

海面水温の変動に伴う西部北太平洋の熱帯低気圧の将来変化

課題責任者

坪木 和久 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

著者

坪木 和久 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

吉岡 真由美 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
情報通信研究機構

台風の強度が気候変動とともにどのように変わるのかは大きな問題である。台風の最大強度は海面水温によって大きくコントロールされるので、海面水温変化は台風の最大強度変化に大きなインパクトを与えることが予想される。本研究は中緯度における台風のリスクの将来変化を明らかにすることを目的として、北上する台風について、現在気候、近未来気候、および21世紀末気候の台風のダウンスケーリング実験を実施した。その初期値・境界値には、21世紀気候変動予測革新プログラムで気象研究所が実施した20km解像度の全球大気モデル(MRI-AGCM)実験を用いた。AGCMに発生する台風のダウンスケーリング実験を、雲解像モデルCReSSを用いて水平解像度2kmで行った。計算領域は西部北太平洋域で、下面境界条件として与える海面水温は、現在気候、近未来気候、さらに21世紀末気候となるにつれて、およそ1°C程度ごとの上昇がみられた。この海面水温の条件でそれぞれの気候に発生する台風について、各約70事例についてダウンスケーリング実験を実施し、中緯度に北上する台風について経路と強度を調べた。その結果、海面水温の増加とともに、より強い強度で中緯度に到達する台風が多くなることが示された。

キーワード：台風, 気候変動, ダウンスケーリング, 雲解像モデル, 将来予測

1. 研究の目的と意義

西部北太平洋に発生する台風は東アジア地域に毎年のように災害をもたらし、日本における風水害の最大の要因となっている。一方で、台風は東アジアの国々において、重要な水資源でもある。台風は地球上に発生する熱帯低気圧のうち、ハリケーンやサイクロンと比べて最も数が多く、また最大の強度をもつという点で重要である。すなわち台風の最大強度は熱帯低気圧の最大強度である。この台風強度が気候変動とともにどのように変わるのかは大きな問題である。台風の最大強度は海面水温によって大きく規定される(たとえばEmanuel(1986)[1]の最大可能強度)。海面水温の気候変動に伴う変化は台風の強度に大きなインパクトを与えることが予想される。地球温暖化に伴い台風の強度が増大することは多くの研究が示しており(たとえば、Elsner et al. 2008[2])、Tsuboki et al. (2015)[3]は、21世紀後半の気候ではスーパー台風が日本にも上陸する可能性を指摘した。実際、データの解析から台風の生涯最大強度の位置が北上していることが示されている(Kossin et al. 2014[4])。また、上陸する台風のうち、カテゴリー4、5の台風の数の増大や、台風の最大強度の増大が示されてきている(Mei and Xie 2016[5])。これらの先行研究は、気候変動とともに西部北太平洋における台風の災害リスクが、日本などが位置する中緯度で増大していることを示している。

本研究課題は2016年度の地球シミュレーター一般公募課題と同年度特別推進課題で実施してきた台風のシミュレーション研究の発展と位置づけられる。これらの課題ではA1Bシナリオのもと、21世紀気候変動予測革新プ

ログラムで気象研究所が実施した20km解像度の全球大気モデル実験の結果に発生する台風について、ダウンスケール実験を行った。この実験では21世紀末の気候だけでなく、近未来気候の25年間についてダウンスケール実験を行った。このシナリオにおける全球モデル実験のデータを用いるのは、たとえば文部科学省委託研究SI-CAT(Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology)などがテーマとしているように、近年ますます社会的関心が高まっている近未来についての台風を対象とすることができる唯一の高解像度全球モデル実験であるからである。本研究の特長は、21世紀末と近未来気候に加えて現在気候における実験を加えて、「北上する台風」について、西部北太平洋のほとんどの部分を含む広い領域で、2kmという非常に高い解像度で雲解像モデルを用いてダウンスケーリング実験を行い、これらの結果を解析する点である。Tsuboki et al. (2015)では、計算機資源の制約から台風毎に計算領域を変えてシミュレーションを行ったが、本研究では共通の広い計算領域を用いてダウンスケーリング実験を行う。出力データは2次元の地表面のデータ(15分ごと)と3次元の大気(6時間毎)であり、地表面のデータからは海面気圧や最大地上風速の詳細な時間発展が得られる。また、大気(6時間毎)のデータからは、台風の構造やメカニズムに関する研究を行うことが可能である。温暖化における台風の問題はその変化シグナルが十分検出できる21世紀末の気候についての研究が多いが、SI-CATにみられるように社会的により期待されていることは近未来(現在から30年程度)の気候における台風の強度変化である。本研究では、近未来気

候の台風も対象とするので、このような社会的要請に対応することができる。本研究で解析するダウンスケーリング実験の結果は、台風の眼の壁雲や積乱雲を解像できる2kmという解像度で実施したので、計算の結果の台風強度についても量的に信頼できることが期待される。現在気候、近未来気候、21世紀末気候を比較する上で、モデル、計算領域、計算設定などの条件を同じにすることで、気候間の台風の変化を明らかにするものである。

