

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3期：感度実験による解析とモデル改良)

課題責任者

竹内 義明 気象庁 気象研究所

著者

竹内 義明^{*1}, 吉村 裕正^{*1}, 和田 章義^{*1}, 中野 満寿男^{*2}, 那須野 智江^{*3},
大西 領^{*4}, 淵上 弘光^{*5}, 佐々木 亘^{*4}, 川原 慎太郎^{*4}, 沢田 雅洋^{*1},
山口 宗彦^{*1}, 入口 武史^{*1}, 杉 正人^{*1}, 川合 秀明^{*1}, 新藤 永樹^{*1}

*1 気象庁 気象研究所, *2 海洋研究開発機構 ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム, *3 海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野, *4 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター, *5 (株) 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台風予測に対する有効性を測るため、3種類の水平解像度7km全球モデル(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を対象とした予測実験を実施した。これまで日本付近に影響した台風事例(第1期)及び台風のライフステージを対象とした2013～2015年の85事例(熱帯低気圧は13事例)(第2期)について、台風進路・強度予測の系統誤差を評価してきた。第3期では積雲対流スキームや雲スキームの変更などの感度実験を実施するとともに、各モデルの台風発生予測可能性の評価のための18日予測実験を実施した。前者の感度実験により、DFSMで見られた台風中心気圧の過降下バイアスが、積雲対流スキームや雲スキームの変更により改善されることなどを確認した。また、後者については各モデルによる違いはあるものの、熱帯の季節内変動や台風の発生が予測可能であることが示された。

キーワード：数値予報, 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(2016年現在20km)が粗いことが考えられる。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、それに見合った計算機資源が必要となる一方、現業全球モデルにおいても非静力学モデルの使用、高解像度に見合った物理過程スキームの開発等を行うことにより、一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。計算機資源の制約に加え、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っていない。

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)公募課題」で与えられた計算資源と、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3種類の全球モデルを用いて台風予測実験を多数実施することにより、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表現される台風の特徴を明らかにするとともにモデルの改良を試みる。

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。また第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事例について5日予測実験を実施した(Nakanoら[1])。第3期ではこれらの初期値を用い、主に積雲対流スキームや雲スキームを変更した感度実験を実施し、台風予測に見られる系統的なバイアス軽減への効果を調べた。また、台風発生の3事例(表1)について18日予測実験を実施した。

表1 第3期の18日予測実験事例リスト

Seq. # of cases	Initial time (0000UTC)	Related typhoons and tropical phenomena
1-3	2015/6/23, 2015/6/25, 2015/6/27	BSISO, Chan-hom

3. 研究成果

3.1 DFSMの台風中心気圧の過降下バイアスの改善

第1期、第2期では積雲スキームとしてArakawa-Schubertスキーム、雲スキームとしてSmith雲スキームを使用していた。第3期では積雲スキームをArakawa-SchubertスキームからYoshimuraスキームに、Smith雲スキームからTiedtke雲スキームに変更し、さらに雲スキームの降水蒸発に伴う冷却の上限値を外した変更版を用いた台風予測実験を実施した。図1に第1期の24事例の実験を行った時の結果を示す。オリジナル版DFSMに見られた台風中心気圧の過降下バイアスは、変更版DFSMで改善されている。

3.2 DFSMの不自然な降水分布の改善

3.1で述べた変更版DFSMにおいて、更にYoshimura積雲スキームの改良を行った。水平収束が大きい場合にエントレインメントを強める代わりに、乾燥して浅い積雲が発生しやすい場合にエントレインメントを強めるように変更した。また、積雲スキームの降水蒸発について、雲スキームの降水蒸発と整合性が良い式に変更した。このYoshimura積雲スキームの改良による降水分布への効果を見るために、図2に2013年10月10日12UTCを初期値とした事例における2013年10月13日05UTCの前1時間降水量を示す。GSMaPによる解析雨量(左)は台風中心付近と北東象限のレインバンドで強い降水が見られる。Yoshimura積雲スキーム改良前(中)ではこれに加

