

# 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>, 和田 章義<sup>\*1</sup>, 沢田 雅洋<sup>\*1</sup>, 杉 正人<sup>\*1</sup>, 大西 領<sup>\*2</sup>, 中野 満寿男<sup>\*3</sup>, 那須野 智江<sup>\*3</sup>, 後藤 浩二<sup>\*4</sup>, 坂内 健大<sup>\*4</sup>, 山口 宗彦<sup>\*1</sup>, 入口 武史<sup>\*1</sup>, 川合 秀明<sup>\*1</sup>, 新藤 永樹<sup>\*1</sup>, 川原 慎太郎<sup>\*2</sup>, 瀧上 弘光<sup>\*5</sup>, 松本 圭太<sup>\*5</sup>

\*1 気象庁 気象研究所, \*2 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター, \*3 海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野, \*4 日本電気株式会社, \*5 NEC ソリューションイノベーション株式会社

2020年代後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、また高解像度での台風予測改善のための知見を得るため、3種類の次世代非静力学全球モデル（DFSM, 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。この課題において、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・強度予測の系統誤差を評価してきており、高解像度化の有効性を確認している[1]。今年度は進路が迷走し予測が困難な事例等での台風予測実験を実施し、気象庁現業モデル最新版をベースとしたDFSM\_GSM1705でも実験を行った。モデル間の比較を行い、台風中心付近の海面からの顕熱が大きいほど台風が発達していることを確認した。また、系統誤差軽減のための知見を得るために物理過程を変更した感度実験も実施し、DFSMで見られる台風の過発達海面からの顕熱を抑えることにより改善されること、MSSGで波しぶきの影響を考慮すると台風中心気圧が低下することが確認できた。

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（2018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。

本研究では、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多数実施する。モデル毎に表現される台風の特徴や系統誤差を明らかにし、台風の科学的理解を深めモデル改良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。

## 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DFSM（気象研究所）、20面体格子のNICAM（JAMSTEC/AORI/AICS）、陰陽格子のMSSG（JAMSTEC）の3つの7km解像度の次世代全球モデルを使用する。今年度は、進路が迷走し予測が困難な2016年の台風

Lionrockや2015年のハリケーンJoaquinの事例について、台風予測実験を実施した。また、西太平洋での台風発生の予測可能性を調べるため、2014年7月について一ヶ月スケールの予測実験を実施した。これらの実験のリストを表1に示す。更にモデル改良の知見を得るために物理過程の一部を変更した感度実験を行った。DFSMは2014年3月に現業化された気象庁GSM1403をベースにしたもの（DFSM\_GSM1403）をこれまで使用してきたが、今年度は2017年5月に現業化されたGSM1705をベースにした新しいDFSM（DFSM\_GSM1705）での実験も実施した。

## 3. 研究成果

### 3.1 モデル間の台風強度の違いと海面からの顕熱との関係

モデルにより台風強度の違いが見られ、DFSMでは台風が過発達するケースが多い。DFSM（DFSM\_GSM1403）では他のモデルと比較して雲スキームからの降水の蒸発に伴う冷却が小さい。DFSMでは蒸発に伴う冷却に上限値が与えられていたため、この上限値を外したところ（DFSM\_nolimevp）、下層の冷却が大きくなり台風の過発達が緩和される結果が得られている。しかし、この冷却の上限値を外してもまだ台風の過発達が大きい事例もあり、今年度の実験した2016年台風第10号（Lionrock）やハリケーンJoaquinの事例でも台風の過発達が大きい。今年度は、気象庁最新版GSMを元にしたDFSM\_GSM1705

表1 台風予測実験の実験時刻のリスト

事例番号	実験時刻				関連する熱帯サイクロンと熱帯現象
	開始時刻		終了時刻		
1	2016/8/22	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
2	2016/8/23	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
3	2016/8/23	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
4	2016/8/24	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
5	2016/8/24	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
6	2016/8/25	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
7	2016/8/25	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
8	2016/8/26	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	台風 Lionrock
9	2015/9/28	1200UTC	2015/10/3	1200UTC	ハリケーン Joaquin
10	2015/9/29	1200UTC	2015/10/4	1200UTC	ハリケーン Joaquin
11	2015/9/30	1200UTC	2015/10/5	1200UTC	ハリケーン Joaquin
12	2015/10/1	1200UTC	2015/10/6	1200UTC	ハリケーン Joaquin
13	2015/10/2	1200UTC	2015/10/7	1200UTC	ハリケーン Joaquin
14	2014/7/10	0000UTC	2014/8/9	0000UTC	
15	2014/7/11	0000UTC	2014/8/10	0000UTC	
16	2014/7/12	0000UTC	2014/8/11	0000UTC	
17	2014/7/13	0000UTC	2014/8/12	0000UTC	
18	2014/7/14	0000UTC	2014/8/13	0000UTC	