2. 数値モデルと計算条件

本研究でダウンスケーリング実験に用いる数値モデルは、地球シミュレータのために開発された領域雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) である。CReSS は非静力学・圧縮系の領域モデルで、水平に直交曲線座標系、鉛直にハイブリッド座標系（地形にそう座標系と高度座標系）を用いている。予報変数は3次元の速度成分、温位偏差、圧力偏差、乱流運動エネルギー、水蒸気混合比、および雲・降水に関する量である。空間の表現には格子法を、時間積分はモード別時間積分法を用いている。雲・降水の変数としては、雲水、雨水、雲氷、雪およびあられの混合比および雲氷、雪、あられの数濃度である。乱流過程は乱流運動エネルギーを用いた1.5次のクロージャーである。また、地表面摩擦や熱・水蒸気の地表面からのフラックスなどの地表面過程が導入されている。地温は地中の多層モデルを用いて、熱伝導方程式を解き、海洋は鉛直1次元の熱拡散方程式を解いている。ダウンスケーリング実験のような予報実験を行うときは全球モデルのような大規模なデータを初期値・境界値として与える。また、放射はRRTM (Rapid Radiative Transfer Model) を導入した。CReSSの詳細についてはTsuboki and Sakakibara (2002)[6]を、またそれを用いたシミュレーション実験についてはTsuboki (2008)[7]を参照していただきたい。

表1 ダウンスケーリング実験における雲解像度 CReSS の設定

計算領域	西部北太平洋 (計算領域は固定)
水平格子解像度	約2km (緯度経度座標を使用)
水平格子数	X: 2403, Y: 2051
鉛直格子解像度	最下層100m、平均350m
鉛直格子数	83
積分期間	各台風につき7日間 (604800秒)
初期値・境界値	気象庁気象研究所のMRI-AGSM20km革新プログラム後期実験 (A1Bシナリオ)
陸面モデル	熱伝導モデル41層、6m
海洋モデル	熱拡散モデル41層、40m
放射過程	RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)
雲物理過程	固相について2モーメントバルク法
ESノード数	128ノード

本研究における実験の設定を表1にまとめた。計算領域は西部北太平洋を広く覆う領域で、東経113.8 - 158.421度、北緯10.0 - 47.0507度の領域である。この計算領域はすべての実験で共通とした。座標系は緯度経度座標を用い、経度方向の格子数は2403で、緯度方向は2051である。水平解像度は経度、緯度方向それぞれに0.0186、0.0181度である。これはほぼ2km解像度に相当する。鉛直方向には83格子で、最下層の格子間隔は100m、平均約350mとなるように鉛直格子を伸張してある。鉛直格子は24000mまで地形に沿う座標系、それより上では高度座標系となるハイブリッド座標系を用いた。モデルの上端高度は約28000mで、24000mより上にレーリーダンピングタイプのスポンジ層をもうけて、不要な波の反射を抑えている。計算は各台風について604800秒 (7日間) を実施し、地表の風、気温、降水強度などについての2次元データは15分ごと、大気の3次元データは6時間毎に出力した。

本研究では21世紀気候変動予測革新プログラムで気象研究所が実施した20km解像度の全球大気モデル後期実験の結果を用いた。この全球モデル実験では水平解像度約20kmで、表2に示すように現在気候 (1979～2003年)、近未来気候 (2015～2039年)、および21世紀末気候 (2075～2099年) の結果があり、西部北太平洋域のデータが提供されている。計算のもととなる気候シナリオは、SRES (Special Report on Emission Scenario) A1Bシナリオである。この全球モデル実験の結果に現れる台風について、雲解像モデル CReSS を用いたダウンスケーリング実験を行った。本研究で行った計算と2016年度の特別推進研究などの計算と合わせて、これら3つの気候に発生する台風のダウンスケーリング実験のデータが整備された (表2)。

3. 北上する台風

西部北太平洋に発生する台風のうち、中緯度に影響を与える台風として北上する台風に着目してダウンスケーリング実験を実施した。全球モデル実験で発生した台風のうち、次の条件に当てはまるものをダウンスケーリング実験の対象とした。全球大気モデルの実験で最低中心気圧が970hPa以下に達し、その位置が120～150°E、15～45°Nの領域にあって、かつ、970hPa程度の気圧に5～20°N、115～160°Eの領域で達し、全球大気モデルで台風と判別される最終地点が北緯20度を超えるもの。このように台風を選別したのは、北上する台風という制限の他に、MRI-AGCM3.2の結果から初期値・境界値として与えられるデータ範囲の制限にもよっている。

