

数值予報開発センター一年報

(令和3年)

令和4年3月
March 2022

気象庁 数值予報開発センター

はじめに¹

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を網羅的にまとめて年度末に報告するもので、令和2年度より刊行が開始された。

数値予報課では、その前年の令和元年度まで、毎年テーマを決めて数値予報システムに関する報告を行う「数値予報課報告・別冊（以下、別冊）」を刊行してきた。別冊は、数値予報システムや観測データの利用、さらには開発基盤やガイダンス等の開発を詳細に報告していたことから、気象庁内外の数値予報モデル開発者や研究者にとって、貴重な技術資料として貢献してきた。しかしながら、毎年テーマを決めることにより、必ずしもその年に大きな進展のあった分野をタイミングよく報告することができない課題があった。このため、令和2年10月の数値予報開発センター発足を契機として、数値予報開発センターで実施した開発や関連活動を詳細かつ網羅的に報告できるよう年報形式に移行した。また、数値予報開発センターは、これまで予報時間や予測対象で庁内各部署に分かれていた数値予報の開発を一体化して発足したことから、本年報では別冊で扱わなかった海洋モデルや化学輸送モデルについても取り扱っている。

令和3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、これらの結果を利用したガイダンス、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、長期再解析を含む気候データ同化システム、波浪・高潮モデル及び海況監視予測システム、黄砂・紫外線・大気汚染に関する予測システム及び二酸化炭素解析システムといった多様なシステムの開発計画や開発成果、開発進捗について報告している。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。専門家のみならずにおかれては、数値予報開発センターにおける活動について、本年報を通してご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ご検討いただきたく、よろしくお願いしたい。

また、数値予報課では「数値予報解説資料集（以下、解説資料集）」を別途刊行している。解説資料集は「基礎編」「応用編」「事例解析編」「資料編」で構成され、数値予報に関する基礎知識から応用知識までを体系的に理解できるようにしている。解説資料集は気象庁のホームページにPDF形式で掲載されている²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。

¹ 佐藤 芳昭 数値予報モデル基盤技術開発室長

² <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html>

数値予報開発センター年報

目次

はじめに

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	毎時大気解析	5
2.8	短期予報ガイダンス	7
2.9	季節アンサンブル予報システム	10
2.10	気候データ同化システム	10
2.11	波浪モデル	10
2.12	高潮モデル	10
2.13	海況監視予測システム	11
2.14	黄砂解析予測システム	11
2.15	紫外線予測システム	11
2.16	大気汚染気象予測システム	11
2.17	二酸化炭素解析システム	11
第3章	数値予報システムの開発成果	14
3.1	開発成果一覧	14
3.2	全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化、全球解析の高度化	15
3.3	全球アンサンブル予報システムの改良	25
3.4	局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良	29
3.5	日本域高潮モデルの台風ポーガス手法改善	34
3.6	メソ解析および局地解析における Metop-C 搭載マイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS の利用	36
3.7	波浪アンサンブル予報システムのメンバー数増強	39
3.8	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	40
3.9	全球解析における GOES-17 データの利用および GOES AMV における品質管理の変更	44
3.10	全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ IASI の利用データセット移行および Metop-C/IASI の利用	48
3.11	航空機観測データの高度利用	53
3.12	オリパラ向けガイダンス	58
3.13	メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用	61
第4章	数値予報システムの開発進捗	66
4.1	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	66
4.2	全球解析システムの改良	76
4.3	全球アンサンブル予報システムの改良	84

4.4	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	92
4.5	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改良	100
4.6	局地解析へのハイブリッド同化手法の導入	102
4.7	高頻度大気解析	106
4.8	観測データの新規導入と利用法の改良	110
4.9	統合型気温ガイダンス（格子形式）の開発	118
4.10	大雨発生確率ガイダンス	120
4.11	季節アンサンブル予報システムの改良	122
4.12	気象庁第3次長期再解析（JRA-3Q）の本計算進捗	133
4.13	波浪モデル	139
4.14	高潮モデル	140
4.15	海況監視予測システム	141
4.16	黄砂解析予測システム	144
4.17	紫外線予測システム	144
4.18	大気汚染気象予測システム	144
4.19	二酸化炭素解析システム	144
4.20	線状降水帯予測の評価	145
第5章	成果発表	148
5.1	学術論文	148
5.2	国際会合	149
5.3	国内会合	152
5.4	数値予報課コロキウム	154
第6章	連携・共同研究の報告	157
6.1	気象研究所との開発連携の報告	157
6.2	気象衛星センターとの共同研究	158
6.3	共同研究一覧	159
6.4	数値予報資料共有 Web	162
第7章	委員・専門家等	164
7.1	国際機関の委員・専門家等	164
7.2	国内機関の委員・専門家等	165
付録A	略語表	166
付録B	数値予報開発センター年報 発行履歴	171

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」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、2018年10月に「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」（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に、「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」とあり、数値予報の高度化・精度向上を強力に推し進めることで、数値予報は防災をはじめ社会の様々なサービスの充実・発展に、より効果的に貢献できる。2030年に向けて掲げられた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と書かれている。

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、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、毎時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、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チームで構成され、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、二酸化炭素解析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。

1.2 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。

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
- : 再解析チーム
- : 海洋モデルチーム
- : 大気化学モデルチーム

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、毎時大気解析について、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2.17.1、図2.17.2に示し、第2.9節から第2.17節で述べる。

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(2019)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精度の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2022年1月現在、水平解像度約20km、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の現在の仕様については第3.2節を参照頂きたい。利用されている観測データの概要については、計盛ほか(2018)を参照頂きたい。

2021年3月には、全球モデルの鉛直層数がそれまでの100層から128層に増強され、LETKFのメンバー数が50から100メンバーに増強された。またハイブリッド4次元変分法における背景誤差を形成する気候学的な背景誤差と流れに依存する背景誤差の重みの変更が行われ、大気場の解析、予測の精度向上が得られた。また、土壌水分解析の導入及び積雪深解析の改良によって、GSMの下部境界条件の初期値の改善を通じた下層気温等の予測精度向上が得られた。その後、2021年6月には、それまで全天同化に対応していなかった衛星観測マイクロ波水蒸気サウンダデータの全天同化での利用開始、ハイパースペクトル赤外サウンダの利

用チャンネルセット変更、航空機気温観測データのバイアス補正手法改良など、観測データの新規利用及び利用手法改良が行われた。

GSMは、2022年度中に水平解像度を現状の約20kmから約13km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の改良等を適宜取り込む計画である。また、衛星観測輝度温度データの観測演算子として利用している高速放射伝達モデルRTTOVのバージョンアップや、衛星観測によって得られる大気追跡風データの利用高度化などを計画している。

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、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、最新のモデルの仕様については第3.3節を参照頂きたい。「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。2022年1月現在、18日予測までは水平解像度約40km、それより先の34日目までは約55kmと予測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。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。

2021年度末には、水平解像度を現在の約40kmから約27km(18日先まで)、約55kmから約40km(34日先まで)に強化する計画である。またモデルの物理過程の改良をGSMに先行して行う。また現在、予測11日目以降の海面水温(SST)については、2段階SST法(高倉・小森2020)により、季節アンサンブル予報システムで予測された値を用いているが、2022年1月の季節予報アンサンブル予報システムの更新により予測SSTの精度が向上することから予測6日目以降から用

いるようにする。

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 (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、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とメソモデル MSM により構成されている。MSM は 2022 年 1 月現在、水平解像度 5 km、鉛直層数 76 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 51 時間、その他の時刻からの予測は 39 時間である。

今後、2021 年度末に鉛直層数増強 (76 から 96 層) や各種物理過程の改良を含むシステム更新を計画している。また、2022 年の台風シーズンにはメソモデルによる 3 日前からの降水予測を行えるように 00UTC、12UTC 初期値からの予測について予報時間を 78 時間に延長する予定である。この際、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、海洋混合層モデルも導入する。さらに、現行のデータ同化システムは 4 次元変分法を採用しているものの、その時々々の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、2022 年度の導入を目指して開発を進めている。

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た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、2022 年 1 月現在の水平解像度は 5 km、鉛直層数は 76 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には SV 法を用いて与えている。今後 MSM の更新に合わせた改良ばかりでなく、確率的予測の改善を目指した機能拡充を行う。

今後は 2021 年度末の MSM の更新に合わせたシステム更新として鉛直層数を 96 層に増強する。また確率的な予測の精度向上を目指し、摂動作成手法の高度化を進めている。

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 2022 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 次元変分法による同化を繰り返す手法を用いている。詳細については、幾田 (2015) を参照頂きたい。

LFM については、2021 年度末のメソモデルの変更と合わせて陸面過程を更新する予定である。その後、2022 年度に各種物理過程の改良に取り組む計画である。また、メソ数値予報システム同様に、全球数値予報システムで利用されている観測データの導入が課題である。

さらに、ハイブリッドデータ同化手法の導入も大きな課題である。局地解析については、3 次元変分法を用いているため背景誤差相関の時間発展が扱われないことから、その時々々の気象条件に応じた背景誤差相関情報の活用が不十分である。このため、そのような情報を補うハイブリッドデータ同化手法の導入は精度向

上に貢献することが期待でき、2021年度末の現業化を目指して開発を進めている。

LFMについては将来的に、半日先までの大雨予測に資するための予報時間の延長と、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昨年度までの開発計画を前倒している。スーパーコンピュータ「富岳」を活用した開発にも着手しており、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。

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、より統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、今年度から「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、50メンバーのシステムを構築する計画である。更なる高解像度化、メンバー数増強については将来のスーパーコンピュータの性能を勘案して最適な構成を検討していく予定である。

2.7 毎時大気解析

毎時大気解析は、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24回、3次元変分法を用いた客観解析により毎時実行されている（室井ほか2008）。

毎時大気解析はこれまでMSMを第一推定値とした5kmの水平解像度で運用されてきた。一方で近年、LFMの運用及び機能強化が行われてきていると共に、リモートセンシング技術の拡充などにより、高頻度・高密度の観測データが利用可能となっている。そこで、時間頻度をこれまでの1時間から30分（1日48回）に高頻度化すると共に、LFMを第一推定値とする2kmの水平解像度で高頻度・高密度に解析を行う高頻度大気解析の開発を行った。2022年度中の運用開始に向けて準備を進めている。

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.
- 幾田泰醇, 2015: 局地解析の更新と改良. 平成27年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2–8.
- JMA, 2019: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 229 pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-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.
- 計盛正博, 本田有機, 佐藤芳昭, 2018: 観測データと品質管理. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72–82.
- 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 (R03~R07)

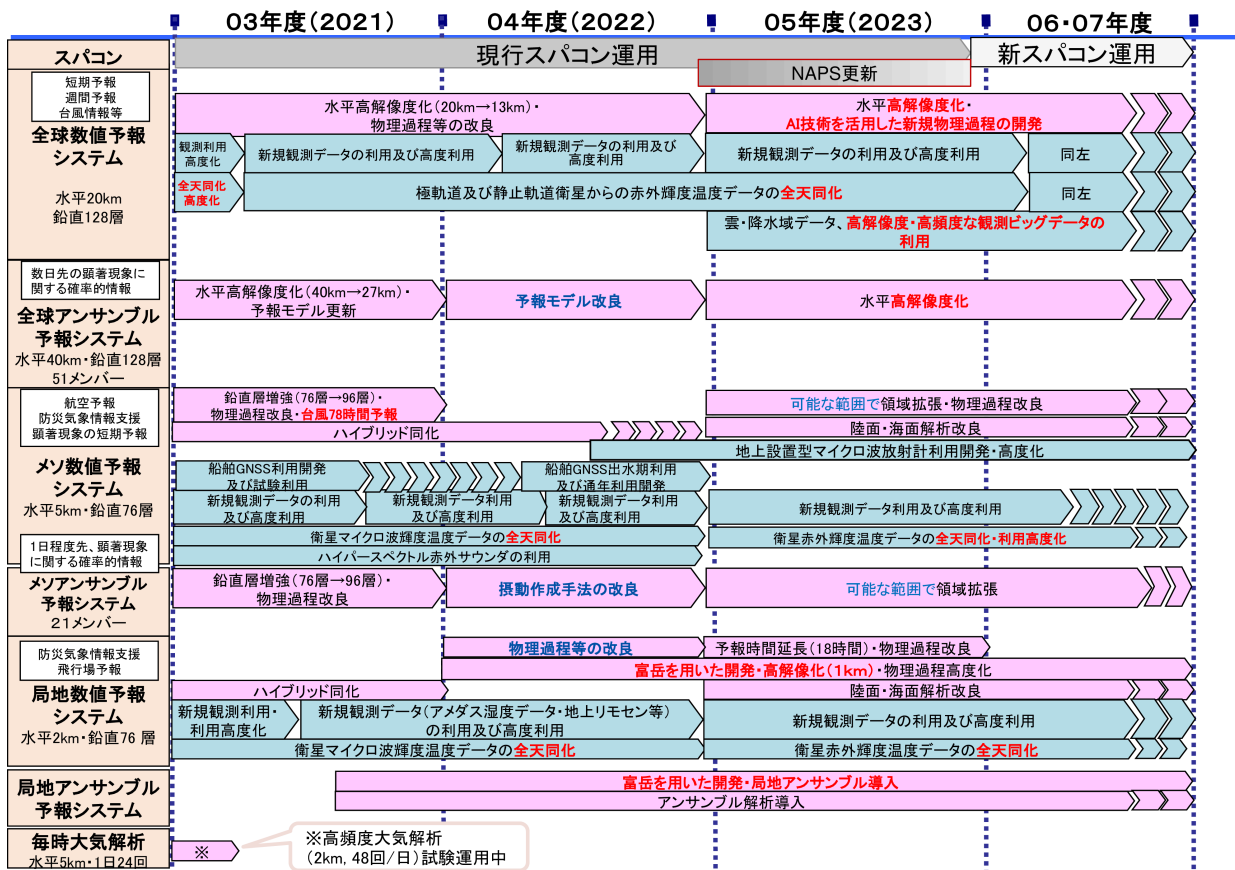


図 2.7.1 数値予報開発計画 (全球数値予報システム、全球アンサンブル予報システム、メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システム、局地数値予報システム、局地アンサンブル予報システム、毎時大気解析)

2.8 短期予報ガイダンス

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。ガイダンスの一覧及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それらを統合する統合型ガイダンスの開発を行っている。本節ではそれぞれの計画について簡単に述べる。なお、開発計画の線表については図 2.8.2 をご覧ください。

2.8.1 ガイダンス

ガイダンスでは、数値予報モデルの特性に由来する系統誤差等を、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ことができる。この開発においては、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 2018b)。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 2018c)。そのため、令和 3~4 年度に計画されている 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及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 2018d)。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。

大きな課題として、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)がある。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」に対応するために開発が進められているもので、令和 3 年 6 月に部内試験運用を開始した。今後、令和 4 年度中に本運用開始を計画している。さらに、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、線状降水帯発生確度ガイダンス(仮称)の開発を行っており、令和 3 年 7 月に部内試験運用を開始した。これについては継続的に改良を実施していく計画である。また、同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」に対応するため、令和 3 年度末に MSM の予測時間延長が予定されていることから、この予報時間を延長した MSM による 48 時間降水量ガイダンス及び 72 時間降水量ガイダンスの開発も行っており、令和 4 年の出水期前までにこの運用を開始する計画である。

その他、LFM 降雪量ガイダンスの開発も進めており、令和 4 年度中の運用開始を計画している。また、後述の統合型ガイダンスの入力となる LFM 気温・降雪量ガイダンスの開発も進めている。

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ところである。

2.8.2 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最適に組み合わせる「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 2018a)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。現在、統合型ガイダンスの降水、風(地点形式)、気温(地点形式)については部内試験運用を開始しており、令和 4 年度末に本運用を開始することを想定して開発を進めている。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。大雨・強風・気温について、例えば気象場に応じた特徴(スケールが小さい現象に対しては分解能が高いガイダンスの方が表現しやすいなど)を抽出する技術調査を共同研究で実施している。この調査結果は随時有効性を確認し、改良

AI技術の活用による統合型ガイダンス

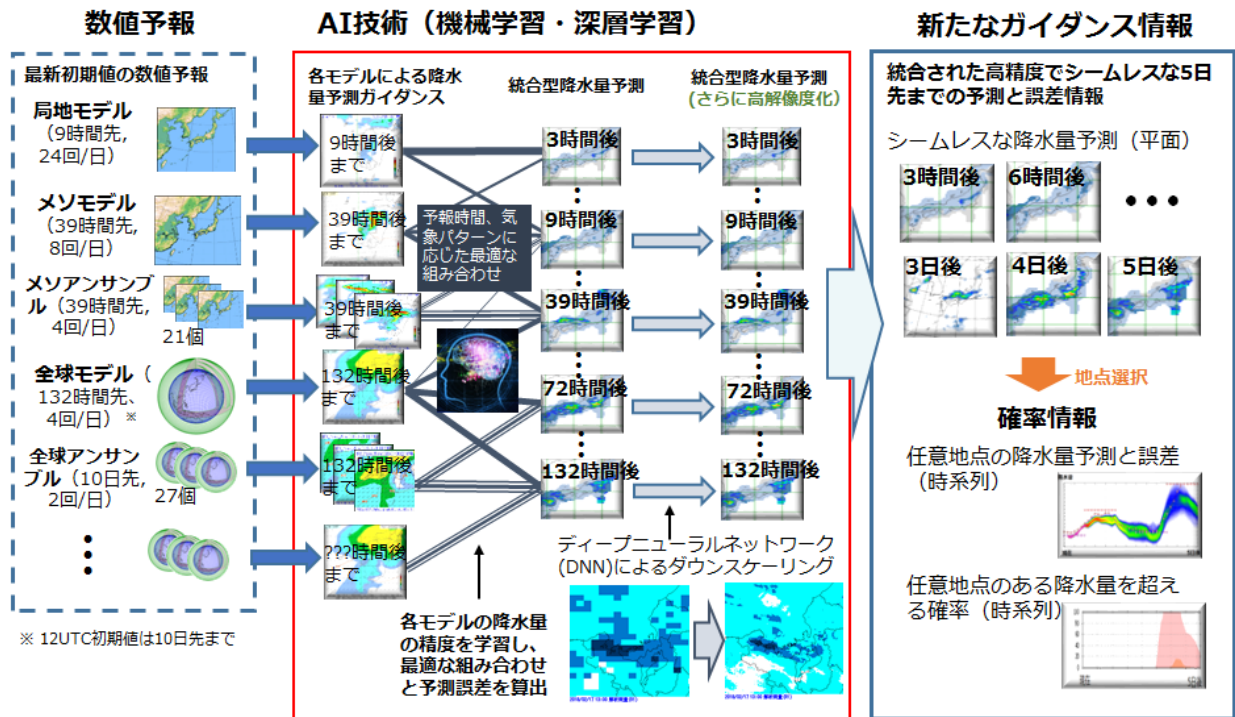


図 2.8.1 統合型ガイダンスの模式図

につながると考えられる場合は導入を行う。また、理研 AIP は AI 技術の専門家であり、様々な知見やツールを有していることから、取り入れ可能な最新 AI 技術やツールについての調査を実施し、上記と同様に有効性が確認された際には随時導入を行う計画である。個別の要素について、以下を計画している。降水及び気温ガイダンスについては確率情報の作成を含む統合手法の改良を行う予定である。また、気温ガイダンスについては、面的な予測を行う統合型気温ガイダンス（格子形式）の部内試験運用を令和 3 年 10 月に開始しており、令和 5 年度末の本運用を目指して引き続き改良を行う。面的なガイダンスとしては、統合型風ガイダンス（格子形式）の開発にも取り組んでおり、こちらも令和 5 年度末の本運用を目指して開発を行う。降雪量ガイダンスについては、降水量ガイダンスと雪水比（気温ガイダンスから求める）を用いて降雪量を求めている。そこで、統合型ガイダンスにおける降水量ガイダンスと気温ガイダンスを結合する計画であり、開発終了後に降雪量ガイダンスの部内試験運用を令和 4 年度中に開始する計画である。

参考文献

計盛正博, 石川宜広, 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.

高田伸一, 2018a: 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.

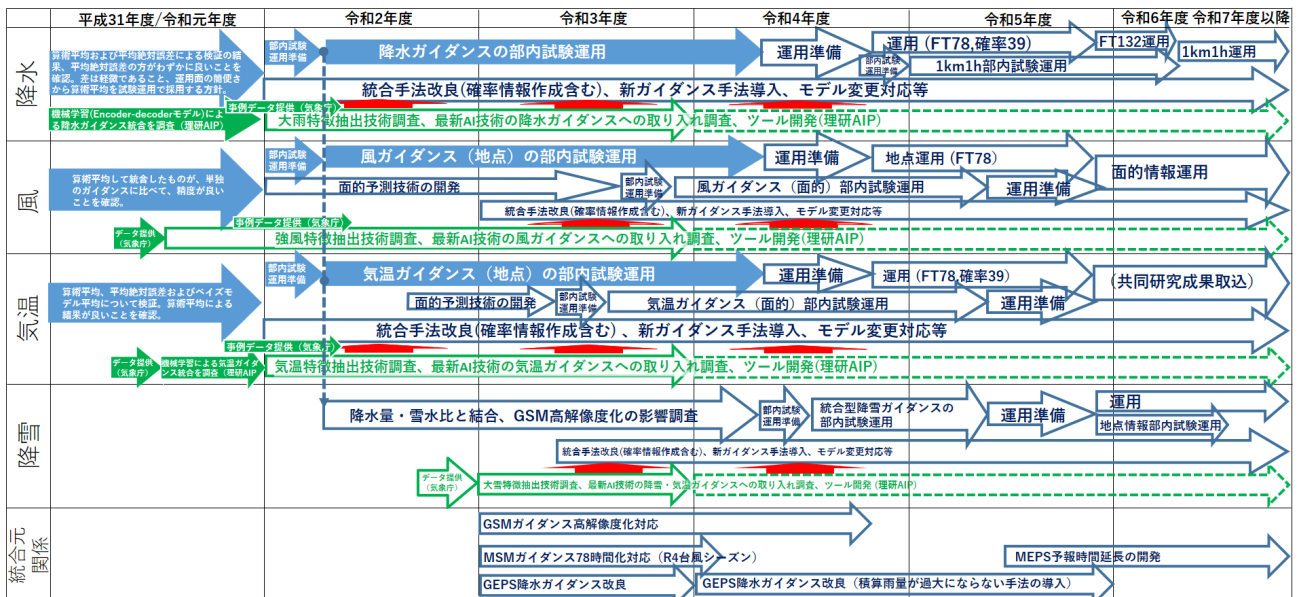
高田伸一, 2018b: ガイダンス概論. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 3-8.

高田伸一, 2018c: 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, 2018d: 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.

		令和3年度				令和4年度			
		R3Q1	R3Q2	R3Q3	R3Q4	R4Q1	R4Q2	R4Q3	R4Q4
モデル改良 対応	GSM	GSM22XX (高解像度化・物理改良)				GSM23XX (高解像度化・物理改良)			
	GEPS	GEPS22XX (高解像度化・物理改良)				GEPS23XX (物理改良)			
	MSM	MSM22XX (予報時間延長・物理改良)				モデル改良があれば対応			
	MEPS	MEPS22XX(鉛直層増強など)				LMF23XX (物理改良)			
	LFM	LA22XX (ハイリット化)							
観測システム変更 対応	湿度計追加 (R2-6年度随時)・積雪深計追加								
	アメダス地点変更 (随時)								
	航空観測自動化 12月 (那覇・中部) など					(R4年度計画未定)			
	空港追加・廃止 (計画未定)								
ガイダンス開発・改良	大雨確率 (継続)	部内試験運用・改良				本運用			
	線状降水帯発生確率	部内試験運用・改良				部内運用			
	LFMガイダンス開発・ルーチン化 (降雪量、視程、風、気温)								
	降水量ガイダンス各種改良・調査 (流域治水用、積算可能型、DNNガイダンス)								
	視程 (格子)・降雪 (格子)・航空用雲ガイダンスの改良								
ガイダンス共通化	共通DB化 (降雪量 (地点)、降水量)					python化			
	python化・共通DB化 (風、天気、視程 (格子))								

図 2.8.2 ガイダンス開発計画



青矢印: 気象庁線表 (塗りつぶしは実施済、白抜きは実施中又は実施予定)、赤矢印: 有効性を確認後に導入
 緑矢印: 共同研究線表 (塗りつぶしは実施済、白抜きは実施中又は実施予定) (令和3年度までは気象庁との共同研究契約として実施、令和4年度以降は未定)

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（水平分解能 110km、鉛直層数 60 層）に気象研究所共用海洋モデル MRI.COM（水平分解能 50~100km、鉛直層数 52 層）を結合した、大気海洋結合モデルを用いている。大気初期値には気候データ同化システム（第 2.10 節参照）、海洋初期値には初期値作成手法として 3 次元変分法を採用している全球海洋データ同化システム（MOVE/MRI.COM）を使用している。仕様の詳細については、高谷（2015）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、社会経済活動への貢献に資するため、エルニーニョといった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。

2022 年 1 月に更新予定の次期季節 EPS では、その予測モデルについて、水平方向の高解像度化（大気：110km から 55km 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・調整を加える。さらに、データ解析手法の 3 次元変分法から 4 次元変分法への変更といった MOVE/MRI.COM の高度化や摂動作成手法の改良も行う。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、2009 年時点の現業全球データ同化シ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）と同じシステム（水平分解能 55km 鉛直層数 60 層）である。仕様の詳細については古林ほか（2015）などを参照頂きたい。さらに、2018 年時点の現業全球データ同化システムをベースとする気象庁第 3 次長期再解析

（JRA-3Q）と同じ仕様を持つ気候データ同化システムの運用も 2021 年 10 月から開始している。

2021 年 12 月現在、JRA-3Q については、1990 年代以降の計算が完了しており、残りの期間（1940 年代末～1980 年代）の計算を実施している（2021 年度中に完了予定）。JRA-3Q では、JRA-55 と比較して、水平方向の高解像度化（55km から 40km へ）、鉛直層数の増強（60 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込まれることから、より高品質なデータの作成が期待される。なお、北西太平洋以外の領域において、2013 年以降の一部期間の熱帯低気圧解析の品質が顕著に低下していることが判明しており、熱帯低気圧解析の品質改善のため、2013 年以降の期間について再計算を実施する予定である。

今後も新しい気象庁長期再解析の実施に合わせて気候データ同化システムの更新を行う計画である。

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 55km）と日本近海を対象とする沿岸（同 5km）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（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、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。

2022 年度には、全球波浪モデルの水平解像度高解像度化（55km から 27km へ）、初期時刻 00UTC の予報時間延長（132 時間から 264 時間へ）を予定している。その後、沿岸波浪モデルの水平解像度高解像度化（5km から 1.7km 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 1km~沖合 16km）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 3.7km）の 2 種類の対象領域を設けている。仕様の詳細については、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

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

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。

日本域高潮モデルについては、2022年度前半には予報時間延長(39時間から132時間へ)及びアンサンブルメンバー数増強(6から21メンバー程度へ)を行う計画である。アジア域高潮モデルについては、2022年度に非構造格子モデルを導入して沿岸部の高解像度化(3.7kmから1.5kmへ)を図るとともに、台風ボーガス手法の改善や全球アンサンブル予報システムの全メンバーを活用したアンサンブル予報化を計画している。中長期的には、日本域高潮モデルへの非構造格子モデルの導入、台風ボーガス手法のさらなる改善、スーパーコンピュータシステムの仕様に応じた高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100km、鉛直層数60層)ー北太平洋(同10km、60層)ー日本近海(同2km、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および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。

本システムについては、2021年度末までにデータ同化での新規衛星データ利用の開始を計画している。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などの本システムのさらなる改善を行う計画である。

2.14 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、大気大循環モデルMRI-AGCM3(Yukimoto et al. 2012)と全球エアロゾルモデルMASINGAR mk-2(Yukimoto et al. 2012)を結合させたモデル(水平解像度40km 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アロゾルの3次元分布から計算した光学的厚さ(Aerosol Optical Thickness, AOT)を衛星観測AOTで修正(2次元変分法)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)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、エア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アロゾルプロダクトについて、ひまわり8号から9号への切り替え対応を行う。中長期的な課題としては、衛星観測データ利用の高度化などがある。

2.15 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. 2012)と化学輸送モデルを結合させたモデルMRI-CCM2(水平解像度110km 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(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、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、衛星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。

2.16 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、アジア域の領域化学輸送モデル(水平解像度20km 鉛直層数18層)及び、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(水平解像度5km 鉛直層数19層)の2種類がある。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地上観測データ(オゾン濃度)でナッジングすることで観測情報を取り込んでいる。高解像度版領域化学輸送モデルは、大気モデルasucaと組み合わせて使用しており、予報ー予報サイクルで運用している。仕様の詳細について、池上ほか(2015)などを参照頂きたい。「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。

2022年度には、高解像度版領域化学輸送モデルについて、地上観測データ同化の導入や領域拡張を行い、アジア域の領域化学輸送モデルとの統合を図る。

2.17 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の発表に利用されている。本システムでは、GSMに二酸化炭素の輸送過程を組み込んだモデルGSAM-TM(水平解像度110km 鉛直層数60層)と逆解法(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。2022年度には衛星データ同化を導入する予定であり、その後、領域区分の細分化などを計画している。

参考文献

Hallberg, Robert, 2013: Using a resolution function to regulate parameterizations of oceanic mesoscale eddy effects. *Ocean Modelling*, **72**, 92–103.

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

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

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.

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.

JMA, 2019: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 229 pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>).

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.

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.

高谷祐平, 2015: 概論. 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, 1–4.

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.

Yukimoto, Seiji, Yukimasa Adachi, Masahiro Hosaka, Tomonori Sakami, Hiromasa Yoshimura, Mikitoshi Hirabara, Taichu Y Tanaka, Eiki Shindo, Hiroyuki Tsujino, Makoto Deushi, and others, 2012: A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3—Model description and basic performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **90**, 23–64.

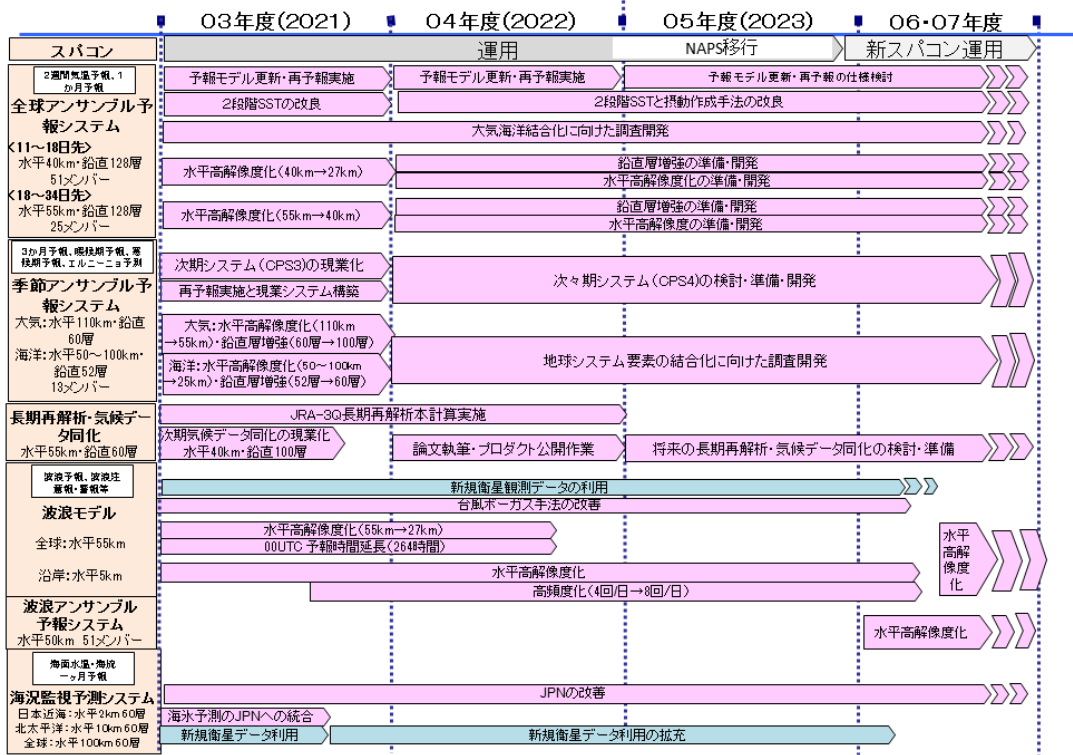


図 2.17.1 全球アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システム、気候データ同化システム、波浪モデル、波浪アンサンブル予報システム、海況監視予測システムの開発計画

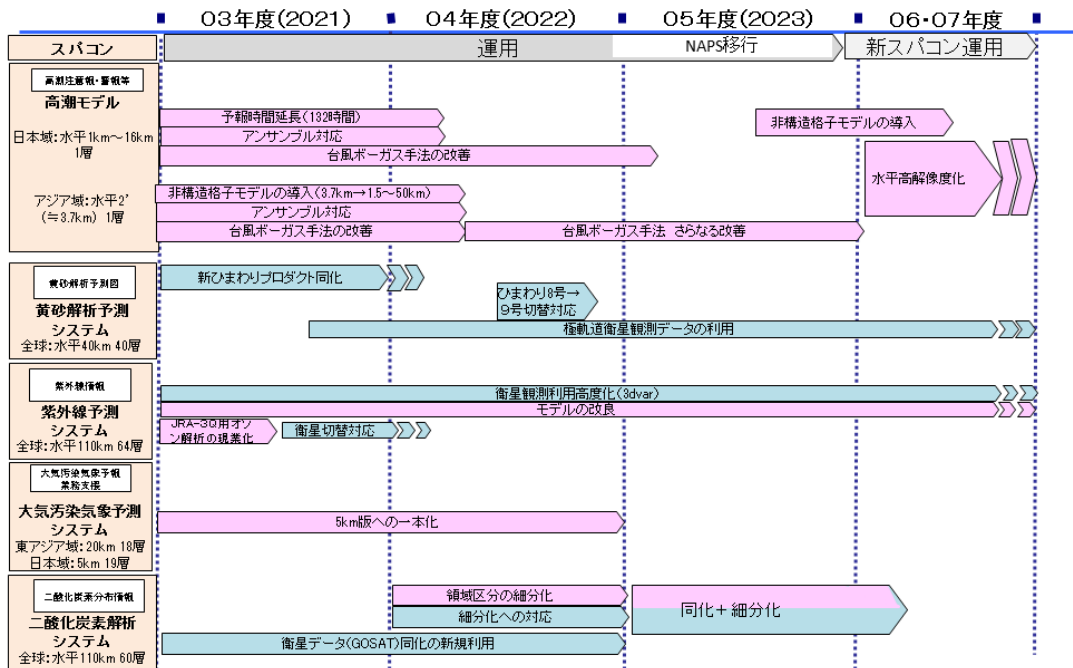


図 2.17.2 高潮モデル、黄砂解析予測システム、紫外線予測システム、大気汚染気象予測システム、二酸化炭素解析システムの開発計画

第3章 数値予報システムの開発成果

3.1 開発成果一覧

第3章では、2021年1月から12月までの数値予報システムに導入した開発成果を報告する。

表 3.1.1 2021年1月から2021年12月までに数値予報システムに導入した開発成果

項	表題	運用開始日
第3.2節	全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化、全球解析の高度化	3月30日
第3.3節	全球アンサンブル予報システムの改良	3月30日
第3.4節	局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良	3月31日
第3.5節	日本域高潮モデル予報時間延長と台風ポーガス利用手法改善	4月26日
第3.6節	メソ解析および局地解析における Metop-C 搭載マイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS の利用	5月25日 (メソ解析) 11月24日 (局地解析)
第3.7節	波浪アンサンブル予報システムのメンバー数増強	6月10日
第3.8節	全球解析における全天同化マイクロ波水蒸気サウンダの拡充	6月29日
第3.9節	全球解析における GOES-17 CSR および AMV データの利用	6月29日
第3.10節	全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ IASI の利用 データセット移行および Metop-C/IASI の利用	6月29日 (データセット移行) 11月24日 (Metop-C/IASI の利用)
第3.11節	航空機データの高度利用	6月30日
第3.12節	オリパラ向けガイダンス	6月30日
第3.13節	メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用	8月31日

3.2 全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化、全球解析の高度化

3.2.1 はじめに

全球数値予報システムは、天気予報や週間天気予報、台風進路・強度予報での利用、メソ数値予報システムへの境界値提供をはじめ多くの役割を担う基盤数値予報システムである。気象庁では、スーパーコンピュータシステムの更新とともに、全球数値予報システムの分解能の向上や計算手法の精緻化などの改良を通して予測精度の向上を進めてきた。第10世代スーパーコンピュータシステムにおいても鉛直、水平解像度の増強や物理過程の精緻化等を通じた全球モデル(GSM)や全球解析(GA)の改良を開発計画(本田2018)に沿って進めている。2021年3月30日に実施した全球数値予報システムの更新では、GSMの鉛直層数を100層から128層へ増強するとともに、地表面解析の高度化、全球解析の高度化を行った。これらの更新により、北半球500 hPa高度や、対流圏下層気温等の予測精度を改善した。本稿では、その改良内容と予測精度の評価結果及び予測特性の変化について報告する。以下では、第3.2.5項に示すGSMのバージョンの命名規則に沿い、本稿で示す改良を総称してGA/GSM2103と呼ぶ。

3.2.2 変更概要

ここでは、GA/GSM2103における変更の概要やその狙いについて示す。各変更の詳細や個々の変更のインパクトについては、気象庁(2021a)及び気象庁(2021b)を参照されたい。

(1) 鉛直層増強

GSMの鉛直層数を100層から128層に増強した。この狙いは、鉛直離散化誤差の減少(氏家2019)を通じた大気表現能力の向上、データ同化の観測演算子で利用される第一推定値の大気プロファイルの改善によって観測情報がより適切に初期値に反映されることに伴う全体的な予測精度向上である。鉛直層増強では、モデルトップ(約80 km)、モデル最下層高度(約8 m)を保ちつつ、大気全体をほぼ均等に高分解能化した。これは、台風予測、日々の天気等に関わる大気現象やそれらの表現に関わる物理プロセスは、地表面から大気の上層まで鉛直方向に広範囲に渡ることを考慮したためである。また、全球解析におけるアウトモデル、インナーモデル及びLETKF(Local Ensemble Transform Kalman Filter: Hunt et al. 2007)・土壌水分解析におけるアンサンブル予報に使われる低解像度モデルの鉛直層もGSMと同様に100層から128層に増強した。

(2) 地表面解析の高度化

地表面解析については、下層大気を中心とした予測精度向上を狙い、日々の積雪分布、土壌水分の変動をより適切に初期値に反映させる改良を行った。

積雪深解析について、第一推定値として、気候値(Foster and Davy 1988)を基にしたものから、モデル予測値と衛星から推定した積雪域を組み合わせたものに変更した。また、第一推定値が高度化されたことにあわせて、解析値における第一推定値の寄与がより大きくなるよう、最適内挿法の設定を調整した。具体的には、観測誤差分散の背景誤差分散に対する比を大きくし、また、遠方での誤差相関がこれまでより小さくなるよう誤差相関の形を変更した。これらの改良により、作成時期が古く品質の低い気候値に起因する不自然な積雪が解析値に残る問題や、局所的な積雪深観測の周囲で広く積雪が解析される問題が解決された。

土壌水分については、初期値に気候値を用いる手法から、土壌1~3層(表層19 cm)までは地上気温及び相対湿度観測を利用した土壌水分解析値を用いる手法(Mahfouf 1991)に変更した。解析処理は、(1)地上観測値を同化した地上気温・相対湿度の解析値作成、(2)地上解析値を観測値とみなした土壌水分解析値作成の2段階で構成される。(1)では、GSMの地上気温・相対湿度予測値を第一推定値として、SYNOPによる地上気温・相対湿度観測を2次元最適内挿法で同化する。(2)では、GSMの土壌水分予測を第一推定値として、土壌水分量と地上物理量の相関関係を利用して前述の地上解析値を同化し、土壌水分解析値を作成する。土壌水分解析では、データ同化手法として、カルマンフィルタの一種であるSimplified Extended Kalman Filter(SEKF, de Rosnay et al. 2012)を採用した。SEKFでは、本来のカルマンフィルタに対し、背景誤差共分散を更新せず固定とする、誤差の水平相関を無視するという簡略化を行っている。

(3) 全球解析の高度化

流れに依存する背景誤差の扱いの高度化による解析精度の向上を狙い、4次元変分法・LETKFのハイブリッド同化(Kadowaki et al. 2020)の改良を行った。まず、LETKFのアンサンブルメンバーを50から100へ増強した。これにより、サンプリング誤差が軽減され、アンサンブル予報から見積もった背景誤差共分散行列の精度が向上し、流れ依存性をより適切に考慮した解析が可能になる。また、メンバー数増強に伴うサンプリング誤差軽減にあわせて、LETKFにおける誤差相関の鉛直局所化の大きさをこれまでの1.5倍に増大するとともに、4次元変分法におけるアンサンブル予報由来の背景誤差を重みの15%から50%に増加した。いずれもアンサンブル予報による背景誤差の情報を解析処理でより活用する方向の変更に対応する。また、LETKFにおける地上気圧の初期値化の改良、気候値由来の背景誤差を最新の全球モデルの誤差統計に基づき更新する等の各種改良を行った。

3.2.3 検証結果

GA/GSM2103 の現業導入に際して実施した、予測精度を検証するための業務化試験¹等の結果に基づき、予測精度の変化の概要を示す。

(1) 実験設定

対照実験には 2021 年 1 月時点の現業数値予報システムを用いた。以下では、対照実験を CNTL、CNTL に第 3.2.2 項で示した変更を取り込んだ実験を TEST と呼ぶ。

実験期間は北半球における夏冬の 2 期間を対象としており、ここではそれぞれ夏期間、冬期間と呼ぶ。実験の解析と予報は以下の期間について実施した。

- 夏期間
 - － 解析: 2019 年 6 月 2 日～2019 年 10 月 11 日
 - － 予報: 2019 年 6 月 12 日～2019 年 10 月 11 日
- 冬期間
 - － 解析: 2019 年 11 月 10 日～2020 年 3 月 11 日
 - － 予報: 2019 年 11 月 20 日～2020 年 3 月 11 日

全球解析には、予測を決められた時刻までに提供するための速報解析と、解析値の品質を維持するために観測データの入電を十分待ってから行うサイクル解析の 2 種類がある。業務化試験では両方の解析を行うが、上の実験期間の解析とはサイクル解析を意味し、速報解析の実施期間は予報と同一になる。なお、両解析と予報の間のデータフローなど、気象庁の全球数値予報システムの全体像については JMA (2019) を参照されたい。

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

(2) 北半球 500 hPa 高度場の予測

図 3.2.1 に北半球 500 hPa 高度の予測の二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) について TEST から CNTL を引いたものを示す。対解析値、対ラジオゾンデともに 3 日先まで夏期間、冬期間で統計的に有意な改善が見られた。夏期間、冬期間ともに対解析検証での 2 日先の RMSE の改善幅は約 0.2 m であった。図 3.2.2 に冬期間における、FT= 24, 48, 72 それぞれにおける北半球 500 hPa 高度の RMSE の改善幅の日々の変化を示している。特に FT=24, 48 については、特定の日付の事例で大きく改善・改悪が示されているわけではなく、ほとんどの事例で少しずつ TEST が CNTL より精度が改善されていることがわかる。これらの RMSE の減少を示す典型的な例として、図 3.2.3 に、冬期の一事例における日本周辺の 500 hPa 高度の 2 日予測の誤差を示す。TEST は CNTL に対して誤差のパターンが大きく変化しているわけではないが、華

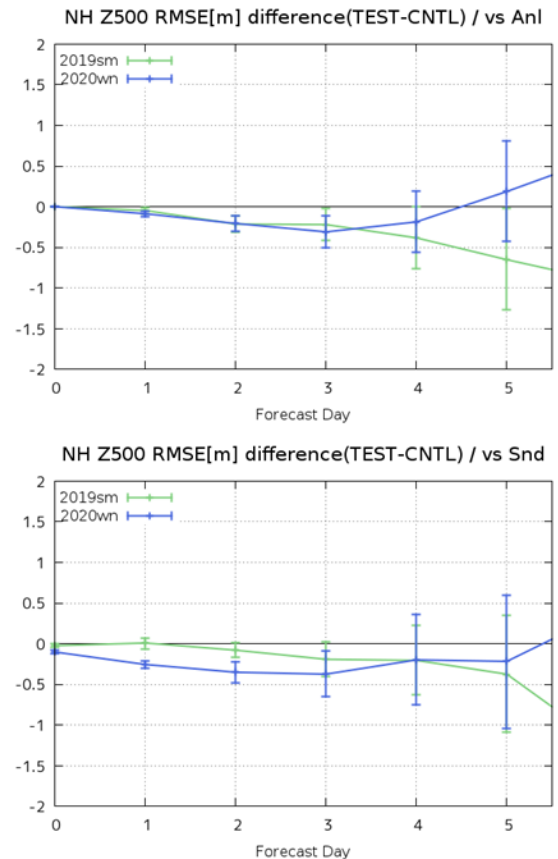


図 3.2.1 北半球 (20°N 以北) での 500 hPa 高度場の RMSE [m] について、TEST から CNTL を引いたもの (縦軸)。横軸は予測時間 [day]。上図が解析値に対する、下図がラジオゾンデ観測値に対する検証の結果。青線が冬期間で緑線が夏期間。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味する。エラーバーは、ブートストラップ法 (リサンプル数 10000) で見積もった 95%信頼区間を表す。

北や日本海、日本の東海上などで誤差の大きさが少しずつ小さくなっており、これらが RMSE の減少につながっていると考えられる。この図で示した事例の他にも、誤差のパターンは変わらないがその大きさが減少する事例が多く見られた。

(3) 下層気温の予測

地表面解析の改良による下層気温予測改善の例として、図 3.2.4 に日本周辺の 850 hPa 気温予測の例を示す。図中の赤点線の楕円で示す通り、この期間は、寒気を伴った低気圧が華北を通過する際に下層気温が解析値よりも低くなる誤差が見られたが、TEST ではその誤差が CNTL に対して減少した。この誤差の減少は積雪深解析の改良による積雪域の広がりすぎの抑制が影響していると考えられる。図 3.2.5 は、図 3.2.4 の事例の初期値として使用された積雪深と、参照データとして 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) による積雪域分布を示

¹ 業務化試験の位置付け・内容については (石田 2017) を参照。

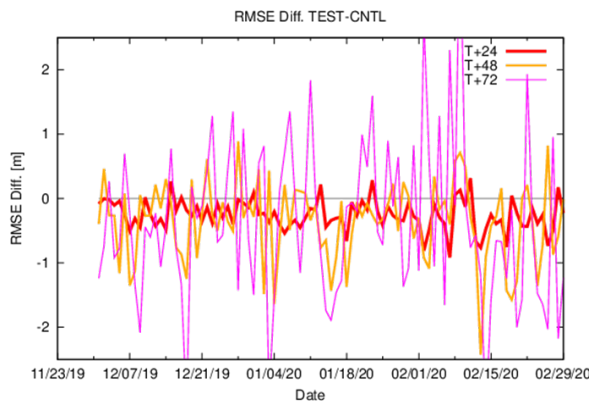


図 3.2.2 冬期間における、北半球 (20°N 以北) での 500 hPa 高度場の対解析値 RMSE [m] について、TEST から CNTL を引いたもの (縦軸) の FT=24 (赤), 48 (オレンジ), 72 (ピンク) における日々の変化。横軸は対象となる日付。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味する。

している。華北付近 (図中の黒点線の楕円で示す領域) において、CNTL では IMS では見られない積雪域が見られたが、TEST ではそのような積雪域は見られず、IMS と整合した積雪分布となっている。図 3.2.5 で示した事例に限らず、冬期間では北半球の積雪域の減少と北半球の下層の気温の低温バイアスの軽減が見られた (図略)。業務化試験でみられたこれらのインパクトは、積雪深改良に向けた開発時の試験でも確認されており (気象庁 2021a)、期待されたものである。なお、これら改善は後述の第 3.2.3 項 (5)、第 3.2.3 項 (6) でも示すとおり、統計検証でも表れている。

(4) 台風予測

図 3.2.6 に台風進路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。図に示すように、FT=72 まで台風進路予測は概ね中立であった。FT=84 以降は TEST の方が誤差が大きいが、台風の事例数が少ない影響で、予報時間を通じて一貫した有意性は見られない。また、個別の台風事例で見ると、改善と改悪の両方を含む。このため、FT=84 以降の台風進路予測は中立と判断した。また、台風の強度予測については、TEST の方が僅かに中心気圧が下がり台風が強まる傾向が見られた (図 3.2.7)。一方、その差は平均で 1 hPa 程度であり、プロダクト利用上の注意点を変更する程度の変化ではないと考える。

(5) 各種統計検証スコア (冬期間)

図 3.2.8 及び図 3.2.9 に、冬期間について解析値とラジオゾンデ観測値を参照値として、代表的な要素の予測を領域ごとに検証した結果を示す。検証は、アノマリー相関係数 (ACC: Anomaly Correlation Coefficient) またはラジオゾンデ観測に対しては相関係数 (CC: Correlation Coefficient)、RMSE、RMSE、平均誤差 (ME: Mean Error) とその変化の有意性について

のものである。

冬期間では、対初期値検証・対ラジオゾンデ検証ともに多くの要素で予測時間前半を中心に改善が見られた。特に、北半球での 500 hPa 高度場や 850 hPa 気温の RMSE, ME の改善が大きい。

(6) 各種統計検証スコア (夏期間)

図 3.2.10 及び図 3.2.11 に、夏期間について解析値とラジオゾンデ観測値を対象として、冬期間と同様に代表的な要素を領域ごとに検証した結果を示す。

夏期間も多くの要素で改善が見られた。特に、北半球領域の 850 hPa 気温の改善が対解析・対ラジオゾンデ検証ともに顕著である。一方で、熱帯では改悪する要素も見られる。

3.2.4 まとめと今後の開発

気象庁は、2021 年 3 月 30 日に全球数値予報システムについて、GSM の鉛直層数を 100 層から 128 層に増強、地表面解析の高度化、全球解析システムの高度化を行った。この改良により、冬季の北半球 500 hPa 高度や対流圏下層の気温等の予測精度が改善した。2 日後の北半球 500 hPa 高度の予測誤差は、0.2 m 減少する結果であった。また、台風進路予測誤差は中立であった。更新に伴う予測特性の変化について、500 hPa 高度の系統誤差の大きな変化は見られないが、RMSE の減少等ランダム誤差が減少した。また、北半球における 850 hPa 気温の低温バイアスは軽減した。

今後の開発として、GSM の水平解像度を 20 km から 13 km に増強する計画である。GSM の水平高解像度化に向けた力学過程の開発では、実効解像度の向上 (フィルター処理、離散化誤差、非線形項に伴うエアリングのいずれにも大きく影響されないスケールをより高波数側に拡大させること) を目的に、格子系として 2 次格子の導入、モデル地形作成手法の見直し、水平拡散の調整を進めている。また、GSM の水平高解像度化と同時に実施する物理過程の改良としては、地形性抵抗過程のパラメータ見直し、次期季節予報システムに向けた開発成果 (湖面温度の考慮や放射過程改良等) の取り込み等を進めている。開発進捗の詳細については、第 4.1 節を参照されたい。

3.2.5 補足：全球モデル (GSM) の仕様

表 3.2.1 に、GSM の水平・鉛直の分解能等の基本仕様の向上や、力学・物理過程の改良についての更新履歴を示す。表の左列に示すように、GSM にはバージョン名が付けられており、変更に伴い改定されている。バージョン名の形式は、全球数値予報システムに改良を導入した西暦の下二桁と月を「GSM」の後ろに付けたもので、例えば、2021 年 12 月時点での最新 GSM のバージョン名は、本稿で示す 2021 年 3 月に運用を開始したものであり、「GSM2103」と呼ぶ。表の中の分解能の表記について、はじめの T もしくは TL は三角形

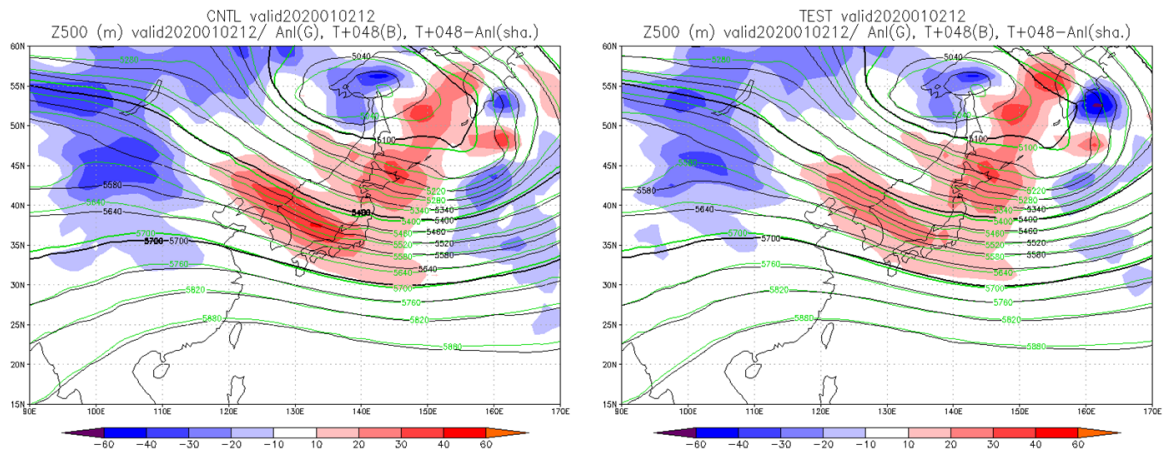


図 3.2.3 2020 年 1 月 2 日 12UTC を対象とした、日本周辺の 500 hPa 高度 [m] の 48 時間予測値（等値線：黒）、解析値（等値線：緑）、48 時間予測値の対解析誤差（カラー）。（左）CNTL、（右）TEST。

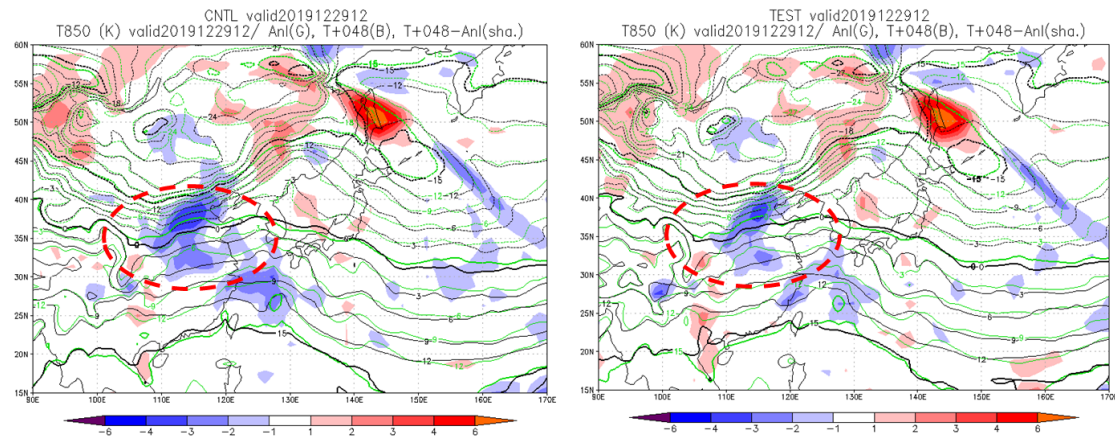


図 3.2.4 2019 年 12 月 29 日 12UTC を対象とした、日本周辺の 850 hPa 気温 [K] の 48 時間予測値（等値線：黒）、解析値（等値線：緑）、48 時間予測値の対解析誤差（カラー）。（左）CNTL、（右）TEST。図中の赤点線の楕円については、本文の記述を参照。

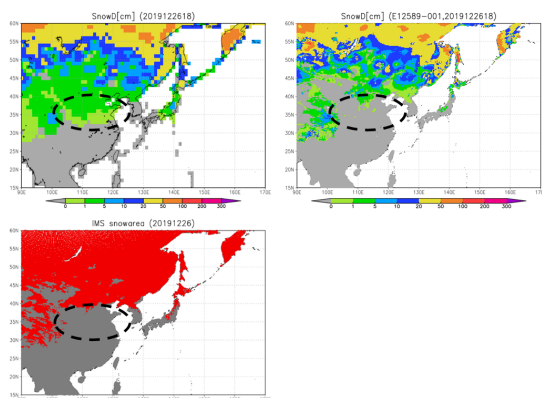


図 3.2.5 図 3.2.4 の事例において、（左上）CNTL、（右上）TEST の初期値として用いられた積雪深の分布 [cm]。（左下）IMS プロダクトによる積雪域分布（赤が積雪域）。図中の黒点線の楕円については、本文の記述を参照。

波数切断を意味し、その後の数字は切断波数を表す。T の場合は 2 次格子、TL の場合は線形格子を意味する。また、その後の L は鉛直層を意味し、直後の数字は層数を表す。

GSM2103 について、力学過程及び物理過程の仕様を表 3.2.2 にまとめる。表における OUTER モデル及び INNER モデルとは、データ同化プロセスにおいて 4 次元変分法やアンサンブル予報の中で用いられるモデルであり、OUTER モデルは解析における第一推定値の計算に用いるモデルを、INNER モデルは解析修正量を求める計算やアンサンブル予報に用いるモデルを指す。ただし、4 次元変分法で用いる INNER モデルの物理過程にはバージョンの古いものや簡略化したものが含まれている。

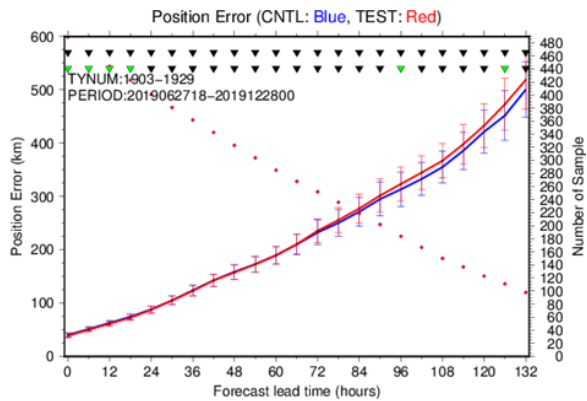


図 3.2.6 夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした進路予測の気象庁ベストトラックに対する誤差 [km] (実線、左軸)とサンプル数(丸、右軸)。赤線が TEST で青線が CNTL、線に付属したエラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間を表す。TEST と CNTL でサンプルは揃えてあり、両方で追跡できたものだけを検証対象としている。このため、サンプル数を表す丸は TEST と CNTL で重なっている。図上部の三角は差の有意性を示すもので、上段が時間方向の相関を考慮、下段が独立仮定で計算した有意判定結果を示し、緑色は有意、黒色は有意でないことを示す。

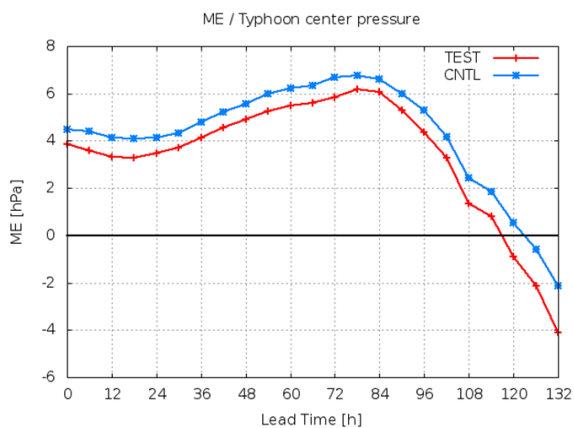


図 3.2.7 夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした中心気圧の平均誤差 [hPa]。赤線が TEST で青線が CNTL。

表 3.2.1 GSM の主な更新履歴

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

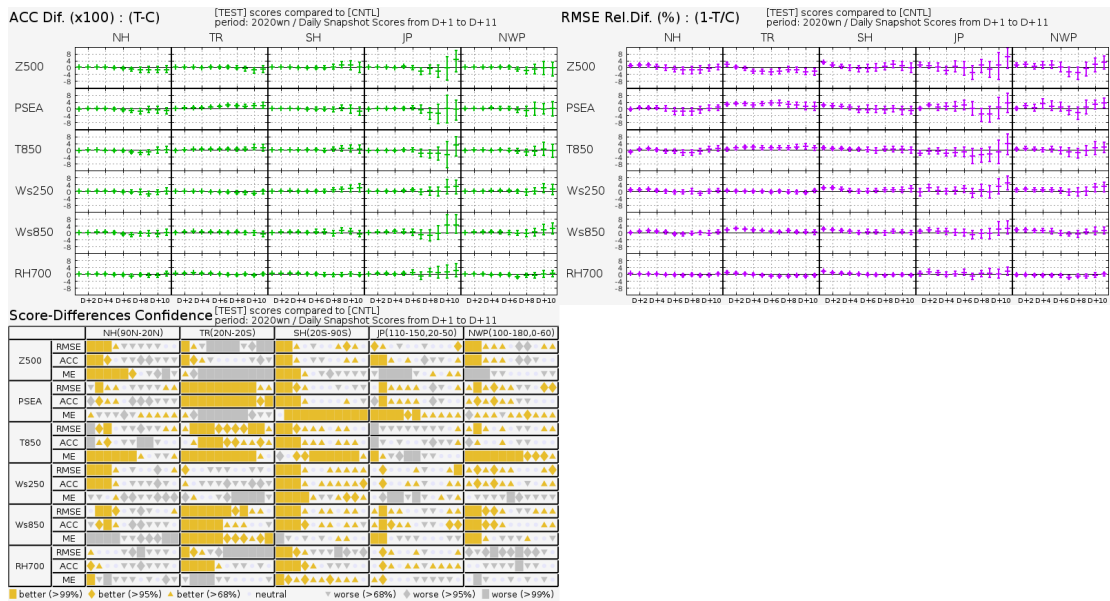


図 3.2.8 冬期間における対流圏主要要素の解析値に対する ACC の改善幅（左上図）、RMSE の改善率（右上図）と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定（左下図：スコアカード）。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球（20°N 以北）、TR が熱帯（20°S - 20°N）、SH が南半球（20°S 以南）、JP が日本周辺（110°E-150°E, 20°N-50°N）、NWP が北西太平洋領域（100°E-180°E, 0°-60°N）を意味する。要素は上から 500 hPa 高度、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、ACC、ME、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

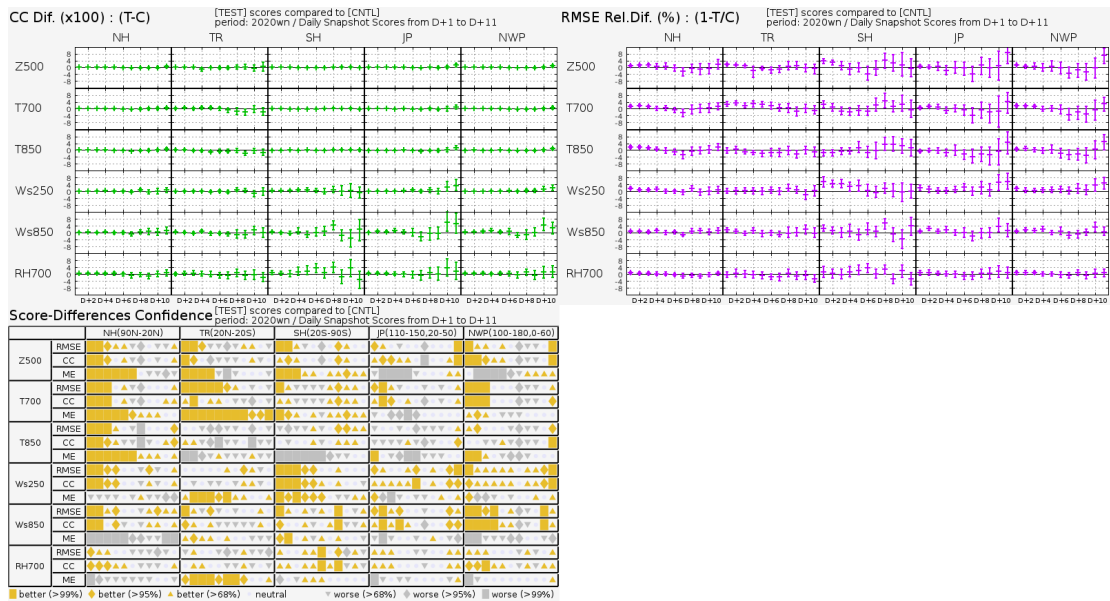


図 3.2.9 冬期間における対流圏主要要素のラジオゾンデ観測値に対する CC の改善幅（左上図）、RMSE の改善率（右上図）と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定（左下図：スコアカード）。ラジオゾンデを参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球（20°N 以北）、TR が熱帯（20°S - 20°N）、SH が南半球（20°S 以南）、JP が日本周辺（110°E-150°E, 20°N-50°N）、NWP が北西太平洋領域（100°E-180°E, 0°-60°N）を意味する。要素は上から 500 hPa 高度、700 hPa 気温 (T700)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、CC、ME、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

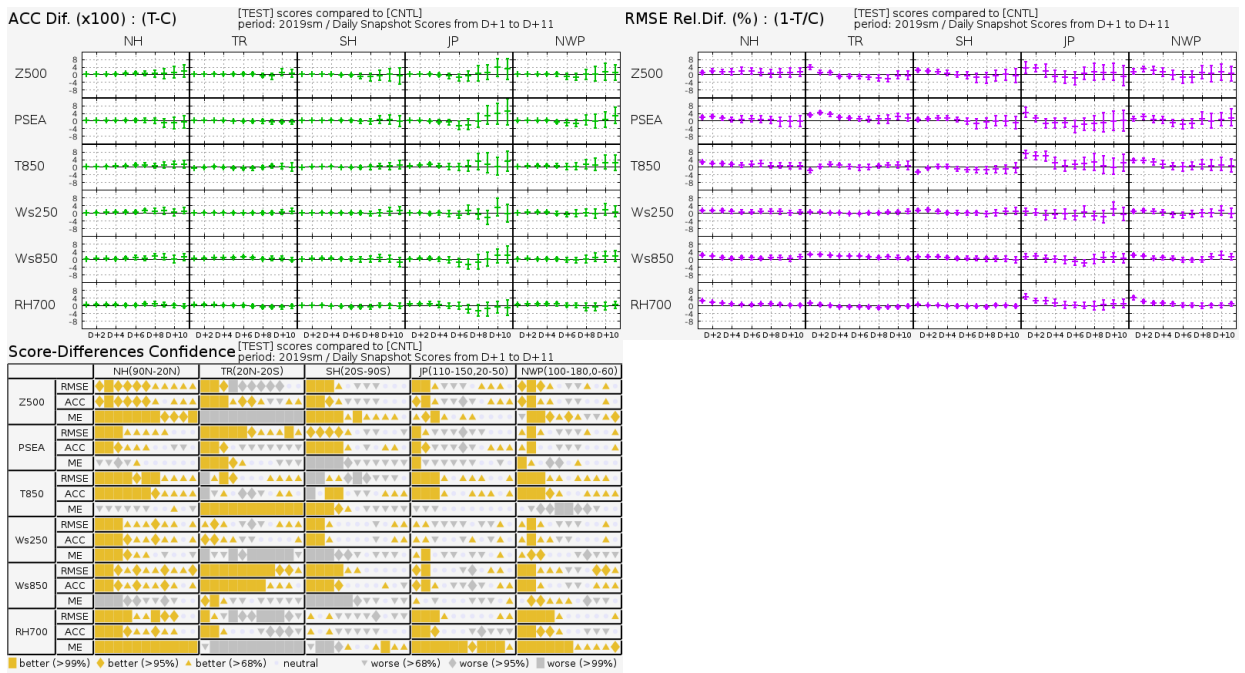


図 3.2.10 夏期間についての解析値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.8 と同じ。

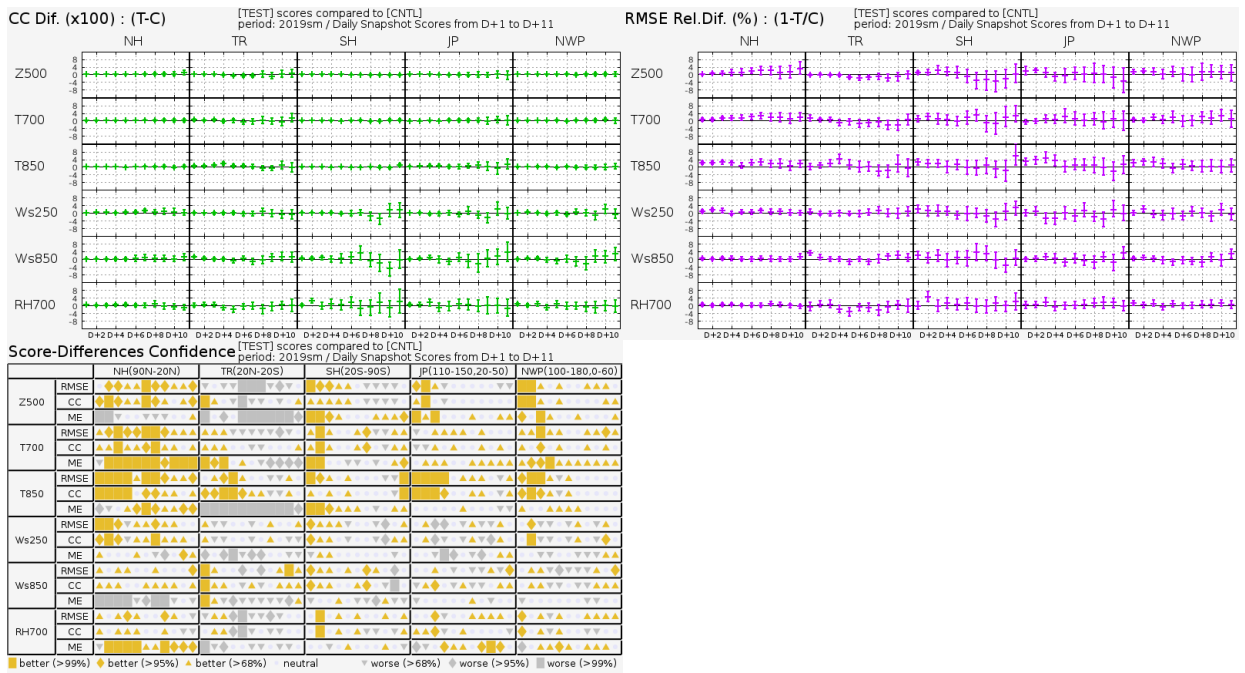


図 3.2.11 夏期間についてのラジオゾンデ観測値に対する検証結果。図の内容は図 3.2.9 と同じ。

表 3.2.2 GSM の仕様 (2021 年 3 月時点)

力学過程		
支配方程式	プリミティブ方程式系	
予報変数	東西風、南北風、気温、比湿、雲水量、地上気圧の対数	
離散化	水平：球面調和関数を基底関数としたスペクトル法、鉛直：有限差分法	
水平格子系	適合ガウス格子 (宮本 2005)	
水平分解能	予報モデル及びアウトターモデル：TL959 (格子間隔約 20 km : 0.1875 度)、インナーモデル：TL319 (格子間隔約 55 km : 0.5625 度)	
鉛直座標系	$\sigma - p$ ハイブリッド座標 (Simmons and Burridge 1981)	
層数 (最上層)	128 層 (0.01 hPa)	
移流+時間積分	2 タイムレベル セミインプリシット - セミラグランジアン法 (Yukimoto et al. 2011)	
積分時間間隔	400 秒 (TL959)、600 秒 (TL319)	
数値拡散	4 次の線形水平拡散を渦度、発散、仮温度に適用。スポンジ層として 2 次の線形水平拡散を 30 hPa より上層で発散に適用。	
物理過程		
放射	長波	2 方向吸収近似 (Yabu 2013) による放射伝達、大気分子による吸収は 2 種類の k -分布法で評価 (Fu and Liou 1992; Chou et al. 2001)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップ (Geleyn and Hollingsworth 1979) を仮定。光学特性は、水雲は Lindner and Li (2000)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
	短波	δ -Eddington 法による散乱・吸収計算 (Joseph et al. 1976; Coakley et al. 1983)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップを仮定し、Collins (2001) に基づく簡略化した独立カラム近似を適用。光学特性は、水雲は Dobbie et al. (1999)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
積雲対流	予測型クロージャを用いるスペクトル型マスマックススキーム (Arakawa and Schubert 1974; Moorthi and Suarez 1992; Randall and Pan 1993)。雲モデルには氷相を考慮した簡易な雲微物理過程を用いる。	
雲	確率密度関数に基づいた凝結スキーム (Smith 1990) を基本に、雲水から降水への変換や再蒸発、雪の融解などの単純化した雲微物理過程、及び雲水と雪の落下スキームを含む。また、層積雲に関する診断的スキーム (Kawai and Inoue 2006) を使用。	
境界層	乱流エネルギークロージャ型 (Mellor and Yamada 1974, 1982) と K クロージャ型 (Han and Pan 2011) のハイブリッドスキーム。	
地形性抵抗	Lott and Miller (1997) のスキームに Wells and Vosper (2010) 及び Vosper (2015) に基づく改良を加えたもの。Beljaars et al. (2004) のスキームにより乱流地形抵抗を扱う。	
非地形性重力波	緯度依存性を持つ定数励起源によるスペクトルパラメタリゼーション (Scinocca 2003)。	
地表面	Monin-Obukhov 相似則に基づくバルク式、安定度関数は Beljaars and Holtslag (1991) を用いる。開水面と海水面は Best et al. (2004) の手法により混在格子として扱う。	
陸面	植生	Sellers et al. (1986) によるスキームを改良した手法でモデル化。
	積雪	体積、密度、アルベド、温度等の変化を予測。部分積雪を扱う。
	土壌	熱伝導はフーリエの法則に従い、水分の移動及び凍結・融解が考慮される。
海水	体積・形状・密度不変で物性が一律の熱伝導体として扱う。内部の熱伝導はフーリエの法則に従い、表面では放射と乱流フラックスの上部境界条件、及び融解を考慮する。	
化学過程	成層圏での簡易な診断型メタン酸化及び光乖離スキーム (Untch and Simmons 1999)。	
海面水温	時間発展は、全球海面水温解析値の年間偏差を、予測時間により季節変動する気候値に加える。	
海水分布	時間発展は、南北半球ごとの全球海水密接度解析値の海面面積年間偏差を維持するように、海水密接度の初期偏差固定予測値を気候値で修正する手法で扱う。	

参考文献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674–701.
- Beljaars, A., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1327–1347.
- Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.
- Best, M. J., A. C. M. Beljaars, J. Polcher, and P. Viterbo, 2004: A proposed structure for coupling tiled surfaces with the planetary boundary layer. *J. Hydr. Meteorol.*, **5**, 1271–1278.
- Chou, M.-D., M. J. Suarez, X.-Z. Liang, and M. M.-H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *Technical report series on global modeling and data assimilation, Vol. 19, NASA Goddard Space Flight Center*, 56pp.
- Coakley, J. A., R. D. Cess, and F. B. Yurevich, 1983: The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: a parameterization for climate models. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 116–138.
- Collins, W. D., 2001: Parameterization of Generalized Cloud Overlap for Radiative Calculations in General Circulation Models. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3224–3242.
- de Rosnay, P., M. Drusch, D. Vasiljevic, G. Balsamo, C. Albergel, and L. Isaksen, 2012: A simplified Extended Kalman Filter for the global operational soil moisture analysis at ECMWF. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 1199–1213.
- Dobbie, J. S., J. Li., and P. Chýlek, 1999: Two-and four-stream optical properties for water clouds and solar wavelengths. *J. Geophys. Res.*, **104**, 2067–2079.
- Ebert, E. E. and J. A. Curry, 1992: A parameterization of ice cloud optical properties for climate models. *J. Geophys. Res.*, **97**, 3831–3836.
- Foster, D. J. and R. D. Davy, 1988: *Global Snow Depth Climatology. Tech. Rep. USAF-ETAC/TN-88/006*. Scott Air Force Base, Illinois, 48 pp.
- Fu, Q. and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139–2156.
- Geleyn, J.-F. and A. Hollingsworth, 1979: An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contrib. Atmos. Phys.*, **52**, 1–16.
- Han, J. and H.-L. Pan, 2011: Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*, **26**, 520–533.
- 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.
- 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.
- 石田純一, 2017: 数値予報システム開発のプロセス. 数値予報課報告・別冊第63号, 気象庁予報部, 4–10.
- JMA, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 229 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>).
- Joseph, J. H., W. J. Wiscombe, and J. A. Weinman, 1976: The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2452–2459.
- Kadowaki, T., Y. Ota, and S. Yokota, 2020: Introduction of a new hybrid data assimilation system for the JMA Global Spectral Model. *WGNE. Res. Activ. Earth. Sys. Modell.*, **50**, 1.9–1.10.
- Kawai, H. and T. Inoue, 2006: A Simple Parameterization Scheme for Subtropical Marine Stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17–20.
- 気象庁, 2021a: 全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化. 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, 77–84.
- 気象庁, 2021b: 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2年), 気象庁数値予報開発センター, 85–92.
- Lindner, T. H. and J. Li, 2000: Parameterization of the Optical Properties for Water Clouds in the Infrared. *J. Climate*, **13**, 1797–1805.
- 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.
- Mahfouf, J.-F., 1991: Analysis of Soil Moisture from Near-Surface Parameters: A Feasibility Study. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 1534–1547.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development

of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.

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

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

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

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

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

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

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

氏家将志, 2019: 鉛直層増強. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 16–24.

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

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

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

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

Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorologi-

cal Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) –Model Description–. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **64**, 1–83.

3.3 全球アンサンブル予報システムの改良

3.3.1 はじめに

2021年3月30日に全球アンサンブル予報システム(GEPS: Global Ensemble Prediction System)の改良を行い、確率予測情報などを改善した。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。過去に数値予報課が開発していた週間・台風EPS及び気候情報課が開発していた1か月EPSを統合したシステムで、2017年1月19日に週間・台風EPSを置き換える形で運用が開始され、同年3月23日には1か月先までの延長予報を開始した(山口2017; 新保2017)。

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おり、水平分解能は18日先までの予測ではTL479(約40km)¹、その後はTL319(約55km)であり、鉛直層はGSMと同様の100層で最上層が0.01 hPaである。また、摂動なしのアンサンブルメンバー(コントロールラン)の初期値には、全球速報解析により作成される解析値を解像度変換したものをを用いている。

アンサンブルメンバー数は、11日先までの予測では1初期時刻あたり27メンバー、その後は13メンバーである。また、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²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。

また、限られた計算機資源で海洋の変動を考慮するため、季節アンサンブル予報システム(CPS2、第2.9節)で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、予測3・4週目の熱帯を中心に精度向上を図った。

アンサンブル予報システムの予測精度を向上するためには、予報モデルと初期値の精度を高めると同時に、両者の不確実性を適切に捉える摂動を作成することが必要である。また、アンサンブルメンバー数を増やすことで、より精度の良い確率予測情報を作成することが可

¹ 水平分解能の表記は、はじめのTLが三角形波数切断と線形格子を用いていることを意味し、その後の数字は切断波数を表す。

² SVを混ぜ合わせた26個(13個+逆符号の13個)の摂動と、LETKFのアンサンブルから抽出した26個の摂動を重みを付けて足し合わせて使用。

能となる。2021年3月30日に導入されたGEPS2103では、確率予測の精度やGSMによる決定論的予測との整合性の向上を目的として、アンサンブルメンバー数の増強と時間ずらし平均法(LAF法)の変更、初期摂動の改良、GEPSで使用する予報モデルの最新のGSM(GSM2103、第3.2節)への更新を行った³。

3.3.2 変更の概要

GEPS2103の変更の概要を説明する。数値予報開発センター年報(令和2年)第2.3.3項(気象庁2021a)において、改良項目の一部について個別の影響評価結果を報告しているため、そちらも参照されたい。

アンサンブルメンバー数の増強とLAF法の変更

GEPS2103では、1初期時刻あたりのメンバー数を11日先までの予測では27から51に、そこから18日先までの予測では13から51に、さらに34日先までの予測では13から25にそれぞれ増強した。また、これまでは11日より先の予測は00,12UTC初期時刻⁴に対して実行され、予報作業においては両初期時刻の予測結果をLAF法により組み合わせて使用⁵してきたが、GEPS2103においては12UTC初期時刻に対してのみ予測を実行するよう変更した。

これらの変更により、18日先までの予測については、メンバー数を増強することでアンサンブル平均や確率予測情報の精度が向上し、また、アンサンブル予報が実況を捕捉できない事例を減らす効果も期待できる。また、11日より先の予測については、LAF法の変更により最新初期時刻の予測結果が多く使用されることになる⁶ため、精度向上が期待できる。

初期摂動の改良

北半球及び南半球の初期摂動作成に使用するSVの数を現在の最大25個から50個に増強した。これにより、より多くの成長モードを初期摂動において考慮できるようになり、確率的情報としての精度が向上する。また、50hPaより上層を、SV計算において摂動の大きさを測るために用いるノルムの評価対象外とした。これにより、対流圏に影響を与えるような成長モードにより重点を置いた初期摂動を作成できるようになる。その他、影響が小さい改良として、空間相関に基づくSV選別処理の廃止、計算されたSVを合成して初期摂動を作成する際に用いるバリエーションミニマム法の収束判定条件緩和、SV計算で使用するモデル面の定義方法を最新GSMの方法に合わせる、SST摂動作成の

³ GEPSの全体像についてはJMA(2019)を参照されたい。

⁴ 18日より先の予測については火曜日と水曜日のみ。

⁵ 作業スケジュール上、12UTC初期時刻の予測資料が最新。

⁶ 18日先までの予測については最新12UTC初期時刻の予測結果のみが使用されるようになるためLAF法は使用されない。その先については火曜日00UTCの11メンバー、同12UTC及び水曜日00,12UTCの各13メンバーによるLAFから、火・水曜日12UTCの各25メンバーによるLAFとなる。

メンバー数増強への対応、SV 計算用モデルにおいて GSM2103 で新規導入された土壌水分解析結果を利用する、SV 摂動に対する振幅調整といった改良も実施した。

予報モデルの更新

GEPS2103 では予報モデルを GSM2103 へと更新した。GEPS2103 においても引き続き全球数値予報システムと GEPS とで予報モデルのバージョンが揃うことになり、適切な GSM 予測の不確実性情報を提供できる。予報モデルの改良内容としては鉛直層数の 100 層から 128 層への増強のみであるが、第 3.2 節で示した全球数値予報システムの更新にはモデルだけでなく初期値の精度向上も含まれ、GEPS でこの初期値を使用することによっても予測精度は向上する。

3.3.3 予測精度の検証

(1) 実験設定

週間天気予測、台風進路予測、2 週目以降の予測それぞれの予測精度の変化を確認するために、次の 4 種の比較実験を実施した。

週間天気予測の評価のための実験

GSM2103 における CNTL 実験（第 3.2 節）で作成された初期値⁷を入力として、GEPS2003（Yamaguchi et al. (2020)、気象庁 (2021b)）を実行したものを対照実験とする。同 TEST 実験で作成された初期値を入力として、GEPS2103 を実行したものをテスト実験とする。以降、対照実験を CNTL 実験、テスト実験を TEST 実験と呼ぶ。夏期間は 2019 年 6 月 20 日～2019 年 10 月 21 日、冬期間は 2019 年 11 月 20 日～2020 年 3 月 11 日の 00,12UTC 初期値を対象に、11 日先まで 51 メンバーの予測を実行した。主要要素の確率予測と日本の降水予測についてはこの実験の結果を示す。

台風進路予測の評価のための実験

2019 年台風第 3 号から 2020 年台風第 13 号⁸を対象として、00,06,12,18UTC 初期値について 5.5 日先まで 51 メンバーの予測を実行した。前述の実験期間に含まれる事例については、00,12UTC 初期値に追加する形で 06,18UTC 初期値の予測を実行した。その他の期間の事例については、追加期間の TEST 実験は GSM2103 による解析予報サイクル実験⁹で作成された初期値を入力として GEPS2103 を実行した。CNTL 実験は 2019 年 10 月 22 日から同年 11 月 20 日までの期間については GEPS2003 を現業システムへ導入するための評価に使用した結果を用い、2020 年 3 月 12 日以降の期間については当時の現業システムで作成された結果¹⁰を入

⁷ 速報解析による初期値。

⁸ 2019 年 6 月 20 日 00UTC から 2020 年 10 月 1 日 18UTC までの期間の台風事例。

⁹ サイクル解析のみ実施。

¹⁰ 初期値はサイクル解析の結果を使用し、初期摂動はその初期値を用いて再計算するのではなく現業システムで計算され

力として GEPS2003 を実行した。追加した期間の評価には 2021 年 3 月の更新内容以外の影響も含まれることとなるが、その程度は小さい。台風進路予測についてはこの実験の結果を示す。

1 か月先までの確率予測とメンバー数増強・LAF 法変更の評価のための実験

GEPS2103 の予測精度を評価するにあたり、気候場の年々変動の影響も考慮するため、過去 30 年（1981～2010 年）に対して、毎月 2 回（初期日は 15 日と月末）、JRA-55(Kobayashi et al. 2015) を初期値として 40 日予測を行う。これを再予報実験という。再予報実験において、2 段階 SST 法で用いる CPS2 の SST 予測値は、同じ期間の CPS2 による再予報で作成されたものである。また、LETKF による長期間の解析予報サイクルを実行することは計算機資源の観点で困難であることから、LETKF の代わりに Evolved SV（SV の評価時間分だけ過去（熱帯では 24 時間前、北半球と南半球では 48 時間前）に求めた SV を現在まで線形成長させたもの¹¹）で摂動を作成した。GEPS2003 に対して、同じ仕様で実行したものを対照実験とする。通常の再予報実験は 12UTC 初期値に対して 13 メンバーで実行するが、今回はアンサンブルメンバー数の増強と LAF 法の変更をあわせて評価するため、2014～2018 年に対し、メンバー構成を現業相当に揃えての評価も実施した。TEST 実験では 12UTC 初期値に対して 2 週目までは 51 メンバー、3・4 週目は 25 メンバー× 2LAF で実行し、評価した。CNTL 実験では 00UTC と 12UTC 初期値に対して 4 週目まで 13 メンバー× 4LAF で実行し、2 週目までは 26 メンバー、3・4 週目は 50 メンバーで評価した¹²。

(2) 主要要素の確率予測

図 3.3.1 に夏期間について 11 日先までの予報時間ごとの CRPS¹³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。熱帯 500 hPa 高度場は 4 日先以降の予測で悪化しているが、同様の精度悪化は GSM2103 の検証結果においても確認されており、初期値やモデル更新の特性変化が GEPS の検証結果にも表れたと考えている。以上述べたことについては、冬実験についても同様である（図略）。改善については、アンサンブルメンバー数の増強が最も寄与している。

た結果をそのまま使用。

¹¹ LETKF による摂動の十分な代替となる保証はないが、予報初期数日を除けば予測精度に大きな違いはない（金浜 2017）。

¹² GEPS2003 を用いた 2 週目までの予報は毎日実行する 2LAF の計 26 メンバーを、3・4 週目の予報は週 2 日実行する 4LAF の計 50 メンバーを用いているため。

¹³ Continuous Ranked Probability Score の略で、閾値 t 以下となる確率予測に対するブライアスコアを $\int_{-\infty}^{\infty} dt$ で積分したものの。

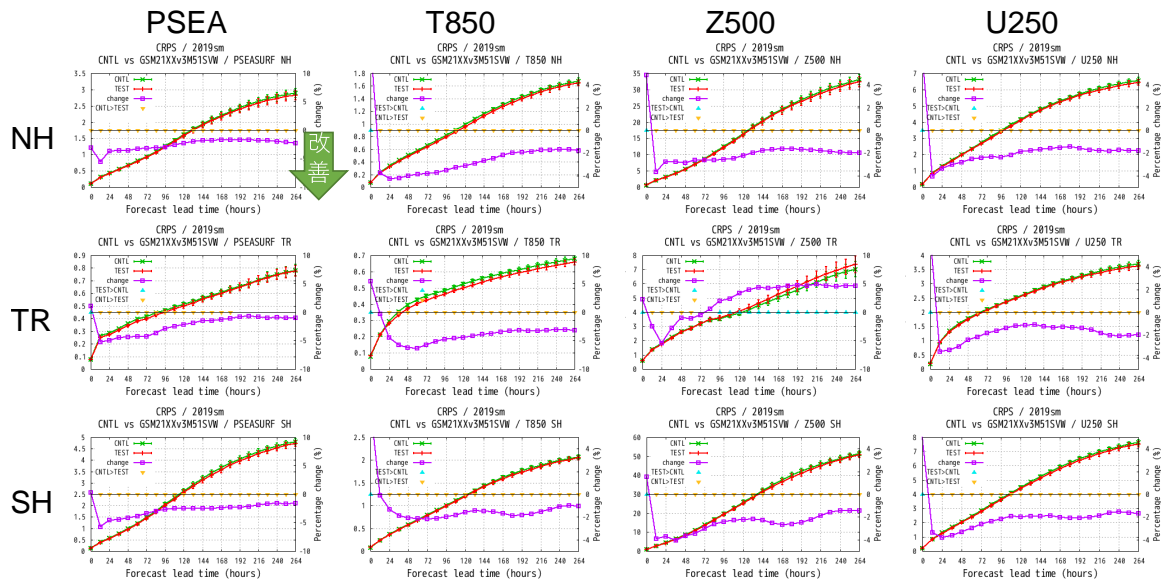


図 3.3.1 夏期間における、主要要素に対する領域別のCRPS。要素は左から順に海面更正気圧 [hPa]、850hPa 気温 [K]、500 hPa 高度場 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 ((TEST-CNTL)/CNTL[%]、右縦軸)。差に統計的に有意性がある場合に ▽(CNTL>TEST) ないし △(TEST>CNTL) をプロットしている。

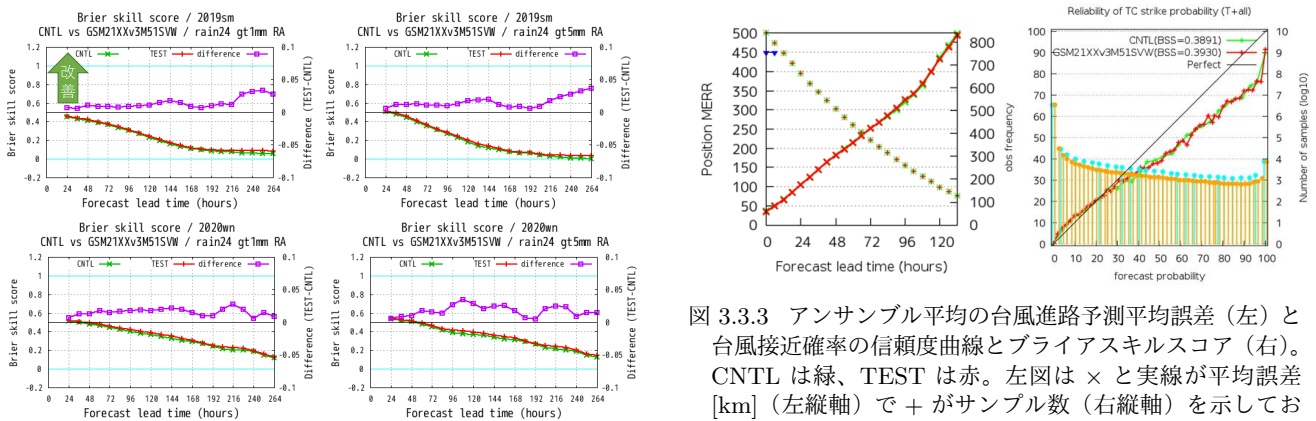


図 3.3.2 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は夏期間、下段は冬期間。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

図 3.3.3 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 (該当なしのため描画なし) 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、ブライアスキルスコアを凡例中の「BSS=」以降に示す。

(3) 日本の降水予測

図 3.3.2 に日本の降水予測について解析雨量に対して検証した結果を示す。ブライアスキルスコア (BSS:Brier Skill Score) は 1 mm/24hr 及び 5 mm/24hr の閾値について、夏期間・冬期間共に改善傾向である。この改善にも、アンサンブルメンバー数の増強が最も寄与している。

(4) 台風進路予測

図 3.3.3 に予報時間ごとのアンサンブル平均台風進路予測誤差と、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。また、台風接近確率の BSS はほぼ中立であり、信頼度曲線や予測頻度に大きな変化はなかった。

また、アンサンブルメンバー数の増強により、実際の進路をより捕捉できるようになった事例が確認された。図 3.3.4 の上段を見ると、CNTL ではベストトラックを捕捉できていないが、TEST ではわずかに捕捉できている。また、下段を見ると、CNTL の予測は分布に偏りがあって中心付近に隙間があり、実況はその間を進んでいる一方、TEST の予測ではその隙間が埋められている。

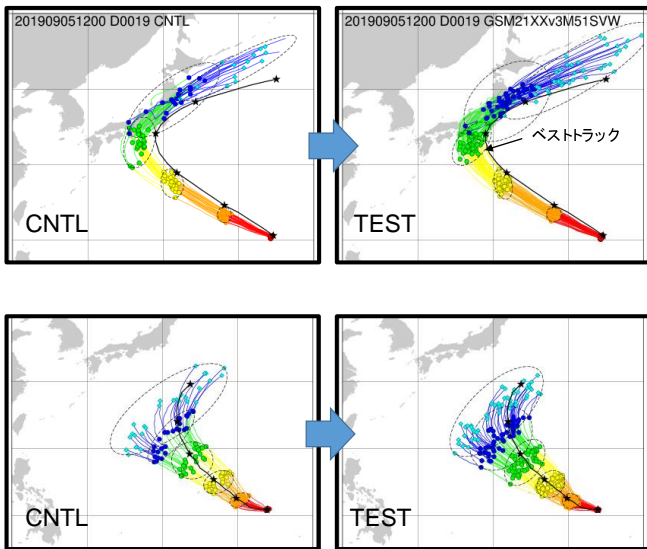


図 3.3.4 実況台風進路の捕捉状況が改善した事例。黒はベストトラック、色は各メンバーの進路予測。左はCNTL、右はTESTによる予測結果で、上段は2019年台風第15号を対象とした2019年9月5日12UTC初期時刻の予測。下段は2019年台風第21号を対象とした2019年10月19日12UTC初期時刻の予測。

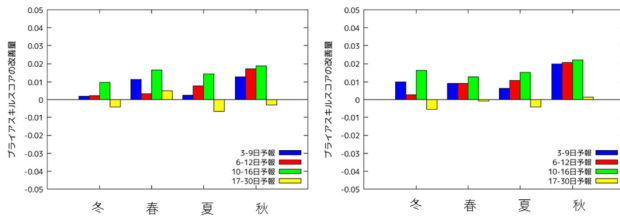


図 3.3.5 GEPS のメンバー構成の変更による季節別のブライアスキルスコアの改善量。左図は北半球の500hPa ジオポテンシャル高度、右図は同850hPa 気温の確率予測についてのブライアスキルスコア改善量を示す。青色は3~9日予報、赤色は6~12日予報、緑色は10~16日予報、黄色は17~30日予報のスコア。

(5) 季節別の確率予測 (1か月先まで)

図 3.3.5 に、確率予測についてメンバー構成の変更による季節別の効果を示す。年間を通じて、2週目(10~16日予報)までのBSS¹⁴に改善が見られる。3週目以降は利用する火曜日と水曜日の2日間で構成する全メンバー数が50のままで変わらないため、季節や要素によって効果が異なり、平均すると予測精度は変更前と同等と考えられる。

3.3.4 おわりに

GEPS について、予報モデルを更新すると共に、アンサンブルメンバー数の増強とLAF法の変更、初期摂動の改良を行い、2021年3月30日に現業システムへ導入した。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、アンサンブルメンバー数の増強により実際の進路をより捕捉できるようになった事例が確認された。

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.

