

# 近未来及び 21 世紀末気候の北上する台風の雲解像モデルを用いた ダウンスケーリング実験

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<sup>\*1</sup>, 吉岡 真由美<sup>\*1,2</sup>, 加藤 雅也<sup>\*1</sup>

\*1 名古屋大学 宇宙地球環境研究所, \*2 情報通信研究機構

気候変動に伴い台風が将来どのように変化するのは、防災面でも水資源の面でも日本を含むアジア諸国の大きな関心事である。温暖化とともに中緯度でも台風が強度を維持して北上することが示されてきている。しかしながら、台風強度の緯度特性の将来変化、すなわち北上する台風がどの緯度で最大強度をとるのか、平均的に台風強度の緯度分布はどの程度変化するかについては、全球モデルでは解像度や対流パラメタリゼーションの問題から不確実性が大きい。そこで本研究では、雲解像モデルを用いて気象研究所 20km 全球モデルの近未来及び 21 世紀末の気候における台風の雲解像ダウンスケーリング実験を行い、台風強度の緯度分布特性が、地球温暖化に伴いどのように変わるのかを量的に示すことで、台風の将来変化との中緯度地域への影響を明らかにする。本課題では近未来気候および 21 世紀末気候の全球実験台風について、2km 解像度の雲解像モデルを用いてダウンスケーリングシミュレーションを実施した。各気候 25 年間において北太平洋西部を北上する 60 事例余りの台風について計算を実施し、台風の強度・経路・構造についてのデータが得られた。これらの結果から、近未来気候に比べて 21 世紀末気候の台風の方がより大きな強度で緯度の高い地域に達するなどの特徴が示された。

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, 気象災害

## 1. 研究の目的と意義

台風は暴風や豪雨により大規模な災害をもたらすとともに、東アジア地域における貴重な水資源でもある。このため地球温暖化に伴い台風がどのように変化するかは、日本を含む東アジア地域における大きな問題である。台風に関する問題としては、発生数、進路及び強度の温暖化に伴う変化が研究されてきているが、日本など中緯度地域への影響という観点から、本研究では北上する台風の強度の緯度分布特性が温暖化に伴ってどのように変化するかについて、雲解像モデルを用いた将来台風のダウンスケーリング実験を実施する。Tsuboki et al. (2015[5]) は、今世紀末の温暖化気候で発生する最も強いクラスの台風はスーパー台風の強度で日本に上陸する可能性があることを示した。そのようなリスクがいつから増大するのか、また平均的に温暖化とともに増加するのかは、日本の台風災害に対する防災において大きな社会的関心事となっている。これについて答えるには、現在の全球モデルによる実験では、解像度や対流のパラメタリゼーションの問題から不十分で、雲解像モデルを用いた多数の北上する台風について高解像度のダウンスケーリング実験が必要である。また Kossin et al. (2014[1]) は、観測データの解析から台風の最大強度の緯度が北上しつつあることを示した。Mei and Xie (2016[2]) はこれまでのベストトラックデータの解析から、上陸する台風の強度や強い台風の数が増大していることを示した。このようなことが近未来から今世紀末の温暖化気候においても同様に起こるの

か、あるいはさらにそれは顕著になるのかは中緯度地域の台風リスクを検討する上で重要な問題である。

本研究ではこれらの問題を解明するために、地球シミュレータで開発された雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) (Tsuboki and Sakakibara, 2002; Tsuboki, 2008[3,4]) を用いて、近未来気候と今世紀末の温暖化気候(将来気候)に現れる全球大気モデルの台風のダウンスケーリング実験を行った。日本を含む中緯度地域への台風の影響の将来変化を明らかにするために、北上する台風に着目し、そのダウンスケーリング実験を行い、台風の強度の緯度分布特性、すなわち台風の強度分布、特に中緯度での強度や、最大強度を取る緯度が、温暖化とともにどのように変化するのかを調べた。これにより温暖化の台風に対する影響とそれによる中緯度地域の台風リスクの増大を検討した。本研究のダウンスケーリング実験は、台風の眼の壁雲や積乱雲を解像できる 2km という高解像度で実施したので、計算の結果得られた台風の強度は量的に精度のよいものであることが期待される。本研究では、用いるモデル、計算領域、計算設定、入力データなどの条件を同じにして、近未来気候と今世紀末の気候の台風の比較する。