でも実験を行い、台風の過発達はかなり改善されることを確認した。DFSM\_GSM1705では接地境界層スキームや積雲スキーム等が更新されており、このことが過発達改善の原因と考えられる。

図1の台風Lionrockの事例において、予報時間FT=84の海面気圧を見ると、台風の強い順にDFSM\_nolimevp、DFSM\_GSM1705、NICAM、MSSGとなっている。解析

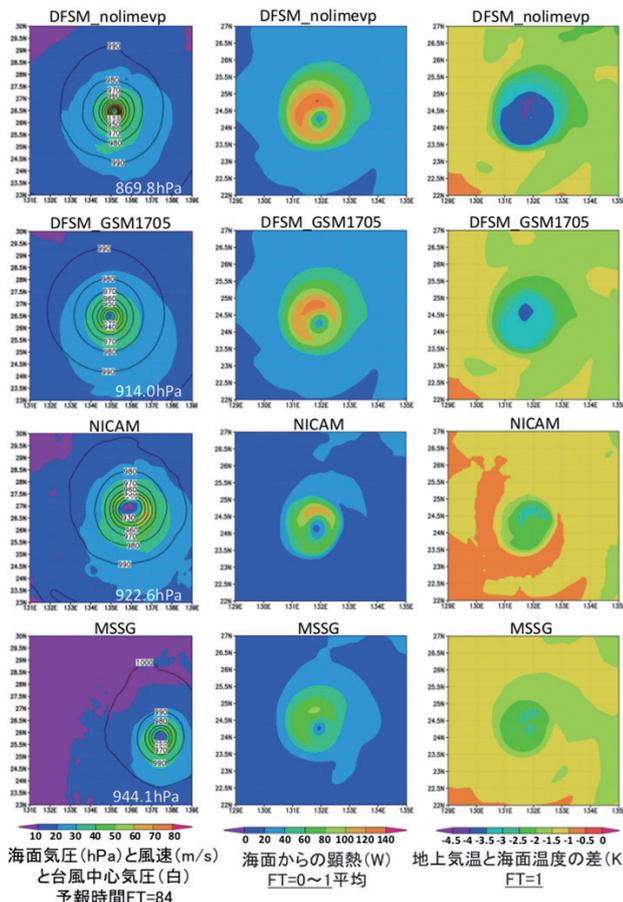


図1 2016年8月24日12UTC初期値から実行した台風第10号(Lionrock)の事例の実験結果。

(RSMC ベストトラック)では台風中心気圧は約940hPaであり、MSSGの結果に近い。予報時間FT=0~1平均の台風中心付近の海面からの顕熱も台風強度と同じ順で大きくなっており、実行開始後すぐの海面からの顕熱が大きいほど、台風がより発達している。海面からの潜熱より顕熱の方が台風強度と対応が良い(図は省略)。予報時間FT=0~1ではモデル間の大気場の違いが小さいため、顕熱の違いの主な原因として接地境界層スキームの違いが考えられる。ただし、図1を見ると予報時間FT=1の地上気温とSST(海面温度)の差にモデル間の違いが見られ、海面からの顕熱との対応が良いため、地上気温とSSTの差の違いも顕熱の違いの原因の1つと考えられる。

### 3.2 海面からの顕熱に関する感度実験

DFSMについて、台風Lionrockの事例で海面からの顕熱の台風強度予測への影響に焦点を当てた感度実験を行った。感度実験のリストを表2に示す。実験では海面からの顕熱の評価に密接に関係する以下の3つの要素を考慮した。

