

| HPCI システム利用研究課題 利用報告書<br>HPCI User Report |                                                                                                                                               |                                                                                                   |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 課題番号<br>Project Number                    | hp240222                                                                                                                                      |                                                                                                   |
| 課題名                                       | 豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発                                                                                                                        |                                                                                                   |
| Project Name                              | Numerical weather prediction model development for mitigation from the torrential rain and typhoon disaster                                   |                                                                                                   |
| 課題代表者<br>Project Representative           | 氏名                                                                                                                                            | 佐藤 芳昭                                                                                             |
|                                           | Name                                                                                                                                          | Yoshiaki SATO                                                                                     |
|                                           | 所属機関                                                                                                                                          | 気象庁情報基盤部数値予報課                                                                                     |
|                                           | Affiliation                                                                                                                                   | Numerical Prediction Division, Information Infrastructure Department, Japan Meteorological Agency |
|                                           | 所属機関の国名                                                                                                                                       | 日本                                                                                                |
|                                           | Country                                                                                                                                       | Japan                                                                                             |
| キーワード<br>[5-10 語程度]                       | アンサンブル予報、高解像度数値予報モデル、防災、豪雨、台風、asuca, GSM                                                                                                      |                                                                                                   |
| Keywords                                  | Ensemble Prediction System, High-resolution numerical weather prediction model, Disaster prevention, Heavy rain, Tropical cyclone, asuca, GSM |                                                                                                   |
| 利用ソフトウェア<br>Software                      | asuca(IN-HOUSE), GSM(IN-HOUSE)                                                                                                                |                                                                                                   |
| 利用枠<br>Project Category                   | 「富岳」政策対応枠: R06 年度<br>Government-Initiated Category of Supercomputer Fugaku: FY2024                                                            |                                                                                                   |
| 実施期間<br>Periods of Use                    | 2024/4/1 – 2025/3/31<br>Apr. 1, 2024 - Mar. 31, 2025                                                                                          |                                                                                                   |

| 利用計算資源情報<br>Resource Information                     |                                          |                    |                  |                    |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 機関名<br>Institutions                                  | 資源名<br>Computer Resources                | 資源量(通期) Resources  |                  |                    |
|                                                      |                                          | 単位<br>Units        | 割当量<br>Allocated | 使用量<br>Amount Used |
| 理化学研究所<br>RIKEN                                      | スーパーコンピュータ「富岳」<br>Supercomputer "Fugaku" | ノード時間<br>node hour | 18,000,000       | 17,195,345         |
| 東京大学(東)理研(西)<br>Univ. of Tokyo(East),<br>RIKEN(West) | HPCI 共用ストレージ<br>HPCI Shared Storage      | GB                 | 500              | —                  |
|                                                      |                                          |                    |                  |                    |
|                                                      |                                          |                    |                  |                    |

課題番号：hp240222

## 豪雨防災、台風防災に資する数値予報モデル開発

佐藤芳昭

気象庁情報基盤部数値予報課

### 1. 研究の背景と目的

集中豪雨をもたらす線状降水帯や台風による被害は近年、毎年のように発生しており、その予測精度向上は喫緊の課題である。本課題は 2030 年時点の気象庁スーパーコンピュータを想定し、線状降水帯の予測精度向上を目的とした高解像度（水平解像度 1km 以下）の領域モデル、高解像度（水平解像度 2km 以下）の領域アンサンブル予報、観測データの利用高度化、及び台風進路予測精度向上を目的とした高解像度（水平解像度 10km 以下）の全球モデルの開発に関する知見を得ることを目的とする。

In recent years, disasters caused by torrential rain and typhoon have been occurring every year, and improving forecast accuracy has become an urgent issue. This project aims to obtain knowledge on the development of a high-resolution (horizontal resolution of 1 km or less) regional model, a high-resolution (horizontal resolution of 2 km or less) regional ensemble forecast system, and advanced use of observation data, to improve the forecast accuracy of torrential rain, and a high-resolution (horizontal resolution of 10 km or less) global model to improve the forecast accuracy of typhoon, assuming the Japan Meteorological Agency supercomputer as of 2030.

### 2. 結果要旨

豪雨防災においては、高解像度モデルによるリアルタイム予測実験を実施し、線状降水帯を予測できた事例を確認した。局地アンサンブル予報システムの開発では、これまでの調査を反映した仕様により、多くの線状降水帯事例で発生可能性を捉えられることを確認した。静止気象衛星ひまわり及び二重偏波気象ドップラーレーダーの利用高度化に向けて、大学や研究機関との共同研究を実施し、多様な設定の同化実験により課題を把握しながら開発を進めた。台風防災においては、水平解像度 13km, 5km の全球モデル(GSM)の予測実験から、高解像度モデルにおける積雲対流過程や海洋混合の効果が台風や降水表現に与える影響を調査した。安定かつ高速実行に向けた力学過程の改良について検討した。これまでの成果のうち、並列計算手法改良については、令和 7 年 3 月に現業 GSM に導入された。

For the torrential rain disaster prevention subproject, real-time forecasting experiments using a high-resolution model were conducted and several successful cases of heavy rainfall forecasting were realized. The development of the Local Ensemble Prediction System confirmed that the system reflecting our previous research could capture the heavy rainfall potential in many cases. For advanced use of the geostationary meteorological satellite Himawari and dual-polarization weather Doppler radar data, we promoted joint research project with universities and research institutes and conducted assimilation experiments with a variety of settings to understand the issues for further development. For the typhoon disaster prevention

subproject, case studies of the 13km and 5km grid spacing Global Spectral Model (GSM) showed that adjustments to cumulus convection and considering ocean mixing processes certainly influenced the representation of tropical cyclones and precipitation in high resolution GSM. Several improvements to the dynamical process have been tested for further speed-up and stable time integration. The improvements to parallelization methods as a deliverable of this project up to the previous year was incorporated to the operational version of GSM in March 2025.