表2に示すように、対象とする北上する台風は、現在気候、近未来気候、および21世紀末気候でそれぞれ85、

表2 各気候の期間、全球モデルの台風の数、計算対象の台風の数、実験数のまとめ

気候	台風期間	台風の数	年平均の数	対象台風数	計算実施台風数
現在気候	1979-2003年	593個	23.7個	85個	71事例
近未来気候	2015-2039年	541個	21.6個	76個	73事例
21世紀末気候	2075-2099年	471個	18.8個	65個	62事例

76 および 65 事例であった。これはこれらの気候における 25 年間の台風発生数が、現在、近未来、さらに 21 世紀末気候になるにつれ減少していることと対応している。これらについて概ね 60 ~ 70 事例ずつダウンスケーリング実験をすることで、対象とするほぼすべての台風のダウンスケーリング実験を行い、気候間の台風の特性の違いを比較した。

4. 結果

まず、図 1 に各気候の 9 月の月平均海面水温を示した。これらの海面水温はダウンスケーリング実験では初期値として与えられ、熱拡散方程式と海面フラックス（放射、顕熱・潜熱フラックス）により時間発展する。台風のような強い擾乱では、海面水温が低下する。これにより台風が異常な強度にまで発達することが抑制される。海面水温は現在気候ではフィリピン東方海上で 29 ~ 29.5°C で本州付近は 27°C 程度である。これが近未来になると 1°C 程度上昇し、21 世紀末気候になるとさらに 1°C ほど上昇する。上昇のしかたは月により、また地域により異なるが、概ねこの程度の海面水温の上昇が起こっている。

ダウンスケーリング実験では表 2 にまとめた事例数の計算を行った。それらの結果得られた台風の経路を図 2 に示した。どの気候においても日本の南海上からフィリピン東方海上にかけて広く分布しており、どの地域にも台風が通過する可能性があることが分かる。赤い線は地

上風速 59 m s⁻¹ 以上の期間を表しており、気象庁の台風カテゴリーでは「猛烈な」台風となるものである。全体的に 21 世紀末気候になると、それがより北まで達する傾向がある。21 世紀末気候で上陸する猛烈な台風の中には（図 3）、本州に接近するまで、850 hPa 近く、風速 70 m s⁻¹ 程度に達するものがみられた（図 4）。これらはきわめて

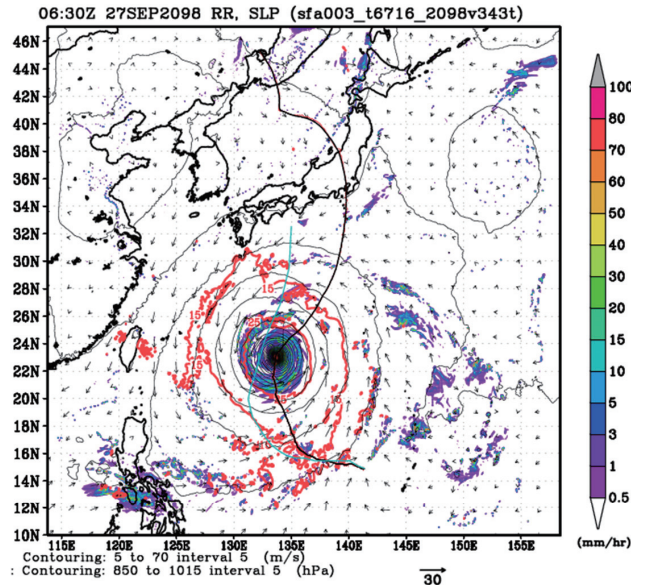


図 3 21 世紀末気候における 2km 解像度でシミュレーションされた非常に強い台風の例。黒の等値線は地上気圧、赤の等値線は風速 15 m s⁻¹、カラーは降水強度。

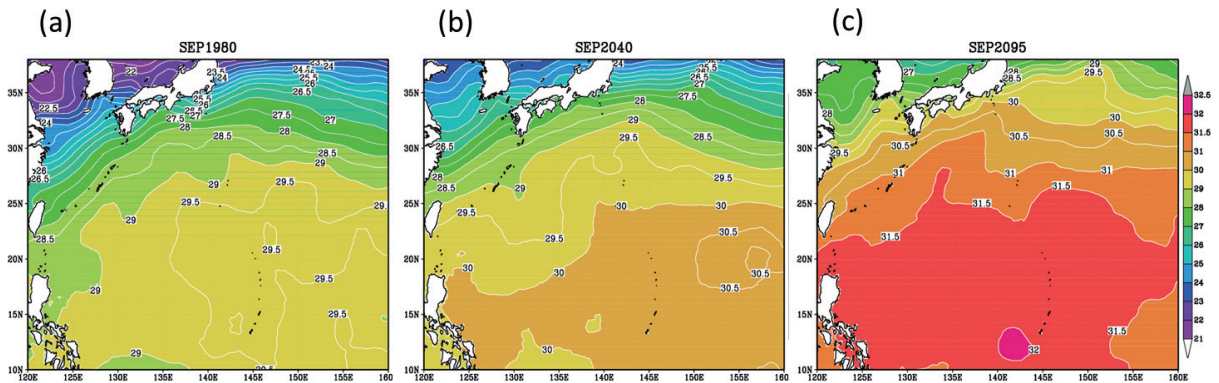


図 1 A1B シナリオの気象研究所全球 20km 大気モデル実験から与えられる海面水温分布の 9 月の例。(a) 現在気候（1980 年）、(b) 近未来気候（2040 年）、(c) 21 世紀末気候（2095 年）。