えて南東象限において不自然な縞模様の降水帯が見られる。改良後(右)ではこの縞模様の降水帯は見られず、南東象限のスパイラルバンドは見られるものの、従来よりも現実的な降水帯が表現できるようになった。

3.3 NICAMの予測精度改善に向けた感度実験の実施

NICAMでは雲微物理過程として長らくシングルモーメントのスキーム(NSW6; Tomita 2008 [5])を用いてきたが、最近の衛星観測に基づき改良を加えたバージョン(Roh and Satoh 2014 [2])やダブルモーメントスキーム(NDW6; Seiki et al. 2014 [3])が近年実装された。対流活動は台風の主要な構成要素であるため、雲微物理過程の精緻化により予測精度の向上が期待される。またSeiki et al. (2015) [4]により巻雲の再現のためには高い鉛直解像度が必要であることが指摘されており、鉛直高解像度化によって雲-放射過程が精緻化され、予測精度の向上が見込まれる。このため、雲微物理過程や鉛直解像度を変更した感度実験を行った。結果は現在解析中である。

3.4 MSSGの予測精度改善に向けた感度実験の実施

MSSGでは、本課題の初期(第1期)において、地表フラックスモデルの改修を行い、予測精度を向上させることに成功した。その経験も踏まえ、地表フラックスが予測精度に及ぼす影響を調査するための感度実験に注力している。その中には、SSTを与える標準実験に加え、大気海洋結合モデルによってSSTを大気と海洋の結

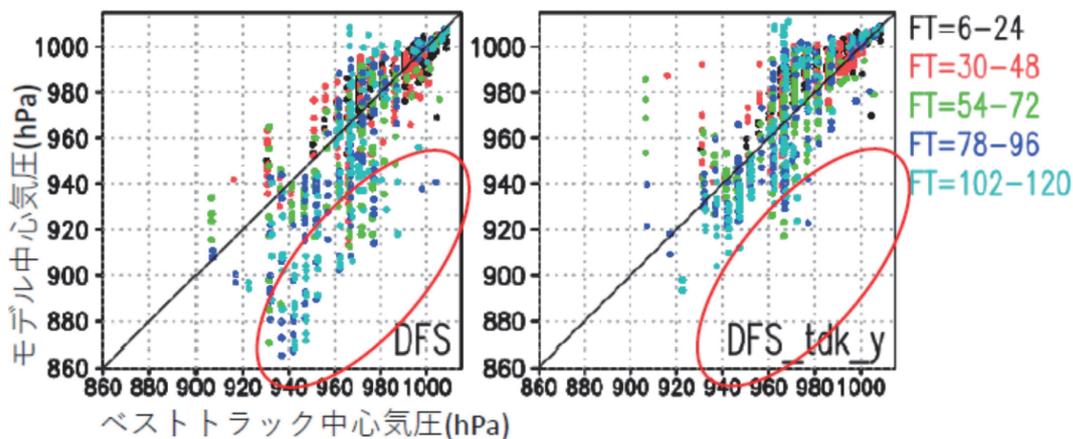


図1 (左) オリジナル版DFSM (積雲: AS、雲: Smith) と (右) 改良版DFSM (積雲: Yoshimura、雲: Tiedtke) でシミュレートされた中心気圧と気象庁ベストトラックの中心気圧との比較。中心気圧を深めすぎるバイアスが改善している (赤楕円部分)。

