

近未来台風予測は実現できるか？

– 全球非静力学大気モデルを用いた高解像度・大アンサンブル実験

課題責任者

小玉 知央 海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野

著者

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

*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 気候変動リスク情報創生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 東京大学 大気海洋研究所, *5 気象庁 気象研究所

台風は日本をはじめ世界各地で暴風や豪雨、洪水といった大きな自然災害をもたらす。近年、地球温暖化の停滞（ハイエイトス）の終焉と温暖化の加速が指摘されている。それに伴い、温暖化による強い台風の割合の増加といった変化が数年から十年程度先の近未来に起きる可能性がある。しかし、近未来における台風活動の予測技術は確立されていない。本研究では台風を強度まで再現可能な高解像度全球非静力学大気モデル NICAM を用いて、近未来台風予測の実現可能性を検討した。全球の気候に大きな影響を及ぼす大規模 El Niño に着目し、2015 年および 1997 年を対象とする大アンサンブル実験を実施した。強い台風の発生数を解析した結果、アンサンブルの広がりの中に観測値が含まれていることを確認した。観測された強い台風の増加については 1997 年実験では捉えることができたが、2015 年実験では確認できなかった。また、与えられた海面水温に対する大気の内変動は 2015 年実験の方が大きく、予測が難しいことが分かった。このように年によって予測可能性が異なる理由について、大規模環境場の特徴に注目した調査を行っている。

キーワード：台風, 地球温暖化, 極端 El Niño, ハイエイトス, アンサンブル実験

1. はじめに

熱帯低気圧（以下、台風と略す）は毎年のように大きな自然災害を引き起こす要因であり、社会的にも関心の高い気象現象の一つである。月から季節、さらには年スケール程度先の台風の活動度について高精度の確率予測を提示できれば、台風による被害の軽減に資することができる。特に 2015 年は北半球で強い台風の発生数が 22 個と観測史上最多を記録し、全球平均気温の急上昇との関係が注目された。強い台風を最低中心気圧が 945hPa 以下に発達した台風と定義すると、気象庁ベストトラックによると、2015 年 6 月から 10 月に日本を含む北西太平洋において発生した強い台風の数は 10 個に達しており、1951 年以降では 1992、1994、1997 年と並び最多を記録した。中でも 1997 年と 2015 年に関しては翌年にかけて El Niño が非常に発達した年であるという共通の特徴がある。El Niño と台風の活動度の関係は多くの先行研究が存在し、El Niño が発達する年には強い台風の発生数が増加することが報告されている（例えば Camargo and Sobel[1]）。しかし、観測された El Niño イベントの数は限られおり、台風に対する影響を観測から統計的に議論するのは困難である [2]。

全球モデルを用いたこれまでの研究では、強い台風の再現は困難であった [3]。しかし近年では物理スキームの精緻化や計算機性能の向上に伴う格子分解能の高解像度化に伴い、強い台風の再現に成功する全球モデルが現れ

ている [4,5,6,7]。我々の研究グループでは、高解像度の全球非静力学モデル NICAM [8,9,10] を用いて 30 年間に及ぶ気候実験を実施し、台風の発生・進路の分布や季節変化が比較的よく再現できることを示してきた [11]。強い台風の発生数についても、NICAM は観測された年々変動の大きさを再現することに成功している（図 3a と b）。そこで本課題では、月から季節、年スケール程度先の台風予測に対する基礎的な知見を得るために、高解像度 NICAM を用いた大アンサンブル実験を行った。強い台風を再現できる全球モデル NICAM を用いることで El Niño に対する台風活動の応答を理解し、月・季節、年スケール以上にまたがる台風シームレス予測の精度向上に資することを目指す。具体的には強い台風の発生数が多かった 2015 年と 1997 年の夏季（6 月から 10 月）を対象とし、観測された El Niño 型の海面水温偏差を外部強制とする NICAM のアンサンブル実験（メンバー数 50）を実施して強い台風の応答を評価した。