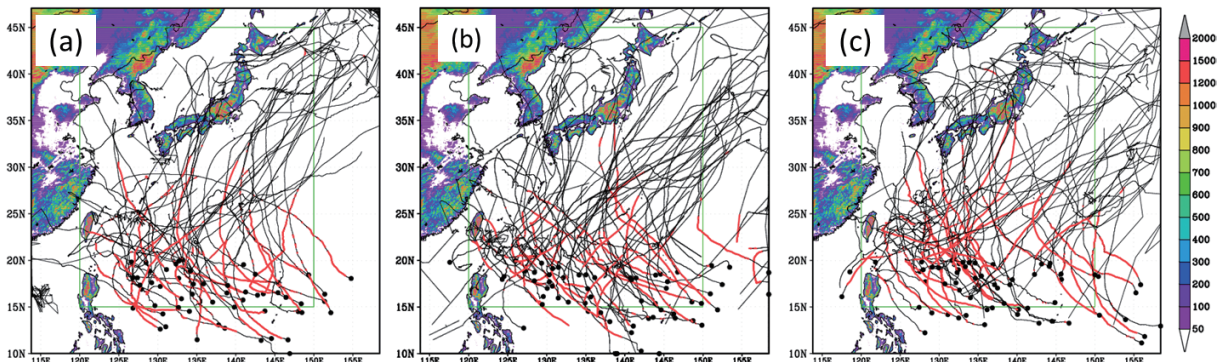


図 2 雲解像モデル CRESS を用いたダウンスケーリングシミュレーションで得られた (a) 現在気候、(b) 近未来気候、および (c) 21 世紀末気候における台風の経路。●は計算開始時の台風の位置、赤い線は風速 59m/s 以上。

強い台風で、実際の上陸すれば、2013年にフィリピンに上陸したスーパー台風 Haiyan (2013) と同様の甚大な被害が発生することが予想される。

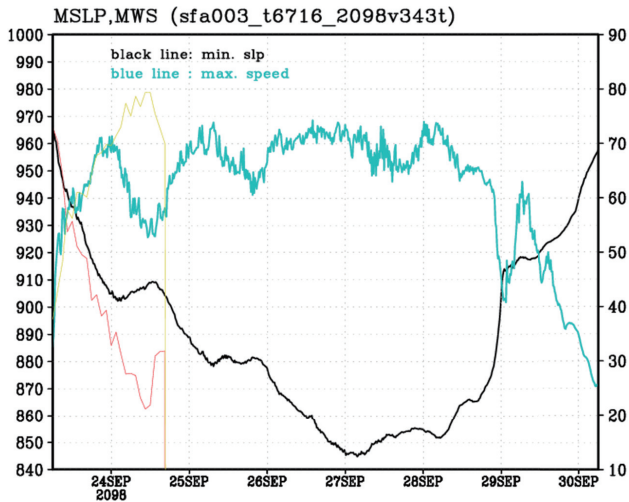


図4 図3に示した台風の中心気圧(黒線)と最大地上風速(青線)の7日間の時間変化。赤線とオレンジ線は対応するGSMの台風の中心気圧と最大地上風速。

5. まとめ

21世紀気候変動予測革新プログラムで気象研究所が実施した20km解像度の全球大気モデル(MRI-AGCM)実験に発生する台風のうち、北上する台風を選んで、雲解像モデルCReSSを用いたダウンスケーリング実験を行った。現在気候、近未来気候、さらに21世紀末気候となるにつれて、海面水温の上昇がみられる。それぞれ気候に発生する台風について、水平解像度2kmでダウンスケーリング実験を各約70事例について実施し、中緯度に北上する台風について経路と強度を調べた。海面水温の増加に対応して、21世紀末気候では非常に強い強度で中緯度に到達する台風が発生する。このことは気候変動とともに中緯度地域の台風についてリスクが増大することを示している。この実験の結果は地上のデータについて15分間隔という非常に高時間分解能のデータが得られており、そのデータは将来の台風災害の研究などに提供される。

謝辞など

地球シミュレータ利用において、計算の実行に手厚いサポートをいただくとともに、ストレージの使用などに特別の計らいをいただきましたことをここに記して感謝申し上げます。

