

高解像度全球非静力学モデルを用いた台風の将来気候予測に関する研究

課題責任者

小玉 知央

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

著者

小玉 知央^{*1}, 山田 洋平^{*1}, 中野 満寿男^{*2}, 野田 暁^{*3}, 清木 達也^{*2}, 大野 知紀^{*3}, 那須野 智江^{*2}, 佐藤 正樹^{*4,3}, 宮川 知己^{*4}, Chen Ying-Wen^{*4}, 八代 尚^{*5}, 杉 正人^{*6}

*¹ 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, *² 海洋研究開発機構シームレス環境予測研究分野, *³ 海洋研究開発機構気候モデル高度化研究プロジェクトチーム, *⁴ 東京大学大気海洋研究所, *⁵ 理化学研究所計算科学研究機構, *⁶ 気象研究所

台風は日本をはじめ世界各地で大きな自然災害をもたらすことから、信頼性の高い将来気候予測は社会的見地からも極めて重要である。このような予測の実現に向け、本課題では最新版の全球非静力学モデル NICAM を用い、CMIP6 HighResMIP のプロトコルに従って複数の水平解像度で歴史再現実験を実施した。1950 年を初期条件とし、水平 56、28 km メッシュ実験を 65 年、14 km メッシュ実験を 11 年実施した。NICAM は最近行われた雲微物理スキーム改良など最新の更新を適用したものをを用いた。歴史再現実験の結果の解析から、水平解像度を高めることで台風の構造や海盆毎の台風発生数がよりよく再現される傾向にあることが分かった。また、以前の NICAM を用いた気候実験に比べて基本場の再現性が向上していることが確認でき、今回得られた台風の再現性の向上により影響を与えていると考えられる。本課題において得られた歴史再現実験データは CMIP6 の枠組みで公開済みである。

キーワード：台風，気候変動，全球非静力学モデル，CMIP6，HighResMIP

1. はじめに

台風は日本をはじめ世界各地で大きな自然災害をもたらすことから、その将来予測には高い社会的関心が持たれている。特に台風とそれに伴う暴風、豪雨等について海盆スケール以下で信頼性の高い予測を行うことができれば、温暖化適応策の観点から極めて有用である。また、台風の発生や急発達メカニズム、気候形成における台風の役割、といった科学的問題を考える上でも台風の将来予測に挑戦することには大きな意義がある。

台風を強度・構造も含めて再現するためには高い水平解像度が必要である。我々はこれまで全球 14 km 格子の非静力学大気モデル NICAM[1-3] を用いて台風をはじめとする気候予測研究を進めてきた（たとえば[4]）。並行して衛星データ等を用いたモデル改良[5, 6]などにも取り組んでおり、CMIP6（結合モデル比較プロジェクト）に向けて気候バイアスが低減したモデル[7]を構築した。

本課題では改良した最新版の NICAM を用い、CMIP6 HighResMIP（高解像度モデル比較プロジェクト）[8] のプロトコルに従って歴史再現実験を行った。本稿では台風および基本場のモデル再現性について紹介する。

2. 実験設定

表 1 は実験に用いたバージョン（NICAM16-S[7]）のモデル設定、表 2 は実験設定である。以前の気候実験[25]との大きな違いは、TRMM 衛星データに基づいて改良された雲微物理スキーム[5, 6]を用いることで現実的な雪の鉛直分布が再現されるようになったことである。また、地形性重力波抵抗スキーム、自然・人為起源エアロ

ゾル、陸面モデルにおける雪解け沼の導入を行うとともに、スラブ海洋モデルは使用せず海面温度は外部境界条件に固定した。これらの変更による気候場へのインパクトの詳細については投稿中のモデル記述論文[7]を参照されたい。初期条件は 1950 年 1 月 1 日とし、水平解像度 56 km、28 km メッシュ実験を 65 年間、14 km メッシュ実験を 11 年間実施した。

なお、本課題で得られたデータは DIAS（データ統合・解析システム）を通じて ESGF (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) において公開されており、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）AR6（第 6 次報告書）等への貢献を期待している。