2. 手法

2015 年と 1997 年の数値実験には全球非静力学モデル NICAM を用いた。水平格子間隔は 14km で積雲対流スキームは利用していない。モデル設定は基本的に Kodama et al.[11] と同じである。ただし台風の発生位置を観測に近づけるために地形性重力波抵抗スキーム [12] を導入した。

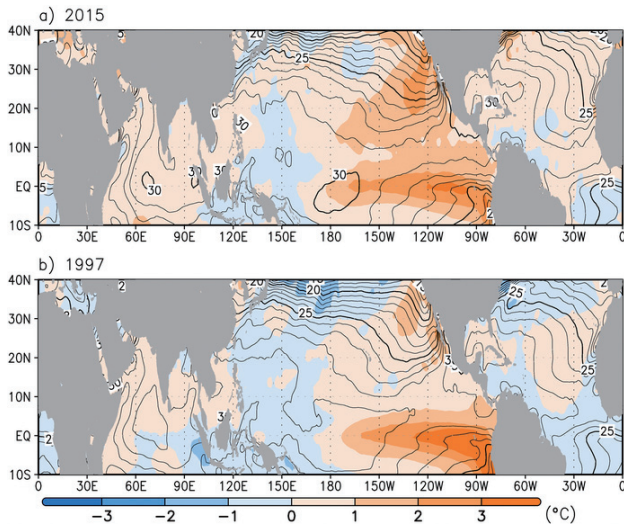


図1 (a) 2015年と(b) 1997年の6月から10月の平均海面水温の観測値を示す。等値線は平均値、色は気候値からの偏差を示す。気候値は1982年から2015年までの平均値で定義した。等値線の間隔は1°Cである。

海面水温は一層のスラブ海洋モデルを用いて予報し、米国海洋大気局の観測値 [13] にナッジングした。2015年および1997年の6月から10月で平均したナッジング先の海面水温を図1に示す。初期条件は気象庁55年長期再解析 [14,15] から内挿して作成した。アンサンブルメンバーは計算開始日を5月19日18時(UTC)から6月1日0時(UTC)まで6時間毎にずらして作成した。発生した台風は [16] の手法にもとづいて検出しており、気候モデル研究で一般的に用いられている風速のバイアス補正は用いていない [17, 18]。2015年と1997年のアンサンブル実験をそれぞれEN15とEN97実験と称す。

3. 結果と議論

図2の青線はEN97実験およびEN15実験のすべてのアンサンブルメンバーにおける台風の経路である。灰線で示した各年のベストトラックを包含しており、モデルは観測をアンサンブルの範囲内に捉えることに成功した。EN15実験ではEN97実験に比べて東経160度以東、北緯20度以北で台風の存在が密になっている。観測では2015年は東太平洋で台風の活動が活発であり、Murakamiら [19] はその原因を東太平洋の亜熱帯域で海面水温が高温だった

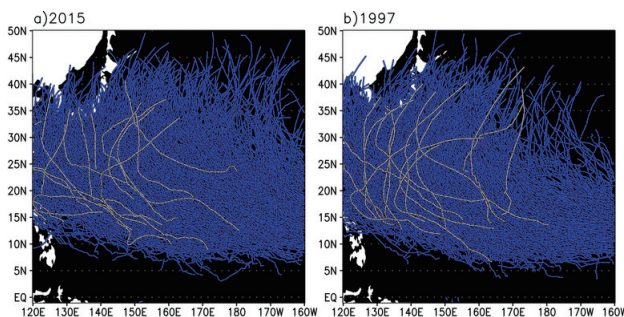


図2 台風の経路図。青線はEN15実験(a)とEN97実験(b)の全アンサンブルの結果を示す。灰色の線は気象庁のベストトラックによる2015年と1997年の台風の経路を示す。

ことに関係すると指摘している。EN15実験が2015年の活発な東太平洋の台風の発生を再現した可能性はあるが、本課題では北西太平洋の強い台風の発生数に注目しているためこの議論は将来の課題とする。