文献

- [1] Emanuel, K. A. (1986), An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance, *J. Atmos. Sci.*, 43, 585–604.
- [2] Elsner, J. B., J. P. Kossin, and T. H. Jagger (2008), The increasing intensity of the strongest tropical cyclones, *Nature*, 455, 92–95.
- [3] Tsuboki, K. (2008), High-resolution simulations of high-impact weather systems using the cloud-resolving model on the Earth Simulator, *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, edited by K. Hamilton, and W. Ohfuchi, 141-156, Springer, New York.
- [4] Kossin, J. P., Emanuel, K. A. & Vecchi, G. A., (2014), The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature* 509, 349-352.
- [5] Mei, W. and S.-P. Xie (2016), Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s, *Nature Geoscience*, DOI: 10.1038/NGEO2792.
- [6] Tsuboki, K., M. K. Yoshioka, T. Shinoda, M. Kato, S. Kanada, and A. Kitoh (2015), Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 646–652, doi:10.1002/2014GL061793.
- [7] Tsuboki, K., and A. Sakakibara (2002), Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator, *High Performance Computing*, edited by H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, pp. 243-259, Springer, New York.

Future Change of Tropical Cyclones in the Western North Pacific with the Increase of Sea Surface Temperature

Project Representative

Kazuhisa Tsuboki Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Authors

Kazuhisa Tsuboki Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Mayumi K. Yoshioka Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

National Institute of Information and Communications Technology

Future change of typhoon intensity with the climate change is a big concern. Since the typhoon intensity is largely controlled by sea surface temperature (SST), its change has a significant impact on the maximum intensity of typhoon. The objective of the present study is a future projection of typhoon risks in the mid-latitude. We conducted high-resolution downscaling simulations of typhoons in the present, near-future and the late twenty-first century climates. The initial and boundary conditions for simulations are provided by the 20-km-mesh atmospheric general circulation model of the Meteorological Research Institute (MRI-AGCM) experiments in Kakushin Program. Using the CReSS model, 2-km-mesh downscaling simulations of the AGCM-simulated typhoons were performed for each climate. The simulation domain covers the most area of the western North Pacific. The SST in the domain increases about 1 °C from the present climate to the near-future climate and 2 °C to the late twenty-first century climate. In each climate, about 70 cases of typhoon were simulated by 2-km-mesh CReSS. The result shows that more intense typhoons reach higher latitude with the increase of SST.

Keywords: Typhoon, Climate change, Downscaling simulation, Cloud-resolving model, Future projection

1. Introduction

Typhoons in the western North Pacific are the major cause of weather disasters in East Asia including Japan. The number of typhoon in this region is the largest in the globe. Typhoon is the strongest tropical cyclone among tropical cyclones. The future change of typhoon in the western North Pacific will have great impact on the East Asian countries. In particular, the future change of typhoon intensity is a big concern. Since the maximum intensity of typhoon is largely controlled by the sea surface temperature (SST) (e.g., Emanuel 1986 [1]), its change with the climate change has a large impact on the typhoon intensity. Previous studies of tropical cyclones change showed that the intensity of intense tropical cyclone increases with the climate change (e.g., Elsner et al. 2008 [2]). Tsuboki et al. (2015) showed that the maximum intensity of supertyphoon in the western North Pacific will increase by the late twenty-first century. They also pointed out a possibility of landfall of supertyphoon on the main islands of Japan in late twenty-first century. Kossin et al. (2014)[4] showed locations of the life-time maximum intensity of tropical cyclone is migrating northward on the basis of the detailed examination of best-track data. Mei and Xie (2016)[5] found that landfalling typhoons of category 4 or more is increasing in the last decades. These previous studies indicate that risks of typhoon disaster are increasing in the mid-latitude regions.

The present study is an extension of the previous works of

the Earth Simulator Projects made in 2016 by the same authors. In these researches, we performed downscaling simulations of typhoons simulated in 20-km-mesh AGCM experiments performed by the Japan Meteorological Agency (JMA), Meteorological Research Institute (MRI) in the Kakushin Program based on the A1B scenario of SRES (Special Report on Emission Scenario). In the experiments of MRI, a near-future climate experiment was performed as well as the simulation of the late twenty-first century climate and present climate. These data were provided for downscaling simulations of typhoon using a cloud-resolving model named the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS). Because near-future changes of climate and related weather are a big concern, as found in SI-CAT (the Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology), for example.

In the present study, we performed downscaling simulations of typhoons in these climates and compared characteristics of typhoons. We focused on northward moving typhoons in the present, near-future, and late twenty-first century climates. The simulations were performed in a large domain covering the most area of the western North Pacific with a very high resolution of 2 km. Tsuboki et al. (2015) performed simulations in different computational domains for each typhoon. On the other hand, the computational domain is common in all the experiments in the present study. This makes it easy to compare the intensity distributions of the three climate simulations.

