

第4章 数値予報システムの開発進捗

4.1 全球モデルの開発進捗

4.1.1 はじめに

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

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

全球10kmメッシュ海面水温データの作成に関しては、全球0.1°メッシュ日別海面水温解析値として気象

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

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

4.1.2 モデルフレーム改良の開発

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

(1) 領域分割手法の改良

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

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

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

Tq959.960mpi

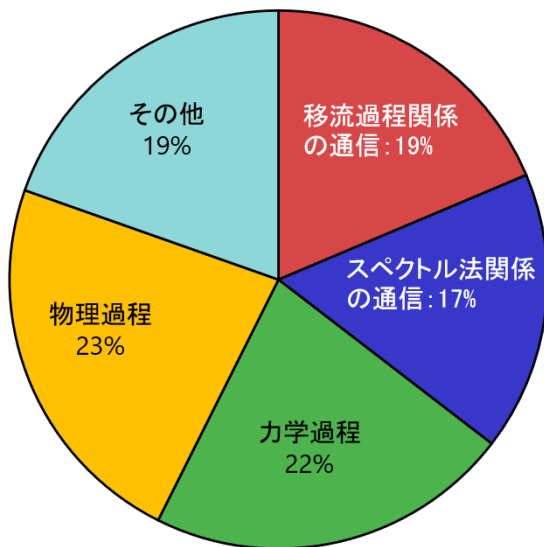


図 4.1.1 第 10 世代スーパーコンピュータシステム (Cray XC50) における、GSM の実行時間に占める主要処理の内訳 (比率)。モデルのバージョンは GSM2303 であり、解像度は TQ959L128、予測期間は 5.5 日、MPI 並列数は 960、OpenMP スレッド数は 12 とした場合の計測値。赤色が移流過程 (セミラグランジュ移流スキーム) に伴う通信処理の所要時間、青色がスペクトル法に伴う通信処理の所要時間、緑色が力学過程計算 (スペクトル法、移流過程等) の所要時間、黄色が物理過程計算の所要時間、水色がその他 (初期化、入出力など) に対応する。

手法と言える。

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

通信律速傾向の軽減策として、領域分割の種類を減らす (領域分割切替えの回数を減らす) 方向での、領域分割手法の見直しを現在検討している。領域分割手法見直しの概念図を図 4.1.2 に示す。現手法では、格子空間の領域分割について、物理過程用と移流過程用の 2 種類の領域分割を利用している。物理過程を計算

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

(2) 空間ループ構造 (配列格納方式) の改良

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

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

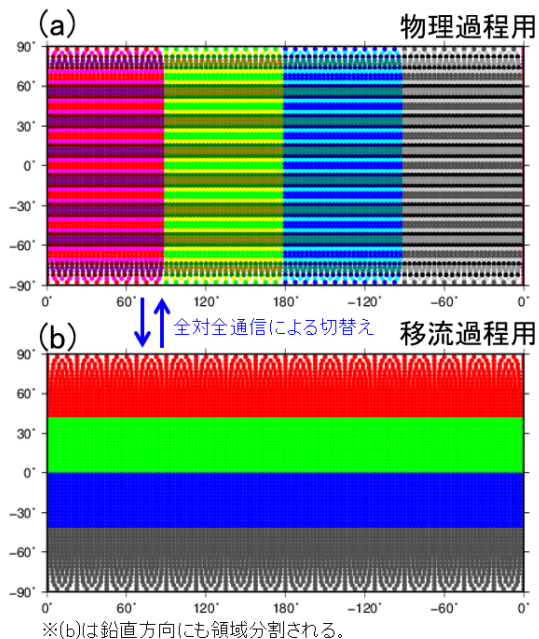
² 各 MPI プロセスが、様々な地域の格子点を担当するようにする領域分割の手法。サイクリック方式、ラウンドロビン方式などがある。負荷の地域依存性の大きい処理の実行効率に優れる。

