

# 全球非静力学モデルを用いた高解像度計算による気象擾乱の発生・発達メカニズムとその予測可能性に関する研究

課題責任者

那須野 智江 海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野

著者

那須野 智江<sup>\*1</sup>, 佐藤 正樹<sup>\*3,6</sup>, 富田 浩文<sup>\*1,7</sup>, 野田 暁<sup>\*3</sup>, 三浦 裕亮<sup>\*1,8</sup>, 谷口 博<sup>\*1,9</sup>, 山田 洋平<sup>\*2</sup>, 柳瀬 亘<sup>\*6</sup>, 小玉 知央<sup>\*2</sup>, 原 政之<sup>\*1,10</sup>, 安永 数明<sup>\*4,11</sup>, 清木 達也<sup>\*3</sup>, 吉崎 正憲<sup>\*1,12</sup>, 中野 満寿男<sup>\*2</sup>, 宮川 知己<sup>\*6</sup>, 八代 尚<sup>\*7</sup>, 山浦 剛<sup>\*7</sup>, 久保川 陽呂鎮<sup>\*6</sup>, 沢田 雅洋<sup>\*13</sup>, 池田 美紀子<sup>\*1,2,5</sup>, Ying-Wen Chen<sup>\*3</sup>, Roh Woosub<sup>\*6</sup>, 福富 慶樹<sup>\*14</sup>, 藤田 実季子<sup>\*1</sup>, 大野 知紀<sup>\*6</sup>, 章 若潮<sup>\*5</sup>

\*1 海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野, \*2 海洋研究開発機構 ビッグデータ活用プロジェクトチーム, \*3 海洋研究開発機構 気候変動リスク情報創生プロジェクトチーム, \*4 海洋研究開発機構 大気海洋相互作用分野, \*5 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター, \*6 東京大学 大気海洋研究所, \*7 理化学研究所 計算科学研究機構, \*8 東京大学 理学部, \*9 神戸高専 一般科 (理科), \*10 埼玉県環境科学国際センター, \*11 富山大学 理学部, \*12 立正大学 地球環境科学部, \*13 気象庁 気象研究所, \*14 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

本課題では、JAMSTECにおける集中観測を主な対象として全球非静力学モデル NICAM を用いた高解像度数値実験を行うことにより、アジア域に災害をもたらす日内から季節程度の気象擾乱（台風、熱帯波動、季節内振動・マッデン・ジュリアン振動 [MJO]、モンスーンなど）について、発生・発達のメカニズムや相互関係を明らかにし、予測改善への指針を得ることを目的とする。H28 年度は、2008 年の集中観測で初期過程が捉えられた台風事例について、全球 3.5km 格子の数値実験および解析を行った。その結果、台風発生のメカニズムについて、季節内振動に伴う大規模な下層の渦度が潜熱放出を通して深まることで、台風初期渦の中心付近での組織的な潜熱放出を促進し、直立した深い中心核構造の形成をもたらしたことが分かった。また、台風の進路予測について、全球 3.5km 格子モデルでは、台風中心付近の鉛直流の分布がより現実的に表現されるために、現業モデルに見られた顕著な北進傾向が改善されたことが分かった。H29 年に計画されている YMC 国際集中観測での実時間予測に向け、H27 年の Pre-YMC 集中観測における予測計算の検証と問題点の検討を行った。

キーワード：全球非静力学モデル, 熱帯気象予測, 熱帯集中観測, 台風, 季節内振動

## 1. 研究目的

本課題では、アジア域および世界各地に災害をもたらす日内から季節程度の気象擾乱・変動現象（台風、熱帯波動、マッデン・ジュリアン振動 [MJO]、モンスーンなど）について、全球非静力学モデル（Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM; Satoh et al. 2014[1]）を用いた高解像度数値計算を行い、発生・発達のメカニズムや相互関係を明らかにすることを目的とする。NICAM は雲・降水に関する物理プロセスを詳細に計算する全球モデルであり、上記のような様々な時空間スケールの気象擾乱の内部構造や相互作用の調査に適している。JAMSTEC および連携研究機関において開発が進められ、これまでに地球シミュレータを用いた計算により世界的な研究実績を積んでいる（Miura et al. 2007[2], 2015[3]; Nasuno et al. 2016[4]; Nakano et al. 2017[5] 他）。本課題では、JAMSTEC における集中観測を主な対象とした計算を行い、観測・モデルデータを総合的に用いた現象理解およびモデルの検証を行うことにより、中期計画の達成を推進する。