### 3. 計算モデル

豪雨防災：気象庁領域モデル (asuca) [1]

台風防災：気象庁全球モデル (GSM)

### 4. 並列計算の方法と効果（性能）

asuca は MPI と OpenMP を併用したハイブリッド並列を採用している。MPI プロセスの一部は、I/O を専用で処理するためのプロセスとして用いている。水平解像度 1km の 18 時間予報の実験ではスーパーコンピュータ「富岳」1152 ノードでの計算時間は約 2000 秒である。

GSM は MPI と OpenMP を併用したハイブリッド並列を採用している。MPI プロセスの一部は、I/O を専用で処理するためのプロセスとして用いている。水平解像度約 13km、132 時間予報について、「富岳」966MPI プロセス（うち、6 I/O 専用 プロセス）、4MPI プロセス/ノード、12 スレッド/MPI プロセス使用時での実行時間が約 20 分である。水平解像度 5km で 13kmGSM と同等の実行時間を達成するには、令和 6 年度までに検討を実施した高速化を反映させた上で約 8 倍（「富岳」約 2000 ノード相当）の資源を要する。

### 5. 研究成果

豪雨防災に向けた数値予報モデル開発として、5.1 で高解像度モデル（水平解像度 1km）によるリアルタイム予測実験、5.2 で高解像度のアンサンブル予報システムの開発、5.3 で様々な観測データの利用に係る技術開発について述べる。台風防災に向けた数値予報モデル開発として、5.4 で高解像度化した GSM の開発について述べる。これらの高解像度化した数値予報モデルによる実験は「富岳」の性能を活用して実施できたものである。また、5.3 は「富岳」上に構築した気象庁現業準拠の実験システムを用いて大学や研究機関と共同で研究を実施できたことによる成果である。

#### 5.1 豪雨防災：高解像度モデル（水平解像度 1km）によるリアルタイム予測実験

令和 5 年度は日本全体を含む領域（気象庁で現業運用している局地モデル (LFM) と同じ領域）に対象領域を拡張し、現在開発中の水平解像度 1km の高解像度 LFM（以下、富岳 1kmLFM）によるリアルタイム予測実験を 1 日 2 回行った。令和 6 年度は雲物理過程等におけるループ分割による SIMD 化の促進や命令スケジューリングの最適化、入出力に関する最適化等の高速化を実施して「富岳」での計算時間を 20%程度高速化した。そのうえで、早朝や夜中を初期時刻とした予測についても精度の確認をするため、1 日 4 回のリアルタイム予測実験を実施した。リアルタイ

ム予測実験の期間は令和 6 年 6 月から 10 月であり、気象庁の予報作業において、情報発表の参考資料として利用した。

表 1 に令和 6 年度に行った富岳 1kmLFM によるリアルタイム予測実験の仕様を、令和 4 年度と 5 年度の実験仕様、気象庁で現業運用中の LFM の仕様と比較して示す。計算結果の利用までの流れは、気象庁スーパーコンピュータで作成した初期値及び境界値を「富岳」へリアルタイム伝送し、即時に「富岳」で予測計算を行った後、計算結果を気象庁に伝送し、対話的描画ソフトによって可視化を行う形で予報作業の参考資料とした。

図 1 に、富岳 1kmLFM の実行例を示す。この事例は、令和 6 年 6 月 21 日 5 時頃に鹿児島県で発生した線状降水帯の事例である。水平解像度 2km の LFM の予測では、鹿児島県の降水域について、ピークの降水量は実際に比べてやや過少な予測をしているのに対し、富岳 1kmLFM では、実際のピークの降水強度に近い値を予測し、3 時間 100mm 降水量の分布も実際に近い形状の降水域を表現できていることがわかる。

気象庁では、「富岳」における高速化を含む開発成果を活かし、令和 7 年度末に水平解像度を 1km に高解像度化した LFM の現業運用を開始する予定である。なお、この LFM は「富岳」と同型機である線状降水帯予測スーパーコンピュータ上で運用予定である。

表 1 リアルタイム予測実験の仕様

|       | 富岳 1km LFM<br>(令和 6 年度) | 富岳 1km LFM<br>(令和 5 年度) | 富岳 1km LFM<br>(令和 4 年度) | 現業 2km LFM |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 水平解像度 | 1km                     | 1km                     | 1km                     | 2km        |
| 領域    | 日本域                     | 日本域                     | 西日本領域                   | 日本域        |
| 水平格子数 | 3161×2601               | 3161×2601               | 1400×1400               | 1581×1301  |
| 予報時間  | 18 時間                   | 18 時間                   | 18 時間                   | 18 時間（最大）  |
| 実行頻度  | 4 回／日                   | 2 回／日                   | 2 回／日                   | 24 回／日     |

