

# 複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験

課題責任者

吉村 裕正 気象庁 気象研究所

著者

吉村 裕正<sup>\*1</sup>, 中川 雅之<sup>\*1</sup>, 杉 正人<sup>\*1</sup>, 和田 章義<sup>\*1</sup>,  
大西 領<sup>\*2</sup>, 那須野 智江<sup>\*3</sup>, 中野 満寿男<sup>\*3</sup>,  
後藤 浩二<sup>\*4</sup>, 坂内 健大<sup>\*4</sup>, 佐々木 亘<sup>\*5</sup>

<sup>\*1</sup>気象庁 気象研究所, <sup>\*2</sup>海洋研究開発機構付加価値情報創生部門地球情報基盤センター, <sup>\*3</sup>海洋研究開発機構地球環境部門環境変動予測研究センター, <sup>\*4</sup>日本電気株式会社, <sup>\*5</sup>株式会社 風力エネルギー研究所

2020 年代後半に現業予測での利用を想定した高解像度全球数値モデルの台風予測に対する有効性を測るため、また高解像度での台風予測改善のための新たな知見を得るため、3 種類の次世代非静力学全球モデル (DFS, NICAM, MSSG) を使用して、高解像度 (水平解像度約 7km) での台風予測実験を実施した。これまでに様々な台風事例について予測実験を実施し、高解像度化やマルチモデルアンサンブルの台風進路・強度予測への有効性を確認している [1]。また、季節内変動等の長周期変動の再現性を高めることや、大気海洋結合モデルを使用し台風と海洋の相互作用を考慮することの重要性を確認している。今年度は、台風予測の誤差の原因を調査した。台風移動速度の予測誤差の要因の調査により、台風進路予測の改善のためには、環境場の風の予測を改善することが重要であることが示唆された。台風の渦度収支解析により、台風の発達を再現するためには、積雲対流の強さ・位置・広がり を正しく再現することが重要であることが示唆された。また、7km や 3.9km の解像度のモデルでの降水をレーダー観測と比較し、モデルの降水分布の問題点と改善方法を考察した。

**キーワード:** 数値予測, 全球モデル, 熱帯低気圧 (台風), 台風予測比較実験

## 1. 目的と意義

台風による自然災害は社会・経済活動に深刻な影響を与えることから、その軽減のために台風の進路や強度の予測精度向上が常に社会から求められている。しかし台風の予測精度は未だ不十分であり、その原因の一つとして現業全球モデルの水平解像度 (2020 年現在約 20km) が粗く台風内部コアが十分解像できていないことが考えられる。

本研究は、気象庁気象研究所および海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が連携し、「地球シミュレータ (ES) 公募課題」で与えられた計算資源を利用して、2020 年代後半での現業利用の実現可能性を想定した 7km の高い水平解像度で、3 種類の次世代全球モデルを用いて台風予測実験を実施する。それぞれのモデルで予測される台風の特徴を明らかにし、台風予測の系統的誤差を評価し、誤差の要因を調査する。また台風の科学的理解を深め、台風予測改善のための知見を得ることにより、台風に伴う大雨や暴風の予測の精度向上に寄与することを目的とする。

これまでに様々な台風事例について予測実験を行い、台風進路・強度予測について系統的な誤差を評価しており、解像度を 20km から 7km に上げることにより、またモデルアンサンブルを行うことにより、台風の進路・強度予測の誤差が低減されることを確認している [1]。また、台風の発生を予測するためには季節内変動等の長周期変動の再現性を高めることが重要であること、台風の過発達を抑えるためには大気海洋結合モデルを使用し台風と海洋の相互作用を考慮することが重要であることを確認している。

今年度は、解像度を上げることにより台風進路予測誤

差が低減される原因を調べるため、台風移動速度の予測誤差の要因の調査を行った。また、台風の進路や強度の予測がモデルにより異なる理由を理解するために、台風の渦度収支解析を行い、台風の渦の発達の要因を調査した。また、モデル実験での降水をレーダーによる降水観測と比較し、モデルにおける降水分布の問題点と改善方法を考察した。

## 2. 実験概要

本研究では、気象庁現業モデル GSM をベースに高解像度向けに非静力学・二重フォーリエ級数の力学コアを導入した DFS (気象研究所)、陰陽格子の MSSG (JAMSTEC)、20 面体格子の NICAM (JAMSTEC/AORI/AICS) の 3 つの 7km 解像度の次世代非静力学全球モデルを使用する。今年度は、日本に上陸し大きな被害をもたらした 2019 年台風 19 号 (Hagibis)、15 号 (Faxai) 等の実験を、7km 解像度だけでなく 3.9km 解像度でも実施した。台風予測の改善のための知見を得るため、物理過程を変更した感度実験も行なった。今年度に行った実験に加えて、昨年度までに実施してきた実験も合わせて解析を行った。

## 3. 台風移動速度の予測誤差の要因に関する調査

これまでに [1] で、水平解像度約 7km の 3 つのモデルによる台風進路予測誤差が水平解像度約 20km の GSM のものより小さかったことを示したものの、その原因の究明が課題となっていた。そこで [2] の手法に基づき、まず DFS と GSM による台風移動速度の予測誤差の要因を調査した。

DFS は、2014 年 3 月当時の GSM をベースに、二重フ

一リエ級数展開を用いて高速化するとともに非静力学化したモデルであり、物理過程は GSM と共通となっている。今回は[1]の実験データから、2013~2015 年の 137 初期値 120 時間予測のうち、00, 12UTC を初期時刻とする 113 事例の DFSM と GSM による予測値を使用した。また参照値としては対応する時刻の予測初期値および RSMC Tokyo-Typhoon Center によるベストトラックを使用した。

調査の手法は[2]に基づき、[3]に従って実装した。まず予測値と参照値の風を、台風を中心とした円筒座標系に変換し、方位角方向・動径方向に平均することで台風の渦を除き、環境場の風とする。次に予測値と参照値における「実際の台風の数値」を、前後 12 時間の台風中心位置の差で決める。そして環境場の風を様々な半径・深さ（下端は 850hPa で固定）で平均し、実際の台風の数値と最もよく整合する風とその時の半径・上端を、最適な指向流・半径・上端とする。またこの最適な半径や上端を用いて、移動速度の予測誤差の要因を環境風・半径・深さと残差の 4 つに分解する。詳細は[2]、[3]を参照されたい。

