複数の次世代非静力学モデルを用いた高解像度台風予測実験 (第2期:台風全ライフステージを対象とした実験)

課題責任者 竹内 義明 気象庁 気象研究所 著者 雅洋 *1, 吉村 裕正 *1, 和田 章義 *1, 中野満寿男 *2 義明^{*1}.沢田 竹内 領*3. 渕上 弘光*4, 佐々木 亘*3, 川原慎太郎*3. 那須野智江*2.大西 武史*1. 杉 正人^{*1}, 川合 秀明^{*1}, 新藤 永樹 *1 山口 宗彦^{*1},入口 *1 気象庁 気象研究所 *2 海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野 *3 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター *4 株式会社 NEC 情報システムズ

2020年代前半に現業予報での利用が想定される高解像度全球数値予報モデルの有効性を測るため、水平解像度7km の全球モデル3種類(DFSM, NICAM, MSSG)により、5日先までの台風及びサイクロン(Pam)予測実験及びMadden-Julian Oscillation・Boreal Summer Intraseasonal Oscillationを対象とした実験を行った。本研究第1期では日本付近に影響 した台風事例を対象としたが、第2期では台風のライフステージ全体を対象として、2013~2015年の85事例(熱帯低 気圧は13個)について、第1期と同様の予測実験を実施し、台風進路・強度予測の系統誤差を評価した。20km 水平解 像度のモデルと比較した結果、7km に高解像度化することにより強度予測が改善されることを再確認するとともに、進 路予測についても改善されることを確認した。さらに3つのモデル結果をアンサンブルして求めた進路・強度予測は個々 のモデルの予測結果を上回り、予測精度がより向上することも示された。2013年台風第26号(Wipha)について、最盛 期の台風の水平・鉛直構造の比較を行った結果、7km に高解像度化することにより、台風域の降水分布や二次循環がよ り現実的に再現されることを確認した。一方で最大風速半径など台風を特徴付ける水平・鉛直構造はモデル間で明瞭な 違いが見られた。海面過程を含む物理過程といったモデル仕様の違いが構造の違いに影響すると考えられる。

キーワード:数値予報,大気大循環モデル,熱帯低気圧(台風),モデル比較実験

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 予測精度向上は常に社会から求められている。しかしな がら台風強度の予測精度は未だ不十分で、原因の一つと して現業全球モデルの水平解像度(2016年現在20km)が 粗いことが挙げられている。モデルの水平解像度を高め ることにより予測精度を向上させるためには、非静力学 大気モデルの使用、高解像度に見合った物理過程スキー ムの開発等を行うと同時に、全般的な気象予測および台 風予測に含まれる系統的なバイアスを低減させる必要が ある。こうした高解像度モデルの開発はその計算機負荷 が大きいことから、シミュレーションを行う事例数は厳 しく限定され、結果として系統的なバイアスを特定する に至らなかった。

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、JAMSTEC「地球シミュレータ(ES) 特別推進課題」で与えられた豊富な計算資源と、2020年 代前半での現業利用の実現可能性を想定した7kmの水平 解像度を持つ複数の全球モデルを用いて、5日先までの台 風予測実験を多数実施し、台風予測などに含まれる系統 的なバイアス及びモデル毎に再現される台風の特徴を明 らかにする。

2. 実験概要

本研究第1期(2015年6~9月)では、2013年9-10月 にかけて日本に接近・上陸した9個の台風を含む52事例 について5日予測実験を実施したのに対し、第2期(2015 年10月~2016年1月)では台風のライフステージ全体(発 生、発達、成熟、衰退期など)を対象とした13個の熱帯 低気圧と Madden-Julian Oscillation (MJO)及び Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO)を含む85事例(表1)に ついて5日予測実験を実施し、この結果とRSMC Tokyo ベストトラックデータを用いて予測結果の検証及びモデ ル間の相互比較を行った。使用モデルは第1期と同じく、 DFSM、NICAM、MSSGの3モデルである。比較のため、 第1期と同様、水平解像度20kmのGSMによる予測実験 も並行して実施した。NICAM については、陸面モデルの バグ修正を行い、第2期の計算に加えて第1期の異常終了 事例についても再計算した。MSSG については、時間とと