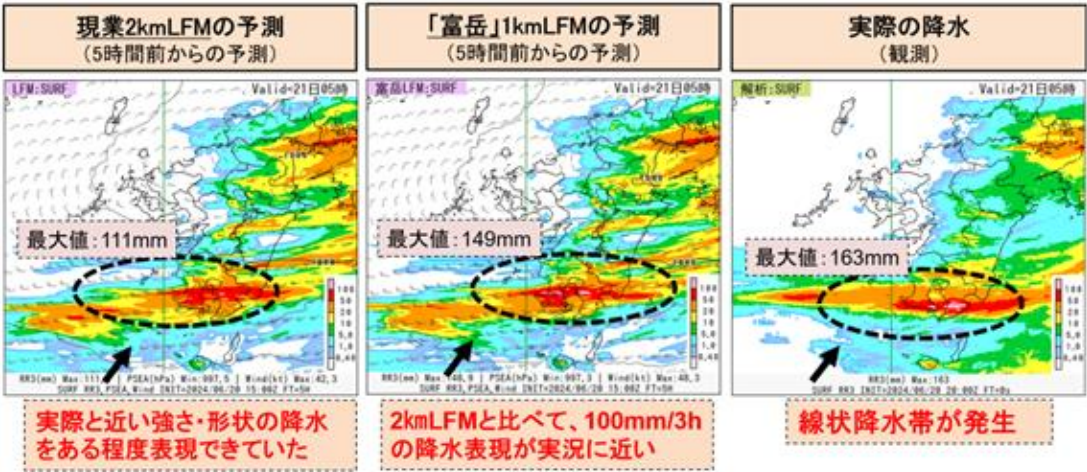


図 1 富岳 1kmLFM の実行例。令和 6 年 6 月 21 日 5 時頃に鹿児島県で発生した線状降水帯事例。左は水平解像度 2km の LFM による 5 時間前からの予測結果、中央は富岳 1kmLFM による 5 時間前からの予測結果、右は実際の降水。予測結果は、3 時間降水量[mm/3h]と風の予測結果を示している。

## 5.2 豪雨防災：高解像度のアンサンブル予報システム

令和 6 年度は、昨年度までの調査により解像度・メンバー数の仕様を決定した局地アンサンブル予報システム（LEPS）において、より適切な摂動の与え方を検討し、これまで考慮していた初期摂動に加え、側面境界摂動を考慮するようにした。これらの調査結果を踏まえた仕様の LEPS により、線状降水帯事例における性能の確認を進めた。

はじめに、側面境界摂動の降水確率予測への効果を見るため、側面境界摂動あり・なしの予測実験（2023 年 6 月 28 日 00UTC～7 月 12 日 18UTC の計 60 初期値）における 3 時間降水量（閾値 20mm/3h）についての予報時間別（21 時間予報）のブライスキルスコア（BSS）を図 2 に示す。BSS は確率予測のスキルスコアで、ここでは気候値予測を基準とし、完全予測で 1、気候値予測で 0、気候値予測より誤差が大きいと負となる。側面境界摂動の導入により、降水確率予測が予報後半中心に改善することが分かる。

つぎに、これまでの調査結果を踏まえた仕様の LEPS について、2023 年の線状降水帯事例の調査結果を示す。本調査での LEPS の設定は次のとおりである。予報モデルは水平解像度 2km の局地モデル（LFM）を用いて、メンバー数は 21（うち摂動を与えないコントロールラン 1）とする。予報時間は 21 時間とする。摂動は初期摂動と側面境界摂動を与える。これらの摂動は、気象庁メソアンサンブル予報システム（MEPS；水平解像度 5km、21 メンバー）の予報値とその時刻のアンサンブル平均との差を振幅調整して作成する。LEPS は、MEPS 予報値を利用した初期摂動・側面境界摂動（100km 程度以上の水平スケール）を与え、その摂動を起因とする水平解像度 2km の LFM の振る舞いの違い（ばらつき）により、強雨予測の不確実性を捉えようとするものである。強雨予測において重要である発生環境場に起因する不確実性を捉えることが期待される。