図 1 に DFSM (左) と GSM (右) の FT=24 における台風

移動速度の誤差への各項の寄与の分布を箱ひげ図で示す。DFSM、GSM とも、環境場の風の誤差による寄与が最も大きい。また DFSM と GSM を比べると、中央値の差は大きくない一方で、DFSM の方が平均値やばらつきが大きくなっている。ただし非共通サンプルである（どちらか一方しか追跡できなかった事例を含む）点には注意が必要である。

図 2 に DFSM (左) と GSM (中) の予測時間ごとの最適な上端と、対応する参照値における最適な上端 (右) を示す。DFSM は平均的には参照値と比較的似た傾向であるのに対し、GSM は平均的には最適な上端が低い傾向が見られる。また同様に予測時間ごとの最適な半径を比較すると、DFSM、GSM とも平均的には参照値より最適な半径が小さい傾向が見られた (図略)。

今後の台風進路予測の改善のためには、台風移動速度の誤差への寄与が大きい環境場の風の予測を改善することが最も重要であると考えられる。引き続き台風のステージや環境風の鉛直シア等による層別化、またモデルのバイアス傾向や台風の構造と誤差の関係の調査を行い、改善に向けた手がかりを得ることを目指す。

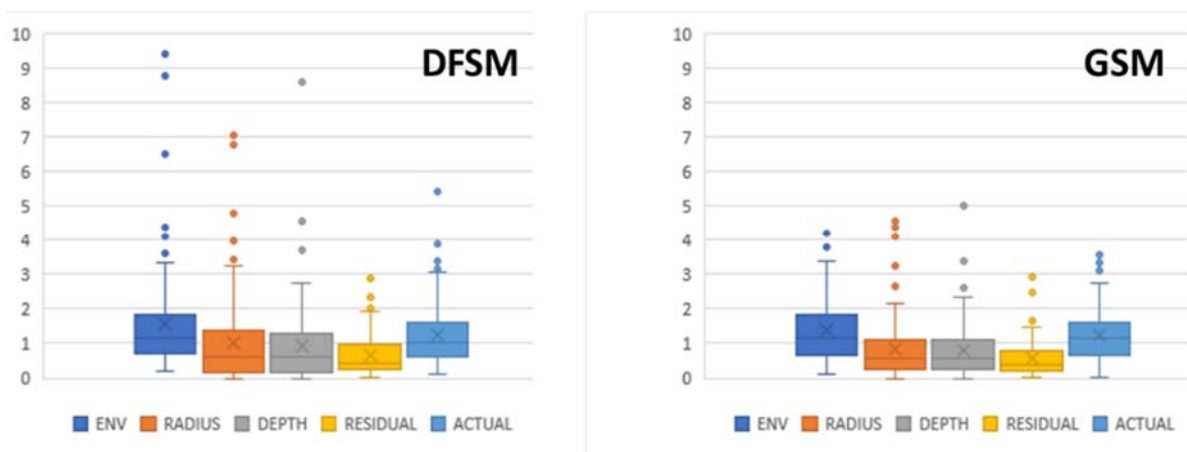


図 1. DFSM (左) と GSM (右) の FT=24 における台風移動速度の誤差への各項の寄与 [m/s] (非共通サンプル)。それぞれの図内は左から環境風、半径、深さ、残差、移動速度全体の差。×：平均値、箱内の横線：中央値、箱の上(下)端：第 1 (3) 四分位数、○：外れ値 (箱の上(下)端から上(下)に箱の 1.5 倍だけ伸ばしたところよりも外れた値)、ひげ：外れ値を除くデータの範囲を表す。

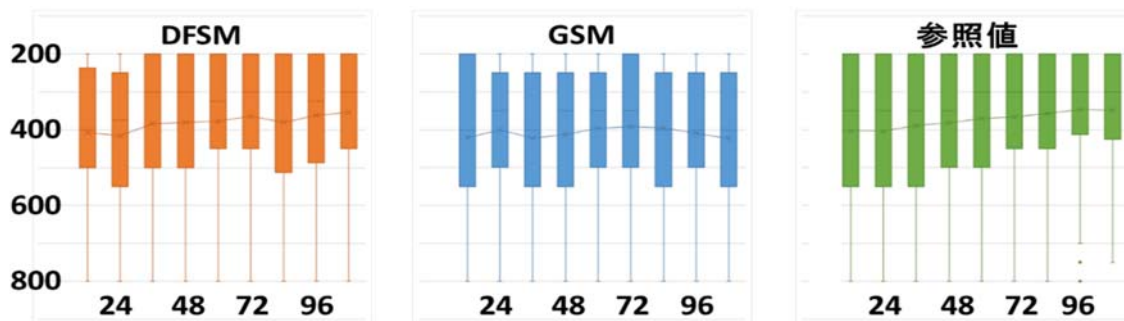


図 2. 予報時間ごとの最適な上端 [hPa]。左から DFSM、GSM、参照値 (ベストトラック+解析 GPV)。非共通サンプル。

#### 4. 台風の渦度収支解析

台風の進路や強度の予測がモデルによって大きく異なることがある[1]。その理由を理解することが、今後のモデルの改善のために重要である。そこで、予報実験結果の境界層（高度 500M）における渦度収支解析（渦度変化率、渦度発散項、水平移流項、鉛直移流項、立ち上がり項、鉛直拡散項の計算）を行った。図3は、DFSМによる2019年の台風19号（Hagibis）の10月6日00Z初期値の5日予報実験結果の軸対称渦の解析事例である。観測では、Hagibisは10月5日18Zに発生し、その後急発達し、7日12Zには、中心気圧915hPaの猛烈な台風となっている。DFSМの予報実験では、8日00Zまではゆっくり発達し、その後急発達し10月10日00Zには、中心気圧912hPaとなっている。

