

## 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

気象庁では「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画（以下、重点計画）」において、台風防災への貢献として気象庁全球モデル（GSM）の水平格子間隔を10kmより高解像度化すること、また、台風予測において重要となる海面水温（SST）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ことを開発の方向性として示している。加えて、データ同化システム高度化の方針として次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用の推進を掲げている。

予報モデルの高解像度化によりデータ転送量・演算量は増加する一方で、昨今の計算機性能は、演算性能の向上に対してノード間通信やメモリバンド幅など通信性能の向上が遅い傾向にある。現在のGSMの実行時間はノード間通信やメモリバンド幅の性能に対する依存が強く、ノード間、CPU-メモリ間のデータ転送量削減による実行時間短縮が重要な課題である。これは全球解析の中の4次元変分法（全球4D-Var）においても同様であるが、質、量ともに今後大幅な増加が見込まれる観測データを内部で保持するために、メモリ使用量自体を削減することも課題である。GSMや全球4D-Varで扱うデータの多くは浮動小数点数であるため、実行時間の短縮やメモリ使用量を削減する有効な方策の一つとして浮動小数点数を倍精度から単精度に変更することが挙げられる。

本稿では重点計画達成に向けた開発進捗として計算機の通信性能の伸長鈍化を背景に将来の高解像度化や観測データの大幅な増加への対応として取り組んでいるGSM及び全球4D-Varの浮動小数点数単精度化について報告する。また、増大する観測データからより多くの情報を引き出すことを目的とした解析手法の高度化にも取り組んでおり、その一つとして全球4D-Varへスケール依存局所化（SDL）の導入を目指している。全球10kmメッシュ海面水温データの作成については、気象庁大気海洋部にて全球0.1°メッシュ日別海面水温解析値（全球HIMSST）として開発に取り組んでおり、全球数値予報システムでの評価を進めている。これらの進捗についても合わせて報告する。

#### 4.1.2 全球モデルの単精度化

数値計算における浮動小数点数の精度は計算誤差に直結し、誤差の累積は計算安定性を損なう可能性もあるため、要求される予測精度や計算機資源に合わせて適切に選択する必要がある。数値予報モデルにおいては倍精度の利用が主流であり、GSMも1996年3月の計算機更新に伴う資源増加に合わせて浮動小数点数を単精度から倍精度に変更し（柏木1995）、以降は倍精度を

使用してきた。しかし、近年は前述した計算機動向を背景に、浮動小数点数の精度を見直す必要性が議論され、大半の計算過程は単精度化しても予測精度に大きく影響しないことが明らかになってきた。例えばLang et al. (2021), Nakano et al. (2018), Rüdüsühli et al. (2013)などで単精度化したモデルの予測精度は変更前と中立であることが示されている。

単精度化により期待される効果は実行時間とメモリ使用量の減少である。実行時間が減少する要因は次の2つに分けられる。1つ目はデータ転送の効率化である。ノード間、CPU-メモリ間などのデータ転送量の減少に加え、より多くのデータをキャッシュに保持できることでキャッシュヒット率が向上しメモリアクセス頻度が低下、データ転送時間が減少する。2つ目はSIMD<sup>1</sup>命令による演算の高速化である。SIMD命令が適用されている箇所では、倍精度から単精度になることで、一度にレジスタに入力される浮動小数点数の数は理想的には2倍になり、演算速度も2倍になる。先に挙げた先行研究において、単精度化による実行時間の減少率はいずれのモデルも約40%~45%が示されている。

2026年3月時点のGSM(GSM2503)の実行時間プロファイルを図4.1.1に示す。現在のGSMでは移流過程を除く力学過程の実行時間が約33%を占めており、そのうち、約15%はMPI通信によるものである。第3.2節の並列化手法の改良によりMPI通信の実行時間割合は減少しているものの、依然として全体に占める割合は高い。GSMはこのようなノード間通信に加え、メモリバンド幅への依存も強く、データ転送の効率化による実行時間の減少が期待できる。浮動小数点数を単精度化すると計算部分では情報落ちや桁落ちに伴う数値計算精度劣化が発生しやすくなるため予測精度を慎重に検証する必要がある。一方で、MPI通信部分を単精度化する場合、直接的に発生するのは丸め誤差のみであり、予測精度への影響が比較的小さいと考えられる。このことから、GSMではまずMPI通信のみを単精度化し、次にモデル全体を単精度化する二段階の対応を検討している。本稿ではそれぞれの調査状況について報告する。

#### (1) MPI通信単精度化

実際に現業運用しているGSMによる検証に先立って、MPI通信のみ単精度化したGSMの力学コアを用いた理想化実験を行い、いずれも予測精度に大きな問題はないことを確認した。主な結果を以下に示す。

- 球面調和変換の格子から波、波から格子への変換1往復あたりの相対誤差を確認した。変換前後の全格子点における最大の相対誤差はスカラー量で

<sup>1</sup> Single Instruction, Multiple Data；複数データへの単一命令実行。

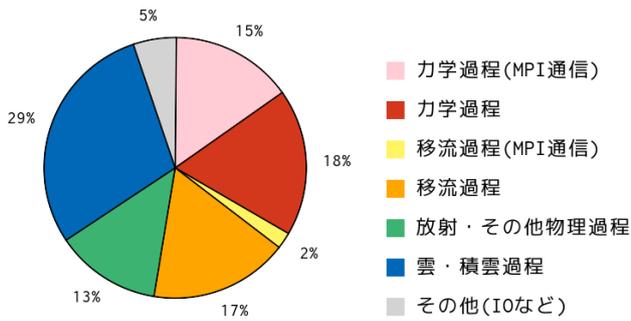


図 4.1.1 GSM2503 の時間積分内のランク平均した実行時間内訳。複数回実行したうち全体の実行時間が平均的だったある回の内訳を示している。出力専用ランクは含めず、計算ランクのみを集計対象としている。計算機は第 11 世代スーパーコンピュータシステム (Fujitsu PRIMERGY CX2550 M7) を使用。水平解像度は TQ959、予測期間は 5.5 日、計算ランク数は 384、OpenMP スレッド数は 14。インパランスの影響を軽減するために各過程に MPIBarrier 関数を追加し測定。

$O(10^{-7})$  程度であり、概ね単精度の丸め誤差程度であった。

- セミラグランジュ移流過程の誤差確認の目的で、浅水系での非線形地衡流場の定常状態維持実験 (Williamson et al. (1992) のテストケース 2) を行い、層厚の対初期値誤差のノルムは丸め誤差程度であった。
- 力学過程全体を合わせた誤差確認の目的で、傾圧不安定実験 (Jablonowski and Williamson 2006) を行った。地表面気圧の MPI 通信単精度と倍精度の差の L2 ノルムは、Jablonowski and Williamson (2006) で示された異なる力学コアを持つモデル同士の差の L2 ノルムより小さかった。つまり MPI 通信単精度化の影響は力学過程を異なる離散化手法に変更した場合より小さいと考えられる。

次に、現業運用している GSM で MPI 通信単精度化した実験結果を示す。表 4.1.1 の 2 列目は倍精度からの実行時間の短縮率とメモリ使用量の減少率である。MPI 通信の合計の実行時間は約 49% 短縮し、ほぼ理想的な結果を得ることができた。GSM 全体としては実行時間が約 12% 短縮し、MPI 通信以外の過程も実行時間が減少している。その要因としては MPI 通信用変数のバッファサイズが減少することでその他過程の変数のキャッシュヒット率が向上すること等が考えられる。

予測精度に与える影響を確認するため、予測のみ MPI 通信単精度のモデルを用いた 31 事例の連続初日実験を行い、同じ初期値から実行した GSM2503 の予測結果と比較を行った。統計検証の結果、GSM2503 からの予測精度の変化はいずれも中立であり、特徴的な変化は見られなかった。一方、ある 1 つの初期値から予測を実行した実験でエネルギースペクトルを確認したところ、モデル上層の高波数側の発散の寄与が倍精度の

