から CNTLDEM を引いたもの (縦軸)。横軸は予測時間 [day]。縦軸の値が 0 よりも小さければ TESTDEM が CNTLDEM に対して改善、大きければ改悪を意味する。エラーバーは、ブートストラップ法 (リサンプル数 10000) で見積もった 95% 信頼区間を表す。

Farr, T. G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf, 2007: The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, **45**.

Gates, W. L., 1992: AMIP: the Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 1962–1970.

Gates, W. L., J. S. Boyle, C. Covey, C. G. Dease, C. M. Doutriaux, R. S. Drach, M. Fiorino, P. J. Gleckler, J. J. Hnilo, S. M. Marlais, T. J. Phillips, G. L. Potter, B. D. Santer, K. R. Sperber, K. E. Taylor, and D. N. Williams, 1999: An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 29–55.

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.

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. 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, P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and

- J. Thépaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049.
- 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.
- 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.
- Iwao, K., N. Yamamoto, D. Patton, S. Kodama, R. Nakamura, M. Matsuoka, S. Tsuchida, S. Sekiguchi, and E. Tsukuda, 2008: Validating global digital elevation models with degree confluence project information and ASTER-DEM on geo grid. *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens and Spatial Info. Sci.*, **37**, 1847–1852.
- JMA, 2022: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 246pp pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>).
- 金浜貴史, 山田和孝, 2019: 重力波. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 81–86.
- Kanehama, T., I. Sandu, A. Beljaars, van A. Niekirk, and F. Lott, 2019: Which Orographic Scales Matter Most for Medium-Range Forecast Skill in the Northern Hemisphere Winter? *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 3893–3910.
- 気象庁, 2021: 全球モデルの改良. 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, 31–41.
- 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, 2018: 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画. 52pp pp.
- 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.
- 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.
- Matsumoto, T., M. Ishii, Y. Fukuda, and S. Hirahara, 2006: Sea ice data derived from Microwave radiometer for climate monitoring. *AMS 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, P2.21.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- Tadono, T., J. Takaku, K. Tsutsui, F. Oda, and H. Nagai, 2015: Status of “ALOS World 3D (AW3D)” global DSM generation. *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, IEEE, 3822–3825.
- Vosper, S. B., 2015: Mountain waves and wakes generated by South Georgia: Implications for drag parametrization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 2813–2827.
- 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.
- 米原仁, 2019: 境界層. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 87–92.
- Yonehara, H., M. Ujiie, T. Kanehama, R. Sekiguchi, and Y. Hayashi, 2014: Upgrade of JMA’s Operational NWP Global Model. *CAS/JSC WGN Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6.19–6.20.

4.2 全球アンサンブル予報システムの改良

4.2.1 はじめに

数値予報開発センターでは、大気モデルの大部分を共有している全球に関する数値予報システム（全球モデル (GSM)、全球解析 (GA)、全球アンサンブル予報システム (GEPS)）の改良をなるべく同時に現業化できるように開発を進めている。

GSM と GA が整合することは、データ同化においてモデルの予測特性を適切に扱うために必要であり、また、GEPS と GSM の予測特性が整合することは、GSM の予測に関する確率予測情報を GEPS が適切に作成するために必要だからである。

令和 4 年 2 月には、令和 4 年度末の全球数値予報システムの更新を目指し、GSM・GA の改良を組み合わせた仕様での準リアルタイム実行による確認を開始した。このうち、GSM の改良の内容は GEPS2203 にも反映した第 3.2 節。

その後 GEPS では、令和 4 年度末の導入を目指して、GEPS2203 以降の GSM の開発成果（第 4.1 節。以下、令和 4 年度末に導入予定の GSM を GSM23XX と呼ぶ）を取り込むとともに、2段階 SST（海面水温）法（高倉・小森 2020）の適用範囲の拡大などの改良を進めてきた。

後者については、予測 SST の利用により、特に 2 週目以降における大気下層気温の予測の改善が、中高緯度でも期待できるという調査結果（第 4.2.3 項に詳述）を踏まえたものである。

今回、GEPS のこれらの改良予定項目について性能を評価するための実験を行い、アンサンブル平均予測の精度向上や確率予測情報の精度向上など想定した効果が得られていることを確認した。本稿では、改良予定項目の概要と実験結果について述べる。

4.2.2 改良予定項目の概要

GEPS で使用する予報モデルを GSM23XX で導入予定のものに更新する。前項でも述べたとおり、これにより GEPS と GSM の予測特性が整合し、GSM による予測に関する確率予測情報をより適切に作成できるようになることが期待できる。

さらに、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 (CPS3) 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する。

4.2.3 2段階 SST 法適用領域拡大

GEPS2203 仕様で 2 段階 SST 法の適用範囲を全球域に拡大した影響調査を行ったところ、以下の結果が得られた。

- 連続初期日型実験において、大気下層の気温予測が改善した（図省略）。

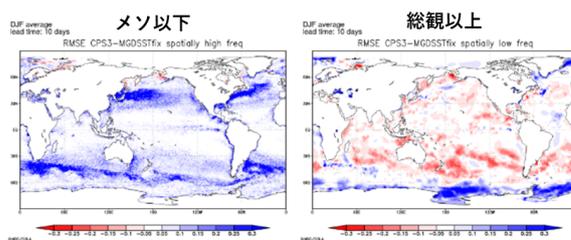


図 4.2.1 GEPS2203 仕様で下部境界に CPS3 の SST 予測偏差を全球域に与えた実験と、MGDSST 初期偏差を全球域に与えた実験の、2019 年 12 月～2020 年 2 月の予測 10 日目における SST の RMSE の差：(左) メソ以下のスケール、(右) 総観規模以上のスケール。赤色は CPS3 予測偏差実験の方が良いことを、青色は MGDSST 初期偏差固定実験の方が精度が良いことを示す。「総観規模以上」は 0.25 度格子に内挿した SST 偏差に対して緯度経度方向に 1-1-1 フィルタ（三点移動平均）を 30 回かけたもの（振幅が半分以下になる空間スケールが数百 km になる）、「メソ以下」は全成分から総観規模以上の成分を差し引いたものとして計算。

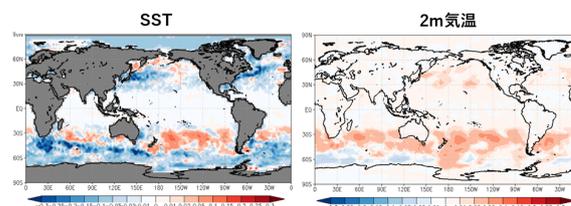


図 4.2.2 5 メンバー再予報型実験（1991～2020 年の月末初期日）による 2 段階 SST 法の全球域への適用領域拡大の効果。(左) SST、(右) 2m 気温に対する冬期間（12～2 月）初期日の予測 6～12 日平均でのアノマリー相関の差（適用領域拡大後から拡大前を引いたもの）。赤色は適用領域拡大によって改善、青色は改悪していることを示す。

- 再予報型実験では、2 週目以降は 200hPa 東西風や 500hPa 高度など、上層の要素でも予測の改善が見られた（図省略）。
- （特に冬半球の）中緯度で空間スケールが小さくなる海洋渦を考慮して CPS3 の SST 予測値をスケール分離して検証したところ、総観規模以上の SST アノマリーの再現は MGDSST の偏差固定値と比較して良くなる一方で、メソ以下のスケールの再現性は低下していた（図 4.2.1）。
- 再予報型実験で寄与を見積もったところ、メソ以下のスケールの SST 変動の再現性低下による 2m 気温への影響は相対的に小さかった（図 4.2.2）。

つまり、従来中高緯度で誤差が大きいと考えられていた CPS3 の SST 予測値について、MGDSST 偏差固定値に対する誤差の違いは主として、CPS3 の海洋モデルの水平解像度が 0.25 度であるために解像できないメソ渦に由来しており、一方、大気下層の予測精度は、CPS3 の SST 予測値の利用により総観規模以上の変動が加わることで（MGDSST 偏差固定値の現業仕様と比べて）改善していた。これらの結果から、2段階

SSTの適用範囲を全球域に拡大して開発を進めることとなった。なお、海水域では2段階SSTは適用されず、MGDSSTの海水域マスクは初期値固定として、CPS3の海水域マスクは予測対象時刻のものが使われる。

4.2.4 総合性能評価試験

本節で述べている改良を合わせた効果を検証するための総合性能評価試験として、連続初期日型実験と再予報型実験を実施した。以下ではこれらの実験の仕様とその結果について記述する。

(1) 連続初期日型実験

実験の設定

実験の諸元は以下の通りである。

- 比較対象（以下 CNTL）：2022年7月時点の現業全球EPSによる予報。ただし初期値はサイクル解析によるものを使用。
- 改良版（以下 TEST）
 - － GSM23XX に導入予定のモデルを使用
 - － 2段階SST法を全球に適用
 ただし初期値はGSM23XXを用いたサイクル解析によるものを使用。
- 実験期間と初期時刻
 - － 夏実験：2021年6月20日～10月11日の各日12UTC
 - － 冬実験：2021年11月20日～2022年3月11日の各日12UTC
- メンバー数：51（現業全球EPSと同じ）

主要要素の確率予測

図4.2.3と図4.2.4に、夏実験と冬実験についての11日先までの予報時間ごとのCRPS¹を示す。夏実験については、熱帯の850 hPa気温が予報前半で改悪となるほかはおおむね中立から改善となっている。冬実験についてはいずれの領域・要素でもおおむね中立から改善である。夏実験での熱帯下層気温の悪化は対ラジゾンデ観測で評価すると見られなくなるので、解析値の変化の影響の可能性があるが詳細は不明である。改善についてはモデルの変更によるものと考えられる。

図4.2.5に、夏実験のZ500とU250のスプレッドを示した。TESTでは対流圏上層でスプレッドが増える傾向が見られる。しかし、図4.2.6にあるとおり、スプレッドスキルの関係を壊すような大きな変化ではないため、スプレッドの調整等は不要と判断した。冬実験でも同じような傾向であった（図略）。

日本の降水予測

図4.2.7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。ブライアスコア(BSS:Brier Skill Score)は1 mm/24hr及び5 mm/24hrの閾値に

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 $\int_{-\infty}^t dt$ で積分したもの。

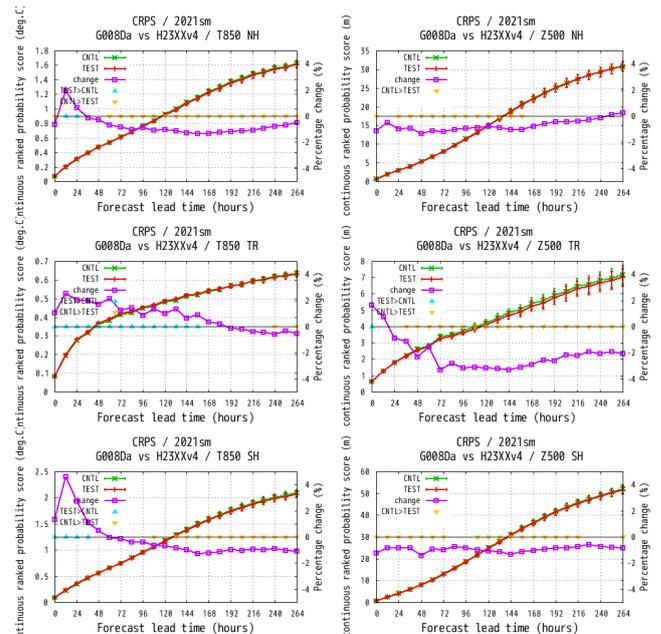


図 4.2.3 夏実験における領域別のCRPS。要素は左列が850hPa気温[K]、右列が500 hPa高度場[m]。領域は上から順に北半球(20°N-90°N)、熱帯(20°S-20°N)、南半球(20°S-90°S)。CNTL実験は緑線、TEST実験は赤線。紫線は変化率((TEST-CNTL)/CNTL[%]、右縦軸)。変化率が負であるとCNTLに対するTESTの改善を意味する。差に統計的な有意性がある場合に▽(CNTL>TEST)ないし△(TEST>CNTL)をプロットしている。

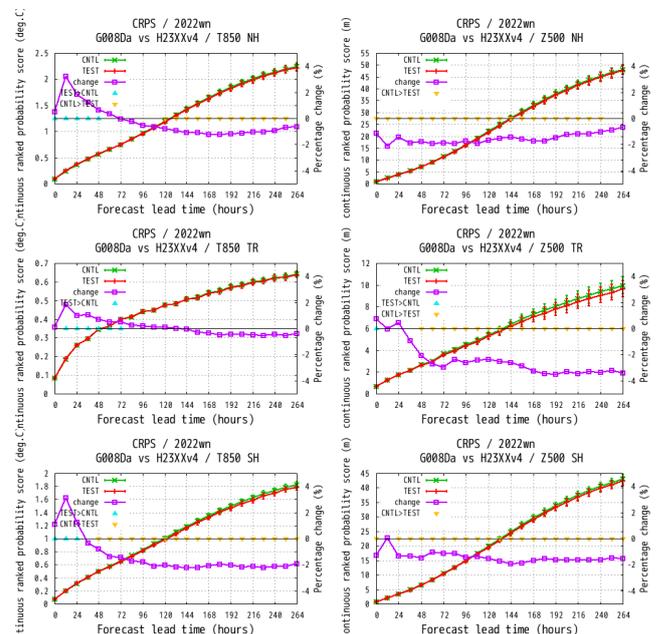


図 4.2.4 図 4.2.3 に同じ。ただし冬実験のもの。

ついて、夏実験については中立、冬実験については改善傾向である。

台風進路予測

図 4.2.8 に予報時間ごとのアンサンブル平均台風進路予測誤差と、台風接近確率(ここでは、FT=0-120 h

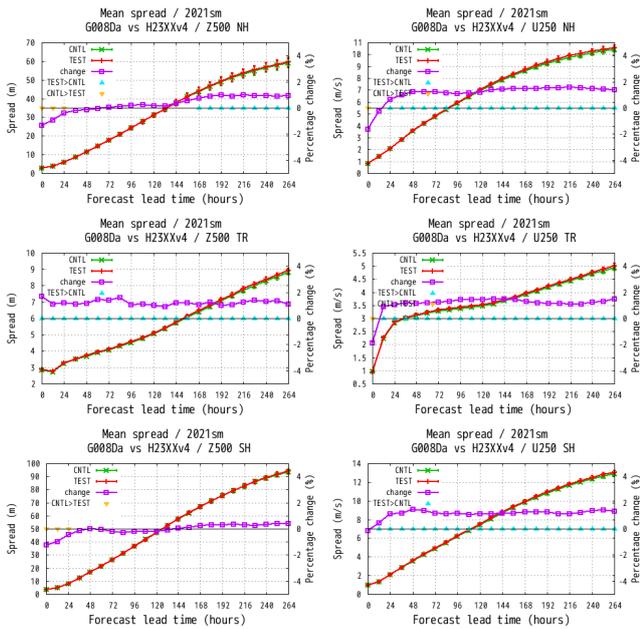


図 4.2.5 夏実験におけるスプレッド。左列は 500 hPa 高度場 [m]、右列は 250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 ((TEST-CNTL)/CNTL [%]、右縦軸)。スプレッドの差に統計的な有意性がある場合に ∇ (CNTL>TEST) ないし Δ (TEST>CNTL) をプロットしている。

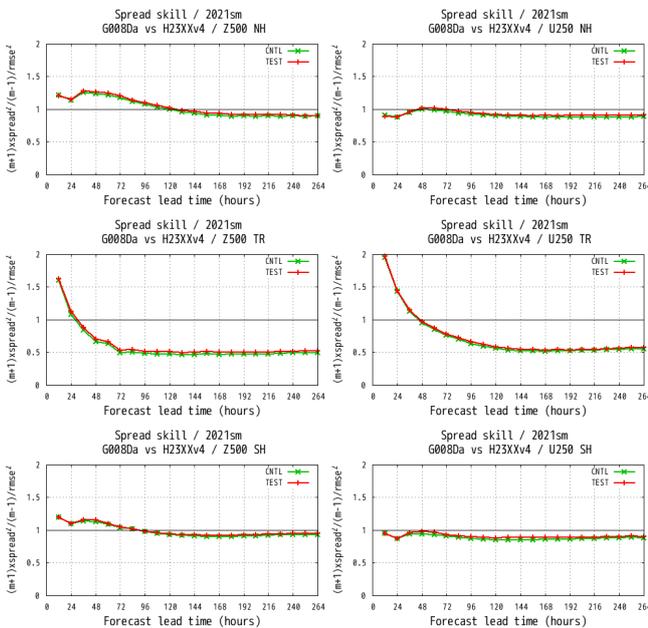


図 4.2.6 夏実験におけるスプレッドスキル (スプレッドと RMSE の比)。左列は 500 hPa 高度場 [m]、右列は 250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。

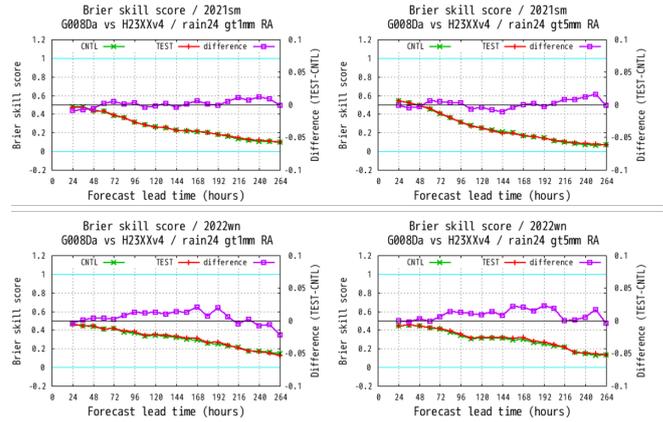


図 4.2.7 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は夏実験、下段は冬実験。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

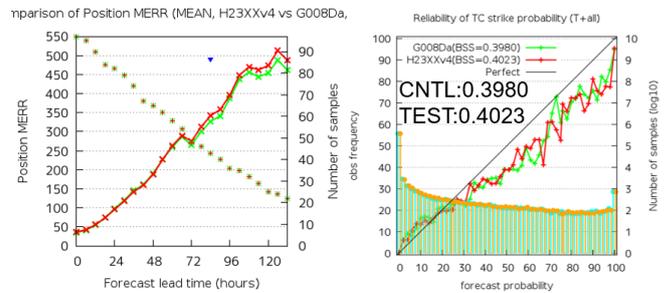


図 4.2.8 アンサンブル平均の台風進路予測平均誤差 (左) と台風接近確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (右)。CNTL は緑、TEST は赤。左図は \times と実線が平均誤差 [km] (左縦軸) で $+$ がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角 (該当なし) と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。右図は実線が信頼度曲線 (左縦軸)、水色とオレンジの棒グラフで CNTL と TEST の予報頻度 (右縦軸) を示す。また、CNTL と TEST のブライアスキルスコアの値を図中に示した。

の間に 120km 以内に台風中心が位置する確率) の予測の検証結果を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。アンサンブル平均の台風進路予測の平均誤差は、予報後半にやや悪化の傾向が見られているが、有意性判定は相関を考慮しない場合の 84 時間予報についてのみ付いている。台風接近確率の BSS や信頼度曲線、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 日以降の評価を目的とした実験として、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。

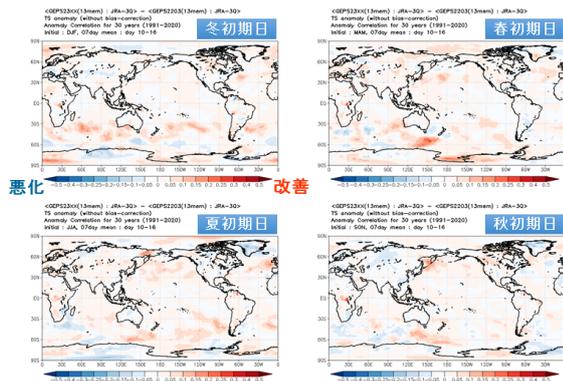


図 4.2.9 再予報型実験での予測 2 週目に対する地上気温のアンサンブル平均予測のアノマリー相関係数の差 (TEST - CNTL)。(左上) 冬初期日、(右上) 春初期日、(左下) 夏初期日、(右下) 秋初期日に対するバイアス補正なしの結果。暖色は改善、寒色は改悪を示す。

アンサンブル平均予測

図 4.2.9 に予測 2 週目に対する地上気温のアンサンブル平均予測のアノマリー相関の差 (TEST - CNTL) を示す。どの季節でも中緯度の海上で改善傾向が見られており、2 段階 SST 法の適用領域拡大によるものと考えられる。

図 4.2.10 と図 4.2.11 に北半球と熱帯に対するアンサンブル平均予測のアノマリー相関の差 (TEST - CNTL) を示す。概ね誤差幅の範囲内で中立の要素・季節が多いことが分かる。また、2 段階 SST の適用領域拡大による改善はごく下層が中心であった (図省略)。これらの結果から、今回の変更による大きな問題はないと考えられる。

4.2.5 まとめと今後の予定

令和 4 年度末に計画されている GEPS の改良予定項目について性能を評価するための実験を行い、アンサンブル平均や確率予測情報の精度などに想定した効果が得られ、問題がないことを確認した。今後は全ての改良予定項目を組み合わせることで現業に相当する構成での評価を行う予定である。

参考文献

高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2 段階 SST 法の詳細と導入事例紹介. 令和 2 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2-8.

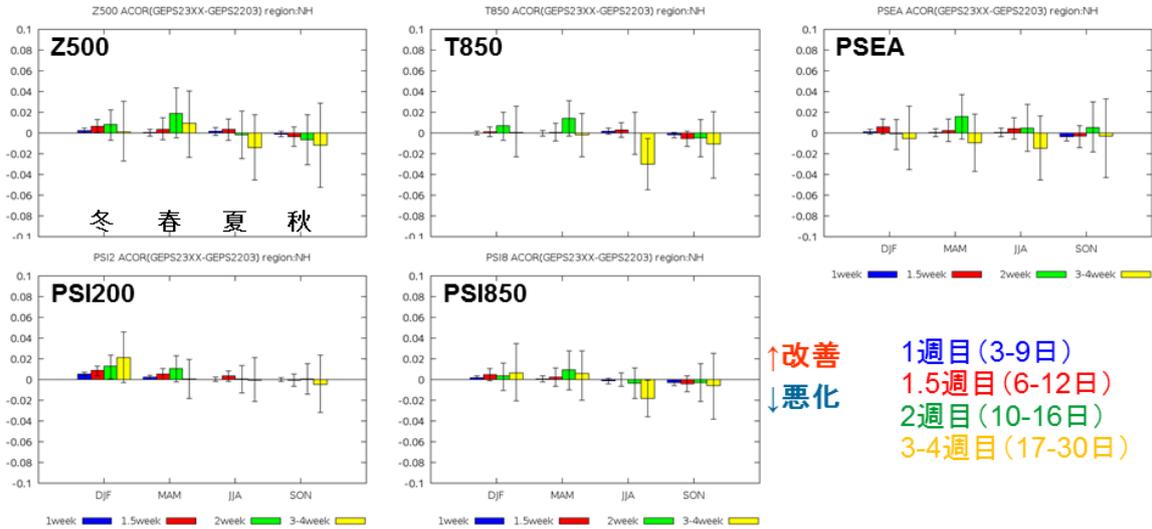


図 4.2.10 再予報型実験（1991～2020 年）による 13 メンバーアンサンブル平均の北半球（20°N - 90°N）でのアノマリー相関係数の差（TEST - CNTL）。（上段）左から 500hPa 高度、850hPa 気温、海面更正気圧、（下段）200hPa 及び 850hPa の流線関数に対するバイアス補正なしの検証結果。それぞれの図は左から順に冬、春、夏、秋の並びとなっており、青は 1 週目（予測 3～9 日）、赤は 1.5 週目（予測 6～12 日）、緑は 2 週目（予測 10～16 日）、黄は 3～4 週目（予測 17～30 日）を表す。誤差棒はブートストラップ法で見積もった 95% 信頼区間。

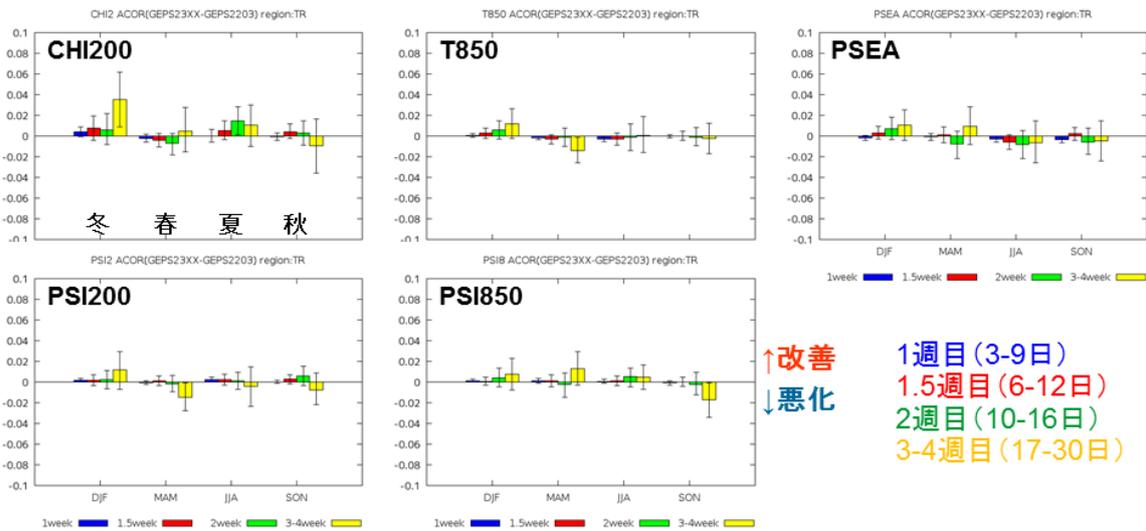


図 4.2.11 図 4.2.10 と同じ。ただし、熱帯（20°S - 20°N）に対する（上段）左から 200hPa 速度ポテンシャル、850hPa 気温、海面更正気圧、（下段）200hPa 及び 850hPa の流線関数の検証結果。

4.3 メソアンサンプル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入

$$X_p = (1 + r_X)X_c \quad (4.3.1)$$

4.3.1 はじめに

メソアンサンプル予報システム (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に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。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従して MEPS の設定を更新した (気象庁 2022)。

本節では、國井・小野 (2020) が挙げた課題のうち、モデルアンサンプル手法の導入に向けた開発について述べる。現在の 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い。そのため、本質的には考慮すべき摂動が不足していると考えられ、予報誤差程度のアンサンプルスプレッドを確保するために過大な初期摂動を用いている可能性もある。このような課題に対し、数値予報モデルの不確実性を表現するため、モデルアンサンプ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を小さくすることによりスプレッドを適正化する開発を進めてきた。

以下、川田ほか (2021) に基づき MEPS への SPPT 法の導入に向けた開発について説明し、これまでの検証実験で得られた結果を報告する。MEPS による予報から作成するアンサンプル摂動は、局地解析の背景誤差として用いられる (第 3.4 節 注:3.5 項) ことから、今回の MEPS の変更が局地数値予報システムへ与える影響について調査した結果も示す。

4.3.2 変更の概要

ここでは、MEPS への SPPT 法の導入に向けた変更の概要を説明する。はじめに SPPT 法について、次に SPPT 法の導入に伴い検討した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。

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には任意性がある。検討の結果、今回報告する実験では、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¹。

(2) 初期摂動の振幅調整

現在の MEPS のスプレッド (図 4.3.1 左) は、アンサンプル平均の RMSE (図 4.3.1 中) と比べると特に日本域でスプレッドが過大な傾向にある。理想的なアンサンプル予報の性質として、スプレッドの大きさはアンサンプル平均の RMSE と同程度であることが望ましい。スプレッドの適正化という観点では初期摂動を小さくすることが考えられるが、これまで初期摂動を小さくすると降水確率予測の精度が悪化することが把握されており、単純に初期摂動の振幅を小さくすることは難しかった。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と思われる。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調整することを検討した。その結果、SPPT 法の導入と併せることで、降水確率予測の精度を維持しつつスプレッドを適正化できることが分かったため、初期摂動の振幅を小さくする (現 MEPS の 95 %) こととした。なお、側面境界付近のスプレッドは過小傾向であるため、側面境界摂動の振幅は調整しない。

4.3.3 性能評価

SPPT 法の導入と初期摂動の振幅調整による影響を確認するための性能評価実験を行った。現ルーチンの MEPS と同じ設定の実験をコントロール (CNTL) とし、CNTL に対し前項で示した変更を適用した実験をテスト (TEST) とする。実験期間は夏:2020 年 7 月 1 日-7 月 31 日、冬:2020 年 1 月 20 日-2 月 25 日とした。

(1) スプレッドの適正化

図 4.3.1 に 850 hPa 相当温位について FT=9 における CNTL のスプレッドとアンサンプル平均の RMSE の夏実験の期間平均を示す。CNTL の課題として、スプレッド (左) をアンサンプル平均 (中) と比較すると、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な一方、それ以外の領域ではスプレッド

¹ 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 (4.3.1) によって変更することは計算不安定につながりやすいと考えられる。実際に計算不安定となる事例が多発した。

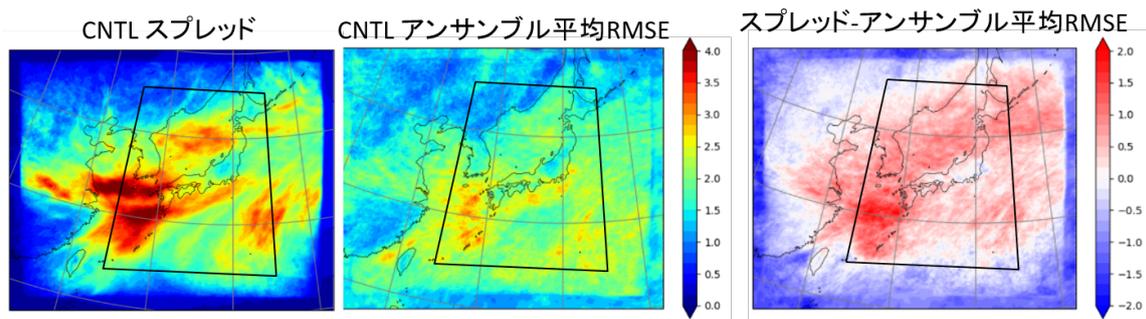


図 4.3.1 CNTL のスプレッドおよびアンサンブル平均の RMSE の夏期間平均。850hPa の相当温位 [K]、FT=9。左からスプレッド、アンサンブル平均の RMSE、スプレッドとアンサンブル平均 RMSE の差。黒枠は検証の日本域 (125°-145°E,25°-45°N) を示す。

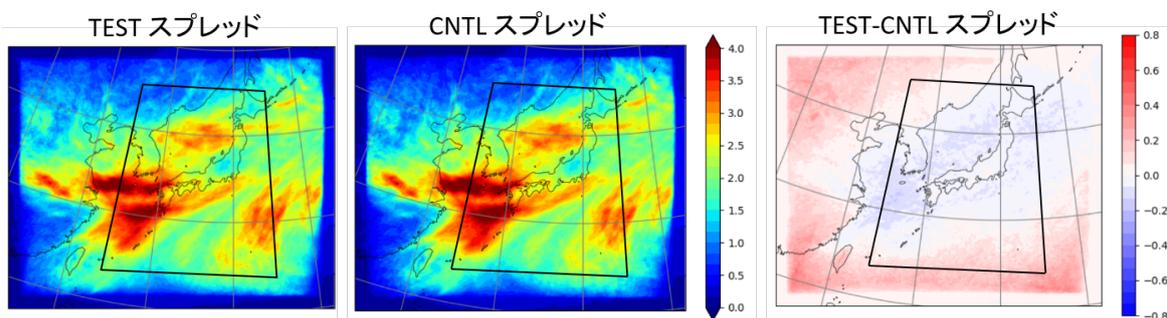


図 4.3.2 スプレッドの夏期間平均。850hPa の相当温位 [K]、FT=9。左から TEST, CNTL, TEST-CNTL。黒枠は図 4.3.1 と同じ。

が過小な傾向があることが分かる。図 4.3.2 に TEST と CNTL のスプレッドを示す。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 (右) を見ると、初期摂動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っている。それぞれ CNTL の課題を緩和し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。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が入りやすい領域で見られ、SPPT 法の導入によるスプレッドの増加は予報領域全体に及び、その両者が合わさったものと考えられる。

図 4.3.3 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 4.3.1 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つつ、MSM 域では予報後半にかけてのスプレッドの過小傾向が改善していることが分かる。こ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、夏実験、冬実験ともに 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

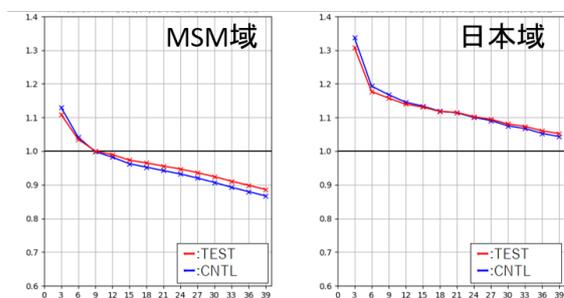


図 4.3.3 夏期間の 850hPa 相当温位 [K] の予報時間別のスプレッドスキル。青線が CNTL、赤線が TEST。検証領域は (左) MSM 域、(右) 日本域。横軸は予報時間 [h]。

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、上層や地上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²、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 4.3.4)。

(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 4.3.5 に示す。いずれの閾値においても CNTL に対して TEST が

² メソスケール現象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)。

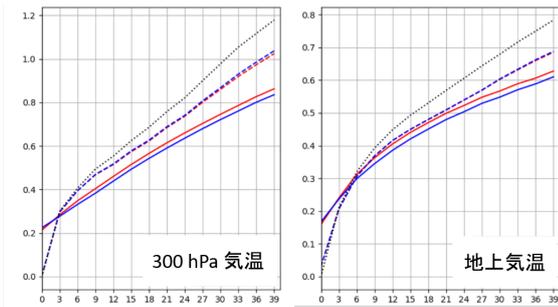


図 4.3.4 スプレッド（実線）およびアンサンブル平均の RMSE（点線）の予報時間別の夏期間検証結果。青線が CNTL、赤線が TEST。黒点線はコントロールランの RMSE。検証領域は日本域。（左）300 hPa の気温 [K]、（右）地上気温 [K]。横軸は予報時間 [h]。

改善した。弱雨に比べ閾値 30 mm/3h 等の強雨予測で改善幅が大きい。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 4.3.6）。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。

今回の実験では初期摂動の振幅は 95% の大きさに調整しているものの、摂動の構造などは変更していないため、各メンバーの降水分布は CNTL と大きく変わらないことが多い。その中で、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ている。降水確率予測の改善につながったと考えられる典型的な事例として、2020 年 7 月 7 日の九州付近の降水事例を挙げる。MSM や MEPS では、積雲対流過程に起因するモデル地形に沿った降水域が表現されることがあり、この事例においてもその傾向が見られている（図 4.3.7 左下）。この事例では、SPPT 法の導入により、この表現にばらつきが生じ、地形に沿った降水を表現するメンバーが減少し地形風下の降水を表現するメンバーが増加した。その結果、30 mm/3h の超過確率で見て、CNTL（右上）に対し TEST（右下）では、黒破線の楕円で示した地形風下の超過確率の増加が見られ、解析雨量との対応が向上した。この事例に見られるように、積雲対流過程の摂動を考慮したことによって降水表現のばらつきが増加したことが、降水確率予測の改善に寄与していると考えられる。

4.3.4 局地数値予報システムへの影響

局地解析における Hybrid-3DVar（第 3.4 節 注:3.5 項）では、気候学的背景誤差と MEPS の予報値から作成した背景誤差を混ぜて用いている。本項では、今回の MEPS の変更が局地数値予報システムへ与える影響を評価するために行った実験結果について述べる。現ルーチン局地数値予報システム相当の設定の実験をコントロール（CNTL）とし、変更した MEPS をアンサ

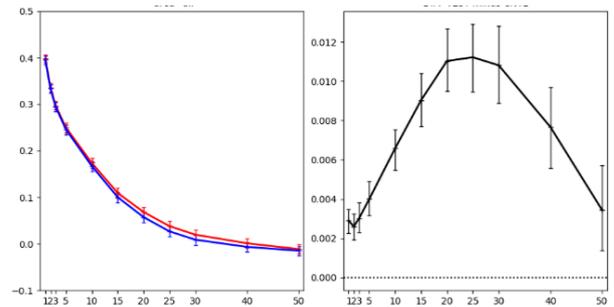


図 4.3.5 夏期間の 3 時間降水量の（左）ブライアスキルスコア、（右）TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は閾値 [mm/3h]。

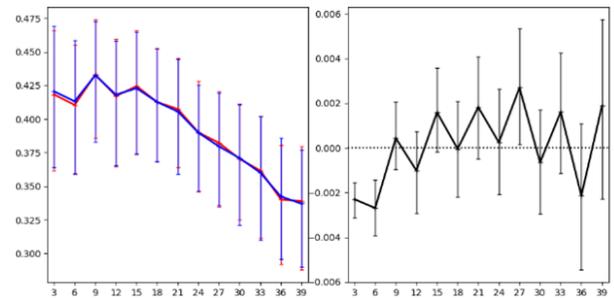


図 4.3.6 冬期間の閾値 2 mm/3h の（左）ブライアスキルスコア、（右）TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は予報時間 [h]。

ンプル摂動として用いた実験をテスト（TEST）とする。実験期間は夏:2020 年 7 月 2 日-7 月 8 日、冬:2020 年 1 月 11 日-1 月 21 日で、それぞれ 1 時間毎の初期値から予測を実行した。

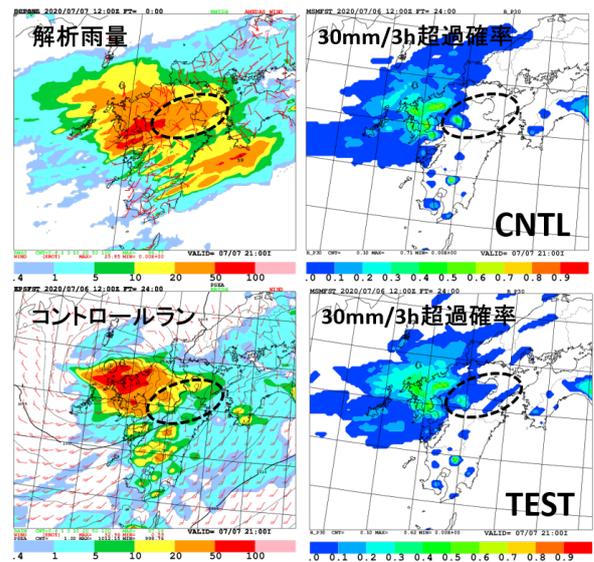


図 4.3.7 2020 年 7 月 7 日 21JST の 3 時間降水量について（左上）解析雨量、（左下）コントロールラン、（右上）CNTL の 30 mm/3h 超過確率、（右下）TEST の 30 mm/3h の超過確率。予報値は 2020 年 7 月 7 日 12UTC 初期値の FT=24。

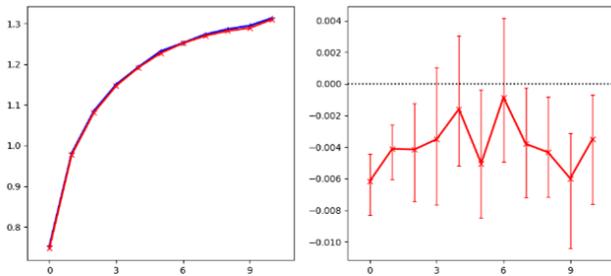


図 4.3.8 局地数値予報システムの夏期間における対地上観測検証の地上気温 [K] の (左) RMSE、(右) TEST と CNTL の差。横軸は予報時間 [h]。青線が CNTL、赤線が TEST。

夏実験、冬実験ともに地上要素で第一推定値と観測値の整合性の向上 (図略) や、予報スコアに有意な改善が見られた。図 4.3.8 に夏期間の地上気温の RMSE、図 4.3.9 に冬期間の地上比湿の ME の改善を示す。地上気温の改善は、MEPS の変更によりスプレッドの増加した領域 (主に北海道など) においてインクリメントが増加した (局地解析のハイブリッド同化において、MEPS のスプレッドの増加により気象場に依存する背景誤差が大きくなり、観測データのインパクトがより大きくなった) ことにより、より地上気温の観測情報が適切に初期値に反映されたことによるものである。地上比湿の改善は、偽相対湿度³と温位の負の誤差共分散が増加したため、地上気温観測が地上比湿のインクリメントに与える影響が大きくなったことの結果とみられる。対ラジオゾンデ検証では北海道や大陸側の地点において初期値の下層の気温、高度場の RMSE が改善した (図略)。これは今回の MEPS の変更で下層気温のスプレッドが北海道や大陸等で増加したことにより下層気温のインクリメントが増加したためと考えられる。しかし、925 hPa の気温予測では FT=3 で改悪となった。MEPS の変更による 925 hPa の気温スプレッドは過大であることから、背景誤差の見積もりが過大となった可能性がある。これらの変化は、いずれも MEPS の変更によるスプレッドの変化との対応が見られる結果と言える。

4.3.5 まとめ

初期摂動と側面境界摂動のみを考慮している MEPS において、新たに数値予報モデルの不確実性を考慮するため、SPPT 法の導入に向けた開発を進めてきた。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、降水確率予測の悪化を抑えつつ、スプレッドの空間分布が適正化することを確認した。このスプレッドの変化は、MEPS 摂動に基づく背景誤差を通して局地数値予報システムに影響するが、その影響がスプレッドの変化と対応することを確認した。この結果を踏まえ、2023 年に MEPS に本変更を導入する計画

³ asuca-Var の解析変数の一つで、(水蒸気の混合比) / (第一推定値の飽和水蒸気の混合比) で定義される。

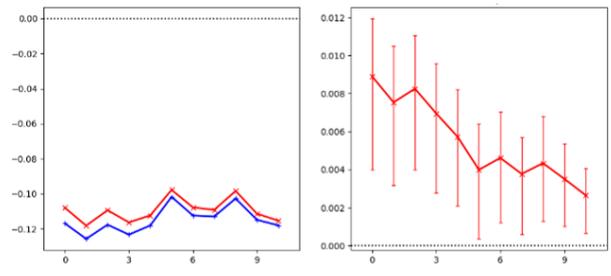


図 4.3.9 局地数値予報システムの冬期間における対地上観測検証の地上比湿 [g/Kg] の (左) RMSE、(右) TEST と CNTL の差。横軸は予報時間 [h]。青線が CNTL、赤線が TEST。

である。現在、同時期に計画される全球モデル、メソモデルの変更と組み合わせた実験を実施し、2023 年の MEPS 更新に向けた準備を進めている。

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)、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考えられ、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

- 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.
- 川田英幸, 欠畑賢之, 河野耕平, 2021: 気象庁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に向けた開発. 第 24 回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.
- 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.
- 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 Perturbed 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. 数值予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 69–78.