## 2. 全球 3.5km 格子大気モデルによる台風 Fengshen (2008) の数値実験

### 2.1 台風発生過程における季節内振動の役割

西太平洋における台風の発生過程には、アジアモンスーンや季節内振動といった大規模な変動（数千 km）から、台風の中心核を形成する目の壁雲（数十 km）まで、幅広い時空間スケールの変動現象が複雑に関与し、その予測は容易ではない。時間スケールの比較的長い季節内振動の影響を正確に把握し、シミュレートすることができれば、台風発生予測の期間延長が期待される。また、数値モデルにおいて数 km 以下の水平格子間隔を用いれば、台風中心付近の構造や力学過程までをほぼ解像することができる。そこで本課題では、季節内振動の影響下で発生した台風 Fengshen (TY0806) を対象に、全球 3.5km 格子の数値実験を行った。この台風は、2008 年 6 月半ばに PALAU2008 集中観測網を通過した熱帯雲擾乱が、フィリピン東海上で台風強度に至った事例である（Yamada et al. 2012[6]）。数値実験は、ECMWF YOTC analysis を初期値デー

タとして用い、発生約4日前の6月15日0000 UTCを初期時刻として行った。

図1bに計算初期時刻の西太平洋域の下層の風速場を示す。モンスーンの開始期に発達した季節内振動により、赤道域に西風が発生し、大規模な低気圧性の渦が形成された。この大規模な渦は季節内振動に伴う湿潤域に対応し、数値実験では、潜熱放出により下層の渦度が上方に伸長して、台風の発生に好都合な環境場となった。図1aに対流圏中層の渦度(6月16, 17, 18日)と6/15-16日の潜熱放出率を示す。北東から南西に伸びる中層の気圧の谷(正の渦度域)が、下層渦の上空で強化されていることが分かる。台風の初期擾乱はこの大規模な渦域の北東部に到達し、深い対流との相互作用により加速され、台風強度に至った。図2に初期擾乱の中心付近を拡大した中層と下層の渦度場を示す。6月17日には下層の渦中心と中層の中心が離れ、渦の鉛直軸が傾いているが、渦中心の近傍で連続的に深い対流が発生して潜熱が放出されるこ

とにより、6月18日には上下の渦中心が一致して、直立した台風の中心核構造が確立している。同様の発達過程は、雲物理過程の設定を変えた他の複数の計算でも共通して見られた。(Nasuno et al. 2016[4])

## 2.2 台風進路の高解像度化による改善

Fengshen は、現業予報の進路誤差が大きかった事例として知られる。図3aに台風進路を示す。現業予報では進路の北進傾向が顕著である(図3a青線)。本研究の全球3.5km格子数値実験では、この誤差が大幅に軽減された(図3a赤線)。その原因を渦度収支解析等により調べた。2つのモデルでシミュレートされた台風中心付近の対流圏下層の鉛直速度の分布を図3b, cに示す。全球3.5km格子モデルでは、台風中心の西側に上昇流域が形成され、これに伴う渦度の生成が継続的に見られた(図3b)。一方、解像度の粗い気象庁全球予報モデルでは、台風中心域の風速分布が十分に解像されず鉛直速度が弱くなるため、西