予報実験では、発達初期（10月6日）には、最大風速は $19\text{ms}^{-1}$ 、最大風速半径は30kmで、渦度は中心から30km以内で大きな値を持つ（図3a）。弱い負の発散（弱い収束）のため、渦度発散項（渦度と発散の積）は、半径20km付近で小さいピークを持つ（図3d）。水平移流項（外側の小さい渦度を内側に移流する）は負の値となり、渦度の時間変化は半径20km以内では小さい正の値、30kmでは負の値となっている。

急発達期（10月8日）には、最大風速は $44\text{ms}^{-1}$ 、最大風速半径は50kmとなり、半径20-30kmに渦度のピーク、半径40kmに強い負の発散（強い収束）のピークが見られる（図3b）。渦度発散項は30-40km付近に正のピークを持つが、水平移流項の負のピークが50kmにある。このため、渦の時間変化率は30kmに大きな正のピーク、50kmには負のピークがある（図3e）。

最盛期（10月10日）には、最大風速は $59\text{ms}^{-1}$ 、最大風速半径は80kmとなり、渦度と発散は広い範囲で大きな値を持っている（図3c）。このため、渦度発散項は、半径40-100kmの広い範囲で正の値になっている（図3f）。一方、半径50km以下では鉛直拡散項が、50km以上では水平移流項が大きな負の値を持つ。その結果、すべて範囲で、渦度の変化率は小さくなって発達が止まっている。

以上の解析結果から、台風の渦の発達には渦度発散項によるが、積雲対流に伴う発散（収束）の強さと位置（台風中心からの距離）によって発達の仕方が異なることが示された。したがって、モデルで台風の発達を正しく再現するためには、積雲対流の強さとともに、その位置と広がり方を正しく再現することが重要であることが示唆される。

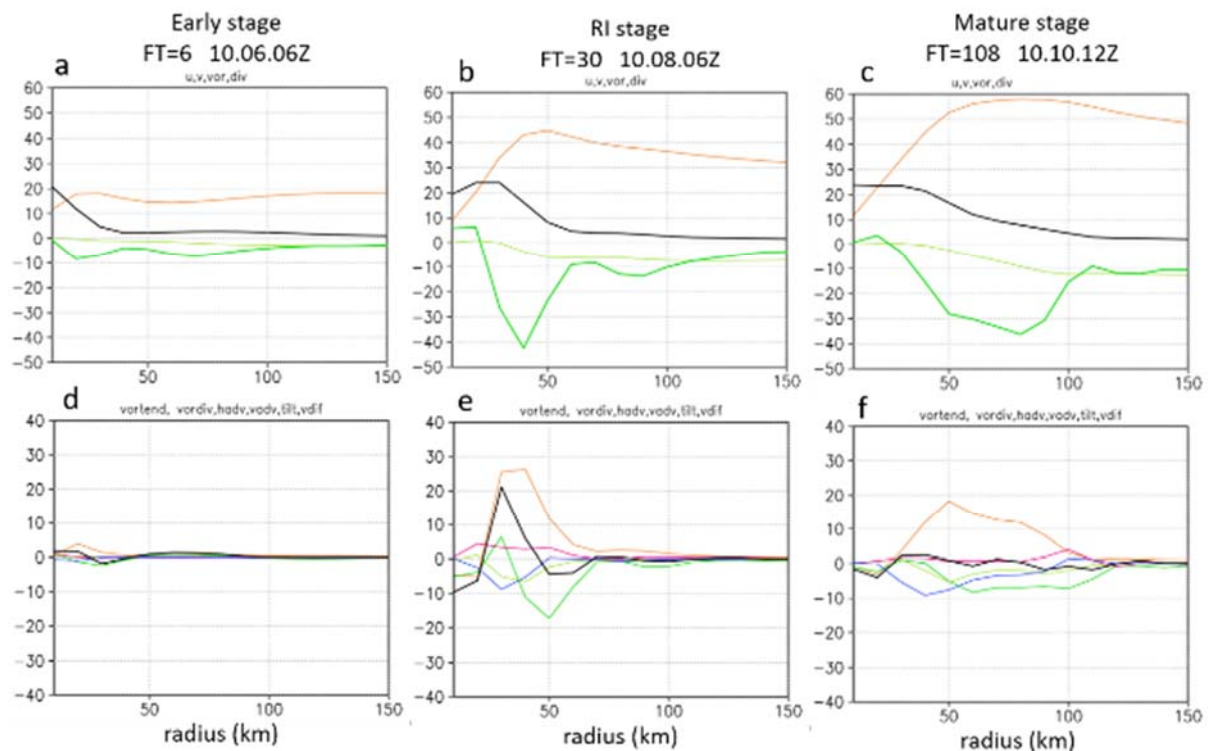


図3. DFSMによる2019年台風19号（Hagibis）の予報実験の軸対称渦の渦度と渦度時間変化率。(a)-(c)：渦度（黒、 $10^{-4}\text{s}^{-1}$ ）、発散（緑、 $10^{-5}\text{s}^{-1}$ ）、接線風（オレンジ、 $\text{ms}^{-1}$ ）、動径風（黄緑、 $\text{ms}^{-1}$ ）。(d)-(f)：渦度時間変化率（黒、 $\text{s}^{-1}\text{hr}^{-1}$ ）、渦度発散項（オレンジ）、水平移流項（緑）、鉛直移流項（黄緑）、立ち上がり項（マゼンタ）、鉛直拡散項（青）。

### 5. 大気モデル降水のレーダー観測との比較

大気モデルの降水の再現性を調べるため、気象庁気象レーダーによる降水観測との比較を行った。DFSМ は、物理過程について

- ・ Arakawa-Schubert 積雲スキーム (AS 積雲) + Smith 雲スキーム (気象庁本庁設定)
- ・ Yoshimura 積雲スキーム (YS 積雲) [4] + Tiedtke 雲スキーム (気象研設定)
- ・ 積雲スキーム未使用 + Tiedtke 雲スキーム