- (1) DFSMの接地境界層スキームへのGUST(突風)の効果の導入。この効果により海面からの顕熱が増加する。
- (2) 海面からの顕熱を抑えるため、ボーエン比の上限(0.1)の導入。
- (3) 海面からの潜熱を増やし顕熱を減らすため、波しぶき[2]簡易版の導入。

DFSM\_nolimevpと比べてDFSM\_nolimevp\_Modifyでは海面からの顕熱が抑えられる設定になっている。図2を見ると、DFSM\_nolimevpで見られた台風の過発達がDFSM\_nolimevp\_Modifyでは抑えられ、解析(RSMC東京ベストトラック)とよく合っている。DFSM\_GSM1705ではDFSM\_nolimevp\_Modifyほど過発達が改善されておらず、台風中心付近の海面からの顕熱がまだ過大であることが示唆される。

表2 台風 Lionrock の事例での感度実験のリスト

実験名	モデルと GSM のバージョン	Gust (突風)	波しぶき	ポーエン比の上限 (0.1)
DFSM_nolimevp	DFSM_GSM1403	○	×	×
DFSM_nolimevp_Modify	DFSM_GSM1403	×	○	○
DFSM_GSM1705	DFSM_GSM1705	○	×	×

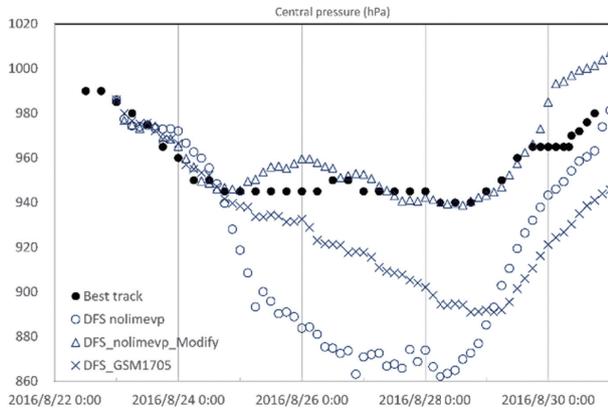


図2 2016年8月23日00UTC初期値から実行した時の台風10号(Lionrock)の中心気圧の時系列。Best trackはRSMC東京ベストトラックデータ(解析)。

### 3.3 台風の発達に及ぼす大気海洋間の熱・物質交換プロセスの影響の解明

台風の発達に及ぼす大気海洋間の熱・物質プロセスの影響を解明するために、MSSGモデルには下記の先端のプロセスモデルが実装されている。

1. 大気海洋結合プロセスモデル [3]
2. 高風速下での波しぶき発生プロセスモデル [4]
3. 高風速・砕波下での熱・物質交換プロセスモデル(新たな熱・物質交換係数モデル) [5]

本節では、上記2のプロセスが台風の発達に及ぼす影響、つまり、高風速下で発生した波しぶきが台風の発達に及ぼす影響を解析した結果を報告する。

高風速下で巻き上げられた波しぶきは蒸発層を形成し、それが大気海洋間の熱交換に影響を及ぼす。単純に考えると、波しぶきが蒸発することにより、海洋から大気への潜熱移動が促進される一方、顕熱移動は抑制される。しかし、その影響の程度は蒸発層の状態に依存する。これまでに、理想的な大気境界層に対しての波しぶきの影

響の一端を明らかにしたもの [4]、現実的な台風の発達における波しぶきの影響に関しては明らかにすべき点が多い。そこで、本公募プロジェクト(TYMIP)が対象とした台風事例を対象に、波しぶきの影響を調べた。具体的には、Haiyan(2013)の予測に関して、高風速下での波しぶき発生プロセスと発生した波しぶきを雲微物理モデルの中で取り扱う新しい雲微物理シミュレーション法 [4] を用いることによって、波しぶきが台風に与える影響を明らかにした。台風の進路に波しぶきの有意な影響は見られなかった(図3左)。一方、台風の中心気圧に関しては、波しぶきの影響を考慮すると中心気圧が5~10hPa程度低下した(図3右)。つまり、波しぶきプロセスが台風の発達に影響を与え得ることを確認できた。