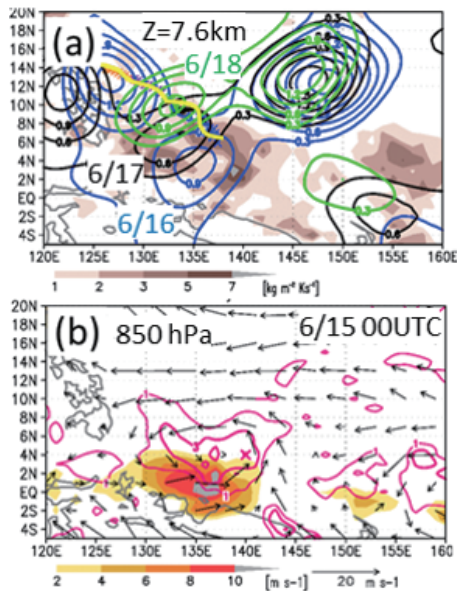


図1 (a) 全球3.5km格子数値実験における対流圏中層の渦度(等値線)と潜熱放出率(陰影)。黄線: 台風中心位置。(b) 初期場の下層西風(色)と渦度(赤線)。Nasuno et al. (2016, Geoscience Letters) Fig. 3c, Fig. 1に加筆、引用。

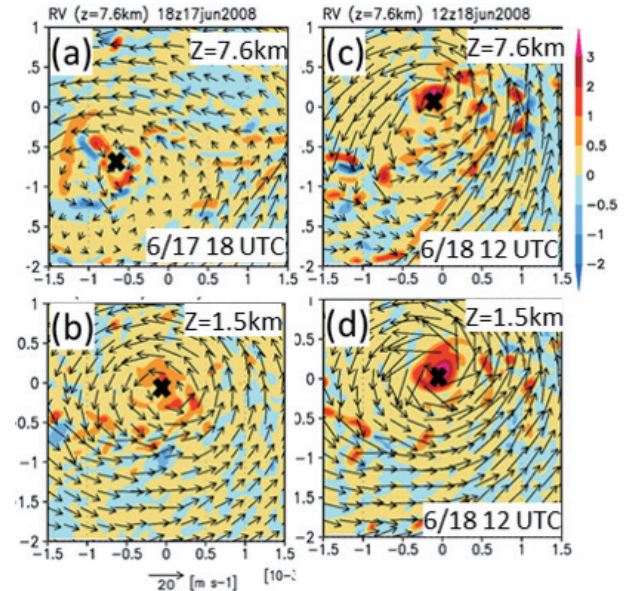


図2 台風中心付近の渦度(色)と風ベクトル。(a)(b) 6/17 18UTC, (c)(d) 6/18 12 UTC。(a)(c) 対流圏中層(z=7.6km)および(b)(d) 下層(z=1.5km)。xは渦中心位置。Nasuno et al. (2016, Geoscience Letters) Fig. 6に加筆、引用。

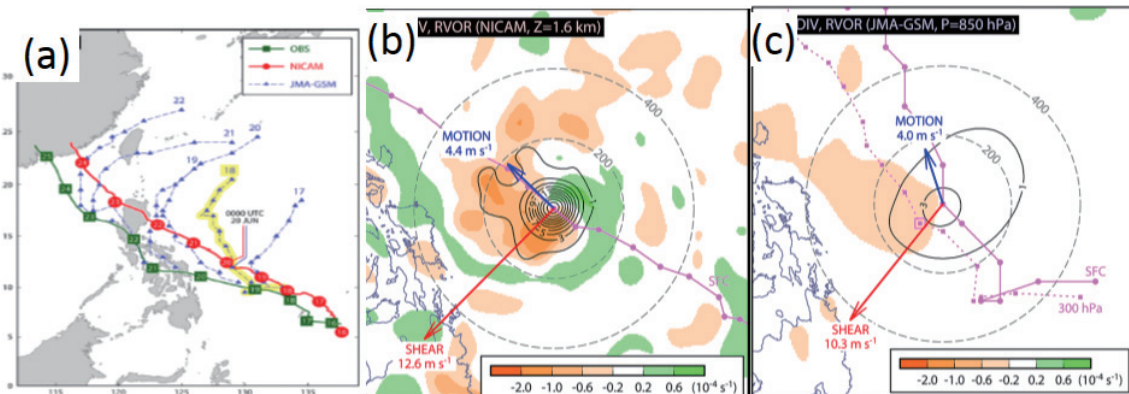


図3 (a) 台風進路。観測(緑)、全球3.5km格子モデル(赤)、気象庁全球モデル(青)。(b) 全球3.5km格子モデルおよび(c) 気象庁全球モデルにおける対流圏下層の鉛直速度(色)と渦度(等値線)。青矢印: 台風の移動ベクトル。Yamada et al. (2016, SOLA) Fig. 1a, Fig. 2b, dを引用。