過程	MPI 通信 単精度	全体単精度
GSM 予測全体	12%	31%
力学 (MPI 通信)	48%	48%
力学	5%	40%
移流 (MPI 通信)	52%	54%
移流	2%	25%
放射・その他物理	1%	25%
雲・積雲	0%	19%
その他 (IO など)	5%	33%
MPI 通信合計	49%	49%
メモリ使用量	2%	34%

表 4.1.1 MPI 通信単精度と全体単精度の、GSM2503(倍精度) からの実行時間短縮率とメモリ使用量の減少率。測定環境と条件は図 4.1.1 と同様。「MPI 通信合計」は各過程の MPI 通信のみを合算したものである。メモリは 1 計算ランクあたりの使用量を比較。

場合と比べて波数ごとにばらつくことがわかった。

以上に示す通り、実行時間が短縮し、かつ予測精度も中立であることから、モデル全体の単精度化に先駆けて MPI 通信単精度を導入する計画である。今後はエネルギースペクトルの特徴的な変化などの問題について予測精度に影響がないか調査を行うとともに、解析予報サイクル実験を行い予測精度が期待通り中立であることを確認する予定である。

## (2) GSM 全体単精度化

GSM 全体の単精度化の検証結果について示す。なお、GSM 全体を単精度化するにあたって、Legendre 陪関数の計算、フルレベルの気圧計算、放射過程の計算等で精度悪化による異常終了が発生したため、当該箇所は倍精度への変更や数学的に等価な別の式への変更等の対策を行った。

GSM 全体を単精度化した実験結果を示す。表 4.1.1 の 3 列目は倍精度からの実行時間の短縮率とメモリ使用量の減少率である。実行時間は全体では約 31% 短縮したが、本項の冒頭で示した先行研究の短縮率約 40%~45% に比べて低い。これは、セミラグランジュ移流過程、放射・その他物理過程、雲・積雲過程の短縮率がそれよりも低いためである。このうち、セミラグランジュ移流過程の実行時間の短縮率が低い原因は、SIMD 命令が適用されていない箇所が多いためであった。特に移流の上流点の物理量を求める内挿処理では、格子点ごとに対応する上流点異なるため、格子点のループ処理における配列参照が連続せず、最適化されにくいと考えられる。他の過程についても同様に SIMD 命令の適用率が低いことが一因であると考えられる。

予測精度については総観規模での大きな違いはないものの、全体的に MPI 通信単精度に比べて倍精度からの差分が大きくなり、統計検証ではいくつか要素に

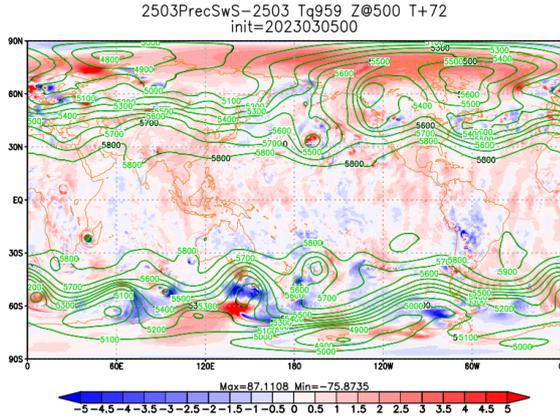


図 4.1.2 予報時間 72 時間における 500hPa 面のジオポテンシャル高度 [m]。コンターの黒が倍精度、黄緑がモデル全体単精度。シェードは単精度から倍精度を引いた差を表す。

精度悪化が見られた。図 4.1.2 は予報時間 72 時間での 500hPa 面ジオポテンシャル高度 (Z500) である。単精度と倍精度のコンターはほとんど重なっている一方、倍精度との差分に着目すると、中緯度から極にかけて広い範囲で 5 m 程度の差分が見られる。同じ予報時間における MPI 通信単精度での差分は基本的に 1 m 以下であり、全体単精度では差分がより大きくなっている。また、赤道付近の差分には縦縞の構造が見えるほか、Z500 の全球平均値は倍精度に比べ増加傾向であった (図略)。統計的な予測精度の変化を確認するために、予測のみ全体単精度のモデルを用いた 31 事例の連続初期日実験を行い、同じ初期値から実行した GSM2503 の予測結果と比較を行った。その結果、海面更正気圧 (PSEA) と Z500 の二乗平均平方根誤差が北半球の予報時間初期で悪化する傾向、弱い雨の降水頻度が予報時間全体で減少する傾向が見られた (図略)。

これら予測結果の変化のうち、Z500 の赤道付近の縦縞構造と全球平均値の増加傾向はセミラグランジュ移流過程、PSEA と Z500 の予報時間初期での悪化は球面調和変換の単精度化による影響が大きかった。セミラグランジュ移流過程では、主に次の 2 つの要因が予測精度を悪化させていた。1 つ目は上流点探査である。GSM の上流点探査は Temperton et al. (2001) に基づいているが、単精度化により、この上流点探査に用いる三角関数の計算精度が悪化する傾向にあった。これは Diamantakis and Vana (2022) とも整合的である。2 つ目は層厚の積算である。GSM で使用している鉛直保存セミラグランジュ法 (吉村・松村 2004) では層厚の積算を行う必要があるが、この処理の精度が単精度化により悪化する傾向にあった。また、球面調和変換の精度悪化については、主に東西波数 0 成分の Legendre 変換の影響であった。これは Lang et al. (2021) において、東西波数 0 成分の Legendre 変換を倍精度としており、GSM でも球面調和変換に対

策が必要であることが示唆された。これらの精度が悪化する箇所について、倍精度への変更や Kahan のアルゴリズムを使用するなどの対策をすることで精度悪化が軽減されることを確認している。一方で単純な対策では実行時間の短縮率も減り、単精度化によるメリットが少なくなることから、倍精度に変更する箇所の絞り込みなど引き続き対策の検討が必要となる。

以上の結果から、モデル全体を単精度化することにより GSM の実行時間は約 30% 短縮することがわかった。一方で予測精度面では、セミラグランジュ移流や球面調和変換で精度が悪化しており、対策が必要となった。今後はこれら以外の過程についても詳しく調査し、精度悪化が見られた場合には必要な対策を検討していく予定である。

### 4.1.3 全球 4D-Var の単精度化

ここでは、全球 4D-Var におけるメモリ使用量削減と実行時間短縮を目的とした浮動小数点数の単精度化について、2025 年 11 月時点での現業システム (以下 CNTL と呼ぶ) をベースとして各部分の浮動小数点数を単精度化した調査<sup>2</sup>の結果について報告する。

#### (1) 単精度化の設定

全球 4D-Var の単精度化の効果及び解析予測精度やインナーモデルの計算安定性に与える影響を単精度化個所別に切り分けて評価するために、単精度化範囲の異なる複数の設定の下での実行結果を比較した。1 つめは (モデル) トラジェクトリのみを単精度化した設定である (以下 TRJ4 と呼ぶ)。全球 4D-Var では、インナー非線形モデルの計算途中に現れる複数の場をモデル内の全ての時刻において倍精度で保存している。これがトラジェクトリであり、接線形・随伴モデルの基本場として用いられる。全球 4D-Var はトラジェクトリ保存のために総メモリ使用量の 20% 以上を費やしていることから、トラジェクトリは単精度化による資源削減の効果が特に大きいことが期待される。基本場であるトラジェクトリは評価関数の最小値探索のために行う接線形・随伴モデルの繰り返し実行の中で値が変化することはなく、単精度化した場合に結果に与える影響は限定的であることも期待される。2 つめは、トラジェクトリに加えて全球 4D-Var の観測演算子や評価関数、最小値探索といった変分法本体の大部分を単精度化した設定である (以下 VAR4 と呼ぶ)。3 つめは、第 4.1.2 項で報告した GSM 全体単精度化の成果を取り込むことでインナーモデルの大部分を単精度化した設定である (以下 MDL4 と呼ぶ)。結果に対する原因の切り分けを目的として VAR4 と MDL4 の単精度化範囲は重複を避けており、VAR4 では球面調和変換などのモデル側の機能を利用する部分は倍精度のまま扱い、MDL4

