

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

海洋研究開発機構地球環境部門環境変動予測研究センター

著者

小玉 知央*¹, 山田 洋平*¹, 中野 満寿男*¹, 野田 暁*¹, 清木 達也*¹, 大野 知紀*¹, 那須野 智江*¹, 佐藤 正樹*^{2,1}, 宮川 知己*², Chen Ying-Wen*², 澁谷 亮輔*², 末松 環*², 八代 尚*³, 杉 正人*⁴, 三浦 裕亮*⁵*¹海洋研究開発機構地球環境部門環境変動予測研究センター, *²東京大学大気海洋研究所, *³国立環境研究所地球環境研究センター, *⁴気象研究所, *⁵東京大学大学院理学系研究科

信頼性の高い台風の将来気候予測に向け、本課題では改良した全球非静力学モデル NICAM を用いて将来気候実験を実施した。昨年度までに実施した歴史再現実験を初期値として水平 56 km および 28 km メッシュで 2050 年まで延長するとともに、水平 14 km メッシュで 2040 年代を対象にタイムスライス気候実験を実施した。これらの実験では CMIP6 HighResMIP のプロトコルに従って境界条件・外部強制をモデルに与えた。実験の結果、全球、特に北西太平洋域において台風の年間発生数が減少するとともに、強い台風に限ると全球の年間発生数が増加するという予測結果が得られた。一方、日本に襲来する強い台風の数はやや減少傾向と予測されたが、強い台風の強風半径については拡大傾向と予測された。特に強い台風については年々変動が大きいので、地域毎に詳細な評価を行うためには積分期間やアンサンブル数を飛躍的に増やす必要がある。また、変化の物理メカニズムを考察するとともに更なる高解像度化を進めることが、信頼性の高い台風の将来気候予測を行うための今後の課題である。

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

昨年度に引き続き、14-56 km メッシュという高解像度の全球非静力学大気モデル NICAM[1-3]を用い、CMIP6 (結合モデル比較プロジェクト) HighResMIP (高解像度モデル比較プロジェクト[4]) のプロトコルに従って気候実験を実施した。高解像度の全球モデルを用いる大きなメリットはスケール間相互作用を陽に表現できることである。特に台風については大規模場から台風の構造までをシームレスに表現できることで台風の発生メカニズムについても物理メカニズムの議論が可能になる。これにより、将来気候における信頼性の高い台風予測につながっていくと考えている。

昨年度は NICAM を用いて歴史再現実験を実施し、台風の再現性について評価を行った。今年度は主に将来気候実験を実施して台風の将来変化を解析した。本稿では実験の概要および得られた台風発生数の予測結果について報告する。

2. 方法

今回用いた NICAM の設定については昨年度の報告書および[5]を参照されたい。昨年度までに実施してきた歴史再現実験では、56 km および 28 km メッシュで 1950-2014 年、14 km メッシュで 1950-1960 年および 2000-2010 年を積分期間とした。これに引き続き、本年度は表 1 に示す設定で将来気候を想定した実験を行った。シナリオは SSP (共有社会経済パス) [12]における高位シナリオである SSP585 を用いた。以下では現在気候として 1990-2014 年 (14 km メッシュのみ 2000-2009 年)、将来気候として

2025-2049 年 (14 km メッシュのみ 2040-2049 年) の結果を示す。

図 1 はモデルに与えた海面温度 (SST) について、現在気候に対する将来気候の昇温量を示す。北大西洋などの一部を除き全体的に昇温しており、全球平均した SST 昇温量は 0.66 度である。将来気候における SST 昇温量は CMIP5 に参加する結合モデルの結果を元にして [6] が、従来の CMIP3 結合モデルの結果で見られたようなエルニーニョ的な昇温パターン [13] は今回確認できない。

本課題で得られたデータの一部については DIAS (データ統合・解析システム) を通じて ESGF (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) において利用可能 (一部、予定) となっている。また、全データについての利用情報を <http://nicamdata.jamstec.go.jp/cmip6/> に掲載