JMA, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research.* Japan, 229 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>).

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, 2021a: 全球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, 93–96.

気象庁, 2021b: 全球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, 42–47.

Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.

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.

Yamaguchi, H., M. Ikegami, K. Ochi, Y. Ota, R. Sekiguchi, and T. Takakura, 2020: Upgrade of JMA's Global Ensemble Prediction System. *WGNE. Res. Activ. Earth. Sys. Modell.*, **50**, 6.17–6.18.

¹⁴ 季節予報で用いる3つの階級「高い」「平年並み」「低い」の各事象を全て集計したスコア。

3.4 局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良

3.4.1 はじめに

局地数値予報システム¹は、時空間スケールの細かな現象の予測を目的に水平解像度 2 km の予報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基盤モデルと位置付けられている。本システムは 2012 年 8 月に、1 日 8 回、東日本を中心とした領域の 9 時間予報を行う仕様で本運用を開始した(永戸ほか 2012)。2013 年 5 月に予報領域を日本全域に拡張するとともに 1 日 24 回(毎正時初期値)の運用に高頻度化した。2015 年 1 月に JMA-NHM(気象庁予報部 2003)に基づく予報システムから、局地解析を asuca-Var(幾田 2014)、局地予報を asuca(気象庁予報部 2014; JMA 2019)へとそれぞれ置き換え、2019 年 3 月に予測期間を 10 時間に延長した。その後、局地モデルの鉛直層数を 58 層から 76 層に増強するとともに、予測精度向上を目的とした物理過程の改良を行い、2021 年 3 月に現業化された²。本節では、2021 年 3 月に現業化された局地モデル更新の概要と、改良による予測特性の変化について述べる。

3.4.2 局地モデル改良の概要

前項で述べた通り、2021 年 3 月の局地モデル更新で鉛直層数を 58 層から 76 層に増強した。境界値を提供するメソモデルはこれまでも 76 層の鉛直層数で運用していたが、本更新では鉛直層数のみならずモデル上端高度および鉛直層間隔をメソモデルと局地モデルで揃えることで、モデル本体と境界値との整合性がより高まることになる³。従来の鉛直層配置と比べると特に下層の鉛直解像度が上がり、最下層のフルレベル(格子中心)の高度は 20 m から 10 m となる。このことから、境界層や地表面からのフラックス診断で精度が向上することが期待される。

本更新で適用された物理過程の改良項目を以下に挙げる。これらの改良は 2020 年 3 月のメソモデルで適用された項目と新規に開発して導入した項目の両者を含む。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 2 年)(気象庁 2021b)を参照されたい。

- 放射過程の氷雲量診断を Wilson and Ballard (1999)の方法に変更
- サブグリッド輸送表現に Leonard 項(Moeng et al. 2010)を導入
- 雪格子における熱伝導率の配置変更

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。

² 局地解析は従来より鉛直層数 48 層で運用しており本更新に伴う鉛直層数の変更はない。

³ 厳密にはメソモデルと局地モデルはそれぞれ水平解像度に応じた地形を用いるため、鉛直格子点が定義される高度は地形の差に起因した違いが生じる。

- 森林における格子内積雪被覆率の変更
- 有限体積法に適合した接地境界層フラックス定式化
- 接地境界層における安定時の普遍関数変更
- 地表面パラメータ(熱粗度・アルベド)の更新
- 蒸発散の計算に植生被覆率を考慮

3.4.3 本改良による予測特性の変化

本項では、改良した局地モデルの予測特性の変化を述べる。以下では、改良前のルーチン相当の設定の実験をコントロール(CNTL)とし、改良を適用した現ルーチン設定の実験をテスト(TEST)と記す。比較実験は、2021 年 3 月末時点のルーチン設定とした全球モデルおよびメソモデルから作成された初期値・境界値を用いて実施した。統計検証期間は、夏期間・冬期間それぞれ 2019 年 8 月 21 日-31 日、2020 年 1 月 11 日-21 日で、検証にはルーチンと同様に毎時初期値で実行した結果を用いた。TEST において、親モデルに 2021 年 3 月に更新した全球モデルを用いた点が数値予報開発センター年報(令和 2 年)で報告した実験と異なっており、2022 年 1 月時点のルーチンに準拠した構成となっている。また、検証期間も異なっている。

本改良では、下層の鉛直解像度が向上したことに加え地表面過程を見直したことにより、地上気象要素に改善が見られた。図 3.4.1 に夏期間における地上風速の対地上観測での平均誤差と二乗平均平方根誤差(RMSE)を示す。図から分かるように、CNTL では全般的に地上風速は正バイアスとなっており、特に夜間でその傾向が強い。TEST では CNTL と比べて風速が弱められる傾向にあることが分かる。その結果、夜間の正バイアスは軽減しており、日中は負バイアスとなるものの RMSE は全対象時刻で改善したことが確認できる。改善幅の地理的分布を見るために、対象時刻 15 UTC(日本時間で 0 時)の RMSE の CNTL からの観測地点ごとの差を右図に示す。改善幅の地域差はそれほど小さくなく、全般的に改善が見られる。最下層のフルレベルの高度が 20 m から 10 m となったことで、10 m 風速の診断は格子平均値から格子点値を推定するだけでよく、推定の不確実性が小さくなった。また、地表面過程の見直しにより最下層の安定度が変わったことも改善に寄与したものと思われる。

図 3.4.2 に冬期間の地上気温の対地上観測検証結果を示す。冬期間の地上気温は夜間に顕著な負バイアスが現れることがこれまで問題となっていた。これは、安定成層時の地上への顕熱フラックスが過大で、大気最下層が地表面の冷却の影響を受けすぎていることが主な原因と考えられる。接地境界層における安定時の普遍関数を Beljaars and Holtslag (1991) から Gryanik et al. (2020) に変更したことで、強安定時の地上への顕熱フラックスが抑制された結果、TEST では夜間負バイアスが大幅に解消された。RMSE でも夜間の地上気温が改善されることが見てとれる。改善幅の地域分

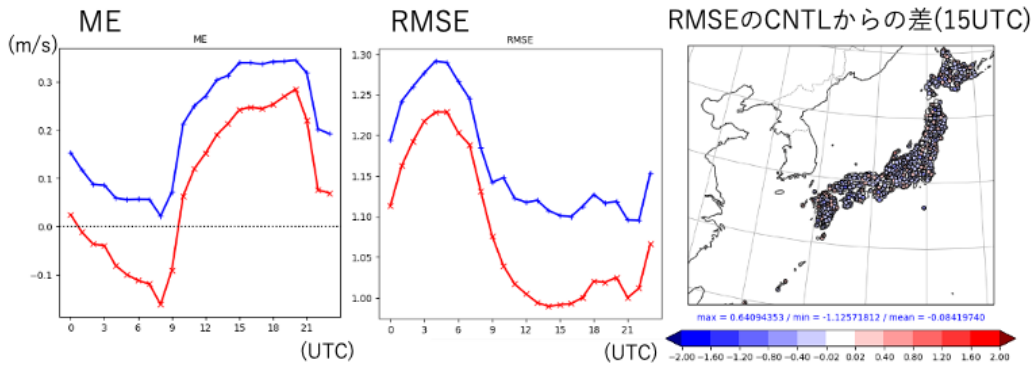


図 3.4.1 夏期間の地上風速（10 m 風速）の地上観測に対する平均誤差（左図）、二乗平均平方根誤差（中図）。横軸は対象時刻（UTC）となっており、青線、赤線がそれぞれ CNTL、TEST の検証結果に対応する。右図は対象時刻 15UTC での TEST の二乗平均平方根誤差の CNTL からの差。

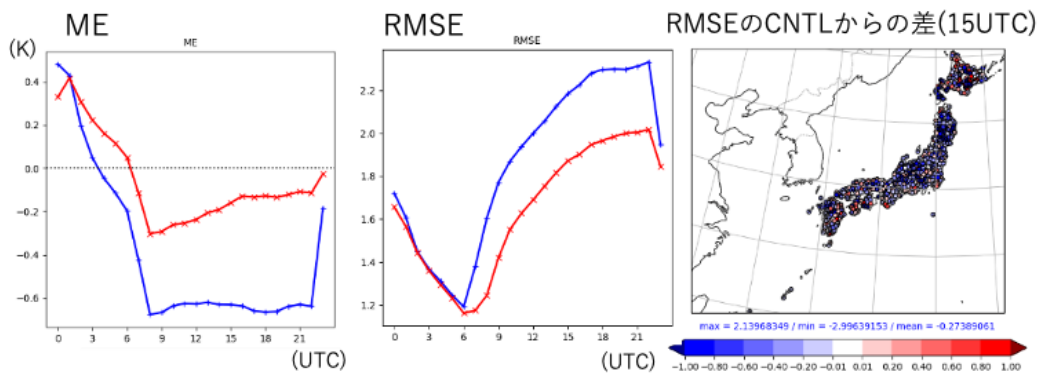


図 3.4.2 冬期間の地上気温（1.5 m 気温）の地上観測に対する平均誤差（左図）、二乗平均平方根誤差（中図）。線種および横軸は図 3.4.1 と同様。右図は対象時刻 15UTC での TEST の二乗平均平方根誤差の CNTL からの差。

布からは、沿岸部にわずかに悪化する地点が見られるもののほとんどの地点で改善することが確認できる。

大気鉛直プロファイルの改善点として、冬期間の気温プロファイルの改善が挙げられる。図 3.4.3 は冬期間の 925 hPa 面気温の CNTL の対ラジオゾンデ平均誤差と鉛直プロファイルの TEST と CNTL の RMSE の差である。鉛直プロファイルから分かる通り、全層で RMSE が改善しており特に 925 hPa 面と 500 hPa 面より上層で改善幅が顕著である。図には示さないが、2021 年 3 月更新前の全球モデルを用いた比較実験から、中上層の改善は全球モデルの更新も改善の半分程度寄与しており、925hPa 面の改善は主に局地モデルの改良によるものであることを確認している。これまで、925hPa 面の気温は日本域の多くの地点で負バイアスがあることが分かっており（左図）、地表面アルベドを気候値に基づいて更新したことなどが負バイアスの軽減に寄与したものと考えられる（中図）。

更新前の局地モデルでは、雲物理と放射過程で用いる氷雲量診断手法が異なっており、放射で用いる雲氷量が過剰となる問題があった。そこで、放射過程の氷雲量診断を雲物理と同様に Wilson and Ballard (1999) による方法を適用するよう修正した。放射過程の氷雲

量診断を見直したことによる予測特性の変化の例として、統計検証期間とは異なる事例となるが、上層雲量の予測結果と大気上端での外向き長波放射 (OLR) の分布の一例を図 3.4.4 に示す。図から分かるように、TEST では上層雲量が CNTL よりも減少する。これは放射過程において上層で過剰に診断されていた氷雲が減少したことに起因するものである。OLR の比較においても TEST の方が雲域で大きな値を持っており、衛星プロダクトの一つである CERES-SSF⁴の結果とより整合する。観測と比較すると TEST でも OLR の過剰バイアスは依然残っており、引き続き雲物理をはじめとした物理過程の改良が必要である。

図 3.4.5 に夏期間を対象とした 1 時間降水量の閾値別検証結果を示す。エクイタブルスレットスコア (ETS) を見ると、統計的に有意ではないものの弱雨を中心に改善の傾向が確認できる。見逃し率に大きな変化は見られない一方、弱雨の空振り率が低下しており、このことが ETS の改善に寄与する。バイアスコアは閾値 10 mm/h 以上で CNTL/TEST とともに 1 を超えており強雨バイアスがある。TEST では閾値 10 mm/h から

⁴ Cloud and Earth's Radiation Energy System (CERES) Single Scanner Footprint (SSF)

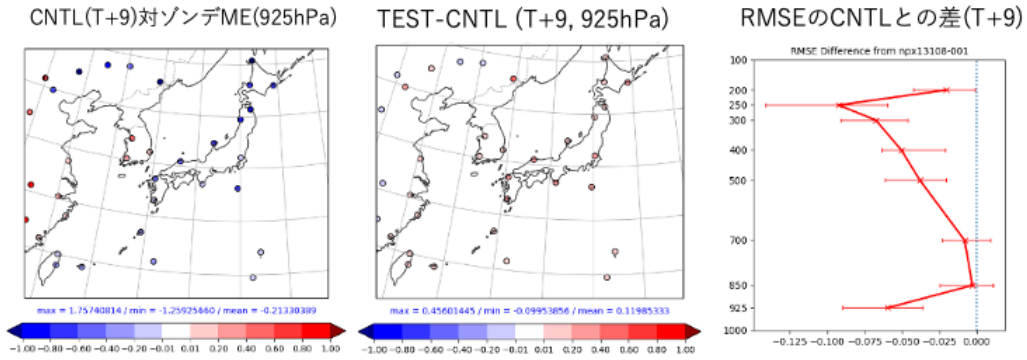


図 3.4.3 冬期間を対象とした 925 hPa 面気温の CNTL の対ラジオゾンデ平均誤差 (左図) および TEST の CNTL からの差 (中図)。右図は対ラジオゾンデ検証での二乗平均平方根誤差の TEST の CNTL からの差を表す。

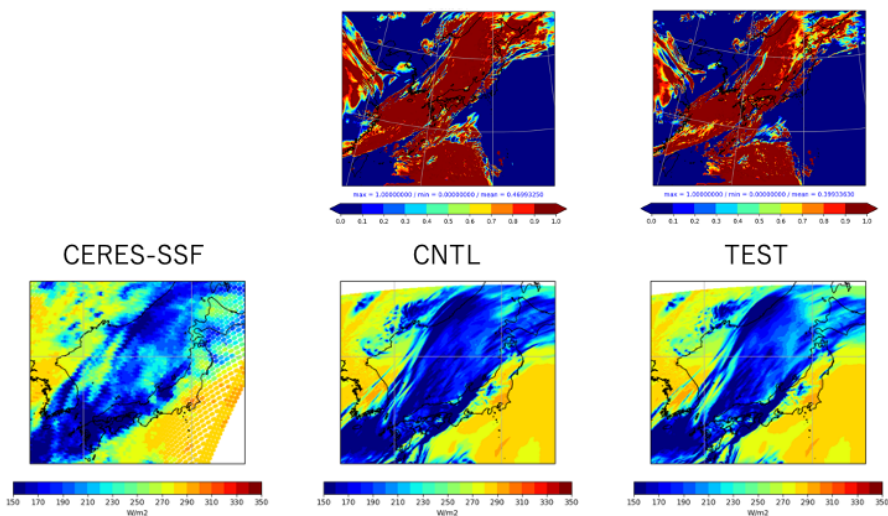


図 3.4.4 上層雲量の予測結果 (上図) と大気上端での外向き長波放射 (OLR) の分布 (下図) の一例。対象時刻は 2018 年 6 月 29 日 12 時で FT=6 の予測結果を示している。左図は CERES-SSF 衛星プロダクトによる同時刻の結果。

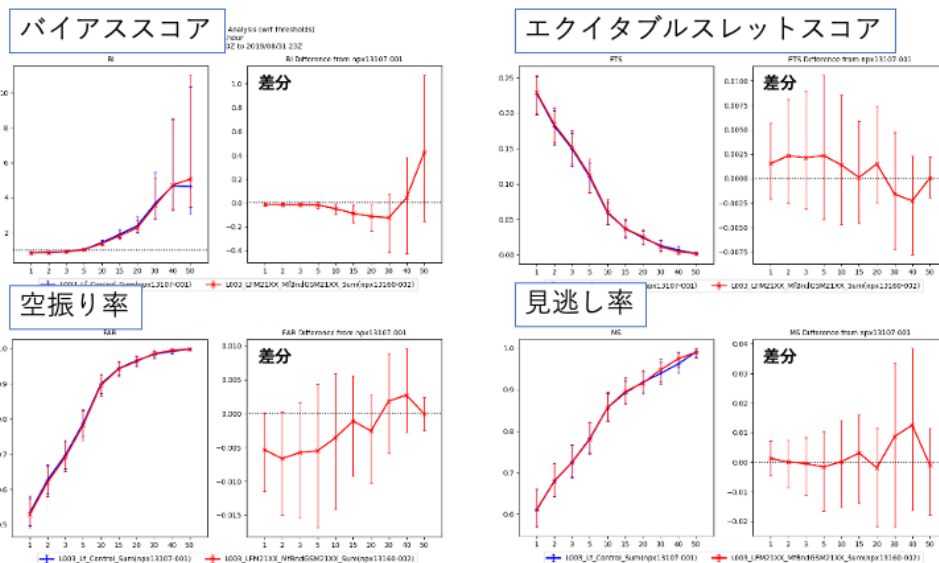


図 3.4.5 夏期間の 1 時間降水量の閾値別統計検証結果と TEST の CNTL からの差。左上: バイアスコア、右上: エクイタブルスコア、左下: 空振り率、右下: 見逃し率をそれぞれ表す。検証格子は 10km としている。線種は図 3.4.1 と同様。

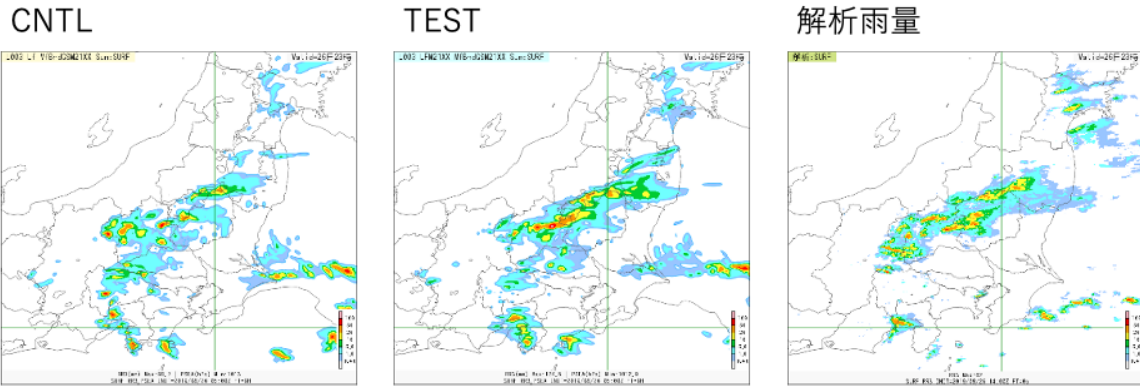


図 3.4.6 不安定降水の事例。対象時刻は 2019 年 8 月 26 日 23 時 (JST)、FT=9 の前 3 時間積算降水量で、左：CNTL、中央：TEST、右：解析雨量をそれぞれ示す。

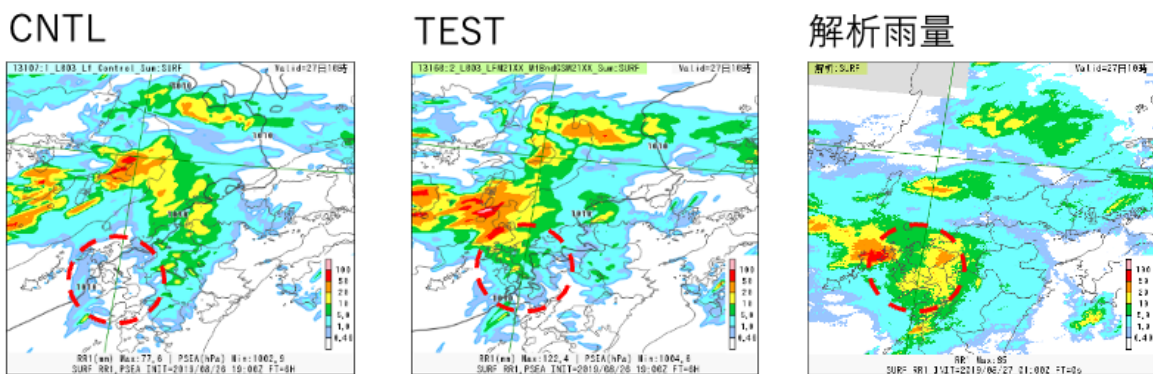


図 3.4.7 対象時刻 2019 年 8 月 27 日 10 時 (JST)、FT=6 の前 1 時間積算降水量。各図は図 3.4.6 と同様。

30 mm/h の範囲で CNTL よりもバイアスコアが小さくなっており改善が見られる。

次に、降水量の面的分布の特性変化について事例を紹介する。不安定降水の事例として、対象時刻 2019 年 8 月 26 日 23 時 (JST) の前 3 時間積算降水量の予測結果を図 3.4.6 に示す。CNTL (左図) では、解析雨量では見られないような狭い領域に集中した降水域がところどころに現れており、そこでは解析雨量よりも強い降水となっている。一方、TEST ではそのような集中した降水が抑えられ、降水域の広がりもより解析雨量と対応する。この特性の変化は、主に境界層・乱流過程において Leonard 項を導入したことによる鉛直輸送高度化の効果によるものと考えられる。数値予報開発センター年報 (令和 2 年) で報告した通り、Leonard 項は格子スケールの上昇流の周辺で顕熱・潜熱を上方に輸送するように作用する。格子スケールの上昇流に加え Leonard 項が熱輸送を部分的に担うことにより、格子スケールの対流が過剰に発達する傾向が抑えられるようになったものと推測される。

降水分布の違いが現れた例として、図 3.4.7 に対象時刻 2019 年 8 月 27 日 10 時 (JST) における前 1 時間積算降水量の予測結果 (FT=6) を示す。観測雨量では長崎県を中心に強雨が観測されている。この事例では

CNTL/TEST とともに強雨域のピークが北から北東寄りにずれているものの、TEST では長崎県に見られる強雨域を部分的に捕捉したことが分かる。

最後に夏期間、冬期間それぞれの閾値別降水量の検証スコア、高層・地上気象要素の RMSE について変化有意性の統計検証結果を図 3.4.8 に示す。降水については、夏期間の FT=1 に改悪が見られるものの、それ以外では夏冬通して中立から改善傾向であった。高層検証は主に冬期間で改善した。先に見たように気温については全層で改善しており、中上層および 925 hPa 面で改善が顕著である。比湿や風速についても主に上層で改善したことが確認できる。地上気象要素については、下向き短波放射を除き改善しており、気温・比湿・風速のいずれも予測期間通して有意に改善した。本更新で下層の鉛直解像度が向上して最下層高度が下がったことや、地表面過程・接地境界層過程の改良が主に改善に寄与したと考えられる。

3.4.4 まとめ

2021 年 3 月に更新された局地数値予報システムでは、局地モデルの鉛直層を 76 層に増強するとともに、雲放射過程、積雲対流過程、境界層・乱流過程、および地表面過程等の物理過程を改良した。前ルーチンと

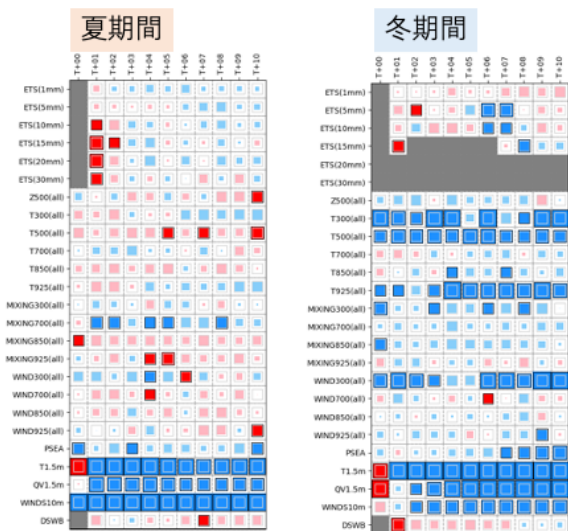


図 3.4.8 夏期間（左）、冬期間（右）の閾値別降水量の検証スコア、高層・地上気象要素の RMSE の変化有意性の統計検証結果。各行は統計検証要素、各列は予測時間に対応する。各統計検証要素は、ETS: 降水量のエクイタブルスコア（括弧内は降水量の閾値）、Z: ジオポテンシャル高度、MIXING(QV): 混合比、T: 気温、WIND: 風速、PSEA: 海面更正気圧、DSWB: 地上における下向き短波放射をそれぞれ表す。青が CNTL と比べて改善、赤が CNTL と比べて改悪を表しており、色付きの領域が各セルの内側の正方形以上の場合、95 パーセント信頼区間で統計的に有意であることを示す。

の比較実験により、地上気象要素や冬期間の高層プロファイルが改善し、不安定降水事例でしばしば見られていた格子スケールに集中した降水が緩和されることを確認した。数値予報開発センター年報（令和 2 年）では、前ルーチンの全球モデルを用いた実験結果を示したが、本節では 2021 年 3 月に現業化した全球モデルに基づく実験結果を示した。両者の比較において、局地モデル改良の効果としての予測特性の変化に本質的な差異は見られなかった。

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。更新した局地数値予報システムは、弱雨の予測精度や不安定降水の面的分布に降水特性の改善が見られるものの、集中豪雨の観点からは対流の発生の遅れや降水帯の停滞の表現が十分でないなど、線状降水帯の発生・維持に直接関わる課題も多い。線状降水帯の予測精度向上に資するため、物理過程の開発を継続的に実施することが重要である。また、将来的に局地モデルの予測期間を延長し、水平分解能を向上させる計画である。

参考文献

- Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.
- Gryanik, V. M., C. Lüpkes, A. Grachev, and D. Sidorenko, 2020: New Modified and Extended Stability Functions for the Stable Boundary Layer based on SHEBA and Parametrizations of Bulk Transfer Coefficients for Climate Models. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 2687–2716.
- 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.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194 pp.
- 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 pp.
- 気象庁予報部, 2019: メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 165 pp.
- 気象庁, 2021: 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 2 年）, 気象庁数値予報開発センター, 97–102.
- Moeng, C.-H., P. P. Sullivan, M. F. Khairoutdinov, and D. A. Randall, 2010: A Mixed Scheme for Subgrid-Scale Fluxes in Cloud-Resolving Models. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3692–3705.
- Wilson, D. R. and S. P. Ballard, 1999: A microphysically based precipitation scheme for the UK meteorological office unified model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1607–1636.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72–86.

3.5 日本域高潮モデルの台風ボーガス手法改善

3.5.1 概要

気象庁は、日本国内の高潮注意報・警報発表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。2021年4月には、数値予報開発センターにおいて、日本域高潮モデルで使用する台風ボーガス手法の改善の現業化を行った。以下では、開発内容について報告する。

3.5.2 日本域高潮モデルで使用する台風ボーガス手法の改善

日本域高潮モデルでは、予報時間内に台風が日本沿岸付近に接近すると予測される場合、MSMを大気外力とした高潮計算のほかに、熱帯低気圧情報を元に作成した台風ボーガスを用いた5通りの高潮計算を行っている。これら複数の予報結果は、台風進路予報の不確実性に伴う高潮予測の不確実性を評価するために用いられる。

高潮モデルでの従来の台風ボーガスは、Fujita (1952)のパラメトリックな気圧・風速分布を仮定しており、陸の影響による海上風の減衰を考慮していなかったため、湾内や内海での高潮の過大予測の原因となっていた。これを改善するために、Westerink et al. (2008)が提案した沿岸域での海上風減衰手法の利用を検討した。Westerink et al. (2008)の手法では、沿岸付近の各海格子にて、風向毎に風上側の陸面粗度長を重み付け平均し、それと海上の粗度長の比から沿岸付近での海上風速の減衰係数を計算する。この手法を応用する際の陸面粗度長としては、2019年の各月のメソ解析の結果を用いた。本手法を適用した高潮モデル実験結果では、期待通りこれまでの過大予測傾向が抑制され、空振り率が低減することが分かった(図略)。一方で捕捉率の低下も認められたため、原因を調査したところ、従来のパラメータ決定手法では強風が吹く範囲が小さめに評価され、台風中心から離れた領域で高潮が過小に予測されていたことが分かった。

この問題に対応するため、台風ボーガスで用いているFujita (1952)の式での台風の大きさを決定するパラメータ r_0 の決定手法の見直しを行った。従来のパラメータ決定法では、台風進行方向右側の風速が最大となる方向で、熱帯低気圧情報の暴風円半径(50 kt半径)で風速が50 ktとなるように r_0 を決定していたが、今回の改善では、(1)暴風円半径の円上に任意個の分点を取り、(2)各分点で「50kt半径で風速50kt」を満たすよう r_0 を決定し、(3)平均した r_0 を採用、とすように変更した。なお、台風に暴風域が存在せず熱帯低気圧情報に暴風円半径が指定されない場合は、同じ処理を強風円半径(30 kt半径)に対して行う。これにより、台風中心から離れた領域での風速が熱帯低気

圧情報や観測に整合するよう改善される(図3.5.1)。

3.5.3 精度検証結果

上記二点の改善策を適用した高潮モデルの精度を評価するため、2015~2018年の台風事例(全1303初期値)を対象に高潮モデル予測実験を行い、変更前の現業高潮モデルの予測結果との比較検証を行った。検証に用いた観測データは、気象庁、国土交通省港湾局、海上保安庁、国土地理院等が運用する潮位観測点の観測値である。図3.5.2で変更前の現業高潮モデル(図中橙線)と台風ボーガス改善を適用した高潮モデルの予測結果(図中緑線)を比較した。この検証では、台風進路の予測誤差等の影響をなるべく除いてボーガス改善の効果を確認するために、3~12時間予測を検証対象とした。図3.5.2では、ボーガス改善版で空振り率は有意に低下する一方で、捕捉率は改善前とほぼ同等か閾値によってはやや改善であることが確認できた。また、2018年台風第21号などの顕著な高潮事例で事例検証を行った結果でも、変更前の現業高潮モデルが実況より過大傾向であったのが、今回の2つの台風ボーガス改善手法を適用することで、実況に近づくことが確認できた(図3.5.3)。

3.5.4 まとめ

上に示したように、Westerink et al. (2008)の手法を適用し陸地の影響を考慮することで、内湾等でのこれまでの過大予測傾向を抑制して空振り率を低下させるとともに、新しい台風ボーガスパラメータ決定手法の採用により現行の高潮モデルと同水準の捕捉率を維持できることが確認できた。この結果を踏まえ、台風ボーガス手法改善の現業数値予報システムへの適用を2021年4月に行った。

参考文献

- Fujita, T., 1952: Pressure distribution within typhoon. *Geophys. Mag.*, **23**, 437-451.
- 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.
- Westerink, J. J., R. A. Luetlich, 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.

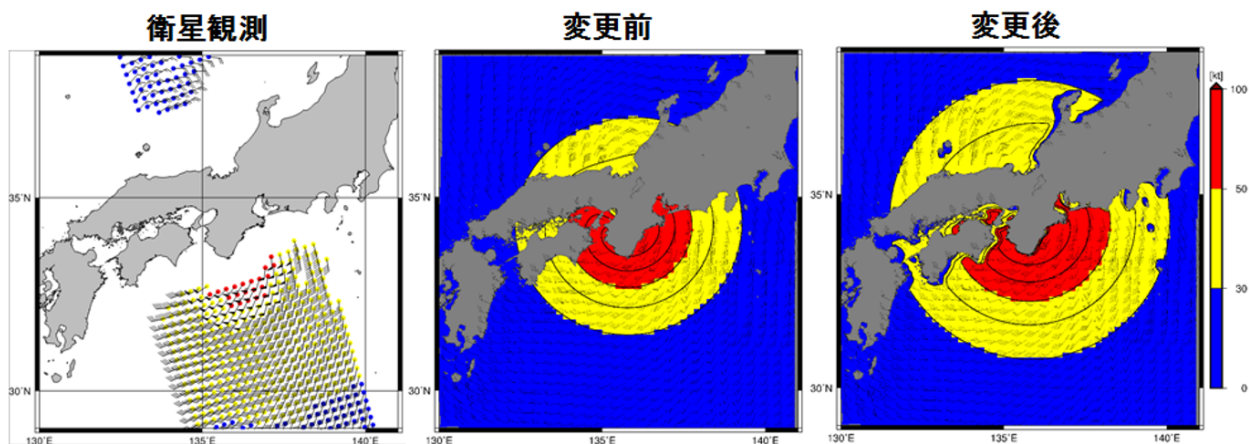


図 3.5.1 平成 30 年（2018 年）台風第 24 号通過時の 9 月 30 日 06 UTC 初期値の 6 時間予報の風分布。左図が衛星観測 (ASCAT)、中央図がボーガス改善前、右図が改善後の風分布を示す。中央図と右図の赤色は暴風域、黄色は強風域を示している。

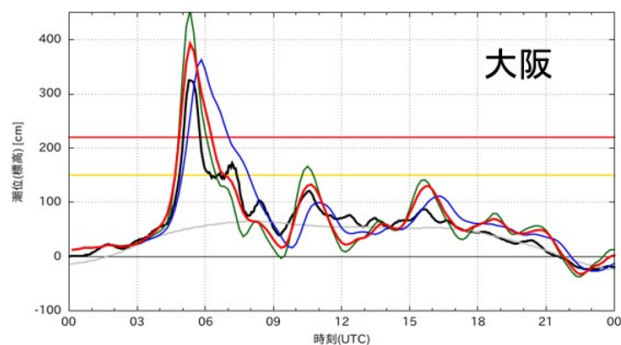
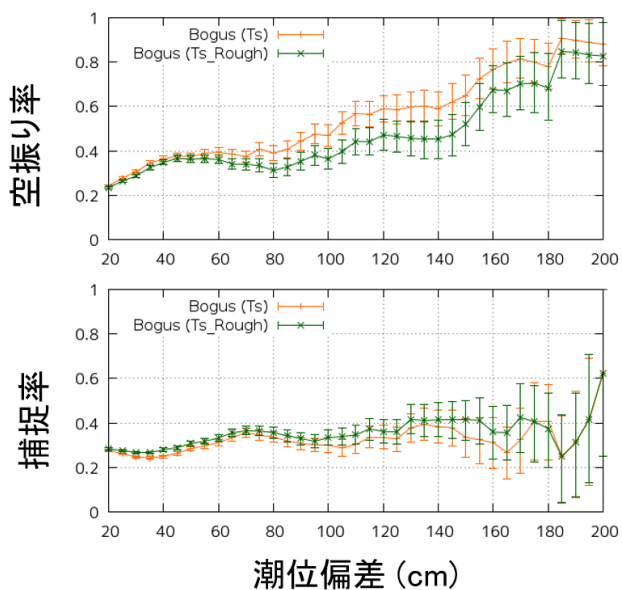


図 3.5.2 日本域高潮モデルでの 3~12 時間予報における空振り率（上段）、捕捉率（下段）。横軸は潮位偏差。図中、橙線は変更前の現業高潮モデル、緑線は台風ボーガス改善を適用した高潮モデルの予測スコアである。

図 3.5.3 平成 30 年（2018 年）台風第 21 号通過時 9 月 4 日 00 UTC 初期値の高潮モデル潮位時系列。横軸は時刻 (UTC)、縦軸は潮位を表す。対象地点は大阪。黒線：観測値、緑線：ボーガス改善前、赤線：ボーガス改善後（台風情報としてベストトラックを使用）、青線：ボーガス改善後（台風情報として 9 月 4 日 00 UTC の台風予報を使用）、灰色線：天文潮位、赤横線：高潮警報基準、黄横線：高潮注意報基準

3.6 メソ解析および局地解析における Metop-C 搭載マイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS の利用

3.6.1 はじめに

Metop-C は、欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT) が運用する、現業極軌道気象衛星 Metop シリーズの 3 機目の衛星で、2018 年 11 月 7 日に打ち上げられた。Metop には多数の観測センサーが搭載されており、既存の 2 機と同様に Metop-C についても当庁の数値予報での利用が順次開始されている。

Metop に搭載のマイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS は、大気的气温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を観測するセンサーで、これらの観測データを初期値解析に利用することで、初期値や予測値における気温や水蒸気の鉛直分布の精度向上が期待される。Metop-C の AMSU-A および MHS については、全球解析において 2020 年 9 月 15 日に利用を開始した (気象庁 2021c)。その後、メソ解析での利用についても開発を進め (気象庁 2021b)、2021 年 5 月 25 日に利用を開始した。さらに、局地解析においても開発を進め、2021 年 11 月 24 日に利用を開始した。

ここでは、Metop-C 搭載のマイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS の、メソ解析および局地解析での利用について述べる。

3.6.2 変更の概要

メソ解析および局地解析では、既に他の衛星 (Metop-A や Metop-B, NOAA-19 など) に搭載の AMSU-A および MHS を利用中であった。Metop-C に搭載の AMSU-A および MHS の品質は、既存利用中のセンサーと顕著な差異はないことから、品質管理手法や観測誤差など、既存利用中のセンサーと同様の手法・設定で利用することとした。スキャンバイアス補正や、雲や降水を判定するための品質管理に用いるパラメータは、全球解析で用いている Metop-C の設定と共通である。なお MHS については、全球解析では 2019 年 12 月に全天同化に移行した (気象庁 2021a) もの、メソ解析や局地解析では全天同化には移行しておらず、晴天域のデータを同化する。

3.6.3 性能評価試験

Metop-C の追加による効果を確認するため、メソ解析および局地解析において、それぞれ性能評価試験を実施した。

(1) メソ解析での利用

開発時点において最新の、2020 年 4 月時点の現業メソ数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに Metop-C 搭載 AMSU-A および MHS の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 6 月 26 日から 7 月 31 日 (夏実験)、2020

年 1 月 15 日から 2020 年 2 月 25 日 (冬実験) である。

Metop-C 追加後の利用データの分布を示す (図 3.6.1)。Metop-C は、Metop-A や Metop-B と同様に、日中に衛星が通過する時間帯が午前中に当たる太陽同期軌道 (午前軌道と呼ばれる) で運用されている。複数の Metop 衛星は観測時刻が近くなり過ぎないように、時間間隔を空けて通過するように運用されており、観測領域にはある程度の重複は見られるものの、観測データの分布範囲が拡大し、利用データ数は増加した。実験期間を通じたデータ数の増加は、AMSU-A では 20% 程度、MHS では 40% 程度であった。

解析に用いられた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 TEST の変化を確認した (図 3.6.2)。対流圏中上層の水蒸気に感度のある CSR や他衛星の AMSU-A 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が向上した特徴が概ねみられ、第一推定値の精度が改善していることを確認した。

予測精度については、主要な要素の統計検証結果を確認したところ、顕著ではないものの改善と改悪が混在して見られ、総合的には中立と考える。

予測精度については中立ではあるものの、ごく短期の予測値である第一推定値の精度が向上していることから、AMSU-A や MHS の追加によるねらった改善は得られていると考える。また、安定的な数値予報精度維持のため利用する観測データ数の確保は重要である。これらを踏まえ、本変更を現業システムに適用した。

(2) 局地解析での利用

開発時点において最新の、2021 年 6 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 Metop-C 搭載 AMSU-A および MHS 追加利用の変更を加えた実験 (TEST) の比較を行った。側面境界として使用されるメソモデルの予測値には、前述のメソ解析における Metop-C/AMSU-A、MHS の追加利用の結果が反映されている。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。

メソ解析同様、Metop-C の追加により利用データ数の増加 (実験期間を通じて、AMSU-A では 20% 程度、MHS では 40% 程度) や分布範囲の拡大を確認した (図 3.6.3)。

解析に用いられた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 TEST の変化を確認した (図 3.6.4)。ここで、局地解析ではデータ同化サイクルを実施していないことに留意する。局地解析では、解析対象時刻の 3 時間前を対象としたメソモデルの予測値を初期値とし、1 時間ごとに 3 次元変分法による解析 (以降、スロットと称す) および 1

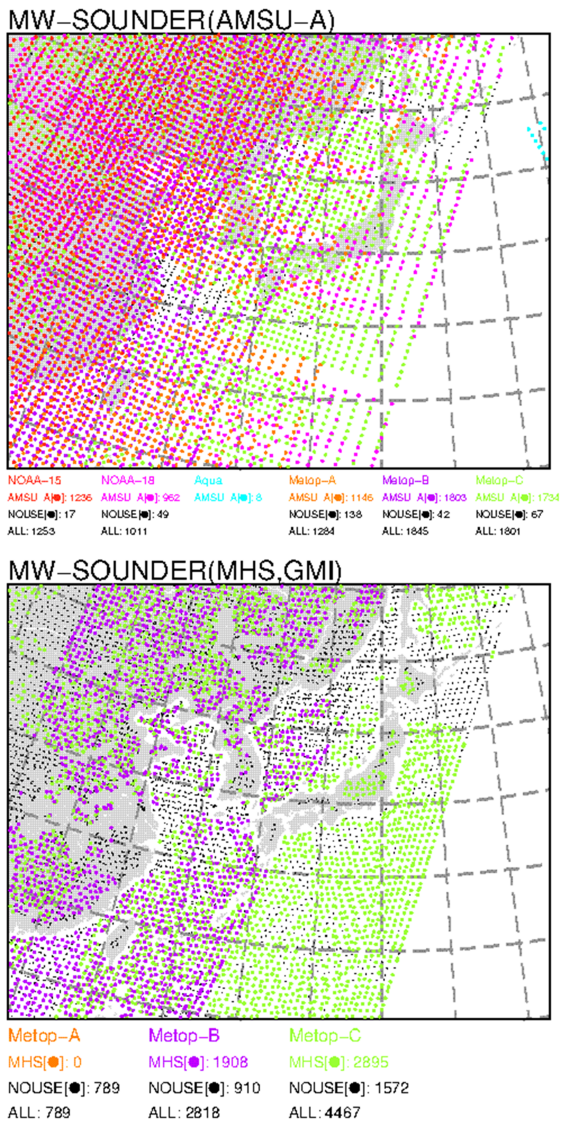


図 3.6.1 メソ解析で利用された AMSU-A および MHS のデータ分布の例。2020 年 6 月 27 日 03UTC を対象。上：AMSU-A、下：MHS。黄緑色の点が Metop-C の利用データ。黒色の点は晴天判別等の品質管理で不使用となっている観測データ。

時間予報を 3 時間分繰り返し、解析値を得ている (永戸ほか 2012, 2013)。ここで得られた解析値や局地モデルによる予測値は、次時刻の局地解析の第一推定値には用いられない。このため、CNTL と TEST に差が現れるのは、Metop-C を同化したスロットとその後続スロットで利用されたデータに限定される。衛星軌道の関係から Metop-C と同じスロットや後続のスロットでデータが利用される Metop-B では、第一推定値と観測値の整合性の向上を示す標準偏差の減少が見られた。また、上記スロットでデータが同化されるその他の衛星についても同様であった。一方で、衛星軌道の関係から上記スロットで利用されるデータがほとんど存在しない NOAA-19 では、当然ながら第一推定値と観測値の整合性にほぼ変化は見られていない。これらから、

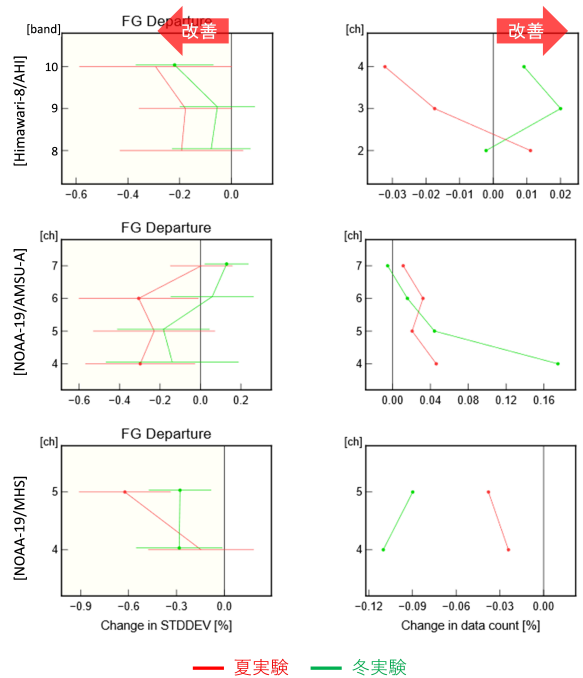


図 3.6.2 メソ解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差 (左列) と利用データ数 (右列) の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。縦軸はチャンネル番号。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。上段：ひまわり 8 号 CSR データ、中段：NOAA-19/AMSU-A、下段：NOAA-19/MHS。

Metop-C の追加により各スロットの第一推定値や解析値の精度が向上したと考察される。予測精度については、主要な要素の統計検証結果を確認したところ、顕著ではないものの改善と改悪が混在して見られ、総合的には中立と考える。

メソ解析と同様、予測精度については中立ではあるものの、第一推定値の精度が向上していること、安定的な数値予報精度維持のため利用する観測データ数の確保は重要であることから、本変更を現業システムに適用した。

3.6.4 まとめ

メソ解析および局地解析において、Metop-C に搭載されたマイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS を、他の衛星に搭載されている同センサーと同様の手法で追加利用し、効果について確認した。その結果、観測データ数の増加や分布範囲の拡大を確認できた。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、ごく短期の予測値である第一推定値については精度の向上が確認でき、AMSU-A や MHS の追加によるねらった改善は得られていると考える。また、安定した数値予報精度の維持のためには利用する観測データ数の確保は重要である。これらを踏まえ、Metop-C に搭載されたマイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS について、メソ解析においては 2021 年 5 月 25 日、局

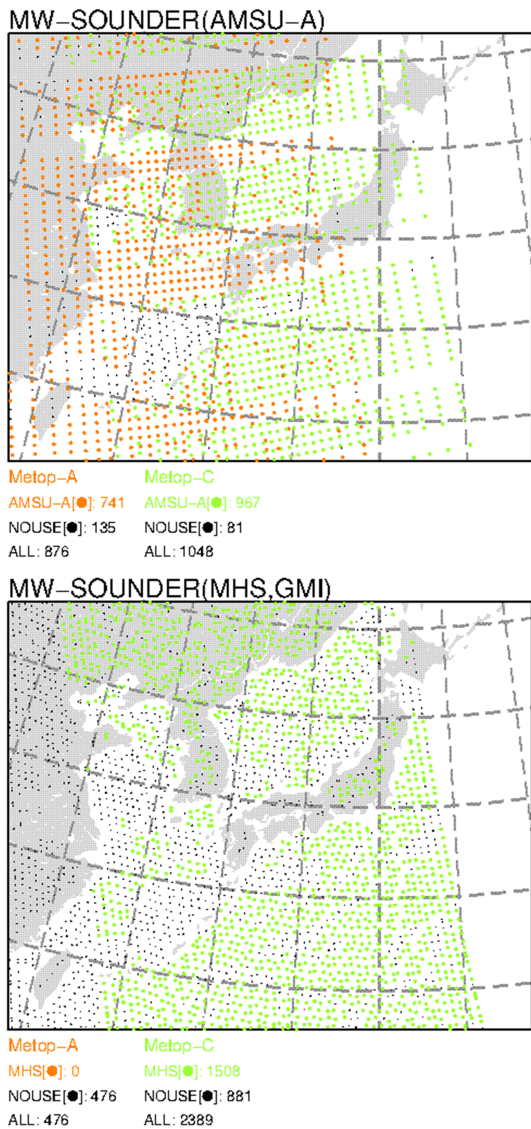


図 3.6.3 局地解析で利用された AMSU-A および MHS のデータ分布の例。2020 年 7 月 2 日 15UTC を対象とした解析の対象時刻 3 時間前のスロット。上：AMSU-A、下：MHS。黄緑色の点が Metop-C の利用データ。黒色の点は晴天判別等の品質管理で不使用となっている観測データ。

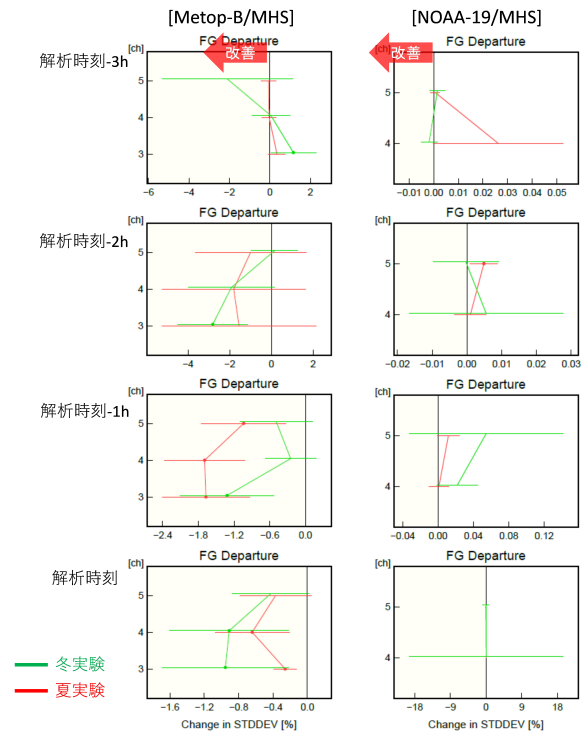


図 3.6.4 局地解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。縦軸はチャンネル番号。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。Metop-B/MHS (左列) および NOAA-19/MHS (右列) の結果を示す。上段からそれぞれ、解析対象時刻 3 時間前のスロット、2 時間前のスロット、1 時間前のスロット、解析対象時刻のスロットのみのデータを用いた検証結果。

気象庁, 2021b: メソ解析における Metop-C データの利用. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 105-106.

気象庁, 2021c: 全球解析における Metop-C マイクロ波サウンダ AMSU-A および MHS の利用開始. 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, 63-65.

地解析においては 2021 年 11 月 24 日に、それぞれ現業利用を開始した。

参考文献

- 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 局地モデル運用の目的と仕様. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 20-22.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 78-86.
- 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.

3.7 波浪アンサンブル予報システムのメンバー数増強

3.7.1 はじめに

気象庁では、波浪の早期注意情報（警報級の可能性）で必要となる波浪の確率論的予測情報を提供するため、波浪アンサンブル予報システム（Wave ENsemble prediction System, WENS）を運用している（高野 2016）。波浪アンサンブルの予測結果は、WMO の荒天予測計画（Severe Weather Forecasting Programme, SWFP）を支援するための気象庁 SWFP ウェブサイト上の波浪予測図 <https://www.data.jma.go.jp/gmd/waveinf/wens/wave.html> 提供の用途でも活用されている。

2021 年 3 月 30 日には、第 3.3 節で報告されている全球アンサンブル予報システム（全球 EPS）のアンサンブルメンバー数の 27 メンバーから 51 メンバーへの増強に合わせて、波浪アンサンブルのアンサンブルメンバー数を 51 に増強した。本稿では、メンバー数増強の予測精度の評価結果を報告する。

3.7.2 予測精度の検証

メンバー数増強の効果を確認するため、全球 EPS 51 メンバー予測結果を大気外力として用いた波浪アンサンブルの実験を実施した。実験期間は、暖候期 2019 年 6 月 20 日～10 月 21 日、寒候期 2019 年 11 月 20 日～2020 年 3 月 11 日である。比較対象とするコントロール実験（以下、CNTL）は当時の現業波浪アンサンブル（アンサンブルメンバー数 27）の予測結果である。有義波高アンサンブル平均のバイアス、RMSE を図 3.7.1 に示した。バイアス、RMSE 共に、CNTL に対して 51 メンバー実験はほぼ中立という結果であった。また、図 3.7.2 に示した信頼度曲線でも 51 メンバー実験と CNTL はほぼ同等であった。このように 51 メンバー実験を実施した結果、概ね中立の結果が確認できたことから、2021 年 3 月に波浪アンサンブルのメンバー数増強の現業化を行った。

参考文献

高野洋雄, 2016: 波浪アンサンブルシステムと週間波浪ガイダンス. 量的予報技術資料（予報技術研修テキスト）, 79–84.

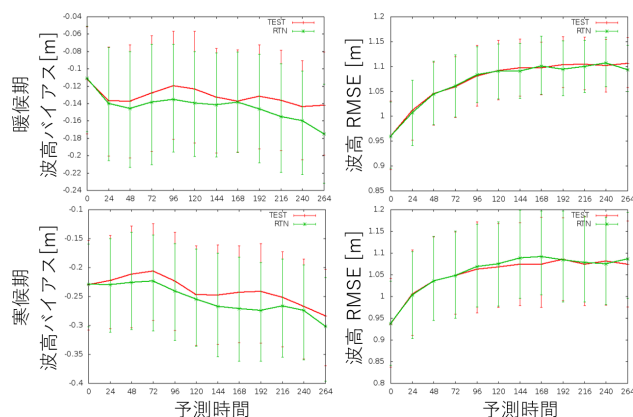


図 3.7.1 波浪アンサンブルでの有義波高アンサンブル平均の対衛星観測検証結果。上段は暖候期、下段は寒候期、左列がバイアス、右列が RMSE。緑線が CNTL（現業 27 メンバー）、赤が 51 メンバー実験の結果。

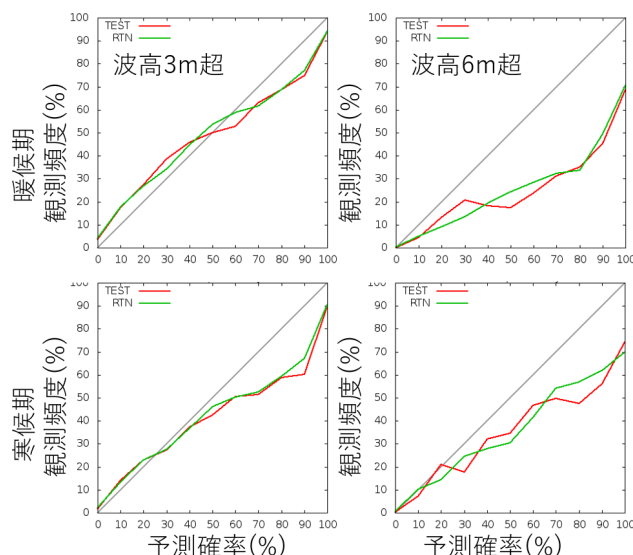


図 3.7.2 波浪アンサンブル 96 時間予測の信頼度曲線。上段は暖候期、下段は寒候期、左列は波高 3 m 超過の確率予測、右列は波高 6 m 超過の確率予測に対応する。緑線が CNTL（現業 27 メンバー）、赤が 51 メンバー実験の結果。

3.8 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

3.8.1 はじめに

気象庁の全球解析では、衛星に搭載されたセンサーによって観測される様々な輝度温度データを利用している。輝度温度を観測するセンサーのうち、マイクロ波イメージャやマイクロ波水蒸気サウンダに対し、2019年12月11日に、晴天域に加え雲・降水域を含む観測データの同化(全天同化)を導入した。これにより、雲・降水域においても気温や水蒸気の情報を取り込まれ、解析値や予測値において、特に水蒸気場の精度が改善した(気象庁 2021a)。

マイクロ波水蒸気サウンダは、183GHz帯の水蒸気の吸収帯付近に複数のチャンネルを持ち、対流圏中上層の水蒸気量に感度を持つセンサーである。いくつかのマイクロ波水蒸気サウンダについては、前述の全天同化導入後も引き続き晴天域のみのデータの利用にとどまっていたが、その後全天同化での利用に向けた開発を進めた(気象庁 2021b)。

ここでは、2021年6月29日に現業化した、マイクロ波水蒸気サウンダの全天同化への移行や新規衛星の追加利用について述べる。

3.8.2 変更の概要

本変更で対象とした衛星/センサーは、Suomi-NPP, NOAA-20/ATMS、DMSP-F17, F18/SSMIS、Megha-Tropiques/SAPHIR、FY-3C/MWHS-2で、いずれも水蒸気の吸収帯183GHz付近のチャンネルを全天同化とする。このうち、FY-3C/MWHS-2は晴天域も含め新規に利用を開始するセンサーで、それ以外のセンサーは、晴天域のデータのみの利用から全天同化へと移行した。また、同化チャンネルには問題がないものの、雲・降水の量を表すパラメータの算出に用いるチャンネルの故障により利用できなくなっていたMetop-A/MHSについて、別のチャンネルを用いた代替的なパラメータ算出手法により、全天同化での利用を再開した。本変更により、全球解析において利用中の183GHz付近のチャンネルは、すべて全天同化により利用されることとなった。図3.8.1に、マイクロ波水蒸気サウンダのカバレッジマップを示す。全天同化への移行、新規センサーの利用(MWHS-2)、品質管理の変更により、利用できるデータが増加した。

これらのセンサーの観測データを全天同化するために適用した、主な品質管理の変更を以下に示す。

(1) 観測誤差調整の変更

輝度温度の観測値(O)と第一推定値からの計算値(B)の差(O-B)の統計から得られた標準偏差を、品質管理においては外れ値除去の閾値等の基準として、また解析本体においては同化の際の観測誤差の基準として用いている。解析本体での観測誤差はこの標準偏差を

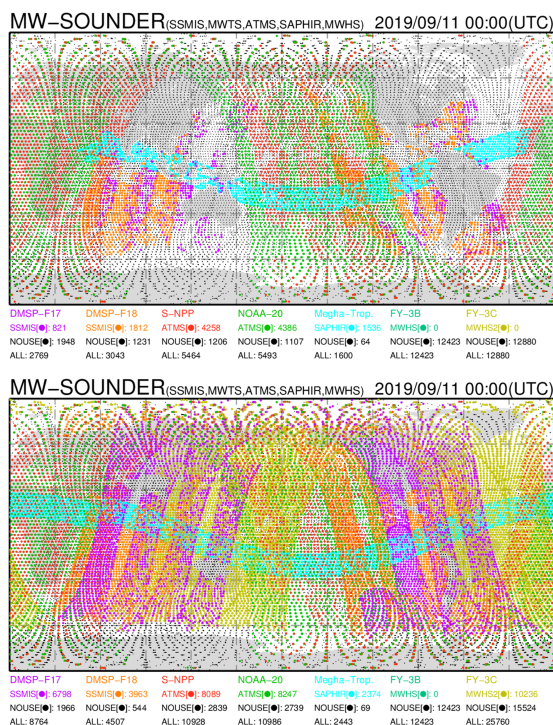


図 3.8.1 マイクロ波水蒸気サウンダのカバレッジマップの変化。上:変更前、下:変更後。2019年9月11日00UTCの全球サイクル解析における分布。なお、品質管理により利用されなかったデータや、同化せずにモニターのみ実施していたデータは、どの衛星も黒色のプロットで表示される。

そのまま用いるのではなく、観測誤差調整として定数倍して用いている。これは、観測値が解析値に過剰に影響を与えることや、他の観測データとのバランスを考慮して設定されたものである。マイクロ波水蒸気サウンダの観測誤差調整は、輝度温度直接同化の導入時に設定された4.5倍という値がそのまま用いられてきた(岡本 2007)。しかし、その後の他の利用データの増加やシステムの更新に伴い、解析値への影響や他の観測データとのバランスも変化していると考えられることから、見直しが必要な値であった。本開発において、Desroziers et al. (2005)による観測誤差の診断結果や、LETKFによる共分散膨張係数の値などを考慮した結果、観測誤差調整の値をこれまでより小さく設定することが適切であると判断した。

本稿では、マイクロ波水蒸気サウンダの観測誤差調整を4.5倍から4倍へと引き下げた結果を示す。なお現業化の際にはさらに検討を行った結果を反映し、マイクロ波水蒸気サウンダは3倍に引き下げ、マイクロ波イメージャについても4倍から3倍へと引き下げた¹。これにより、マイクロ波水蒸気サウンダやマイクロ波

¹ この引き下げを適用した結果には、マイクロ波水蒸気サウンダおよびマイクロ波イメージャの両方の効果が見られる。本稿ではマイクロ波水蒸気サウンダの効果を示すことを目的としているため、マイクロ波水蒸気サウンダのみの観測誤差調整の結果を示した。

イメージャの観測情報が解析値により大きく反映されるようになった。

(2) SSMIS と MHS との衛星重なり間引きの廃止

品質管理においては、複数の同センサーが近い場所をほぼ同時刻に観測した場合には、ひとつの衛星のデータを残して他の衛星のデータは利用しないという間引き処理（以下、「重なり間引き」と称する）が組み込まれている（岡本 2007）。これは、複数の衛星に搭載された同センサーが、特に極軌道衛星のデータが集中する高緯度を中心に、過度に解析結果に影響を与えることを避けるためである。これまで別センサーである SSMIS（183GHz チャンネル）と MHS との間にも重なり間引きを適用していたが、複数の同センサーに適用するという扱いに一貫性を持たせるため、廃止することとした。その際、データが増えることにより過度に解析結果に影響を与えるといった問題は見られなかった。

(3) 海上における可降水量を用いた品質管理の廃止

可降水量の少ない観測地点においては、マイクロ波水蒸気サウンダは大気の透過率が高く、観測値は地表温度や射出率といった地表面の状態に大きく左右される。そのため輝度温度の計算精度が低く、これまで観測データを利用しない設定となっていた。本変更においても、射出率の推定精度が低い海水上や陸上においては、可降水量が少ない場合には引き続き利用しない設定としている。しかし、海上については海面水温や射出率の推定精度が陸上よりも高いことから、輝度温度の計算精度に実用上の問題がないことを確認し、利用することとした。

(4) SAPHIR、SSMIS の陸上での利用

SAPHIR の利用開始（計盛 2015）および SSMIS の 183GHz チャンネルの利用開始（村上 2017）の際、これらのセンサーでは、他のマイクロ波水蒸気サウンダには搭載されている 90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルが利用できず、これらのチャンネルを用いた地表面の温度や射出率の精度評価が十分に行えないとして、海上のデータのみを同化していた。

これらのセンサーの陸上での利用を検討したところ、標高が低い場合や可降水量が多い場合などに、地表面への感度が小さく問題なく利用できることが確認できた。そこで、各チャンネルの感度高度と標高に応じた判定を行い、利用することとした。

3.8.3 観測誤差の設定

気象庁（2021a）で示した通り、全天同化においては、雲・降水量を表すパラメータと、O-B の標準偏差との関係に基づき観測誤差を設定している。本変更で利用を開始したそれぞれのセンサーについては、利用できるチャンネルを用いて以下のように雲・降水量を表すパラメータを導出する。

(1) Suomi-NPP, NOAA-20/ATMS、FY-3C/MWHS-2

Suomi-NPP および NOAA-20 に搭載の ATMS、ならびに FY-3C に搭載の MWHS-2 については、90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルが搭載されている。これらのチャンネルを用いて、気象庁（2021a）の (2.2.5) 式²により散乱インデックスを算出し、雲・降水量を表すパラメータとして用いる。

(2) DMSP-F17, F18/SSMIS

DMSP-F17 に搭載の SSMIS については、90GHz 帯や 150GHz 帯のチャンネルが搭載されていることから、気象庁（2021a）の (2.2.5) 式により散乱インデックスを算出し、雲・降水量を表すパラメータとして用いる。

DMSP-F18 に搭載の SSMIS においては、150GHz 帯のチャンネルが故障のため利用できない。一方で、37GHz の垂直、水平偏波のチャンネルが利用できる³ことから、気象庁（2021a）の (2.2.3) 式⁴により、雲・降水量の影響を表すパラメータとして C_{37} を算出し用いる。ただし、陸上では C_{37} を利用できないため、DMSP-F18 は海上のデータのみ利用する。

(3) Megha-Tropiques/SAPHIR

Megha-Tropiques に搭載の SAPHIR には、183GHz 帯に感度高度の異なる 6 チャンネルが搭載されているが、他の水蒸気サウンダに搭載されている 90GHz 帯や 150GHz 帯のチャンネルはなく、これらを利用した散乱インデックスを算出することができない。そこで、6 つのチャンネルのうち、最も透過率が高く下層に感度のあるチャンネル 6（ 183 ± 11 GHz）を利用する（Chambon and Geer 2017）。このチャンネルは透過率が最も高いことから、雲・降水の有無による輝度温度への影響は最も大きい。そのため、このチャンネルの観測値や雲・降水の影響を考慮した計算値を、晴天と仮定した場合の計算値と比較することで、雲・降水の影響の程度を見積もることができる。観測における雲・降水の有無の影響を SI_o 、モデルにおける雲・降水の有無の影響を SI_b とし、両方を偏りなく考慮するため、雲・降水量を表すパラメータとして両者を平均した SI_s を以下のように算出する。

$$SI_o = TB_{ch6}^{clr} - TB_{ch6}^o \quad (3.8.1)$$

$$SI_b = TB_{ch6}^{clr} - TB_{ch6}^b \quad (3.8.2)$$

$$SI_s = (SI_o + SI_b)/2 \quad (3.8.3)$$

² 90GHz より 150GHz で雲・降水粒子による散乱の効果が大いことを利用した指標。両チャンネルの輝度温度の差から、水蒸気の吸収の効果を差し引いた値。

³ SSMIS はチャンネルによって観測位置が異なるが、24 チャンネル全ての観測位置合わせ処理がされている UPP データを使用している（村上 2017）。

⁴ 海面からのマイクロ波放射が偏光しているのに対し、雲・降水からのマイクロ波放射は非偏光であることを利用し、37GHz の垂直偏波と水平偏波の輝度温度の差から雲・降水の影響の程度を表した指標。

ここで、 TB_{ch6}^{clr} は晴天を仮定して計算した輝度温度、 TB_{ch6}^o は観測輝度温度、 TB_{ch6}^b は雲・降水を考慮した全天計算輝度温度をそれぞれ表す。

(4) Metop-A/MHS

Metop に搭載の MHS には、90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルが搭載されていることから、これらを用いた散乱インデックスが雲・降水の量を表すパラメータとして用いられている。しかし、Metop-A については 150GHz 帯のチャンネルが故障したため、散乱インデックスが算出できず、同化する 183GHz 帯のチャンネルには故障がないにもかかわらず利用できなくなっていた。そこで、前述の SAPHIR と同手法を適用する。MHS には 183GHz 帯に 3 つのチャンネルが搭載されているが、そのうち最も透過率が高く感度高度の低いチャンネル 5 (190.311 GHz) を用い、同様に散乱インデックスを算出することとした。

この手法で作成された散乱インデックスを、150GHz 帯のチャンネルが故障する前の期間のデータを用い、従来の手法 (90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルを利用) と比較したところ、概ね分布が一致することが確認できた。

3.8.4 性能評価試験

本変更の効果を確認するため、2020 年 10 月時点の現業全球数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに全天同化センサー拡充の変更を加えた実験 (TEST) の比較を行った。実験期間は 2019 年 7 月 10 日から 9 月 11 日 (夏実験)、2019 年 12 月 10 日から 2020 年 2 月 11 日 (冬実験) で、8 月および 1 月のそれぞれ 1 か月が検証対象期間である。

(1) 解析値・第一推定値の変化

平均解析場には、本変更による顕著な変化はみられなかった。若干の変化として、850hPa においては熱帯域を中心とした比湿の増減や全球的な気温の上昇が確認された。この変化については、複数の海外数値予報センターの解析値を用いて確認したところ、概ね CNTL における他センターとの差異が減少する方向の変化であることが確認された。ECMWF などでは既に多くのセンサーが全天同化で利用されているため、その解析値に近づく変化は妥当であると考えられる。

解析に用いられた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 TEST の変化を確認した (図 3.8.2)。ここで示すデータはいずれも、今回の変更において直接利用方法に変更を加えていない観測データである。(a) に示した静止衛星晴天放射輝度温度 (CSR) は、マイクロ波水蒸気サウンダと同様に対流圏中上層の水蒸気量に感度のあるデータである。O-B の標準偏差が減少した上で利用データが増加するなど、第一推定値と観測値の整合性が向上した特徴がみられ、マイクロ波水蒸気サウンダの持つ

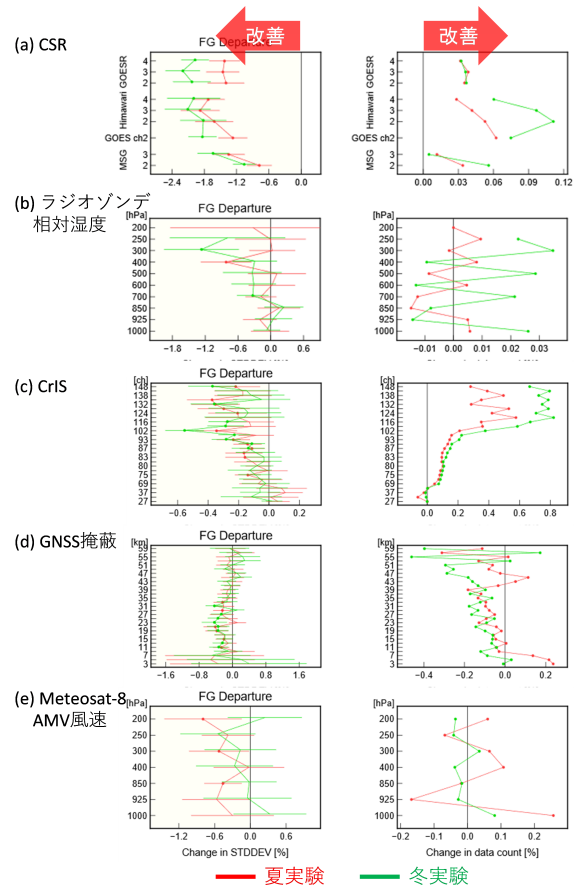


図 3.8.2 TEST の CNTL に対する、様々な観測と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の変化率 (各観測データの左列) および利用データ数変化率 (右列) [%]。(a) 静止衛星晴天輝度温度、(b) ラジオゾンデ相対湿度、(c) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS、(d) GNSS 掩蔽、(e) Meteosat 大気追跡風。赤線が夏実験、緑線が冬実験を示す。エラーバーと丸印はそれぞれ、95%信頼区間と、それによる変化率の正負が統計的に有意であることを示す。縦軸は (a)(c) についてはチャンネル番号、(b)(e) については気圧 (hPa)、(d) については高度 (km) を示す。

情報を取り込んだ直接的な効果として、第一推定値の精度が向上したと考えられる。(b) で示したラジオゾンデ相対湿度においても、統計的な有意性は低いものの 500hPa より上層を中心に改善の傾向がみられ、(a) の結果とも整合的である。また、気温に関する観測 ((c) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS、(d) GNSS 掩蔽) や風 ((e) Meteosat-8 大気追跡風) に関する観測との整合性も向上していた。背景誤差相関やデータ同化サイクルを通じて改善効果が伝搬し、水蒸気だけでなく気温や風についても第一推定値の精度が向上したと考えている。

(2) 予測値の変化

自分解析値およびラジオゾンデ観測値を参照とした予測値の検証では、500hPa 高度場や 850hPa 気温などの代表的な要素に関し、概ね精度は中立であった。ただし、本変更は解析値を変化させる変更であることから、

予測検証の参照値として自分解析値は最適ではない可能性がある。また、衛星観測による効果はラジオゾンデ観測の少ない海洋上で顕著であると考えられる。そこで、本変更に対し独立で、分布に偏りのない参照値として、複数の海外数値予報センター（ECMWF、UKMO、NCEP）の解析値や ECMWF の再解析（ERA5）を用いた検証を行った。ここでは、ERA5 を参照値とした検証結果を示す（図 3.8.3）。本変更の効果として、マイクロ波水蒸気サウンダが感度を持つ対流圏中上層の水蒸気量（比湿）の予測が、参照値に近づく変化が確認できた。また、気温や風速、高度場についても同様の変化が見られた。これらの特徴は、ERA5 だけではなく複数の海外数値予報センターの解析値を参照値とした場合にも同様に見られた。複数の参照値に近づく変化が総合的に見られたことから、この変化は予測の改善を示すものと考えられる。この改善傾向は、予測初期を中心に概ね 2 日先まで確認された。

3.8.5 まとめ

全球数値予報システムにおいて、複数のマイクロ波水蒸気サウンダの利用に関し、全天同化への移行や新規利用センサーの追加、品質管理の変更を行った。この変更の効果を性能評価試験により確認した結果、第一推定値や予測値の精度向上が確認できた。このことから、2021 年 6 月 29 日に、全球解析において本変更の現業システムへの適用を開始した。

参考文献

- Chambon, Philippe and Alan J. Geer, 2017: All-sky assimilation of Megha-Tropiques/SAPHIR radiances in ECMWF numerical weather prediction system. *ECMWF Tech. Memo.*, **802**.
- 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.
- 計盛正博, 2015: マイクロ波水蒸気サウンダ SAPHIR 輝度温度データの利用開始. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 54–59.
- 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.
- 村上康隆, 2017: 全球解析における DMSF-F17, F18/SSMIS 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, 74–77.
- 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: 全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの全天同化センサーの拡充. 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

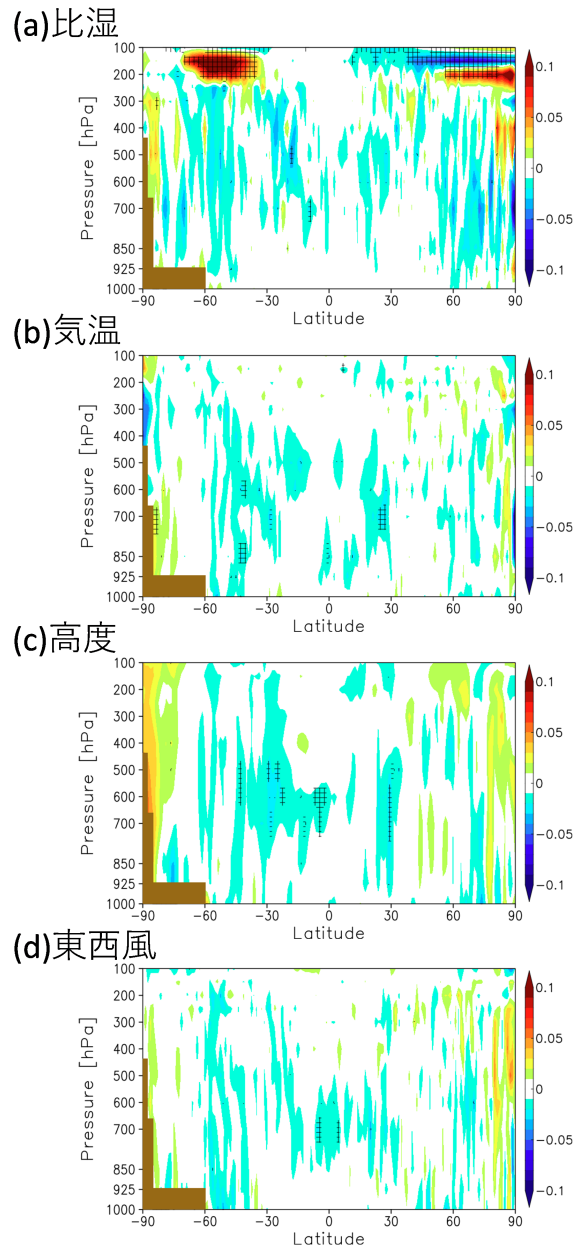


図 3.8.3 ERA5 を参照値とした予報精度検証。上から (a) 比湿、(b) 気温、(c) 高度、(d) 東西風の 1 日後予測の帯状平均の RMSE 改善率 [%] を示す。寒色は予報精度の改善、暖色は改悪を示す。網掛けは信頼区間 95% で有意であることを示す。統計期間は 2019 年 8 月 1 日～8 月 31 日。

ター, 104–105.