³ なお、実装の単純化として、南北方向のみを分散割当形式とし、東西方向についてはブロック割当形式としている。

⁴ 各 MPI プロセスが、地理的に近い格子点を担当するようにする領域分割の手法。近隣格子参照を伴う処理の実行効率に優れる。

⁵ 全体の水平格子点数 N 、MPI 並列数 M に対し、領域分割切替えの全対全通信は通信量 $O(N)$ 、通信回数 $O(M^2)$ であるが、袖通信は通信量 $O(\sqrt{NM})$ 、通信回数 $O(M)$ である。

現手法



新手法

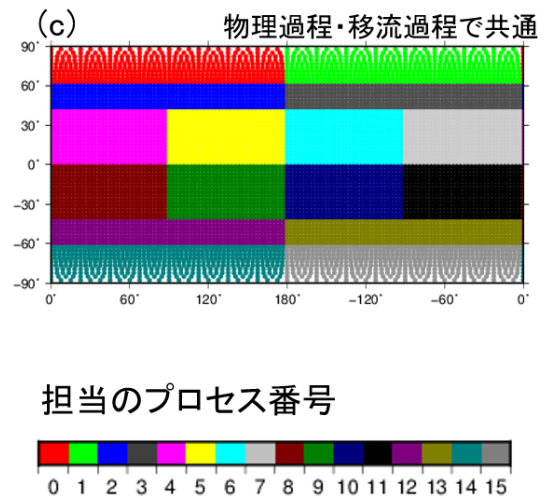


図 4.1.2 領域分割手法見直しの概念図 (TL63L128、MPI 並列数 16 での例)。(a)~(c) は、GSM の各水平格子点が割り当てられる MPI プロセスの番号を色分けで示した図であり、それぞれ、(a) が現手法にて物理過程 (および移流過程以外の格子空間の処理) を計算する際に利用する領域分割 (東西・南北の 2 次元領域分割; 東西はブロック割当形式、南北は分散割当形式)、(b) が現手法にて移流過程を計算する際に利用する領域分割 (南北・鉛直の 2 次元領域分割; 南北・鉛直ともブロック割当形式)、(c) が新手法にて格子空間の処理全般 (物理過程・移流過程共通) で利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

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

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

並列化効率の改善を狙い、外側成分により多くのデータを割り当てる設定とした。

(3) 変更のインパクト

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

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

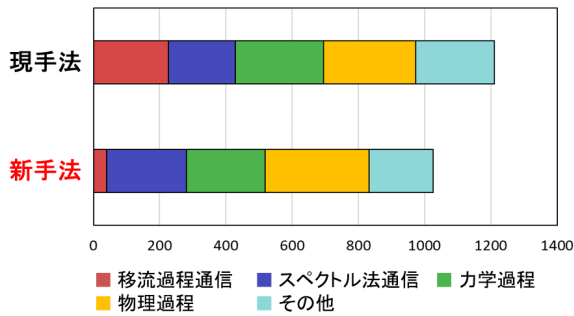


図 4.1.3 第 10 世代スーパーコンピュータシステム (Cray XC50) における、現手法・新手法での、GSM の実行時間と主要処理の内訳 (積み上げ棒グラフ形式)。モデルのバージョンは GSM2303 であり、解像度は TQ959L128、予測期間は 5.5 日、MPI 並列数は 960、OpenMP スレッド数は 12 とした場合の計測値。各色が対応する処理は図 4.1.1 と同じ。横軸の単位は秒。

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

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

4.1.3 海面水温解析値が全球数値予報システムの予測精度に与える影響調査

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

気象庁全球数値予報システムでは、全球 0.25° メッシュ日別海面水温解析値である MGDSST (栗原ほか 2006) を下部境界条件として用いている。MGDSST は気象庁大気海洋部が作成しているが、重点計画を受け、より高解像度である全球 0.1° メッシュ日別海面水温解析値 (以下、全球 HIMSST) の開発にも取り組んでいる。全球 HIMSST は、MGDSST に対して高解像度であるだけでなく、MGDSST では解析手法の影響でフィルターされている短周期の変動成分 (周期 10 日~27 日) が考慮される予定である。全球数値予報システムにおいても、全球 HIMSST の利用によって短期間での SST 変化による影響が大気の解析や予測に表現される