3. 解析方法

緯度経度格子へ変換した計算結果に対して台風トラックリング[4]を適用した。具体的には、海面気圧の極小を検出して追尾し、最大地上風速、下層渦度、暖気核、寿命といった基準を元に台風かどうかを判定した。水平メッシュサイズが異なる実験から現実的な台風発生数を得るために暖気核の基準を調整した点を除き、今回用いた基準は[4]と同一である。

表 1 CMIP6 向け NICAM の主な物理過程

雲微物理	改良版シングルモーメントバルク雲微物理 NSW6 [9, 5, 6]
積雲対流・大規模凝結	利用せず
放射	MstrnX [10]、更新版放射テーブル[11]、

	雲微物理との整合化
乱流	MYNN レベル2 [12, 13]
重力波	地形性重力波抵抗 [14]
陸面過程	MATSIRO [15]、湿り沼スキーム [16]

表2 NICAM HighResMIP 歴史再現実験の設定

実験期間	1950–2014 (56 km, 28 km メッシュ) 1950–1960 (14 km メッシュ)
初期条件	ERA-20C 再解析[17]
海水面温度・ 海水密度	HadISST2 ベースの 0.25° 日平均値 [18]
自然起源エア ロゾル	低解像度のエアロゾル結合 NICAM の気候値 (対流圏)、歴史の変動デー タ (成層圏)
人為起源エア ロゾル	簡易 プリウム モデル MACv2-SP[19]
温室効果気体	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , CFC-11, CFC-12 など の全球平均濃度[20]
太陽放射	バンド毎の歴史の変動データ[21]
オゾン	歴史の変動データ[22]
葉面積指数	2004-2013 の月平均気候場[23, 24]
地形	A 地形[7]

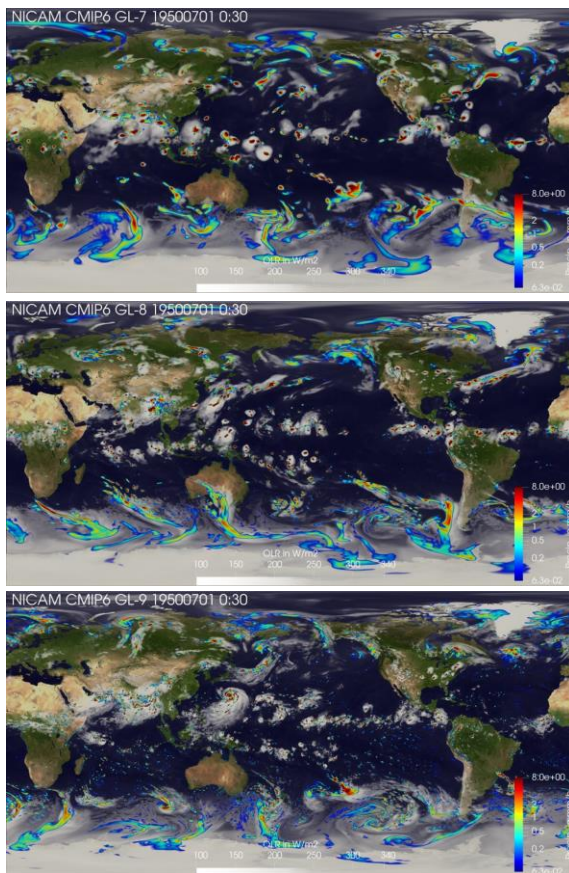


図1 積分開始1年目の北半球夏季のある日における OLR (外向き長波放射) および降水のスナップショット。上から順に、56 km、28 km、14 km メッシュ実験。

4. 結果

はじめにシミュレーション結果の特徴を俯瞰するため、北半球夏季における OLR (上向き長波放射; 気象衛星ひまわりの赤外雲画像に概ね対応) および降水量のスナップショットを図1に示す。水平 56 km メッシュ実験においては熱帯を中心に巨大な雲塊が表現され、雲域と晴天域のコントラストが大きい。雲塊の多くは渦を巻いている。28、14 km とメッシュサイズが細くなるにつれて雲塊のサイズは縮小し、十分ではないものの細かい対流構造が表現されるようになる。また、台風の眼やレインバンドが見られるようになり、台風の構造が現実的に再現され始めていることを示している。