の3つの設定で実験を行った。また、7km 解像度だけでなく、3.9km 解像度での実験も行った。MSSG は、積雲スキームは使用していない。

図4は、上記設定のDFSМ とMSSG を使用し2019/09/06/12UTC を初期時刻とした実験における、12時間積分後の2019/09/07/00UTC の1時間降水量と同時刻の気象レーダーの観測降水と天気図を示す。南西諸島付近の降水について大気モデルと気象レーダーの降水を比較する。AS 積雲スキームやYS 積雲スキームを使用したDFSМ の降水は、気象レーダーの降水と比べて弱い降水が広がる傾向にある。一方、積雲スキームを使用しないMSSG やDFSМ の降水は、気象レーダーの降水と比べて降水が集中し、強い降水の粒々が見られる。積雲スキームを使用しないNICAM でも、他の初期値の実験で同様の傾向が見られる。積雲スキームの違い、解像度の違い、

モデルの違いよりも、積雲スキームの使用・不使用により降水が大きく変わることが分かる。YS 積雲スキームの修正により降水分布を改善することも試みているが、現在のところそれほど良好な結果は得られていない。

AS 積雲スキームやYS 積雲スキーム等の従来の積雲スキームでは、積雲の水平スケールはモデルの解像度(格子間隔)より十分小さいと仮定している。すなわち格子内に占める積雲上昇流域の面積の割合 $\sigma$ について、 $\sigma \ll 1$ の仮定を行っている。積雲スキームを使用しない場合は、すべての積雲を陽に解像できると仮定する、すなわち $\sigma = 1$ と仮定することと同等になる。今回実験を行なった2km~15km ぐらいの解像度は、どちらの仮定も成り立たない、グレーゾーンと呼ばれる領域になる。グレーゾーンの解像度では、 $0 < \sigma \leq 1$ のスケールの積雲上昇流を適切に扱う積雲スキームが必要になると考えられる。このような積雲スキームが開発できれば、降水の集中が弱すぎることも強すぎることもない適切な降水が表現できるようになると期待できる。このようなグレーゾーンに適した積雲スキームは世界で提案されてきているが、まだ決定打になるものはない。今後、グレーゾーン積雲スキームの開発を行い、グレーゾーンの解像度での降水分布を観測に近づけていくことにより、台風に伴う降水や台風進路・強度の予測の改善に繋げていきたい。

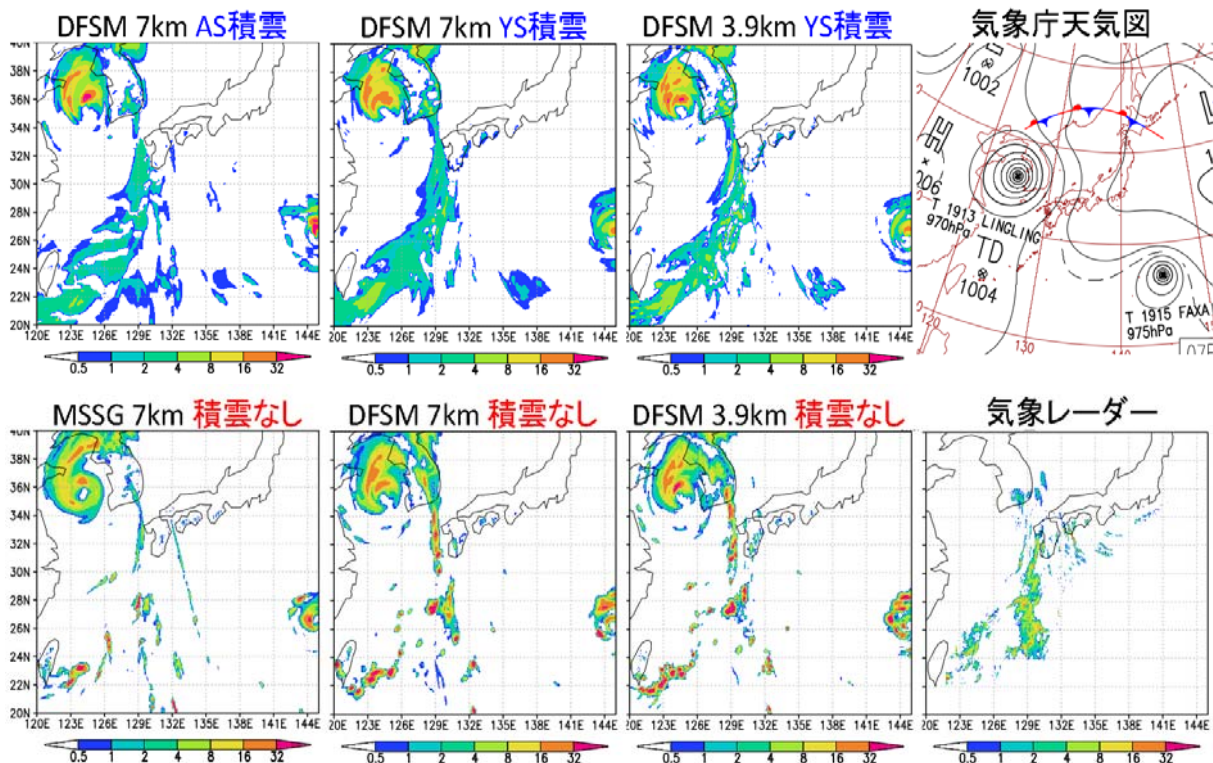


図4. DFSМ とMSSG による2019/09/06/12UTC を初期時刻とした12時間積分後の2019/09/07/00UTC の1時間降水量。単位はmm。7km, 3.9km は水平解像度、AS 積雲, YS 積雲は使用した積雲スキーム、積雲なしは積雲スキーム未使用を表す。右上は同時刻の気象庁天気図。右下は気象レーダー観測の1時間降水量。

## 6. モデル結果の不可逆圧縮によるストレージ容量の圧縮

これまでに多数のモデル比較実験を行ってきたため、そのストレージは膨大な量に上っている。ストレージ容量圧縮のために、近年は精度を落とす代わりに高い圧縮率を得る不可逆圧縮法の活用が進んでいる。本年度は試みとして、大規模格子データに対する効率的な不可逆圧縮法[5]を用いて、MSSG モデルから得られた grads 形式のデータ（単精度、有効数字7桁）を5桁までの精度を保持して圧縮した。その結果、MSSG モデルのストレージ容量を14.8TBから3.1TBにおよそ5分の1にまで削減することができた。このような不可逆圧縮は、モデル比較実験などの大量のストレージを要するプロジェクトの効率的な推進に役立つと考えられる。