図3は6月から10月に発生した強い台風の発生数の確率密度分布である。中央値はEN15が5.5個、EN97が7個であり、四分位範囲はそれぞれ3個と2個であった。EN97実験ではNICAMの気候値(図3a; 6個)よりも増加し、四分位範囲はEN15実験よりも小さい。1997年の強い台風の発生数は海面水温のEl Niño的な高温偏差に強く影響を受けていることを示している。一方でEN15実験では観測の発生数(10個)を再現するメンバーも存在する(2メンバー)が、NICAMの気候値よりも中央値はやや減少し、四分位範囲はEN97実験よりも大きい。つまり、2015年については海面水温そのものよりも、海面水温に応答した大気の内変動が強い台風の発生数に影響したことを示唆している。

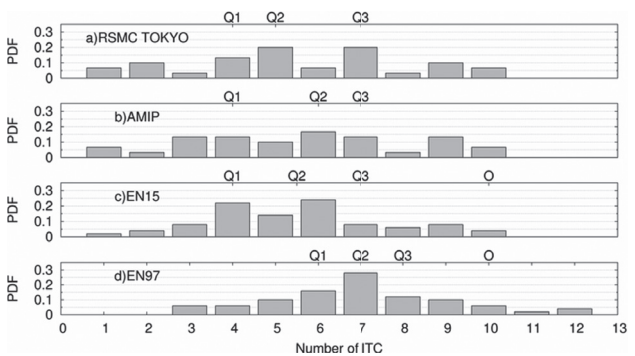


図3 6月から10月における強い台風の発生数の確率密度関数。(a) 1979-2008年における気象庁のベストトラックデータ(RSMC TOKYO)、(b) 1979-2008年におけるNICAM気候実験 [11]、(c) 2015年アンサンブル実験 (EN15実験)、(d) 1997年アンサンブル実験 (EN97実験) の結果を示す。Q1は第一四分位数、Q3は第三四分位数、Q2は中央値を示す。Q1とQ3の差の絶対値は四分位範囲を示す。○は2015年と1997年の強い台風の観測値を示す (RSMC TOKYO)。

さきに述べたとおり El Niño 年では強い台風の発生数が増加することが先行研究から指摘されている。El Niño 年に強い台風が増加する理由として、台風の発生位置が平年に比べて南東部(東経140度-東経160度付近)へ偏ることで台風が暖かい海洋上を長時間移動し、多くの熱を海洋から受け取り、より強く発達することができると考えられている [1,20]。従って、台風が強い勢力まで発達できるかどうかは発生位置や経路の影響を受けると考えられる。図4はEN15、EN97実験それぞれについて、強い台風の存在密度と発生密度の水平分布を示す。図3で示されたようにアンサンブル実験内の強い台風の総数がEN15実験ではEN97実験よりも少ないことに注意する必要があるが、EN97実験では東経140度-東経160度付近に発生密度は極大域が確認でき、EN15実験では極大域はEN97実験ほどはっきりしていない。存在密度に注目すると台湾の東海上、東経130度-東経140度付近でEN97実験はEN15実験よりも密度が大きくなっている。経路の違いは暖か

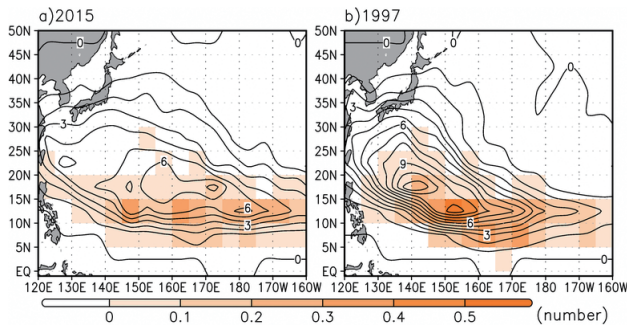


図4 (a) EN15 実験と (b) EN97 実験の台風の発生密度 (色) と存在密度 (等値線) のアンサンブル平均値の水平分布を示す。等値線の間隔は 1 (個/5 か月) である。

い洋上への存在期間に影響すると考えられるため EN15 実験と EN97 実験の強い台風の発生数に差を与えたと考えられる。Yokoi and Takayabu [21] は台風の経路はその発生位置の影響を受けることを示唆している。本研究において、強い台風の発生数を予測するためには発生域を正確に予測することが重要であることを確認できた。