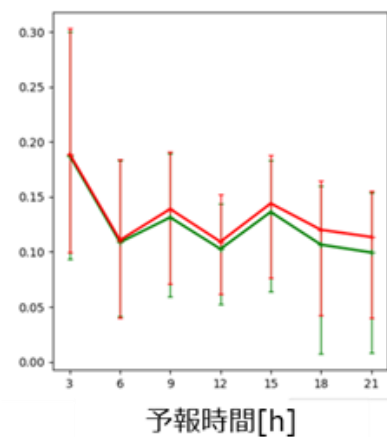


図 2 閾値 20mm/3h の予報時間別のブライスキルスコア。赤線が側面境界摂動あり、緑線が側面境界摂動なし実験。横軸は予報時間[h]。

図 3 に、2023 年 7 月 10 日福岡・佐賀・大分県の線状降水帯事例についての予測結果を示す。この事例は、梅雨前線南側の大規模な下層収束によって発生し、線状降水帯としては比較的予測しやすかったと考えられ、コントロールラン（図 3（中））では実況の強雨を良く捉えた。また、LEPS21 メンバーによる 50mm/3h を超える確率（図 3（右））において比較的高い確率（約 0.5）を表現した。図 4 に示す、2023 年 7 月 3 日熊本県の線状降水帯事例（図 4（左）の実線丸）は、梅雨前線南側の小規模な下層収束によって発生し、コントロールラン（図 4（中））ではやや強度が弱く、予測が難しかった。この場合にも、LEPS21 メンバーによる予測では、熊本県の実況の線状降水帯の位置に、50mm/3h 以上の強雨を予測するメンバーが存在することによって、アンサンブルにより強雨の可能性を捕捉できていた（図 4（右））。また、この時間帯に発生した長崎県・佐賀県、鹿児島県付近、九州東方沖の強雨（図 4（左）の点線丸）も、コントロールランだけでは捉えられなかったが、アンサンブルにより強雨の可能性を捕捉できた。この傾向は、他の多くの線状降水帯事例においても同様に見られた。

今後は、令和 7 年度末の気象庁の線状降水帯予測スーパーコンピュータでの LEPS 運用開始に向けて、「富岳」でのリアルタイム予測実験（令和 7 年 6 月から 10 月）を計画する。

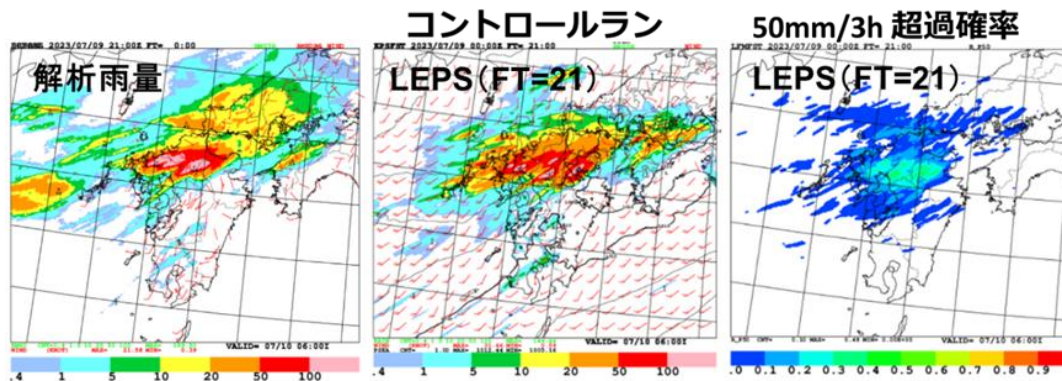


図 3 2023 年 7 月 10 日 06JST の 3 時間降水量[mm/3h]に関する、(左) 解析雨量、(中) LEPS コントロールラン予測、(右) LEPS の 50 mm/3h 超過確率。LEPS は 2023 年 7 月 9 日 00UTC 初期値の 21 時間予報 (FT=21)。

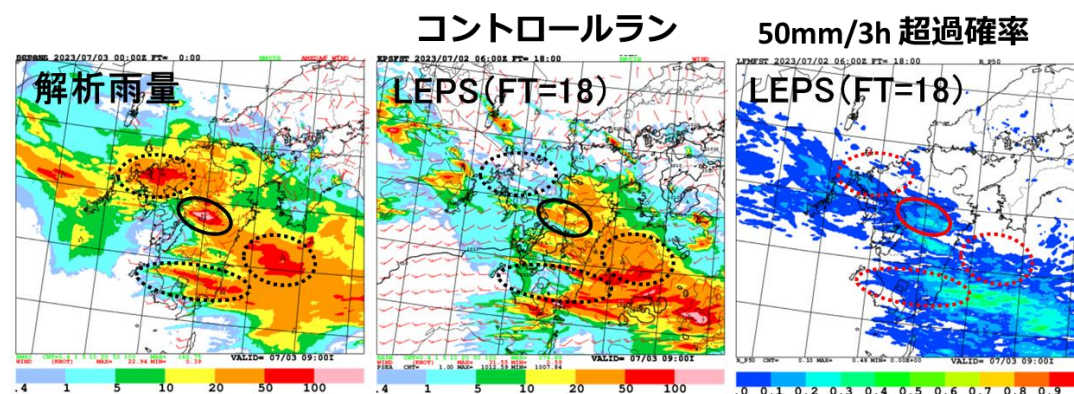


図 4 図 2 と同じ。ただし、2023 年 7 月 3 日 09JST について。2023 年 7 月 2 日 06UTC 初期値の 18 時間予報 (FT=18)。

### 5.3 豪雨防災：様々な観測データの利用に係る技術開発

メソ数値予報システムにおける、静止気象衛星ひまわりが観測した晴天放射輝度 (CSR) データ及び二重偏波気象ドップラーレーダーの利用高度化に向けて、令和 6 年度はデータ品質や同化インパクトを調査した。大学や研究機関と共同開発した成果を円滑に現業数値予報モデルの改良に活用するべく、調査にあたっては、令和 4 年度に「富岳」上に構築した現業準拠の実験システムに、令和 5 年 3 月に実施された現業システムの改良を取り込んだものを利用した。