## 7. 結論と今後の課題

今年度の成果のポイントは以下の通りである。

- ・台風移動速度の誤差の要因として、環境場の風の誤差による寄与が最も大きく、台風進路予測の改善のためには、環境場の風の予測を改善することが最も重要と考えられる。
- ・台風の渦の発達は渦度発散項によるが、積雲対流に伴う収束の強さと位置（台風中心からの距離）によって発達の仕方が異なるため、モデルで台風の発達を正しく再現するためには、積雲対流の強さ・位置・広がり正しく再現することが重要であることが示唆される。
- ・南西諸島の降水について、積雲スキームを使用するモデルではレーダー観測と比べて弱い降水が広がり、積雲スキームを使用しないモデルでは降水が集中し強い降水の粒々が見られた。従来の積雲スキームでは、格子内に占める積雲上昇流域の面積の割合  $\sigma \ll 1$  の仮定を行っており、 $\sigma$  がある程度大きいスケールの積雲対流を適切に表現できていないと考えられる。

上記のように、台風予測改善のためには、環境場の風の予測の改善や積雲対流の再現性の向上が重要と考えられる。環境場の風の予測を改善するためには、モデルの改良により環境場の予報誤差、系統的誤差（バイアス）を減らす必要がある。また、約2km~15kmのグレーゾーンの解像度で積雲対流の再現性を向上するためには、 $\sigma \ll 1$  の仮定を行わない積雲スキームの開発が重要と考えられる。今後、台風予測の改善に向けて、モデルの開発・改良を引き続き行っていく。

## 謝辞

本研究は地球シミュレータ公募課題（2019年4月~2020年3月）のもとで地球シミュレータを用いて実施された。また、本研究の一部は、ポスト「京」重点課題4「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」、および基盤研究C「台風強度予測精度向上のための台風強化停止プロセスの解明」（研究代表者：和田章義・気象研究所、課題番号15K05292）の支援を

受けて行われた。

## 文献

- [1] Nakano, M., A. Wada, M. Sawada, H. Yoshimura, R. Onishi, S. Kawahara, W. Sasaki, T. Nasuno, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sugi, and Y. Takeuchi, “Global 7-km mesh nonhydrostatic Model Intercomparison Project for improving Typhoon forecast (TYMIP-G7): Experimental design and preliminary results,” *Geosci. Model Dev.*, 10, 1363-1381, doi:10.5194/gmd-10-1363-2017 (2017).
- [2] Galarneau, T.J., and C.A. Davis, “Diagnosing Forecast Errors in Tropical Cyclone Motion”, *Mon. Wea. Rev.*, 141, 405-430, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00071.1> (2013).
- [3] Miller, W., and D. Zhang, “Understanding the Unusual Looping Track of Hurricane Joaquin (2015) and Its Forecast Errors”, *Mon. Wea. Rev.*, 147, 2231-2259, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0331.1> (2019).
- [4] Yoshimura, H., R. Mizuta, and H. Murakami, “A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence,” *Mon. Wea. Rev.*, 143, 597-621, doi:10.1175/MWR-D-14-00068.1 (2015).
- [5] D. Kolomenskiy, R. Onishi and H. Uehara, Data compression for environmental flow simulations, arXiv:1810.04822 (2019).

# Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast (TYMIP-G7)

## Project Representative

Hiromasa Yoshimura      Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

## Authors

Hiromasa Yoshimura <sup>\*1</sup>, Masayuki Nakagawa <sup>\*1</sup>, Masato Sugi <sup>\*1</sup>, Akiyoshi Wada <sup>\*1</sup>, Ryo Onishi <sup>\*2</sup>, Tomoe Nasuno <sup>\*3</sup>, Masuo Nakano <sup>\*3</sup>, Koji Goto <sup>\*4</sup>, Kenta Sakauchi <sup>\*4</sup>, Wataru Sasaki <sup>\*5</sup>

<sup>\*1</sup> Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, <sup>\*2</sup> Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>\*3</sup> Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>\*4</sup> NEC, Ltd., <sup>\*5</sup> Wind Energy Institute of Tokyo, Inc.

We conducted typhoon forecast experiments using the three 7-km mesh nonhydrostatic global atmospheric models, DFSM, MSSG and NICAM to obtain new findings for improving typhoon predictions by high resolution global atmospheric models. In our project, we have conducted numerous numerical experiments on various cases of typhoons and atmospheric disturbances, and confirmed the effectiveness of high-resolution atmosphere model and multi-model ensemble [1]. We also confirmed the importance of the reliable prediction of the tropical intraseasonal oscillation, and the importance of considering interaction between typhoon and ocean by using coupled atmosphere-ocean models. This fiscal year we investigated the cause of typhoon forecast error. The results of diagnosis of tropical cyclone (TC) motion forecast error suggest that the improvement of environmental wind forecast is the most important to reduce the error. The results of vorticity budget analysis of typhoon vortex suggest that the intensity and the location of the convergence associated with convections is important for the typhoon vortex intensification. We also compared precipitation in the models at 7 and 3.9 km resolution with radar observations and considered how to improve precipitation distribution in the models.

**Keywords:** Numerical Weather Prediction, Global Atmospheric Model, Tropical Cyclone, Model Intercomparison

## 1. Purpose of this project

Natural disasters caused by typhoons seriously affect social and economic activities. It is always sought by society to alleviate the damages by improving the accuracy of the track and intensity forecast of typhoons. However, the accuracy is still insufficient. One of the reasons is that the horizontal resolution of the operational global atmosphere model is relatively coarse (20 km as of 2019) to resolve the inner core of typhoons.