## 2. 研究内容

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実験の結果を用いる。この実験では 21 世紀末の気候だけでなく、近未来気候についても 25 年間のデータがある。これを用

表1 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	—
近未来気候	2015-2039年	541個	21.6個	76個	62事例
将来気候	2075-2099年	471個	18.8個	65個	61事例

いるのは、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からである。本研究では今世紀末と近未来のそれぞれの気候における、“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うことである。Tsuboki et al. (2015[5]) 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、本研究では共通の計算領域を用いて、ダウンスケーリング実験を行い、平均的、統計的な台風強度の緯度分布特性を調べる。実験の対象とする各気候の期間、全球モデルでの台風の数、計算対象となる北上する台風の数、実験数を表1にまとめた。このうちの近未来気候と将来気候について本研究で計算を実施する。現在気候については別の計算枠で計算を行い、本研究の結果と比較する。本研究で用いる雲解像モデルは地球シミュレータで開発されたCRESSである。このモデルについては、先の特別推進課題で海洋モデルと結合したものをを用いたが、本研究では大気のみを用い、海洋は混合層モデルのみを接続して計算を実施する。また、本研究は文部科学省委託研究気候変動リスク情報創生プログラムと密接に関連するものである。

### 3. 研究成果

ダウンスケーリング実験は、雲解像モデルCRESSを用いて行った。その実験設定を表2にまとめる。計算領域は全実験で共通で北太平洋西部のほとんどを覆う領域である。水平解像度は2km相当で、各台風について7日間の計算を行った。全球大気モデルに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120～150E、15～45Nの領域にあって、かつ、970hPa程度の気圧に5～20N、115～160E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度を越えるもの。

表2 ダウンスケーリング実験の設定

計算領域	北太平洋西部（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MRIAGSM20km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
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

表2に示すように、対象とする北上する台風は、近未来気候と将来気候でそれぞれ76と65事例であった。一方で現在気候については85事例と比較的多い。これらについて概ね60事例ずつダウンスケーリング実験をすることで、気候間の台風の特性の違いを比較できると考えられる。本課題では近未来気候と将来気候で62と61事例の計算を実施した。これらの数は、対象とする台風のほとんどといえる。

図1と2にそれぞれ近未来気候と将来気候のダウンスケーリング実験から得られた台風の経路を示す。北緯20°N以南を起点として、北上する台風がシミュレーションされていることが分かる。経路のうち赤い部分は、気象庁の台風の最強カテゴリーである「猛烈な台風」の最大地上風速54m/s以上の期間を示している。図1と2を比較すると、明らかに台風経路の赤い部分が、近未来気

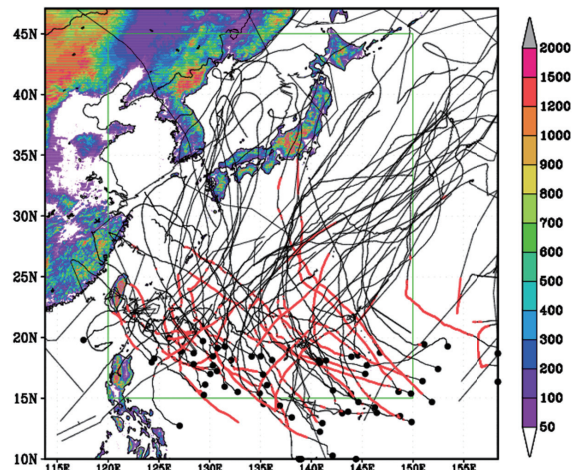


図1 近未来気候の北上する台風についてのダウンスケーリング実験から得られた62事例の台風の経路。図中の●は計算開始時の台風の位置、赤い線は最大地上風速54m/s以上の期間。ダウンスケーリング実験の対象とする台風は、緑の枠のなかで全球大気モデルの台風が970hPa以下の最低中心気圧になるものである。