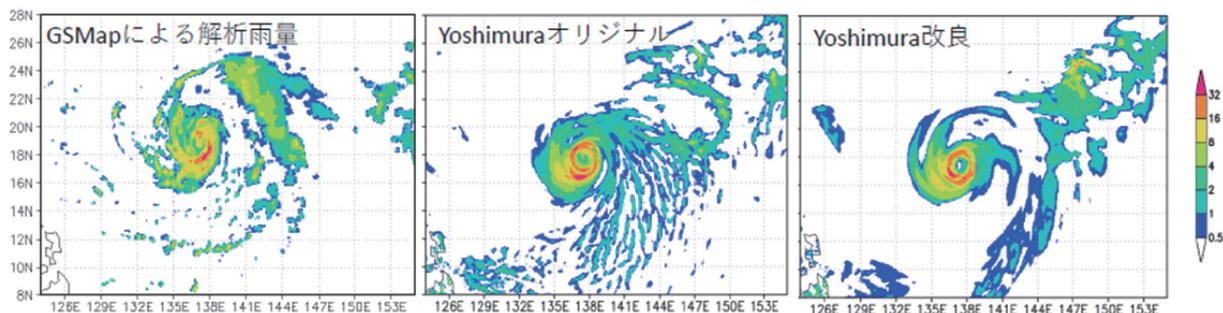


図2 2013年10月10日12UTCを初期値とした事例における2013年10月13日05UTCの前1時間降水量。解析値(左)に比べてYoshimura積雲スキーム改良前(中)では降水分布に不自然な縞模様が見られたが、改良後(右)では縞模様が見られない。

合過程を考慮した上で予報する実験も行ってきた。また、強風下における熱および運動量のフラックスモデルに関しても、一般的なモデルだけでなく、室内実験結果を元にアップスケールすることによって得られたフラックスモデル (Takagaki et al. 2012 [6]) を用いた感度実験も行った。それぞれの感度実験により、MSSG 計算において、地表面フラックスの扱いが台風予測に大きな影響を及ぼすことを確認できた。さらに詳細な解析を継続している。

3.5 長期積分による台風発生予測比較実験

台風発生の予測可能性を評価するために、2015年6月23日00UTC初期値の18日予測実験を実施した。図3にBSISOダイアグラムを示す。このダイアグラムにおいて、中心角は対流中心の位置を、中心からの距離が振幅の大きさをそれぞれ示している。予測期間後半に振幅が減衰することが各モデル共通に見られる。NICAM (青線)、MSSG (緑線) の予測実験結果では位相は遅く、一方でDFSM (赤線) の結果では位相はやや速い。図4は同じ実験における7月3日(10日先予測)の海面気圧と前1日降水量分布を示している。ここでは季節内変動に伴う西

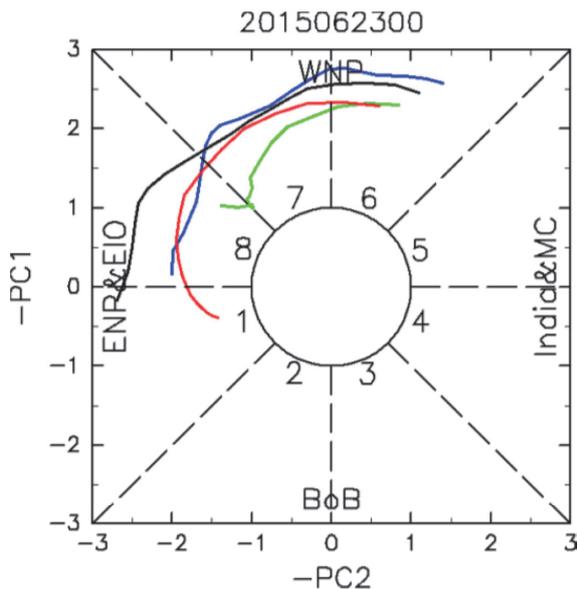


図3 BSISOダイアグラム。角度が対流中心の位置を、中心からの距離が振幅の大きさを示す。各モデルとも予測期間後半に振幅の減衰が見られる。また、NICAM (青線)、MSSG (緑線) は位相が遅く、DFSM (赤線) は位相がやや速い。