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

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

4.4 局地モデルの改良

4.4.1 はじめに

局地モデルは、時空間スケールの細かな現象の予測を迅速に提供することを目的とした予報モデルで、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モデルと位置付けられている。2022年12月時点で、水平解像度2 km、鉛直76層の予報モデルとなっており、1日24回（毎正時初期値）予報時間10時間で運用している。今般、予測精度向上のために格子平均標高の作成元データを高精度・高解像度のMERIT DEM(Yamazaki et al. 2017)に置き換えるとともに、物理過程を改良し、2022年度末に局地モデルを更新する計画である。本節では、これらの改良項目の概略と物理過程の変更による予測特性の変化について述べる。

4.4.2 変更の概要

本項では、2022年度末に予定している局地モデルの変更の概要と、個々の変更を適用したときの予測特性の変化を報告する。モデルで用いる格子平均標高の作成元データを、米国地質調査所のGTOPO30（約1 km解像度）から約90 m解像度のMERIT DEMに置き換えるとともに、物理過程について以下の変更を適用する計画である。

- 雲物理過程について、メソモデルで用いているスキームの導入に加え、混相雲の扱いの変更、雲氷の質量-粒径関係の変更等の改良
- 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
- 放射過程で用いる微量気体濃度（CO₂, N₂O, CH₄）を2020年全球気候値に基づいて更新
- 境界層乱流スキームであるMYNNスキームで用いられる、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定式化の改良

境界層乱流スキームの変更については、2022年3月に現業化されたメソモデルで導入された項目と同一であるため、変更の詳細については数値予報開発センター年報（令和3年）第4.4節（気象庁2022）を参照いただきたい。

各項で示す比較実験について、2022年8月時点のルーチン相当の設定とした実験をコントロール（CNTL）とし、個別の変更を適用した設定の実験をテスト（TEST）と表記する。統計検証では以下の実験期間を対象とした。

- 夏期間：2020年7月2日～7月15日
- 冬期間：2020年1月11日～1月21日

雲物理の改良

局地モデル・メソモデルの雲物理はいずれも1モーメントバルク法に基づくスキームを採用しているが、仕様の詳細が大きく異なる。メソモデルの雲物理は基

盤モデルを2017年2月にこれまで運用してきたJMA-NHM(Saito et al. 2006)から新しい気象庁非静力学モデル asuca(Ishida et al. 2022)に置き換えた際に、JMA-NHMの雲物理スキームから大幅な改良がなされた。さらに、2020年3月のメソモデル更新の際にも改良が加えられており、新しい科学的知見が多く取り込まれている（以下、2020年3月以降メソモデルで用いている雲物理をMPascと表記する）。他方、局地モデルについてはJMA-NHMの雲物理スキームが用いられている。今年度の局地モデル更新では、雲物理スキームを従来のものからMPascに置き換えるのに加え、以下に述べる変更を適用する計画である。なお、MPascの詳細については、数値予報開発センター年報（令和2年）第2.2.8項（気象庁2021a）を参照いただきたい。

MPascを局地モデルにそのまま適用した場合、衛星シミュレータ（RTTOV）を用いた調査から、冬季の日本海上等の混相雲で過冷却水滴（雲氷）が過少になることが開発の過程で明らかとなった。そこで、観測に基づく混相雲の雲量診断の見直し（Abel et al. 2017）を行うことで固相の成長による雲氷の消費を軽減した。また、MPascでは雪と雲氷で同じ質量-粒径関係（Brown and Francis 1995）を使用しているが、この関係式は粒径が100 [μm]以上を想定したものであり、粒径の小さな雲氷に適用するのは適切でないと考えられる。そこで、雲氷の質量-粒径関係を100 [μm]以下についても考慮しているMitchell et al. (2010)の関係式に変更した。その他、局地モデルの水平格子間隔に応じた臨界相対湿度の調整や、昇華・蒸発・融解過程の定式、雲氷の落下速度計算、雪と雲氷の衝突併合過程、部分雲過程に関連する見直しを行った。

以下に、MPascへの置き換えおよび改良を加えた雲物理の予測への影響を示す。ただし、TESTでは上記雲物理の変更に加えて境界層スキームの変更も適用した。これは、境界層スキームの変更により乱流統計量が適正化された効果が部分雲の表現に影響することを前提として、今般の雲物理の開発を実施したためである。図4.4.1に夏季の低気圧による降水事例について、GPM主衛星二周波降水レーダー（DPR）のKu帯レーダーの反射強度を、衛星シミュレータによってモデル出力から算出した反射強度と比較した結果を示す。MPascの導入および上述の改良により、高度5 km付近に見られる融解層の上層・下層ともにTESTで改善が見られた。まず、融解層より上層に着目すると、CNTLでは過大であった反射強度が、TESTでは観測に近づいていることが分かる。CNTLの方が雪の平均粒径が大きいことが上層の反射強度が高くなる原因となっているが、TESTで雪の粒径分布が変わることで、CNTLで過大であった雪の平均粒径が小さくなったこと、また、質量-粒径関係の変更により、粒径が大きくなると共にバルク密度が小さくなる効果を考慮するようになった結果である。次に、融解層より下層に着目すると、高度約

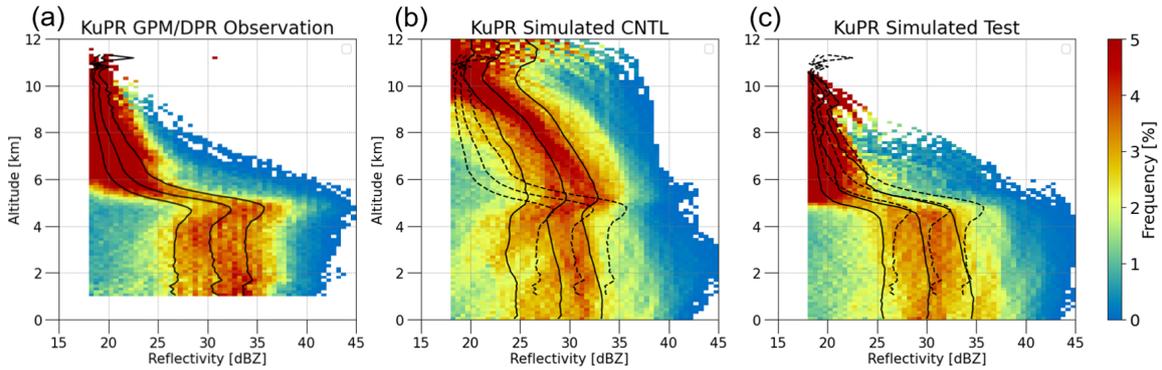


図 4.4.1 2020 年 7 月 13 日 01UTC における GPM/DPR の Ku 帯レーダーの反射強度 [dBZ] の CFADs (Contoured Frequency by Altitude Diagrams: レーダー反射強度の高度別頻度分布)。(a) は観測値、(b),(c) はそれぞれ CNTL, TEST の予測結果 (FT=10) を表す。実線は、(a)-(c) それぞれの 25・50・75 % タイル値を、(b),(c) の破線は観測値による値を表す。

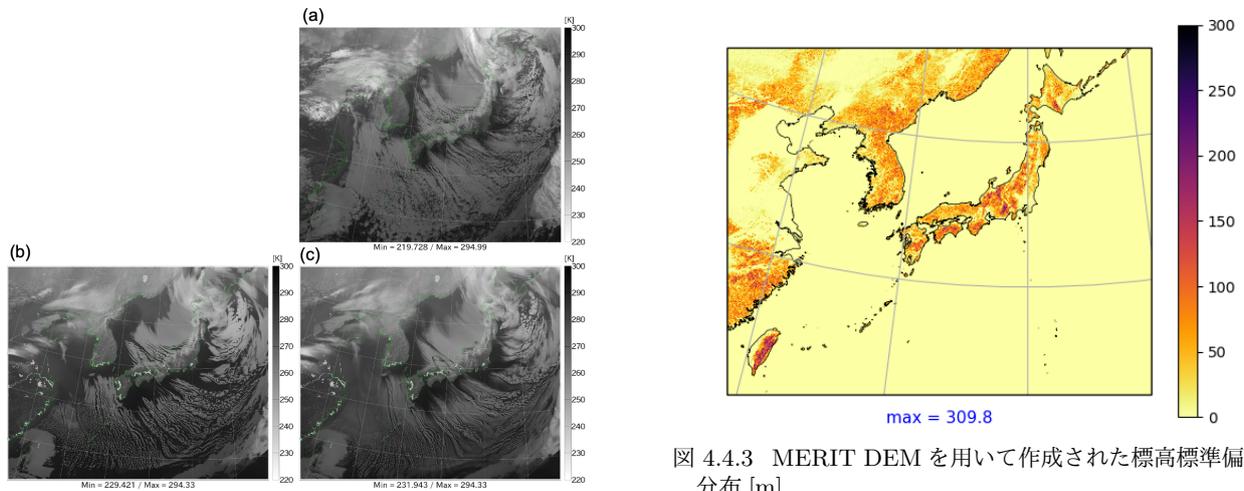


図 4.4.2 2022 年 1 月 12 日 06UTC におけるひまわり 8 号バンド 13 の輝度温度 [K]。(a) は観測値、(b),(c) はそれぞれ CNTL, TEST の予測結果 (FT=9) を表す。(b),(c) はそれぞれのモデル出力から衛星シミュレータを用いて得られた結果を示している。

2-4 km 付近の反射強度の頻度は、CNTL よりも TEST の方が観測に近い。雨の粒径分布は CNTL, TEST で同じ関数形を用いるため、この差は雨水混合比の差に起因する。部分雲過程の導入、霰の生成が多くなったことによる融解の増加、雪の粒径分布変更による雪の融解の増加により雨の生成が多くなったことに加え、雨の落下速度-粒径関係の変更により、雨の落下が少し遅くなり大気中に残りやすくなったことによるものと考えられる。

図 4.4.2 に冬型事例におけるひまわり 8 号バンド 13 の輝度温度の分布を示す。TEST は、北陸沖における雲が過剰ではあるものの、寒気吹き出しの上流側における雲や日本の南海上における雲に着目すると、CNTL は雲域が狭い一方、TEST では雲域の広がり観測に近づく。これは、部分雲過程の導入により、格子平均値で飽和に達していなくても、雲が存在できるように

図 4.4.3 MERIT DEM を用いて作成された標高標準偏差の分布 [m]

なった影響と考えられる。このような部分雲過程の導入による改善は、夏季の海上の弱い降水を伴う対流の表現においても確認された。

地形性乱流による形状抵抗導入

メソモデルや局地モデルでは、統計検証の結果から対流圏下層や地上において強風バイアスがあることがわかっている。その原因の一つとして、サブグリッドの地形起伏の影響を考慮していないことが考えられる。このような問題意識から、サブグリッドスケールの地形性乱流による抵抗の効果を表現するために、Beljaars et al. (2004) が提案した TOFD スキームを新たに局地モデルに導入する計画である¹。

Beljaars et al. (2004) の TOFD スキームでは、サブグリッドの標高標準偏差に応じてパラメタライズした形状抵抗を下層水平風の時間変化率に与える。したがって、サブグリッドの標高標準偏差を適切に算出するためには、局地モデルの水平解像度 (2 km) よりも十分に高解像度の標高データが欠かせない。そこで、平均

¹ 全球モデルでは TOFD スキームが 2020 年 3 月に導入された (気象庁 2021b)。

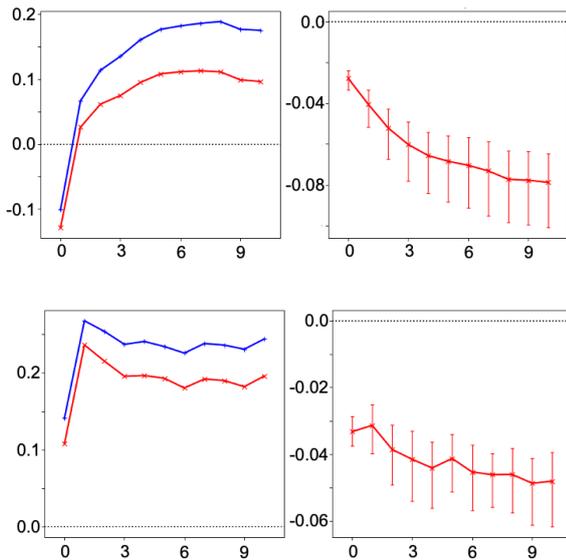


図 4.4.4 地上風速の対アメダス平均誤差 [m/s] (左) と TEST の CNTL からの差 (右)。横軸は予測時間 [h] を表し、上段が夏期間、下段が冬期間の検証結果である。左図において CNTL、TEST の結果はそれぞれ青線、赤線に対応する。

標高の元データと同様に、約 90 m 解像度の MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) から標高標準偏差データを作成した。標高標準偏差を算出する前段階で、地形データにバンドパスフィルタを適用し、TOFD で対象とする水平スケールの起伏を抽出した。取り出す水平スケールは、Beljaars et al. (2004) では GTOPO30 の利用を想定して 2 km–20 km としているが、MERIT DEM では微細な地形構造を反映できることから、局地モデルの解像度で適切に利用する目的で 400 m–4 km とした。合わせて、地形フィルタ幅に依存する TOFD の係数も修正した。この設定で算出した標高標準偏差の分布を図 4.4.3 に示す。分布の特徴として、標高は高いが砂漠域が広がる大陸奥地などでは標準偏差が比較的小さい一方、日本の中部山岳や台湾などでは大きいことが挙げられる。

TOFD を導入した実験²を TEST とした統計検証結果として、地上風速の対アメダス平均誤差を図 4.4.4 に示す。夏期間の初期値を除き地上風速は強風バイアスが見られるが、TEST では夏冬ともにバイアスが軽減していることが分かる。また、地上だけでなく下層大気の強風バイアスも、対ラジオゾンデ検証、対ウインドプロファイラ検証のいずれでも軽減する結果が得られた。地上風速の弱体化は地表面からの顕熱・潜熱を減らす要因になるため、気温や比湿にも影響を及ぼす。統計検証結果からは、夏期間を中心に地上気象要素の全般的な改善が確認できた。

夏季の降水についても、対解析雨量の統計検証でも弱～中程度の雨量を中心に空振り率・見逃し率がとも

² 本実験では平均標高は CNTL と同じ GTOPO30 を用いた。

に低下しており、改善が確認された。降水で改善がみられた事例を図 4.4.5 に示す。この事例では梅雨期で南西風が卓越しており、CNTL では解析雨量と比較して中部山岳の風下で過大な降水がみられる (図の破線内)。一方、TEST では山地を中心に下層の風速が低下し、山岳風下の過大な降水が減少した。地形に対応したこのような特性変化が、弱から中程度の雨量の階級での空振り率の減少に寄与していると考えられる。

微量気体濃度定数更新 (放射)

放射計算で用いられる温室効果気体については、CO₂、N₂O、CH₄ の濃度として通年の気候値を領域一様に与えている。これまで局地モデルで使われているこれらの微量気体濃度は 2000 年前後の全球平均値を用いており、近年の値と比べて過小であった。今年度のモデル更新で、微量気体濃度の値を WMO が算出している温室効果気体の 2020 年全球平均値に変更する。この変更により温室効果気体の寄与が増加することから、対流圏の気温が上昇する。

更新前後の地上下向き長波を基準地上放射観測網 (BSRN) の観測値と比較した結果を図 4.4.6 に示す。定数更新により、どの地点でも夏冬ともに地上下向き長波は増加し、夏期間に 0.15 [W/m²]、冬期間に 0.4 [W/m²] 程度の影響があることが分かる。札幌では夏期間に正バイアスであるためバイアスが拡大するが、それ以外では観測と比べ過小であり、定数更新によりバイアスが軽減する。地上下向き短波については、CO₂ の透過率が低下した結果、0.1–0.2 [W/m²] 程度減少することを確認した。

4.4.3 まとめ

本節では、2022 年度末に予定している局地モデルの更新について、物理過程の改良に向けた開発とそれによって得られた効果を概観した。雲物理において、メソモデルで用いているスキームはより新しい知見が取り込まれていることから、局地モデルにも同じスキームを導入したことに加え、いくつかの改良にも取り組んだ。今般導入する雲物理スキームでは、レーダー反射強度や衛星シミュレータを用いた検証において、より観測に近づくことが確認できた。地形性乱流による形状抵抗を今回新たに導入することで、地上および下層大気の強風バイアスが軽減するだけでなく、地上気象要素の全般的な誤差軽減や地形に起因する降水表現の改善にも寄与した。また、放射で用いる微量気体濃度定数を近年の値に更新することで、地上下向き長波の平均誤差が軽減した。今後、2023 年度末に局地モデルの予測時間延長、2025 年度に水平分解能の高解像度化を予定している。これに合わせ、予測精度の向上に資するため物理過程の改良にも継続して取り組む計画である。

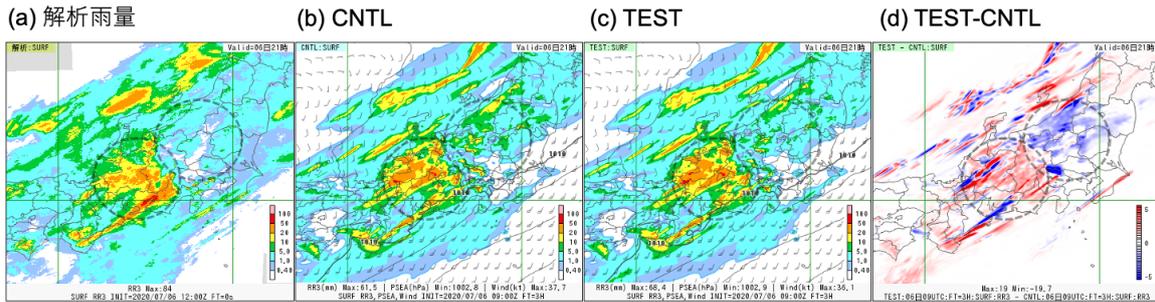


図 4.4.5 2020 年 7 月 6 日 12UTC (2020 年 7 月 6 日 09UTC 初期値) の前 3 時間降水量 [mm]。(a) 解析雨量、(b)CNTL、(c)TEST、(d)TEST の CNTL からの差にそれぞれ対応しており、(b) と (c) の等値線は海面更正気圧 [hPa]、矢羽根は地上風 [kt] を示す。

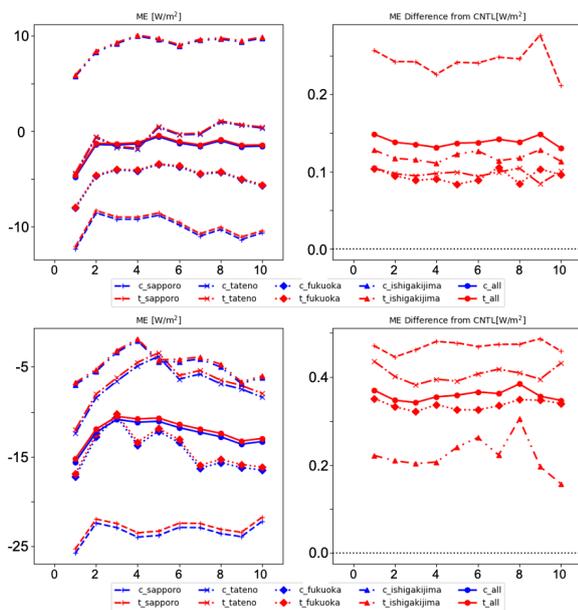


図 4.4.6 地上上下向き長波の基準地上放射観測網 (BSRN) 各地点での平均誤差 [W/m^2] (左) と TEST の CNTL からの差 (右)。+ : 札幌、× : 館野、◆ : 福岡、▲ : 石垣島、● : 4 地点の平均にそれぞれ対応する。横軸は予測時間 [h] を表し、上段が夏期間、下段が冬期間の検証結果である。左図において CNTL, TEST の結果はそれぞれ青線、赤線に対応する。

参考文献

Abel, S. J., I. A. Boutle, K. Waite, S. Fox, P. R. A. Brown, R. Cotton, G. Lloyd, T. W. Choullarton, and K. N. Bower, 2017: The Role of Precipitation in Controlling the Transition from Stratocumulus to Cumulus Clouds in a Northern Hemisphere Cold-Air Outbreak. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 2293–2314.

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

Brown, P. R. and P. N. Francis, 1995: Improved Measurements of the Ice Water Content in Cirrus Using

a Total-Water Probe. *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, **12**, 410–414.

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.

気象庁, 2021a: メソ解析とメソモデルの改良. 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, 48–55.

気象庁, 2021b: 全球モデルの改良. 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, 31–41.

気象庁, 2022: 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. 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, 92–99.

Mitchell, D. L., P. Robert, and R. P. Lawson, 2010: Inferring Cirrus Size Distributions through Satellite Remote Sensing and Microphysical Databases. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1106–1125.

Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Monthly Weather Review*, **134**, 1266–1298, doi:10.1175/MWR3120.1.

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.

4.5 観測データの新規導入と利用方法の改良

4.5.1 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。

4.5.2 放射伝達モデル RTTOV の更新

(1) RTTOV 更新の概要

衛星により観測された輝度温度の同化では、観測演算子として放射伝達モデルを用い、計算した輝度温度を観測された輝度温度と比較している。放射伝達モデルは、数値予報モデルが出力する気温・水蒸気のプロファイル及び地表面情報を入力として輝度温度を計算する。気象庁では、全球解析への輝度温度同化開始(計盛・岡本 2004; 計盛ほか 2005; 岡本 2007)以来、放射伝達モデルとして、EUMETSAT の NWP-SAF で開発された RTTOV(Eyre 1991) を用いている。

RTTOV は計算精度向上や機能追加、新規衛星への対応など、常に改良が行われており、数年ごとに新しいバージョンがリリースされている。RTTOV を最新版に更新することにより、最新の技術開発成果を取り込むことができるほか、バグ修正や新たに打ち上げられた衛星への対応といったサポートも受けられる。そのため、継続的に輝度温度データを利用する上で RTTOV の更新が必要である。

現在、RTTOV-10.2 から RTTOV-13(Saunders et al. 2020) への更新作業を行っている(気象庁 2022f)。RTTOV-13 への更新による主な変更点に、以下のものがある。

- 最新の気体吸収データベースに基づく放射伝達計算用の係数(以下「係数」とする)の更新
- マイクロ波における雲や降水域の輝度温度計算の高度化
- 赤外波長帯における雲域の輝度温度計算の精緻化
- 陸域の射出率データベースの更新
- 海面射出率モデルの更新(赤外: IREMIS、マイクロ波: FASTEM-6)

輝度温度データは、全球解析、メソ解析、局地解析システムでそれぞれ同化利用されており、これらすべてにおいて RTTOV の更新作業が必要となるほか、輝度温度を観測する利用中のセンサすべてに関して、変更による影響の確認が必要となる。変更箇所が多岐にわたる大規模な変更となり、予期せぬ変化や異常が生じる可能性があるため、導入に向けた更新作業は、以下のように 2 段階に分けて確実に実施した。まずは、

システムへの組み込みとして、モジュールの差し替えや定数ファイル名の変更など、RTTOV-13 が動作するために必要な最低限の(科学的に新しい機能の利用を含まない)変更を行い、大規模な更新を確実に実施する。次に、RTTOV-13 で導入された科学的に新しい機能を利用するため、計算アルゴリズムの変更や最新の分光学に基づいた高精度なシミュレーションが可能となる、放射伝達計算用の係数の更新を中心とした変更を実施する。

第一段階のシステムへの組み込みは、全球解析およびメソ解析については 2022 年 6 月 30 日に、局地解析については 2022 年 8 月 9 日に、それぞれ実施した。現在、第二段階の新機能の利用に向けた変更について作業を進めている。以下、第一段階および第二段階についてそれぞれ概要を述べる。

(2) RTTOV-13 のシステムへの組み込み

大規模な変更を確実に実施するための第一段階として、RTTOV-13 が動作するための必要最低限の実装を行った。実装の内容は、モジュールの更新の他、RTTOV-10.2 とは互換性がなく RTTOV-13 での導入が必須となる、陸域の射出率データベースの更新および、マイクロ波における雲や降水域の輝度温度計算の高度化である。係数については、フォーマットのみ RTTOV-13 に対応する変更をし、RTTOV-10.2 で利用していた係数の内容を変更せず、輝度温度の計算結果を大きく変えないようにした。組み込み作業では着手時点での最新バージョン 13.0 を利用して RTTOV ライブラリを作成し、RTTOV の外部仕様等の変更に合うように RTTOV を使用するモジュール類やテーブル等を変更した。全球解析、メソ解析および局地解析の各システムにおける実装の変更箇所と更新内容の対応を表 4.5.1 に示す。

陸域の輝度温度の計算では、一部のセンサを除き、陸域の射出率として RTTOV 付属の射出率データベースの値を入力としている。マイクロ波サウンダ AMSU-A、MHS および ATMS では、マイクロ波の陸面射出率として CNRM データベース¹(Karbou et al. 2006, 2010) を利用している。RTTOV-13 では CNRM データベースの内容が 2015 年の観測に基づく気候値に更新されるとともに、ファイルフォーマットが変更され、従来のファイルは利用できなくなった。このことから、内容の更新された新しいデータベースを利用することとした。ただし、新しいデータベースではサンプリングの影響と思われる空間的な欠損が点在するため、元のデータベース(解像度 0.25°)を格子点毎に 0.5°×0.5°の領域で平均して欠損値を補完したファイルを作成して利用した。また、チャンネルによって欠損の状況が異

¹ フランス気象局の国立気象研究センター(Centre National de Recherches Météorologiques)で作成されたデータベース。

なることへの対応等、必要に応じた処理の修正も行った。なお、赤外センサについては、赤外の陸面射出率データベース UWIREMIS(Borbas and Ruston 2010)を静止気象衛星の CSR の同化で利用している。このデータベースについては、フォーマットのみ変更されたファイルが提供されており、これを利用することから、輝度温度の計算結果には影響はない。

全球解析では、衛星に搭載されたマイクロ波イメージャやマイクロ波水蒸気サウンダを、雲・降水域も含めた全天同化により利用している(気象庁 2021a, 2022e)。RTTOV を用いて雲や降水域を含む輝度温度を計算するには、雲や降水粒子の散乱特性を定義する散乱定数ファイルが必要である。RTTOV-13 では、雲氷、雪、霰の非球形粒子による散乱を考慮するように計算が高度化され(Geer et al. 2021)、散乱定数ファイルが更新された。これにより、RTTOV-10.2 で用いていた従来の散乱定数ファイルは利用できなくなることから、RTTOV-13 における高度化を適用する必要性が生じた。RTTOV-13 用に提供されている散乱定数ファイルには雲氷、雲氷、雨、雪、霰の散乱定数が含まれている一方、RTTOV-10.2 を用いた雲や降水域の輝度温度の計算では、RTTOV に雲氷、雲氷、降水フラックス、降雪フラックスを与えており、霰に関するパラメータは与えていない。霰に関するパラメータの扱いを RTTOV-10.2 と揃えるため、RTTOV-13 用に提供されている散乱定数ファイルから、霰に関する定数を除いたファイルを作成して利用するようにした²。図 4.5.1 に RTTOV-10.2 と RTTOV-13.0 で計算したマイクロ波イメージャ GMI のチャンネル 13 (183.31±7 GHz) の輝度温度の例を示す。対流雲の周辺において計算された輝度温度はいずれも観測より低いバイアスを持つ傾向にあるものの、RTTOV-13 ではバイアスが緩和され、観測に近い輝度温度が計算されている。結果として、品質管理で弾かれる観測データが減少し、利用される観測データがやや増加した。

ここまで述べたシステムへの組み込みと変更について、いくつかのステップで動作確認を行った。まず、解析予報サイクルをせずに、変更前のシステムと同一のモデル第一推定値を利用した品質管理処理のみの実験を行い、品質管理処理における基本的な実装に不備がないかを確認した。この実験を全球解析、メソ解析および局地解析の各システムにおいて一定期間行い、変更による輝度温度の計算値の統計的な特性を確認した。その結果、どのセンサについても、輝度温度の計算値と観測値の差や標準偏差について変更前後の差異は小さく、確認された差異についても、マイクロ波センサで射出率データベースを変更したことなど、加えた変

² 提供されている散乱定数ファイルを利用して霰を 0 として与えることも可能であるが、散乱定数ファイルから霰に関する定数を除いたファイルを利用した場合と比べてアジョイントの計算結果がわずかに異なるため、この対応とした。

表 4.5.1 各システムにおける変更箇所と変更内容。表内の(1)~(3)は以下の通り。(1):モジュールの更新、(2):陸域の射出率データセットの更新、(3):マイクロ波における雲や降水域の輝度温度計算の高度化。

システム	変更箇所	変更内容
全球	解析前処理 (解析本体用、LETKF 用)	(1)、(2)、(3)
	解析本体、LETKF	(1)、(3)
メソ、 局地	解析前処理	(1)、(2)
	解析本体	(1)
	解析後処理	(1)、(2)

更に対応する変化であった。全球解析において全天同化を行うマイクロ波センサについては、輝度温度の計算値と観測値の差異の統計的性質に基づき雲や降水の影響に応じた観測誤差を設定していることから、雲や降水域を含む輝度温度の計算の高度化が、観測誤差の設定に与える影響について着目した。その結果、統計的性質の変化は小さく、観測誤差の設定に変更の必要はないことを確認した。

次に、解析本体を含めたシステムの実装を確認するため、解析予報サイクルをせずに解析処理までを行う実験を一定期間行った。その結果、全球解析、メソ解析および局地解析の各システムにおいて、解析インクリメントや解析コストが意図通りほとんど変わらないことを確認した。さらに、解析予報サイクル実験により予測精度が概ね中立であることを確認し、ここまで述べたシステムへの組み込みによる顕著な変化は起きておらず、想定通りの動作をしていることを確認した。全球解析においては、全天同化マイクロ波センサで利用される観測数が増加することにより、LETKF でスプレッドが減少するとともに、それ対応して共分散膨張係数が大きくなっており、想定通りの結果が得られたことを確認した。

これらの結果を踏まえ、全球解析、メソ解析および局地解析の各現業システムに、RTTOV-13 の組み込みを適用した。

(3) RTTOV-13 の新機能の利用

現在、RTTOV-13 のシステムへの組み込みによって利用可能となった新しい係数や海面射出率モデルの導入に向けて、開発を進めている。これらの更新では、RTTOV による輝度温度の計算精度が変化するため、計算された輝度温度の統計に基づいて作成されるパラメータ等(固定値によるバイアス補正量、観測誤差、品質管理に必要な定数等)は、いずれも確認や見直しが必要となる。

これまでの調査では、新しい係数や海面射出率モデルの導入により輝度温度の計算精度自体は向上し、観測値に近づくことを確認した。一方で、解析予報サイクル実験を行ったところ予測精度に改悪が見られ、調査や対応が必要となっている。原因として、更新によって

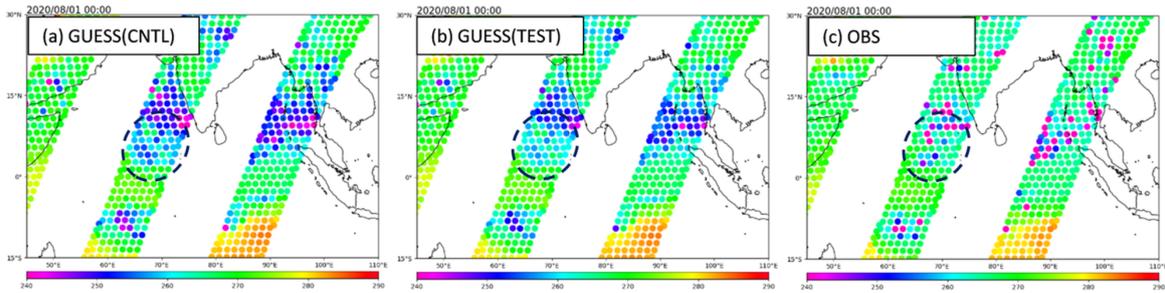


図 4.5.1 RTTOV-10.2 と RTTOV-13.0 で計算された GMI のチャンネル 13 (183.31±7 GHz) の輝度温度の比較 (解析時刻 2020 年 8 月 1 日 00UTC におけるデータ分布の例)。(a)GUESS(CNTL) と (b)GUESS(TEST) はそれぞれ RTTOV-10.2 と RTTOV-13.0 により計算された輝度温度。(c)OBS は観測された輝度温度。単位はいずれも [K]。

品質管理処理の結果が変化することが考えられる。例えば、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A の品質管理で用いる雲水量を輝度温度から推定する際に、新たな係数で再作成されたスキャンバイアス補正值を用いると、雲水量の複数衛星間の差異は解消することから、推定した雲水量の精度自体は向上していると考えられるが、既存の閾値をデータの不使用の判定に用いると、衛星によってはこれまでより利用データ数が減少し、予測精度の悪化の一因となっていることが分かった。そのため、品質管理に用いている従来の様々な閾値や、品質管理処理自体についての見直しが必要である。現在、センサごとに予測精度の改悪の原因を調査し、品質管理処理の変更の可否を検討しているところである。

RTTOV-13 には、システムへの組み込みの際に利用するようにした射出率データベース以外にも、いくつかの射出率データベースが追加されている。CNRM データベースには、マイクロ波センサ SSMIS の射出率が新しく利用可能となった。また赤外の射出率データベースとして、2000 年から 2016 年の気候値である CAMEL climatology(Borbis and Feltz 2019) が利用可能である。今後、これらの新しい射出率データベースの利用を検討する。

(4) まとめと今後の課題

現在利用中の放射伝達モデル RTTOV について、最新バージョンである RTTOV-13 をシステムへ実装した。これにより、全天同化など衛星データの先進的な技術を取り込むことができるようになるほか、バグ修正や新しい衛星への対応といったサポートが可能になるなど、輝度温度データの利用高度化に向けて大きく前進した。

係数の更新や射出率モデルの更新など、RTTOV-13 の新機能を利用することで、輝度温度の計算精度が向上することを確認した。一方で、品質管理処理の結果が変化することで予測精度が悪化し、輝度温度の計算結果の向上が単純に予測精度の向上につながらないことが確認された。品質管理処理の結果が変化する原因として、品質管理に用いている閾値等が、必ずしも精度向上した計算結果に適合していない可能性がある。

RTTOV-13 の新機能を最大限活用できるよう、更新による品質管理処理への影響の調査や対処についての検討を引き続き行う。

4.5.3 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

(1) ハイパースペクトル赤外サウンダ利用の概要

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で観測することにより、大気中の温度や水蒸気量の鉛直分布を得ることのできるセンサである。当庁においては現在全球解析でのみ利用中であるが、メソ解析において導入を目指して開発を進めている (気象庁 2022b)。

現在全球解析では、気温に感度のあるチャンネル (以下「気温チャンネル」) のみを利用している。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に気温が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) といった難点があり、これまで利用できていなかった (岡垣 2015)。また、メソ解析では、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輝度温度の計算に誤差が生じるなど課題があり、利用に向けた開発が進んでいなかった (岡本ほか 2020)。

今般、全球解析においては、互いに誤差相関の小さい複数の水蒸気チャンネルを選択し、気温チャンネルに追加して利用する。またメソ解析については、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 2022d)、システムの改善により赤外サウンダの利用がより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する。局地解析については、モデル上端高度が低い問題は依然としてあるものの、水蒸気チャ

ンネルについてはモデル上端より上部の大気プロファイルへの感度が小さいため、全球解析での利用で選択した水蒸気チャンネルを新規に利用する。

以下では、2022年度末の現業利用開始に向けて現在開発を進めている、全球解析における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、概要を述べる。

(2) 全球解析における水蒸気チャンネルの利用

RTTOVによる Jacobian（各高度における気温や水蒸気量などの変化に対する輝度温度への感度）を元に、水蒸気チャンネルの候補を選択した。候補となったチャンネルの数はIASIで64個、CrISで27個となった。

すべての水蒸気チャンネルの候補を同化した予備実験を実施し、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、互いに誤差相関の少ない複数チャンネルを選択した。最終的にIASI、CrISともに9個のチャンネルが選択された。その他の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で、水蒸気チャンネルのために新たに加えた品質管理手法はない。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。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、静止衛星晴天放射輝度温度データ）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が確認された。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、外国センターの解析値を用いた予測値の検証では、水蒸気場を中心にRMSEが減少することを確認した。

(3) メソ解析における赤外サウンダの新規利用

メソ解析で利用するチャンネルは全球解析で使用している気温チャンネルおよび、使用開始を予定している前述の水蒸気チャンネルを候補とし、モデル上端高度よりも上部の大気に感度のあるチャンネルは利用しないこととした。

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。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が確認された。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。

(4) 局地解析における赤外サウンダの新規利用

局地解析のモデル上端高度はメソモデルよりもさらに低く、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。そのため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。

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。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が確認された。

(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ている。それぞれの数値予報システムで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する水蒸気チャンネルは、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。

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、チャンネル選択の最適化、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。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、1D-Varでリトリ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したい。

4.5.4 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

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)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³。

2022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4.5.4に示す。更新が完了し運用を再開したレーダーの観測データは、いったん数値予報で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、利用を再開している(気象庁2021b, 2022a)。

2021年7月以降に更新された釧路・種子島・室戸岬・大阪DRAW(以下、新規更新レーダーとする)の反射

³ ドップラー風速については毎時大気解析、三十分大気解析でも利用されている。

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再開するため、メソ・局地それぞれの数値予報システムにおいてデータ品質の調査及びこれらのデータが解析値及び予測値に与えるインパクトを調査した。なお、レーダーデータの同化手法及び品質管理 (Quality Control:QC) 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。

局地解析における新規更新レーダーの疑似相対湿度⁴とドップラー速度の D 値⁵平均及び D 値標準偏差をそれぞれ表 4.5.3 と表 4.5.4 に示す。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、更新後に数値予報システムでの利用が再開されている福岡レーダーのデータ品質と概ね同等であり、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 4.5.2 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と利用した実験の 5 mm/h の降水予測スコア (10 km 平均) を示している⁶。図から、バイアスコアについては新規更新レーダーありの方がなしに比べてやや悪化する傾向が見られるが、空振り率と見逃し率が予測時間全体で改善したことにより、ETS は新規更新レーダーありの方がなしに比べて予測時間全体で改善していることが確認できる。メソ解析においても、15 mm/3 h より弱い雨で新規更新レーダーありの方がなしに比べて ETS が改善することを確認した。

他にも、メソ解析において対流圏中・下層を中心にラジオゾンデ、航空機等による風の観測値と第一推定値の整合性の改善⁷等が確認できたことから、令和 4 年

表 4.5.2 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再開したレーダーである。「-」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	-	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	-	那覇	2018.12.13
名古屋	2021.02.26	石垣島	-		

⁴ 反射強度から推定した相対湿度。

⁵ 観測値 - 第一推定値。

⁶ 新規更新レーダーの観測データを同化した実験は、データの追加に加えて第一推定値と境界値についても新規更新レーダーの観測データを同化したメソ予報のデータを使用している。

⁷ 観測には様々な誤差が含まれており、また、観測値が正し

表 4.5.3 局地解析における新規更新レーダーと福岡レーダーの疑似相対湿度の D 値統計。統計期間は 2022 年 06 月 23 日から 2022 年 7 月 6 日。

サイト名	平均 (%)	標準偏差 (%)	サンプル数
釧路	-0.156	7.76	185014
室戸岬	-0.349	5.68	118119
種子島	0.427	6.66	131667
福岡	0.387	8.15	56983

表 4.5.4 局地解析における新規更新レーダーと福岡レーダーのドップラー速度の D 値統計。統計期間は 2022 年 06 月 23 日から 2022 年 7 月 6 日。

サイト名	平均 (m/s)	標準偏差 (m/s)	サンプル数
大阪 DRAW	-0.121	1.92	54576
釧路	-0.156	2.04	80664
室戸岬	-0.010	2.09	74137
種子島	-0.176	2.06	86017
福岡	-0.068	2.28	48707

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再開した。

令和 5 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、更新が完了したレーダーについてはデータ品質及びメソ数値予報システム、局地数値予報システムに与える影響を確認したうえで順次現業利用を再開する。また、レーダー更新に伴う観測データの品質向上に基づいた観測誤差の変更に関する調査・開発や、将来的な課題である偏波パラメータのデータ同化での利用に向けた調査を進める。

4.5.5 データ同化での船舶 GNSS 利用に関する開発

(1) 冬季におけるメソ解析での船舶 GNSS 可降水量の利用

令和 3 年 8 月からメソ数値予報システムにおいて船舶に設置した GNSS 受信機によって観測された可降水量 (以下、船舶 GNSS 可降水量とする) の利用を開始した (気象庁 2022c)。しかしながら、リアルタイムで入電した船舶 GNSS 可降水量の冬季におけるデータ品質とメソ数値予報システムに与える影響を確認出来ていなかったため、令和 3 年 11 月から船舶 GNSS 可降水量の利用を中断した。

冬季におけるメソ解析での船舶 GNSS 可降水量の利用にむけて、船舶 GNSS 可降水量のリアルタイムデータの品質の調査を行ったところ、D 値統計において夏季に比べて D 値平均の負バイアス傾向が強くなった。

この原因を確認するため、船舶 GNSS 可降水量と同等の海上の観測とみなせる船舶のラジオゾンデ観測や離島のラジオゾンデ観測から計算した可降水量とメソ解析の第一推定値とを比較して調査したところ、これらの観測値に対して第一推定値が大きくなる傾向があくても代表性誤差 (露木 2002) の観点から解析値を観測値に近づけることが必ずしも数値予報システムにおける解析値の精度向上を意味するとは限らない。そのため、第一推定値の精度向上を解析値の精度向上の目安の 1 つとしている。

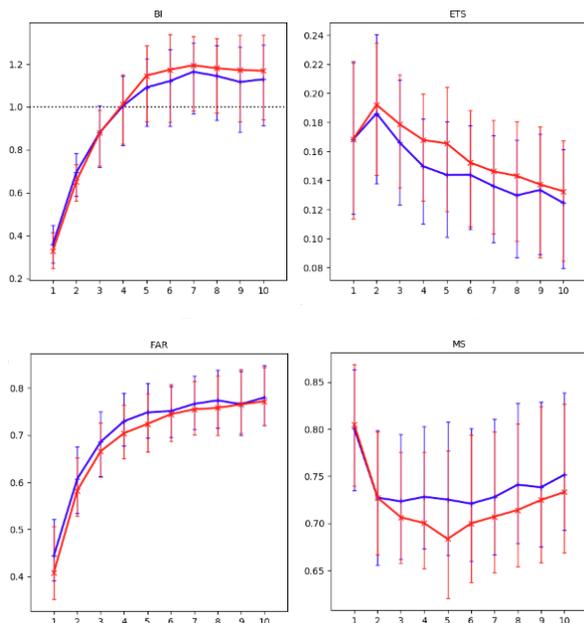


図 4.5.2 解析雨量を参照値とした予測時間別の 5 mm/h の降水予測スコア (10 km 平均)。上段左: バイアスコア、上段右: ETS、下段左: 空振り率、下段右: 見逃し率。青線は新規更新レーダーなし、赤線は新規更新レーダーありのスコアを示しており、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。横軸は予測時間 [hour]。統計期間は 2022 年 6 月 23 日から 2022 年 7 月 6 日。

ることがわかった (図 4.5.3)。特にメソモデルでは可降水量が小さい場合に水蒸気の予測値が観測値に対して大きくなる傾向が見られることから、冬季における船舶 GNSS 可降水量の D 値統計の負バイアス増大は、夏季に比べて冬季の可降水量が小さくなることによって、日本周辺の海上で水蒸気量が過大となるバイアスが冬季において顕在化し、可降水量の第一推定値が観測値より大きくなる頻度が増加した結果と考えられ、船舶 GNSS 可降水量の観測データの品質に問題はないと判断した。

更に船舶 GNSS 可降水量の利用がメソ数値予報システムに与える影響を確認するために性能評価試験を行ったところ、事例調査において改善事例が確認された。また、統計検証結果から予測精度についてもこれまでと同等であることが確認されたことから、令和 4 年 4 月から船舶 GNSS 可降水量の通年での利用を開始した。

(2) メソ解析における船舶 GNSS に対する QC 処理の改良及び局地解析での利用に向けた開発

メソ数値予報システムでの利用開始以降の船舶 GNSS 可降水量のデータ特性を調査した結果、陸に近い海域において異常値が通報される事例⁸が散見されたことから、これらの低品質データの利用を避けるため、地上 GNSS を船舶 GNSS より優先して利用するよう、QC

⁸ 周囲の建築物等からの反射 (マルチパスの効果) などが原因として考えられる。

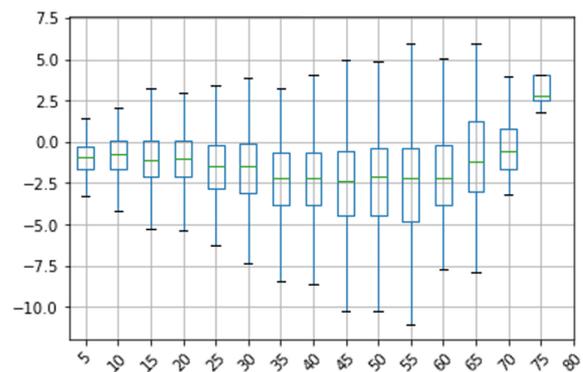


図 4.5.3 離島のラジオゾンデの相対湿度観測から算出した可降水量とメソ第一推定値の可降水量の比較調査。横軸はラジオゾンデの可降水量 [mm]、縦軸は D 値 [mm]。統計期間は 2021 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日。八丈島、名瀬、石垣島、南大東島、父島、南鳥島のラジオゾンデ観測を使用。

処理の変更を検討している。

船舶 GNSS では、QC に利用可能な各種パラメータも観測データとともに通報されている。現業のメソ数値予報システムでの利用開始以降の船舶 GNSS 可降水量観測値とこれらのパラメータを比較して調査することにより新たな QC 処理を実装し、影響評価を行っている。

また、可降水量の空間変化や時間変化が大きい場合に第一推定値と実況とのずれが大きくなり、観測データの品質が良いにもかかわらず QC 処理の 1 つであるグロスエラーチェックで排除されてしまい、同化に利用されないことがしばしばある (気象庁 2022c)。このため、船舶 GNSS 可降水量への Dynamic QC (大野木ほか 1997) の導入に向けた開発を進めている。これらを合わせた船舶 GNSS の QC 処理の改良を令和 4 年度末に現業導入する予定である。

さらに、メソ解析に実装した QC 処理を局地解析での利用に合わせて変更し、局地解析での船舶 GNSS 可降水量の利用を目指して開発を進めている。性能評価試験の結果、局地数値予報システムの予測精度向上のインパクトが確認出来たことから、令和 4 年度末の現業導入を目指して開発を進めている。

4.5.6 局地数値予報システムにおけるマイクロ波散乱計の新規利用

マイクロ波散乱計は、地球に向かってマイクロ波を放射し、地表面での後方散乱強度を測定する能動型の測器であり、海面の状態を介して海上の風ベクトルを推定することができる。海上では直接観測データが少ないため、マイクロ波散乱計による観測データは海上の風の貴重な情報源となる。マイクロ波散乱計はマイクロ波を用いて観測しているため、得られる観測データは雲の減衰を受けにくい、強雨領域では減衰する、強風域では算出が難しいといった性質を持っている。散

表 4.5.5 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 D 値統計。統計期間は 2021 年 7 月 1 日 00UTC から 2021 年 7 月 15 日 21UTC。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	-0.134	-0.272
標準偏差	1.24	1.31
サンプル数	33986	33986

表 4.5.6 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 D 値統計。統計期間は 2022 年 1 月 1 日 00UTC から 2022 年 1 月 15 日 21UTC。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	-0.083	-0.391
標準偏差	1.44	1.56
サンプル数	36128	36128

乱計の詳細な観測原理については太原 (1999) を参照されたい。

気象庁では、EUMETSAT が運用する極軌道衛星 Metop シリーズに搭載されている ASCAT 海上風プロダクトを全球解析、メソ解析で利用している (守谷 2016) が、局地解析では同化に利用されていないため、局地解析での新規利用に向けた開発を進めている。

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、まずは 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 D 値平均、D 値標準偏差 (夏期間及び冬期間における東西風、南北風の D 値統計結果を表 4.5.5 及び表 4.5.6 に示す。) 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。令和 4 年度末の現業導入を目指して開発を実施している。

4.5.7 全球解析における Suomi-NPP,NOAA-20 の VIIRS AMV の利用

第 3.8.2 項で述べた通り、近い将来全球解析で利用する極域 AMV の利用数の減少が想定されているため、令和 4 年 6 月に極域での Dual-Metop AMV の利用を開始した。さらなる極域 AMV の拡充を目的に、令和 5 年 3 月の現業化に向けて、米国の極軌道衛星 Suomi-NPP と NOAA-20 に搭載された VIIRS によって算出される AMV の利用に関する調査、開発を進めている。

参考文献

Borbas, Eva E and Benjamin C Ruston, 2010: *The RTTOV UWiremis IR land surface emissivity module*. EUMETSAT Darmstadt.

Borbas, Eva and Michelle Feltz, 2019: Updating the CAMEL surface emissivity atlas for RTTOV.

Rep. Visit. Sci. Mission NWP_AS18_01, EUMETSAT Numerical Weather Prediction Satellite Applications Facility.

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.

Eyre, JR, 1991: A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. *ECMWF Tech. Memo* 176.

Geer, Alan J, Peter Bauer, Katrin Lonitz, Vasileios Barlakas, Patrick Eriksson, Jana Mendrok, Amy Doherty, James Hocking, and Philippe Chambon, 2021: Bulk hydrometeor optical properties for microwave and sub-millimetre radiative transfer in RTTOV-SCATT v13. 0. *Geoscientific Model Development*, **14**, 7497–7526.

幾田泰醇, 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.

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.

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.

Karbou, Fatima, Élisabeth Gérard, and Florence Rabier, 2006: Microwave land emissivity and skin temperature for AMSU-A and-B assimilation over land. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, **132**, 2333–2355.

Karbou, Fatima, Elisabeth Gérard, and Florence Rabier, 2010: Global 4DVAR assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part I: Impacts of various land surface emissivity parameterizations. *Weather and Forecasting*, **25**, 5–19.

計盛正博, 岡本幸三, 2004: ATOVS 輝度温度の直接同化. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 93–104.

計盛正博, 大和田浩美, 福田和代, 2005: ATOVS レベル 1C 輝度温度の直接同化. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 82–89.

気象庁, 2021a: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトグループの全球解析への導入. 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, 23–28.

- 気象庁, 2021b: 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: 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. 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, 111.
- 気象庁, 2022c: 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, 2022d: 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. 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, 92-99.
- 気象庁, 2022e: 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. 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, 40-43.
- 気象庁, 2022f: 放射伝達モデル RTTOV の更新. 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, 110.
- 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.
- 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, 2007: ATOVS 直接同化. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58-70.
- 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.
- 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.
- Saunders, R, J Hocking, E Turner, S Havemann, A Geer, C Lupu, J Vidot, P Chambon, C Köpken-Watts, L Scheck, and others, 2020: RTTOV-13 science and validation report. Tech. rep., EU-METSAT NWP SAF, 0 pp. https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/rtm/docs_rttov13/rttov13_svr.pdf.
- 太原芳彦, 1999: マイクロ波放射計. 数値予報課報告・別冊第 45 号, 気象庁予報部, 27-43.
- 露木義, 2002: 変分法によるデータ同化の基礎. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 1-16.