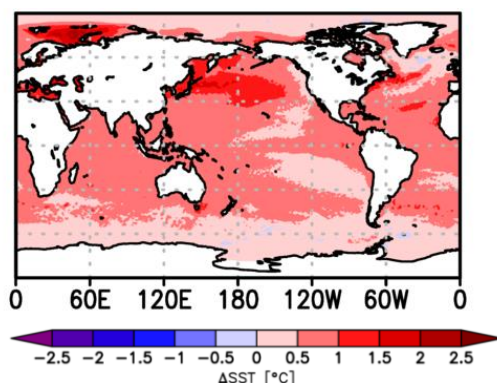


図 1 モデルに与えた海面温度の 1990-2014 年に対する 2025-2049 年の上昇量。

しており、データに興味のある方はぜひ参照頂きたい。
 台風の抽出については昨年度の報告書と同様、海面気圧の極小を検知・追尾する方法[13]を用いた。但し、暖気核のしきい値等、詳細については微調整を行っている。

表 1 NICAM HighResMIP 将来気候実験の設定

実験期間	・2015-2050 (56 km, 28 km 実験) ・2040-2050 (14 km 実験)
初期条件	・歴史再現実験 (56 km, 28 km 実験) ・28 km 将来気候実験 (14 km 実験)
海水面温度・海水密度	HadISST2 へ CMIP5 RCP8.5 モデルの変化量およびトレンドを上乗せ[6]
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)、観測に基づく気候値 (成層圏) [7]
人為起源エアロゾル	簡易プルームモデル MACv2-SP、SSP585 に基づく係数[8, 9]
温室効果気体	SSP585 準拠、全球平均濃度[10]
オゾン	SSP585 準拠、月平均分布[11]

3. 結果

図 2 は現在・将来気候実験によって得られた全球の台風年間発生数である。将来変化に着目すると、水平解像度に依存せず台風の発生数は減少するという予測結果となっている。年々変動が大きく積分期間も十分ではないが、

減少割合は概ね 1 割弱から 2 割程度である。台風の発生数が将来減少するという予測結果は改良前の NICAM を用いた研究結果[13]を裏付けるものであり、既存の気候モデルを用いた研究[14]とも整合的である。台風発生数の減少メカニズムについては台風の種の観点から[15]において論じている。

海盆毎の台風の年間発生数について図 3 に示す。日本

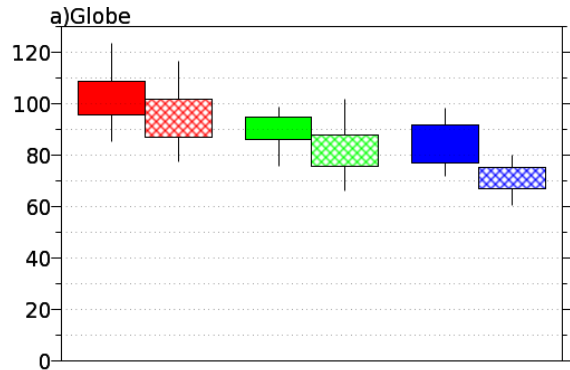


図 2 全球の台風年間発生数。56 km (赤色)、28 km (緑色)、14 km (青色) メッシュ NICAM による現在気候 (塗りつぶし) および将来気候 (網掛け) 実験の結果。箱は 25-75%、線は最小・最大値の範囲を表す。