図2aは全球、図3は海盆毎の台風発生数である。全球平均の台風発生数はメッシュサイズにあまり依存せず、どの実験も観測の発生数をよく捉えている。海盆毎の結果からは、インド洋を除きメッシュサイズは細かい方が現実的な発生数を捉えている傾向がわかる。なお、特に弱い台風の発生数はトラッキング手法に強く依存し、先行研究[29]のように異なるメッシュサイズの実験結果を同一のメッシュサイズに変換し同一のしきい値を用いた場合、メッシュサイズが粗い実験ほど台風発生数が過剰になることがわかっている (図省略)

図2bは中心気圧と最大風速の関係である。強い台風に注目すると、メッシュサイズが細かいほど気圧に對す

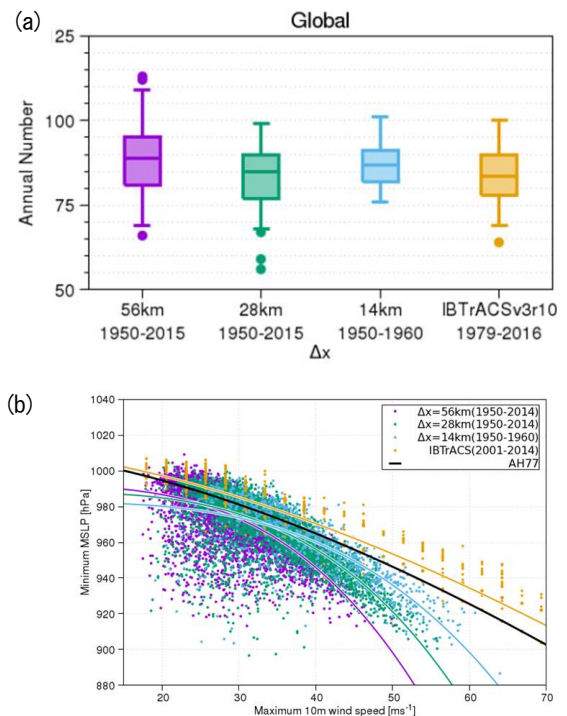


図2 (a) 全球における台風発生数の箱ひげ図。各水平解像度および観測に基づくデータ (IBTrACS [26]) の結果を示す。(b) 台風の最大風速と最低中心気圧の関係。黒線は観測に基づく関係式[27]