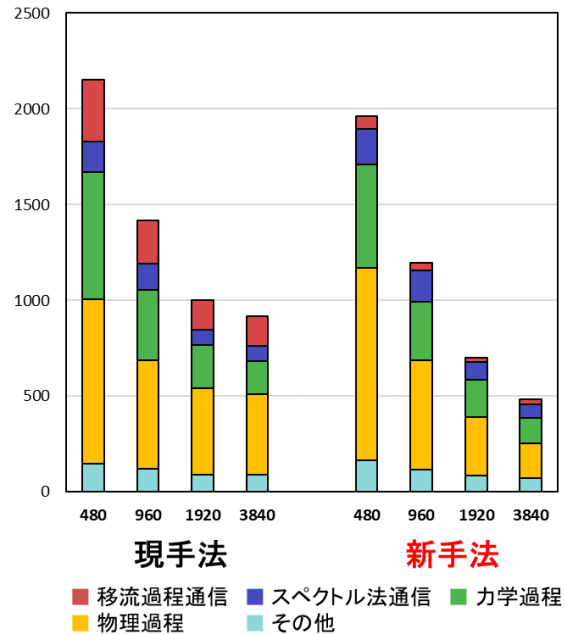


図 4.1.4 スーパーコンピュータ「富岳」における、現手法・新手法での、GSM の実行時間と主要処理の内訳 (積み上げ棒グラフ形式)。モデルのバージョンは GSM2303 であり、解像度は TQ959L128、予測期間は 5.5 日。現手法・新手法について、それぞれ MPI 並列数を 480, 960, 1920, 3840 とした場合 (OpenMP スレッド数はいずれも 12) の計測値を横軸に並べている。各色が対応する処理は図 4.1.1 と同じ。縦軸の単位は秒。

ことが期待できるため、その利用を今後計画している。全球 HIMSST の利用に向けた開発に先立ち、海面水温解析値の特性の違いが全球数値予報システムに与える影響を把握しておくことが効率的に開発を進める上で重要となる。英国気象局が作成する OSTIA (Good et al. 2020) は、全球 0.05° メッシュの日別海面水温解析値であり、全球 HIMSST と同様に、MGDSST より高解像度であることに加え、より短周期の変動成分 (周期 1 日~27 日) を含む。そのため、OSTIA が全球数値予報システムの予測精度に与える影響を把握することは、全球 HIMSST 利用に向けた予備調査となる。本項では、OSTIA を用いて調査した、海面水温解析値の特性の違いが全球数値予報システムに与える影響について報告する。調査においては、SST の違いが全球予報計算の下部境界条件として台風予測などに直接的に与える影響だけでなく、解析予報サイクルを通じて解析値及び予測値の精度に与える影響にも着目した。

(1) 全球数値予報システム及び全球モデルでの SST の扱われ方

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

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

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

(2) MGDSSTとOSTIAの比較

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

(3) OSTIAを用いたインパクト実験

海面水温解析値の特性の違いが全球数値予報システムにおける予測精度に与えるインパクトを確認するため、解析予報サイクル実験を実施した。対照実験としては、2022年2月時点で準リアルタイム実行(気象庁2023b)の水平解像度13kmの全球数値予報システムを用いた。以下では、対照実験をCNTL、用いる海面水温解析値をMGDSSTからOSTIAに変更した実験をTESTと呼ぶ。なお、OSTIAに関しては解像度を

0.05°から0.25°に変換したものをを用いた。実験は夏期実験として2019年8月、冬期実験として2020年1月の2期間で実施した。ここでは、より大きいインパクトが得られた夏期実験の結果を述べる。