### 3.4 30日積分での台風発生予測

5つの初期値からの30日積分実験において、DFSM(DFSM\_nolimevp)ではNICAMと比べて西太平洋での台風発生が少なく台風が弱い傾向にある。しかし、DFSMについても、物理過程をデフォルトの設定であるArakawa-Schubert積雲・Smith雲スキームからYS積雲 [6]・Tiedtke雲スキームに変更すると、西太平洋での台風発生数が増え台風が強まった。DFSMのデフォルト設定では熱帯の水蒸気量が他のモデル・設定より少なくなっており、このことが台風の発生数が他より少ない原因の1つと考えられる。

## 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。

- ・モデル間の比較により、台風近傍の海面からの顕熱が大きいほど台風が発達していることを確認。
- ・DFSM\_GSM1705では、接地境界層スキーム等の物理過程の更新によりDFSM\_nolimevpと比べて台風

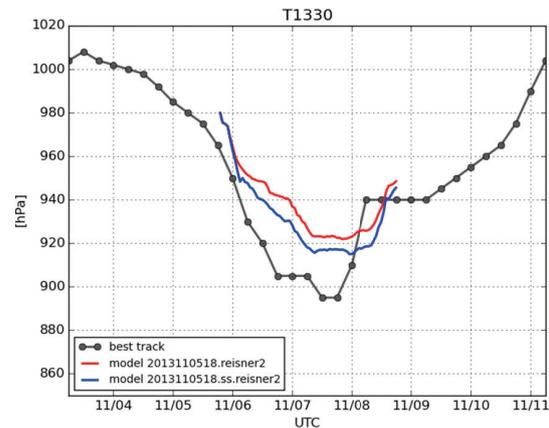
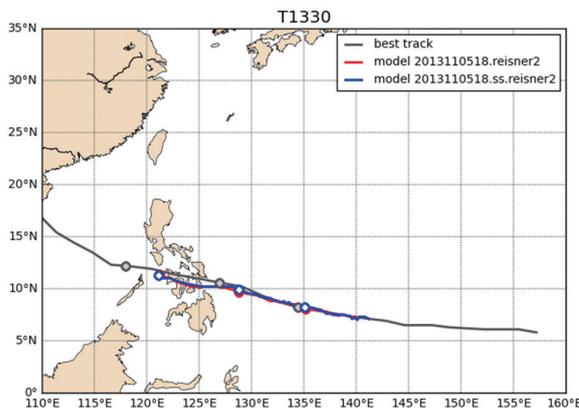


図3 Haiyan(2013)に対するMSSG計算結果。進路予測(左)と中心気圧予測(右)。赤線が通常のMSSG計算結果、青線が波しぶきを考慮したMSSG計算結果を示す。

の過発達はかなり改善される。

- ・ DFSM で、海面からの顕熱を抑制すると台風の過発達が抑えられる。
- ・ MSSG で、波しぶきの効果を導入すると台風中心気圧が少し低下する。
- ・ 30 日積分実験において、DFSM では NICAM と比べて西太平洋での台風発生が少なく台風が弱い。DFSM では熱帯の水蒸気量が NICAM より少ないことが原因の 1 つと考えられる。

平成 30 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（2018 年 4 月～2019 年 3 月）では、これまでの実験の結果の解析を引き続き行い、得られた知見を元にモデル改良をさらに進める。更に、高解像度大気海洋結合モデルを使用した実験を行い、海洋モデルとの結合による海水温低下とそれに伴う海面からの顕熱・潜熱の減少等の効果が台風予測に与える影響を評価する予定である。

## 謝辞

本研究は地球シミュレータ公募課題（2017 年 4 月～2018 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] 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).
- [2] Bao, J., J.M. Wilczak, J. Choi, and L.H. Kantha, 2000, "Numerical Simulations of Air-Sea Interaction under High Wind Conditions Using a Coupled Model: A Study of Hurricane Development," *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2190-2210, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2190:NSOASI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2190:NSOASI>2.0.CO;2) (2000).
- [3] Sasaki, W., R. Onishi, H. Fuchigami, K. Goto, S. Nishikawa, Y. Ishikawa, K. Takahashi, "MJO simulation in a cloud-system-resolving global ocean-atmosphere coupled model," *Geophysical Research Letter*, 43, 9352-9360 (2016).
- [4] Onishi, R., H. Fuchigami, K. Matsuda, K. Takahashi, "Detailed Cloud Microphysics Simulation for Investigation into the Impact of Sea Spray on Air-Sea Heat Flux," *Flow Turbulence and Combustion*, 97, 1111-1125 (2016).
- [5] Komori, S., K. Iwano, N. Takagaki, R. Onishi, R. Kurose, K. Takahashi, N. Suzuki, "Laboratory Measurements of Heat Transfer and Drag Coefficients at Extremely High Wind Speeds," *J. Phys. Oceanogr.* 48, 959-974 (2018).
- [6] 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).