3.9 全球解析における GOES-17 データの利用および GOES AMV における品質管理の変更

3.9.1 はじめに

気象庁の全球解析では、静止気象衛星の観測によって得られる、晴天放射輝度温度 (CSR: Clear-Sky Radiance) ならびに大気追跡風 (AMV: Atmospheric Motion Vector) を同化に利用している。利用している静止気象衛星は、日本が運用するひまわりの他、欧州が運用する Meteosat ならびに米国が運用する GOES である。

米国の静止気象衛星は、米国大陸東側を観測する GOES-E(East) と西側を観測する GOES-W(West) の 2 機体制で運用されている。GOES-E としては、2017 年 12 月から GOES-16 が運用されており、全球解析において、CSR は 2019 年 6 月 18 日より (気象庁 2021b)、AMV は 2020 年 7 月 29 日より (気象庁 2021a)、それぞれ利用を開始している。

2018 年 3 月に打ち上げられた GOES-17 は、2019 年 2 月に GOES-W として、GOES-15 から運用が切り替えられた。GOES-17 は GOES-16 と同型の新世代衛星であり、搭載されている可視赤外放射計 (ABI) は、ひまわり 8 号および 9 号に搭載されている AHI とも同型のセンサーである。GOES-17 の CSR および AMV については、同型のセンサーを同様に処理して作成される GOES-16 の CSR および AMV の利用方法に準じて利用することで、同様の効果が得られると考えられる。ただし、GOES-17 は衛星内部の冷却装置に不具合があり、特定の季節・時間帯において、観測データの品質が低下する問題がある¹。そのため、CSR および AMV についても、この品質低下によるプロダクトへの影響を評価した上で利用を開始する必要があった。

ここでは、GOES-17 の CSR および AMV の品質評価や、利用に際して必要となった品質管理の変更、ならびにこれらのデータを利用した性能評価試験について示す。なお、AMV については調査の過程で適用が望ましいことが判明した QI(Quality Indicator) を用いた品質管理処理の変更を、GOES-17 だけでなく GOES-16 にも適用した。性能評価試験の結果、数値予報への効果を確認することができたことから、2021 年 6 月 29 日に全球解析において GOES-17 の CSR および AMV の現業利用開始ならびに GOES AMV の品質管理処理の変更を実施した。図 3.9.1 に、GOES-17 の現業利用開始後の CSR および AMV の分布を示す。

3.9.2 GOES-17 CSR の利用

静止衛星イメージャの輝度温度データから作成される CSR は、特定の大きさの領域ごとに晴天部分を抽出

¹ 衛星と太陽の位置関係によっては、センサー内部の検出器が太陽の影響により昇温し、十分にセンサーの感度を保てなくなる。詳細は以下を参照：<https://www.goes-r.gov/users/GOES-17-ABI-Performance.html>

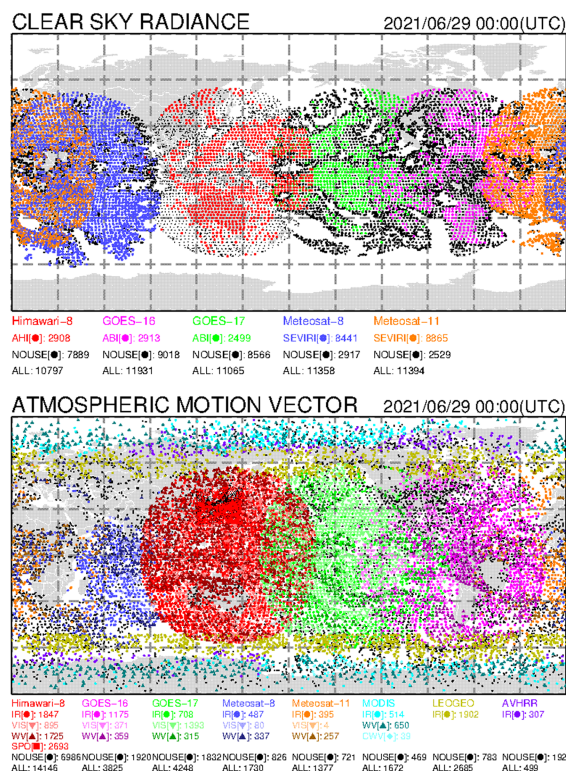


図 3.9.1 2021 年 6 月 29 日 00UTC の全球サイクル解析で利用された CSR (上段) および AMV (下段) の分布。黄緑色のプロットが GOES-17。なお、品質管理により利用されなかったデータはどの衛星も黒色のプロットで表示される。

して平均処理したプロダクトである。水蒸気バンドの CSR を同化することにより、対流圏の中上層の水蒸気量を中心に初期値の精度が改善することが確認されている (石橋・上沢 2007; 計盛 2016; 岡部 2019)。

GOES-17 の CSR については、2019 年 11 月に現業システムにおいて、同化はせずに品質のモニターを開始した。GOES-17 は、前述の不具合により、特定の季節・時間帯において正常な観測データが得られず、そのような場合には CSR データも作成されていない。春分および秋分の前 (1~2 月、4~5 月、7~8 月および 10~11 月) の 12UTC 付近で CSR データが欠損する (図 3.9.2)。データが欠損している季節・時間帯の近傍で作成されたデータについては、当初は不具合の影響で品質の低下が確認されていた。その後、2020 年 2 月にプロダクトのバージョンアップが実施され、品質の低下したデータは配信されなくなっていることが確認された。配信されているデータの品質を調査したところ、GOES-16 の CSR データと同程度であり、全球解析において追加の品質管理を行うことなく、GOES-16 の CSR と同じ品質管理処理でデータの利用が可能であることが確認できた。

GOES-17 CSR データ利用の効果および不具合による悪影響がないことを確認するため、いずれも不具合によるデータ欠損期間を含んだ、2020 年 3 月 21 日~

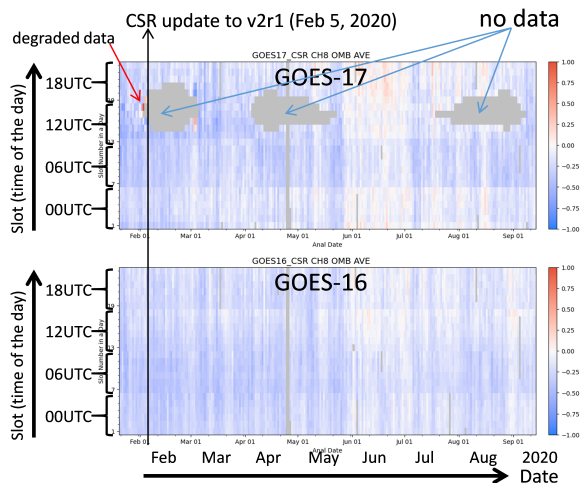


図 3.9.2 GOES-17 CSR (上段) と GOES-16 CSR (下段) のチャンネル 8 (6.2 μm) における、品質管理をパスしたデータの O-B のバイアス (バイアス補正前)。横軸は日付、縦軸は概ねの時刻 (各解析における同化スロットを時刻の早い順に下から並べた) を表す。チャンネル 9 (6.9 μm) や 10 (7.3 μm) についても、同様の傾向。

6月11日(春実験)、および2020年7月21日~9月11日(夏実験)を対象とした性能評価試験を実施した。開発時点で最新の、2020年10月時点の現業全球数値予報システムと同等の実験をCNTLとし、CNTLにGOES-17 CSRを追加利用した実験をTESTとする。なお、上記実験期間においては、GOES-17と観測領域が同じGOES-15の運用は終了しており、CNTLでは当該領域はCSRデータの空白域となっている。

解析に用いられた各種観測データについて、第一推定値との差異や利用データ数のCNTLに対するTESTの変化を確認した。CSRと同様に対流圏中上層の水蒸気量に感度のある、マイクロ波水蒸気サウンダ(183GHz帯のチャンネル)を中心に、観測値と第一推定値の差(O-B)の標準偏差の減少や利用データ数の増加、バイアスの軽減など、第一推定値と観測値の整合性が向上し、第一推定値の精度が改善している特徴が確認できた。第一推定値の精度向上は、解析予報サイクルを通じて同化される観測値の影響を受けた結果であり、解析値の精度が向上したことを示唆する。図3.9.3に、マイクロ波水蒸気サウンダMHSのO-B標準偏差の変化を示す。特にGOES-17の観測領域のうち、GOES-16との重なりがなくこれまでデータの空白域だった領域でO-B標準偏差が減少している。また、利用データ数の増加やバイアスの軽減なども、GOES-17 CSRを追加した領域に対応して確認でき、春実験についても同様であった。これらの特徴はGOES-16 CSR利用開始の際に見られた特徴とも同様であったことから、GOES-17 CSRについて、データ欠損を含む期間におけるデータの利用に問題はないと考える。

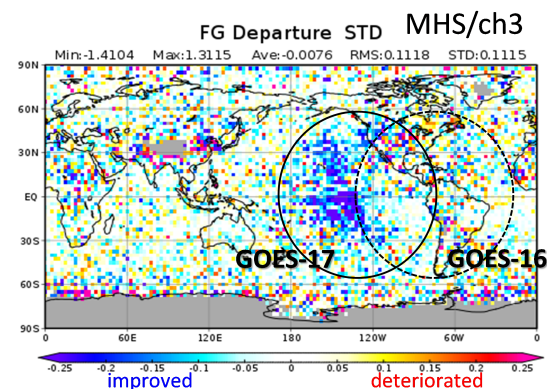


図 3.9.3 GOES-17 CSR 利用の性能評価試験における、解析に用いられたマイクロ波水蒸気サウンダ MHS (チャンネル 3) の O-B 標準偏差の変化率 (%)。青色は標準偏差の減少 (改善) を示す。夏実験 (2020 年 8 月) の結果。

3.9.3 GOES-17 AMV の利用

GOES-17 AMV についても CSR と同様、冷却装置の不具合の影響が見られる期間について、データの品質を確認した。GOES-16 と観測範囲が重なる領域において両衛星による AMV を比較した結果、食期間の前後の数か月間を中心として、12UTC 前後のデータ品質に差異が見られることがわかった(気象庁 2021c)。このため、11UTC から 16UTC の時間帯のデータを通年で利用しない品質管理を実装した。

この品質管理を適用して GOES-17 AMV を追加利用する性能評価試験を実施したところ、対流圏の水蒸気感度のある ATMS, MHS などのマイクロ波サウンダやマイクロ波散乱計の海上風の O-B 標準偏差が減少するなど、他の観測データと第一推定値の整合性の向上がみられ、第一推定値の精度改善が確認された。一方で、上述の品質管理のみでは南半球の予測精度にやや改悪の傾向が見られたため、次項に述べるように QI を用いた品質管理処理の適用を検討した。

3.9.4 GOES-16, -17 AMV における QI を用いた品質管理

気象庁の現業の AMV 品質管理処理では、観測データとともに通報される QI を品質管理に用いている(山下・今井 2007)。QI は EUMETSAT で開発された品質管理指標で (Holmlund 1998)、0~100 の値をとり、値が大きいほど品質が良いことを示す。QI には数値予報モデルとの整合性を考慮に入れた予報値チェックあり QI と、数値予報モデルとの整合性を考慮しない予報値チェックなし QI があり、AMV の品質管理には、これまで予報値チェックあり QI を用いてきた。しかし、GOES-16 AMV では予報値チェックあり QI が通報されなくなったことから、QI を用いた品質管理は行わず、風速誤差や高度推定誤差の大きい AMV を除くための新たな品質管理処理を追加して対応した(気象庁 2021a)。

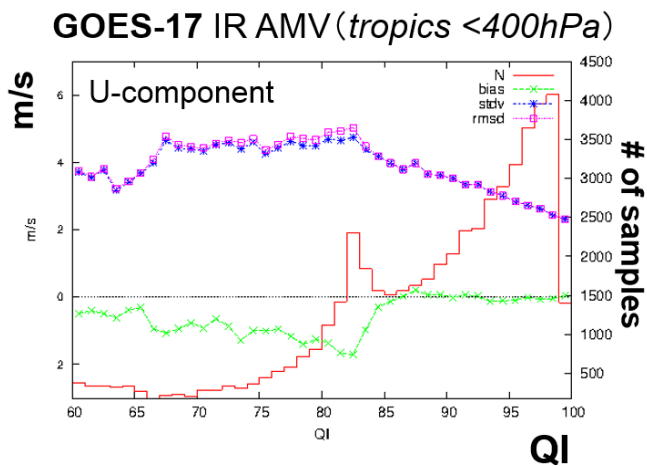


図 3.9.4 熱帯領域における 400hPa より上空の GOES-17 AMV の QI 値と東西風速の各種 O-B 統計の関係を示す図。横軸は QI 閾値、左の縦軸は緑線:バイアス (m/s)、紫線:RMSD (m/s)、青線:標準偏差 (m/s) を表している。右の縦軸は、赤線:サンプル数を示している。

GOES-17 AMV についても予報値チェックあり QI は通報されておらず、GOES-16 と同様の品質管理を適用した。しかし、前項で示したように予測精度に改悪の傾向が見られたことから、改めて予報値チェックなし QI (以降、単に QI とする) を利用した品質管理の検討を行った。GOES-17 AMV の QI と風速の O-B の関係を調査した結果、図 3.9.4 に示す通り、QI が高いほどバイアスや標準偏差が減少するなど品質も良くなる特徴が確認され、QI が品質管理に有効であることがわかった。また、GOES-16 AMV についても同様の傾向が確認されたことから、QI による品質管理処理は、GOES-16 にも適用することとした。

QI を用いた品質管理の効果を確認するため、GOES-16、-17 の、QI による品質管理の有無を比較する性能評価試験を実施した。この品質管理の予測精度への影響について、ECMWF の再解析 (ERA5) を参照値として確認した結果を図 3.9.5 に示す。QI による品質管理を行った場合、行わない場合に比べて、南緯 60 度から南緯 30 度の予測精度の悪化が軽減し、北緯 30 度から北緯 60 度の予測精度悪化がやや改善に変化しており、QI による品質管理の効果が確認できる。

以上から、GOES-16、-17 の AMV に対して QI による品質管理を導入し、設定した閾値以下の QI のデータは利用しないこととした。閾値としては、詳しい調査の結果、AMV 作成の元となる画像の種類 (可視、水蒸気、赤外) によらず、熱帯では 87、熱帯域以外では 90 を用いることとした。

3.9.5 総合性能評価試験

これまで述べた変更を合わせた総合性能評価試験を実施した。2021 年 4 月時点の現業全球数値予報システムと同等の実験を CNTL とし、これに GOES-17 の AMV および CSR データを追加利用した上で、GOES-

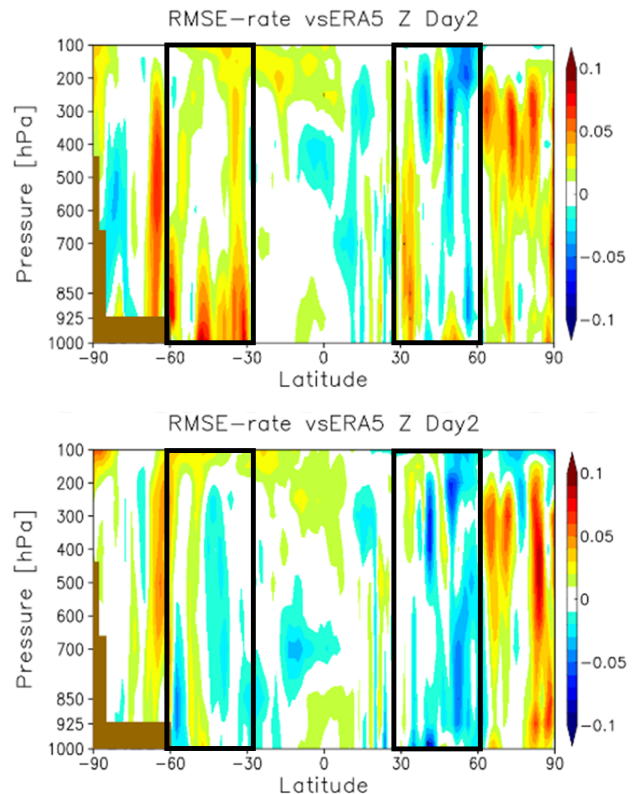


図 3.9.5 ERA5 を参照値とした予報精度検証。ジオポテンシャル高度の 2 日予報の帯状平均の RMSE 改善率 [%] を示す。上図は QI による品質管理を行わない場合。下図は QI による品質管理を行った場合。寒色は予測精度の改善、暖色は改悪を示す。黒枠は QI 閾値による改善の影響が大きかった領域を示す。統計期間は 2020 年 8 月 1 日~31 日。

16 および 17 の AMV に QI を用いた品質管理処理を適用した実験を TEST とする。実験期間は 2020 年 7 月 21 日から 11 月 11 日で、8 月から 10 月の 3 か月が検証対象期間である。

解析に用いられた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 TEST の変化を確認した。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の整合性が向上した特徴がみられ、第一推定値の精度が改善していることが確認された。マイクロ波気温サウンダ AMSU-A や ATMS (気温チャンネル) の大気下層に感度のあるチャンネルや、マイクロ波散乱計による海上風にみられた改善については、主に GOES AMV の QI を用いた品質管理の適用や、GOES-17 AMV の追加利用が寄与していると思われる。マイクロ波水蒸気サウンダ MHS や ATMS (水蒸気チャンネル) など、対流圏中上層の水蒸気量に感度のある観測データについては、GOES-17 CSR の追加利用が主に寄与していると思われる。

予測精度については、中低緯度を中心に概ね 2 日先まで改善傾向を示した (図 3.9.6)。

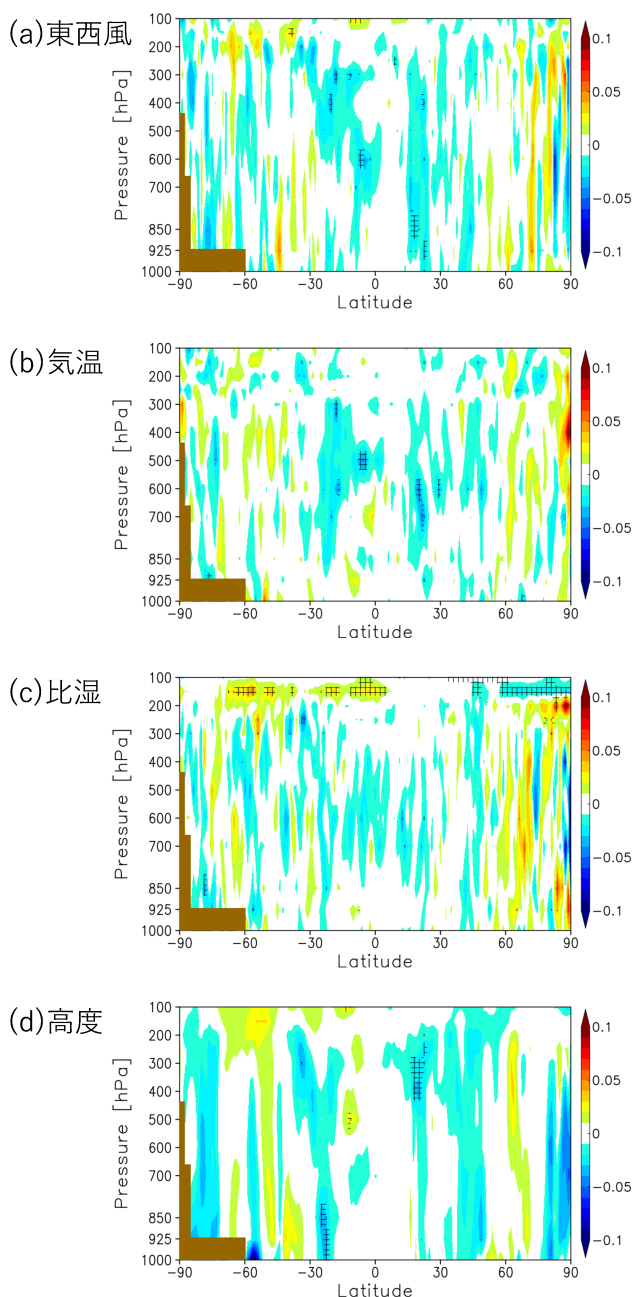


図 3.9.6 ERA5 を参照値とした予報精度検証。上から (a) 東西風、(b) 気温、(c) 比湿、(d) 高度の 2 日予報の帯状平均の RMSE 改善率 [%] を示す。寒色は予報精度の改善、暖色は改悪を示す。網掛けは信頼区間 95% で有意であることを示す。統計期間は 2020 年 8 月 1 日～10 月 31 日。

3.9.6 まとめ

GOES-W として運用が開始された GOES-17 について、冷却装置の不具合の影響を中心に、CSR および AMV の品質を調査した。CSR については、配信されているデータに品質の問題はなく利用が可能であることを確認した。AMV については、冷却装置の不具合の影響による品質悪化に対処するため、11UTC から 16UTC の時間帯のデータを通年で不使用とする品質管理を導入し、第一推定値の精度改善など一定の効果を確認した。また、QI を用いた品質管理が有効であるこ

とを確認し、GOES-16 にも合わせて適用することで、解析場が改善し、南半球で見られた予報精度の改悪の傾向が解消することを確認した。

全球数値予報システムにおいて、GOES-17 の CSR および AMV を追加利用するとともに、GOES-16 および 17 の AMV に QI を用いた品質管理を適用して性能評価試験を実施した。その結果、第一推定値や予測値の精度向上を確認できた。この結果を受け、2021 年 6 月 29 日より、上記変更を全球数値予報システムにおいて現業化した。

参考文献

- Holmlund, K., 1998: The utilization of statistical properties of satellite-derived atmospheric motion vectors to derive quality indicators. *Wea. Forecasting.*, **13**, 1093–1104.
- 石橋俊之, 上沢大作, 2007: 静止衛星イメージャ. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 106–120.
- 計盛正博, 2016: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 46–49.
- 岡部いづみ, 2019: ひまわり 8 号のバンド 9,10 及び Meteosat のチャンネル 6 の晴天放射輝度温度データの追加利用. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 56–57.
- 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.
- 気象庁, 2021a: GOES-16 AMV 及び ScatSat-1/OSCAT の全球解析への利用開始. 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, 56–59.
- 気象庁, 2021b: GOES-16 CSR の全球解析への利用. 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, 16–17.
- 気象庁, 2021c: 全球解析における GOES-17 データの利用. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁数値予報開発センター, 104–104.

3.10 全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ IASI の利用データセット移行および Metop-C/IASI の利用

3.10.1 はじめに

欧州の極軌道気象衛星 Metop に搭載されているハイパースペクトル赤外サウンダ IASI には 8461 のチャンネルがあり、そのうちの数百チャンネルを抽出したサブセットデータが、数値予報での利用を目的として作成・配信されている。気象庁では、NOAA/NESDIS (米国海洋大気庁/米国環境衛星資料情報局) が作成・配信している、616 チャンネルのデータセット (以降「NESDIS 形式」とする) を、全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダの利用開始時に用いていた (岡本 2011; 岡垣 2015)。その後、このデータセットに加え、欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT) が作成・配信している 500 チャンネルのデータセット (以降「EUMETSAT 形式」とする) も取得し、利用に向けた開発を進めてきた (気象庁 2021c)。

数値予報センターが利用するデータセットとしては EUMETSAT 形式の方が主流であり、数値予報での利用を主目的とした DBNet データ (WMO 2017) も EUMETSAT 形式で配信されている。DBNet データは、世界各地の衛星データ利用機関が、衛星から直接受信した受信局周辺のデータを処理し、即時交換することによって得られるデータで、データの得られる範囲は限られるものの、衛星運用機関が軌道一周分のデータをまとめて処理・配信したデータ (全球データ) と比較して、観測から入電までの時間が短いことが特徴である。つまり、全球データのみが配信される NESDIS 形式から、DBNet データを含む EUMETSAT 形式データセットの利用に移行することで、全球速報解析において利用データ数の増加が見込まれる。また、DBNet データはデータ入電から利用までの待ち時間の短いメソ解析や局地解析で特に有効で、今後計画しているこれらの解析システムでの利用に向けて、同化システムを EUMETSAT 形式データセットに適合させておくことは重要である。

Metop-C は、EUMETSAT が運用する、現業極軌道気象衛星 Metop シリーズの 3 機目の衛星で、2018 年 11 月 7 日に打ち上げられた。Metop-C に搭載の IASI データは、前述の EUMETSAT 形式データセットが先にユーザーへ配信が開始されたことから、その利用に向けた開発は EUMETSAT 形式データセットへの移行を前提として着手した。

ここでは、2021 年 6 月 29 日に現業化された、ハイパースペクトル赤外サウンダの EUMETSAT 形式データセットへの移行および、それに伴う品質管理手法の変更、ならびに、2021 年 11 月 24 日に現業化された、Metop-C/IASI の全球解析での利用開始について述べる。

USEチャンネル										
32	38	44	49	51	55	57	61	63	70	
85	87	109	116	122	128	135	141	146	148	
154	159	161	167	173	180	185	187	193	199	
205	212	217	219	224	226	230	232	236	237	
239	243	246	249	252	256	259	262	265	267	
269	271	273	275	278	279	282	284	285	288	
292	294	296	306	308	309	313	316	320	323	
326	327	329	332	333	335	345	347	350	354	
356	360	363								
QCチャンネル										
404	405	769	797	1090	1098	1338	1352			

図 3.10.1 同化利用および品質管理のために選定された IASI のチャンネル番号。黒字：両データセットに共通して含まれるチャンネル、青字：NESDIS 形式のみに含まれるチャンネル、赤字：代替とした EUMETSAT 形式のチャンネル。

3.10.2 データセット移行における品質管理の変更

利用中の IASI データセットを、NESDIS 形式のデータセットから、EUMETSAT 形式のデータセットに移行するために行った品質管理処理の変更について、以下に述べる。方針としては、データセットの移行の前後で、IASI データの品質管理処理が従来と同等の性能を維持し、IASI データの同化による解析や予測への影響も同様であることを確認することとした。なお、性能評価試験にはサイクル解析を用い、NESDIS 形式のデータセットと EUMETSAT 形式のデータセットで、利用できるデータ数 (地点数) に本質的な差異はない。DBNet データによりデータ数増加が見込める速報解析での評価は行わないが、データ数が増加することで IASI データ利用の効果がより多く得られると期待される。

(1) 同化利用チャンネルの選定

NESDIS 形式データセットと EUMETSAT 形式データセットには、それぞれ共通して抽出されているチャンネルもあれば、どちらかにしかないチャンネルもある。同化や品質管理に使用しているチャンネルのうち、共通のチャンネルについてはそのまま移行し、EUMETSAT 形式データセットにないチャンネルについては、同化や品質管理といった用途に応じて相当するチャンネルを選定した。図 3.10.1 に、選定前後のチャンネルの一覧を示す。

現在同化利用しているチャンネルは、いずれも 15 μ m 付近の二酸化炭素の吸収帯にあり、気温に感度のあるチャンネルである。同化して利用するチャンネルについては、標準大気における荷重関数から、感度高度が近いチャンネルを選定することとした。その際、荷重関数のテールがモデル最上面にかかっているチャンネルや、荷重関数に歪みがあるチャンネル、水蒸気やオゾンにも感度があり計算精度のやや劣るチャンネルは

除いた。また、チャンネル番号が隣り合う場合は、観測原理に起因するチャンネル間誤差相関が考えられるため、片方のチャンネルを除いた。

(2) 品質管理用チャンネルの選定

ハイパースペクトル赤外サウンダデータの同化における放射伝達計算では雲の影響を考慮していないため、雲の影響を受けた観測データを除去する必要がある。雲判別は、雲の有無の判別と、判別された雲についての雲頂高度の推定という、2段階で行っている。

(i) 巻雲検出用チャンネル

雲の有無の判別では、窓チャンネルにおいて観測値と晴天放射計算値を比較する手法と、11 μm 帯と12 μm 帯のチャンネルをペアとして用い巻雲を検出する手法の、2つの手法により行っている。このうち、巻雲の検出では、氷粒子に対する特性が波長によって異なることを利用し、2つのチャンネルの差分値が閾値を超えた場合を巻雲とする。巻雲が検出された観測地点では、対流圏に感度のないチャンネルのみを利用する。

EUMETSAT形式のデータセットには、これまで巻雲の検出に使用していたチャンネルが含まれていなかったため、新たなチャンネルのペアを選定した。ペアの選定においては、従来のペアの差分値との相関が高いことを重視し、また閾値は従来の検出結果と同等となるように調整した。

(ii) 雲頂高度推定用チャンネル

窓チャンネルの観測値を利用して雲と判定され、巻雲が検出されなかった場合には、雲頂高度を推定し、推定した雲頂高度より下層に感度が低いチャンネルのみを利用する。雲頂高度の推定には、Eyre and Menzel (1989)の方法¹を用い、同化していないチャンネルからチャンネルのペアを選択して用いる。これまで使用していたチャンネルのペアがEUMETSAT形式のデータセットに含まれていなかったため、荷重関数の形状や感度のピーク高度が近いチャンネルから、新たなチャンネルのペアを選定した。

上記のように品質管理チャンネルを選定したのち、品質管理の結果を確認した。EUMETSAT形式の同化チャンネルについて、対応するNESDIS形式の同化チャンネルと雲除去の結果が概ね同等となることを確認した。

(3) 上層に感度があるチャンネルのグロスエラーチェックの閾値緩和

データセット移行に伴う配信チャンネルの違いに対応するため、ここまで述べてきた利用チャンネルおよび品質管理チャンネルの変更を行い、数値予報精度に変化が生じないように対応を行った。しかしながら、本開

¹ ある高度に単層・黒体の雲があると仮定し、放射伝達モデルを用いて計算した放射輝度が観測値と最も合致する雲量と高度を求める手法。CO₂スライシング法と呼ばれる。複数のチャンネルを用いると雲量と高度が同時に求められる。

発とは別に先行して実施した、データ利用方法や解析システムの変更（マイクロ波輝度温度全天同化とアウターループ(気象庁2021a)およびハイブリッド同化(気象庁2021a)の導入)により、これまでのハイパースペクトル赤外サウンダの品質管理方法では解析値の精度が悪化する問題(後述)が生じた。そのため、IASIだけでなく利用中の他のハイパースペクトル赤外サウンダ²についても、品質管理手法を見直す必要が生じた。

上記の問題は、システムの変更に伴って成層圏を中心とした上層の平均解析場が変化したことによって、同化利用するデータに偏りが出たために生じたと考えられる。実装されていた品質管理では、雲の影響を受けたデータをより厳しく取り除くため、バイアス補正後のO-B(観測値と第一推定値との差)に対するグロスエラーチェック(外れ値を除く処理)の閾値として、O-Bの統計から見積もった標準偏差の1.5倍を用いていた(岡垣2015)。これは0のまわりに正規分布するO-Bのうち、正規分布の裾に当たるデータを取り除き、0に近いデータを厳選して利用することを想定していたものである。ところが、システムの変更により上層の平均解析場が変化することで、正規分布の中心が0から外れ、片側のデータが過剰に取り除かれることで、偏ったデータが抽出されることとなった。また、それらに変分法バイアス補正(VarBC, 佐藤2007)が適合することにより、偏ったデータが使われ続けることとなった。その結果、解析値の精度が悪化したと考えられる。また成層圏より上部の大気上層では雲の影響はないことから、雲の影響を受けたデータを厳しく取り除く目的のこの閾値の設定はそもそも適切ではない。これらのことから、上層に感度があるチャンネル(具体的には波数680.0 cm^{-1} 以下のチャンネル)のグロスエラーチェックの閾値をO-Bの標準偏差の2.5倍に緩和し、正規分布するO-Bの大部分のデータを利用することで、データの偏りが生じないようにした。

なお、下層に感度のあるチャンネルについては、上記のシステム変更に伴う悪影響はみられていないことから、今回は変更を加えず、これまで通り標準偏差の1.5倍を閾値として用いる。ただし、本来は正規分布の裾に当たるデータも含めて利用することが望ましいため、下層チャンネルについても、グロスエラーチェック閾値を緩和できるような品質管理の改良を進める必要がある。

(4) スキャンバイアス補正テーブルの再作成

バイアス補正は、スキャン位置に依存する補正をテーブル参照により補正するスキャンバイアス補正と、大気状態に依存する補正を行う変分法バイアス補正の2段階で行っている。前述のように、システムの更新により平均解析場が変化したことから、最新のシステム

² 米国の地球観測衛星Aquaに搭載のAIRS、並びに米国の現業気象衛星Suomi-NPPおよびNOAA-20に搭載のCrIS。

における O-B の統計結果に基づき、スキャンバイアス補正テーブルを再作成した。

(5) 観測誤差の再設定

観測誤差は O-B の統計における標準偏差を用いて設定されている。更新後のシステムにおいて、グロスエラーチェックを適用する前のデータ³を用いて O-B の統計を取り直し、その標準偏差を改めて観測誤差とした。設定した観測誤差を、後述する Metop-C と合わせて、図 3.10.3 に示した。再設定後の観測誤差は、変更前の観測誤差と比較して極端な差異はなく、また Desroziers et al. (2005) の手法により診断された値とも近い値となっていることを確認している。

3.10.3 データセット移行に関する性能評価試験

IASI データセットの移行やハイパースペクトル赤外サウンダに対する品質管理変更の影響を確認するため、2020 年 10 月時点の現業全球数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに上記の変更を加えた実験 (TEST) の比較を行った。実験期間は 2019 年 7 月 10 日から 9 月 11 日 (夏実験)、2019 年 12 月 10 日から 2020 年 2 月 11 日 (冬実験) で、8 月および 1 月のそれぞれ 1 か月が検証対象期間である。

(1) 利用データ数

性能評価試験では、データセット移行による利用データ数に本質的な差異は見られなかった。性能評価試験で実施している全球サイクル解析では、どちらの形式のデータも通常はデータ待ち受け時間内に全てのデータの入電が完了する。

なお、全球速報解析の場合には、EUMETSAT 形式データセットに移行することで、データ数は 2% 程度増加することを確認している。これには DBNet データの追加が寄与している。

(2) 解析値・第一推定値の変化

現在利用しているハイパースペクトル赤外サウンダのチャンネルは気温に感度のあるチャンネルのみであることから、解析値の平均場は主に気温で変化が見られた (図 3.10.2)。対流圏中層付近 (400-700hPa) や上部成層圏 (50hPa 以上) では気温が若干上昇し、対流圏海面付近 (100-200hPa) では若干低下した。上層に感度があるチャンネルのグロスエラーチェック閾値の緩和やスキャンバイアス補正テーブルの更新など、バイアス補正に関わる変更の効果と思われる。

解析に用いられた各種観測データについて、第一推定値との差異や利用データ数の変化を確認したところ、いずれも顕著な変化はなく、第一推定値の精度の向上や悪化は確認されなかった。

³ グロスエラーチェック後のサンプルによる統計では、閾値が厳しく設定されている下層チャンネルにおいて観測誤差が不自然に小さくなってしまったため、グロスエラーチェック前のデータを母集団とした。

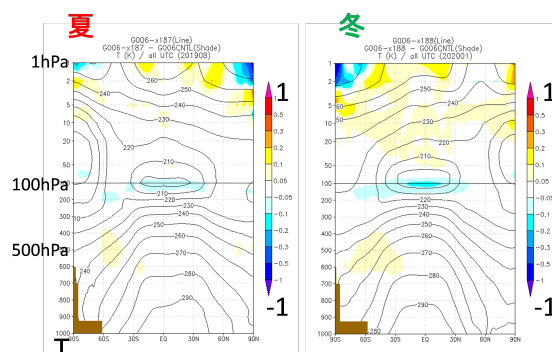


図 3.10.2 気温の解析場の TEST と CNTL の差異の帯状平均。左：夏実験、右：冬実験。

(3) 予測値の変化

解析値およびラジオゾンデ観測を対象とした予測値の検証では、500hPa 高度場や 850hPa 気温などの代表的な要素に対し概ね中立であり、同等の精度が得られることを確認した。

その後、性能評価試験のベースとなる実験を、2021 年 3 月末に現業化された全球解析の鉛直層増強等 (第 3.1 節) を適用したシステムに更新して、同様の実験を実施した。その結果、更新したシステムにおいても、データ形式の変更前後で、解析、予測とも同等の精度が得られ、新たな対処は不要であることを確認した。これらをふまえ、本変更をその他の観測データの利用改良 (第 3.6 節、第 3.8 節および第 3.12 節) とともに、2021 年 6 月 29 日に現業システムの全球解析に適用した。

3.10.4 Metop-C/IASI の利用

EUMETSAT 形式の IASI データ利用を現業化したのち、Metop-C 搭載の IASI についても新たに EUMETSAT 形式データを取得し、利用に向けた開発を進めた。

Metop-C は、Metop-A や Metop-B と同様に、日中に衛星が通過する時間帯が午前中に当たる太陽同期軌道 (午前軌道と呼ばれる) で運用されている。ただし、複数の Metop 衛星は観測時刻が近くなり過ぎないように、時間間隔を開けて通過するように運用されている。このうち、Metop-A は 2021 年 11 月に運用を終了 (IASI については 9 月に通常観測を終了) し、利用中の午前軌道の衛星は Metop-B だけとなったことから、午前軌道におけるハイパースペクトル赤外サウンダのデータ数やカバレッジを確保する上で、特に Metop-B の障害や点検時の備えとして、Metop-C の利用は重要である。

方針として、既に Metop-A および Metop-B の IASI は利用していることから、Metop-C の IASI についてデータ品質が同程度であることを確認した上で、同様の方法で利用することとした。同化に必要なパラメータとして、スキャンバイアス補正テーブルの作成および、観測誤差の設定を行った。いずれも、2021 年 7 月時点の現業システム相当の実験システムを用い、O-B の

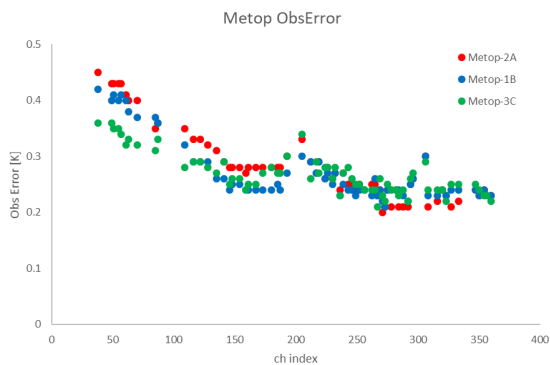


図 3.10.3 O-B 統計に基づき IASI に設定した観測誤差。横軸はチャンネルインデックス (500 チャンネル中の通番)。赤 : Metop-A、青 : Metop-B、緑 : Metop-C。

統計により作成した。図 3.10.3 に、設定した Metop-C の観測誤差を、Metop-A および Metop-B とともに示す。Metop-C は既存の Metop-A や Metop-B と顕著な差異はなく、波長帯によっては若干ノイズが少ないという特徴も見られた。

品質管理の結果について、O-B のヒストグラムや平均値のマップ、雲判別結果等の品質管理フラグの状況などを確認した。既存の Metop とほぼ同等となり、利用方法に問題はないことを確認した。

3.10.5 Metop-C 利用に関する性能評価試験

Metop-C/IASI の利用による効果を確認するため、性能評価試験を実施した。その際、Metop-C/IASI 利用開始時点では Metop-A の運用は既に終了している状況を想定し、Metop-A の利用を止め Metop-C を利用した場合に、解析・予測精度が同程度に維持できることを確認することとした。

2021 年 7 月時点の現業全球数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに Metop-C/IASI を追加し Metop-A/IASI を棄却した実験 (TEST) の比較を行った。(つまり IASI については、CNTL では Metop-A および Metop-B が利用され、TEST では Metop-B および Metop-C が利用される。) 実験期間は 2020 年 12 月 16 日から 2021 年 2 月 11 日 (冬実験)、2021 年 6 月 18 日から 8 月 11 日 (夏実験) で、1 月および 7 月のそれぞれ 1 か月が検証対象期間である。

(1) 利用データ数

冬実験、夏実験とも TEST における Metop-C/IASI の利用データ数は、CNTL における Metop-A/IASI と同程度であることを確認した。IASI の利用データ数合計は TEST で約 3% 減少したが、これは Metop-B との重複領域が Metop-A と Metop-C で若干異なるためである。TEST では Metop-C により、IASI データのカバレッジが Metop-B のみを利用するより拡大していることが確認できた。

(2) 解析値・第一推定値の変化

平均解析場の差異は微小であった。解析に用いられた各種観測データについて、第一推定値との差異や利用データ数の CNTL に対する TEST の変化を確認した。ラジオゾンデの気温観測など、変化は小さく概ね中立の結果であった。気温に感度のあるマイクロ波サウンダ AMSU-A の結果を確認すると、熱帯や南半球の上層チャンネルで O-B のばらつきが減少し、第一推定値の精度向上を示す傾向が見られた一方、対流圏上層付近に感度のあるチャンネルで、O-B 標準偏差が若干増加し、第一推定値の精度悪化を示す傾向が確認された。詳細については調査中であり今後の課題であるが、顕著な予測精度の悪化にはつながらないことを確認している。

(3) 予測値の変化

予測場の精度について、解析値およびラジオゾンデ観測を対象として、主要な要素 (500hPa 高度、地上気圧、250hPa 風速、850hPa 風速、700hPa 相対湿度) の検証を行った。顕著な改善や改悪はみられず、概ね精度を維持していることを確認した。他センター解析値や自分解析値を対象とした予測場の検証、台風進路予測精度についても同様に、顕著な改善や改悪はなく、いずれも概ね精度を維持していることを確認した。

3.10.6 まとめと今後の課題

全球数値予報システムにおいて、同化利用するハイパースペクトル赤外サウンダ IASI のデータセットを、NESDIS 形式のデータセット (616 チャンネル) から EUMETSAT 形式のデータセット (500 チャンネル) に移行した。その際、移行後のデータセットに含まれないチャンネルについては、代替として移行前のチャンネルの用途に応じて相当するチャンネルを選定した。また、最新のシステムに品質管理を適合させるため、すべてのハイパースペクトル赤外サウンダに対し、上層に感度のあるチャンネルのグロスエラーチェック閾値の緩和や、スキャンバイアス補正テーブルの再作成、観測誤差の更新を実施した。性能評価試験により、この変更前後で解析、予測とも意図通り同等の精度が得られることを確認し、2021 年 6 月 29 日に、現業システムに適用した。

Metop-C に搭載された IASI について、EUMETSAT 形式のデータセットを取得し、利用に向けた開発を進めた。データ品質は他の Metop 衛星に搭載されている IASI と同程度であることが確認できたことから、同様の手法で利用することとした。性能評価試験は、Metop-A の運用終了を考慮し、Metop-A を除いた上で Metop-C を利用する設定で実施した。その結果、この設定でも解析・予測精度を同程度に維持できることを確認した。この結果をふまえ、2021 年 11 月 24 日に、全球システムでの Metop-C/IASI の現業利用を開始した。なお、第一推定値の精度については、解析に用い

た観測データとの比較において、一部のデータで悪化を示す傾向が確認されるなどの課題もあり、今後品質管理を中心に同化手法の改善に向けて取り組むこととしたい。

現在、ハイパースペクトル赤外サウンダの利用は、気温に感度のあるチャンネルにとどまっている。今後は、水蒸気チャンネルなど利用チャンネルの拡充を図るとともに、より多くの観測情報を予測精度に反映させるため、チャンネル間の観測誤差相関を考慮したデータ同化手法の改良に取り組む。また、メソ解析や局地解析での利用に向けた開発にも取り組む予定である。

参考文献

- Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385–3396.
- Eyre, J. R. and W. P. Menzel, 1989: Retrieval of Cloud Parameters from Satellite Sounder Data: A Simulation Study. *J. Appl. Meteor. Climat.*, 267–275.
- 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, 2011: 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 57 号, 気象庁予報部, 25–36.
- 佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 171–175.
- WMO, 2017: Guide to the Direct Broadcast Network for Near-real-time Relay of Low Earth Orbit Satellite Data: Attachment to the Guide to the WMO Information System (WMO-No. 1061).
- 気象庁, 2021a: ハイブリッド同化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, 18–22.
- 気象庁, 2021b: マイクロ波輝度温度全天同化とアウター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, 2021c: 全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ IASI のデータセット移行. 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.

3.11 航空機観測データの高度利用

3.11.1 はじめに

航空機観測データは上空の気象要素を直接観測した貴重なデータであり、利用高度化のための開発に取り組んでいる。気象庁の全球解析ではデータ同化手法として4次元変分法が導入されており、利用する観測データにはバイアスがないことを前提としている。しかし航空機観測の気温データには機体ごとにバイアスがあることが知られている (Ballish and Kumar 2008) ため、気象庁の全球解析でもバイアス補正を実施している。このバイアス補正について、従来の手法 (酒匂 2010) には課題があったため、2021年6月30日にカルマンフィルタを用いた新しい手法に変更した。

本節では、全球解析へのカルマンフィルタによる航空機気温バイアス補正適用に関する性能評価試験の結果を報告する。従来のバイアス補正手法の課題、カルマンフィルタを用いた新しいバイアス補正の実装内容については、気象庁 (2021) を参照されたい。

3.11.2 性能評価試験の設定

性能評価試験では、コントロール実験 (CNTL) として2020年8月27日時点の現業の全球解析・予報モデル相当のシステムを利用した。CNTLには酒匂 (2010) による航空機気温バイアス補正が実装されている。テスト実験 (TEST) はCNTLの航空機気温バイアス補正手法を気象庁 (2021) で解説したカルマンフィルタを用いた手法に置き換えた実験であり、その他についてはCNTLと同一である。カルマンフィルタによるバイアス補正に必要なランダム誤差共分散の実験開始時の値については、実験期間前の2年分の航空機気温データから作成し、調整パラメータ (D) については0.001とした。実験期間は、夏季、冬季それぞれ2019年7月10日～9月11日、2019年12月10日～2020年2月11日とした。

バイアス補正の対象となる航空機気温データはAM-DAR報で通報されたデータであり、AIREP報で通報されるデータに対してはTEST・CNTLともにバイアス補正は実行されない。夏季実験・冬季実験の検証期間はそれぞれ2019年8月・2020年1月である。

3.11.3 性能評価試験の結果

(1) 航空機観測のデータ分布

全球解析で使用される航空機観測のデータ分布の例を図3.11.1に示す。航空機観測は北半球で多く南半球では少ないといった特徴がある。同じ直接観測データであるSYNOPやTEMPのデータ分布と比較すると観測データ数は多いが、航空機の運行状況の影響を受けるため、時刻や天候、平日・休日の違いによっても利用できるデータ数が変化する。

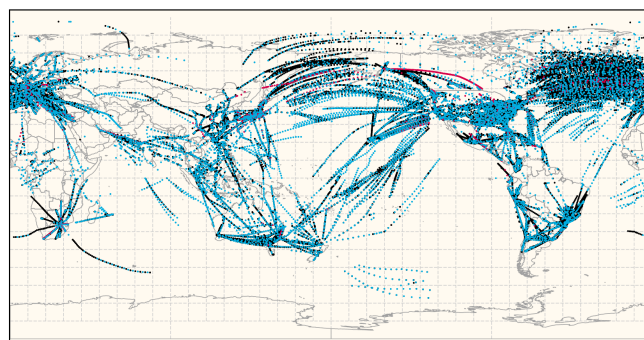


図 3.11.1 2019年8月1日00UTCの全球解析における航空機観測データの分布図。青点はデータ同化に利用されたデータ、赤点は品質管理でリジェクトされたデータ、黒点は品質管理はパスしたが、データ同化には使用されなかったデータを示している。

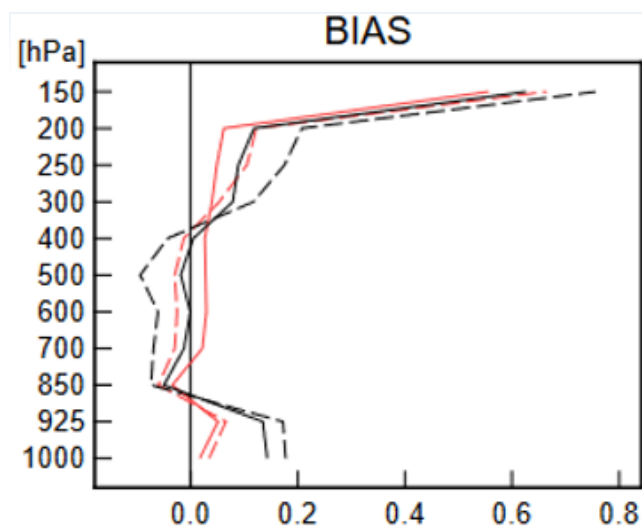


図 3.11.2 第一推定値と解析値に対する航空機気温観測のバイアスの鉛直プロファイル。赤線、赤破線はそれぞれTESTの解析値と第一推定値に対するバイアスを示し、黒線、黒破線はそれぞれCNTLの解析値と第一推定値に対するバイアスを示している。単位はKである。

(2) 第一推定値、解析値に対する航空機気温データのバイアスの変化

CNTLとTESTの第一推定値、解析値に対する航空機気温データのバイアスの鉛直プロファイルを図3.11.2に示す。統計期間は2019年7月2日から2019年9月11日である。第一推定値に対するバイアスに着目すると、概ね全ての鉛直レベルでTESTはCNTLに比べてバイアスが0に近くなっており、新しいバイアス補正手法が有効に機能していることが確認できる。図3.11.3は200hPa付近を飛行するある特定の航空機のCNTLとTESTのD値(観測値から第一推定値を引いた値)の時系列を示している。CNTLでは期間平均で+1K程度のバイアス(D値平均)が存在するが、TESTではバイアスが大幅に減少している。

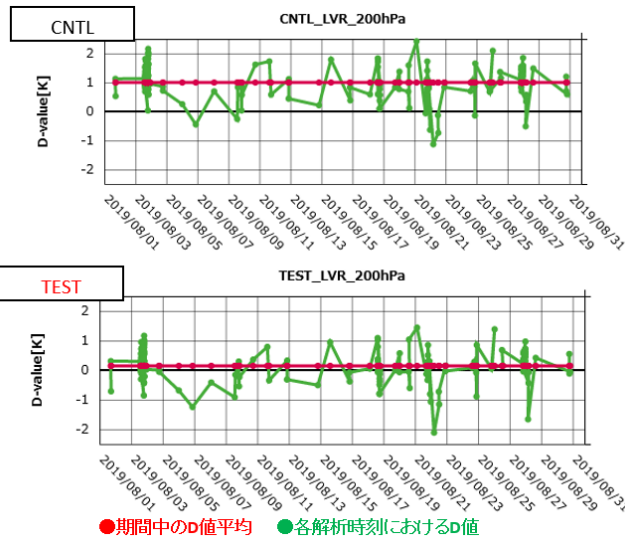


図 3.11.3 200hPa 付近を飛行するある特定の航空機の D 値時系列。上は CNTL、下は TEST の時系列を示す。単位は K である。

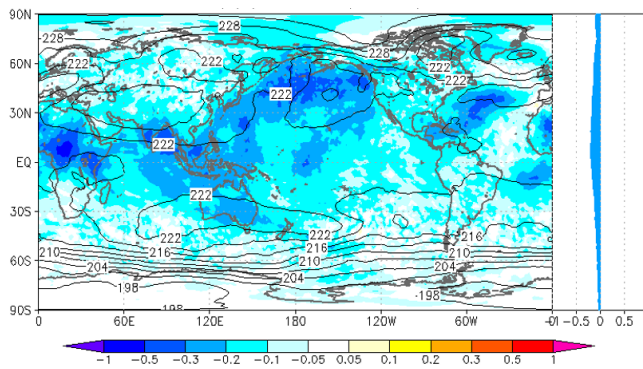


図 3.11.4 2019 年 8 月の 200hPa における月平均気温解析場の変化 (TEST-CNTL)。図の右には緯度帯平均値を示している。単位は K である。

(3) 解析場への影響

図 3.11.2 に示した通り、航空機気温データは 200hPa 付近では解析値に対して高温バイアスを持っているが、カルマンフィルタによるバイアス補正の実装により概ね半分程度に減少している。2019 年 8 月の 200hPa における月平均気温解析場の変化 (TEST-CNTL) を図 3.11.4 に示す。全面的に気温の解析場を下げるインパクトが見られるが、熱帯、北半球中緯度の海上で比較的变化が大きく、航空機観測が少ない南半球の極付近では変化が小さい。また、CNTL では、ECMWF・NCEP・UKMO といった海外の数値予報センターの解析値に対して高温傾向であったが、TEST ではこの傾向が軽減した。例として、図 3.11.5 に ECMWF の解析値を用いて計算した 2019 年 8 月の 200hPa における月平均気温解析場との比較を示す。従来の手法では 200hPa の気温解析場が ECMWF よりも高温傾向にあったが、新しい手法の導入によりこの傾向が軽減している。

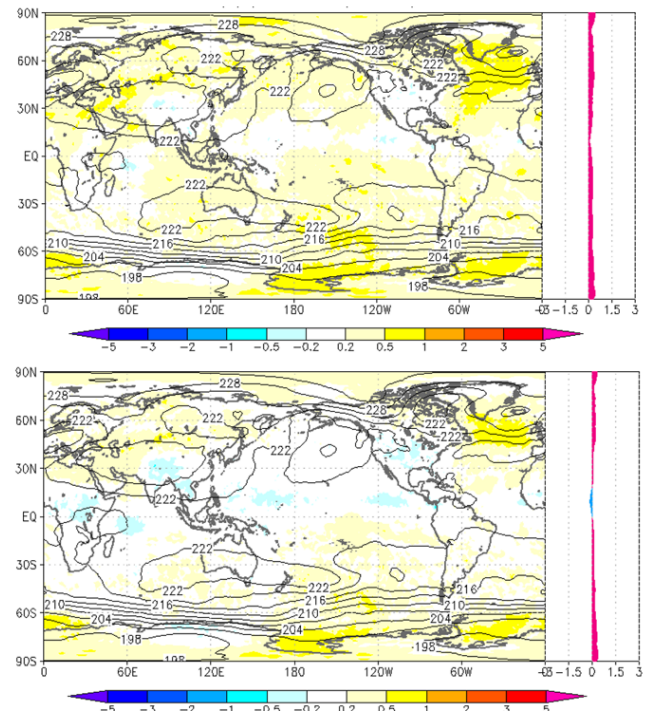


図 3.11.5 2019 年 8 月における ECMWF の 200hPa の月平均気温解析場との比較。上図は CNTL-ECMWF、下図は TEST-ECMWF である。図の右には緯度帯平均値を示している。単位は K である。

(4) 予測精度への影響

図 3.11.6 はラジオゾンデを参照値とした全球モデルの 264 時間予測までの予測精度の変化を示している。これらの図は二乗平均平方根誤差 (RMSE) の TEST-CNTL の差分を示しており、マイナス (黄色) の領域にプロットがあれば改善であることを示している。予測中盤の大気下層の気温、東西風など、やや改悪傾向の要素・高度も見られるものの、その他多くの要素・高度では、概ね中立からやや改善となっている。特に高度の予測値については他の要素と比較して改善傾向がよく現れている。高度の予測値はモデルの気温場と水蒸気場から計算されているため、バイアス補正手法改良による気温の鉛直プロファイルの改善が比較的分かりやすく現れていると考えられる。

台風予測への影響を確認するため、2019 年 7 月 20 日から 10 月 11 日に存在した台風に対して精度検証を行ったところ今回の変更が台風進路予測に与える影響は概ね中立であったが、改善事例として 2019 年台風第 8 号 (T1908) に対する 2019 年 8 月 3 日 00UTC 初期値の予測を示す。図 3.11.7 に示すとおり、T1908 は気象庁ベストトラックでは 8 月 6 日から 7 日にかけて九州に上陸後、対馬海峡を通過し朝鮮半島南東領域を北上しているが、CNTL の進路予測はベストトラックに対して西にずれ、九州西海上を北西進して 7 日 00UTC には黄海に進む予測となっている。TEST でもベストトラックに対して西にずれた予測となっているが、48

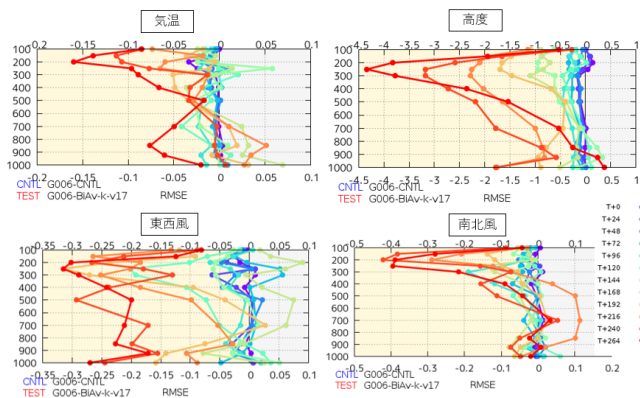


図 3.11.6 ラジオゾンデを参照値とした予測時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の予測精度 (RMSE) の変化。T+0 は予測初期値の変化、T+264 は 264 時間予測の変化を示す。縦軸は気圧高度 (hPa)、横軸は RMSE の TEST-CNTL の差分 (単位は気温:K、ジオポテンシャル高度:m、東西風、南北風:m/s) を示す。マイナス領域 (黄色) にプロットがあれば改善である。

時間以降の予測は CNTL よりややベストトラックに近づいており、九州西海上を北西進して朝鮮半島南西領域付近を北上する予測となっている。このような違いが生じた要因を次に示す。

予測初期時刻の 275hPa から 350hPa において解析に利用された航空機データの位置における TEST と CNTL の解析インクリメント (解析値 - 第一推定値)、300hPa の気温、及び 200hPa の高度の予測初期値 (図 3.11.8) を比較すると、300hPa 付近の黒破線で示した領域における気温のインクリメントが CNTL (図 3.11.8 (b)) では正となっているが TEST (図 3.11.8 (a)) では負となり、これに対応して CNTL に比べて TEST の 300hPa の気温の初期値が低くなっている (図 3.11.8 (c))。初期値の時点では 200hPa の高度に大きな違いは見られないが (図 3.11.8 (d))、この初期値の違いが 200hPa のジオポテンシャル高度の予測に影響を与えたと考えられる。その後の 200hPa 高度の予測を TEST と CNTL で比較 (図 3.11.9) すると、予測時間の進行とともに黒破線内の差分が東進して 72 時間後の予測に当たる 6 日 00UTC には黄海付近に達している。この影響を受けて太平洋高気圧に対応する高圧部の西への張り出しが弱まっており、TEST の進路予測が CNTL に比べて東寄りになったと推測される。

3.11.4 まとめと今後の予定

2009 年に気象庁全球解析システムに導入された航空機気温データのバイアス補正手法には複数の課題があったため、それらを解決するバイアス補正手法を考案・実装し、解析・予測精度へ与える影響を調査した。夏・冬 1 か月の性能評価試験の結果、従来の手法に比べて航空機気温データのバイアスが適切に補正され、概ね全ての鉛直レベルで第一推定値に対するバイアスが改善した。また、複数の海外数値予報センターの解析値

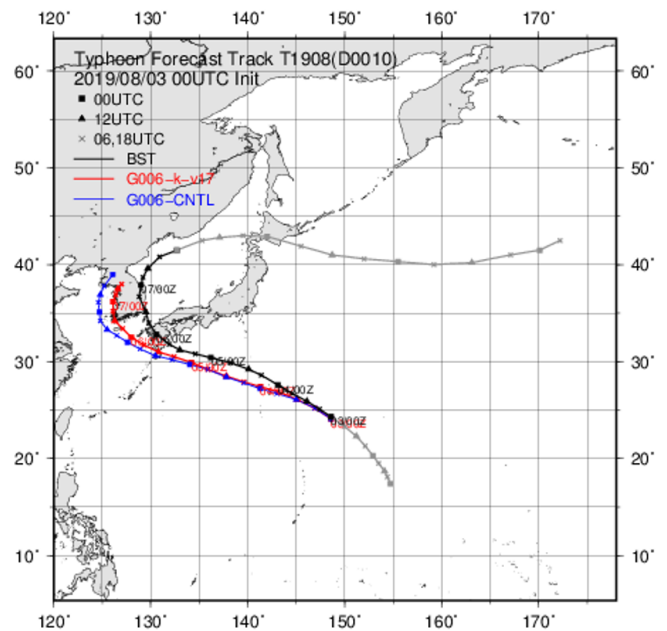


図 3.11.7 T1908 に対する 2019 年 8 月 3 日 00UTC 初期値の進路予測。赤線は TEST、青線は CNTL の台風進路予測を示す。黒線及び灰色線は気象庁ベストトラックである。

との比較から 200hPa の気温解析場の高温傾向が減少することを確認した。ラジオゾンデを参照値とした気温・高度・風の予測精度検証では、概ね中立からやや改善の検証結果が得られた。台風進路予測に与えるインパクトについては概ね中立であったが、当手法の導入により予測初期時刻における気温の修正が上空の気象場の予測に影響を与え、台風進路予測が改善する事例を確認した。

本報告では夏季の性能評価試験結果について報告したが、冬季についても概ね同様の結果となった。以上の試験結果からバイアス補正手法を従来の手法から変更した方がメリットが大きいと考えられたため、当手法は 2021 年 6 月に気象庁の全球解析システムに導入された。現在は当手法の気象庁領域モデルへの導入を検討している。

参考文献

- Ballish, B. A. and V. K. Kumar, 2008: Systematic differences in aircraft and radiosonde temperatures. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1689–1708.
- 酒匂啓司, 2010: 航空機気温データの全球解析での利用. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 33–37.
- 気象庁, 2021: 観測データの新規導入と利用方法の改良. 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, 103–104.

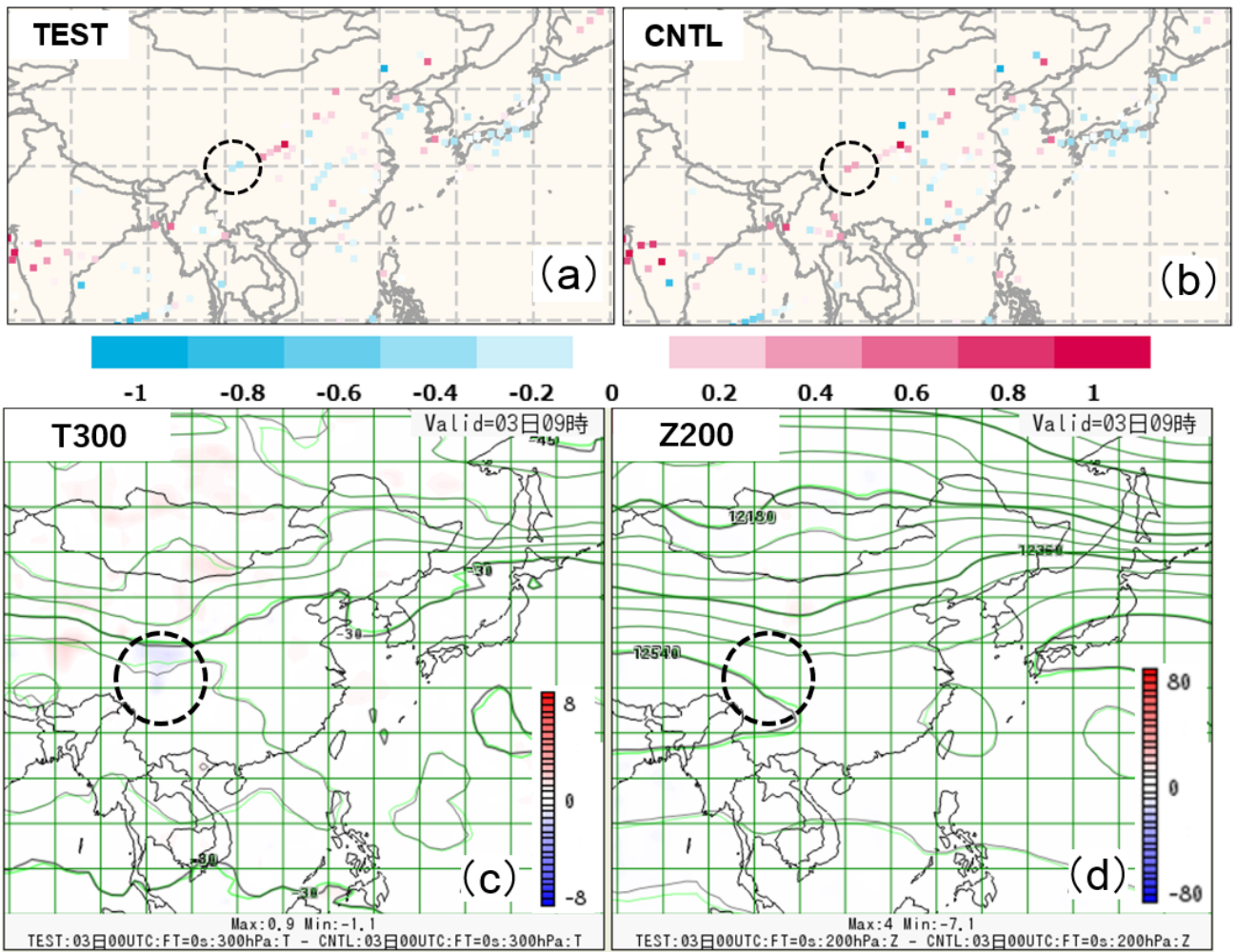


図 3.11.8 予測初期時刻 (2019 年 8 月 3 日 00UTC) において高度 275hPa から 350hPa で解析に利用された航空機気温データの位置における、(a) : TEST、(b) : CNTL の解析インクリメント、ならびに (c) : 300hPa の気温、(d) : 200hPa の高度の TEST と CNTL の比較。(c)、(d) の黒線は TEST、緑線は CNTL の等値線を示しており、カラーは TEST と CNTL の差分である。気温の単位は K、高度の単位は m である。なお、300hPa の気温と 200hPa の高度の図には以前の解析サイクルによる差分も含まれる。

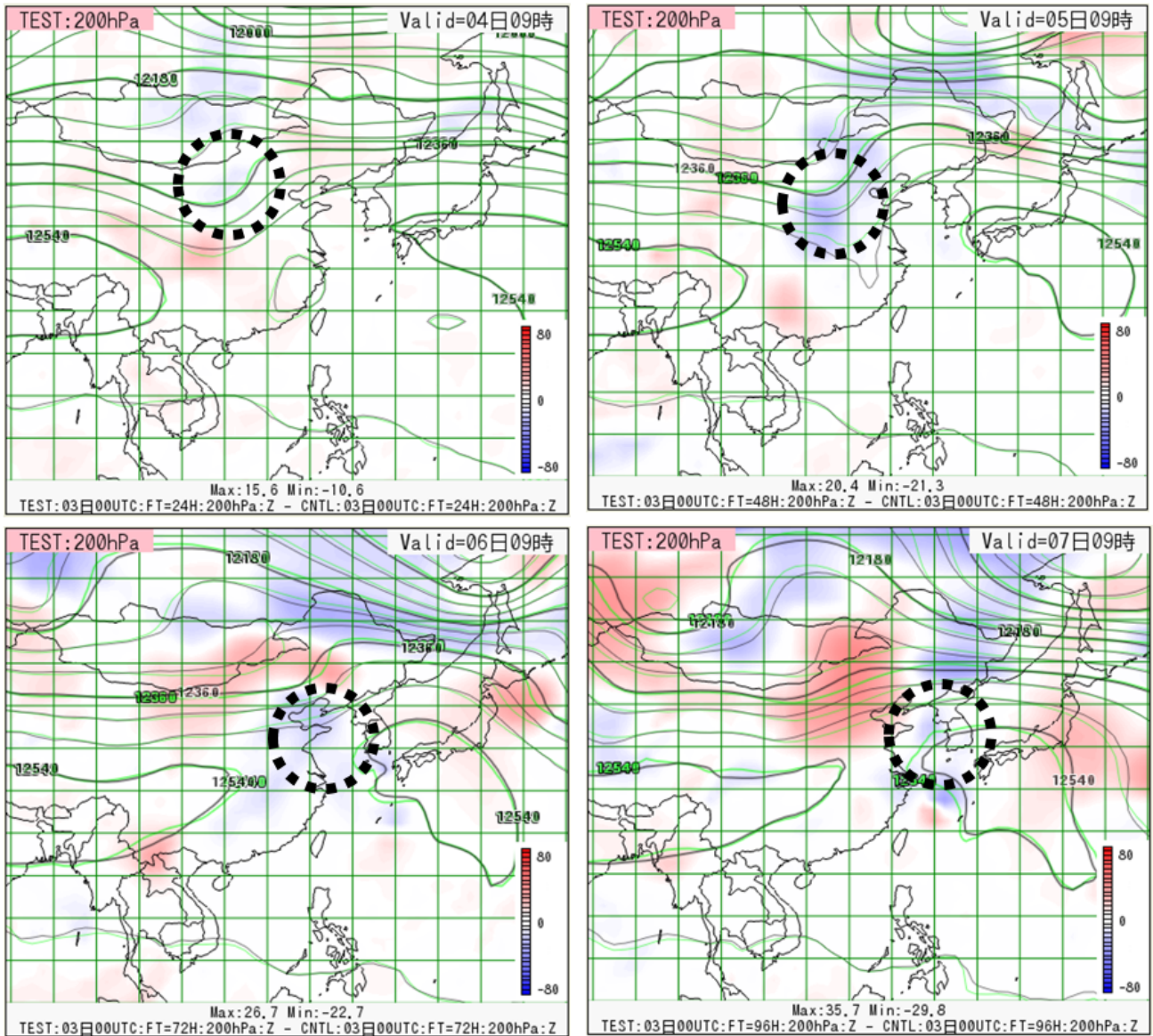


図 3.11.9 TESTとCNTLの200hPa高度の予測。左上、右上、左下、右下の図はそれぞれ24時間後、48時間後、72時間後、96時間後の予測を示す。黒線はTEST、緑線はCNTLの等値線を示しており、カラーはTESTとCNTLの差分である。高度の単位はm。

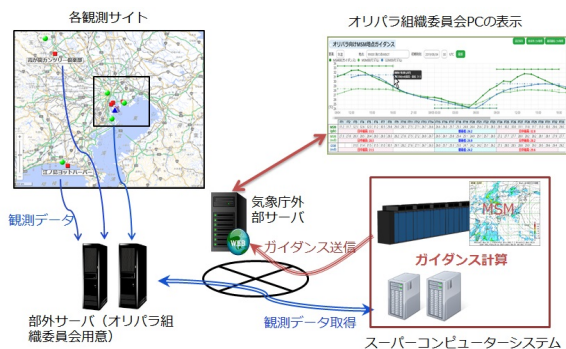


図 3.12.3 オリパラ向けガイダンスにおけるデータの流れの模式図。

- 予測地点：図 3.12.1 に示す 14 地点。
- 予報時間：39 時間 (00, 12UTC 初期値のみ 51 時間)
- 予測手法：目的変数 (予測地点の実況と MSM 地上気温・風との差) を MSM 予測値から算出した説明変数による線形式で求め、カルマンフィルタで線形式の係数を日々逐次更新する。風については、風速を頻度バイアス補正で補正している。

前述したように継続した長期間の観測データを得られる地点は少なく、少ない観測データで予測式 (係数) の最適化を行う必要があったことから、オリパラ向け風ガイダンスの学習方法及び初期係数の設定を見直した。具体的には、気温ガイダンスは通常 2 週間程度で係数の最適化がおおむね完了するため、MSM 気温ガイダンス (三戸 2018) と同様の設定とした。その一方で、MSM 風ガイダンスは係数の最適化に通常数か月以上かかる (高田 2018) ため MSM 風ガイダンス (松本 2018) から一部変更した。変更点としては、学習回数を増やすために、学習条件 (モデル風向と観測風向の差による学習の制限) を緩和した。¹ また、通常の地点ガイダンスでは、新規予測地点が追加された場合に近隣地点の係数を自動的にコピーしてから係数を逐次的に更新するが (高田 2018)、今回は初期係数を近接観測地点のコピーではなく、係数ゼロ (最初は MSM の地上風と同じとする) からスタートとした。これは、後者の方がより早く係数が最適化されたためである²。今回の観測点のほとんどが東京湾海岸といった特殊な地勢に設置されており、近距離でも地点間の観測特性の違いが大きかったことがその要因と考えられる。

3.12.4 精度評価

以下に大会期間中のオリパラ向けガイダンスの精度評価の一例と利用者側のコメントを記す。図 3.12.4 は、競技会場の一つであるお台場海浜公園の日別の最高気

¹ MSM 風ガイダンスでは、MSM の地上風と観測された風の風向が 90 度違うと学習しない。今回はそれを 135 度の違いまで許容することとした。

² MSM のバイアスが適切に補正できているか否かで判断する。

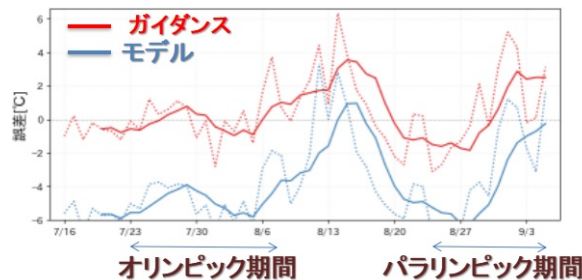


図 3.12.4 お台場海浜公園における、気温ガイダンス及び MSM (地上) の翌日日中の最高気温の誤差。青線が MSM (図中モデル)、赤線が気温ガイダンス。破線が日別値、実線は 10 日移動平均。期間は 2021 年 7 月 16 日～9 月 4 日。

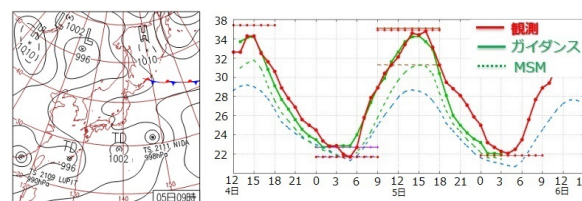


図 3.12.5 2021 年 8 月 5 日 9 時の地上天気図 (左)、8 月 4 日 12 時初期値の気温ガイダンスの毎正時の予測値 (右)。赤実線は実況値、緑実線は気温ガイダンス、緑破線は MSM の予測値。

温の誤差を時系列でみたものである。誤差に着目すると、気温ガイダンスはオリパラ期間中では適切に MSM (モデル) の負バイアスを補正していることが分かる。ただし、大会期間中ではなかったが、8 月中旬はガイダンスはモデルを上方修正して、逆に精度を悪化させている日がある。この期間は前線が停滞して雨の日が多く、太平洋高気圧に覆われる通常の夏のパターンと異なっていたためである。夏季の雨天時に高めに外すことについては、大会前に組織委員会に利用上の留意点として伝えている。なお、お台場海浜公園以外の地点に関しても同様に MSM の誤差の軽減を確認している。

図 3.12.5 は、2021 年 8 月 4 日 12 時初期値の霞ヶ関カンツリー倶楽部における気温ガイダンスの予測及び 5 日 9 時の地上天気図である。翌日は最高気温が 35°C を超える猛暑日になったが、気温ガイダンスは実況に近い値を予測している。大会期間中は暑い日が多かったが、その他の地点でもおおむね最高気温を適切に予測していた。

図 3.12.6 は、カヌー・スラロームセンターの大会期間中における風ガイダンス、MSM (モデル) の風速の日別 ME と RMSE である。カヌー・スラロームセンターは 2019 年 7 月 13 日から観測が開始され、その後継続して観測データが提供され続けた地点である。当地点の風ガイダンス RMSE は MSM の地上風の正バイアスを補正し、MSM の風速予測の誤差を大きく軽減していることがわかる。なお、予測対象であるオリパラ競技会場の中には、観測データが十分に得られなかった地点もあり、その地点においてはやや精度が落

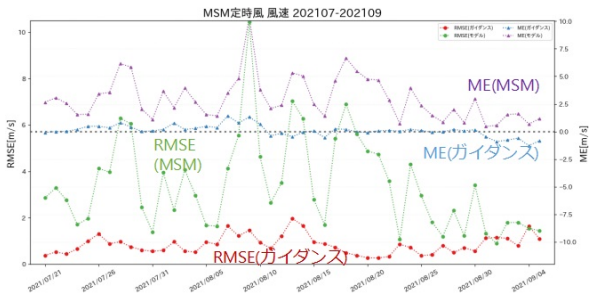


図 3.12.6 大会期間中のカヌー・スラロームセンターにおける、風ガイダンス及び MSM 地上風の風速の日別 ME (右軸)と日別 RMSE (左軸)。赤点線が風ガイダンスの RMSE、緑点線が MSM 地上風の RMSE、青点線が風ガイダンスの ME、紫点線が MSM 地上風の ME。期間は 2021 年 7 月 21 日～2021 年 9 月 4 日。

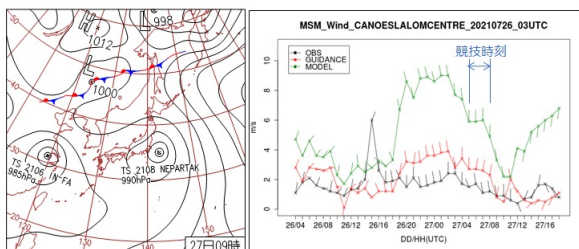


図 3.12.7 2021 年 7 月 27 日 9 時の地上天気図 (左)、7 月 26 日 12 時初期値の風ガイダンス及び MSM 地上風の毎正時の予測値 (右)。黒線は実況値、赤線はガイダンス、緑線は MSM の予測値。

ちる傾向があった。

図 3.12.7 は、2021 年 7 月 26 日 12 時初期値のカヌー・スラロームセンターにおける風ガイダンスの予測及び 27 日 9 時の地上天気図である。翌日に関東の南海上を台風が進む見込みとなっており、風の予測に注目が集まった事例である。競技が行われた時間帯において、MSM の予測を下方修正し、より実況に近い風速を予測していた。

大会終了後、オリパラ組織委員会及びオフィシャルな予報を作成した気象予報士などの関係者を交えて勉強会が行われた。関係者からは今回提供したガイダンスが非常に役に立ち、頻繁にモニター図を確認していたとのコメントを頂いた。特に気温はガイダンスをほぼ全面的に採用してオフィシャルな予報を出していたとのことである。一方、風ガイダンスも頻繁に利用したが、風の変わり目などで実況と差がある場合があり、適宜修正していたとのコメントがあった。風ガイダンスは気温ガイダンスに比べて学習期間が長く必要であり、大会前に観測が途中停止した影響があったと考えられる。また、大会運営では風の詳細な変化が求められるが、現在の MSM 及びその風ガイダンスでは詳細な風の変動の表現が難しいといった現状もあり、これについては今後の課題である。

参考文献

- 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.
- 高田伸一, 2018: 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.

3.13 メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用

3.13.1 はじめに

気象庁では交通政策審議会気象分科会提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務の在り方」に基づき、線状降水帯の予測精度向上に向けた取り組みを進めている。令和2年7月豪雨を受け、これらの取り組みを加速させることを目的に気象庁内に線状降水帯予測精度向上タスクフォース（TF）が立ち上げられた。

令和2年7月豪雨では発生要因の1つとして大気下層の水蒸気の流入が指摘されているが、特に海上においては大気下層の水蒸気観測データが不足している状況である。そのため、線状降水帯の予測精度を向上するには、海上の水蒸気観測を強化してデータ同化に利用することにより、予報初期値における水蒸気場の精度を上げることが重要である。可降水量を同化することで大気下層の水蒸気を同化することと同等の効果が期待できるため、船舶に搭載された GNSS（Global Navigation Satellite System: 全球測位衛星システム）による可降水量観測をメソ解析で利用するための調査、開発に取り組んでいる。

本節では、メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用に関する開発について報告する。

3.13.2 船舶 GNSS 観測

船舶 GNSS はリアルタイムで10分毎にデータが配信されており、可降水量、天頂遅延量といった観測値の他に、GNSS 解析に利用した衛星の数、遅延量残差などの品質管理（Quality Control: QC）に利用可能なパラメータも含まれている。利用可能な船舶 GNSS は試験運用が開始された2021年6月時点では、気象庁の観測船である凌風丸、啓風丸のみであったが、海上保安庁の測量船にも GNSS 観測機器が順次設置され、2021年8月31日には気象庁の観測船2隻、海上保安庁の測量船4隻の合計6隻のデータが利用可能となった。但し、海上保安庁のデータには可降水量導出に必要な気圧や湿度の観測が含まれていないため、これらのデータについてはメソモデルの予測値を利用している。船舶 GNSS の解析手法等は Shoji et al. (2017) をご参照いただきたい。

3.13.3 船舶 GNSS 可降水量の QC 処理

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

- ブラックリストチェック

- 観測地点ごとの観測データ時系列図による監視や海外数値予報センターの観測データ品質管理レポートなどにより、品質に問題があることがわかっている地点
- 異常値チェック
 - 可降水量観測値が1mmより小さい、または90mmより大きい
- グロスエラーチェック
 - D値¹の絶対値が8mm以上
- 空間整合性チェック²
 - 周辺の可降水量のD値平均と空間整合性チェック対象観測点のD値との絶対値の差が5mm以上

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

3.13.4 船舶 GNSS の事後解析データを利用した調査

前述の通り、メソ解析では地上 GNSS の可降水量がデータ同化に利用されているが、これらは陸上の固定点のデータである。船舶 GNSS では、船舶の移動や波浪の影響によるアンテナの不規則な動きが観測精度に与える影響が懸念された。このため、2021年5月時点の現業システムに相当するメソ解析予報システムに凌風丸の GNSS 可降水量を加えて品質調査を実施した。ただし、2021年度初頭の時点では現業利用を想定したリアルタイムデータの提供が開始されていなかったため、事後解析データ³を利用して調査を行った。

凌風丸の船舶 GNSS 可降水量の事後解析データの品質を表3.13.1に示す。また、地上 GNSS の可降水量（船舶 GNSS を含む）のデータ品質を表3.13.2に示す。表中の ALL は入電したデータ、QCPASS は QC 処理を通過したデータ、USE は同化に使用されたデータを示す。これらから、船舶 GNSS 可降水量の事後解析データの D 値標準偏差は地上 GNSS 可降水量の D 値標準偏差と概ね同等であることがわかる。船舶 GNSS 可降水量は ALL, QCPASS でやや負バイアスの傾向となっているが、Shoji et al. (2017) では船舶 GNSS の可降水量はラジオゾンデ観測から計算した可降水量と比較して負バイアス傾向があることが述べられており、船舶 GNSS の可降水量を算出する GNSS 解析手法も負バ

¹ 観測値から第一推定値を引いた値

² グロスエラーチェックでD値の絶対値が5mm以上でかつ、周囲20km以内に地上GNSS観測点もしくは船舶GNSS観測点合計で5地点以上ある場合に実行される。

³ GNSS 解析で使用する衛星軌道情報として精密歴を使用したデータ。精密歴は観測時刻から約2~3週間後に公開されるため、リアルタイムで使用することはできない。

表 3.13.1 凌風丸の事後解析 GNSS 可降水量の D 値統計

統計期間:2020年6月10日から2020年7月15日			
統計量	ALL	QCPASS	USE
データ数	742	686	431
平均 (mm)	-0.28	-0.29	0.28
標準偏差 (mm)	2.89	2.18	2.10

表 3.13.2 地上 GNSS 可降水量の D 値統計 (船舶含む)

統計期間:2020年6月10日~2020年7月15日			
統計量	ALL	QCPASS	USE
データ数	1058913	886048	282981
平均 (mm)	0.26	0.10	0.15
標準偏差 (mm)	2.64	2.25	2.22

イアスの一因になっていると考えられる。

メソモデルの予測に対しても中立からやや改善の影響があることを確認し、2021年6月1日からメソ解析において船舶 GNSS の試験運用を開始した。

3.13.5 リアルタイムでの性能評価試験の検証結果

メソ解析での試験運用開始後、リアルタイムの船舶 GNSS 可降水量を利用した試験運用環境のメソ解析・予報のデータ (TEST) と船舶 GNSS を利用しない運用環境のメソ解析・予報のデータ (CNTL) を比較することにより船舶 GNSS 可降水量利用の性能評価を実施した。評価期間は2021年6月1日から2021年7月15日である。なお、気象庁の観測船2隻のデータは6月1日から利用しているが、海上保安庁の測量船のデータについては期間中に入電が開始した2隻からのデータ品質を確認した後、2021年7月9日から利用している。

(1) 船舶 GNSS 可降水量のリアルタイムデータの品質調査

リアルタイムの船舶 GNSS 可降水量の D 値統計による品質調査結果を表 3.13.3 に、D 値の空間分布を図 3.13.1 に示す。また、事後解析データの D 値ヒストグラムとの比較を図 3.13.2 に示す。これらから、船舶 GNSS 可降水量の事後解析データとリアルタイムデータにはそれほど大きな違いがないことがわかる。海上保安庁の可降水量データについても同様の検証を行ったところ、平均については気象庁観測船に比べ負バイアス傾向が見られたものの、標準偏差についてはほぼ同程度であった (図略)。

(2) メソモデルの降水予測への影響

図 3.13.3 に TEST と CNTL の閾値別 3 時間降水量 (20km 格子平均) の予測スコアを示す。図から降水予測への影響については、強い雨ではバイアスコアにやや悪化の傾向が見られるものの概ね中立である。空振り率、スレッツスコアについては概ね中立であるが、30mm/3h の降水ではやや改善の傾向が確認できる。ス

表 3.13.3 凌風丸のリアルタイム GNSS 可降水量の D 値統計

統計期間:2021年6月1日~2021年7月15日			
統計量	ALL	QCPASS	USE
データ数	5228	5055	743
平均 (mm)	-0.38	-0.39	-0.10
標準偏差 (mm)	2.58	2.12	2.30

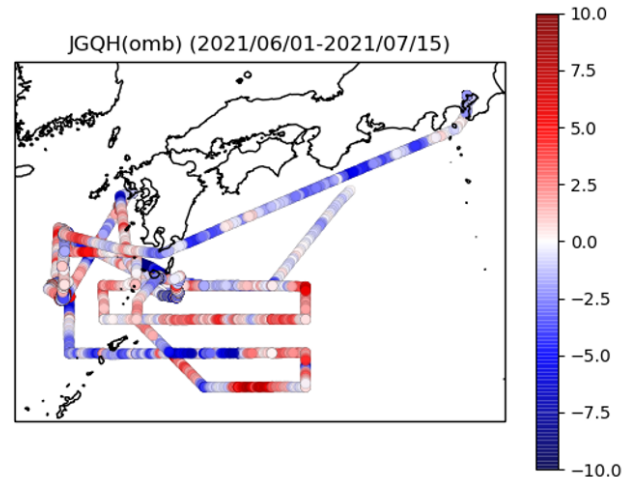


図 3.13.1 性能評価試験期間中の凌風丸の可降水量の D 値分布。期間は2021年6月1日から2021年7月15日。カラーは可降水量の D 値を示している。単位は mm。

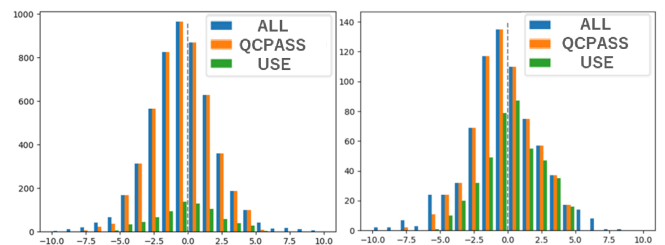


図 3.13.2 凌風丸のリアルタイム GNSS 可降水量 (左) と事後解析 GNSS 可降水量 (右) の D 値ヒストグラム。横軸の単位は mm。ALL は入電したデータ、QCPASS は QC 処理を通過したデータ、USE は同化に使用されたデータを示す。リアルタイムデータは試験運用期間の 2021 年 6 月 1 日から 2021 年 7 月 15 日、事後解析データは事前調査の 2020 年 6 月 15 日から 2020 年 7 月 15 日のデータを使用している。リアルタイムデータの観測時間間隔は 10 分であるが、事後解析データの観測時間間隔は 30 分である。

レッツスコアでは 1 から 3mm/3h 程度の降水でやや悪化が見られる。

(3) 事例検証

2021年6月3日から4日にかけて発生した九州南部の大雨の事例の中から、2021年6月3日0時 UTC 初期値のメソモデルの予測に対する船舶 GNSS 可降水量同化の影響を示す。この事例では、梅雨前線上の低気圧が朝鮮半島南部から日本海を発達しながら北東進し、この低気圧や前線に向かって暖かく湿った空気が

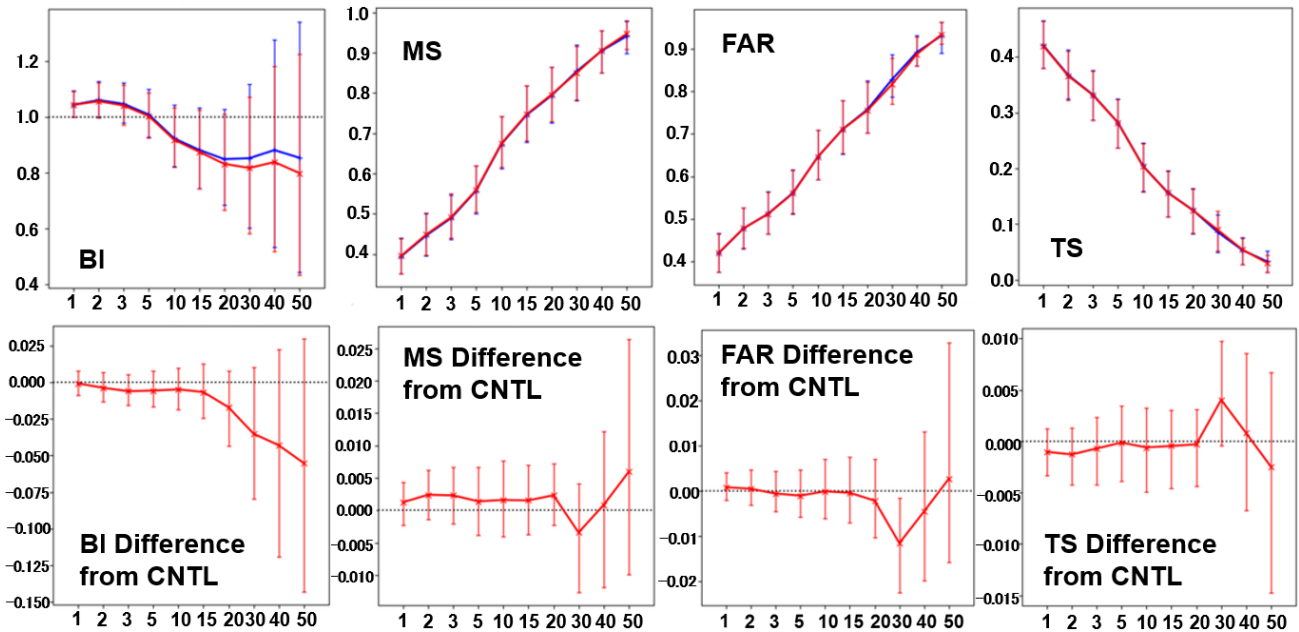


図 3.13.3 降水強度閾値別の対解析雨量のCNTL（青線）とTEST（赤線）のバイアスコア、見逃し率、空振り率及びスレットスコア（上段）と、それらのTESTとCNTLの差（下段）。横軸は3時間降水強度閾値 [mm/3h] を表す。検証格子は20km × 20km。エラーバーは有意検定95%信頼区間を示している。

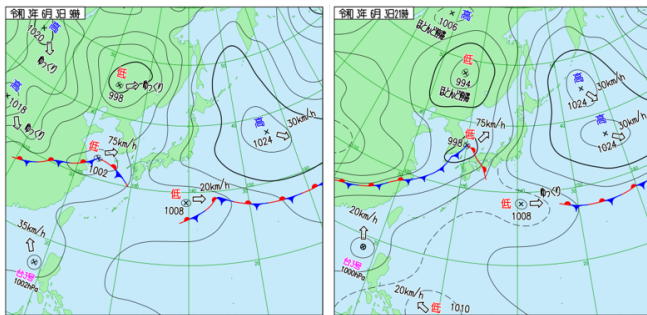


図 3.13.4 2021年6月3日から4日にかけて発生した九州南部の大雨の事例の気象状況。左は2021年6月3日9時、右は2021年6月3日21時の天気図である。

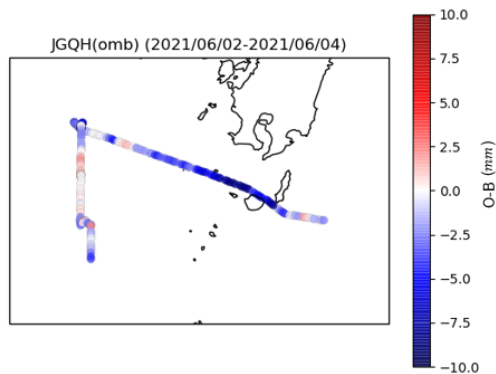


図 3.13.5 2021年6月2日から4日にかけての凌風丸のGNSS可降水量のD値分布。カラーは可降水量のD値を示している。単位はmm。

流れ込んだ（図 3.13.4）ため大気の状態が不安定となり、九州南部で大雨となった。

この時、凌風丸は図 3.13.5 に示す九州南部付近の海上で観測を行っていた。図 3.13.5 から、一連の大雨期間において、凌風丸の可降水量観測値は第一推定値に比べやや少ないことが確認できる。図 3.13.6 に示すとおり、該当の予報初期時刻では、観測地点の周辺においてTESTの方がCNTLに比べて可降水量の空間変化がより明瞭に表現されるようになったが、この変化は以前の解析サイクルによる修正の効果も影響していると思われる。図 3.13.7 は2021年6月3日0時UTCを初期値とした9時間予測における前3時間降水量をTESTとCNTLで比較した図である。TESTはCNTLに比べて赤丸で示した九州南部の強い降水をより実況に近い形で予測しているのが確認できる。

上述のように予測が改善した事例が見られた一方、実況と第一推定値の擾乱の位置ずれが大きい場合には修正が不十分な事例もみられた。特に擾乱近傍のような可降水量の空間変化が大きい領域では、正常と思われる観測がQCでリジェクトされ、同化に利用されない事例もあった。一例を図 3.13.8 に示す。この事例では啓風丸の可降水量のD値は概ね -5 mm から 5 mm の範囲に収まっており、第一推定値との整合性が良いが、2021年6月24日12UTCから2021年6月25日06UTCまではD値が大きくなり観測データがリジェクトされている。この期間、啓風丸は擾乱近傍の可降水量の変化が比較的大きい領域を航行しており、実況と第一推定値の擾乱の位置ずれによってD値が大きくなっ

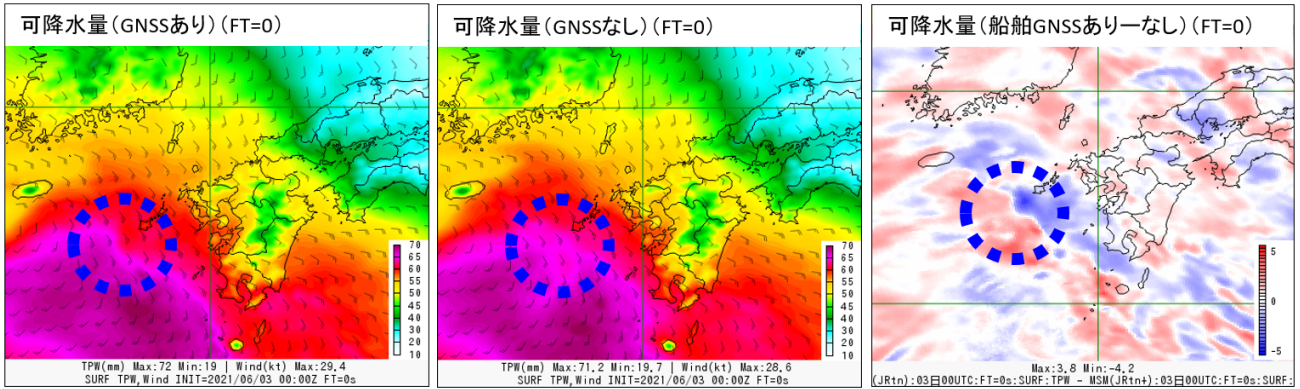


図 3.13.6 2021 年 6 月 3 日 0 時 UTC 初期値における可降水量と風の分布。左は TEST、中央は CNTL の可降水量（カラー）と風（矢羽）の分布を示す。右は可降水量の差分（TEST - CNTL）を示す。

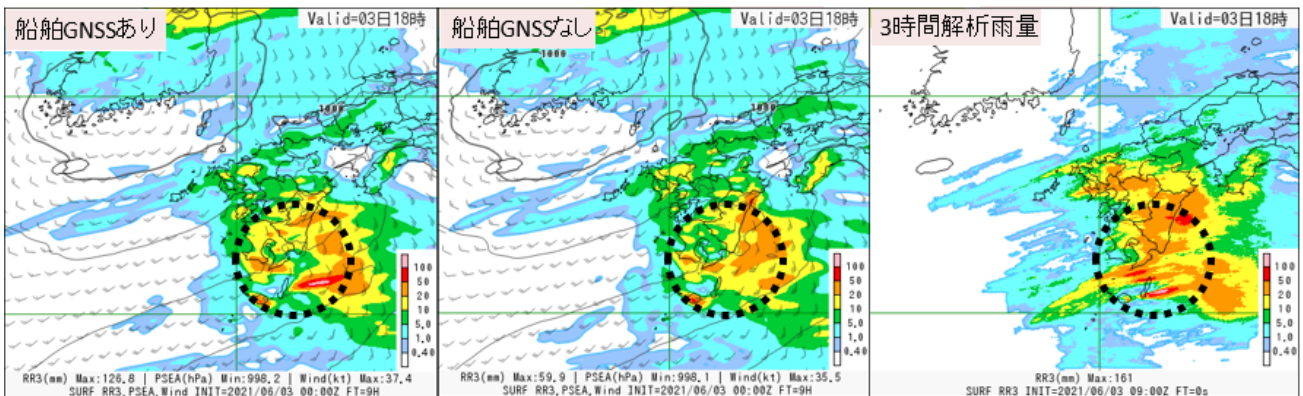


図 3.13.7 2021 年 6 月 3 日 0 時 UTC 初期値の 9 時間予測の前 3 時間降水量予測の比較。左は TEST、中央は CNTL、右が解析雨量。

た（図略）。第一推定値の時間・空間変化率の大きさに応じてリジェクトの閾値を変化させる Dynamic QC(大野木ほか 1997) を導入することにより、船舶 GNSS 観測をより有効に利用できる可能性がある。

3.13.6 まとめと今後の課題

線状降水帯発生の一因として大気下層の水蒸気流入が指摘されているが、特に海上では実況を予報初期値に反映するために必要な水蒸気観測が不足している。そのため、船舶 GNSS による可降水量観測をメソ解析で利用する調査、開発に取り組んでいる。

2021 年 6 月 1 日からのメソ解析における船舶 GNSS の試験運用期間において、船舶 GNSS 可降水量がメソ解析、予報に与える影響を調査した。その結果、船舶 GNSS 可降水量のリアルタイムデータの品質は地上 GNSS 可降水量と比較するとやや負バイアスであるが、標準偏差は概ね同等であることが分かった。降水予測スコアについては統計的に概ね中立であった。事例検証では降水量予測が改善した事例もあったが、実況と第一推定値の擾乱の位置ずれが大きい場合などは周辺の場合を十分に修正できず、予測があまり改善しない事例もみられた。リアルタイムの船舶 GNSS 可降水量データの品質に問題がないこと及び、降水予測改善の事例

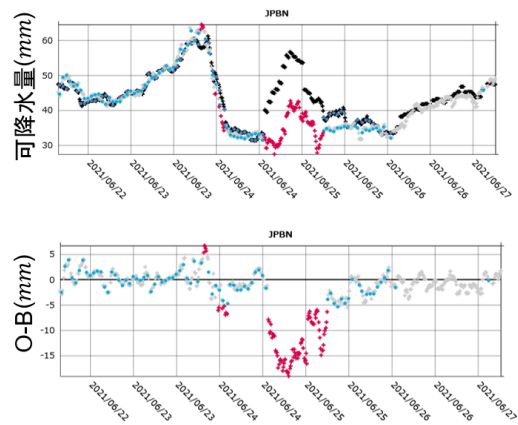


図 3.13.8 啓風丸の可降水量観測の時系列図。上図は可降水量観測値（灰色：QC で正常と判定されたデータ、赤色：QC で異常と判定されたデータ、水色：データ同化に使用されたデータ）及び第一推定値（黒）を示し、下図は D 値（灰色：QC で正常と判定されたデータ、赤色：QC で異常と判定されたデータ、水色：データ同化に使用されたデータ）を示す。

が確認されたことから、2021 年 8 月 31 日にメソ解析において船舶 GNSS 可降水量の現業利用を開始した。ただし、リアルタイムデータを用いた冬季の性能評価試験を実施していないことから、冬季においてはいつ

たん船舶 GNSS の利用を停止する計画である。冬季についてもリアルタイムデータを用いた性能評価試験を行い、検証を行ったのち現業利用を行う予定である。

また、擾乱近傍のような可降水量の空間変化が大きい領域で船舶 GNSS をより有効に利用するために Dynamic QC の導入を進め、更なるデータの高密度・高頻度利用に向けて調査・開発を行う。

参考文献

石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用.