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

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

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

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

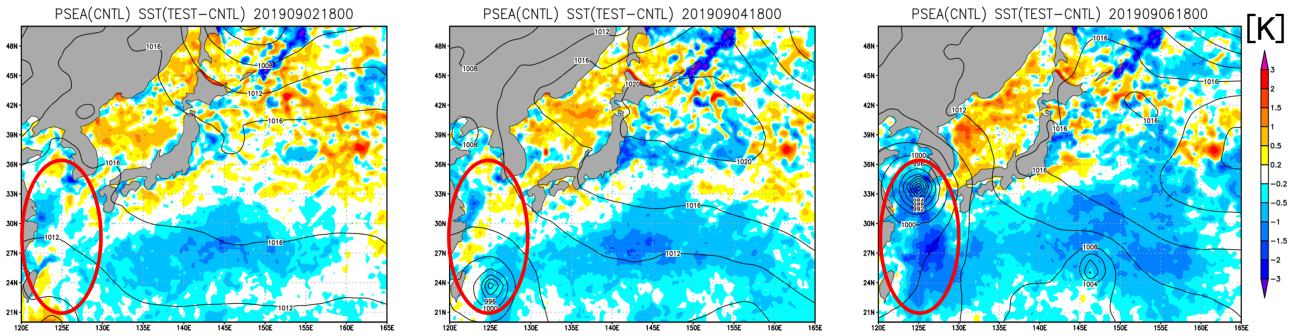


図 4.1.5 (左) 2019 年 9 月 2 日 18UTC、(中) 2019 年 9 月 4 日 18UTC、(右) 2019 年 9 月 6 日 18UTC における日本周辺での SST [K] の差 (OSTIA (TEST) - MGDSSST (CNTL))。OSTIA については解像度を 0.05° から 0.25° に変換したものを描画している。等値線は 2022 年 2 月時点で準リアルタイム実行の全球数値予報システムを用いた実験における海面更正気圧 [hPa] の解析値、赤丸は台風通過領域を表す。

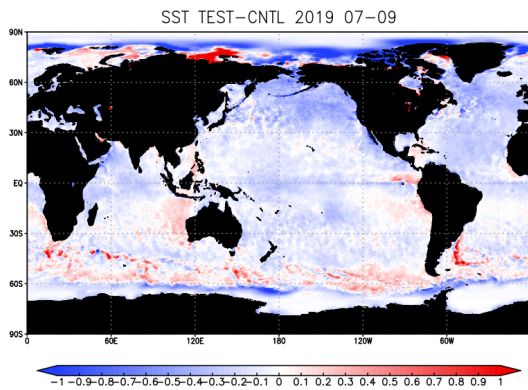


図 4.1.6 2019 年 7 月から 9 月で期間平均した SST [K] の差 (OSTIA (TEST) - MGDSSST (CNTL))。OSTIA については解像度を 0.05° から 0.25° に変換したものを描画している。

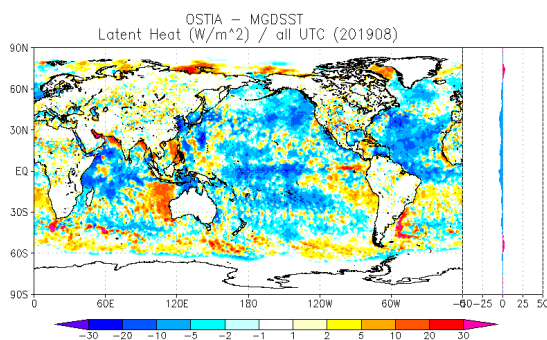


図 4.1.7 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月平均の潜熱フラックス [$W m^{-2}$] の差 (TEST-CNTL) とその帯状平均値。

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

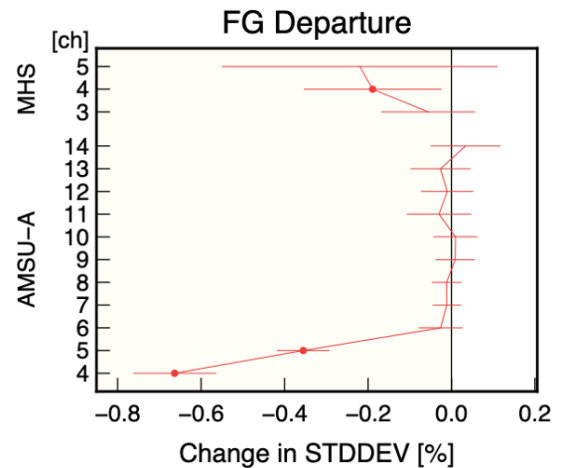


図 4.1.8 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における全球平均のマイクロ波気温サウンダ AMSU-A 及びマイクロ波水蒸気サウンダ MHS の観測値と第一推定値との差の標準偏差の変化率 [%]。負の値は TEST の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表し、エラーバーは 95%信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意であることを表す。