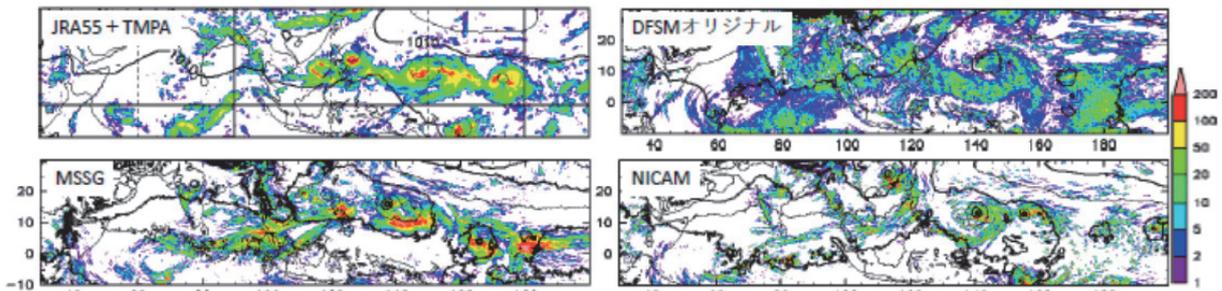


図4 2015年6月23日初期値実験における7月3日の海面気圧 (コンター; hPa) と前1日降水量分布 (色; mm/day)。季節内変動に伴う西太平洋の対流活発と台風発生が予測されている。

太平洋の対流活発域と台風発生が予測されている。

初期値をずらした計算も行い(6月25,27日)、共通して、DFSMやGSMでは台風発生の背景場となる赤道域の西風のBSISOの発達による発達が鈍く、MSSGやNICAMでは強い傾向が見られた(図略)。これに対応して、DFSMでは初期値が早い計算では台風の連続発生が再現されず、MSSGでは現実より早くまた多くの台風が発達した。NICAMやMSSG(DFSM,GSM)で循環場と対流の相互作用が強い(弱い)理由について、モデルの物理過程の影響などを詳しく調べる必要がある。

4. 結論と今後の予定

今年度の成果のポイントは以下の通りである。

- (1) 5日予測に係る第1期および第2期の成果を論文としてまとめた (Nakanoら [1])。
- (2) 感度実験によるモデル改良を試みた。その結果、DFSMによる台風強度の過大評価の改善、不自然な降水分布の解消など、モデルバイアスが改善した。その他、最新版NICAMを地球シミュレータに移植し、雲微物理過程及び鉛直高解像度化の感度実験を行った。さらに、大気海洋結合版MSSGによる追加実験を実施した。
- (3) 長期積分実験により、BSISOや台風発生予測のモデル相互比較を実施した。

平成29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4期(2017年4月~2018年3月)では、感度実験の結果の解析とモデル改良をさらに進めるとともに、台風の一生にわたる長期間の予測実験を実施する予定である。

謝辞

本研究は地球シミュレータ公募課題(2016年4月~2017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、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から技術支援を受けたことに謝意を表す。また、本研究の一部は文部科学省によるHPCI戦略プログラム分野3「防災・減災に資する地球変動予測」、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」、JSPS科学研究費補助金の

基盤研究 B「台風進路予測の変動メカニズムの解明」(研究代表者:榎本剛・京都大学、連携研究者:中野満寿男、課題番号 26282111)、基盤研究 C「西太平洋における台風初期渦の実態と発達条件の明確化」(研究代表者:那須野智江・JAMSTEC、課題番号 26400475)、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] 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.*, doi:10.5194/gmd-10-1363-2017 (2017).
- [2] Roh, W. and M. Satoh, “Evaluation of Precipitating Hydrometeor Parameterizations in a Single-Moment Bulk Microphysics Scheme for Deep Convective Systems over the Tropical Central Pacific,” *J. Atmos. Sci.*, 71, 2654–2673, doi: 10.1175/JAS-D-13-0252.1 (2014).
- [3] Seiki, T., M. Satoh, H. Tomita, and T. Nakajima, “Simultaneous evaluation of ice cloud microphysics and nonsphericity of the cloud optical properties using hydrometeor video sonde and radiometer sonde in situ observations,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 6681–6701, doi:10.1002/2013JD021086 (2014).
- [4] Seiki, T., C. Kodama, M. Satoh, T. Hashino, Y. Hagihara, and H. Okamoto, “Vertical grid spacing necessary for simulating tropical cirrus clouds with a high-resolution atmospheric general circulation model,” *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4150–4157. doi: 10.1002/2015GL064282 (2015).
- [5] Tomita, H., “New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice,” *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86, 121–142 (2008).
- [6] Takagaki, N., S. Komori, N. Suzuki, K. Iwano, T. Kuramoto, S. Shimada, R. Kurose, and K. Takahashi, “Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds,” *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23604, doi: 10.1029/2012GL053988 (2012).