# 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>, Akiyoshi Wada<sup>\*1</sup>, Masahiro Sawada<sup>\*1</sup>, Masato Sugi<sup>\*1</sup>, Ryo Onishi<sup>\*2</sup>, Masuo Nakano<sup>\*3</sup>, Tomoe Nasuno<sup>\*3</sup>, Koji Goto<sup>\*4</sup>, Kenta Sakauchi<sup>\*4</sup>, Munehiko Yamaguchi<sup>\*1</sup>, Takeshi Iriguchi<sup>\*1</sup>, Hideaki Kawai<sup>\*1</sup>, Eiki Shindo<sup>\*1</sup>, Shintaro Kawahara<sup>\*2</sup>, Hiromitsu Fuchigami<sup>\*5</sup> and Keita Matsumoto<sup>\*5</sup>

\*1 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, \*2 Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*3 Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*4 NEC, Ltd., \*5 NEC Solution Innovators, Ltd.

We conducted typhoon forecast experiments using the following three 7-km mesh global atmospheric models, the nonhydrostatic global spectral atmospheric model using Double Fourier Series (DFSMS), Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG), and Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) to obtain new findings for improving typhoon prediction by high resolution global atmospheric model. Our project has conducted numerous numerical experiments on various cases of typhoons and atmospheric disturbances, statistically evaluated the systematic error of typhoon track and intensity predictions, and showed the effectiveness of high resolution atmosphere model [1]. This fiscal year we also continued to conduct typhoon forecast experiments in new typhoon cases. From the comparison among the models, it was confirmed that typhoons further developed as air-sea sensible heat fluxes around the storm center were higher. In addition, the excessive development of the typhoon predicted by DFSM could be improved by reducing the air-sea sensible heat fluxes from the results of sensitivity experiments on surface boundary processes. Furthermore, the effect of sea spray played a role in further lowering central pressure of typhoon from the results of sensitivity experiments using MSSG.

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

## 1. Introduction

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 2018) to resolve the inner core of typhoons.

In this project, by utilizing computational resources for the project on 'Earth Simulator (ES) Proposed Research Projects', we conducted numerous typhoon forecast experiment by the global atmosphere models with the 7-km horizontal resolution. The 7-km resolution is expected for the operational use in the late 2020s. Clarification of the characteristics of typhoons predicted in each model, estimates of systematic errors on typhoon predictions, and deeply understanding of typhoons from a scientific view contribute to the improvement of the accuracy of predictions on typhoons.

## 2. Experimental design

We conducted typhoon forecast experiments for Typhoon Lionrock (2016) and Hurricane Joaquin (2015) this fiscal year. In addition, monthly forecast experiments were conducted in July 2004 to investigate the predictability of genesis of tropical cyclones in the western North Pacific. These experiments are summarized in Table 1. In addition, some sensitivity experiments with modified physical processes were conducted. DFSM we have used so far (DFSM\_GSM1403) is based on Japan Meteorological Agency Global Spectral Model (JMA GSM) 1403. This fiscal year we also conducted experiments with new DFSM (DFSM\_GSM1705) based on JMA GSM 1705.