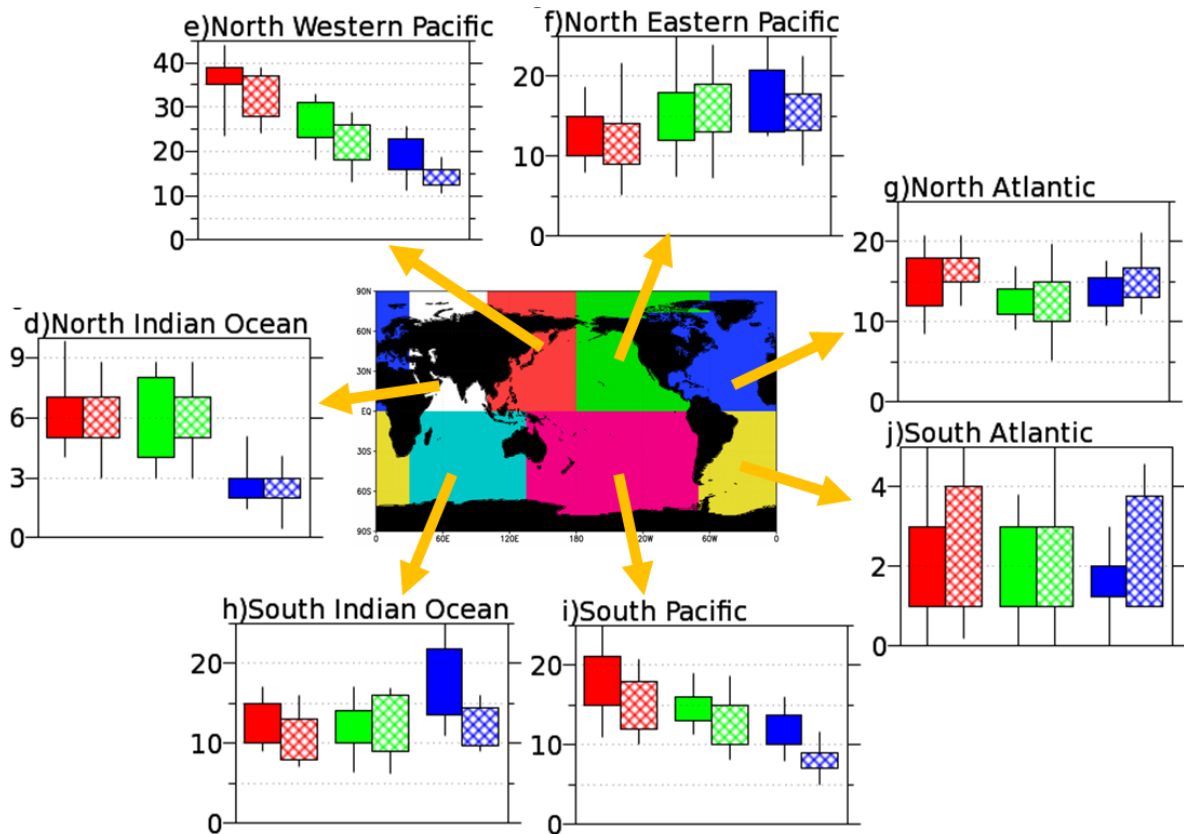


図 3 図 2 と同様、但し海盆毎の台風年間発生数。

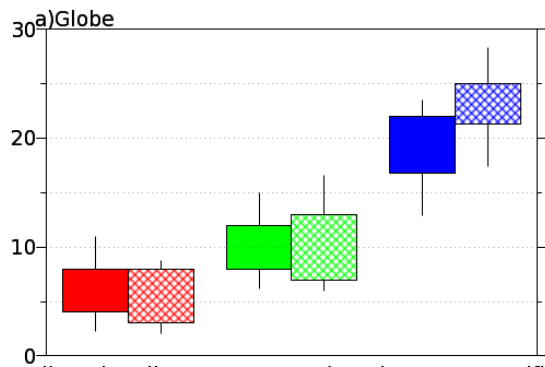


図4 図2と同様、但しスーパー台風（最低中心気圧945hPa以下に発達した台風）の年間発生数。

を含む北西太平洋域では台風の発生数は将来減少し、南太平洋における減少とあわせて全球の減少の大部分に寄与している。他の海盆では年々変動が大きい、もしくは解像度依存性が大きく、変化傾向はあまり明瞭ではない。

図4は最低中心気圧945 hPa以下に発達した台風（以下、スーパー台風）に限った全球の年間発生数を示す。スーパー台風は14 kmメッシュ実験において明瞭な増加傾向を示しているが、28 km、56 kmメッシュの実験では変化が確認できない。昨年度までの再現性の検証から、スーパー台風の発生数は高解像度化によってほとんどの海盆で増加して観測に近づくことが分かっている（図省略）。また、高解像度化によって台風の最大風速は増加する（昨年度報告書）とともに、台風の強風域のサイズは縮小する（図省略）。これらの結果は、スーパー台風の再現にとって少なくとも14 km以下のメッシュサイズが必要であることを示唆しており、将来予測の解像度依存性に大きな影響を及ぼしている可能性がある。

図5は日本付近に注目したスーパー台風の存在頻度の将来変化である。日本付近に限るとスーパー台風は将来減少傾向になると予測している。この結果については14 kmメッシュだけでなく28 kmおよび56 kmメッシュの実験でも類似の結果が得られている（図省略）。他方、スーパー台風の構造を解析した結果、14 kmメッシュ実験では強風域の半径が拡大することが予測された（図省略）。スーパー台風は年々変動が大きいことから、日本において台風による暴風の頻度が高まるかどうか、といった地域的な評価を行うためには積分期間やアンサンブル数を飛躍的に増やす必要がある。また、特にスーパー台風の再現・予測を行うためには14 kmメッシュは十分ではない可能性があり、予測の信頼性を向上させるためには更なる高解像度化を行って検証を進める必要もある。