4.6 FSOI (Forecast Sensitivity Observation Impact)

4.6.1 はじめに

数値予報システムでは、多種多様な観測データが同化利用されている。同化された観測データがどのように予報にインパクトを与えているか理解することは、観測データ利用の改善及び予測精度向上のためには不可欠である。数値予報開発センターでは、全球モデルの予測精度向上を目的に、全球解析における観測データの新規利用及び利用手法改良に係る開発を行っている。その一つとして、同化した観測データが予報に与えるインパクトを定量的に評価する手法 Forecast Sensitivity Observation Impact (FSOI; Langland and Baker 2004) について、現業システム上での定常的な稼働に向けて開発を進めている。

観測データが予報に与えるインパクトについて、気象庁においてはこれまで観測データセットを追加・棄却する観測システム実験 (OSE: Observing System Experiment)、あるいは、疑似観測データを作成してデータ同化を行う観測システムシミュレーション実験 (OSSE: Observing System Simulation Experiment) により評価してきた。OSE あるいは OSSE での観測データの同化による評価では、対象とする観測データの使用・不使用の設定でそれぞれサイクル実験と予報を行う必要があり、多くの計算機資源と時間を要する。それに対し FSOI による評価では、1 回の実験で観測データごとに予報に与えるインパクトを定量的に診断できるのが特徴である。

気象庁における FSOI の開発は 2008 年頃から進められてきており、これまで気象研究所の実験システムに実装され、その結果が報告されている (石橋 2011, 2015; Ishibashi 2018)。現在、気象庁では気象研究所で実装された FSOI を数値予報課の実験システム (2019 年 12 月時点の現業システム相当) に移植・実装している。

本節では、全球解析へ実装した FSOI について紹介する。なお、FSOI 自体の詳細な解説は Langland and Baker (2004) を、気象庁におけるこれまでの FSOI 開発については石橋 (2011), Ishibashi (2018) を参照されたい。

4.6.2 FSOI の概念

一般的にデータ同化によるサイクル解析では、観測データで第一推定値を修正することにより予報が改善されるとされている。つまり、この予報の改善は観測データの同化によってもたらされたとみなすことができる。FSOI では、この予報の改善を数値予報モデルの線形近似を利用して解析時刻にまで時間をさかのぼり、個々の観測データのインパクトに変換し評価する手法である。FSOI の概念を図 4.6.1 で示す。ここで、 \mathbf{x} , \mathbf{y} はそれぞれモデル空間、観測空間を示す。上添え字 a ,

b , f , o はそれぞれ解析値、第一推定値、予報値、観測値を、下添え字は時刻を示す。例えば、 $\mathbf{x}_{0|-6}^b$ は 6 時間前を初期時刻とする時刻 0 におけるモデル空間における第一推定値を意味する。6 時間前の解析値 \mathbf{x}_{-6}^a を初期値として予報すると、時刻 0 に第一推定値 $\mathbf{x}_{0|-6}^b$ 、時刻 t に予報値 $\mathbf{x}_{t|-6}^f$ を得る。時刻 0 における観測値 \mathbf{y}^o を同化するとインクリメント $\delta\mathbf{x}$ が得られ、より真値に近いと考えられる解析値 \mathbf{x}_0^a を得る。解析値 \mathbf{x}_0^a から予報を行うと時刻 t の予報値は $\mathbf{x}_{t|0}^f$ となる。ここで時刻の異なる解析値からの時刻 t における予報値に着目すると、 $\mathbf{x}_{t|0}^f$ の方が $\mathbf{x}_{t|-6}^f$ よりもより真値に近いと想定され、この差は時刻 0 の観測値 \mathbf{y}^o の同化によって実現したものである。ここで時刻 t における $\mathbf{x}_{t|0}^f$ の予報誤差を $\mathbf{E}_{t|0} = \mathbf{x}_{t|0}^f - \mathbf{x}_t^a$ とすると、予報誤差のエネルギーノルムは

$$e_{t|0}^f = \mathbf{E}_{t|0}^T \mathbf{C} \mathbf{E}_{t|0} \quad (4.6.1)$$

と表される。ここで \mathbf{C} は、乾燥エネルギーノルムや湿潤エネルギーノルム等の誤差の評価に用いるノルムを計算するための行列とする。これによりエネルギーノルム差 Δe 、つまり FSOI による観測インパクトは以下のように展開できる。

$$\begin{aligned} \Delta e &= e_{t|0}^f - e_{t|-6}^f \\ &= \mathbf{E}_{t|0}^T \mathbf{C} \mathbf{E}_{t|0} - \mathbf{E}_{t|-6}^T \mathbf{C} \mathbf{E}_{t|-6} \\ &= (\mathbf{E}_{t|0} - \mathbf{E}_{t|-6})^T \mathbf{C} (\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \\ &= (\mathbf{x}_{t|0} - \mathbf{x}_{t|-6})^T \mathbf{C} (\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \\ &= \left[M(\mathbf{x}_0^a) - M(\mathbf{x}_{0|-6}^b) \right]^T \mathbf{C} (\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \\ &\simeq \left[\mathbf{M}(\mathbf{x}_0^a - \mathbf{x}_{0|-6}^b) \right]^T \mathbf{C} (\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \\ &= \left[\mathbf{M}\mathbf{K}(\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}_{0|-6}^b) \right]^T \mathbf{C} (\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \\ &= (\delta\mathbf{y}^{ob})^T \mathbf{K}^T \mathbf{M}^T \mathbf{C} (\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \quad (4.6.2) \end{aligned}$$

ここで、非線形モデル M の接線形モデルを \mathbf{M} 、随伴モデルを \mathbf{M}^T 、 \mathbf{K} はカルマンゲイン、カルマンゲインの随伴行列を \mathbf{K}^T 、 \mathbf{H} は観測演算子とする。 $\delta\mathbf{y}^{ob}$ は観測値と第一推定値の差 (O-B, D 値) である。(4.6.2) 式が意味するところは以下のとおりである。まず時刻 t における予報誤差 $\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6})$ に左から \mathbf{M}^T をかけて時刻 0 に戻す。さらに左から \mathbf{K}^T をかけてモデル空間から観測空間に変換することで、 $\delta\mathbf{y}^{ob}$ に対する予報誤差の感度 (勾配) ベクトルとなる。最後に $\delta\mathbf{y}^{ob}$ をかけることで観測 \mathbf{y}^o の同化によって減少した予報誤差エネルギーノルムが得られ、つまりは FSOI による観測インパクトを得ることができる。また、着目する観測データごとにインパクトを診断することも可能である。ある観測データを同化したことによって予報誤差が減少 (増加) した場合、その観測データのインパクトは負 (正) となる。全観測データのインパクトの

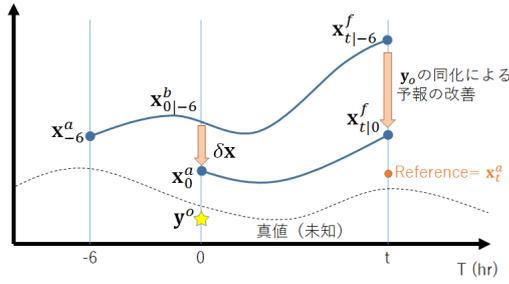


図 4.6.1 FSOI の概念図。Kotsuki et al. (2019) を改変。

総計に占める寄与率としては正（負）と表わすこともできる。

4.6.3 全球解析システムにおける FSOI の実装

次に気象庁における FSOI の実装について解説する。FSOI における予報誤差の評価には、数値予報モデルの線形近似が成り立つと仮定した 24 時間予報を対象とし、指標となる予報誤差のエネルギーノルムには乾燥エネルギーノルム (Rabier et al. 1996) を使用している¹。FSOI の単位は J/kg である。

(4.6.2) 式の $\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6})$ を展開すると、

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \\
 &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_{t|0}^f + \mathbf{x}_{t|-6}^f - 2\mathbf{x}_t^a) \\
 &= \mathbf{C}(M(\mathbf{x}_0^a) - M(\mathbf{x}_{0|-6}^b) + 2M(\mathbf{x}_{0|-6}^b) - 2\mathbf{x}_t^a) \\
 &\simeq \mathbf{C}(M(\mathbf{x}_0^a - \mathbf{x}_{0|-6}^b) + 2M(\mathbf{x}_{0|-6}^b) - 2\mathbf{x}_t^a) \\
 &= \mathbf{C}(M\delta\mathbf{x} + 2(M(\mathbf{x}_{0|-6}^b) - \mathbf{x}_t^a)) \quad (4.6.3)
 \end{aligned}$$

と書ける。ここではインクリメント $\delta\mathbf{x}$ を使う式に変形するために、非線形モデル M を接線系モデル \mathbf{M} で近似している。背景場については第一推定値 $\mathbf{x}_{0|-6}^b$ に非線形モデル M を作用させて時間発展を計算するが、解析値 \mathbf{x}_0^a からの時間発展は陽には計算せず、インクリメント $\delta\mathbf{x}$ に接線形モデル \mathbf{M} をかけている。これは接線系を仮定した解析では、解析場と背景場それぞれに沿った時間発展は同じものであり、区別されないことに起因する (石橋 2011)。そのためインクリメントを \mathbf{M} で時間発展させ、予報誤差を計算することは妥当であると考えられる。

次に、(4.6.2) 式には 4D-Var では陽に求めているカルマンゲイン \mathbf{K} の随伴行列 \mathbf{K}^T がある。 \mathbf{K} のサイズはモデルの次元 \times 観測数であるためメモリ上に保持できず、 \mathbf{K}^T を求めることも困難である。そのためこのままでは FSOI を計算できない。そこで 4D-Var のアルゴリズムを利用して、 \mathbf{K}^T を陽に計算しなくても済むようにしている。まず、 \mathbf{K} は 4D-Var における評

¹ 全球的な力学場を評価する場合には乾燥エネルギーノルムで十分であろう。またノルムの選択問題については石橋 (2011)、石橋 (2015) を参照されたい。

価関数 J のヘッセ行列 (解析誤差共分散行列) \mathbf{A} を使うと、一般的には

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1} \quad (4.6.4)$$

である。 \mathbf{R} は観測誤差共分散行列である。これから \mathbf{K}^T は

$$\mathbf{K}^T = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{A} \quad (4.6.5)$$

と書ける。4D-Var では、インクリメントは

$$\begin{aligned}
 \delta\mathbf{x} &= \mathbf{K}\delta\mathbf{y}^{ob} \\
 &= \mathbf{A}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\delta\mathbf{y}^{ob} \quad (4.6.6)
 \end{aligned}$$

のように \mathbf{K} を陽に使わずに繰り返し計算によって求られている。ここで、 $\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\delta\mathbf{y}^{ob}$ は評価関数 J の勾配 $\delta J/\delta\mathbf{x}$ で使われているベクトルである。このアルゴリズムを利用することで、(4.6.6) 式のベクトル $\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\delta\mathbf{y}^{ob}$ を感度ベクトル $\mathbf{M}^T\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6})$ で置き換えて繰り返し計算を行うと、 $\mathbf{A}\mathbf{M}^T\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6})$ が求まる。さらに左から $\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}$ をかけて、(4.6.5) 式を利用すると、

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{M}^T\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \\
 &= \mathbf{K}^T\mathbf{M}^T\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6}) \quad (4.6.7)
 \end{aligned}$$

となる。4D-Var の中でベクトル $\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\delta\mathbf{y}^{ob}$ を感度ベクトル $\mathbf{M}^T\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6})$ で置き換えることによって \mathbf{K}^T を直接計算せずにベクトル $\mathbf{K}^T\mathbf{M}^T\mathbf{C}(\mathbf{E}_{t|0} + \mathbf{E}_{t|-6})$ を計算することができるようになる。これにより FSOI による観測インパクト (4.6.2) 式が求められる。

4.6.4 FSOI の結果

上記システムを用いて、2018 年 7 月 21 日–9 月 11 日 (夏実験)、2018 年 12 月 21 日–2019 年 2 月 11 日 (冬実験) を対象に FSOI による観測インパクトを計算した。特に表記しない限りここでは夏実験の結果を示す。また、全球解析システムで同化している観測データについては表 4.6.1 に示す。

観測種別ごとのインパクトの寄与率を図 4.6.2 に示す (冬実験については図略)。衛星観測データの寄与は 80.7 % (冬: 71.4 %) に達し、そのうち輝度温度観測データの寄与は 65.3 % (冬: 60.9 %) である。2014 年 8 月時点のシステムを用いた石橋 (2015) では輝度温度観測データの寄与は 50 % 未満であったことを踏まえると、近年の様々な開発成果の導入により輝度温度観測データの重要性が増していることを示している。輝度温度観測データではマイクロ波サウンダ AMSU-A の寄与が 29.9 % (冬: 21.7 %) で最も大きく、次にマイクロ波サウンダ ATMS の 12.8 % (14.7 %) と続く。ハイパースペクトル赤外サウンダについては、CrIS, IASI, AIRS を合計すると全観測数のうち 48.8 % (冬:

48.8%) の膨大な割合を占めており、寄与の合計においても 13.8% (冬: 15.7%) と大きなインパクトを持っていることが分かる。一方でラジオゾンデ等の従来型観測については、寄与率は大きくないものの、1観測当たりの改善インパクトは大きく、重要な観測データであることを示している(図略)。水蒸気に感度のあるマイクロ波イメージャとマイクロ波サウンダは一般的にインパクトが小さく、1観測あたりのインパクトも小さい(図略)。要因について、石橋(2011)は乾燥エネルギーノルムによる評価や観測誤差膨張等によるものであろうと考察している。

次に同化ウィンドウごとのインパクトについて図 4.6.3 に示す。AMSU-A、AHI ともに同化ウィンドウの後半ほど改善インパクトが大きい。他の観測データでも同様の結果となっており、要因としては急速に発達するモードが背景場に含まれていることで、同化ウィンドウの後ろほど O-B が大きくなりやすく、改善インパクトも大きくなるとされている(Ishibashi 2018)。ただし、AHI では同化ウィンドウ前半で改悪インパクトとなっており、上述の理由では説明できない。これは AHI 以外にも ABI や SEVIRI といった CSR に共通の特徴で、冬実験でも同様の傾向である。CSR では背景誤差と観測誤差のバランスや同化ウィンドウ前半での背景誤差共分散行列の形が不適切といったことが要因として考えられる。

FSOI の水平分布を、マイクロ波サウンダである AMSU-A と MHS についてそれぞれ図 4.6.4 に示す。AMSU-A (気温サウンダ) と MHS (水蒸気サウンダ) は合わせて NOAA や Metop などの極軌道衛星に搭載されているセンサで、概ね同じ時刻に同じ位置の観測データが得られる²。現在 AMSU-A は雲や降水の影響を受けない晴天域でのみ同化利用されており、MHS は雲や降水域も含む全天同化で利用されている。FSOI の水平分布をみると、インパクトの最も大きい AMSU-A は全球的に改善インパクトが卓越し、特にラジオゾンデ等従来型観測の少ない南半球で改善インパクトが大きいことが確認できる。細部について確認すると、東太平洋の熱帯海上では帯状の改悪インパクトが見られるが、これに対し MHS では、同領域においては改善インパクトとなっている。冬実験においても同様に、熱帯海上で AMSU-A と MHS でインパクトが逆になっている領域が見られる。両者の間に逆のインパクトがみられる要因として、全天同化が行われている MHS では雲域でも有効な情報が引き出され、改善インパクトが得られている一方で、晴天域でのみ同化利用されている AMSU-A については海上では雲の影響を受けないような品質管理を行っているが、雲周辺で何かしらの影響を受けている可能性が考えられる。また、AMSU-A については陸上の雨域と考えられる領域で改悪インパ

² いくつかの衛星では MHS の故障等により AMSU-A のみデータを利用している。

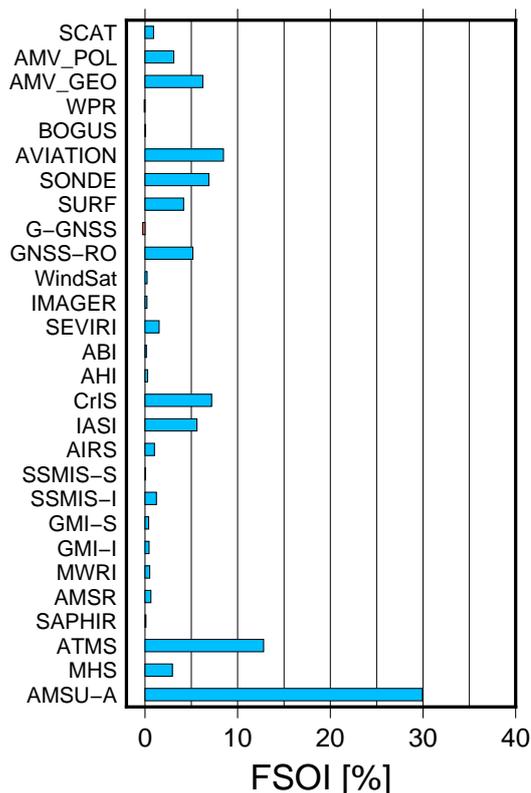


図 4.6.2 夏実験における観測種別ごとのインパクトの寄与率。正は改善インパクト、負は改悪インパクトを示す。

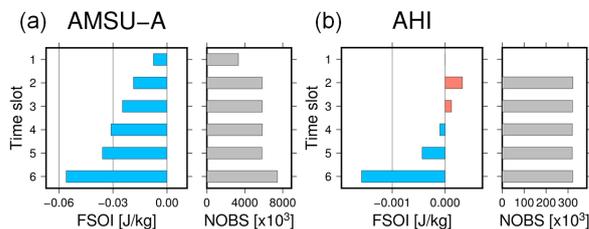


図 4.6.3 夏実験における同化ウィンドウごとの (a) AMSU-A、(b) AHI のインパクト及び観測数。負は改善インパクト、正は改悪インパクトを示す。

クトを示すことが確認されている(図略)。陸上では雨域判別が困難なことから晴天域として同化利用しているため降水による悪影響を受け、予報が悪化したことによるものと考えられる。このように FSOI で観測インパクトが改悪となる領域では同化手法の系統的な問題が存在する可能性もあり(石橋 2015)、詳細に調べることで観測データの利用方法が改良できることを示唆し、予報の改善につながる可能性がある。

4.6.5 FSOI と OSE の比較

様々な観測データセットを棄却する OSE を実施し、観測インパクトについて FSOI と OSE の比較を行った。OSE でも FSOI と同様に 24 時間予報の精度検証を行った。実験システム、実験期間についても FSOI と同様である。検証用のリファレンスとして、多様な観測を同化利用している独立した客観解析システムの

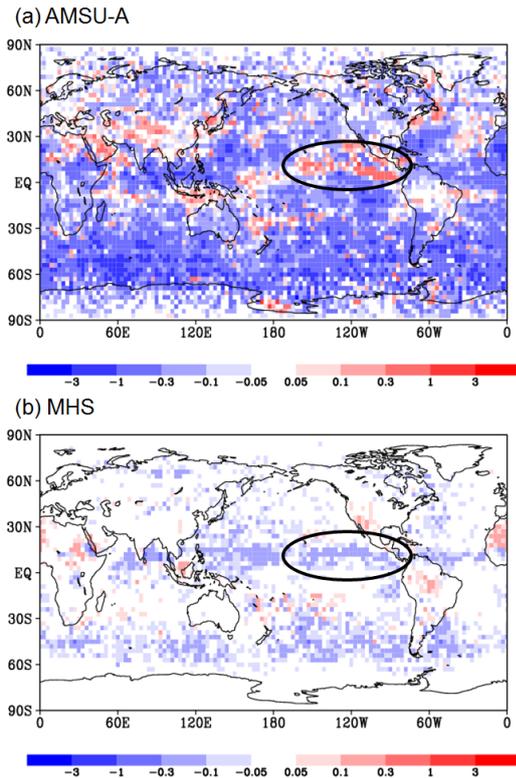


図 4.6.4 夏実験における (a) AMSU-A, (b) MHS の FSOI の水平分布。青色は改善インパクト、赤色は改悪インパクトを示す。単位は 1.0×10^{-4} J/kg。楕円で囲った範囲は本文中で言及した東太平洋の熱帯海上を示す。

データである ECMWF 再解析 ERA5 (Hersbach et al. 2020) を使用した。精度の指標としては、全ての観測データを同化利用している実験の RMSE との比較による OSE における RMSE の改善率を用いた。

図 4.6.5 は高層観測（ラジオゾンデ、パイロットバルーン、ウィンドプロファイラ）を棄却した OSE の RMSE 改善率である。北半球を中心に予報が大幅に悪化していることが分かる。図 4.6.6 に FSOI によるラジオゾンデのインパクトを示す。寄与率では 6.7% (図 4.6.2) を占めるラジオゾンデ観測の多くは改善インパクトである。したがって、北半球に集中しているラジオゾンデを棄却した OSE を行うと北半球を中心に予報が大きく悪化するため、FSOI と OSE の結果は整合的である。一方で、整合的でない観測データもある。ハイパースペクトル赤外サウンダを棄却した OSE の結果では全球的に予報は改悪しているものの、ラジオゾンデほど大きく悪化しない (図 4.6.7)。しかしハイパースペクトル赤外サウンダは FSOI では 13.8% と大きなインパクトを持ち、面的にも全球で改善インパクトを持つ観測である (図 4.6.8)。また、マイクロ波イメージャでは OSE 実験では予報が大きく改悪する割に (図略)、FSOI の改善インパクトは小さい。このように、FSOI と OSE が整合的でない場合があり、FSOI は OSE の代替とはならないことを示唆している。

表 4.6.1 FSOI による観測インパクト評価に用いた観測種別。

観測種別	説明
SCAT	マイクロ波散乱計による海上風
AMV_POL	極軌道衛星による大気追跡風
AMV_GEO	静止軌道衛星による大気追跡風
WPR	ウィンドプロファイラ
BOGUS	台風ボーガス
AVIATION	航空機観測
SONDE	ラジオゾンデ
SURF	地上観測
G-GNSS	地上 GNSS 観測
GNSS-RO	GNSS 掩蔽観測
WindSat	マイクロ波イメージャ
IMAGER	GOES-15/CSR
SEVIRI	Meteosat-8,11/CSR
ABI	GOES-16/CSR
AHI	Himawari-8/CSR
CrIS	ハイパースペクトル赤外サウンダ
IASI	ハイパースペクトル赤外サウンダ
AIRS	ハイパースペクトル赤外サウンダ
SSMIS-S, -I	マイクロ波水蒸気サウンダ、イメージャ
GMI-S, -I	マイクロ波水蒸気サウンダ、イメージャ
MWRI	マイクロ波イメージャ
AMSR	マイクロ波イメージャ
SAPHIR	マイクロ波水蒸気サウンダ
ATMS	マイクロ波気温・水蒸気サウンダ
MHS	マイクロ波水蒸気サウンダ
AMSU-A	マイクロ波気温サウンダ

4.6.6 まとめと課題

FSOI により、観測データごとの予報への寄与を定量的に評価することが可能となった。これまで実施されてきた OSE では対象となる観測データセットを棄却することで観測インパクトを見積もってきたが、異なる観測データセットを調べる際には別途実験をする必要があり、人的にも計算的にもコストがかかっていた。しかしながら、非線形モデルを含むシステム全体の性能を評価できるという特徴がある。FSOI では 1 回の実験だけで観測種別ごとのインパクトを評価できるが、時間発展は線形を仮定するため、モデルの非線形性、再現性、バイアス等の影響を受ける可能性があり、その結果の解釈は慎重に行わなければならない。また、前項で示した通り、FSOI と OSE の結果は必ずしも一致しないことから、両者が必要であることに変わりはない。それそれぞれを代替するものでもない。これら OSE と FSOI の特徴を表 4.6.2 に簡単にまとめているので参照されたい。

今後の予定として、より現業に近いシステムもしくは最新の現業システムへの移植・実験を進めるとともに、現業システムでの定常的な稼働を検討している。そのためには、実装方法や維持管理のコストも含めた課題の整理が必要である。FSOI の応用としては、観測データの予報へのインパクトを日々監視するモニター

表 4.6.2 FSOI と OSE による観測インパクト評価の違い。

	FSOI	OSE
計算コスト	小	大
検証予報時間	FT=24 hr	短期 - 中期
評価対象	すべての同化 観測データ	対象の観測データセット
リアルタイム評価	可能	不可能
品質管理への応用	可能	ある程度可能
モデル改良への応用	可能	困難
観測インパクト評価の妥当性	モデル非線形性、再現性、バイアス等の悪影響を受ける	システム性能込みで評価

としての活用や、予測誤差が大きい事例の原因調査、新規導入観測データの効果の確認、同化システムの課題発見、品質管理の高度化等に役立つことが期待される。一方で、FSOIで改悪インパクトとなった観測については、当該観測データの品質に問題があるわけではなく、数値予報システムや品質管理が不適切であり、観測情報を適切に引き出せていない可能性が大いに考えられる。そのため、FSOIの結果が観測データの利用価値に直結するわけではなく、数値予報システムの特長や OSE の結果等と合わせて慎重に解釈する必要がある。

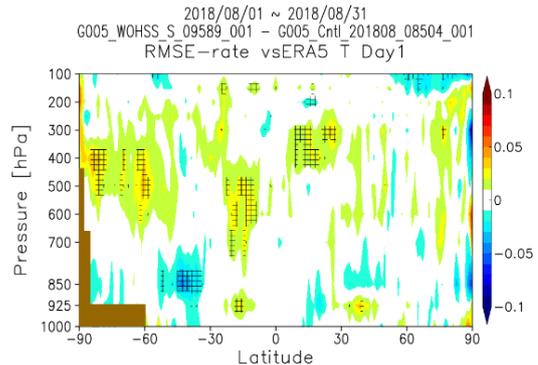


図 4.6.7 図 4.6.5 と同様。ただしハイパースペクトル赤外サウダを棄却した OSE について。

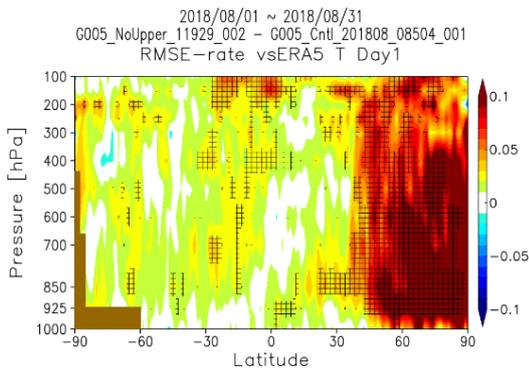


図 4.6.5 高層観測を棄却した OSE (夏実験) において、ERA5 を参照値とした予報精度検証。気温の帯状平均の RMSE 改善率 [%] を示す。寒色は予報精度の改善、暖色は改悪を示す。網掛けは信頼区間 95 % で有意であることを示す。統計期間は 2018 年 8 月 1 日 - 8 月 31 日。

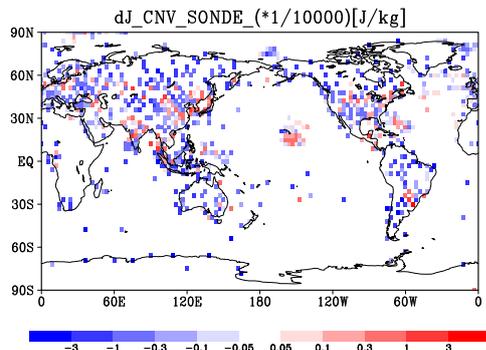


図 4.6.6 夏実験におけるラジオゾンデの FSOI の水平分布。青色は改善インパクト、赤色は改悪インパクトを示す。

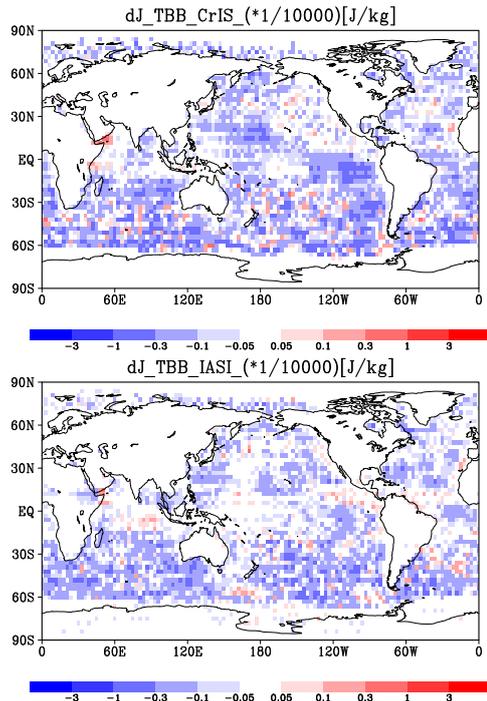


図 4.6.8 図 4.6.6 と同様。ただし CrIS (上段)、IASI (下段) の FSOI について。AIRS はインパクトが小さいので省略した。

参考文献

Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Hornyi, 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. Hlm, M. Janiskov, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, de P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, , and J.-N. Thpaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049.
- 石橋俊之, 2011: 観測情報の拡充. 数値予報課報告・別冊第 57 号, 気象庁予報部, 97–102.
- 石橋俊之, 2015: FSO による評価. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 90–93.
- Ishibashi, T., 2018: Adjoint-based observation impact estimation with direct verification using forward calculation. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 2837–2858.
- Kotsuki, S., K. Kurosawa, and T. Miyoshi, 2019: On the properties of ensemble forecast sensitivity to observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 1897–1914.
- Langland, R. H. and N. L. Baker, 2004: Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. *Tellus*, **56A**, 189–201.
- Rabier, F., E. Klinker, P. Courtier, and A. Hollingsworth, 1996: Sensitivity of forecast errors to initial conditions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 121–150.

4.7 水蒸気観測データの数値予報での利用に関する開発

4.7.1 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, 2022b)。このうち「観測の強化」では、「地域気象観測所(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。

本節では「観測の強化」に向けた取り組みのうち、マイクロ波放射計、アメダス湿度計、洋上の水蒸気等の観測(民間船舶によるGNSS観測)から得られた水蒸気観測のデータ同化での利用に向けた調査、開発の進捗について報告する。

4.7.2 地上設置型マイクロ波放射計データ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の試験利用

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5年4月までに図4.7.1(気象庁 2022b)に示す17箇所に設置する予定であり、最初に設置された名瀬のMWRによる観測が令和4年7月から開始された。

同月には現業のメソ数値予報システムと同等の試験環境においてMWRデータのリアルタイムでの同化利用が開始され、その予測結果は天気予報を発表する際の参考資料として利用されている。

その後、令和4年12月までに八丈島、高知、浜田、鳥取へのMWRの設置が完了し、そのデータを試験環境でデータ同化に利用している。

(2) MWRについて

MWRは大気中の水蒸気や酸素、雲などが発するマイクロ波帯域の電磁波の強さから輝度温度を測定し、そのデータから大気的气温や水蒸気などを推定する測器である。今回気象庁で整備するMWRはドイツのRPG社のMWRである。水蒸気に感度のある7チャンネルと気温に感度のある7チャンネルの合計14チャンネルで大気中の輝度温度を観測し、数秒~数分間隔で気温や水蒸気の鉛直プロファイル、可降水量等を推定することが可能である。

(3) MWRデータの同化手法及び品質管理処理

MWRデータの同化には観測した輝度温度を直接同化する手法、1D-VARでリトリーブした気温や水蒸気の高鉛直プロファイルを同化する手法、2ch法(Hogg et al.

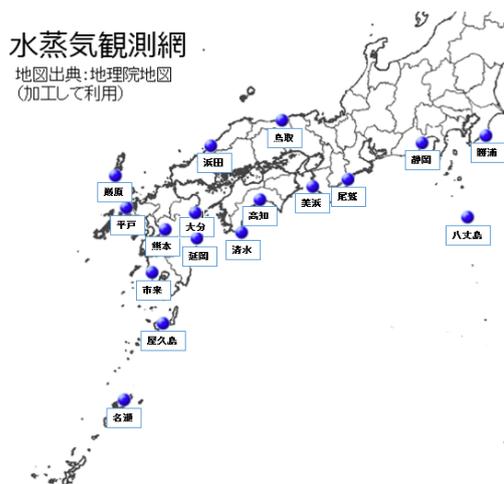


図 4.7.1 MWR の設置予定地点。第4回線状降水帯予測精度向上WG資料に加筆。

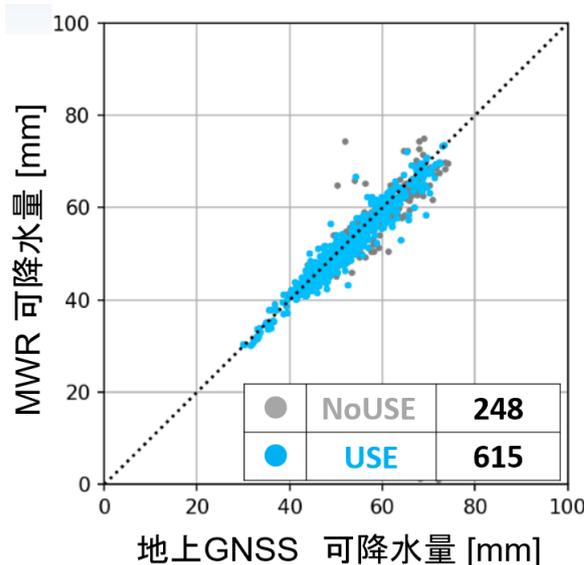


図 4.7.2 名瀬に設置されたMWRによるNNで推定した可降水量と名瀬に設置された近隣の地上GNSSによる可降水量の散布図。横軸は地上GNSSの可降水量[mm]、縦軸はMWRの可降水量[mm]。観測時刻が毎正時に最も近いMWRデータ以外を除去(時間間引き)後、品質管理処理を通過し同化に利用されたMWRデータを水色丸、同化に利用されなかったMWRデータを灰色丸で示している。統計期間は2022年7月14日から2022年8月20日。

1983)やニューラルネットワーク(NN)で推定した可降水量を同化する手法などがある。今回は早期に数値予報での利用を開始するため、既に地上GNSSデータの利用で実績がある可降水量による同化手法(石川 2010)を採用し、概ね地上GNSSと同様の処理を実装した。但し、地上GNSSの可降水量と比較してMWRの可降水量は降雨の影響によりデータ品質が低下するため、降雨時の低品質データを排除する品質管理処理を新たに導入した。

名瀬に設置されたMWRのNNによる可降水量の品質確認を行ったところ(図4.7.2)、品質管理処理によ

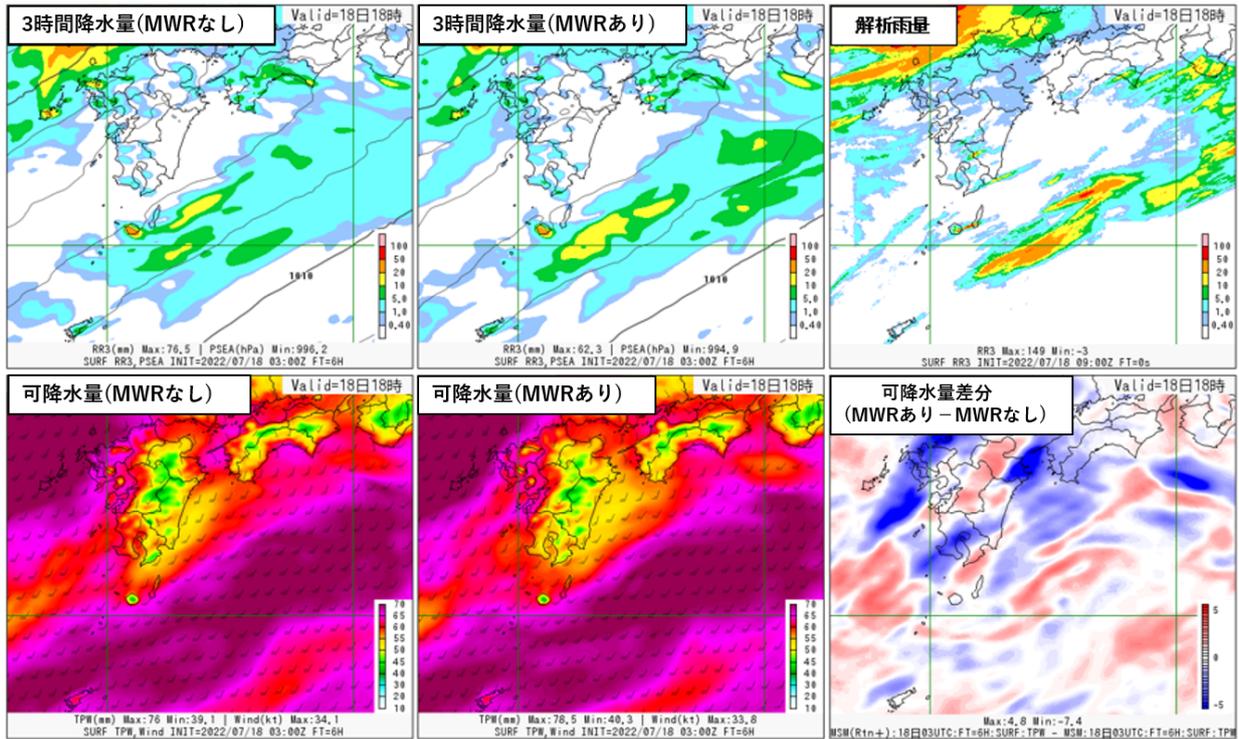


図 4.7.3 2022 年 7 月 18 日 09UTC を対象時刻とした初期時刻 2022 年 7 月 18 日 03UTC からのメソモデルの 6 時間予測の事例。上段の図のカラーは前 3 時間降水量 [mm]、等値線は海面更正気圧 [hPa] を示す。上段左は MWR を同化に利用しない場合の予測、上段中央は MWR を同化に利用した場合の予測、上段右は実況（解析雨量の 3 時間積算値）である。下段のカラーは可降水量 [mm]、矢羽は地上風 [kt] を示す。下段左は MWR を同化に利用しない場合の予測、下段中央は MWR を同化に利用した場合の予測であり、下段右は MWR を同化に利用した場合と同化に利用しない場合の可降水量の差分を示す。

て低品質データは棄却され、同化に利用される MWR のデータは地上 GNSS のデータとの整合性が良いことが確認できる。

(4) 事例調査

図 4.7.3 に MWR 可降水量の同化利用による改善事例を示す。この事例では、名瀬に設置された MWR の可降水量が第一推定値より多かったため、MWR 可降水量を同化した実験のほうが初期値において可降水量が増加した。その結果、MWR 可降水量を同化した実験の予測は MWR を同化しない実験の予測に比べて名瀬の風下での可降水量が増加したことによって予測される降水量が増加し、実況に近い予測となり改善した。

4.7.3 アメダス湿度データ利用に関する開発

局地的な集中豪雨を予測のターゲットとしている局地数値予報システムでは、約 160 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、SYNOB 湿度とする）をデータ同化に利用している（永戸ほか 2013）。

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 500 箇所以上のアメダス観測所に湿度計が設置される予定である。これらの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 SYNOB 湿度及びアメダス湿度の利用に向けた開発にも取り組んでいる。

アメダス湿度データの同化処理及び品質管理処理は、局地解析での SYNOB 湿度データの利用に対する処理をベースに構築している。ただし、SYNOB 湿度の同化では観測要素である相対湿度から解析要素である比湿に変換¹する際に必要となる地上気圧も同時に観測されているためその観測データを利用して変換を行っているが、アメダス観測所では地上気圧は観測されていないため、比湿への変換に利用する地上気圧としてモデルの第一推定値をアメダス観測点に内挿した値を利用することとした。メソ解析においても局地解析と同様の手法により地上湿度の同化を行う。

メソ解析において地上湿度をデータ同化に使用した実験と使用しない実験の結果を比較することにより、

¹ 相対湿度ではなく比湿を用いる理由として、気温の高い夏季は水蒸気量そのものの同化が効果的であること、夏季日中のモデル気温の負バイアスにより、相対湿度による同化では水蒸気量を実際より過少に評価してしまうことが挙げられる（永戸ほか 2013）。

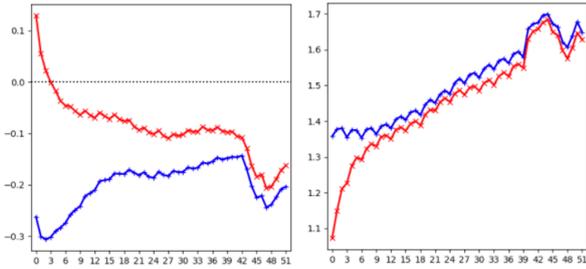


図 4.7.4 地上観測を参照値とした地上比湿 [g/kg] の平均誤差 (左図) と二乗平均平方根誤差 (右図) の予測時間別の統計検証。青線は地上湿度をデータ同化に利用しない実験、赤線は地上湿度をデータ同化に利用した実験を示している。統計期間は 2021 年 7 月 1 日から 7 月 31 日。

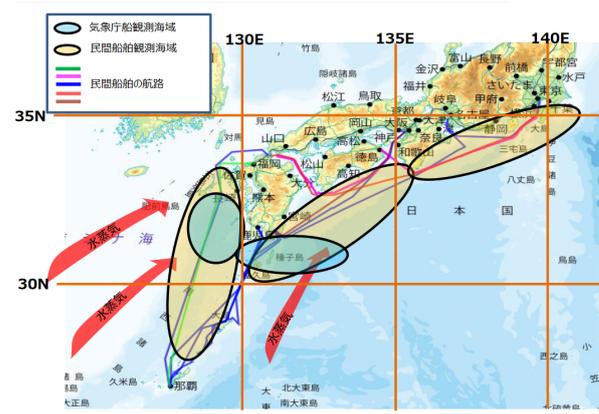


図 4.7.6 船舶 GNSS の観測領域を示す模式図。カラーのラインは GNSS 受信機を設置した民間船舶の航路を示しており、黄色塗りの領域は民間船舶の主な観測領域を示している。第 4 回線状降水帯予測精度向上 WG 資料から引用。

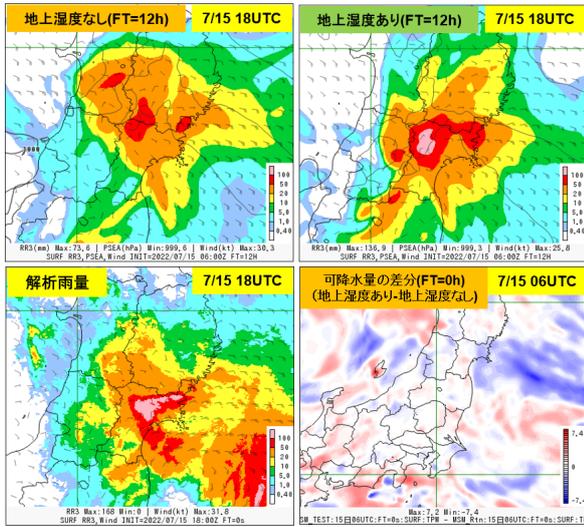


図 4.7.5 2022 年 7 月 15 日 18UTC を対象時刻とした初期時刻 2022 年 7 月 15 日 06UTC のメソモデルの 12 時間予測の事例。上段の図のカラーは前 3 時間降水量 [mm]、矢羽は地上風 [kt] を示す。上段左は地上湿度を同化に利用しない場合の予測、上段右は地上湿度を同化に利用した場合の予測を示す。下段左の図のカラーは実況 (解析雨量) の前 3 時間降水量である。下段右の図は地上湿度を同化に利用した場合と地上湿度を同化に利用しない場合の初期時刻における可降水量の差分 [mm] である。

地上湿度の同化がメソモデルの地上比湿の予測精度に与える影響を確認したところ、図 4.7.4 に示す通り予測前半を中心に地上湿度のバイアス、RMSE を改善する効果が見られた。局地モデルにおいても予測期間を通して地上湿度の予測精度が向上することを確認した。

図 4.7.5 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。

4.7.4 民間船舶 GNSS の利用

令和 3 年 8 月 31 日に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た (気象庁 2022a)。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、旅客船や貨物船などの民間船舶への GNSS 受信機の設置を進めている (気象庁 2022b)。

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、問題がないことを確認した上で順次利用を開始している。令和 4 年度中に合計 10 隻の民間船舶による水蒸気観測を開始する予定である (図 4.7.6)。令和 4 年 12 月末までに品質に問題がないことを確認した 6 隻の民間船舶の GNSS データのメソ解析での利用を開始した。

4.7.5 今後の予定

MWR データの利用に関しては、新たに観測が開始された地点のデータ品質を確認した後、リアルタイムの試験環境に順次追加して解析、予測に与える影響を調査し、得られた結果をもとに品質管理処理を見直す。また、令和 4 年度末に設置完了予定の 17 箇所のマイクロ波放射計が「観測網」としてどのように降水予測に影響を与えるのかを評価する。

更に、局地解析でのマイクロ波放射計可降水量データの利用についても開発を進め、令和 5 年度末にメソ解析、局地解析での現業利用開始を計画している。その後、輝度温度の直接同化、より高頻度なデータの利用に向けた開発等に取り組む予定である。

アメダス湿度計の利用に関しては、品質管理手法の高度化を検討したうえで、メソ数値予報システム、局地数値予報システムに与える影響を確認するため、それぞれ事例調査や統計的な評価を実施する。令和 4 年度末のメソ解析及び局地解析での現業利用開始を目指して開発を進めている。

民間船舶 GNSS の可降水量データのメソ解析での利用については引き続き、通報が開始された船舶 GNSS

のデータ品質を確認後、速やかに現業での利用を開始する。

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.

Hogg, D. C., F. O. Guiraud, J. B. Snider, M. T. Decker, and E. R. Westwater, 1983: A Steerable Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Water Vapor and Liquid in the Troposphere. *J. Appl. Meteor.*, **22**, 789–806.

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/senjokousuitai.WG/part1/part1-shiry03.pdf>.

気象庁, 2022a: 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, 2022b: 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/senjokousuitai.WG/part4/part4-shiry01.pdf>.