Seq. # of cases	Initial time (000	OUTC and 1200UTC)	Palatad turhoons and tropical phonomona	
	Start time		End time		Related typhoons and tropical phenomena
1 - 10	2013/6/6	1200UTC	2013/6/11	0000UTC	Yagi
11 – 19	2013/11/3	0000UTC	2013/11/7	0000UTC	Krosa, Haiyan
20 - 40	2014/7/27	1200UTC	2014/8/6	1200UTC	Halong, Nakri
41 - 50	2015/3/7	0000UTC	2015/3/11	1200UTC	MJO, Pam, Bavi
51 - 60	2015/6/27	0000UTC	2015/7/1	1200UTC	BSISO, Chan-hom
61 – 76	2015/8/13	1200UTC	2015/8/21	0000UTC	Molave, Goni, Atsani
77 – 85	2015/9/6	0000UTC	2015/9/10	0000UTC	Kilo, Etau

表1 第2期の実験事例リスト (Nakano ら [4] を改変)

MJO: Madden-Julian Oscillation

BSISO: Boreal Summer Intraseasonal Oscillation

もに可降水量が増加しつづけるモデル系統誤差を取り除く ため、全域で適用していたバルク地表フラックスモデル [1] を陸域のみに適用し、海域では Fairall らのフラックスモデ ル [2][3] に変更した。詳細は Nakano ら [4] を参照のこと。

3. 研究成果

3.1 台風進路予測

水平解像度7kmのモデルはどれもGSMと比べてベス トトラックデータの台風経路をよりよく再現している (図1)。MSSGの第1期の進路予測誤差はDFSMおよび NICAMに比べて比較的大きかったものの、第2節で述べ たMSSGのフラックスモデルの改良により、3つのモデ ルがほぼ同等の精度を持つようになった。ただし予測精 度は個々の事例に大きく依存していた。つまり高解像度 化が台風進路予測の精度向上に主要な役割を果たしてい たかは確定することができず、むしろ進路予測の向上に はそれ以外の要因(初期値化や物理過程の改良)も重要 であることが示唆された。

DFSM, NICAM, MSSG の3モデルを組み合わせたマル チモデルアンサンブル (MME) による台風進路予測の検 証も行った (図1の水色)。予報時間 84 ~ 120 時間にお いて MME の誤差は最も小さくなった。特に MME の 120 時間予測精度は GSM に比べて 24% (リードタイムに換算 すると約 18 時間)の大幅な改善が得られた。



図1 5日台風進路予報結果(Nakanoら[4]から引用)。左縦軸 はRSMCベストトラックからの差、右縦軸は事例数を示す。 横軸は予報時間を表す。

3.2 台風強度

図2に第1期及び第2期の全事例に対する台風中心気 圧のRSMC Tokyo ベストトラックデータに対する偏差 の平均値と標準偏差を示す。正のバイアス誤差が大きい GSM と比べて、DFSM, MSSG, NICAM は台風強度をよく 再現している。DFSM とGSM は水平解像度と力学の計 算手法を除くと同じモデル仕様であることから、本結果 はモデルの高解像度化により台風強度予測、特に台風の 発達予測が改善されることを示唆する。モデル毎に特徴 を見ると、DFSM は予報時間とともに過発達(72時間で 10hPa 以上)傾向にあり、一方で MSSG と NICAM は予報 時間 84 時間で誤差が一定となり、小さな正のバイアスを 保つようになる。3 つのモデルを合わせた MME による台 風強度予測は RMSE が最も小さくなった。このことは台 風強度についても MME は有効であることを示唆する。



3.3 台風水平構造

図3に2013年台風第26号(Wipha)の各モデルにおけ る96時間予報(初期時刻は2013年10月14日0600UTC) で得られた1時間降水量の水平分布と海面気圧分布を示 す。GSMは中心気圧、最大地上風速とも弱く、降水分布 においては壁雲がはっきりとしない。DFSMは中心気圧 が最も低く、壁雲もコンパクトで二重壁雲になっている。 MSSGとNICAMの中心気圧はRSMCTokyoベストトラッ クに近いが、降水分布は両モデルで明瞭に異なる。MSSG はDFSMほどではないが締まった壁雲を表現しているの に対し、NICAM はバンド状の降水分布が明瞭となり、壁 雲の形成には至っていない。なお MSSG 及び NICAM は どちらも積雲パラメタリゼーションを用いていない。よっ て2つのモデル仕様の違いが、同程度の台風中心気圧が 得られているにも関わらず、台風の構造に明瞭な違いを 生じさせていたことが分かった。