In this project, we conducted numerous typhoon forecast experiments by the global atmosphere models at the 7-km horizontal resolution by utilizing computational resources for the project on 'Earth Simulator (ES) Proposed Research Projects' in cooperation with the Meteorological Research Institute (MRI) and the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). The 7-km resolution is expected for the operational use in the late 2020s. The purpose of this project is to clarify the characteristics of typhoons predicted in each model, to investigate the cause of systematic errors on typhoon predictions, and to improve scientific understanding of typhoons, for improving the accuracy of predictions on typhoons.

## 2. Experiments

We conducted typhoon forecast experiments using the following three 7-km mesh nonhydrostatic global atmospheric

models: the Double Fourier Series spectral Model (DFSM) developed in MRI, the Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) developed in JAMSTEC and the Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) developed in JAMSTEC, AORI and AICS. This fiscal year we conducted experiments for typhoons such as No. 19 (Hagibis) and No. 15 (Faxai) in 2019, which landed in Japan and caused great damage. Sensitivity experiments with modified physical processes were also conducted to obtain knowledge for improving typhoon prediction. In addition to the experiments conducted this year, we also analyzed the experiments conducted up to the previous year.

## 3. Diagnosis of TC motion forecast error

Nakano et al. [1] demonstrated that tropical cyclone (TC) track predictions by three 7-km mesh models (DFSM, MSSG, NICAM) performed statistically better than that by 20-km mesh GSM, while the reason for the improvement remained unclear. In this study, we investigated the cause of TC motion forecast error by DFSM and GSM using the methodology developed by Galameau and Davis [2] and Miller and Zhang [3].

The forecast data used in this study were derived from TYMIP datasets [1]. We used 113 sets of 5-days simulations by DFSM and GSM initialized at 00 and 12 UTC from 2013 to 2015. The corresponding model initial conditions and the

RSMC Tokyo-Typhoon Center best track data were used as reference. Physical packages included in DFSM and GSM are the same as those in the March 2014 version of the operational global atmospheric model of the JMA.

We adopt the methodology developed by Galameau and Davis [2] and modified by Miller and Zhang [3]. First, we regrid horizontal winds to a storm-centered cylindrical coordinate system and define the environmental winds within a disk bounded by radius  $r$  as the area-averaged horizontal flows that remain after removing the symmetric TC vortex. Second, the motion of TCs in forecast and in reference is computed based on the model forecast track and the best track positions at 12 h before and after the time of interest. Third, we define the optimal steering flow as the volume averaged forecast and reference environmental wind that minimizes the vector difference from the motion of TCs. Finally, the sources of forecast TC motion error are decomposed into environmental wind error, vortex removal radius error, vortex depth error and residuals using a diagnostic equation derived in [2]. For more details, see [2] and [3].

Figure 1 shows box-and-whisker diagram of the vector magnitude [ $\text{m s}^{-1}$ ] of four decomposed error sources and TC motion error for forecast time of 24 h for DFSM (left) and GSM (right). Note that the diagnose samples are not identical. The environmental wind term is the largest of the four terms in both cases of DFSM and GSM. There is not much difference between medians of DFSM and GSM, while the averages and spreads are larger in DFSM than that in GSM.

Figure 2 shows time series of optimal steering layer top in DFSM, GSM and corresponding reference. DFSM shows similar tendency to reference on average, while GSM shows tendency to prefer lower steering layer top. As for time series of optimal radii, they tend to be smaller than that of corresponding reference on average in both DFSM and GSM (not shown).

Our results suggest that the improvement of environmental wind forecast is the most important to reduce TC motion forecast error. We will continue to analyze the results to further improve TC prediction.

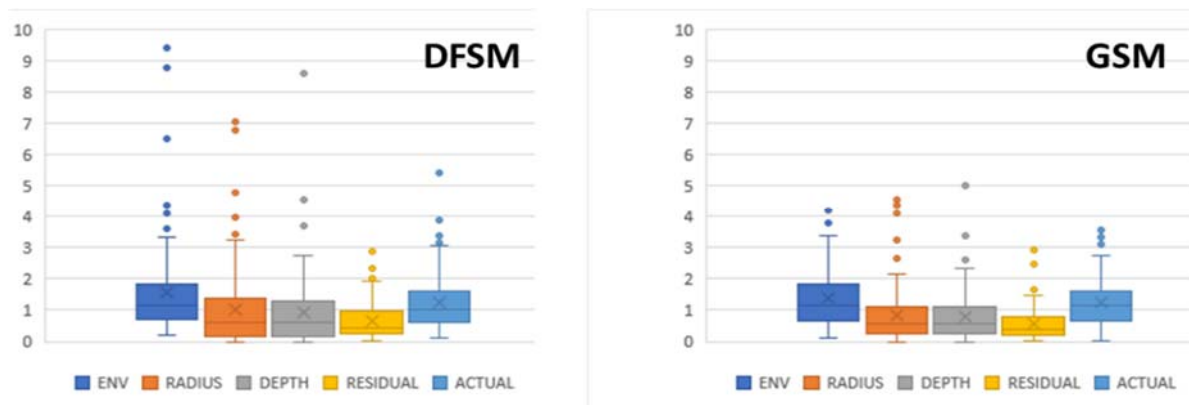


Fig. 1 Box-and-whisker diagram of the vector magnitude [ $\text{m s}^{-1}$ ] of four decomposed error sources and TC motion error for forecast time of 24 h for DFSM (left) and GSM (right). Note that the diagnose samples are not identical. The X marks in the boxes represent the mean and the points represent outlier. The top, middle and bottom line of the boxes represent the 3rd quartile, median and 1st quartile, respectively.