<sup>2</sup> 現状では、外部のファイルやライブラリの入出力、計算の安定性・整合性のために単精度化が難しい処理などは常に倍精度のまま扱っている。

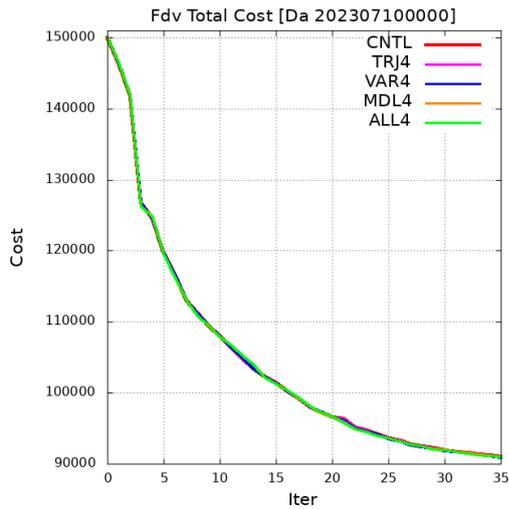


図 4.1.3 2023 年 7 月 10 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の浮動小数点数の精度別の評価関数値の推移。

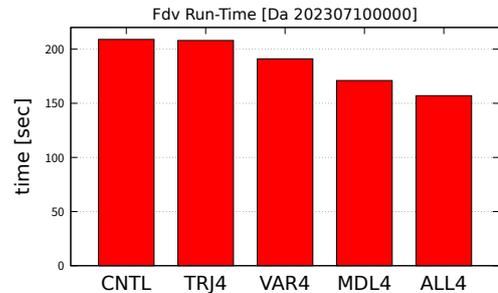
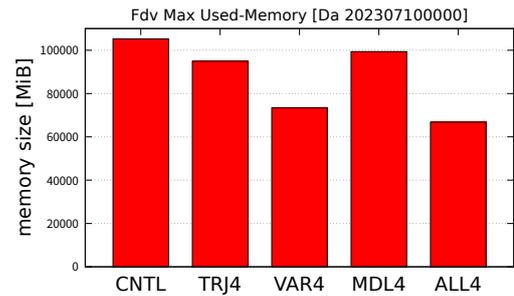


図 4.1.4 2023 年 7 月 10 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の浮動小数点数の精度別のメモリ使用量と実行時間。メモリ使用量は 32 ノード 256 並列実行時のノード別最大値。

実験名	評価関数値	
	初回	探索 35 回目
CNTL	149983.226305462769	90985.9835379593424
TRJ4	149983.226305462769	90985.9855378020438
VAR4	149983.265625000000	90927.703125000000
MDL4	149988.689996716799	91025.9898162671889
ALL4	149988.781250000000	90982.265625000000

表 4.1.2 2023 年 7 月 10 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の浮動小数点数の精度別の評価関数値。初回の値と最小値探索を 35 回行った後の値。

では変分法側の機能に分類したトラジェクトリは倍精度で保存することとした。最後は、VAR4 と MDL4 を同時に適用することで全球 4D-Var 全体を可能な限り単精度化した設定である（以下 ALL4 と呼ぶ）。

## (2) 実行結果の例

図 4.1.3 及び表 4.1.2 はある事例における設定別全球 4D-Var の評価関数の最小値探索の推移である。探索途中も含めてグラフはほとんど重なっており、浮動小数点数の精度の違いによって生じた差は僅かである。この差をパーセンテージで表すと、初回で最大 0.004 % 程度、探索 35 回目で最大 0.06 % 程度である。特に TRJ4 では初回は CNTL と完全に一致し、探索 35 回目でも 0.000002 % 程度と、その差は極めて小さい。なお、それぞれの設定での解析インクリメントにも目立った差は生じていなかった（図略）。図 4.1.4 は同じ事例における設定別のメモリ使用量と実行時間の例である。CNTL と比較すると、メモリ使用量は TRJ4 で 10 % 程度、VAR4 で 30 % 程度削減できることがわかった。実行時間は TRJ4 では CNTL とほとんど変わらないが、VAR4 では 8 % 程度短縮した。MDL4 ではメモリ使用量は 5 % 程度の削減に留まるが、実行時間は 19 % 程

度短縮した。VAR4 と MDL4 を同時に適用した ALL4 では、CNTL と比較してメモリ使用量を 37 % 程度削減しつつ、実行時間を 25 % 程度短縮するという結果が得られた。これは VAR4 と MDL4 の結果を合算した値に近く、両者の単精度化範囲を排他的に設定したとと整合的である。

## (3) 解析予報実験の結果

解析予測精度への影響を確認するため、設定別の実験を実施した。これらの実験での単精度化対象は全球 4D-Var 本体のみであり、第一推定値作成に用いる GSM は倍精度のままである。平均解析場については、いずれの環境でも CNTL との間に大きな差は生じていないことが確認できた。予測精度については、TRJ4 と VAR4 はほぼ中立と言える結果であったが、MDL4 と ALL4 では Z500 の二乗平均平方根誤差が予報開始から 3 日目以降でやや大きくなる傾向などが見られた（図略）。Z500 の予測精度悪化は第 4.1.2 項で述べた GSM 全体単精度化実験の結果と整合しており、全球 4D-Var においても球面調和変換に同様の対策を行うことを検討している。

以上のように、全球 4D-Var では変分法本体の単精度化はメモリ使用量削減の効果が大きく、なおかつ解析予測精度維持との両立も実現できる可能性があるという結果が得られた。インナーモデルの単精度化は実行時間削減の効果が大きいですが、解析予測精度が悪化する可能性があり対策が必要である。今後、更なる調査と対策を検討していく。

#### 4.1.4 全球 4D-Var への SDL 導入

2025 年 11 月時点の全球 4D-Var は気候学的背景誤差とアンサンブル背景誤差を併用するハイブリッド法を採用している。このうちアンサンブル背景誤差は複数メンバーのアンサンブル予報摂動から構成され、背景誤差の流れ依存性を考慮する上で重要な役割を担っている。しかし、実用上限られたメンバー数のみで構成せざるを得ないために、アンサンブル背景誤差の構造には見かけ上の誤差相関が混入してしまう。その対策として、十分に距離が離れた地点間の誤差相関を低減させる処理である局所化を行うことが一般的であり、全球 4D-Var では誤差の相関距離に応じた特定の局所化スケール値（水平方向には局所化距離、鉛直方向には対数気圧による局所化スケール高度）を用いたガウス関数型の局所化を採用している。誤差の相関距離は要素によって異なりうるが、要素間の誤差相関の扱いが難しいことから、全球 4D-Var では気温、気圧、風向・風速には同じ水平局所化距離を与え、他の要素との相関を考慮していない比湿のみ別の水平局所化距離を与えるという要素別局所化を行っている。また、誤差の相関距離は総観スケールの現象では長く、メソスケールの現象では短いというように現象のスケールに応じても異なると考えられるが、全球 4D-Var の水平局所化距離は 800km（比湿は 400km）、鉛直局所化スケール高度は 0.8 という一意の値を用いている。現象のスケールに応じた局所化を行う手法としては、スケール依存局所化（Scale-dependent Localization;SDL）が知られている（Buehner (2012); Buehner and Shlyayeva (2015)）。これはアンサンブル背景誤差を構成するアンサンブル予報摂動を波数空間上でスケール別に分離し、それぞれに異なる局所化距離を与える手法であり、アンサンブル背景誤差がより適切な誤差相関を表現できることから解析予測精度向上が期待できる。本稿では全球 4D-Var で用いる水平局所化への SDL 導入の検討について報告する。