Global 7-km mesh Nonhydrostatic Model Intercomparison Project for Improving Typhoon Forecast (TYMIP-G7) – The Third Term: Analysis with Sensitivity Experiments and Model Improvement –

Project Representative

Yoshiaki Takeuchi Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Authors

Yoshiaki Takeuchi^{*1}, Hiromasa Yoshimura^{*1}, Akiyoshi Wada^{*1}, Masuo Nakano^{*2}, Tomoe Nasuno^{*3}, Ryo Onishi^{*4}, Hiromitsu Fuchigami^{*5}, Wataru Sasaki^{*4}, Shintaro Kawahara^{*4}, Masahiro Sawada^{*1}, Munehiko Yamaguchi^{*1}, Takeshi Iriguchi^{*1}, Masato Sugi^{*1}, Hideaki Kawai^{*1} and Eiki Shindo^{*1}

*1 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, *2 Project Team for HPC Advanced Predictions utilizing Big Data, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *3 Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *4 Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *5 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. Through the second term from June 2015 to March 2016, we performed 85 runs for 13 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 (DFS), 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). In the third term, we performed some additional sensitivity experiments on different cumulus and cloud schemes as well as a few 18-day forecast experiments on the investigation of model inter-comparison. DFS with different cumulus and cloud schemes led to the improvement of TC intensity forecasts as well as a better representation of precipitation distribution around the TC. The 18-day forecast experiments indicate that the coupling of cumulus convection with atmospheric environmental circulation differs between the three models.

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

1. Introduction

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. Based on the statistical evaluation obtained from the previous study, some additional sensitivity experiments on different cumulus and cloud schemes are conducted with the following three 7-km mesh nonhydrostatic atmospheric models (DFS, MSSG, and NICAM).

2. Experimental design

The first term of the project focus on the TC season in the western North Pacific 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 in addition to nine TCs in 52 runs during the first term (Nakano et al. [2]). In the third term, we performed some additional sensitivity experiments to clarify the source of forecast biases and reduce them with some improved physics scheme. In addition, 18-day forecast experiments

Table 1 List of the initial time 18 days forecast experiments for the third term of TYMIP-G7

Seq. # of cases	Initial time (0000UTC)	Related typhoons and tropical phenomena
1–3	2015/6/23, 2015/6/25, 2015/6/27	BSISO, Chan-hom

were performed by the three model with different three initial conditions (Table 1) to make intercomparison between the three models with the focus on BSISO and TC genesis.

3. Results

3.1 Improvement of the low bias of TC central pressure in DFSM

In the first and second terms, the Arakawa-Schubert cumulus scheme and the Smith cloud scheme were used in DFSM (see Nakano et al. [2]). In the third term, the experiments using the DFSM with different cumulus and cloud schemes from the original DFSM were performed for TCs. In the modified DFSM, the Yoshimura cumulus scheme (Yoshimura et al. 2015 [8]) and the Tiedtke cloud scheme (Tiedtke 1993 [6]) are used. In addition, the upper limit of evaporation cooling of precipitation is removed in the cloud scheme. Fig. 1 shows the result of 24 simulations performed by the modified DFSM. The bias of the central pressure simulated by the original DFSM became low in the modified DFSM so that TC intensity forecast was improved.