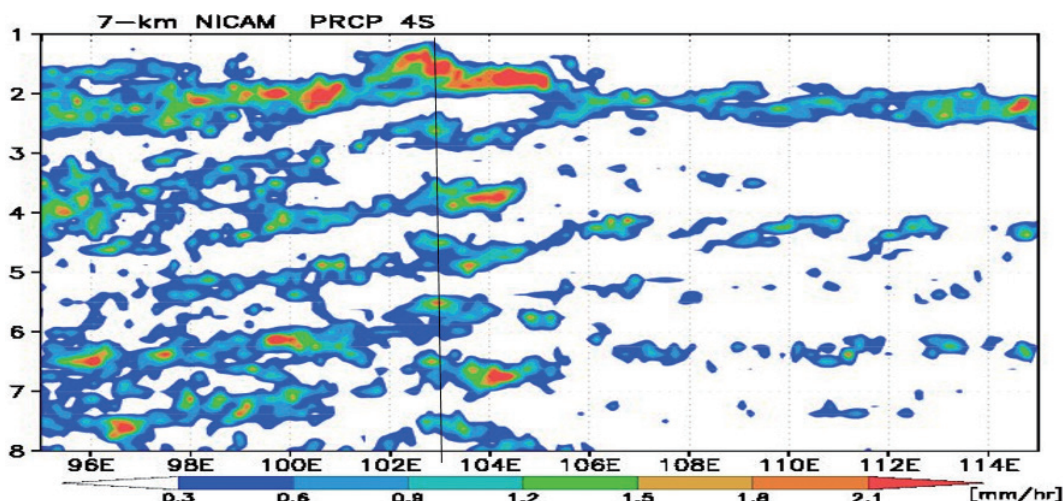


図4 全球7km格子のNICAMを用いた7日間の予測計算における降水の時間—経度図。2015年11月各日の0000 UTCを初期時刻とする計算結果を合成。

側での渦度の生成が小さかった(図3c)。このため、現業予報では西向き成分に対し一般風による北向き成分が卓越して、北進誤差が現れたと解釈される。(Yamada et al. 2016[7])

### 3. 集中観測 Pre-YMC 予測計算の再現性の検証

当課題では、H29-H30年度に中期計画の一環として計画されている the Years of the Maritime Continent (YMC) 国際集中観測にモデル班として参加し、NICAMを用いた実時間予測と予測結果の配信を担当する。YMCの予備研究として、H27年11-12月に集中観測”Pre-YMC”がスマトラ南西において実施され、当課題において地球シミュレータ上にリアルタイム予測システムを構築し、実時間予測を行って、結果を配信した(H27年度 Earth Simulator Annual Report 参照)。YMC集中観測での運用に向け、予測結果の精度を検証し課題点の明確化を行った。集中観測の主対象である、海大陸域の降水の日周期変動と熱帯の大規模な擾乱MJOについて重点的に解析を行った。図4に全球7km格子の7日予測計算における、降水量の時系列の観測期間前半の合成図を示す。観測点付近(103E, 4S)で、夜間に降水が強まり、西側に伝播していく日周期変動が良く再現されている。課題点として、観測で降水がピークとなる沿岸部において、モデルでは降水が弱まる傾向があり、海陸風の日周期変動の再現性改善の必要性が示唆される。MJOについては、MJOスキルスコアによる定量評価を行い、全球14km格子の30日予測計算について、平均的に2-3週間の予測スキルを確認した(図略)。

### 4. まとめと今後の課題

現在、世界的に全球モデルの高解像度化が加速されているが、水平格子間隔5km以下のモデルは殆どが試験的な運用の段階にあり、現象のメカニズムに関する研究例は極めて少ない。本課題において、台風の発生事例における季節内振動の役割や、モデルの高解像度化による進路予測改善の原因を明らかにしたことは、今後の展開の重要な足掛かりとなる。高解像度化により台風進路の誤