2. Model and experimental design

The numerical model used in the present study is the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) which has been developed for numerical simulations on the Earth Simulator. The basic equations of CReSS are the non-hydrostatic and compressible equation systems. The horizontal coordinates are orthogonal curvilinear type including the orthogonal linear coordinates (Cartesian coordinates) as the special case. The vertical coordinate is hybrid coordinate composed of a terrain-following coordinate and height coordinate. Using a stretching technique of the vertical coordinate, the lower levels are calculated with fine grid spacing. Prognostic variables are the three-dimensional velocity components, perturbations of pressure and potential temperature, water vapor mixing ratio, sub-grid-scale turbulent kinetic energy (TKE), and mixing ratios and number concentrations of cloud microphysical variables. A finite difference scheme is used for spatial discretization. The dependent variables are set on a staggered grid: the Arakawa-C grid in horizontal and the Lorenz grid in vertical. For time integration, the mode-splitting technique is used. Terms related to sound waves of the basic equation are integrated with a small time step and other terms with a large time step. Several different types of initial and boundary conditions are available for idealized and prediction experiments. The bulk parameterization of cold rain considers water vapor, rain, cloud, ice, snow, and graupel. Double moment of liquid and ice phases is optionally available. Parameterizations of the sub-grid scale eddy motions in CReSS are one-order closure or the 1.5-order closure with TKE. Heat, moisture and momentum fluxes at the earth surface are calculated by bulk schemes. One-dimensional thermal conductivity model is used for calculation of ground temperature. One-dimensional diffusion model is used for

the ocean mixing layer. The atmospheric and cloud radiation is calculated by RRTM (Rapid Radiative Transfer Model). A detailed description of CReSS is given by Tsuboki and Sakakibara (2002). Some simulation experiments of typhoon and heavy rainfall using CReSS are presented in Tsuboki (2008).

Table 1 summarizes the experimental settings in the present study. The computational domain is large enough to cover mostly the western North Pacific: 113.8–158.421°E and 0.0–47.0507°N. The horizontal coordinates are longitude and latitude. The grid numbers are 2403 and 2051 in longitude and latitude directions, respectively. The horizontal resolutions are 0.0186 in longitude and 0.0181 in latitude. These resolutions correspond to about 2 km. The vertical grid number is 83 and the lowest grid spacing is 100 m. The vertical grid spacing is stretched with an average grid spacing of 350 m. The vertical coordinate is a hybrid type: terrain following below 24000 m and height coordinate above that. The model top height is 28000 m and a dumping layer is set above 24000 m in height to prevent reflections of waves. An integration time is 604800 seconds (7 days) for each typhoon. The surface two-dimensional data are output every 15 minutes and upper atmospheric data every 6 hours.

The initial and boundary conditions are provided by the 20-km resolution MRI-AGCM in the Kakushin Program. As summarized in Table 2, three climate output data are available: present climate (1979–2003), near-future climate (2015–2039), and the late twenty-first climate (2075–2099). The future climate SST was estimated using the present climate SST and a multi-model ensemble of 18 SSTs based on the SRES A1B emission scenario. Dynamic downscaling simulations of typhoons found in the AGCM simulations in the three climates were performed using the CReSS model. The number of simulations is summarized in Table 2.

Table 1 Experimental setting of downscaling simulation.

Domain	Western North Pacific (fixed)
H. resolution	2 km in long.-lat. coordinates
H. grid number	X: 2403, Y: 2051
V. resolution	Min. 100m, average 350m
V. grid number	83
Integration period	7 days for each typhoon (604800 sec)
Initial and boundary condition	MRIAGSM20km Kakushin Program
Land model	Thermal cond. model , 41 levels, 6m
Ocean model	One-dim. Model, 41 levels, 40m
Radiation	RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)
Cloud physics	Two-moment bulk for cold rain
ES node number	128 nodes

3. Northward moving typhoons

The downscaling simulations of the present study focus on the northward moving typhoons because they have impact on the mid-latitude regions. We selected target typhoons for CReSS simulation according to the following criteria. 1) The life-time minimum sea level pressure of AGCM typhoons is 970 hPa or below in the region of 120–150°E and 15–45°N. 2) The central pressure reaches 970 hPa in the region of 115–160°E and 5–20°N. 3) The northernmost point of the AGCM typhoon is beyond 20°N.

Numbers of selected typhoon of AGCM are 85, 76, and 65 in present, near-future, and the late twenty-first century climates,

Table 2 Summary of periods, numbers of AGCM-typhoons, northing typhoons and cases for downscaling experiments in each climate.

climate	Period	Number of AGCM-typhoon	Average umber	Northing typhoon	Number of case
Present	1979-2003	593	23.7	85	71 cases
Near-future	2015-2039	541	21.6	76	73 cases
Future	2075-2099	471	18.8	65	62 cases

respectively. Using CReSS, we performed downscaling simulations of 60~70 typhoons in each climate. They are almost all the selected northward moving typhoons in each climate.