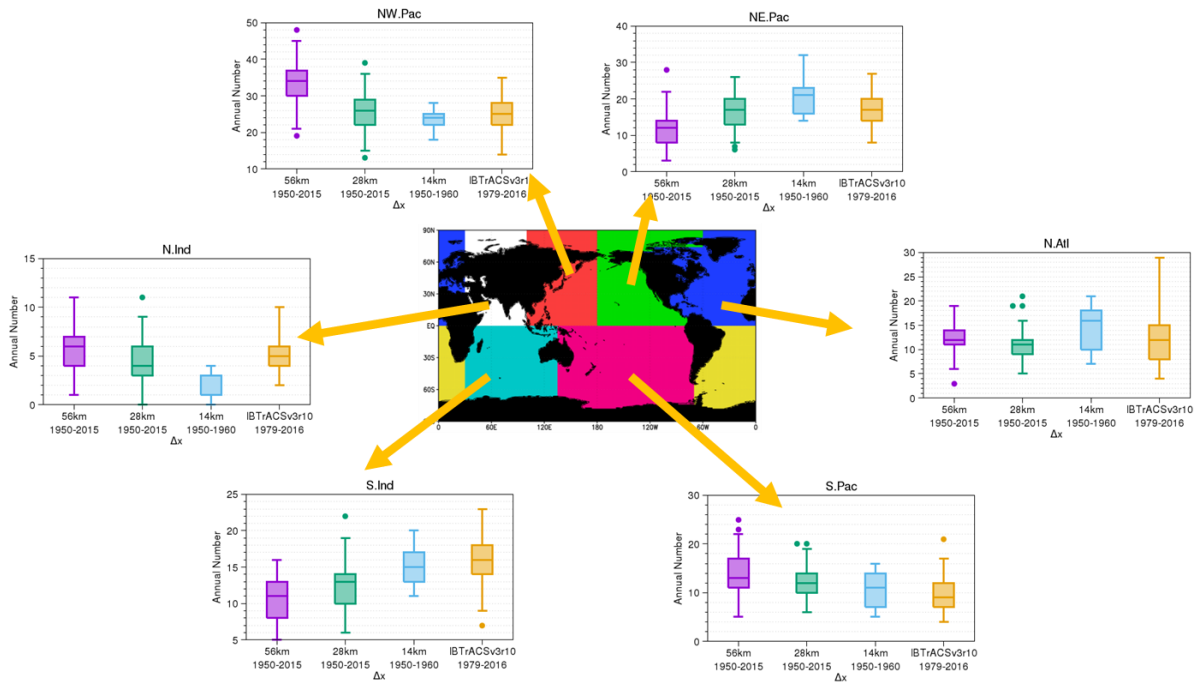


図3 図2aと同じ。但し海盆毎の台風発生数。

る最大風速は強まる傾向にある。これは台風の水平構造が再現され始めていること（図省略）と整合的である。また、14 km メッシュ実験においても非常に強い台風に伴う最大風速は再現できておらず、更なる高解像度化や地上風速の評価方法検討などを進める必要がある。

以上のような台風の良好な再現性は、基本場の再現性の向上と関連していると考えられる。その一例として、東西風のバイアスを図4に示す。従来のNICAMに比べて最新版のNICAMではジェット的位置および強度が改善する傾向にある。東西風は台風の進路だけでなく台風発生位置にも大きな影響を与えることが分かってきている（図省略）。また、従来のNICAMには大陸上において地上気温が高温になるバイアスが存在したが、今回はこれが大幅に縮小したことが分かっている（図省略）。

5. 今後の展望

翌年度（2019年度）の課題において、56 km、28 km メッシュ実験については2050年まで延長し、14 km メッシュ実験についても2040年代のタイムスライス実験を行っている。従って、今後は台風の温暖化応答について詳しく調べることが可能になる。

台風の発生は年々変動が大きいため、台風に伴う暴風といった極端現象の評価を行うためには今回のようなシングルランでは不十分である。将来的には高解像度・大規模アンサンブル気候実験による研究が重要になってくると考えられる。また、スーパー台風を再現するためにはさらに細かい雲解像スケールの水平解像度を用いることが望ましい。引き続きメッシュサイズを細かくするとともにモデル精緻化や効率化を進める予定であ

る。

謝辞

本研究は環境再生保全機構の環境研究推進費（2RF-1701）、および文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラム・ポスト「京」重点課題4の支援を受けて実施した。

文献

- [1] Tomita, H. and M. Satoh, “A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid”, *Fluid Dyn. Res.*, vol.34, no.6, pp.357–400, June 2004.
- [2] Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, “Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations”, *J. Comput. Phys.*, vol.227, no.7, pp.3486–3514, March 2008.
- [3] Satoh, M. and Coauthors, “The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development”, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1:18, December 2014.
- [4] Yamada, Y., M. Satoh, M. Sugi, C. Kodama, A. T. Noda, M. Nakano, and T. Nasuno, “Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model”, *J. Clim.*, vol.30, no.23, pp.9703–9724, 2017.
- [5] Roh, W. and M. Satoh, “Evaluation of Precipitating Hydrometeor Parameterizations in a Single-Moment