4.8 線状降水帯の発生確度

4.8.1 はじめに

気象庁では大雨災害の軽減のため、線状の降水帯により非常に激しい雨が降り続けている状況を「線状降水帯」というキーワードで解説する「顕著な大雨に関する気象情報」の発表を2021年出水期から開始した¹。また2022年出水期からは、そのような状況となる可能性がある程度高い場合の「線状降水帯による大雨の半日程度前からの呼びかけ」を開始した²。

このように、大雨災害に対する危機感を伝えるうえで線状降水帯の的確な情報を発表することが必要とされており、特に発生予測情報の精緻化が急務となっている。数値予報開発センターでは、線状降水帯の発生予測を支援するプロダクトとして、発生しやすい地域やその程度を予測する「線状降水帯の発生確度」を開発して部内試験運用を行っている。ここでは現状でのプロダクトの仕様と精度検証結果を説明する。

4.8.2 仕様の概要

線状降水帯の発生確度はMEPS大雨発生確率ガイドンス(気象庁2022)を用いて計算する。大雨発生確率ガイドンスは、3時間降水量80mm, 100mm, 120mmを閾値として、それ以上の降水量となる確率を予測するガイドンスである³。

線状降水帯の発生確度では、ある3時間降水量閾値(80mm, 100mmのいずれか)におけるMEPS大雨発生確率ガイドンスの各メンバーについて、ある閾値以上の確率が予想されている領域の水平分布から、線状降水帯に相当する形状となっている領域を抽出する。ここで線状降水帯と判定する基準は「顕著な大雨に関する気象情報」の発表基準⁴に即した以下の2条件を満たすこととした。

- 面積が500km²以上、または格子数が15格子以上
- 長軸・短軸比が2.5以上

メンバー間の予測のばらつきによって、線状降水帯の領域の検出結果にもメンバーごとに違いが生じるが、線状降水帯と判定されたメンバー数が多いほど、発生確度が高いと考えることができることから、各格子点に対して線状降水帯の領域内であると判別されたメンバー数の全メンバー数に対する割合を算出し、それをその格子における線状降水帯の発生確度とした。

¹ https://www.jma.go.jp/jma/press/2106/14a/20210614_kenchona.teikyokaishijikoku.pdf

² https://www.jma.go.jp/jma/press/2205/18a/20220518_jyouhoukaizen.html

³ 3時間降水量80mmを閾値とする大雨発生確率ガイドンスは部内利用を目的に計算している。

⁴ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/bosai/kishojoho.senjokousuitai.html#b>

プロダクトの仕様は大雨発生確率ガイドンスと同様であり、格子間隔は5km(等緯度経度格子)、予測対象は3時間(対象時刻とその前後1時間)、予報時間(FT)は3~39時間後までの1時間毎である。発生確度の計算は、3時間降水量の閾値80mm(確率の閾値は30, 35, 40, 45%)、100mm(確率の閾値は15, 20, 25, 30%)のそれぞれに対して行う。

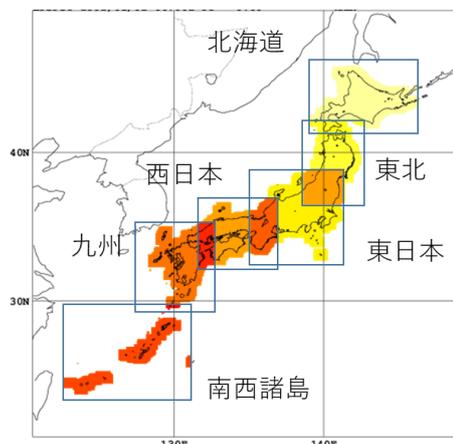


図 4.8.1 線状降水帯の発生確度の検証対象領域(着色した領域)と、地域の分割。地域別検証では隣接する地域間で重複がある。

4.8.3 検証

2019年6月~2021年10月(各年1~4月は除く)の期間について図4.8.1に示す地域別に統計検証を実施した。検証においては解析雨量の分布が上述の2条件を満たした事例を線状降水帯の観測事例とし、線状降水帯が予想された格子と線状降水帯の観測領域までの距離が100km以内となった場合に予測の適中とした。

閾値が100mm/3h, 25%の場合の検証結果を図4.8.2に示した。この期間に上述の2条件を満たした事例数は全国で185あり、九州の事例数は112と地域別では最も多かった。線状降水帯の発生頻度の地域的偏りによって、発生確度の信頼度にも領域毎に著しい違いがあり、頻度が高い九州や、比較的高い西日本や東日本(それぞれ観測事例数29, 34)では信頼度曲線が対角線に近く、確率情報として一定の精度があることを表している。それら以外の発生頻度の低い地域では発生確度の信頼度は低く、本プロダクトだけを用いて線状降水帯発生のポテンシャルを捉えることは現状では難しい。

長崎・佐賀県に「顕著な大雨に関する気象情報」が発表された2021年8月14日6時JSTに対するFT別の線状降水帯の発生確度(100mm/3h以上、閾値25%)の分布を図4.8.3に示した。メンバーごとでは線状降水帯検出の有無や検出位置の違いが大きいが、発生確度で見ると観測された線状降水帯の位置を中心に高い値が得られている。FT=8の予測結果は長崎県付近に

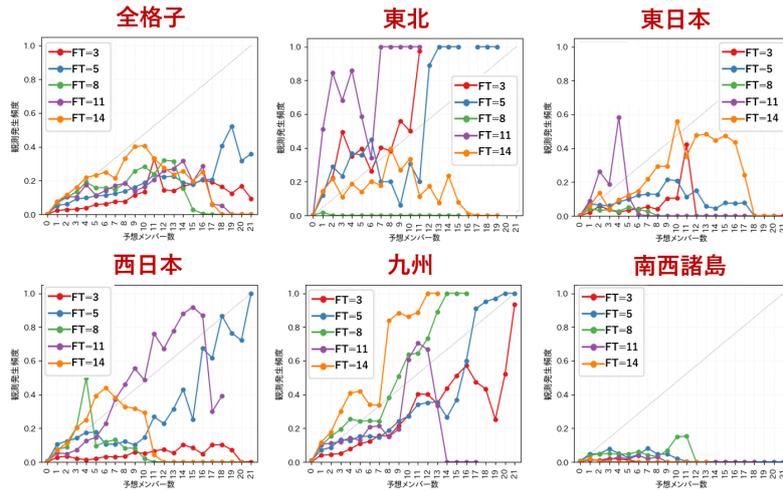


図 4.8.2 線状降水帯の発生確度（降水量閾値 100 mm/3h、確率閾値 25%）の領域別の信頼度曲線。縦軸：実況での線状降水帯発生率、横軸：線状降水帯検出メンバー数。ここでは、対象格子の周辺 100 km 以内に現象があれば「現象あり」としている。なお北海道は事例数が少ないためここでは図を省略したが、全格子の図には北海道のデータも含まれる。

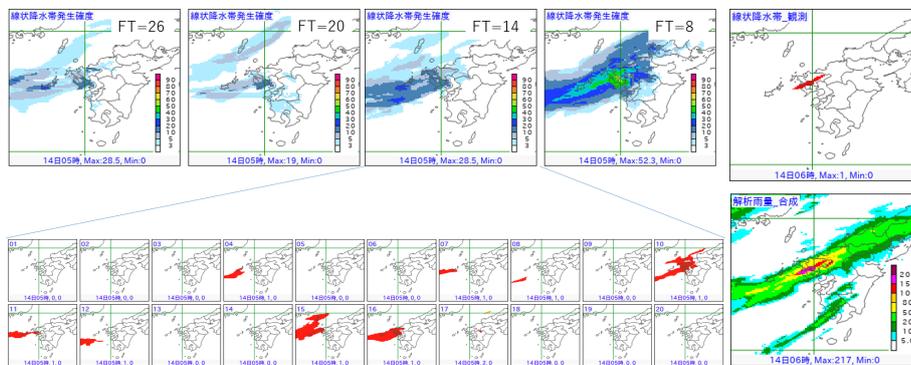


図 4.8.3 2021 年 8 月 14 日 5 時 JST に対する線状降水帯の発生確度（降水量閾値 100 mm/3h、確率閾値 25%）。上段左から、FT=26, 20, 14, 8 での発生確度。下段には FT=14 における各メンバーの検出領域を着色域で示す。また右端には解析雨量の 6 時 JST までの 3 時間降水量（右下図）とそれから解析された線状降水帯の位置（右上図）を示している。

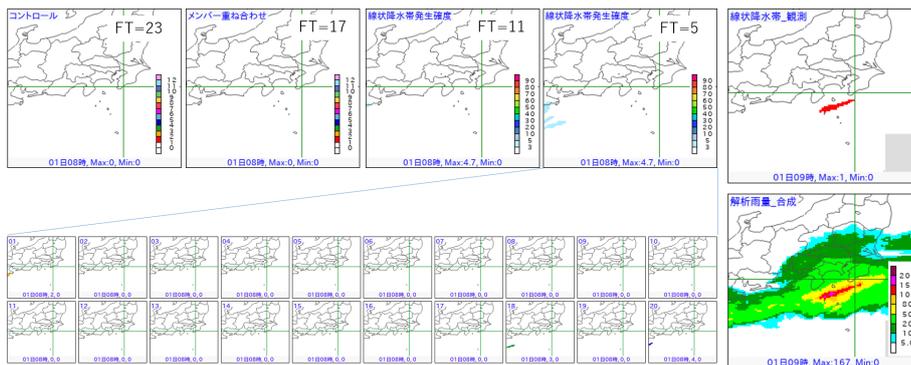


図 4.8.4 2021 年 7 月 1 日 8 時 JST に対する線状降水帯の発生確度（降水量閾値 100 mm/3h、確率閾値 25%）。上段左から、FT=23, 17, 11, 5 での発生確度。下段には FT=5 における各メンバーの検出領域を着色域で示す。また右端には解析雨量の 9 時 JST までの 3 時間降水量（右下図）とそれから解析された線状降水帯の位置（右上図）を示している。

50%を超える高い発生確度が計算されている。またこの事例では FT=26 まで遡っても、ピーク値は小さくなるものの線状降水帯発生のポテンシャルを捉えることができていることがわかる。

このように事前に検出できた事例がある一方、どのメンバーでも線状降水帯発生の可能性が検出できなかつ

た事例もある。図 4.8.4 は伊豆諸島北部に対して「顕著な大雨に関する気象情報」が発表された 2021 年 7 月 1 日 8 時 JST に対する予測結果である。FT=5 の時点においても当該地域では線状降水帯のシグナルは検出できていない。

4.8.4 まとめ

線状降水帯の発生予測を支援するプロダクトとして、MEPS 大雨発生確率ガイダンスを活用した線状降水帯の発生確度の開発を行っている。顕著な降水を事前に察知することを目的としているが、技術的に難易度が高いプロダクトであり、今後も精度向上を目指して開発を継続していく。

参考文献

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.

4.9 統合型ガイダンス

4.9.1 はじめに

数値予報開発センターでは、面的および任意の地点における目先から5日先までの高精度でシームレスな予測と誤差情報の作成を目的として、複数の数値予報結果や観測データをAI技術の活用によって最適に組み合わせる統合型ガイダンス（仮称）の開発を2018年度から行っている。2019年1月からは理化学研究所革新知能統合研究センター（理研 AIP）との共同研究を開始し、2020年8月には降水、風（地点形式）、気温（地点形式）の統合型ガイダンスの部内試験運用を開始（気象庁 2021）、2021年10月には統合型気温ガイダンス（格子形式）の部内試験運用を開始した（気象庁 2022）。

その後も新規要素追加や改良に向けた開発を継続しており、統合型風ガイダンス（格子形式）、統合型降水ガイダンス（確率情報）および統合型降雪量ガイダンス（地点形式）について、既存のガイダンスを上回る予測精度を持つことが確認できたことから、それぞれ2022年2月、6月および12月に部内試験運用を開始した。ここではこれらの統合型ガイダンスについて、仕様と作成手法、検証結果等を述べる。

統合型ガイダンス共通の仕様として、1日12回、GSMガイダンスとMSMガイダンスの初期値更新の都度、その時点で最新のガイダンス（ただしLFMガイダンスはMSMガイダンスと同じ00, 03, …, 21UTC初期値のもの）を用いて作成する（気象庁 2021）。以下では初期値の区別のため、00UTC初期値のGSMガイダンス作成後に実行した統合型ガイダンスを00g初期値、03UTC初期値のMSMガイダンス作成後に実行した統合型ガイダンスを03m初期値などと呼び、00g, 06g, 12g, 18gをまとめてgシリーズ、00m, 03m, …, 21mをまとめてmシリーズと呼ぶ。

4.9.2 統合型風ガイダンス（格子形式）

(1) 仕様

統合型風ガイダンス（格子形式）は、統合型ガイダンスで目指している面的な予測情報を提供するガイダンスであり、海上も含めた5 km格子で毎正時の風の予測を作成する。表 4.9.1 に部内試験運用開始時点での統合型風ガイダンス（格子形式）の仕様を示す。

表 4.9.1 部内試験運用開始時点での統合型風ガイダンス（格子形式）の仕様

作成対象	5 km ガイダンス格子（緯度経度座標）
入力データ	GSM, MSM, LFM の地上風
予測要素	毎正時の地上風
予報期間と間隔	FT=1 から FT=39 まで（00, 12UTC 初期値では FT=51 まで）1 時間間隔

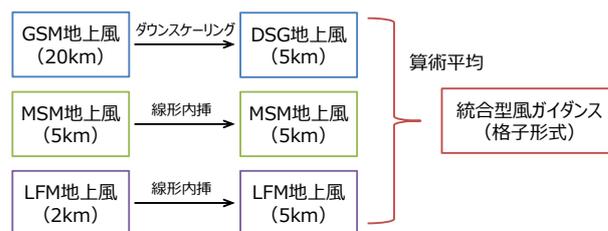


図 4.9.1 統合型風ガイダンス（格子形式）の作成処理

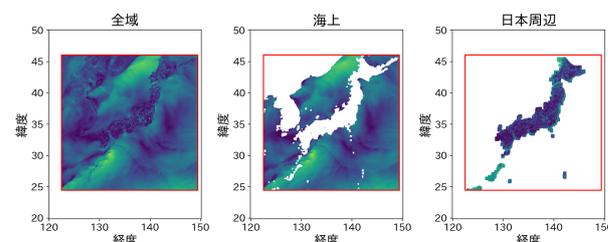


図 4.9.2 統合型風ガイダンスの作成領域と検証対象領域。左から全域、海上、日本周辺で、それぞれ緑から紺色の領域を検証対象とする。緑から紺の塗り分けはある時刻の風速を示している。赤枠内は深層学習でGSMを5 km格子にダウンスケーリングする領域、図の外枠（概ねN50E120-N20E150の領域）が統合型風ガイダンス（格子形式）の作成領域。図の赤枠と全領域の間にある空白域ではバイキュービック補間で5 km格子に内挿したGSMを統合に用いる。

(2) 作成手法

格子形式の風の予測値は、GSM、MSM、LFMのモデルの地上風の算術平均によって算出する。このとき、入力となるモデルと作成するガイダンスの座標系および格子間隔がそれぞれ異なるため、作成する格子に揃えてから算術平均する。具体的には、ランベルト座標系で格子間隔が5 kmのMSMと2 kmのLFMは周囲の4格子からの線形内挿を用い、格子間隔が20 kmのGSMはダウンスケーリングを用いて、緯度経度座標系での5 kmガイダンス格子に座標変換する（図 4.9.1）。

GSMのダウンスケーリングには、領域により、超解像で用いられる深層学習の手法であるEnhanceNet（Sajjadi et al. 2017; Höhle et al. 2020）と、周囲4×4格子からの距離の重み付き平均で内挿を行うバイキュービック補間を利用する。EnhanceNetの学習では、20 km格子に内挿した毎時大気解析の地上風を入力とし、5 km格子の毎時大気解析の地上風を目的変数とする。2014年から2017年の4年間のデータを利用してネットワークを学習および確認した後、入力データとして20 km格子のGSM地上風を与えることで、5 km格子にダウンスケーリングしたGSM（以下、DSGと書く）の地上風を求める。EnhanceNetの制約および毎時大気解析の領域の制約により、EnhanceNetでダウンスケーリングする領域は図 4.9.2の赤枠内とする。統合型風ガイダンス（格子形式）ではガイダンス格子の全領域を予測対象とするため、図の赤枠より外側の領域ではバイキュービック補間を用いてダウンスケーリングする。

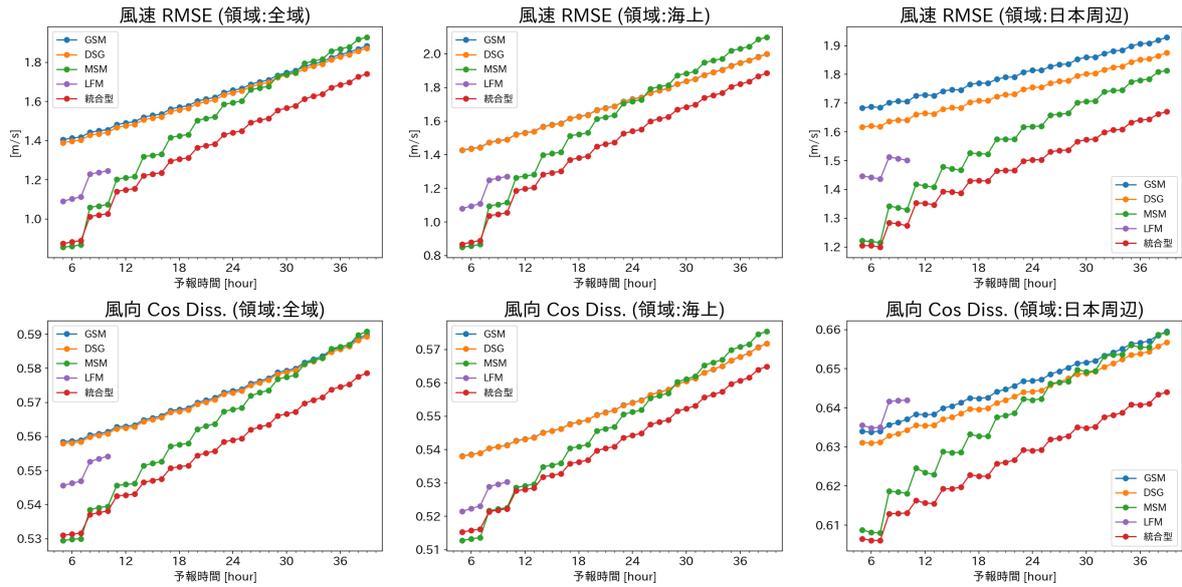


図 4.9.3 統合型風ガイダンス（格子形式）の予報時間別検証結果。上段は風速の RMSE、下段は風向の Cos Diss.、左列は全域、中央は海上、右列は日本周辺の検証結果。海上では GSM と DSG の結果がほぼ重なっている。

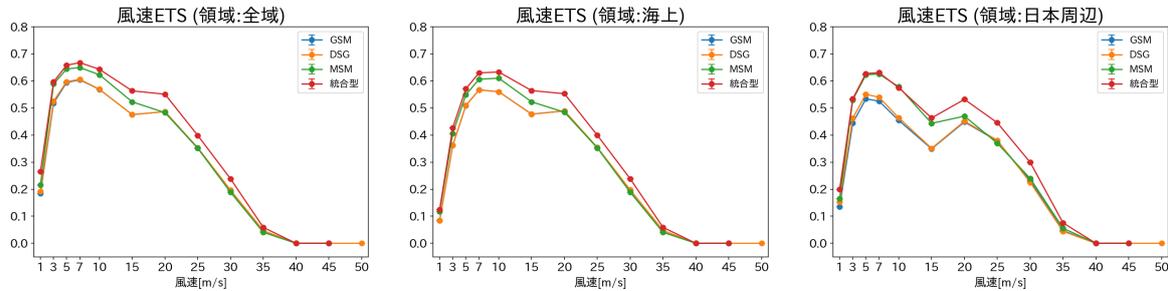


図 4.9.4 統合型風ガイダンス（格子形式）の風速の閾値別 ETS。左は全域、中央は海上、右は日本周辺の検証結果。LFM は予報時間が短いため検証結果を掲載していない。

(3) 検証結果

統合型風ガイダンス（格子形式）の検証結果を示す。検証期間は EnhanceNet の学習および確認期間とは独立な 2018 年 6 月 5 日から 2019 年 6 月 4 日の 1 年間で、全初期値の検証をまとめた結果を示す。比較対象は GSM、MSM、LFM、および DSG の地上風で、MSM と LFM は各モデルの風を 5 km のガイダンス格子に線形内挿した値、GSM はバイキュービック補間で 5 km ガイダンス格子に内挿した値とする。格子形式での風の観測値は存在しないため、検証の真値は 5 km のガイダンス格子に線形内挿した毎時大気解析の地上風とする。毎時大気解析では MSM の FT=2~4 を第一推定値に用いているため(原・工藤 2017)、毎時大気解析を真値とした場合、これらの FT では特に MSM の予測精度が高くなることから、検証対象とする予報時間は FT=5 以降とする。ここでは図 4.9.2 に示した全領域、海上、日本周辺の 3 つの領域での検証結果を示す。また、風向の検証では以下の式で定義する風向のコサイン非類似度 (以下、Cos Diss. と書く) を用いる。

$$\text{Cos Diss.} = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta) \quad (4.9.1)$$

Cos Diss. は予測と実況の風向の差 θ が小さいほど値が小さく、予測精度が高いことを示す。

図 4.9.3 に統合型風ガイダンス（格子形式）の予報時間別の風速の RMSE と風向 Cos Diss. の領域平均を示す。図 4.9.3 を見ると、風速の RMSE、風向の Cos Diss. とほぼ全ての FT で統合型ガイダンスの誤差が最も小さく、予測精度が高いことが分かる。MSM は GSM と比べて予報時間による誤差の増加率が大きい、統合型ガイダンスでは MSM よりも誤差の増加率は小さく、予報後半においても最も精度が高くなっている。日本周辺領域では GSM よりも DSG の精度が高くなっている一方、海上では GSM と DSG の予測精度はほぼ一致している。これは、日本周辺領域では地形の影響により 20 km 格子と 5 km 格子での風の差が大きく、ダウンスケーリングによる修正の効果が大きいのに対して、海上では地形の影響が小さく、20 km 格子の平均的な風でも十分な空間代表性を持っているためと考えられる。

図 4.9.4 に風速の閾値別 ETS を示す。概ね全ての閾値と領域で統合型ガイダンスの ETS が最も大きく、風速の閾値別に見た場合でも統合型ガイダンスの精度が

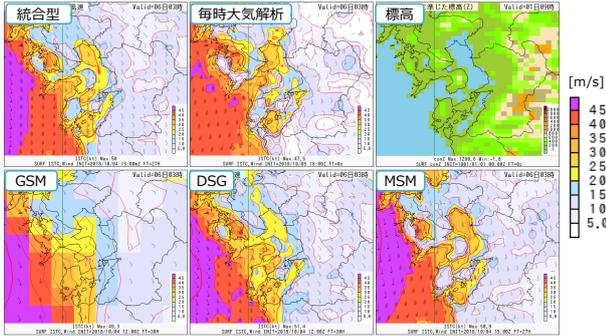


図 4.9.5 2018 年 10 月 4 日 15m 初期値の FT=27 の統合型風ガイダンス（格子形式）の予測事例。左上：統合型ガイダンスの地上風、中上：毎時大気解析の地上風、右上：標高、左下：GSM の地上風、中下：DSG の地上風、右下：MSM の地上風。

最も高いことが分かる。ただし、風速 35 m/s 以上の暴風に対してはどのモデルおよび領域でも ETS が 0 に近く、統合型ガイダンスも含めて予測精度は低いことに留意が必要である。

(4) 事例

図 4.9.5 に 2018 年 10 月 4 日 15m 初期値の FT=27 の統合型風ガイダンス（格子形式）の予測事例を示す。この事例では台風第 25 号が東シナ海にあって北上しており（図略）、九州地方では暴風警報が発表されていた。ダウンスケーリング前の 20 km 格子での GSM 地上風（左下図）では、長崎県や天草諸島とその周辺でも台風に伴う強風が予測されているものの、解像度が粗く、地形に沿った風は表現できていない。一方、DSG（中下図）ではダウンスケーリングにより地形（右上図）に沿った強風が表現できている。長崎県や天草諸島周辺の海上の風を毎時大気解析（中上図）と比べると、DSG はやや弱く、MSM（右下図）ではやや強く予測されており、これらを算術平均した統合型ガイダンス（左上図）では毎時大気解析に近い風が予測できている。

4.9.3 統合型降水ガイダンス（確率情報）

(1) 仕様

統合型降水ガイダンス（確率情報）は、統合型ガイダンスで目指している面的な確率情報を提供するガイダンスであり、5 km 格子での 3 時間平均降水量 (MRR3)、1 時間最大降水量 (RMAX31)、3 時間最大降水量 (RMAX33) および 24 時間最大降水量 (RMAX24) について、それぞれの補正超過確率を 3 時間ごとの予報時間で作成する。補正超過確率については (2) の作成手法を、降水ガイダンスの詳細は白山 (2018) を参照いただきたい。表 4.9.2 に部内試験運用開始時点での統合型降水ガイダンス（確率情報）の仕様を示す。

(2) 作成手法

統合型降水ガイダンス（確率情報）は、統合型降水ガイダンス（気象庁 2021）および GSM, MSM, LFM,

表 4.9.2 部内試験運用開始時点での統合型降水ガイダンス（確率情報）の仕様

作成対象	5 km ガイダンス格子（緯度経度座標）
予報期間と間隔	FT=3 から FT=39 まで 3 時間間隔
予測要素	MRR3, RMAX31, RMAX33, RMAX24 の各補正超過確率
確率を作成する降水量の閾値 [mm]	MRR3, RMAX31: 30, 50, 80 RMAX33: 100, 150 RMAX24: 100, 120, 150, 200, 250, 300

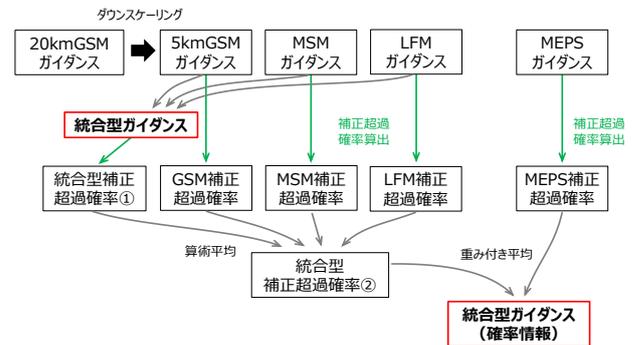


図 4.9.6 統合型降水ガイダンス（確率情報）の作成処理

MEPS の各平均降水量・最大降水量ガイダンスから算出した、補正超過確率 (森 2019) の重み付き平均により算出する。補正超過確率は時間・空間方向の広がり を考慮した超過確率 (閾値を超える予測の割合) であり、GSM, MSM, LFM ガイダンスでは対象格子点を含む 17×17 格子内、MEPS ガイダンスでは対象格子を含む $11 \times 11 \times M$ 格子内 (M はアンサンブルメンバー数) で閾値を超える格子数の割合を水平距離と標高差および前後 3 時間内の FT で重みを付けて算出する。このようにして求めた各降水ガイダンスの補正超過確率のうち、MEPS ガイダンス以外の補正超過確率を算術平均した後、さらに MEPS ガイダンスの補正超過確率と FT に応じた重み付き平均することで、統合型降水ガイダンスの確率情報を算出する (図 4.9.6)。

(3) 検証結果

統合型降水ガイダンス（確率情報）の検証結果を図 4.9.7 に示す。検証期間は 2020 年 7 月から 2022 年 6 月の 2 年間で、検証領域は日本の陸上周辺の領域 (図 4.9.2 の日本周辺領域) とする。比較対象として現在利用可能な確率情報である MEPS 降水ガイダンスの補正超過確率の検証結果を示す。統合型ガイダンスでは利用可能な最新のガイダンスを用いて作成しており、00, 06, 12, 18UTC 初期値の MEPS ガイダンスは 00g, 06g, 12g, 18g 初期値の統合型ガイダンスで利用されるため、ここでは g シリーズの統合型ガイダンスと 00-18UTC 初期値の MEPS ガイダンスを比較した結果を示す。予報時間別のプライアスキルスコア (BSS、図 4.9.7 上段) を見ると、BSS が正の要素・閾値・予報時間では、統合型降水ガイダンスが MEPS 降水ガイダンスを概ね上回る精度を持つことが分かる。特に LFM を利用す

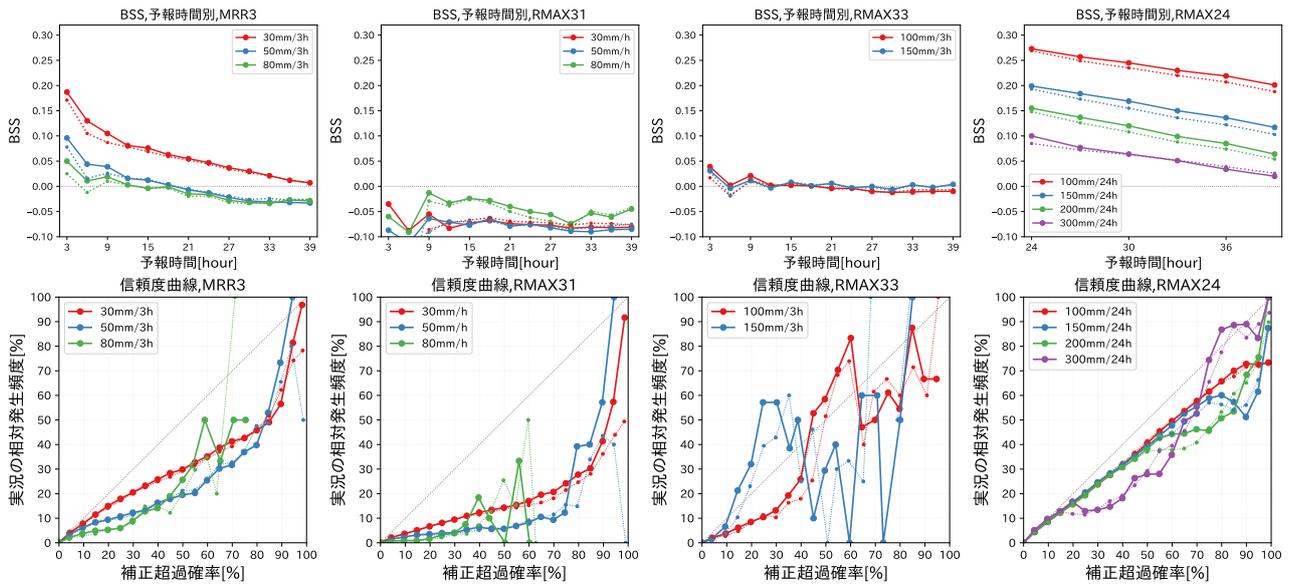


図 4.9.7 統合型降水ガイダンス（確率情報）の検証結果。上段：予報時間別の BSS、下段：信頼度曲線。左から順に、MRR3、RMAX31、RMAX33、RMAX24 の検証結果。実線は統合型降水ガイダンス、破線は MEPS 降水ガイダンスの検証結果。降水量の閾値別に色分けしている。

る FT=9 までの改善幅が大きくなっている。また、これらの要素・閾値では、信頼度曲線（図 4.9.7 下段）でも改善が見られる。一方、RMAX31 や FT=12 以降の 50 mm/3h, 80 mm/3h 閾値の MRR3 などでは、統合型ガイダンス、MEPS ガイダンスとも BSS が負または 0 付近になっている。これは MRR3 や RMAX31 の信頼度曲線（図 4.9.7 下段）に示したように、強い降水ほど予測頻度が過大となっているためである。これらの閾値では確率の値をそのまま利用するのではなく、大雨発生のパテンシャルとして利用する必要がある。

(4) 事例

図 4.9.8 に 2020 年 7 月 9 日 18m 初期値の FT=27 の統合型降水ガイダンスの RMAX24 とその確率情報の予測事例を示す。この事例では、九州や四国地方は前線の暖域内に当たり、湿った空気の影響で 24 時間最大降水量が 200 ~ 300 mm を超える大雨となった（左図）。統合型降水ガイダンス（中図）では、九州と四国で 100 mm を超える降水を予測しているものの、200 mm 以上の予測領域は狭い。一方、統合型降水ガイダンスの確率情報（右図）では、実況で 200 mm を

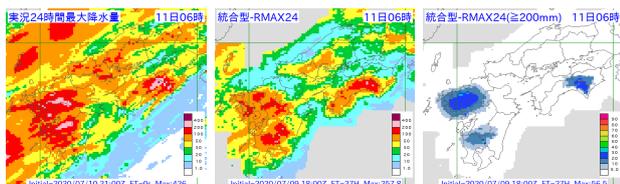


図 4.9.8 2020 年 7 月 9 日 18m 初期値の FT=27 の統合型降水ガイダンスの RMAX24 とその確率情報の予測事例。左：実況、中：統合型降水ガイダンス、右：確率情報。実況は 1 km 格子の解析雨量を 24 時間積算した値の 5 km 格子内最大値。

超えた領域で 20 %前後の確率が予測されており、大雨の可能性を示唆している。この事例のように、単一のガイダンスでは予測されない大雨も、確率情報を利用することでその可能性を予測できる場合がある。

4.9.4 統合型降雪量ガイダンス（地点形式）

(1) 仕様

統合型降雪量ガイダンス（地点形式）は積雪深計が設置されたアメダス地点における降雪量を予測するガイダンスである。以下では地点形式の降雪量ガイダンスのことを単に「降雪量ガイダンス」と書く。

表 4.9.3 に部内試験運用開始時点での統合型降雪量ガイダンスの仕様を示す。

表 4.9.3 部内試験運用開始時点での統合型降雪量ガイダンス（地点形式）の仕様

予測地点	積雪深計設置地点（2022 年 11 月の 4 地点追加を含む全 333 地点）
予測要素	6, 12 時間降雪量
予報期間と間隔	FT=6 または 12 から FT=39 まで（00, 12UTC 初期値では FT=78 まで）3 時間間隔
層別化	地点、初期時刻、予報時間（3 時間毎 1 日分）
頻度バイアス補正の観測側閾値 [cm]	6 時間降雪量: 0, 1, 5, 15, 20 12 時間降雪量: 0, 3, 10, 30, 40

(2) 作成手法

統合型降雪量ガイダンスは、GSM および MSM の降雪量ガイダンスを算術平均した後、頻度バイアス補正することで算出する（図 4.9.9）。LFM 降雪量ガイダンスは存在しないため統合に用いることはできない。算術平均のみを用いた場合には、大雪の予測頻度（BI）

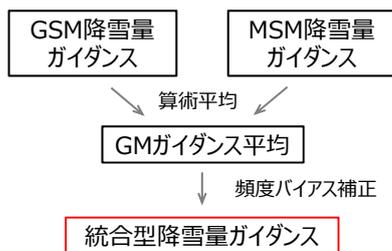


図 4.9.9 統合型降雪量ガイダンスの作成処理

と予測精度 (ETS) が低下し、大雪警報・注意報を適切に支援することができなくなるため、算術平均後に頻度バイアス補正を行う (頻度バイアス補正の観測側の閾値は表 1 に記載)。頻度バイアス補正は地点別に層別化するが、大雪の頻度が少ないことを考慮し、6 時間降雪量の 20 cm 閾値と 12 時間降雪量の 40 cm 閾値に対応する予測側の閾値は全国一律で学習する。頻度バイアス補正の学習は 2019 年 12 月から 2021 年 2 月の 2 シーズンの冬期間で行った。

(3) 検証結果

統合型降雪量ガイダンスの検証結果を示す。検証期間は 2021 年 12 月から 2022 年 3 月で、積雪深計が設置されている全国 329 地点のアメダス地点を対象とする。比較対象として、入力となる MSM 降雪量ガイダンスの検証結果および頻度バイアス補正を行う前の GSM と MSM ガイダンスの算術平均 (GM ガイダンス平均) の検証結果を示す。ここでは m シリーズの初期値での検証結果のみ示すが、g シリーズでも同様の結果であった。

図 4.9.10 に 6 時間および 12 時間降雪量ガイダンスの閾値別 ETS と BI を示す。GM ガイダンス平均の検証結果 (緑線) を見ると、6 時間、12 時間降雪量とも、MSM ガイダンス (青線) と比べて、弱い雪の BI が大きく、強い雪の BI が小さい。また、6 時間 30 cm や 12 時間 40 cm 以上の強い雪では ETS も MSM ガイダンスを下回っている。これに対して統合型ガイダンス (赤線) は頻度バイアス補正の上限である 6 時間 20 cm または 12 時間 40 cm の閾値まで BI は概ね 1 に近く、ETS は全閾値で MSM ガイダンスを上回っている。図には示さないが GSM ガイダンスとの比較結果も同様であった。

(4) 事例

2022 年 1 月 1 日の新千歳空港での統合型降雪量ガイダンスの予測事例を示す。この日の北海道では、冬型の気圧配置の中、日本海で収束した強い雪雲が石狩湾から流入した影響で、札幌市や千歳市などで大雪警報が発表された。図 4.9.11 に 2021 年 12 月 31 日 09m 初期値の新千歳空港での降雪量ガイダンスと実況を示す。6、12 時間降雪量とも、各降雪量ガイダンスの予測は実況と比べてピークの時間帯が 3 時間ほど後ろにずれているものの、降雪量としては実況に近い値を予測でき

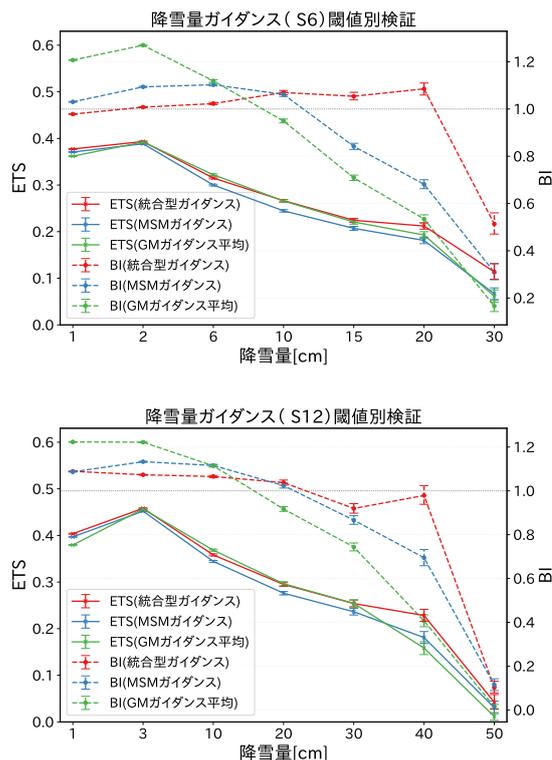


図 4.9.10 降雪量ガイダンスの閾値別 ETS (実線) と BI (破線)。上：6 時間降雪量ガイダンスの検証結果、下：12 時間降雪量ガイダンスの検証結果。赤線は統合型ガイダンスの検証結果、緑線は GSM と MSM ガイダンスを算術平均した値 (GM ガイダンス平均) の検証結果、青線は MSM ガイダンスの検証結果を示す。

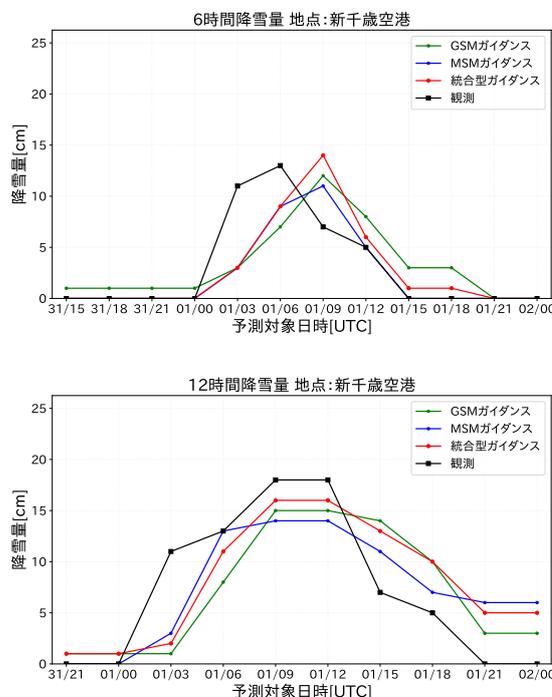


図 4.9.11 2021 年 12 月 31 日 09m 初期値の新千歳空港での降雪量ガイダンスの予測事例。上：6 時間降雪量ガイダンス、下：12 時間降雪量ガイダンス。黒線は実況、赤線は統合型ガイダンス、青線は 09UTC の MSM ガイダンス、緑線は 06UTC の GSM ガイダンスの予測。

ている。統合型降雪量ガイダンスでは頻度バイアス補正を用いているため、GSM ガイダンスと MSM ガイダンスの算術平均よりもピーク値が強く予測されており、GSM, MSM ガイダンスよりも実況に近い降雪量を予測できている。

4.9.5 まとめと今後の開発予定

統合型風ガイダンス（格子形式）、統合型降水ガイダンス（確率情報）および統合型降雪量ガイダンス（地点形式）を開発し、既存のガイダンスを上回る予測精度を持つことが確認できたため、それぞれ、2022年2月、6月および12月に部内試験運用を開始した。今後は部内試験運用を実施しながら利用方法の検討を進めるとともに、現在の手法をベースラインとして、予測手法の改良や理研 AIP との共同研究の成果の取り込みなど、AI 技術の活用による予測精度改善のための開発にも取り組んでいく予定である。

参考文献

- Höhlein, K., M. Kern, T. Hewson, and R. Westermann, 2020: A comparative study of convolutional neural network models for wind field downscaling. *Meteorol. Appl.*, **27**(6).
- 気象庁, 2021: 統合型ガイダンス. 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, 107–110.
- 気象庁, 2022: 統合型気温ガイダンス (格子形式) の開発. 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, 118–119.
- Sajjadi, M. S. M., B. Schölkopf, and M. Hirsch, 2017: EnhanceNet: Single Image Super-Resolution Through Automated Texture Synthesis. *arXiv preprint*. [Available at <https://arxiv.org/abs/1612.07919>].
- 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 95–118.
- 原旅人, 工藤淳, 2017: 毎時大気解析の変更. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61–65.
- 森祐貴, 2019: 降水ガイダンス. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 26–35.