#### 5.3.1 静止気象衛星ひまわりが観測した晴天放射輝度 (CSR) データの利用高度化

令和 5 年度に引き続き、高解像度化した CSR データ (高解像度化 CSR) の利用高度化を進め、データの高密度利用の効果や観測誤差設定の最適化について調査を行った。また、CSR データと水蒸気量の関連性についてメソ数値予報データや千葉大学による地上観測を用いた調査を行った他、地表面状態の影響について宇宙航空研究開発機構が運用する気候変動観測衛星しきさいの地表面温度プロダクトや千葉大学のひまわり地表面温度プロダクト[2]を用いた調査を行った。

高解像度 CSR を高密度に利用するための調査として、令和 5 年度に行った実験では利用間隔（間引き距離）を現業システムと同じ 45km に設定していたところ、本年度は 30km・15km と間引き距離を短く設定して高密度に利用する実験を行った。間引き距離を短くすることで利用されるデータが大幅に増加し（図 5）、モデル第一推定値（初期の予測値）の水蒸気場の改善が示唆された（図 6）。しかしながら、高密度にデータを利用して作成した初期値から予測モデルを実行すると、降水等の予測成績が悪化する傾向も見られた。今後は、この結果の理解を深めるため、観測誤差設定と利用データ密度の関係について詳しく調査を行う必要がある他、高密度にデータを利用することで、これまで顕在化していなかった問題が見られるようになった可能性を考え、後述するような CSR データの品質管理について、更に調査を行う必要があると考えている。

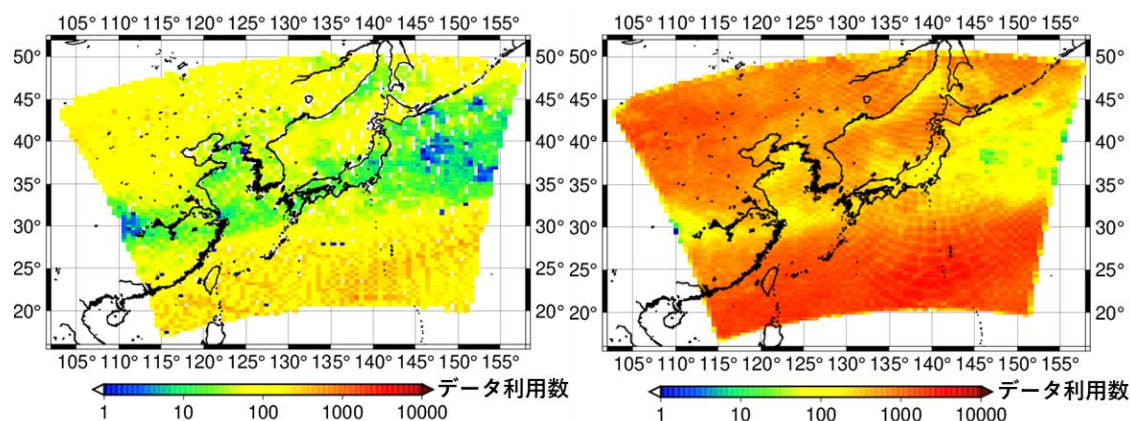


図 5 現行の CSR データ（左）と高解像度 CSR（15km 間引き：右）の緯度経度 0.35 度×0.55 度格子内あたりの利用データ数(2021/06/26－07/13)。

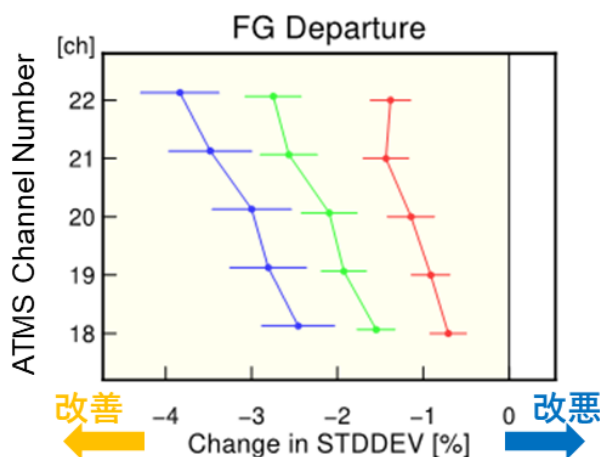


図 6 データ同化に用いた他観測データと第一推定値（予測値）の整合性の変化の確認。マイクロ波サウンダ ATMS の例。縦軸の数字が ATMS のチャンネル番号を表す。グラフの色は高解像度 CSR の間引き距離設定の違いを表し、赤色が 45km 間引き、緑色が 30km 間引き、青色が 15km 間引きである。横軸は第一推定値と ATMS 観測輝度温度の差異についての標準偏差(STDDEV)の変化率を表す。第一推定値と観測値の整合性が向上（改善）すると標準偏差が減少する。