差が改善されたことは、全球7km格子モデル台風予測相互比較プロジェクト(公募課題「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」; Nakano et al. 2017[5])の成果とも整合的である。H28年度は2008年の集中観測に関連する事例を取り上げたが、今後より多くの事例を扱って得られた知見を検証し、より広い見解を得る必要がある。H29-H30年度には、中期計画の一環として計画されている、YMC集中観測を対象とする予測・再現計算を行い、熱帯の短周期擾乱の実態および、それらの季節内振動やモンスーンとの相互関係の包括的な理解に取り組む。

### 謝辞

本研究は、地球シミュレータ所内課題として採択され、地球シミュレータを用いて実施された。また研究の実施にあたり、JSPS 科研費 JP26400475、文部科学省 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」およびポスト「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」の支援を受けた。

### 文献

- [1] Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., and Kubokawa, H., “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development,” *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, 2014.
- [2] Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, and K. Oouchi, “A Madden-Julian Oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model,” *Science*, 318, 1763-1765, 2007.
- [3] Miura, H., T. Suematsu, and T. Nasuno, “An ensemble hindcast of the Madden-Julian Oscillation during the CINDY2011/DYNAMO field campaign and influence of seasonal variation of sea surface temperature,” *Journal of*

- the Meteorological Society of Japan, 93A, 115-137, 2015.
- [4] Nasuno, T., Yamada, H., Nakano, M., Kubota, H., and Yoshida, R., “Global cloud-permitting simulations of Typhoon Fengshen (2008)”, *Geoscience Letters*, 3, 32, DOI: 10.1186/s40562-016-0064-1, 2016.
- [5] Nakano, M., Wada, A., Sawada, M., Yoshimura, H., Onishi, R., Kawahara, S., Sasaki, W., Nasuno, T., Yamaguchi, M., Iriguchi, T., Sugi, M., and Takeuchi, Y., “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, 2017.
- [6] Yamada H, Nasuno T, Yanase W, Shirooka R, and Satoh M, “Genesis of Typhoon Fengshen (2008) from Vortex Superposition: PALAU Field Experiment and a Global Cloud-Resolving Simulation.”, Abstracts of the 30th conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Ponte Vedra Beach, Florida, 15–20 April 2012, 2012.
- [7] Yamada, H., Nasuno, T., Yanase, W., and Satoh, M., “Role of the vertical structure of a simulated tropical cyclone in its motion: A case study of Typhoon Fengshen (2008)”, *SOLA*, 2016, Vol. 12, 203–208, doi:10.2151/sola.2016-041, 2016.

# Study of Cloud and Precipitation Processes Using a Global Cloud Resolving Model

Project Representative

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

Authors

Tomoe Nasuno<sup>\*1</sup>, Masaki Satoh<sup>\*3,6</sup>, Hirofumi Tomita<sup>\*1,7</sup>, Akira T. Noda<sup>\*3</sup>, Hiroaki Miura<sup>\*1,8</sup>, Hiroshi Taniguchi<sup>\*1,9</sup>, Yohei Yamada<sup>\*2</sup>, Wataru Yanase<sup>\*6</sup>, Chihiro Kodama<sup>\*2</sup>, Masayuki Hara<sup>\*1,10</sup>, Kazuaki Yasunaga<sup>\*4,11</sup>, Tatsuya Seiki<sup>\*3</sup>, Masanori Yoshizaki<sup>\*1,12</sup>, Masuo Nakano<sup>\*2</sup>, Tomoki Miyakawa<sup>\*6</sup>, Hisashi Yashiro<sup>\*7</sup>, Tsuyoshi Yamaura<sup>\*7</sup>, Hiroyasu Kubokawa<sup>\*6</sup>, Masahiro Sawada<sup>\*13</sup>, Mikiko Ikeda<sup>\*1,2,5</sup>, Ying-Wen Chen<sup>\*3</sup>, Roh Woosub<sup>\*6</sup>, Yoshiaki Fukutomi<sup>\*14</sup>, Mikiko Fujita<sup>\*1</sup>, Tomoki Ohno<sup>\*6</sup> and Ruochao Zhang<sup>\*5</sup>