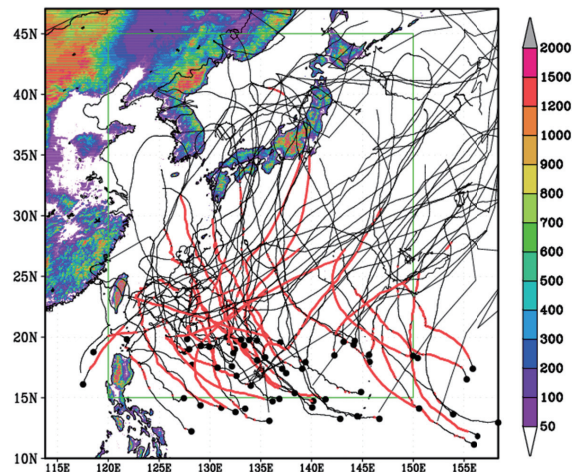


図2 図1と同じ。ただし21世紀末の将来気候の台風についての結果。

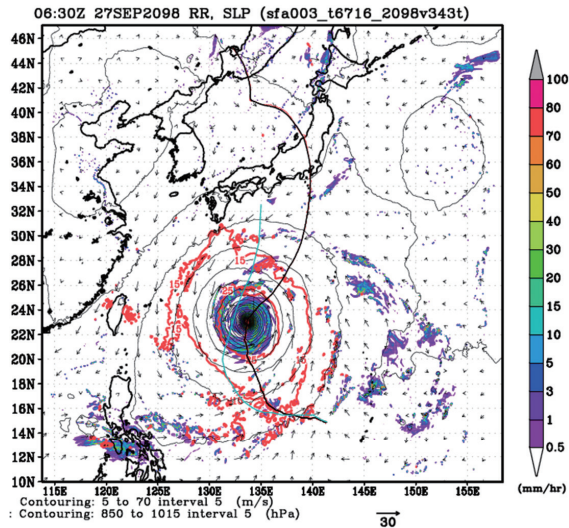


図3 将来気候のダウンスケーリング実験の台風のうち関東地方に上陸した例。黒実線は台風の経路、カラーレベルは地上降水強度 (mm hr<sup>-1</sup>)、黒の等値線は海面更正気圧、赤の等値線は風速 15 および 25 m s<sup>-1</sup> である。

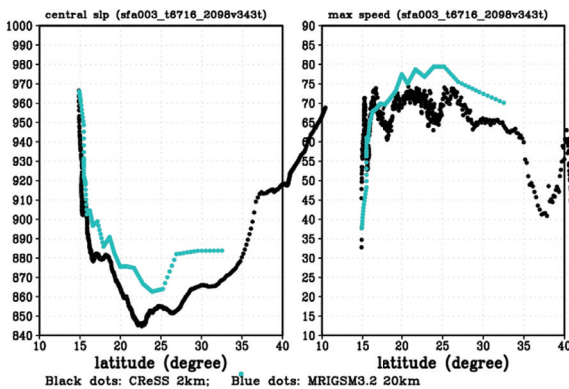


図4 図3に示した台風の緯度毎の強度変化。左は中心気圧、右は最大地上風速。水色の線はMRIAGSM20KM、黒はCReSSの結果

候にくらべて将来気候の方がより日本に近づいていることが分かる。このことから平均的に日本付近の台風強度が増大していることが分かる。

図3に関東地方に上陸する将来気候における台風の様子を示す。表示の時刻で眼の壁雲がはっきりしたきわめて強い台風で、地上風速 15 m s<sup>-1</sup> の領域が東西に約 15 度あり、ほぼ超大型の台風の規模である。図4に緯度ごとの中心気圧と最大地上風速の分布を示した。最低中心気圧は北緯 23° 付近にあるが、北緯 31° 付近まで 860 hPa で、最大地上風速は北緯 27° 付近まで 75 m s<sup>-1</sup> を超えている。高緯度まで非常に強い勢力を維持していることが分かる。本課題の結果から、各気候における台風の強度変化・経路・構造についてのデータが得られた。また、近未来気候に比べて 21 世紀末の将来気候の台風の方がより強い強度で緯度の高い地域に達するなどの特徴が示された。