## 3. Results

### 3.1 Typhoon intensity difference among models and the relation to air-sea sensible heat fluxes

As for the difference in typhoon intensity among the three models, DFSM (DFSM\_GSM1403) tended to be excessive compared with other models. When the upper limit of the cooling with evaporation of precipitation from the cloud scheme

Table 1 List of the initial time for typhoon forecast experiments

Seq. # of cases	Initial time (0000UTC and 1200UTC)				Related tropical cyclones and tropical phenomena
	Start time		End time		
1	2016/8/22	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
2	2016/8/23	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
3	2016/8/23	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
4	2016/8/24	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
5	2016/8/24	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
6	2016/8/25	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
7	2016/8/25	1200UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
8	2016/8/26	0000UTC	2016/9/1	0000UTC	Typhoon Lionrock
9	2015/9/28	1200UTC	2015/10/3	1200UTC	Hurricane Joaquin
10	2015/9/29	1200UTC	2015/10/4	1200UTC	Hurricane Joaquin
11	2015/9/30	1200UTC	2015/10/5	1200UTC	Hurricane Joaquin
12	2015/10/1	1200UTC	2015/10/6	1200UTC	Hurricane Joaquin
13	2015/10/2	1200UTC	2015/10/7	1200UTC	Hurricane Joaquin
14	2014/7/10	0000UTC	2014/8/9	0000UTC	
15	2014/7/11	0000UTC	2014/8/10	0000UTC	
16	2014/7/12	0000UTC	2014/8/11	0000UTC	
17	2014/7/13	0000UTC	2014/8/12	0000UTC	
18	2014/7/14	0000UTC	2014/8/12	0000UTC	

was excluded (DFSM\_nolimevp), the excessive development was alleviated due to increases of the cooling in the lower troposphere. However, there were some cases that typhoon development was still excessive even though the upper limit of cooling was excluded. This fiscal year, we also conducted typhoon forecast experiments with DFGM\_GSM1705. The

DFSM\_GSM1705 improved the excessive development of typhoons reasonably by updating the physical schemes such as the surface boundary layer scheme and the cumulus cloud scheme.

Figure 1 shows that predicted Lionrock’s intensity was strong in order of DFGM\_nolimevp, DFGM\_GSM1705, NICAM and MSSG. The Lionrock’s intensity predicted by MSSG was most reasonable to RSMC best track analysis. At forecast time zero (FT0) to 1 hour (FT1), predicted air-sea sensible heat flux was also in order of that of predicted intensity, indicating that the storm further developed as air-sea sensible heat fluxes around the storm center were higher. At the period from FT0 to FT1, the difference of atmospheric environments is considered to be small among the models so that the difference of air-sea sensible heat fluxes was mainly caused by the difference of the surface boundary layer scheme. However, a difference among the models was also found in the difference between surface air temperature and sea surface temperature (Fig. 1). In addition, the horizontal pattern of the difference of the temperature difference corresponded well to air-sea sensible heat fluxes. This suggests that the temperature difference was one of factors that caused the difference of air-sea sensible heat fluxes among the models.

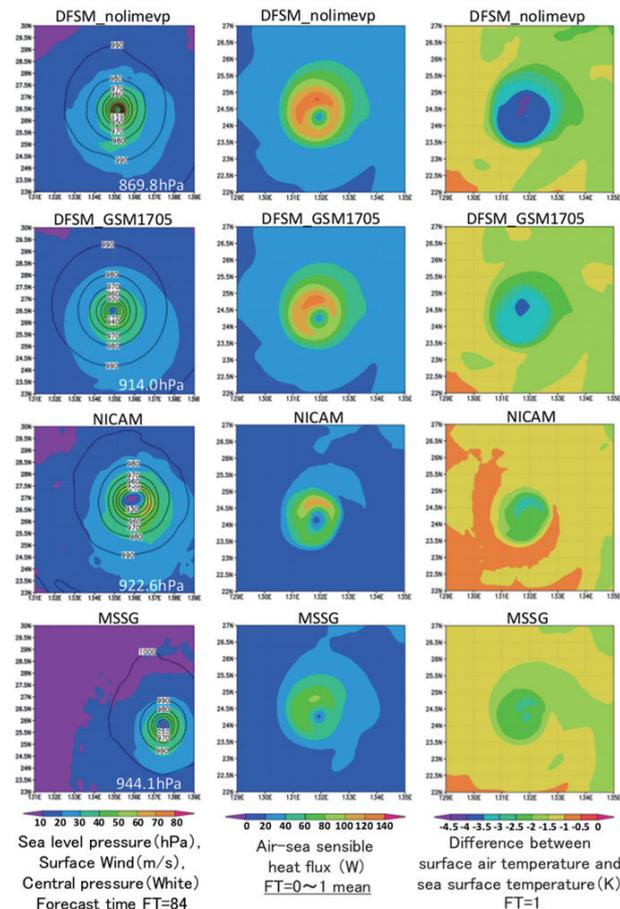


Fig. 1 Simulation results of Lionrock (2016) executed from initial value at 12 UTC 24<sup>th</sup> August 2016.