4.10 季節アンサンブル予報システムの開発

4.10.1 CPS の 1 か月予報への利用可能性の調査

(1) はじめに

気象庁では 3 か月予報、暖・寒候期予報、エルニーニョ監視速報の基礎資料の作成、及び全球アンサンブル予報システム (GEPS: Global Ensemble Prediction System; 第 3.2 節参照) への海面水温 (SST) の提供のために、大気海洋結合モデルを使った季節アンサンブル予報システムを運用している。また、「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」における社会経済活動への貢献として、大気海洋結合の効果を活用するための開発に取り組むことで、2 週間から 1 か月先の日本の予測に重要な熱帯の季節内振動などの現象の予測精度改善を目指すとしている。気象庁では大気海洋結合モデルを 1 か月よりも長い時間スケールを対象として運用しているが、より短い時間スケールでの活用を計画しており、現在開発を進めている。

2022 年 2 月に運用を開始した新しい季節アンサンブル予報システム JMA/MRI-CPS3 (CPS3; Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 3; Hirahara et al. 2023; 気象庁 2022) は、大気・海洋モデルの高解像度化や物理過程の改良等により、前システム CPS2 (Takaya et al. 2018; 高谷・石川 2015) に比べて系統誤差や年々変動が大きく改善した (気象庁 2022)。また、CPS2 では 5 日間毎に 1 回、実時間から 2 日遅れて 4 日間かけて計算していたが、CPS3 では毎日 00UTC 初期日を当日中に計算するよう運用スケジュールを変更した。これにより、季節予報だけでなく、季節内予測への利用可能性を調査することができるようになった。

現在、1 か月予報の基礎資料の作成は大気モデルである GEPS が担っている。本項では CPS の 1 か月予報への利用可能性について調査を行った結果を報告する。

(2) 現業 CPS と GEPS の比較

はじめに、現業運用している GEPS2203 と CPS3 の 1 か月予報の予測精度を比較した。1 か月予報の基礎資料に用いる GEPS2203 のアンサンブル構成は、毎週火曜日と水曜日の 12UTC 初期日でそれぞれ 25 メンバーであるが、CPS3 では 1 初期値あたり 5 メンバーである。このため、GEPS2203、CPS3 とともに、毎週火曜日と水曜日の初期日のそれぞれ 5 メンバーを使用した。ただし、GEPS2203 の初期時刻は 12UTC である一方、CPS3 は 00UTC であるため、CPS3 は 12 時間不利な設定となっている¹。検証期間は GEPS2203 現業化後の 2022 年 3 月 15 日から 2022 年 10 月 26 日までの全

¹ CPS の海洋初期値を作成する全球海洋データ同化システムの同化ウィンドウが、00UTC を基準とした 5 日単位であること、及び現業運用スケジュールの観点から、現状 CPS の初期時刻を 12UTC に変更することは困難である。

66 初期日である。対検証値として、気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q; 気象庁 2021) を使用した。1 か月予報のように予測時間が長くなると、モデルの不完全さに起因する系統誤差の影響が大きくなる。このため、季節予報では数十年にわたる過去予報 (再予報) によって求めたモデル平年値を用いて系統誤差補正を施すことが一般的である (平井・伊藤 2013)。しかし、再予報計算には多くの計算機資源を必要とすることや、(3) で述べる大気初期摂動変更のインパクトを確認するために、本項の調査では系統誤差補正を施していない。

図 4.10.1 にアンサンブル平均のアノマリー相関係数 (ACC) を示す。北半球 (20~90N; NH) 域における 500hPa 高度 (Z500) の CPS3 の ACC はリードタイム 1 週目にかけて GEPS に比べて有意に低い傾向だが、熱帯 (20S~20N; TR) 域における 200hPa 速度ポテンシャル (CHI200) の CPS3 の ACC は 1 週目のリードタイムから中立か高くなる傾向にある。このことは、季節内予測における熱帯の大気と海洋の相互作用の重要性を示唆している。

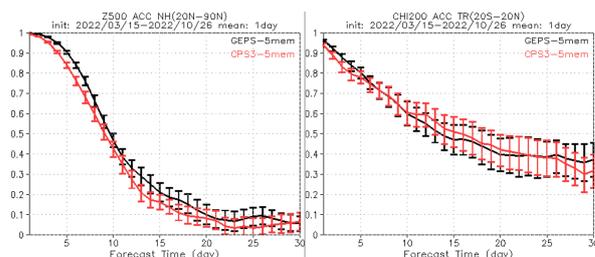


図 4.10.1 GEPS2203 (黒線) と CPS3 (赤線) の (左) NH 域における Z500 と (右) TR 域における CHI200 の 5 メンバーアンサンブル平均のアノマリー相関係数。エラーバーは試行回数 1000 回の bootstrap 法による 95 % 信頼区間。

図 4.10.2 は NH 域における Z500 の二乗平均平方根誤差 (RMSE) とスプレッドである。スプレッドはアンサンブル平均で求めた RMSE と同程度であることが望ましい (高野 2002) が、CPS3 のスプレッドはリードタイム 1 週目にかけて RMSE に比べて過大の傾向にある。1 か月予報では 1 か月先までを週単位で予報を行うため、予報初期の CPS3 の過大なスプレッドは適切ではない。

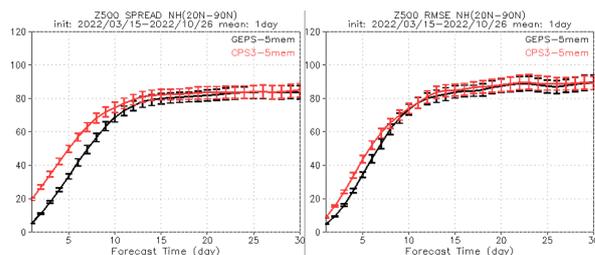


図 4.10.2 GEPS2203 (黒線) と CPS3 (赤線) の NH 域における (左) Z500 のスプレッドと (右) RMSE。単位は m。エラーバーは試行回数 1000 回の bootstrap 法による 95 % 信頼区間。

図 4.10.3 は TR 域における CHI200 の RMSE とスプレッドである。予報初期の GEPS のスプレッドは RMSE に比べて過大である一方、CPS3 ではそのような傾向は見られない。GEPS では特異ベクトル (Singular Vector; 以下 SV; Buizza and Palmer 1995) 法による下層の大きな比湿摂動により、積雲対流過程による過剰な降水を表現する傾向にあるため (越智 2016)、スプレッドが過大であると考えられる。

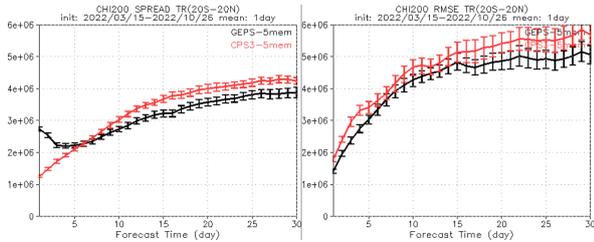


図 4.10.3 第 4.10-2 図と同じ。ただし、TR 域における CHI200 のスプレッドと RMSE。単位は m^2/s 。

(3) CPS の初期摂動の改良

CPS3 で中・高緯度の予報初期のスプレッドが過大であるのは、CPS3 の初期摂動作成手法として成長モード育成 (Breeding of Growing Mode; 以下 BGM) 法 (Toth and Kalnay 1993, 1997) を採用していることが一因である。GEPS で採用している SV 法と比べて、BGM 法による中・高緯度の摂動の成長率は低いことが知られている (Leutbecher and Lang 2014, 太田 2016)。このため、BGM では、予報時間が経過しても十分な大きさのスプレッドが得られるように摂動の振幅を大きくする必要がある。

GEPS に用いる初期摂動は、Initial SV (以下 ISV) と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (Local Ensemble Transform Kalman Filter; 以下 LETKF; Hunt et al. 2007) を併用している。理想的には解析誤差を反映した LETKF 摂動のみで予測の不確実性を適切に表現できるのが望ましいが、LETKF 摂動のみでは予報時間が進むとスプレッドが不足するためである (太田・堀田 2016)。計算機資源の効率的な利用や、2 週間予報と 1 か月予報の整合性を考慮すると、可能な限り GEPS と CPS で仕様を共通化することが望ましい。

これらを踏まえて、CPS3 の初期摂動を、BGM から、GEPS と同じ ISV と LETKF に変更した実験 (以下、CPS3SVTR01) を行った。本実験における初期摂動は、(2) で述べた GEPS における熱帯のスプレッド過大への対策として熱帯初期摂動の振幅を半分にした点を除き、GEPS2203 の設定と同一とした。すなわち、北・南半球の ISV の摂動の振幅はモデル面第 15 層 (約 500hPa) 気温の二乗平均平方根 (RMS) が 0.21K、熱帯はモデル面第 6 層 (約 850hPa) 気温の RMS が 0.1K となるように設定し、LETKF は解析摂動の 0.85 倍とした。ISV 計算の評価時間は、北・南半球では初期時刻

から 48 時間、熱帯では 24 時間である。また、GEPS では気象庁全球日別 SST 解析 (MGDSST; 栗原ほか 2006) に基づく SST 摂動 (Hotta and Ota 2019) を使用しているが、本実験では CPS3 と同様に、海洋初期値作成のために運用している全球海洋データ同化システム MOVE-G3 (Fujii et al. 2023) における解析誤差共分散行列を近似する摂動 (Niwa and Fujii 2020) を使用した。検証期間は (2) と同様、2022 年 3 月 15 日から 2022 年 10 月 26 日までの全 66 初期日である。

図 4.10.4 に NH 域における Z500 の RMSE とスプレッドを示す。予報初期に過大であったスプレッドの大きさが、CPS3SVTR01 では RMSE と同程度の大きさとなっていることがわかる。このことは、GEPS の前身の週間アンサンブル予報システムの初期摂動を BGM から SV に変えた時のインパクトとも整合的である (米原 2008)。リードタイム 2 週目以降のスプレッドの大きさは、BGM の場合とほとんど変わらない。図 4.10.5 に TR 域における CHI200 の RMSE とスプレッドを示す。CPS3SVTR01 は CPS3 に比べて、予報初期の RMSE、スプレッドともにやや悪化傾向である。一方で、スプレッドは GEPS と比べると狙い通り改善傾向である (図 4.10.3)。

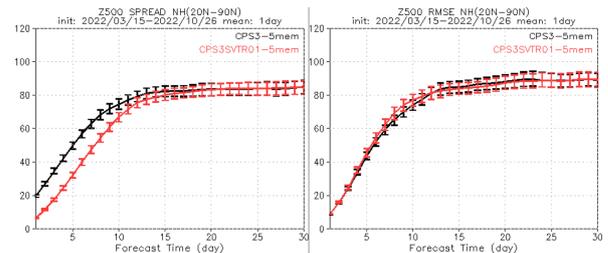


図 4.10.4 第 4.10-2 図と同じ。ただし、CPS3 (黒線) と CPS3SVTR01 (赤線)。

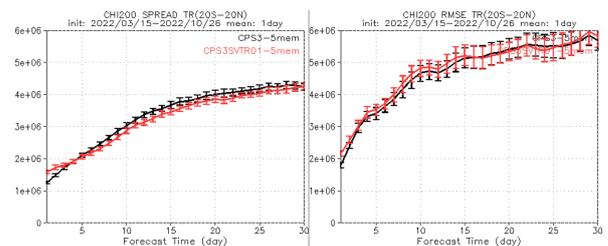


図 4.10.5 第 4.10-3 図と同じ。ただし、CPS3 (黒線) と CPS3SVTR01 (赤線)。

(4) CPS 再予報における初期摂動の評価

GEPS の初期摂動は、現業仕様と再予報仕様で手法が異なる (金浜 2017)。現業仕様は、前述の通り、LETKF と ISV を併用しているが、再予報では SV の各計算において求まる通常の ISV と過去から初期時刻までに線形成長した SV (Evolved SV; 以下 ESV) を組み合わせて作成した初期摂動を用いる。ESV 法は初期時刻に対して 48 時間前からの計算を行う一方、LETKF は解

析予報サイクルで6時間ごとに連続的に計算する必要がある。したがって、再予報で LETKF 摂動を作成することは計算機資源の制約上困難である。LETKF では解析誤差を反映する一方、SV は誤差成長を効率的に表現するため、初期摂動の違いによる予測のスペルも異なる可能性がある。

このため、CPS3 の再予報実験（以下、CPS3-12ini）の大気初期摂動を、BGM から ISV と ESV の併用に変更した実験（以下、CPS3-SV-TR01-12ini）を行った。実験仕様は大気初期摂動を除き、CPS3 再予報（仕様の詳細は気象庁 2022 を参照）と基本的に同じである。実験期間は 1991～2020 年の各月 1 初期日で、全 360 初期日である。メンバー数は 1 初期値あたり 5 メンバーである。本実験における初期摂動も、(3) と同様、熱帯のスペル過大への対策として熱帯の ISV の振幅を半分にした点を除き、GEPS2203 再予報と同じとした。すなわち、北・南半球の ISV の摂動の振幅はモデル面第 15 層（約 500hPa）気温の RMS が 0.21K、熱帯はモデル面第 6 層（約 850hPa）気温の RMS が 0.1K、北半球と熱帯の ESV はモデル面第 22 層（約 250hPa）の気温の RMS が 0.15K、南半球は 0.18K となるように設定した。GEPS における ESV 摂動の振幅は、LETKF+SV 摂動と同程度のスペルとなるように設定されている。

図 4.10.6 に NH 域における Z500、及び TR 域における CHI200 のスペルを示す。予報初期の NH 域における Z500 のスペルは、CPS3-SV-TR01-12ini では CPS3-12ini に比べて小さい。また、TR 域における CHI200 のスペルは、CPS3-SV-TR01-12ini では CPS3-12ini に比べて大きい。これらの特徴は (3) で述べた、SV+LETKF に変更した CPS3SVTR01 実験と整合的である。

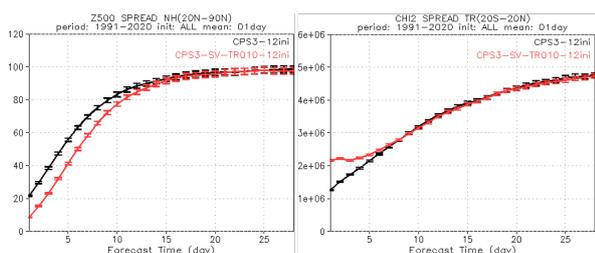


図 4.10.6 CPS3-12ini（黒線）と CPS3-SV-TR01-12ini（赤線）の（左）NH 域における Z500（単位 m）と（右）TR 域における CHI200 のスペル（単位 m^2/s ）。エラーバーは試行回数 1000 回の bootstrap 法による 95 % 信頼区間。

CPS の BGM 法は、主にマッデン・ジュリアン振動 (MJO: Madden-Julian Oscillation) に関係した不安定モードを求めるために開発が行われてきた (Chikamoto et al. 2007)。そこで、初期摂動を SV に変えることによる MJO への予測精度への影響を確認した。MJO は Wheeler and Hendon (2004) の Real-time Multivariate MJO index で検出を行い、スコアの計算は久保 (2017)

に基づいて計算した。図 4.10.7 に MJO の予測精度を示す。CPS3-SV-TR01-12ini は CPS3-12ini とほぼ同等の予測精度であることがわかる。

(5) まとめと今後の課題

CPS の 1 か月予報への利用可能性について調査を行った。中・高緯度の予測 1 週目のスペルの大きさは CPS3 では過大であるが、GEPS と同じ初期摂動 (SV+LETKF) を用いることでより適切となった。GEPS では予測初期の熱帯域上層のスペルは過大であるため、CPS への SV 法の適用にあたり、熱帯 SV の摂動の振幅を GEPS の半分とした。その結果、熱帯のスペルや RMSE は CPS3 と比べて中立かやや悪化傾向であるものの、GEPS と比べると改善傾向であった。CPS3 の BGM 法は MJO に関連した不安定モードを求めるために開発されたが、SV 法に変更しても MJO の予測精度は中立であった。

今後は令和 4 年度末に導入予定の GEPS23XX との比較や、現業 GEPS と同等のメンバー数での比較を行うとともに、引き続き大気初期摂動について検討を行う。GEPS23XX では 2 段階 SST 法を全球域に拡張する改良等がなされており、1 か月予報レンジの予測精度が GEPS2203 に比べて向上している (第 4.2 節)。今回の調査は現業 CPS3 と同じ 5 メンバーで実施したが、現業 GEPS は 25 メンバー（再予報は 13 メンバー）である。5 メンバーという限られたアンサンブルを用いることによるサンプリング誤差の問題がある。また、SV の初期摂動の振幅は調整の自由度が大きい。今回の調査では、熱帯 SV の振幅を小さく調整することで、熱帯のスペル過大傾向を緩和することができた。同様の試みが、過去の GEPS でもなされているが、週間予報レンジの中・高緯度の予測精度が悪化することがわかっている (越智 2016)。CPS においても、GEPS の知見を生かしつつ、不確実性の表現が狙いどおりか、摂動の振幅が適切か、といった点に注目しながら、初期摂動の設計や調整を行う必要がある。

4.10.2 CPS の他センターとの比較検証

(1) はじめに

コペルニクス気候変動サービス²(C3S; Buontempo et al. 2022) は欧州委員会が主導する地球観測計画であるコペルニクス計画の計画要素の一つである。C3S では、世界最高水準の厳しい性能要件³を満たした現業センターによって構成されるマルチモデルアンサンブルを利用した気候モニタリングや季節予報などのサービスを提供している。C3S から提供されるデータはオープンデータであり、国内外の研究者が最新の現業システムの結果を活用することができる。前季節アンサンブル予報システムの CPS2 は、その性能要件を満たし

² <https://climate.copernicus.eu/>

³ <https://climate.copernicus.eu/>

c3s330-operational-production-seasonal-forecasts

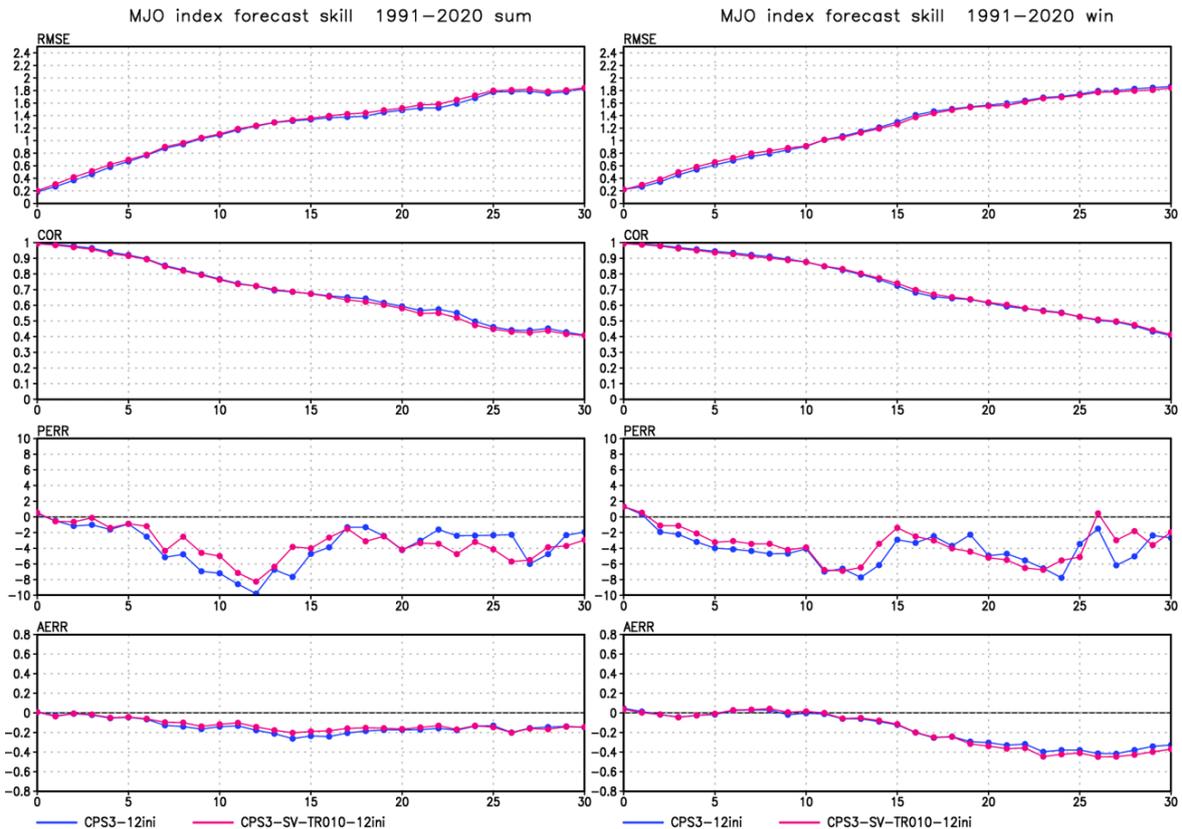


図 4.10.7 CPS3-12ini (青線)と CPS3-SV-TR010-12ini (赤線)の MJO の予測精度。上から RMSE、相関係数、位相誤差、振幅誤差。横軸はリードタイム (日)。左は夏 (4~9 月) 初期日、右は冬 (10~3 月) 初期日。スコアの計算方法等の詳細は (久保 2017) を参照。

ていたことから、2020 年 10 月より C3S に参加している。2022 年 2 月に運用を開始した CPS3 は、大気・海洋モデルの高解像度化や物理過程の改良等により、CPS2 に比べて系統誤差や年々変動が大きく改善したことから、C3S 参加機関の中でも予測精度が高くなっていることが期待される。本項では CPS3 を含めた C3S 参加機関のバイアスや予測精度について述べる。

(2) C3S の概要

C3S に参加している機関は 2022 年 12 月現在、8 つの機関が参加しており、それぞれ欧州中期予報センター (ECMWF)、フランス気象局 (Météo-France)、英国気象庁 (UKMO)、ドイツ気象局 (DWD)、欧州地中海気候変動センター (CMCC)、米国環境予測センター (NCEP)、JMA、カナダ環境・気候変動省 (ECCC) である。アンサンブル構成に関わる仕様は表 4.10.1 の通りである。現業運用予報のメンバー数は ECCC を除きどのセンターも 50~55 であるが、再予報のメンバー数はセンター間によって差が大きい。メンバー数の違いによるスコアへの影響を避けるため、再予報検証ではメンバー数を 10 に揃えて検証した。JMA を含む多くのセンターでは、現業運用前に再予報の実行を完了させる「fix」方式を採用しているが、UKMO の再予報は現業運用と同じタイミングで必要な実験を実行する「on-the-fly」方式を採用している。このため、UKMO

の再予報データは最新の 12 か月分のデータを使用した。対解析値として ECMWF 再解析 ERA5⁴ (Hersbach et al. 2020)、MGDSST 解析値を使用した。全てのセンターの予報値及び解析値について、2.5 度格子に内挿して検証した。平年値期間は C3S 再予報期間に従い、1993~2016 年⁵とした。特筆しない限り、各機関の再予報から求めたモデル平年値を使用して系統誤差補正を行った。モデル等のさらなる詳細は C3S Web ページ⁶等を参照されたい。

(3) C3S 再予報に基づくバイアス特性

図 4.10.8 に、5 月初期月の夏季 (6~8 月) を対象とした SST バイアスを示す。NCEP を除き、北半球夏季のインド洋熱帯域で正のインド洋ダイポールモード現象 (以下、IOD) に類似した SST バイアスがみられる。数時間から季節予報までの IFS の系統誤差を理解するための ECMWF における内部プロジェクト (UGROW) で、正の IOD 型バイアスについて調査が行われており、熱帯インド洋の下層東風バイアスや、温度躍層が浅すぎるバイアスと関連していることが示されている

⁴ 対 JRA-3Q でも検証を行ったが特性は同じであった

⁵ ただし、UKMO の 1 月初期月のみ 1994~2016 年としている

⁶ <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/C3S+Seasonal+Forecasts>

表 4.10.1 C3S 参加機関のシステムの主な仕様 (2022 年 12 月現在)。

センター	現業運用予報のメンバー数と初期日	再予報のメンバー数と初期日
ECMWF	51 毎月 1 日 (51)	25 毎月 1 日 (25)
Météo-France	51 毎月 1 日 (1)、前月最後と 2 番目の木曜日 (各 25)	25 毎月 1 日 (1)、前月最後と 2 番目の木曜日 (各 13)
UKMO	50 毎日 (2)	28 毎月 1 日、前月 25、17、9 日 (各 7)
DWD	50 毎月 1 日 (50)	30 毎月 1 日 (30)
CMCC	50 毎月 1 日 50 メンバー	40 毎月 1 日 (30)
NCEP	52 毎日 00,06,12,18UTC (各 1)	16 通年半旬 00,06,12,18UTC (各 1)
JMA	55 毎日 (5)	10 月末に最も近い通年半旬とその 15 日前 (各 5)
ECCC	10 毎月 1 日 (10)	10 毎月 1 日 (10)

(Mayer et al. 2022)。また、CPS では MJO の再現性向上を目的として、積雲対流スキームにおけるエントレインメント率の計算に経験的な高度・湿度依存性を導入 (Komori et al. 2020) したが、これを除いた実験では正の IOD 型バイアスは見られない (図略)。

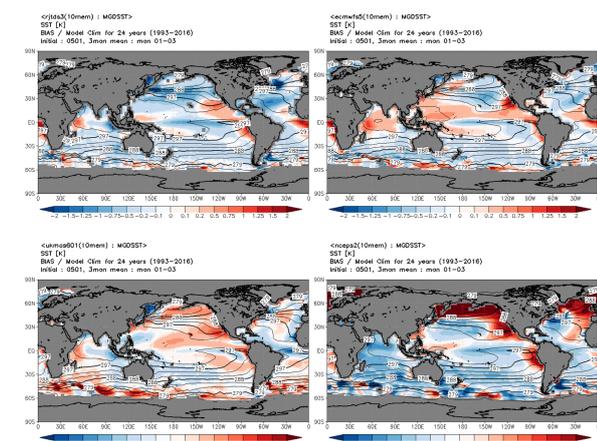


図 4.10.8 再予報に基づく 5 月初期月のリードタイム 1 か月の夏季の SST バイアス (カラー) とモデル年平均值 (コンター)。単位は K。(左上) JMA、(右上) ECMWF、(左下) UKMO、(右下) NCEP。

図 4.10.9 に、11 月初期月の冬季 (12~2 月) を対象とした SST バイアスを示す。南半球夏季の南大洋はどのセンターも SST 正バイアスがある。CPS3 では南大洋の対流圏下層の過冷却水雲の再現性を向上させたものの、(Chiba and Komori 2020)、光学的に厚い過冷却水雲が不足していることが示唆される。

(4) スコア検証

図 4.10.10 に C3S 参加機関の現業運用予報のリードタイム 1 か月の 3 か月平均場 (3 か月予報に相当) の ACC を示す。2022 年 2 月の CPS3 更新後の北半球 Z500 や熱帯 2m 気温の ACC は、事例数が少ないものの、C3S

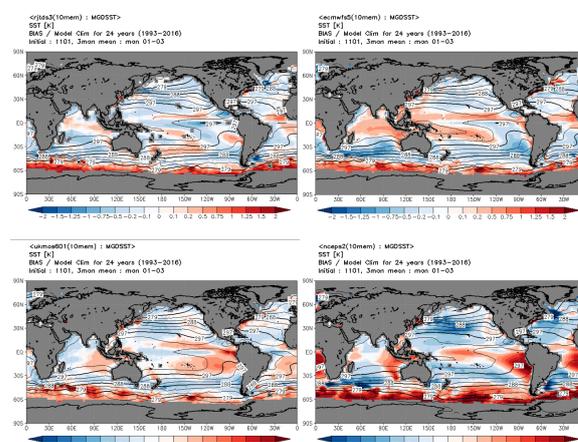


図 4.10.9 図 4.10.8 と同じ。ただし、11 月初期月のリードタイム 1 か月の冬季。

参加機関の中でもトップクラスであることがわかる。2022 年夏~秋の期間において、ラニーニャ現象や負のインド洋ダイポールモード現象が発生しており、トップクラスの予報成績のセンターではこれらの現象に伴う循環場を良く予測できていた (図略)。

図 4.10.11 と図 4.10.12 に、C3S 参加機関の再予報のリードタイム 1 か月の 3 か月平均場の ACC を示す。CPS3 は CPS2 よりも全体的にスコアが改善傾向にあり、C3S 参加機関の中でもトップクラスであることがわかる。北半球冬季の Z500 の ACC は UKMO が他のセンターに比べて比較的高い傾向にある。Scaife et al. (2014) では、前システムの GloSea5 にて、北半球冬季の北極振動や北大西洋振動が数か月先まで予測可能で、現システムの GloSea6 でも同様 (Davis et al. 2020) であると報告されており、それらとの関係が示唆される。CPS3 の再予報のメンバー数に合わせて 10 メンバーで検証を行ったが、メンバー数が少ないことによるサンプリング誤差の問題があることに注意が必要である。

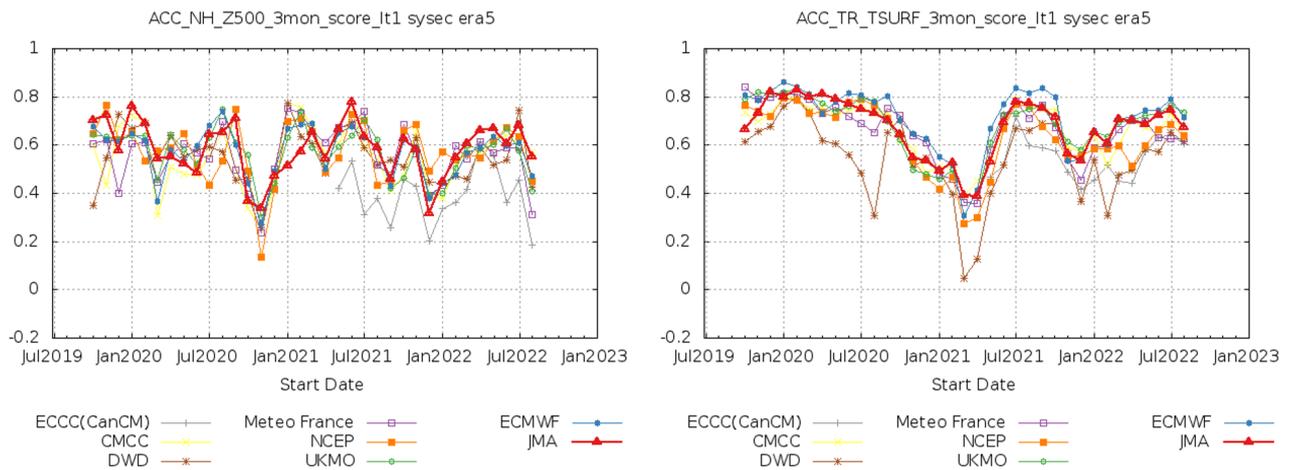


図 4.10.10 C3S 参加機関の現業運用予報のリードタイム 1 か月の 3 か月平均場の ACC。(左) NH 域における Z500、(右) TR 域における 2m 気温。

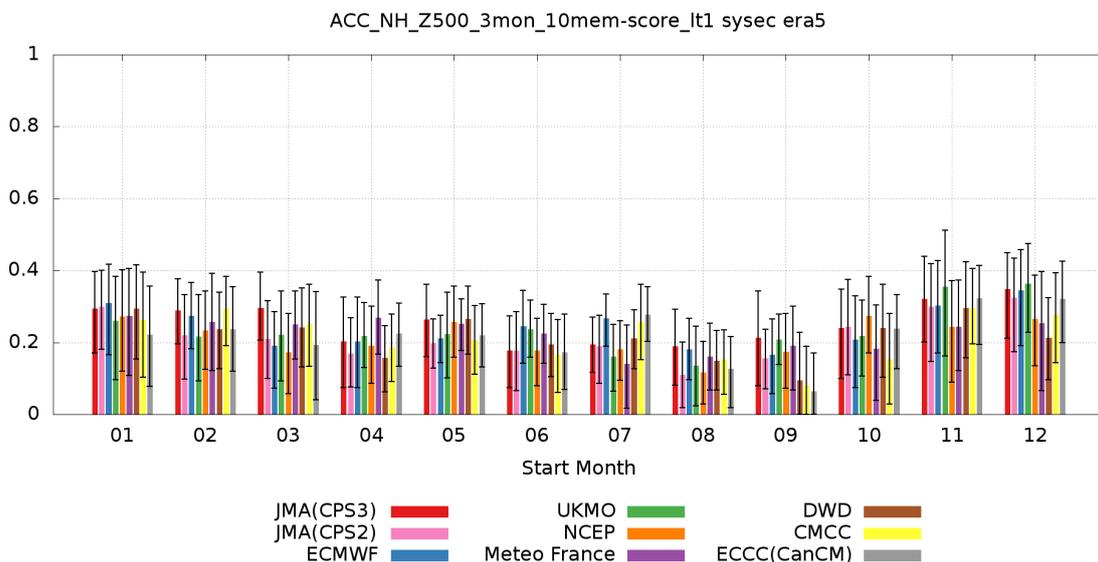


図 4.10.11 C3S 参加機関の再予報のリードタイム 1 か月の 3 か月平均場の NH 域における Z500 の ACC。エラーバーは試行回数 1000 回の bootstrap 法による 95 %信頼区間。

(5) まとめと今後の課題

C3S 参加機関の予報データを用いてバイアス特性の調査や精度検証を行った。CPS3に見られるバイアスは他センターでも共通に見られるものもある。ECMWFのように、これらのバイアスに対してトップダウン・アプローチで診断を行っているセンターもある。こうした他センターの動向も参考にしつつ、次期システムに向けた開発を進めていきたい。また、CPS3の予測精度は世界の最先端の現業季節予報モデルと比較しても遜色ないことがわかった。ただし、再予報の検証ではメンバー数が少ない CPS3 に合わせて検証を行ったため、サンプリング誤差の問題がある。計算機資源には限りがあるため、前項で述べた CPS の 1 か月予報への利用可能性等を探りつつ、最適なアンサンブル構成について検討する必要がある。

参考文献

Buizza, R. and T. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434–1456.

Buontempo, C., S. N. Burgess, D. Dee, B. Pinty, J. N. Thepaut, M. Rixen, S. Almond, D. Armstrong, A. Brookshaw, A. L. Alos, B. Bell, C. Bergeron, C. Cagnazzo, E. Comyn-Platt, E. Damasio-Da-Costa, A. Guillory, H. Hersbach, A. Horanyi, J. Nicolas, A. Obregon, E. P. Ramos, B. Raoult, J. Munoz-Sabater, A. Simmons, C. Soci, M. Suttie, F. Vamborg, J. Varndell, S. Vermoote, X. Yang, and de J. Garces Marcilla, 2022: The Copernicus Climate Change Service: Climate Science in Action. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **103**, 2669–2687.

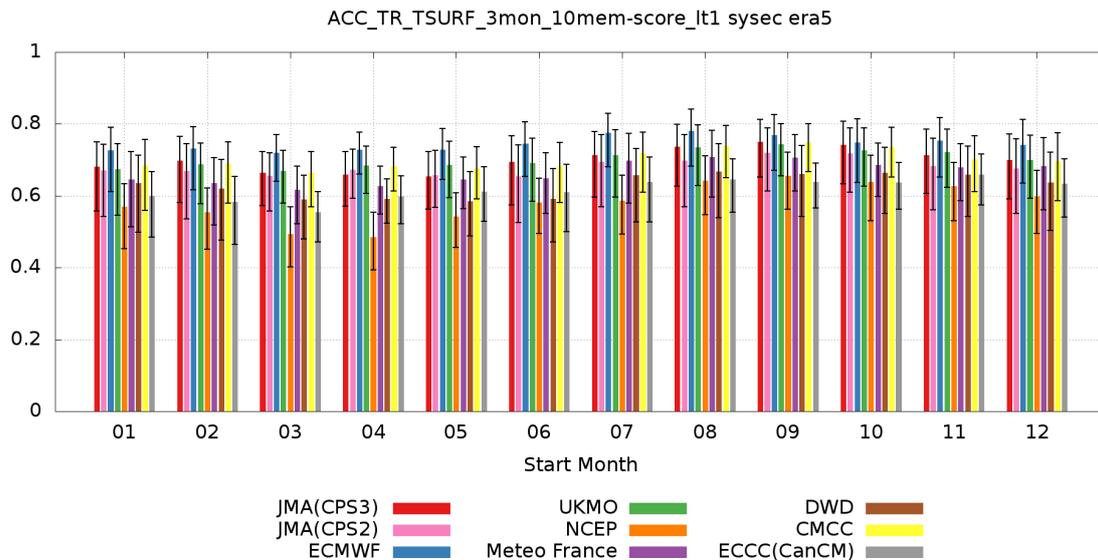


図 4.10.12 図 4.10.11 と同じ。ただし、TR 域における 2m 気温の ACC。

- Chiba, J. and T. Komori, 2020: Improved representation of super-cooled liquid water cloud in JMA's next-generation coupled seasonal prediction system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 7–3.
- Chikamoto, Y., H. Mukougawa, T. Kubota, H. Sato, A. Ito, and S. Maeda, 2007: Evidence of growing bred vector associated with the tropical intraseasonal oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04 806.
- Davis, P., C. Ruth, A. A. Scaife, and J. Kettleborough, 2020: A Large Ensemble Seasonal Forecasting System: GloSea6. *AGU Fall Meeting, 2020AGUFMA192...05D*, accessed 6 December 2022, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AGUFMA192...05D/abstract>.
- 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.*, **4**, 1–20, doi:10.3389/fclim.2022.1019673.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Hornyi, J. Muoz-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. Hlm, M. Janiskov, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, de P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thpaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049.
- 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*, accepted.
- 平井雅之, 伊藤明, 2013: 1 か月予報と異常天候早期警戒情報の予報システム. 平成 24 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 168–195.
- 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.
- 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.
- 金浜貴史, 2017: 再予報の仕様. 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, 9–11.
- 気象庁, 2021: 気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗. 気象庁数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 115–124.
- 気象庁, 2022: 季節アンサンブル予報システムの改良. 気象庁数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 122–132.
- Komori, T., S. Hirahara, and R. Sekiguchi, 2020: Improved representation of convective moistening in JMA's next-generation coupled seasonal predic-

- tion system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4–5.
- 久保勇太郎, 2017: MJO. 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, 33–37.
- 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, 第 73 巻, S1–S18.
- Leutbecher, M and S. T. K. Lang, 2014: On the reliability of ensemble variance in subspaces defined by singular vectors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 1453–1466.
- Mayer, M, M. A. Balmaseda, S. Johnson, L. Magnusson, C. Roberts, and H. Zuo, 2022: Outcomes from UGROW-IO: Forecast errors in the Eastern Indian Ocean across lead times. *ECMWF Tech Memo*, **898**, 25p.
- Niwa, Y. and Y. Fujii, 2020: A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 3118–3143.
- 越智健太, 2016: 熱帯域のスプレッドの評価. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 58–65.
- 太田洋一郎, 2016: 初期値アンサンブル. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 4–10.
- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016: 週間アンサンブル予報システムにおける LETKF の開発. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 66–76.
- Scaife, A. A., A. Arribas, E. Blockley, A. Brookshaw, R. T. Clark, N. Dunstone, R. Eade, D. Fereday, C. K. Folland, M. Gordon, L. Hermanson, J. R. Knight, D. J. Lea, C. MacLachlan, A. Maidens, M. Martin, A. K. Peterson, D. Smith, M. Vellinga, E. Wallace, J. Waters, and A. Williams, 2014: Skillful long-range prediction of European and North American winters. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2514–2519.
- 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.
- 高谷祐平, 石川一郎, 2015: 季節アンサンブル予報システムの更新. 平成 27 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1–111.
- Takaya, Y., S. Hirahara, T. Yasuda, S. Matsueda, T. Toyoda, Y. Fujii, H. Sugimoto, C. Matsukawa, I. Ishikawa, H. Mori, R. Nagasawa, Y. Kubo, N. Adachi, G. Yamanaka, T. Kuragano, A. Shimpo, S. Maeda, and T. Ose, 2018: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting. *Clim. Dyn.*, **50**, 751–765.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317–2330.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297–3319.
- Wheeler, M. C. and H. H. Hendon, 2004: An all season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917–1932.
- 米原仁, 2008: 週間アンサンブル予報システムの改良. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23–26.

4.11 気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗と品質評価

4.11.1 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; 気象庁 2021, 2022) 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3月末に全期間の計算を完了した。しかしながら、2013年5月～2021年12月の期間については、熱帯低気圧ボーガスデータの一部欠落により、北西太平洋を除く領域で熱帯低気圧解析の品質が低下していることが判明したため (気象庁 2022)、欠落した熱帯低気圧ボーガスデータを補完のうえ、2022年5月より同期間の再計算を開始し、2022年11月末に計算を完了した。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。現在、JRA-3Qの品質評価を気象研究所気候・環境研究部第一研究室と協力して進めている。

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・精度評価に活用している。また、JRA-3Q データを国内外で広く利用できるよう、1990年代以降のデータの先行公開を開始したところである¹。

本稿では、JRA-3Qの初期品質評価として、2日予報スコア (第4.11.2項)、ラジオゾンデ観測データに対する背景値の適合度 (第4.11.3項)、熱帯低気圧 (第4.11.4項)、気温解析値の時間均質性 (第4.11.5項) の評価結果を述べる。JRA-3Qで用いているデータ同化システム、境界条件、強制場、観測データの概要等については、数値予報開発センター年報 (令和2年) 第2.3.8項 (気象庁 2021) 及び同 (令和3年) 第4.12節

(気象庁 2022) を参照されたい。

4.11.2 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・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4.11.1と図4.11.2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) 及び背景誤差分散の調整 (気象庁 2021) 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のこれらの領域における低いRMS誤差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。

4.11.3 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) は、背景誤差や観測誤差といったデータ同化システムの調整パラメータに対して独立であることから、その統計から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バイアスがあったことを示している (図4.11.3 (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

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>) を参照されたい。

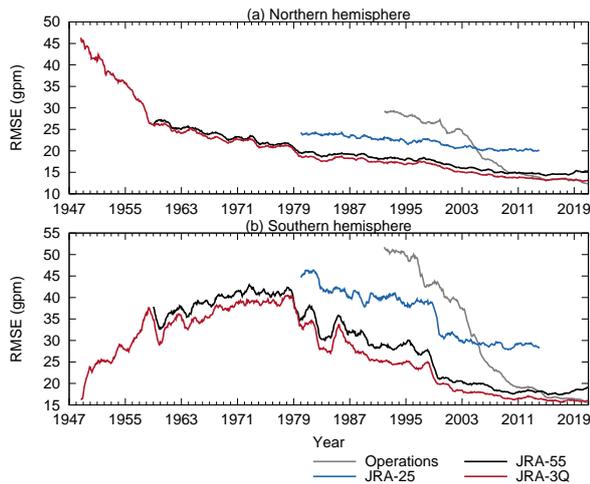


図 4.11.1 JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの 500hPa 高度 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a) 北半球中・高緯度 (90°-20°N)、(b) 南半球中・高緯度 (20°-90°S)。

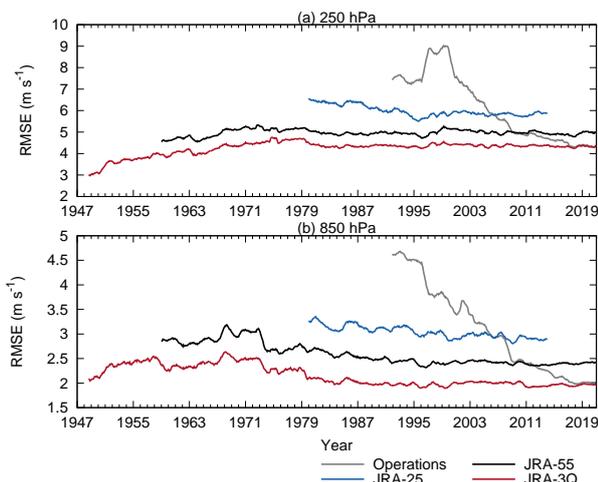


図 4.11.2 JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの熱帯域 (20°N-20°S) 風ベクトル 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a) 250hPa、(b) 850hPa。

付近では、JRA-25、JRA-55、JRA-3Q とともに 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 4.11.3 (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 4.11.3 (a)、(b))。火山性エア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 4.11.4)、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 とともに大きいのが、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。

4.11.4 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見られる問題があった (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気象庁現業システムに基づく熱帯低気圧ポーガスデータ作成手法に変更した (気象庁 2021)。これにより熱帯低気圧解析の一貫性が大幅に改善したが、2013 年 5 月～2021 年 12 月の期間については、熱帯低気圧ポーガスデータの一部欠落により、北西太平洋を除く領域で熱帯低気圧解析の品質が低下していることが判明したため (気象庁 2022)、欠落した熱帯低気圧ポーガスデータを補完のうえ、同期間の再計算を実施した。

図 4.11.5 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。上述の要因により、JRA-55 では 1980 年代後半以降、検出率の低下傾向が見られる。一方、JRA-3Q については、再計算の実施により再計算前のデータで見られていた 2013 年以降の検出率の急落が解消するとともに、JRA-55 で見られた弱化傾向が解消され、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、気象庁が熱帯低気圧ポーガスを独自に作成することにより、熱帯低気圧周辺風よりも熱帯低気圧の強度をより適切に捉えかつ時間的均質性の高い熱帯低気圧ポーガスの利用が可能になったことが大きく寄与していると考えられる。

4.11.5 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、旧世代のものに比べて概ね改善している (例えば、Simmons et al. 2014)。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

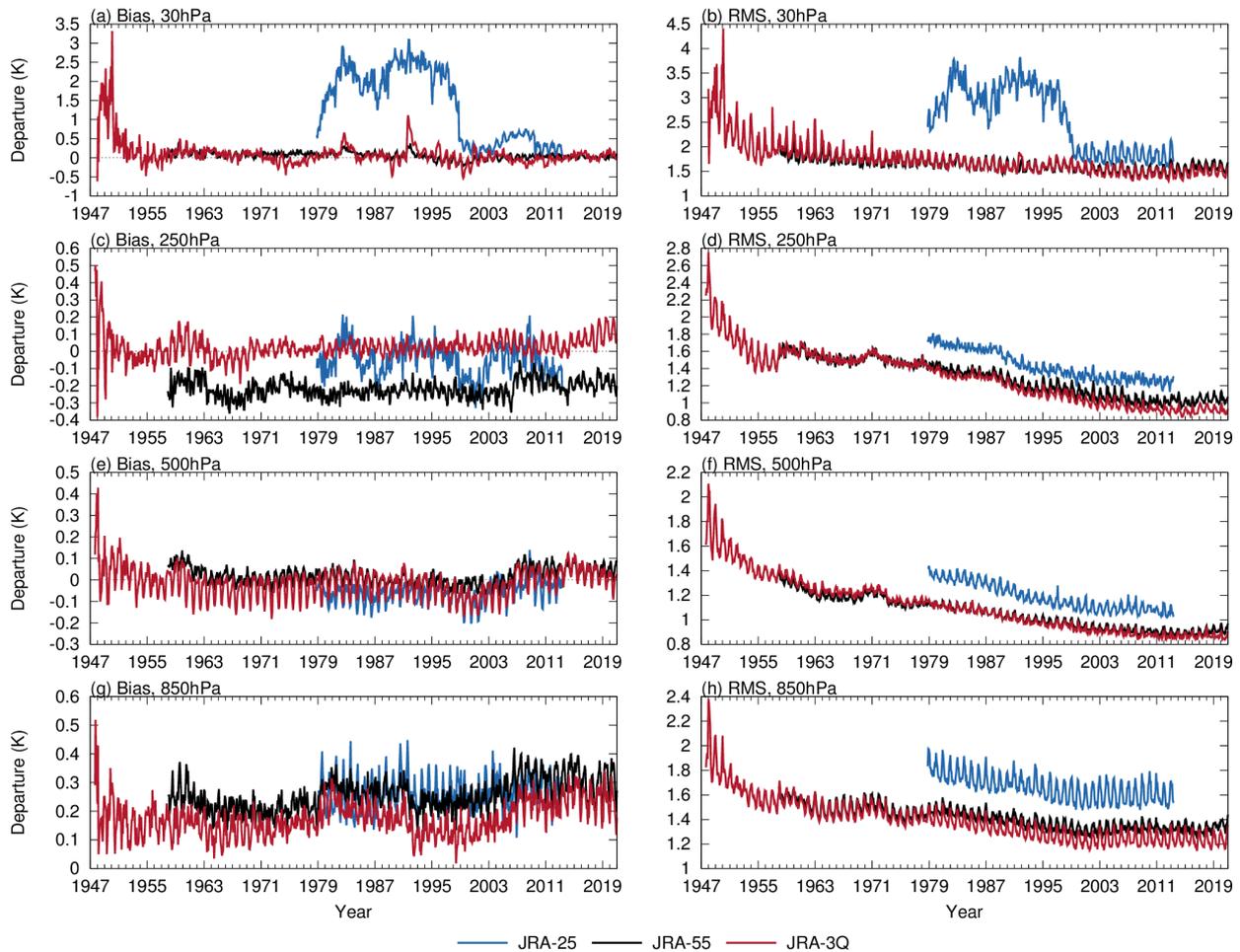


図 4.11.3 JRA-3Q、JRA-55 及び JRA-25 で使用したラジオゾンデ気温観測対背景値 D 値の全球平均、及び RMS の時系列

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。

(1) 地上

図 4.11.6 は、全球平均地上気温について、JRA-3Q の月別時系列と、JRA-55、ECMWF 再解析 ERA5 (Hersbach et al. 2020) 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) 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）。

1980 年代以降においては、これらの時系列の変動はかなり良く一致している。JRA-3Q については 1985 年 6 月に海面境界条件を現場観測に基づいた 1 度解像度の COBE-SST2 (Hirahara et al. 2014) から衛星観測に基づいた 0.25 度解像度の MGDSSST (栗原ほか 2006) に切り替えているが、それによる影響は全球平均では無視できると言える。一方、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水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。また、JRA-55 と JRA-3Q の差については、予報モデルにおける開水・海水排他格子から開水・海水混在格子への改善に伴い (米原 2019)、海水密度度の変動の影響が海水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、海水域において気温の長周期変動

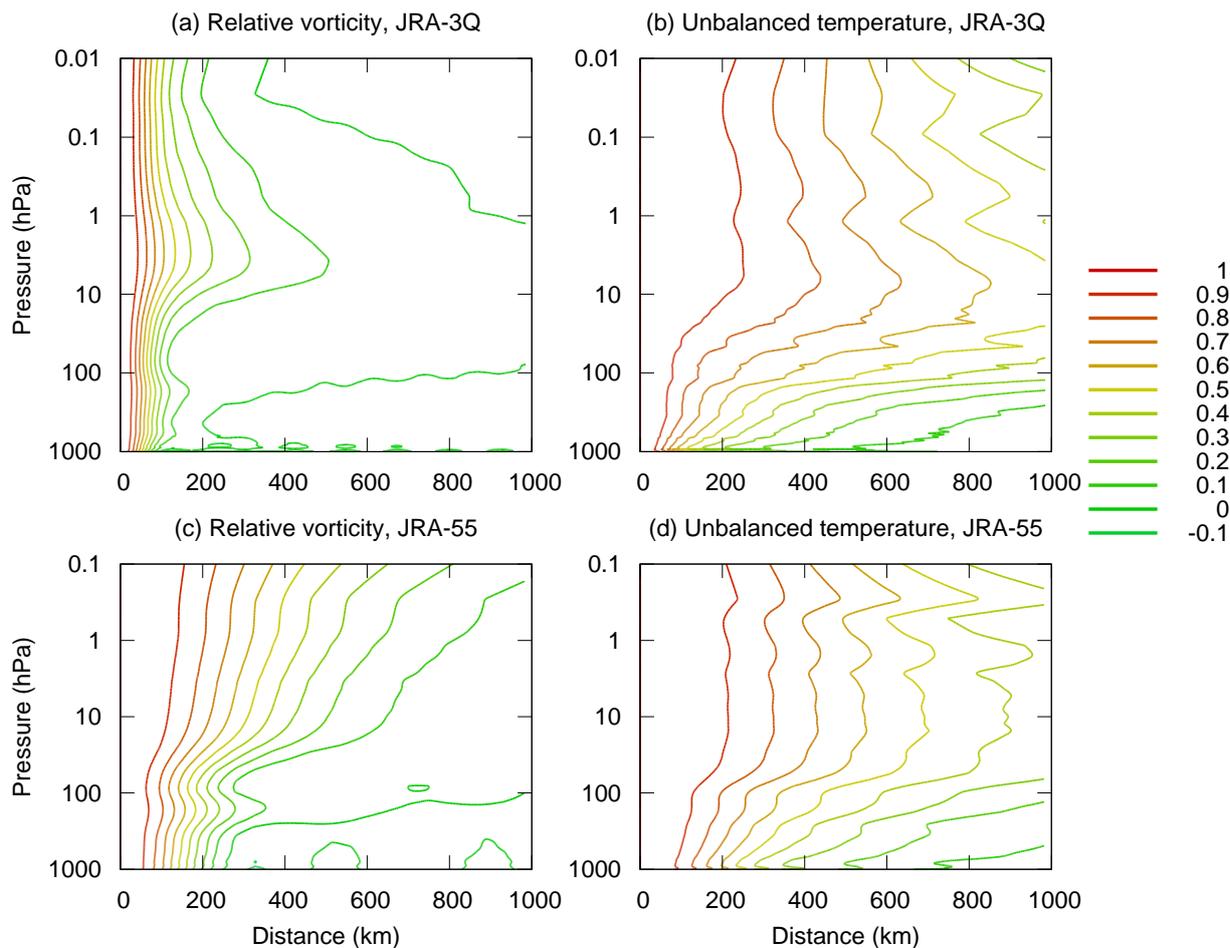


図 4.11.4 (a, b) JRA-3Q 及び (c, d) JRA-55 で利用した背景誤差共分散の水平相関の距離・高度断面図。(a, c) 相対渦度及び (b, d) 非バランス気温（風の場と統計的に独立な気温成分）の背景誤差共分散の水平相関。相対渦度、非バランス気温等、変分法の制御変数の詳細は（竹内 2002）を参照。