4.1.4 まとめと今後の予定

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

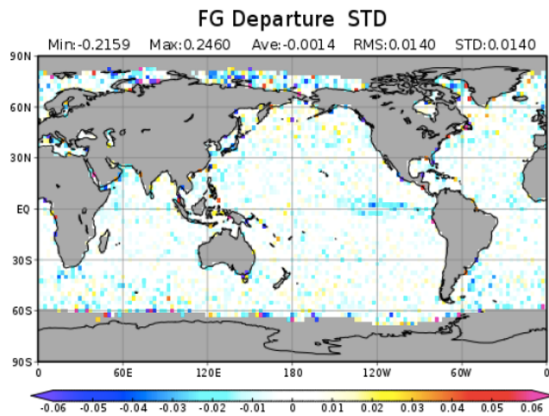


図 4.1.9 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における AMSU-A (ch4) の観測値と第一推定値との差の標準偏差の差 [K]。負の値は TEST の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表す。

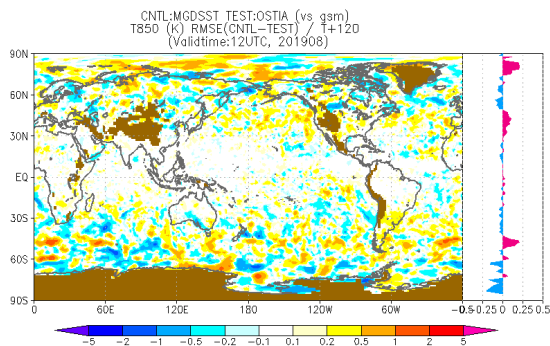


図 4.1.10 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における 850 hPa 気温の 5 日予測での対解析 RMSE の差 [K] とその帯状平均値。正の値は TEST が CNTL に対して改善していることを表す。

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

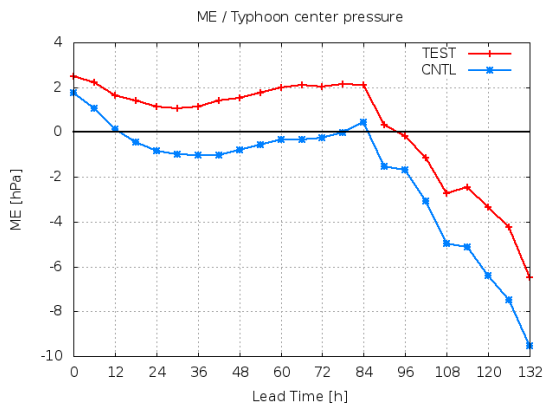


図 4.1.11 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月における台風中心気圧の対気象庁ベストトラック ME [hPa]。横軸は予報時間 [hour]。青は CNTL、赤は TEST を表す。