\*1 Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*2 Project Team for HPC Advanced Predictions utilizing Big Data, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*3 Project Team for Risk Information on Climate Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*4 Department of Coupled Ocean-Atmosphere-Land Processes Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*5 Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*6 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, \*7 Advanced Institute for Computational Science, RIKEN, \*8 School of Science, The University of Tokyo, \*9 Department of Science, Kobe City College of Technology, \*10 Center for Environmental Science in Saitama, \*11 Department of Earth Science, University of Toyama, \*12 Faculty of Geo-environmental Science, Risho University, \*13 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, \*14 Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

The objective of this project is to deepen our understanding of diurnal to seasonal atmospheric variabilities (e.g., tropical cyclones, tropical waves, Madden-Julian Oscillation [MJO], monsoons) by high-resolution global simulations using Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM), and to improve the forecast skill of these phenomena. In FY2016 we conducted a set of global 3.5-km mesh simulations of Typhoon Fengshen, the early formation stage of which was observed during the PALAU2008 field campaign, to investigate the multi-scale processes of the tropical cyclone (TC) formation. The results showed that the large-scale lower tropospheric gyre associated with the boreal summer intraseasonal oscillation (ISO) extended upward by latent heat release. This facilitated the successive formation of deep convection close to the storm center and subsequent establishment of the TC inner core. It was also found that the better representation of the vertical velocity within the TC inner core by the high-resolution simulation reduced the northward track bias, which was pronounced in the operational forecasts.

**Keywords:** global nonhydrostatic model, tropical weather forecast, tropical intensive observation, tropical cyclone, intraseasonal oscillation

## 1. Introduction

This project aims for better understanding of the mechanisms of severe meteorological disturbances, which are in many cases embedded in large-scale disturbances, and improving their representation in the numerical model. To achieve this goal, we perform numerical experiments using Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. [1]), which is capable of representing global cloud and precipitation in a seamless framework. Our major target is the phenomena observed during the JAMSTEC field campaigns. We make comprehensive analysis using the simulation, observation, and analysis data.

## 2. Global 3.5-km mesh simulation of Typhoon Fengshen (2008)

### 2.1 Roles of the intraseasonal oscillation in the TC formation

The tropical cyclone (TC) formation over the western Pacific occurs under multi-scale interactions among large-scale variabilities, such as the intraseasonal oscillation (ISO) or monsoon circulations (O[10,000 km]), synoptic-scale waves and troughs (O[1,000 km]), and the mesoscale systems including the eyewall clouds (O[10 km]). Because of its complexity, an accurate prediction of the TC genesis is a tough problem. The ISO is drawing an increasing attention of the operational centers

as a source of extended range predictability by its long time scale. A high-resolution numerical model with horizontal mesh size  $<5$  km marginally resolves TC inner core structure and the associated dynamical processes. Therefore, in FY2016 we investigated the formation process of Typhoon Fengshen (2008) by a series of global 3.5-km mesh simulations using NICAM, with our focus on the role of the large-scale variability (e.g., ISO). Fengshen formed on 19 June 2008, a few days after its precursor passing over the PALAU2008 observational array (Yamada et al. 2012[2]). Simulations were initialized using the ECMWF YOTC operational analysis at 0000 UTC 15 June 2008.

Figure 1b shows the lower tropospheric wind and vorticity fields at the initial time. Equatorial westerlies associated with an ISO event, which occurred during the onset period of the western North Pacific summer monsoon, was intensified to form a large-scale cyclonic gyre. The gyre was collocated with the humid region associated with the ISO. In the simulation, the lower tropospheric gyre extended upward by latent heat release within the gyre, providing a favorable condition for TC formation. Figure 1a presents the middle tropospheric daily mean vorticity. A synoptic-scale wave intruding from mid-latitude extended southwestward and amplified by the latent heat release above the lower tropospheric gyre. This environment allowed successive occurrences of deep convection close to the incipient vortex of Fengshen, which traveled along the northeast rim of the large-scale gyre, and its subsequent development reaching typhoon intensity. Figure 2 zooms in the vorticity fields around the precursor of Fengshen in the lower