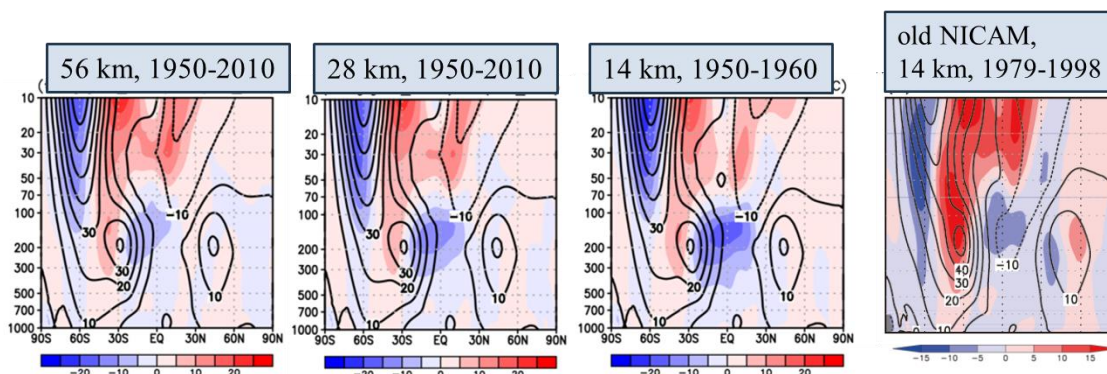


図4 6–8月における東西平均東西風のバイアス（シェード）。(a) 56 km NICAM、(b) 28 km NICAM、(c) 14 km NICAM、(d) 14 km AMIP 実験版 NICAM。等値線およびバイアスの比較対象は ERA-20C[17] (a-c) および JRA-55[28] (d)。平均期間は各パネルに記載。単位 m/s。

Bulk Microphysics Scheme for Deep Convective Systems over the Tropical Central Pacific”, *J. Atmos. Sci.*, vol.71, no.7, 2654–2673, 2014.

[6] Roh, W., M. Satoh, and T. Nasuno, “Improvement of a Cloud Microphysics Scheme for a Global Nonhydrostatic Model Using TRMM and a Satellite Simulator”, *J. Atmos. Sci.*, vol.74, no.1, 167–184, 2017.

[7] Kodama, C. and Coauthors, “The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments”, submitted to *Geosci. Model Dev.*

[8] Haarsma, R. J., and Coauthors, “High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6”, *Geosci. Model Dev.*, vol.9, no.11, pp.4185–4208, November 2016.

[9] Tomita, H., “New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice”, *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol.86A, pp.121–142, 2008.

[10] Sekiguchi, M., and T. Nakajima, “A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model”, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol.109, no.17–18, pp.2779–2793, 2008.

[11] 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.*, vol.119, no.11, pp.6681–6701, June 2014.

[12] Nakanishi, M., and H. Niino, “An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog”, *Boundary-Layer Meteorol.*, vol.119, no.2,

pp.397–407, May 2006.

[13] Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh, H. Tomita, S. Iga, and Y. Tsushima, “Importance of the subgrid-scale turbulent moist process: Cloud distribution in global cloud-resolving simulations”, *Atmos. Res.*, vol.96, no.2–3, pp.208–217, May 2010.

[14] McFarlane, N. A., “The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere”, *J. Atmos. Sci.*, vol.44, no.14, pp.1775–1800, July 1987.

[15] Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe, “Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff”, *Glob. Planet. Change*, vol.38, no.1–2, pp.209–222, July 2003.

[16] Nitta, T., K. Yoshimura, and A. Abe-Ouchi, “Impact of Arctic Wetlands on the Climate System: Model Sensitivity Simulations with the MIROC5 AGCM and a Snow-Fed Wetland Scheme”, *J. Hydrometeorol.*, vol.18, no.11, pp.2923–2936, November 2017.

[17] Poli, P., and Coauthors, “ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century”, *J. Clim.*, vol.29, no.11, pp.4083–4097, June 2016.

[18] Kennedy, J., H. Titchner, N. Rayner, and M. Roberts,

“input4MIPs.MOHC.SSTsAndSeaIce.HighResMIP.MOHC-HadISST-2-2-0-0-0, Version 20170201”. Earth System Grid Federation, 2017.

[19] Stevens, B., S. Fiedler, S. Kinne, K. Peters, S. Rast, J. Musse, S. J. Smith, and T. Mauritsen, “MACv2-SP: a parameterization of anthropogenic aerosol optical properties and an associated Twomey effect for use in CMIP6”, *Geosci. Model Dev.*, vol.10, no.1, pp.433–452, February 2017.