CSR データと水蒸気量の関係性を把握（キャラクタリゼーション）するため、観測された輝度温度とモデルデータから計算した輝度温度の差異について、数値予報モデルの水蒸気量との関係を調査した。その結果、対流圏上・中層において相対湿度が飽和に近い値をとる地点で、この差異が負になる（負バイアス）傾向が見られ、負バイアスを持つデータの水平分布などの特徴から雲の影響が CSR データに残っていることが原因と考えられた。適切な CSR データ利用のためには雲の影響が残った CSR データを除去する必要があることから、新たな品質管理が必要なことが示唆された。また、地上気象観測による CSR データのキャラクタリゼーションとして、千葉大学サイトにおける地上水蒸気量観測（サンフォトメーター・MAX-DOAS）による可降水量と CSR データを比較した。その結果、バンド 10・バンド 9・バンド 8 の順で下層に感度があるバンドほど可降水量観測値と相関が大きいことが示され、可降水量に寄与する水蒸気量が下層ほど多い性質と整合的であった。千葉大学サイトでは東西南北の 4 方位で当該観測を行っており、方位間の観測値のばらつきが多いほど大気不安定度が高いといった特性も知見として得られていることから、高解像度 CSR 同化における適切な空間的スケールの把握や誤差特性等との関連について調査を進める。

次に、CSR データの同化利用に地表面状態が及ぼす影響を確認するため、気候変動観測衛星しきさいの地表面温度プロダクト及び、千葉大学のひまわり地表面温度プロダクトを用いた調査を行った。特に水蒸気量が少ない冬季において、地表面温度プロダクトと同化で利用している地表面温度の差異と、観測された輝度温度とモデルデータから計算した輝度温度の差異との間に弱い正の相関が確認され、同化に利用している地表面温度の誤差が CSR データの数値予報モデルの利用に悪影響を与えている可能性が示唆された。

### 5.3.2 二重偏波気象ドップラーレーダーの利用高度化

令和 5 年度に引き続き、動径風データの利用手法高度化及び現在利用しているレーダー反射強度から推定された相対湿度の精度検証を進めた。

令和 5 年度の調査にて低仰角を中心に低品質データの混入が明らかになったことを踏まえ、令和 6 年度は、防災科学技術研究所の先行研究によるツール・知見を活用し、レーダービームが地形により遮蔽される領域のデータの品質について調査を行った。地形により遮蔽されるレーダービームの割合と観測データの分布を比較したところ、レーダービームが一部のみ遮蔽されている領域の観測データを中心に低品質データが一部存在することがわかった。図 7 に低品質データの一例を示す。この事例では、東海地方にて北寄りの風（図 7a,b）が吹いており、名古屋レーダーによる観測でも概ね北寄りの風が観測されている。仰角 0.2 度と 1.3 度の動径風を比較すると、仰角 0.2 度では観測範囲が狭いことや、仰角 0.2 度にてレーダービームが地形により一部遮蔽される領域では、仰角 1.3 度にて北寄りの比較的強い風が吹いている場合でも、仰角 0.2 度では観測される風速が小さい場合や南風の場合があることがわかる。

地形による影響を受けたデータの品質管理手法の検討や動径風のインパクトを詳細に調査するため、「富岳」の計算資源を活かし、利用データの地形によるレーダービームの遮蔽率の上限値を変更した感度実験や、海上のみや一部高度のデータのみを利用した実験を実施したところ、一部の実験設定では動径風を利用することにより解析・予測結果が改悪することがわかった。偏波パ

ラメータを活用した更なる品質管理手法の高度化や観測誤差設定の見直しに向けて実験結果の解析を進めている。

レーダー反射強度から推定された相対湿度のゾンデによる精度検証では、令和 5 年度の調査にてレーダーの粒子判別結果とゾンデ観測の比較から融解層が 0°Cより下方に一定の厚みをもっており、0°C面高度より下層は液相域と仮定して相対湿度を推定する現在の手法の高度化には融解層下限の推定が重要であることを確認した。令和 6 年度は飛揚中にゾンデが水平方向に移動する効果を考慮してモデル・ゾンデの気温の精緻な比較をしたところ、融解層域におけるモデル気温の精度は概ね良いことまで確認し、相対湿度の比較調査を進めている。