謝辞

本研究は環境再生保全機構の環境研究推進費（JPMEERF20172R01）、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（JPMXD0717935457）・ポスト「京」重点課題4の支援を受けて実施した。

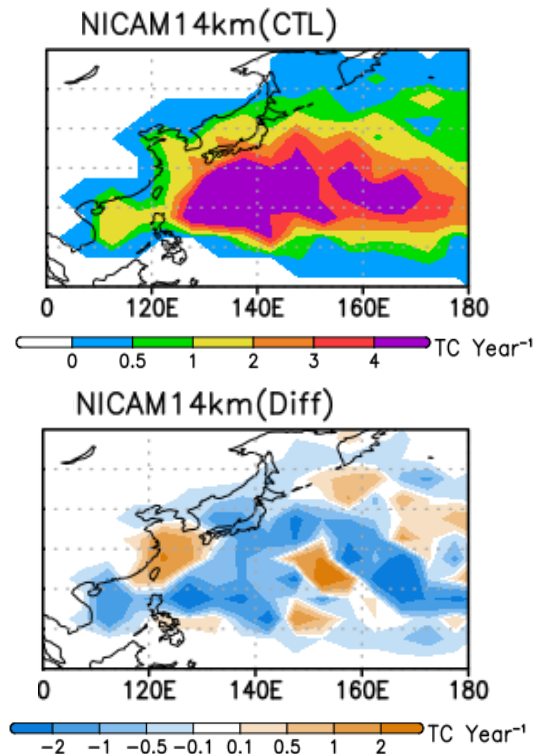


図5 5度格子あたりの台風の存在頻度。現在気候（上段）および将来変化（下段）。14 kmメッシュ実験の結果。

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] 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.
- [5] Kodama, C., T. Ohno, T. Seiki, H. Yashiro, A. T. Noda, M. Nakano, Y. Yamada, W. Roh, M. Satoh, T. Nitta, D. Goto, H. Miura, T. Nasuno, T. Miyakawa, Y.-W. Chen, and M. Sugi, "The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments", *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2019-369, April 2020.
- [6] Kennedy, J., Titchner, H., Rayner, N. and Roberts, M., "input4MIPs.CMIP6.HighResMIP.MOHC.MOHC-highresSST-future-1-0-1", Version 20190215., doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.10361, 2019.

- [7] Thomason, L., Vernier, J.-P., Bourassa, A., Arfeuille, F., Bingen, C., Peter, T. and Luo, B., “Stratospheric Aerosol Data Set (SADS Version 2) prospectus”, to be submitted to Geosci. Model Dev, Available from: http://www.wcrp-climate.org/images/modelling/WGCM/CMIP/CMIP6Forcings_StratosphericAerosolDataSet_InitialDescription_150131.pdf (Accessed 28 July 2020).
- [8] 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.
- [9] Fiedler, S., B. Stevens, M. Gidden, S. J. Smith, K. Riahi, and D. van Vuuren, “First forcing estimates from the future CMIP6 scenarios of anthropogenic aerosol optical properties and an associated Twomey effect”, *Geosci. Model Dev.*, vol.12, no. 3, pp.989–1007, March 2019.
- [10] Meinshausen, M., and Z. R. J. Nicholls, “UoM-REMIND-MAGPIE-ssp585-1-2-1 GHG concentrations”, Version 20181127, doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.9868, 2018.
- [11] Hegglin, M., D. Kinnison, J.-F. Lamarque, and D. Plummer, “input4MIPs.CMIP6.ScenarioMIP.URreading.URreading-CCMI-ssp585-1-0”, Version 20181101, doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.9544, 2018.
- [12] O’Neill, B. C., and Coauthors, “The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6”, *Geosci. Model Dev.*, vol.9, no. 9, pp.3461–3482, 2016.
- [13] 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.
- [14] Christensen, J.H. and Coauthors, “Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change”, In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp.1217-1308, 2013.
- [15] Yamada, Y., C. Kodama, M. Satoh, M. Sugi, M. J. Roberts, R. Mizuta, A. T. Noda, T. Nasuno, M. Nakano and P. L. Vidale, “Evaluation of the contribution of tropical cyclone seeds to changes in tropical cyclone frequency due to global warming in high-resolution multi-model ensemble simulations”, *Prog. In Earth Planet. Sci.*, under revision.