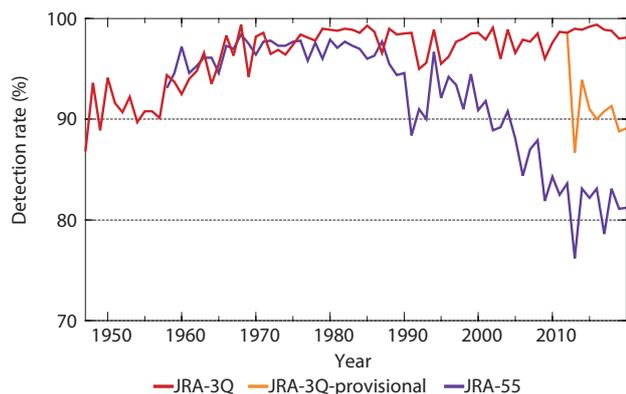


図 4.11.5 JRA-3Q 確定版、JRA-3Q 暫定版 (provisional)、及び JRA-55 における熱帯低気圧の全球検出率。熱帯低気圧の検出方法は Hatsushika et al. (2006) に準拠し、合同台風警報センターおよび米国国立ハリケーンセンターのベストトラックデータを使用した。（気象研究所 釜堀弘隆氏、原田やよい氏提供）

の再現性を向上させるためには、海水密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。

(2) 対流圏下層から下部成層圏

図 4.11.7 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 Wentz 2016, 2017) を用いる。

JRA-3Q の全球平均気温では、第 4.11.3 項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 4.11.7 (a)）。その要因の一つとしては、JRA-55 では 1978 年以前の

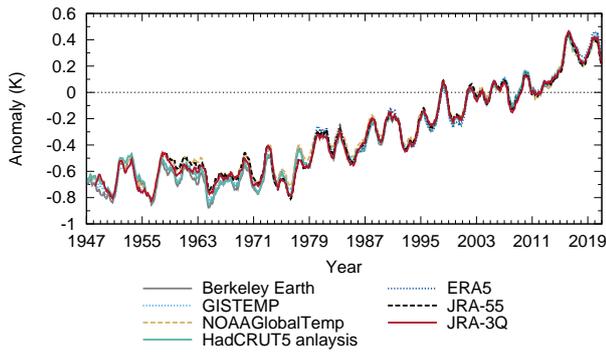


図 4.11.6 JRA-3Q、JRA-55、ERA5、HadCRUT5、NOAAGlobalTemp、GISTEMP、Berkeley Earth の全球平均地上気温の 12 か月移動平均値。JRA-55 と JRA-3Q の全球平均地上気温を算出する際、海上においては背景場を利用している（陸上においては解析値）。偏差はそれぞれのデータセットの 1991～2020 年の期間の気候値に対して計算されている。

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。

(3) 中部成層圏から成層圏上端

図 4.11.8 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

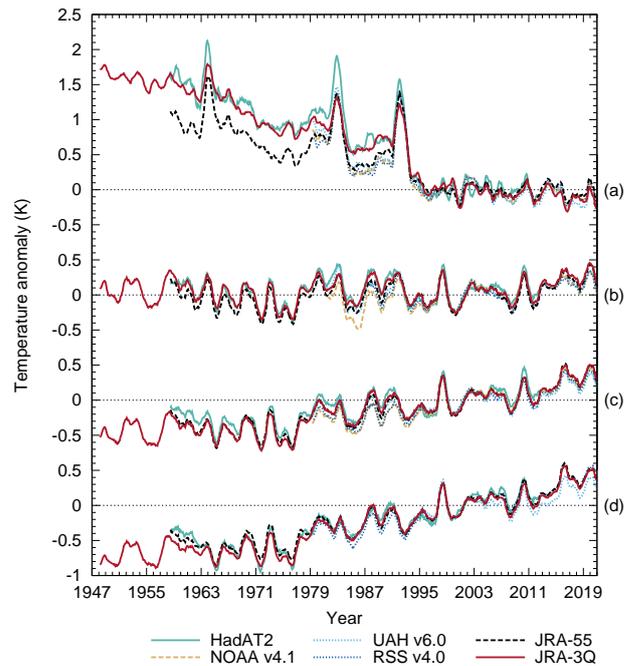


図 4.11.7 (a) 下部成層圏、(b) 対流圏上層、(c) 対流圏中層、(d) 対流圏下層の全球平均気温偏差の 12 か月移動平均値の時系列。RSS v4.0、UAH v6.0、NOAA v4.1 の時系列は MSU チャンネル 4、3、2 の観測値とその対流圏下層への外挿値であるのに対し、JRA-3Q、JRA-55、HadAT2 の時系列は気温から計算した MSU 等価量である。偏差はそれぞれのデータセットの 1995～2005 年の期間の気候値に対して計算されている。

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、

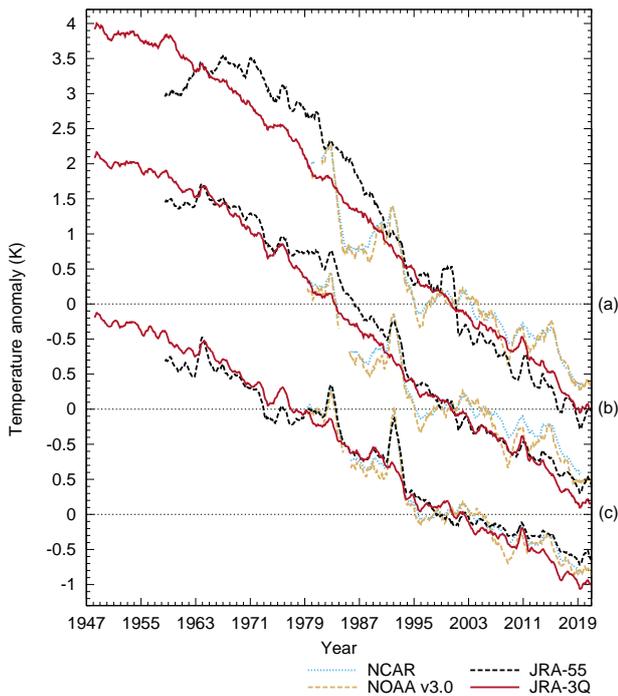


図 4.11.8 (a) 成層圏上端、(b) 上部成層圏、(c) 中部成層圏の全球平均気温偏差の12か月移動平均値の時系列。NOAA v3.0とNCARの時系列はSSUチャンネル3、2、1の観測値であるのに対し、JRA-3QとJRA-55の時系列は気温から計算したSSU等価量である。偏差はそれぞれのデータセットの1995～2005年の期間の気候値に対して計算されている。

JRA-55、JRA-3Qともに予報モデルにおいて、火山性エアロゾル、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に加えて、第4.11.3項で述べたように、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が原因と考えられる。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。

4.11.6 まとめと今後の予定

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海面水温解析の開発成果や、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、現在進めている品質評価で確認されている。熱帯低気圧については、再計算の実施により再計算前のデータで見られていた2013年以降の検出率の

急落が解消するとともに、JRA-55で見られた弱気傾向が解消され、熱帯低気圧解析の一貫性が大幅に改善した。

大気海洋部等においては、2023年春頃に地球温暖化等の気候監視・異常気象分析をはじめとする幅広い業務でJRA-55データからJRA-3Qデータへの切替えが予定されており、これらのプロダクトの精度向上が見込まれる。更に、地方官署等においても、大きな災害をもたらした過去事例等の調査にJRA-3Qデータを活用することにより、顕著現象等に関する知見の拡充も期待される。また、2023年春頃には、2013年5月～2021年12月の再計算も含め、JRA-3Qの全期間のデータ公開を予定している。品質評価結果については、JRA-3Qの仕様とともにJRA-3Q総合報告論文として学術論文誌に投稿する予定である。

4.11.7 謝辞

第4.11.4項の執筆に協力いただいた気象研究所原田やよい氏、釜堀弘隆氏に感謝申し上げます。

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.
- Haimberger, L., C. Tavalato, 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, doi:10.1175/JCLI-D-11-00668.1.
- 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, doi:10.2151/jmsj.84.891.
- 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, doi:10.1002/qj.3803.
- Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014:

- Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, **27**, 57–75, doi:10.1175/JCLI-D-12-00837.1.
- Huang, B., M. J. Menne, T. Boyer, E. Freeman, B. E. Gleason, J. H. Lawrimore, C. Liu, J. J. Renne, 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 NOAA GlobalTemp version 5. *J. Climate*, **33**, 1351–1379, doi:10.1175/JCLI-D-19-0395.1.
- 気象庁, 2021: 気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗. 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, 115–124 pp.
- 気象庁, 2022: 気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗. 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, 133–138 pp.
- 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.
- 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.
- 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, doi:10.1029/2018JD029522.
- 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. Jckel, D. E. Kinnison, O. Kirner, F. Ladstetter, M. Michou, O. Morgenstern, F. O'Connor, L. Oman, G. Pitari, D. A. Plummer, L. E. Revell, E. Rozanov, A. Stenke, D. Visoni, Y. Yamashita, and G. Zeng, 2018: Revisiting the mystery of recent stratospheric temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 9919–9933, doi:10.1029/2018GL078035.
- 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, doi:10.1175/JCLI-D-15-0744.1.
- 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, doi:10.1175/JCLI-D-16-0768.1.
- 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**, e2019JD032361, doi:10.1029/2019JD032361.
- 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, doi:10.2151/jmsj.85.369.
- 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, doi:10.1175/JCLI-D-15-0629.1.
- Rohde, R. A. and Z. Hausfather, 2020: The Berkeley Earth land/ocean temperature record. *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 3469–3479, doi:10.5194/essd-2019-259.
- 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. Muñoz-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. 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, doi:10.1002/qj.2317.
- Simmons, A. J., P. D. Jones, da V. Costa Bechtold, A. C. M. Beljaars, P. W. Kållberg, S. Saarienen, 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**, D24115, doi:10.1029/2004JD005306.
- 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, doi:10.1007/

s13143-017-0010-y.

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, doi:10.1038/nature11579.

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.

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

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, doi:10.1175/JTECH-D-16-0018.1.

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.

4.12 波浪モデル

4.12.1 はじめに

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に向け、気象庁では GWM の 0.5° (約 55km) から 0.25° (約 27km) への水平解像度高解像度化と、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) に増強するための開発を行ってきた。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。

2022 年度にはこれらの開発課題について業務化試験と精度検証を実施した。その結果、高解像度化により島嶼・海峡等の周辺での波高表現に改善が認められたこと等を踏まえ、2023 年 1 月末にこれらの改善を現業化予定である。本節では、これらの改善について報告する。

4.12.2 改良項目概要

2022 年度の波浪モデルの改良項目の概要について以下に述べる。

(1) GWM の高解像度化

GWM の水平解像度をこれまでの 0.5° (約 55km) から 0.25° (約 27km) に高解像度化する。これにより島嶼、海峡等の海陸分布がより現実的に表現できるようになる (図 4.12.1)。

(2) 延長予報の頻度増強

GWM ではこれまで 12UTC 初期時刻のみ 264 時間の延長予報を実行しており、他の初期時刻 00, 06, 18UTC では予測時間は 132 時間であったが、00UTC 初期時刻も GSM の 264 時間延長予報が利用可能であることから、これを用いて 00UTC の GWM についても 264 時間予測を行う。

4.12.3 業務化試験の結果

(1) GWM の高解像度化

2021 年 6 月 20 日～10 月 11 日を夏実験期間、2021 年 11 月 20 日～2022 年 3 月 11 日を冬実験期間として業務化試験を実施した。本節ではこの業務化試験結果を TEST と呼ぶ。コントロール実験 (CNTL) としては現業 GWM 予測結果を用いた。業務化試験の精度確認のため、衛星波高観測を真値とみなした有義波高の対観測検証を行った。各予測対象時刻での全球域、日本近海の Scatter Index¹は、図 4.12.2 の通り暖候期、寒

¹ Scatter Index は誤差の標準偏差を観測平均値で正規化した指標。波浪モデル検証で良く用いられる指標であり、WMO

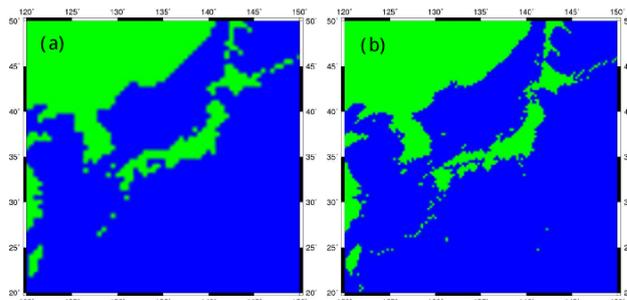


図 4.12.1 GWM の日本付近の海陸分布。(a) 現行 GWM (水平解像度 0.5°)、(b) 0.25° GWM。緑は陸、青は海格子。

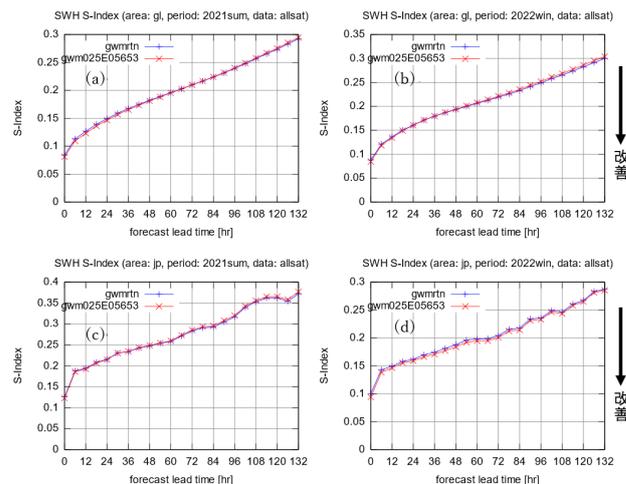


図 4.12.2 GWM 対衛星観測検証 Scatter Index。図中、青は CNTL (0.5° GWM)、赤は TEST (0.25° GWM)。(a) 全球 (極域除いた $75^\circ\text{S} \sim 75^\circ\text{N}$) 暖候期 (2021 年 6～10 月)、(b) 全球 寒候期 (2021 年 11 月～2022 年 3 月)、(c) 日本近海 ($120 \sim 150^\circ\text{E}$ 、 $20 \sim 50^\circ\text{N}$) 暖候期、(d) 日本近海 寒候期

候期いずれも CNTL に対してほぼ中立であった。

Scatter Index の平面分布 (図 4.12.3) を確認したところ、日本周辺、東南アジア、南太平洋、中米の島嶼部等 (図 4.12.3(c) 中の緑枠の領域) で Scatter Index が低下しており、高解像度化によって島等による波浪の遮蔽の表現が改善されたと考えられる。

事例検証でも高解像度化により波浪の表現が改善されている事例を確認した。図 4.12.4 に 2021 年 9 月 10 日 06UTC を初期時刻とした GWM の 24 時間予測での波高を示した。CNTL では解像度の制約から先島諸島や久米島等が表現されておらず、そのため太平洋から東シナ海に波浪が高いまま伝わる予測となっていた (図 4.12.4(a))。衛星観測の波高 (図 4.12.4 中丸で示された点) と比較すると、CNTL では東シナ海にて約 2m の波高を予測しており観測波高約 1.5m に対して過大傾向であった (図 4.12.4(a) 中、赤丸で囲んだ領域)。一方、TEST では高解像度化により地形がより正確に表現されるようになったことから、東シナ海での波高予

国際波浪予報相互比較でも用いられている。

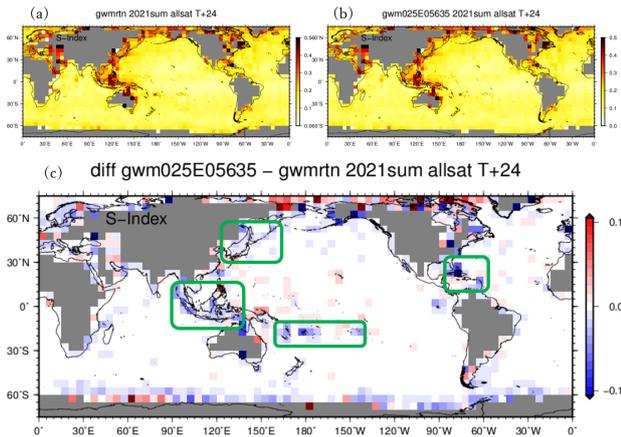


図 4.12.3 GWM 暖候期 24 時間予測 対衛星観測検証 Scatter Index。(a) CNTL (0.5°GWM)、(b) TEST (0.25°GWM)、(c) TEST-CNTL 差。青が TEST での改善を示す。

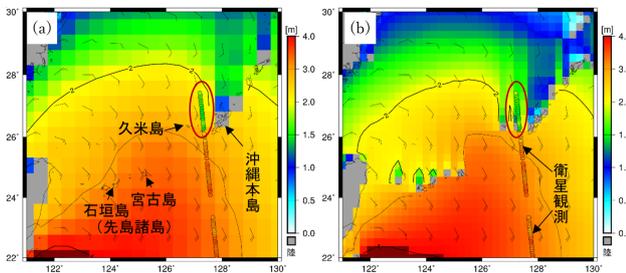


図 4.12.4 南西諸島周辺での GWM 24 時間予測波高 (単位 [m])。 (a) CNTL、(b) TEST。初期時刻は 2021 年 9 月 10 日 06UTC。図中の丸は衛星による波高観測値。灰色の格子は波浪モデルでの陸を示す。台湾の南東に 2021 年台風第 14 号が存在している。

測も衛星観測と整合する結果となった (図 4.12.4(b))。

(2) 後続モデル (沿岸波浪モデル、波浪アンサンブル) の影響評価

GWM 自体の評価に加えて、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波浪アンサンブル予報システム (WENS) についても、GWM 高解像度化に伴う影響の評価を行った。ここでのコントロール実験 (CNTL) はそれぞれ現業 CWM、現業 WENS である。CWM の CNTL と TEST の差はバイアス、Scatter Index いずれでも小さく、精度は中立であることを確認した (図略)。WENS についてはコントロールラン、アンサンブル平均についてバイアス、Scatter Index 等のスコアで比較して、TEST は CNTL に対しほぼ中立であることを確認した (図略)。

(3) 延長予報の頻度増強

264 時間予測の統計検証を 00,12UTC 初期時刻それぞれに対して行い、00UTC-12UTC 間の差を確認した (図 4.12.5)。00UTC 264 時間予測の精度 (図 4.12.5 中、橙色線) は 12UTC (図 4.12.5 赤線) と同等であることを確認した。

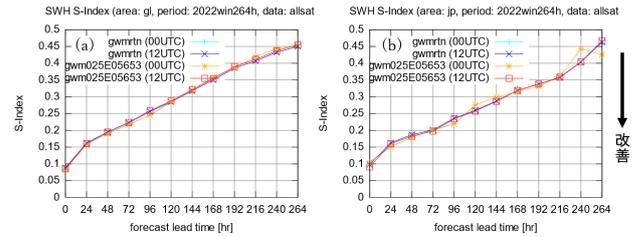


図 4.12.5 GWM 寒候期 264 時間予測の Scatter Index。(a) 全球、(b) 日本近海。図中、水色は CNTL 00UTC、青は CNTL 12UTC、橙色は TEST 00UTC、赤は TEST 12UTC のスコア。CNTL 00UTC は 132 時間まで。

4.12.4 まとめ

2022 年度に GWM の高解像度化および延長予報の頻度増強の開発を行い、業務化試験を実施した。統計検証の比較では概ね中立だが、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 の後続の CWM、WENS についても影響評価を行い、精度は概ね中立であった。また、延長予報の頻度増強については、今回追加予定の 00UTC 延長予報は 12UTC と同様の精度であることを確認した。これらの結果を踏まえ、GWM 改善の現業化を 2023 年 1 月末頃に行う予定である。

また、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

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.

4.13 高潮モデル

2022年度、高潮モデル関連では第3章で報告したように

- 日本域高潮モデルの予報時間延長（第3.5節）
- 日本域台風時高潮確率予報システムの導入（第3.6節）
- アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入（第3.7節）

の改善を8～9月にかけて行った。

その後は台風ボーガス手法の改善等に取り組んでいる。日本域高潮モデル、アジア域高潮EPS共に、GSMやMSM等大気モデルの解析・予測の風・気圧場で駆動するが、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・気圧場を埋め込んでいる。この際、大気モデル中の台風予測位置と熱帯低気圧情報での台風位置が大きく異なる場合には、あたかも台風が二つ存在するような気象場になることがありえる。これを避けるために vortex relocation (Kurihara et al. 1993, 1995) と呼ばれる手法の利用を検討している。この手法では、大気モデルの風・気圧等の場に対してフィルタ処理等を適用し台風を除去した後、台風ボーガスを埋め込む。これにより上述のような偽の二つ玉台風ができるのを防ぐことができる。現在この手法を高潮モデルの台風ボーガスに導入するための開発を進めているところである。

他には次期スーパーコンピューターシステム上での高潮モデル改善に向けて、水平高解像度化、高速化等の開発も進めている。

参考文献

- Kurihara, Y., M.A. Bender, and R.J. Ross, 1993: An Initialization Scheme of Hurricane Models by Vortex Specification. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2030–2045.
- Kurihara, Y., M.A. Bender, R.E. Tuleya, and R.J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL Hurricane Prediction System. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791–2801.

4.14 日本沿岸海況監視予測システムの開発

4.14.1 はじめに

数値予報課では、日本周辺の詳細な海況・海水情報提供のため令和2年10月から日本沿岸海況監視予測システム（以下、JPNシステム）を現業運用している（JMA 2022）。現在、海面高度偏差（SLA: Sea Level Anomaly）同化での高度計衛星 Sentinel-3A/B、HaiYang-2B の追加、領域平均 SLA 補正値の診断手法変更、海洋モデル更新（時間積分スキーム変更や NuSDaS 直接出力など）と、北海道野付湾の定着氷の流出軽減のための実利的な対処を計画している。今般、これらの変更を合わせた JPN システム業務化試験（遅延解析、速報解析、予測実験）を行った。ここでは、その概要を報告する。

4.14.2 改良・変更項目

解析システムと予測モデルに対する改良・変更項目の概要は、以下の通りである。

解析システムの改良

- SLA 同化で利用する高度計衛星として Sentinel-3A/B、HaiYang-2B を追加（現ルーチンでは Cryosat-2、Jason-3、SARAL を利用）
- 海水質量変動等に対応する領域平均 SLA 補正値を直近の観測データによって診断（現ルーチンでは、再解析実験で使用した月別補正値を時間外挿して求めた値を利用しており、現実の値との乖離が懸念された）

予測モデルの改良

- 使用している予測モデルのバージョンを現在の MRI.COM v4.6 から v5.0 に上げる。これにより、時間積分スキームとして3次の Leap-frog Adams-Moulton 法 (LFAM3) を採用することが可能となり、予報モデルの実行時間が現ルーチンと比較して約 42%短縮される。また、従来はモデル出力 (4byte バイナリ) を後処理で NuSDaS に変換していたが、モデル実行時に NuSDaS を直接出力することで後処理ジョブが不要となり、維持管理コストを下げると共に、当該ジョブにかかっていた実行時間（約3分）が短縮される。
- 日本近海モデルの海水予測において、北海道野付湾の定着氷の流出軽減のための実利的な対処（粘性増加）を導入

4.14.3 試験結果

2021年6月～2022年7月を対象期間として、JPNシステムの遅延解析、速報解析、予報の業務化試験（以下、TEST）を実行した。対照実験（CNTL）として現行のルーチン結果を使用したところ、TESTはCNTLに対して以下の改善および特性の変化が見られた。

- SLA 同化で利用する高度計衛星の追加によって、TESTでは観測データ数が適切に増えることが確

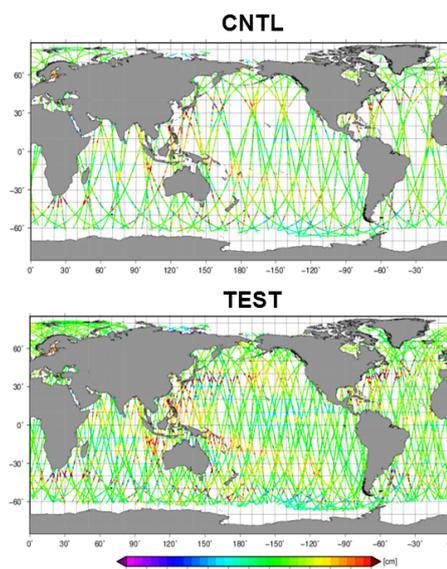


図 4.14.1 SLA 同化で利用する高度計衛星の観測値（2022年7月21日）：（上）CNTL、（下）TEST。線は衛星の軌道、色は SLA[cm] を表す。

認できた（図 4.14.1）。

- 北海道野付湾での粘性を増加させることで、定着氷の流出が多少軽減した（図 4.14.2）。
- 現場観測水温を真値とする速報解析の精度検証の結果、100m 深水温の月別 RMSE 時系列での TEST の改善傾向が確認できた（図 4.14.3）。また、鉛直プロファイルで比較すると、100m 以深でも改善しており、領域平均 SLA 補正値の診断方法変更が寄与していると推測された（図省略）
- 10日予測値の 100m 深水温に対する対現場観測検証の結果、TEST では初期値改善によってバイアスの絶対値と RMSE が改善していることを確認できた（図 4.14.4）。なお、日本近海モデルでは概ね中立の結果であった（図省略）。
- 10日予測値の対現場観測検証による鉛直プロファイル（北太平洋全域平均）を比較すると、6月・12月ともに概ね 100m 以深の低温バイアスが TEST で改善されていることが確認できた（図 4.14.5）。
- 対初期値による統計検証では、黒潮続流域・北太平洋全域ともにバイアスや RMSE に寄与するような変化傾向が見られず、CNTL と TEST で共通した海洋前線上の誤差成長が見られた（図省略）。この結果は、10日目まで現場観測に対して見られた予測の改善には、予測モデル更新よりも解析システムの改良が寄与していることを示唆している。

4.14.4 まとめ

JPN システムに対して、SLA 同化での高度計衛星の追加、領域平均 SLA 補正値の診断手法変更、海洋モデル更新と、北海道野付湾の定着氷の流出への対処を行った結果、現ルーチンと比べて同程度以上の精度で

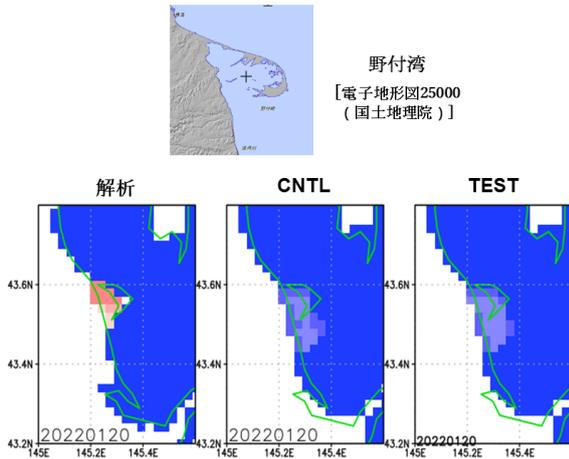


図 4.14.2 北海道野付湾における海水密度度の3日予測値 (2022年1月20日を対象): (左) 海水解析、(中) CNTL、(右) TEST。色は密度度 [0-1] を表す。

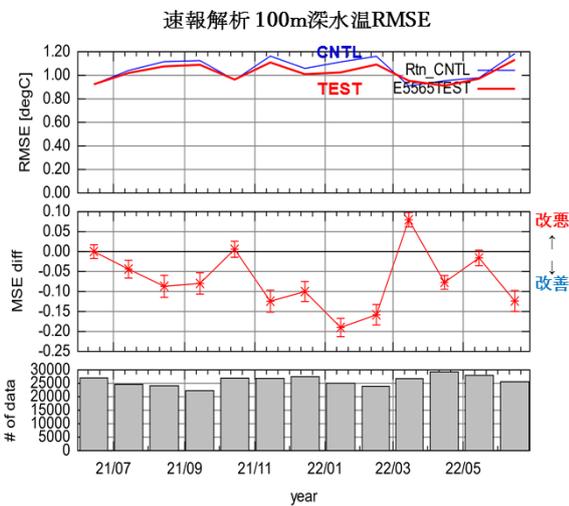


図 4.14.3 JPN システム速報解析の対現場観測検証: 100m 深水温の月別 RMSE 時系列 (2021年6月~2022年6月): 北太平洋全域平均に対する (上) RMSE (青が CNTL、赤が TEST)、(中) MSE の差 (TEST - CNTL)、(下) 検証データ数。

あることが確認され、また計算コストを低減することで将来の開発へ向けた資源も確保できた。このことから、上記の改良の現業化を令和4年度中に行う予定である。

参考文献

JMA, 2022: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 246 pp., Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-nwp/index.htm>.

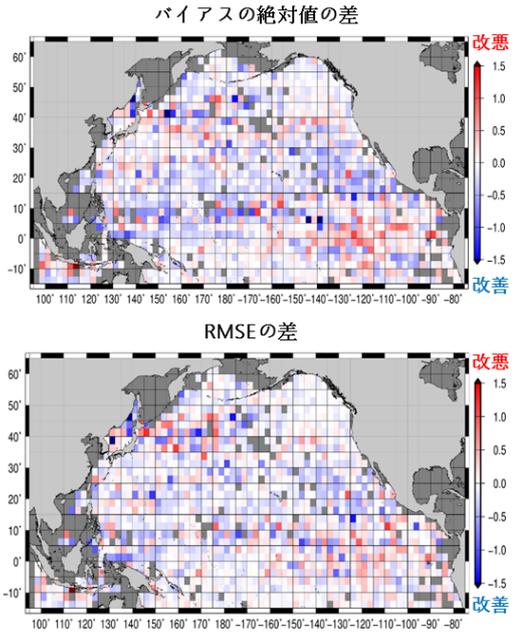


図 4.14.4 JPN システム 10 日予測値の対現場観測検証 (100m 深水温): (上) 各メッシュ (2.5 度× 2.5 度) 内平均バイアスの絶対値の差 (TEST - CNTL)、(下) RMSE の差 (TEST - CNTL)。図中の青色は TEST が改善傾向であることを示す。

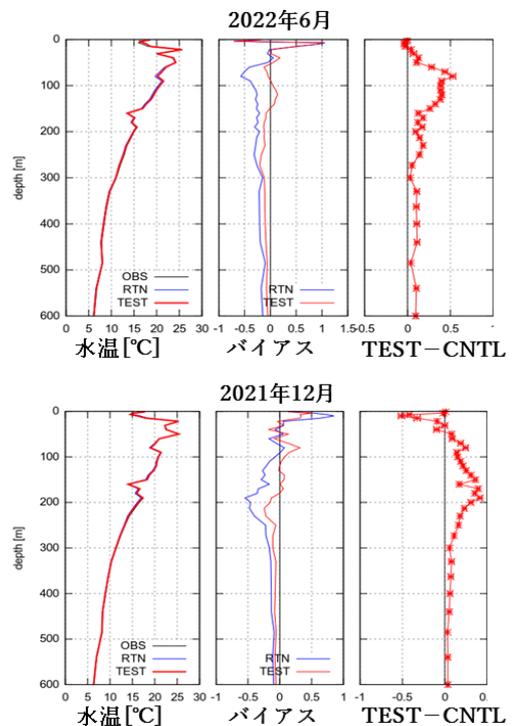


図 4.14.5 JPN システム 10 日水温予測値 対現場観測 バイアスプロファイル (北太平洋全域平均): (上) 2022 年 6 月、(下) 2021 年 12 月の結果。黒線は観測、青線は CNTL、赤線は TEST を示す。

4.15 物質循環システムの開発

4.15.1 高解像度版領域化学輸送モデルへのデータ同化導入

はじめに

当庁の大気汚染気象予報業務のため運用・開発している大気汚染気象予測システムにおいては、アジア域を対象とした領域化学輸送モデル（20km 版モデル）、東日本～西日本域を対象とした高解像度版領域化学輸送モデル（5km 版モデル）の2つのモデルを運用している（JMA 2022）。現在、維持管理の効率化等のため、20km 版モデルの機能をカバーできるよう5km 版モデルを整え、5km 版モデルに一本化することを計画している。具体的には、5km 版モデルにおいて

1. 20km 版モデルと同様のデータ同化手法導入
2. 計算領域の拡張
3. 境界値について20km 版モデルから全球化学輸送モデルへの切り替え

を行う（図 4.15.1、図 4.15.2）。今般、上述の1を実施し業務化試験を行った。ここでは、その概要を報告する。

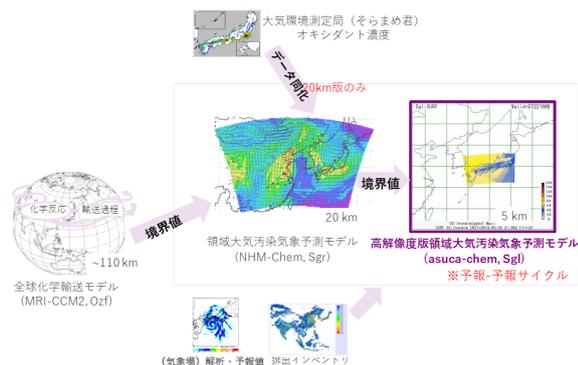


図 4.15.1 5km 版モデルへ一本化する前の大気汚染気象予測システム概念図：5km 版モデルではデータ同化は行わず、東日本～西日本のみを対象として予測を行い、境界値は20km 版モデルから与えられる。

変更項目

5km 版モデルに導入したデータ同化手法は、20km 版モデルと同じくナッジングである。観測値は12UTCから18UTCの環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめくん）による地上オゾン濃度を同化に用いた。なお、ナッジング計算は各モデル格子点上で行われるため、あらかじめ観測値も測定局数を分母とする算術平均で格子点値化しておく。

試験結果

2019年4月から5月の春季と2019年6月から9月の夏季を対象期間として、5km 版モデル（2022年3月時点の現業システム）を利用した予報～予報サイクルの対照実験（CNTL）と5km 版モデルに20km 版モデルと同様のナッジング処理を追加した予測実験（TEST）

を業務化試験として実施した。検証用観測値は、同化に使用していない時間帯のそらまめくんによる地上オゾン濃度とした。その結果、TESTはCNTLに対して以下のような特徴が見られた。

- 前日20時（JST）過ぎまで高濃度が持続し夜遅くに濃度が低下した2019年5月28日の事例では、不自然な高濃度領域が発生していない（図 4.15.3）。
- 測定局別の検証では、RMSEはFTの小さい範囲では改善したが、概ね12時間予報以降は改善の効果が小さくなっていった（図 4.15.4）。
- 府県予報区別の検証では、日中に最も濃度が上昇する時間帯である13-15時（JST）を対象に120 ppb以上、80 ppb以上を閾値としてスレットスコアを算出した。一部改善がみられる地域もあったが、スレットスコアは春季、夏季とも概ね中立の結果であった（図 4.15.5）。

まとめ

20km 版モデルと同様のデータ同化手法を5km 版モデルに適用する業務化試験を行った結果、予測精度は予測時間の短い範囲では改善した。改善の効果は予測時間が長くなるにつれて小さくなり、現業で着目する日中（16～18時間予報）では中立であった。改善とは言えないものの5km 版モデルへのデータ同化導入について問題ないことが確認されたことから、大気汚染気象予測システムの5km 版モデル一本化への第一段階として、この改良の現業化を2022年6月16日に実施した。

4.15.2 高解像度版領域化学輸送モデルの領域拡張と境界値変更

はじめに

第4.15.1項で述べた通り、現在、ルーチンシステム維持管理の効率化等のために大気汚染気象予測システムのモデル一本化を計画しており、次の開発ステップとして、20km 版モデルの役割を担えるよう5km 版モ

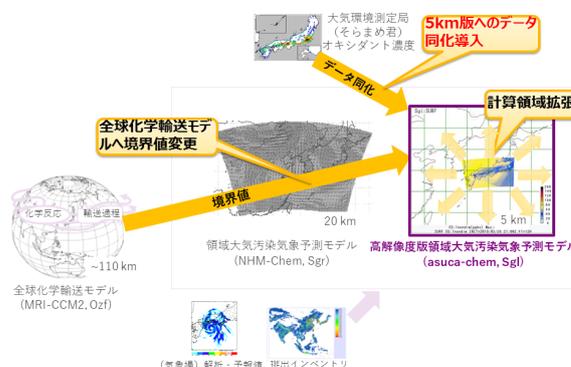


図 4.15.2 5km 版モデルへ一本化した後の大気汚染気象予測システム概念図：20km 版モデルと同様のデータ同化手法を5km 版モデルに適用し、計算領域を拡張して、全球化学輸送モデルから境界値を与える。

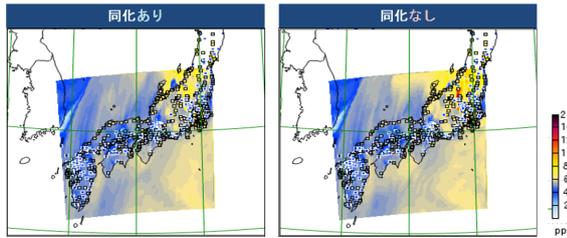


図 4.15.3 2019 年 5 月 28 日 15UTC (2019 年 5 月 28 日 12UTC 初期値) での TEST (左図)、CNTL (右図) の地上オゾン濃度 (陰影) 解析値及びそらまめくん観測値 (四角)。

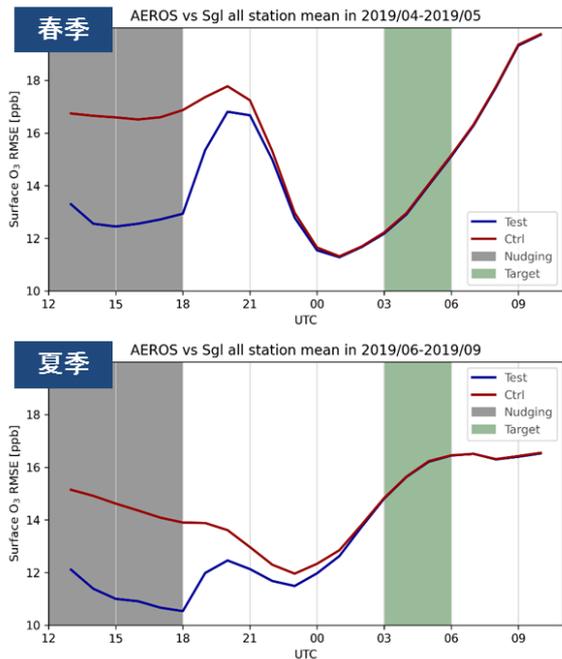


図 4.15.4 計算領域に含まれる 1016 測定局における地上オゾン濃度測定局別 RMSE の全国平均値: (上段) 春季、(下段) 夏季。赤線が CNTL、青線が TEST の結果。12-18UTC はナudging期間 (TEST のみ)、03-06UTC はカテゴリ検証対象期間を示す。

デルの計算領域を拡張し、5km 版モデルに必要な境界値を 20km 版モデルに替わって全球化学輸送モデルから与える必要がある。今般、それらの改良及び排出インベントリやモデルの改良を適用した業務化試験を行った。ここでは、その概要を報告する。

変更項目

5km 版モデルの改良について、予測結果に影響する変更項目は以下のとおり。

- 領域拡張：東日本～西日本域を対象とした計算領域から、大気汚染気象予報業務に必要な地域及び大気汚染物質の排出源となる大陸を含む計算領域へと拡大する (図 4.15.6)。
- 境界値変更：境界値を与えるモデルを 20km 版モデルから全球化学輸送モデルに変更する。

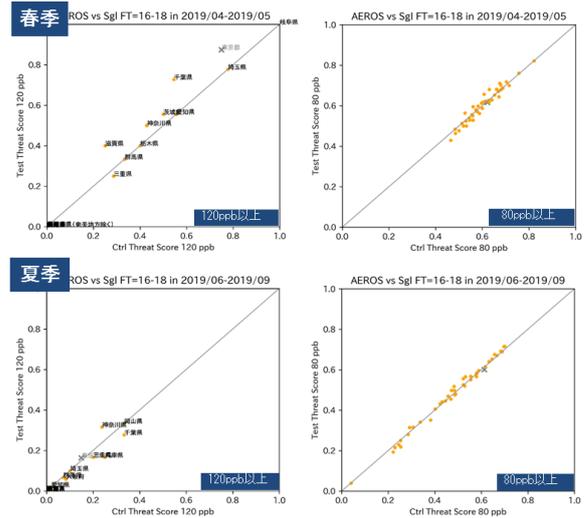


図 4.15.5 (上段) 春季と (下段) 夏季の地上オゾン濃度府県予報区別最大値に対する 120ppb 以上 (左図)、80ppb 以上 (右図) のスレツスコア: 縦軸は TEST、横軸は CNTL を示し、左上にプロットされている府県は改善を意味する。各府県予報区に含まれる格子点値及び観測値 (1 時間値) のうち最大の値を府県予報区別最大値とした。なお、東京都は府県予報区で島嶼部が含まれ特殊な処理を必要とするため検証対象外とした。

- 排出インベントリ変更：アジア域排出インベントリ REAS の更新 (バージョン 2.1 から 3.2.1: Kurokawa and Ohara (2020))、全球火災排出データベース GFED の更新 (バージョン 3 から 4: Randerson et al. (2018))、東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース EAGrid (Kannari et al. 2007; 福井ほか 2014) の利用高度化 (週日値のみの利用から週日/週末値の利用) を行う。
- モデル更新：MPI 計算領域分割の袖領域における値の更新タイミングの修正、鉛直渦拡散係数の修正、エーロゾル熱力学平衡計算の省略、エーロゾル関連パラメータの変更 (エーロゾルの粒子半径と標準偏差、草地、低木地のダスト排出量) を行う。
- その他：出力の高速化、メモリ使用量の削減などを実施する。計算領域の格子点数が約 8 倍となるため、予報計算に必要な計算資源は現行の 16 ノード × 15 分から 40 ノード × 45 分に増加する。

試験結果

業務化試験として、前述の改良を適用した 5km 版モデルの予測実験 (Sgl.TEST) を実施した。対照実験は 5km 版モデル (Sgl.CNTL) と 20km 版モデル (Sgr.CNTL) の現業の実行結果とした。検証対象期間は 2022 年 4 月から 9 月とし、そらまめくんによる地上オゾン観測値に対して検証を行った。なお、2022 年 6 月 15 日以前の初期日の Sgl.CNTL には、地上オゾン観測値同化 (ナudging) の導入が未適用である。その影響が見られるのは予報初期のみで、それ以降の予

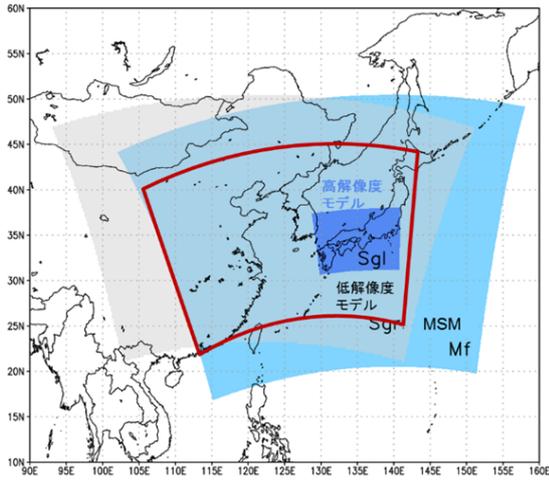


図 4.15.6 領域拡張後の 5km 版モデルの計算領域（赤枠）。塗りつぶした領域は 20km 版モデル（灰色）、現行の 5km 版モデル（濃い青色）、5km 版モデルの入力となるメソモデル（薄い青色）。

報時間（夏期間）では Sgl_TEST と Sgl_CNTL の実験結果の違いは前項の改良による影響が支配的である。Sgl_TEST は Sgl_CNTL と Sgr_CNTL に対して以下のような特徴が見られた。

- 関東地方でスモッグ気象情報が発表された 2022 年 6 月 30 日の事例では、Sgr_CNTL の予測は観測に対して過少であるのに対して、Sgl_CNTL と Sgl_TEST では高濃度を予測した（図 4.15.7）。総じて高濃度事例では、Sgl_CNTL と同等の分布を予測できていた。
- 統計検証では対照実験に対し予測精度は概ね中立であった（春期間は改善（図 4.15.8）、夏期間は中立からやや改悪（図 4.15.9））。春期間の夜間では、Sgl_TEST は Sgl_CNTL より RMSE が概ね減少し改善した。夏期間の日中では、都市内陸部で Sgr_CNTL より過大予測傾向が強まり、都市沿岸部で Sgl_CNTL より過少予測傾向が弱まる特性変化が見られた（図省略）。

まとめ

20km 版モデルの役割を担えるよう 5km 版モデルの計算領域を拡張し、境界値を全球化学輸送モデルから与える業務化試験を行った結果、20km 版モデルや現行の 5km 版モデルに対して予測精度は概ね中立であり、スモッグ気象情報の発表がされるような顕著事例では現行の 5km 版モデルと同等、20km 版モデルに対しては改善が見られた。このことから、上記の改良の現業化を 2022 年度中に行う予定である。