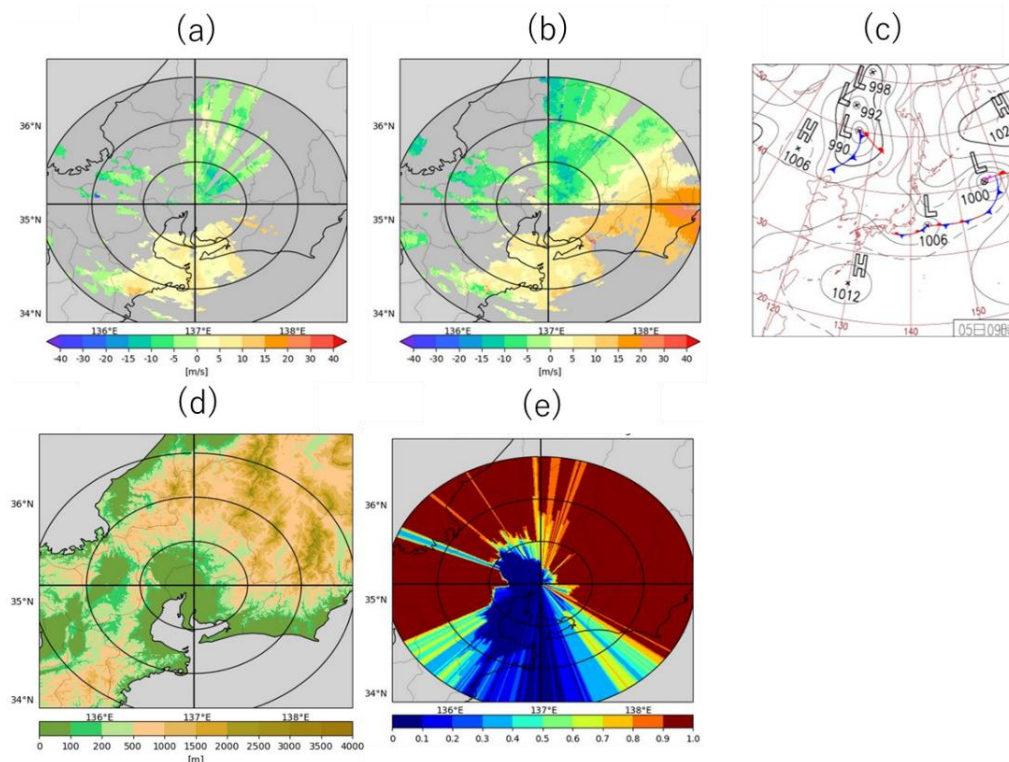


図 7 地形によりレーダービームが遮蔽された低品質データの例。2022 年 8 月 4 日 10 時に名古屋レーダーの動径風観測。(a)仰角 0.2 度、(b) 仰角 1.3 度、(c)2022 年 8 月 4 日 9 時の天気図、(d)標高、(e)名古屋レーダー仰角 0.2 度におけるレーダービームの地形遮蔽率。

#### 5.4 台風防災に向けた数値予報モデル開発

台風防災に向けた数値予報モデル開発としては (1)9km, 5km に高解像度化した GSM における、積雲対流過程や海洋の扱いの精緻化が台風予測や周辺の湿潤な流れ及び降水に与える影響調査、(2)モデルを高速かつ安定な実行を可能にする力学過程の計算手法の改良の検討を進めた。以降では、水平解像度 Xkm の GSM を、XkmGSM と表記する。(1)については、環境場の状態によって積雲対流過程の計算の有無を判別・抑制するパラメータの影響や、台風による海洋の鉛直混合に伴う海面水温低下考慮のインパクトを調査した。図 8 に示す通り、標準設定では高解像度の GSM ほど、台風中心付近での降水の過度な集中とそれに伴う中心気圧の発達や周辺の降水強化が見られるのに対し、積雲対流過程をより広範囲で計算する設定や、海洋混合を考慮した設定では、降水の集中や中心気圧の過度な発達が緩和される振る舞いが見られた。(2)について、計算ステップ 1

回あたりに進める予測時間（時間ステップ）を長くした場合でも安定に実行できるための手法を検討した。小スケールの数値ノイズを除去する高次のフィルターの導入と移流計算の精緻化を組み合わせるにより、長い時間ステップでもより安定な時間積分が可能になることをいくつかのテストから確認した。さらに、これまで「富岳」も活用して得られた高速化の成果のうち、並列計算手法の改良については実用化に向けた準備を進め、2025 年 3 月 18 日に気象庁の現業数値予報システムに導入された。今後は、高解像度全球モデルによる台風の発達や台風からの湿潤な空気の流れこみの予測における、雲や積雲対流過程や海面の扱いの精緻化の影響を整理し、改良の方向性を固める。また、物理過程の精緻化に係る成果の現業全球数値予報システムへの導入に向けて、全ての計算の単精度化・長い時間ステップでの安定実行等、引き続き高速化に関する開発を進める。