### 3.2 Sensitivity experiments on air-sea sensible heat fluxes

We conducted sensitivity numerical experiments focusing on the effect of air-sea turbulent heat fluxes on the intensity prediction of Lionrock with DFGM. Table 2 shows a list of sensitivity experiments. The experiments considered the following three factors that were closely related to estimates of air-sea turbulent heat fluxes.

- (1) The ‘Gust’ effect is introduced into the surface boundary scheme in the GFSM. This effect leads to increases in

Table 2 List of sensitivity numerical prediction experiment for the prediction of Lionrock

Experiment name	Model & Version of GSM	Gust	Sea spray	Limitation of Bowen ratio (0.1)
DFSM_nolimevp	DFSM_GSM1403	○	×	×
DFSM_nolimevp_Modify	DFSM_GSM1403	×	○	○
DFSM_GSM1705	DFSM_GSM1705	○	×	×

air-sea turbulent heat fluxes by increasing surface wind speeds.

- (2) The limit of the Bowen ratio (0.1) is introduced to suppress air-sea sensible heat fluxes.
- (3) A simple parameterization of sea spray [2] is introduced to increase air-sea latent heat flux and to reduce air-sea sensible heat flux.

In Figure 2, the simulated storm overdeveloped in the DFSM\_nolimevp experiment, while the overdevelopment was suppressed in the DFSM\_nolimevp\_Modify experiment. The simulated intensity in the DFSM\_nolimevp\_Modify experiment was consistent with the Regional Specialized Meteorological Center Tokyo best track analysis. In the DFSM\_GSM1705 experiment, overdevelopment of the simulated storm was not improved compared with the result in the DFSM\_nolimevp\_Modify experiment. This suggests that air-sea sensible heat fluxes around the storm center tended to be still excessive.

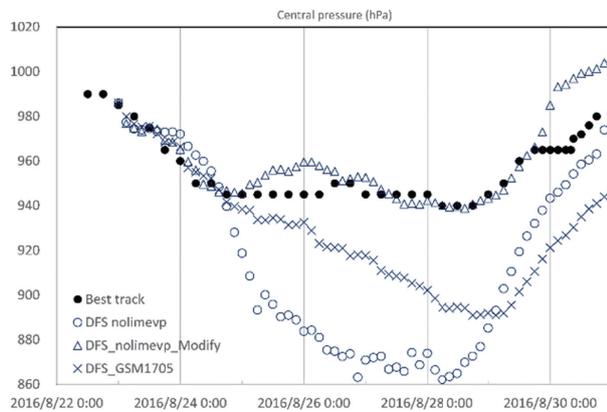


Fig. 2 Time series of central pressure of typhoon Lionrock (2016) simulated from the initial time of 00 UTC 23<sup>rd</sup> August 2016 together with RSMC Tokyo best track analysis.

### 3.3 Influence of air-sea heat and mass transfer processes on typhoon development

In order to investigate the influences of heat and mass transfer processes between atmosphere and ocean on typhoon development, MSSG has cutting-edge process models implemented:

1. Atmosphere-ocean coupling process model [3]
2. Sea-spray process model [4]
3. Heat and mass transfer model under wave-breaking high wind speed [5]

This section reports the research on the above-mentioned list-2, that is, the research on the influence of the sea-spray generated under high-wind speed on the typhoon development.

It is well-known that the sea-spray often forms the so-called evaporation layer, and the layer influence on the heat transfer between atmosphere and ocean. The latent heat transfer is promoted while the sensible heat transfer is suppressed in the evaporation layer, but its extent depends on the meteorological conditions of the layer. Onishi et al. (2016) clarified the sea-spray influence inside idealized evaporation layers, while the influence under realistic condition remains unclear. In this project, the sea-spray influence has been investigated in one of the typhoon events, i.e., Haiyan (2013), targeted for the model intercomparison (TYMIP). Figure 1 shows the MSSG simulation results. The influence of the seaspray can be inferred from the difference between the result with the reference (ordinary) MSSG and that with the sea-spray considering MSSG. It is clear that the track is insensitive to the seaspray while the central pressure is sensitive. The central pressure dropped by 5-10 hPa if the seaspray was considered. This result clearly shows the relevance of the sea-spray process in the typhoon forecast.