3.4 台風鉛直構造

第3.3 節と同様、Wipha の最盛期について、15 事例の 予測結果から得られた動径 – 高度断面を用いて、合成図 解析を行った。図4は方位角平均を施した動径風速およ び接線風速である。GSM と比べて DFSM は典型的な台風



図3 台風 Wipha の降水(彩色)、海面気圧(黒等値線)、風速 25m s⁻¹(赤等値線)の96時間予報値。縦軸・横軸の数値は台風中心からの距離(km)。海面気圧の等値線間隔は960hPa以上では10hPa、それ以下では20hPa(Nakanoら[4]から引用)。



図4 台風 Wipha の合成図解析。縦軸は高度、横軸は動径。軸対称動径風速(彩色)と接線風速(等値線)。等値線の間隔は 5m s⁻¹ (15m s⁻¹以上のみ)。緑線は最大風速半径。図の下部の灰色領域は地面の下を表す(Nakano ら [4] から引用)。

の二次循環(台風中心に向かう対流圏下層風と上部対流 圏での外向きの流れ)を再現している。しかし、DFSM の軸対称平均構造はMSSG及びNICAMと大きく異な る。MSSGの下層風の層の厚さはDFSMの約2倍となっ た。また上層外向き流のすぐ下に内向き流れがあるのも 特徴的である。NICAMにおける台風渦の高さはDFSM, MSSGより低い。具体的には、DFSM,MSSGは100hPa付 近に15m s⁻¹接線風ピークがあるのに対し、NICAMでは 170hPaにピークがある。さらに、NICAMの最大風速半径 はDFSMの2倍以上であり、最大風速半径の鉛直分布の 傾きもDFSMやMSSGとは異なり傾きが大きくなってい た。3つのモデルの水平解像度が同じであることから、モ デルで使われている力学や物理過程の違いが台風の内部 構造の違いをもたらしたと考えられる。

3.5 予備的感度実験

予備的感度実験として、DFSM の物理過程の一部を変 更した実験を、事例数は少ないながらも複数の設定で行っ た。積雲スキームを Randall and Pan [5] から Yoshimura ら [6] に、雲スキームを Smith [7] から Tiedtke [8] に変更する と、台風進路予測が改善する事例があり、また最大風速 半径がより大きくなることを確認した。また、積雲スキー ムを使用しない設定にすると降水がより集中するように なり、集中の度合いが積雲スキームを使用しない NICAM や MSSG に近づくことを確認した。第 3.2 節で述べたよ うに DFSM では予報時間とともに過発達の傾向にあるが、 これについては、計算安定性を増すために導入されてい る雲スキーム (Smith スキームや Tiedtke スキーム) にお ける降水の蒸発に伴う冷却のリミッターを外すことによ り過発達が抑えられる傾向にあることが分かった。

4. 結論と今後の予定

本研究により、これまで限られた事例でしか行えなかっ た高解像度全球モデルについて、第1期、第2期合わせ て132事例の5日予測実験を実施することができた。主 な結果は以下の通りである。

- (1) 台風進路・強度の系統誤差を統計的に評価した。
- (2)高解像度化の台風進路・強度の精度向上への明瞭 な効果及びモデルアンサンブル予測の有効性を確 認した。
- (3) 台風予測に対する事例依存性を確認した。
- (4) 台風強度に密接に関係している台風の詳細構造の データセットを作成、などの結果が得られた。

平成28年度地球シミュレータ公募課題の一つとして実施される本研究の第3期(2016年4月~2017年3月)では、これまでの実験結果及び得られた知見を基に詳細な解析を進めるとともに、モデル解像度や物理過程に着目した感度実験を本格的に行うことにより、モデル改善を通じて台風予測精度の向上を計るとともに、特に台風の発生に関わる MJO や BSISO についても詳細な解析を実施する予定である。

謝辞

本研究は地球シミュレータ特別推進課題(2015年10月 ~2016年3月)のもとで実施された。地球シミュレータ での実験実施に際して、JAMSTEC地球情報基盤センター 情報システム部計算技術グループ池田美紀子氏及び齋藤 友一氏から技術支援を受けたことに謝意を表する。