数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54–60.

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.

Shoji, Yoshinori, Kazutoshi Sato, Masanori Yabuki, and Toshitaka Tsuda, 2017: Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan. *Springer*.

第4章 数値予報システムの開発進捗

4.1 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

4.1.1 はじめに

気象庁では、全球数値予報システムの予測精度向上に向けた開発を計画的に進めてきており、第10世代スーパーコンピュータシステムにおいても全球モデル(GSM)の鉛直、水平解像度の増強を計画している(本田 2018)。第3.2.1項で示したとおり、2020年度(令和2年度)末の全球数値予報システムの更新において、GSMの鉛直層を100層から128層へ増強した。次期(令和4年度末予定)のGSMの更新では、水平解像度の20 kmから13 kmへの高分解能化を計画しており、現在開発を進めている。

数値予報モデルの水平解像度向上では、前線、細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上を通じた全般的な予測精度向上を期待する。また、平成30年に気象庁が策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」においても、台風防災への貢献に向けた開発の方向性として、GSMの水平解像度10 km以下への高分解能化を挙げている。次期のGSM更新における水平解像度の20 kmから13 kmへの向上は、2030年に向けたGSMの高度化に向けたステップという意味も持つ。

天気予報や台風予報の予測精度向上には、数値予報モデルの高分解能化に加え、物理過程の改良による系統誤差の軽減も重要になる。次期GSM更新における物理過程改良では、過去のGSM更新時に課題として残った部分への対応や、新しい季節予報システム(Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System 3: CPS3, 第4.11.1項)及び気象研究所の開発成果取り込みによる系統誤差減少も狙う。近年のGSMの物理過程改良(GSM1212-GSM1705: 米原 2019; GSM2003: 気象庁 2021a)では、多くの要素で系統誤差が減少した反面、逆に誤差が拡大した要素もいくつか存在する。例えば、GSM2003では、地形性抵抗過程の改良により対流圏の循環場の予測精度が大幅に向上した反面、下部成層圏における気温や風の系統誤差拡大や、第一推定値とマイクロ波気温サウンダ観測との整合性悪化が課題として残った。また、令和3年度末に導入予定のCPS3の大気モデルはGSM2003をベースに季節予測精度向上のための物理過程の改良が加えられており、CPS3の系統誤差減少に寄与した。大気モデルの維持管理及びGSM・CPS間の開発成果の相互活用を効率的に行う上で、予測対象や時間スケールに依存しない部分については可能な限りGSM・CPSで仕様を共通化することが望ましい。

本節では、全球数値予報システムの水平解像度向上及び物理過程改良に向けた開発状況について報告する。

物理過程の開発においては、GSM2003からの追加改良としての地形性抵抗過程の改善について示すほか、CPS3の開発成果の活用としての湖の扱いの改良とオゾン気候値の更新、気象研究所の開発成果である放射過程における雲氷有効サイズ診断式改良について示す。特に、それぞれの開発において、力学過程改良では実効解像度の向上、物理過程改良ではGSMに見られる風や気温等の系統誤差軽減の効果が得られたことについて示す。また、最後に力学過程と物理過程の改良を組み合わせした場合での、台風及びそれに伴う降水事例へのインパクト等について示す。本節の以下では、現在の解像度、次期更新で計画している解像度でのGSMをそれぞれ「20 km GSM」「13 km GSM」と呼ぶ。

4.1.2 全球モデルの水平高解像度化に向けた力学過程の開発

現在のGSMや各国の数値予報センターの全球モデルの水平解像度は、20 km~10 km程度と総観規模の現象を十分解像可能なものとなっている。この中で、更なる水平高解像度化による予測精度向上を得るためには、格子数や切断波数を増強することに加え、信頼可能スケール(エイリアシング¹、フィルター処理、離散化誤差のいずれにも大きく影響されない空間スケール)をより高波数域まで拡大させ、実効解像度を向上させることが重要である。13 km GSMに向けた力学過程の開発では、実効解像度の向上を念頭に置いた。

(1) 実効解像度を向上させるための変更 格子次数の見直し(1次格子→2次格子)

スペクトルモデルにおいて、切断波数 N で表現した変数についての m 次の非線形項をエイリアシングなしに表現するには、格子点数 L は、 $L > (m+1)N$ を満たす必要がある。このような条件を満たす格子を m 次格子と呼ぶ。移流項の計算にセミラグランジュ法を用いるGSMでは、現在、水平格子系として1次格子を採用している。これは、セミラグランジュ法では主要な非線形項である移流項を陽に評価する必要がないことに由来する(Côté and Staniforth 1988)。一方で、高解像度化に伴い移流項以外の非線形項(気圧傾度力項、物理過程等)に伴うエイリアシングが顕在化し、1次格子のままの高解像度化では、実効解像度の向上が困難となることが近年指摘されるようになった(Wedi 2014; Malardel et al. 2016など)。現在のGSMでも、エイリアシングの問題(スペクトラルブロッキング等)が存在しており、実効解像度向上や計算安定性上の課

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

題となっている (Ujii and Hotta 2019)。

13 km GSM では非線形項に伴うエイリアシングの軽減のため、水平格子系を 1 次格子から 2 次格子に変更する。この際、切断波数は現在の 959 のまま固定とする。本変更により、東西格子数 (赤道付近)・南北格子数はそれぞれ 1.5 倍になり、水平格子間隔は約 13km とする (表 4.1.1)。以下では、1 次格子、2 次格子による波数切断を表す場合、切断波数を xxx として、それぞれ "TLxxx"、"TQxxx" と表記する²。

モデル標高作成におけるフィルター・数値拡散の調整

GSM では、計算安定性向上やエイリアシング、ギブス現象の抑制を目的として、モデル標高 (平均標高) の平滑化や予報変数に対するフィルター処理 (数値拡散) を施している。13 km GSM では、2 次格子化によりエイリアシングが軽減されることを踏まえ、実効解像度の向上のため、中高波数成分の減衰を弱めるようにこれらフィルターや数値拡散を調整する。モデル標高については、元の標高データセットからモデル格子への変換手法と、変換後作用させるフィルターの 2 点について変更を行う。現在の GSM のモデル標高は、米国地質調査所が作成した全球 1km 格子の地形データセットである GTOPO30 をモデル格子に面積積み付けで内挿した後、フィルターとして波数空間において全波数 n 成分について以下の係数をかけることで高波数成分を減衰させている。

$$f(n) = \exp \left(\log(df) \left(\frac{n(n+1)}{N(N+1)} \right)^2 \right) \quad (4.1.1)$$

$$df = 0.1 \quad (4.1.2)$$

ここで、 df は減衰の大きさを表す係数 ($df < 1$) である。また、 N は切断波数である。Elvidge et al. (2019) によるモデル標高の相互比較では、GSM のモデル標高に適用されるこのフィルターは、相互比較に参加した機関のモデルの中ではフィルターによる減衰は小さい部類に含まれるものの、ECMWF の全球モデルである IFS で適用される手法に比べると中高波数域での減衰が強いことが示されている。また、GSM のモデル標高作成手法では、モデル格子への内挿に伴う平滑化が入る分の減衰も含まれる。現在のモデル標高のフィルターの設定は、計算安定性やエイリアシングの影響を考慮して経験的に決められたものであるが、2 次格子の導入によりエイリアシングが軽減されることで、モデル標高の高波数域でのフィルターをさらに弱めることが可能になる。13 km GSM では、これまでの手法よりも標高スペクトルをより保持できるよう、モデルよりも高解像度 (TL7999 相当) の適合ガウス格子に一度内挿したのち、波・格子変換によりモデル格子に変換するようにし、さらに波数空間上でのフィルターを

² それぞれ Linear, Quadratic の頭文字を取る

以下の通り変更し中高波数での減衰が小さくなるようにする。

$$f(n) = S_1(n)S_2(n) \quad (4.1.3)$$

$$S_1(n) = \frac{1}{1 + \lambda_1 \left(\frac{n(n+1)}{N(N+1)} \right)^2} \quad (4.1.4)$$

$$S_2(n) = \frac{1}{1 + \lambda_2 \left(\frac{n(n+1)}{N(N+1)} \right)^8} \quad (4.1.5)$$

S_1, S_2 はそれぞれ、中波数、切断波数域への寄与が大きいフィルターであり、両者の組み合わせによってモデル標高のフィルターを構成する。 λ_1, λ_2 は経験的に決めるパラメータであり、13 km GSM ではそれぞれ、 $\lambda_1 = 0.866, \lambda_2 = 4$ としている。これらの変更により、標高スペクトル計算時に混入する誤差 (内挿処理による高波数成分の減衰や、少ない格子でサンプルすることによるエイリアシング等) を軽減させることが可能になるほか、元データの特徴を可能な限り保持した標高スペクトルを得ることができる。

数値拡散について、GSM では 4 次の水平拡散を数値拡散として、水平発散、相対渦度および仮温度に適用している (JMA 2019)。拡散係数の大きさは、GSM8911 (切断波数 106, 第 3.2 節) の運用開始時に経験的に決めた値を外挿して設定している³。13 km GSM では、中高波数成分の表現やギブス現象の有無、計算安定性のバランスを考慮して拡散係数を現行の半分とした。

(2) 変更のインパクト

20 km GSM と 13 km GSM では、スペクトル法における切断波数は 959 と同じであるが、13 km GSM では、切断波数付近のノイズの減少や中高波数域でのスペクトルの保持に伴う実効解像度の向上により、より小スケールの現象の表現能力が向上する。

2 次格子の導入は、エイリアシングに伴うノイズの減少に大きく貢献する。図 4.1.1 は、南米ペルー付近におけるモデル第 44 層目 (約 500 hPa) の相対渦度の分布を表している。1 次格子を採用している 20 km GSM では、急峻な標高の周辺においてエイリアシングに伴う渦度のノイズが顕著に見られるが、2 次格子を採用している 13 km GSM ではこれらのノイズが大きく減少している。これは、標高の勾配が大きいところでは気圧傾度力の非線形性が大きくなる場所、高次格子の導入によりエイリアシングが軽減されるためである。

図 4.1.2 は日本の中部域におけるモデル標高の鳥瞰図を示す。13 km GSM では地形作成手法の改良により実効解像度が向上し、20 km GSM に比べて中部山岳の起伏や、東京湾、大阪湾、伊勢湾、房総半島、渥美半島、能登半島などがよりはっきり表現されるようになる。

³ 切断波数が 106 の時に全波数 106 成分に対する時定数を 7.2 時間とするのを基準として、拡散係数が切断波数 N の-2 乗に比例するようにしている。

表 4.1.1 20kmGSM(TL959), 13kmGSM(TQ959) の切断波数、東西、南北格子数、格子間隔。

	切断波数	東西格子数 (赤道付近)	南北格子数	格子間隔 (30°N 付近)	格子間隔 (赤道付近)
20kmGSM (TL959)	959	1920	960	19.244 km	20.849 km
13kmGSM (TQ959)	959	2880	1440	12.890 km	13.899 km

これら力学過程の改良は大気のエネルギースペクトルの改善という形で顕著に現れる。図 4.1.3 は、モデル面第 71 層目 (約 150hPa) における、東西風の運動エネルギー (回転成分、発散成分) 及び気温のスペクトルを示す。1 次格子を採用している 20 km GSM では、エイリアシングに伴うスペクトラルブロッキングに対応した切断波数付近でのスペクトルの反り上がりが特に渦度と気温で顕著である。一方、2 次格子を採用している 13 km GSM では、スペクトラルブロッキングはほぼ解消される。また、13 km GSM は全波数 200 以上成分でのスペクトルの振幅が 20 km GSM に比べて大きく、全波数 800 付近までは、1 次格子での 13 km 格子に相当する TL1439 で計算されたスペクトルの振幅とほぼ同等である。このことは、力学過程の改良によりこれまでと同じ切断波数で高い実効解像度向上を得られていることを示している。基底関数として球面調和関数を用いたスペクトル法では、スペクトル変換における計算コストは切断波数の 3 乗に比例する。切断波数を大きく取ることなく、実効解像度向上を得られていることは、計算コストを抑えつつ効率的に高解像度化されていることでもある。

4.1.3 物理過程の改良：地形性抵抗過程の改良

GSM2003 では、Lott and Miller (1997) に基づくサブグリッド地形効果パラメタリゼーションと Beljaars et al. (2004) に基づく地形性乱流形状抵抗を導入した。この改良により、冬季に日本付近でトラフが浅いバイアスが軽減して北半球 500 hPa 高度を始めとした対流圏の予測精度が改善する効果を得た (気象庁 2021a)。一方で、下部成層圏における西風の弱風バイアスの拡大、上部成層圏における第一推定値と衛星観測データの整合性の悪化等成層圏の予測精度には課題が残った。これらの課題を解決するために、地形性重力波抵抗 (Gravity Wave Drag, 以下 GWD) 過程および地形性乱流形状抵抗 (Turbulent Orographic Form Drag, 以下 TOFD) のパラメタを見直した。

GWD による運動量フラックスの地表面での生成量 τ_{sfc} [Pa] は以下で表される。

$$\tau_{\text{sfc}} = \rho_l |\mathbf{u}_l| N_l \left(\frac{H_{\text{eff}}}{3} \right)^2 \frac{\sigma}{\mu} G(D1^2 + D2^2)^{1/2} \quad (4.1.6)$$

ここで、 ρ は大気密度 [kg m^{-3}]、 \mathbf{u} は水平風ベクトル [m/s]、 N はプラント・バイサラ振動数 [s^{-1}]、 H_{eff}

はサブグリッドスケールの地形の実効的な振幅 [m]、 σ はサブグリッド地形の勾配 [m m^{-1}]、 μ はサブグリッド地形の標準偏差 [m]、 $D1, D2$ は重力波の下層風向方向成分及び下層風向に直交する成分、 G は山の形状を反映させた調整パラメタである。下付き文字の l は地表面からの高度が μ から 2μ までの値で平均した値であることを表す。 H_{eff} は、 $z_{\text{blk}}, n_{\text{eff}}$ をそれぞれブロック流抵抗を考慮する山の高さ [m]、調整パラメタとして、以下の式で表される。

$$H_{\text{eff}} = n_{\text{eff}} (3\mu - z_{\text{blk}}) \quad (4.1.7)$$

地表面で生成された運動量フラックスは上方に伝播するが、各高度における運動量の飽和フラックス τ_{sat} [Pa] は飽和振幅 H_{sat} [m] を用いて以下で表される。

$$\tau_{\text{sat}} = \rho |\mathbf{u}| N \left(\frac{H_{\text{sat}}}{3} \right)^2 \frac{\sigma}{\mu} G(D1^2 + D2^2)^{1/2} \quad (4.1.8)$$

飽和フラックスを超えた分の運動量フラックスは背景場に渡され、水平風の加速率に寄与する。 τ_{sfc} は調整パラメタである G と n_{eff} に、 τ_{sat} は G に比例する形で表される。GWD により水平風の加速率の大きさや鉛直プロファイルの特性はこれらのパラメタに依存する。

図 4.1.4 は、中東域で領域平均した GWD による東西風加速率の鉛直プロファイルの G, n_{eff} に対する感度を示したものである。黒線で示した GSM2003 での GWD のパラメタの場合、100 hPa 付近に東西風加速率の極小値 (西風の減速) が見られる。感度実験からは、GWD による加速率の鉛直プロファイルの特性は G, n_{eff} のパラメタへの依存性も大きく、 G が大きく n_{eff} が小さくなるほど、より上層で振幅飽和に達して応力が分配されるようになるため、加速率のピーク高度が上がり、かつ、大きさが小さくなる様子が見られる。GSM2003 の GWD による東西風加速率が下部成層圏で強くそのピーク高度が他のモデルに比べて低い点は、地形性抵抗に関するモデル間相互比較 ("COORDE"⁴ プロジェクト、Niekerk et al. 2020) でも指摘されてい

⁴ The COncstraining ORographic Drag Effects project の略。数値実験作業部会 (WGNE: Working Group on Numerical Experimentation) 及び全球大気システム研究 (GASS: Global Atmospheric System Studies) のもとで実施されたプロジェクト。

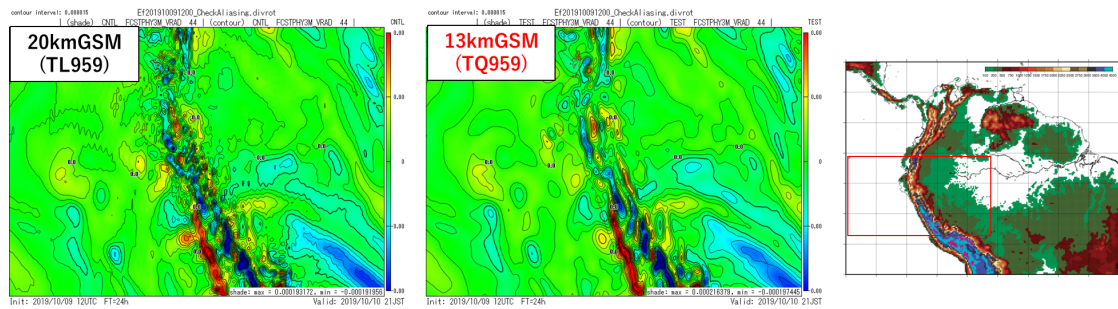


図 4.1.1 南米ペルー付近（右図の赤枠）におけるモデル面第 44 層目（約 500 hPa）の渦度 $[s^{-1}]$ 分布。（左）20 km GSM（1 次格子）、（中）13 km GSM（2 次格子）。2020 年 10 月 9 日 12UTC 初期値の FT=24。

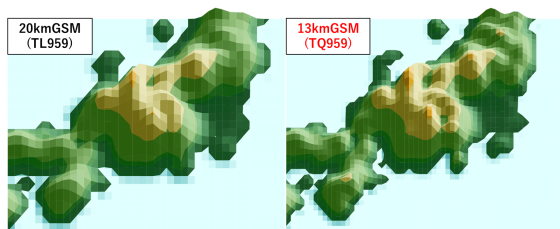


図 4.1.2 日本の中部域におけるモデル標高の鳥瞰図。（左）20 km GSM、（右）13 km GSM

るが、この特性は GWD のパラメータに依存していることが明らかになった。図 4.1.4 で示した感度実験や COORDE の結果を踏まえ、次期 GSM 更新に向けた改良では、 $G = 0.6$ 、 $n_{\text{eff}} = 1.0$ とした。また、GWD のパラメータ調整に合わせる形で、GWD のパラメータ変更により対流圏中下層での東西風減速を弱めることを補完し、北半球の循環場の精度を維持するために、TOFD による東西風減速の振幅を GSM2003 の 2 倍に強めるように調整した。

本節で示す改良のインパクトやその妥当性を検証するために、Niekerk et al. (2020) が提唱したサブグリッド地形パラメタリゼーションの効果を示す実験（以下、COORDE 型実験）を実施した。COORDE 型実験とは、(i) 水平解像度 50 km 程度の数値予報モデルにおける SSO (Subgrid Scale Orography; サブグリッド地形効果パラメタリゼーション、ここでは TOFD は含まない) の有無による東西風の変化と、(ii) 水平解像度 10 km 程度の数値予報モデルにおける地形の解像度の違い (10 km 以下と 80~200 km 程度) による東西風の変化を計算し、(ii) を参照値として比較することで、(i) の妥当性を検証するものである。図 4.1.5 に改良前後での COORDE 実験結果と参照値を示す。なお、(i) の実験の解像度は約 40 km (TL479)、(ii) の実験では高解像度、低解像度はそれぞれ約 9 km (TL1919)、110 km (TL159) とした。改良前は、下部成層圏 (100 hPa から 70 hPa 付近) で、SSO による減速が参照値 (図 4.1.5(c)) と比べて大きい傾向が見られる (図 4.1.5(a)) が、改良後ではその減速が大きく減少している (図 4.1.5(b))。その

結果として、図 4.1.5(d),(e) で見られるように、同じ高度で見られた東西風のバイアスが大きく減少した。また、解析・予報サイクル実験においては、下部成層圏での東西風バイアスの軽減に加えて、上部成層圏における第一推定値と衛星観測データの整合性向上や、対流圏から成層圏にかけて主要な予測スコアの改善が見られた (図略)。

4.1.4 物理過程の改良：その他の改良

(1) 湖の取り扱いの改良

湖は、陸よりも熱容量が大きく水温の日変化が小さい一方で、海よりも水温の季節変化の振幅は大きい。また、淡水の湖は、海と比べて蒸発量が多い、凝固点が高いといった違いがあるほか、夏は表面ほど温度が高く、深い湖は冬は凍結しにくいといった特徴がある⁵。数値予報モデルが高度化・高解像度化されるにつれ、湖の水温・凍結の状態を適切に表現することは大気の数値予報精度向上にとって無視できなくなり、その扱いの精緻化が重要になってくる。

GSM では、湖等の陸水は海格子として扱われており、モデル内で海と湖の区別はない。接地境界層過程では、湖についても海面・海氷過程と同様の定式化で解かれる。物理定数についても海の塩分濃度を仮定しており、湖格子でも海格子と同様、凝固点は -1.64°C 、バルク法における潜熱フラックスの計算に使う水面の比湿は水面温度と地表面気圧から計算した飽和比湿の 0.98 倍 (塩分濃度約 3.7% に相当) としている。また、湖面温度、湖水密接度についても、GSM では湖の特徴を考慮したものになっておらず、簡便な扱いとなっている。湖 (陸水) 温度は、全球日別海面水温解析 (栗原ほか 2006) を陸域に外挿した値を標高補正 (6.5 K/km) して用いている。湖水密接度については、北米の五大湖やロシアのラドガ湖などは全球海水解析 (海洋気象情報室作成) の対象であるため、解析値を初期値に用いているが、非解析域 (主に陸域) では、湖面温度が -1.64°C

⁵ 秋から冬に表面が冷えると成層が不安定化し対流が発生する。水の密度は 4°C で最大であり、湖の全体の温度が 4°C 前後となるまでこの状態が継続するため。

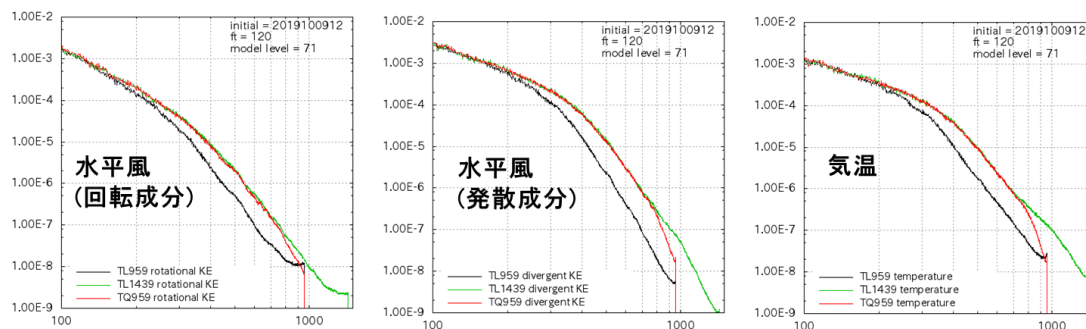


図 4.1.3 モデル面第 71 層目 (約 150hPa) の (左) 運動エネルギーの回転成分 [m^2s^{-2}]、(中) 運動エネルギーの発散成分 [m^2s^{-2}]、(右) 気温のスペクトル [K^2]。黒: 20 km GSM(TL959)、赤: 13 km GSM(TQ959)、緑: 13 km GSM (TL1439) 横軸は波数。2020 年 10 月 9 日 12UTC 初期値の FT=120。

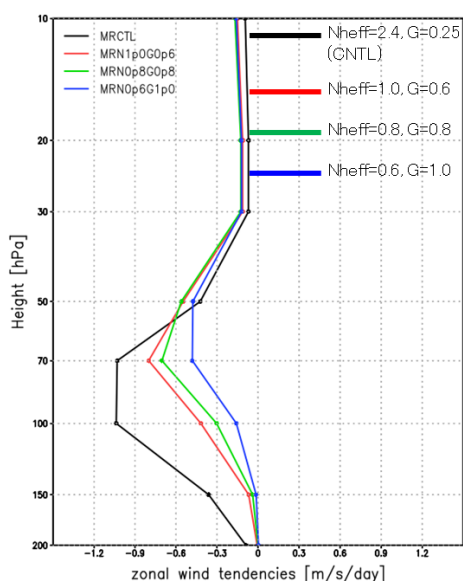


図 4.1.4 中東域 (28°E-68°E, 15°N-50°N) 平均の地形性重力波抵抗による加速率 [m/s day^{-1}] の 200 hPa から 10 hPa まで鉛直プロファイルのパラメータによる違い。黒: $n_{\text{eff}} = 2.4, G = 0.25$ (GSM2003 での設定)、赤: $n_{\text{eff}} = 1.0, G = 0.6$ 、緑: $n_{\text{eff}} = 0.8, G = 0.8$ 、青: $n_{\text{eff}} = 0.6, G = 1.0$ 。統計期間は 2015 年 1 月 1 日から 2015 年 1 月 14 日までの各日 00UTC 初期値、FT=24。

以下の場合に密接度 1 とする。

次期の GSM 更新に向けた改良では、下層気温を中心とした予測精度向上を狙い、以下に示す湖の扱いの精緻化を行う。

湖格子の考慮

GSM において、非陸格子のひとつとして、海格子に加えて湖を考慮するようにする。湖格子の判別には、米国地質調査所作成の全球地表面種別データセット (水平解像度 1 km) である GLC2000 を用いた。モデル格子内で、湖 (陸水) として分類されているデータが卓越する場合は、そのモデル格子は湖として取り扱う。例

外として、全球日別海面水温解析の対象となっているカスピ海や黒海は海格子のままとする。

湖面温度や凍結の季節変化の改良

湖格子における湖面温度については、MODIS⁶の地表面温度プロダクトから月別気候値を算出し、時間内挿した湖面温度気候値を与える。湖水密接度については、湖水密接度を C 、湖面温度気候値を T として、以下の式で診断する (氷床を除く陸格子の密接度は 0 とする)。ただし、五大湖、バイカル湖、ラドガ湖等、海水解析の対象である大きな湖では、従来と同様、海水解析値を使う。

$$C = \begin{cases} 0 & T \geq 273.15 \text{ K} \\ 1 - e^{0.1(T-273.15)} & T < 273.15 \text{ K} \end{cases} \quad (4.1.9)$$

接地境界層過程における湖の扱い (海面過程の拡張)

湖の特徴を表現することと実装の簡便さの両立を念頭に置き、湖格子における接地境界層の計算は海面過程における物理定数を湖向けに変更する形で行う。湖格子では淡水を仮定し、凝固点は 0°C 、バルク法による潜熱フラックスの計算に使う水面の比湿は水面温度と地表面気圧から計算した飽和比湿と同じとして計算を行う。

湖の取り扱い改良のインパクトについて、以下に例を示す。図 4.1.6 は、2019 年 8 月 15 日の北米域における湖面温度分布を示している。図中の楕円及び矢印で示した領域 (ウィニペグ湖、アサバスカ湖、グレートスレーブ湖等) では、改良版の方が、現手法に対して湖面温度が $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 程度高くなっている。これは、当該領域の湖面温度について、現手法ではハドソン湾等の低い海面温度を外挿して計算しているのに対し、改良版では衛星観測による気候値に基づく値となるた

⁶ MODERate resolution Imaging Spectroradiometer (Terra 衛星および Aqua 衛星に搭載されている中分解能撮像分光放射計)

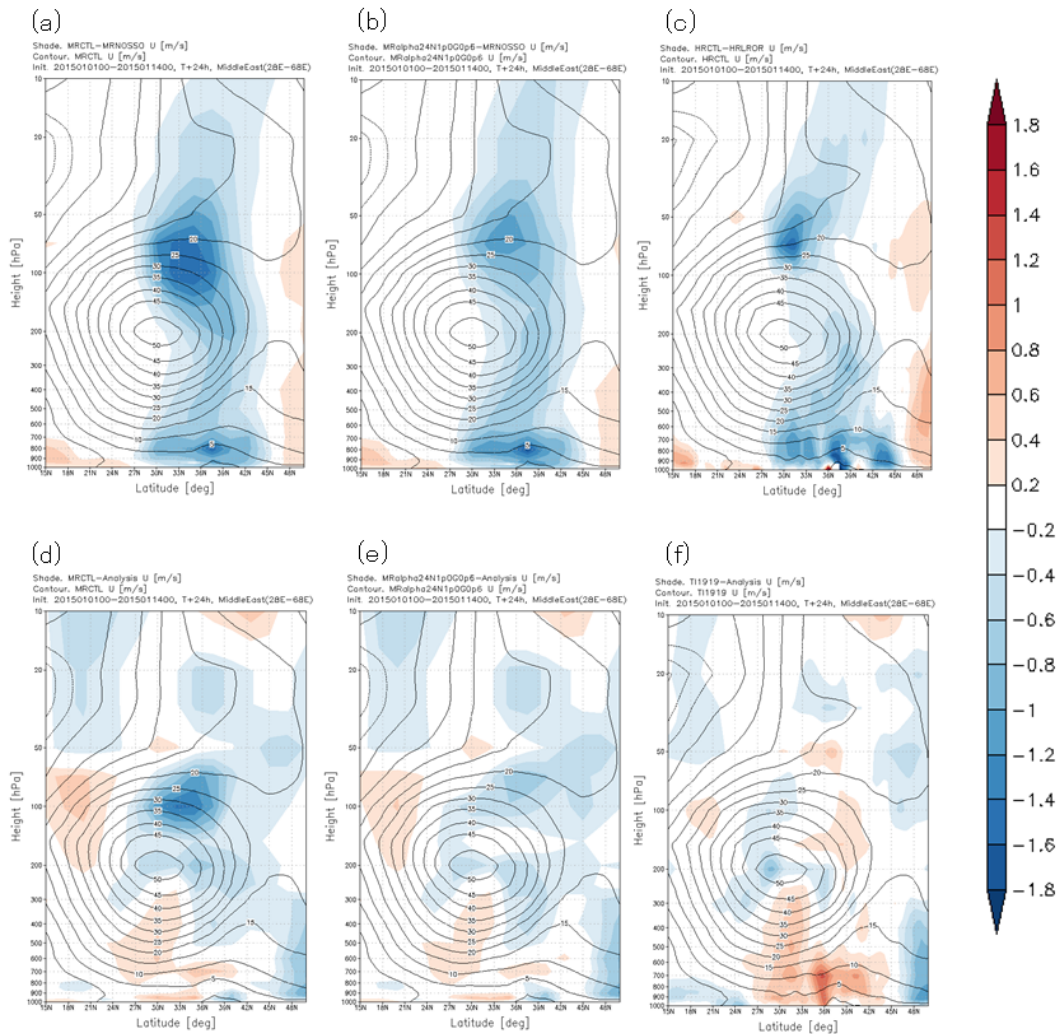


図 4.1.5 COORDE 型実験での中東域における、(a), (b) 中解像度 (TL479:水平解像度約 40 km) 実験での東西風 [m/s] (等値線) と SSO の有無による差 (カラー)、(c) 高解像度実験 (TL1919:水平解像度約 9 km) における、東西風 [m/s] (等値線) と低解像度地形 (地形のみが TL159:水平解像度約 110 km) 実験との差 (カラー)。(d)-(f) は東西風 [m/s] とその解析値からの差 (カラー)。24 時間予測値で、実験期間、領域は図 4.1.4 と同じ。(a),(d) がパラメータ調整前、(b),(e) がパラメータ調整後、(f) が高解像度実験によるもの。

め、湖水温度が海面温度よりも高くなりやすいという特性が反映されたためである。湖面温度の違いは湖周辺での地上気温の系統誤差にも影響する。図 4.1.7 は、2019 年 8 月平均の地上気温の 6 時間予測値の SYNOP に対する平均誤差を示したものである。図中の楕円で示した湖のある領域では、現手法で見られた低温バイアスが改良版では軽減している。これは、湖面温度が改良版では高くなったことに起因する。その他、冬期において湖面温度の低下や湖の凍結が表現されるようになったことに伴う湖周辺での高温バイアスが軽減された地域が見られた (図略)。湖面温度の取扱の改良のインパクトについて、データ同化サイクルにおける観測値と第一推定値の整合性や主要予報スコアはいずれも中立～改善であり、特に下層気温の予報スコアに改善が見られた (図略)。

(2) オゾン気候値の更新

現在の GSM では放射過程で利用するオゾン濃度について、気象研究所化学輸送モデル MRI-CCM1(Shibata et al. 2005) を用いて作成された 3 次元月別気候値を、1 hPa より上層で SPARC プロジェクトによる衛星観測に基づく帯状平均月別気候値 (Randel et al. 1998) で補正したもの (以下、現気候値) を使用している (村井 2009; 関口ほか 2019)。放射計算の精度向上及び成層圏の気温バイアス軽減を狙い、オゾン気候値についてより新しい精緻なデータセットに基づき更新する。次期 GSM に向けては、気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q, 気象庁 2021b) 向けに整備された、MRI-CCM2(Deushi and Shibata 2011) をベースにしたオゾン再解析から作成した新しいオゾン気候値 (1981-2010 年で平均、以下、新気候値) を利用することを計画している。この

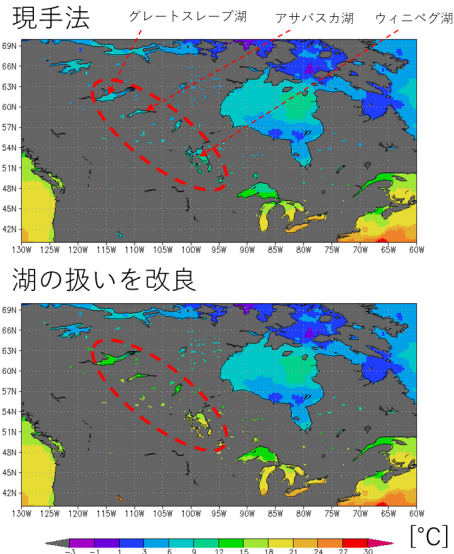


図 4.1.6 北米域における湖面温度及び海面温度 [°C] の分布。(上) 現行手法、(下) 改良版手法。時刻は 2019 年 8 月 15 日 12UTC。図中の楕円及び矢印については本文を参照。

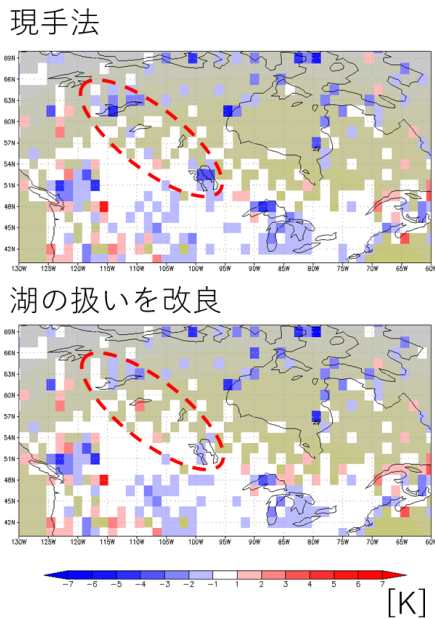


図 4.1.7 北米域における、2019 年 8 月平均の FT=6 における気温の SYNOPSIS に対する平均誤差 [K]、(上) 現行手法、(下) 湖面温度改良版。図中の楕円については本文を参照。

新気候値は CPS3 でも使用されるものであり、これらのシステムにおいて、成層圏の気温の解析精度、予測精度向上が確認されている。オゾン気候値更新は、予測対象や時間スケールに依存しない部分についてシステム間で仕様を共通化させることも狙いに含まれる。

図 4.1.8 は、1 月のオゾン濃度気候値の帯状平均の分布を示したものである。新気候値は現気候値に対して熱帯の 10 hPa 付近でオゾン濃度が減少し、SPARC 気

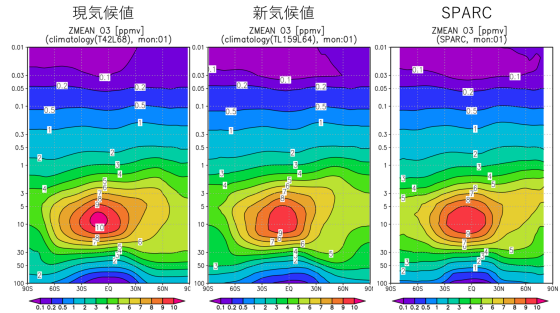


図 4.1.8 1 月における帯状平均のオゾン濃度気候値 [ppmv]。(左) 現気候値、(中) 新気候値、(右) 衛星観測に基づく気候値 (Randel et al. 1998)

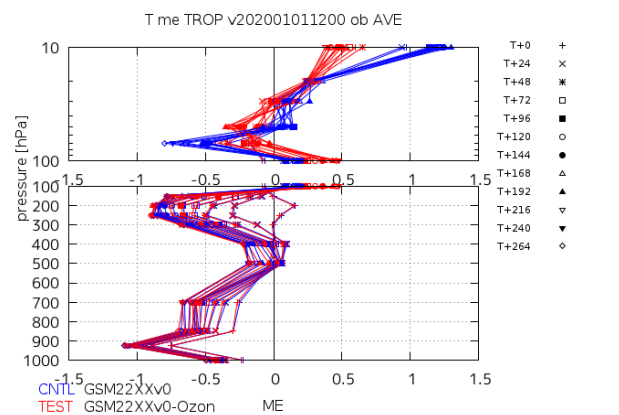


図 4.1.9 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の熱帯 (20°S-20°N) の気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差 [K] の予報時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。(青) 現オゾン気候値使用、(赤) 新オゾン気候値使用

候値に近づいている。また、100 hPa 付近では新気候値はオゾン濃度がやや減少している。オゾン気候値の更新の全球数値予報システムへのインパクトは、特に成層圏の気温予測に顕著に見られる。図 4.1.9 は、解析予報サイクル実験で得られた 2020 年 1 月平均の熱帯 (20°S-20°N) における気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差である。対流圏では平均誤差の違いはほとんどみられないが、10 hPa では、現オゾン気候値使用時で見られた高温バイアスが新オゾン気候値を使用することで大きく減少する。一方で、100 hPa 付近では高温バイアスが拡大する。これらの気温の変化は、オゾン濃度の増減に対応した放射過程による加熱率の変化でほぼ説明できることを確認しており (図略)、想定される変化と考える。なお、対流圏の予測精度への影響は小さく、主要予測スコアはほぼ中立であった (図略)。予測精度への影響は中立以上で、想定されるインパクトが確認されたことから、オゾン濃度の新気候値を次期 GSM の更新に含めることは問題ないと考えられる。

(3) 雲氷有効サイズ診断式の改良

数値予報モデルにおける雲氷による放射の効果の扱いは、大気上端での放射量や放射過程による加熱率の鉛直プロファイルの変化を通じて、数値予報モデルの放射収支や気温等の系統誤差に大きく影響する。放射過程で必要となる雲氷光学特性をパラメタライズするためには雲氷有効サイズの情報が必要となるが、GSMでは、雲氷有効サイズは雲氷量や気温などから診断する。雲氷有効サイズや光学特性のパラメタライゼーションは、参照値とする観測された雲氷の領域による違い、仮定する雲氷の形状の違い等に起因した不確実性も大きい。そのため、GSMでの利用にあたっては、研究の進展に応じて診断式を随時見直してきた。次期GSM更新に向けては、雲氷有効サイズの診断式を、中緯度での巻雲を対象にパラメタライズされたWyser (1998)の手法から、熱帯・中緯度の両方で適用可能なSun (2001)の手法に変更する。この変更により、診断される雲氷有効サイズはより小さくなり、放射による雲氷の効果が大きく表現されるようになる。このことによる大気上端上向き長波放射フラックスの過剰バイアス軽減を狙う。また、気象研究所で開発中の雲氷光学特性および有効サイズの診断式改良(Nagasawa 2021)のうち、雲氷有効サイズ診断式を先行的に採用し、今後のNagasawa (2021)による手法の取り込みに備える狙いもある。

雲氷有効サイズ診断式改良の全球数値予報システムへのインパクトについて示す。図4.1.10は、解析予報サイクル実験で得られた2019年8月平均の大気上端上向き長波放射量(OLR: Outgoing Longwave Radiation)の衛星観測プロダクトであるCERES(Cloud and the Earth's Radiant Energy System)との差、および雲氷有効サイズ診断式改良前後の差を示す。GSMにはOLRの正バイアスが顕著であることが知られている(米原ほか2019)が、雲氷有効サイズ診断式の改良により、期待通りその正バイアスが軽減されている。また、大気上端から出ていく放射量が減少した結果、対流圏の気温は全体的に暖まる傾向となり、GSMで見られる対流圏の気温の負バイアスも減少する(図4.1.11)。これらの結果、主要スコアも中立以上のものとなった(図略)。

4.1.5 力学過程と物理過程の改良の予測精度への影響

力学過程の改良と物理過程を加えた13 km GSM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に解析予報サイクル実験を実施した⁷。対照実験には、2021年3月時点の全球数値予報システムと同等の設定を用いた。図4.1.12に2019年7月-9月について解析値を対象とした、代表的な要素の予測を領域毎に検証した結果を示す。主要なスコアについては、概ね中立から改善が得られている。図4.1.13に令和元年台風第19号(令和元年東日本台風)とそれ

に伴う降水の予測事例について示す。この事例では、進路予測には大きな変化は見られなかった(図略)ものの、台風中心示度については13 km GSMは20 km GSMより深まり、ベストトラックに近づく傾向が見られた。一方で、台風の衰退のタイミングが遅れる傾向は13 km GSM、20 km GSMで共通である。また、日本付近の降水予測について、東海地方における地形効果による降水の強まりは13 km GSMの方がより顕著に表現され、解析雨量と整合するようになった。令和元年台風第19号事例に限らず、統計検証においても、13 km GSMは日本付近の強い降水の頻度が増加し、より解析雨量と整合するようになったほか、台風中心示度は強まる傾向が見られた(図略)。これらの実験結果から、水平高解像度化とそれに合わせた力学過程・物理過程の改良で期待される効果が得られていると考える。

4.1.6 まとめと今後の予定

前線、細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上を通じた全般的な予測精度向上、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、全球モデルの水平解像度の20 kmから13 kmへの増強、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に向けた開発を進めている。それぞれの開発について基礎調査と性能評価を行い、想定された改善効果を得られることを確認した。水平高解像度化に向けた力学過程の改良では実効解像度向上や全体的な精度向上、地形性抵抗過程の改良による対流圏から成層圏の系統誤差軽減と予測精度改善、CPS3や気象研究所の物理過程開発成果取り込みによる気温の系統誤差減少を確認した。また、これら改良を組み合わせた試験では、標準的なスコアの改善や台風接近に伴う、日本域の降水の細かい表現の向上を確認した。

今後は、これらの改良と全球解析の改良(第4.2節)を組み合わせた仕様での準リアルタイム実行を行い、メソ数値予報システム等後続システムへの波及も含めた効果の確認を進める。並行して、物理過程(雲、積雲、海面、非地形性重力波、地形データの扱い等)の更なる改良に向けた開発を進め、物理過程改良の上乗せをした上で令和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.
- Côté, J. and A. Staniforth, 1988: A Two-Time-Level Semi-Lagrangian Semi-implicit Scheme for Spectral Models. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2003–2012.

⁷ 第4.2節で示す全球解析の改良も含まれる。

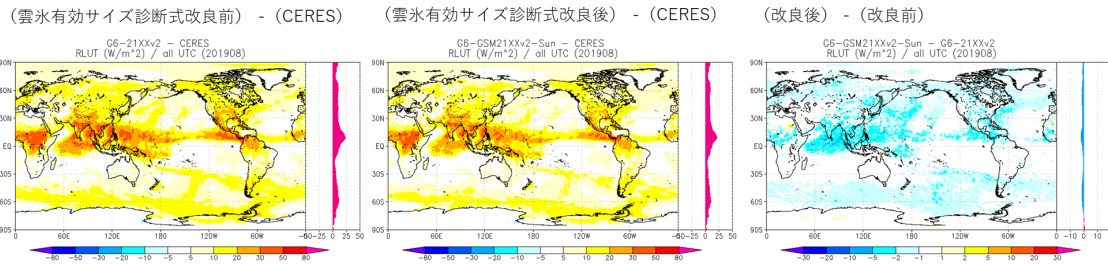


図 4.1.10 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月平均の OLR の CERES プロダクトに対する誤差。(左) 雲氷有効サイズ診断式改良前、(中) 雲氷有効サイズ診断式改良後。(右) 2019 年 8 月平均の OLR の雲氷有効サイズ診断式改良前後の差。単位はすべて $[W m^{-2}]$ 。

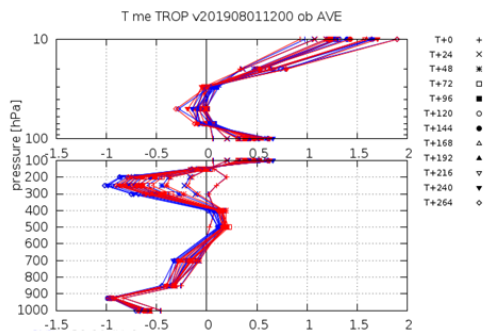


図 4.1.11 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月平均の熱帯 ($20^{\circ}S-20^{\circ}N$) の気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差 $[K]$ の予報時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。(青) 雲氷有効サイズ診断式改良前、(赤) 雲氷有効サイズ診断式改良後

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

Elvidge, A. D., I. Sandu, N. Wedi, S. B. Vosper, A. Zadra, S. Boussetta, F. Bouyssel, A. Niekerk, M. A. Tolstykh, and M. Ujiie, 2019: Uncertainty in the Representation of Orography in Weather and Climate Models and Implications for Parameterized Drag. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**, 2567–2585.

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.

JMA, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 229 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/>).

jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm).

気象庁, 2021a: 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, 2021b: 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.

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.

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.

Malardel, S., N. Wedi, W. Deconinck, M. Diamantakis, C. Kuehnlein, G. Mozdzynski, M. Hamrud, and P. Smolarkiewicz, 2016: A new grid for the IFS. *ECMWF Newsletter.*, **146**, 23–27.

村井臣哉, 2009: 放射. 数値予報課報告・別冊第 5 号, 気象庁予報部, 87–90.

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

Niekerk, A., I. Sandu, A. Zadra, E. Bazile, T. Kanehama, M. Köhler, M. Koo, H. Choi, Y. Kuroki, M. D. Toy, S. B. Vosper, and V. Yudin, 2020: Constraining Orographic Drag Effects (COORDE): A Model Comparison of Resolved and Parametrized Orographic Drag. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **12**.

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

関口亮平, 長澤亮二, 中川雅之, 籾将吉, 2019: 放射. 数

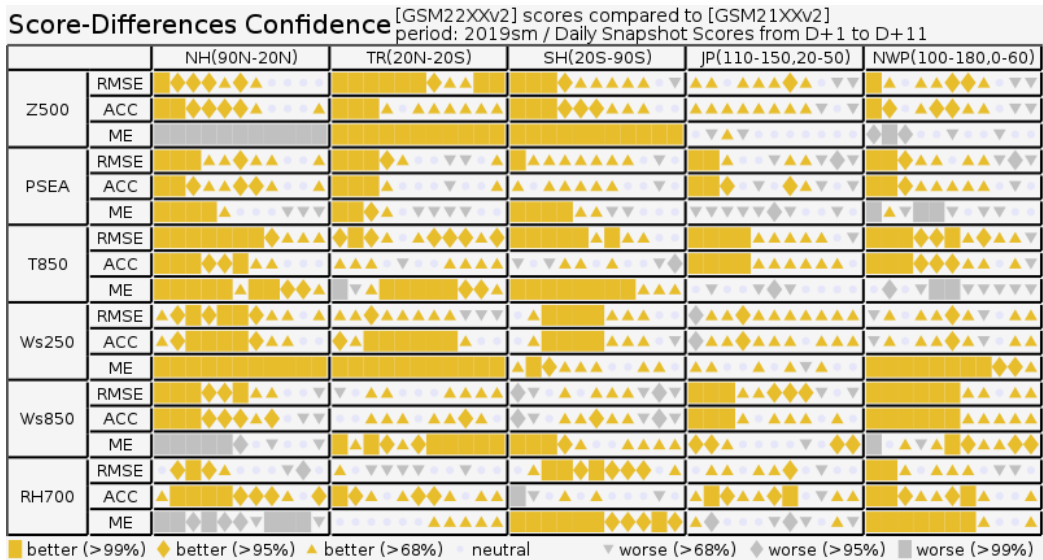


図 4.1.12 2019 年 7 月–9 月における対流圏主要要素の解析値に対する 13 km GSM(TEST) と 20 km GSM(CNTL) のスコア差の有意性判定 (スコアカード)。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S – 20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E-150°E, 20°N-50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E-180°E, 0°-60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、ACC、ME、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

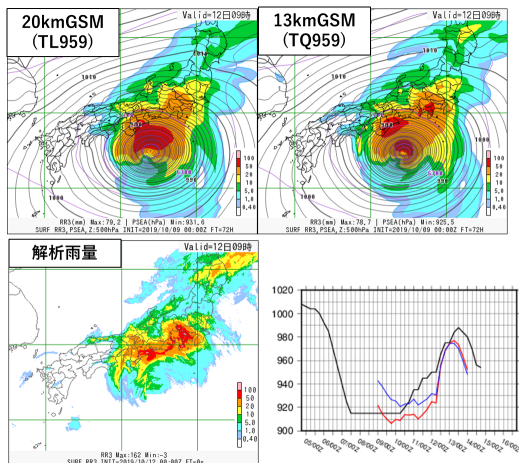


図 4.1.13 2019 年 10 月 12 日 09JST を対象とした令和 2 年台風第 19 号の予測事例。(左上) 20 km GSM、(右上) 13 km GSM、(左下) 解析雨量。等値線は海面更正気圧 [hPa]、カラーは前 3 時間雨量 [mm]。(右下) 台風第 19 号の中心気圧 [hPa]。青：20 km GSM、赤：13 km GSM、黒：気象庁作成のベストトラック。GSM の初期値はすべて 2019 年 10 月 9 日 00UTC。

値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 66–80.

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

Sun, Z., 2001: Reply to comments by Greg M. Mc-

Farquhar on ‘Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations’. (October B, 1999, 125, 3037–3055). **127**, 267–271.

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

Ujiie, M. and D. Hotta, 2019: Elimination of spectral blocking by ensuring rotation-free property of discretized pressure gradient within a spectral semi-implicit semi-Lagrangian global atmospheric model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 3351–3358.

Wedi, N. P., 2014: Increasing horizontal resolution in numerical weather prediction and climate simulations: illusion or panacea? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **372**, 20130 289.

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

米原仁, 2019: 気象庁全球モデルにおける近年の改良. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 1–11.

米原仁, 佐藤均, 下河邊明, 2019: 性能評価試験. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 114–120.

4.2 全球解析システムの改良

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)）の改良を同時に現業化できるよう開発を進めている。

地表面関連の初期値は、大気下層の気象要素や大気の循環場の予測に影響を与える。その初期値改良のために、令和2年度末に現業化したGSM2103（第3.2節）では、積雪深解析を高度化するとともに土壌水分解析を導入した。これらのうち積雪深解析の高度化により、それまでのGSMが抱えていた課題のうち(1)局所的なSYNOG積雪深観測の周囲で広く積雪が解析される問題、(2)第一推定値として作成時期の古く品質の低い気候値を使っており日々のモデル予測値や衛星データによる積雪域情報を解析に利用できない、といった課題に対処した。しかし、積雪深解析の実行頻度は以前と同様に1日1回であり、観測データの反映の遅れや解析値の変化傾向が鈍化するという課題が残され、また、新たに利用を開始した衛星観測データから算出した衛星積雪域には誤判定（見逃し）事例も多いことがわかってきた。令和3年度末の導入を目指してきたGSM22XX（第4.1節）に向けては、これらの課題に対処するための開発を進めてきた。

また、大気解析においては、4次元変分法に対して日々の気象場に応じて変化する第一推定値の不確実性情報を与えるために、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF, Hunt et al. (2007)) を用いている。気象庁のLETKFでは限られたメンバー数に起因するサンプリング誤差の影響を軽減するために観測空間局所化と呼ばれる手法を用いているが、その設定が複雑化しているためGSM22XXでは今後の維持管理を考慮して設定を整理することとした。

これらの開発状況について紹介する。

4.2.2 変更概要

(1) 積雪深解析

解析の1日4回化

現在の積雪深解析は1日1回行われ、日平均値を解析している。このため、観測データの反映が遅れるという課題に加え、解析値の変化傾向が鈍化するという課題もある（図4.2.1）。積雪深解析の実行頻度を増やすことにより、これらの課題に対処する。

第一推定値作成処理の変更

積雪深解析のための第一推定値は、GSMによる積雪深予測値を、衛星観測データから算出した衛星積雪域を用いて修正することで作成している。現在、衛星積雪域が雪無しの場合（かつ積雪被覆確率気候値が80%以下の場合）、GSMによる積雪深予測値がどんなに

大きくても第一推定値は0 cmとしているが、衛星積雪域の誤判定（見逃し）事例も多い（図4.2.2）。このため、前述の条件に該当する場合に第一推定値を即0 cmとするのではなく、積雪深予測値の大小に応じて次第に第一推定値を0 cmに近づける処理へ変更することで、この課題に対処する。具体的には、積雪深予測値が5 cm以下の場合は0 cmとするが、それ以上の場合は予測値を $e^{-0.1}$ 倍したものを第一推定値とする。これらの閾値は積雪分布の変化を観測と比べながら試行錯誤で設定した。

その他

積雪深解析の結果は、日本域についてアメダス観測値を空間内挿した値で置き換えたのち（以後、日本域修正と呼ぶ）、GSMの初期値として利用される。積雪深解析の1日4回化によってサハリン南部に不自然な雪無し領域が広がる問題が顕在化し（図4.2.3）、その対処として積雪深解析では日本のSYNOGを利用しないこととした。日本域修正は変更しないため、GSMの初期値として利用される日本域の積雪深は変わらない。なお、4回化で問題が顕在化した理由は脚注¹のように考えている。GSM2103における積雪深解析高度化では、2次元最適内挿法における背景誤差の水平相関関数を相関距離が短くなるように変更した。一方、観測データの探索範囲を変更していなかったため、相関距離と整合するよう修正する。また、GSM2103では2次元最適内挿法で使用する観測誤差と背景誤差の比を意図通りに出来ていないことが判明したため、意図していた値へと変更（約0.696を0.75へ）する。

(2) LETKF

LETKFで用いる観測空間局所化においては鉛直方向について、観測種別に依存する形で複数の関数を用いている。GSM2103時点における鉛直方向の局所化関数は、従来型観測に対しては0.6スケールハイトを局所化スケール²とするガウス関数とし、地上気圧と地上GNSS天頂大気遅延量については例外として2倍の局所化スケールを与えている。一方、衛星観測輝度温度データに対しては、荷重関数の2乗と $0.6\sqrt{2}$ スケールハイトのガウス関数のうち、大きい値で構成される関数を用いている。荷重関数とガウス関数の組み合わせはOta et al. (2019)で導入されたもので、輝度温度

¹ 稚内 (SYNOG) の積雪深は少なく、距離に近い沼川 (アメダス) は積雪深が多い傾向にあるため、日本域修正では加重平均により稚内に対応する格子の積雪深は増える。その結果を初期値とするGSMの予測値は稚内で観測より積雪深が多くなり、積雪深解析では積雪深を減らすインクリメントが入る。サハリンの積雪深観測が得られるのは通常00UTCのみであり、1日4回化することで06,12,18UTCでは積雪深を減らすインクリメントが背景誤差相関を通じて一方的かつ高頻度に入ることになる。こうした状況が継続するといずれ00UTCの観測も第一推定値との差が大きくなって品質管理でリジェクトされてしまうようになる。

² 値が $e^{-0.5}$ となる距離。

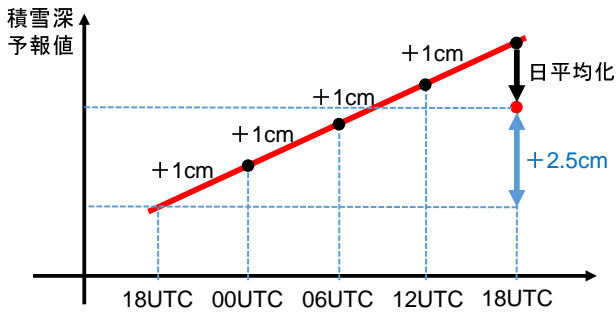


図 4.2.1 日平均を解析することにより積雪深増加時に変化傾向が鈍化することの模式図。観測による修正がない場合、6時間に1cmずつ積雪深が増えると1日で4cm積もるが、日平均の解析では2.5cmの増加にとどまる。

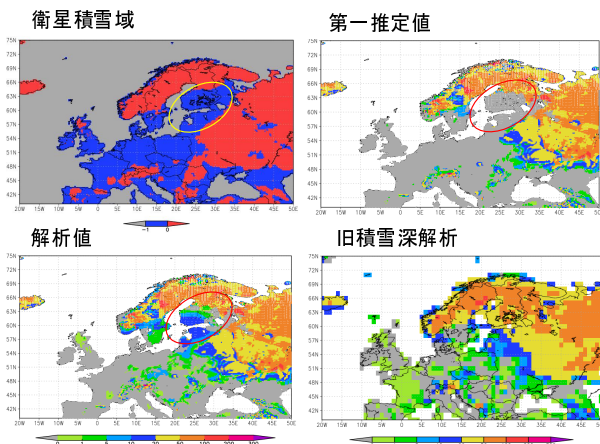


図 4.2.2 衛星積雪域の誤判定(見逃し)が疑われる事例。左上は衛星積雪域で赤が積雪有りと判定された領域。右上は積雪深の第一推定値で、図中に丸で囲った領域は左上で積雪無しと判定され、且つ、積雪被覆率気候値が小さいため0cmとされた。左下はGSM2103による解析値で、特に丸で囲った領域ではSYNOPにより第一推定値に比べて積雪域が大きく広がっているものの、北東側の50cmを超える積雪域との間に積雪無し領域が残るなど不自然な分布となっている。右下はGSM2103導入前まで運用してきた積雪深解析による結果。

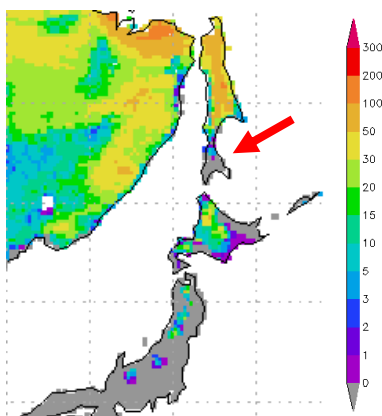


図 4.2.3 積雪深解析の1日4回化によってサハリン南部に不自然な雪無し領域が広がる例。2019年12月14日12UTCの積雪深解析の結果。赤矢印の部分、サハリン付近に不自然な積雪なし領域が広がる。

データの局所化関数に対して局所化スケールを用いた調整機能を導入すること、荷重関数の形状によらず一定程度の鉛直方向の広がりを与えることが目的である。

輝度温度データは、ある特定高度のみの大気状態の情報ではなく、鉛直方向に広がりをもった大気状態の情報をもつものであるため、従来型観測より大きな局所化スケールを与えているのだが、地上気圧や地上GNSS天頂大気遅延量と異なる局所化スケールを与えることに科学的な理由はなく、局所化スケールとして3種類を使い分けていることによる維持管理上の混乱も生じるようになってきた。このため、使用する局所化スケールを通常用いる0.6スケールハイト、広めにしたい場合の1.2スケールハイトの2種類に整理することとした。具体的には衛星観測輝度温度データに対して用いるガウス関数のスケールを地上気圧等と同じ1.2スケールハイトへ変更する³。

4.2.3 積雪深解析改良の性能評価

(1) オフライン積雪深解析による評価

陸面モデルの開発、特に開発の初期段階においては、大気や降水の観測値や解析値を外部強制にして陸面過程のみを単体実行するオフライン陸面モデルを使用することも多い。このオフライン陸面モデルを用いて積雪深解析(と日本域の修正処理)を行う仕組みを、ここではオフライン積雪深解析と呼ぶことにする。実験を長期間実施して季節変化や挙動を確認したい場合、あるいは多数の試行錯誤を行うことで設定を詰めたいような場合、このような軽量化した実験システムが便利である。ここでは、2018年11月10日~2020年3月31日、2019年11月10日~2021年1月31日を対象としたオフライン積雪深解析による解析予報サイクル実験の結果をいくつか紹介する。CNTLはGSM2103相当の積雪深解析を用いたもの、TESTはCNTLに対して前述の変更を加えたものである。TESTにおいて解析の1日4回化により最新の積雪深予測値や観測値が反映され、CNTLよりも早く積雪域を表現できるようになった例として、2020年2月6日06UTCの事例を図4.2.4に示す。TESTでは黒海の北側の積雪域(図中の矢印のあたり)を表現できているが、CNTLでは解析が行われる18UTCまで表現されていなかった。また、解析値の変化傾向の鈍化が改善する等により、チベットなど山岳域で積雪深が大きくなった。図4.2.5に例を示す。TESTではチベット高原やヒンドウクシュ山脈の積雪域が広がり、積雪深も大きくなっている。1日4回解析化による応答速度の改善の他、それにより積雪域が広がることで低温化したことも要因として考えられる。IMS⁴との対応もTESTの方が良い場合が

³ これに付随して、解析に使用する値の下限値(値未満の観測は使わない)を0.0025から0.05に引き上げる変更も含まれる。

⁴ NOAA/NESDISによる積雪域プロダクト

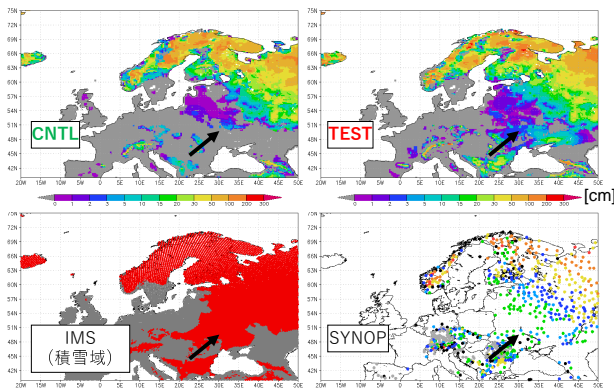


図 4.2.4 2020 年 2 月 6 日 06UTC の積雪深解析値。左上が CNTL、右上が TEST、左下は NOAA/NESDIS による IMS 積雪域プロダクト、右下は SYNOP。

多い。第一推定値作成処理の変更により、第一推定値と観測値の差が大きいという理由でリジェクトされるデータが減少した。図 4.2.6 に例を示す。CNTL では、2019 年 12 月 29 日 18UTC (図中矢印) に第一推定値が即 0 cm に修正された一方、観測値はその後大きな積雪深を維持しており、品質管理によって以降の観測が使用されなくなっている。一方 TEST では第一推定値の変化が穏やかであり、継続して観測が使用されている。また、同じく第一推定値作成処理の変更により、CNTL で表現される不自然な積雪分布が改善する事例が見られた。図 4.2.7 に例を示す。TEST と CNTL とで融雪の季節進行に大きな違いは見られないものの、CNTL では北米大陸の五大湖より東側の領域で不連続な積雪分布が見られる。CNTL では衛星積雪域によって第一推定値が 0 cm に修正され、その後 SYNOP により部分的に積雪域が再形成されていた。積雪域の大きな季節変化については、TEST と CNTL とで大きな違いはない (図略)。

(2) 大気解析を含めた評価

大気解析や予報へのインパクトを評価するため、大気解析を含めた解析予報サイクル実験を実施した。GSM2103 に準じた仕様による実験を CNTL、CNTL に対して第 4.2.2 項 (1) の変更全てを適用した仕様による実験を TEST とする。解析実施期間と評価期間 (括弧) は以下のとおり。

- 冬実験 1 : 2018 年 11 月 10 日 - 2019 年 03 月 11 日 (2018 年 12 月 - 2019 年 2 月)
- 冬実験 2 : 2019 年 11 月 10 日 - 2020 年 03 月 11 日 (2019 年 12 月 - 2020 年 2 月)
- 夏実験 : 2019 年 06 月 10 日 - 2019 年 10 月 11 日 (2019 年 7 月 - 9 月)
- 春実験 : 冬実験 2 を 2020 年 6 月 11 日まで延長 (2020 年 3 月 - 5 月)

積雪深解析は主に冬半球の陸上で機能するものであることから、陸地の多い北半球の冬を対象とした実験を

2 つの年を対象として実施した。また、春実験は通常の開発においてあまり行われることはないが、融雪期の精度を確認する目的で実施した。以下では、冬実験 2 を中心に概観する。上向き短波放射フラックスの対 CERES⁵検証 (図 4.2.8) によると、TEST は CNTL に比べて地上ではチベット高原や北米で増加傾向である。積雪域の増加に伴うアルベドの変化に対応しているとみられ、バイアスが軽減するところが多い一方、ヒマラヤ山脈などバイアスが增大するところもある。大気上端についても地上と同じ変化傾向であるが、こちらは概ねバイアスが軽減する傾向である。上向き長波放射フラックスについても概ねバイアスが軽減するところが多い一方、地上ではヒマラヤ山脈などバイアスが增大するところもみられた (図略)。平均解析場 (図 4.2.9) は TEST では CNTL に比べてチベット高原周辺や北米などで海面気圧は高く、地上気温は低く変化しており、積雪深の増加と対応している。解析値の対 SYNOP 検証 (図 4.2.10) においては、TEST では CNTL に比べて気温の低下がみられ、北米中央部では正バイアスが軽減している一方、ロッキー山脈やヒマラヤ山脈周辺では負バイアスが拡大している。地上観測の少ない山岳地帯の一部では、第一推定値作成処理の変更によって、積雪深解析値がやや過大になっている可能性もあると考えられる。第一推定値と観測値の整合性については、北半球のラジオゾンデ気温観測に対して改善改善の明瞭な傾向は見られなかった (図略)。

図 4.2.11 から、TEST では対解析で日本周辺の 500 hPa 高度場と 200 hPa 東西風のバイアスが軽減し、二乗平均平方根誤差 (RMSE) も改善している。チベット高原の積雪域が増えて気温が低下することで対流圏中上層の南北温度傾度が強化され、ジェット弱風バイアスが軽減したものと考えられる。図 4.2.12 から、対解析・対ラジオゾンデ観測の RMSE では主要な要素について全般的に改善傾向であり、特に北半球域・日本周辺域で改善幅が大きい。冬実験 1 でも改善幅は小さいものの同傾向であり、夏実験では中立、春実験では変化幅は小さいものの北半球や日本周辺域で改善傾向であった (図略)。

4.2.4 LETKF 変更の性能評価

(1) LETKF 単独実験による性能評価

第 4.2.2 項 (2) で述べた変更の影響を評価するため、4 次元変分法を行わず LETKF によるアンサンブル平均解析値を解析値とし、その解析値を初期値とする低解像度のモデル (TL319) による決定論予報を行う解析予報サイクル実験による評価をまず最初に行った。このような仕様による実験を簡便のため LETKF 単独実験と呼ぶ。

GSM2103 に準じた仕様による実験を CNTL、それ

⁵ 全球放射収支計によるプロダクト (<https://ceres.larc.nasa.gov/>)。

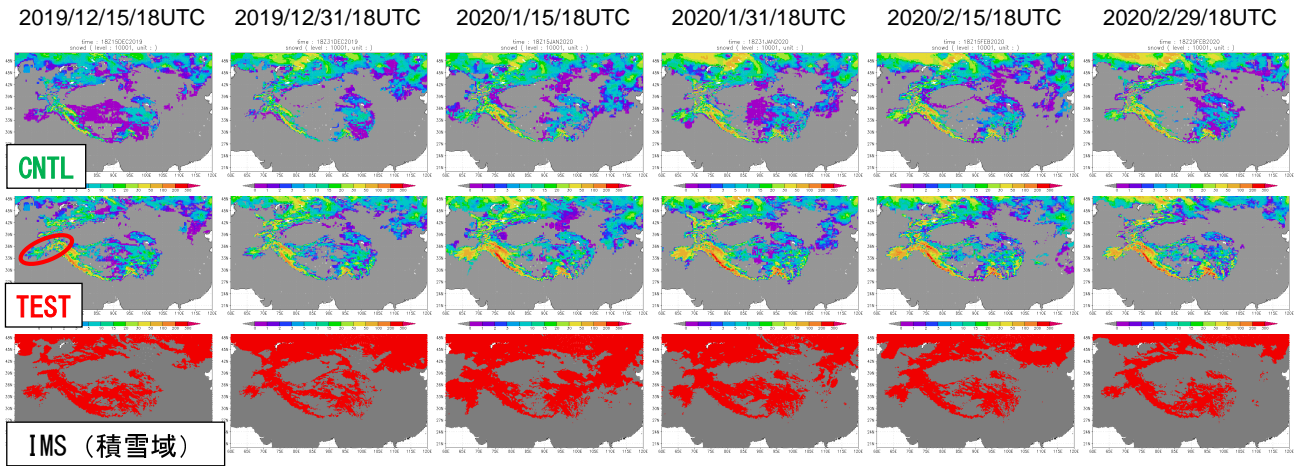


図 4.2.5 チベット高原の積雪深解析値の変化。上から順に CNTL,TEST,IMS (積雪域)。TEST の左端の図中に赤丸でヒンドークシュ山脈のおよその位置を示す。

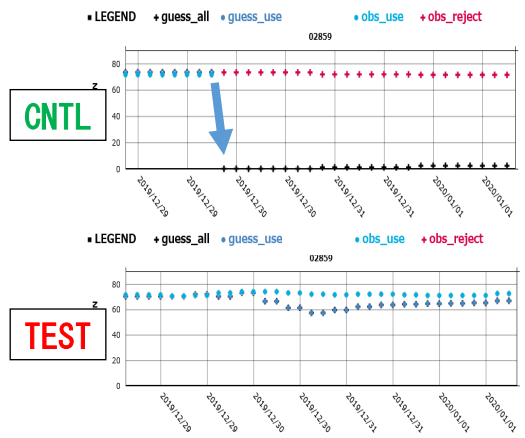


図 4.2.6 観測データの利用状況が改善した例。Paljakka (フィンランドの観測点) における積雪深の第一推定値と観測値、品質管理の結果を示したものの。凡例の obs_use は使用された観測値、obs_reject は品質管理によって使用されなかった観測値を示し、guess_all と guess_use は共に第一推定値を示す (観測が使用された場合は両方、観測が使用されなかった場合は前者のみをプロットしている)。

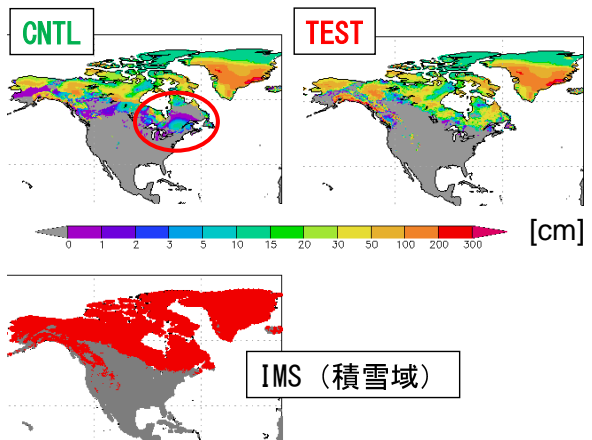


図 4.2.7 2020 年 5 月 1 日 18UTC の積雪深解析値 (融雪期)。左上は CNTL、右上が TEST、左下は IMS (積雪域)。CNTL の図に赤丸で不自然な積雪分布が見られる領域を示す。

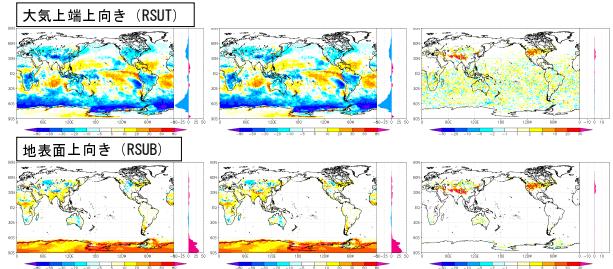


図 4.2.8 短波放射フラックスの対 CERES 平均誤差 (冬実験 2,FT=6)。上段は大気上端上向き放射フラックス、下段は地表面上向き放射フラックス。左から順に、CNTL,TEST,TEST-CNTL。

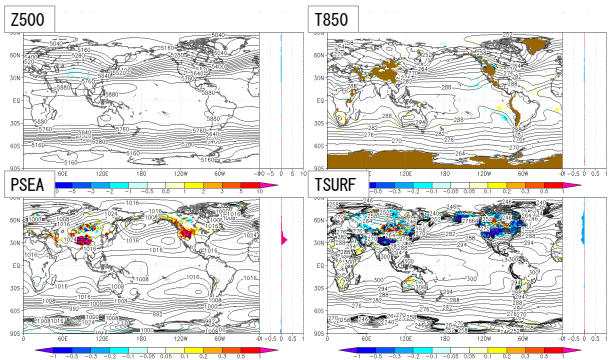


図 4.2.9 平均解析場の変化 (冬実験 2,TEST-CNTL)。左上は 500 hPa 高度、右上は 850 hPa 気温、左下は海面気圧、右下は地上気温。

に第 4.2.2 項 (2) で述べた変更を加えた実験を TEST とする。解析実施期間と評価期間 (括弧) は以下のとおり。

- 夏期間: 2018 年 7 月 10 日 - 2018 年 9 月 11 日 (2018 年 8 月)
- 冬期間: 2018 年 12 月 10 日 - 2019 年 2 月 11 日 (2019 年 1 月)

図 4.2.13 にマイクロ波サウンダの O-B の標準偏差

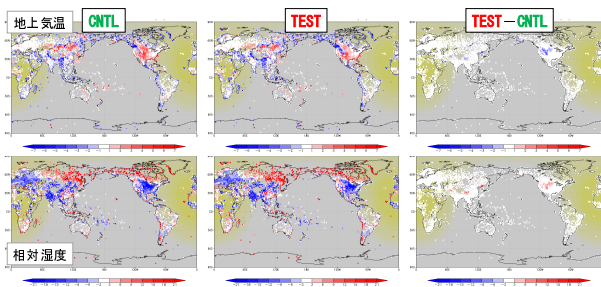


図 4.2.10 解析値の対 SYNOP 平均誤差 (12UTC)。上段は気温、下段は相対湿度。左から順に CNTL, TEST, TEST-CNTL。

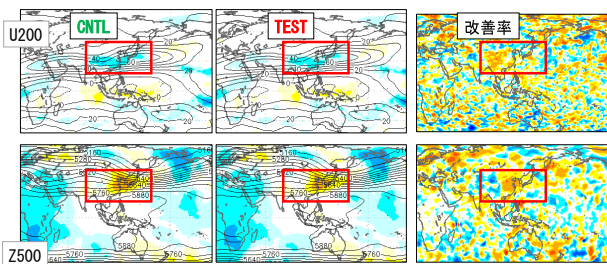


図 4.2.11 対解析のバイアスと RMSE 改善率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL})(\text{FT}=72)$ 。上は 200 hPa 東西風、下は 500 hPa 高度。左から CNTL のバイアス, TEST のバイアス, RMSE 改善率。

変化率、QC を通過して同化に使用された観測数の変化率を示す。AMSU-A の上層に感度のあるチャンネルを中心に O-B の標準偏差は減少しており、同化に使用されるチャンネル数も増えている。ATMS の気温に感度のあるチャンネルも同様であったが、その他の衛星輝度温度観測に対しては概ね中立であった (図略)。図 4.2.14 に夏期間のラジオゾンデ気温観測についての結果を同様に示す。O-B の標準偏差は対流圏では中立から改善傾向であるものの、成層圏では熱帯を中心に改悪傾向であった。冬期間についても熱帯の成層圏では改悪傾向であった (図略)。図 4.2.15 に夏期間について、対解析の RMSE の改善率を示す。対流圏では中高緯度を中心に中立から改善傾向であるものの、成層圏では高度を除いて改悪が目立つ。こうした傾向は対 ERA5 についても同様に見られた。冬期間についても同様の傾向であった (図略)。一方、台風進路予測誤差については改善傾向であった (図 4.2.16)。共分散膨張係数は全般的に増加傾向であり、スプレッドは対流圏の熱帯や下部成層圏で増加傾向であった (図略)。

この実験結果において懸念すべきは成層圏の改悪ということになるが、AMSU-A において上層に感度のあるチャンネルほど O-B の標準偏差の変化率が減少していること、ラジオゾンデ気温観測では成層圏 (特に熱帯) において逆に O-B の標準偏差の変化率が増加傾向であることから、AMSU-A の上層に感度のあるチャンネルに対しては観測に解析を寄せすぎている可能性がある。別調査において最適な鉛直局所化スケールは

対流圏よりも成層圏の方が小さいという統計結果も得ており (未公表)、鉛直局所化スケールを鉛直方向に変化させることも今後は必要になるかもしれない。ただし、観測種別ごとに関数形を最適化するのは維持管理の複雑化をもたらすため、それを必要としない局所化手法⁶への移行を考えるのが先と考えている。

(2) ハイブリッド実験による性能評価

現在のグローバル解析における LETKF の役割は、4次元変分法に対して第一推定値の不確実性情報を与えることであるが、そこでは主に対流圏の情報を使用している。LETKF の成層圏における精度悪化はグローバル解析にはあまり悪影響をもたらさない可能性があるため、4次元変分法も行うハイブリッド同化実験による性能評価も実施した。GSM2103 に準じた仕様による実験を CNTL、第 4.2.2 項 (2) で述べた変更を加えた実験を TEST とする。解析実施期間と評価期間 (括弧) は以下のとおり。

- 夏期間：2019 年 7 月 10 日 - 2019 年 9 月 11 日 (2019 年 8 月)
- 冬期間：2019 年 12 月 10 日 - 2020 年 2 月 11 日 (2020 年 1 月)

図 4.2.17 にマイクロ波サウンダの O-B の標準偏差変化率、QC を通過して同化に使用された観測数の変化率を示す。全体的に中立であり、LETKF 単独実験で見られたような気温に感度のあるチャンネルにおける O-B の標準偏差の減少は見られなかった。図 4.2.18 に夏期間のラジオゾンデ気温観測についての結果を同様に示す。こちらも全体的に中立であり、LETKF 単独実験で見られたような成層圏 (特に熱帯) における O-B の標準偏差の増加は見られなかった。冬期間についても同様であった (図略)。図 4.2.19 に夏期間について、対解析の RMSE の改善率を示す。LETKF 単独実験で見られたような成層圏での改悪傾向は見られないが、対流圏の南半球で若干の改悪傾向が見られる。冬期間についても同傾向であった (図略)。台風進路予測誤差については中立であり、LETKF 単独実験で見られたような改善傾向は見られなかった (図 4.2.20)。共分散膨張係数は LETKF 単独実験と同様に全般的に増加傾向であるが、スプレッドについては夏期間の対流圏で熱帯より南氷洋で増加が目立つなど LETKF 単独実験とは異なる特徴も見られた (図略)。

4.2.5 まとめ

GSM2103 で改良した全球積雪深解析に対して解析の 1 日 4 回化等の改良を検討し、オフライン積雪深解析や解析予報サイクル実験による評価を行った。積雪域の表現が改善することや、冬・春実験を中心に北半球域・日本周辺域の予測精度の改善傾向が見られることを確認した。今後、GSM22XX に向けた他の改良予定項目と組み合わせた評価を行うなど、現業化に向け

⁶ 背景誤差共分散行列を直接局所化する手法など。

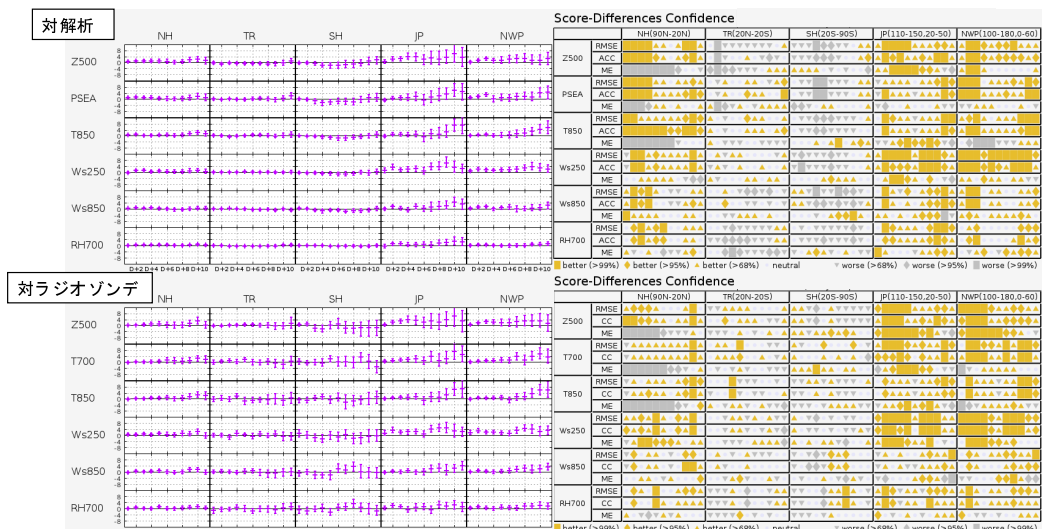


図 4.2.12 冬実験 2 の対流圏主要要素の RMSE の改善率 [%] (左図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (右図: スコアカード)。上段が対解析値、下段が対ラジオゾンデの結果。検証領域は左から北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)、日本周辺 (110°E - 150°E, 20°N - 50°N)、北西太平洋領域 (100°E - 180°E, 0°N - 60°N)。要素は上から 500 hPa 高度、海面更正気圧 (対ラジオゾンデは 700 hPa 気温)、850 hPa 気温、250 hPa 風速、850 hPa 風速、700 hPa 相対湿度。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、アンノミー相関係数 (ACC) (対ラジオゾンデは相関 (CC))、バイアスで、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示す (塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が大きい)。

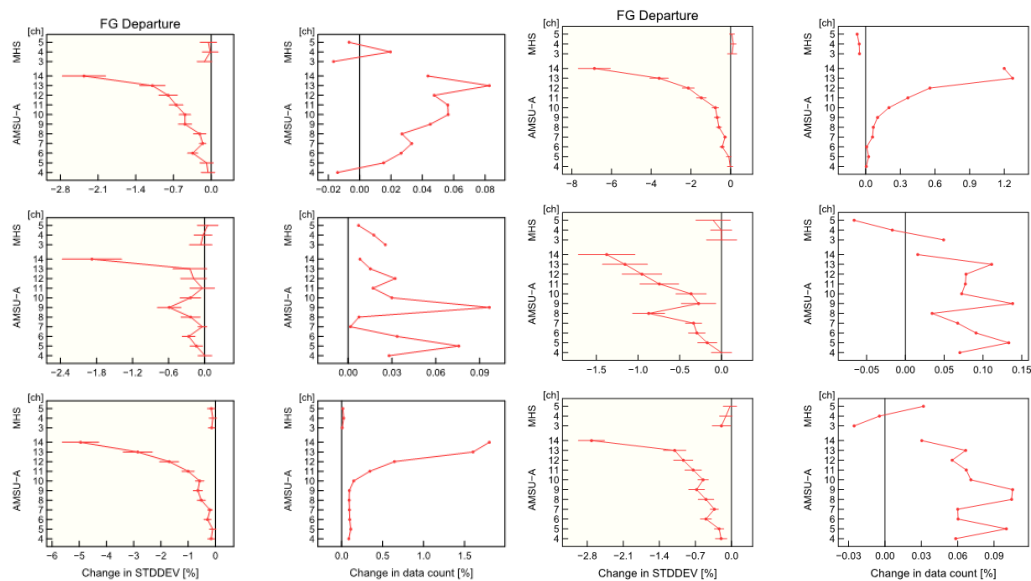


図 4.2.13 AMSU-A 及び MHS の O-B の標準偏差の変化率と観測使用数の変化率。左が夏期間、右が冬期間のもので、それぞれ左側に O-B の標準偏差の変化率、右側に観測使用数の変化率 (%)。上から北半球、熱帯、南半球。

た作業を進めていく。

また、4 次元変分法に対して日々の気象場に応じて変化する第一推定値の不確実性情報を与えるための LETKF について、今後の維持管理を考慮して観測空間局所化で用いるガウス関数に与える局所化スケールを設定を 3 つから 2 つに整理することとした。影響を評価するため、LETKF 単独実験及び通常のハイブリッド同化による解析予報サイクル実験を実施した。LETKF 単独実験では対流圏の中高緯度の改善傾向、台風進路

予測の改善傾向が確認された一方、成層圏における改悪が確認された。原因の一つとして、成層圏において AMSU-A の観測値に解析を寄せすぎている可能性が考えられるものの、設定を複雑化せずに調整・最適化するためには、局所化手法の変更を含めた開発が必要である。ハイブリッド同化実験においては成層圏における改悪は見られなかったが、現在のハイブリッド同化の設定では LETKF による成層圏の情報をあまり使用していないことが理由の一つと考えられる。一方で、

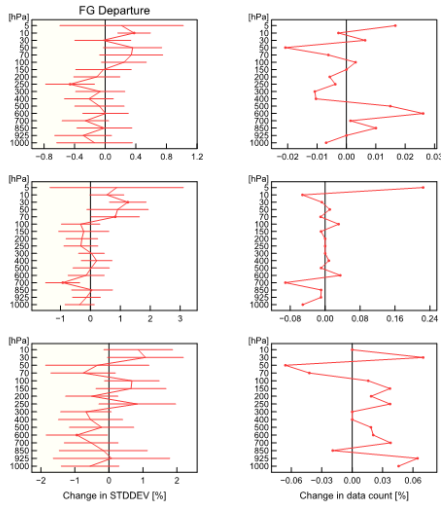


図 4.2.14 図 4.2.13 と同じ。ただし、夏期間のラジオゾンデ気温観測についてのもの。

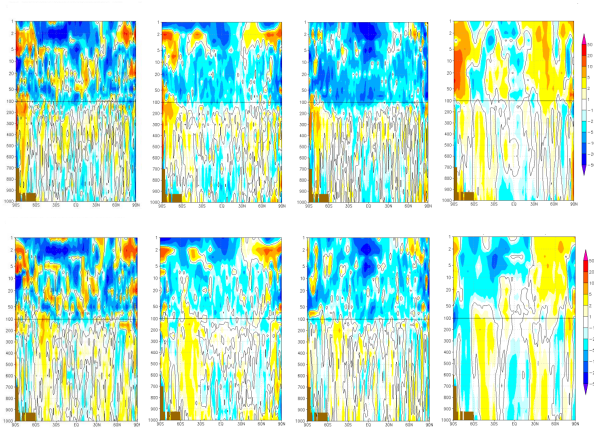


図 4.2.15 夏期間の対解析の RMSE 改善率（東西平均）。左から順に比湿、気温、東西風、高度。上段は FT=24[h]、下段は FT=72[h]。

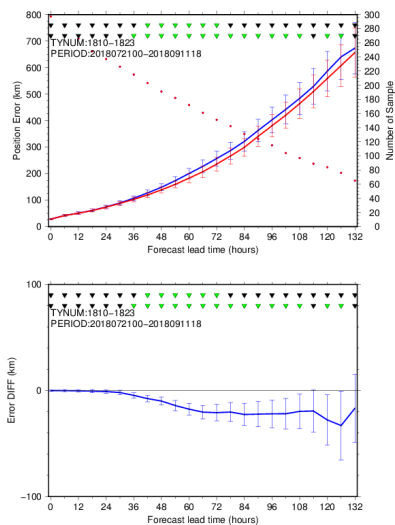


図 4.2.16 夏期間における台風進路予測誤差（上、青が CNTL、赤が TEST）、とその差（下、TEST-CNTL）。JMA ベストトラックを真としたもの。

対流圏の中高緯度の改善傾向や台風進路予測の改善傾向も見られなくなり、また、対流圏の南半球では若干の改悪傾向が見られた。これらの変化と変更内容の関係があまり明確ではないこと、北半球では改悪傾向ではないこと、今後の開発・維持管理の上で設定の複雑さを軽減することは重要であることなどから、こちらについても今後、GSM22XX に向けた他の改良予定項目と組み合わせた評価、他の期間での実験を行うなど、現業化に向けた作業を進めていく。

なお、GSM22XX の現業への導入時期については年度当初の計画を変更して令和 4 年度後半へと延期することとなった。

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.

Ota, Y., M. Ikegami, and H. Yamaguchi, 2019: Upgrade of initial perturbations made using the Local Ensemble Transform Kalman Filter in JMA’s Global EPS. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **49**, 6.11–6.12.