4. Result

Since SST is the primary factor to determine typhoon intensity, monthly average SSTs of September of the three climates are compared in Fig. 1. The SST is used for the lower boundary condition in ocean area. It changes from the initial value owing to the vertical diffusion of heat, radiation, and latent and sensible heat fluxes at the surface. In general, SST decreases below a typhoon and suppresses the typhoon development. SST is about 29~29.5°C to the east of the Philippines and 27°C to the south of the main islands of Japan in the present climate. It increases 1°C in the near-future climate and 2°C in the warmer climate of the late twenty-first century.

Figure 2 shows the typhoon tracks obtained in the downscaling simulations of each climate. They are distributed almost all the area of the western North Pacific. The red lines indicate periods of the maximum wind speed of 59 m s⁻¹ or larger. This corresponds to the most intense typhoon category of JMA. In general, the red lines extend to higher latitude in the warmer climates. In the warmer climate of the late twenty-first

century, an extremely intense typhoon was found (Fig. 3). The central pressure is nearly 850 hPa and the maximum surface wind speed is 70 m s⁻¹ (Fig. 4). They are extremely intense and

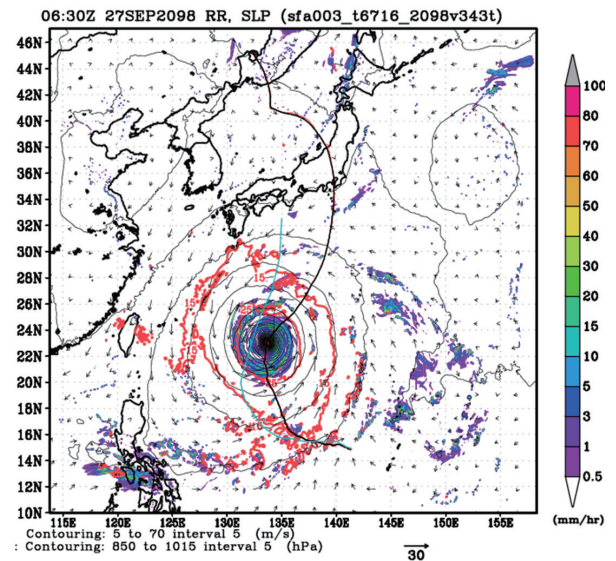


Fig. 3 An example of extremely intense typhoon simulated by the 2-km-mesh CReSS model in the global warming climate of the late twenty-first century. Black contours are sea level pressure, red contours are surface wind speed of 15 m s⁻¹, and the color shadings are precipitation intensity (mm h⁻¹).

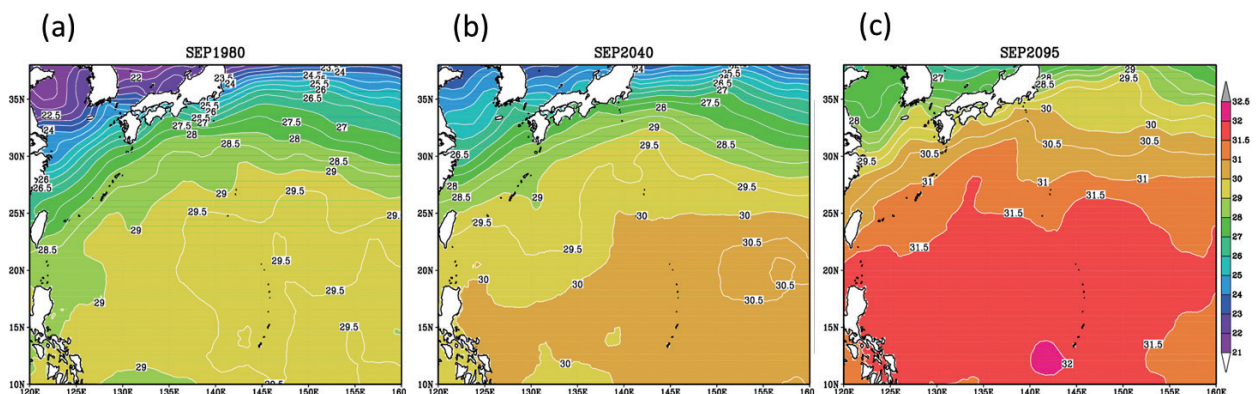


Fig. 1 Monthly average sea surface temperature of September obtained from 20-km resolution MRI AGCM based on A1B scenario and used for the cloud-resolving downscaling simulations: (a) the present climate (1980), (b) the near-future climate (2040), and (c) the late twenty-first century climate (2095).