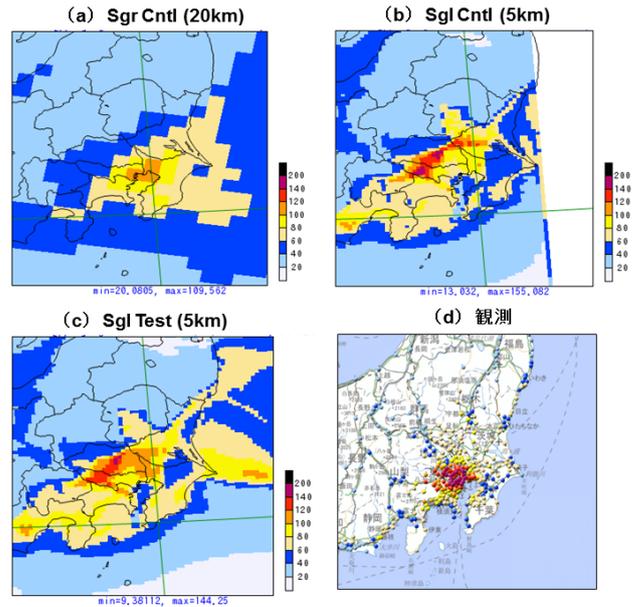


図 4.15.7 2022 年 6 月 30 日 15 時 (JST) の地上オゾン濃度分布の 18 時間予測値と観測値：(a) Sgr_CNTL、(b) Sgl_CNTL、(c) Sgl_TEST、(d) 観測値（データはそらまめくん、地図の出典は「地理院タイル」）。

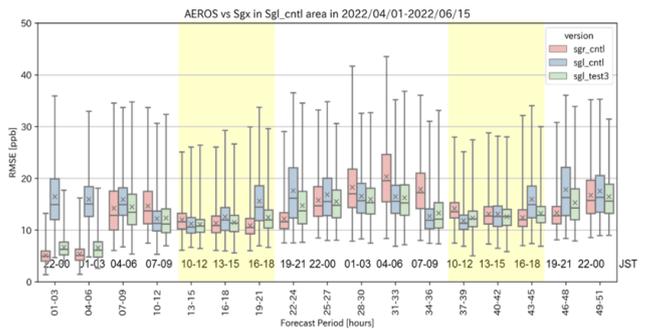


図 4.15.8 春期間（2022 年 4 月 1 日～6 月 15 日初期日予測）の地上オゾン濃度予測の RMSE（3 時間毎）。横軸は予報時間で、図中には対象時刻の JST と日中を表す黄色の塗りつぶしも示す。Sgl_TEST は緑、Sgl_CNTL は青、Sgr_CNTL は赤の箱ひげ図。ひげは 0-100 パーセンタイル値、箱は 25-75 パーセンタイル値、横線は 50 パーセンタイル値、x は平均値を示す。

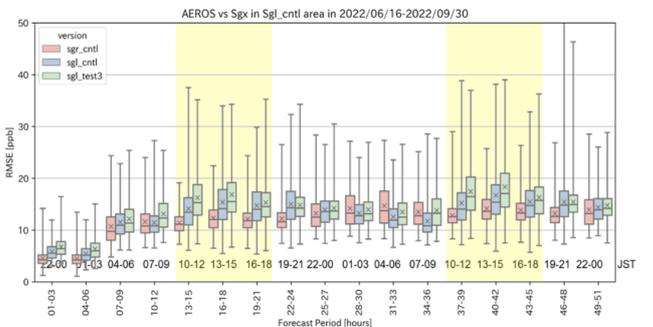


図 4.15.9 図 4.15.8 と同様。ただし、夏期間（2022 年 6 月 16 日～9 月 30 日初期日予測）の結果。

4.15.3 全球化学輸送モデルの同化利用衛星切り替え

はじめに

数値予報課では、紫外線情報の作成などを目的として、オゾン量の解析・予測を行う紫外線予測システムとして全球化学輸送モデルを運用している (JMA 2022)。全球化学輸送モデルでは、衛星観測データを利用してオゾン全量データ同化を行っているが、現在利用している衛星 (Suomi-NPP) は設計寿命が過ぎていることから、同シリーズの後継衛星 (NOAA-20) への切り替えに向けて準備を進めている。今般、衛星切り替えと同時に適用予定の軽微な変更を加えて業務化試験を実施した。ここでは、その概要を報告する。

変更項目

- 同化利用衛星切り替え
 - － Suomi-NPP/OMPS から NOAA-20(JPSS-1)/OMPS¹へ変更。同時に、バックアップ衛星を、Aura/OMI から Suomi-NPP/OMPSへ変更。
 - － ノイズ除去のための品質管理 (QC) 処理を強化
- モデル変更
 - － JRA-3Q 向け再解析で先行して適用した2点 (オゾン全量データ同化時の化学成分取扱い精緻化、短波放射過程での非現実的な加熱率対応) の改修
 - － モデル内の時刻管理の見直し (瞬間値出力タイミング、オゾン全量出力タイミング、エロゾル月別気候値の更新タイミングずれの修正)
- 維持管理コスト低減のための変更
 - － 数値予報ルーチン上流で行っていた衛星データデコード・QC処理の取り込み
 - － JRA-3Q 向けオゾン解析との統合に向けた出力の追加

試験結果

2020年3月～2021年2月を対象期間として、全球化学輸送モデルの業務化試験 (以下、TEST) を実行した。対照実験 (CNTL) として現行のルーチン結果を使用したところ、TESTはCNTLに対して以下の特性が見られた。概要を以下に示す。

- 新規利用する NOAA-20 は現ルーチンの Suomi-NPP よりも線状に入るノイズの幅が広いので、QC処理を強化する必要がある。このQC強化により Suomi-NPP と概ね同程度にノイズを除去することができた (図 4.15.10)。

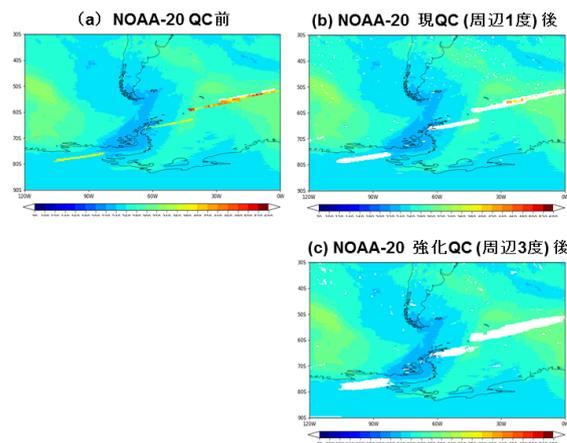


図 4.15.10 NOAA-20 衛星に対する QC 処理変更の効果: (a) QC 処理前、(b) 現ルーチンと同じ QC 処理後、(c) 強化した QC 処理後の結果。図中の「周辺〇度」は QC 処理における空間整合性チェックの範囲の大きさを示す。

- 東西平均オゾン全量の解析値を比較すると、(主に JRA-3Q 向けオゾン解析に先行導入した改修の適用により) TESTはCNTLよりも一様に若干増加する。また、東西平均オゾン全量の O-B を比較すると、現ルーチン使用で見られていた O-B の正バイアス (第1推定値の負バイアス) が緩和されていることが確認できた (図 4.15.11)。
- 対オゾンゾンデ検証による領域平均オゾン分圧バイアスを比較すると、CNTLと比べてTESTでは成層圏でわずかにオゾン濃度が増加するものの、バイアス傾向はほぼ変わらないことが確認できた (図 4.15.12)。
- 12～36 時間予測値の対分光光度計検証結果から、CNTLと比べてTESTではバイアスがわずかに正方向にシフトし、RMSDはバイアスの変化と対応するが、変化の大きさは小さく同程度の結果であることが確認できた (図省略)。
- 全球化学輸送モデルの計算結果を利用する紫外線情報や全球解析の特性が変わらないことも確認できた (図省略)。

まとめ

全球化学輸送モデルで利用している衛星の切り替えに軽微なモデル変更を加えて業務化試験を行った結果、オゾン全量としてはわずかに増加する傾向が見られたが、検証結果は中立であった。また、全球化学輸送モデルの計算結果を利用する紫外線情報や全球解析の特性が変わらないことも確認できた。このことから、上記の改良の現業化を 2022 年度中に行う予定である。

¹ https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/omps_nadir
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/noaa-20>

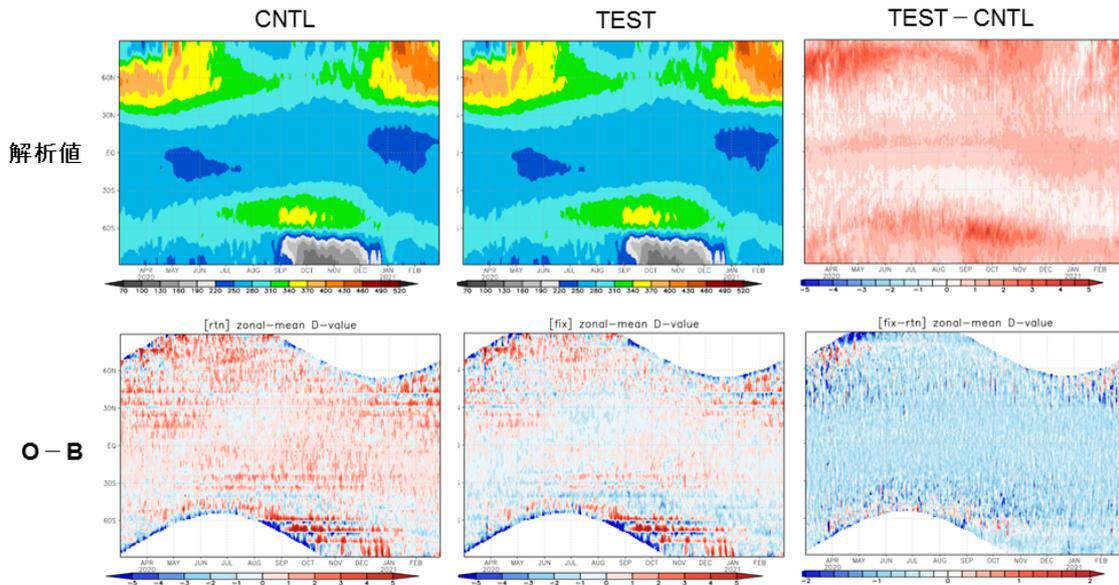


図 4.15.11 東西平均オゾン全量の（上）解析値と（下）O-B の時系列：左から CNTL、TEST、TEST - CNTL の結果。

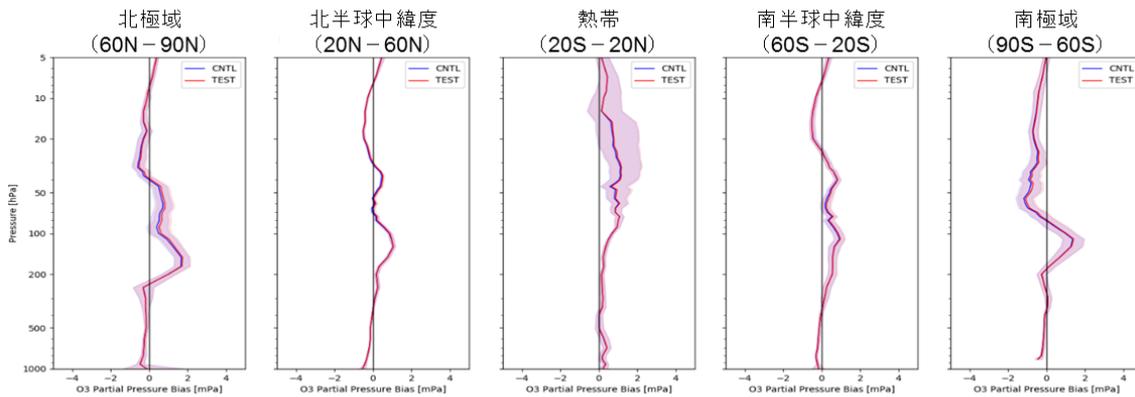


図 4.15.12 対オゾンゾンデ検証結果：領域平均オゾン分圧解析値のバイアス [mPa]（全 26 地点：北極域 2 地点、北半球中緯度 19 地点、熱帯 1 地点、南半球中緯度 3 地点、南極域 1 地点）、黒線は観測値、青線は CNTL、赤線は TEST、赤陰影と青陰影はそれぞれブートストラップ法で見積もられた 95%信頼区間。

4.15.4 全球エアロゾルモデルのひまわり切り替え対応

はじめに

数値予報課では、黄砂情報の作成などで利用される黄砂解析予測システムとして、全球エアロゾルモデルを運用している (JMA 2022)。全球エアロゾルモデルでは、気象衛星ひまわりの観測（可視・近赤外）でリトリーブされたエアロゾル光学的厚さ（AOT: Aerosol Optical Thickness）のプロダクト (Yoshida et al. 2021; 北島ほか 2021) を 2 次元変分法で同化している。静止気象衛星ひまわり 8 号は、2022 年 12 月 13 日に待機運用中であったひまわり 9 号へと運用交代された。その運用交代に先立ち、ひまわり 8 号から 9 号への切り替えに伴うエアロゾルプロダクトの品質評価を行った。

比較結果

ひまわり 8 号と 9 号で作成されたエアロゾルプロダクトを用いて、複数初期値で解析値と予測値の動作確認を日々実施した。同化して得られた解析値の例として、図 4.15.13 に 2022 年 10 月 23 日 06UTC での比較結果を示す。ひまわり 8 号と 9 号のエアロゾル解析値の差は日々の変動と比べて十分小さなものであり、大きな違いは見られなかった。なお、これらの解析値を利用したエアロゾル予測値にも大きな違いは見られなかった (図 4.15.14)。

まとめ

静止気象衛星ひまわり 8 号から 9 号への運用交代に伴い、全球エアロゾルモデルで利用しているエアロゾルプロダクトの品質評価を行った。8 号と 9 号のエアロゾルプロダクトを同化した解析値の差は日々の変動と

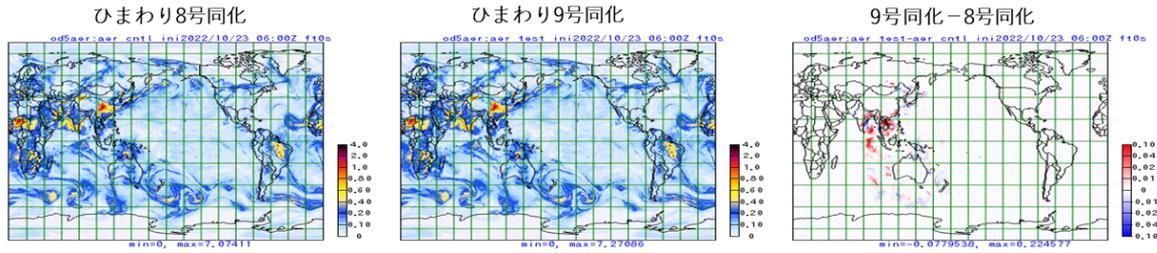


図 4.15.13 2020 年 10 月 23 日 06UTC におけるエアロゾル光学的厚さ (550nm) の解析値 : (左) ひまわり 8 号のエアロゾルプロダクトを同化、(中) ひまわり 9 号のエアロゾルプロダクトを同化、(右) ひまわり 9 号とひまわり 8 号による解析値の差。

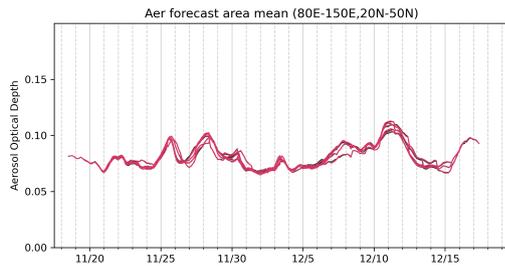


図 4.15.14 ひまわり 8 号 (黒線) とひまわり 9 号 (赤線) のエアロゾルプロダクトを用いた予測結果の差。

比べて十分小さいものであり、予測値にも大きな違いは見られなかったことから、2022 年 12 月 13 日に予定通りひまわり 9 号の利用に移行した。なお、全球エアロゾルモデルに対しては現在、2022 年度末に予定している GSM の水平高解像度化に伴う対応も準備を進めている。

参考文献

- 福井哲央, 國領和夫, 馬場剛, 神成陽容, 2014: 大気汚染物質排出インベントリ EAGrid2000-Japan の年次更新. 大気環境学会誌, **49**, 117–125.
- JMA, 2022: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 246 pp., Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-nwp/index.htm>.
- Kannari, A., Y. Tonooka, T. Baba, and K. Murano, 2007: Development of multiple-species 1km × 1km resolution hourly basis emissions inventory for Japan. *Atmospheric Environment*, **41**, 3428–3439.
- 北島俊行, 吉田真由美, 村上浩, 2021: ひまわり 8 号・9 号可視・近赤外エアロゾルプロダクトのアルゴリズム更新. 測候時報, **88**, 19–28.
- Kurokawa, J. and T. Ohara, 2020: Long-term histor-

ical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 3. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 12761–12793.

Randerson, J.T., van der G.R. Werf, L. Giglio, G.J. Collatz, and P.S. Kasibhatla, 2018: *Global Fire Emissions Database, Version 4.1 (GFEDv4)*. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, <https://doi.org/10.3334/ORNLLAAC/1293>.

Yoshida, M., K. Yumimoto, T. M. Nagao, T. Y. Tanaka, M. Kikuchi, and H. Muakrami, 2021: Satellite retrieval of aerosol combined with assimilated forecast. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 1797–1813.

4.16 線状降水帯予測の2022年事例における検証

4.16.1 はじめに

線状降水帯による被害は近年、毎年のように発生しており、その予測精度向上は喫緊の課題となっている。線状降水帯は、暖湿流の流入が持続し、局地前線や地形などの影響で空気塊が持ち上げられ、不安定な大気状態で積乱雲や積乱雲群が発生し、上空の風の影響でそれらが線状に並ぶことで形成される¹。線状降水帯の予測が難しい理由として、

1. 線状降水帯の発生メカニズムに未解明な点がある
2. 線状降水帯周辺の大気の3次元分布が正確にはわかっていない
3. 数値予報モデルに課題がある

ことが挙げられている¹。数値予報の観点では、特に観測データが不足している海上の気象状態に不確実性があり、数値予報の初期値が十分でないことや、個々の積乱雲の発生、発達の詳細には未解明な点も多く、数値予報モデルでの解像度の限界や、積乱雲の表現手法が十分でないことなどが課題となっている。

気象庁では、線状降水帯の予測精度向上に向けた取り組みを強化・加速化し、新たな水蒸気観測機器の整備や予測技術の開発等を継続的に実施している。2022年の取り組みとして、

1. 「線状降水帯による大雨の半日程度前からの呼びかけ」²（6月1日から）の開始、
2. 線状降水帯のメカニズム解明研究のための高密度な集中観測（気象研究所を中心とした、大学等の14機関と連携）³（6月から10月）
3. スーパーコンピュータ「富岳」を活用したリアルタイムシミュレーション実験³（6月から10月）
4. 民間船舶GNSSによる可降水量データのメソ解析への利用（6月3日から随時追加）
5. 線状降水帯の予測精度向上等を早期に実現するためのスーパーコンピュータシステムの整備（令和3年度気象庁補正予算）（2023年3月より部内運用開始予定）

などを実施している。

数値予報開発センター年報（令和3年）（気象庁2022）では線状降水帯の検出手法、評価手法などについて報告した。本節では2022年の線状降水帯事例に対して、MSMだけでなく、LFMでの線状降水帯の予測精度について、昨年度開発した手法に基づいて検証した結果を報告する。

¹ https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/senjokousuitai_ooame.html

² https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kishojoho_senjokousuitai.html

³ https://www.jma.go.jp/jma/press/2205/31a/SLMCS_AllJapan20220531.html

4.16.2 検証対象事例と検証手法

本調査の対象とする線状降水帯事例を表4.16.1に示す。線状降水帯の検出手法（数値予報開発センター年報（令和3年）（気象庁2022））は、

1. 解析雨量（5 km メッシュ）において前3時間積算降水量が100 mm以上の分布域の面積が500 km²以上
2. 1.の形状が線状（長軸・短軸比2.5以上）
3. 1.の領域内の前3時間積算降水量最大値が150 mm以上

とした。しかし、この条件で検出された2022年の線状降水帯事例は4事例と例年の十数事例より少なく、MSMとLFMの違いが十分に検証できなかったため、3.の条件を外して緩和した。なお、気象庁が発表している「顕著な大雨に関する情報」の発表実績⁴と比較すると、3.の条件だけでなく、オリジナルの1 km メッシュ解析雨量から5 km メッシュへの変換手法が異なることや、検出する時間間隔が、本調査では3時間毎であるが、「顕著な大雨に関する情報」は10分毎に検出しているなどの仕様の違いにより異なっている。例えば、8月3日から4日にかけて、山形県、新潟県、福井県で発生した線状降水帯事例は、00, 03, ..., 21 UTCの前3時間積算降水量で基準に達していない、もしくは、面積、長軸・短軸比の基準を満たしていない理由で、本調査事例には含まれていない。このように線状降水帯の検出手法には課題があり、発表された基準に合わせることを検討している。

検証手法についても以前と同様に、実況の線状降水帯の領域から100 km以内にMSMやLFMそれぞれで検出された線状降水帯があった場合を「線状降水帯を適中した」とする。本調査では、MSMの3, 6, 9, 12, 15, 18時間予測、LFMの3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10時間予測に対して、線状降水帯を適中できたか検証した。

4.16.3 検証結果

線状降水帯対象事例における、MSM、LFMでの検証結果一覧を表4.16.1に、分布を図4.16.1に示す。冒頭で示したように、現状の数値予報システムでは線状降水帯の予測が難しく、MSMでは4事例しか線状降水帯を適中できていなかった。一方、LFMではより多くの事例で線状降水帯を適中していた。短時間降水予報や直近の防災情報を目的としたLFMでは、計算機資源の制約もあり、現状の予測時間は10時間までと半日前からの防災情報として用いることはできないが、短時間予測を含めてMSMでは全く適中できなかった事例でも、LFMでは適中できている時間があった。また、予測頻度に注目すると、3時間毎のMSMと比較して、LFMは1時間毎に予測計算することから、ある事例では適中された予測時間が多くなっていた。この

⁴ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jirei/index.html>

表 4.16.1 線状降水帯発生日時と MSM、LFM での線状降水帯の検証結果。適中した時間での「X」はどの時間も適中できなかったことを指す。

通番	線状降水帯発生日時	MSM で適中した 予測時間 (hour)	LFM で適中した 予測時間 (hour)
1	06/19 09UTC	X	10
2	07/04 18UTC	X	X
3	07/05 18UTC	6, 9, 12	4
4	07/16 09UTC	X	6
5	07/18 06UTC	X	6, 9
6	07/18 09UTC	X	3, 5
7	07/18 12UTC	X	3
8	07/18 15UTC	X	3, 5, 6, 7, 10
9	07/22 12UTC	X	X
10	08/03 00UTC	12	8, 10
11	08/13 12UTC	12	3, 5, 7
12	09/18 09UTC	X	X
13	09/23 06UTC	X	4
14	09/23 09UTC	3, 15, 18	4, 6, 8

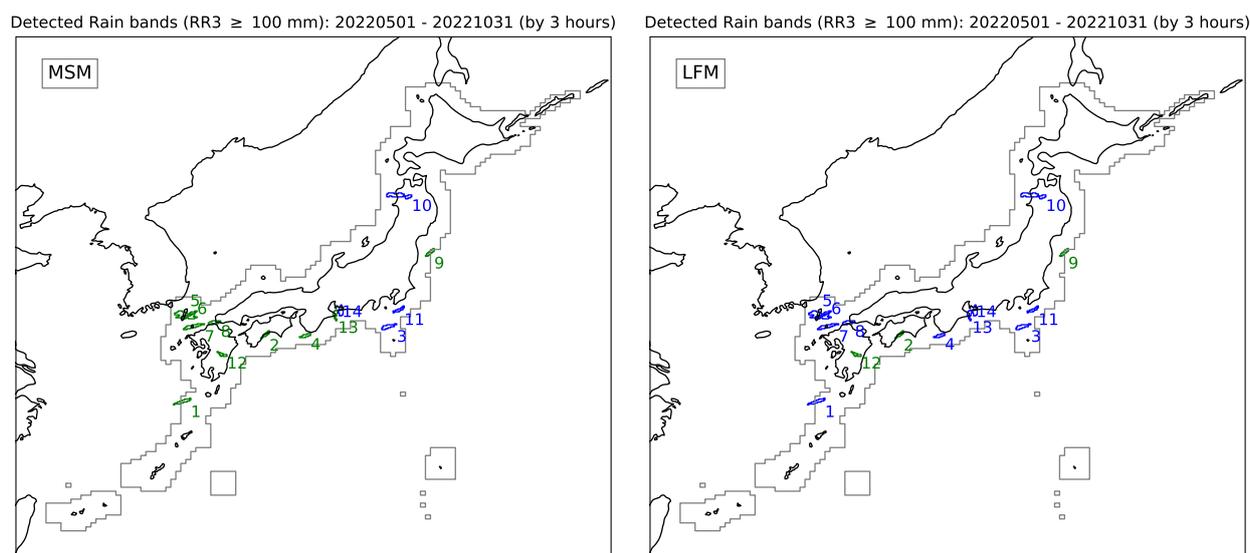


図 4.16.1 線状降水帯の分布図。図中では実況で線状降水帯が発生した場所を示し、その場所から 100 km 以内に MSM (左図) または LFM (右図) で線状降水帯を適中した場合 (捕捉) を青色、適中できなかった場合 (見逃し) を緑色で示す。図中の番号は表 4.16.1 の通番と対応した事例である。

ことから、LFM は短時間の複数初期値を利用することで、アンサンブル的に線状降水帯が起こる可能性を把握することができる。

最後に、LFM で線状降水帯を適中した事例 (表 4.16.1 の通番 8 に対応) の降水分布を図 4.16.2 に示す。この事例では、黄海から日本海に進む低気圧や、前線に向かって暖かく湿った空気が九州を中心に流れ込んだ影響で、7月18日夜遅くに山口県から福岡県沖にかけて線状降水帯が発生した。MSM では降水の集中帯が島根県沖にずれており、そこでの降水量も実況で線状降水帯が発生した場所の降水量と比較して少なかった。

LFM では、降水域が実況よりもやや北東に位置がずれているが、山口県に線状降水帯が発生しており、降水量も実況と同程度であった。しかし、その周辺では、実況にはない過剰な強雨域もあった。今回の検証の対象外ではあるが、他にも LFM は線状降水帯の空振り事例が多く見られた。

4.16.4 まとめ

2022 年に発生した線状降水帯に対して、MSM や LFM での線状降水帯予測の検証を行った。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) (気象庁 2022) で調査し

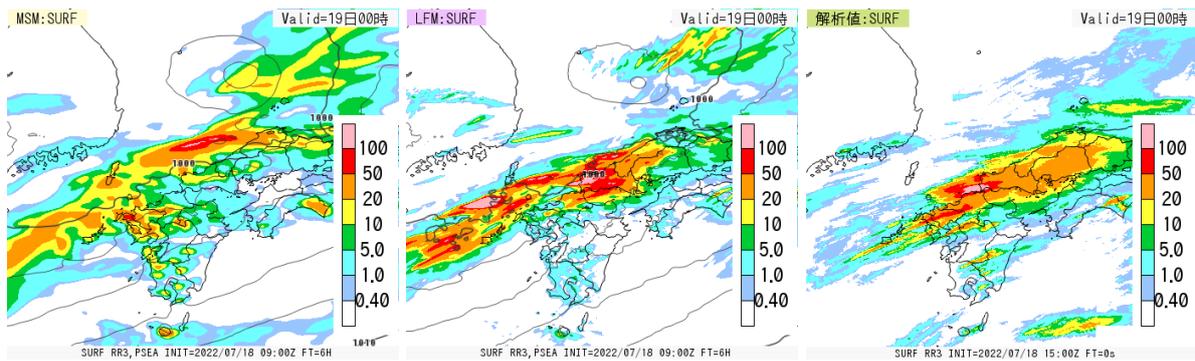


図 4.16.2 線状降水帯予測事例。2022 年 7 月 18 日 09UTC 初期値の 6 時間予測。左が MSM、中が LFM、右が対応する時刻の解析雨量 [mm/3h]。加えて、MSM と LFM に地上気圧 [hPa] を等値線で示す。

た時の線状降水帯検出基準では、2022 年の線状降水帯事例がかなり少なくなったことから、最大降水量の基準を外して緩和した状態で検証した。MSM と LFM で線状降水帯の予測を比較したところ、LFM の予測がより線状降水帯を適中していた。一方で、LFM では過剰な強雨域も予測しており、線状降水帯の空振りも多くなっていた。

線状降水帯は事例数が少ないこともあり、その予測精度の評価は難しい。今回調査をした決定論予測以外にも、線状降水帯予測の不確実性を把握するために、MEPS などアンサンブル予測による確率的検証も取り組む必要がある。また、線状降水帯の発生メカニズムに着目した、下層収束や水蒸気量などに対する検証も重要である。このように、線状降水帯予測の精度を様々な観点で評価・検証し、予測精度向上に資する調査を継続する必要がある。

参考文献

気象庁, 2022: 線状降水帯予測の評価. 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, 145-147.

4.17 台風進路予測の現状と誤差分析

4.17.1 はじめに

気象庁は「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」の台風防災において、台風に伴う災害発生の数日前からの広域避難を確実に実行することを目標として掲げている。特に台風の進路予測は、その後の降水量や風の予測に大きく影響することから、その改善は最優先事項である。進路予測の精度向上のためには、進路予測誤差の現状把握から誤差の要因分析を通じて、数値予報システムでの問題点や改善点を見出すことが重要である。本節では、GSMでの台風進路予測の現状と進路誤差の分析手法の一つである最適指向流を用いた調査結果を簡単に報告する。

4.17.2 台風進路予測の現状

台風進路予測の現状として、数値実験作業部会(WGNE)の枠組みの中で、気象庁が1991年から実施している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の結果を取り上げる。WGNEの熱帯低気圧予測の国際相互比較検証の仕様や検証手法などについては、梅津・森安(2013)、Yamaguchi et al. (2017)などを参照願いたい。また、2018年と2019年に対する検証結果は数値予報開発センター年報(令和2年)(気象庁2021)で報告した。

まず、台風3日予測に対する台風進路誤差の2021年までの経年変化を図4.17.1に示す。数値予報システムの絶え間ない改良によって、長期的には進路誤差が減少している。ただし、進路誤差の経年変化には年変動があり、特に2021年は、ほとんどの数値予報センターで3日予測の進路誤差が増大していた。また、ここ10年ほどに注目すると、一番進路誤差が小さいECMWFでも3日予測で200kmを切る程度で近年は誤差減少が鈍化している傾向が見られた。

次に、台風の転向状態に区分化し、ベストトラックでの進行方向成分で分解(図4.17.2)した位置誤差の分布を図4.17.3に示す。転向状態はベストトラックでの進行方向によって、図4.17.4のように区分している。経田・越智(2014)など、以前から指摘されている通り、転向後でのスローバイアス(図中の左下での青色)や転向前での台風西進時での北上バイアス(図中の右側での赤色)が近年においても見られる。外国数値予報センターにおいても同様の傾向が見られる(図略)ことから、各数値予報センターでの共通の課題となっている。

4.17.3 台風進路予測誤差の分析

台風の進路誤差をより詳細に分析するために、台風を移動させる環境場(指向流)に注目し、吉村ほか(2020)と同様の手法で最適指向流による分析を行った。最適指向流の手法について簡単に説明すると、台風の進路

は台風以外の上空の風によって流されることを前提として、台風の渦を除いた周辺の平均風を環境場の風とし、それと実際の台風の速度が合致する条件を診断するものである。手法はGalarneau and Davis(2013)に基づき、Miller and Zhang(2019)に従って実装した。GSM予測値と参照値(ここでは全球解析値)それぞれの最適指向流の結果から、台風移動速度の誤差要因が環境風・台風の渦の大きさ・下端を850hPa固定とした指向流を受ける深さ・残差の4成分に分解される。

最適指向流で分析した事例として、2021年台風第19号を取り上げる。この台風は進路誤差が2021年で比較的大きい台風であった。転向して北東進するタイミングが遅れた2021年10月12日00UTC初期値からの予測値(図4.17.5)と、それに対応する時刻の解析値に対して最適指向流を求めた。その結果、指向流を受ける深さに違いが見られた。図4.17.6に予測値と解析値の指向流が受ける深さの上端を示す。48時間予測にかけて、予測値では700hPa程度が上端となっており、解析値と比べて上層の流れに感度がないことが示されている。下層ほど東風成分が卓越していたことから、この上端の低さによって台風の西進誤差が生じたと考えられる。吉村ほか(2020)においてもGSM予測値は深さの上端が低い傾向があるとしており、この事例でも進路誤差のひとつの要因になっていることを示唆している。

4.17.4 まとめ

GSMの台風進路予測について調査した。長期的には誤差は減少していたが、転向後のスローバイアスや転向前の台風西進時の北上バイアスは、今年の台風に対しても見られ、程度の差はあれども長年残っている誤差であることを確認した。

続いて、最適指向流手法を導入することによって、台風を移動させる環境場を診断した。GSMでの進路誤差の要因として、台風を動かす環境風の深さに解析値との違いがある事例を紹介した。最適指向流には、様々な前提条件があることや、台風の移動の説明がつかない事例も見られたことから、より詳細な分析や、他の分析手法の調査も必要である。台風進路予測の精度向上に資するよう今後とも調査を継続していきたい。

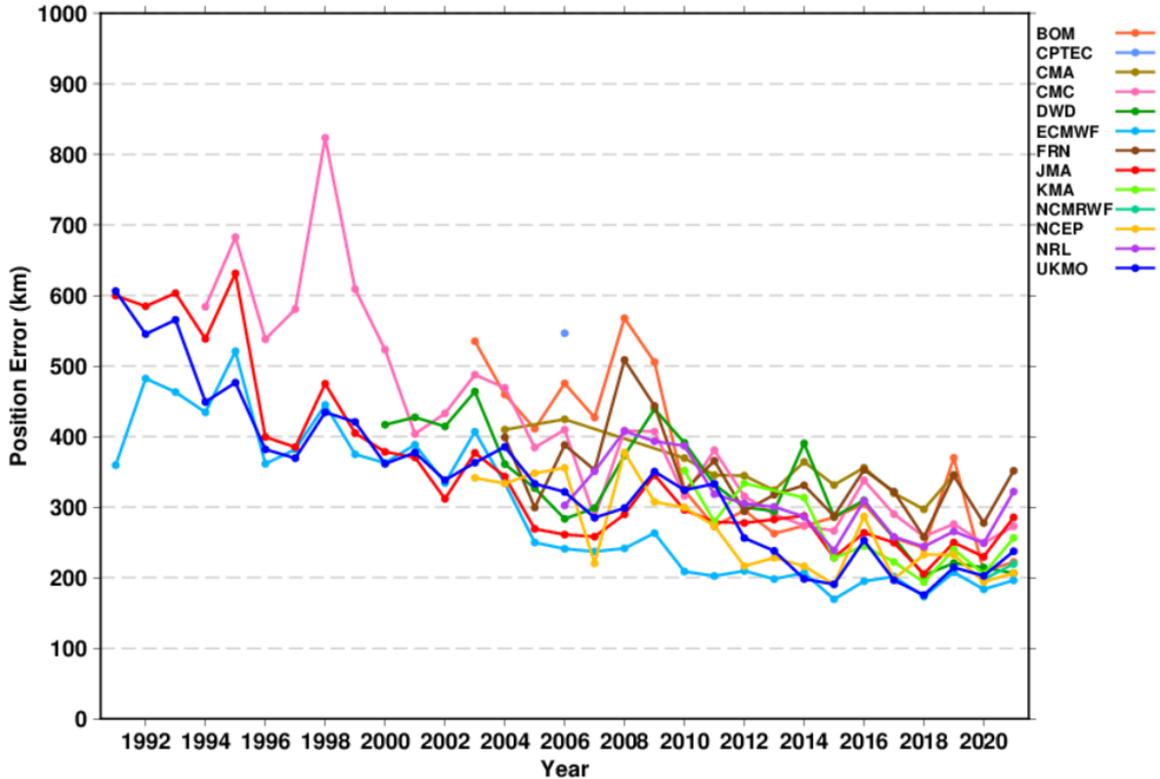


図 4.17.1 台風の3日予測での進路誤差の経年変化。

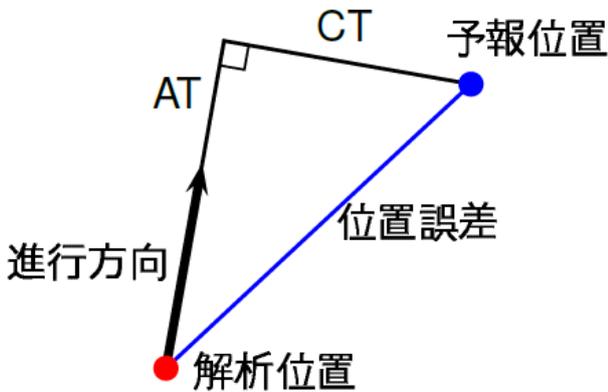


図 4.17.2 ベストトラックでの台風の進行方向で分解した、進路予測誤差の取り方。進路予測誤差は進行方向に沿った方向の誤差(AT)と進行方向に直行する方向の誤差(CT)に分解される。

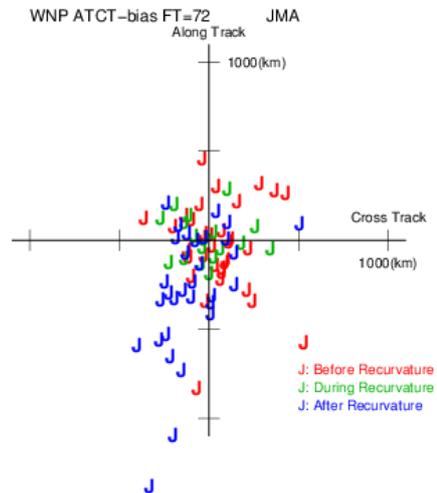


図 4.17.3 台風の進行方向成分で分割した GSM 進路誤差の分布。2021 年台風事例に対する 3 日予測。ベストトラックでの中心位置から進行方向の進路誤差を縦軸に、進行方向と直行する進路誤差を横軸にプロットしている。また、赤色は転向前、緑色は転向中、青色は転向後の事例を示す。

参考文献

Galarneau, T. J. and C. A. Davis, 2013: Diagnosing Forecast Errors in Tropical Cyclone Motion. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 405–430.
 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.

経田正幸, 越智健太, 2014: 台風アンサンブル予報システム. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62–71.

Miller, William and Da-Lin Zhang, 2019: Understanding the Unusual Looping Track of Hurricane

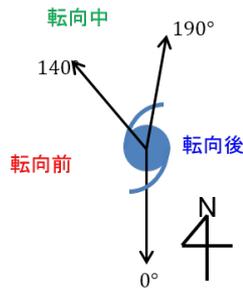


図 4.17.4 台風の進行方向に応じた転向前、転向中、転向後の区分。南進を0°として、時計回りに、0°-140°を転向前、140°-190°を転向中、190°-360°を転向後と定義する。

値予報課報告・別冊第59号, 気象庁予報部, 98-111.
 Yamaguchi, M., J. Ishida, H. Sato, and M. Nakagawa, 2017: WGNE Intercomparison of Tropical Cyclone Forecasts by Operational NWP Models: A Quarter Century and Beyond. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 2337-2349.

吉村裕正, 中川雅之, 杉正人, 和田章義, 大西領, 那須野智江, 中野満寿男, 後藤浩二, 坂内健大, 佐々木亘, 2020: 複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験. *Annual Report of the Earth Simulator 2019*, 4-1-4-5.

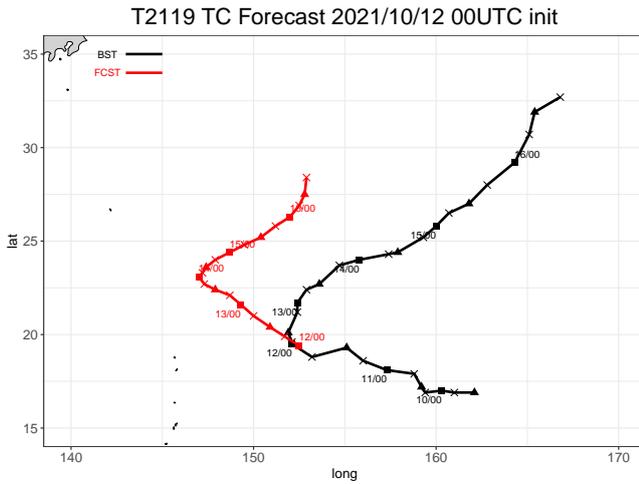


図 4.17.5 2021 年台風第 19 号の進路予測。2021 年 10 月 12 日 00UTC 初期値。赤が予測値、黒がベストトラックの進路。

Joaquin (2015) and Its Forecast Errors. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 2231-2259.

梅津浩典, 森安聡嗣, 2013: WGNE 熱帯低気圧検証. 数

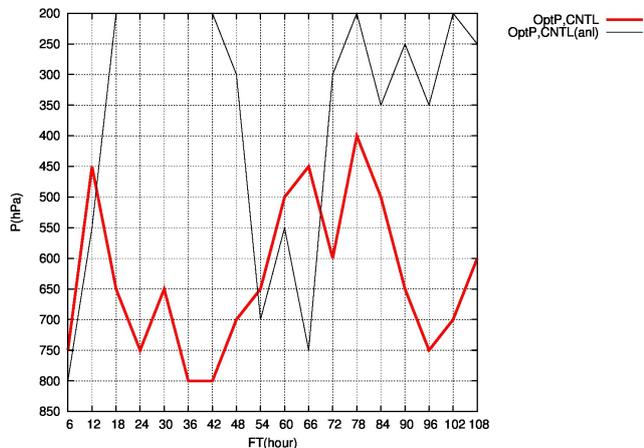


図 4.17.6 最適指向流によって導かれた指向流が受ける深さの上端の気圧。横軸は 2021 年 10 月 12 日 00UTC 初期値からの予測時間 [hour]。赤が予測値、黒が対応する時刻の解析値での上端の気圧。

第5章 成果発表

5.1 学術論文

2022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。

- Higuchi, M., 2022: Operational Use of Shipborne GNSS-derived Precipitable Water Vapor in JMA's Mesoscale NWP System, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 1-07.
- Ikuta, Y., M. Sawada, and M. Satoh, 2022: Determining the impact of boundary layer schemes on the secondary circulation of Typhoon Faxai using radar observations in the gray zone, *Journal of the Atmospheric Sciences*, printing.
- Ishida, J., K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi, Y. Kitamura, and C. Muroi, 2022: ASUCA: The JMA Operational Non-hydrostatic Model, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 825-846, doi:10.2151/jmsj.2022-043.
- Ishijima, K., K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Y. Tanaka, T. Maki, T. Nakamura, Y. Niwa, and S. Hirao, 2022: Understanding Temporal Variations of Atmospheric Radon-222 around Japan Using Model Simulations, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 343-359, doi:10.2151/jmsj.2022-017.
- Kajino, M., A. Kamada, N. Tanji, M. Kuramochi, M. Deushi, and T. Maki, 2022: Quantitative influences of interannual variations in meteorological factors on surface ozone concentration in the hot summer of 2018 in Japan, *Atmospheric Environment*, **16**, doi:10.1016/j.aeaoa.2022.100191.
- Kanehama, T., I. Sandu, A. Beljaars, A. van Niekerk, N. Wedi, S. Boussetta, S. Lang, S. Johnson, and L. Magnusson, 2022: Evaluation and optimization of orographic drag in the IFS, *ECMWF Technical Memorandum*, **893**, doi:10.21957/fps6gngqe.
- Kanehama, T., T. Takakura, H. Sugimoto, S. Urakawa, K. Sakamoto and H. Nakano, 2022: Optimization of Meteorological Research Institute Community Ocean Model for Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 3 and beyond, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 3-03.
- Kondo, M., S. Sitch, P. Ciais, F. Achard, E. Kato, J. Pongratz, R. A. Houghton, J. G. Canadell, P. K. Patra, P. Friedlingstein, W. Li, P. Anthoni, A. Arneeth, F. Chevallier, R. Ganzenmüller, A. Harper, A. K. Jain, C. Koven, S. Lienert, D. Lombardozzi, T. Maki, J. E. M. S. Nabel, T. Nakamura, Y. Niwa, P. Peylin, B. Poulter, T. A. M. Pugh, C. Rödenbeck, T. Saeki, B. Stocker, N. Viovy, A. Wiltshire, and S. Zaehle, 2022: Are Land-Use Change Emissions in Southeast Asia Decreasing or Increasing?, *Global Biogeochemical Cycles*, **36**, doi:10.1029/2020GB006909.
- Kotsuki, S, T. Miyoshi, K. Kondo and R. Potthast, 2022: A local particle filter and its Gaussian mixture extension implemented with minor modifications to the LETKF, *Geoscientific Model Development*, **15**, 83258348.
- Kubo, Y. and K. Ochi, 2022: Verification of JMA/MRI-CPS3 and JMA Global Ensemble Prediction System in the sub-seasonal time range, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 10-19.
- Kudo, A., 2022: Statistical Post-Processing for Gridded Temperature Prediction Using EncoderDecoder-Based Deep Convolutional Neural Networks, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 219-232, doi:10.2151/jmsj.2022-011.
- Maki, T., T. Y. Tanaka, T. Koshiro, A. Shimizu, T. T. Sekiyama, M. Kajino, Y. Kurosaki, T. Okuro, and N. Oshima, 2022: Changes in Dust Emissions in the Gobi Desert due to Global Warming Using MRI-ESM2.0, *SOLA*, **18**, 218-224, doi:10.2151/sola.2022-035.
- Matsukawa, C., Y. Kuroki, and T. Kanehama, 2022: Optimization of orographic drag parametrizations in the JMA operational global model using COORDE type experiments, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 4-07.
- Nakamura, Y., 2022: Implementation of New Bias Correction Method for Aircraft Temperature with Kalman Filter in JMA's Global NWP System, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 1-09.