##### (1) SDL の設定

2025 年 11 月時点の現業システム（以下 CNTL と呼ぶ）の全球 4D-Var に SDL を導入し、調査を行った。SDL はアンサンブル予報摂動をスケール別にカテゴリ分離して扱うため、その自由度は分離後のカテゴリ数に応じて増加する。必要な計算量・計算資源もその分だけ大きくなることから、まずは水平 2 スケール分離を導入することを考えた。Caron and Buehner (2018) を参考に、水平距離 2000km 以上の構造に対応する全波数 0 から 19 までは大（総観）スケールの現象を表していると見なし、これを分離した残りは中・小（サブ総観・メソ）スケールの現象を表していると見なすこととした。これは Caron and Buehner (2018) で行われた 3 スケール分離に対し、サブ総観スケールとメソスケールを統合した場合にあたる。スケール分離は

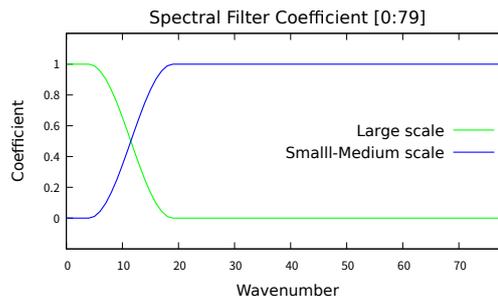


図 4.1.5 2 スケール分離のための係数。全波数 0 から 319 のうちの 79 まで（20 から 319 までは一定値で大スケールは 1、中・小スケールは 0）。

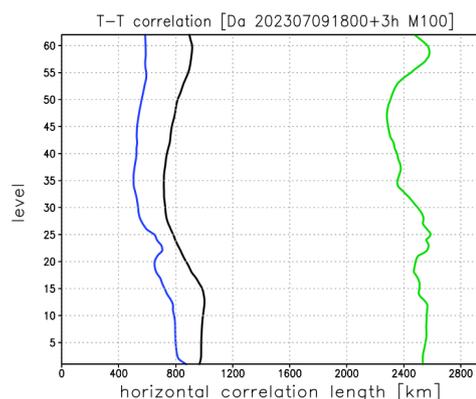


図 4.1.6 2023 年 7 月 9 日 18UTC を予報初期時刻とする 100 メンバーの全球 3 時間予報値から求めたスケール別の気温・気温相関に基づく水平局所化距離の推定結果。モデル面第 1 層から第 62 層目まで。青線が中・小スケール、緑線が大スケール、黒線がスケール分離なし（CNTL）の場合。

全波数 19 で切断するのではなく、滑らかに遷移するように波数空間上のアンサンブル予報摂動の各成分にスケール別の分離係数をかけることで行う。図 4.1.5 に本調査で用いた 2 スケール分離の係数を示す。全波数 5 から 19 にかけて遷移するように設定しており、係数の和はどの波数でも 1 である。

スケール別のアンサンブル予報摂動に与える水平局所化距離については、Ménétrier et al. (2015a,b) の手法に基づき推定した。これは実際のアンサンブル予報摂動のサンプルから各格子点における距離に応じた相関の大きさを評価し、その全球平均値を局所化関数と比較することで適切な水平局所化距離を推定する手法である。適切な水平局所化距離は高度によって変わるが、全球 4D-Var では対流圏で適切な局所化を行うことを重視して水平局所化距離を決めている。そのため、ここでは 250hPa 付近であるモデル面第 62 層よりも下層にのみ注目する。図 4.1.6 は気温・気温相関を用いて推定した水平局所化距離の鉛直分布の例である。スケール分離なしの場合の推定値は 700km から 1000km 程度であり、CNTL で用いている水平局所化距離 800km は適切であると言える。これに対し 2 スケール分離し

た場合の推定値は、中・小スケールでは 450km から 800km 程度、大スケールでは 2300km から 2600km 程度である。この結果を元に、中・小スケールに対しては、推定値よりやや小さいものの、これまでの比湿に対するものと同じ 400km の水平局所化距離を与えることとした。これは、アンサンブル背景誤差に対応する制御変数が与えた中で最小の水平局所化距離に基づいて実効解像度が変わることから、CNTL と同じ 400km を維持することで実効解像度の違いによる影響を排除することを意図している。一方、大スケールの推定値は CNTL で用いている 800km から大きく乖離している。先行研究での設定や予備的に行った実験の結果<sup>3</sup>を元に、本節で示す調査では現行設定から極端に大きな変更を行うことを避け、大スケールに与える水平局所化距離は 1200km とすることとした。また、比湿・比湿相関を用いた大スケールの推定値は他の要素を用いた場合と同程度であったこと（図略）、中・小スケールに対して従来の比湿と同じ 400km の水平局所化距離を与えたことから、2 スケール分離した場合には要素別局所化を行わず、比湿も他の要素と同じ扱いをすることとした。以後この設定を SDL0412 と呼ぶこととする。

## (2) 疑似観測 1 点同化の結果

解析結果への影響を確認するための初動的調査として、疑似観測 1 点同化を実施した。図 4.1.7 は気温疑似観測 1 点同化に対する東西風インクリメントの例である。観測地点から 400km 以内では CNTL と SDL0412 に大きな差は見られないが、その外側では CNTL には局所的に大きな部分や波状の微細な構造といった、見かけ上の誤差相関から生じた可能性がある構造が存在する一方、SDL0412 ではそれらの発生を抑制できていることがわかる。また、気温インクリメントを比較すると SDL0412 は CNTL より遠くまでインクリメントが広がっている様子も確認できた（図略）。これらは SDL 導入で期待された通りの挙動であると言える。

## (3) 実観測同化実験の結果

解析結果への影響をより詳しく確認するために、ある事例における実観測を用いた同化実験を実施した。SDL0412 のインクリメントは、大きな構造は CNTL のインクリメントと共通するものの、CNTL に見られる波状の微細な構造が見られなくなったことなど、疑似観測 1 点同化実験と共通する特徴が見られた（図略）。また、評価関数値を比較すると SDL0412 の方が最終値が小さくなる傾向が見られた。これは SDL0412 では解析値が観測値により近づく傾向があることを示唆している。これらの傾向は複数の事例で共通して見られており、SDL 導入の効果と考えられる。すなわち SDL0412 では、中・小スケールの現象を起源とする見かけ上の

<sup>3</sup> 大スケールに与える局所化距離を 800km から 2400km まで変えながら、得られた解析値とそこからの予報値、観測値と予報値の差などを比較した。

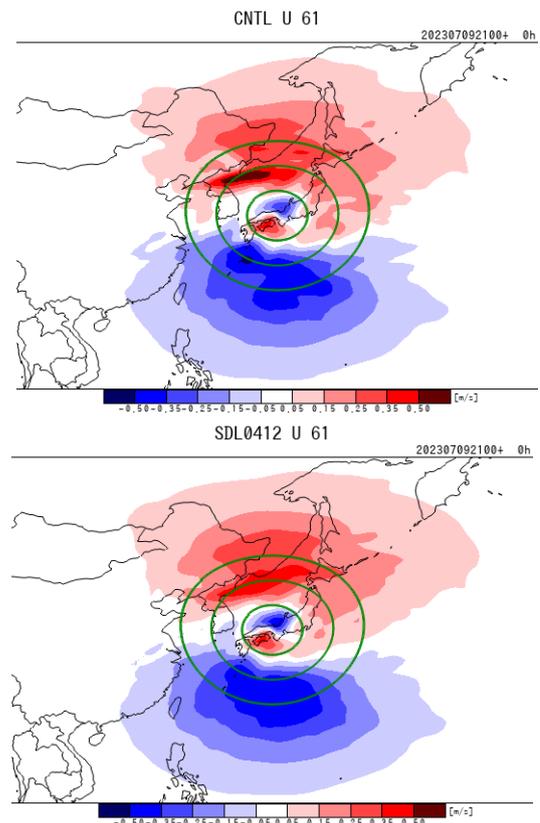


図 4.1.7 2023 年 7 月 11 日 00UTC を解析対象時刻とする全球 4D-Var の同化窓先頭に置いた気温疑似観測 1 点同化に対する同化窓先頭の東西風インクリメントの例（モデル面第 61 層）。上が局所化距離 800km のみの場合（CNTL）、下はスケール分離した上で・小スケールに 400km、大スケールに 1200km の局所化距離を与えた場合（SDL0412）。緑線は観測位置を中心とする半径 400km、800km、1200km の同心円。