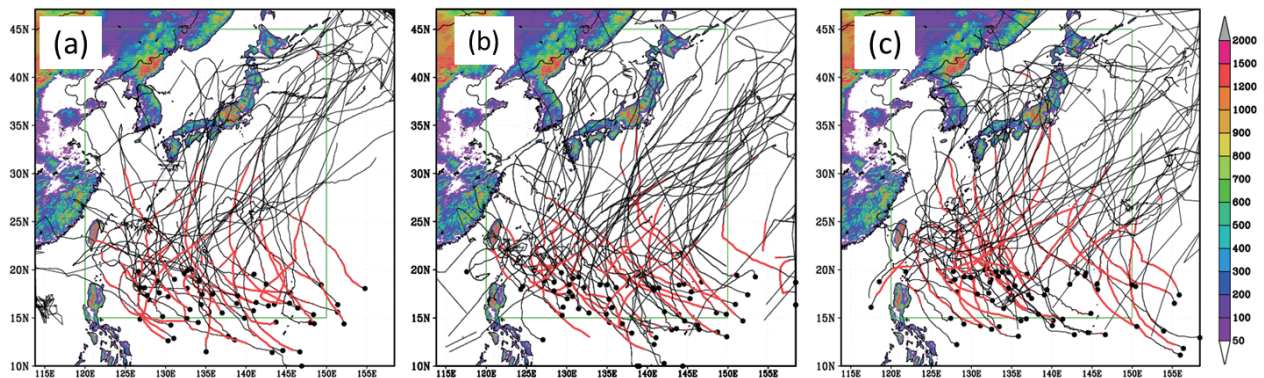


Fig. 2 Tracks of simulated typhoons obtained from the downscaling simulations using CReSS: (a) the present, (b) near future, and (c) the late twenty-first century climates. The closed circles are the initial points of typhoons in the initial time. The red parts of track indicate that the maximum wind speed is 59 m s⁻¹ or more.

severe disaster is expected with their landfall as a huge disaster occurred with the landfall of Supertyphoon Haiyan (2013) over the Philippines.

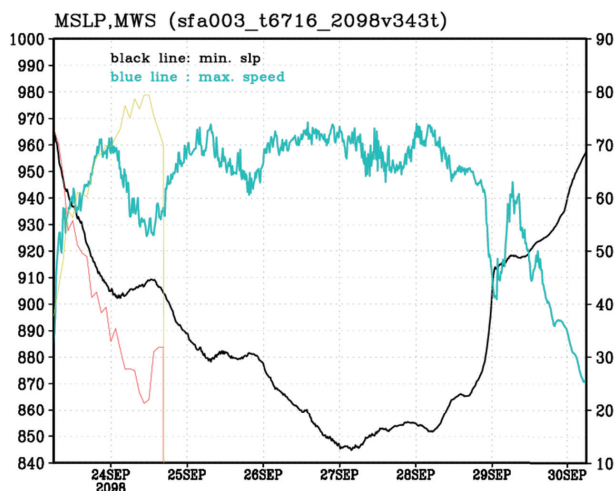


Fig. 4 Time series of the central sea level pressure (black line) and maximum surface wind speed of the simulated typhoon shown in Fig. 3 for the 7 days. The red and orange lines are those of the corresponding AGCM typhoon, respectively.

5. Summary

Using 20-km resolution MRI AGCM output data, CReSS made downscaling simulations of northward moving typhoons over the western North Pacific in present, near-future, and the late twenty-first century climates. SST used for the bottom boundary condition increases from present climate to the near-future climate, and then to the climate of the late twenty-first century. In each climate, roughly 70 typhoons were selected for the downscaling simulations and those were performed with a high-resolution of 2 km using CReSS. We examined tracks and intensity of the simulated typhoons. With increase of SST, more intense typhoons reach to the mid-latitude. This indicates that typhoon risk increases even in the mid-latitude in the warmer future climate. The output data of CReSS are obtained every 15 minutes for the surface data and every six hours for the atmospheric data. They will be provided for disaster researches.

Acknowledgement

We would like to thank JAMSTEC for their special support of the research in calculation and use of storages.

References

- [1] Emanuel, K. A. (1986), An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585–604.
- [2] Elsner, J. B., J. P. Kossin, and T. H. Jagger (2008), The increasing intensity of the strongest tropical cyclones, *Nature*, **455**, 92–95.
- [3] Tsuboki, K., M. K. Yoshioka, T. Shinoda, M. Kato, S. Kanada, and A. Kitoh (2015), Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 646–652, doi:10.1002/2014GL061793.
- [4] Kossin, J. P., Emanuel, K. A. & Vecchi, G. A., (2014), The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature* 509, 349-352.
- [5] Mei, W. and S.-P. Xie (2016), Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s, *Nature Geoscience*, DOI: 10.1038/NGEO2792.
- [6] Tsuboki, K., and A. Sakakibara (2002), Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator, *High Performance Computing*, edited by H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, pp. 243-259, Springer, New York.
- [7] Tsuboki, K. (2008), High-resolution simulations of high-impact weather systems using the cloud-resolving model on the Earth Simulator, *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, edited by K. Hamilton, and W. Ohfuchi, 141-156, Springer, New York.