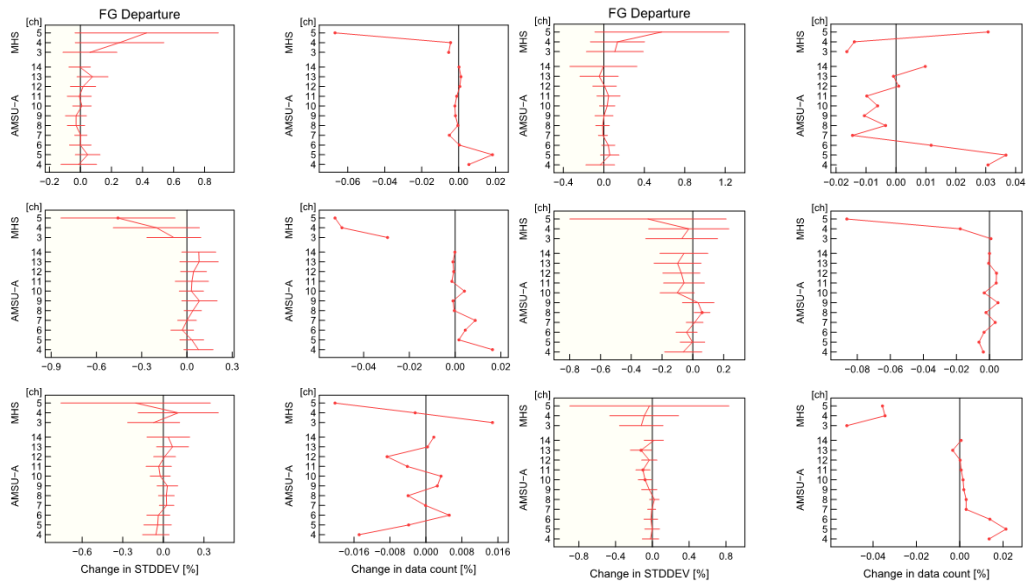


図 4.2.17 図 4.2.13 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

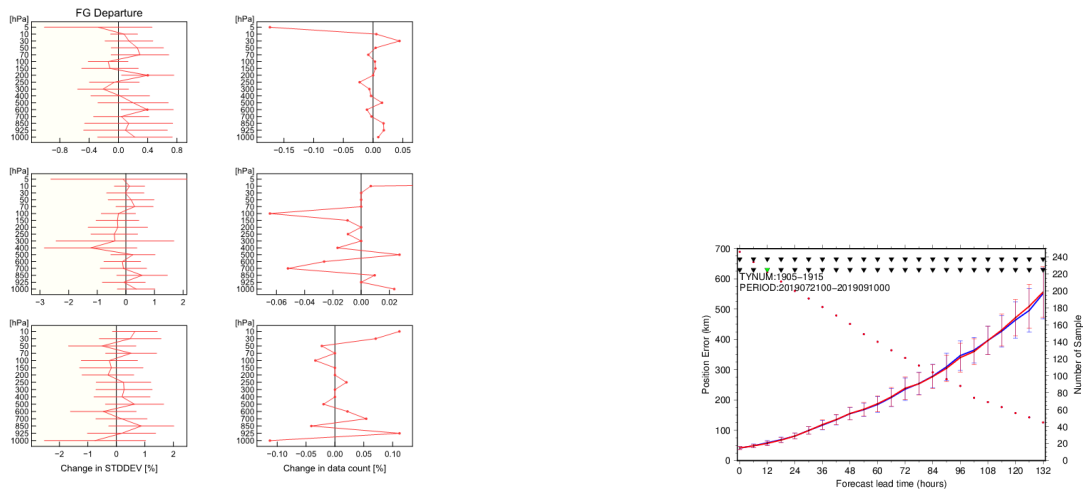


図 4.2.18 図 4.2.14 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

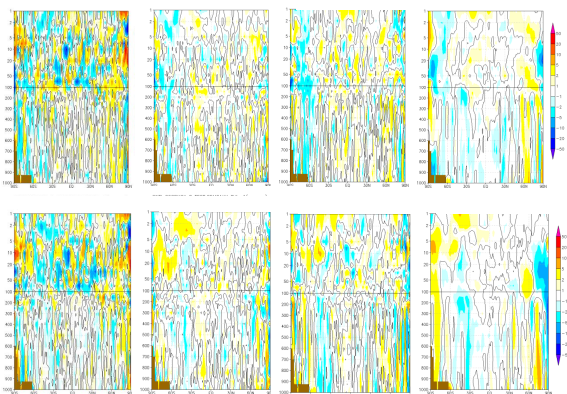


図 4.2.19 図 4.2.15 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

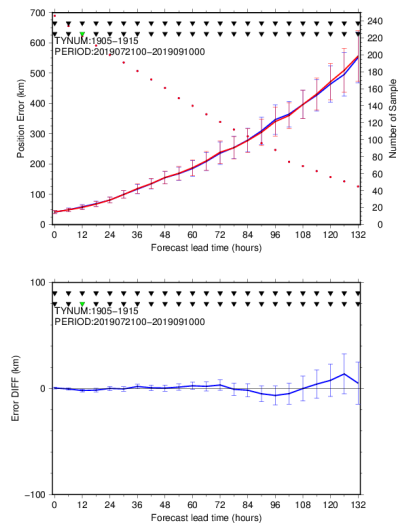


図 4.2.20 図 4.2.16 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

4.3 全球アンサンブル予報システムの改良

4.3.1 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））の改良を同時に現業化できるよう開発を進めている。GSMの水平高解像度化などのGSM・GAの改良（第4.1節、以下では両者まとめてGSM22XXと呼ぶ）とタイミングを合わせ、GEPSにおける現象表現能力の向上等による全般的な精度向上を目的とし、予報モデル更新、水平高解像度化、2段階SST（海面水温）法（高倉・小森 2020）の改良などを令和3年度末に導入する計画で開発を進めてきた¹。

今回、次項で述べるGEPSの各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。

4.3.2 改良予定項目の概要

GSM22XXでは、水平解像度を約20 kmから約13 kmへと高解像度化するとともに、モデルの物理過程等の改良も計画している。このため、GEPSについても使用する予報モデルの水平解像度を、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にそれぞれ高解像度化するとともに、GEPSで使用する予報モデルをGSM22XXで導入予定のものに更新する。水平高解像度化によるGEPSの現象表現能力の向上とモデル更新により予測精度向上が期待され、また、GSMとGEPSで使用するモデルが整合することにより、引き続きGSMによる予測に関する確率予測情報を適切に作成できることが期待される。ただし本稿で示す実験結果には、水平高解像度化及びそれに関連する力学過程の変更を除き、予報モデル更新に伴う影響評価は含まれない。以降の用語の使い方として、水平高解像度化には関連する力学過程の変更も含むものとし、予報モデル更新には力学過程の変更は含まないものとする。

また、スプレッドとスキルの関係を適切に保つため、SV（特異ベクトル）による初期摂動の振幅調整を行う。具体的には、北半球と南半球の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大きさが0.23 Kとなるように設定していたものを、0.21 Kへと変更する。これらの値は、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よう実験で試行錯誤して調整するもので、今回の変更で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、より小さな値へと調整した。

さらに、GEPSの下部境界条件としてのSSTをより高精度のものとするを目的とし、2段階SST法で外力として使用する季節アンサンブル予報システム（CPS）のSST予測値について、CPS2（第2.9節）の予測結果から、令和4年2月の発表情報から運用されるCPS3（第4.11節）の予測結果に変更する。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日へと変更する。

4.3.3 性能評価試験

(1) 水平高解像度化

GEPS2103（第3.3.1項）の現業化の判断のために実施した実験をCNTLとする。CNTLに対し、GEPSで使用する予報モデルを水平高解像度化した実験をTESTとする。TESTに入力する初期値については、CNTL用の初期値を作成するGA（観測データの入電打ち切り時間の短い速報解析ではなく、なるべく多くの観測データを同化したサイクル解析を使用）に対し、使用するGSMをGSM22XXと同じ解像度へ水平高解像度化したもので作成した。実験期間は2019/7/21-2019/9/11初期値（以降、2019夏と呼ぶ）と、2019/12/21-2020/2/11初期値（以降、2019/20冬と呼ぶ）とし、12UTC初期値のみ、アンサンブルメンバー数を13とした結果同士で比較した。11日先までの予測を対象とした。

図4.3.1に海陸分布の比較を示す。CNTLでは識別できていない琵琶湖や一部の島がTESTでは識別可能となった。海陸表現だけでなく地形表現も細かくなり、山岳の表現は急峻となる（図略）。

北半球500 hPa高度場と850 hPa気温場のアンサンブル平均予測について、対解析のRMSEは改善傾向であった（図4.3.2）。対解析雨量の検証では、1mm/24h及び5mm/24hの閾値でブライアスキルスコアは概ね中立～改善であった（図4.3.3）。なお、冬の5mm/24hの予報後半は若干改悪に見えるが、統計的に有意な差ではない。

図4.3.4に予報時間ごとの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。コントロールラン（摂動を加えないアンサンブルメンバー）とアンサンブル平均の台風進路予測誤差は中立から改善傾向であった。台風接近確率の信頼度曲線に大きな変化はなく、ブライアスキルスコアは改善傾向であった。台風中心気圧の予測はCNTLより改善される傾向であるが、実況と比べてかなり浅い点は変わらない（図4.3.5）。この改善には、GEPSで使用する予報モデルの水平高解像度化と、GSMの水平高解像度化によりGAで台風が深く表現されることの両方が効いている。

また、年々変動の寄与を含めて評価するため、再予報

¹ 第4.3.4項に記したとおり、GSMへの導入は令和4年度後半へと延期され、GEPSへの導入はモデルの更新を含め計画どおり

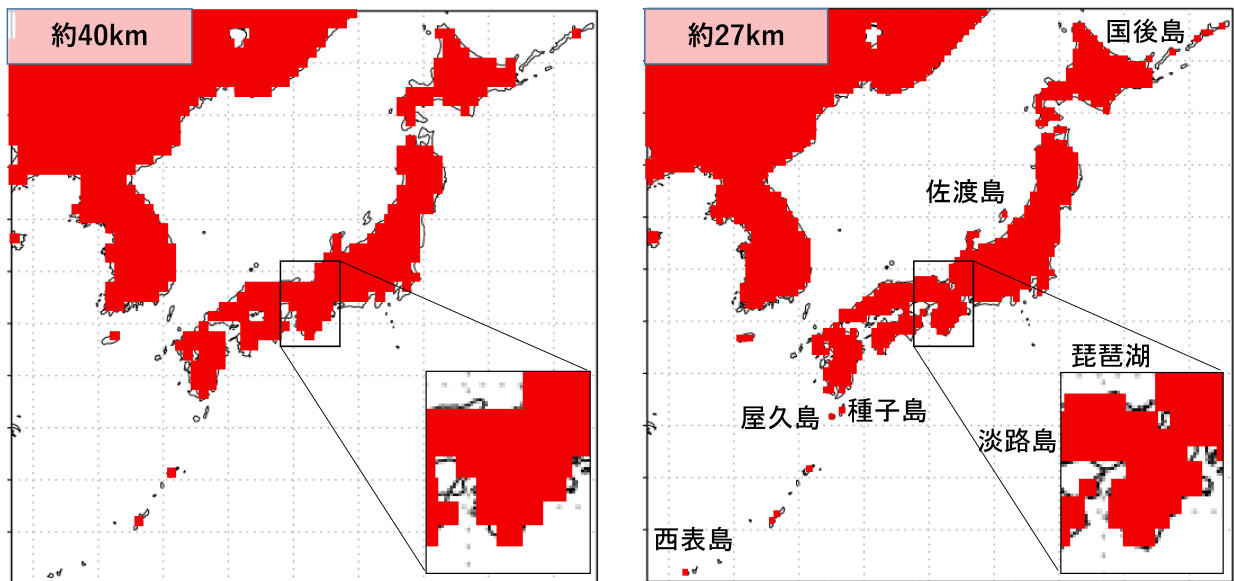


図 4.3.1 水平高解像度化前（左）後（右）の海陸分布の表現。赤は陸の格子、白は海・湖の格子。

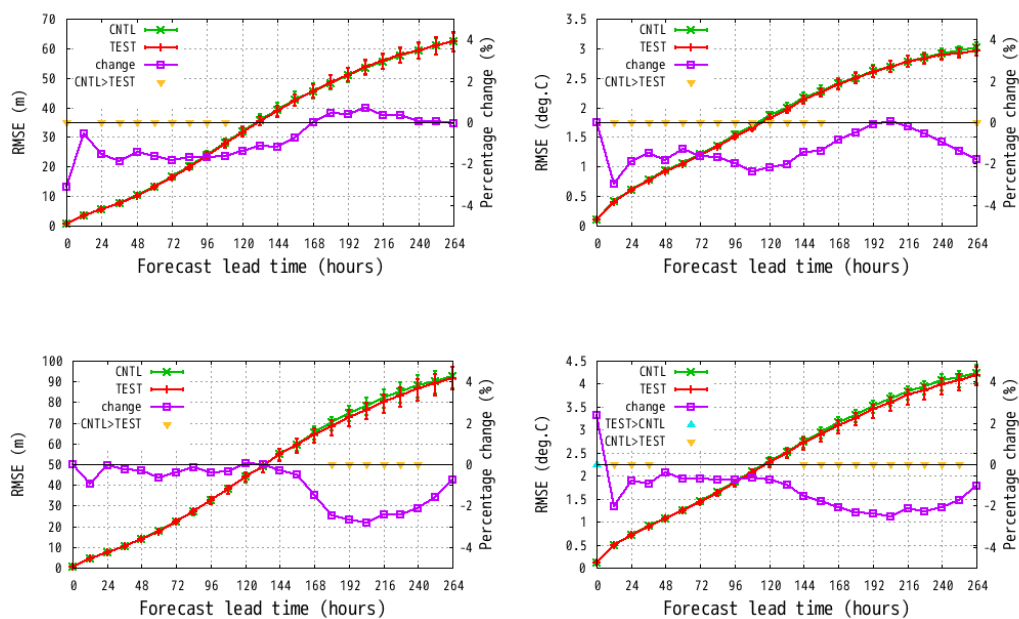


図 4.3.2 アンサンブル平均の対解析 RMSE。領域は北半球 (20°N - 90°N)。上段は 2019 夏、下段は 2019/20 冬。左列は 500 hPa 高度場 [m]、右列は 850 hPa 気温場 [K]。CNTL は緑線、TEST は赤線で、紫線は変化率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL}[\%])$ 、右縦軸。5% の有意水準で差が有意である場合に $\nabla(\text{CNTL}>\text{TEST})$ ないし $\triangle(\text{TEST}>\text{CNTL})$ をプロットしている。

型の実験も実施した。GEPS2103 の現実化の判断のために実施した実験を CNTL、CNTL に対して GEPS で使用する予報モデルを水平高解像度化したものを TEST とする。再予報型実験については越智・関口 (2019) に詳しいが、ここでは実験期間は 1990-2010 年とし、月末 12UTC 初期日のみを対象とする 13 メンバーによる結果同士で比較した。

TEST は CNTL に対し、北半球域では中立の要素が多いものの、850 hPa 気温場や 850 hPa 流線関数では概ね改善傾向であり (図 4.3.6)、熱帯域では多くの要

素で改善傾向であった (図 4.3.7)。また、平均誤差の空間分布は TEST と CNTL で概ね同様の傾向であり、変化幅も小さかった (図略)。

(2) SV による初期摂動の振幅調整

GEPS で使用する予報モデルに対して予報モデル更新及び水平高解像度化したものを CNTL とする。CNTL へ入力する初期値は、GSM22XX の改良予定項目を全て組み合わせた解析予報サイクル実験で作成したもの (サイクル解析) を用いた。CNTL に対して SV による

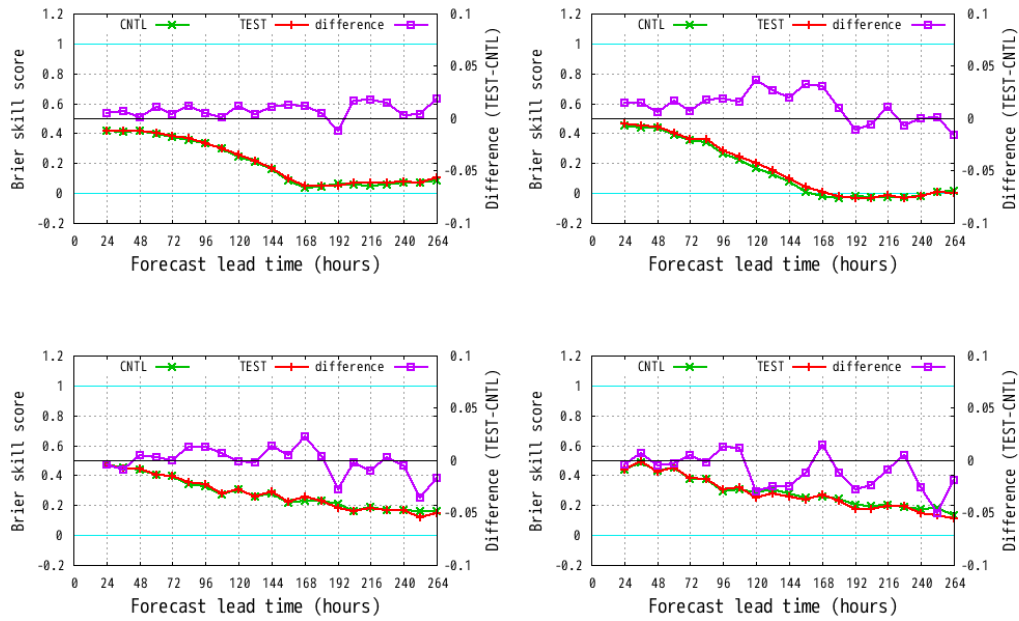


図 4.3.3 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は 2019 夏、下段は 2019/20 冬。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

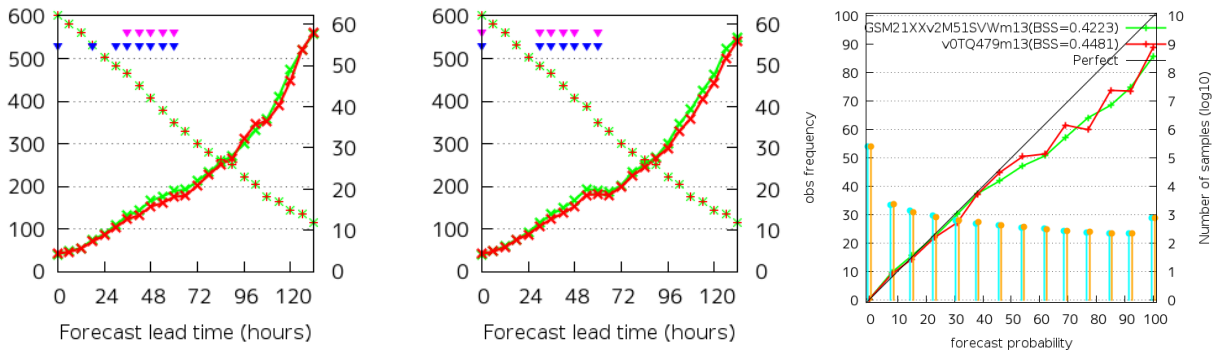


図 4.3.4 コントロールラン (左) 及びアンサンブル平均 (中) の台風進路予測平均誤差と、台風接近確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (右)。CNTL は緑、TEST は赤。左図と中図は × と実線が平均誤差 [km] (左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。右図は実線が信頼度曲線 (左縦軸)、水色とオレンジの棒グラフで CNTL と TEST の予報頻度 (右縦軸) を示す。また、ブライアスキルスコアを凡例中の「BSS=」以降に示す。

初期摂動の振幅調整を行ったものを TEST とする。実験期間は 2019/6/20-2019/10/11 初期値 (以降、2019 夏と呼ぶ) と、2019/11/20-2020/03/11 初期値 (以降、2019/20 冬と呼ぶ) とし、12UTC 初期値のみ、アンサンブルメンバー数を 13 とした結果同士で比較した。11 日先までの予測を対象とした。

TEST は CNTL に対し、中高緯度の 500 hPa 高度場に代表される予報初期 (目安として FT=48-72h 周辺) においてスプレッドが過剰な要素について、過剰傾向が緩和されるとともに予測精度に若干の改善が見られた (図 4.3.8)。本改良については再予報で注目する予報時間への影響は小さいと考えられるため、再予報

型の実験は実施していない。

(3) 2 段階 SST 法の改良

まず、全球日別海面水温解析 (MGDSST, 栗原ほか (2006)) 遅延解析の偏差固定 SST (ルーチン仕様と異なり、CPS に対して有利な設定) と、CPS2 及び CPS3 による SST 予測値を検証した。CPS の実行スケジュールによる遅れは無いと仮定した。すなわち、毎日運用の CPS3 に対して、5 日毎運用のため本来なら遅れが生じる CPS2 に有利な設定で検証したところ (真値は MGDSST 遅延解析)、以下のような特徴がみられた (図 4.3.9)。

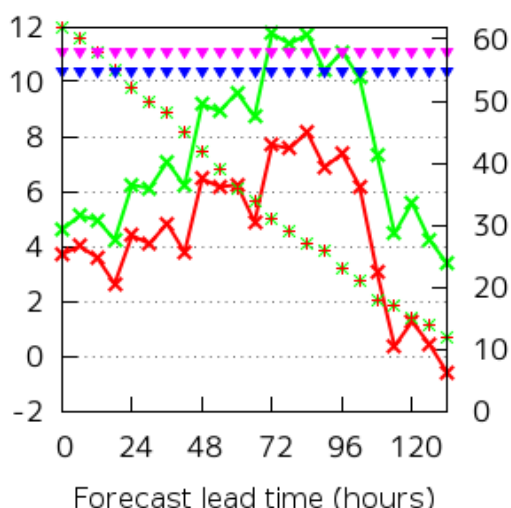


図 4.3.5 2019 夏におけるコントロールランの台風中心気圧の平均予報誤差。CNTL は緑、TEST は赤。× と実線が平均誤差 [hPa] (左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。

- CPS3 による SST 予測値は CPS2 による予測値よりも精度が良い。
- 熱帯・亜熱帯 (30°S-30°N) では、予測時間が経過すると初期偏差固定 SST の精度を上回るようになり、その境目の予測時間が CPS3 では CPS2 よりも短くなる。
- CPS による SST 予測値の活動度は初期偏差固定 SST よりも小さいが、CPS3 は CPS2 よりも活動度が大きい。

次に、ルーチン仕様と同様に MGDSST 速報解析を用いた初期偏差固定 SST を CPS3 の SST 予測値と比較検証したところ、以下のような特徴が見られた (図 4.3.10)。

- 熱帯・亜熱帯では、予測 2 日目から CPS3 の SST 予測値の方が初期偏差固定 SST よりも精度が良い。
- CPS3 の SST 予測値の精度が初期偏差固定 SST の精度を上回る傾向は、熱帯・亜熱帯でも中・高緯度 (30°N-60°N、30°S-60°S) でも、夏よりも冬の方が顕著である。
- 予測 6 日目のアノマリー相関係数の差の空間分布から、海洋の変動が大きい黒潮、メキシコ湾流、南極周極流に対して、特に海洋の渦のスケールが小さくなる冬半球で CPS3 の SST 予測値の精度が初期偏差固定 SST よりも悪化していることが確認できた。これは、CPS3 では小さいスケールの変動の表現が不十分であることを示唆しており、予め想定された結果であった。

以上の結果、ルーチン仕様では熱帯・亜熱帯においては予測 2 日目から CPS3 の SST 予測値の精度が初期偏差固定 SST よりも良いものの、台風 5 日予報への影

響調査が十分でないことを考慮して、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 日に前倒しすることにした (図 4.3.11)。

次に 11 日先までの予測を対象とした実験を実施した。GEPS2103 業務化試験を CNTL とし、CNTL に対して CPS3 による SST 予測値の利用と緩和期間の 6-11 日への前倒しを適用したものを TEST とする。実験期間は 2019/6/20~2019/10/21 初期値 (以降、2019 夏と呼ぶ) と、2019/11/20-2020/03/11 初期値 (以降、2019/20 冬と呼ぶ) とし、12UTC 初期値のみ、アンサンブルメンバー数を 13 とした結果同士で比較した。

TEST は CNTL に対し、熱帯における 6 日以降の予測でアノマリー相関係数の改善が見られた (図 4.3.12)。特に海面気圧や 1000hPa 気温場で改善が大きい。2 段階 SST 法の適用領域外である中・高緯度ではほぼ変化は見られなかった (図略)。海面気圧などの一部の要素では 6 日以降の予測で活動度の低下がみられたが (図略)、初期偏差固定 SST に比べ CPS3 による SST 予測値の活動度が小さいことから、緩和期間の前倒しに対する自然な応答と見られる。活動度が低下した要素についても、ブライアスキルスコアは中立であった (図略)。

次に再予報型の実験を実施した。GEPS で使用する予報モデルに対して予報モデル更新及び水平高解像度化したものを CNTL、それに対して CPS3 による SST 予測値の利用と緩和期間の 6-11 日への前倒しを適用したものを TEST とする。なお、実験期間は 1991-2020 年の 12-2 月及び 6-8 月とし、月末 12UTC 初期日のみを対象とする 13 メンバーによる結果同士で比較した。

TEST は CNTL に対して、予測後半を中心に中立~改善傾向であった (図 4.3.13)。平面図で確認すると西部太平洋~インド洋で改善は明瞭であった (図略)。活動度については、予測 1.5 週目 (6~12 日目) では熱帯の平均で減少傾向、予測 3-4 週目では増加傾向であり、先に述べた各 SST の活動度の違いによる自然な応答と見られる (図略)。また、MJO (マッデン・ジュリアン振動) 指数の予測精度 (計算手法は久保 (2017) に基づく) は改善傾向であった (図 4.3.14)。

4.3.4 まとめと今後の予定

令和 3 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。今後は全ての改良予定項目を組み合わせて現業に相当する構成での評価を行い、現業へ導入すべきかを判断することとなる。なお、GSM22XX の現業への導入時期については年度当初の計画を変更して令和 4 年度後半へと延期することとなったが、GEPS については計画どおり (使用する予報モデルの GSM22XX への更新を含め)、令和 3 年度末に導入する方向で準備を進めている。

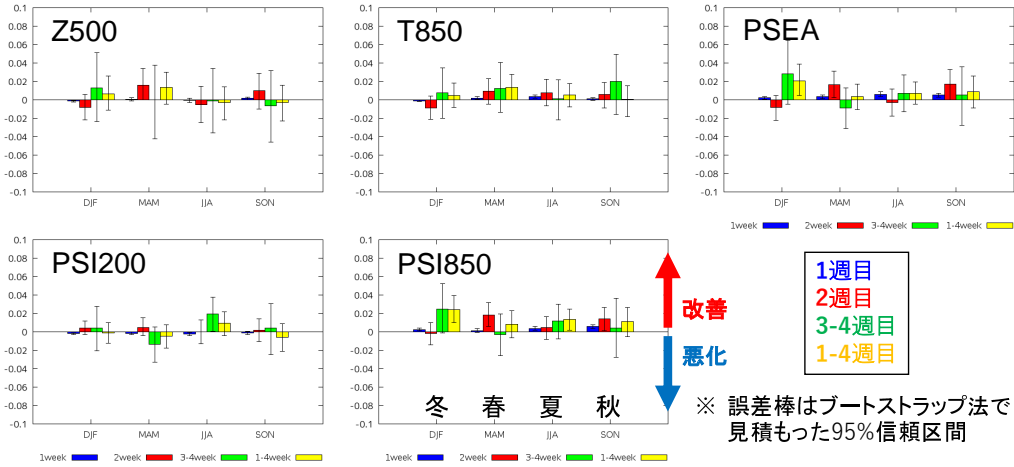


図 4.3.6 再予報 (1990-2010 年) による 13 メンバーアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差。バイアス補正なしの北半球の検証結果で、上段は左から 500 hPa 高度場、850 hPa 気温場、海面気圧、下段は 200 hPa と 850 hPa の流線関数。それぞれの図は左から順に冬 (DJF) 春 (MAM) 夏 (JJA) 秋 (SON) の並びとなっており、青は 1 週目、赤は 2 週目、緑は 3-4 週目、黄は 1-4 週目を表す。

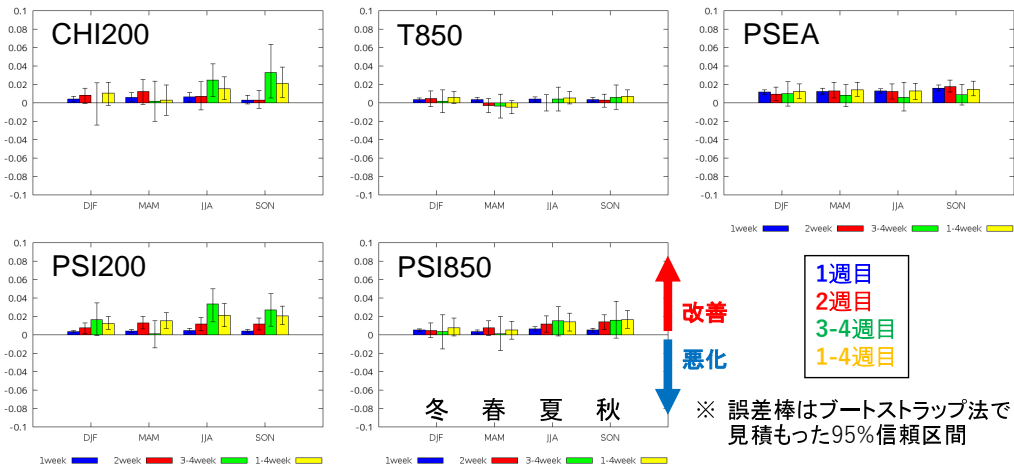


図 4.3.7 図 4.3.6 と同じ。ただし、熱帯 (20°S - 20°N) についての結果。

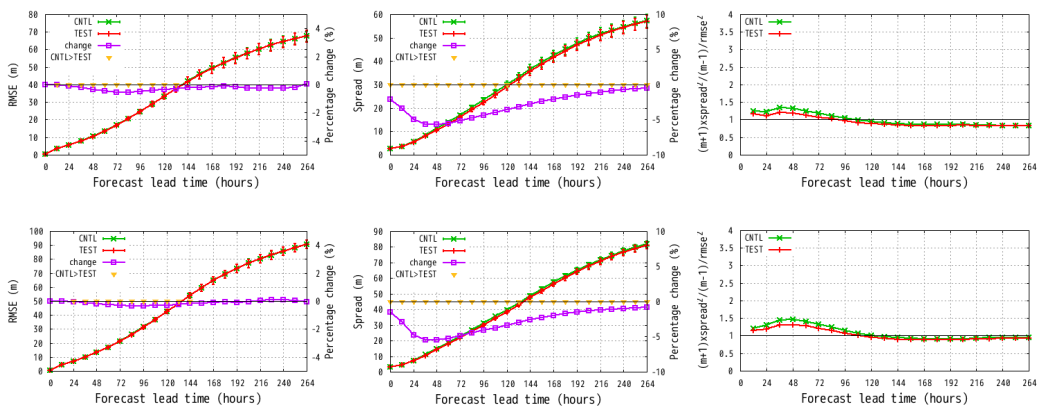


図 4.3.8 アンサンブル平均の 500 hPa 高度場の北半球の検証結果。上段は 2019 夏、下段は 2019/20 冬。左列は予報時間ごとの RMSE[m]、中列は予報時間ごとのスプレッド [m]、右列はスプレッドスキル (1 を超えるとスプレッドが予報誤差に対して過剰)。CNTL は緑線、TEST は赤線。RMSE とスプレッドでは、紫線は変化率 $((\text{TEST} - \text{CNTL}) / \text{CNTL} [\%])$ 、右縦軸。左列と中列については差に統計的な有意性がある場合に $\nabla (\text{CNTL} > \text{TEST})$ ないし $\triangle (\text{TEST} > \text{CNTL})$ をプロットしている。

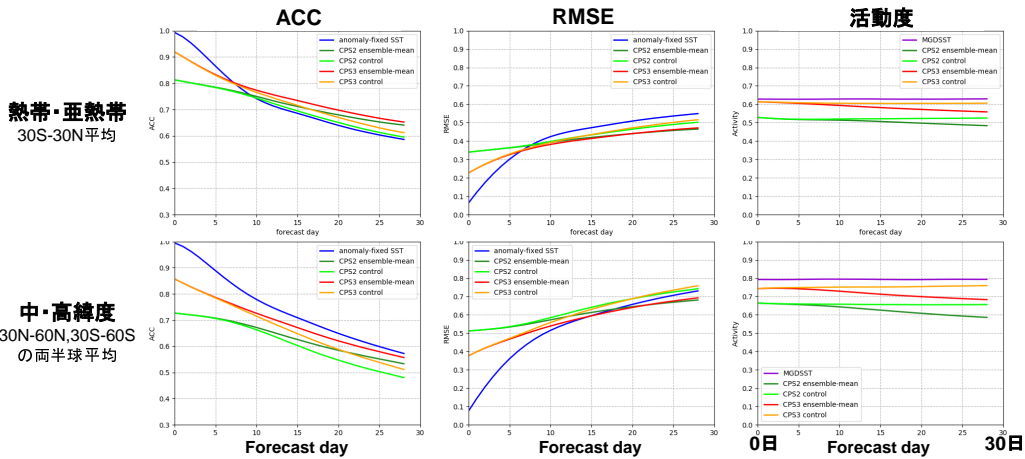


図 4.3.9 MGDSST 遅延解析を真値とした場合の CPS2 と CPS3 の SST 予測値の検証結果 (1991-2019 年の平均)。上段が熱帯・亜熱帯、下段は中・高緯度。左列はアノマリー相関係数、中列は RMSE、右列は活動度。青線は初期偏差固定 SST (初期偏差計算には MGDSST 遅延解析を使用)、深緑線は CPS2 のアンサンブル平均、赤線は CPS3 のアンサンブル平均 (他に、緑線は CPS2 の、橙線は CPS3 のコントロールラン)、紫線は MGDSST 遅延解析 (活動度のみ)。CPS の SST 予測値はバイアス補正済み。なお、CPS の実行スケジュールによる遅れがないという仮定で検証している。

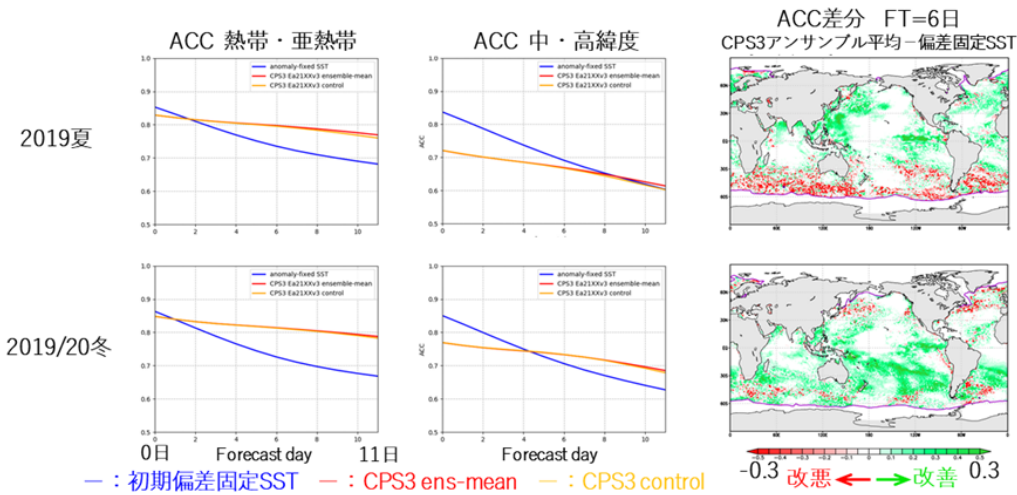


図 4.3.10 ルーチン仕様と同様に MGDSST 速報解析を用いて評価した場合の CPS3 の SST 予測値と初期偏差固定 SST の比較結果。左列が熱帯・亜熱帯、中列は中・高緯度、右列は予測 6 日のアノマリー相関係数の差分。上段は 2019 年夏、下段は 2019/20 冬の期間の結果を示す。青線は初期偏差固定 SST (初期偏差計算には MGDSST 速報解析を使用)、赤線は CPS3 のアンサンブル平均、橙線は CPS3 のコントロールメンバー (真値は MGDSST 遅延解析)。CPS の SST 予測値はバイアス補正済み。

さらに先の改良予定項目としては、引き続き GEPS で使用する予報モデルの最新 GSM への更新や、2 段階 SST 法の適用領域の拡大などを令和 4 年度末に導入する計画で検討を進めているところである。

参考文献

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

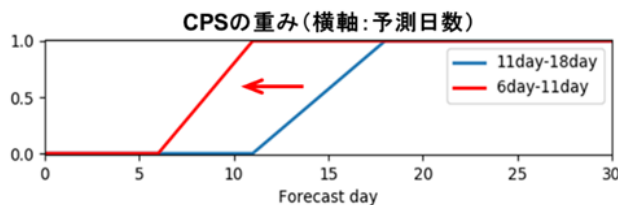


図 4.3.11 2 段階 SST 法で適用する CPS の SST 予測値の重み (縦軸は重み、横軸は予測日数)。CNTL は青線、TEST は赤線。

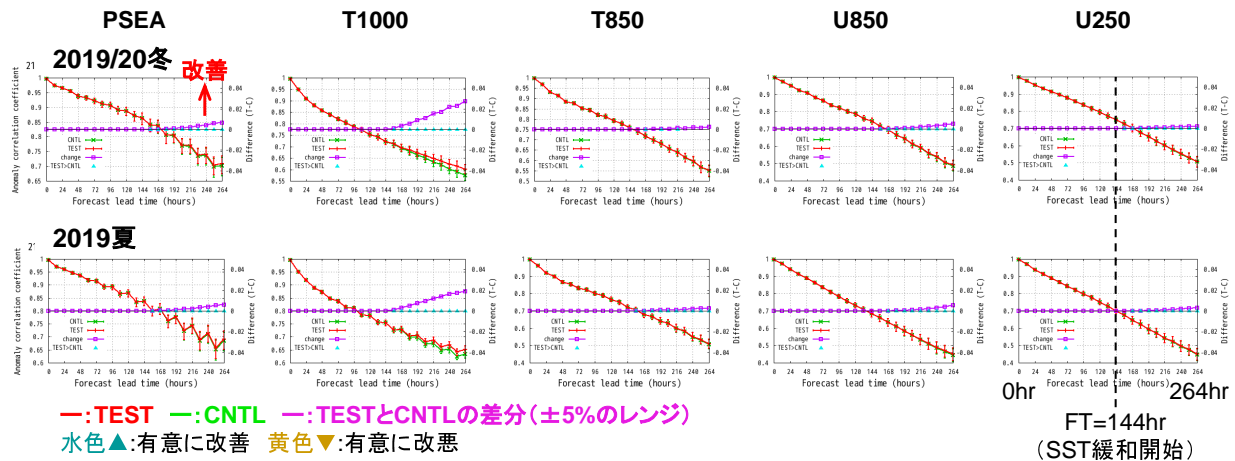


図 4.3.12 熱帯におけるアンサンブル平均のアノマリー相関係数。上段は 2019/20 冬、下段は 2019 夏。左から順に海面気圧、1000 hPa 気温、850 hPa 気温、850hPa 東西風、250 hPa 東西風。CNTL は緑線、TEST は赤線、紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

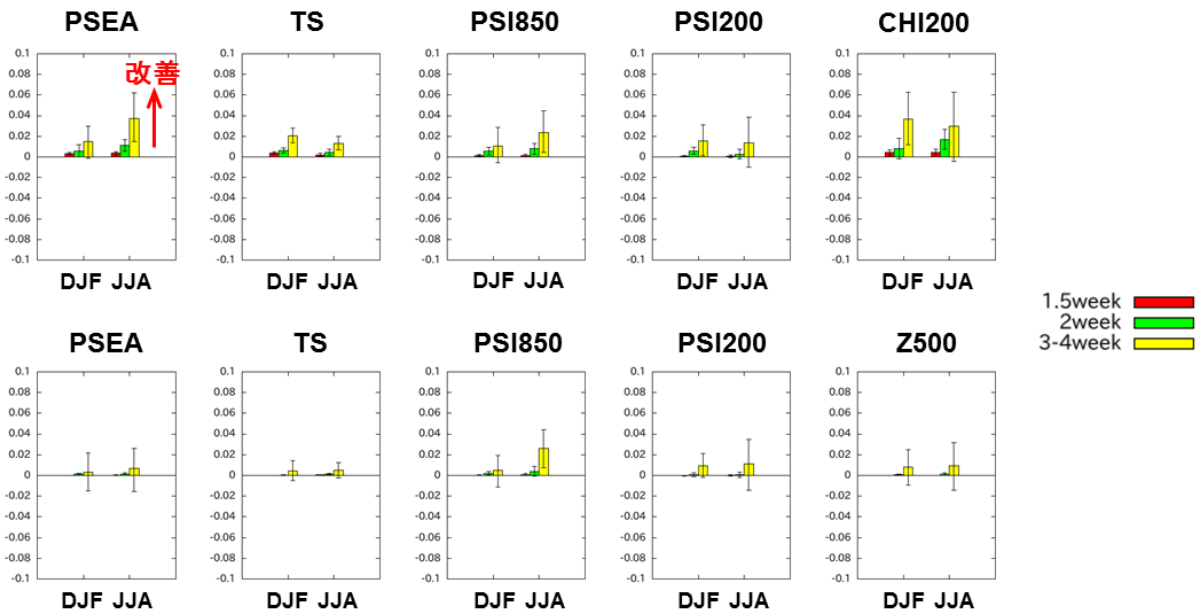


図 4.3.13 再予報 (1991-2020 年) によるアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差。上段が熱帯、下段が北半球のバイアス補正なしの検証結果。上段は左から海面気圧、地上気温、850 hPa 流線関数、200 hPa 流線関数、200 hPa 速度ポテンシャルであり、下段は上段と同じ、ただし 200hPa 速度ポテンシャルの代わりに 500hPa 高度としている。それぞれの図の左側が冬 (DJF) で右が夏 (JJA) の並びとなっており、赤が 1.5 週目、緑は 2 週目、緑は 3-4 週目を表す。

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.

越智健太, 関口亮平, 2019: 再予報型の予測実験。数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 121-126.

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.

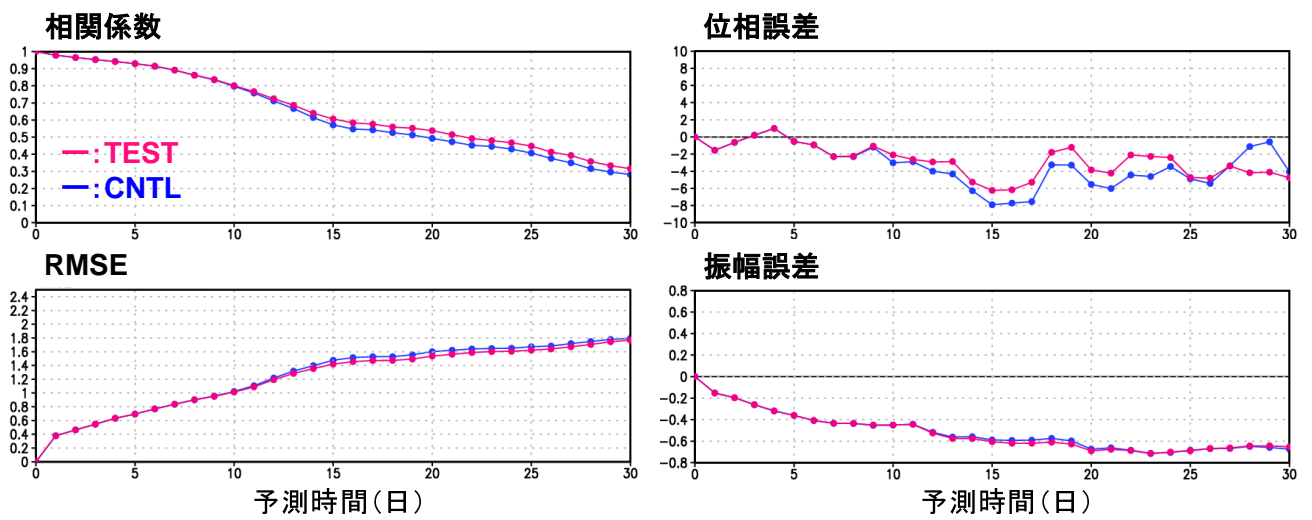


図 4.3.14 再予報（1991–2020 年）による MJO 指数の予測精度。夏冬期間で初期値の振幅が 1 以上の事例を対象としたもの。左上は相関係数、右上は位相誤差、左下は RMSE、右下は振幅誤差。赤線が TEST で青線が CNTL

4.4 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

4.4.1 はじめに

メソ数値予報システム¹は日本域を予報領域とした水平解像度 5 km の予報システムとなっており、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て、1日8回、予報期間 51 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や 4 次元変分法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。近年では、2017 年 2 月に予報モデルを JMA-NHM (気象庁予報部 2003) から新しい気象庁非静力学モデル asuca (気象庁予報部 2014; JMA 2019) に置き換えた。それに続き、2020 年 3 月にメソ解析を JMA-NHM に基づく非静力学メソ 4 次元変分法 (JNoVA; 気象庁予報部 2010) から asuca に基づくメソ 4 次元変分法 (asuca-Var; Ikuta et al. 2021) に置き換え、現在に至っている。

2022 年に更新を予定しているメソ数値予報システムでは、衛星観測データの利用拡充を主な目的としてメソモデルの鉛直層を 76 層から 96 層、メソ解析のインナーモデルを 38 層から 48 層にそれぞれ増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げる。また、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報情報を提供するとして「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」に示された目標に資するため、00, 12UTC 初期値の予報期間を 51 時間から 78 時間に延長する。あわせて、予報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う計画である。本節では、2022 年に更新予定のメソ解析・メソモデルの改良の概略を報告するとともに、これまでの検証実験で得られた予報特性の変化について述べる。

4.4.2 メソ解析の改良

はじめに述べた通り、本変更では、衛星観測データの利用拡充を主な目的として、モデル上端高度を引き上げる。以下では、モデル上端高度を引き上げた新しい解析システム (MA22XX) の背景誤差と MA22XX における衛星観測データの利用拡充について述べる。

(1) 背景誤差の作成

MA22XX では、メソ解析のインナーモデルの鉛直層を 38 層から 48 層に増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km まで引き上げ、仕様を向上させ

る²。21.8 km から 37.5 km までを含む背景誤差が必要となるため、現ルーチンと同様に NMC 法 (Parrish and Derber 1992) により新たに作成することとした。現ルーチンと MA22XX の背景誤差の比較を表 4.4.1 にまとめる。

MA22XX の鉛直誤差共分散は現ルーチンと同じく 3 時間毎の対象時刻別および海陸別に作成した。NMC 法に用いる予報差サンプル (対象時刻が等しく初期時刻が異なる予報値の差を予報誤差の情報を含むサンプルとみなす) の統計期間はこれまで同様に 1 年分 (各月 10 日分) を用いた。NMC 法では、背景誤差共分散の構造の推定を行うが、第一推定値の誤差に対応する規格化は別途定める必要がある。背景誤差と観測誤差とのバランスを変えないことを意図して、500 hPa の温位の誤差分散が現ルーチンと同程度になるように規格化した。新たに作成した MA22XX の鉛直誤差共分散は現ルーチンと比較して大幅に性質が変わるものではなかった。図 4.4.1 には x 方向の風について、全時刻かつ海陸合わせて平均した鉛直誤差共分散を示す。対象時刻別、海陸別に見ても、Ikuta et al. (2021) が言及した陸上の境界層内の誤差分散構造の日変化特性が表現されていた (図略)。

水平誤差相関は現ルーチンと同じく水平 2 次元のガウス関数を仮定し、その分散は x 方向、 y 方向の 2 方向で与え水平一様とする。また、全時刻で同じであるとする。統計期間はこれまで同様に 1 年分 (各月 10 日分) である。現ルーチンにおいて、鉛直誤差共分散と水平誤差相関とで統計期間および「予報差サンプルの時間差」が異なる理由は、2020 年 3 月のメソ解析への asuca-Var 導入時 (気象庁 2021a) に、水平誤差相関については当時のルーチン (JNoVA に基づく) の設定 (藤田ほか 2016) を変更しなかったからである。藤田ほか (2016) では、水平誤差共分散の年平均の分布をガウス関数にフィッティングする際に標準偏差のみを推定していたが、今回は標準偏差と振幅を推定する Caruana et al. (1986) の方法に変更した。変更した理由は、藤田ほか (2016) における JNoVA の予報差サンプルと今回の asuca の予報差サンプルには空間スケールに大きな違い³があり、これまでと同じフィッティング手法を用いることが適当ではなかったためである。新たに作成した MA22XX の水平誤差相関距離は現ルーチンと同程度であった (図 4.4.2)。

¹ メソ解析およびメソモデル (予報モデル) あわせてメソ数値予報システムと表記する。

² そのほかの仕様変更として、成層圏の水平風速の大きさに対応して、インナーモデルの積分時間間隔を 120 s から 100 s へ変更する。

³ JNoVA の予報差サンプルには、衛星観測輝度温度のデータ分布と対応が見られる、空間スケールの大きな予報差が含まれていた。当時の衛星観測輝度温度のバイアス補正は気象庁全球解析における変分法バイアス補正係数を利用していたことにより、補正が十分でなかったことが指摘されおり (気象庁 2021a)、これが影響している可能性が考えられる。

表 4.4.1 背景誤差の変更前後の比較。

		現ルーチン	MA22XX
モデル上端高度 (層数)		21.8 km (38 層)	37.5 km (48 層)
鉛直誤差共分散	対象時刻	対象時刻別	同左
	空間分布	海陸別	同左
	統計期間	2018 年 3 月-2019 年 2 月 (各月 10 日-19 日)	2018 年 7 月-2019 年 6 月 (各月 11 日-20 日)
	予報差サンプルの時間差	3 時間 (FT=6 と 3 の差)	同左
水平誤差相関	対象時刻	全時刻で同じ	同左
	空間分布	水平一様	同左
	統計期間	2014 年 8 月-2015 年 7 月 (各月 1 日-10 日) *	2018 年 7 月-2019 年 6 月 (各月 11 日-20 日)
	予報差サンプルの時間差	6 時間 (FT=12 と 6 の差)	3 時間 (FT=6 と 3 の差)
	算出に用いるフィッティング手法	標準偏差のみを推定	標準偏差と振幅を推定

* この統計期間の JNoVA に基づくサンプルである (藤田ほか 2016)。

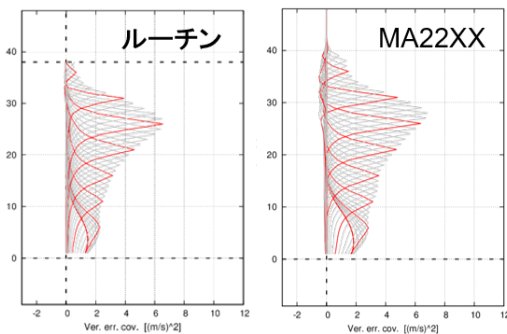


図 4.4.1 x 方向の風の鉛直誤差共分散 (全時刻かつ海陸合わせて平均したもの)。(左) 現ルーチン、(右) MA22XX。縦軸は鉛直層、横軸は鉛直誤差共分散 $[m^2s^{-2}]$ を示す。灰、赤の各線はピークを持つ鉛直層と各鉛直層との間の誤差共分散を示す (ピーク層 5 層ごとに赤線とした)。各線のピークの値は当該鉛直層における誤差分散を示す。

(2) 観測データ利用の改良

メソ解析ではマイクロ波サウンダをはじめとした衛星による輝度温度観測を同化しており (計盛 2011)、輝度温度の観測演算子には適切な気温や水蒸気のプロファイルが不可欠である。モデル上端高度より上では、あらかじめ用意しておいた標準的なプロファイルを外挿して用いるが、この処理によって輝度温度の計算精度の悪化が顕著となるチャンネルは同化に使用しないようにしている。そのため現メソ解析では、全球解析で同化利用しているマイクロ波気温サウンダ AMSU-A⁴ のチャンネルのうち、対流圏上層から成層圏に感度のある ch9~14 は同化に利用していない。今回、モデル上端

⁴ マイクロ波サウンダ AMSU-A の詳細は岡本 (2007) を参照されたい。

高度を引き上げることによって、より上層の気温や水蒸気のプロファイルが利用できるようになる。そこで、荷重関数のほとんどが 37.5 km までに収まる ch9~11 の利用を新たに開始する。また、既に利用していたチャンネルについても、荷重関数が 21.8 km より上層まで続いているものがあるため、利用の改善が期待できる。

はじめに、モデル上端高度を引き上げたとき (ここでは ch9~11 は同化に使用しない) の衛星輝度温度観測の利用への効果を確認する。図 4.4.3 には Aqua/AMSU-A の ch9 の観測値と第一推定値の差 (O-B) を示しており、モデル上端高度引き上げ (右) により、O-B が小さくなっていることが分かる。モデル上端高度の引き上げによって、外挿していたプロファイルの影響が少なくなり、計算輝度温度の値は観測値に近づく。また、既に利用しているチャンネルについても、特に荷重関数が 21.8 km より上層まで続いているチャンネル (ch7,8) を中心に O-B のバイアスや標準偏差が減少することを確認した (図略)。

つぎに、新たに ch9~11 を同化に使用した場合の影響を確認する。モデル上端高度を引き上げた実験を CNTL、CNTL に対して ch9~11 を同化に使用した実験を TEST とする⁵。図 4.4.4 に、AMSU-A および MHS、ラジオゾンデの気温の O-B の標準偏差の変化率を示す。AMSU-A の ch7,8 および 100 hPa のラジオゾンデ気温で O-B の減少、MHS では冬期間に増大が見られ、その他は概ね中立である。予報実験結果では、ラジオゾンデ観測による検証で中下層においては概ね中立であり、上層の気温は中立から改善傾向であった (図略)。後者について AMSU-A の ch9~11 の同化の効果と考えら

⁵ 夏実験: 2019 年 8 月 1 日~31 日、冬実験: 2020 年 1 月 20 日~2 月 25 日

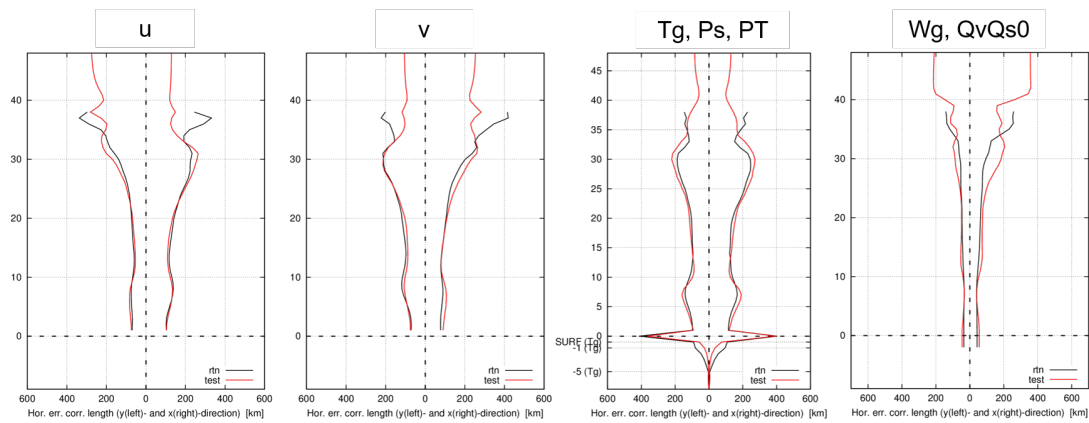


図 4.4.2 現ルーチン（黒線）と MA22XX（赤線）の水平誤差相関距離。左から x 方向の風、 y 方向の風、地中温度・地上気圧・温位、土壌水分・偽相対湿度。縦軸は鉛直層を示す。横軸は水平誤差相関距離 [km] で、左半分は y 方向について、右半分は x 方向について示す。

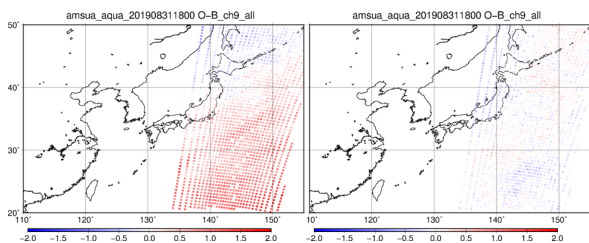


図 4.4.3 2019 年 8 月 31 日 18UTC の Aqua/AMSU-A の ch9 についての輝度温度観測と第一推定値の差 (O-B)。単位は [K]。(左) 現ルーチン、(右) モデル上端高度を引き上げたテスト。

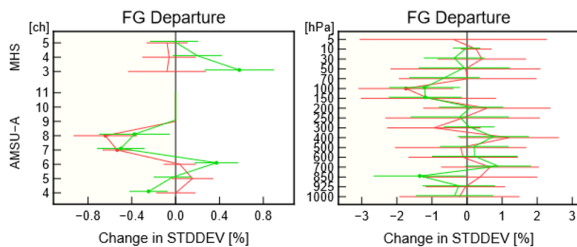


図 4.4.4 観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の変化率 [%]。赤線は夏実験、緑線は冬実験について。(左) AMSU-A, MHS。縦軸はチャンネルの別。(右) ラジオゾンデの気温。縦軸は気圧 [hPa]。

れる。

GNSS 掩蔽観測データについても、モデル上端高度引き上げにより利用されるデータ数が増加する。この利用データ数の増加による予測精度への影響は概ね中立であった (図略)。また、これらのモデル上端高度引き上げに伴うデータ利用の改善に加えて、解析本体における輝度温度観測の観測演算子での地表面射出率の取り扱いを、品質管理における取り扱いと整合させる変更を行った。

4.4.3 メソモデルの改良

先に述べた通り、2022 年に更新予定のメソモデルでは鉛直層数を 76 層から 96 層に増強する。本変更では地上から 76 層の層配置はほぼ現ルーチンと同様とし、モデルトップを 21.8 km から 37.5 km に引き上げる。また予測精度改善を目的として、以下に挙げる物理過程の改良を予定している。これらの改良には 2021 年 3 月の局地モデルで適用された項目 (気象庁 2021b) のうち、メソモデルでも改良の効果が確認できた項目も含んでいる。

- 放射過程の短波水蒸気吸収係数の更新
- 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
- 境界層スキームで用いる長さスケール診断方法を改良
- 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)
- 鉛直 1 次元海洋混合層モデルの導入
- 潜熱フラックスに海塩による蒸発抑制効果を考慮

以下ではメソモデルに新規導入予定の改良項目のうち、主要な開発項目について概略を述べる。

(1) 海洋混合層モデルの導入

2020 年 3 月現業化時のメソモデル (以下 MSM2003 と表記) では、予測時間が進むにつれ台風が過発達する傾向があることがこれまでの調査から分かっている。第 4.4.1 項で述べた通り、3 日先の台風に伴う雨量の予測を提供することが 2022 年のメソモデル更新の主目的の一つであるため、台風の過発達バイアスは優先して改善すべき課題である。過発達バイアスをもたらす要因の一つに、MSM2003 では海面水温 (SST) を初期値

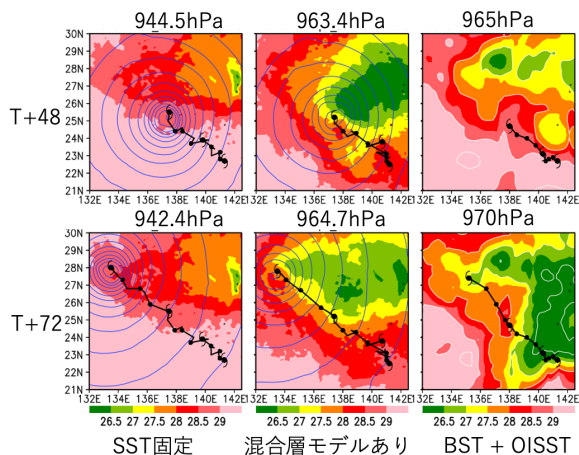


図 4.4.5 海洋混合層モデル導入の効果を 2019 年台風第 10 号を対象として比較した実験の例 (2019 年 8 月 10 日 00UTC を初期値)。図においてカラーは海面水温 (SST)、黒線は海面気圧 (5 hPa 間隔)、マーカーあり太黒線は台風中心の経路であり、図の上に台風中心気圧を示した。左図は SST を固定した実験、中央図は海洋混合層を導入した実験の結果であり、右図は同対象時刻の OISST (カラー) とベストトラック (黒線) である。

から固定しているために、海洋が鉛直混合されて SST が低下する効果をモデルが表現できないことが考えられる。そこで、鉛直 1 次元の海洋混合層モデルを導入することにより、地上風に応じて SST が低下する効果を取り入れることを試みた。

用いた海洋混合層モデルは Price-Weller-Pinkel (PWP) モデル (Price et al. 1986, 1994) と呼ばれているもので、海洋の鉛直 1 次元混合を考慮したモデルとなっている。このモデルでは海洋の水温、塩分濃度、水平流速を予報変数としており、それぞれが長波・短波放射、淡水フラックス (海面での降水・蒸発)、風応力によって強制される。また、海中の水平流速は慣性振動のみが考慮され、水平移流の効果は考慮されない。海洋の鉛直混合は、密度不安定やシア不安定によって各層の混合が起こることに加え、混合層全体とその下層との混合を別途考慮することによって表現する。

PWP モデルをメソモデルに導入するにあたり、SST の気候値からの偏差を海中の気候値に加えることで海水温の初期値を与えた。また、予測時間が進むにつれ非現実的な海水温にドリフトすることを防ぐために、初期値にナッジングする処理を加えた。ナッジングの時定数は、海岸 (陸格子) からの距離と水深の関数として与え、陸に近いところおよび浅い海で時定数が小さくなるようにした。

海洋混合層モデルを導入した効果を見るために、2019 年台風第 10 号を対象とした比較実験の例を図 4.4.5 に示す。海洋混合層モデルを導入しない場合 (左図) は SST は初期値に固定される一方、NOAA によって作

成された SST 解析値である OISST⁶ では台風の東側を中心に SST が低下しており、予測時間の経過とともに SST が解析値と乖離することが分かる。また、FT=72 での台風中心気圧もベストトラックでは 970 hPa であるのに対し、モデルの予測は 942.2 hPa となっており、明らかに過発達となっている。海洋混合層モデルを導入した場合 (中央図) には、OISST とは定量的な違いがあるものの台風の経路に沿って SST が低下している。台風中心気圧もベストトラックに近い値となっており、本改良により MSM2003 の台風の過発達傾向を改善しうると言える。

(2) 蒸発散プロセスの改良

メソモデル・局地モデルに共通する課題として、地上気温の日変化が不明瞭 (日中の低温バイアス、夜間的高温バイアス) であることや地上比湿が予測期間を通して負バイアスとなることが挙げられる。現ルーチン仕様 (MSM2003) では、日中低温バイアスを軽減する目的で、土壤水分を少なくして地表面からの顕熱フラックスを大きくさせる対処がとられている。しかし、土壤水分を減らす対処は同時に潜熱フラックスを減らす結果となり、地上比湿の負バイアスの要因にもなっている。さらに、用いている土壤水分はほとんどの地点でしおれ点 (植物が生育可能な最小の土壤水分) を下回り、明らかに現実的ではないことが分かっている。したがって、MSM2003 に見られる地上気温・比湿のバイアスは単に土壤水分を調節するだけでは解決できず、蒸発散プロセスそのものを見直すことが必要と考えられる。このような問題意識から、まず土壤水分気候値をより現実的なものに変更したうえで、蒸発散プロセスの定式の改良を行うことで、地上気温・比湿のバイアスを低減させることにした。

これまで、土壤水分気候値は暖候期・寒候期それぞれについて、土地利用種別ごとに主観的に定めた蒸発効率から診断していた。本改良ではメソ積雪解析で用いているオフライン陸面モデル (Kusabiraki 2015) を長期積分した結果を月別に平均することでモデル気候値を作成する方法に変更した。今回は、1998 年 1 月から 2010 年 12 月 (最初の 3 年はスピニングアップ期間) を対象に大気解析値を強制力として土壌 7 層、深さ約 3 m までの温度・水分を予測し、月別の気候値データセットを作成した。そして、このデータセットに基づき、メソモデルの陸面過程で用いる平均体積含水率を算出しモデルの入力とした。得られた土壤水分はほとんどの地点で従来の土壤水分よりも多くなり、植生のある地域でしおれ点を下回ることがなくなるなど、より現実的な値となることが確認できた。

蒸発散フラックスの定式化については、陸地での格子平均の蒸発散を遮断降水 (樹木等に捕捉され地面に到達しない降水) の蒸発・結露、植生域の蒸発散、裸地面

⁶ Optimum Interpolation Sea Surface Temperature

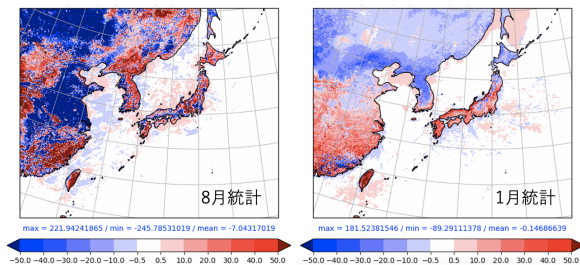


図 4.4.6 2019年8月(左)、2020年1月(右)を対象とした24時間最大潜熱フラックス (W/m^2) の蒸発散プロセス改良後と改良前の差。00, 12UTC 初期値の1か月統計を示す。

の蒸発の3つのソースからの寄与としてそれぞれ考慮できるようにし、各プロセスについても見直しを図った。3つのソースからの寄与は都市・植生・裸地の格子内被覆率と保水率に応じて決定される。遮断降水や結露はこれまで考慮されてこなかった過程であり、これを新たに考慮することは降雨時やその直後の潜熱フラックスの再現性の向上につながると期待できる。植生域の蒸発散プロセスについては、気孔抵抗(気孔からの蒸散において生じる拡散抵抗)が日射量のみ依存して決定されるこれまでの定式から、Noilhan and Planton (1989)に基づき、日射量に加え気温、水蒸気、深層土壌水分、LAI⁷にも依存する定式に修正した。また、植生下地面からの蒸発についても植生の疎密に応じて考慮するよう修正した。裸地面の蒸発効率は地表付近の土壌体積含水率によって決定されるが、体積含水率に線形に依存する従来の定式から Lee and Pielke (1992)による定式に改めた。この修正により、土壌が乾燥すると蒸発効率が急激に低下し、裸地面からの蒸発が抑制されるようになる。

今回の蒸発散プロセス改良によるインパクトを見るために、図 4.4.6 に 2019年8月、2020年1月を対象とした24時間最大潜熱フラックスの1か月統計値の差を示す。夏は植生が多い地域で潜熱が増加する一方、乾燥域や都市域では減少する。また、冬については寒冷地を除いて潜熱は増加傾向にあることが確認できる。地上気象要素への影響については、他の改良項目も含めた検証結果として第 4.4.4 項で示す。

(3) 境界層スキームの改良

境界層スキームは Nakanishi and Niino (2009) によって提案された MYNN レベル 3 モデル(以下 MYNN3)を採用している。MYNN3 の定式化では、渦粘性に用いる混合長や乱流運動エネルギー(TKE)の散逸率を特徴づける長さスケールなどは一つの代表的長さ(以下では元論文に倣って master length と表記する)によって表現される。master length は乱流渦の大きさを特徴づける長さ L_T 、安定成層によって鉛直混合が抑

⁷ Leaf Area Index (葉面積指数)

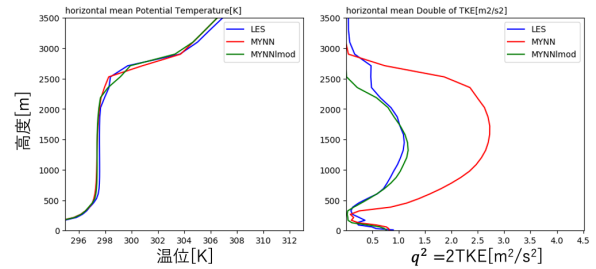


図 4.4.7 GABLS3 テストケース (FT=18) での水平平均した温位(左)と乱流速の2乗(乱流運動エネルギーの2倍)(右)の鉛直プロファイル。青線、赤線、緑線はそれぞれ高解像度 LES、master length 修正前の MYNN3、修正後の MYNN3 の結果をそれぞれ示す。

制される効果を表す長さ L_B 、接地境界層での長さ L_S の3つによって決定される。今回の改良では、master length を構成するそれぞれの長さについて見直した。

MYNN3 は境界層内の乱流混合をパラメタライズすることを目的としたモデルであり、自由大気で乱流が生成され混合が起こることを想定しない設計となっている。一方で現行のメソモデルや局地モデルでは、MYNN3 を境界層内に限定せず自由大気でも適用しており、このことに起因して対流圏上層で TKE が生成される場合に L_T が過大に診断され、乱流フラックスが過剰になる問題が起こっていた。そこで、 L_T を境界層と自由大気で独立に求めて鉛直分布を持たせることで、診断が過大にならないように改良した。この改良で新たに必要となる境界層高度⁸は、Olson et al. (2019)による方法に基づいて診断した。また、地表面熱フラックスが正の場合に L_B を大きくする項は境界層内のみで物理的意味を持つが、これまで全層にわたって適用されていた。境界層高度を診断することによってこの項を境界層内のみ適用することが可能になったことから、あわせて L_B の修正も行った。 L_S については Nakanishi and Niino (2009) の定式化では不安定時に過大見積もりとなっている可能性があるため、Olson et al. (2019)に基づいて修正した。

境界層スキーム改良の効果を見るために、境界層の日変化を対象とした理想実験の一つである GABLS3 テストケース (Bosveld et al. 2014) の比較実験結果を図 4.4.7 に示す。この実験では鉛直1次元モデルの MYNN3 に加え、Large-Eddy Simulation (LES) による水平解像度 50 m の高解像度実験もあわせて実施した。図 4.4.7 に示した時刻では高度 500 m 以下の領域に安定境界層を形成している一方で、高度 1500 m 付近に鉛直シアがあり乱流が生成される状況となっている。修正前の MYNN3 では上層に TKE があることで L_T が過大に評価され、境界層より上層で LES から見

⁸ MYNN3 は境界層高度を陽に定義しないスキームであるため、MYNN3 の定式化とは独立に境界層高度を診断する必要が生じる。

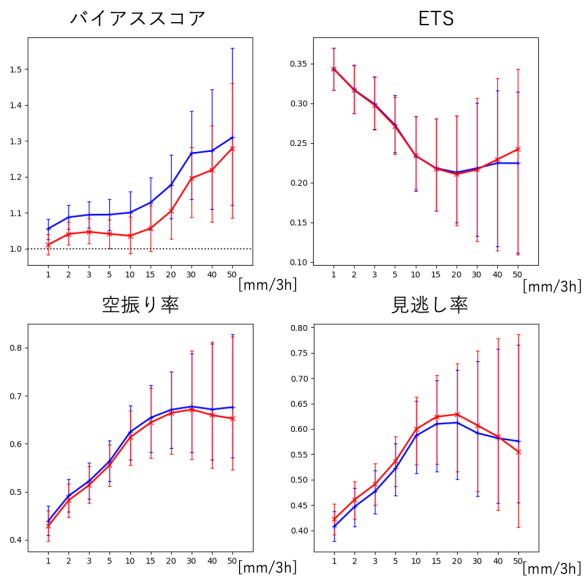


図 4.4.8 夏期間における3時間積算降水量(検証格子 20 km)の閾値別検証結果。左上: バイアスコア、右上: エクイタブルスレツスコア(ETS)、左下: 空振り率、右下: 見逃し率をそれぞれ表す。青線がCNTL、赤線がTESTの結果を示す。

積もられたTKEよりもはるかに大きくなっている。一方で修正後のMYNN3ではTKEの分布はLESと整合し、より適切に乱流輸送を評価できることが分かる。

4.4.4 本改良による予測特性の変化

本項では、改良したメソ数値予報システムの予測特性の変化について述べる。以下では、現ルーチン(MSM2003)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、夏期間・冬期間それぞれ2019年8月1日-10月20日、2019年12月23日-2020年2月29日とした。

図4.4.8は夏期間における3時間積算降水量(検証格子20km)の閾値別検証結果である。CNTLのバイアスコアは全ての閾値で1を上回っており、降水予測の頻度が過剰傾向にあることが分かる。それに対し、TESTのバイアスコアは全ての閾値で1を上回っているもののCNTLよりも減少しており、降水予測の過剰バイアスが軽減した。TESTの降水頻度が減少した結果、空振りは減ったものの見逃しが増えたことで、エクイタブルスレツスコア(ETS)で見ると予測精度としては中立であった。冬期間についても同様の傾向があった(図略)。過剰な降水が減った事例として、図4.4.9に2019年9月20日21UTC(2019年台風第17号事例)の前3時間積算降水量・海面更正気圧の予測結果を示す。CNTLでは解析雨量と比較して山陰地方(図中赤丸で囲まれた領域)で雨量がやや過剰なのに対し、TESTでは雨量が抑えられていることが確認でき

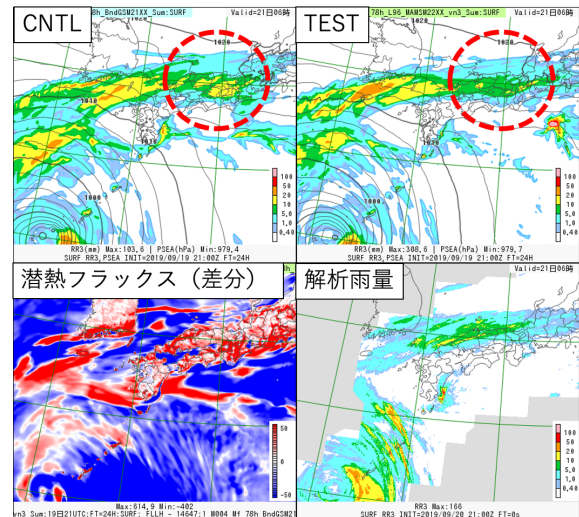


図 4.4.9 対象時刻2019年9月20日21UTC(FT=24)の前3時間積算降水量・海面更正気圧の予測結果(上図)および解析雨量(mm/3h)(右下)。左下図は同時刻における潜熱フラックス(W/m^2)のTESTのCNTLからの差。

る。また、海上でTESTの方がCNTLよりも潜熱フラックスが小さくなっていることが分かる。海洋混合層モデルの導入によるSST低下や海塩による蒸発抑制効果が海面からの潜熱フラックスを減少させたことに加え、境界層モデルの更新や雲量診断で用いる臨界相対湿度の下限値変更が降水頻度の減少に寄与したと推測される。

図4.4.10は台風を対象とした、中心気圧・最大平均風速・中心位置の平均誤差の予測時間別検証結果である。第4.4.3項でも述べた通り、台風中心気圧は予測時間とともに過発達になる傾向があることがこの図からも確認できる。TESTでは過発達の傾向はあるもののCNTLよりも抑えられており、特に予報後半で中心気圧の負バイアスが軽減した。最大風速についてもCNTLに見られる正バイアスがTESTでは軽減し、強度予測の観点からは改善したといえる。海洋混合層モデルの導入、海塩による蒸発抑制効果により海面からの潜熱フラックスが減ったことが台風強度予測の改善に寄与したと考えられる。一方で、台風進路誤差についてはCNTLとTESTとで大きな違いは見られなかった。

図4.4.11は夏期間における水蒸気混合比と気温の対ラジオゾンデ平均誤差の鉛直プロファイルである。CNTLでは対流圏下層で水蒸気混合比の正バイアス、気温の負バイアスがあることがこの図から分かる。TESTではいずれのバイアスも軽減されており、特に925 hPa面で改善幅が大きい。また、夏期間ほど顕著ではないが冬期間でも同様の傾向が見られる(図略)。蒸発散プロセスの改良により陸上の顕熱・潜熱フラックスが改善したこと、境界層スキームの改良により境界層内で過剰な鉛直輸送が抑制されるようになったことがバイアス軽減の主要因と思われる。また、短波水蒸気吸収

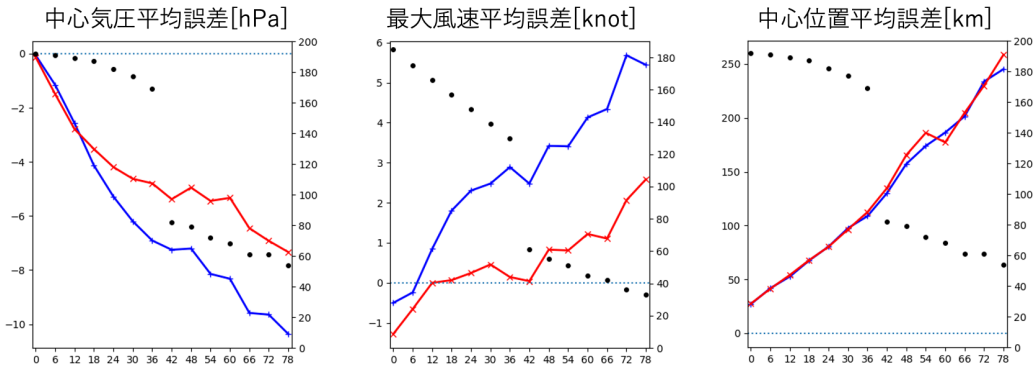


図 4.4.10 台風の中心気圧平均誤差（左）、最大風速平均誤差（中央）、中心位置平均誤差（右）の予測時間別検証結果。黒点は検証事例数（右側の軸に対応）を示す。横軸は予測時間 (h) であり、線種は図 4.4.8 と同様。

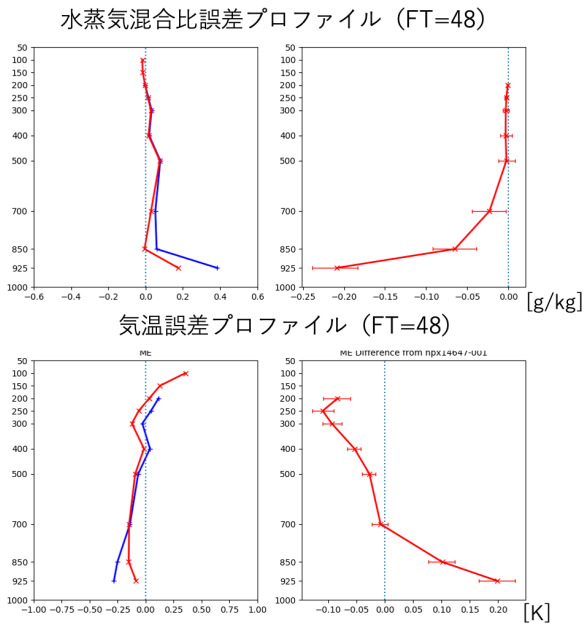


図 4.4.11 夏期間の水蒸気混合比（上段）、気温（下段）の FT=48 での対ラジオゾンデ平均誤差（左）および TEST の CNTL からの差（右）。縦軸は気圧 (hPa) を表す。線種は図 4.4.8 と同様。

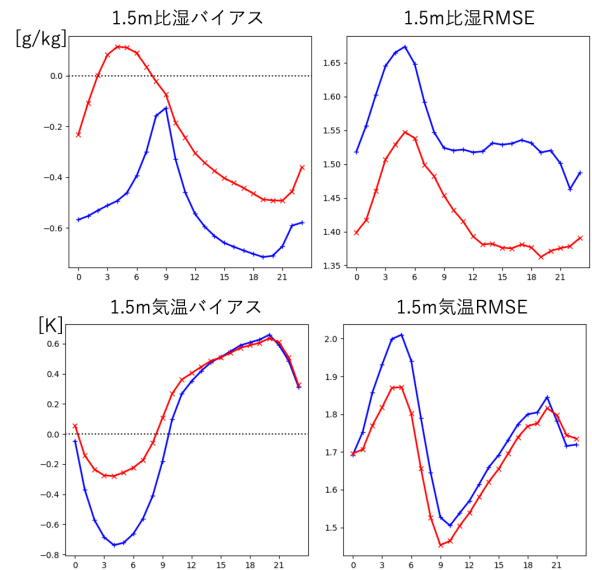


図 4.4.12 夏期間における対象時刻別の 1.5 m 比湿（上段）、1.5 m 気温（下段）の平均誤差（左）RMSE（右）。横軸は対象時刻 (UTC) であり、線種は図 4.4.8 と同様。

係数の更新は下層の非断熱加熱を増加させるインパクトがあることが分かっており、下層気温の上昇はこのことも影響したと考えられる。

夏期間における対象時刻別の 1.5 m 比湿、1.5 m 気温の統計検証結果を図 4.4.12 に示す。第 4.4.3 項でも述べた通り、地上気温には日中の低温バイアス、夜間の高温バイアスがあることや地上比湿に負バイアスがあることがこの図からも明らかである。TEST では日中の低温バイアスが縮小するとともに地上乾燥バイアスが大幅に縮小した。二乗平均平方根誤差 (RMSE) で見ても、気温は日中を中心に改善、比湿は全ての対象時刻で改善しており、土壌水分量気候値の更新や蒸発散プロセスの改良において当初の開発で意図した通りのインパクトが得られた。日中の地上比湿について観測地点別に見ても (図 4.4.13)、ほとんどの地点で CNTL

にあった比湿の負バイアスが TEST では比湿が増えることにより RMSE が改善することが確認できる。

4.4.5 まとめ

2022 年にメソモデルの鉛直層を 76 層から 96 層に増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げる計画である。これに合わせ、台風による豪雨を想定し、3 日先までの総雨量予測情報を提供するために 00, 12UTC 初期値の予測期間を 51 時間から 78 時間に延長する。本更新に向けて、現システムで見られるバイアスを軽減させるとともに、予測精度を向上させるため各物理過程の見直しや改良に取り組んだ。この改良により、台風の過発達傾向や地上気象要素のバイアスが軽減し、頻度過剰だった降水や下層の気温や水蒸気量のプロファイルが改善されることを確認した。一方で、降水予測精度の観点からは中立であり、精度改善のためには継続的な開発が求められる。線状降水

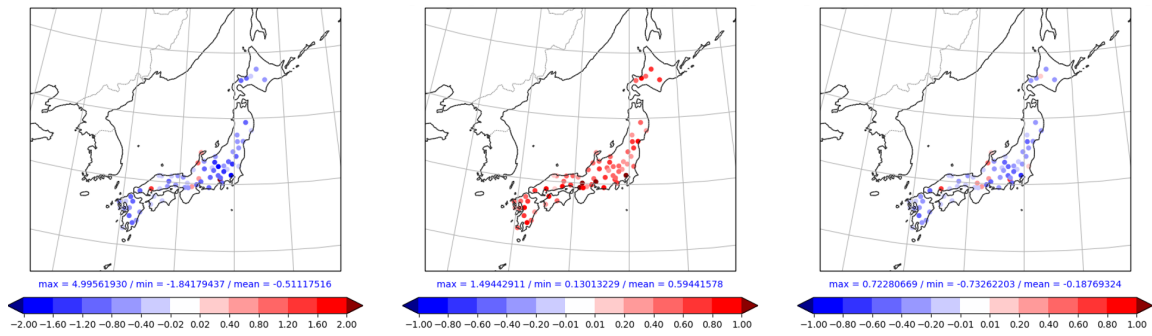


図 4.4.13 夏期間、対象時刻 12 時 (JST) における 1.5 m 比湿の観測地点別検証結果。左図は CNTL の平均誤差、中央は TEST の CNTL からの差、右図は RMSE の TEST の CNTL からの差をそれぞれ示す。カラーバーの単位は g/kg。

帯など顕著現象の予測を改善することや、そのような顕著現象をもたらす環境場の再現性を向上させることも引き続き重要な課題である。

参考文献

- Bosveld, F. C., P. Baas, van E. Meijgaard, de E. I. F. Bruijn, G-J. Steeneveld, and A. A. M. Holtslag, 2014: The Third GABLS Intercomparison Case for Evaluation Studies of Boundary-Layer Models. Part A: Case Selection and Set-Up. *Bound.-Layer Meteor.*, **152**, 133–156.
- Caruana, R., R. Searle, T. Heller, and S. Shupack, 1986: Fast algorithm for the resolution of spectra. *Anal. Chem.*, **58**, 1162–1167.
- 藤田匡, 福田純也, 塚本暢, 2016: メソ数値予報システムの背景誤差の改良. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63–67.
- 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.
- 計盛正博, 2011: メソ解析における衛星観測輝度温度データの同化. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 3–8.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194 pp.
- 気象庁予報部, 2010: 非静力学メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 106 pp.
- 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 pp.
- 気象庁予報部, 2019: メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 165 pp.
- 気象庁, 2021a: メソ解析とメソ予報の改良. 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: 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 2 年), 気象庁

数値予報開発センター, 97–102.

- Kusabiraki, H., 2015: Improvement of snow analysis using an offline land-surface model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **45**, 01.13–01.14.
- Lee, T. J. and R. A. Pielke, 1992: Estimating the Soil Surface Specific Humidity. *J. Appl. Meteor. Climat.*, **31**, 480–484.
- 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.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895–912.
- Noilhan, J. and S. Planton, 1989: A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536–549.
- 岡本幸三, 2007: ATOVS とは. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 57–58.
- Olson, J. B., J. S. Kenyon, W. M. Angevine, J. M. Brown, M. Pagowski, and K. Sušelj, 2019: A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRFARW. *NOAA Technical Memorandum OAR GSD*, **61**, 37 pp.
- Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.
- 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.

4.5 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改良

4.5.1 はじめに

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

MEPS の仕様は国井・小野 (2020) に解説がある。実行頻度は1日4回 (予報初期時刻: 00,06,12,18UTC)、予報時間は全予報初期時刻において39時間であり、摂動を与えないコントロールランを含め全21メンバーでアンサンブルを構成する。各メンバーの予報の計算領域や水平格子間隔 (5 km)、鉛直層配置、物理過程を含む各種設定をMSMに揃えている。2022年に計画されているメソ数値予報システムの更新 (第4.4節) では、MSMの鉛直層を76層から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、あわせて物理過程の改良が行われる。このMSMの更新計画に追随し、MEPSの設定も更新する計画である¹。

本節では、2022年のMSM更新に追随して行う予定のMEPSの鉛直層増強と物理過程改良について、これまでの検証実験で得られた予測特性の変化について報告する。

4.5.2 変更の概要

はじめに述べたとおり、本変更の内容は、2022年のMSM更新 (以下MSM22XXと表記) で計画されている鉛直層増強と物理過程改良をMEPSにも以下のとおり導入することである。

- 鉛直層増強: 鉛直層を76層から96層に増強する。地上から76層の層配置はほぼ現ルーチンと同様とし、モデル上端高度を21.8 kmから37.5 kmに引き上げる。
- 物理過程改良: (第4.4.3項) で説明するMSM22XXの物理過程改良を全てMEPSの予報モデルに取り込む。

それ以外のMEPSの仕様は、気象庁 (2021) による初期・側面境界摂動の作成手法の改良以降の変更はない。

4.5.3 本変更による予測特性の変化

変更したMEPSの予測特性の変化について述べる。現ルーチン設定の実験をコントロール (CNTL) とし、変更した設定の実験をテスト (TEST) とする。境界値はいずれも2021年3月現業化時のGSMを用いる。実験期間は夏実験:2019年8月1日-8月31日、冬実験:2020

¹ 2022年のMSM更新では予報時間延長 (00,12UTC初期値について51時間から78時間へ) も計画されているが、計算機資源およびその活用による数値予報システム全体の改良計画 (石田ほか 2017) に基づきMEPSの予報時間は変更しない。

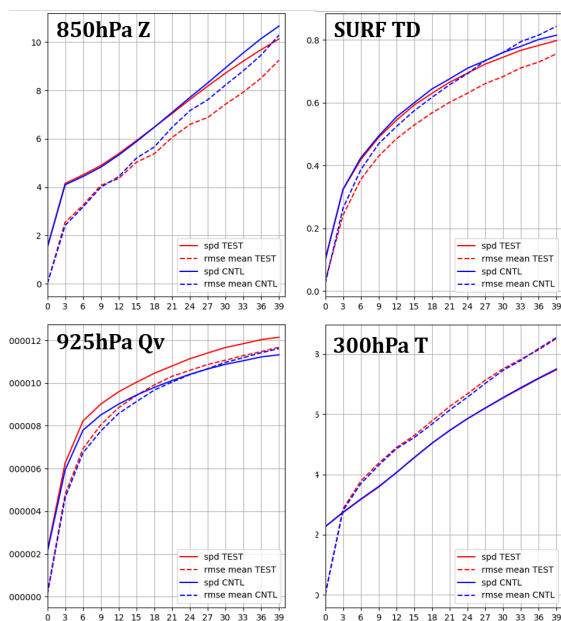


図 4.5.1 夏実験期間におけるアンサンブルスプレッド (実線) およびアンサンブル平均のRMSE (点線) の予報時間別の検証結果。青線がCNTL、赤線がTEST。(左上) 850 hPa の高度場 [m]、(右上) 地上の露点温度 [K]、(左下) 925 hPa の比湿 [g/kg]、(右下) 300 hPa の気温 [K]。検証領域は125°-145°E, 25°-45°Nの領域。

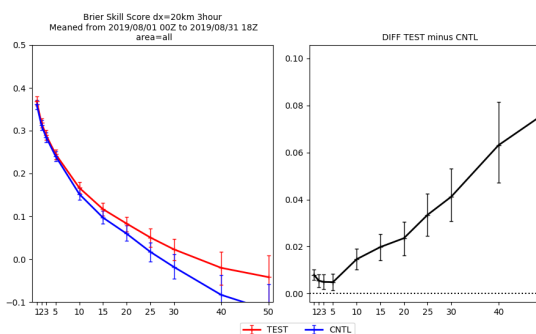


図 4.5.2 夏実験期間の3時間降水量の (左) ブライアスキルスコア、(右) TESTとCNTLの差。青線がCNTL、赤線がTEST。横軸は閾値 [mm/3h]。

年1月20日-2月25日とした。

図4.5.1に夏実験期間についてアンサンブルスプレッドとメソ解析を参照値としたアンサンブル平均の二乗平均平方根誤差 (RMSE) の領域平均の時系列を示す。上段に示すように対流圏下層の高度場および地上露点温度のアンサンブル平均のRMSEが減少した。ほかの地上気象要素についても同様の傾向であった。MSM22XXの物理過程改良において対流圏の下層環境場および地上気象要素の改善が見られており、このことと整合する結果である。地上気象要素については冬実験期間も同様の傾向であった (図略)。下段左に示すように925 hPaの水蒸気場ではスプレッドが増加した。境界層スキームの改良により各メンバーの予報においてMSM22XX

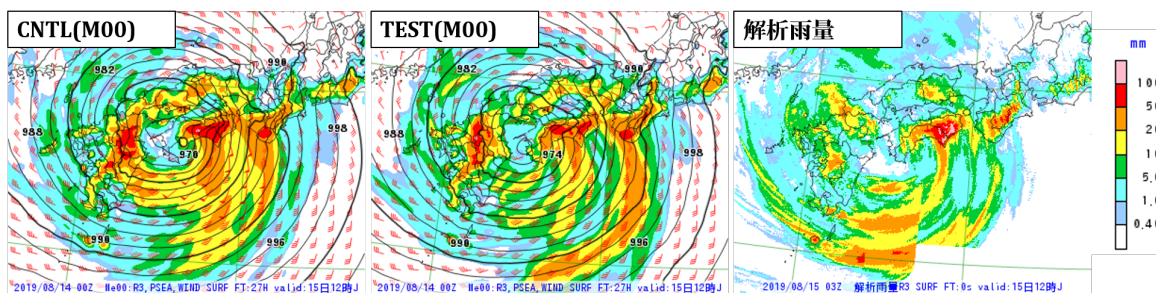


図 4.5.3 2019 年 8 月 15 日 21UTC の 3 時間降水量・海面更正気圧について CNTL (左) と TEST (中) のコントロールランの予測結果 (2019 年 8 月 14 日 00UTC 初期値の FT=27) および解析雨量 (右)。

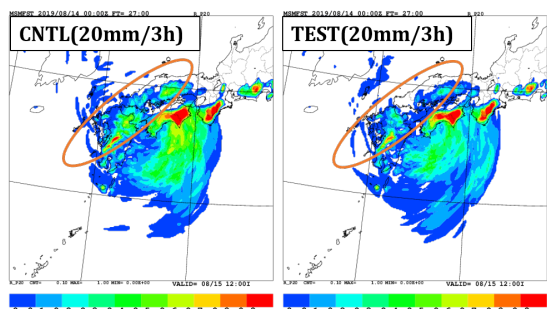


図 4.5.4 2019 年 8 月 15 日 21UTC の 3 時間降水量について 20 mm/3h の超過確率。(左) CNTL、(右) TEST。2019 年 8 月 14 日 00UTC 初期値の FT=27。

と同様に雲域で個々の細かいセルが表現されるようになっており、対応した細かい構造が水蒸気場に見られるようになったことを反映した結果と考えられる。下段右には 300 hPa の気温について示す。300 hPa では CNTL と TEST でほとんど変化はなく、モデル上端高度が引き上げられた影響は見られなかった。冬実験期間でも同様であった。MSM22XX ではこの高度の予測特性に大きな変化はないこと、初期・境界摂動に用いる特異ベクトル (SV) 法の鉛直ターゲット域は変えていない (メソ SV は、水蒸気量は高度約 2900 m、水蒸気量以外は高度約 5300 m まで、全球 SV は高度約 9000 m まで) ことから、上層における各メンバーのばらつき方にほとんど変化がなかったと考えられる。

降水確率予測の変化を確認するため夏実験期間の 3 時間降水量のブライアスキルスコア (BSS) を図 4.5.2 に示す。いずれの閾値においても CNTL に対して TEST が改善する。降水確率予測の改善につながったと考えられる代表的な事例として、2019 年 8 月 15 日の台風に伴う降水事例を挙げる。図 4.5.3 に 2019 年 8 月 15 日 21UTC の 3 時間降水量のコントロールランの予測結果を示す。CNTL では解析雨量と比較して過大であった中国地方、九州地方の降水域の予測が、TEST では縮小していることが分かる。MSM22XX では降水過剰バイアスが減少し空振りが減ったことが述べられており、この事例でもその傾向が見られる。同時刻を対象とした 3 時間降水量の 20 mm/3h の超過確率を図 4.5.4

に示す。中国地方、九州地方において、CNTL に比べ TEST の 30 % 以上を示す領域が縮小し、解析雨量との対応が良くなっていた。MSM の物理過程改良の効果が MEPS の各メンバーの予測にも反映された結果と考えられる。このような事例の結果を反映して夏実験期間の BSS が改善していた。冬実験期間の BSS の変化は中立であった (図略)。

4.5.4 まとめ

2022 年に MEPS の鉛直層を 76 層から 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、物理過程を改良する計画である。これらは MSM の更新計画に追随し、MEPS の予報モデルの設定を MSM に揃える変更である。この変更により降水確率予測の改善や地上気象要素のアンサンブル平均の改善を確認した。

今後もメソスケールのアンサンブル予報の高度化に取り組んでいく。MEPS の初期摂動への asuca に基づく SV 法の導入、数値予報モデルの不確実性を考慮する手法の導入が開発課題として挙げられる。豪雨防災に資する領域アンサンブル予報の観点では、線状降水帯に代表されるような集中豪雨の予測が持つ不確実性を適切に捕捉可能なアンサンブル予報システムの開発が課題となっている (第 2.6 節)。MEPS よりも時空間スケールの小さい現象が対象となり未解明の部分は多いが、初期値、境界値、数値予報モデルの不確実性を適切に表現できるシステムを検討していく必要がある。

参考文献

- 石田純一, 高田伸一, 栗原茂久, 2017: 第 10 世代数値解析予報システム. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 113-123.
- 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.
- 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.