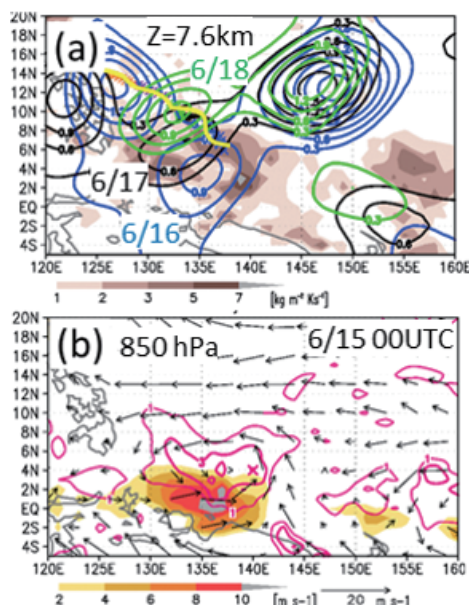


Fig. 1 (a) Vertically integrated latent heating rate (shade) and middle tropospheric daily mean vorticity (contours) in the global 3.5-km mesh simulation, (b) zonal velocity (color) and relative vorticity (red contours) at 850 hPa in the initial data (ECMWF YOTC operational analysis. (Fig. 3c and Fig. 1 of Nasuno et al. [2016, Geoscience Letters] with modifications)

and middle troposphere. On 17 June, the center of the vortex was distant between the two levels, indicating a tilted structure of the vorticity axis (Fig. 2a, b). On 18 June, the center at the both levels coincided, and an upright TC inner core structure was established (Fig. 2c, d). The same sequence of processes was also found in simulations varying cloud microphysics parameters (Nasuno et al. 2016[3]).

## 2.2 Reduction of the track bias in the 3.5-km mesh simulation

Fengshen is known by the large track error in the operational forecasts. Figure 3a shows the observed and simulated tracks of Fengshen. In the Japan Meteorological Agency (JMA) global model (blue lines), northward track biases were pronounced. In the global 3.5-km mesh simulation (red line), the bias was less evident. We examined the reasons for the reduction of the track error in the high-resolution simulation by vorticity budget analysis. Figures 3b and 3c show the lower tropospheric vertical velocity and vorticity fields in the two models. In the global 3.5-km mesh model, upward velocity and associated production of positive vorticity successively appeared within the 100-km radius of the vortex center on the west side (Fig. 3b). In the JMA global model, in contrast, vertical motion is much smaller due to the coarse model resolution, and vorticity production was weak (Fig. 3c) against the northward advection by the environmental flow. These elucidate the difference in the track forecast between the two models (Yamada et al. 2016[4]).

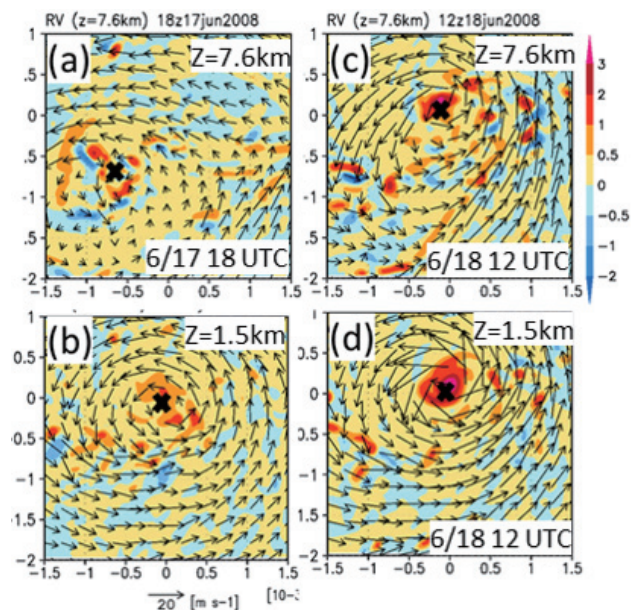


Fig. 2 Zoomed plots of the relative vorticity (color) and wind vectors at (a) (b) 1800 UTC 17 June and (c) (d) 1200 UTC 18 June, 2008 at (a) (c)  $z = 7.6$  km and (b) (d)  $z = 1.5$  km around the center of the incipient vortex of Fengshen in the global 3.5-km mesh simulation. Crosses indicate the vortex center. (Fig. 6 of Nasuno et al. [2016, Geoscience Letters] with modifications)