#### 4. 想定される波及効果

気候変動により台風がどのように変わるのか、それによって中緯度地域は台風のリスクが増大するのかどうかという問題について、特に中緯度地域に影響する台風の

強度変化について、十分な精度を持つデータを提示することができる。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今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、近未来気候と今世紀末の気候について、台風の強度変化を調べるので、このような社会的要請に一つの答えを示すことができる。本研究で実施するダウンスケーリング実験は、台風の眼の壁雲や積乱雲を解像できる 2 km という解像度で実施されるので、計算の結果得られる台風の強度についても量的に精度のよいものであることが期待される。計算の結果得られる多数の台風のダウンスケーリング実験の結果は、各気候に発生する台風のデータとして公開される。この結果は本研究の目的に使用されるだけでなく、たとえば地上風のデータは将来気候の台風に伴う高潮の計算に用いられる。また、地上降水強度のデータは、台風に伴う降水強度の将来変化を統計的に調べる研究に用いられるだろう。大気の 3 次元のデータは、台風の構造の将来変化などの研究に用いられることも期待される。このように得られるデータは高解像度の台風データとしてさまざまな研究に利用されることが期待される。

#### 謝辞

地球シミュレータ特別推進課題において、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] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

# Cloud-resolving Downscaling Simulations of Northward-moving Typhoons in Warming Climates of the Near Future and Late Twenty-first Century

Project Representative

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

Authors

Kazuhiisa Tsuboki<sup>\*1</sup>, Mayumi K. Yoshioka<sup>\*1,2</sup> and Masaya Kato<sup>\*1</sup>

\*1 Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, \*2 National Institute of Information and Communications Technology

Future change of tropical cyclones is an important issue for the Asian countries including Japan from the viewpoint of disaster prevention and water resources. Increases of tropical cyclone intensity with the climate change have been demonstrated by previous studies. However, there are still large uncertainty in the future projection of tropical cyclones owing to model resolutions and convective parameterizations. In the present study, downscaling simulations of AGCM-simulated typhoons in the near-future and late twenty-first century climates have been performed to study the future change of typhoon with the climate change. The simulations of typhoons were made using a cloud-resolving model with a horizontal resolution of 2 km. Sixty northward-moving typhoons over the western North Pacific in 25 years of each climate were simulated. Tracks, intensities and structures of the simulated typhoons were examined. The typhoons in the late twenty-first century climate have larger intensity than those in the near-future climate. The former typhoons reach higher latitude with larger intensity than the latter typhoons.

**Keywords:** Typhoon, Climate change, Downscaling simulation, Cloud-resolving model, Meteorological disaster

## 1. Introduction

Typhoons occasionally cause a huge disaster owing to their violent wind and associated heavy rainfall. On the other hand, they are important water resources in East Asia. The future change of typhoon with the climate change is, therefore, a big issue in these areas including Japan. The main objective of the present study is future change of northward-moving typhoons which directly affect the mid-latitude countries. Future changes of number, intensity and tracks of typhoon have been studied in the previous researches. Tsuboki et al. (2015[5]) showed that the strongest category of typhoon possibly strikes the main islands of Japan with the intensity of super-typhoon. When does this type of typhoon risk appear? How intense will typhoons become in the future warmer climate? The previous studies raise a great concern for these problems. On the basis of data analysis of typhoon, Kossin et al. (2014[1]) found that the latitude of typhoon maximum intensity is migrating northward with time. Mei and Xie (2016[2]) showed the increase of number of the strongest category of typhoon and increase of typhoon intensity. It is important problem whether a similar increase of typhoon risk in the mid-latitude will occurs in the near-future and future climates.

To clarify the increase of typhoon risk in the mid-latitude, we performed downscaling simulation experiments of AGCM-simulated typhoons in the near-future and future climates using CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) (Tsuboki

and Sakakibara, 2002; Tsuboki, 2008[3,4]). We focused on the northward-moving typhoons which strongly affect mid-latitude countries. Typhoon intensities in the mid-latitude, latitude variation of typhoon intensity and latitudes of the life-time maximum intensity of typhoon were studied.