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

Project Representative

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

Authors

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

^{*1}Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2}Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ^{*3}RIKEN Advanced Institute for Computational Science, ^{*4}Meteorological Research Institute, ^{*5}School of Science, The University of Tokyo

We performed a series of future climate simulations using the updated global non-hydrostatic atmospheric model NICAM for the purpose of reliable future projection of tropical cyclones. The historical simulations with 56- and 28-km mesh performed in FY2019 were extended to 2050, and an additional time slice simulation with 14-km mesh was performed for the 2040s. The results of these simulations show the number of tropical cyclone genesis decreases globally, especially in the northwestern Pacific and that of the intense tropical cyclone genesis increases in the future climate. Meanwhile, the number of intense tropical cyclones existing around Japan tends to decrease slightly, and the size of the intense tropical cyclones tends to increase slightly. It is necessary to increase the integration period and the ensemble number as well as enhance resolution in order to evaluate impact of the global warming on the intense tropical cyclones on a regional scale.

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

1. Introduction

In this project, we are challenging reliable projection of tropical cyclones in future climate, motivated by both the social demands and scientific interests. To this end, a series of climate simulations were carried out using a high resolution global non-hydrostatic atmospheric model NICAM [1-3] under the protocol of CMIP6 HighResMIP (High resolution model intercomparison project) [4]. The tropical cyclones in the historical simulations were evaluated in the FY2019 report. Here, we show future projection of the tropical cyclones with 56-14 km mesh NICAM.

2. Method

Details of the NICAM used in this study are described in [5]. The historical and future climate simulations were performed for 1950-2050 with 56-km and 28-km mesh NICAM, and 1950s, 2000s, and 2040s with 14-km mesh NICAM. Hereafter, the analysis period for the present and future climate is 1990-2014 and 2025-2049 for the 56-28 km mesh runs and 2000-2009 and 2040-2049 for the 14 km mesh runs, respectively. The sea surface temperature in the future climate were obtained from CMIP5 multi-model ensemble mean [6]. Some of the data are or will be available on ESGF (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) through Data Integration and Analysis System (DIAS). Also see <http://nicamdata.jamstec.go.jp/cmip6/> for information on

accessing the entire simulation data. The tropical cyclones were detected and tracked based on the mean sea level pressure. The algorithm is same as [7] except for an update of some parameters.

3. Results

Fig. 1 shows the annual number of the tropical cyclone genesis for the entire globe in the present and future climate. The genesis number is expected to decrease in the future climate regardless of

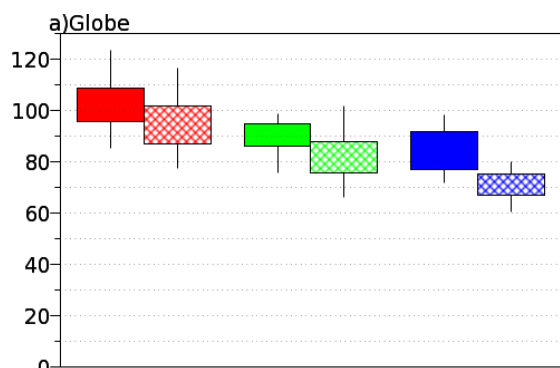


Fig. 1 Box plot of the annual global genesis number of the tropical cyclones in the present (shaded) and future (hatched) climate simulations with 56-km (red), 28-km (green) and 14-km mesh NICAM.