誤差相関から生じた不適切なインクリメント構造は軽減され、大スケールの現象を起源とする実際の誤差相関から生じたインクリメント構造はより適切に表現されるようになり、CNTL に比べると観測地点から比較的離れた場所も含めて観測値の情報が反映されやすくなった結果として、評価関数の最終値が小さくなったと解釈できる。

最後に、解析予測精度への影響を確認するために実施した解析予報サイクル実験の結果について述べる。SDL0412 は CNTL に対して、平均解析場の変化は比較的小さかったものの、個別に見ると解析値・予報値ともに観測値により近づく傾向が見られた。予測精度については主に夏半球の予報 7 日目あたりまでで改善が見られる一方、熱帯域の対流圏では気温などの平均誤差に悪化も見られた（図略）。

以上のように、全球 4D-Var に SDL を導入することでアンサンブル背景誤差をより適切に表現することができ、解析精度向上が期待できる。スケール分離や局所化距離の設定には調整の余地があることから調査を継続し、解析予測精度の更なる向上を目指す。

#### 4.1.5 全球 HIMSST の利用に向けて

全球数値予報システムでは SST を下部境界条件としており、SST 解析値は気象庁大気海洋部作成の全球 0.25°メッシュ日別海面水温解析値 (MGDSST; 栗原ほか (2006)) を用いている。重点計画の下、より高解像度となる全球 0.1°メッシュの全球 HIMSST を開発しており、解析予報サイクル実験により全球数値予報システムへの影響を評価した。

これまで全球数値予報システムでは全球 HIMSST 利用に向けた予備調査として、英国気象局が作成する全球 0.05°メッシュの日別海面水温解析値 OSTIA (Good et al. 2020) を用いて、高解像度かつ高精度な SST 解析値の影響を評価してきた (気象庁 2024)。その結果、SST 解析値は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影響し、時空間スケールごとの寄与を検討したところ、とくに短周期成分の効果が大きいことが確認されている。なお、全球数値予報システムにおける SST 解析値の役割や期待される効果は先述の気象庁 (2024) に詳述されているため、適宜参考にしてほしい。

##### (1) 全球 HIMSST の特性

全球 HIMSST の解析手法は MGDSST に準じているが、解像度が 0.25° から 0.1° に高解像度化され、利用観測データとして既存の観測に加え新たに静止気象衛星ひまわり搭載の可視赤外放射計による SST 観測値が利用される。考慮する時間スケールについて、気象庁 (2024) では全球 HIMSST で短周期 (周期 10 日~27 日) 変動成分を新たに利用開始予定としていた。しかし、2023 年 3 月から MGDSST にて AMSR2 による短周期成分の利用が開始されており、全球 HIMSST と MGDSST では仕様に大きな差はなくなっている。

全球 HIMSST と MGDSST の比較の一例として、2023 年 7 月の月平均 SST の差を示す (図 4.1.8)。全球 HIMSST と MGDSST の差は新たに利用されるようになった静止気象衛星ひまわりの観測領域のみならず全球域に見られ、黒潮及び黒潮続流やメキシコ湾流、南極周極流など海洋中小規模擾乱が存在する中緯度帯でとくに大きな違いが見られている。全球 HIMSST は MGDSST より解像度が高いため、より空間構造が細かい渦を表現できるようになったためと考えられる。また、大気海洋部で実施された全球 HIMSST と MGDSST の検証では、全球 HIMSST のほうが MGDSST よりも浮遊ブイ観測値に対する二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error; RMSE) が減少し、より高精度となっていることが確認されている (図略)。一方で、台風通過時における SST 低下は全球 HIMSST と MGDSST で大きな違いは見られなかった (図略)。両者の SST 解析において、ともに短周期変動成分として AMSR2 を利用しているため、大気現象への応答性が同程度となっていると考えられる。

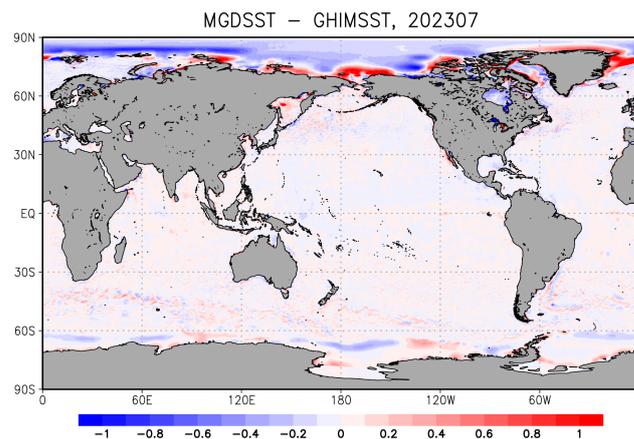


図 4.1.8 2023 年 7 月における月平均 SST の MGDSST と全球 HIMSST の差 (MGDSST- 全球 HIMSST) [K]。陸域は灰色としている。

##### (2) 解析予報サイクル実験

全球数値予報システムへの全球 HIMSST 利用のインパクトを確認するため、全球 HIMSST を SST 解析値として解析予報サイクル実験を実施した (以下、全球 HIMSST 実験)。比較対象は MGDSST を利用した実験である (以下、MGDSST 実験)。実験対象期間は 2023 年 7 月であり、解析が 2023 年 6 月 10 日から 2023 年 8 月 11 日まで、予報が 6 月 20 日から 8 月 11 日までである。

2023 年 7 月実験について第一推定値と観測値との差 (O-B) を確認すると、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A との整合性において、ch4 や ch5 など下層気温に感度があるチャンネルについて統計的な有意性はないものの改善傾向となっていた (図 4.1.9)。この結果は OSTIA を用いた予備実験 (気象庁 2024) と定性的に一致しているが、変化幅としては限定的である。また、予測精度は中立からやや改善であり (図 4.1.10)、台風予測精度については中立の結果を得ている (図略)。

実験対象とした時期では比較対象となる全球 HIMSST 実験、MGDSST 実験ともに短周期変動成分に AMSR2 が利用されていること、また、ひまわりは静止気象衛星のため観測領域が限られていることから、SST 解析に静止気象衛星ひまわりを新規に利用することの全球数値予報システムへの影響は OSTIA を用いた予備実験ほどは大きくならなかったと考えられる。全体として、解析予測精度は中立からやや改善であったため、全球数値予報システムにおける全球 HIMSST の利用に問題はないと考えている。

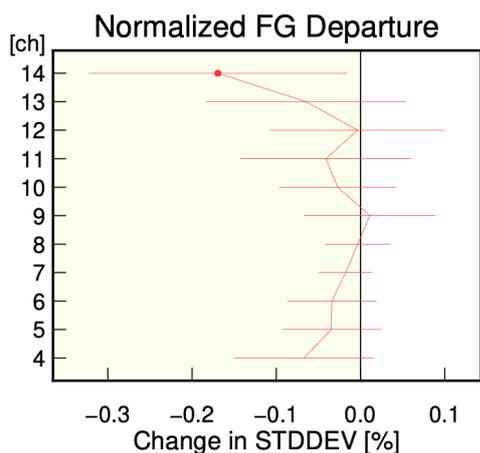


図 4.1.9 解析予報サイクル実験による 2023 年 7 月における全球域でのマイクロ波気温サウンダ AMSU-A による観測値と第一推定値との差の標準偏差の変化率 [%]。負の値は全球 HIMSSST 実験の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表し、エラーバーは 95%信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意であることを表す。

#### 4.1.6 まとめ

##### (1) 各開発項目の進捗

本稿では、台風防災へ貢献するため取り組んでいる全球数値予報システムの開発について報告した。

将来の高解像度への対応として、GSM の浮動小数点数の単精度化について報告した。MPI 通信単精度化と全体単精度化の二段階の対応を検討しており、MPI 通信単精度化では予測精度は中立でありながら実行時間が約 10%短縮する結果を得た。全体単精度化では実行時間は 30%程度短縮するものの、予測精度が部分的に悪化することから調査と対策を検討していく。