## 2. Methods

The initial and boundary conditions of the downscaling experiments were provided by the Meteorological Research Institute (MRI) 20-km-mesh AGCM, MRI-AGCM3.2. AGCM experiments were performed based on the Special Report on Emission Scenario (SRES) A1B emission scenario. These experiments include the present, near-future, and late twenty-first century (future) climate experiments. The advantage and uniqueness of these experiments are the near-future experimental data which are important for the present human society. In the present study, we perform downscaling experiments of northing typhoons of the near-future and future climates in a large domain with a very high resolution of 2 km. The domain is fixed for the western North Pacific for all experiments. The period of each climate, number of AGCM typhoons, number of northing typhoon in AGCM and number of experiments in each climate are summarized in Table 1.

Table 1 Summary of periods, numbers of AGCM-typhoons, northing typhoons and cases for downscaling experiments in each climate.

climate	Period	Number of AGCM-typhoon	Average number	Northing typhoon	Number of case
Present	1979-2003	593	23.7	85	–
Near-future	2015-2039	541	21.6	76	62 cases
Future	2075-2099	471	18.8	65	61 cases

### 3. Results

The experimental setting of downscaling simulations using CReSS is summarized in Table 2. The domain is common for all experiments and the horizontal resolution is 2 km. The integration period is 7 days for each typhoon. We selected northing typhoons of the AGCM-experiments according to the following two criterion. (1) The life-time minimum central pressure in the AGCM-experiments is equal to or lower than 970 hPa and its point is located in the area of 120-150 E and 15-45 N. (2) The central pressure reaches about 970 hPa in the area of 5-20 N and 115-160 E, and the northernmost point of typhoon is beyond 20 N.

Table 1 showed that the northing AGCM-typhoons are 76 and 65 in the near-future and future climates, respectively. In contrast, there are 85 typhoons in the present climate. The downscaling experiments were performed for 62 and 61 typhoons in the near-future and future climates, respectively. They are sufficient numbers to represent the characteristics of northing typhoons in each climate.

Figures 1 and 2 show the all tracks of typhoons obtained in the downscaling experiments in the near-future and future climates, respectively. The initial points of experiments are located to the south of 20 N and typhoons move northward. The red parts of the tracks indicate that typhoon intensity is the JMA-strongest-category (equal to or greater than  $54 \text{ m s}^{-1}$ ). In comparison of these two figures, it is clear that the red parts of tracks increase in the mid-latitude in the future climate than the near-future climate.

Figure 3 shows an example of an intense typhoon passing over the Kanto region in the future climate. It is very intense typhoon with a clear eyewall. The diameter of the region of  $15 \text{ m s}^{-1}$  wind speed is about 15 degree in zonal direction, which is almost the JMA-largest category of typhoon size. Figure 4

Table 2 Experimental setting of downscaling simulations

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
Cloud physics	Two-moment bulk for cold rain
ES node number	128 nodes

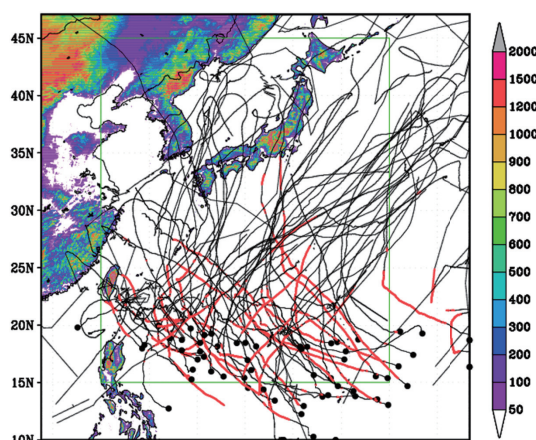


Fig. 1 Typhoon tracks of near-future climate obtained from the 62 downscaling experiments. The closed circles indicate initial points of typhoons. The red parts of tracks mean that the surface maximum wind speed is equal or larger than  $54 \text{ m s}^{-1}$ .