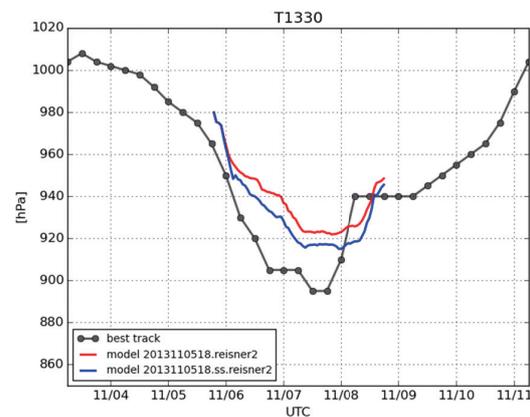
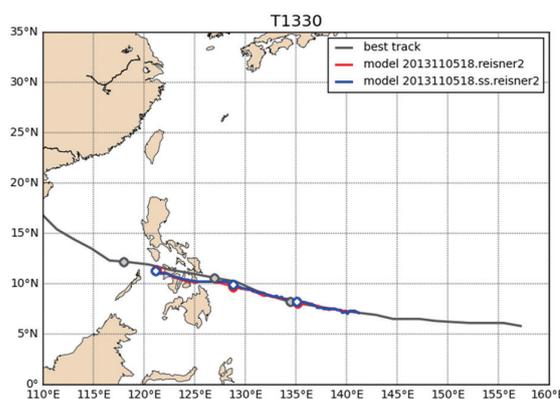


Fig. 3 MSSG simulation results for the track (left) and central pressure (right) of Haiyan (2013). The forecast results with the reference MSSG are shown in red while those with the sea-spray considering MSSG are in blue.

#### 4. Conclusions and future works

The main achievements of this fiscal year are as follows.

- By comparison between the three models, typhoons further developed as air-sea sensible heat fluxes around the storm center were higher.
- DFSM\_GSM 1705 improved excessive development of predicted typhoon considerably due to updating of the physical scheme particularly the surface boundary scheme.
- Reduction of air-sea sensible heat fluxes led to suppressing excessive development of predicted typhoons by suppressing air-sea sensible heat fluxes.
- Predicted central pressures became a little lower by introducing the effect of sea spray into the MSSG.

In the subsequent project, we will continue to analyze the results of numerical experiments obtained in the previous projects and will refine the model based on the findings obtained during the project. In addition, we will try to conduct numerical experiments using a high resolution atmospheric-ocean coupled model to evaluate the effect of sea surface cooling and thereby changes in air-sea sensible heat and latent heat fluxes on typhoon predictions.

#### Acknowledgements

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.*, doi:10.5194/gmd-10-1363-2017 (2017).
- [2] Bao, J., J.M. Wilczak, J. Choi, and L.H. Kantha, 2000, "Numerical Simulations of Air–Sea Interaction under High Wind Conditions Using a Coupled Model: A Study of Hurricane Development," *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2190–2210, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2190:NSOASI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2190:NSOASI>2.0.CO;2) (2000).
- [3] Sasaki, W., R. Onishi, H. Fuchigami, K. Goto, S. Nishikawa, Y. Ishikawa, K. Takahashi, "MJO simulation in a cloud-system-resolving global ocean-atmosphere coupled model," *Geophysical Research Letter*, 43, 9352–9360 (2016).
- [4] Onishi, R., H. Fuchigami, K. Matsuda, K. Takahashi, "Detailed Cloud Microphysics Simulation for Investigation into the Impact of Sea Spray on Air-Sea Heat Flux," *Flow Turbulence and Combustion*, 97, 1111–1125 (2016).
- [5] Komori, S., K. Iwano, N. Takagaki, R. Onishi, R. Kurose, K. Takahashi, N. Suzuki, "Laboratory Measurements of Heat Transfer and Drag Coefficients at Extremely High Wind Speeds," *J. Phys. Oceanogr.* 48, 959–974 (2018).