3.2 Improvement of unnatural precipitation distribution in DFSM

The Yoshimura cumulus scheme was further improved based on the modified DFSM described in section 3.1. It was modified so that the entrainment would be enhanced when

the air is dry and shallow cumulus is likely to occur instead of when the horizontal convergence is large. To see the effect of the improvement of the Yoshimura cumulus scheme on the precipitation distribution, Fig. 2 shows the horizontal distribution of hourly precipitation at 05 UTC on 13 October 2013 that was simulated initialized at 12 UTC 10 October 2013. Precipitation analysis derived from GSMaP (Aonashi et al. 2009 [1]) (left) shows an asymmetric rainfall pattern with a spiral rainband southeast from the TC center and broad distant rainbands northeast from the TC center. Unnatural striped precipitation patterns were found southeast from the TC center simulated by the modified DFSM without any improvements of the Yoshimura cumulus scheme (middle). After the improvement (right), the precipitation pattern became more realistic compared with the pattern simulated by the modified DFSM without the improvements.

3.3 Sensitivity tests for better prediction performance of NICAM

In the experiments using NICAM, we have used a single moment bulk cloud microphysics scheme (NSW6) proposed by Tomita (2008)[7] for about 10 years. Recently, NSW6 was improved by Roh and Satoh (2014)[3] based on satellite observations. In addition, a double moment bulk cloud microphysics scheme (NDW6) were developed and

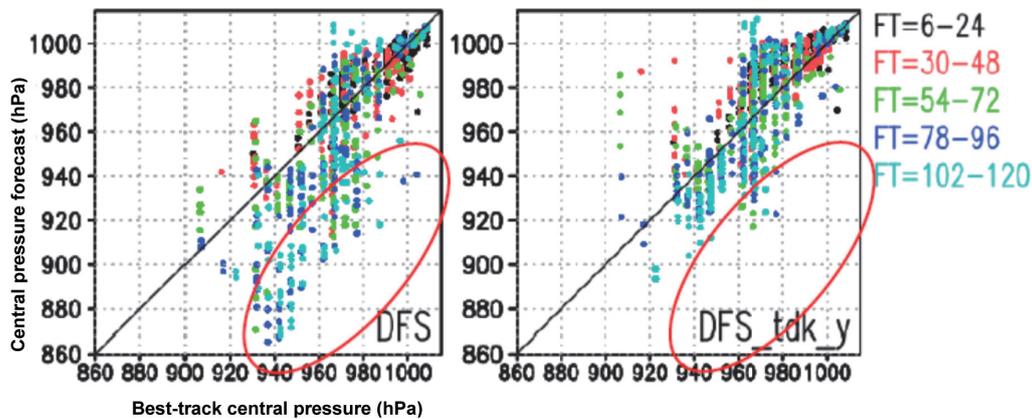


Fig. 1 Left panel shows a scatter diagram on the relation of RSMC best-track central pressure to center pressure forecast by the original DFSM with AS cumulus scheme and Smith cloud scheme and the modified DFSM with the original Yoshimura cumulus scheme and the Tiedtke cloud scheme. The red circle shows over-intensification in the original DFSM and the improvement in the modified DFSM.