文献

- D. Zhang and R.A. Anthes, "A high-resolution model of the planetary boundary layer—sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 Data," J. Appl. Meteor., vol.21, pp.1594-1609, 1982.
- [2] C.W. Fairall, E.F. Bradley, D.P. Rogers, J.B. Edson, and G.S. Young, "Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment," J. Geophys. Res., vol.101, pp.747-3764, 1996.
- [3] C.W. Fairall, E.F. Bradley, J.E. Hare, A.A. Grachev, and J.B. Edson, "Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm," J. Climate, vol.16, pp.571-591, 2003.
- [4] M. Nakano, 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. Discuss., doi:10.5194/gmd-2016-184, in review, 2016.
- [5] D. Randall and D.-M. Pan, "Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure," The representation of cumulus convection in numerical models, AMS Meteorological Monograph Series, vol.46, pp.137-144, 1993.
- [6] H. Yoshimura, 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, vol.143, pp.597-621, 2015.
- [7] R. N. B. Smith, "A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model," Quart. J. Roy. Meteor. Soc., vol.116, pp.435-460, 1990.
- [8] M. Tiedtke, "Representation of clouds in large-scale models," Mon. Wea. Rev., vol.121, pp.3040-3061, 1993.

Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast (TYMIP-G7) - The Second Term: Statistical Study for Full Life-cycle of Tropical Cyclones -

Project Representative

Yoshiaki Takeuchi Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Authors

Yoshiaki Takeuchi^{*1}, Masahiro Sawada^{*1}, Hiromasa Yoshimura^{*1}, Akiyoshi Wada^{*1}, Masuo Nakano^{*2}, Tomoe Nasuno^{*2}, Ryo Onishi^{*3}, Hiromitsu Fuchigami^{*4}, Wataru Sasaki^{*3}, Shintaro Kawahara^{*3}, Munehiko Yamaguchi^{*1}, Takeshi Iriguchi^{*1}, Masato Sugi^{*1}, Hideaki Kawai^{*1} and Eiki Shindo^{*1}

*1 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

*2 Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*3 Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*4 NEC Informatec Systems, Ltd.

A project "Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast" (TYMIP-G7) aims at the improvement of 5-day tropical cyclone (TC) track and intensity forecasts. This project has been continuing through two terms from June 2015 to March 2016. We performed 137 runs for 22 TC cases in total on the Earth Simulator, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) using the following three 7-km mesh global atmospheric models, the nonhydrostatic global spectral atmospheric model using Double Fourier Series (DFSM), Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG), and Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) as well as a 20-km mesh hydrostatic Global Spectral atmospheric Model (GSM). We statistically evaluated errors of TC forecasts for gaining the advantages of the application of higher resolution model to TC forecasts. In addition, we demonstrated that Multi Model Ensemble mean (MME) forecast using the results of the three results was superior to the forecast in each model. However, predictions of rapid intensification are still a challenging issue even though 7-km mesh global atmospheric model is used. We also found that predicted TC structure quite differed among the three models even though they had the same horizontal resolution with a similar central pressure.

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

1. Introduction

Three nonhydrostatic global atmospheric models have ever been developed in each research group for each purpose in Japan. The main objective of the project "Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast" (TYMIP-G7) is to statistically quantify and understand the advantage of high-resolution global atmospheric models on the improvement of 5-day tropical cyclone (TC) track and intensity forecasts, aiming to improve 5-day TC track and intensity forecasts. We statistically evaluated errors of TC forecasts based on Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) Tokyo best track data for gaining the advantages of the application of higher resolution model to TC forecasts using the results of the following three 7-km mesh nonhydrostatic atmospheric models (DFSM, MSSG, and NICAM) as well as a 20-km mesh hydrostatic operational atmospheric model of JMA (GSM) for 22 TC cases included in 137 runs.

2. Experimental design

2.1 Targeted Cases

The first term of the project focus on the typhoon season from September to October in 2013, while the second term addressed a lifecycle of a TC in addition to Madden-Julian Oscillation (MJO) and Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), which is closely related to TC genesis. We examined 13 TCs in 85 runs during the second term (Table 1) in addition to nine TCs in 52 runs during the first term.

2.2 Models

We used DFSM, MSSG and NICAM in the second term

Seq. # of cases	Initial time (000	00UTC and 1200	DUTC)	Palated tropical evolution and tropical phenomena	
	Start time		End time		Related tropical cyclones and tropical phenomena
1 - 10	2013/6/6	1200UTC	2013/6/11	0000UTC	Yagi
11 – 19	2013/11/3	0000UTC	2013/11/7	0000UTC	Krosa, Haiyan
20 - 40	2014/7/27	1200UTC	2014/8/6	1200UTC	Halong, Nakri
41 - 50	2015/3/7	0000UTC	2015/3/11	1200UTC	MJO, Pam, Bavi
51 - 60	2015/6/27	0000UTC	2015/7/1	1200UTC	BSISO, Chan-hom
61 – 76	2015/8/13	1200UTC	2015/8/21	0000UTC	Molave, Goni, Atsani
77 – 85	2015/9/6	0000UTC	2015/9/10	0000UTC	Kilo, Etau