4.6 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入

4.6.1 はじめに

局地数値予報システム¹は、時空間スケールの細かな現象の予測を目的に水平格子間隔 2 km の予報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。2021 年 3 月の局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良（第 3.4 節）に続き、2022 年には局地解析の背景誤差共分散のハイブリッド化と気候学的背景誤差の更新、メソ数値予報システムの更新（第 4.4 節）に伴う予報モデルの物理過程の改良を計画している。本節では、横田ほか (2021) に基づき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について説明し、これまでの検証実験で得られた結果について報告する。

4.6.2 ハイブリッド同化の概要

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）で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 を行い、その解析値は局地モデル LFM の初期値として用いられる。しかし、ここで用いられる 3DVar は、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 が使われており、これが水平方向に一樣であるため、予測の不確実性の空間分布を解析インクリメントに適切に反映できないという問題がある。この問題を軽減するため、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 (Lorenz 2003) を局地解析に導入する。

今回導入する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。

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

$$\delta\mathbf{x} \equiv \mathbf{B}^{1/2} \mathbf{v} \equiv \begin{pmatrix} \beta_c \mathbf{B}_c^{1/2} & \beta_e \mathbf{B}_e^{1/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_e \end{pmatrix} \quad (4.6.1)$$

ここで $\mathbf{d} = \mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b)$ 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）、 \mathbf{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

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。

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、 $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (1, 0)$ であれば $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$ 、 $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0, 1)$ であれば $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$ で解析が行われることになる。

この \mathbf{B}_e の作成に用いられる MEPS の実行は 6 時間毎であるが、局地解析は 1 時間毎に実行するため、利用する MEPS 摂動は解析時刻によって予報時間が異なる。MEPS 摂動の大きさは予報時間が進むほど大きくなるため、この摂動をそのまま \mathbf{B}_e 作成に用いるのは適切でない。そこで、MEPS 摂動に対して解析時刻ごとに異なる係数（高度 5.5 km の温位の気候学的な誤差分散を MEPS 摂動の分散の水平平均で割ったもの）を \mathbf{B}_e に乗じてから解析に用いるという誤差共分散膨張を導入した。これにより、 \mathbf{B}_e が \mathbf{B}_c と同等の大きさになり、予報時間による \mathbf{B}_e の大きさの変化が軽減される。

また、 \mathbf{B}_e は限られたメンバー数の MEPS 摂動から作成されるため、特に空間的に離れた点同士の誤差相関は相対的にサンプリング誤差が大きく、これをそのまま用いて解析を行うことは適切でない。そこで、 \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を乗じ（空間局所化）、離れた点同士の誤差相関を小さくした上で用いた。

限られたメンバー数の MEPS 摂動から \mathbf{B}_e を作成するという課題に対しては、異なる初期時刻の MEPS を用いることで摂動作成に利用するメンバーを増やす、LAF (Lagged Averaged Forecast) 法によるアプローチも有効と考えられる。以下、第 4.6.3 項と第 4.6.4 項では、LAF 法の有効性を含めて、Hybrid-3DVar の解析インクリメントや予測精度へのインパクトを確認する。

4.6.3 Hybrid-3DVar の導入による解析インクリメントの変化

Hybrid-3DVar の導入による解析インクリメントの変化を把握するため、 x 方向の風（イノベーション: 5 m/s、観測誤差標準偏差: 1 m/s）を 2019 年 8 月 5 日 21UTC の台風の南（図 4.6.1(a) の * の位置）の高度 900 hPa に同化するという 1 点観測同化実験を行った。 \mathbf{B}_e は 18UTC を初期値とする 20 メンバーの MEPS 摂動から作成したものと、06, 12, 18UTC を初期値とする計 60 メンバーの MEPS 摂動から LAF 法により作成したものの 2 パターン用意し、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 100 km、鉛直 0.5 km とした。なお、60 メンバーの実験では、予報時間が異なるため摂動の大きさが異なるアンサンブル予報を混ぜることによる悪影響を抑えるため、予報時間の長さに応じて異なる誤差共分散膨張係数を乗じて \mathbf{B}_e を作成した。

実験の結果、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$ の場合は x 方向の風の解析インクリメントが楕円形の分布になる（図 4.6.1(b)）のに対し

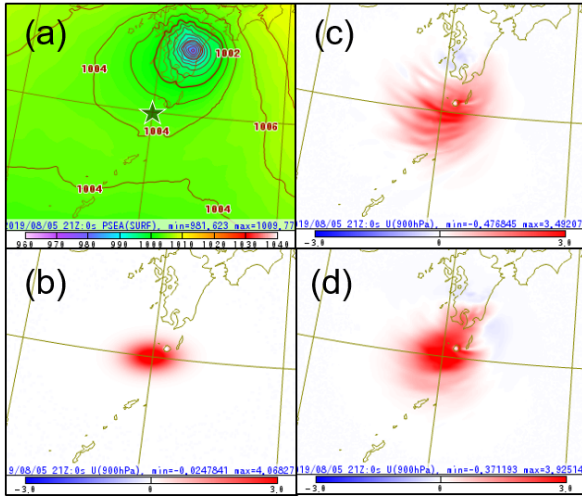


図 4.6.1 1点観測同化実験における (a) 地上気圧の第一推定値 [hPa] と (b-d) 900 hPa の x 方向の風の解析インクリメント [m s^{-1}]. (b-d) の \mathbf{B} の設定はそれぞれ (b): $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$, (c): $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$ (20 メンバー), (d): $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$ (60 メンバー)。

し、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$ の場合は台風の流りに沿った分布になり、メンバー数が増えるとより水平方向に滑らかな分布になった (図 4.6.1(c),(d))。なお、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$ の場合は風以外の要素もアンサンブル相関に基づく解析インクリメント (台風中心付近での気圧の低下など) が見られた (図略)。また、ハイブリッドの重みを $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0.5, 0.5)$ とした場合の解析インクリメントは、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$ の場合と $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$ の場合を平均したような分布になった (図略)。

4.6.4 性能評価

Hybrid-3DVar の導入による予報への影響を確認するため、夏は 2020 年 7 月 2 日-7 月 15 日、冬は 2020 年 1 月 11 日-1 月 21 日の期間 (3 時間毎) について実験を行った。

実験では、先に述べたハイブリッド化に加え、現ルーチン相当のシステムから次の二つの変更を加える。一つは、局地解析とメソ解析の解析モジュールの統一化²を図るもので、予測精度をほぼ変えない仕様変更が含まれる。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ー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³。もう一つは気候学的背景誤差の修正である。これは、 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大きく異なる⁴ことから、その修正

を試みたものである。今回は大気中の制御変数 (風、温位、地上気圧、偽相対湿度) の誤差分散をメソ解析の気候学的背景誤差の誤差分散 (第 4.4.2 項) に置き換えることとした⁵。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)。

前項では、60 メンバーに増やした場合に解析インクリメントがより滑らかになるを見たが、ここでも LAF 法によりメンバー数を増加した場合の予報への影響を見るためにいくつかの設定を比較する。

実験の名称は以下のとおりとする。

- CNTL: 2021 年 5 月時点のルーチン相当
- M000: 非ハイブリッド ($(\beta_c^2, \beta_e^2) = (1, 0)$)
- M020: 20 メンバー (LAF を行わない)
- M060: 60 メンバー (3 初期値の LAF)
- M100: 100 メンバー (5 初期値の LAF)

2021 年 5 月時点の現業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) とする。CNTL に対して、解析モジュールの統一化および気候学的背景誤差の修正を加えた実験を M000 とする (非ハイブリッドである)。M000 に対して前項のハイブリッド同化を導入した実験を M020 とする (ただし、LAF 法を行わない)。M020 に対して LAF 法によりメンバー数を 60, 100 に増加した実験をそれぞれ M060, M100 とする。M020, M060, M100 が Hybrid-3DVar の実験であり、予備調査の結果を踏まえていずれも $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0.5, 0.5)$ とし、局所化スケールは水平 100 km、鉛直 0.5 km とした。

図 4.6.2 は夏期間における地上比湿と地上風速の予報時間別の統計検証結果である。比湿は、M020 では乾燥バイアスが拡大し二乗平均平方根誤差 (RMSE) が悪化するが、メンバー数を増やすと乾燥バイアスが CNTL と同程度になるとともに RMSE が改善した。このことは、観測数の多い地表面付近では特にサンプリング誤差による悪影響が大きく、これがメンバー数の増加によって軽減することを示していると考えられる。風速はハイブリッド同化導入により平均誤差 (ME), RMSE が改善傾向であった。気温もハイブリッド同化導入により RMSE が改善し、メンバー数が大きいほど改善する傾向であった (図略)。冬期間についても同様の傾向を確認している。

図 4.6.3 には夏期間における 1 時間降水量の閾値別検証結果を示す。強雨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。1-3 mm/h 程度の弱雨については見逃しが増加するが空振りは減少し、ETS は改善した。冬期間についても降水検証において全般的に改善が見られた (図略)。

² 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、今回更新する。

³ 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 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である。

⁵ この変更で局地解析の性質 (高解像度の解析イ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。

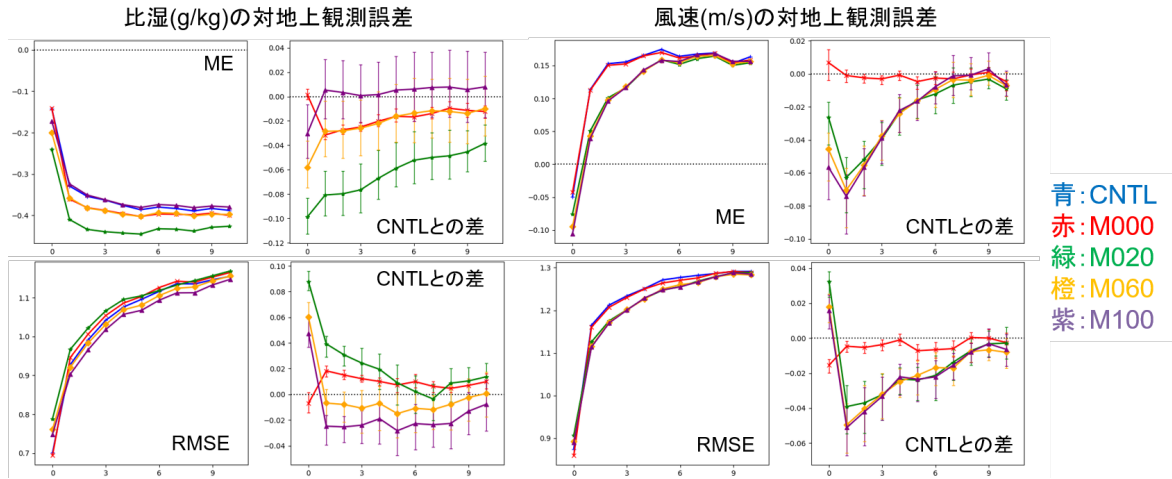


図 4.6.2 夏期間における（左）地上比湿、（右）風速の対地上観測検証結果。それぞれ上段に ME とその CNTL との差、下段に RMSE とその CNTL との差を示す。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は M000、緑線は M020、橙線は M060、紫線は M100 の結果を示す。

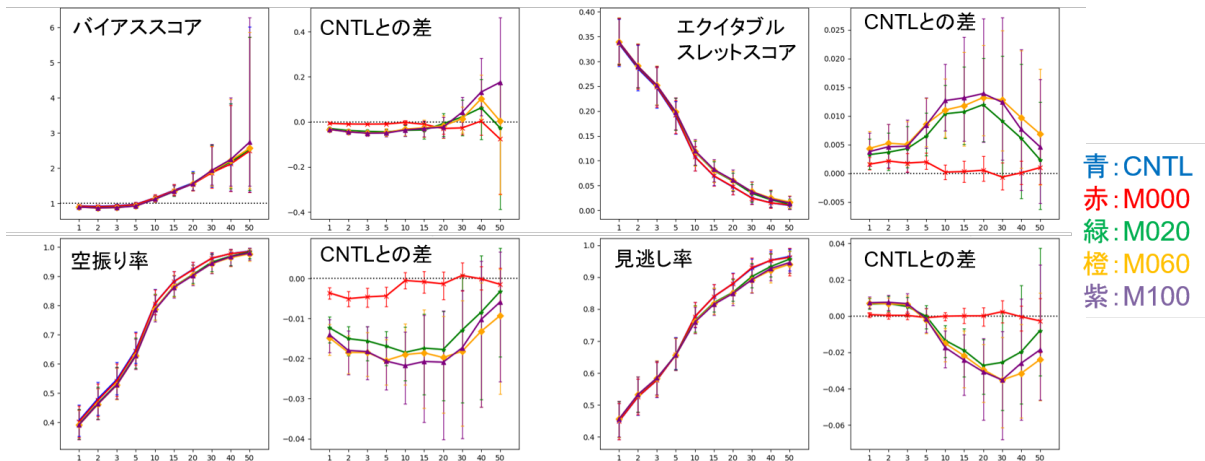


図 4.6.3 夏期間における 1 時間降水量 [mm/h] (検証格子 10 km) の閾値別の対解析雨量検証結果。(左上) バイアスコアとその CNTL との差、(右上) エクイタブルスレットスコア (ETS) とその CNTL との差、(左下) 空振り率とその CNTL との差、(右下) 見逃し率とその CNTL との差。線種は図 4.6.2 と同様。

図 4.6.4 に示す、2020 年 7 月 3 日 12UTC 初期値の FT=6-9 の 3 時間降水量の予測では、ハイブリッド同化の導入によって、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ており、M100 の予測結果が最も良かった。図 4.6.5 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）、メンバー数が多いほど線状降水帯付近への暖気の流入を強めていた。メンバー数が多いほど暖気流入が強かったのは、LAF により前線近傍のスプレッドが大きくなったこと（図略）に対応して、解析インクリメントが入りやすくなったためと考えられる。

4.6.5 まとめ

局地数値予報システムについて、局地解析の背景誤差共分散のハイブリッド化と気候学的背景誤差の更新、メソ数値予報システムの更新（第 4.4 節）に伴う予報モデルの物理過程の改良を計画している。本更新に向けて、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局地解析に導入し（Hybrid-3DVar）、これによって強い雨や地上気象要素を中心に予測精度が向上することを確認した。また、LAF 法により MEPS 摂動作成に利用するメンバー数を増やすことの有効性を確認した。今後は、メソ数値予報システムの更新（第 4.4 節）とそれに伴う局地モデルの物理過程改良、MEPS の更新（第 4.5 節）を反映する等、2022 年の局地予報システムの更新に向けた準備を進めていく。

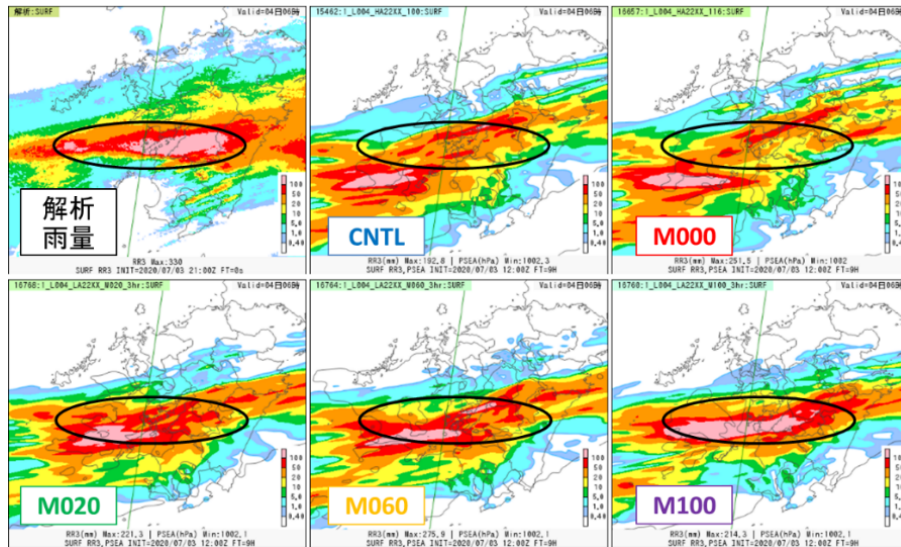


図 4.6.4 2020 年 7 月 3 日 21UTC の 3 時間降水量 [mm/3h] について、解析雨量 (左上) と各実験における予測結果 (2020 年 7 月 3 日 12UTC の FT=6-9)。

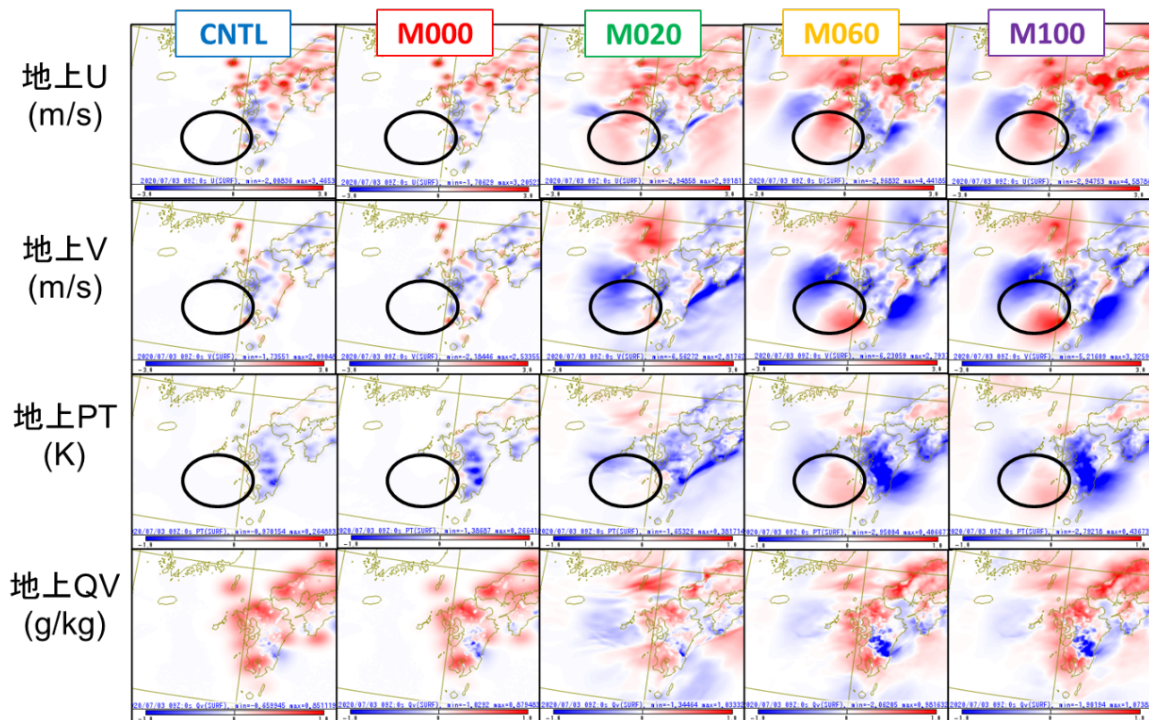


図 4.6.5 2020 年 7 月 3 日 12UTC の初期値作成までの 4 回の解析のうちの最初の解析 (09UTC) における解析インクリメント。上から地上の x 方向の風 [m/s], y 方向の風 [m/s], 温位 [K], 比湿 [g/kg] について、左から CNTL, M000, M020, M060, M100 の各実験について示す。

参考文献

- 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.
- Lorenz, 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.
- 横田祥, 秋元銀河, 河野耕平, 幾田泰醇, 2021: 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. 第 23 回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.

4.7 高頻度大気解析

4.7.1 はじめに

高頻度大気解析は、現行の毎時大気解析を高解像度化、高頻度化することで、日本周辺における大気の実況監視をよりきめ細やかに行うことを目的として作成する、風と気温の客観解析値である。令和4年度中の運用開始に向けて開発が進められている。

大気の実況監視を支援するため、気象庁は様々な観測データを利用して短時間のうちに客観解析を行い、速報的な3次元GPVとして提供する、「毎時大気解析」を運用してきている(室井ほか 2008)。その歴史は、2002年1月より慣熟的にデータ配信が開始された「毎時下層風解析」(酒井 2001)に始まる。メソ予報(MSM)の下層風予報値をウィンドプロファイラデータで補正(解析手法として最適内挿法を採用)するものであった。2003年11月にはアメダスを利用した地上風の解析を追加して「毎時風解析」(西嶋 2004)と名称を変更した。2006年3月には第8世代のスーパーコンピュータシステムの導入により解析格子を高解像度化し(水平格子間隔10 kmから5 kmへ)、解析要素に気温を追加して「毎時大気解析」と名称を改めた(西嶋 2005)。その後、3次元変分法の導入とドップラー速度の利用開始(藤田 2007)、大気下層の解析の変更(藤田 2008)、asuca-Varによる3次元変分法への更新(原・工藤 2017)が行われてきた。

2018年に導入された第10世代のスーパーコンピュータにおいて、その計算機資源を活かした現業数値予報システムの改良計画が立てられ、毎時大気解析については水平格子間隔を5 kmから2 kmへ、鉛直層数を48層から76層へ、実行頻度を1日24回から48回へと増強することが計画されている(石田ほか 2017)。本節では、この計画に基づく毎時大気解析の高解像度化、高頻度化の開発について報告する。解析の頻度が「毎時」ではなくなる等から「高頻度大気解析」と名称を新たにすることとした。

4.7.2 高頻度大気解析システム

表4.7.1に毎時大気解析と比較した高頻度大気解析の仕様を示す。

高解像度化、高頻度化

毎時大気解析は、水平格子間隔5 kmのMSMを第一推定値として利用し、解析を水平格子間隔5 km、鉛直48層で行っている。これに対して、高頻度大気解析は、水平格子間隔2 kmの局地予報(LFM)を第一推定値として利用し、解析を水平格子間隔2 km、鉛直76層で行う(高解像度化)。さらに、高頻度大気解析は毎正時に加え、毎正時30分にも解析を行う(高頻度化)。この二点が毎時大気解析と高頻度大気解析の大きな仕様の違いになる。第一推定値にLFMを用いる点は、解析の特性を決定づける上で最も重要な変更で

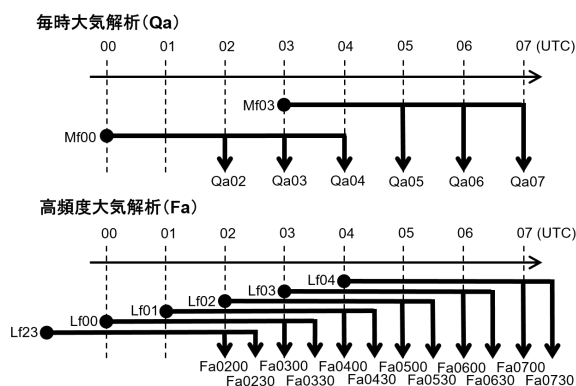


図 4.7.1 毎時大気解析および高頻度大気解析で通常用いられる第一推定値と解析時刻の対応の模式図。(上段) 毎時大気解析とMSM予報値の対応。例えば00UTC初期値のMSM(Mf00)による2時間予報値が、02UTCの毎時大気解析(Qa02)の第一推定値として用いられる。(下段) 高頻度大気解析とLFM予報値の対応。例えば00UTC初期値のLFM(Lf00)による3時間予報値が03UTCの高頻度大気解析(Fa0300)の第一推定値として用いられる。

ある。図4.7.1に、毎時大気解析と高頻度大気解析で通常用いられる第一推定値との対応を示す。高頻度大気解析では、LFMの3時間予報または3時間30分予報を第一推定値として用いる¹。図4.7.2には解析領域を示す。高頻度大気解析の解析領域は、第一推定値であるLFMの予報領域と同じとするため、毎時大気解析に比べて、やや狭い領域となる。鉛直層はモデルトップの高さ(21.8 km)を変えずに高解像度化し、LFM(76層)と同様の層配置とする。高頻度大気解析は、第一推定値として用いるLFMと全く同じ格子系であり、地形、海陸比も一致する。

解析手法、観測データ、プロダクト

表4.7.1の中段以降に示すように、高頻度大気解析は、「高解像度化、高頻度化」以外は毎時大気解析の手法を踏襲する。解析手法は、毎時大気解析と同様にasuca-Varによる3次元変分法を用いる。その制御変数は原・工藤(2017)で解説されたとおり、これまでの毎時大気解析の設計を踏襲した制御変数である。また、原・工藤(2017)が毎時大気解析にasuca-Varを導入した際には、背景誤差や解析インクリメントの補正(藤田 2008)について、それ以前の非静力学メソ4次元変分法(JNoVA)による毎時大気解析システム(藤田 2007)のものを踏襲し、プロダクトの性質を大きく変えないよ

¹ LFMの初期値は水平格子間隔5 kmの局地解析から提供された解析値を、予報モデルの水平格子間隔2 kmに内挿することにより作成しているため、LFMの時間積分が始まった直後は、実質的に5 km解像度程度の情報しかなく、時間積分が進むにつれて、小さなスケールの情報が増えていく(永戸ほか 2013)。高解像度の情報を持った第一推定値を使いたいため、予報開始直後ではなく3時間予報または3時間30分予報を用いる。

表 4.7.1 毎時大気解析システムと高頻度大気解析システムの仕様

	毎時大気解析 (Qa5km)	高頻度大気解析 (Fa2km)
領域 (格子数)	H25.3.27 以前のメソモデル (721x577)	局地モデル (1581x1301)
第一推定値	メソモデル	局地モデル
水平格子間隔	5 km	2 km
鉛直層数	48 層 (最上層 21.8 km)	76 層 (最上層 21.8 km)
解析時刻	毎時 00 分	毎時 00 分および 30 分
同化手法	3次元変分法	同左
制御変数	流線関数、非バランス速度ポテンシャル、温位	同左
観測の待ち受け時間	18 分	同左
観測	ウィンドプロファイラ (風)、航空機 (気温、風)、アメダス (気温、風)、空港気象ドップラーレーダー (ドップラー速度)、気象レーダー (ドップラー速度)、衛星可視赤外イメージャ (大気追跡風)	同左
出力要素	風、気温	同左

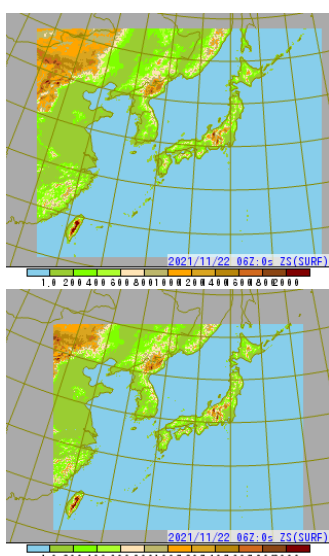


図 4.7.2 (上段) 毎時大気解析および (下段) 高頻度大気解析の解析領域。

うにした²。今回も同様の方針とする。毎時大気解析の背景誤差は、水平格子間隔 5 km のメソ予報による予報誤差の統計をもとに、最適内挿法の予報誤差の設定に概ね対応するよう調整されたものである (藤田 2007)。この毎時大気解析の背景誤差を、高頻度大気解析の格子系に内挿³して用いる。毎時大気解析では 3次元変分法の後に二つの解析インクリメントの補正を行っており、これらは毎時大気解析特有の処理である。一つは、

² 毎時大気解析における asuca-Var 導入は、高い計算効率、維持管理の利点を活かすためであり、特に前者は今回の高解像度化に大きく寄与している。

³ 水平一様を仮定しているため、鉛直 48 層から 76 層への内挿

海上での気温、風の解析インクリメントを海岸線から離れるにつれて減衰させる処理 (地上フィルターと呼ばれる) である。もう一つは、アメダス観測値による地上場の修正の影響が第一推定値の境界層の上端付近まで及ぶように、大気解析インクリメントを補正する処理である。これらの処理も、高頻度大気解析と同様に行う。地上フィルターにおいては、海岸線からの基準距離等は毎時大気解析と同じ値に設定する。

利用する観測データも毎時大気解析と同じ (表 4.7.1 を参照)、観測データの待ち受け時間も毎時大気解析と同じく 18 分である。

解析要素は、毎時大気解析と同じく、風と気温である。プロダクトの配信時刻は、毎時大気解析と同様の初期時刻プラス 30 分以内とする計画である。

4.7.3 特性

(1) 高解像度化

前項で述べたシステム仕様により、高頻度大気解析 (以下、Fa2km) は毎時大気解析 (以下、Qa5km) と比較して次のような特徴がある。

- Fa2km の地形、海陸比は LFM と同じ解像度となり、その分布に応じた解析が得られる。
- Fa2km と Qa5km の解析インクリメントは基本的に変わらない。
- Fa2km には第一推定値である LFM で予測された空間スケールの小さい気象現象の表現が反映される。

図 4.7.3 は Qa5km と Fa2km の地形を示す。図 4.7.4 (右) に同じ領域の Qa5km と Fa2km の地上気温の解析結果を示しているが、地形分布の表現の細かさに応じた地上気温分布が見られる。海岸付近の地上気温分布のシャープさの違いも、海陸比 (図略) の違いを反

映したものである。

図 4.7.4 (左) には第一推定値である MSM および LFM、(中) にはそれぞれの解析インクリメントを示す。地上気温の解析インクリメントはアメダス気温観測によって得られる。Qa5km と Fa2km では観測への寄せ方は基本的に同じになるような仕様としているので、インクリメントは概ね両者で同様であることが分かる。その中で、青点線で囲った栃木県北部から茨城県北部の領域では、インクリメントのパターンに違いがある。この領域は第一推定値の地上気温に違いがある(図 4.7.4 (左))。これは第一推定値において、この領域における降水表現が異なっており(図略、LFM では強い降水を予測)、この違いに起因したものと見られる。この例のように、Fa2km と Qa5km の解析インクリメントが異なる場合の多くは、両者の第一推定値の違いに起因する。

図 4.7.5 には、冬季の風下山岳波の事例を示す。図 4.7.5 (左) の 300 hPa の平面図の白線は、佐渡島付近から奥羽山脈を越えて太平洋まで引いており、図 4.7.5 (中) は、この白線に沿った第一推定値の鉛直断面である。Fa2km の第一推定値として用いる LFM は、この事例の風下山岳波を表現できている(衛星画像で、LFM 予測と同程度の波長の波を確認した(図略))。これは、Qa5km の第一推定値として用いる MSM では、表現することができないスケールの現象である。図 4.7.5 (右) に示す解析値において、Fa2km には LFM で予測された山岳波の構造が反映されていることが分かる。上層の解析インクリメントは山岳波のようなスケールの現象を修正するものではないので、それぞれの第一推定値の表現の細かさが、そのまま解析値に反映される。

(2) 高頻度化

正時の高頻度大気解析 (Fa00) と正時 30 分の高頻度大気解析 (Fa30) を比較し、以下のことを確認した。

- 利用する観測データについては、Fa00 と Fa30 とで大気追跡風 (AMV) 以外は同等の観測数である。AMV は、Fa00 と Fa30 とで利用できる最新データの観測分布の密度が異なる (Fa30 は Fa00 に比べて AMV の観測データ数が最大で約 30% 少ない)。
- Fa00 では LFM の 3 時間予報、Fa30 は LFM の 3 時間 30 分予報を第一推定値とすることから、Fa30 は Fa00 に比べて、第一推定値と観測値の差は大きくなる傾向があるが、解析値と観測値の差は同程度であった。

厳密には上記の違いはあるが、実況監視において Fa00 と Fa30 の違いを考慮して使う必要はない。

4.7.4 まとめ

高頻度大気解析は毎時大気解析を高解像度化、高頻度化したシステムである。第一推定値に LFM を用いて、LFM と同じ領域、水平格子間隔、鉛直層設定で、正時と正時 30 分に解析を行う。高頻度大気解析の解

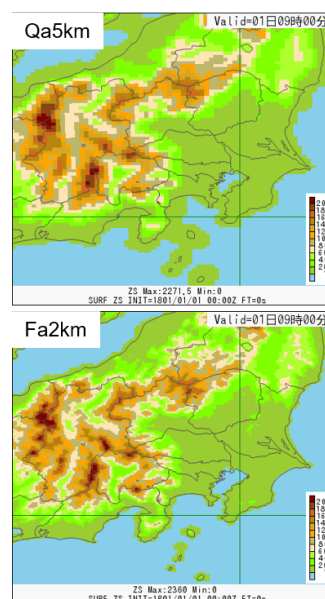


図 4.7.3 (上段) 毎時大気解析および(下段) 高頻度大気解析の地形。色は標高 [m] を表す。

析手法と観測データの利用方法は現行の毎時大気解析を踏襲しており、その解析インクリメントは毎時大気解析と基本的に変わらないようにしている。高頻度大気解析は、第一推定値に LFM を用いることによって、LFM で予測された小さなスケールの現象が反映された解析値となる点が毎時大気解析との違いである。毎時大気解析が「MSM 予測値を観測値に極力近づけた風と気温の格子点情報」であったのに対し、高頻度大気解析は「LFM 予測値を観測値に極力近づけた風と気温の格子点情報」であり、より局地的な気象も対象とした実況監視に有効な資料となると考えている。令和 4 年度中の運用開始に向けて準備を進めている。

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.
- 藤田匡, 2007: 毎時大気解析の高度化. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 98-101.
- 藤田匡, 2008: 毎時大気解析の改良. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58-61.
- 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.
- 石田純一, 高田伸一, 栗原茂久, 2017: 第 10 世代数値解析予報システム. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 113-123.
- 室井ちあし, 藤田匡, 石川宜広, 2008: 気象庁毎時大気解析. 天気, **55**, 401-408.
- 西嶋信, 2004: 毎時風解析. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.
- 西嶋信, 2005: 毎時大気解析. 平成 17 年度数値予報研

第一推定値

解析値 - 第一推定値

解析値

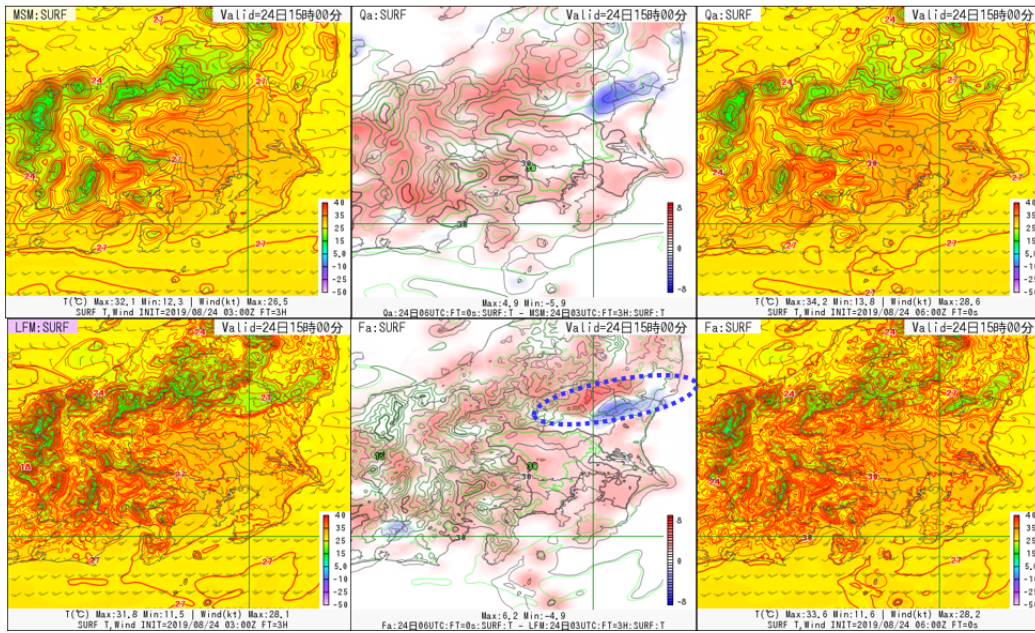


図 4.7.4 (上段) 毎時大気解析および(下段) 高頻度大気解析の2019年8月24日06UTCの地上気温 [°C] 解析。(左) 第一推定値、(中) 解析インクリメント、(右) 解析値。

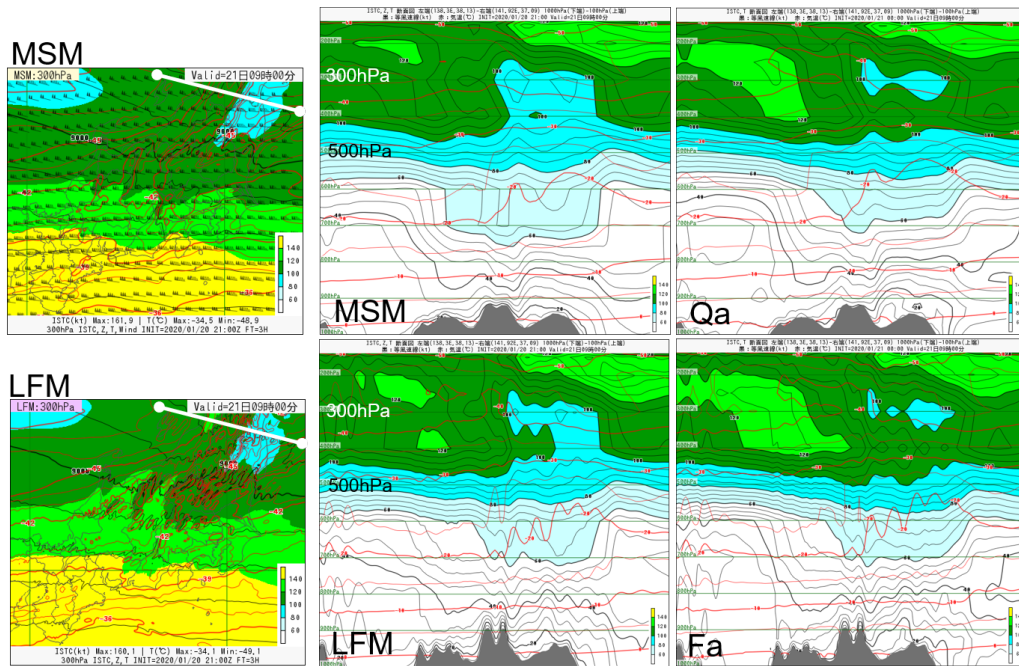


図 4.7.5 (上段) 毎時大気解析および(下段) 高頻度大気解析の冬季の風下山岳波の事例(2020年1月20日00UTC)。(左) 第一推定値の300 hPaの平面図、左図の白線に沿った(中) 第一推定値の鉛直断面、(右) 解析値の鉛直断面。塗りつぶしのコンターは風速 [kt]、赤線は気温 [°C]。

修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.

酒井喜敏, 2001: 毎時下層風解析. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-63.

4.8 観測データの新規導入と利用法の改良

4.8.1 はじめに

気象庁の数値予報解析システムでは、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、予測精度向上には重要であり、新規観測データの導入や、観測データの利用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。

4.8.2 放射伝達モデル RTTOV の更新

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 で維持開発されている RTTOV (Eyre 1991) を用いている。現在利用中のバージョンは、2012年にリリースされた RTTOV 10.2 (Saunders et al. 2012) で、2012年11月に利用を開始した。

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、新たに打ち上げられた衛星の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 の更新は重要である。

現時点で最新の RTTOV のメジャーバージョンは 2020年11月にリリースされた 13 (以降 RTTOV-13 とする) で、その後マイナーバージョンとして 13.1 が 2021年11月にリリースされている (Saunders et al. 2020)。現在、現業数値予報システムでの RTTOV-13 への更新作業を行っている¹。RTTOV-13 への更新による主な変更点としては、以下のようなものがある。これらにより、輝度温度の計算精度向上が期待できるほか、現在進めている全天同化や陸域での利用データ拡大にも寄与する。

- 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
- 複数種類の雲・降水粒子とそれぞれの雲量を考慮した全天候での放射伝達計算
- 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・反射率データベースの更新

¹ 着手時点での最新バージョン 13.0 への更新を行っている。13.1 への更新は当庁での利用範囲に大きな影響はないことから今後の機会に実施する。

現在、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。また、利用されているすべての輝度温度センサーに関して、変更による影響の確認が必要となる。そのため、導入に向けた更新作業は、以下のように 2 段階に分けて実施する予定である。まずは、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変更を行い、大規模な更新を確実に実施する。その際、係数についてはフォーマットの変更のみとし、現在利用している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する。これにより、実装の不備等がバージョンアップによる改善に埋もれて見逃されることを防ぐ。次に、係数の更新を中心とした、計算結果に大きく影響する変更を実施する。その際、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。

現在は、第一段階であるモジュールの差し替え等の実装作業について概ね完了し、動作確認を行っているところである。

4.8.3 メソ解析におけるマイクロ波輝度温度の全天同化

全球解析においては、衛星に搭載されたマイクロ波センサーの、雲・降水域を含む輝度温度データの全天同化を 2019年12月に導入した (気象庁 2021a, 第 3.6 節)。メソ解析においても、マイクロ波センサーの全天同化に向けて開発を進めている。その際、メソ解析の特性を踏まえた対処が必要となる。

全球解析と同様に、雲・降水域を含めた輝度温度の計算には、RTTOV のパッケージに含まれる、散乱を考慮した放射伝達モデル RTTOV-SCATT (Bauer et al. 2006) を用いる。前述の RTTOV-13 の導入により、RTTOV-SCATT で用いる雲・降水粒子 (hydrometeor) のフラクシオン²を、粒子ごとに別々に与えることができるようになる。MSM の内部では、液相、固相の水として雲水、雲氷、雨、雪、あられの混合比を予報変数に持つ (氏家 2020) ことから、これを活用できる RTTOV-13 の導入は有効である。図 4.8.1 に、メソモデル内で計算される各粒子のフラクシオンを RTTOV-SCATT に与えて計算した、マイクロ波イメージャ AMSR2 の輝度温度を示す。雲・降水域における輝度温度を精度よく計算することができ、全天同化に向けて有効であることが確認できた。

メソ解析では、マイクロ波センサーからリトリブした降水強度を同化している (佐藤 2003) ことが、全

² モデル格子内に存在する物質の割合 (0-1)。0 は格子内に物質が存在しないことを、1 は格子内すべてを覆うことを意味する。

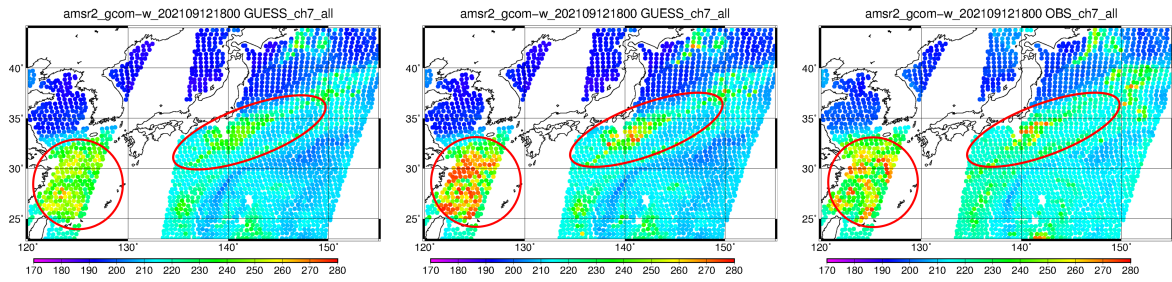


図 4.8.1 雲・降水を考慮した輝度温度の計算値と観測値の違い。GCOM-W/AMSR2/ch7 (19GHz 垂直偏波)。左：すべての雲・降水粒子（雲水、雲氷、雨、雪、あられ）について共通の雲量（放射過程で使用）を与えて計算した輝度温度、中央：それぞれの水物質ごとに診断したフラクションを与えて計算した輝度温度、右：観測値。

球解析とは異なる。メソ解析に全天同化を導入する場合、降水域における観測データが、降水強度のリトリブに使用される観測データと重複することから、リトリブ降水強度の同化は廃止する方向で検討している。その際、全天同化により、リトリブ降水強度と同等のインパクトを得られるかどうかなどを、確認する必要がある。

現在、品質管理および解析本体において雲・降水を考慮した輝度温度の計算を組み込み、全天同化の実装や設定などを確認しているところである。

4.8.4 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

ハイパースペクトル赤外サウンダは、気温や水蒸気の鉛直分布を得ることのできるセンサーである。線状降水帯や台風の予測に重要な、初期値における大気鉛直構造の精度を、ハイパースペクトル赤外サウンダの利用により向上させることができる。ハイパースペクトル赤外サウンダは全球解析では利用中であるが、メソ解析においては導入を目指して開発を進めているところである。メソ解析では、これまで全球解析から係数を引き継いで使用するバイアス補正などに課題があり、現業利用には至っていなかった（岡本ほか 2020）。その後、2020年3月の asuca-Var の導入（気象庁 2021c）によりメソ解析独自のバイアス補正が可能となったことから、利用に向けた開発を再開した。

メソモデルは全球モデルと比較してモデル上端の高度が低いことも課題のひとつであった。品質管理や解析本体で輝度温度を計算する際、モデル上端より上部の大気プロファイルは標準大気プロファイルの気温減率を用いて補完している。このため、モデル上端より上部に感度のあるチャンネルについては、放射伝達モデルにより計算した輝度温度の誤差が大きく、利用が難しい。また、赤外波長帯での観測は雲の影響を大きく受けることから、雲頂高度より下部に感度のあるチャンネルは、品質管理において除去している。結果として、利用できるチャンネルが多く残らないという課題があった。これに対し、衛星観測データ利用拡充を主な目的として、モデル上端高度を引き上げる計画であ

り（第 4.4 節）、より多くのチャンネルが利用できるようになる見込みである。

現在、Metop に搭載の IASI と Suomi-NPP および NOAA-20 に搭載の CrIS について、利用に向けた開発に取り組んでいる³。現時点の性能評価試験では、全球解析で利用中のチャンネルを候補とし、モデル上端による悪影響の少ないチャンネルを選んで利用した。雲判別などの品質管理処理は全球解析に準じた。変分法バイアス補正の説明変数は、現在 asuca-Var において他のセンサーとも共通で用いられている変数（軌道の上昇下降フラグ、衛星天頂角、地表面温度）と定数を用いた。性能評価試験の結果として、気温や水蒸気の第一推定値に改善の傾向が見られた他、気温や降水の予測精度に中立または改善の傾向が確認されており、詳しい分析を進めているところである。

4.8.5 陸域マイクロ波輝度温度同化における地表面射出率の動的推定

輝度温度の同化では、数値予報モデルが出力する気温・水蒸気のプロファイルとともに、地表面の温度や射出率などの情報を放射伝達モデルに入力し、輝度温度を計算している。その際、これらの地表面の情報の誤差は計算される輝度温度の誤差となり、ひいては大気の解析場・予測場の誤差につながる。とりわけ大気下層に感度のあるチャンネルの輝度温度では、地表面情報の影響は大きい。大気下層は線状降水帯など顕著現象の環境場として重要であり、地表面情報の取り扱いの高度化は、顕著現象の予測精度の向上に資する。

ここでは、全球解析への導入に向けて気象研究所とともに取り組んでいる、陸域におけるマイクロ波気温サウンダの地表面射出率の動的推定について記す。マイクロ波気温サウンダのチャンネルのうち、低い高度に感度のある AMSU-A のチャンネル 5-7 および、ATMS のチャンネル 6-8 を対象とし調査を行っている。これらのチャンネルは、地表面情報の精度の影響を受けやすいことから、現業数値予報システムにおいては現在、

³ 全球解析では Aqua に搭載の AIRS も使用していたが、既にデータ配信が終了しているためメソ解析での開発は行わない。

陸上では不使用、または標高が高い場合に不使用としている。

全球解析では、マイクロ波サウンダの輝度温度同化における陸域射出率として、RTTOV に内包されている月別の気候値データ CNRM Atlas (Karbou et al. 2010) を利用している。しかし、陸域の射出率は時空間変動が大きく、気候値の利用では精度が十分ではない場合がある。そこで、射出率を観測データごとに動的に推定し、より正確な地表面情報を得ることを目指す。これにより、陸域を中心に、大気下層の気温場の解析精度や予測精度の向上が期待できる。

射出率の推定には、上記の射出率気候値の作成と同じ手法 (Karbou et al. 2006) を用いる。ある周波数 ν 、衛星天頂角 θ の輝度温度 $T_b(\nu, \theta)$ は、晴天域のマイクロ波放射伝達方程式を用いると、地表面温度 T_s 、地表面射出率 $\varepsilon(\nu, \theta)$ 、大気の下向き放射 $T_a^\downarrow(\nu, \theta)$ 、上向き放射 $T_a^\uparrow(\nu, \theta)$ 、大気透過率 Γ から、以下のように表される。

$$T_b(\nu, \theta) = T_s \varepsilon(\nu, \theta) \Gamma + \{1 - \varepsilon(\nu, \theta)\} \Gamma T_a^\downarrow(\nu, \theta) + T_a^\uparrow(\nu, \theta) \quad (4.8.1)$$

大気の下向き放射 $T_a^\downarrow(\nu, \theta)$ 、上向き放射 $T_a^\uparrow(\nu, \theta)$ 、大気透過率 Γ は、RTTOV を用いてモデル変数から算出できる。(4.8.1) 式を射出率について変形すると、

$$\varepsilon(\nu, \theta) = \frac{T_b(\nu, \theta) - T_a^\downarrow(\nu, \theta) \Gamma - T_a^\uparrow(\nu, \theta)}{(T_s - T_a^\downarrow(\nu, \theta)) \Gamma} \quad (4.8.2)$$

となり、観測輝度温度、モデル変数、地表面温度から射出率を推定することができる。また、(4.8.1) 式を地表面温度について変形すると、

$$T_s = \frac{T_b(\nu, \theta) - (1 - \varepsilon(\nu, \theta)) T_a^\downarrow(\nu, \theta) \Gamma - T_a^\uparrow(\nu, \theta)}{\varepsilon(\nu, \theta) \Gamma} \quad (4.8.3)$$

となり、観測輝度温度、モデル変数、射出率から地表面温度を推定することができる。開発当初は、地表面温度にモデル変数を用い、射出率のみを推定して利用することを検討していた。しかし調査の過程で、地表面温度についても推定値の利用が夜間の乾燥地域を中心に有効であることが確認でき、地表面温度も推定することとした。なお簡便のため、地表面温度の推定に使用する地表面射出率には、動的に推定した射出率ではなく、前述の気候値データを用いた。射出率及び地表面温度の推定には、透過率の高い 31.4 GHz、50.3 GHz のチャンネル (AMSU-A、ATMS ともチャンネル 2, 3) をそれぞれ用いている。チャンネルの最適な組合せや、地表面温度推定に用いる射出率の妥当性については調査中である。

陸域において地表面射出率と地表面温度を上記のように推定し、輝度温度の同化に用いる変更を加えた全

球同化サイクル実験 (2018 年 8 月を対象) を実施し、効果を確認した。動的に推定した射出率は、期間平均では気候値と同程度であった。しかし、輝度温度の計算値と観測値の差異の標準偏差を確認すると、サハラ砂漠からアラビア半島及び中央アジアを中心に減少しており、輝度温度の計算値の誤差が減少していることが確認された。これは、動的推定により射出率の変動を適切にとらえ、輝度温度計算に反映できた結果と考えられる。予測値に関しては、輝度温度の計算値の誤差が顕著に減少したアフリカ北部からアラビア半島付近において、気温や高度場に誤差の減少が見られ、精度の向上が確認できた。

今後は、降水により射出率が推定できない場合の対処、海氷や雪氷域への適用の検討、冬季における動作確認など、現業システムでの利用に向けてさらに調査を行う。さらには、他の輝度温度センサーへの適用や、メソ解析、局地解析への適用についても検討する。

4.8.6 メソ解析・局地解析におけるマイクロ波サウンダ ATMS の利用

NOAA が運用する、次世代現業極軌道衛星 JPSS シリーズ衛星の Suomi-NPP⁴ および NOAA-20 には、マイクロ波サウンダ ATMS が搭載されており、全球解析で利用されている (平原 2017; 村田・亀川 2020)。全球解析での利用に引き続き、メソ解析においても ATMS の利用に向けた開発を行っている (気象庁 2021b)。ATMS の利用により、AMSU-A や MHS と同様、対流圏における気温や水蒸気の鉛直分布の改善が期待される。

メソ解析において性能評価試験を実施したところ、気温チャンネルのバイアス補正が不十分であることが分かり、原因の特定や対処の検討を行っているところである。また今後は、局地解析においても同様に、ATMS の利用に向けた調査を行う予定である。

4.8.7 メソ解析・局地解析における二重偏波レーダーの利用

メソ解析及び局地解析では、全国に 20 地点ある気象庁の一般気象レーダーの反射強度とドップラー速度、及び 9 地点の空港気象レーダー (DRAW) のドップラー速度を同化に利用している。これらのレーダーの二重偏波レーダーへの更新が進められており、一般気象レーダーについては 2020 年 3 月に東京レーダーが最初に更新された後、2021 年 7 月までに福井、大阪、福岡、広島、名古屋、仙台のレーダーが更新された (図 4.8.2 の赤丸のレーダー)。DRAW についても 2020 年 3 月に福岡が、2020 年 10 月に新千歳が更新されている⁵。これらの更新レーダーについて、データ同化で使

⁴ Suomi-NPP は JPSS シリーズの準備衛星であるが、JPSS シリーズと同等のセンサーが搭載されている。

⁵ これらレーダーの更新以前に 2016 年 3 月に羽田、関西、2016 年 12 月に成田、2018 年 12 月に那覇、2019 年 11 月に中部の DRAW が更新されている。



図 4.8.2 2021 年 7 月時点での気象庁一般気象レーダーの二重偏波レーダーへの更新状況。気象庁ホームページより。

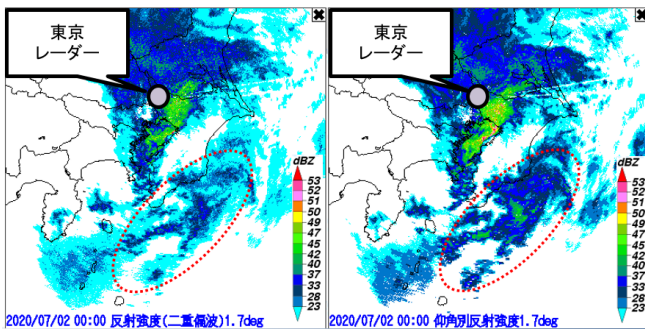


図 4.8.3 降雨減衰補正なし(左)とあり(右)の反射強度の比較。仰角は 1.7 度。ただし、降雨減衰補正なしの方位分解能は、0.35°、ありの方位分解能は 0.7°である。観測時刻は 2020 年 7 月 2 日 00JST。赤点線で囲った領域は降雨減衰補正の有無による違いが顕著な領域を示す。

用する反射強度とドップラー速度の品質等を調査したうえで現業での利用を再開した。

本項では、東京レーダーの反射強度の利用(2021年5月に現業化)、及び東京レーダー以降に更新が完了したレーダーの利用(2021年11月に現業化)に向けたメソモデル、局地モデルに関する性能評価について報告する。なお、東京レーダー・福岡 DRAW のドップラー速度の現業利用については、気象庁(2021d)を参照願いたい。

(1) 東京レーダーの反射強度の利用

(一) 二重偏波化された東京レーダーの反射強度

二重偏波化された東京レーダーの反射強度は、偏波情報を用いた降雨減衰補正と非降水エコーの除去によりデータ品質が向上している。降雨減衰補正の有無による反射強度の比較を図 4.8.3 に示す。東京レーダーの南東方向にやや強い降水域が存在し、この雨域による降雨減衰の影響で、「減衰補正なし」はその後方にある赤点線で囲んだ領域の降水が「降雨減衰補正あり」より弱くなっている。

(二) 反射強度の同化手法と品質管理

地上レーダーの反射強度は、第一推定値の相対湿度とレーダーシミュレータで計算した反射強度の関係から相対湿度に変換され、これを疑似観測として同化している(幾田(2011)、幾田(2014))。なお、レーダーシミュレータは C バンド帯(5.3GHz)における雨・雪・霰の反射強度を推定しており、アンテナパターンやビームの屈折は考慮しているが、降雨減衰は考慮していない。

品質管理では、以下の条件に該当するデータを除外し、同化に使用しないようにしている。

- レーダーサイトからの距離が 200km 以上
- 仰角 5.6 度以上
- 気温 0 度未満で推定された相対湿度
- 反射強度の D 値(観測値 - 第一推定値)と、相対湿度の D 値が逆符号

(三) メソ、局地の性能評価試験の設定

メソ実験は 2020 年 12 月時点相当、局地実験は 2021 年 3 月時点相当の解析予報システムをコントロール実験(CNTL)とし、CNTL に加え東京レーダーの反射強度を同化に利用した実験をテスト実験(TEST)とした。検証期間は 2020 年 4 月 11 日から 2020 年 7 月 10 日である。ここでは主にメソ実験の性能評価試験の結果について報告する。

(四) 実験結果

(i) メソ解析における東京レーダーの反射強度、相対湿度の特性

図 4.8.4 にメソ解析における東京レーダーとそれ以外のレーダーの反射強度の観測値と第一推定値の散布図の比較を示す。東京レーダー以外のレーダー(右図)では、観測値が概ね 15dBZ から 30dBZ の領域の $y=x$ の線よりやや上側の赤い点線で示した領域におけるサンプル数が多くなっている。降雨減衰の影響を受けたことにより、反射強度の観測値が第一推定値よりも小さくなったと考えられる。一方、降雨減衰補正が適用された東京レーダー(左図)はこの領域のサンプル数が減少しており、観測値と第一推定値との整合性が向上している。

図 4.8.5 に反射強度から推定した疑似相対湿度の D 値ヒストグラムを示す。東京レーダー(左図)は降雨減衰補正により反射強度が強くなった影響で他のレーダーと比較して平均値がやや大きくなっているが、標準偏差は小さくなっている。局地解析についても概ね同様の傾向であった。

(ii) メソ・局地モデルの降水予測への影響

東京レーダーの反射強度データが予測に与える効果を分かりやすくするため、東京レーダーを中心とした緯度 6 度×経度 6 度の領域を対象として検証を行った。図 4.8.6 は 3 時間降水量 1mm のメソモデルの降水予測ス

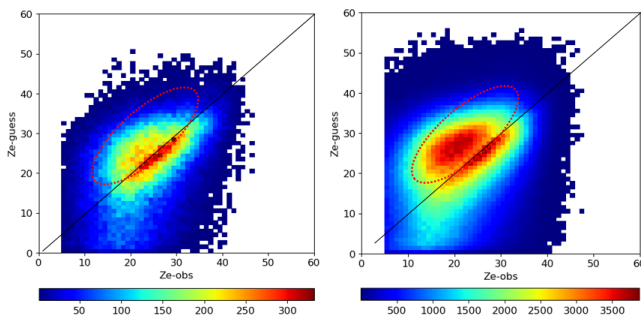


図 4.8.4 メソ解析における東京レーダー（左）とそれ以外のレーダー（右）の反射強度の散布図の比較。横軸は観測、縦軸は第一推定値。単位は dBZ。シェードはサンプル数を示し、暖色系ほどサンプル数が多い。赤点線で囲った領域は両者の違いが顕著な領域を示す。

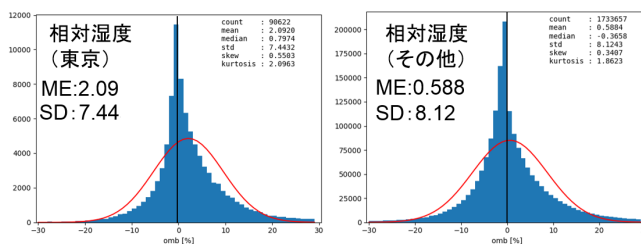


図 4.8.5 メソ解析における東京レーダー（左）とそれ以外のレーダー（右）の疑似相対湿度の D 値ヒストグラムの比較。横軸は疑似相対湿度の D 値 (%)、縦軸はサンプル数。図中の ME は平均、SD は標準偏差である。

コア (20km 格子平均) である。バイアスコア (左列) は、予報時間を通して改善傾向がみられ、一部の予報時間では有意な改善となっている。エクイタブルスレットスコア (ETS、右列) は概ね中立である。3 時間降水量 10mm の降水予測スコアも概ね同様であった。3 時間降水量 20mm 以上の降水予測スコアは、FT=24hour 以降のバイアスコアがやや悪化する傾向が見られたものの、ETS は概ね中立であった。以上、一部でやや悪化のインパクトがみられるものの、総合的には中立からやや改善のインパクトを確認した。

1 時間降水量 5mm の局地モデルの降水予測スコア (10km 格子平均) では、予報初期 (FT=1~2hour) に ETS でやや悪化の傾向が見られるものの、それ以降は概ね改善傾向であった。1 時間降水量 1mm の降水予測スコアについても同様の傾向であり、1 時間降水量 10mm、20mm の降水予測スコアについては概ね中立であった。以上、メソモデル、局地モデルの降水予測へのインパクトは中立からやや改善であることを確認した。

(2) 2020 年度更新レーダー及び仙台レーダーの利用再開

(一) メソ、局地の性能評価試験の設定

メソ実験、局地実験ともに一般気象レーダーの福井、

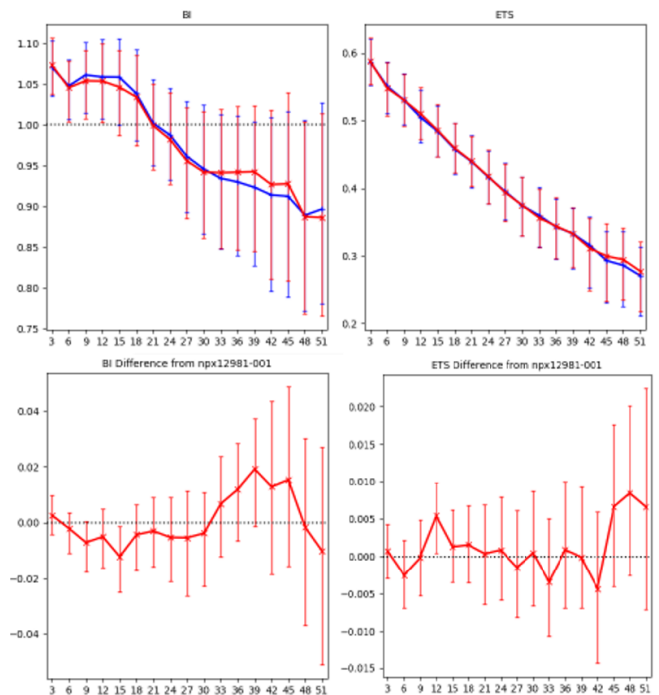


図 4.8.6 二重偏波東京レーダーの反射強度がメソの降水予測スコアに与える影響を示す図。東京レーダーの反射強度なし (CNTL:青線) とあり (TEST:赤線) の 3 時間降水量 1mm のバイアスコア及び ETS (上段) と、それらの TEST-CNTL の差 (下段)。横軸は予報時間 [hour]。検証格子は 20km × 20km で参照値は解析雨量。エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。

大阪、福岡、広島、名古屋、仙台と新千歳 DRAW (以後、新規更新レーダー) の利用が再開されていない 2021 年 5 月時点相当の解析予報システムをコントロール実験 (CNTL) とし、福井、大阪、福岡、広島、名古屋、仙台の反射強度とドップラー速度、及び新千歳 DRAW のドップラー速度を同化に利用した実験をテスト実験 (TEST) とした。メソ実験の検証期間は 2021 年 6 月 14 日から 2021 年 7 月 14 日、局地実験の検証期間は 2021 年 6 月 15 日から 2021 年 7 月 14 日である。

(二) 新規更新レーダーのデータ品質

新規更新レーダーの反射強度についても東京レーダーと同様に降雨減衰補正により第一推定値との整合性が向上する傾向が見られた。メソ解析における、反射強度から推定された疑似相対湿度の D 値平均、標準偏差を表 4.8.1 に示す。新規更新レーダーの疑似相対湿度の D 値平均は既に同化に利用されている東京レーダーと比較してやや小さい。標準偏差は概ね同等である。局地解析における、反射強度から推定された疑似相対湿度の D 値平均、標準偏差を表 4.8.2 に示す。東京レーダーと比較すると、平均はやや小さく、標準偏差は同等かやや小さいが、違いは大きくない。

新規更新レーダーのメソ解析及び局地解析それぞれにおけるドップラー速度の D 値平均、標準偏差を表

表 4.8.1 新規更新レーダーと東京レーダーのメソ解析における疑似相対湿度の D 値統計

サイト名	平均 (%)	標準偏差 (%)	サンプル数
仙台	1.90	7.50	33290
名古屋	1.20	7.09	29897
福井	1.65	7.49	31274
大阪	2.05	7.05	36795
広島	1.53	7.60	38205
福岡	2.25	8.08	44484
東京	2.71	7.29	61466

表 4.8.2 新規更新レーダーと東京レーダーの局地解析における疑似相対湿度の D 値統計

サイト名	平均 (%)	標準偏差 (%)	サンプル数
仙台	0.188	7.15	240821
名古屋	-0.948	6.89	317356
福井	-0.516	7.05	236869
大阪	-0.047	6.83	337522
広島	-0.349	6.71	316802
福岡	-0.164	7.20	265525
東京	0.602	7.33	482567

4.8.3、表 4.8.4 に示す。ドップラー風速の品質についても東京レーダーとほぼ同等の精度であることが分かる。

(三) メソモデル、局地モデルの降水予測への影響
メソモデルの降水予測に与える影響を確認するため、3 時間降水量 20mm の降水予測スコア (20km 格子平均) を図 4.8.7 に示す。新規更新レーダーによるデータ利用領域拡大の影響を受けて、主に予報の初期を中心に空振りと見逃しが減少するため、ETS は改善傾向となっている。予報後半では負バイアスが拡大して見逃しが増えた影響で、有意性はないものの ETS はやや改悪傾向である。3 時間降水量 10mm 及び 30mm の降水予測スコアもおおむね同様の傾向であった。

図 4.8.8 は局地モデルにおける 1 時間降水量 5mm の降水予測スコア (10km 格子平均) を示す。メソ実験同様、データ利用領域拡大により予報前半を中心に空振りと見逃しが減少するため、ETS は概ね改善傾向がみられる。1 時間降水量 1mm 及び 10mm の降水予測スコアについては予報初期で改善が見られるものの、中盤以降は中立であった。1 時間降水量 20mm の降水予

表 4.8.3 新規更新レーダーと東京レーダーのメソ解析におけるドップラー速度の D 値統計

サイト名	平均 (m/s)	標準偏差 (m/s)	サンプル数
新千歳 DRAW	-0.150	2.31	36928
仙台	-0.197	2.54	70452
名古屋	-0.128	2.85	123417
福井	-0.057	2.61	91616
大阪	-0.114	2.65	109854
広島	-0.195	2.59	105841
福岡	0.022	2.61	84536
東京	-0.194	2.54	99840

表 4.8.4 新規更新レーダーと東京レーダーの局地解析におけるドップラー速度の D 値統計

サイト名	平均 (m/s)	標準偏差 (m/s)	サンプル数
新千歳 DRAW	-0.134	2.02	64329
仙台	-0.214	2.22	122726
名古屋	-0.107	2.50	216387
福井	-0.071	2.25	161961
大阪	-0.137	2.23	193205
広島	-0.155	2.24	183683
福岡	-0.011	2.18	145248
東京	-0.190	2.17	173502

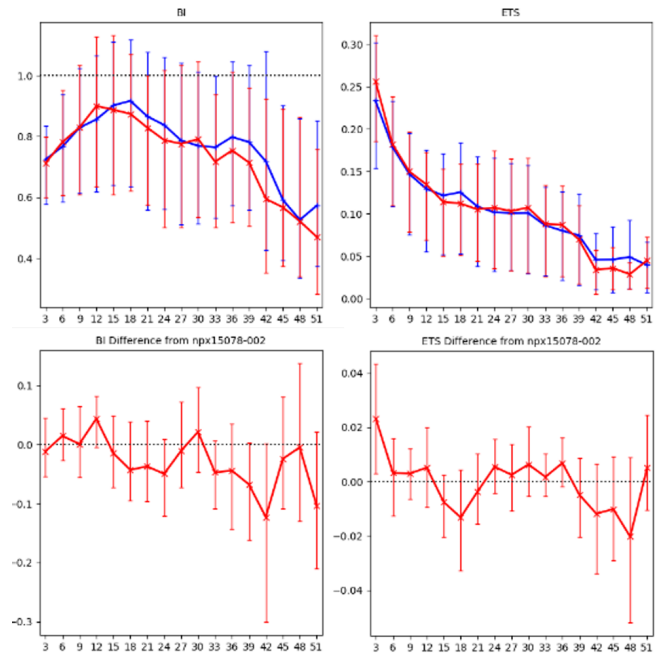


図 4.8.7 新規更新レーダーがメソの降水予測スコアに与える影響を示す図。CNTL (青線) と TEST (赤線) の 20km 格子平均の 3 時間 20mm 降水量のバイアススコア及び ETS (上段) と、それらの TEST と CNTL の差 (下段)。横軸は予報時間 [hour]。参照値は解析雨量。エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示している。

測スコアについては、FT=1hour では ETS は改善傾向であるが、2 から 7 時間予測では空振りと見逃しが増加して改悪傾向であった。

図 4.8.9 に局地モデルにおける TEST (中央) と CNTL (左) の降水予測の比較を示す。TEST では新規更新レーダーの利用によって観測データが予報初期値に取り込まれ、赤点線で囲んだ領域の降水予測が実況 (右) に近づいているのが確認できる。

4.8.8 メソ解析における Metop-C/ASCAT 海上風データの新規利用

Metop-C/ASCAT は EUMETSAT が運用する極軌道衛星に搭載されたマイクロ波散乱計で、観測の少ない海上の風を観測可能な測器である。観測された海上風は、データ同化で予報初期値に取り込むことで、風の収束・発散等、海上の風の場の予測精度向上に貢献し、擾乱等の予測精度向上も期待できる。なお全球解

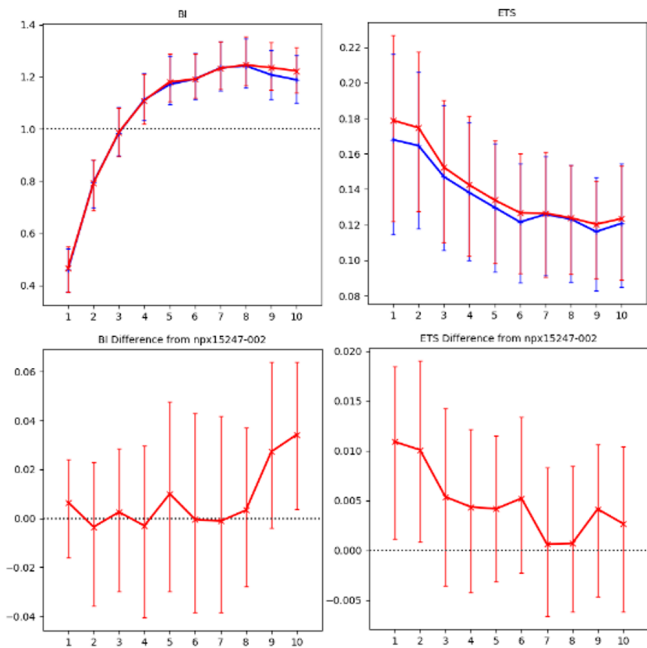


図 4.8.8 新規更新レーダーが局地モデルの降水予測スコアに与える影響を示す図。CNTL (青線) と TEST (赤線) の 10km 格子平均の 1 時間 5mm 降水量のバイアスコア及び ETS (上段) と、それらの TEST と CNTL の差 (下段)。横軸は予報時間 [hour]。参照値は解析雨量。エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示している。

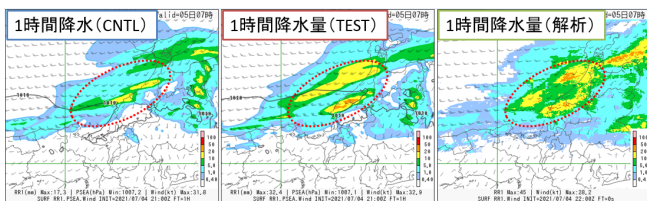


図 4.8.9 新規更新レーダーの利用が局地モデルの降水予測に与える影響。予報初期時刻 2021 年 7 月 4 日 21UTC の 1 時間後の予測を示す。左は CNTL の予測、中央は TEST の予測、右は実況 (解析雨量) である。カラーは 1 時間降水量 (単位は mm/h) を示す。

析では、Metop-C/ASCAT 海上風は 2019 年 12 月から現業利用が開始されている。

マイクロ波散乱計の観測においては、既にメソ解析で利用されていた Metop-A の運用が 2021 年 11 月 14 日に終了し、データ同化での利用数が減少した。これによってメソモデルの予測精度低下が懸念されたことから、これまでメソ解析では利用されていなかった Metop-C/ASCAT 海上風データを同一シリーズの Metop-A、B と同様の設定で現業利用するための調査を実施した。

まず、Metop-C/ASCAT のデータ品質を調査し、表 4.8.5、表 4.8.6 に示すとおり、東西風、南北風とも Metop-A、B と同等であることを確認した。また、Metop-A の運用停止を想定して Metop-A を利用せず Metop-C を同化に利用した場合、Metop-B との観測領域の重なりによって Metop-A、Metop-B を利用した場

表 4.8.5 メソ解析における Metop-A、-B、-C の ASCAT 海上風の東西風に関する D 値統計。統計期間は 2020 年 6 月 26 日 00UTC から 2020 年 7 月 31 日 21UTC。

衛星名	平均 (m/s)	標準偏差 (m/s)
Metop-A	-0.141	1.60
Metop-B	-0.180	1.51
Metop-C	-0.151	1.49

表 4.8.6 メソ解析における Metop-A、-B、-C の ASCAT 海上風の南北風に関する D 値統計。統計期間は 2020 年 6 月 26 日 00UTC から 2020 年 7 月 31 日 21UTC。

衛星名	平均 (m/s)	標準偏差 (m/s)
Metop-A	-0.296	1.69
Metop-B	-0.255	1.60
Metop-C	-0.261	1.56

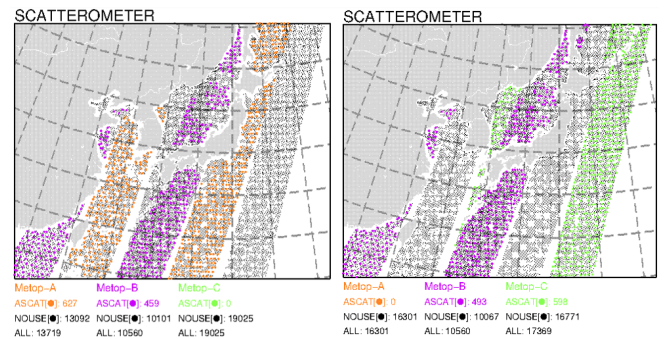


図 4.8.10 Metop-A、Metop-B を利用した場合 (左) と Metop-B、Metop-C を利用した場合 (右) の ASCAT 海上風のメソ解析におけるデータ分布の比較。オレンジ色は Metop-A、紫色は Metop-B、黄緑色は Metop-C の ASCAT 海上風であり、これらはメソ解析に利用されたデータの分布を示す。黒色はデータ同化に利用されなかった ASCAT 海上風データである。解析時刻は 2020 年 7 月 3 日 03UTC。

合よりデータ利用数が 15~20%減少するが、Metop-B のみ利用する場合に比べると 40%程度増加することが分かった (図 4.8.10)。

これらの調査によりデータ品質と同化での利用データ数の減少の緩和について概ね期待通りの結果が得られたため、Metop-A、Metop-B の ASCAT を利用した実験をコントロール実験、Metop-B、Metop-C の ASCAT を利用した実験をテスト実験として性能評価試験を行ったところ、主に同化に利用されるデータ数減少の影響で一部予測精度が悪くなる要素はみられるものの、総合的にはこれまでの解析場の精度が概ね維持され、予測に対しても中立程度のインパクトが確認できたことから、2021 年 12 月からメソ解析での現業利用を開始した。

4.8.9 今後の予定

ここで述べた観測データの導入・改良のうち、一部については 2022 年 6~7 月頃の適用に向けて準備を進

めている。また、年度後半の2023年2月頃にも、モデルの変更とともに現業システムへの適用を行う予定である。

これに加え、インド洋を観測するMeteosat-8からMeteosat-9への切り替え、ひまわり8号から9号への切り替え、GOES-17からGOES-18への切り替えなど、運用中の衛星の世代交代への対応や、プロダクトの仕様変更への対応なども予定している。

参考文献

- Bauer, P., E. Moreau, F. Chevallier, and U. O’Keeffe, 2006: Multiple-scattering microwave radiative transfer for data assimilation applications. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 1259–1281.
- Eyre, JR, 1991: A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. *ECMWF Tech. Memo 176*.
- 幾田泰醇, 2011: メソ解析におけるレーダー反射強度データの同化. 平成23年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9–12.
- 幾田泰醇, 2014: レーダー反射強度の同化手法の改良. 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 100–101.
- 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.
- 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.
- Saunders, R., J. Hocking, P. Rayer, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, P. Brunel, F. Karbou, and F. Aires, 2012: RTTOV-10 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, 31 pp. https://nwp-saf.eumetsat.int/oldsite/deliverables/rtm/rtm_rttov10.html.
- 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., EUMETSAT NWP SAF, 0 pp. https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/rtm/docs_rttov13/rttov13_svr.pdf.
- 氏家将志, 2020: 雲過程. 数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 45–55.
- 佐藤芳昭, 2003: メソ解析へのマイクロ波放射計データ同化. 平成15年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 7–12.
- 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.
- 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.
- 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, 2021c: メソ解析の改良. 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.
- 気象庁, 2021d: 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, 105–105.

4.9 統合型気温ガイダンス（格子形式）の開発

4.9.1 はじめに

数値予報開発センターでは、高精度でシームレスな5日先までの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した（気象庁2021）。

2020年度以降も新規要素追加や改良に向けた開発を継続しており、この中で、統合型気温ガイダンス（格子形式）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、2021年10月に部内試験運用を開始した。統合型気温ガイダンス（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、現在開発中の統合型降雪量ガイダンスの入力データとしても利用される。ここでは統合型気温ガイダンス（格子形式）の仕様と作成手法、検証結果等を述べる。

4.9.2 仕様

統合型ガイダンスは、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）を用いて作成される。表4.9.1に部内試験運用開始時点での統合型気温ガイダンス（格子形式）の仕様を示す。本仕様はMSM気温ガイダンス（格子形式）（三戸2018）に準じる。

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

作成対象	5 km 格子
基準とする数値予報モデル	MSM
入力ガイダンス	統合型気温ガイダンス（地点形式）
予報対象時間	毎正時
予報期間と間隔	FT=1 から FT=39 まで 1 時間間隔 (00, 12UTC 初期値では FT=51 まで)

4.9.3 作成手法

統合型気温ガイダンス（格子形式）は、現行の気温ガイダンス（格子形式）（三戸2018）と同様に、モデル地上気温予測値と地点形式の統合型気温ガイダンスの差分（モデルからの修正量）を、地形（海陸比、モデル標高）を考慮して周囲の格子に分配することで全格子での予測値を作成する（図4.9.1）。統合型ガイダンスには対応する数値予報モデルが存在しないため、基準となるモデル地上気温はMSMの予測値を使用する。

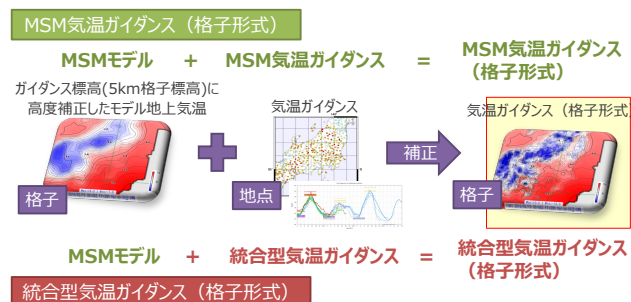


図 4.9.1 統合型気温ガイダンス（格子形式）算出の模式図。

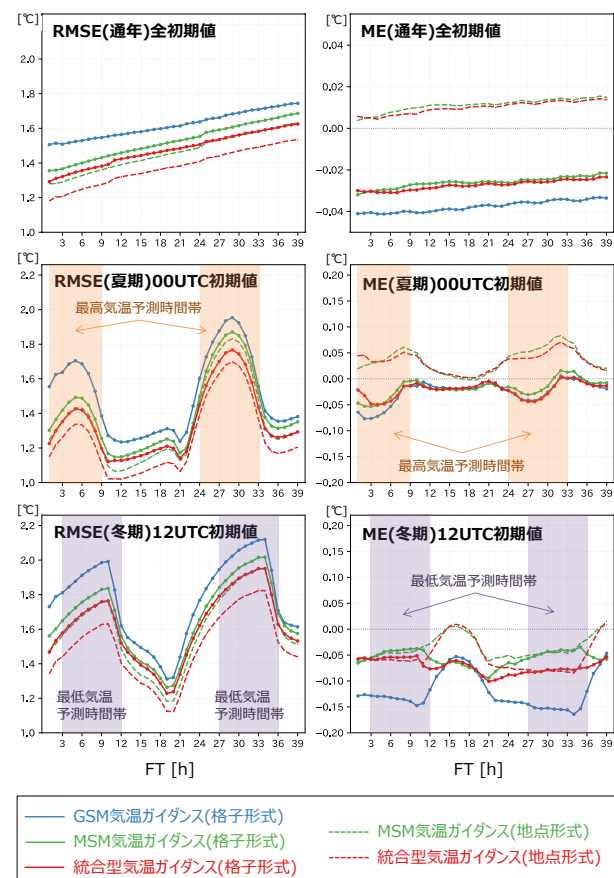


図 4.9.2 統合型気温ガイダンス（格子形式）の予報時間別・検証期間別検証結果。左列はRMSE、右列はME、上段は通年の全初期値、中段は夏期の00UTC初期値、下段は冬期の12UTC初期値の検証結果。実線は格子形式ガイダンスの検証結果、破線は地点形式ガイダンスの検証結果。

4.9.4 検証結果

ここでは統合型気温ガイダンス（格子形式）の検証結果を示す。検証期間は2018年6月5日から2021年6月4日の3年間で、6, 7, 8月を夏期、12, 1, 2月を冬期とする。検証に用いる実況値は全アメダス地点での観測値とし、格子形式ガイダンスではアメダス地点の周辺4格子からの内挿値を予測値とする。

図4.9.2に統合型気温ガイダンス（格子形式）の予報時間別・検証期間別のRMSEとMEを示す。格子形式の気温ガイダンスを比較すると、統合型気温ガイダンスはいずれの予報時間・検証期間においてもGSMおよびMSMガイダンスよりもRMSEが小さく、予測精

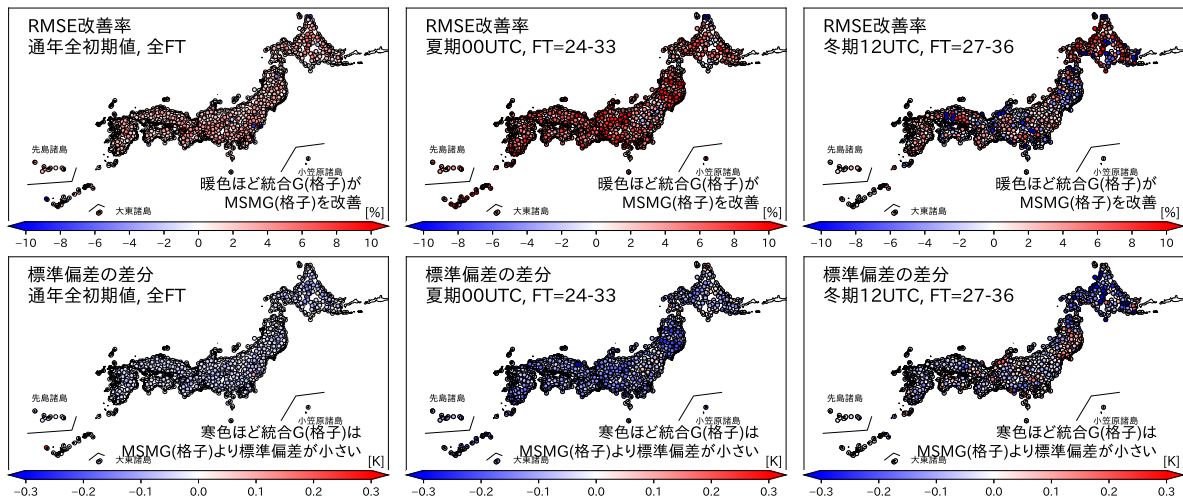


図 4.9.3 統合型気温ガイダンス（格子形式）の対 MSM 気温ガイダンス（格子形式）での地点別・検証期間別検証結果。上段は RMSE 改善率、下段は標準偏差の差分、左列は通年の全初期値、中央は夏の 00UTC 初期値、右列は冬の 12UTC 初期値の検証結果。

度が高い。格子形式ガイダンスと地点形式ガイダンスを比較すると、統合型・MSM ガイダンスとも、地点形式ガイダンスの方が格子形式ガイダンスよりも RMSE が小さい。これは地点形式ガイダンスがアメダス地点での観測値を目的変数として直接予測しているのに対し、格子形式ガイダンスは格子点での予測値からアメダス地点での予測値を間接的に算出しているため、地点を対象とした検証では後者の方が一般に不利になるためである。しかしながら、統合型気温ガイダンス（格子形式）は MSM 気温ガイダンス（地点形式）に近い予測精度を持っており、特に予報後半や、夏の最高気温予測時間帯、冬の最低気温予測時間帯では同等の予測精度を持っている。ME を見ると、地点形式ガイダンス、格子形式ガイダンスとも絶対値としては 0 に近く、全般にバイアスは小さい。ただし、格子形式ガイダンスは地点形式ガイダンスよりもやや負バイアス傾向となっている。この要因としては、格子形式ガイダンスの検証では周囲 4 点からの内挿でアメダス地点の気温を求めているが、実際のアメダス地点は谷筋に位置するなど、平均的にはアメダス標高の方が低くなるためと考えられる。

図 4.9.3 に、統合型気温ガイダンス（格子形式）の MSM 気温ガイダンス（格子形式）に対する RMSE 改善率と標準偏差の差分を示す。ここでは交差検証として、最近接アメダス地点を利用しないで作成した格子形式ガイダンスの予測精度を示す。RMSE 改善率と標準偏差の差分の定義は以下の通りである。

$$\text{RMSE 改善率} = \frac{\text{RMSE}_m - \text{RMSE}_i}{\text{RMSE}_m} \quad (4.9.1)$$

$$\text{標準偏差の差分} = \sigma_i - \sigma_m \quad (4.9.2)$$

ここで RMSE と σ はアメダス観測を真値とした RMSE と標準偏差を、添字 i, m は統合型気温ガイダンス（格子形式）と MSM 気温ガイダンス（格子形式）を示す。

図 4.9.2 で示した通り、GSM ガイダンスと MSM ガイダンスを比較した場合、MSM ガイダンスの精度が高いため、ここでは MSM ガイダンスとの比較のみ示している。RMSE 改善率を見ると通年では全国ほぼ全ての地点で統合型気温ガイダンス（格子形式）が MSM 気温ガイダンス（格子形式）を改善していることがわかる。特に夏の最高気温予測時間帯での改善が大きい一方で、冬の最低気温予測時間帯などでは改善している地点も見られる。標準偏差の差分を見ると、RMSE で改善が見られる地点での改善と整合しており、統合型ガイダンスがランダム誤差を軽減することで RMSE を改善していると言える。

4.9.5 まとめと今後の開発予定

地点形式の統合型気温ガイダンスをもとに面的な気温を予測する統合型気温ガイダンス（格子形式）を開発した。統合型気温ガイダンス（格子形式）は GSM および MSM の気温ガイダンス（格子形式）を上回る予測精度を持つことが確認できたため、2021 年 10 月に部内試験運用を開始した。今後は、2022 年度末の本運用開始を目指し、格子形式での確率情報（超過確率）の開発、GSM 高解像度化対応、MSM 予報時間延長対応のほか、現在の手法をベースラインとして、深層学習を用いた面的気温ガイダンスの開発、理研 AIP との共同研究の成果の取り込みなど、最新の AI 技術を用いた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

- 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.
- 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.