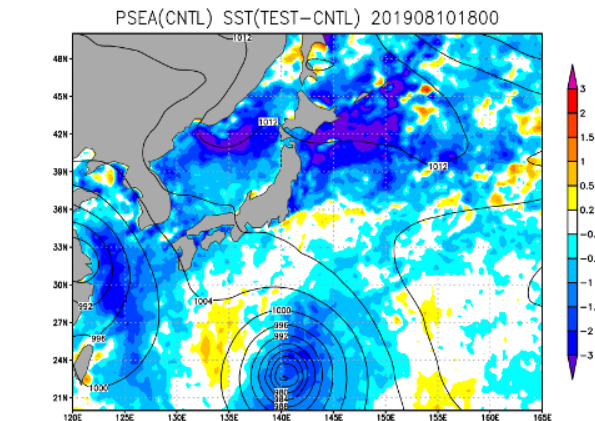
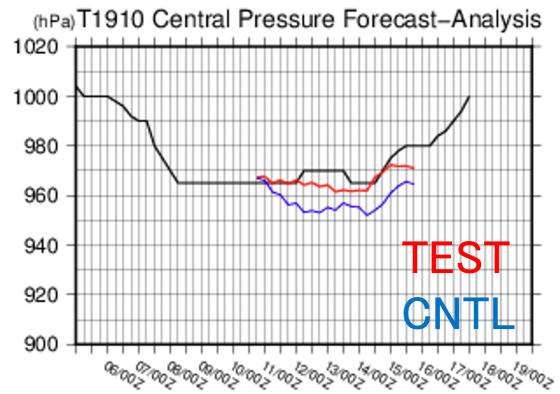


図 4.1.12 (上) 2019 年 8 月 10 日 18UTC を初期時刻とする台風第 10 号の中心気圧 [hPa] の予測。横軸は日時。黒は気象庁ベストトラック、青は CNTL、赤は TEST を表す。(下) 2019 年 8 月 10 日 18UTC における日本周辺での SST [K] の差 (OSTIA-MGDSST)。等値線は CNTL の海面更正気圧 [hPa]。

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

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

謝辞

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

参考文献

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

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

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

気象庁, 2023a: メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長. 数値予報開発センター年報 (令和 4 年), 気象庁数値予報開発センター, 21–24.

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

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

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

4.2 全球アンサンブル予報システムの開発

4.2.1 SST 摂動リセンタリング処理の変更はじめに

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

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

リセンタリング処理変更の効果

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

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

の要素への影響は小さかったものの (図略)、大気予測の改善に寄与していることも分かった。

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

参考文献

- Hotta, D. and Y. Ota, 2019: Statistical generation of SST perturbations with spatio-temporally coherent growing patterns. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 1660–1673.
- Takakura, T. and T. Komori, 2020: Two-tiered sea surface temperature approach implemented to JMA's Global Ensemble Prediction System. *WGNE. Res. Activ. Earth Sys. Modell.*, **50**, 6.15–6.16.
- Yamaguchi, H., J. Chiba, Y. Ichikawa, and T. Takakura, 2023: Hindcast verification of JMA's GEPS for one-month prediction with a globally expanded two-tiered sea surface temperature approach. *WGNE. Res. Activ. Earth Sys. Modell.*, **53**, 6.13–6.14.