今後は EN97 実験と EN15 実験における大規模環境場の違いに注目し、大気の内部分動を決める要因を考察することで、近未来台風予測の実現可能性について引き続き検討を行っていく。

謝辞

本研究の一部は文部科学省フラグシップ 2020 (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」および気候変動リスク創生プログラムの支援を受けた。実験は海洋研究開発機構の地球シミュレータ特別推進課題で実施した。実験の実施には池田美紀子氏からご助力をいただいた。

文献

- [1] S.J. Camargo, and A.H. Sobel, “Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO,” *J. Climate*, vol.18, no.15 pp.2996–3006, August 2005.
- [2] R. Han, H. Wang, Z.-Z. Hu, A. Kumar, W. Li, L.N. Long, J.-K.E. Schemm, P. Peng, W. Wang, D. Si, X. Jia, M. Zhao, G.A. Vecchi, T.E. LaRow, Y.-K. Lim, S.D. Schubert, S.J. Camargo, N. Henderson, J.A. Jonas, and K.J.E. Walsh, “An assessment of multimodel simulations for the variability of western North Pacific tropical cyclones and its association with ENSO,” *J. Climate*, vol.29, no.18, pp.6401–6423, September 2016.
- [3] S.J. Camargo, “Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models,” *J. Climate*, vol.26, no.24, pp.9880–9901, December 2013.
- [4] J.V. Manganello, K.I. Hodges, J.L. Kinter III, B.A. Cash, L. Marx, T. Jung, D. Achuthavarier, J.M. Adams, E.L. Altshuler, B. Huang, E.K. Jin, C. Stan, P. Towers, and N. Wedi, “Tropical cyclone climatology in a 10-km global atmospheric GCM: toward weather-resolving climate modeling,” *J. Climate*, vol.25, no.11, pp.3867–3893, June

2012.

- [5] H. Murakami, Y. Wang, H. Yoshimura, R. Mizuta, M. Sugi, E. Shindo, Y. Adachi, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, T. Ose, and A. Kitoh, “Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM,” *J. Climate*, vol.25, no.9, pp.3237–3260, May 2012.
- [6] H. Murakami, G.A. Vecchi, S. Underwood, T.L. Delworth, A.T. Wittenberg, W.G. Anderson, J.-H. Chen, R.G. Gudgel, L.M. Harris, S.-J. Lin, and F. Zeng, “Simulation and prediction of category 4 and 5 hurricanes in the high-resolution GFDL HiFLOR coupled climate model,” *J. Climate*, vol.28, no.23, pp.9058–9079, December 2015.
- [7] M. Wehner, Prabhat, K.A. Reed, D. Stone, W.D. Collins, J. Bacmeister, “Resolution dependence of future tropical cyclone projections of CAM5.1 in the US CLIVAR Hurricane Working Group idealized configurations,” *J. Climate*, vol.28, no.10, pp.3905–3925, May 2015.
- [8] H. Tomita, 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.
- [9] M. Satoh, T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, S. Iga, “Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations,” *Journal of Computational Physics*, vol.227, no.7, pp.3486–3514, March 2008.
- [10] M. Satoh, H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A.T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue and H. Kubokawa, “The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development,” *Progress in Earth and Planetary Sci.*, vol.1, 18, August 2014.
- [11] C. Kodama, Y. Yamada, A.T. Noda, K. Kikuchi, Y. Kajikawa, T. Nasuno, T. Tomita, T. Yamaura, H.G. Takahashi, M. Hara, Y. Kawatani, M. Satoh, M. Sugi, “A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.93, no.4 pp.393–424, August 2015.
- [12] N.A. McFarlane, “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.
- [13] R.W. Reynolds, N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes, and W. Wang, “An improved in situ and satellite SST analysis for climate,” *J. Climate*, vol.15, no.13, pp.1609–1625, July 2002.
- [14] S. Kobayashi, Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, “The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics,” *J.*