4.10 大雨発生確率ガイダンス

4.10.1 はじめに

近年、平成30年7月豪雨、令和2年7月豪雨などの顕著な大雨災害が相次いで発生している。このため、気象庁では、令和4年度出水期より、半日程度前から線状降水帯による大雨への警戒を呼びかける情報の提供を開始する予定である。数値予報開発センター（数値予報モデル基盤技術開発室）では、その情報の支援資料として、令和2年度後半から「大雨発生確率ガイダンス」の開発を行っており、令和3年度の部内試験運用を経て、令和4年度からの本運用開始を予定している。また、このガイダンスは部内利用だけでなく部外にも直接配信される計画となっており、顕著な大雨の可能性の大小を示すプロダクトとして庁外でも利用して頂く予定である。

4.10.2 仕様

大雨発生確率ガイダンスの本稿執筆時点（2022年1月時点）での仕様を表4.10.1示す。

大雨発生確率ガイダンスは、確率型ガイダンスとして実績のある発雷確率ガイダンス（土田 2018）と同じくロジスティック回帰を採用する。本稿執筆時点では、2018年～2021年の6～8月の説明・目的変数のデータを用いて予測式の係数を計算している。

目的変数は該当5 km格子を中心とした55 km四方のどこかで3時間100 mmまたは150 mm以上の降水の有無としている。これは領域の広げ方は違うものの、発雷確率ガイダンスと同じ手法である。目的変数とする対象領域を広げることにより、サンプル数を増やし、予測精度を向上させることができる。

層別化処理の対象は初期時刻、予報時間、地域としている。発雷確率ガイダンスと似ているが、夏季の大雨をターゲットとしているため、季節変化の層別化処理は入っていない。また、適切なサンプル数を確保するために、層別化した地域数も発雷確率ガイダンスの35地域に比べて少ない。

予測の時間間隔は、発雷確率ガイダンスの3時間間隔と異なり、1時間間隔としている。これにより確率のピークを時間的により詳細に予測することができる。

説明変数には、線状降水帯発生条件（加藤 2015）及びMSM降水量ガイダンス（白山 2018）を参考として、大雨の予測に特化した説明変数を採用している。

4.10.3 検証

MSM大雨発生確率ガイダンスの、本稿執筆時点での精度検証結果を示す。図4.10.1は、検証期間2019～2021年6～8月の、九州地方でのMSM大雨発生確率ガイダンスのブライアスキルスコア（BSS）である。ここでは2019年から2021年の各年を除いて係数を作成し、除いた年で検証を行った交差検証の結果を示す。

表 4.10.1 大雨発生確率ガイダンスの仕様

作成対象	5 km 格子（等緯度経度格子）
作成対象とするモデル	MSM, MEPS
予測対象	3時間降水量が100,150 mm以上となる確率
作成手法	ロジスティック回帰
予測対象時間単位	3時間（対象時刻及び前後1時間）
予測期間と時間間隔	FT=3～39（00,12UTC 初期値は51）の1時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	3時間降水量、500 m 高度水蒸気フラックス、500 m 高度相当温位、地形性上昇流×比湿、700 hPa 上昇流
目的変数	対象とする5 km 格子を含む周囲11格子（55 km 四方）の範囲のどこかで3時間降水量が100 または150 mm 以上となるか否か。
層別化処理の対象	初期時刻、予報時間、地域（北日本、東日本、西日本、九州、南西諸島の5つ）
備考	MSM で作成した予測式を MEPS に適用してメンバーごとの確率を作成。

100 mm/3h 以上、150 mm/3h 以上の BSS 共に正となっており（赤線）、確率予測として有効性があることが示されている。

図4.10.2に信頼度曲線を示す。100 mm/3h以上の予測の信頼度曲線（左図）については右肩上がりになっており（赤線）、高確率ほど大雨が発生する確率が高くなっていることが確認できる。一方、150 mm/3hの信頼度曲線（右図）では10%を超えるとほぼ横這いになっており、確率として使えるのは10%程度までということが分かる。

なお、九州地方では線状降水帯による大雨が多く発生し、このため予測精度も高くなりやすい。このため全国で検証した場合を別途確認すると、九州より精度が低く、特に北・東日本での予測精度は低い状況であった（図略）。このため、今後さらなる改良に向けて開発を継続する必要がある。

4.10.4 事例

大雨発生確率ガイダンスの例として、2020年7月4日朝に球磨川が氾濫した大雨特別警報の事例を示す。図4.10.3は、2020年7月4日6時を対象とした100, 150 mm/3h以上のMSM大雨発生確率ガイダンスで、7月3日18時を初期値とする12時間後の予測及び対応する実況の3時間降水量である。この事例は、MSMの予測精度が高かったこともあり、解析雨量の3時間積算降水量100 mm以上の領域に対して、大雨発生確率ガイダンスでは、100 mm/3h以上の確率が約40%、150 mm/3h以上の確率が約15%の予測が出ていた。

図4.10.4は、7月4日5時を対象とした100 mm/3h

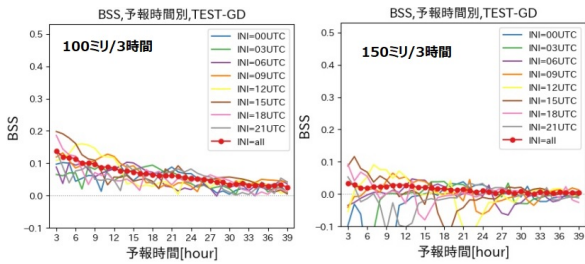


図 4.10.1 検証期間 2019~2021 年の 6~8 月における MSM 大雨発生確率ガイダンスのブライアスキスコア。左が 100 mm/3h 以上、右が 150 mm/3h 以上の確率のスコア。各線は初期値毎のスコアで、赤線が全初期値をまとめたスコア。検証領域は九州地方、予報時間は 3~39 時間、交差検証によるスコア。

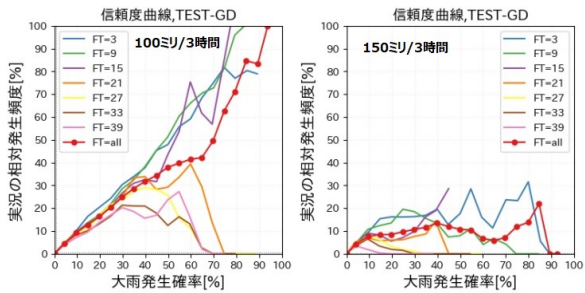


図 4.10.2 MSM 大雨発生確率ガイダンスの信頼度曲線。左が 100 mm/3h 以上、右が 150 mm/3h 以上の確率予測の検証結果。検証期間、領域などは図 4.10.1 に同じ。

以上の MEPS 大雨発生確率ガイダンスの予測（全 21 メンバー）で、7 月 3 日 15 時を初期値とする 14 時間後の予測である。この予測でも、多くのメンバーが線状降水帯による大雨の発生の可能性を予測していた。

4.10.5 今後

この大雨発生確率ガイダンスは 2022 年 6 月に運用開始となる予定であるが、線状降水帯などの大雨の予測は非常に難しく、今後さらに有効な説明変数の調査などガイダンスの改良を引き続き行う予定である。また、ガイダンスへの入力となる数値予報モデルの改良や、モデルの初期値の解析精度の改善や観測データの利用方法の改善も必要である。

その他、当ガイダンスを使って線状降水帯を検出するプロダクトの開発も行っており、将来的には顕著な

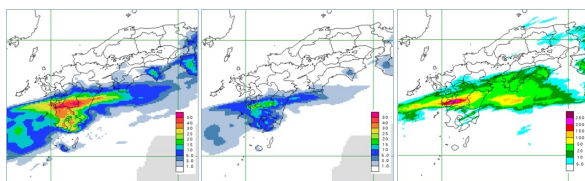


図 4.10.3 2020 年 7 月 3 日 18 時初期値の MSM 大雨発生確率ガイダンスの事例。左が 100 mm/3h 以上の確率、中が 150 mm/3h 以上の確率で共に 12 時間後の予測。右が対応する実況の 3 時間降水量。

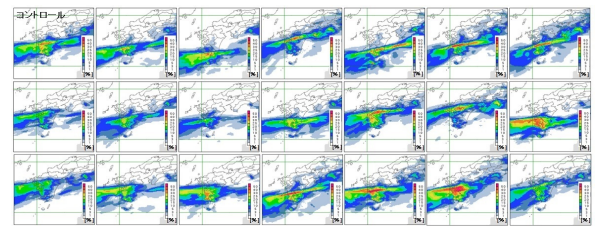


図 4.10.4 2020 年 7 月 3 日 15 時初期値の MEPS 大雨発生確率ガイダンスの事例。100 mm/3h 以上の確率の 14 時間後の予測。

大雨をもたらす線状降水帯の発生確度も提供する計画である。

参考文献

- 加藤輝之, 2015: 線状降水帯発生要因としての鉛直シアと上空の湿度について. 平成 26 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 114-132.
- 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.
- 土田尚佑, 2018: 発雷確率ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 165-176.

4.11 季節アンサンブル予報システムの改良

4.11.1 はじめに

気象庁は季節予報の基礎資料を作成するため、季節アンサンブル予報システムを運用している。本節は2022年2月から運用を開始した新しいシステム JMA/MRI-CPS3 (Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 3; 以降 CPS3) の仕様と予測精度について報告する。

季節予報が対象とする現象の多くは、大気と海洋をはじめとする地球システム要素間の相互作用を通じて変動するため、予測システムでもこれらの相互作用を考慮することが重要である。気象庁における大気-海洋結合予測システムの現業利用は、1998年7月に運用を開始したエルニーニョ予測モデル (JMA-CGCM) から始まる (吉川ほか 2016)。当初は熱帯域のエルニーニョ-ラニーニャ現象 (ENSO) に焦点を絞ったシステムとしてスタートしたが、その後、計算機性能の向上に合わせて予測精度の改善を図り、2008年には日本を含んだ全球域の季節予測を兼ねる JMA/MRI-CPS1 (Takaya et al. 2017) の導入に至った。本節で記述する CPS3 は、それから三代目の季節予測システムにあたる。

2015年6月から運用していた旧システム JMA/MRI-CPS2 (Takaya et al. 2018; 以降 CPS2) と比較すると、大気・海洋モデルの高解像度化や物理過程の改善等により系統誤差が大きく改善している。再予報の大気初期値や大気強制力には最新の長期再解析データセット JRA-3Q (Kobayashi et al. 2021) を使用し、海洋初期値作成に用いる全球海洋データ同化システムには現業機関としては世界に先駆けて4次元変分法を導入した。また、ユーザーが予測結果をより利用しやすくなるよう、システム運用スケジュールの見直しも加わった大規模なシステム更新となっている。

第4.11.2項では、CPS3のシステムの概要を紹介し、第4.11.3項は再予報による性能評価の結果を報告する。第4.11.4項では、まとめと今後の課題について述べる。

4.11.2 システム概要

CPS3は予測モデルに大気-陸面-海洋-海氷結合モデルを用いたアンサンブル予報システムである。図

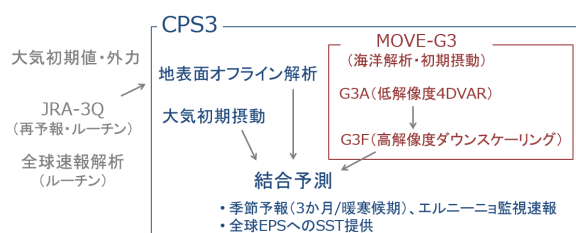


図 4.11.1 CPS3 概要

4.11.1 は CPS3 の処理の概要を示し、表 4.11.1 では仕様の詳細を CPS2 と比較する。

システムの処理内容は、予測モデルの初期化と予測計算の2つに分けることができる。初期化部分では、大気初期摂動、地表面初期値および海洋の初期値・初期摂動を作成する。なお、大気初期値・外力には事前に作成された JRA-3Q および全球速報解析 (GA) を利用する。予測計算には、季節予報に適するよう改良・調整を加えた気象庁全球大気モデル (GSM; JMA 2019) および気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM; Tsujino et al. 2017) を利用する。2つのモデルは、結合ライブラリー (SCUP; Yoshimura and Yukimoto 2008) を用いて1時間毎に1回、海面・海水面の物理量を交換しながら予測計算を進める。

(1) 大気・陸面モデル

大気・陸面モデルの基本バージョンには2020年3月に現業化された GSM2003 (Yonehara et al. 2020) を利用する。水平解像度は TL319 (≈55km)、鉛直層数は100層に設定し、CPS2 で利用していた TL159 (≈110km) 60層と比べて水平・鉛直方向ともに高解像度化させ、モデルトップも 0.1hPa から 0.01hPa に引き上げている。また、CPS2 のベースである GSM1011 (JMA 2013) から GSM2003 へのバージョン更新に伴って、種々の力学や物理過程の改良 (Yonehara et al. 2014, 2017, 2018, 2020) が取り込まれている。陸面過程は積雪の層構造や被覆率を考慮できるように改良された。土壌温度・水分を表現する鉛直層も多層化され、日変化の表現が改善している。海氷面のアルベドは、それまで考慮されていなかった海氷厚や氷上積雪によるアルベドの変化 (Hunke and Lipscomb 2010) を考慮するよう精緻化された。地形性抵抗過程として、Iwasaki et al. (1989) による地形性重力波抵抗スキームに代えて、地形性重力波抵抗と地形をまわりこむ流れによる抵抗を Lott and Miller (1997) によって表現している。また、新たにサブグリッドスケールの地形による形状抵抗も Beljaars et al. (2004) のスキームによって考慮されるようになった (金浜・山田 2019)。非地形性の重力波による運動量輸送効果は GSM1011 ではレイリー摩擦により簡易的に表現されていたが、より精緻な Scinocca (2003) が導入されたことで成層圏準2年振動の再現性が大きく向上した (金浜 2012)。

さらに CPS3 では季節予報の精度向上を意図した物理過程の改善や調整を追加で実施している。GSM2003 の積雲対流パラメタリゼーションは Arakawa and Schubert (1974) に基づいており、その方程式系は Pan and Randall (1998) の雲底マスフラックス時間発展予測式で閉じる (JMA 2019)。CPS3 ではこの積雲クローザー各項の見直しを行い、運動エネルギーの散逸時間スケールを浅い積雲と深い積雲とで分けて扱う等の精緻化を加えた。積雲のエントレインメント率には経験的な高

表 4.11.1 新旧システムの仕様比較

	JMA/MRI-CPS2 (2015年6月-)	JMA/MRI-CPS3 (2022年2月-)
大気モデル	GSM1011C* 解像度: TL159L60 (~110km) モデルトップ: 0.1hPa	GSM2003C* 解像度: TL319L100 (~55km) モデルトップ: 0.01hPa
海洋モデル	MRI.COM v3.2 1.0°(東西) × 0.3-0.5°(南北) L52+海底境界層	MRI.COM v4.6 0.25°(東西) × 0.25°(南北) L60
初期条件	大気: JRA-55 陸面: JRA-55 陸面解析値 海洋: MOVE/MRI.COM-G2 海氷: 同化無し	大気: JRA-3Q (再予報)、全球速報解析 (現業運用時) 陸面: オフライン地表面解析値 海洋: MOVE/MRI.COM-G3 海氷: 3D-Var
初期摂動	大気: 熱帯・北半球 BGM 海洋: 大気 BGM 駆動 3D-Var	大気: 熱帯・北半球・南半球 BGM 海洋: 海洋解析誤差摂動
モデル摂動	確率的物理過程強制法 (大気のみ)	
アンサンブルメンバー数	13 メンバー/5 日	5 メンバー/日

*GSM1011C および GSM2003C はそれぞれ GSM1011 および GSM2003 に対して季節予報用の改良・調整を加えたもの

度・湿度依存性を導入し (Komori et al. 2020; Bechtold et al. 2008)、その鉛直最小値を Tokioka et al. (1988) に従う最小エントレインメント率条件に適合させる。これらの変更により、東太平洋の熱帯収束帯 (ITCZ) 域で過少な下層雲バイアスが大きく改善し、また対流圏中層が乾燥している場で深い積雲が抑制される観測事実をよりよく表現できるようになった。層積雲スキームの発動条件に利用する指数には CPS2 に引き続き Kawai et al. (2017) を採用した。CPS2 には南半球夏季に南極海の海氷が顕著に融解するバイアスがあり、これと関連して南大洋には海面下向き短波放射フラックスの過大バイアスが見られた。CPS3 ではこの領域に多く存在する対流圏下層の過冷却水雲の再現性を向上させることでバイアスを軽減した (Forbes and Ahlgrimm 2014; Kay et al. 2016; Chiba and Komori 2020)。海上ガスト風には境界層内の自由乱流 (Godfrey and Beljaars 1991) によるものに加えて、深い対流に駆動される成分 (Redelsperger et al. 2000) を新たに導入した。海洋モデルでは表現しきれない海面水温 (SST) の日変化は、大気モデル内で表現する。CPS3 では、Zeng and Beljaars (2005) を拡張して水温の鉛直構造の変化を考慮しながら熱収支を解けるよう精緻化を行い、水温日変化サイクルの再現性を向上させた。CPS2 では北半球大陸上の地表面付近に乾燥バイアスや気温の年々変動の過小バイアスがあった。これらを改善するため、サブグリッドスケールの湖面を考慮できるようモデルの陸比を変更し (図 4.11.2)、水-氷-雪の間の相変化および熱伝導に伴う湖水と湖面水温の変動を予測する熱力学スキームを導入した。その強制力のひとつである地表面下向き短波放射フラックスには、粗い解像度の低負荷計算設定 (1 時間間隔、東西 4 格子間隔) でも地表面への正味入射を良好に評価できる補正スキーム (Hogan and Bozzo 2015; Hogan and Hirahara 2016) を導入した。モデルに与えるオゾン濃度気候値は、気象研究所化学気候モデル MRI-CCM2 (Deushi and Shibata 2011) を用いた解析値に基づく気候値 (1981-2010 年平均) に更新した。温室効果ガス濃度については、JRA-3Q と同様に直近まで観測に基づく値を用い、2017 年以降は中程度の排出量を想定する CMIP6 の SSP2-RCP4.5 シナリオを選択して用いる。エアロゾル濃度分布には

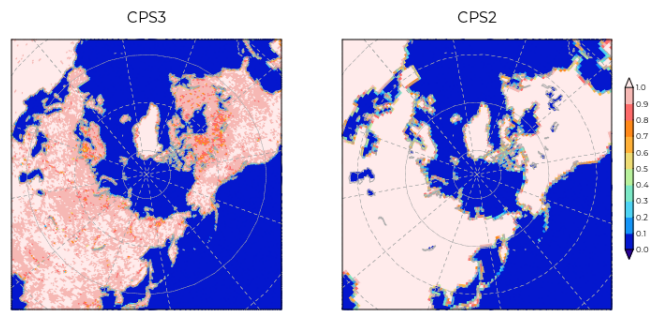


図 4.11.2 CPS3 および CPS2 の陸比

GSM2003 と同様に月別気候値 (Yabu et al. 2017) を用いる。ただし、1991 年のピナツポ火山噴火時のように顕著なエアロゾル変動が予測結果に無視できない影響を与えることも想定される。CPS3 では、火山性エアロゾル濃度分布を入手できればその気候影響 (直接効果のみ) を評価できるよう、光学特性パラメータの拡充や外部ファイル読み込み機能を実装した。本オプションは現業プロダクトには反映できないが、濃度分布を入手次第、予報の参考資料の作成あるいは事後評価に用いることも出来る。

(2) 海洋・海氷モデル

海洋・海氷モデルには、気象研究所で開発された気象研究所共用海洋モデル MRI.COM (Tsujino et al. 2017) を利用する。モデルの基本バージョンには開発時点の最新版であった v4.6 を利用した。MRI.COM はビジネス近似を施したプリミティブ方程式を有限差分法で解いている。CPS3 では、CPS2 と同様に水平座標に全球三極座標を採用しつつ、その解像度を東西 0.25° × 南北 0.25° (渦許容解像度) まで引き上げた。鉛直座標には、急峻な海底地形に沿う流れがより精緻に再現できる z^* 座標 (Adcroft and Campin 2004) を採用した。海氷モデルでは、CPS2 と同様に海氷厚で分類した 5 つのカテゴリーの海氷の移流や生成・成長・融解を扱う (Tsujino et al. 2017)。

図 4.11.3 は、1999 年 12 月頃の太平洋熱帯域東部の SST を解析と予報で比較したものである。この年はラニーニャ現象が発生していたことから、赤道湧昇に伴

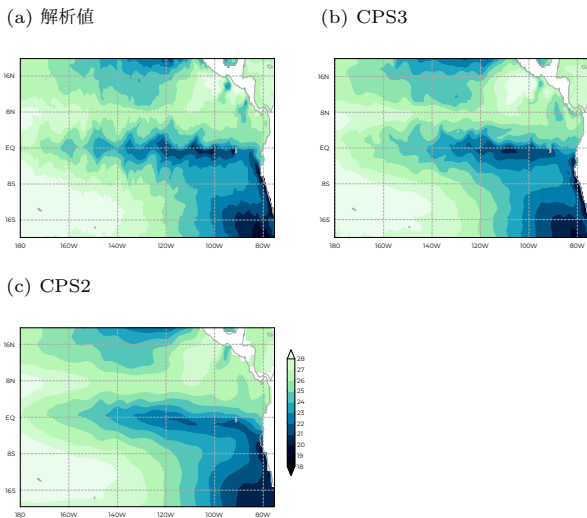


図 4.11.3 1999 年 12 月 22-26 日の 5 日平均海面水温 [°C]。
 (a) 海面水温解析値には Merchant et al. (2014) を利用。
 (b)CPS3 および (c)CPS2 は予測 11-15 日目。

う低温域と熱帯不安定波 (TIW) に伴う冷水の南北蛇行が平年より明瞭に見られ、海洋モデルが高解像度化した CPS3 ではそうした SST の微細構造をより現実的に再現できる (Karnauskas et al. 2007; Graham 2014) ようになっている。TIW はその蛇行を通じて赤道とその南北の熱交換を促進する働きがあり、ENSO 発生時には太平洋赤道域の SST に対して負のフィードバックをもたらす (Vialard et al. 2001; An 2008) ことが報告されているため、CPS2 に見られた ENSO の過発達バイアスの抑制にも高解像度化の効果が及ぶことが期待される。

(3) 予測初期値

大気・地表面初期値

再予報時には、大気初期値に JRA-3Q を利用する。一方、現業運用時の JRA-3Q の計算開始時刻は解析対象時刻より 1 日以上遅れることから、CPS3 は現業運用時の計算開始時間の前倒しのため、より早く解析を行う GA を利用する。再予報と現業で一貫しない初期値を用いることになるが、大気初期値の違いによる季節予報への影響は小さいことを事前に確認している。地表面初期値は、予報モデルに用いるものと同じ仕様のオフライン地表面モデルを大気解析値（遅延解析は JRA-3Q、速報解析は GA）で駆動して作成する。これによりバージョンや解像度の不一致による予報初期ショックを避け、CPS3 のみに導入されている湖面スキームや SST 日変化スキームの初期化を可能にしている。

海洋・海水初期値

CPS3 の海洋初期値は、新全球海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-G3 で作成されている。気象庁数値予報開発センターにおいては対象とする現象に

じて MRI.COM と MOVE (Usui et al. 2006) を利用した海洋データ同化システムを複数運用しているが、このうち 3 代目の全球同化システムを MOVE/MRI.COM-G3 (MOVE-G3) と呼んでいる。表 4.11.2 に、旧全球海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-G2 (Toyoda et al. 2013, MOVE-G2) との主な仕様の違いを示す。以下では、これら変更のうち主要なものを順に説明する。

まず着目すべき点として、4 次元変分法 (4D-Var) の導入と、それに伴い 2 つの解像度のモデルを導入したことが挙げられる。CPS3 の開発にあたっては予報モデルの海洋部分を高解像度化したため、予報モデルに初期値を提供する海洋データ同化においても予報モデルと同じ 0.25° のモデルを用いる必要があった。その一方で、気象研究所で開発された MRI.COM のアジョイントモデル及び海洋 4D-Var の活用により流れに依存する背景誤差共分散を考慮し、観測をより適切に利用することも望まれた。予報モデルの高解像度化と 4D-Var の導入という計算機負荷の大きな 2 つの変更を両立するため、まず 1°×0.3-0.5° の低解像度モデルで 4D-Var を行い (G3A)、次にその水温・塩分場を Incremental Analysis Updates (IAU; Bloom et al. 1996) と呼ばれる手法で 0.25° の高解像度モデルに与える (G3F) という二段構えのシステムを採用した。これらは領域海洋同化で既に導入されている現業運用実績のある手法である (Usui et al. 2015)。この手法により、4D-Var の反復計算にかかる計算機資源を抑えつつ、0.25° モデルにより直接 3 次元変分法 (3D-Var) を行う場合よりも精度を向上させることが出来る。G3A と G3F の設計思想は、大気 4D-Var に使われているインナーモデルとアウトターモデルの関係に近く、モデル初期値の解像度変換を行わない¹ため、それに伴う計算不安定等を生じないという利点がある。

ここで、新旧システムの海洋再解析精度を評価したものを図 4.11.4 に示す。この図から、多くの海域で G3A において MOVE-G2 より誤差が減少していることが分かる。特に SST や南大洋の 100m 深水温で顕著な改善が見られており、同化される面的 SST プロダクトの変更や 4D-Var の導入がこれに寄与していると考えられる。一方で、沿岸域や海水縁など局所的に誤差が増加している原因の調査は今後の課題である。

もう一つの大きな改良点としては、海水密度同化の導入が挙げられる (Toyoda et al. 2011, 2016)。海水の予報初期値について、CPS2 ではデータ同化システムを持たなかったため、予報-予報サイクル (水温・塩分のみを解析した MOVE-G2 内のモデル予報値) を使用していた。また、大気強制力として使用していた JRA-55 (Kobayashi et al. 2015) の海面下向き短波放射フラックスが過大だったことから、衛星観測に合わせるように経験的な補正を加えて同化に用いていた。

¹ 2 種類のトラジェクトリを持つ点が大気 4D-Var と異なるが、トラジェクトリ間の乖離は大きくない。

表 4.11.2 全球海洋データ同化システムの仕様

システム名	MOVE-G3		
	MOVE-G2	G3A (低解像度 4D-Var)	G3F (高解像度 ダウンスケーリング)
運用開始	2015 年 6 月	2022 年 2 月	
支配方程式	自由表面のプリミティブ方程式を有限差分法で解く		
水平解像度	1°(経度)×0.3-0.5°(緯度)	1°(経度)×0.3-0.5°(緯度)	0.25°(経度)×0.25°(緯度)
鉛直解像度	52 層+海底境界層	60 層+海底境界層	60 層
観測データ	水温 (海面及び海中)、 塩分、海面高度	水温 (海面及び海中)、 海面高度、海水密接度	海水密接度
同化される 面的 SST プロダクト	COBE-SST (Ishii et al. 2005)	MGDSST (栗原ほか 2006)	-
解析手法	3D-Var/FGAT と IAU	4D-Var と IAU	G3A の水温・塩分に IAU
海水同化 大気強制力	- JRA-55	密接度 3D-Var と IAU JRA-3Q と全球速報解析	
解析ウィンドウ	10 日	10 日 (IAU 期間 5 日 + 同化期間 5 日)	5 日
初期値作成頻度	5 日毎に 5 メンバー (2 ストリーム)	毎日 5 メンバー (5 ストリーム)	
初期値摂動作成手法	大気強制力に成長モード 育成による摂動を与える	4D-Var の探索履歴から 解析誤差共分散を近似	摂動を含む G3A の 水温・塩分に IAU
実行形態	速報解析と遅延解析 それぞれ約 2 日と約 33 日の 観測データカットオフ	速報解析と遅延解析 それぞれ約 6 時間と約 4 日の 観測データカットオフ	

MOVE-G3 では、気象庁で衛星観測を元に解析された海水密接度データ (Matsumoto et al. 2006) を 3D-Var で同化することにより、海面フラックス補正を必要とせず、さらに観測された海水場に関する情報を解析値に反映できるようになった。3D-Var により求められた海水密接度インクリメントは、水温や塩分と同様に IAU によりモデル積分中に与えられる。変分法における解析変数は海水密接度のみであるが、IAU による海水密接度修正に伴って、海氷厚、海面塩分・水温、同化ウィンドウ中の前方積分に用いる気温などにも修正を加えている。ここで、海水密接度の 3D-Var 及び IAU は G3A と G3F のそれぞれで独立に行っている。

新たに導入された海水密接度同化の効果を示すため、図 4.11.5 に新旧システムによる海洋再解析の海水域面積偏差の推移を示す。ここで、検証に用いた気象庁全球日別 SST 解析 (MGDSST; 栗原ほか 2006) の海水密接度は MOVE-G3 に同化されたのと同じものであり対等な比較でないことに注意が必要であるが、海水密接度同化の導入により海水域面積の年々変動や季節変動がより良く表現できるようになったことが分かる。

実行形態と初期摂動作成手法にも変更が施されている。MOVE-G2 では、一回の解析で 10 日進む解析サイクルを 2 系統実行することで 5 日おきに速報解析 (予測初期値の作成) を行っていたのに対し、MOVE-G3 では一回の解析で 5 日進む解析サイクルを 5 系統実行することで毎日速報解析を行っている。また、MOVE-G3 では大気強制力に JRA-3Q と GA を併用している。均質性に優れる前者を遅延解析に、即時性や大気初期値との整合性に優れる後者を速報解析に利用することで、再解析からの一貫性を保ちつつ、実時間からおおよそ 6 時間遅れで海洋モデル初期値を提供できるようになった (MOVE-G2 ではおおよそ 60 時間遅れ)。さらに、MOVE-G3 では後述の手法により、毎日 5 メンバーの異なる海洋初期値を作成している。

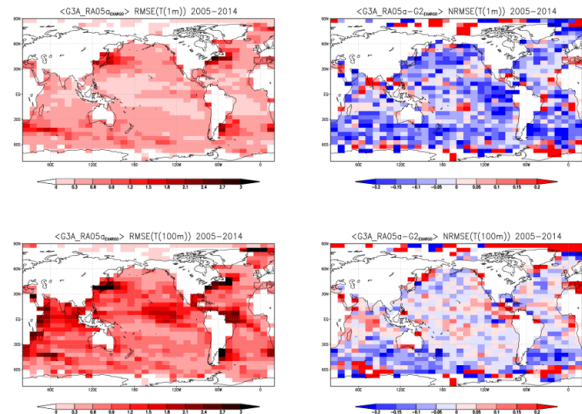


図 4.11.4 海洋再解析の精度評価。新旧システムにより Argo フロート (現場観測) の 2 割を同化しない再解析実験を 2005-2014 年の期間で行い、同化しない観測により水温解析の二乗平均平方根誤差 (RMSE) を評価したもの。上段: 1m 水温 (SST)、下段: 100m 水温。左列は MOVE-G3(G3A) の水温 RMSE [K]、右列は旧システム MOVE-G2 を基準とした RMSE の増減率を示している (青が改善)。

(4) 初期摂動

大気モデル初期摂動の作成手法

大気モデルの初期値には、メンバーごとに異なる初期摂動を付加して初期値の不確実性を表現する。CPS3 では BGM 法 (Breeding of Growing Mode 法; Toth and Kalnay 1993; Chikamoto et al. 2007) に基づいて、北半球 (20°-90°N)、熱帯 (20°S -20°N) および南半球 (20°-90°S) の各領域の上位 2 つの成長モードを育成し、それらを組み合わせて初期摂動パターンを作成する。摂動の成長は北・南半球は 500hPa 高度を、熱帯は 200hPa の速度ポテンシャルを用いて評価する。大気初期値の解析精度 (不確実性) は長期的に改善 (縮小) しているものの、簡素化のため初期スプレッドの規格化の割合は再予報から現業予報まで一定とする (500hPa 高度は気候学的変動の 14.5%、200hPa 速度ポテンシ

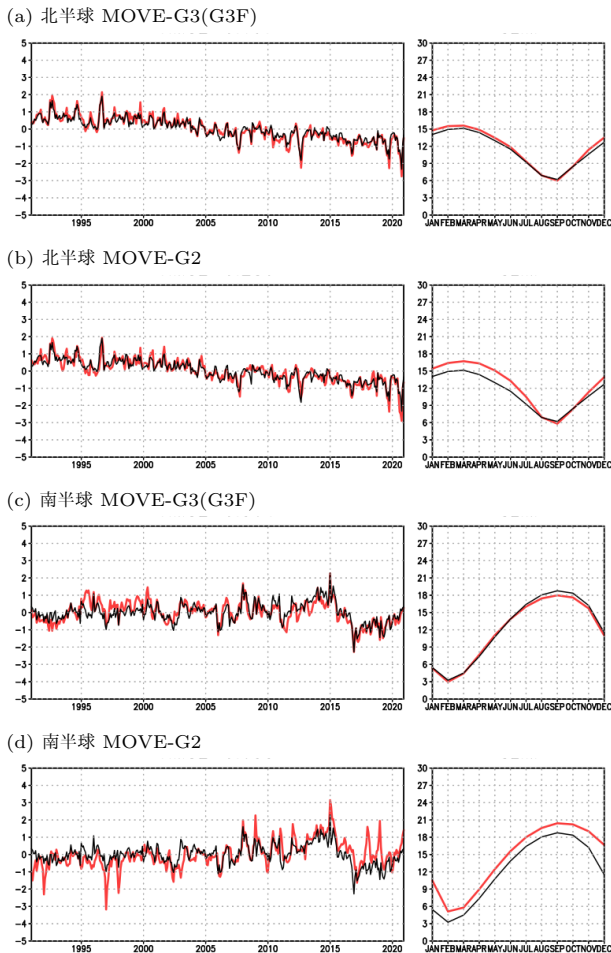


図 4.11.5 全球海洋再解析における海氷域面積偏差 (10^6 km^2) の時系列。赤線は海洋データ同化システム、黒線は MGDSST の値で、各パネルの右側には各解析の季節変動（月別気候値）を示してある。

ルは 20%)。

海洋モデル初期摂動の作成手法

海洋初期値には、解析誤差共分散行列を近似する摂動(藤井ほか 2022)を初期値に加える。MOVE-G3(G3A)の 4D-Var で利用する準ニュートン法では、制御変数の値をずらし、その時の評価関数の勾配を求める反復計算を繰り返す。その際に得られる制御変数のずれと勾配のずれを表すベクトルから解析誤差共分散行列の上位固有値・固有ベクトルの組の近似値を求めることが出来る。CPS3 では、インパクト実験の結果を踏まえて摂動の大きさが解析インクリメントの 0.5 倍となるようにスケリングした固有ベクトルを組み合わせることで初期摂動を作成する。

(5) 現業運用スケジュール

CPS3 の現業運用スケジュールは、CPS2 から大きく変更されている。CPS2 の予測計算の実行頻度は 5 日間一度で、1 初期日あたりのメンバー数は 13 であった。積分計算は実時間から 2 日遅れて半月 3 日目に開始され、4 日かけて実施されていた(図 4.11.6)。これに対

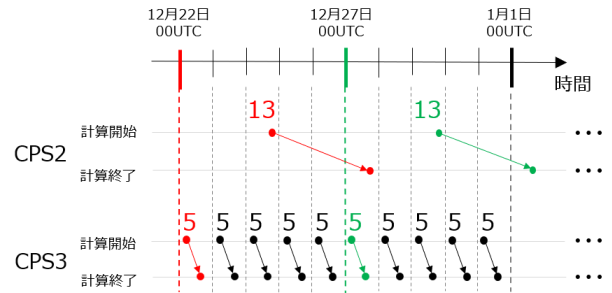


図 4.11.6 CPS2 および CPS3 の予報実行スケジュール。図中の数字は 1 初期日あたりのメンバー数を、矢印は予測計算を開始・終了する時刻を示す。CPS2 と CPS3 の違いを強調するため、12 月 22 日 00UTC および 12 月 27 日 00UTC を初期値とする予測計算に関わる数字・矢印のみ、それぞれ赤および緑で描画している。

して CPS3 は仕様を大きく見直して、毎日 00UTC から始まる 5 メンバーの予測計算を当日のうちに完了させる。この変更は、システムを簡素化して保守・運用をしやすいだけでなく、予測結果の利用者にとっても 5 日間隔の制約に縛られずに情報を作成することができるよう、利便性の向上を意図したものである。また 2020 年 3 月より季節アンサンブル予報システムで予測された SST は、日々実行される全球アンサンブル予報システムの下部境界条件(2 週目~)としても利用されている。今回の運用スケジュールの変更により予測 SST の時間遅れが短縮され、より高頻度で更新されるようになるため、全球アンサンブル予報システムの精度向上にも寄与することが期待される。

4.11.3 精度評価

本項では、1991-2020 年を対象とする再予報に基づいて CPS2 と CPS3 の予測精度を比較する。この再予報では、CPS2 と仕様を揃えて各月の月末半月初日とその 15 日前の 00UTC から各 5 メンバー予報を行う(Takaya et al. 2018)。季節内予測の検証(第 4.11.3 項(1))には各初期日の 5 メンバーをそのまま用い、季節予測の検証(第 4.11.3 項(2))には各月 2 初期日を合わせて合計 10 メンバーの LAF(Lagged Average Forecast; Hoffman and Kalnay 1983)アンサンブルを構成して用いる。以降、「1 月初期値の予報」と表現した場合のリードタイム 0 か月目は 12 月 12 日と 12 月 27 日の 10 メンバーによる 1 月の月平均値となるようにリードタイムを定義する。検証データには、JRA-3Q、MGDSST、NOAA OLR(Liebmann and Smith 1997)および GPCP v2.3(Adler et al. 2018)を利用する。

(1) 季節内予測

季節内変動の予測を見ると、特にマッデン・ジュリアン振動(MJO)の改善が顕著である(図 4.11.7)。CPS2 では、予測初期に見られるインド洋中部~東部の対流活発位相が同じ経度帯で持続しやすいバイアスがあった。これにより MJO の東進も不明瞭になる傾向があっ

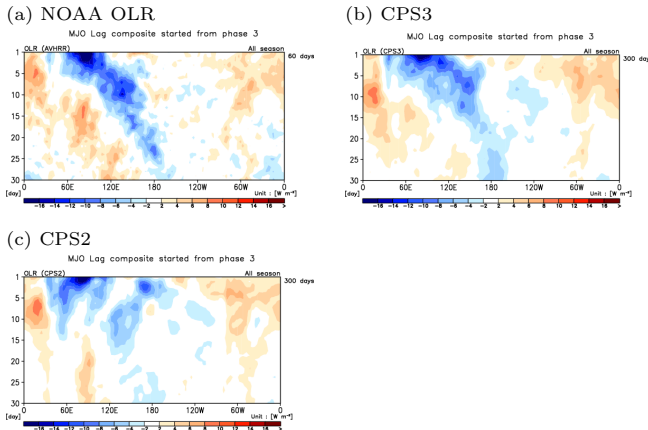


図 4.11.7 インド洋域 (Phase-3) に MJO の対流活発域の初期位相があるときの大気上端外向き長波放射量 (OLR) ラグ時間合成図 (全季節)。横軸は経度、縦軸は予報時間 [日]。位相の定義は Wheeler and Hendon (2004) に従う。

だが、CPS3 では対流活発域やそれに引き続く不活発域の東進を良く表現できるようになっている。全季節・全位相で合算した MJO 指数の相関係数 (図略) によると、CPS2 は 0.5 以上のスコアをリードタイム 21 日目まで維持していたのに対し、CPS3 はこれを 27 日目まで延長している。そのほかブロッキング現象の出現頻度バイアスにも改善が見られる (図 4.11.8)。CPS2 と比較すると、特にヨーロッパのブロッキングの頻度過少バイアスが大きく軽減されており、大気モデルの水平・鉛直高解像度化がバイアス改善に効果があるとする先行研究と整合的である (Anstey et al. 2013; Schiemann et al. 2017; Berckmans et al. 2013)。ただし、それらの研究で指摘されている高解像度化による高周波擾乱や大規模山脈の地形効果の表現向上以外にも、CPS3 については地形性重力波抵抗スキームの刷新をはじめとする物理過程の精緻化も改善に寄与した可能性がある。

(2) 季節予測

気象庁はエルニーニョ・ラニーニャ現象の指標と監視・予測に NINO.3 (150°-90°W, 5°S-5°N) 領域で平均した SST を利用している。図 4.11.9 は、5 月初期値の NINO.3 領域に対する予測 SST 偏差を解析と比較したものである。CPS2 には初期値に与えられた ENSO 初期シグナルを過度に発達させて大外しに至る事例が多いことが課題となっていた。図示された事例のうち例えば 2010 年代に着目すると、CPS2 には直近数か月の変化傾向を外挿したような大外しがよく見られるが、CPS3 は同じ事例を対象とする予測で大外しを軽減できていることが分かる。その一方、1997 年や 2015 年のような大振幅のエルニーニョは適切に予測できていることから推察されるように、CPS3 はこれまでより多様な ENSO を表現できるようになっており、不完全ながら事例に応じた予測スプレッドの変動も表現できるようになっている。ENSO の単調な発達を避け、多様な

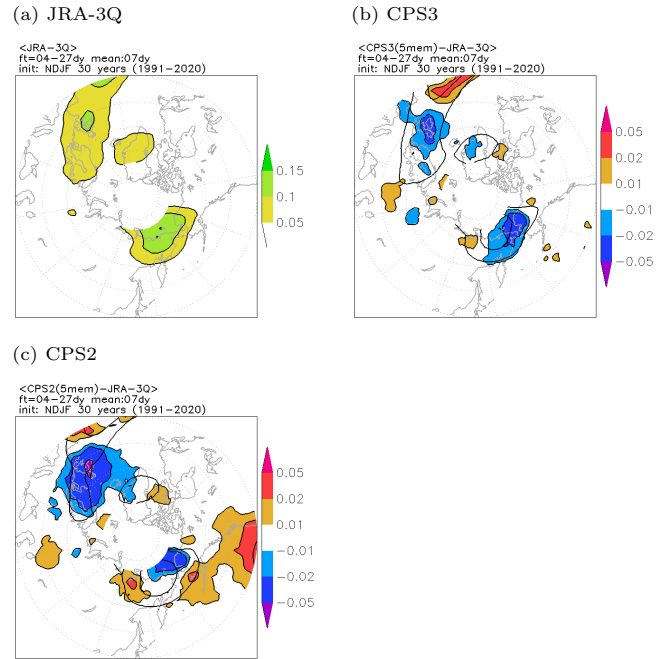


図 4.11.8 (a)JRA-3Q のブロッキング高気圧の出現頻度気候値、(b)CPS3 および (c)CPS2 の JRA-3Q との差。ブロッキングの定義は Scherrer et al. (2006) の方法を用いる (詳細は新保 (2017) を参照)。1991-2020 年の 11-2 月、リードタイム 4-27 日目 (7 日平均の中心日) を対象としている。出現頻度気候値を示す等値線 (黒線) の間隔は 0.05 で、0.05 以上を描画。本手法では 75°N 以北の値は定義しない。

予測結果を表現できるようになった要因として、海洋初期値の改善や、モデルの性能改善が複合的に寄与していると考えられる。図 4.11.7 で確認したように、MJO については対流活発域が特定の経度帯にとどまる誤差が軽減し、ENSO に対してより多様な海上風強制をもたらすことができるようになっている。また、ENSO に対する負のフィードバックとして寄与するプロセスに着目すると、海洋モデル高解像度化による TIW の表現改善や、浅い積雲や層積雲スキームの変更等による負の短波放射フィードバック (Chiba and Kawai 2021) の改善が ENSO 過発達の抑制に寄与していると考えられる。NINO.3 予測 SST と MGDSST とのアノマリー相関係数 (図 4.11.10) は有意では無いものの改善傾向であり、二乗平均平方根誤差 (RMSE) については全てのリードタイムで有意に改善している。予測のスプレッドには過少傾向は見られるものの、スプレッドの変化幅に対して RMSE の縮小幅の方が大きいことから、アンサンブル予測システムとしての性能の目安であるスプレッドスキル比は改善している。特にリードタイム 0 か月目については、RMSE の縮小とスプレッドの拡大がともに有意であり、海洋初期値の精度向上 (図 4.11.4) や CPS3 で新たに導入した海洋摂動が寄与していると考えられる。なお、別途行った 3D-Var および 4D-Var 海洋解析値による予報精度比較実験では、

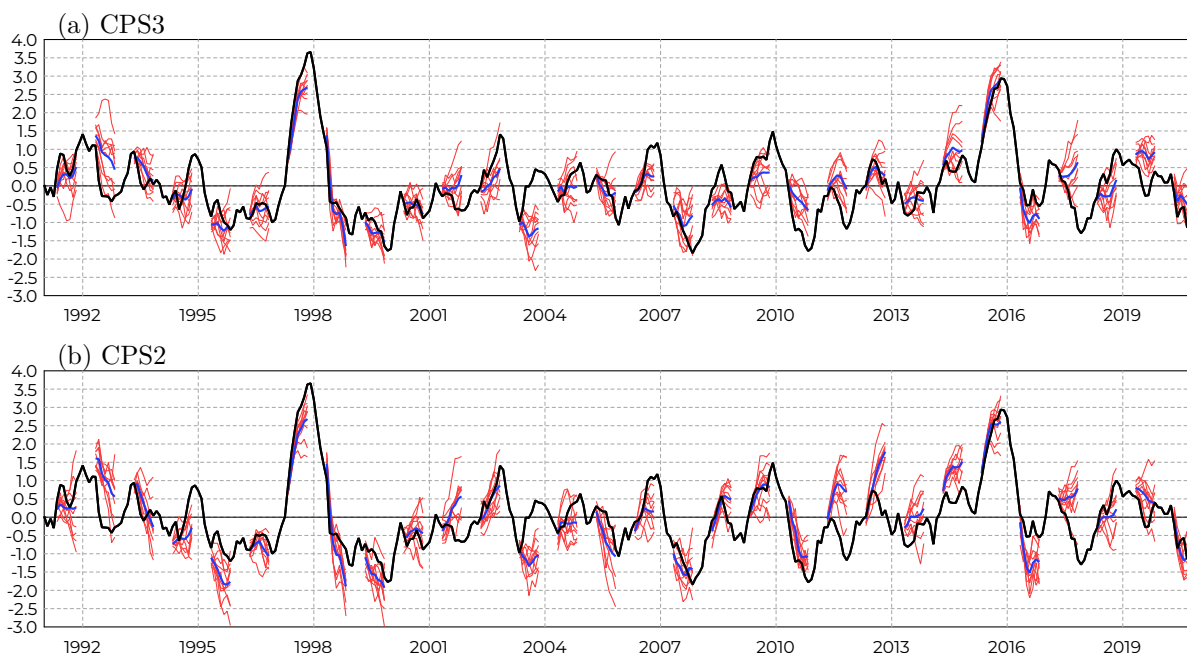


図 4.11.9 NINO.3 領域平均 SST 偏差時系列。(a)CPS3 および (b)CPS2 による、各年の 5 月初期値 (4 月 11 日および 26 日を初期値とする 10 メンバー LAF) のリードタイム 0-6 か月目 (5-11 月) の予測。黒線は MGDSST、赤細線は各メンバー、青線はアンサンブル平均。

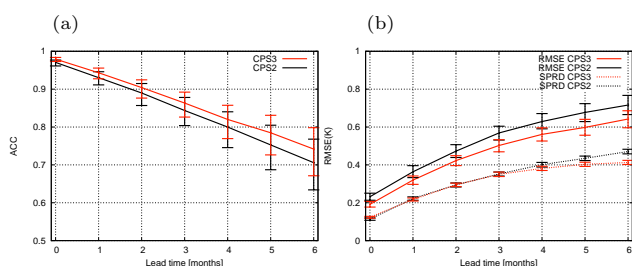


図 4.11.10 (a)CPS3 (赤) および CPS2 (黒) と MGDSST との NINO.3 SST のアノマリー相関係数, (b) 二乗平均平方根誤差 (実線) およびスプレッド (破線)。再予報 (1991-2020 年の各月初期日から計 360 事例を抽出) に基づく。実線は 1000 回のブートラップ試行の平均値を、エラーバーは 95%信頼区間を示す。

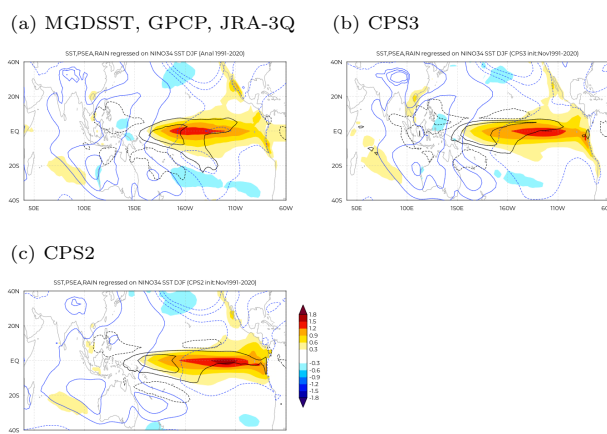


図 4.11.11 北半球冬季 (12-2 月) の NINO 3.4 平均領域 SST に回帰した SST (陰影; K)、降水量 (黒線)、海面気圧 (青線) の回帰係数。1991-2020 年 11 月初期値の再予報の統計に基づく。等値線は、降水量は -5, -3, -1, 1, 3, 5 [mm/day] に、海面気圧 -1.2, -0.8, -0.4, 0.4, 0.8, 1.2 [hpa] に描画 (負の値は破線)。

特にリードタイム 1 か月目程度まで 4D-Var 化による RMSE 縮小が有意に見られている。

ENSO 発生時の典型的な大気海洋変動パターンを確認するため、図 4.11.11 に NINO 3.4 (170°-120°W, 5°S-5°N) 領域平均 SST に回帰した SST、降水量および海面気圧の分布を示す。解析の SST を見ると、再予報の対象となった 1991-2020 年では ENSO が中部太平洋を中心に変動する傾向があることが分かる。その一方で、CPS2 には東部太平洋に変動の中心が偏り、また降水偏差を伴って大きく変動するバイアスが見られるが、CPS3 は不十分ながらこのバイアスを改善している。またフィリピン付近の低 SST 偏差と高気圧偏差の対についてもより明瞭に表現できるようになり、解析に近づいている。

図 4.11.12 は、季節予報の主要予測指標の一つである 2m 気温のアノマリー相関係数を新旧システムで比較している。ここでは、現業季節予報の発表形態に合わせて、3 か月予報 (各月初期値のリードタイム 1-3 か月目)、暖候期予報 (2 月初期値のリードタイム 4-6 か月目 (6-8 月)) および寒候期予報 (9 月初期値のリードタイム 3-5 か月目 (12-2 月)) に相当するリードタイムの結果を示している。対象とする季節によって傾向に差があるものの、どの初期月についても同等~改

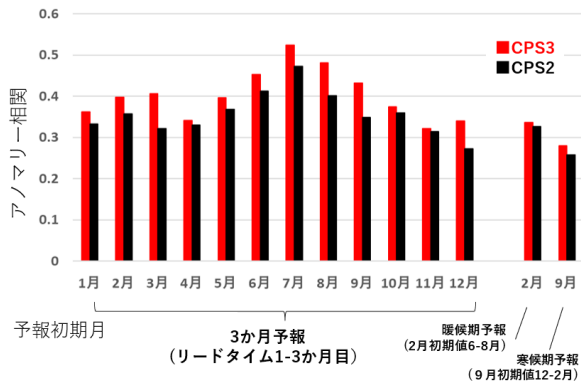


図 4.11.12 北半球域 (20°-90°N) で平均した CPS3 (赤) および CPS2 (黒) と JRA-3Q との 2m 気温アノマリー相関係数

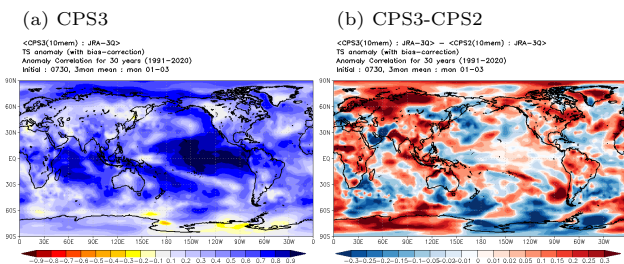


図 4.11.13 (a)CPS3 における 2m 気温のアノマリー相関係数および (b)CPS3 と CPS2 のアノマリー相関係数の差。

善傾向を示しており、特に北半球の夏 (6-8 月) から秋 (9-11 月) にかけての予報については一貫したスコア改善が見られる。スコアの水平分布を確認するため、8 月初期値の秋を対象とするアノマリー相関係数の分布 (図 4.11.13) を確認すると、熱帯域海洋上では太平洋中部～東部やインド洋でスコアが中立～改善となっており、インド洋ダイポール現象や ENSO に伴う大気海洋変動の予測精度が高まっていることを示唆する。一方、北極海を見るとカラ海やラプテフ海などの海氷縁が位置する緯帯でも明瞭な改善が見られる。CPS3 では、氷上アルベドスキームの改良や、予測初期においては海氷密接度データ同化の導入なども寄与して海氷予測精度が大きく改善されたこと別途確認しており、海氷密接度とともに変動する 2m 気温の予測にもその影響が表れたと考えられる。陸域では、熱帯域のアフリカ大陸赤道域やアマゾン域、中高緯度大陸上でも中立～改善傾向であり、陸面・湖面過程の精緻化が改善に寄与した可能性がある。

4.11.4 まとめと今後の課題

本節では CPS3 の仕様と再予報に基づく精度評価結果について報告した。最新の長期大気再解析 JRA-3Q の利用に加えて、海洋データ同化には 4 次元変分法を導入し、海氷データ同化を新規導入したことなどにより予報初期値の品質が向上した。モデルの高解像度化

や物理過程の精緻化も加わり、MJO やブロッキング高気圧などの季節内変動から、エルニーニョ現象に至る季節規模の現象まで、幅広い時間スケールの変動の表現が改善した。また現業運用スケジュールを見直したことにより、これまでより予測情報を利用しやすくなった点は精度に陽に表れない改善である。

今後、CPS3 を季節内規模の予測にも対応できるシステムとするには、1 実行あたりのアンサンブルメンバー数の増強の他、大気と海洋が相互作用せずに解析されていることやモデル仕様の違いに起因する予報初期ショックを軽減していく必要がある。また、季節規模の予測のさらなる改善には、CPS3 では固定されているオゾン濃度分布の変動を考慮するなど、新たな予測可能性を抽出し、実現可能なものからシステムに組み込んでいくことが必要である。今後も引き続きこうした開発課題への取り組みを進めることによって予測精度の向上を図るとともに、より利活用しやすいシステムとなるよう改善を積み重ねる予定である。

参考文献

- Adcroft, A. and J.-M. Campin, 2004: Rescaled height coordinates for accurate representation of free-surface flows in ocean circulation models. *Ocean Modell.*, **7**, 269–284.
- Adler, R., M. Sapiano, G. Huffman, J.-J. Wang, G. Gu, D. Bolvin, L. Chiu, U. Schneider, A. Becker, E. Nelkin, P. Xie, R. Ferraro, and D.-B. Shin, 2018: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation. *Atmosphere*, **9**, 138.
- An, Soon-Il, 2008: Interannual variations of the tropical ocean instability wave and ENSO. *J. Climate*, **21**, 3680–3686.
- Anstey, J. A., P. Davini, L. J. Gray, T. J. Woollings, N. Butchart, C. Cagnazzo, B. Christiansen, S. C. Hardiman, S. M. Osprey, and S. Yang, 2013: Multi-model analysis of Northern Hemisphere winter blocking: Model biases and the role of resolution. *JGR: Atmospheres*, **118**, 3956–3971.
- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674–701.
- Bechtold, P., M. Köhler, T. Jung, F. Doblas-Reyes, M. Leutbecher, M. J. Rodwell, F. Vitart, and G. Balsamo, 2008: Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1337–1351.
- Beljaars, A. C. M., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent oro-

- graphic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1327–1347.
- Berckmans, J., T. Woollings, M.-E. Demory, P.-L. Vidale, and M. Roberts, 2013: Atmospheric blocking in a high resolution climate model: influences of mean state, orography and eddy forcing. *Atmospheric Sci. Lett.*, **14**, 34–40.
- Bloom, S. C., L. L. Takacs, A. M. Da Silva, and D. Ledvina, 1996: Data Assimilation Using Incremental Analysis Updates. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1256–1271.
- Chiba, J. and H. Kawai, 2021: Improved SST short-wave radiation feedback using an updated stratocumulus parameterization. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 7–03.
- 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.*, 7–03.
- 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**, L04806.
- 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.
- Forbes, R. M. and M. Ahlgrim, 2014: On the representation of high-latitude boundary layer mixed-phase cloud in the ECMWF global model. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 3425–3445.
- 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, 投稿中.
- Godfrey, J. S. and A. C. M. Beljaars, 1991: On the turbulent fluxes of buoyancy, heat and moisture at the air-sea interface at low wind speeds. *JGR: Oceans*, **96**, 22 043–22 048.
- Graham, T., 2014: The importance of eddy permitting model resolution for simulation of the heat budget of tropical instability waves. *Ocean Modell.*, **79**, 21–32.
- Hoffman, R. N. and E. Kalnay, 1983: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A*, **35A**, 100–118.
- Hogan, R. J. and A. Bozzo, 2015: Mitigating errors in surface temperature forecasts using approximate radiation updates. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **7**, 836–853.
- Hogan, R. J. and S. Hirahara, 2016: Effect of solar zenith angle specification in models on mean short-wave fluxes and stratospheric temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 482–488.
- Hunke, E. C. and W. H. Lipscomb, 2010: *CICE: the Los Alamos sea ice model documentation and software user’s manual version 4.1*. Los Alamos National Laboratory, 76 pp.
- 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.
- Iwasaki, T., S. Yamada, and K. Tada, 1989: A parameterization scheme of orographic gravity wave drag with two different vertical partitionings. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 11–27.
- JMA, 2013: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. *Appendix to WMO Numerical Weather Prediction Progress Report, Tokyo, Japan*.
- JMA, 2019: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. *Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System and Numerical Weather Prediction, Tokyo, Japan*.
- 金浜貴史, 2012: 重力波抵抗. 数値予報課報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 100–110.
- 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.
- Karnauskas, K. B., R. Murtugudde, and A. J. Busalacchi, 2007: The effect of the Galápagos islands on the equatorial Pacific cold tongue. *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 1266–1281.
- Kawai, H., T. Koshiro, and M. J. Webb, 2017: Interpretation of factors controlling low cloud cover and low cloud feedback using a unified predictive index. *J. Climate*, **30**, 9119–9131.
- Kay, J. E., L. Bourdages, N. B. Miller, A. Morrison, V. Yettella, H. Chepfer, and B. Eaton, 2016: Evaluating and improving cloud phase in the Community Atmosphere Model version 5 using spaceborne lidar observations. *JGR: Atmospheres*, **121**, 4162–4176.
- Kobayashi, S., Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuyoshi, Y. Harada, C. Kobayashi, and H. Naoe, 2021: JRA-3Q: Japanese reanalysis for three quarters of a century. *WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis*.

- sis/ECMWF annual seminar 2021, WMO/WCRP, 04-2, <https://symp-bonn2021.sciencesconf.org/data/355900.pdf>.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, Ayataka Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Komori, T., S. Hirahara, and R. Sekiguchi, 2020: Improved representation of convective moistening in JMA's next-generation coupled seasonal prediction system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4–05.
- 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.
- Liebmann, B. and C. A. Smith, 1997: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275–1277.
- 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. *14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, AMS, P2.21.
- Merchant, C. J., O. Embury, J. Roberts-Jones, E. Fiedler, C. E. Bulgina, G. K. Corlett, S. Good, A. McLaren, N. Rayner, S. Morak-Bozzo, and C. Donlon, 2014: Sea surface temperature datasets for climate applications from Phase 1 of the European Space Agency Climate Change Initiative (SST CCI). *Geosci. Data J.*, **1**, 179–191.
- Pan, D.-M. and D. A. Randall, 1998: A cumulus parameterization with a prognostic closure. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 949–981.
- Redelsperger, J.-L., F. Guichard, and S. Mondon, 2000: A parameterization of mesoscale enhancement of surface fluxes for large-scale models. *J. Climate*, **13**, 402–421.
- Scherrer, S. C., M. Croci-Maspoli, C. Schwierz, and C. Appenzeller, 2006: Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region. *Int. J. Climatol.*, **26**, 233–249.
- Schiemann, R., M.-E. Demory, L. C. Shaffrey, J. Strachan, P. L. Vidale, M. S. Mizieliński, M. J. Roberts, M. Matsueda, M. F. Wehner, and T. Jung, 2017: The resolution sensitivity of Northern Hemisphere blocking in four 25-km atmospheric global circulation models. *J. Climate*, **30**, 337–358.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- 新保明彦, 2017: ブロッキング高気圧. 平成 28 年度季節予報研修テキスト「1 か月予報システムの更新」, 38–41.
- Takaya, Y., T. Yasuda, Y. Fujii, S. Matsumoto, T. Soga, H. Mori, M. Hirai, I. Ishikawa, H. Sato, A. Shimpo, M. Kamachi, and T. Ose, 2017: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 1 (JMA/MRI-CPS1) for operational seasonal forecasting. *Clim. Dyn.*, **48**, 313–333.
- 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.
- Tokioka, T., K. Yamazaki, A. Kitoh, and T. Ose, 1988: The equatorial 30–60 day oscillation and the Arakawa-Schubert penetrative cumulus parameterization. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 883–901.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317–2330.
- Toyoda, T., Y. Fujii, T. Yasuda, N. Usui, T. Iwao, T. Kuragano, and M. Kamachi, 2013: Improved analysis of seasonal-interannual fields using a global ocean data assimilation system. *Theor. Appl. Mech. Japan*, **61**, 31–48.
- Toyoda, T., Y. Fujii, T. Yasuda, N. Usui, K. Ogawa, T. Kuragano, H. Tsujino, and M. Kamachi, 2016: Data assimilation of sea ice concentration into a global ocean–sea ice model with corrections for atmospheric forcing and ocean temperature fields. *J. Oceanogr.*, **72**, 235–262.
- Toyoda, T., T. Awaji, N. Sugiura, S. Masuda, H. Igarashi, Y. Sasaki, Y. Hiyoshi, Y. Ishikawa, T. Mochizuki, T. Sakamoto, H. Tatebe, Y. Komuro,

- T. Suzuki, T. Nishimura, M. Mori, Y. Chikamoto, S. Yasunaka, Y. Imada, M. Arai, M. Watanabe, H. Shiogama, T. Nozawa, A. Hasegawa, M. Ishii, and M. Kimoto, 2011: Impact of the assimilation of sea ice concentration data on an atmosphere-ocean-sea ice coupled simulation of the Arctic ocean climate. *SOLA*, **7**, 37–40.
- 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**.
- Usui, N., Y. Fujii, K. Sakamoto, and M. Kamachi, 2015: Development of a four-dimensional variational assimilation system for coastal data assimilation around Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3874–3892.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi, 2006: Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Adv. Space Res.*, **37**, 806–822.
- Vialard, J., C. Menkes, J.-P. Boulanger, P. Delecluse, E. Guilyardi, M. J. McPhaden, and G. Madec, 2001: A model study of oceanic mechanisms affecting equatorial Pacific Sea surface temperature during the 1997–98 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 1649–1675.
- 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.
- Yabu, S., T. Y. Tanaka, and N. Oshima, 2017: Development of a multi-species aerosol-radiation scheme in JMA’s global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4–15.
- Yonehara, H., M. Ujiie, T. Kanehama, R. Sekiguchi, and Y. Hayashi, 2014: Upgrade of JMA’s Operational NWP Global Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6–19.
- Yonehara, H., T. Tokuhira, R. Nagasawa, M. Ujiie, A. Shimokobe, M. Nakagawa, R. Sekiguchi, T. Kanehama, H. Sato, and K. Saitou, 2017: Upgrade of parameterization schemes in JMA’s operational global NWP model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4–17.
- Yonehara, H., R. Sekiguchi, T. Kanehama, K. Saitou, T. Kinami, A. Shimokobe, D. Hotta, R. Nagasawa, H. Sato, M. Ujiie, T. Kadowaki, S. Yabu, K. Yamada, M. Nakagawa, and T. Tokuhira, 2018: Upgrade of JMA’s operational global NWP system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6–15.
- Yonehara, H., C. Matsukawa, T. Nabetani, T. Kanehama, T. Tokuhira, K. Yamada, R. Nagasawa, Y. Adachi, and R. Sekiguchi, 2020: Upgrade of JMA’s operational global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6–19.
- 吉川郁夫, 石川一郎, 安田珠幾, 2016: エルニーニョ/ラニーニャ現象の監視予測業務. 測候時報 特別号, **83**, 61–81.
- Yoshimura, H. and S. Yukimoto, 2008: Development of a Simple Coupler (Scup) for earth system modeling. *Pap. Meteor. Geophys.*, **59**, 19–29.
- Zeng, X. and A. Beljaars, 2005: A prognostic scheme of sea surface skin temperature for modeling and data assimilation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, 14605.

4.12 気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗

4.12.1 はじめに

当庁はこれまで、第1次 (JRA-25; Onogi et al. 2007) (2005年度完成) 及び第2次 (JRA-55; 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 (季節EPS) 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、現在、長期再解析データの期間延長と品質向上を図るため、1940年代末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) を実施している。JRA-3Qでは、現行のJRA-55以降の現業全球数値解析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、2021年5月には1990年代～現在まで (ストリームA) の本計算が完了した。引き続き、1960年代～1980年代 (ストリームB) 及び1940年代末～1950年代 (ストリームC) の本計算を実施中である。JRA-3Qの品質評価については、気象研究所気候・環境研究部第一研究室と協力して進めている。

JRA-3Qで用いるデータ同化システムと境界条件及び強制場の概要、ストリームA期間に利用する観測データの概要等については気象庁 (2021) で報告したとおりである。本稿では、ストリームB及びストリームC期間に利用する観測データの概要 (第4.12.2項) 及び既に計算が完了した期間 (本稿執筆2021年12月時点でストリームA期間は完了、ストリームB期間は1987年まで、ストリームC期間は1954年まで) の品質評価結果 (第4.12.3項) を述べる。

4.12.2 ストリームB及びストリームC期間に利用する観測データの概要

ストリームB期間の観測データは、JRA-55で整備した観測データセット (古林ほか 2015) を基本としつつ、再較正により均質性が向上した衛星データ等、JRA-55実施以降に新たに利用可能となった観測データセットを可能な限り収集して利用している (表4.12.1)。

ストリームC期間については、気象庁再解析では初めて対象とする期間であることから、同期間の本計算実施に向けて以下のデータソースから観測データの収集・整備を行った (表4.12.1)。

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

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

これらのデータセットに収録されている国内観測地点数は、特にストリームC前半において非常に少ないことから (例えば、国内高層観測は1947年には10を超える地点で開始されていたが、IGRA バージョン 2 で1947年まで遡れるのは2地点のみ)、気象研究所で観測原簿からデジタル化された国内9地点の地上観測データ及び館野のラジオゾンデ観測データを追加した。加えて、利根川・荒川決壊で東京など関東平野に大きな被害をもたらしたことで知られるカスリーン台風 (1947年9月) について、本事例の調査・研究に資するよう解析精度向上を図るため、前後の期間 (1947年7月～10月) の国内ラジオゾンデ観測を高層月報 (Central Meteorological Observatory 1948) からデジタル化して追加した。

4.12.3 計算完了期間の品質評価結果

(1) 2日予報スコア

図4.12.1と図4.12.2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) 誤差を示している。気象庁 (2021) で述べたとおり、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、及び、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・品質向上の効果が認められる。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

表 4.12.1 ストリーム B 及びストリーム C 期間に用いる観測データソース。無地のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものから新たに追加、又は再校正・再処理されたもの、陰影のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものと同じものである。

データ提供元	データ種別、及びデータ提供元による識別名	利用期間	備考
従来型データ			
NOAA/NCEI	ICADS R3.0	～1957年12月	Freeman et al. (2017)
	IGRA V2	～1957年12月	doi:10.7289/V5X63K0Q
NOAA/CIRES	ISPD V4	～1957年12月	doi:10.5065/9EYR-TY90
ハドレーセンター	HadISD v3.1.0.201911p	～1957年12月	Dunn (2019)
NCAR	CHUAN V1.7 (国内地点のみ利用)	～1957年12月	doi:10.5065/AHPM-FC10
	積雪深 (米国)	1957年11月～	doi:10.5065/B6MM-RS76
ECMWF		1958年1月～	Uppala et al. (2005)
		1961年1月～	
気象庁	ラジオゾンデ (国内地点)	1947年7月～10月	高層月報 (Central Meteorological Observatory 1948) からデジタル化
	ドロップゾンデ (伊勢湾台風周辺)	1959年9月21日～26日	JMA (1961) からデジタル化
気象研究所石井正好氏	地上観測 (稚内、札幌、函館、新潟、東京、神戸、潮岬、福岡、鹿児島)	～1957年12月	観測原簿からデジタル化
気象研究所釜堀弘隆氏	ラジオゾンデ (館野)	～1949年12月	科研費基盤研究 S 26220202 観測原簿からデジタル化
RIHMI	積雪深 (ロシア)	1950年1月～	http://meteo.ru/english/climate/snow.php
中国地面気象記録月報	積雪深 (中国)	1971年1月～	印刷物からデジタル化
IMH	積雪深 (モンゴル)	1975年1月～	
熱帯低気圧ベストトラック			
NOAA/NCEI	IBTrACS v03r05	ストリーム C 及び B 全期間	Knapp et al. (2010)
気象庁		1951年2月～	
衛星輝度温度			
ECMWF	VTPR	1973年1月～1979年2月	Uppala et al. (2005)
	HIRS 及び SSM	1978年11月～	
NOAA/NCDC	SSM/I	1987年6月～	
NOAA/NCEI	MSU CDR V1.0	1978年11月～	doi:10.7289/V51Z429F
NOAA/CLASS	SSM/I	1987年7月～	
EUMETSAT CM SAF	SSM/I FCDR E3	1987年7月～	doi:10.5676/EUM_SAF_CM/FCDR.MWI/V003
AMV			
ECMWF	Meteosat, GMS, GOES	1979年1月～	Uppala et al. (2005)
気象庁気象衛星センター	再処理 GMS	1979年1月～1979年11月	
	再処理 GMS-3～-4	1987年3月～	
EUMETSAT	再処理 Meteosat-2～-4	1982年5月～	van de Berg et al. (2001)

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ており、この期間の観測システムのもとでのデータ同化システムの性能には依然として課題があることを示唆している。

(2) ラジオゾンデ観測データに対する背景値の適合度

図 4.12.3 は、JRA-3Q、JRA-55 及び JRA-25 で使用したラジオゾンデ気温観測について、30、250、500、850hPa における対背景値 D 値 (観測値 - 背景値) の全球平均及び RMS の時系列の比較を示している。気象庁 (2021) で述べたとおり、JRA-3Q では、JRA-55 で見られた対流圏上層の高温バイアスが大幅に解消しているほか (図 4.12.3(c))、対流圏下層の低温バイアスが緩和していることも分かる (図 4.12.3(g))。また、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。

他方、成層圏においては、JRA-3Q では特に大規模火山噴火後の 1982 年 (エルチヨン火山) や 1991 年 (ピナツポ火山) に D 値平均値の増大が見られるほか (図 4.12.3(a))、対流圏中層においても、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

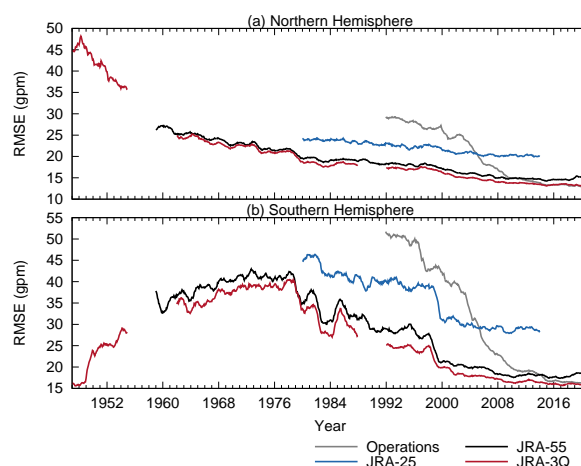


図 4.12.1 JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの 500hPa 高度 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a) 北半球中・高緯度、(b) 南半球中・高緯度。

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

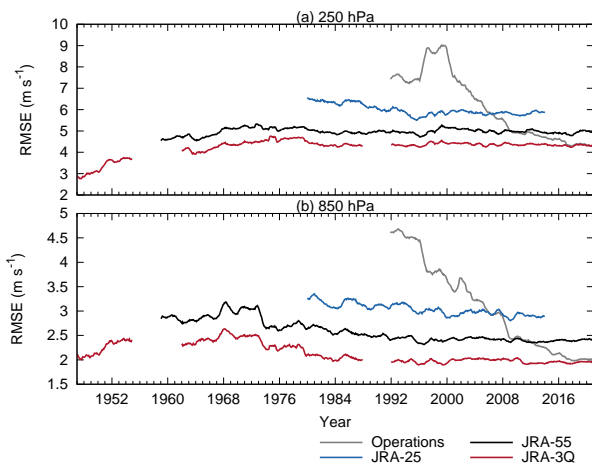


図 4.12.2 JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの熱帯域風ベクトル 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a)250hPa、(b)850hPa。

しているため、観測データの少ない過去期間においてモデルバイアスを十分に拘束できない場合があり得ることが推測される。水平相関距離の違いが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、この期間の観測データ数が非常に少なく、特に高層観測が北半球の一部地域しか存在しないことにより、背景値の精度が低いことに加え、統計的ばらつきが大きいことも要因の一つと考えられる。

(3) 対流圏下層から下部成層圏の全球平均気温時系列

図 4.12.4 は、対流圏下層から下部成層圏までの 4 層の気温偏差を $82.5^{\circ} \text{N} \sim 82.5^{\circ} \text{S}$ の領域で平均したもののについて、JRA-3Q の月別時系列と、JRA-25、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) とリモートセンシングシステム (RSS) の MSU 及び AMSU マイクロ波探査計気温データ V4.0 (Mears and Wentz 2016, 2017) を用いる。

JRA-3Q の全球平均気温では、(2) で述べた要因により、大規模火山噴火後の成層圏の昇温量が小さい傾向はあるが、その他の点では、HadAT2 や RSS V4.0 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 4.12.4(a))。その要因としては、JRA-55 では 1978 年以前のゾンデ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 MRI-CCM2 (Deushi and Shibata 2011) により作成されたゾンデ再解析データを利用していること、ラジオゾンデ気温観測のバイアス補正を JRA-55 では RAOBCORE V1.4 (Haimberger et al. 2008) 及び

V1.5 (Haimberger et al. 2012) に基づいて行ったのに対し、JRA-3Q では RISE (RICH with solar elevation dependent) v1.7.2 (Haimberger et al. 2012) に更新したことが考えられる。

(4) 熱帯低気圧

JRA-3Q で用いる熱帯低気圧ポーガスについては、JRA-55 と異なり、気象庁の北西太平洋用の台風ポーガス作成手法 (JMA 2019) を用いており、同手法を全領域に適用できるように拡張したうえで、熱帯低気圧ポーガスを自主作成し利用している (気象庁 2021)。図 4.12.5 は JRA-3Q、JRA-55 及び ECMWF 再解析 ERA5 (Hersbach et al. 2020) における領域別の熱帯低気圧検出率の比較を示している。JRA-55 では、熱帯低気圧周辺風での算出方法の不具合による、解析された熱帯低気圧強度の不自然な長期変化傾向により、1990 年代以降、検出率が低下していることが分かる。JRA-3Q では、前述の熱帯低気圧ポーガス作成手法に変更したことにより、2010 年代初めまでは概ね 90% 以上の検出率を維持しており、熱帯低気圧解析の一貫性が大幅に改善している。

しかしながら、2013 年以降の期間については、北西太平洋以外の領域で検出率の急落が見られる。調査の結果、以下の原因によるものであることが分かった。

JRA-3Q では熱帯低気圧ポーガス作成の入力データとして、2012 年まではベストトラック・データベース IBTrACS (Knapp et al. 2010) v03r05、2013 年以降は国際民間航空機関 (ICAO) に指名された熱帯低気圧アドバイザーセンターから受信した熱帯低気圧電文を利用している。このうち、熱帯低気圧電文について、電文時刻・形式が想定外のものになっていたことや電文が未受信であったことにより、JRA-3Q で利用されない期間があったため、熱帯低気圧解析の品質が低下した。

上記の熱帯低気圧解析の品質改善のため、2013 年以降の期間について再計算を実施する予定である。

4.12.4 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、1940 年代末以降を対象とする JRA-3Q 長期再解析を実施している (本稿執筆 2021 年 12 月時点でストリーム A 期間は完了、ストリーム B 期間は 1987 年まで、ストリーム C 期間は 1954 年まで実施)。JRA-3Q では、現行の JRA-55 以降の現業全球数値解析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 2 日予報スコア及びラジオゾンデ観測データに対する背景値の適合度による評価等により示された。

他方、大規模火山噴火後の成層圏の昇温量が小さい

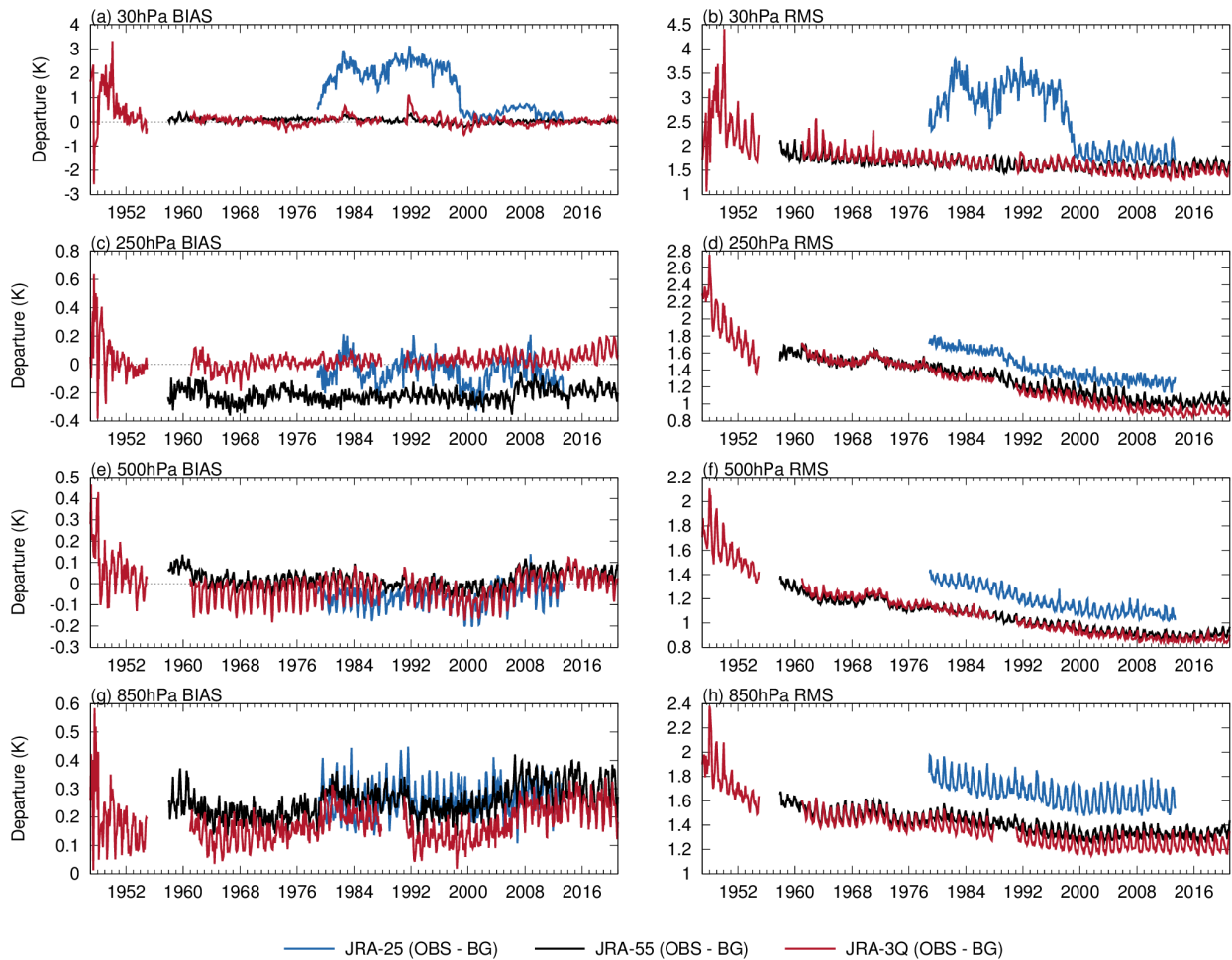


図 4.12.3 JRA-25、JRA-55 及び JRA-3Q で使用したラジオゾンデ気温観測対背景値 D 値の全球平均、及び RMS の時系列

傾向や、1970 年代以前の対流圏中層のラジオゾンデ気温観測との整合性が JRA-55 と比べて若干改悪しているといった問題点も明らかになった。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、観測データの少ない過去期間においてモデルバイ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。将来の再解析においては、観測システムへの変遷に対してデータ同化システムを効果的に適合させるための調整方法について、検討すべきと考えられる。

熱帯低気圧解析については、JRA-3Q では気象庁の台風ボーガス作成手法を用いて全領域で熱帯低気圧ボーガスを自主作成し利用することにより、JRA-55 と比べて熱帯低気圧解析の一貫性が大幅に改善した。しかし、2013 年以降の期間については、熱帯低気圧ボーガス作成処理の不備により、熱帯低気圧検出率が急落していることが判明したため、同期間の再計算を実施する予定である。

JRA-3Q 本計算は、2013 年以降の再計算も含め、全期間を 2022 年度中に完了する計画であり、引き続き、プロダクトの品質評価を進める予定である。

参考文献

- Bronnimann, S. and A. Stickler, 2013: *The Comprehensive Historical Upper Air Network*. Research Data Archive at NCAR, Computational and Information Systems Laboratory, doi:10.5065/AHPM-FC10, Accessed 29 Aug 2017.
- Central Meteorological Observatory, 1948: *Aerological data of Japan*.
- Compo, et al., G. P., 2019: *The International Surface Pressure Databank version 4*. Research Data Archive at NCAR, Computational and Information Systems Laboratory, doi:10.5065/9EYR-TY90, Accessed 17 Mar 2020.
- 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.
- Dunn, R. J. H., 2019: HadISD version 3: monthly updates. Hadleycentre tech. note, Met Office, 8 pp., Exeter, UK.

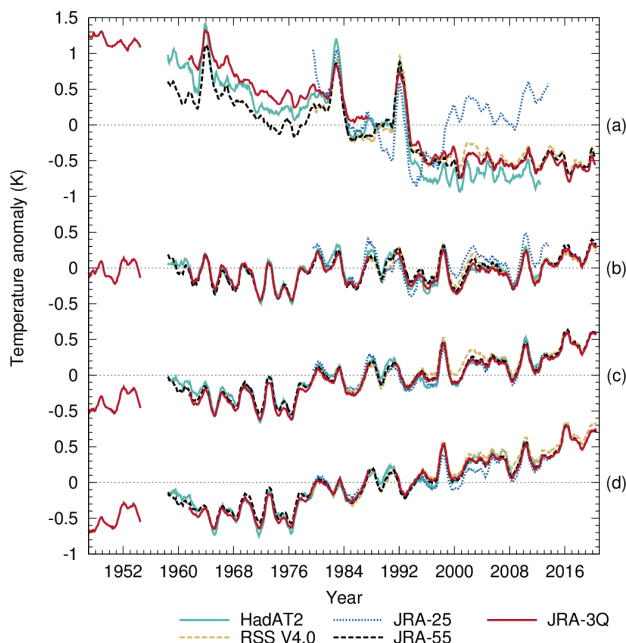


図 4.12.4 (a) 下部成層圏、(b) 対流圏上層、(c) 対流圏中層、(d) 対流圏下層の気温偏差の $82.5^{\circ}\text{N}\sim 82.5^{\circ}\text{S}$ の領域平均の 12 か月移動平均値の時系列。RSS V4.0 の時系列は MSU チャンネル 4、3、2 の観測値とその対流圏下層への外挿値であるのに対し、HadAT2、JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 の時系列は気温から計算した MSU 等価量である。偏差は JRA-3Q を除きそれぞれのデータセットの 1979~1998 年の期間の月気候値に対して計算されている。JRA-3Q の偏差については JRA-55 の月気候値に対して計算されている。

<https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/publications/science/climate-science-technical-notes>.

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

Freeman, E., S. D. Woodruff, S. J. Worley, S. J. Lubker, E. C. Kent, W. E. Angel, D. I. Berry, P. Brohan, R. Eastman, L. Gates, W. Gloeden, Z. Ji, J. Lawrimore, N. A. Rayner, G. Rosenhagen, and S. R. Smith, 2017: ICOADS Release 3.0: A major update to the historical marine climate record. *Int. J. Climatol.*, **37**, 2211–2237, doi:10.1002/joc.4775.

Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka, 2008: Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records—Some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data. *J. Climate*, **21**, 4587–4606, doi:10.1175/2008JCLI1929.1.

Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka, 2012: Homogenization of the global radiosonde temper-

ature 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. 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, doi:10.1002/qj.3803.

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

JMA, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 229 pp., <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/nwp-top.htm>.

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.

Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 363–376, doi:10.1175/2009BAMS2755.1.

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.

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.

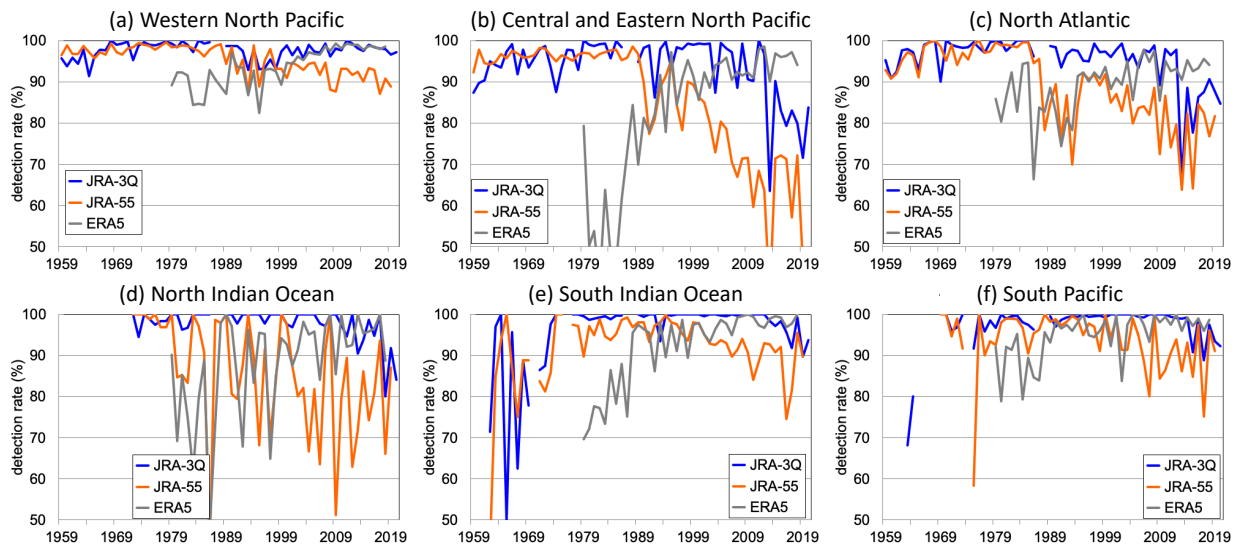


図 4.12.5 (a) 北西太平洋、(b) 中部北太平洋及び北東太平洋、(c) 北大西洋、(d) 北インド洋、(e) 南インド洋、(f) 南太平洋における JRA-3Q、JRA-55 及び ERA5 の熱帯低気圧検出率。熱帯低気圧の検出方法は Hatsushika et al. (2006) に準拠し、合同台風警報センターおよび米国国立ハリケーンセンターのベストトラックデータを使用した。(気象研究所 釜堀弘隆氏提供)

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.