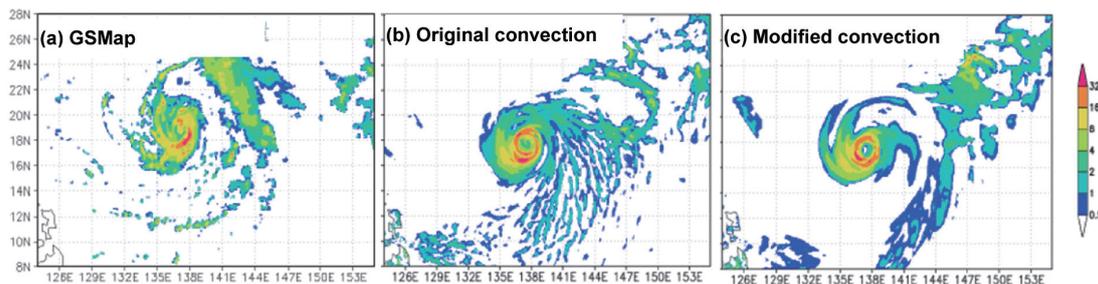


Fig. 2 Hourly precipitation patterns (mm/day) at 05UTC October 13 in 2013 (a) derived from GSMaP, (b) calculated by the DFSM with the original Yoshimura scheme and (c) calculated by the DFSM with the revised Yoshimura scheme (right). The forecast was initiated from 12UTC October 10 in 2013.

implemented by Seiki et al. (2014) [4]. Because convection is a primary component of tropical cyclones, sophistication of cloud microphysics is considered to lead to improvement of forecast results. Moreover, Seiki et al. (2015) [5] pointed out that high vertical resolution ($dz < 400\text{m}$) is needed to represent cirrus clouds in the model. Therefore, the increase of the vertical resolution is considered to improve the forecasts though sophisticated cloud-radiation processes. In the third term, we have been performing some additional sensitivity experiments by changing cloud microphysics and vertical resolution.

3.4 Sensitivity tests for better prediction performance of MSSG

During the first term of this project, we substantially improved TC forecasts performed by MSSG by changing a surface flux scheme. Now, we have continued the investigation of the sensitivity of the forecasts to surface flux processes on the performance of MSSG. In the third term, we conducted TC forecasts with different ocean surface flux schemes: One is a conventional model and the other is new model that provides different dependency on high wind speeds. We have confirmed that the ocean surface flux schemes have a substantial impact on the TC forecasts by MSSG. We have been investigating the results now.

3.5 Model inter-comparison on TCs generation with 18-day forecasts

To examine the predictability of TC genesis, we performed 18-day simulations initialized at 00 UTC 23 June in 2015 using the three 7-km mesh nonhydrostatic atmospheric models. Fig. 3 shows the BSISO diagram: the radial axis shows the amplitude and the azimuth axis shows the position of convection center. The simulated amplitude became smaller than the observation in the three 7-km mesh models in the later period of forecast time. The simulated phase was slower [a bit faster] in the NICAM (blue) and MSSG (green), [DFSM (red)]. Fig. 4 shows simulated sea-level pressure and accumulated 1-day precipitation at 00 UTC 3 June (10-day after the initial date). Active convective phase of BSISO and its related TC genesis were simulated in the three 7-km mesh models.

We also executed simulations for different initial dates (25

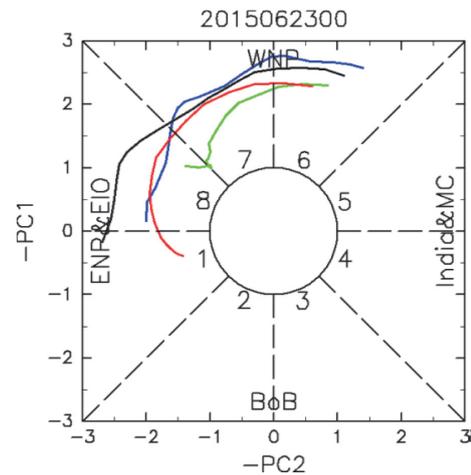


Fig. 3 BSISO diagram on 18-day forecasts. Initial time: 23 June in 2015. Colors indicate the prediction with NICAM (blue), MSSG (green), and DFSM (red). Black line denotes the analysis based on observations.

and 27 June 2015). In DFSM and GSM, enhancement tended to be delayed in the equatorial western region that provided a background environment for TC genesis by BSISO. Meanwhile, the enhancement was robust in MSSG and NICAM. DFSM with initial conditions at an earlier initial date was unable to capture the occurrence of successive TC genesis. MSSG, on the other hand, tended to develop multiple TCs immediately. The reasons for such tight (weak) coupling of cumulus convection with atmospheric environmental circulation in MSSG and NICAM (DFSM and GSM) need to be further examined in view of the physical processes and their modeling.