- Meteor. Soc. Japan*, vol.93, no.1, pp.5–48, March 2015.
- [15] Y. Harada, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, S. Kobayashi, Y. Ota, H. Onoda, K. Onogi, K. Miyaoka, and K. Takahashi, “The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.94, no.3, 269–302, May 2016.
- [16] M. Nakano, M. Sawada, T. Nasuno, and M. Satoh, “Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model,” *Geophys. Res. Lett.*, vol.42, pp.565–571, January 2015.
- [17] M. Zhao, and I. Held, “An analysis of the effect of global warming on the intensity of Atlantic hurricanes using a GCM with statistical refinement,” *J. Climate*, vol.23, no.23, pp.6382–6393, December 2010.
- [18] M. Sugi, H. Murakami, and K. Yoshida, “Projection of future changes in the frequency of intense tropical cyclones,” *Climate Dynamics*, vol.49, no.1–2, pp.619–632, July 2017.
- [19] H. Murakami, G.A. Vecchi, T.L. Delworth, A.T. Wittenberg, S. Underwood, R. Gudgel, X. Yang, L. Jia, F. Zeng, K. Paffendorf, and W. Zhang, “Dominant role of subtropical Pacific warming in extreme eastern Pacific hurricane seasons: 2015 and the future,” *J. Climate*, vol.30, no.1, pp.243–264, January 2017.
- [20] T.-C. Chen, S.-Y. Wang, M.-C. Yen, “Interannual variation of the tropical cyclone activity over the western north Pacific,” *J. Climate*, vol.19, no.21, pp.5709–5720, November 2006.
- [21] S. Yokoi, and Y. N. Takayabu, “Attribution of decadal variability in tropical cyclone passage frequency over the Western North Pacific: A new approach emphasizing the genesis location of cyclones,” *J. Climate*, vol.26, no.3, 973–987, February 2013.

Is Near-future Projection of Tropical Cyclone Feasible? High-resolution Large-ensemble Experiments Using Global Non-hydrostatic Atmospheric Model

Project Representative

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

Authors

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

*1 Project Team for HPC Advanced Predictions utilizing Big Data, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *2 Project Team for Risk Information on Climate Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *3 Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *4 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, *5 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Typhoons cause major natural disasters such as heavy rains and floods in many parts of the world including Japan. It is pointed out that global warming is accelerating after a global warming hiatus, which started in early 21th century and ended recently. This global warming acceleration can lead to rapid climate changes such as an increase in the ratio of super typhoons in near future. However, near-future prediction of typhoon activity is not yet established. In this study, we examine a feasibility of near-future typhoon prediction using NICAM, a high resolution global non-hydrostatic atmospheric model, which can reproduce realistic intensity of typhoons. A series of large ensemble experiments are performed for typhoon seasons in 2015 and 1997 to focus on extreme El Niño, which greatly influences global climate. Analysis of intense typhoon shows that its observed number is within the range of ensemble spread. Increase in the intense typhoon is captured in the ensemble simulations for 1997 but not for 2015. In addition, internal variability of the atmosphere for a given sea surface temperature is larger in 2015 than in 1997, which makes predictions of the intense typhoon more difficult in 2015. We are investigating this year-to-year difference of predictability from a viewpoint of large-scale circulation.

Keywords: Typhoon, global warming, extreme El Niño, hiatus, ensemble experiment

1. Introduction

Typhoon causes large natural disasters and attracts not only scientific but also socioeconomic attentions. If accurate probability predictions of typhoon activity in one month, seasonal, and annual scale were achieved, this system would contribute to a reduction of damages associated with typhoon. Here, intense typhoon (ITY) is defined as a typhoon with the minimum sea-level pressure of 945 hPa or less. In June to October 2015, the number of ITYs in the western North Pacific reached 10, which was comparable to those in 1992, 1994 and 1997 and the largest in the record of Japan Meteorological Agency since 1951. An extreme El Niño development was a common characteristic in 2015 and 1997. Previous studies reported an increase in the number of ITYs during a stage of development of El Niño (e.g. Camargo and Sobel [1]). However, the number of El Niño events is limited in observation [2], which may interfere with reliability of the observed relationship

between ITY and El Niño.