利用観測データの増大に備え、全球 4D-Var についても浮動小数点数の単精度化を検討した。その結果、大幅なメモリ使用量削減と実行時間短縮を行えることを確認した。現時点で確認された解析予測精度への影響は限定的であるものの、今後も調査と開発を慎重に進めてゆく方針である。

また、全球 4D-Var に SDL を導入することでアンサンブル背景誤差をより適切に表現しうることが確認できた。解析予測精度向上につなげるため、更なる高度化も視野に開発を続けている。

全球 HIMSSST 利用に向けた開発では、高解像度化により全球 HIMSSST は MGDSSST に比較して海洋中小規模擾乱など細かい空間構造が表現されていることを確認した。また、全球数値予報システムでの解析予測精度も中立から改善となる結果を得た。

##### (2) 今後の計画

これらの開発項目について開発と評価を進め、順次全球数値予報システムに導入することを目指している。GSM の MPI 通信単精度化及び全球 4D-Var への SDL 導入と全球 HIMSSST の利用開始は令和 9 年 3 月頃を計

画しており、全球 4D-Var の単精度化も解析予測精度への影響が十分に小さいことが確認できた範囲についてはここでの導入を目指している。また、GSM の全体単精度化は令和 10 年 3 月頃の導入を目指し評価を進めている。全球 4D-Var の全体単精度化の導入時期は未定であるが、評価が済んだ範囲ごとに段階的に導入していく計画である。

#### 参考文献

- Buehner, M., 2012: Evaluation of a spatial/spectral covariance localization approach for atmospheric data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 617–636.
- Buehner, M. and A. Shlyayeva, 2015: Scale-dependent background-error covariance localisation. *Tellus*, **67A**, 28 027.
- Caron, J.-F. and M. Buehner, 2018: Scale-dependent Background Error Covariance Localization : Evaluation in a Global Deterministic Weather Forecasting System. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1367–1381.
- Diamantakis, M. and F. Vana, 2022: A fast converging and concise algorithm for computing the departure points in semi-Lagrangian weather and climate models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **148(743)**, 670–684.
- 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 Operational Production of Foundation Sea Surface Temperature and Ice Concentration Analyses. *Remote Sensing*, **12(4)**.
- Jablonski, C. and D. L. Williamson, 2006: A baroclinic instability test case for atmospheric model dynamical cores. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2943–2975.
- 気象庁, 2024: 全球モデルの開発進捗。数値予報開発センター年報 (令和 5 年), 気象庁 数値予報開発センター, 83–90.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析。測候時報, 気象庁, **73 特別号**, S1–S18.
- Lang, S.T.K., A. Dawson, M. Diamantakis, P. Dueben, S. Hatfield, M. Leutbecher, T. Palmer, F. Prates, C. D. Roberts, I. Sandu, and N. Wedi, 2021: More accuracy with less precision. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **147**, 4358–4370.
- Ménérier, B., T. Montmerle, Y. Michel, and L. Berre, 2015a: Linear Filtering of Sample Covariances for Ensemble-Based Data Assimilation. Part I : Opti-

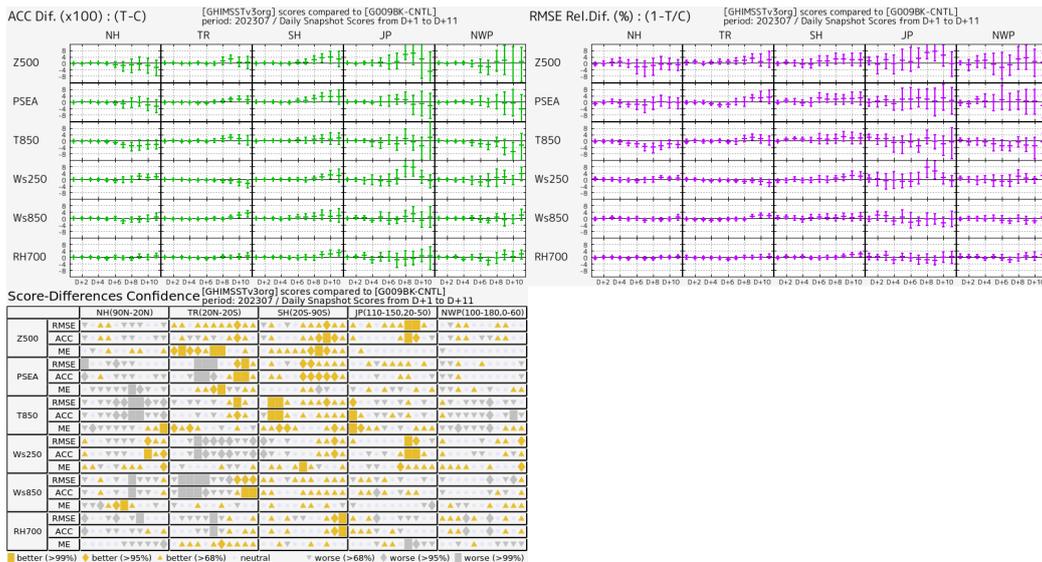


図 4.1.10 2023 年 7 月における対流圏主要要素のアノマリー相関係数の改善幅 (左上)、RMSE の改善率 (右上) と全球 HIMSST 実験と MGDSST 実験のスコア差の有意性判定 (左下: スコアカード)。自実験の解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S–20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E–150°E, 20°N–50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E–180°E, 0°–60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、ACC、ME について、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど有意水準が厳しい。

mality Criteria and Application to Variance Filtering and Covariance Localization. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1622–1643.

Ménétrier, B., T. Montmerle, Y. Michel, and L. Berre, 2015b: Linear Filtering of Sample Covariances for Ensemble-Based Data Assimilation. Part II : Application to a Convective-Scale NWP Model. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1644–1664.

Nakano, M., H. Yashiro, C. Kodama, and H. Tomita, 2018: Single Precision in the Dynamical Core of a Nonhydrostatic Global Atmospheric Model: Evaluation Using a Baroclinic Wave Test Case. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 409–416.

Rüdisühli, S., A. Walser, and O. Fuhrer, 2013: COSMO in single precision. *COSMO Newsletter*, **14**, 70–87.

Temperton, C., M. Hortal, and A. J. Simmons, 2001: A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 111–127.

Williamson, D. L., J. B. Drake, J. J. Hack, R. Jakob, and P. N. Swarztrauber, 1992: A Standard Test Set for Numerical Approximations to the Shallow Water Equations in Spherical Geometry. *J. Comput. Phys.*, **102**, 211–224.

柏木啓一, 1995: 計算機システム. 平成 7 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 8–12.

吉村裕正, 松村崇行, 2004: セミラグランジュ統一モデ

ル. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 51–60.