4. Conclusions and future works

Major results in the third term are as follows:

- (1) A peer review paper has been published (Nakano et al.[2]).
- (2) The cumulus and cloud schemes were improved from the original schemes in DFSM. We performed some additional sensitivity experiments for 24 TCs. The experiments with the modified DFSM showed better predictions on TC intensity and more realistic precipitation pattern than those with the original DFSM.
- (3) 18-day forecast experiments were performed by the three model with different three initial conditions. All

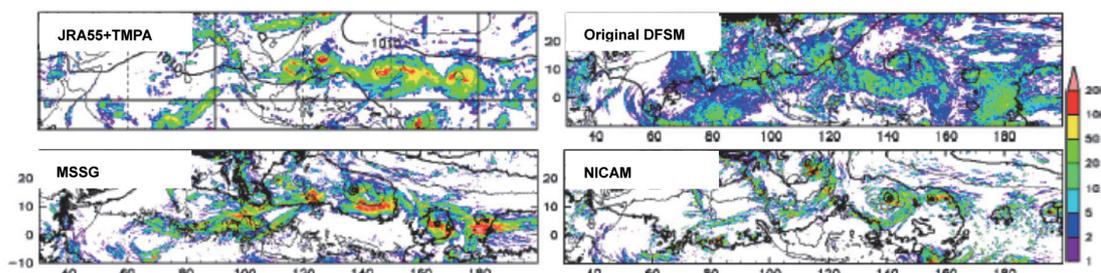


Fig. 4 Simulated sea-level pressure in hPa (contours) and one-day preceded precipitation in mm/day (shade) on 3 July in 2015. Initial time: 23 June in 2015.

the models well simulated the eastward propagation of convection system. In addition, all the models were able to capture TCs genesis although specific biases were found in some model.

Further investigation on the sensitivity experiments is needed to improve the model in view of the physical processes and their modeling. In addition, long-term integration experiments should be conducted to forecast a lifecycle of TCs from the genesis to the transition to the extratropical cyclone.

Acknowledgements

All numerical experiments were run on the Earth Simulator (NEC SX-ACE).

References

- [1] Aonashi, K., J. Awaka, M. Hirose, T. Kozu, T. Kubota, G. Liu, S. Shige, S., Kida, S. Seto, N. Takahashi, and Y. N. Takayabu, "GSMaP passive, microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation," *J. Meteor. Soc. Japan*, 87A, 119-136 (2009).
- [2] 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.*, doi:10.5194/gmd-10-1363-2017 (2017).
- [3] Roh, W. and M. Satoh, "Evaluation of Precipitating Hydrometeor Parameterizations in a Single-Moment Bulk Microphysics Scheme for Deep Convective Systems over the Tropical Central Pacific," *J. Atmos. Sci.*, 71, 2654–2673, doi: 10.1175/JAS-D-13-0252.1 (2014).
- [4] Seiki, T., M. Satoh, H. Tomita, and T. Nakajima, "Simultaneous evaluation of ice cloud microphysics and nonsphericity of the cloud optical properties using hydrometeor video sonde and radiometer sonde in situ observations," *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 6681–6701, doi:10.1002/2013JD021086 (2014).
- [5] Seiki, T., C. Kodama, M. Satoh, T. Hashino, Y. Hagihara, and H. Okamoto, "Vertical grid spacing necessary for simulating tropical cirrus clouds with a high-resolution atmospheric general circulation model," *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4150–4157. doi: 10.1002/2015GL064282 (2015).
- [6] Tiedtke, M., "Representation of clouds in large-scale models," *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3040-3061 (1993).
- [7] Tomita, H., "New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice," *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86, 121–142 (2008).
- [8] 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 (2015).