In previous studies, global circulation models (GCMs) had not well reproduced intense tropical cyclones [3]. In recent years, however, high-resolution GCMs tend to succeed in well reproducing intense storms [4, 5, 6, 7]. In our research group, climate simulation was performed for 30 years using a high resolution global non-hydrostatic model called NICAM [8, 9, 10]; and the model relatively well simulated horizontal distribution of tropical cyclogenesis and its seasonal change [11]. Furthermore, NICAM well simulated the observed interannual variability of ITY numbers (Figs. 2a and b).

In this study, a large ensemble simulation is conducted using high-resolution NICAM to gain knowledge for typhoon prediction in one month, seasonal and annual scale. By using NICAM, which can reproduce ITYs, we aim to understand the response of typhoon to El Niño and to contribute to an improvement of the accuracy of typhoon seamless prediction.

As a first step, we conduct 50-member ensemble simulations of boreal summer (June to October) in 2015 and 1997, when El Niño-type sea surface temperature anomaly is observed (Fig. 1), and evaluate the number of ITYs and its response to El Niño.

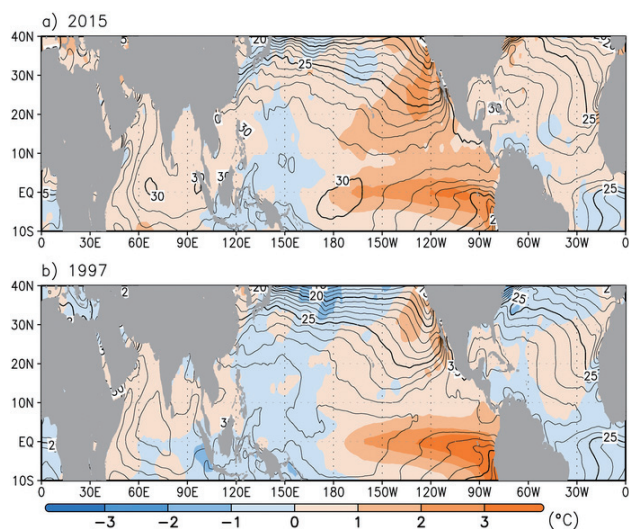


Fig. 1 Horizontal distributions of observed sea surface temperature (contour) and its anomaly relative to climatology (shade) in Jun2015 and 1997. The contour interval is 1 degree Celsius. The climatology is defined by averaging the observed sea surface temperature over 1982 and 2015.

2. Methodology

NICAM was used for ensemble simulations in 2015 and 1997. The horizontal grid spacing was 14 km without cumulus parameterization. The model setting was the same as Kodama et al. (2015) [11] except that the gravity wave drag scheme [12] was implemented. Sea surface temperature was calculated by a slab ocean model, which was nudged to observation [13]. The initial condition was prepared by interpolating from the JRA-55 reanalysis [14, 15]. The 50 members were produced by changing the initial time by 6 hourly from May 19th (18UTC) to June 1st (00UTC) for 2015 and 1997. These ensemble simulations for 2015 and 1997 are referred to as EN15 and EN97 runs, respectively. Simulated typhoons were detected by utilizing a tracking method [16]. In this study, ITY was defined as typhoon whose the minimum sea-level pressure reaches 945 hPa or less.

3. Results and discussion

Figure 2 shows probability density function for ITYs during June-October. The median values of ITY numbers were 5.5 for EN15 run and 7 for EN97 run, and their interquartile ranges are 3 and 2, respectively. The median value in EN97 run is larger than that of NICAM climatology (6), and the interquartile range in EN97 is smaller than EN15 run. The number of ITYs in EN97 run seems to be strongly related to the El Niño-type sea surface temperature anomaly (Fig. 1b). Meanwhile, in EN15 run, two members reproduce the observed number of ITYs (10), although the median value is slightly less than the NICAM climatology and the interquartile range (Q3 minus Q1) is larger than that in

EN97 run. This suggests that, in 2015, the number of ITYs was affected not only by El Niño-type sea surface temperature but also internal variability of the atmosphere in response to sea surface temperature.