## 4.2 局地モデルの高解像度化に向けた開発

### 4.2.1 はじめに

局地モデル (LFM) は日本域を予報領域とした水平解像度 2 km の予測システムで、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いる。

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」では、半日前から降水予測に基づいた住民の早期避難や地域の防災対応を可能とするため、線状降水帯等に伴う大雨の予測精度向上を図り、高精度かつ整合性のある数値予報プロダクトを提供としている。この目標に資するため、線状降水帯を構成する個々の積乱雲を部分的に表現できるよう水平解像度を 2 km から 1 km へ高解像度化することで、線状降水帯の予測精度向上を計画している。また、より細かい地形を表現することで風の予測精度向上等による降水の立ち上がりの改善が期待される。並行して、計画している高解像度化による計算量増加への対応として、線状降水帯予測スーパーコンピュータ (NAPS11s) 向けの高速化が必要となる。

本節では、2025年度末の LFM の高解像度化に向けた開発において課題となった地形に関する物理過程等の最適化、および雲物理過程の高速化について報告する。

### 4.2.2 地形作成方法ならびにパラメータの最適化

LFM の 1 km 化にあたり、解像度に則したモデル標高およびその大気への影響を表現するため、モデル標高作成手法の調整と、サブグリッド地形起伏による乱流形状抵抗スキーム (TOFD; Beljaars et al. 2004) のパラメータの最適化を行った。

#### 地形斜度制限の緩和

LFM のモデル標高は水平解像度約 90 m の高精度標高データセット MERIT DEM (Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM; Yamazaki et al. 2017) を用いて LFM 格子点における平均標高を計算する。さらに、モデルの計算安定性確保のため、モデル解像度の 1.5 倍相当の解像度に平滑化したのち、隣接格子との傾斜率 (標高差 ÷ 水平距離) が特定の上限值 (0.15) を超えないように高い側の格子の標高を下げる処理を施している。この方法で 1 km 解像度のモデル標高を作成したとき、現行の 2 km 解像度のものに比べて系統的に標高が低下してしまうことがわかった (図 4.2.1 左図)。この原因として、現在設定している最大傾斜率 0.15 では 1 km 解像度の場合に必要な急傾斜を抑えている可能性があることが判明した。この最大傾斜率は、以前の現業非静力学モデル (JMA-NHM; Saito et al. 2006, 2007) における設定を踏襲したものである。現在のモデルである asuca (気象庁予報部 2014; Ishida et al. 2022) は計算安定性が向上しており、傾斜が 45 度程度 (傾斜率 1.0 に相当) の地形であっても安定に計算できる

ことが理想実験等で確認されている (石田ほか 2014b)。これを踏まえ、最大傾斜率を 0.15 から 0.25 に変更し、斜度に対する制限を緩和することとする。図 4.2.2 は 2 km 解像度と 1 km 解像度のモデル標高を頻度分布で比較したものであるが、最大傾斜率を 0.15 のままで 1 km 解像度モデル標高を作成すると、2 km 解像度モデル標高とほぼ同じ頻度となっている。一般に、高解像度化すると標高のメリハリが付き、高標高の格子が増加することが想定されるが、最大傾斜率 0.15 ではそれを実現することはできない。最大傾斜率を 0.25 に変更して 1 km 解像度モデル標高を作成すると、高標高の格子が増加し、斜度制限変更前のモデル標高に見られていた系統的な標高の低下は見られないことを確認した (図 4.2.1 右図)。

#### TOFD のパラメータ調整

モデルの高解像度化に併せて、TOFD スキームのパラメータの最適化を行う。TOFD スキームではサブグリッドの標高標準偏差に基づいて地形抵抗の大きさを定式化している。標高標準偏差を計算する際、TOFD スキームが対象とするスケールの起伏を抽出するため、地形データにバンドパスフィルタを適用している。フィルタ関数は Beljaars et al. (2004) の (A.1) 式に基づいており、現行の LFM では高波数側のフィルタ幅を 400 m、低波数側のそれを 4 km に設定している。今回、1 km 解像度に変更するにあたって、低波数側のフィルタ幅を 2 km に変更する。加えて、波数空間のフィルタ関数  $H_{flt}$  (Beljaars et al. 2004, (A.2) 式) の積分を数値的に計算し、最適なパラメータを算出する ( $I_H = 0.00440 \text{ m}^{-1}$ ,  $k_{flt} = 0.00243 \text{ m}^{-1}$ )。

また、1 km 解像度の LFM を開発する過程で、現行 LFM と比べて地上風向の誤差はほぼ変わらないものの地上風速の正バイアスの拡大が認識された。感度実験等の結果から、地上風速誤差の縮小を目的として、TOFD 定式 (Beljaars et al. 2004, (16) 式) の定数  $\alpha$  を 12 から 24 に変更する。

#### 最適化のインパクト

地形に関する最適化のインパクトを調査するために、2023 年の夏 120 事例 (2023 年 6 月 28 日から 7 月 12 日、1 日 8 回実行) について実験を行った。図 4.2.3 は対アメダス地上風速予測の平均絶対誤差を表す。最適化後の地上風速誤差は、予報初期を除き、最適化前と比べて大きく縮小し、2 km 解像度実験と同等の予測精度となっていることがわかる。地上風向の予測誤差は縮小することを確認している (図略)。

### 4.2.3 NAPS11s 向けの雲物理過程の高速化

LFM の演算量は、水平高解像度化により大幅に増加する。一方で、計算機資源を演算量の増加と同等に増強することは困難であり、プロダクトの提供時刻を維持するためには LFM の高速化が必須となっている。現

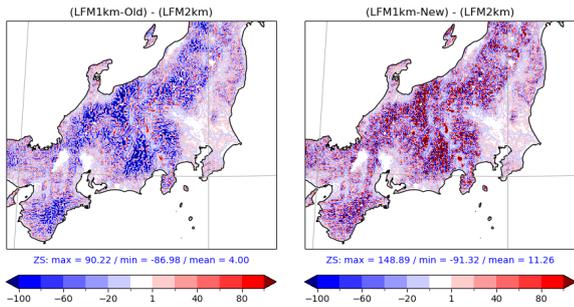


図 4.2.1 2 km 解像度と 1 km 解像度におけるモデル標高の差 [m]。左図は最大傾斜率を 0.15 で計算したものの、右図は 1 km 解像度について最大傾斜率を 0.25 で計算したものを表す。

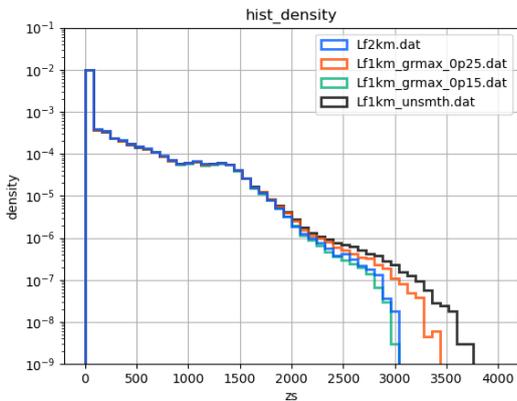


図 4.2.2 モデル標高のヒストグラム。青線は 2 km 解像度、緑線は 1 km 解像度で最大傾斜率を 0.15 としたものの、赤線は 1 km 解像度で最大傾斜率を 0.25 としたものの、黒線は 1 km 解像度で最大傾斜率による補正を行わないものをそれぞれ表す。

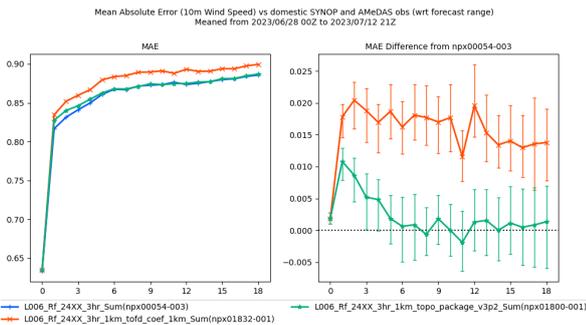


図 4.2.3 対アメダス地上風速のリードタイム別平均絶対誤差 [m/s](左図)。青線は 2 km 解像度実験結果、赤線は地形最適化前の 1 km 解像度実験結果、緑線は地形最適化後の 1 km 解像度実験結果。右図は 2 km 解像度実験結果に対する差分を表す。実験期間は 2023 年 6 月 28 日から 7 月 12 日まで (120 初期値)。

在 LFM が運用されている NAPS11s では、LFM の実行時間の約 25% を asuca の雲物理過程が占めていることがわかっている。そこで、主要なボトルネックである雲物理過程を対象に、NAPS11s 上での高速化を目的としたコーディングレベルでの最適化を行った。

asuca はスカラプロセッサ向けに設計されており、3次元配列の最内を鉛直方向とする kij 方式<sup>1</sup>を採用している。並列化手法は、MPI を用いた水平 2次元の領域分割によるプロセス並列化と、各プロセス内の水平方向のループに対する OpenMP を用いたスレッド並列化を併用している。物理過程は、鉛直 1次元で実装された物理過程ライブラリ (原 2012) のサブルーチンを、各スレッドから呼び出す形で実装されている。