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.

Smith, A., N. Lott, and R. Vose, 2011: The Integrated Surface Database: Recent developments and partnerships. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 704–708, doi:10.1175/2011BAMS3015.1.

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

Uppala, S. M., P. W. Kllberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. Van De Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hlm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Mor-

crette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, and J. Woollen, 2005: The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961–3012, doi:10.1256/qj.04.176.

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

4.13 波浪モデル

4.13.1 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、全球波浪モデルと沿岸波浪モデルを運用している(竹内ほか 2012)。これら波浪モデルの精度向上に向け、数値予報開発センターでは 2021 年度には

- 全球波浪モデルの高解像度化
- 波浪モデルへの高次移流スキームの導入
- 波浪データ同化での新規衛星観測データの利用

等の開発を行っている。

4.13.2 全球波浪モデルの高解像度化

現在の全球波浪モデルの解像度は 0.5° (約 55 km) であるが、これを 0.25° (約 27 km) にする計画で開発を進めている。高解像度化によりこれまでの 0.5° では十分に解像できていなかった諸島や海峡等が解像できるようになり、予測精度が向上することが期待される。

4.13.3 波浪モデルへの高次移流スキームの導入

現在の波浪モデルでは移流スキームとして風上一次差分を使用しているが、予測精度向上を目指し、数値拡散が小さく精度の高い移流スキームの利用可能性検討を行っている。Li (2008) の Upstream Nonoscillatory advection schemes (UNO) を波浪モデルに実装し、理想実験等を通じた動作確認を行った。今後は実際の地形を適用した現実的な波浪予測の実験を行い、インパクトを調査していく予定である。

4.13.4 波浪データ同化での新規衛星観測データの利用

波浪モデルでは初期値作成のため、最適内挿法によるデータ同化を行っている。この波浪データ同化では、船舶、ブイ、波浪計等の現場観測に加えて、地球観測衛星に搭載の海面高度計で計測された波高データも用いている。現在気象庁の波浪データ同化で使用している衛星観測データは Jason-3, Saral, Sentinel-3A/B の 4 衛星のデータであるが、これら以外に CryoSat-2, CFOSAT, Sentinel-1A/B, Sentinel-6 等の衛星観測データも各衛星機関から公開されている。現在未使用の衛星観測データを今後活用していくために、データの収集、観測精度の確認等を進めているところである。

参考文献

- Li, J. G., 2008: Upstream nonoscillatory advection schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 4709–4729.
- 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.

4.14 高潮モデル

4.14.1 はじめに

気象庁は、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ため、二種類の高潮モデルを運用している。一つは日本国内の高潮注意報・警報発表のための日本域高潮モデル(林原 2011)、もう一つはWMO 高潮監視スキーム (Storm Surge Watch Scheme, SSWS) に基づき台風委員会メンバー (国および地域) に高潮予測情報を提供するためのアジア域高潮モデルである (Hasegawa et al. 2017)。2021 年度には、数値予報開発センターにおいて、これらの高潮モデル改良に向けた以下の開発を行っている。

- 高潮の早期注意情報の提供に向けた高潮アンサンブル予報システムの開発
- 日本域高潮モデルの予報時間延長に向けた開発
- 新しいアジア域高潮モデルの開発

以下では、それぞれの開発内容について述べる。

4.14.2 高潮の早期注意情報の提供に向けた高潮アンサンブル予報システムの開発

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)」として発表する。早期注意情報は、現在、雨、雪、風、波を対象に発表されているが、台風等に伴う高潮についてもニーズがあることから、数値予報開発センターでは高潮早期注意情報向けに日本域高潮モデルを用いた高潮アンサンブル予報システムの開発を進めている。現在の日本域高潮モデルでも、台風進路予報の不確実性を考慮するために、台風時には6メンバーのアンサンブル的な予測計算を行っている。しかし、台風進路の数10 km 程度の違いでも各地域の高潮発生状況は大きく変わる可能性があることから、現行の6メンバー予測は5日先までの高潮発生可能性を予測するには十分とは言えない。そこで、米国 NOAA が運用している the probabilistic tropical storm surge model (P-Surge; Gonzalez and Taylor 2018) を参考に、台風進路に摂動を与える多メンバーアンサンブル予報の手法を開発している。P-Surge ではハリケーン予報の不確実性を考慮するために、(1)ハリケーン進路、(2)進行速度、(3)強度、(4)ハリケーンの大きさの摂動を組み合わせ数百メンバーの高潮モデルアンサンブルを実行する。開発中の高潮アンサンブルでは計算機資源も考慮し、上記のうち高潮予測に最も影響が大きいと考えられる(1)台風進路直交方向の摂動を与えた高潮モデルのアンサンブル予報を実行する。(2)の進行速度の不確実性については、モデル計算後の後処理にて高潮モデルで予測した潮位偏差を台風進行速度に応じて時間をずらした後、別途計算した天文潮位を加算することで考慮する構成で開発を進めている。

4.14.3 日本域高潮モデルの予報時間延長

第4.4節で報告されている通り、メソ数値予報システムでは00, 12UTC 初期値の予測時間を78時間に延長する開発が進められている。日本域高潮モデルについても台風防災向け情報の改善に向け、MSM 78時間予測を活用し予測時間を78時間に延長する計画である。

4.14.4 新しいアジア域高潮モデルの開発

(1) 非構造格子有限体積法の導入

現在のアジア域高潮モデルでは、水平解像度 $1/30^\circ$ (約3.7 km)の等緯度経度格子を用いており、有限差分法による予測計算を行っている。現在の水平解像度は日本及び各国の海岸地形を解像するのに十分とは言えず、高解像度化が望まれる。しかし、同じモデルを用いて単純に高解像度化すると、膨大な計算機資源が必要になる。そのため、比較的少ない資源で動作する非構造格子有限体積法高潮モデルを開発している。非構造格子を用いることで、沿岸付近は解像度を高く、沖合は低くし総格子数を抑えることができる。これにより、高解像度化と計算効率化の両立を図る。

(2) アンサンブルメンバー増と確率プロダクトの導入

台風予測の不確実性を考慮するために、同モデルでは大気外力としてGSM 予測結果に加えて、全球EPSのアンサンブルメンバーからクラスター解析により5メンバーを抽出し、合計6メンバーのアンサンブル予報を行っている。数日先の台風予報の不確実性に伴う高潮予測の不確実性を考慮するために、全球EPSの51メンバー全てを用いた高潮アンサンブルを実行し、超過確率等の確率予測プロダクトを提供する計画である。

(3) 台風ボーガス手法の改善

第3.5節で報告したように、日本域高潮モデルでは台風ボーガスに陸地の影響考慮や台風のパラメータ計算手法の改善を2021年4月に導入したが、アジア域高潮モデルでは同改善策はまだ導入されていない。上述の各種改善と共に、同様の台風ボーガス改善手法をアジア域高潮モデルに導入予定である。

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.
- Hasegawa, H., N. Kohnno, 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, 1-9.
- 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.

4.15 海況監視予測システム

4.15.1 はじめに

気象庁は、日本周辺の詳細な海況・海水情報提供のため 2020 年 10 月から日本沿岸海況監視予測システム (MOVE/MRI.COM-JPN、以下 JPN システムと記す) を現業運用している。JPN システムは、気象研究所にて開発された MRI.COM (Tsuji no et al. 2017; Sakamoto et al. 2019) および海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM (Hirose et al. 2019) をベースとしている。JPN システムは海洋モデルに加え海水モデルも組み込んでおり、海況予測と整合の取れた海水予測を行うことが可能である。このことから従来の気象庁海水予測モデル (佐藤ほか 1989) に替えて、JPN システムによる海水予測を海水予測業務に使用する計画である。一方で、現在の JPN システムの海水予測にはオホーツク海南部における密接度や海水域の過小傾向があることから、数値予報開発センターでは気象研究所と協力して海水予測改善に向けた開発を行ってきた。

また、JPN システム中の海洋データ同化 遅延解析¹では大気外力として JRA-55 を使用しているが、2021 年 10 月からは第 4.12 節の通り JRA-3Q が現業運用を開始されたことから、遅延解析での大気外力を JRA-55 から JRA-3Q に切り替える。

これらの開発項目を合わせた JPN システム業務化試験を行い精度検証を行った。本稿ではその概要を報告する。

4.15.2 改良・変更項目の概要

● 海水予測改良

- 海洋データ同化で参照する平均海面力学高度気候値データを Mensah et al. (2019) の観測・研究成果を反映したデータに差し替える。これによりオホーツク海南部での高水温バイアスが軽減される。
- JPN 海洋データ同化に、海水下の混合層での水温を結氷温度に近づけるように水温修正量を下方修正する処理を追加。これは、北太平洋データ同化ではすでに導入されていた処理を日本域 2km モデルでの同化にも適用するものである。
- 海水密接度をデータ同化する際に、沿岸海水生成域で誤って融解されないようにするための陸マスクを導入。
- JPN では海洋データ同化による水温低下によって、北海道南東方等で本来発生しないはずの海水が生じることがまれにあった。これを防ぐため、各格子点が一定の条件 (水温、気候値での海水有無、等) を満たす場合には水温修正量を加えない処置を追加。

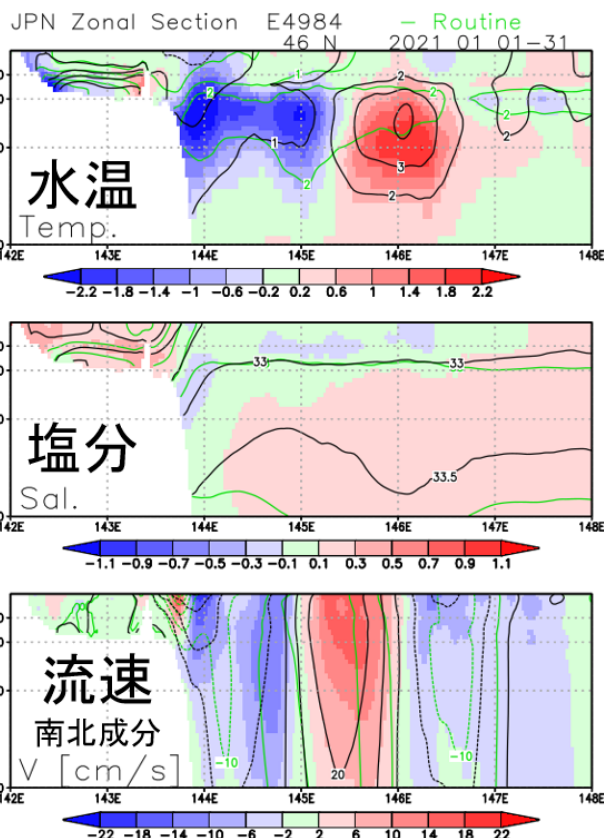


図 4.15.1 JPN 解析値 2021 年 1 月平均水温・塩分・南北流速 46°N 鉛直断面。黒の等値線は TEST、緑の等値線は CNTL、シェードは TEST-CNTL 差を表す。

ずの海水が生じることがまれにあった。これを防ぐため、各格子点が一定の条件 (水温、気候値での海水有無、等) を満たす場合には水温修正量を加えない処置を追加。

- 遅延解析での大気外力を JRA-55 から JRA-3Q に変更
 - 大気外力の更新間隔も JRA-55 の 3 時間毎から、JRA-3Q に合わせ 1 時間毎と高頻度化

4.15.3 業務化試験の結果

2020 年 9 月～2021 年 9 月の約 1 年間を対象期間として、JPN システムの遅延解析、速報解析、予測の業務化試験 (以下、TEST) を実行した。なお、海水改善策の効果が対象海域であるオホーツク海の水溫・塩分場に波及するための時間を考慮して、遅延解析は 2019 年 10 月からスピニアップを開始した。対照実験 (CNTL) としては、現行のルーチン結果を使用した。TEST は CNTL と比べ、以下の改善および特性の変化が見られた。概要を以下に示す。

(1) オホーツク海南部海水予測改善策の効果

オホーツク海南部での冬季の水溫・塩分・海流場は、TEST で水溫・塩分低下、南向きの流れ強化など海水の生成・維持に適切な変化となっていることを確認した (図 4.15.1)。

¹ JPN システムでは、速報解析と遅延解析の 2 つの海洋データ同化を実行している。前者は予測の初期値を作成するためにリアルタイム性を重視した解析、後者はなるべく多くの観測値を同化して精度を上げるために過去に遡って実施する解析のことである。JPN システムの遅延解析は最大約 50 日前に遡って実施している。

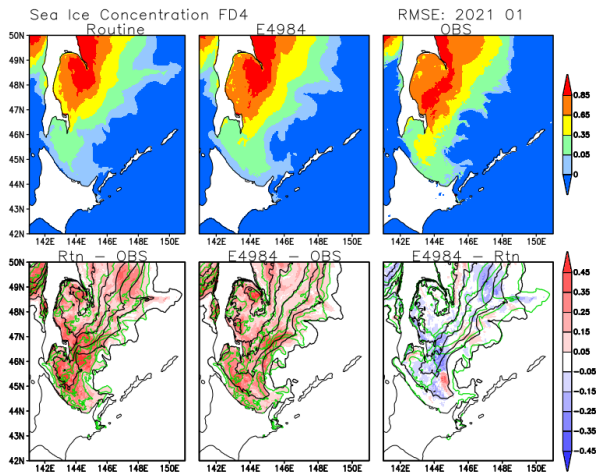


図 4.15.2 2021 年 1 月 JPN 4 日予測 海氷密度度。(上段) 月平均場。左より CNTL、TEST、解析 (下段) RMSE。左より CNTL、TEST、TEST-CNTL 差。

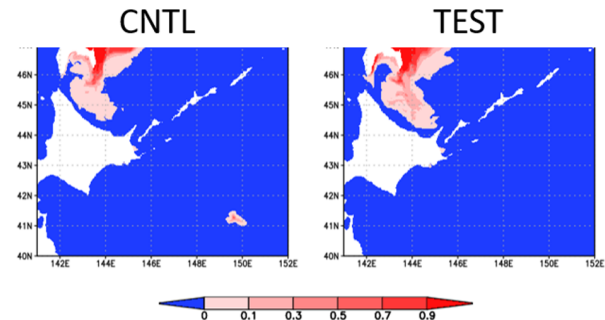


図 4.15.3 2021 年 1 月 18 日を初期日とする JPN 1 日予測 海氷密度度。(左) CNTL、(右) TEST

2020~2021 年冬季の海氷密度度予測について海水速報解析 (金子 2007) に対する検証を行い、TEST では負バイアス傾向は残るものの、CNTL と比較して負バイアスおよび RMSE が減少し精度改善していることを確認した (図 4.15.2)。上記の傾向は他の月、他の予測時刻でも同様であり、TEST で改善傾向であった (図略)。

CNTL では、実験期間中の 2021 年 1 月 18 日初期日に北海道南東方 (41° N、150° E 付近) に観測にはない海氷が生じていたが、TEST ではこの海氷生成が想定通り抑制されていることを確認した (図 4.15.3)。

加えて、オホーツク海南部 (42~48°N、140~150°E) を対象に海水速報解析を真値とみなした統計検証を行った (図 4.15.4)。各予測対象時間、各月とも RMSE は CNTL から減少、また、バイアスは CNTL で認められていた 1 月、3 月の負バイアス傾向が減少する等、一般的に改善傾向が確認された。

海氷密度度 ≥ 0.05 を閾値とした海水域のスレットスコア等の統計検証も行った (図 4.15.5)。捕捉率、スレットスコアは CNTL よりも 1 に近づき改善している。また、バイアスコアでは、1 月、3 月に CNTL で見ら

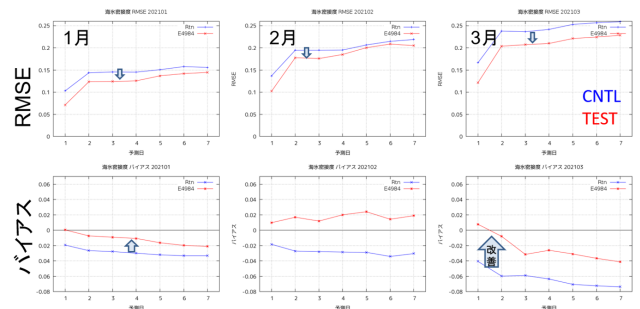


図 4.15.4 JPN 海氷密度度予測統計検証スコア。(左) 2021 年 1 月、(中央) 2 月、(右) 3 月。(上段) RMSE、(下段) バイアス。図中、赤、青線はそれぞれ TEST、CNTL。

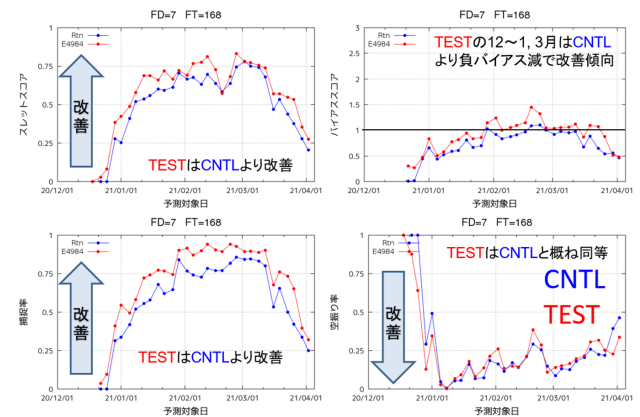


図 4.15.5 JPN 海水域統計検証スコア。7 日予測を評価対象としている。(左上) スレットスコア、(右上) バイアスコア、(左下) 捕捉率、(右下) 空振り率。図中、赤、青線はそれぞれ TEST、CNTL。

れた負バイアス (< 1) 傾向が減じて 1 に近づき改善傾向であった。

(2) 遅延解析での大気外力に JRA-3Q を用いた解析結果の検証

遅延解析について対現場観測 (フロート・船舶・ブイ等) 統計検証を行った結果、水温バイアス・RMSE は季節・海域・層によって改善・改悪混在がみられるが、概ね中立であることを確認した (図 4.15.6、図 4.15.7)。

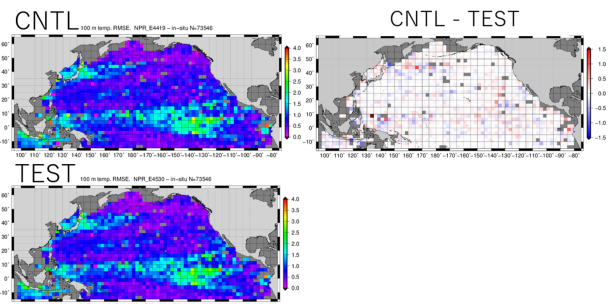


図 4.15.6 JPN システム (北太平洋同化システム) 遅延解析 100m 深水温 対現場観測 RMSE。右上図は CNTL-TEST 差で図中赤が TEST の改善を示す。

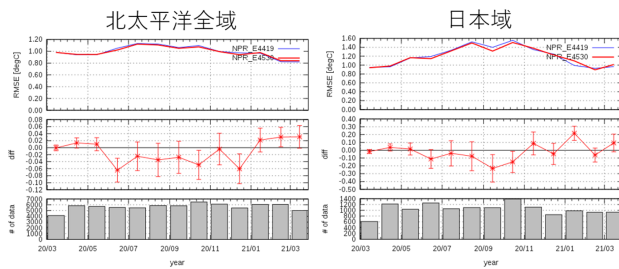


図 4.15.7 JPN システム遅延解析 100m 深水温 対現場観測 月別 RMSE 時系列。(左) 北太平洋全域、(右) 日本域。上段は RMSE で、図中、赤、青線はそれぞれ TEST、CNTL。中段は RMSE TEST-CNTL 差。下段は検証に用いた観測データのサンプル数。

4.15.4 まとめ

上に示したように、海水予測については負バイアス・RMSE が減少し改善傾向であること、水温解析場では概ね中立であることが確認されたことから、上記の改良の現業化を令和 4 年 1 月に行う。

なお、海水予測については本稿で報告した改善策により一定の改善が得られたものの、過小傾向はまだ残っていることから、今後も引き続き JPN システムの海水予測精度改善に向けて取り組む予定である。

参考文献

- 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.
- 金子秀毅, 2007: オホーツク海の気象 —大気と海洋の双方向作用— 第 8 章海水域の解析とその変動の特徴. 気象研究ノート, **214**, 75–92.
- Mensah, V., K. I. Ohshima, T. Nakanowatari, and S. Riser, 2019: Seasonal changes of water mass, circulation and dynamic response in the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **144**, 115–131, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.01.012>.
- 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.
- 佐藤清富, 加納裕二, 白土正明, 1989: 北海道周辺海域を対象とした数値海水モデル. 気象庁研究時報, **41(4)**, 121–136.
- Tsujino, H., H. Nakano, K. Sakamoto, S. Urakawa, M. Hirabara, H. Ishizaki, and G. Yamanaka,

4.16 黄砂解析予測システム

気象研究所では、本システムで利用している全球エロゾルモデルやデータ同化に関する研究・開発を進めている。これらの研究・開発成果については、黄砂予測への影響を確認した後、必要に応じて本システムへの反映を検討する。また、本システムのデータ同化で利用している静止気象衛星ひまわりの光学的厚さ（AOT）解析プロダクトについて、そのリトリーバルアルゴリズムの改良を進める大気海洋部業務課気象技術開発室に協力している。

4.17 紫外線予測システム

気象研究所では、本システムで利用している全球化学輸送モデルやデータ同化に関する研究・開発を進めている。これらの研究・開発成果については、紫外線予測への影響を確認した後、必要に応じて本システムへの反映を検討する。また、気象庁第3次長期再解析（JRA-3Q）のために、気象研究所の技術協力を得て、衛星観測によるオゾン全量データを同化した高精度なオゾン再解析の計算を実施した。なお、JRA-3Qの準リアルタイム運用にあわせてオゾン再解析も同様に2021年10月から運用を開始した。

4.18 大気汚染気象予測システム

東日本や西日本を対象とした水平解像度5kmの高解像度版領域化学輸送モデルについて、領域拡張及び地上オゾン観測データ同化手法（池上ほか2017）の導入を進めている。これらの開発を本システムに反映することでアジア域の領域化学輸送モデルとの統合を図る。

4.19 二酸化炭素解析システム

二酸化炭素解析については、その入力データに用いている観測地点の偏在（図4.19.1）があり、世界全体の均質的な解析に大きな支障となっている。その対応として、広範囲を一様な品質で観測する衛星観測の利用が考えられる。このため、温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）のデータ同化利用について、気象研究所の研究成果をもとに開発を行い、二酸化炭素解析の精度向上が確認できた（図4.19.2）。今後、2022年度中のGOSATデータ同化導入を目指して本システムへの適用を進める予定である。

参考文献

Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa, T. Ogawa, 2008: Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. At-*

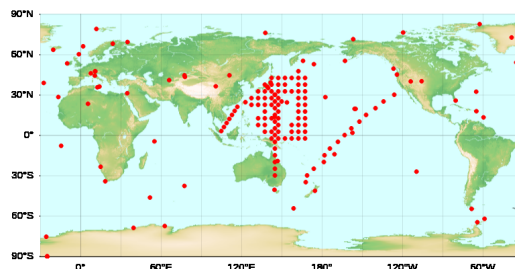


図 4.19.1 大気 CO₂ 解析に使用する観測点の分布。南米やアフリカなど観測地点がほとんどない地域が存在する。気象庁 HP から引用。

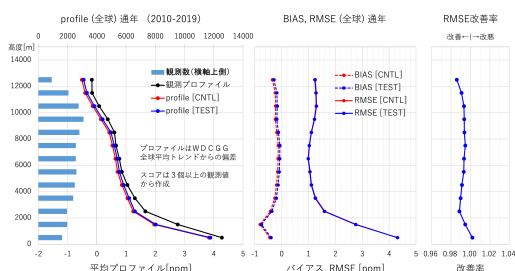


図 4.19.2 検証用格子点値に変換した CO₂ 航空機観測（CONTRAIL; Machida ほか（2008）を参照値とした、GOSAT 同化なし（CNTL）、GOSAT 同化あり（TEST）の CO₂ モデル解析値の高度別検証スコア。検証期間は2010年から2019年。（左）航空機観測（黒）と対応するモデル解析値（CNTL（赤）、TEST（青））による CO₂ 濃度の全球全期間平均の鉛直プロファイル（CO₂ 濃度の経年増加分は差し引いている）。棒グラフはスコア作成に用いた月平均値の数。（中）月平均解析値のバイアス（破線）と RMSE（実線）。CNTL と TEST の色は左図と同じ。（右）RMSE 改善率（RMSE(TEST)/RMSE(CNTL)）。平均プロファイルは CNTL に比べ TEST のほうが観測に近く、バイアスはすべての高度で 0 に近づき、RMSE 改善率は高度 0~1km を除き 1 より小さく改善となった。

mos. Oceanic. Technol., **25**, 1744–1754, (doi: 10.1175/2008JTECHA1082.1).

池上雅明, 鎌田茜, 梶野瑞王, 出牛真, 2017: 気象庁領域大気汚染気象予測モデルへの地上オゾン観測データ同化. 測候時報, **84**, 97–107.

4.20 線状降水帯予測の評価

4.20.1 はじめに

日本国内では、毎年のように線状降水帯による顕著な大雨が発生し、数多くの甚大な災害が生じている。平成30年8月の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」では、2030年を目標にして、半日前程度から線状降水帯の発生・停滞に伴う集中豪雨をより高い精度で予測することが示された。気象庁では本提言に沿って、平成30年10月に「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」を策定し、線状降水帯の発生・停滞の予測精度向上により、集中豪雨の可能性を高い確度で予測して、特に、明るいうちからの避難など、早期の警戒と避難を可能にすることを重点目標のひとつとした。

近年では令和2年7月豪雨(気象庁2020)時の、特に4日朝の熊本県の大雨に対して、前日の夕方時点での予測することが困難であった。そのことを契機に、気象庁では線状降水帯の予測精度向上を喫緊の課題として認識し、線状降水帯予測精度の向上のため、観測の強化・予測の改善の方策に取り組んでいる。令和2年12月23日には大学等研究機関の専門家の協力を得て、最新の研究の知見を取り入れることを目的とした「線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ」が発足された。続いて、令和3年6月3日から九州西方海上で船舶に搭載したGNSS可降水量の観測が開始され、令和3年6月17日には防災情報として「顕著な大雨に関する情報¹」の提供が開始された。さらには、線状降水帯の予測精度向上を前倒しで推進し、予測精度向上を踏まえた情報の提供を早期に実現するため、水蒸気観測等の強化、気象庁スーパーコンピュータの強化や「富岳」を活用した予測技術の開発等を早急に進める目的で、令和3年度気象庁関係補正予算が計上された。

このような状況下において、線状降水帯の予測精度向上を図ることが不可欠であり、気象庁業務評価レポート(令和3年度版)²において、「半日前程度の雨量予測精度の向上を評価するための数値指標についても令和3(2021)年度中に作成することを検討する」としている。これまでメソ数値予報システム等の改良時には線状降水帯を含む強雨の事例毎の検証は行われているが、1か月程度の期間の数値予報実験では、線状降水帯事例数があまりに少ないため、数値予報における線状降水帯の予測精度はあまり知られていない。このため、数値予報開発センター評価チームでは、線状降水帯予測の精度について調査を行った。

本節では、線状降水帯予測の評価指標のために行った、線状降水帯の検出手法、評価手法の調査とその結

果について報告する。

4.20.2 評価対象と評価手法

線状降水帯は台風のように明確な定義はまだ確立されていないが、線状降水帯の事例研究だけでなく、津口(2016)での解説やHirockawa et al.(2020)のように線状降水帯を客観的に検出・分類する手法が開発されている。他にも、線状降水帯の定義にはいくつかの候補があるが、ここでは防災情報として発表されている、「顕著な大雨に関する情報」で示されている定義に準拠し、

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

を線状降水帯の検出条件とした³。

評価対象とする予測は、現業MSMの12-15時間の3時間予測降水量とした。これにより、気象庁業務評価レポート(令和3年度版)で示されている半日前程度の雨量予測精度に対して、過去数年以上の変化を見ることができる。

評価手法として、線状降水帯の現象の有無を予測と実況それぞれについて判定し、その結果により標本を分類する、カテゴリ検証を用いた。予測での線状降水帯の判定条件は、解析雨量で検出された線状降水帯を「実況あり」に対して、予報地方単位程度の位置ずれに相当する100 km以内に線状降水帯が予測できた場合を「予測あり」とした。実際に線状降水帯を予測できたとする事例を図4.20.1に示す。実際の位置ずれの範囲は、解析雨量で検出された線状降水帯(桃)を等緯度経度で囲み(青点線枠)、そこから100 kmで囲われた範囲(青実線枠)内とした。

現象の有無に分類された事例数を表4.20.1の通り定義し、主に「実況あり」の時に予測が適中した割合である「捕捉率」

$$\text{捕捉率} \equiv \frac{\text{FO}}{\text{FO} + \text{XO}} \quad (4.20.1)$$

と「予測あり」の時に実況があった割合、すなわち空振りをしなかった割合である「一致率」

$$\text{一致率} \equiv \frac{\text{FO}}{\text{FO} + \text{FX}} \quad (4.20.2)$$

の2つの指標について、MSMの年推移を調査した。

¹ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kenchoame.html>

² <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/hyouka/hyouka-report/r03report/r03report.index.html>

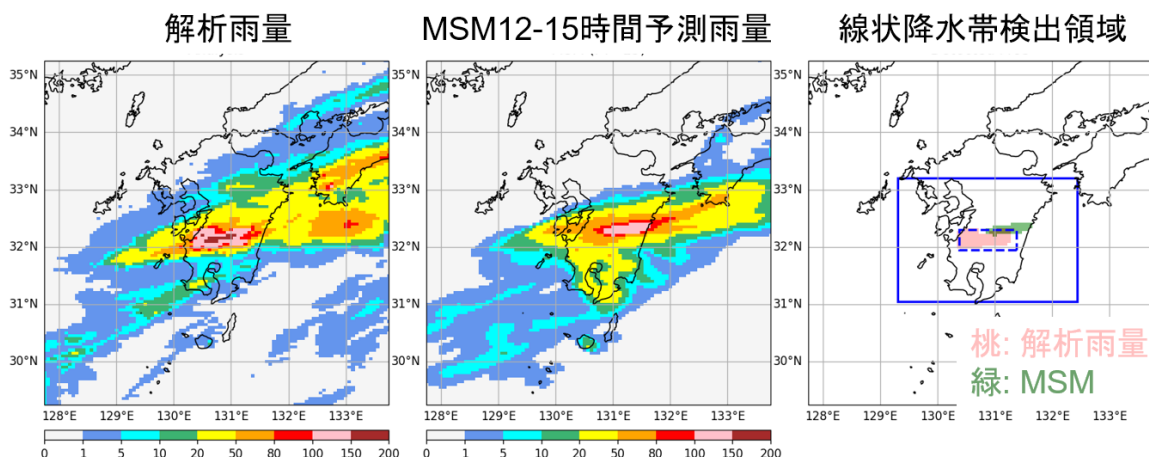


図 4.20.1 2020 年 7 月 3 日 21UTC–2020 年 7 月 4 日 00UTC における線状降水帯検出事例。解析雨量での 3 時間降水量 [mm] (左)、2020 年 7 月 3 日 09UTC 初期値の MSM での 3 時間予測降水量 [mm] (中)、解析雨量 (桃) と MSM (緑) で検出された線状降水帯の領域と「予測あり」判定領域 (青実線枠) (右)。

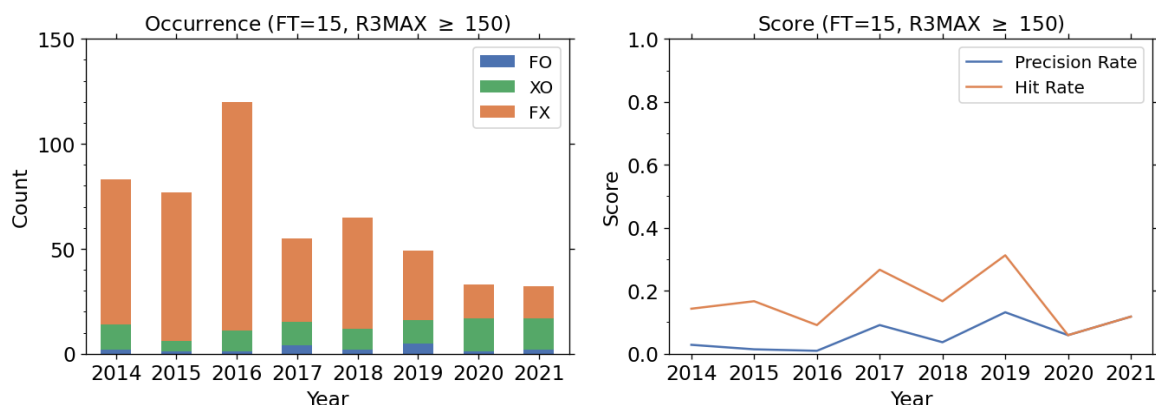


図 4.20.2 線状降水帯予測のカテゴリ検証での事例数 (左) と捕捉率・一致率の年変化 (右)。事例数は表 4.20.1 で分類して示し、捕捉率は Hit Rate (橙)、一致率 Precision Rate (青) と記した。

表 4.20.1 カテゴリ検証で用いる分割表。FO, FX, XO, XX はそれぞれの事例数を示す。

		実況		計
		あり	なし	
予測	あり	適中 (FO)	空振り (FX)	FO+FX
	なし	見逃し (XO)	適中 (XX)	XO+XX
計		M	X	N

4.20.3 評価結果

図 4.20.2 に MSM 予測の現象の有無に分類された事例数と捕捉率・一致率の年変化を示す。まず、空振り数 (FX) が大半を占めていることが分かる。すなわち、MSM ではかなり線状降水帯を発生させており、実況よりも過大である。一方、2019 年以降には空振り数は以前より減少していた。これは 2017 年 2 月に新たに開発した非静力学モデル asuca を導入した以降、表 4.20.2

で示したメソ数値予報システムの改良によって、降水の過剰が軽減したためと考えられる。これにより、一致率が向上しているが、それでも 1 割程度しかなく、全体の 9 割は空振りとなっていた。

線状降水帯の実況事例数 (FO+XO) 自体は年間 20 以下と少なく、かつ、年変動が大きい。近年は実況事例数が増加している傾向が見られる。その中で、線状降水帯ありの適中数 (FO) は少なく、1–5 事例程度であり、1–3 割程度しか捕捉していない。また、捕捉率の年変動も大きく、近年で捕捉率が向上しているとは言い難い。

2017 年と 2019 年は、どの年よりも捕捉率が高いが、これは平成 29 年台風第 21 号 (気象庁 2017) や「令和元年東日本台風」 (気象庁 2019) など東日本を通過した台風から伸びるレインバンドによってもたらされた降水域が線状降水帯として検出され、それによって適中数 (FO) が増加したためであった。このような台風事例を除くために、簡易的に実況の台風中心から 300 km 以内で検出された線状降水帯を除いて捕捉率・一致率

³ 「顕著な大雨に関する情報」4 番目の条件である、領域内のキキクルを用いた基準は、数値予報の予測値に当てはめることは困難のため省略した。

表 4.20.2 2017 年 2 月以降の主なメソ数値予報システムの改良

運用日	変更概要	参照
2017 年 2 月 28 日	MSM へ非静力学モデル asuca の導入と鉛直層増強	原 (2017)
2019 年 3 月 26 日	メソ解析へ高解像度 ASCAT 海上風の利用など	太田ほか (2019)
2020 年 3 月 25 日	4 次元変分法同化システム asuca-Var へ更新と MSM 物理過程等改良	数値予報課 (2021)

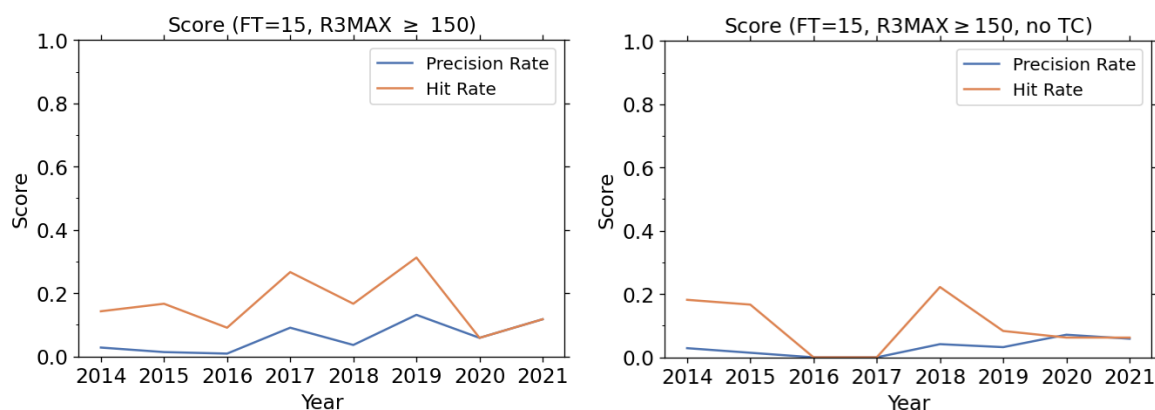


図 4.20.3 線状降水帯予測のカテゴリ検証での捕捉率・一致率の年変化。台風事例数を含む（図 4.20.2 の右図と同一）（左）と含まない（右）場合。

を再集計した。その結果を図 4.20.3 に示す。台風事例を除くと、全体的に捕捉率・一致率が低下した。台風のレインバンドは、他の線状降水帯よりも比較的スケールが大きい現象であることから、現象のスケールが大きい線状降水帯ほど予測しやすく、このことが台風の有無によって捕捉率・一致率が変化する要因のひとつと考えられる。

4.20.4 まとめ

「顕著な大雨に関する情報」で定義された線状降水帯に対して、MSM の 12-15 時間予測降水量の精度を調査した。線状降水帯の実況あり事例は、年間 20 以下と少なく MSM で予測できたのは 1-5 事例のみである。一方、予測あり事例が実況あり事例よりも大幅に多く、MSM では空振りが大半を占める。しかし、近年のメソ数値予報システムの改良により、空振り事例は減少していた。「顕著な大雨に関する情報」で定義された線状降水帯では台風事例も含まれ、それにより捕捉率・一致率の向上に寄与していた。

線状降水帯は事例数が少なく、その予測精度の評価は難しい。台風事例の有無により、線状降水帯予測の捕捉率が変化することからも、現象のスケールに応じて、予測精度を評価する必要がある、より高解像度の LFM と比較することも重要である。また、MEPS などアンサンブルプロダクトによる確率的検証や、下層収束や湿舌など線状降水帯発生メカニズムに着目した評価をすることで、線状降水帯予測の精度を評価し、改善の指標となるよう調査を継続する。

参考文献

- 原旅人, 2017: メソ数値予報システムの改良の概要. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42-47.
- Hirockawa, Y., T. Kato, H. Tsuguti, and N. Seino, 2020: Identification and Classification of Heavy Rainfall Areas and their Characteristic Features in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 835-857.
- 気象庁, 2017: 台風第 21 号及び前線による大雨・暴風等. 災害をもたらした気象事例 平成 29 年 10 月 25 日.
- 気象庁, 2019: 台風第 19 号による大雨、暴風等. 災害をもたらした気象事例 令和元年 10 月 15 日.
- 気象庁, 2020: 令和 2 年 7 月豪雨. 災害をもたらした気象事例 令和 2 年 8 月 11 日.
- 太田行哉, 岡部いづみ, 小屋松進, 西本秀祐, 谷寧人, 2019: メソ解析における観測データ利用の改良及びメソ数値予報システムにおける北西太平洋高解像度日別海面水温解析の利用開始. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61-67.
- 数値予報課, 2021: メソ数値予報システムの改良. 令和 2 年度数値予報解説資料集, 気象庁情報基盤部, 186-212.
- 津口裕茂, 2016: 新用語解説, 線状降水帯. *天気*, **63**, 11-13.

第5章 成果発表

5.1 学術論文

2021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。

1. 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.
2. Tsukijihara, T. and R. Kawamura, 2021: Contributions of the climate regime shift and historical global warming to explosive cyclone activity around Japan according to large-ensemble simulations *International Journal of Climatology*, , 1–13.
3. Yokota, S. and H. Seko, 2021: Ensemble-based singular value decomposition analysis to clarify the causes of heavy rainfall *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 2244–2263.
4. Ikuta, Y., M. Satoh, M. Sawada, H. Kusabiraki, and T. Kubota, 2021: Improvement of the Cloud Microphysics Scheme of the Mesoscale Model at the Japan Meteorological Agency using Spaceborne Radar and Microwave Imager of the Global Precipitation Measurement as Reference *Monthly Weather Review*, **149**, 3803–3819.
5. Yokota, S., T. Kadowaki, M. Oda, and Y. Ota, 2021: Improving ensemble-based background error covariances of the hybrid 4DVar in JMA’s global analysis *WGNE Res. Activ. Earth System Modell.*, **51**, 1–27.
6. Kusabiraki, H., Y. Kitamura, M. Sawada, K. Matsubayashi, and S. Nishimoto, 2021: Increasing Vertical Resolution and Updating Physical Processes in JMA’s Regional NWP System *WGNE Res. Activ. Earth System Modell.*, **51**, 5–07.
7. Nonaka, K. and S. Koyamatsu, 2021: Operational Use of GOES-16 Atmospheric Motion Vector (AMV) and ScatSat-1/OSCAT Data in JMA’s Global NWP System *WGNE Res. Activ. Earth System Modell.*, **51**, 1–09.
8. Ruiz, J., G. Lien, K. Kondo, S. Otsuka, and T. Miyoshi, 2021: Reduced non-Gaussianity by 30 s rapid update in convective-scale numerical weather prediction *Nonlinear Processes in Geophysics*, **28**, 615–626.
9. Takamatsu, T., H. Ohtake, T. Oozeki, T. Nakaegawa, Y. Honda, and M. Kazumori, 2021: Regional Solar Irradiance Forecast for Kanto Region by Support Vector Regression Using Forecast of Meso-Ensemble Prediction System *Energies*, **14**, 3245–3262.
10. Yamaguchi, H., M. Ikegami, T. Iwahira, K. Ochi, R. Sekiguchi, and T. Takakura, 2021: Upgrade of JMA’s Global Ensemble Prediction System *WGNE Res. Activ. Earth System Modell.*, **51**, 6–13.
11. Kakehata, T., M. Kunii, K. Kawano, and H. Kawada, 2021: Upgrade of JMA’s Mesoscale Ensemble Prediction System *WGNE Res. Activ. Earth System Modell.*, **51**, 5–05.
12. Ujiie, M., M. Higuchi, T. Kadowaki, Y. Kuroki, K. Kiyaoka, M. Oda, K. Ochi, R. Sekiguchi, H. Shimizu, S. Yokota, and H. Yonehara, 2021: Upgrade of JMA’s Operational Global NWP system *WGNE Res. Activ. Earth System Modell.*, **51**, 6–09.
13. Ikuta, Y., T. Fujita, Y. Ota, and Y. Honda, 2021: Variational data assimilation system for operational regional models at Japan Meteorological Agency *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 1563–1592.
14. 新野宏, 小林文明, 栃本英伍, 末木健太, 足立透, 梅原章仁, 田村幸雄, 野田稔, 佐々浩司, 加藤輝之, 加茂直幸, 中里真久, 益子渉, 伊藤純至, 横田祥, 田村哲郎, 楠研一, 石津尚喜, 2021: 「竜巻シンポジウム—藤田哲也博士生誕100年を記念して—」の報告 *天気*, **68**, 511–520.
15. 横田祥, 2021: データ同化とアンサンブル予報を用いたスーパーセル竜巻の発生要因と予測に関する研究—2019年度山本賞受賞記念講演— *天気*, **68**, 85–92.

16. 高坂裕貴, 2021: 気象庁長期再解析 (長期の過去気候データセットの整備) の紹介 *Journal of Japan Solar Energy Society* (太陽エネルギー), **266**, 48–53.
17. 石田純一, 和田章義, 析本英伍, 杉本志織, 三好建正, 澤田謙, 佐藤陽祐, 太田行哉, 2021: 第 22 回非静力学モデルに関するワークショップ開催報告 *天気*, **68**, 437–442.

5.2 国際会合

2021 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際会合を掲載する。発表者には*をつけ、その他は共著者である。なお、ここでは数値予報開発センターの職員以外の発表者は省略する。

- 第 3 回季節内から季節予測 (S2S) プロジェクト技術委員会 1 月 19 日 オンライン
 - 出席者: 久保勇太郎
- 地形性抵抗相互比較プロジェクト (COORDE) オンラインミーティング 3 月 4 日 オンライン
 - 出席者: 松川知紘
 - *松川知紘、金浜貴史、黒木志洸「Orographic drag developments at JMA: optimization of orographic drag parametrizations in GSM using COORDE-type experiments」(3 月 4 日 口頭発表)
- 第 15 回国際風ワークショップ (IWW15)¹ 4 月 12 日–4 月 16 日 オンライン
 - 出席者: 野中健一
 - *野中健一「Use of GOES-17 AMV in the JMA ' S Global NWP System」(4 月 13 日 口頭発表)
 - 高坂裕貴、古林慎哉 (共著)「AMV reprocessing activity for JRA-3Q at MSC/JMA」(4 月 16 日 口頭発表)
- 全球気候観測システム (GCOS) 合同パネル会合・気候のための大気観測パネル (AOPC) 第 26 回会合² 4 月 19 日–4 月 23 日 オンライン
 - 出席者: 古林慎哉
- ヨーロッパ地球科学連合 (EGU)2021 年総会³ 4 月 19 日–4 月 30 日 オンライン
 - 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之 (共著)「Early results of the evaluation of the JRA-3Q reanalysis」(4 月 26 日 口頭発表)
 - 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之 (共著)「Evaluation of a new Japanese reanalysis (JRA-3Q) in a pre-satellite era」(4 月 26 日 口頭発表)
- International Space Science Institute (ISSI) Science Team Fourth meeting (A Reference Quality Model For Ocean Surface Emissivity And Backscatter From The Microwave To The Infrared)⁴ 5 月 18 日 オンライン
 - 出席者: 計盛正博
- 国際鉛直探査計研究会議 (ITSC) 第 23 回会合 6 月 24 日–6 月 30 日 オンライン
 - 出席者: 村田英彦、近藤圭一、清水宏幸、亀川訓男、草野直人、笠井彩、安藤慧、計盛正博
 - *近藤圭一、入口武史、清水宏幸「Impact of microwave radiance assimilation over land using dynamic emissivity in the global NWP system of JMA」(6 月 28 日 ポスター発表)
 - *村田英彦、清水宏幸、亀川訓男、草野直人、近藤圭一「Recent upgrades and progresses of satellite radiance data assimilation at JMA」(6 月 29 日 口頭発表)
 - 計盛正博 (共著)「A reference ocean surface emission and backscatter model」(6 月 29 日 ポスター発表)
 - *清水宏幸、計盛正博「Addition of microwave humidity sounder radiance data to all-sky assimilation

¹ <https://www.ssec.wisc.edu/meetings/iwgg/2021-meeting/agenda/>

² <https://gcos.wmo.int/en/gcos-joint-panels-meeting-2021>

³ <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3762>

⁴ <https://www.issibern.ch/teams/oceansurfemiss/index.php/fourth-meeting-18-may-2021/>

in the JMA global NWP system」(6月30日 ポスター発表)

- 世界気象機関(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) 会合7月8日 オンライン
 - － 出席者: 太田行哉
- NOAA Microwave Sounder Workshop⁵ 7月28日 オンライン
 - － 出席者: 計盛正博
 - － *計盛正博「Use of satellite microwave observation in JMA NWP systems and expectation for future NOAA microwave sounding mission」(7月28日 口頭発表)
- 世界気候研究計画(WCRP)-世界気象研究計画(WWRP) データ同化・再解析シンポジウム、ECMWF 年次セミナー⁶ 9月13日-9月17日 オンライン
 - － 出席者: 古林慎哉、高坂裕貴
 - － *高坂裕貴、古林慎哉、千葉丈太郎、徳廣貴之「Representation of the past weather prior to the International Geophysical Year (1957-1958) in JRA-3Q」(9月13日 口頭発表)
 - － 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之(共著)「Brewer-Dobson circulation represented in JRA-3Q」(9月14日 口頭発表)
 - － *古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之「JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century」(9月16日 口頭発表)
 - － 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之(共著)「Early results of the evaluation of the JRA-3Q reanalysis」(9月16日 ポスター発表)
 - － 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之(共著)「Evaluation of the latest Japanese Reanalysis for three quarters of a century (JRA-3Q) during a pre-satellite era」(9月16日 ポスター発表)
- EUMETSAT 気象衛星会議2021⁷ 9月20日-9月24日 オンライン
 - － *清水宏幸、計盛正博、村田英彦「Addition of microwave humidity sounder radiance data to all-sky assimilation in the JMA global NWP system」(事前録画による発表)
- 世界気象機関(WMO) 第17回第二地区(RA II-17) 会合第2部 9月27日-9月30日 オンライン
 - － 出席者: 佐藤芳昭
 - － 佐藤芳昭(共著)「Overview of RA II WG Infrastructure」(9月28日 口頭発表)
- 第43回欧州領域モデリング会合及び第28回短期数値予報会合 9月27日-10月1日 オンライン
 - － 出席者: 北村祐二, 太田行哉, 河野耕平
 - － *北村祐二、沢田雅洋、松林健吾、草開浩、西本秀祐「Development of Limited-Area NWP Systems at JMA」(9月28日 口頭発表)
- 国際オゾンシンポジウム(QOS)2021⁸ 10月3日-10月9日 オンライン
 - － 出席者: 中川勝之
- 国際大気質予測研究ワークショップ(IWAQFR)⁹ 10月20日-10月22日 オンライン
 - － 出席者: 鎌田茜
- アジア太平洋地域における温室効果ガスワークショップ 10月25日-10月26日 オンライン
 - － 出席者: 中村貴

⁵ https://www.jpss.noaa.gov/science_events/20210728-noaa-microwave-sounder-workshop/

⁶ <https://symp-bonn2021.sciencesconf.org/>

⁷ <https://www.eumetsat.int/eumetsat-meteorological-satellite-conference-2021>

⁸ <http://qos2021.yonsei.ac.kr/index.php>

⁹ <https://congresos.cuaieed.unam.mx/event/5/>

- ESCAP/WMO 台風委員会気象作業部会 (WGM) 第 4 回会合¹⁰ 10 月 28 日 オンライン
 - 出席者：長谷川寛、檜垣将和、福浦崇史、管野淳平
 - 長谷川寛（共著）「AOP5: Storm Surge Watch Scheme」(10 月 28 日 口頭発表)
- アジアオセアニア気象衛星利用者会議（AMOSUC-11） 11 月 1 日-11 月 4 日 オンライン
 - 出席者：草野直人
 - *草野直人「Update of the radiative transfer model to RTTOV 13.0 at JMA」(11 月 3 日 口頭発表)
- 数値実験作業部会 (WGNE) 第 36 回会合¹¹ 11 月 1 日-11 月 5 日 オンライン
 - 出席者：氏家将志
 - *氏家将志「WGNE inter-comparison of Tropical Cyclone Track forecast 2020」(11 月 3 日 口頭発表)
- NOAA Infrared Sounder Workshop¹² 12 月 6 日 オンライン
 - 出席者：亀川訓男
 - *亀川訓男「Use of satellite Hyperspectral IR sounder observation in JMA NWP systems and expectation for future NOAA IR sounding mission」(12 月 6 日 口頭発表)
- 世界気象機関 (WMO) インフラ委員会 (INFCOM) 現業気候予測システム専門家チーム (ET-OCPS) 会合 12 月 7 日 オンライン
 - 出席者：小森拓也
- 世界気象機関 (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) 会合 12 月 9 日 オンライン
 - 出席者：太田行哉
- 米国地球物理学連合 (AGU)2021 年秋季会合 12 月 13 日-12 月 17 日 オンライン
 - 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之（共著）「Brewer-Dobson circulation diagnosed from JRA-3Q」(12 月 14 日 口頭発表)

¹⁰ <http://www.typhooncommittee.org/tor-meteorology-wgm/>

¹¹ <http://wgne.meteoinfo.ru/meetings/wgne36-meeting-presentations/>

¹² https://www.jpss.noaa.gov/science_events/20211206-noaa-virtual-infrared-sounder-workshop/

5.3 国内会合

2021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。発表者には*をつけ、その他は共著者である。なお、ここでは数値予報開発センターの職員以外の発表者は省略する。

1. 数値予報開発センターが主催した会合

- 第1回気象庁数値モデル研究会 asuca 分科会¹ 10月13日 オンライン
 - － *北村祐二「asucaの境界層過程・乱流過程について」(10月13日口頭発表)
 - － *沢田雅洋「MSM2003で導入された雲物理の改良」(10月13日口頭発表)

2. 数値予報開発センター以外の機関が主催した会合

- 日本気象学会長期予報研究連絡会研究会 1月17日 オンライン
 - － *千葉丈太郎、古林慎哉、高坂裕貴、徳廣貴之「気象庁第3次長期再解析 JRA-3Q」(1月17日口頭発表)
 - － 平原翔二(共著)「次期季節アンサンブル予報システム JMA/MRI-CPS3」(1月17日口頭発表)
- 日本気象学会 2021年度春季大会² 5月16日-5月21日 オンライン
 - － *北村祐二、沢田雅洋、松林健吾、草開浩、西本秀祐「2021年3月の気象庁局地数値予報システム更新の概要」(5月18日口頭発表)
 - － *古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之「気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の概要」(5月18日口頭発表)
 - － 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之(共著)「気象庁長期再解析(JRA-3Q)非衛星時代の品質評価」(5月18日口頭発表)
 - － *氏家将志「2021年3月の気象庁全球数値予報システムの更新について」(5月18日口頭発表)
 - － *雁津克彦、森祐貴、井上卓也、藤兼典史「統合型ガイダンスの開発概要について」(5月18日口頭発表)
 - － 中村貴、近藤圭一(共著)「衛星観測データのCO₂収支速報解析へのインパクト調査」(5月18日口頭発表)
 - － *黒木志洸「気象庁全球モデルの水平高解像度化に向けた力学過程の開発」(5月19日ポスター発表)
 - － *佐藤芳昭「気象庁現業数値予報システムの現状と開発計画」(5月19日ポスター発表)
 - － *徳廣貴之「気象庁で現業運用する気候・海洋・大気化学モデルの現状と開発計画」(5月19日ポスター発表)
 - － 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之(共著)「JRA-3Q長期再解析の初期評価結果」(5月19日ポスター発表)
 - － 北村祐二、草開浩(共著)「気象庁現業モデル asucaの気候実験利用のための開発」(5月19日ポスター発表)
- 日本地球惑星科学連合(JpGU)2021年大会³ 5月30日-6月6日 オンライン
 - － *清水宏幸、計盛正博、村田英彦「Addition of microwave humidity sounder radiance data to all-sky assimilation in the JMA global NWP system」(6月3日口頭発表)
 - － 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之(共著)「Quality assessment of the third Japanese Reanalysis for three quarters of a century (JRA-3Q) during a pre-satellite era」(6月4日口頭発表)
 - － 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之(共著)「Early results of the evaluation of the JRA-3Q reanalysis」(6月4日口頭発表)
 - － 中村貴(共著)「An observation-based reconstruction reveals progressive ocean acidification around Japan」(6月5日口頭発表)

¹ <http://pfi.kishou.go.jp/bunkaasuca2021.html>

² <https://www.metsoc.jp/meetings/2021s>

³ <http://www.jpгу.org/meeting-j2021/>

- 中村貴（共著）「Signal of CO₂ emitted from 2020 Western U.S. wildfire captured by commercial airliner observations」(6月6日 口頭発表)
- 日本気象学会 2021 年夏季大会 8月21日-8月22日 オンライン
 - 平原翔二（共著）「数値季節予測システムの開発と利用」(8月21日 口頭発表)
- 日本太陽エネルギー学会「太陽光発電出力予測と需要」セミナー 9月27日 オンライン
 - 高坂裕貴（共著）「気象庁長期再解析（長期の過去気候データセットの整備）の紹介」(9月27日 口頭発表)
- 第23回非静力学モデルに関するワークショップ⁴ 10月28日-10月29日 オンライン
 - *横田祥、河野耕平、秋元銀河「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」(10月29日 口頭発表)
- 第26回大気化学討論会⁵ 11月9日-11月11日 オンライン
 - 近藤圭一、中村貴（共著）「衛星観測を用いた領域二酸化炭素収支推定」(11月11日 口頭発表)
- サイエンスカフェつくば 11月26日 オンライン
 - 佐藤芳昭（共著）「これからの気象庁の数値予報」(11月26日 口頭発表)
- 日本気象学会 2021 年度秋季大会⁶ 12月2日-12月8日 三重大学・オンライン
 - *平原翔二「次期季節予測システム JMA/MRI-CPS3」(12月3日 ポスター発表)
 - *川口真司「寒気流入と大雪との関連性に関する研究」(12月3日 ポスター発表)
 - 古林慎哉、高坂裕貴、千葉丈太郎、徳廣貴之（共著）「JRA-3Q 長期再解析の赤道波・熱帯低気圧の表現性能評価」(12月3日 ポスター発表)
 - 計盛正博（共著）「衛星搭載高性能マイクロ波放射計による積算水蒸気量の長期トレンド比較」(12月3日 ポスター発表)
 - *北村祐二「気象庁非静力学モデル asuca の大規模計算に向けた開発計画と課題」(12月8日 口頭発表)
 - *中村佑希「気象庁全球解析システムへのカルマンフィルタを用いた航空機気温データバイアス補正手法の導入」(12月8日 口頭発表)
 - *氏家将志「気象庁全球モデル開発の展望と将来の計算機対応に向けた取り組み」(12月8日 口頭発表)
 - *近藤圭一、入口武史、清水宏幸「陸域マイクロ波輝度温度同化における地表面射出率と地表面温度の推定についての調査」(12月8日 口頭発表)
 - 近藤圭一（共著）「Lorenz-96 モデルを使った粒子フィルタのデータ同化インパクトの研究」(12月8日 口頭発表)

⁴ <https://sites.google.com/view/nhm2021>

⁵ https://jpsac.org/symposium/26th_touronkai_2021/

⁶ <https://www.metsoc.jp/meetings/2021a>

5.4 数値予報課コロキウム

表 5.4.1: 2021 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 18 日	米原仁、門脇隆志、山口春季、宮岡健吾 (気象研究所)、関口亮平、越智健太、井藤智史、鍋谷亮司 (数値予報課本課)	気象庁全球モデル (GSM) の鉛直層増強、同化でのアンサンブルメンバー数増強、及び陸面解析改良の業務化試験報告
1 月 20 日	草開浩、北村祐二、沢田雅洋、松林健吾、西本秀祐	局地解析予報システムの更新 (業務化試験報告)
1 月 21 日	平原翔二、久保勇太郎、吉田拓馬、小森拓也、千葉丈太郎、関口亮平、越智健太、高倉寿成、金浜貴史、杉本裕之 (気候情報課)、足立恭将 (気象研究所)、石川一郎 (気象研究所)、藤井陽介 (気象研究所)	次期季節予測システム JMA/MRI-CPS3 の性能評価試験報告
1 月 25 日	野中健一、草野直人	GOES-17 CSR・AMV の総合性能評価試験報告
1 月 27 日	中村佑希	全球解析における航空機気温データバイアス補正手法の改良 (性能評価試験報告)
1 月 27 日	亀川訓男	ハイパースペクトル赤外サウンダの Metop-C/IASI の利用に向けたデータセットの移行 (性能評価試験報告)
1 月 27 日	清水宏幸	全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの全天同化センサーの拡充
2 月 18 日	中村佑希、野中健一、亀川訓男、清水宏幸、草野直人	全球解析における観測データ利用手法の改良 (GOES-17 AMV, CSR の新規利用、ハイパースペクトル赤外サウンダの Metop-C/IASI の利用に向けたデータセットの移行、マイクロ波水蒸気サウンダ全天同化センサーの拡充、航空機気温データバイアス補正手法の改良) の総合性能評価試験報告
2 月 22 日	越智健太、樋口真悠子	全球積雪深解析の改良に向けた開発進捗報告
2 月 22 日	越智健太、平原翔二、足立恭将 (気象研究所)	全球モデルにおける湖の改良に向けた開発進捗報告
3 月 4 日	清水宏幸	メソ解析における Metop-C/AMSU-A, MHS の新規利用 (性能評価試験報告)
3 月 4 日	笠井彩、小屋松進 (気象衛星センター)	メソ解析における新規衛星データ利用に関する開発進捗状況
3 月 11 日	沢田雅洋、北村祐二、松林健吾、草開浩、西本秀祐、相河卓哉、山崎行浩	MSM78 時間延長予報に向けた開発進捗報告
3 月 15 日	石井恭介	東京レーダー反射強度の利用再開 (性能評価試験報告)
3 月 18 日	木南哲平	NCEP 派遣報告
3 月 25 日	市川悠衣子、関口亮平、平原翔二	気象庁全球モデル (GSM) のオゾン気候値更新および、太陽天頂角計算の高度化と地表面アルベド高解像度化について (進捗報告)
3 月 25 日	小田真祐子、横田祥	全球 LETKF の輝度温度観測の鉛直局所化の緩和
4 月 8 日	長澤亮二 (気象研究所)	気象庁全球大気モデルの放射計算における氷雲の扱いの見直し

開催日	発表者	発表表題
4月20日	亀川訓男、野中健一、中村佑希、清水宏幸、草野直人	全球解析における観測データ利用手法の改良 (GOES-17 AMV, CSR の新規利用、ハイパースペクトル赤外サウンダの Metop-C/IASI の利用に向けたデータセットの移行、マイクロ波水蒸気サウンダ全天同化センサーの拡充、航空機気温データバイアス補正手法の改良) の業務化試験報告
4月20日	樋口真悠子、入口武史、中村佑希	メソ解析における船舶 GNSS 利用に向けた性能評価試験報告
4月22日	米原仁、氏家将志、黒木志洸、門脇隆志、小田真祐子、山口春季、越智健太、関口亮平、市川悠衣子	気象庁全球モデルの水平高解像度化と物理過程改良、及び全球解析改良の性能評価試験報告
5月13日	松川知紘	気象庁全球モデル (GSM) の台風進路予測の改善に向けた誤差特性の調査
6月15日	平原翔二、久保勇太郎、吉田拓馬、小森拓也、千葉丈太郎、関口亮平、越智健太、高倉寿成、金浜貴史、市川悠衣子、杉本裕之 (気候情報課)、足立恭将 (気象研究所)、石川一郎 (気象研究所)、藤井陽介 (気象研究所)	次期季節予測システム JMA/MRI-CPS3 の業務化試験報告
7月1日	山口春季	全球アンサンブル予報システムの水平高解像度化
7月1日	高倉寿成	GEPS の 2 段階 SST 法における CPS3 の利用と緩和期間変更
7月20日	樋口真悠子、入口武史、中村佑希、数値予報課現業班	船舶 GNSS 利用の試験運用期間における調査結果報告
7月29日	米原仁、関口亮平、山口春季	気象庁全球モデル (GSM) の水平高解像度化と物理過程改良、及び全球解析改良の総合性能評価試験報告
8月4日	川畑拓矢 (気象研究所, 気象業務支援センター)、LeDuc (気象業務支援センター, 東京大学)、大泉伝 (気象研究所, 気象業務支援センター)、太田琢磨 (気象リスク対策課)、小林健一郎 (神戸大学)、斉藤和雄 (気象研究所, 気象業務支援センター, 東京大学)	球磨川氾濫を引き起こした線状降水帯および洪水危険度の確率予測
8月19日	山口春季、市川悠衣子、岩平朋也、越智健太、関口亮平、高倉寿成	次期全球アンサンブル予報システムの総合性能評価試験報告
9月2日	石井恭介	2020 年度更新レーダー及び仙台レーダーの利用再開 (性能評価試験報告)
9月6日	堀田大介 (気象研究所)、門脇隆志、米原仁、石橋俊之 (気象研究所)	対自分解析検証スコアの不確実性の定量化
9月9日	笠井彩	局地解析における Metop-C/AMSU-A, MHS の新規利用 (性能評価試験報告)
9月9日	亀川訓男	全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ Metop-C/IASI の利用について (性能評価試験報告)
9月17日	工藤淳、井上卓也	統合型気温ガイダンス (格子形式) の部内試験運用について

開催日	発表者	発表表題
9月30日	横田祥、秋元銀河、河野耕平、幾田泰醇（気象研究所）	局地解析へのハイブリッド同化手法の導入（開発進捗報告）
10月6日	西本秀祐	メソ・局地モデルの境界層過程における長さスケールの定式の見直し
10月6日	草開浩	領域モデルの地表面過程における蒸発散プロセスの改良
10月7日	林田和夫	気象庁全球数値予報システムにおける解像度変換処理の省メモリ化について
10月14日	工藤淳	IBIS プロジェクトの進捗と第一期 Python 化に向けた開発について
10月19日	中村貴、眞木貴史（気象研究所）	二酸化炭素解析システムへの CO2 衛星観測（GOSAT）データ同化の導入について（業務化試験報告）
10月19日	鎌田茜、田中泰宙（気象研究所）、白石瞬（気象技術開発室）、中山隆一郎（気象技術開発室）	ひまわり 8 号エーロゾルプロダクト更新の黄砂解析予測システムへの影響評価報告
10月21日	米原仁、山口春季、市川悠衣子	気象庁全球モデル (GSM) の水平高解像度化と物理過程改良、及び全球解析改良の業務化試験報告
11月1日	黒木志洸、氏家将志、堀田大介（気象研究所）	GSM のスペクトル法におけるガウス重み・ルジャンドル陪関数計算手法の高度化
11月2日	野中健一	全球解析における Dual-Metop AMV の利用に向けた開発進捗報告
11月2日	齊藤直彬	全球解析における COSMIC-2 の GNSS 掩蔽観測データの利用に向けた開発進捗報告
11月4日	井岡佑介	メソ解析における Metop-C/ASCAT 海上風データの新規利用
11月4日	笠井彩	メソ解析における ATMS の同化利用に関する開発進捗状況
11月11日	中村佑希	全球・メソ・局地解析における航空機データの高度利用 (性能評価試験報告)
11月18日	秋元銀河、大井川正憲、畔野貴弘、河野耕平、横田祥、清水宏幸、草野直人、齊藤直彬、鍋谷亮司（数値予報課本課）	メソ解析のモデルトップ引き上げ（開発進捗報告）
11月19日	越智健太、高倉寿成、小森拓也、足立恭将（気象研究所）	大気・海洋結合化による全球 EPS の改良に向けた取り組みの紹介
11月25日	井上卓也、土田尚侑	LFM 気温・降雪量ガイダンスの開発
12月2日	草開浩、メソモデルチーム	メソ数値予報システムの更新（性能評価試験報告）
12月16日	横田祥、畔野貴弘、大井川正憲、秋元銀河、河野耕平、幾田泰醇（気象研究所）、松下泰広（数値予報課本課）、白山洋平	局地解析へのハイブリッド同化手法の導入（性能評価試験報告）
12月23日	工藤淳、井藤智史、井上卓也、井岡佑介、渡口暲、服部正隆（航空予報室）	次世代 AI 基礎研修実施報告

第6章 連携・共同研究の報告

6.1 気象研究所との開発連携の報告

2021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) **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
開発連携の内容 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
- (b) **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
開発連携の内容 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
- (c) **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
開発連携の内容 ハイブリッド同化の次のデータ同化手法の候補に関する基礎調査
- (d) **連携先** 気象観測研究部第三研究室
開発連携の内容 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
- (e) **連携先** 気象観測研究部第三研究室
開発連携の内容 観測データのインパクト評価手法に関する情報共有と助言

2. 数値予報システム（局地）の予測精度向上

- (a) **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
開発連携の内容 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
- (b) **連携先** 気象予報研究部第一研究室
開発連携の内容 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
- (c) **連携先** 気象予報研究部第三研究室
開発連携の内容 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

3. 数値予報システム（メソ、局地）の予測精度向上

- (a) **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
開発連携の内容 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

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) **連携先** 気象観測研究部第四研究室
開発連携の内容 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

5. 数値予報システム（局地アンサンブル）の開発と改良

- (a) **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
開発連携の内容 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
- (b) **連携先** 気象観測研究部第四研究室
開発連携の内容 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

6. 数値予報システム（全球、メソ、局地）の予測精度向上

- (a) **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

開発連携の内容 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

- (b) 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

開発連携の内容 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

7. AI 技術

- (a) 連携先 全球大気海洋研究部第三研究室

開発連携の内容 ダウンスケーリング等、AI 技術の知見の共有

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) 連携先 台風・災害気象研究部第二研究室

開発連携の内容 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

9. 季節予報システムの予測精度向上

- (a) 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

開発連携の内容 将来の季節予報システムの研究開発

10. 気候データ同化の高度化

- (a) 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

開発連携の内容 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

11. 波浪モデルの予測の改善精度向上

- (a) 連携先 全球大気海洋研究部第五研究室

開発連携の内容 波浪モデルの高度化に向けた技術的な助言・支援

12. 海況監視予測システムの予測精度向上

- (a) 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

開発連携の内容 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

- (b) 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

開発連携の内容 JPN 海氷予測の改善に向けたシステム改良への支援

- (c) 連携先 全球大気海洋研究部第五研究室

開発連携の内容 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

- (d) 連携先 全球大気海洋研究部第四研究室

開発連携の内容 海洋モデルの更なる高速化・精緻化のための研究開発

13. 大気化学モデルおよび観測データ利用の高度化

- (a) 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

開発連携の内容 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

6.2 気象衛星センターとの共同研究

1. 開発センター担当者 野中健一

期間 2021 年

開発名称 大気追跡風の精度向上へ向けての調査

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 (2021 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
アンサンブルデータ同化のための最適摂動手法に関する研究	科研費基盤研究(B)	2016-2021	東京大学	研究協力者: 横田祥
粒子フィルタを用いた積乱雲の発生・発達に関する不確実性の解明	科研費基盤研究(B)	2017-2021	気象研究所	研究協力者: 横田祥
海盆間相互作用を介した西大太平洋-インドモンスーンと台風の年々変動メカニズムの解明	科研費基盤研究(B)	2017-2021	気象研究所	研究協力者: 久保勇太郎
統合的気候モデル高度化研究プログラム	文部科学省	2017-2021	東京大学	研究協力者: 古林慎哉、 平原翔二
結合データ同化システム開発の方法と応用	科研費基盤研究(A)	2017-2021	統計数理研究所	研究協力者: 久保勇太郎、 越智健太
航空機運航におけるアンサンブル予報情報の利用法の研究	宇宙航空研究開発機構	2018-2021	宇宙航空研究開発機構	共同研究者: 井藤智史
低気圧に伴う竜巻の階層構造と予測可能性に関する基礎研究	科研費基盤研究(B)	2018-2021	東京大学	研究協力者: 横田祥
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
気象庁における km-規模のハイブリッドデータ同化システムを用いた GPM/DPR データ同化手法の高度化	第 2 回地球観測研究公募	2019-2021	宇宙航空研究開発機構	研究協力者: 秋元銀河、 欠畑賢之
宇宙からのマイクロ波放射観測から得られる水蒸気、雲、降水に関する情報の気象庁数値予報システムでの利用	第 2 回地球観測研究公募	2019-2021	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、 亀川訓男、 清水宏幸、 草野直人、 笠井彩
観測ビッグデータを活用した変分法データ同化の高度化	科研費研究活動スタート支援	2019-2021	気象研究所	研究協力者: 大井川正憲
衛星観測データを活用した次世代炭素収支解析システムの構築	科研費基盤研究(C)	2019-2021	気象研究所	研究協力者: 中村貴

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
ビッグデータ同化と AI によるリアルタイム気象予測の新展開	AIP 加速課題(戦略的創造研究推進事業)	2019-2021	理化学研究所	共同研究者: 雁津克彦、 井上卓也、 高田伸一、 井藤智史、 白山洋平、 藤兼典史、 笹子貴昭、 土田尚侑
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
気象庁非静力学モデル asuca による極端気象の再現の検証に関する研究	東北大学	2020-2021	東北大学	研究協力者: 佐藤芳昭
夏季の成層圏-対流圏結合系における力学-放射-化学過程の解明と気候影響評価	科研費基盤研究(C)	2020-2022	気象研究所	研究協力者: 中川勝之
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
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、 徳廣貴之、 小森拓也
高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発	東京大学大気海洋研究所(AORI)「特定共同研究」	2021	東京大学	共同研究者: 氏家将志、 米原仁、 横田祥、 齊藤慧、 松川知紘、 黒木志洸、 市川悠衣子
アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化とデータ同化手法の開発	東京大学大気海洋研究所気候システム研究系特定共同研究	2021	東京大学	研究参加者: 氏家将志、 米原仁、 金濱貴史、 木南哲平、 齊藤慧、 黒木志洸、 市川悠衣子、 須藤康平

研究名称	研究種別	期間(年度)	共同研究機関	開発センター職員の研究分担等
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
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
温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究	環境研究総合推進費	2021-2023	国立環境研究所、 気象研究所、 海洋研究開発機構、 千葉大学	研究協力者： 中村貴
顕著現象予測精度向上を目指した粒子フィルタによるハイブリッドデータ同化手法の構築	科研費若手研究	2021-2024	気象研究所	研究代表者： 近藤圭一
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

6.4 数値予報資料共有 Web

6.4.1 はじめに

「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」（平成30年8月交通政策審議会気象分科会提言）では、「研究機関や国外機関等との積極的な情報交換や研究に必要なデータ提供等の連携をより一層深めていき、国内外の最新の知見を結集しながら、我が国の気象特性を踏まえた『数値予報』技術の飛躍的向上を目指す」とされているところである。また、「気象業務における産学官連携の推進」（令和2年12月交通政策審議会気象分科会提言）では、「産学官がそれぞれの強みを活かしながら社会的課題の解決を一層行える環境として、気象情報・データの共有環境を構築していくことが重要である」とされている。

数値予報課では、これまでも大学・研究機関との間で数値予報モデル開発懇談会等の会合を通じ、当庁の現業数値予報モデルの精度向上に資する連携の在り方について、定期的に議論を重ねてきた。この中で、気象庁の現業作業で用いているモニタ図等のデータを研究コミュニティが検証し、改善に資する助言や提案をする仕組みがあれば有効との意見があり、実現に向けた検討を進めてきた。

こうした背景を踏まえ、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として、数値予報課が日々の現業作業で用いている数値予報モニタ図とおおむね同様の資料について、気象分野の大学・研究機関と共有するための環境「数値予報資料共有 Web¹」を整備し、令和3年3月に運用を開始した（福山ほか2021）。

本節では、数値予報資料共有 Web の概要について紹介する。

6.4.2 運用目的

数値予報資料共有 Web では以下の三項目を目的として掲げ、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 の利用者は、利用規約により気象分野の大学・研究機関の研究者と定め、利用に際しては、事前に所定の様式による利用開始申請を行うものとしている。申請は所属機関・部署の代表者（責任者）が一括して行い、代表者（責任者）に対して、アカウントを発行する方式としており、令和3年12月時点で約20件の利用申請が承認されている。

数値予報資料共有 Web では、数値予報モニタ図を準リアルタイムで提供しており、予報初期時刻からおよ

そ15時間後に資料を閲覧できる環境を整備している。本サービス上のコンテンツの著作権は、全て気象庁に帰属するものとしている。また、顕著現象が発生した際には、振り返りによる発生要因等の情報交換・認識の共有を行うため、単に数値予報モニタ図の提供を行うだけではなく、意見交換を行うための Redmine 環境を整備し、承認されたユーザであれば、誰でもフォーラム等への投稿を自由に実施できるようになっている。

数値予報資料共有 Web を利用して得られた成果の還元に関しては、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るとともに、気象庁が数値予報検証にかかる報道発表を行う場合等は、利用者に事前の助言等を依頼する場合があるとしている。

以上により、数値予報資料共有 Web を通じて、当庁の数値予報モデルにおける解析・予測の課題にかかる共通認識を持つことができるとともに、得られた知見を当庁システムにフィードバックすることを通じて、双方の一層の連携強化が期待される。

6.4.3 数値予報モニタ図

数値予報資料共有 Web で提供している数値予報モニタ図の表示例を図 6.4.1 に示す。数値予報モニタ図では、一つの画面上に6枚の予想画像を表示する仕様としており、画面上部の「表示対象モデル・ガイダンス」を変更することにより、表示するモデル・ガイダンスの種類及び領域を選択することができるようになっている。

数値予報モニタ図の基本的な仕様は表 6.4.1 のとおり。

表 6.4.1 数値予報モニタ図の基本的な仕様

表示対象	GSM, GSM ガイダンス, MSM, MSM ガイダンス, LFM, LFM ガイダンス
更新時期	予報初期時刻+15 時間後
領域	表示対象毎のプリセット領域
提供期間	GSM 及び GSM ガイダンスはサービス開始以降（サーバ上に保存可能な期間に限る）、MSM, MSM ガイダンス, LFM 及び LFM ガイダンスは過去約1年分

領域は気象庁が事前に設定したプリセット領域を表示する仕様としている。例えば GSM であれば日本だけでなく、ヨーロッパやオセアニアなど海外領域の表示も可能である。一方、MSM ではこうした領域で表示することはできない。詳細な表示領域については、数値予報資料共有 Web に掲載している説明資料を参照されたい。

表示対象モデル・ガイダンスの提供回数と対象予報時間は表 6.4.2 のとおり。

¹ <https://nwp.kishou.go.jp/jmanwp/>

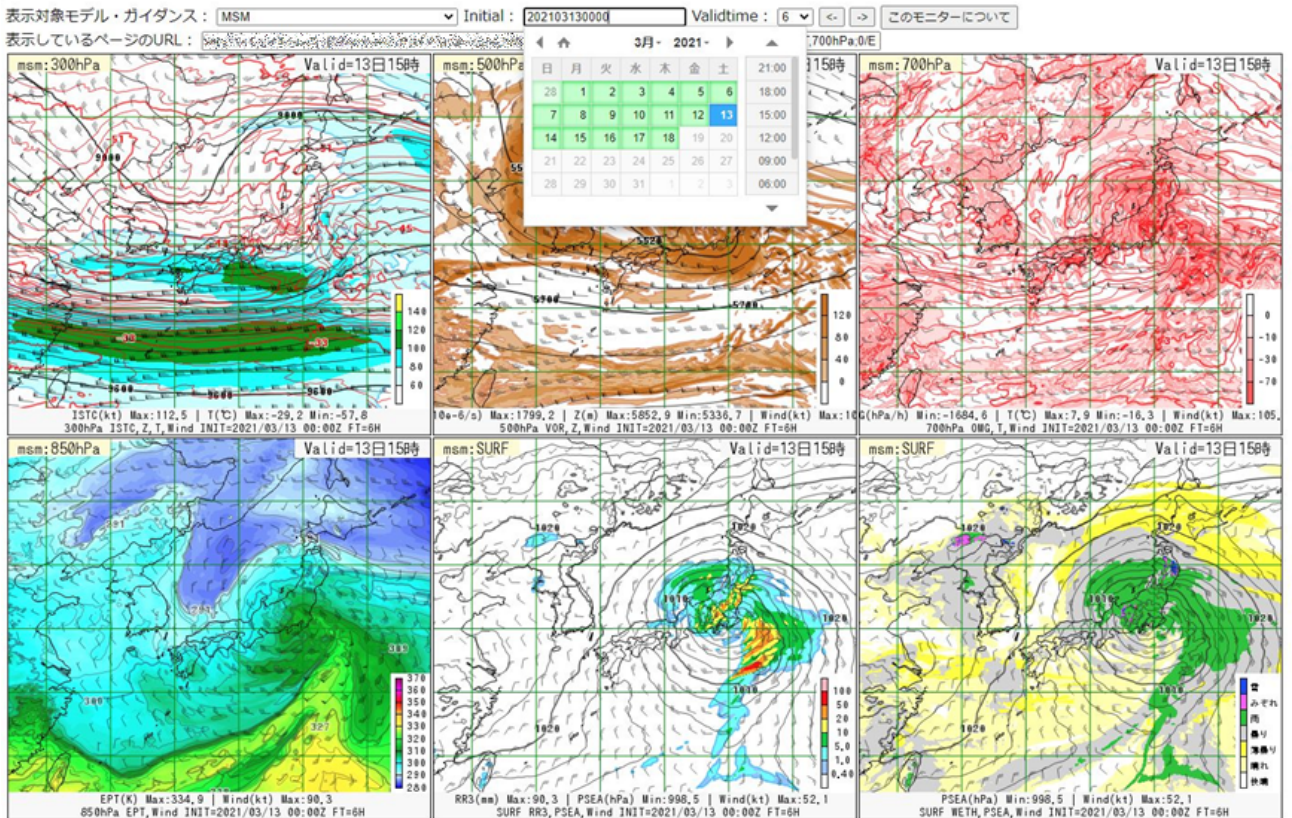


図 6.4.1 数値予報モニタ図の表示例

表 6.4.2 表示対象モデル・ガイダンスの提供回数と対象予報時間（令和 3 年 12 月現在）

モデル・ガイダンス	提供回数	対象予報時間
GSM	4 回/日	264 時間 (00,12UTC 初期値), 132 時間 (06,18UTC 初期値)
GSM ガイダンス	4 回/日	84 時間
MSM	8 回/日	51 時間 (00,12UTC 初期値), 39 時間 (03,06,09,15,18,21UTC 初期値)
MSM ガイダンス	8 回/日	39 時間
LFM	24 回/日	10 時間
LFM ガイダンス	24 回/日	10 時間

6.4.4 今後の展望

数値予報モニタ図で表示している各種画像の描画には、気象庁が開発した描画ツール TAG(雁津 2017) を用いている。TAG の特徴として、指定した領域や要素を高速で描画する機能を備えている。本機能を用いることで、現在のような限定的なプリセット領域の表示にとどまらず、図の表示領域を自由に変更できるようにすることや、利用者のリクエストに応じた動的な表示が可能となる。今後このような機能の実装に取り組む予定である。

また、大学・研究機関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: 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.

第7章 委員・専門家等

7.1 国際機関の委員・専門家等

1. 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)

2. WMO 研究評議会 (Research Board)

- 数値実験作業部会 (WGNE)
氏家将志 (部会員)

3. WMO 第二地区 (RA II)

- インフラ作業部会 (WG-Infrastructure)
佐藤芳昭 (議長)

4. 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)

5. 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)

6. 海面高度科学チーム (OSTST)

- 浅井博明 (メンバー)

7. 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)

8. 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)

7.2 国内機関の委員・専門家等

1. 公益社団法人日本気象学会

- 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 期委員教育と普及委員会委員
黒木志洸
- 日本気象学会第 41 期委員講演企画委員会委員
平原翔二
- 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 2022 年度春季大会実行委員会委員
中村貴

2. 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

3. 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、計盛正博

4. 宇宙航空研究開発機構

- 衛星搭載風ライダー（DWL）分科会メンバー
野中健一
- 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

付録 A 略語表

略語	原語	訳または意味
3D-Var	3 Dimensional Variational method	3次元変分法
4D-Var	4 Dimensional Variational method	4次元変分法
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
AGCM	Atmospheric General Circulation Model	大気大循環モデル
AHI	Advanced Himawari Imager	ひまわり8号、9号に搭載されているイメージャ
AI	Artificial Intelligence	人工知能
AIREP	AIRcraft REPorts	航空機実況気象通報
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder	大気赤外サウンダ（Aqua衛星に搭載）
AMDAR	Aircraft Meteorological DATA Relay	航空機観測データ中継装置
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer-2	高性能マイクロ波放射計2
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）
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
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（NOAA-20, Suomi-NPP衛星に搭載）
BGM法	Breeding of Growing Modes法	成長モード育成法
BSS	Brier Skill Score	確率予測に関する統計指標の一つ
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-SSF	CERES-Single Scanner Footprint	単独衛星フラックス
CFOSAT	Chinese-French Oceanography Satellite	中仏海洋衛星
CHUAN	Comprehensive Historical Upper-Air Network	歴史的な高層観測データセット
CIRES	Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences	米国の環境科学共同研究所
CLASS	Comprehensive Large Array-data Stewardship System	包括的大規模配列データ管理システム（NOAAの衛星データ提供システム）
CM SAF	Satellite Application Facility on Climate Monitoring	気候監視に関する衛星データ処理研究拠点
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project	結合モデル相互比較プロジェクト
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）
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（NOAA-20, Suomi-NPP衛星に搭載）
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
DWL	Doppler Wind Lidar	ドップラー風ライダー
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	欧州中期予報センター

略語	原語	訳または意味
ENSO	El Niño-Southern Oscillation	エルニーニョ・南方振動
EPS	Ensemble Prediction System	アンサンブル予報システム
ERA	ECMWF ReAnalysis	ECMWF 再解析
ESCAP	The 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
FCDR	Fundamental Climate Data Record	基本気候データレコード
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
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
GEONET	GNSS Earth Observation Network System	GNSS 連続観測システム
GEPS	Global Ensemble Prediction System	気象庁の全球アンサンブル予報システム
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
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite	米国の静止気象衛星
GOSAT	Greenhouse gases Observing SATellite	日本が打ち上げた温室効果ガス観測技術衛星。和名は「いぶき」
GPM	Global Precipitation Measurement	全球降水観測計画
GPV	Grid Point Value	格子点値
GSAM-TM	Global Spectral Atmosphere Model - Transport Model	GSM を用いた大気輸送モデル
GSM	Global Spectral Model	気象庁の全球スペクトルモデル
HadAT	HADley Centre's rAdiosonde Temperature product	ハドレーセンターのラジオゾンデ気温プロダクト
HadISD	HADley Integrated Surface Dataset	ハドレーセンターの地上観測データセット
HIRS	High resolution Infrared Radiation Sounder	高分解能赤外放射サウンダ（NOAA, Metop 衛星に搭載）
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer	赤外大気探査干渉計（Metop 衛星に搭載）
IAU	Incremental Analysis Update	同化による修正量を強制力として一定の割合で与え続ける手法
IBTrACS	International Best Track Archive for Climate Stewardship	気候管理に関する国際ベストトラックアーカイブ
ICAO	International Civil Aviation Organization	国際民間航空機関
ICOADS	International Comprehensive Ocean-Atmosphere DataSet	包括的海洋-大気データセット
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
IGRA	Integrated Global Radiosonde Archive	全球ラジオゾンデアーカイブ
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	米国大気海洋庁国立気象衛星データ情報サービス作成の積雪域プロダクト
INFCOM	INFrastructure COMmission	WMO インフラ委員会
ISD	Integrated Surface Database	NCEI の地上観測データセット
ISPD	International Surface Pressure Databank	国際地上気圧観測データバンク
ITCZ	Intertropical Convergence Zone	熱帯収束帯
Jason	Jason	欧米共同運用の海面高度観測衛星
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）

略語	原語	訳または意味
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
JST	Japan Standard Time	日本標準時
LAF 法	Lagged Average Forecast 法	時間ずらし平均法
LAI	Leaf Area Index	葉面積指数
LEPS	Local Ensemble Prediction System	気象庁の局地アンサンブル予報システム
LES	Large Eddy Simulation	ラージエディ (大渦) シミュレーション
LETKF	Local Ensemble Transform Kalman Filter	局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
LFM	Local Forecast Model	気象庁の局地モデル
MA	Meso Analysis	メソ解析
MASINGAR	Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere	気象研究所全球エ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 の極軌道気象観測衛星
MGDSST	Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperature	気象庁の全球日別海面水温解析 (値)
MHS	Microwave Humidity Sounder	マイクロ波水蒸気サウンダ (NOAA, Metop 衛星に搭載)
MJO	Madden Julian Oscillation	マッデン-ジュリアン振動
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)
MWHS	MicroWave Humidity Sounder	マイクロ波水蒸気サウンダ (FY 衛星に搭載)
MYNN	Mellor-Yamada Nakanishi-Niino scheme	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino 境界層スキーム
NCAR	National Center for Atmospheric Research	米国大気研究センター
NCDC	National Climate Data Center	米国気候データセンター
NCEI	National Centers for Environmental Information	米国環境情報センター
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	米国環境予測センター
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
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)
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
OSTST	Ocean Surface Topography Science Team	海面高度科学チーム
QC	Quality Control	品質管理
QI	Quality Indicator	品質指標
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

略語	原語	訳または意味
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	平均二乗偏差
RMSE	Root Mean Square Error	二乗平均平方根誤差
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
SAPHIR	Soundeur Atmospherique du Profil d'Humidite Intertropicale par Radiometrie	マイクロ波水蒸気探査計 (Megha-Tropiques 衛星に搭載)
Saral	Satellite with ARgos and ALtiKa	インドの太陽同期準回帰ダウンダスク軌道海洋観測衛星
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
ScatSat	ScatSat	インドの海洋観測用極軌道衛星
SEKF	Simplified Extended Kalman Filter	簡略化した拡張カルマンフィルタ
Sentinel	Sentinel	欧米共同運用の海面高度観測衛星
SI	Scattering Index	散乱インデックス
SI	Similarity index	類似度
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)
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)
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
TEMP	TEMP	高層実況気象通報式
Terra	Terra	米国の午前軌道地球観測衛星
TIRA	Task Team for Intercomparison of ReAnalyses	WCRP の再解析相互比較タスクチーム
TL	Tangent Linear Model	接線形モデル
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
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
UKMO	United Kingdom Met Office	英国気象局
UTC	Coordinated Universal Time または Temps Universel Coordonn'e (フランス語)	協定世界時
VarBC	Variational Bias Correction	変分法バイアス補正
VTPR	Vertical Temperature Profile Radiometer	赤外気温サウンダ (5号以前の NOAA 衛星に搭載)
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
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	世界気象機関研究評議会 (WMO/Research Board) 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
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

付録B 数値予報開発センター年報 発行履歴

発行年月	発行号
2021年（令和3年）3月	数値予報開発センター年報（令和2年）

数値予報開発センター一年報

令和4年3月17日発行

編集 気象庁 数値予報開発センター
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-2
発行 気象庁 数値予報開発センター

Copyright © 気象庁数値予報開発センター 2022 Printed in Japan
著作権法で定める範囲を超えて、無断で転載または複製することを
禁止します。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。