Increases in ITY number during El Niño event are thought to be related to the southwestward shift of the genesis location of tropical cyclones compared with neutral condition; in this condition, typhoons pass over a warm ocean in deep tropics for a longer time and can develop more by receiving heat from the ocean [1, 17]. Therefore, the number of ITYs seems to be influenced by the genesis location and track of typhoons. Figure 3 shows that, in EN97 run, the genesis of ITYs is concentrated over a specific area (140°E-160°E; 10°N-15°N), while clear concentrated area is not seen in EN15 run. As for the track, its density in EN97 run is higher than that of EN15 run, over the eastern sea of Taiwan (130°E-140°E). Difference in the track seems to determine a period when typhoon remains over a warm ocean and causes difference in the number of ITYs between EN15 and EN97 runs. [18] suggests that tracks of typhoons are affected by their genesis locations. The result of this study suggested an importance of accurate prediction of the typhoon genesis location in predicting the number of ITYs.

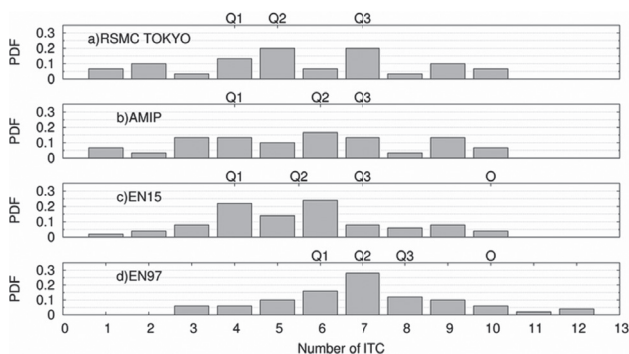


Fig. 2 Probability density functions of the number of the intense typhoon (ITY) genesis during June to October. (a) observation (RSMC TOKYO) for 1979 and 2008, (b) NICAM AMIP simulation [11] for 1979-2008, (c) EN15 for all the ensembles and (d) EN97 for all the ensembles. Q1, Q2 and Q3 mean lower quartile, median and upper quartile, respectively. O indicates the numbers of ITY observed in (c) 2015 and (d) 1997.

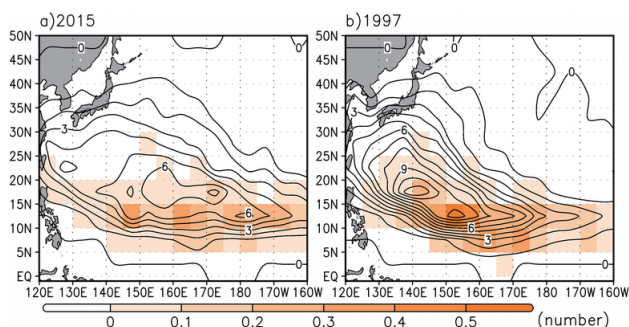


Fig. 3 Horizontal distributions of intense typhoon genesis (contour) and track (shade) densities simulated in EN15 and EN97 runs. The contour interval is 1 typhoon per 5 months.

We will continue investigating the feasibility of the near-future projection of tropical cyclone by focusing on the difference of the large-scale environmental conditions between EN97 and EN15 runs and discussing factors that determine the internal variability of the atmosphere.

Acknowledgement

This work is supported by the FLAGSHIP2020, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology-Japan within the priority study 4 (Advancement of meteorological and global environmental predictions utilizing observational “Big Data”). All numerical experiments were run on the Earth Simulator (NEC SX-ACE) under support of “The Earth Simulator Strategic Project with Special Support” of JAMSTEC. The authors thank Ms. Ikeda for her cooperation in performing the ensemble simulations.