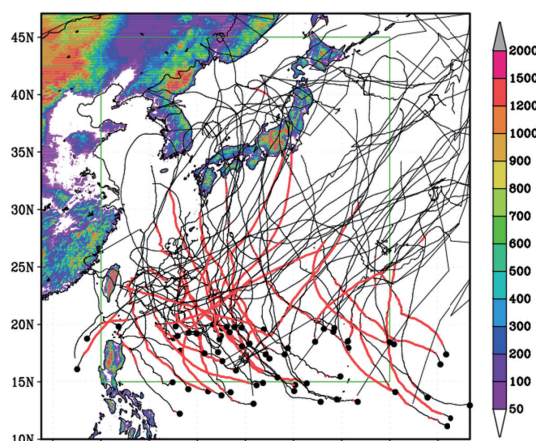


Fig. 2 Same as in Fig. 1 but for 61 typhoons of the future climate.

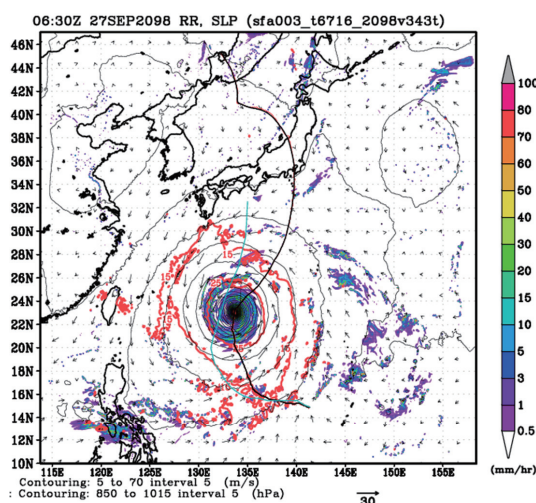


Fig. 3 A case of intense typhoon of the future climate. The black line is the track of typhoon. The color levels are the rainfall intensity at the surface ( $\text{mm hr}^{-1}$ ), black contours are sea level pressure, and red contours are the wind speed of 15 and  $25 \text{ m s}^{-1}$ .

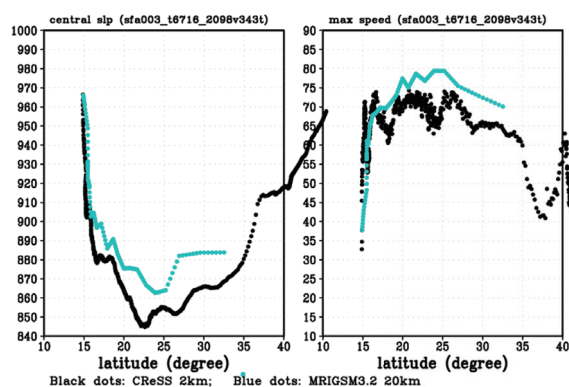


Fig. 4 Latitude variation of the central pressure (left panel) and the maximum wind speed of the typhoon shown in Fig. 3. The light blue dots are MRIAGSM20KM and black dots are CReSS.

shows the latitude distribution of the central pressure and the maximum surface wind speed. The life-time minimum central pressure is located around 23 N. The central pressure is lower than 860 hPa until 31 N and the maximum surface wind speed is larger than  $75 \text{ m s}^{-1}$  until 27 N. These indicate that the simulated typhoon maintained very strong intensity to the mid-latitude. The downscaling experiments of the present study showed that the typhoons in the future climate are more intense in the mid-latitude than those in the near-future climate. This result suggests the increase of the typhoon risks in the mid-latitude.

#### 4. Concluding Remarks

Since the downscaling experiments were performed using the cloud-resolving model with a very high resolution of 2 km, the obtained data are considered to be quantitatively accurate. The data will be open after a quality check is made. The surface data are output every 15 minutes. For example, they are used for a study of storm surge associated with future typhoons.

#### Acknowledgement

The Earth Simulator was used in the present study as “Strategic Project with Special Support” of JAMSTEC. We would like to thank JAMSTEC for their special support of the research.

#### References

- [1] 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.
- [2] Mei, W. and S.-P. Xie (2016), Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s, *Nature Geoscience*, DOI: 10.1038/NCEO2792.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.