スーパーコンピュータ「富岳」と同じアーキテクチャを採用している NAPS11s 上でプログラムの実行性能を引き出すためには、CPU コアがもつベクトル化機能 (SIMD:Single Instruction Multiple Data<sup>2</sup>) を活用した命令数の削減や、ソフトウェアパイプライン<sup>3</sup>(SWPL:Software Pipelining) の適用による命令実行効率の向上が非常に重要である。これらのコンパイラによる最適化を適用するためには、最内ループにループ運搬依存<sup>4</sup>や複雑な分岐処理が存在しないことが求められる。また、SWPL を適用するには、必要に応じてループ分割を行うことによりループボディ<sup>5</sup>の粒度を適切に設定することが必要である。しかし、現行の雲物理過程は降水フラクション等の計算において鉛直方向のループ運搬依存があり、またループ内に多くの複雑な分岐処理を含んでいる。さらに、各素過程の時間変化率を足し込んだ結果を次の素過程の計算に使う手法 (シーケンシャルプリッティング) を採用していることからループ運搬依存が計算全体に及んでいる。その結果、全ての計算を単一のループ内で実行せざるを得ない構造となっており、ループボディが非常に大きくなっている。これらのコードの特徴が、最内ループでの SIMD 化や SWPL の適用を困難にしており、NAPS11s で実行性能が低い要因となっている。

そこで、コンパイラによる最適化が適用可能となるようにコーディングレベルでの最適化を行う。まず、最内ループの運搬依存を解消するために、雲物理過程計算時にのみ ikj 方式に切り替える変更を行った。具体的には、物理過程ライブラリの雲物理過程を (k) の 1次元実装から (i,k) の 2次元実装に変更し、asuca 側では j ループに対するスレッド並列処理内の雲物理過程を呼び出す前後で (k,i) と (i,k) の配列の詰め替えを行うように変更する。雲物理過程は水平方向にはループ運搬依存が無いため、この変更により最内ループの SIMD 化やループ分割が可能となる。さらに、SIMD 化を前提とした分岐処理の削減・整理、および SWPL が適用可能な粒度でのループ分割等の最適化も併せて行う。

<sup>1</sup> x,y,z 方向のループインデックスとして一般的に i,j,k を用いることから a(k,i,j) のように 3次元配列を定義する方式を「kij 方式」と呼んでいる (石田ほか 2014a)。

<sup>2</sup> 1つの命令で複数のデータを同時に処理する並列化方式。

<sup>3</sup> コンパイラが命令を並び替え、ループ反復間で命令実行を重ね合わせることで、命令の並列性を向上させる最適化手法。

<sup>4</sup> ループ反復間に依存関係が存在する状態。

<sup>5</sup> 一つのループで囲まれたコードブロック。

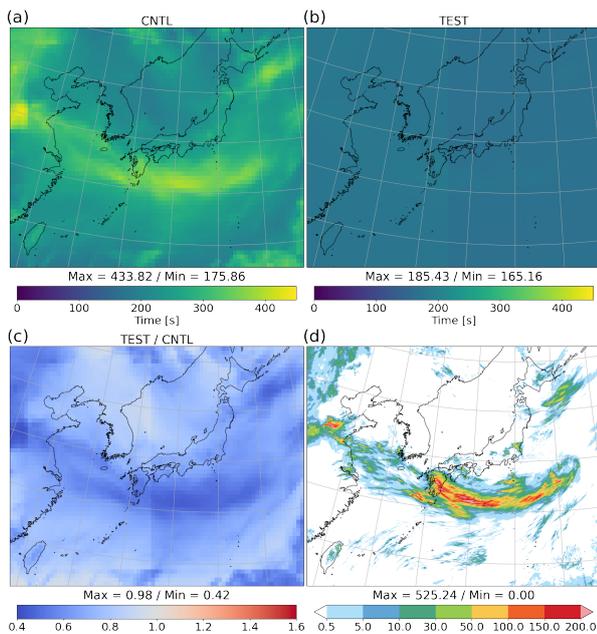


図 4.2.4 2023 年 7 月 3 日 00UTC 初期値の 1 km へ高解像度化した LFM の 18 時間予報における雲物理過程の MPI プロセス毎の実行時間 [s](a,b,c) と 18 時間積算降水量 [mm](d)。(a) は最適化前 (CNTL)、(b) は最適化後 (TEST)、(c) は最適化前後の比 (TEST/CNTL) を表す。

以上の変更により、雲物理過程のほとんどのループで SIMD 化および SWPL が適用されるようになる。

図 4.2.4 に 1 km へ高解像度化した LFM(1kmLFM) の 18 時間予報における雲物理過程の MPI プロセス毎の最適化前後の実行時間<sup>6</sup>と 18 時間積算降水量を示す。最適化前 (CNTL) は、水物質量の多い領域を含むプロセスの実行時間が相対的に長く、プロセス間のロードインバランスを拡大させる原因となっている。これは、CNTL のコード構造上 SIMD 化や SWPL が適用できず逐次実行となるため、演算量が水物質量に大きく依存してしまうことに起因する。一方、最適化後 (TEST) は、SIMD 化と SWPL の適用により演算の並列性と実行効率が向上し、特に CNTL でボトルネックとなっていた水物質量の多い領域で実行時間が最大約 58%削減され、プロセス間のロードバランスが改善する。この高速化により、1kmLFM のモデル全体としての実行時間は約 18%削減される。

#### 4.2.4 まとめと今後の開発

2025 年度末の LFM 更新では、半日前からの住民の早期避難や地域の防災対応に向けて、線状降水帯をはじめとする大雨の予測精度向上を目的として、主に対流の表現力向上に向けた現行の水平解像度 2 km から 1 km への高解像度化とそれに伴う地形に関するパラメータ変更、計算量増加に対応するための高速化を行

<sup>6</sup> ここでは、MPI 並列数を 4560、OpenMP スレッド数を 12 として評価した。

う。高解像度化に伴う地形の精緻化を図るため、最大地形斜度率の見直しを行い、入力となる地形データにより近い標高分布を取り込めることを確認した。高解像度化による予測精度への影響調査において、1 km LFM の地上風向の予測誤差は軽減し、地上風速の予測精度は、乱流形状抵抗スキーム TOFD のパラメータを最適化することで、現行の LFM と同程度となることがわかった。高速化の取り組みとして、NAPS11s 上でボトルネックの 1 つであった雲物理過程のコーディングレベルでの最適化を行い、1 km に高解像度化した LFM のモデル全体としての実行時間を最適化前に比べて大きく削減できることを確認した。これらのモデル改良の他、計算安定性の改善に向けた修正等を含めて、スーパーコンピュータ「富岳」を活用して、長期間にわたる再予報実験を行い、予測特性への影響や数値安定性に関する調査を進めている。今後は、本節で示した改良と観測データ利用改良 (第 4.4 節) 等を合わせた仕様での試験を実施し、改善の効果を確認したのち、2025 年度末に局地数値予報システムを更新する計画である。

#### 参考文献

Beljaars, A. C. M., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1327–1347, doi:10.1256/qj.03.73.

原旅人, 2012: 物理過程ライブラリの開発. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 205–208.

石田純一, 河野耕平, 荒波恒平, 2014a: 並列化・高速化. 数値予報課報告・別冊第 60 号付録 A, 気象庁予報部, 141–146.

Ishida, J., K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi, Y. Kitamura, and C. Muroi, 2022: ASUCA: the JMA operational non-hydrostatic model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 825 – 846.

石田純一, 河野耕平, 松林健吾, 2014b: 理想実験を通じたドライモデルとしての評価. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 62–87.

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.

Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic Atmospheric Models and Operational Development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271–304.

Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.

Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O’Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson,

S. Kanae, and P. D. Bates, 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5844–5853, doi:10.1002/2017GL072874.