[20] Meinshausen, M., and Coauthors, “Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling

Future Projection of Typhoon using High-resolution Global Non-hydrostatic Model

Project Representative

Chihiro Kodama Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Chihiro Kodama ^{*1}, Yohei Yamada ^{*1}, Masuo Nakano ^{*2}, Akita T. Noda ^{*3}, Tatsuya Seiki ^{*2}, Tomoki Ohno ^{*3}, Tomoe Nasuno ^{*2}, Masaki Satoh ^{*4,3}, Tomoki Miyakawa ^{*4}, Ying-Wen Chen ^{*4}, Hisashi Yashiro ^{*5}, Masato Sugi ^{*6}

^{*1}Project Team for HPC Advanced Predictions utilizing Big Data, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2}Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*3}Project Team for Advanced Climate Modeling, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*4}Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ^{*5}RIKEN Advanced Institute for Computational Science, ^{*6}Meteorological Research Institute

We performed a series of historical simulations using an updated global non-hydrostatic atmospheric model, NICAM, under a protocol of CMIP6 HighResMIP. The simulations were performed for 1950-2014 (65 years) with 56 km and 28 km mesh model and for 1950-1960 (11 years) with 14 km mesh model. The results show that an overall performance in simulating the genesis number of tropical cyclones is improved as the horizontal mesh size is finer. We also found better performance in the simulated basic state compared with that simulated by the previous version model, consistent with the better performance in the simulated tropical cyclones in this study. The simulation data are available under the framework of CMIP6.

Keywords : tropical cyclone, climate change, global non-hydrostatic model, CMIP6, HighResMIP

1. Introduction

Future projection of tropical cyclone (TC) is of great social concern because of its high risks causing natural disasters including high wind, storm surge, and intense rainfall. In addition, several scientific questions regarding TC remain, for example, mechanisms of cyclogenesis and rapid intensification and role of TC in climate system.

These social and scientific needs motivate us to run global non-hydrostatic atmospheric model for a climate scale that has a mesh size fine enough to represent intensity and resolve structure of the TCs. In the past, we had performed present-day and future climate simulations using 14 km mesh NICAM [1-3] and investigated future change in TC activity (e.g. [4]). NICAM has been upgraded and improved (e.g. [5, 6]) since then, and now it is ready for CMIP6 (Coupled model intercomparison project) HighResMIP (High resolution model intercomparison project [8]).

In this project, a series of historical simulations using the updated NICAM with different horizontal mesh size under a HighResMIP protocol were performed. Simulated performance of the TC activity is briefly introduced here.

2. Method

We used NICAM16-S [7], a minor version of NICAM.16 (NICAM released in 2016) for CMIP6. Details of the model configurations are described in [7]. Major updates from

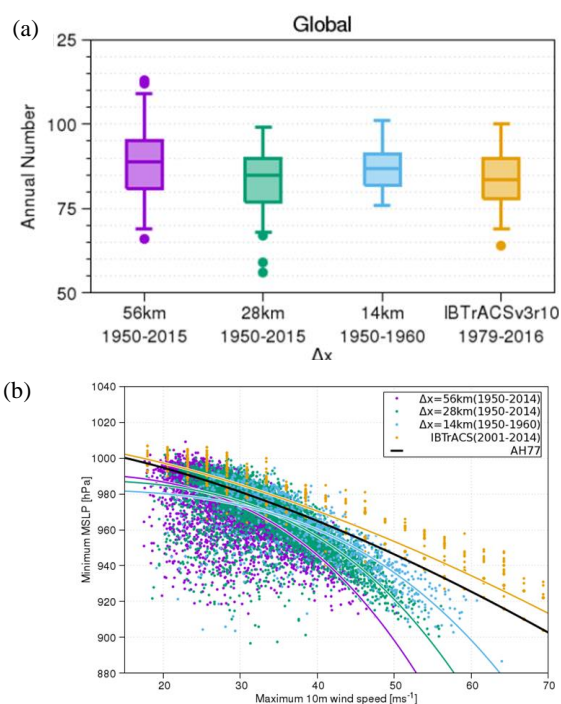


Fig. 1 (a) Boxplot of the global genesis number of the tropical cyclones for each horizontal mesh run and observational data (IBTrACS [11]). (b) Relationship between maximum surface windspeed and minimum central pressure. Black curve is obtained based on the observation [12].