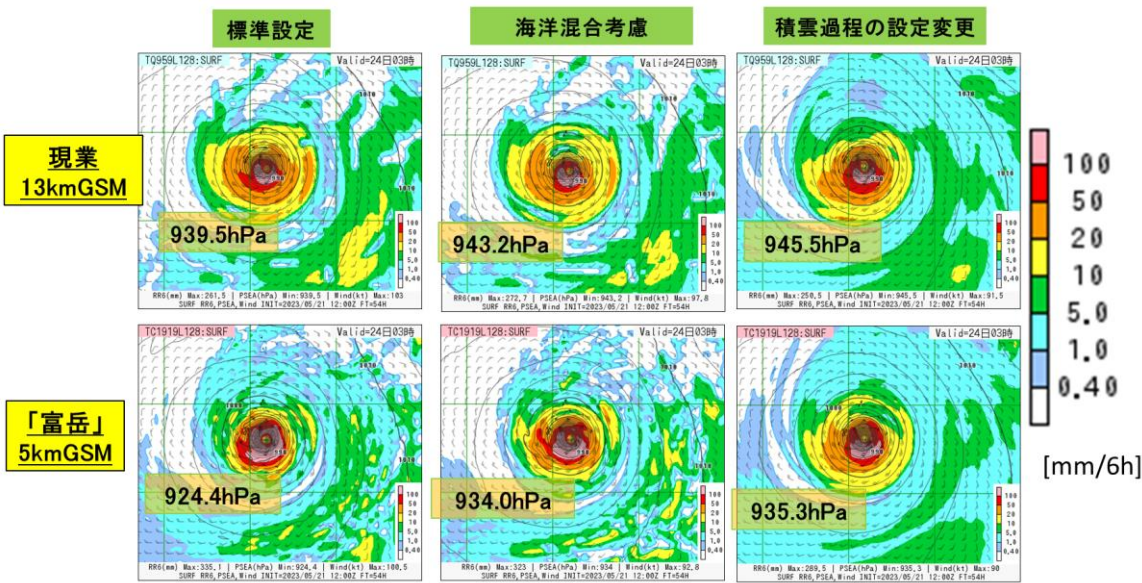


図 8 令和 5 年 5 月 24 日 3 時を対象とした 54 時間後の予測。上段は 13kmGSM、下段は 5km GSM によるもの。左、中、右列はそれぞれ、標準設定、海洋混合を考慮した設定、積雲対流の設定変更(より広範囲で積雲対流過程を計算)での予測を示す。色塗りで前 6 時間降水量 [mm]、等値線で海面更正気圧 [hPa]、矢羽根で地上風速を示している。

6. まとめと今後の課題

豪雨防災に向けた数値予報モデル開発としては、(1)高解像度モデル（水平解像度 1km）によるリアルタイム予測実験、(2)高解像度のアンサンブル予報システムの開発、(3)様々な観測データの利用に係る技術開発を行った。それぞれまとめと今後の課題を述べる。

(1) 豪雨防災：高解像度モデル（水平解像度 1km）によるリアルタイム予測実験

令和 6 年度は対象領域を日本全体に拡張したリアルタイム予測実験を 1 日 4 回に高頻度化することで早朝や夜中を初期時刻とした予測についても精度の確認を実施した。気象庁では、令和 7 年度末に水平解像度 1km の局地モデルの運用開始を計画している。運用開始に向けた最終的な精度や計算安定性を確認するため、1 年程度の長期間の予報実験を「富岳」で実施する。この予報実験結果はガイダンスの学習用教師データとしても重要である。

## (2) 豪雨防災：高解像度のアンサンブル予報システムの開発

令和5年度までの調査により解像度・メンバー数の仕様を決定したLEPS（解像度2km、21メンバー）において、より適切な摂動の与え方について調査を実施し、これまで考慮していた初期摂動に加え、側面境界摂動を考慮するようにした。これらの調査結果を踏まえた仕様のLEPSにより、線状降水帯事例における性能の確認を進め、多くの事例で実況を捕捉できることを確認した。今後は、令和7年度末の運用開始に向けて、「富岳」でのリアルタイム予測実験を計画する。これにより実運用前の計算安定性や確率予測精度を確認し、最終的な準備を行う。

## (3) 豪雨防災：様々な観測データの利用に係る技術開発

令和5年度に開発した高解像度CSRについて、令和6年度は高密度に利用する実験や観測誤差設定を最適化するための実験を行った。高解像度CSRを高密度に同化することで予報初期の水蒸気場についての改善が示唆されたものの、降水等の予測精度の改善は見られず、場合によって改悪する傾向も見られた。また、CSRと水蒸気量・地表面状態の関係を調べるため、モデル水蒸気量・地表面温度や千葉大学による地上観測、しきさい・千葉大学ひまわり地表面温度プロダクトなどを利用した調査を行った。その結果、雲の影響を受けたデータが利用されている可能性や、同化に利用している地表面温度の誤差が同化に悪影響を及ぼしている可能性が示唆された。今後は、最適な同化密度・観測誤差設定や水蒸気量・地表面温度の影響についての調査を引き続き進め、得られた知見をメソ数値予報システムに適用するための開発を進める。

二重偏波気象ドップラーレーダーの利用高度化に向けて、動径風データの利用手法高度化及び現在利用しているレーダー反射強度から推定された相対湿度の精度検証を進めた。動径風の利用高度化では、防災科学技術研究所による先行研究の成果を活用した地形によりレーダービームが遮蔽された観測データの品質管理手法の検討、「富岳」の計算資源を活用した多様な実験設定による動径風のインパクト調査を実施した。また、ゾンデとモデル・レーダーの比較手法の高度化を図りつつ、モデル気温の精度検証を進めた。令和7年度は、偏波パラメータを活用した動径風の品質管理手法や相対湿度の推定手法の高度化を図るとともに、これまで得られた成果をもとに複数の設定で同化実験を実施し、レーダーデータ利用高度化に向けて現業数値予報システムに適用可能な設定案の検討を行う。

台風防災に向けた数値予報モデル開発としては、水平解像度13km、5kmのGSMにおける積雲対流過程や海洋混合の効果が台風や降水表現に与える影響を確認し、これら過程の精緻化により、降水や台風の発達等の表現が改善される可能性を確認した。また、より安定かつ高速な実行を可能にするための力学過程の改良に取り組んだ。さらに、これまで得られた高速化の成果のうち、並列計算手法の改良について、2025年3月18日に現業全球数値予報システムに導入した。今後は、雲や積雲対流過程や海洋の扱いの改良の方向性を固めるほか、物理過程の精緻化に係る成果の現業全球数値予報システムへの導入に向けて、全球モデルの高速かつ安定な実行に関する開発を引き続き進める。

## 参考文献

- [1] J. Ishida, K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi, Y. Kitamura and C. Muroi, J. Meteor. Soc. Japan. 100 825-846(2022).
- [2] Y. Yamamoto, H. Ishikawa, Y. Oku and Z. Hu, J. Meteor. Soc. Japan. 96B 59-76 (2018).