- Nonaka, K., 2022: Operational Use of GOES-17 Atmospheric Motion Vectors (AMVs) in JMA's Global NWP System, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 1-11.
- Reid, J. S., A. Gumber, J. Zhang, R. E. Holz, J. I. Rubin, P. Xian, A. Smirnov, T. F. Eck, N. T. O'Neill, R. C. Levy, E. A. Reid, P. R. Colarco, A. Benedetti, and T. Tanaka, 2022: A Coupled Evaluation of Operational MODIS and Model Aerosol Products for Maritime Environments Using Sun Photometry: Evaluation of the Fine and Coarse Mode, *Remote Sensing*, **14(13)**, doi:10.3390/rs14132978.
- Sakuragi, T., 2022: JMA's Wave Ensemble System and Related Development, *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **24**.
- Sawada, M., Y. Kitamura, K. Matsubayashi, H. Kusabiraki, S. Nishimoto, T. Aikawa, Y. Yamasaki, 2022: Extending Forecast Range and Introducing Ocean Mixed Layer Model to JMA's Mesoscale NWP system, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 5-07.
- Sawada, M., Y. Kitamura, K. Matsubayashi, H. Kusabiraki, S. Nishimoto, T. Aikawa, and Y. Yamasaki, 2022: Extending Forecast Range and Introducing an Ocean Mixed Layer Model in JMA's Mesoscale NWP system, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 5-07.
- Sekiguchi, R., Y. Ichikawa, K. Ochi, and T. Takakura, 2022: Hindcast verification of JMA's GEPS for one-month prediction, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 6-03.
- Shimizu, H. and M. Kazumori, 2022: Addition of microwave humidity sounder radiance data to all-sky assimilation in the JMA global NWP system, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 1-17.
- Takakura, T., K. Ochi, Y. Adachi, and T. Komori, 2022: Assessing the feasibility for Atmosphere-Ocean Coupling of JMA's Global Ensemble Prediction System *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 6-05.
- Tanaka, H. L., H. Nakamichi, K. Kondo, S. Akami and M. Iguchi, 2022: Applying the Particle Filter to the Volcanic Ash Tracking PUFF Model for Assimilating Multi-Parameter Radar Observation, *Journal of Disaster Research*, **17**, 791-804, doi:10.20965/jdr.2022.p0791.
- Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase, Early Online Release: Ensemble Experiments for a Maritime Meso- β -scale Vortex that Spawned Tornado-Like Vortices Causing Shipwrecks, *Journal of the Meteorological Society of Japan*.
- Yamaguchi, H., Y. Adachi, S. Hirahara, Y. Ichikawa, T. Iwahira, Y. Kuroki, C. Matsukawa, R. Nagasawa, K. Ochi, R. Sekiguchi, T. Takakura, M. Ujiie, and H. Yonehara, 2022: Upgrade of JMA's Global Ensemble Prediction System, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 6-09.
- Yokota, S., T. Banno, M. Oigawa, G. Akimoto, K. Kawano, and Y. Ikuta, 2022: Implementation of hybrid 3DVar in JMA's local analysis, *Research activities in Earth system modelling. WGNE Report*, **52**, 1-19.
- 藤井陽介, 吉田拓馬, 久保勇太郎, 2022: 変分法データ同化システムにおける BFGS 公式を利用したアンサンブルメンバー生成について, *統計数理*, **70**.

5.2 国際会合

2022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。会議名に続いて、(開催日時、開催場所/開催形式、参加者、発表した場合は題目、発表形式)の順になっている。なお、数値予報開発センター職員以外の参加者はここに掲載していないのでご留意いただきたい。

- 季節内から季節予測 (S2S) プロジェクト技術委員会第4回 (1月25日 オンライン)
 - － 久保勇太郎
- 電波干渉 (RFI) ワークショップ 2022 (2月14 - 18日 オンライン)
 - － 村田英彦「Use of satellite microwave observations in JMA global NWP system and some evidences of RFI in AMSR2 observation」(2月16日 口頭)
- WMO インフラ委員会情報管理・技術常設委員会 (INFCOM/SC-IMT) 運用・監視専門家チーム (ET-OM)WIS モニタリングタスクチーム (TT-WIS Monitoring) および統合全球観測システム (WIGOS) データ品質モニタリングタスクチーム (TT-WDQMS) チーム合同会議 (2月15日, 3月15日 オンライン)
 - － 太田行哉
- WMO WIGOS TT-WDQMS 会合 (5月31日, 9月27日, 11月29日 オンライン)
 - － 太田行哉
- 国際地表面作業部会会合第4回 (IESWG-4) (4月5 - 6日 オンライン)
 - － 近藤圭一「Impact of microwave radiance assimilation over land using dynamic emissivity in the global NWP system of JMA」(4月6日 口頭)
- 国際海上風科学チーム (IOVWST) 会合 2022 (4月12, 19, 26日, 5月3日 オンライン)
 - － 井岡佑介「Recent Update on Operational Use of Scatterometer Winds in JMA's Mesoscale NWP System」(4月26日 口頭)
- 衛星からの温室効果ガス観測に関する国際ワークショップ第18回 IWGGMS-18 (7月12 - 14日 オンライン)
 - － 中村貴 (共著)「Comparison of GOSAT-2 XCO₂ and an independent inversion analysis」(7月12 - 14日 ポスター)
- 全球大気システム研究委員会ミーティング第3回 (7月27 - 29日 米国/モントレール)
 - － 沢田雅洋「Impact of a two-moment bulk microphysics scheme on precipitation forecast in the JMA regional model」(7月27 - 28日 ポスター)
- 数値天気予報 (NWP) データとプロダクトの要件に関する全球データ処理・予測システム (GDPPS) シンポジウム (8月29 - 31日 スイス/ジュネーブ)
 - － 大井川正憲
- WMO 現業季節予測システム専門家チーム (ET-OCPS) 会合 (9月19, 23日 ポルトガル/リスボン)
 - － 小森拓也
- 現業季節予測ワークショップ第3回 (OCP-3) (9月20 - 22日, ポルトガル/リスボン)
 - － 小森拓也
- 欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT) 気象衛星会議 2022 (9月19 - 23日 ベルギー/ブリュッセル)
 - － 近藤圭一「Impact of microwave radiance assimilation over land using dynamic emissivity in the global NWP system of JMA」(9月20日 ポスター/9月21日 口頭)
 - － 清水宏幸「Assimilation of hyperspectral infrared sounder radiances in the JMA's meso-scale NWP system」(9月20日 ポスター)
- 欧州領域モデリング会合第44回及び短期数値予報会合第29回 (9月26 - 29日 ベルギー/ブリュッセル)
 - － 北村祐二「Development of Limited-Area NWP Systems at JMA」(9月26日 ポスター)
- WMO 全球大気監視 (GAW) モデル応用科学諮問部会 (SAG-APPS) 年次会合 (9月27 - 29日 スイス/ジュネーブ オンライン併用)
 - － 田中泰宙 (オンライン)
- ESCAP/WMO 台風委員会気象作業部会 (WGM) 会合第5回 (10月13日 オンライン)
 - － 菅野淳平 (口頭)・檜垣将和・長谷川寛・福浦崇史「AOP5: Storm Surge Watch Scheme」

¹ 略号については付録を参照。

- エーロゾル予測に関する国際協調 (ICAP) 会合第 12 回 (10 月 18 - 21 日 米国/モンタレー オンライン併用)
 - 田中泰宙 (オンライン)
- WMO 観測・インフラ/情報システム委員会 (INFCOM) 会合第 2 回 (10 月 24 - 28 日 スイス/ジュネーブ)
 - 佐藤芳昭
- WGNE 気象及び気候予測モデルの系統誤差ワークショップ第 6 回 (10 月 31 日 - 11 月 4 日 英国/レディング オンライン併用)
 - 米原仁「Recent activities for reducing the systematic errors derived from the parameterizations in the JMA operational global model」(11 月 3 日 ポスター オンライン)
 - 高倉寿成「Assessing the feasibility for Atmosphere-Ocean Coupling of JMA's Global Ensemble Prediction System」(10 月 31 日 ポスター)
 - 須藤康平「Offline verification of the land surface model in the JMA operational global model」(11 月 3 日 ポスター オンライン)
- 海面高度科学チーム (OSTST)2022 年会合 (10 月 31 日 - 11 月 4 日 イタリア/ベニス)
 - 浅井博明「A new operational ocean data assimilation and forecasting system of the Japan Meteorological Agency」(11 月 3 日 ポスター)
- 数値実験作業部会 (WGNE) 会合第 36 回 (11 月 8 - 10 日 米国/ボルダー オンライン併用)
 - 氏家将志「WGNE inter-comparison of Tropical Cyclone Track forecast 2021」(11 月 8 日 口頭 オンライン)
- アジア・オセアニア気象衛星利用者会議 (AMOSUC-12) 第 12 回 (11 月 15 - 17 日 オンライン)
 - 近藤圭一「Impact of microwave radiance assimilation over land using dynamic emissivity in the global NWP system of JMA」(11 月 17 日 口頭)
 - 清水宏幸「Assimilation of hyperspectral infrared sounder radiances in the JMA's meso-scale NWP system」(11 月 17 日 口頭)
 - 草野直人「Impact of clear-sky radiances at CO2 band in the JMA's global data assimilation system」(11 月 17 日 口頭)
- Joint Workshop of the OS-Eval TT and CP-TT and SynObs Kick-Off (11 月 15 - 18 日 つくば オンライン併用)
 - 吉田拓馬「Ocean Initialization of the Coupled Prediction System Version 3 (CPS3) for Seasonal Forecasts」(11 月 15 日 口頭)
- WMO 第 2 地区協会管理部会会合 (11 月 28 - 29 日 UAE/アブダビ オンライン併用)
 - 佐藤芳昭「Report of RA II WG-I (Working Group on Observation, Infrastructure and Information Systems)」(11 月 28 日 口頭)
- 米国地球物理学連合 (AGU) 秋季会合 (12 月 12 - 16 日 米国/シカゴ)
 - 吉田拓馬「A New Operational Ocean-Sea Ice Coupled Analysis System with Four-Dimensional Variational Method (MOVE-G3)」(12 月 16 日 ポスター)

5.3 国内会合

2022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。

- データ同化ワークショップ第12回(2月17日 オンライン)
 - － 清水宏幸「気象庁全球解析におけるマイクロ波輝度温度データの全天同化とアウトグループについて」(口頭)
- GPM および衛星シミュレータ合同研究集会(3月3-4日 オンライン)
 - － 清水宏幸「気象庁メソ数値予報システムにおけるマイクロ波輝度温度データの全天同化に向けた調査」(3月3日 口頭)
- 先端的モデリングと超高解像度シミュレーション研究会(3月9日 オンライン併用)
 - － 渡邊賢「気象庁非静力学予報モデル(asuca)の富岳での高速化チューニング」(口頭)
- 日本気象学会春季大会(5月17-21日 オンライン)
 - － 畔野貴弘「気象庁局地解析へのハイブリッド同化手法の導入に向けた開発」(5月17日 口頭)
 - － 樋口真悠子「気象庁メソ数値解析予報システムでの船舶GNSS可降水量の現業利用」(5月17日 口頭)
 - － 北村祐二「2022年の気象庁メソモデル更新の概要」(5月20日 口頭)
 - － 金浜貴史「気象庁全球モデルにおける地形効果表現の改良に向けて」(5月20日 口頭)
- 日本海洋学会秋季大会(9月3-7日 通常/オンライン併用)
 - － 今泉孝男「海面高度データ追加と外力変更による解析インパクト実験」(9月6日 口頭)
- 日本気象学会秋季大会(10月24-27日 通常/オンライン併用)
 - － 林田和太「GPUによる気象庁全球モデルの高速化に向けて:雲・積雲過程」(10月24日 口頭)
 - － 清水 宏幸「気象庁メソ数値予報システムにおける AMSR3 輝度温度データの全天同化に向けた開発」(10月24日 口頭)
 - － 田中泰宙・中村貴(共著)「民間航空機観測により捉えられた米国西部森林火災由来CO₂変動」(10月26日 口頭)
 - － 中村貴(共著)「現地観測と衛星観測データによる炭素収支解析」(10月26日 口頭)
 - － 近藤圭一「気象庁全球数値予報システムにおけるFSOIを用いた観測データのインパクト」(10月26日 口頭)
 - － 近藤圭一(共著)「データ同化のハイパーパラメータの動的推定によるシステムの安定化」(10月26日 口頭)
- 大気化学討論会第27回(11月16-18日 通常/オンライン併用)
 - － 鎌田茜(共著)「2018年猛暑月の地上オゾンへの気象要素の年々変動の影響」(11月17日 口頭)
- 非静力学モデルに関するワークショップ第24回(12月19-20日 通常/オンライン併用)
 - － 山崎行浩*・草開浩「気象庁非静力学モデル asuca における地形性乱流による形状抵抗(TOFD)導入」(12月19日 口頭)
 - － 奥川椋介*・沢田雅洋・草開浩・西本秀祐「気象庁局地モデル(LFM)における新しい雲物理過程の導入」(12月19日 口頭)
 - － 川田英幸「気象庁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に向けた開発」(12月19日 口頭)
- 気象庁数値モデル研究会³⁾第14回(12月12日 通常/オンライン併用)
 - － 太田行哉「現業数値予報システムによる進路予測の現状と誤差の分析」(口頭)
 - － 氏家将志「気象庁全球数値予報システムの台風進路予測改善に向けた取り組み」(口頭)

¹⁾ 共著の場合、発表者には*をつけている。また、数値予報開発センターの職員以外の発表者は掲載していない。

²⁾ 開催期間が1日の場合、発表日は省略している。

³⁾ 当センター主催。 <http://pfi.kishou.go.jp/modelkenkyukai2022.html>

5.4 数値予報課コロキウム

表 5.4.1: 2022 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 20 日	藤兼典史	統合型風ガイダンス (格子形式) の開発について
1 月 21 日	草開浩・メソモデルチーム・メソ同化 EPS チーム	メソ数値予報システムの更新 (業務化試験 ¹ 報告)
1 月 21 日	横田祥・メソ同化 EPS チーム・メソモデルチーム	局地数値予報システムの更新 (業務化試験報告)
1 月 25 日	石井恭介	メソ解析における GPM/DPR の Ka レーダー利用 (性能評価試験報告)
1 月 27 日	齊藤慧	気象庁全球モデル GSM における Tiedtke 雲スキームの開発 (開発進捗報告)
2 月 3 日	氏家将志・米原仁	気象庁全球モデル (GSM) の物理過程開発状況について (積雲、海面過程)
2 月 4 日	草野直人	全球解析・メソ解析および局地解析における放射伝達モデル RTTOV-13 の導入
2 月 9 日	福浦崇史・長谷川寛・菅野淳平・檜垣将和	日本域高潮アンサンブルの開発 (中間報告その 2)
2 月 10 日	鎌田茜	高解像度版領域化学輸送モデルへのデータ同化導入 (業務化試験報告)
2 月 14 日	白山洋平・笹子貴昭・高田伸一	MSM22XX に向けたガイダンスの改良について
2 月 17 日	野中健一・草野直人	全球解析における観測データ利用手法の改良 (総合性能評価試験報告)
2 月 17 日	草野直人・石井恭介・笠井彩	メソ解析における観測データ利用手法の改良 (総合性能評価試験報告)
2 月 22 日	長谷川寛・菅野淳平・福浦崇史・檜垣将和	新しいアジア域高潮モデル (中間報告)
2 月 24 日	近藤圭一 (数値予報課)・石橋俊之 (気象研究所)	全球解析における FSOI についての開発進捗報告
3 月 14 日	松川知紘	気象庁全球モデル (GSM) における非地形性重力波過程の射出フラックスと安定時の鉛直拡散係数の改良に向けた開発進捗報告
3 月 14 日	樋口真悠子	冬季におけるメソ解析での船舶 GNSS 利用に関する性能評価試験報告
4 月 14 日	白山洋平・飯塚義浩	大雨発生確率ガイダンス及び線状降水帯発生確度ガイダンスの現業化
5 月 17 日	草野直人・石井恭介 (数値予報課)・笠井彩 (情報利用推進課)	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)
5 月 17 日	清水宏幸・草野直人 (数値予報課)・笠井彩 (情報利用推進課)	局地解析における観測データ利用手法の改良 (総合性能評価試験報告)
5 月 19 日	山下翔大	統合型降水ガイダンス (確率情報) の開発について
5 月 19 日	工藤淳	第一期 Python 化ガイダンスのルーチン化に向けた実行試験の実施状況

¹ 「性能評価試験」は基礎開発の効果を確認するための試験である。他の開発項目とのマージして行う試験を「総合性能評価試験」という。「業務化試験」は現業システムと同じ仕様で評価期間を延長して行う試験である。(https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/63/chapter1.pdf)

開催日	発表者	発表表題
5月20日	野中健一・草野直人	全球解析における観測データ利用手法の改良 (Dual-Metop AMV の新規利用・放射伝達モデル RTTOV の更新) の業務化試験報告
5月20日	安藤慧	全球解析における Meteosat CSR の ASR 内包 CSR への利用切り替え
5月24日	福浦崇史・菅野淳平・長谷川寛・檜垣将和	日本域高潮モデルの変更と日本域高潮アンサンブルの導入 (業務化試験報告)
5月24日	菅野淳平・福浦崇史・長谷川寛・檜垣将和	新アジア域高潮モデル業務化試験報告
6月9日	金浜貴史・氏家将志・米原仁	気象庁全球モデルの標高オリジナルデータセット更新
6月17日	清水宏幸・草野直人 (数値予報課)・笠井彩 (情報利用推進課)	局地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)
7月7日	大和田浩美 (気象衛星課)	静止気象衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダの効果
7月14日	清水宏幸	全球・メソ・局地解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダの利用手法改良
7月19日	今泉孝男	海洋データ同化システムにおける海面高度データ利用に関する基礎調査
7月21日	川口真司・米原仁	気象庁全球モデルにおける高解像度海面水温解析値の利用可能性に関する調査
8月5日	草野直人	全球解析における放射伝達モデル RTTOV-13 の放射伝達計算用係数等の更新
8月23日	安藤慧	全球解析における Meteosat CSR の ASR に内包された CSR への利用切り替えの改良
8月29日	渡口棕	メソ解析・局地解析におけるアメダス湿度利用 (性能評価試験報告)
8月31日	樋口真悠子	メソ解析における船舶 GNSS 品質管理処理改良について (開発経過報告)
9月6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)
9月6日	樋口真悠子	局地解析における船舶 GNSS 新規利用について (性能評価試験報告)
9月8日	山崎行浩・草開浩	局地モデルにおける地形性乱流による形状抵抗 (TOFD) 導入について
9月20日	井岡佑介	局地解析におけるマイクロ波散乱計海上風の新規利用について
9月22日	石井恭介	釧路・種子島・室戸岬・大阪 DRAW のレーダー利用再開 (性能評価試験報告)
9月26日	米原仁・太田洋一郎・清水宏幸・野中健一	気象庁全球モデルの水平高解像度化と物理過程改良・全球解析における積雪深解析の改良および観測データ利用の改良の性能評価試験報告
9月28日	櫻木智明・近澤昌寿・中村貴・小林熙・檜垣将和	全球波浪モデル高解像度化に向けた開発 中間報告
9月29日	奥川棕介・沢田雅洋・草開浩・西本秀祐	局地モデルにおける雲物理過程の更新
10月6日	草開浩・メソモデルチーム	局地数値予報システムの更新
10月6日	草開浩・河野耕平・畔野貴弘	メソ解析における新しい全球積雪深解析の利用について
10月13日	樋口真悠子・清水宏幸・渡口棕・草開浩	メソ解析における観測データ利用手法の改良 (総合性能評価試験報告)

開催日	発表者	発表表題
10月13日	Mike Fiorino (George Mason University and the University of Colorado)	ERA5 Tropical Cyclone Forecasts 1979-2021
10月19日	渡口棕・清水宏幸・井岡佑介・樋口真悠子	局地モデルの物理過程更新および局地解析における観測データ利用手法の改良 (総合性能評価試験報告)
10月20日	川田英幸・欠畑賢之・河野耕平・大井川正憲	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 (性能評価試験報告)
10月25日	鎌田茜・山口春季 (数値予報課)・梶野瑞王 (気象研究所)	高解像度版領域化学輸送モデルの領域拡張 (業務化試験報告)
11月9日	高田伸一	統合型降雪量ガイダンス (地点形式) の開発について
11月10日	松川知紘	数値予報モデル開発における機械学習利用に向けた調査: 気象庁全球モデル (GSM) の非地形性重力波過程のエミュレーション
11月17日	高倉寿成・中村貴	全球化学輸送モデルの同化利用衛星切替 (業務化試験報告)
11月21日	安藤慧・野中健一	全球・メソ・局地解析におけるひまわり8号からひまわり9号への観測データ利用の切り替えについて
11月22日	櫻木智明・近澤昌寿・中村貴・小林熙・檜垣将和	全球波浪モデル高解像度化業務化試験報告
11月24日	工藤淳・白山洋平・山下翔大・草野直人・吉田拓馬 (数値予報課)・橋詰克也 (航空予報室)・渋谷和孝 (気象測器検定試験センター)	次世代 AI 基礎研修実施報告
12月1日	澤田洋平 (東京大学大学院 工学系研究科 附属総合研究機構)	不確実性定量化が加速する極端気象確率予測と新しい気象モデリング
12月14日	米原 仁・井藤 智史・小泉 耕・太田 洋一郎・清水 宏幸・野中健一・千葉 丈太郎	気象庁全球モデルの水平高解像度化と物理過程改良・全球解析における積雪深解析の改良および観測データ利用の改良の業務化試験報告
12月15日	工藤淳・藤兼典史・井上卓也・山下翔大・白山洋平	統合型ガイダンス (仮称) のルーチン化に向けた開発状況
12月16日	樋口真悠子・清水宏幸・渡口棕・草開浩・井藤智史	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16日	川田英幸・欠畑賢之・河野耕平・大井川正憲・井藤智史	メソアンサンブル予報システムの改良 (業務化試験報告)
12月19日	渡口棕・樋口真悠子・井岡佑介・清水宏幸・メソモデルチーム・井藤智史	局地モデルの物理過程更新および局地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)

第6章 連携・共同研究

6.1 気象研究所との開発連携

2022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。

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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
6. 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

7. 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

8. 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

9. 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

10. 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

11. 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

12. 海況監視予測システムの予測精度向上

- (a) 内容 現業 JPN システムの安定運用のためのモデル改善・更新の助言・支援

連携先 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

- (b) 内容 JPN 海水予測の改善に向けたシステム改良への支援

連携先 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

- (c) 内容 次世代海況監視予測システムに向けた同化スキームの研究開発

連携先 全球大気海洋研究部第五研究室

- (d) 内容 海洋モデルの更なる高速化・精緻化のための研究開発

連携先 全球大気海洋研究部第四研究室

13. 大気化学モデルおよび観測データ利用の高度化

- (a) 大気化学モデルおよび観測データ利用の高度化

内容 大気化学に関する現業システムの維持管理や安定運用に係る取組への協力

連携先 全球大気海洋研究部第一・第三研究室, 気候・環境研究部第三研究室

6.2 気象衛星センターとの共同研究

1. 大気追跡風の精度向上へ向けての調査

- (a) 内容 ひまわり 8号とひまわり 9号の大気追跡風の実験比較、及び高度推定の精度向上に向けた取り組み

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 (2022 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
台風進路に関わる「藤原効果」の再考	科研費基盤研究 (B)	2018-2022	琉球大学 気象研究所	研究協力者： 氏家将志 沢田雅洋
最先端の地上大気観測とデータ同化で、線状降水帯の予測精度はどこまで向上するのか？	科研費基盤研究 (B)	2019-2022	気象研究所	研究協力者： 横田祥
新世代衛星観測の同化がもたらす、台風と大気上層場との相互作用メカニズムの解明	科研費基盤研究 (B)	2019-2022	気象研究所	研究協力者： 近藤圭一
防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測	「富岳」成果創出加速プログラム	2020-2022	東京大学 気象研究所 海洋研究開発機構 気象業務支援センター 理化学研究所 国立環境研究所 東京工業大学	連携参加者： 佐藤芳昭 氏家将志 米原仁 沢田雅洋 黒木志洸 田中泰宙 小森拓也
気候変動に伴う黄砂の発生・輸送に関する変動予測とその検出手法に関する研究	環境研究総合推進費	2020-2022	国立環境研究所 気象研究所 東京大学 鳥取大学	研究協力者： 鎌田茜
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	2020-2022	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
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	京都大学	2021-2022	京都大学	研究参加者： 佐藤芳昭 計盛正博 門脇隆志 氏家将志
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
高解像度・大アンサンブルシミュレーションを用いた線状降水帯に寄与する環境場の解明	科研費基盤研究 (C)	2021-2023	気象研究所	研究協力者： 横田祥
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

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
アジアモンスーンの数值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	2022	東京大学	研究協力者: 氏家将志 米原仁 金浜貴史 木南哲平 齊藤慧 黒木志洸 林田和大 須藤康平
対流圏ジェットの季節予測可能性に対する対流圏成層圏結合と中緯度海洋前線帯の役割	科研費新学術領域研究	2022-2023	気象研究所	研究協力者: 小森拓也
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
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	宇宙航空研究開発機構	研究代表者: 計盛正博 研究協力者: 村田英彦 近藤圭一 亀川訓男 清水宏幸 草野直人 安藤慧
高精度予測モデルの開発と効率的な人為制御法のメカニズム解析	ムーンショット型研究開発事業	2022-2026	東京大学 気象研究所 宇宙航空研究開発機構 京都大学 東北大学 東京海洋大学	共同研究者: 沢田雅洋

6.4 数値予報資料共有 Web の改良

6.4.1 はじめに

数値予報課では、気象分野の大学・研究機関との連携をより一層強化するための方策の一つとして、数値予報結果の妥当性を日々確認する現業作業で用いている数値予報モニタ図（以下、現業モニタ）と、おおむね同様の資料について、大学・研究機関と共有するための環境「数値予報資料共有 Web¹」を、令和3年3月29日から運用している（福山ほか 2021）。

数値予報資料共有 Web の利用者は、気象分野の大学・研究機関の研究者と定めており、以下の三項目を目的として、運用を行っている。

- 気象分野の大学・研究機関等との連携の推進
- 顕著現象発生時の振り返りによる、発生要因等の迅速かつ円滑な情報交換・認識共有
- 本サービスで提供するコンテンツを通じ研究者が得た知見の、気象庁の数値予報への還元

数値予報資料共有 Web では、予報初期時刻からおよそ 15 時間後に数値予報資料を表示できる閲覧システムを整備している。また、顕著現象が発生した際には、発生要因等の情報交換・認識の共有を行えるよう、Redmine 環境による情報交換システムも併せて整備し、承認されたユーザであれば、誰でもフォーラム等へ投稿できるようになっている。

この他、利用者は本サービスで提供するコンテンツを利用した研究成果の発表等を行う場合、気象庁へその発表資料の事前共有を行うものとして利用規約に定めている（気象庁 2022c）。

以上により、研究者側と気象庁側で可能な限り同じ図を共有して振り返り・議論を行うことで、顕著現象の発生要因等の迅速かつ円滑な情報交換・認識共有が期待できるとともに、研究者が得た知見の気象庁数値予報システムへの還元も期待できる（福山ほか 2021）。

6.4.2 閲覧システムの機能強化

令和4年の取組として、以下のとおり閲覧システムの機能強化を行った。

(1) 数値予報動的モニタ図の提供開始

従来の閲覧システムでは、表示領域が固定された数値予報静的モニタ図（以下、静的モニタ）を提供していたが、令和4年の出水期に合わせ、新たに6月1日から領域の拡大・縮小等により任意領域の表示が可能な数値予報動的モニタ図（以下、動的モニタ）の提供を開始した。

以前から提供を行っていた静的モニタでは気象庁が事前に設定したプリセット領域の画像表示を行っていた。例えば GSM であればヨーロッパ、オセアニアといった海外の領域や、北海道、東日本といった国内の

領域を提供していたが、いずれも固定された領域と限定的な要素が対象であり、利用者側が任意の領域・要素を指定して、動的に画像を表示させるインタラクティブな利用はできなかった。

顕著現象発生時の現象の把握には、対象となるシステムに着目し、必要に応じて領域の拡大・縮小を行い、総観規模の現象把握や詳細スケールでの調査等を実施できることが望ましい。

インタラクティブな閲覧環境には、事前に様々な縮尺の画像をタイル状に生成しておくタイル法と、ユーザのリクエストに応じて動的に画像を生成する動的生成法がある。タイル法は事前に作成した画像を表示するため、サーバ負荷が小さく膨大なトラフィックに耐えうる反面、多数の縮尺に対応した画像を保存する必要があり、過去データや複数の要素を表示させる場合、ストレージの圧迫が課題となる。動的生成法の場合は、生成元データを保存するだけでよく、ストレージの節約が可能な反面、画像生成にサーバの負荷がかかるため、膨大なトラフィックへの対応は難しい。数値予報資料共有 Web の閲覧システムは、顕著現象発生時の振り返りを念頭に置いており、複数の要素を過去データも含めて表示する必要はあるが、利用者は大学・研究機関等に限られるため、動的生成法が適している。

動的生成法によるインタラクティブな閲覧環境を提供する際には、高速な画像生成レスポンスが求められる。ユーザビリティにおける応答速度の影響は古くから調査されており、ユーザの行動がページに瞬間的に反映されたと感じさせるためには 100 ミリ秒以下、作業中のユーザの思考を邪魔しないためには 1 秒以下の応答が必要とされている（Nielsen 1993）。

こうした高いレスポンスによる画像生成を目的として、気象庁では高速な画像作成が可能な描画ツール TAG を開発している（雁津 2017）。既に気象庁の数値予報現業では、TAG を利用した任意の領域・要素を表示可能な現業モニタが運用されている実績がある。静的モニタでは、現業モニタが生成した画像を公開する方式で実装を行ったが、今回の動的モニタの提供では、現業モニタそのものを移植する形で対応を行った。

提供を開始した動的モニタの表示例を図 6.4.1 に示す。静的モニタと同様に、一つの画面上に 6 枚の予測画像を表示する仕様としており、任意の領域・要素を表示できるようになっている。断面図の表示なども可能になっている。

(2) 表示要素の拡充

動的モニタでは、表示可能な要素の拡充を行った。動的モニタでの具体的な表示可能要素数を表 6.4.1 にまとめている。静的モニタでは、例えば GSM, MSM, LFM の各モデルの表示要素数は最大 6 要素であったが、現在はいずれも数十要素の表示が可能であり、大幅な拡充となっている。従来の静的モニタと同様に、モデル

¹ <https://nwp.kishou.go.jp/jmanwp/>

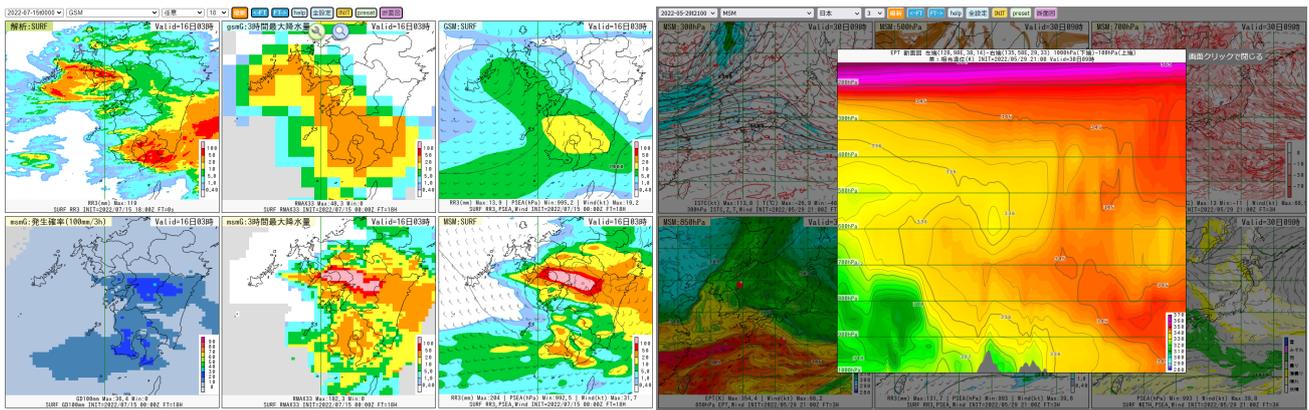


図 6.4.1 動的モニタの表示例。左図は、九州で発生した線状降水帯に着目し、GSM, MSM モデル及びガイダンスの予測結果並びに実況として解析雨量を表示している。右図では、別の事例で相当温位の断面図を表示させている。

の初期値差分の閲覧なども引き続き可能となっている。

表 6.4.1 動的モニタの表示要素数

表示対象	要素数
GSM	風・高度・気温など 45 要素
MSM	風・高度・気温など 46 要素
LFM	風・高度・気温など 39 要素
GSM ガイダンス	降水量ガイダンスなど 57 要素 (説明変数を含む)
MSM ガイダンス	降水量ガイダンスなど 62 要素 (説明変数を含む)
LFM ガイダンス	降水量ガイダンスなど 5 要素 (説明変数を含む)
解析	毎時大気解析気温など 9 要素

閲覧システムに対しては、「数値予報資料共有 Web について、降水だけでなく各種指標なども閲覧できると速やかな要因分析が可能となる。」等の要望が指摘されていた。要素の拡充にあたり、こういった要望も考慮し、最新の閲覧システムでは、降水量や相当温位等に加え、可降水量、SSI、CAPE、シアパラメータといった複数の不安定に関する指標も閲覧できるようになっている。また、令和 4 年 6 月 1 日に運用が開始された MSM 大雨発生確率ガイダンス (気象庁 2022b) も、動的モニタで閲覧できるようになっている。この他、数値予報結果の表示機能の拡充のみならず、実況との比較にも活用できるよう、解析雨量等の実況解析値も表示できるようにした。

6.4.3 今後の展望

今回導入した動的モニタにより、現象の把握を目的とした機能が、大幅に強化されることになった。利便性が飛躍的に向上した一方で、多数の要素を閲覧対象に加えているため、ストレージの逼迫が懸念されている。令和 5 年には全球予測システムの更新 (第 4.1 節, 第 3.8 節) に併せて、高解像度化 (気象庁 2022a) が予

定されており、描画に必要なデータサイズの大幅な増加が見込まれる。将来の安定的な環境提供のため、特に過去データについて、保存対象を限定するなどの対策をおこなう必要があると考えている。

また、情報交換システムでは、今年度から線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ委員を対象に、線状降水帯についての予測結果・実況資料等をスライド資料にとりまとめ、速報として投稿する取組も行っている。引き続き、大学・研究機関等の専門家との更なる連携強化を図るべく、円滑な意見交換を行える仕組みの構築や、数値予報格子点データ等を提供する方策についても検討を進めていく予定である。

参考文献

- 福山幸生, 石田純一, 久保勇太郎, 上田学, 原田正輝, 2021: 「数値予報資料共有 Web (仮称)」の構築. 日本気象学会 2021 年度春季大会予稿集, 311.
- 雁津克彦, 2017: 4.6 可視化ツール (3)-TAG. 数値予報課報告・別冊第 63 号, 気象庁予報部, 97-100.
- 気象庁, 2022a: 4.1 全球モデルの水平高解像度向上、物理過程改良に向けた開発. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 66-75.
- 気象庁, 2022b: 4.10 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, 2022c: 6.4 数値予報資料共有 Web. 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, 162-163.
- Nielsen, J., 1993: Usability Engineering, (5.5 Feed-Back). 1st ed. *Morgan Kaufmann*.

6.5 「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」

6.5.1 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一方、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、令和3年度より実施している。また、令和4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ている。

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。

6.5.2 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。その結果、MEPSよりも高い確率で大雨の可能性を捉えた事例を確認しており（図6.5.1）、高解像度のモデルを用いたEPSの有用性が示されている。また、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た実験システムにより、解像度2kmのままで、より多数のメンバー（100メンバー）のアンサンブル予報実験を行う調査も実施している。今後、メンバー数を21のままとして、モデルをより高解像度にする実験を実施し、これらの有効性の比較を行う計画である。

引き続き、様々な事例に対して様々なアンサンブル構成を試験することで、局地EPSの最適な構成等の知見を得ることを目指す。

6.5.3 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を予測時間を延長した場合、予測性能がどのようになるか、またどのような課題があるか見極める必要がある。

このような調査を行う観点から、2022年の6月から10月までの期間、00JST及び12JSTを初期値とした18時間予報をリアルタイムに実行した。予測領域は統計的に線上降水帯が発生しやすい西日本を中心とした1400km×1400kmの領域に限定した（図6.5.2）。

この実験では、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、より現象に近い強雨を予測した事例を多く確認した（例えば図6.5.3）。一方で、現実よりも過剰な予測事例も確認しており、今後、降水の形成に影響する雲物理過程等の各種過程の改良や、解像度に合わせた最適化等が必要である。

6.5.4 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。2022年10月現在のGSMの水平解像度は約20kmであり、台風中心部で発達する積乱雲などを正確に再

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7月17日文科科学省通知）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/senjokousuitai_WG/part1/part1-gijigaiyou.pdf

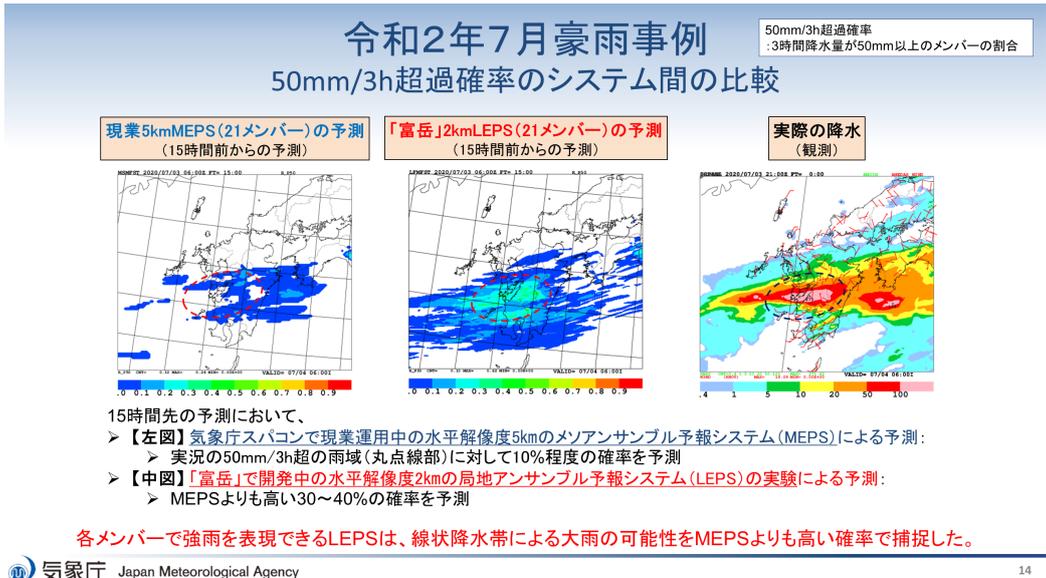


図 6.5.1 メソアンサンブル予報システム (MEPS) と局地アンサンブル予報システム (LEPS) の豪雨事例における大雨超過確率比較

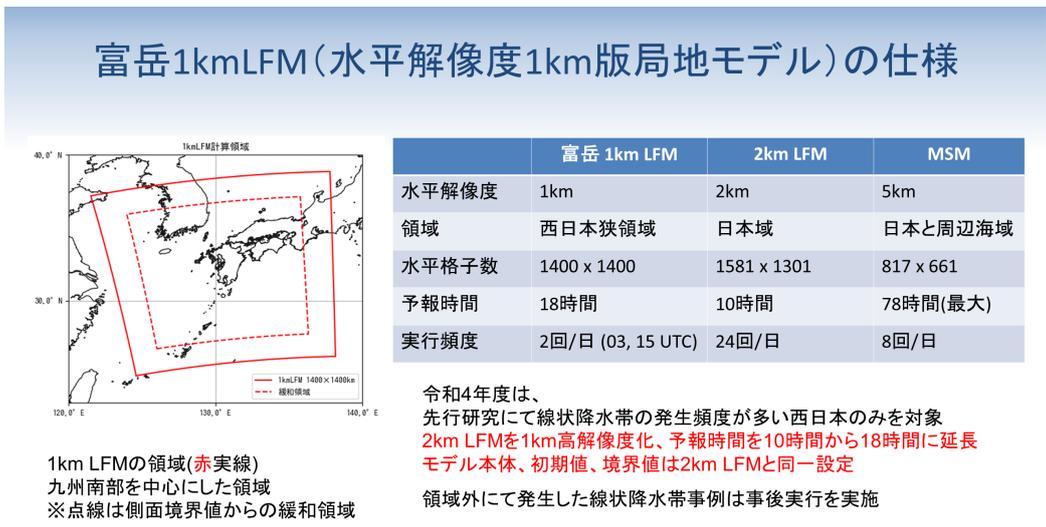


図 6.5.2 水平解像度 1km 版局地モデルの仕様

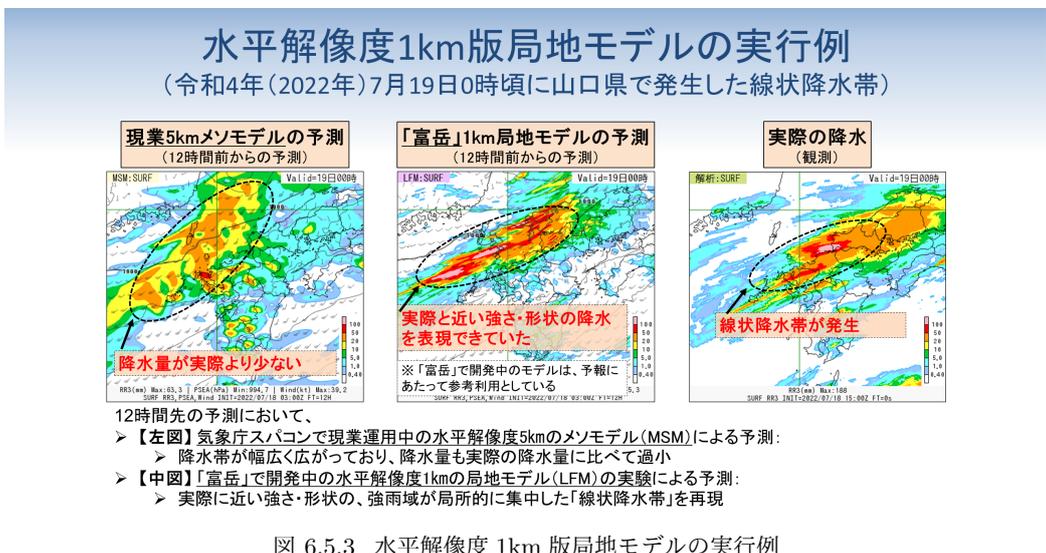


図 6.5.3 水平解像度 1km 版局地モデルの実行例

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。

2022 年 10 月までに、GSM の力学過程の速度調査を行うと共に、並列計算手法見直し、通信量削減等の高速化を実施したことにより、GSM で解像度 10km の予測実験の実施が可能となった。この予測実験の結果、高解像度化により台風の構造や前線付近での降水がより細かく再現される一方、台風中心付近での降水が過大傾向になる事例が見られた（図 6.5.4）。

今後は、更なる高解像度化やそれを気象庁のシステムで運用可能にするための高速化、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。

6.5.5 その他の活動

数値予報システムの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等研究者の技術や知見を取り込むことが重要である。これに関連して、第 6 回数値予報モデル懇談会では、学官連携をより推進するには大学等研究機関が容易に現業数値予報システムを利用できる環境を構築することが有効との意見があった³。

数値予報システムに対して何らかの改良を施す際には、事前に、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必要がある。このため気象庁では、このような実験を行うための開発基盤として、数値予報システムを模擬する「数値解析予報実験システム NAPEX(原 2017)」を整備、活用している。

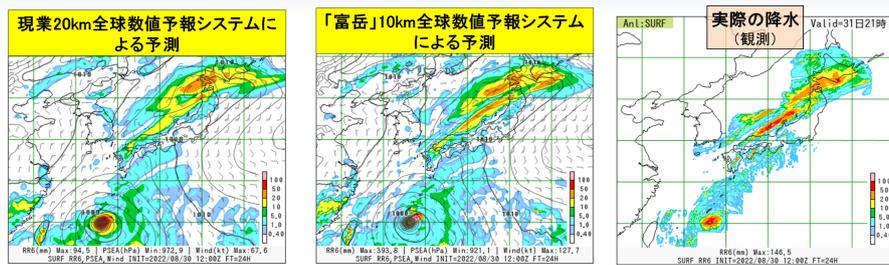
これらの背景を踏まえ、NAPEX に準じた実験システムを「富岳」に構築、大学等研究者とともに多様な観測データの利用手法改善等に取り組む開発基盤とすることを目指して作業を進めている。NAPEX は観測データの取得、品質管理、客観解析（データ同化）及び予報といった多数のジョブで構成される非常に複雑なシステムであり、利用習熟には知見の集約や継承が必要になる。このため、マニュアル作成についても同時に進めている。今後、本実験システムを活用し、大学等研究者の協力を得て、数値予報システム改良の加速化を図る計画である。

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.

³ https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi_model_kondankai/part6/part6-gijigaiyou.pdf

高解像度の全球数値予報モデルGSMの予測例 (令和4年台風第11号と北日本の前線による降水事例)



令和4年8月31日21時を対象とした24時間後の降水量[mm/6h]予測

図 6.5.4 高解像度の全球数値予報モデル GSM の予測例

第7章 受賞・研究交流

7.1 当センター主催会議等

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：2022年6月27日から29日、後期：2022年9月12日から15日。
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：11名、気象衛星センター：3名、他省庁：2名、大学：5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。

7.2 研究者来訪

氏名 Dr. Mike Fiorino (George Mason University and the University of Colorado)
内容 熱帯低気圧の予報特性に関する議論。2022年10月13日に、数値予報課コロキウムで講演「ERA5 Tropical Cyclone Forecasts 1979-2021」。

7.3 受賞

対象者 季節アンサンブル予報システム開発グループ
賞名 気象庁長官表彰
内容 「季節アンサンブル予報システムの開発」により季節予報やエルニーニョ現象予測の精度向上に貢献した功績。

7.4 学位取得

氏名 諸田雪江
学位 理学博士(名古屋大学から取得)
論文 Precipitation Core and Lightning Activity in an Isolated Convective Storm
(孤立積乱雲内の降水コアと雷活動)

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)
- 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)
- 世界気候研究計画 (WCRP)
 - － データ諮問会議 (WDAC)/再解析相互比較タスクチーム (TIRA) : 古林慎哉 (メンバー)
- 全球気候観測システム (GCOS)
 - － 気候のための大気観測パネル (AOPC) : 古林慎哉 (メンバー)
- 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 期委員 電子情報委員会副委員長：田中泰宙
 - － 日本気象学会第 41 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 41 期委員「天気」編集委員会委員：沢田雅洋
 - － 日本気象学会第 41 期委員国際学術交流委員会委員：太田芳文
 - － 日本気象学会第 41 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 41 期委員講演企画委員会委員：西本秀祐
 - － 日本気象学会 2022 年度春季大会実行委員会委員：中村貴
- 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ー委員会 AMSR 分科会」：計盛正博
 - － 「SGLI 分科会委員」「地球観測に関する科学アドバイザー委員会 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
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder	大気赤外サウンダ (Aqua 衛星に搭載)
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	エア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 (Suomi-NPP 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	BroydenFletcherGoldfarbShanno 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
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
CHAMP	CHALLENGING Mini-satellite Payload	ドイツ・米国の GNSS 掩蔽観測衛星
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
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

略語	原語	訳または意味
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
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
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-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
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans	大洋水深総図
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 Satel- lite	米国の静止気象衛星

略語	原語	訳または意味
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
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
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
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
ISRO	Indian Space Research Organisation	インド宇宙研究機関
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
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
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	気象研究所全球エアロゾル輸送モデル
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

略語	原語	訳または意味
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)
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 衛星に搭載)
MWRI	Micro-Wave Radiation Imager	中国の FY-3 シリーズに搭載されたマイクロ波イメージャ
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
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
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 COrrrection 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

略語	原語	訳または意味
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グ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
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
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
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
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
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)

略語	原語	訳または意味
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 Coordonné (フランス語)	協定世界時
VarBC	Variational Bias Correction	変分法バイアス補正
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