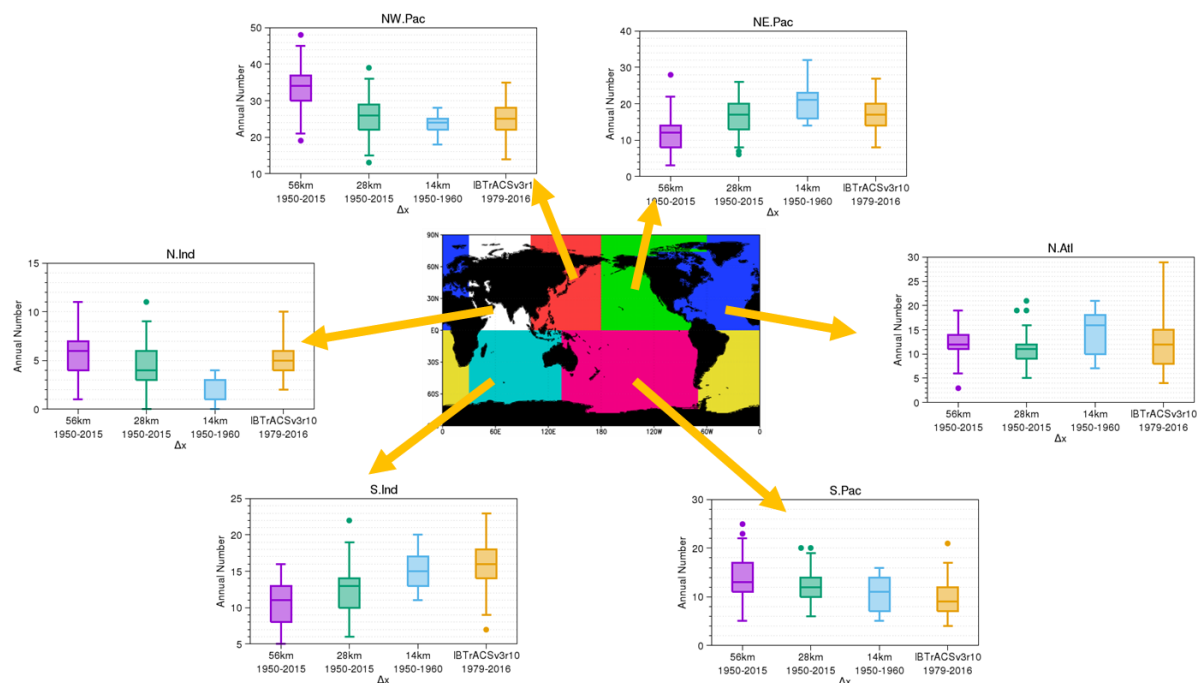


Fig. 2 Same as Figure 1a but for each ocean basin.

NICAM.12, a previous version used in the climate simulation [9], include an update of a cloud microphysics scheme [5, 6] and an introduction of orographic gravity wave drag scheme, aerosols forcings, and wetland scheme in a land model [10]. The sea surface temperature and sea ice concentration were fixed to the observed variation. The simulations were started from 1 January 1950 and continued for 65 years with 56 and 28 km mesh model and for 11 years with 14 km mesh model. The data are available on ESGF (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) through Data Integration and Analysis System (DIAS).

Detection and tracking algorithms of TCs [4] were applied to the simulated latitude-longitude gridded data. Specifically, minima of mean sea level pressure were detected and tracked, and criteria of maximum surface windspeed, low-level vorticity, warm core, and lifetime were used to distinguish TCs from non-TCs. These criteria were same as [4] except that the warm core criterion was changed to obtain realistic genesis number of TCs from different horizontal mesh simulations.

3. Result

Figs. 1a and 2 show global and regional genesis number of TCs. The global genesis number of TCs is comparable with that observed, and it does not strongly depend on the horizontal mesh size of the model. Regionally, the model with finer mesh size tends to better simulate the observed number of TC genesis except for the Indian ocean. Note that the genesis number of weak TCs strongly depends on the tracking method, and use of the criteria that are exactly same as [4]

leads to an overestimation of the TC genesis in the runs with coarser mesh model.