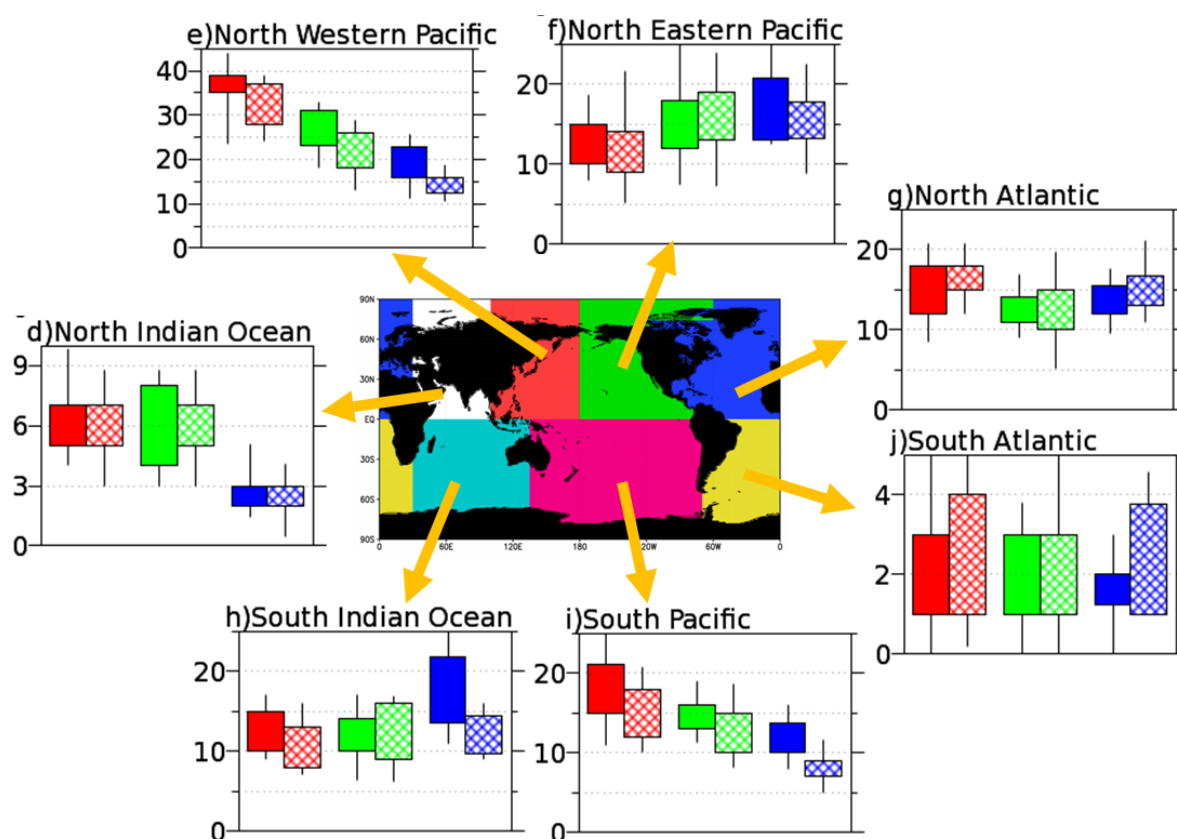


Fig. 2 Same as Fig. 1 but for each ocean basin.

the horizontal resolution. This result is consistent with the previous studies [7, 8], and we are discussing its mechanisms in terms of the tropical cyclone seeds [9].

Fig. 2 shows regional number of tropical cyclone genesis. Most of the decrease in the global genesis number is attributed to the decrease in the northwestern Pacific and the south Pacific. The changes are not clear in other ocean basin in association with large interannual variability and/or resolution dependency.

We also analyzed the intense tropical cyclones and found an increase in the global number of intense tropical cyclone genesis (not shown). Albeit noisier, the number of intense tropical cyclones around Japan is expected to decrease slightly and the size of the intense tropical cyclones is expected to increase slightly. Because of its large interannual variability, increasing integration period and ensemble number as well as enhancing resolution is necessary to project intense tropical cyclones on a regional scale.

Acknowledgement

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20172R01) of the Environmental Restoration and Conservation Agency of Japan (ERCA) and the Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU) (JPMXD0717935457) 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] 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.
- [5] Kodama, C., T. Ohno, T. Seiki, H. Yashiro, A. T. Noda, M. Nakano, Y. Yamada, W. Roh, M. Satoh, T. Nitta, D. Goto, H. Miura, T. Nasuno, T. Miyakawa, Y.-W. Chen, and M. Sugi, "The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments", *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2019-369, April 2020.

- [6] Kennedy, J., Titchner, H., Rayner, N. and Roberts, M., “input4MIPs.CMIP6.HighResMIP.MOHC.MOHC-highresSST-future-1-0-1”, Version 20190215., doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.10361, 2019.
- [7] 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.
- [8] Christensen, J.H. and Coauthors, “Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change”, In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp.1217-1308, 2013.
- [9] Yamada, Y., C. Kodama, M. Satoh, M. Sugi, M. J. Roberts, R. Mizuta, A. T. Noda, T. Nasuno, M. Nakano and P. L. Vidale, “Evaluation of the contribution of tropical cyclone seeds to changes in tropical cyclone frequency due to global warming in high-resolution multi-model ensemble simulations”, *Prog. In Earth Planet. Sci.*, under revision.