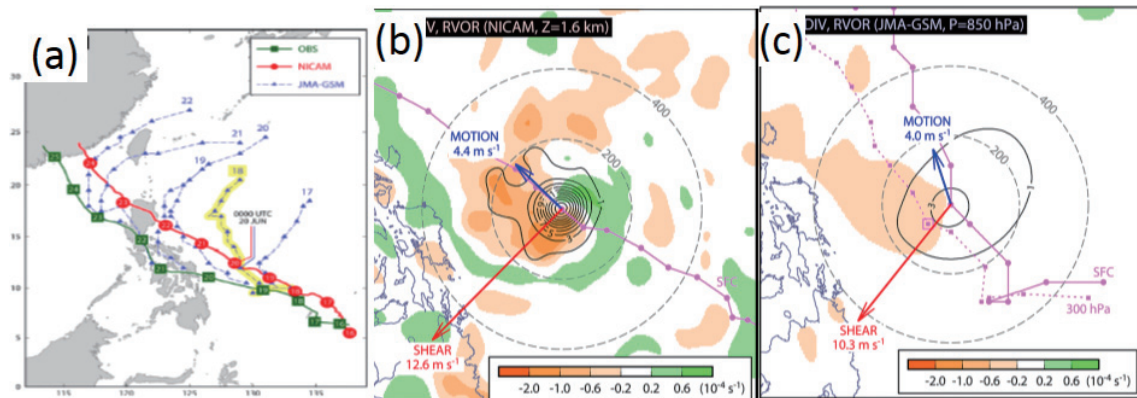


Fig. 3 (a) Track of Fengshen [best track (green), the global 3.5-km mesh model (red), the JMA global model (blue)]. Vertical velocity (color) and relative vorticity (contour) in (b) the global 3.5-km mesh model and (c) the JMA global model in the lower troposphere at 0000 UTC 20 June, 2008. (Fig. 1a, Fig. 2b and 2d of Yamada et al. [2016, SOLA])

### 3. Summary and Future study

The use of high-resolution is a worldwide direction toward better simulation/prediction of the TC formation, life cycle, and structure, but availability of the global simulation with <5 km mesh sizes are still very limited. Our results suggest a significant role of large-scale variability on the TC genesis process and a possible impact of resolving the TC inner core structure on its track forecast. In future studies, validation of our findings and exploration of extensive understanding by accumulation of case studies are warranted. In FY2017-2019, we plan to deal with more simulation cases in synergy with the years of the Maritime Continent (YMC) field campaign (<http://www.jamstec.go.jp/ymc/index.html>).

### Acknowledgements

All the simulations were conducted on the Earth Simulator. This study was partly supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP26400475, HPCI Strategic Programs for Innovative Research Field 3 of MEXT and FLAGSHIP 2020 project of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT).

### References

- [1] Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., and Kubokawa, H., “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development,” *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, 2014.
- [2] Nasuno, T., Yamada, H., Nakano, M., Kubota, H., and Yoshida, R., “Global cloud-permitting simulations of Typhoon Fengshen (2008),” *Geoscience Letters*, 3, 32, DOI: 10.1186/s40562-016-0064-1, 2016.
- [3] Yamada H, Nasuno T, Yanase W, Shirooka R, and Satoh M, “Genesis of Typhoon Fengshen (2008) from Vortex Superposition: PALAU Field Experiment and a Global Cloud-Resolving Simulation.”, Abstracts of the 30th conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Ponte Vedra Beach, Florida, 15–20 April 2012, 2012.
- [4] Yamada, H., Nasuno, T., Yanase, W., and Satoh, M., “Role of the vertical structure of a simulated tropical cyclone in its motion: A case study of Typhoon Fengshen (2008),” *SOLA*, 2016, Vol. 12, 203–208, doi:10.2151/sola.2016-041, 2016.