Fig. 2b shows the relationship between maximum surface windspeed and minimum central pressure. TC windspeed for a minimum central pressure is increased and approached to the observed curve as the mesh size is finer, indicating the better representation of the horizontal structure of the TCs. It is still difficult to simulate very strong windspeed even in the 14 km mesh simulation, suggesting needs to enhance resolution as well as to reconsider model configuration such as surface process in the model. We also found better performance in the simulated basic state compared with that simulated in NICAM.12 (not shown).

Acknowledgement

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund (2RF-1701) of the Environmental Restoration and Conservation Agency of Japan (ERCA) and the Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU) and the FLAGSHIP2020 project within the priority study4, of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan.

References

- [1] Tomita, H. and M. Satoh, "A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid", *Fluid Dyn. Res.*, vol.34, no.6, pp.357–400, June 2004.
- [2] Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, "Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model

- (NICAM) for global cloud resolving simulations”, *J. Comput. Phys.*, vol.227, no.7, pp.3486–3514, March 2008.
- [3] Satoh, M. and Coauthors, “The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development”, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1:18, December 2014.
- [4] Yamada, Y., M. Satoh, M. Sugi, C. Kodama, A. T. Noda, M. Nakano, and T. Nasuno, “Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model”, *J. Clim.*, vol.30, no.23, pp.9703–9724, 2017.
- [5] 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.*, vol.71, no.7, 2654–2673, 2014.
- [6] Roh, W., M. Satoh, and T. Nasuno, “Improvement of a Cloud Microphysics Scheme for a Global Nonhydrostatic Model Using TRMM and a Satellite Simulator”, *J. Atmos. Sci.*, vol.74, no.1, 167–184, 2017.
- [7] Kodama, C. and Coauthors, “The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments”, submitted to *Geosci. Model Dev.*
- [8] Haarsma, R. J., and Coauthors, “High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6”, *Geosci. Model Dev.*, vol.9, no.11, pp.4185–4208, November 2016.
- [9] Kodama, C. and Coauthors, “A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation”, *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol.93, no.4, pp.393–424, 2015.
- [10] Nitta, T., K. Yoshimura, and A. Abe-Ouchi, “Impact of Arctic Wetlands on the Climate System: Model Sensitivity Simulations with the MIROC5 AGCM and a Snow-Fed Wetland Scheme”, *J. Hydrometeorol.*, vol.18, no.11, pp.2923–2936, November 2017.
- [11] Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, “The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS)”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol.91, no.3, pp.363–376, March 2010.
- [12] Atkinson, G. D., and C. R. Holliday, “Tropical Cyclone Minimum Sea Level Pressure/Maximum Sustained Wind Relationship for the Western North Pacific”, *Mon. Weather Rev.*, vol.105, no.4, pp.421–427, April 1977.

- (CMIP6)", *Geosci. Model Dev.*, vol.10, no.5, pp.2057–2116, May 2017.
- [21] Matthes, K., and Coauthors, "Solar forcing for CMIP6 (v3.2)". *Geosci. Model Dev.*, vol.10, no.6, pp.2247–2302, June 2017.
- [22] Hegglin, M., D. Kinnison, J.-F. Lamarque, and D. Plummer, "CCMI ozone in support of CMIP6 - version 1.0. Version 20160711", 2016.
- [23] Shabanov, N. V., and Coauthors, "Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.43, no.8, pp.1855–1865, August 2005.
- [24] Yang, W., and Coauthors, "MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.44, no.7, pp.1885–1898, July 2006.
- [25] Kodama, C. and Coauthors, "A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation", *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol.93, no.4, pp.393–424, 2015.
- [26] Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, "The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS)", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol.91, no.3, pp.363–376, March 2010.
- [27] Atkinson, G. D., and C. R. Holliday, "Tropical Cyclone Minimum Sea Level Pressure/Maximum Sustained Wind Relationship for the Western North Pacific", *Mon. Weather Rev.*, vol.105, no.4, pp.421–427, April 1977.
- [28] Kobayashi, S., and Coauthors, "The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics", *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol.93, no.1, pp.5–48, 2015.
- [29] Strachan, J., P. L. Vidale, K. Hodges, M. Roberts, and M.-E. Demory, "Investigating Global Tropical Cyclone Activity with a Hierarchy of AGCMs: The Role of Model Resolution", *J. Clim.*, vol.26, no.1, pp.133–152, January 2013.