References

- [1] S.J. Camargo, and A.H. Sobel, “Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO,” *J. Climate*, vol.18, no.15 pp.2996–3006, August 2005.
- [2] R. Han, H. Wang, Z.-Z. Hu, A. Kumar, W. Li, L.N. Long, J.-K.E. Schemm, P. Peng, W. Wang, D. Si, X. Jia, M. Zhao, G.A. Vecchi, T.E. LaRow, Y.-K. Lim, S.D. Schubert, S.J. Camargo, N. Henderson, J.A. Jonas, and K.J.E. Walsh, “An assessment of multimodel simulations for the variability of western North Pacific tropical cyclones and its association with ENSO,” *J. Climate*, vol.29, no.18, pp.6401–6423, September 2016.
- [3] S.J. Camargo, “Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models,” *J. Climate*, vol.26, no.24, pp.9880–9901, December 2013.
- [4] J.V. Manganello, K.I. Hodges, J.L. Kinter III, B.A. Cash, L. Marx, T. Jung, D. Achuthavariar, J.M. Adams, E.L. Altshuler, B. Huang, E.K. Jin, C. Stan, P. Towers, and N. Wedi, “Tropical cyclone climatology in a 10-km global atmospheric GCM: toward weather-resolving climate modeling,” *J. Climate*, vol.25, no.11, pp.3867–3893, June 2012.
- [5] H. Murakami, Y. Wang, H. Yoshimura, R. Mizuta, M. Sugi, E. Shindo, Y. Adachi, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, T. Ose, and A. Kitoh, “Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM,” *J. Climate*, vol.25, no.9, pp.3237–3260, May 2012.
- [6] H. Murakami, G.A. Vecchi, S. Underwood, T.L. Delworth, A.T. Wittenberg, W.G. Anderson, J.-H. Chen, R.G. Gudgel, L.M. Harris, S.-J. Lin, and F. Zeng, “Simulation and prediction of category 4 and 5 hurricanes in the high-resolution GFDL HiFLOR coupled climate model,” *J. Climate*, vol.28, no.23, pp.9058–9079, December 2015.
- [7] M. Wehner, Prabhat, K.A. Reed, D. Stone, W.D. Collins, J. Bacmeister, “Resolution dependence of future tropical cyclone projections of CAM5.1 in the US CLIVAR Hurricane Working Group idealized configurations,” *J. Climate*, vol.28, no.10, pp.3905–3925, May 2015.
- [8] H. Tomita, 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.
- [9] M. Satoh, T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, S. Iga, “Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations,” *Journal of Computational Physics*, vol.227, no.7, pp.3486–3514, March 2008.
- [10] M. Satoh, H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A.T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue and H. Kubokawa, “The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development,” *Progress in Earth and Planetary Sci.*, vol.1, 18, August 2014.
- [11] C. Kodama, Y. Yamada, A.T. Noda, K. Kikuchi, Y. Kajikawa, T. Nasuno, T. Tomita, T. Yamaura, H.G. Takahashi, M. Hara, Y. Kawatani, M. Satoh, M. Sugi, “A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.93, no.4 pp.393–424, August 2015.
- [12] N.A. McFarlane, “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.
- [13] R.W. Reynolds, N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes, and W. Wang, “An improved in situ and satellite SST analysis for climate,” *J. Climate*, vol.15, no.13, 1609–1625, July 2002.
- [14] S. Kobayashi, Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, “The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.93, no.1, pp.5–48, March 2015.
- [15] Y. Harada, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, S. Kobayashi, Y. Ota, H. Onoda, K. Onogi, K. Miyaoka, and K. Takahashi, “The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.94, no.3, 269–302, May 2016.
- [16] M. Nakano, M. Sawada, T. Nasuno, and M. Satoh, “Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model,” *Geophys. Res. Lett.*, vol.42, pp.565–571, January 2015.

[17] T.-C. Chen, S.-Y. Wang, M.-C. Yen, "Interannual variation of the tropical cyclone activity over the western north Pacific," *J. Climate*, vol.19, no.21, pp.5709–5720, November 2006.

[18] S. Yokoi, and Y. N. Takayabu, "Attribution of decadal variability in tropical cyclone passage frequency over the Western North Pacific: A new approach emphasizing the genesis location of cyclones," *J. Climate*, vol.26, no.3, 973–987, February 2013.