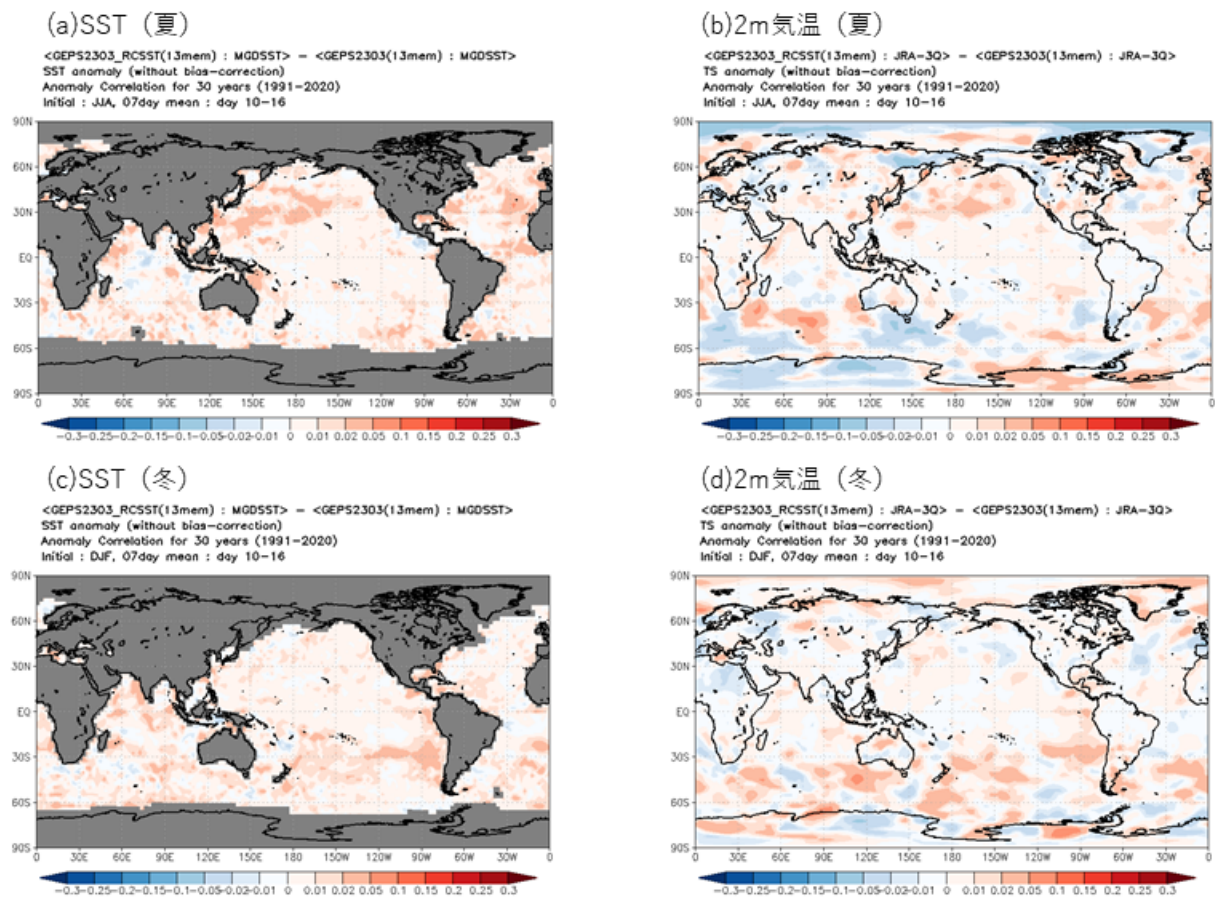


図 4.2.1 再予報実験予測 2 週目のアノマリー相関係数の差分 (TEST - CNTL)。 (a)(b) 夏期間 (6、7、8 月) と (c)(d) 冬期間 (1、2、12 月) の (a)(c)SST と (b)(d)2m 気温。

4.3 観測データの新規導入と利用方法の改良

4.3.1 はじめに

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

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

(1) NOAA-21 の概要

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

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

(2) データ品質および同化設定

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

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

NOAA-21/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、全球、メソ、局地の各システムに共通の試験として、現業数値予報システム相当の実験システムを用い、2023 年夏季を対象に同化実験を実施した。現業数値予報システム相当のコントロール実験 (CNTL)、CNTL に NOAA-21/ATMS および CrIS を追加した実験 (TEST)、並びに CNTL から Suomi-

NPP および NOAA-20 のいずれの ATMS も CrIS も使用しない設定としたベース実験 (BASE) を実施した。BASE に対する CNTL、および BASE に対する TEST の変化を比較することで、ATMS および CrIS を追加すること自体による基本的な性能を確認するとともに、NOAA-21 の追加利用による効果が既存衛星と同様であるかどうかを確認した。