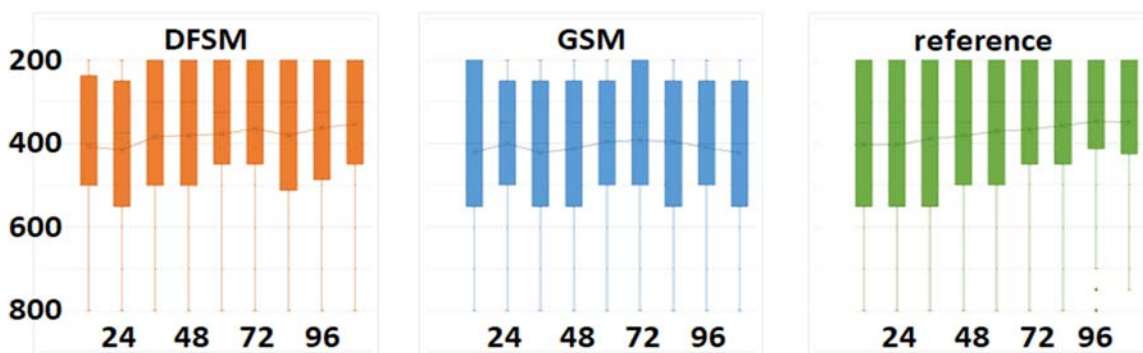


Fig. 2 Box-and-whisker diagram of time series of optimal steering layer top [hPa] in DFSM (left), GSM (middle) and corresponding reference (right). Note that the diagnose samples are not identical.

#### 4. Vorticity budget analysis of typhoon

Fig. 3 shows results of vorticity budget analysis of axisymmetric typhoon vortex in a forecast experiment with DFSM for typhoon Hagibis in 2019. The maximum wind speed and the radius of maximum wind increase from the early development stage in October 6 to the mature stage in October 10. The convergence associated with convection also intensifies and the area of convergence expands and moves outward. Corresponding to the changes in the convergence, the stretching term (product of vorticity and divergence) increases and the positive area expands and moves outward.

In the rapid intensification stage in Oct. 8, the large positive vorticity tendency from stretching term exceeds the negative tendency from advection and diffusion terms, leading to the rapid intensification. On the other hand, in the mature stage in Oct.10, the large positive tendency from stretching term is balanced by the negative tendencies from other terms, leading to no more intensification. The results suggest that not only the intensity but also the location of the convergence associated with convections is very important for the typhoon vortex intensification.

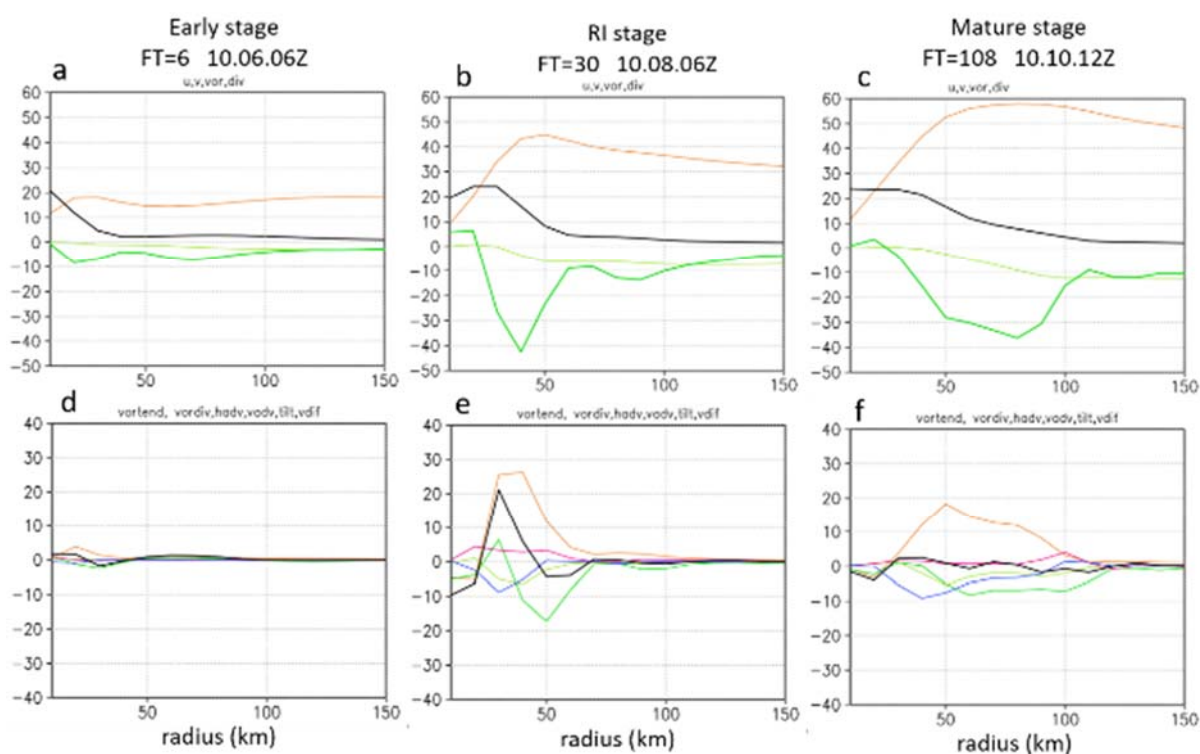


Fig. 3 Vorticity and vorticity tendency of axisymmetric typhoon vortex in a DFSM forecast experiment of typhoon Hagibis in 2019. (a)-(c): Vorticity (black,  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ ), divergence (green,  $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ), tangential wind (orange,  $\text{ms}^{-1}$ ) and radial wind (yellow green,  $\text{ms}^{-1}$ ). (d)-(f): Vorticity tendency (black,  $10^{-4}\text{s}^{-1}\text{hr}^{-1}$ ), stretching term (orange), horizontal advection term (green), vertical advection term (yellow green), tilting term (magenta) and vertical diffusion term (blue).

#### 5. Comparison of precipitation in atmospheric models with radar observation.

We compared the precipitation in atmospheric models with that observed in JMA weather radar. We conducted experiments with DFSM under the following 3 settings:

- Arakawa-Schubert cumulus scheme (AS cumulus) + Smith cloud scheme,
- Yoshimura cumulus scheme (YS cumulus) [4] + Tiedtke cloud scheme,
- No cumulus scheme + Tiedtke cloud scheme.

In MSSG, no cumulus scheme is used.