Table 1 List of the initial time for the second term of TYMIP-G7 (Modified from Nakano et al. [4])

MJO: Madden-Julian Oscillation

BSISO: Boreal Summer Intraseasonal Oscillation

based of the models in the first term. However, we could find the improvements for MSSG and NICAM. Regarding MSSG, the replacement of conventional bulk surface flux model [1] with the Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (COARE) 3.0 model over the ocean [2] [3] led to a solution to the issue on extraordinary increases in precipitable water predicted during the first term. The modification had a substantial impact on TC track predictions. Regarding NICAM, a problem of division by zero frequently occurred in its land surface model called the Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and Runoff (MATSIRO) during the first term. The bug was fixed so that we conducted numerical experiments for some abnormal cases in the first term again as well as the runs in the second term. The impact of the bug fix on TC forecast is negligibly small. The detail of experimental design will be described in the literature [4].

3. Results

3.1 Track prediction

The TC track predictions by DFSM, MSSG and NICAM showed better performances than the prediction by GSM (Fig. 1). We also applied a multi-model ensemble mean (MME) approach to TC forecast using the track predictions of the three



Fig. 1 Errors of track predictions for GSM, DFSM, MSSG, NICAM and MME (in the second term). Each gray bar indicates the number of samples every forecast time (right vertical axis) (After Nakano et al. [4]).

models and validate it based on RSMC Tokyo best track data. Track prediction of MME realizes the smallest track errors for forecast time (FT) = 84 - 120 h. The reduction rate by MME is approximately 24 % for position errors at FT = 120 h compared with that in GSM.

3.2 Intensity predictions

Figure 2 shows the time series of the average of predicted central pressure through two terms from June 2015 to March 2016 with the standard deviations in each model based on RSMC Tokyo best track data. The central pressure has a relatively small bias in DFSM, MSSG and NICAM compared with the error in GSM. This reveals that the three global 7-km mesh models contribute to reduction in systematic positive errors of predicted central pressures. The robustness is found in the comparison between results of GSM and DFSM: High resolution model realizes reduction in the systematic bias of predicted TC intensity since there is no difference between GSM and DFSM except for the horizontal resolution and dynamical core. In Fig. 2, the MME TC forecast had the smallest bias among the experiments with the smallest root mean square error. This demonstrates the advantage of MME for TC forecasts.



Fig. 2 Same as Fig. 1 except for TC central pressures. Error bars indicates the standard deviation of central pressure difference between the prediction and JMA best track. (After Nakano et al. [4])

4. Concluding remarks

We statistically evaluated errors on TC track and intensity predictions. We found the following four main results through two terms from June 2015 to March 2016:

- We confirm statistical evidence of the advantage of high resolution on the improvement of both TC intensity and track predictions.
- (2) We confirm that a Multi Model Ensemble mean (MME) approach is a promising for further improvement of TC intensity and track predictions.
- (3) Predicting rapid intensification is still a challenging issue for 7-km mesh global atmospheric models.
- (4) Predicted TC structure quite differs among the three models even though they had the same horizontal resolution with a similar central pressure.

It should be noted that the advantage of high resolution model for TC forecast depends on a TC case. Further investigation is needed to utilize the advantage for improving the global model and thus 5-day TC forecast.

Acknowledgement

This project was conducted as "The Earth Simulator Strategic Project with Special Support" of JAMSTEC. All numerical experiments are run on the Earth Simulator (NEC SX-ACE). The authors thank Ms. Mikiko Ikeda, Mr. Yuichi Saitoh for support to conducting the experiments on the Earth Simulator.

References

- D. Zhang and R. A. Anthes, "A high-resolution model of the planetary boundary layer—sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 Data," J. Appl. Meteor., 21, 1594-1609, 1982.
- [2] C. W. Fairall, E. F. Bradley, D. P. Rogers, J. B. Edson, and G. S. Young, "Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment," J. Geophys. Res., 101, 747-3764, 1996.
- [3] C. W. Fairall, E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev, and J. B. Edson, "Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm," J. Climate, 16, 571-591, 2003.
- [4] M. Nakano, 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. Discuss., doi:10.5194/gmd-2016-184, in review, 2016.