(3) 全球解析における利用

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

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

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

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

(4) メソ解析における利用

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

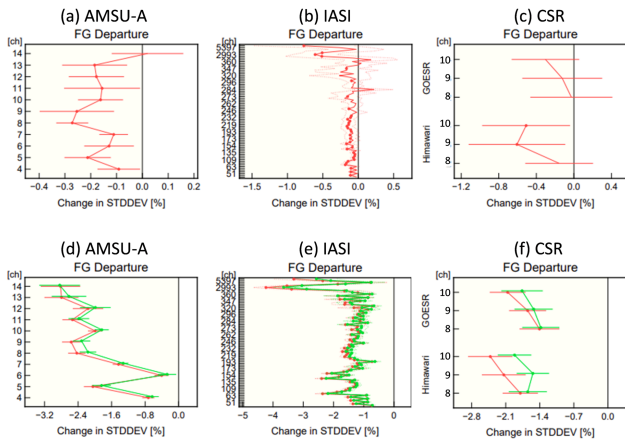


図 4.3.1 全球解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の変化率 [%]。上段は TEST の CNTL に対する変化率、下段は TEST (赤) および CNTL (緑) の BASE に対する変化率を示す。(a)(d) マイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b)(e) ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI、(c)(f) 静止衛星 CSR。縦軸はチャンネル番号。IASI は上から 9 チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は気温チャンネル。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合 (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

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

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

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

(5) 局地解析における利用

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

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

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

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

(6) まとめと今後

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

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

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

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

4.3.3 二重偏波化された沖縄・松江のレーダーデータの利用

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

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

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

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

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

¹ ドップラー速度については三十分大気解析でも利用されている。

² 昨年度導入したレーダーのうち最後に更新した地点が室戸岬で 6 月運用開始。

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

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

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

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

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

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

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

³ 反射強度から推定した相対湿度。

⁴ 更新前後ではデータの同時取得ができないため統計期間が異なっている。

⁵ 過去の調査では局地解析の疑似相対湿度の O-B 平均はおおよそ -2~0。今回の更新での沖縄の値もこの範囲で収まっている。

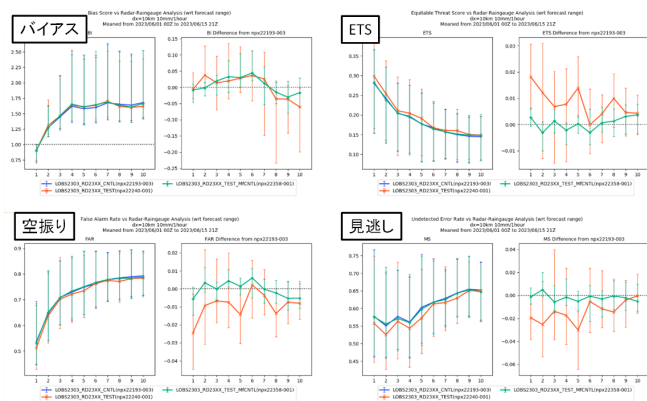


図 4.3.2 解析雨量を参照値とした予測時間別の 10 mm/h の降水予測スコア (10 km 平均)。上段左：バイアススコア、上段右：ETS、下段左：空振り率、下段右：見逃し率。青線は CNTL、緑線は MfCNTL、橙線は TEST のスコアを示しており、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。各統計指標について、左図がスコア、右図は MfCNTL、TEST について CNTL からの差を示している。横軸は予測時間 [hour]。統計期間は 2023 年 6 月 1 日から 2023 年 6 月 15 日。

たうえで順次現業利用を開始する。

参考文献

- 平原洋一, 2017: 全球解析における Suomi-NPP/ATMS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 70–72.
- 幾田泰醇, 2015: レーダー反射強度. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 40–42.
- 石川宜広, 2015: ドップラーレーダーのドップラー速度データの数値予報での利用. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 29–35.
- 亀川訓男, 計盛正博, 2017: 全球解析における Suomi-NPP/CrIS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 73–74.
- 気象庁, 2021: レーダー更新に伴う品質調査. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 105.
- 気象庁, 2022a: メソ解析・局地解析における二重偏波レーダーの利用. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 112–116.
- 気象庁, 2022b: 全球解析における全天同化マイクロ波水蒸気サウンダデータ利用の拡充. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 40–43.
- 気象庁, 2023a: メソ解析および局地解析におけるマイクロ波サウンダ ATMS の利用. 令和 4 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 42–47.
- 気象庁, 2023b: 二重偏波化された釧路・種子島・室戸岬・大阪 DRAW のレーダーデータの利用再開. 数値

予報開発センター年報 (令和 4 年), 気象庁 数値予報開発センター, 88–89.

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