Figure 4 shows one-hour precipitation on 00UTC 7<sup>th</sup> September 2019 simulated in DFSM and MSSG, and that

observed in JMA weather radar. The precipitation in DFSM using the AS or YS scheme tends to be weaker and more widespread compared with the radar precipitation. On the other hand, the precipitation in DFSM or MSSG with no cumulus scheme is more concentrated compared with the radar. In the conventional cumulus schemes such as the AS and YS schemes, the assumption of  $\sigma \ll 1$  is used, where  $\sigma$  is a fraction of cumulus updrafts in a grid. At the gray zone resolution (approximately from 2km to 15km), the assumption should be relaxed. We will develop a cumulus scheme suitable for the gray zone to improve precipitation distribution.



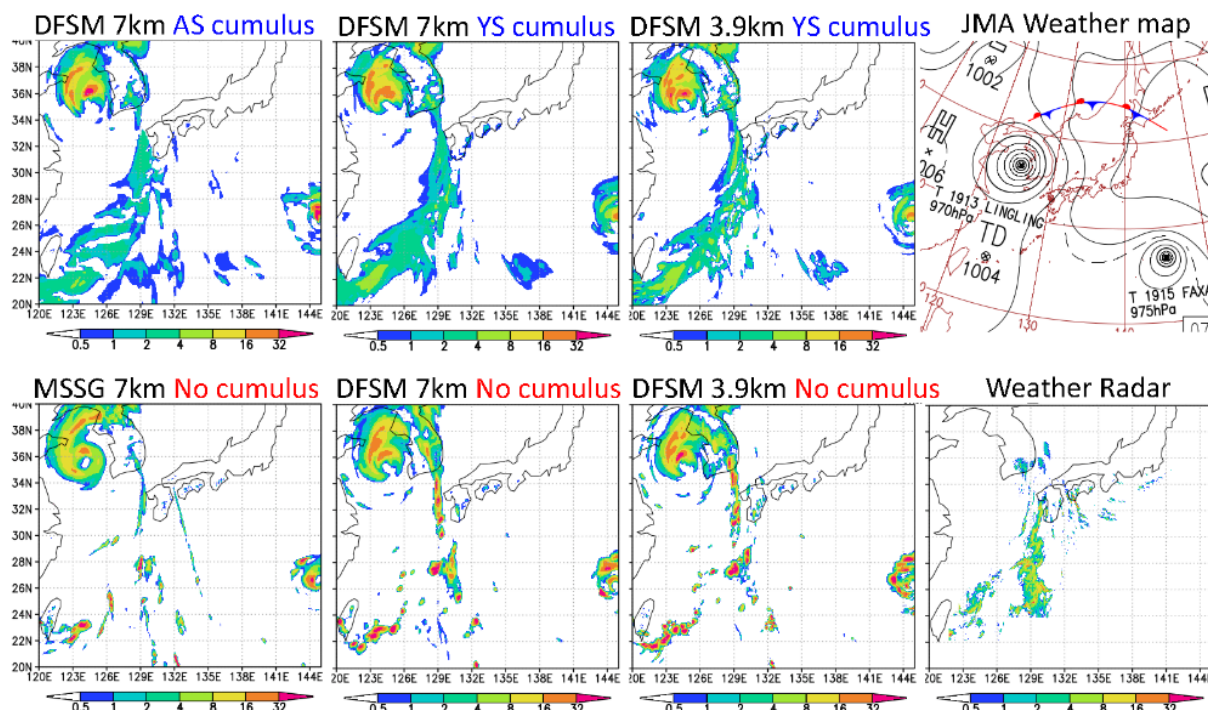


Fig. 4 One-hour precipitation (mm) on 00UTC 7<sup>th</sup> September 2019 simulated in DFSM and MSSG from initial time 12UTC 6<sup>th</sup> September 2019. 7km and 3.9km represent horizontal resolution. ‘AS cumulus’ and ‘YS cumulus’ represent the cumulus schemes used in DFSM. ‘No cumulus’ represents that no cumulus scheme is used. The upper right figure is a JMA weather map, and the lower right figure is one-hour precipitation observed in weather radar on 00UTC 7<sup>th</sup> September 2019.

## 6. Conclusions and future works

The main achievements of this fiscal year are as follows.

- The results of TC motion forecast error diagnostic suggest that the improvement of environmental wind forecast is the most important to reduce the error.

- The results of vorticity budget analysis of typhoon vortex suggest that the intensity and the location of the convergence associated with convections is important for the typhoon vortex intensification.

- The precipitation in the models using the cumulus scheme tends to be weaker and more widespread compared with the radar precipitation, while the precipitation in the models without the cumulus scheme is more concentrated.

As mentioned above, it is important to improve the environmental wind forecast and the prediction of the intensity and the location of the convections in order to improve typhoon forecasts. In order to improve precipitation and cumulus convections at the gray zone resolution (approximately from 2km to 15km), it is thought to be important to develop a cumulus scheme that does not make the assumption of  $\sigma \ll 1$ , where  $\sigma$  is a fraction of cumulus updrafts in a grid. We will continue to develop our models to improve typhoon forecasts.

## Acknowledgement

All numerical experiments were run on the Earth Simulator

(NEC SX-ACE).

## References

- [1] Nakano, M., A. Wada, M. Sawada, H. Yoshimura, R. Onishi, S. Kawahara, W. Sasaki, T. Nasuno, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sugi, and Y. Takeuchi, “Global 7-km mesh nonhydrostatic Model Intercomparison Project for improving Typhoon forecast (TYMIP-G7): Experimental design and preliminary results,” *Geosci. Model Dev.*, 10, 1363-1381, doi:10.5194/gmd-10-1363-2017 (2017).
- [2] Galarnreau, T.J., and C.A. Davis, “Diagnosing Forecast Errors in Tropical Cyclone Motion”, *Mon. Wea. Rev.*, 141, 405-430, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00071.1> (2013).
- [3] Miller, W., and D. Zhang, “Understanding the Unusual Looping Track of Hurricane Joaquin (2015) and Its Forecast Errors”, *Mon. Wea. Rev.*, 147, 2231-2259, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0331.1> (2019).
- [4] Yoshimura, H., R. Mizuta, and H. Murakami, “A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-Lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence,” *Mon. Wea. Rev.*, 143, 597-621, doi:10.1175/MWR-D-14-00068.1 (2015).