

# 気候変動に伴う台風・沿岸災害ハザードの長期評価手法の開発

課題責任者

森 信人 京都大学防災研究所

著者

二宮順一<sup>\*1</sup>、後藤浩二<sup>\*2</sup>、平 陽介<sup>\*2</sup>、志村智也<sup>\*3</sup>、撫佐昭裕<sup>\*2,4</sup>、竹見哲也<sup>\*3</sup>、森 信人<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup>金沢大学理工研究域, <sup>\*2</sup>日本電気株式会社, <sup>\*3</sup>京都大学防災研究所, <sup>\*4</sup>東北大学サイバーサイエンスセンター

要旨

台風に起因する沿岸災害におけるマングローブの減災効果の定量的な評価を行うため、地球シミュレータで効率的に実行できる大気海洋波浪結合モデルの開発を行ってきた。近年、地球温暖化による台風災害の拡大が懸念される中、本モデルを用いて気候変動に伴うスーパー台風による災害の定量的評価のため擬似温暖化実験を行った。実験として RCP8.5 に基づく 4 通りの温暖化差分を用いて、2013 年にフィリピンに甚大な被害をもたらした台風 Haiyan のシミュレーションを行った。その結果、4 通りの温暖化条件において、台風 Haiyan の最低気圧の低下と最大風速の増加が起こることが示された。

キーワード：モデル高度化, HPC 技術, 大気海洋波浪結合モデル, 台風 Haiyan, 擬似温暖化実験

## 1. はじめに

台風は、洪水、地滑り、高波、高潮の原因となる主要な気象災害の 1 つである。台風の大きさ、強度、経路によっては、熱帯・亜熱帯およびの中緯度の広い範囲に壊滅的な被害をもたらす。例えば、2013 年にフィリピンへ上陸した台風 Haiyan によって、802 百万ドルの経済的な損失があっただけでなく、34,803 人の死傷者・行方不明者という非常に大きな人的被害があったことが報告されている [1]。さらに、気候変動に伴い、台風がより強力になり、災害の規模の拡大が懸念されている [2]。このような台風による災害を軽減および防止するためには、正確な数値予報モデルに基づくタイムリーかつ適切な警報、減災効果のあるインフラ（例えば、防波堤などのグリーンインフラやマングローブなどのグリーンインフラ）の設置などが必要である。

本課題の目的は、台風による沿岸災害およびマングローブの減災効果を評価するため、高解像度の大気海洋波浪結合モデルを開発することである。

本年度は、これまでに開発してきた高解像度大気海洋波浪結合モデル [3][4][5] を使用し、気候変動に伴う大型台風による災害の定量的評価のための擬似温暖化実験を行った。

## 2. 高解像度大気海洋波浪結合モデル

高解像度大気海洋波浪結合モデルは、USGS の COAWST モデルをベースとし、大気モデル (WRF [6])、海洋モデル (ROMS [7])、波浪モデル (SWAN [8]) の各モデルコンポーネントとそれらを結合するツールキット (MCT [9]) から構成されている。本結合モデルを地球シミュレータ (ES) において効率的に実行するには、VPU (Vector Processor Unit) [10] の利用効率と並列化効率の改善が必要である。これまで、VPU の利用効率を高めるため、COAWST を構成する各モデルコンポーネントの演算特性を VPU の使用状況

を表す指標 (ベクトル演算率とベクトル長) をもとに解析し、これらの指標を高める実装方式を検討・改良してきた **エラー! 参照元が見つかりません。エラー! 参照元が見つかりません。**。これらの VPU の利用効率のための最適化により、COAWST の各モデルコンポーネント (WRF, ROMS, SWAN) のベクトル化率は、それぞれ 96%, 99%, 94% まで向上した。また、ES 上での COAWST の並列処理の効率を高めるため、COAWST の各モデルコンポーネントの演算時間、通信時間および通信の待ち時間等のモデル間の負荷バランスを解析し、負荷均等化するよう計算機資源の配分の最適化を行ってきた。これらの最適化により、ES の 353 ノードを使用し、台風 Haiyan の 5 日間のシミュレーションを約 22 時間で実行可能とした。

## 3. 気候変動に伴う台風及び沿岸災害への影響評価手法の開発

気候変動に伴う台風及び沿岸災害への影響を評価するため、これまで評価してきた 2013 年の台風 Haiyan を対象に、擬似温暖化実験を行った。擬似温暖化実験における大気モデル WRF および海洋モデル ROMS の初期値・境界値には、第 5 期結合モデル相互比較計画 (5th phase of the Coupled Model Inter-comparison Project: CMIP5) に提出された RCP8.5 シナリオ [11] に基づく将来予測シミュレーションの結果を使用した。将来予測シミュレーションの 1979 年から 2003 年までの結果を平均した現在気候値と 2075 年から 2099 年までの結果を平均した将来気候値との差分を 2013 年の台風 Haiyan の計算に使用した初期値・境界値に加え、シミュレーションを行うことで、気候変動による影響を評価した。今回は、CMIP5 に提出された 28 個のモデルによる将来予測シミュレーション結果を分析し、3 つのクラスタに分類し、クラスタ毎に作成した初期値・境界値データを用いた 3 ケース ((C1, C2, C3 と呼ぶ) と 3 つのクラスタを平均した初期値・境界値データを用いた

ケース (C0 と呼ぶ) の合計 4 ケースのシミュレーションを行った。表 1 にシミュレーションに使用したパラメータを示す。

4 つの擬似温暖化実験 (C0, C1, C2 及び C3) と以前行った 2013 年の台風 Haiyan の再現実験の結果をエラー! 参照元が見つかりません。に示す。経路(エラー! 参照元が見つかりません。(a))については、4 つの擬似温暖化実験と再現実験ではほとんど差はみられなかった。一方、最低気圧(エラー! 参照元が見つかりません。(b))と最大風速(エラー! 参照元が見つかりません。(c))については、4 つの擬似温暖化実験の結果はいずれも再現実験よりも最低気圧は低くなり、最大風速は増加していることが分かった。

#### 4. まとめと今後の予定

地球シミュレータにおいて、これまで開発してきた COAWST 大規模モデルを使用し、気候変動による台風及び沿岸災害への影響評価のための疑似温暖化実験を行った。その結果、温暖化により台風の最低気圧低下と最大風速の増加が起こることが示された。また、気候変動に伴う長期評価手法として本疑似温暖化実験が有効であることが示された。

今後、これまで開発してきたモデルおよび手法を他の過去の日本に襲来した顕著な台風事例にも適用し、本手法の検証を進める予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 S-18 サブテーマ 3-2 および科学研究費補助金により実施された。

#### 文献

- [1] Mori, N., Kato, M., Kim, S., Mase, H., Shibutani, Y., Takemi, T., Tsuboki, K., and Yasuda, T., “Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf,” *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5106-5113, (2014).  
<https://doi.org/10.1002/2014GL060689>.
- [2] Murakami, H., Mizuta, R., and Shindo, E., “Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60 km-mesh MRI-AGCM,” *Climate Dynamics*, 39, 2569–2584, 2016.
- [3] Mori, N., Taira, Y., Takemi, T., Ninomiya, J., Sakakura, K., Musa, A., Watanabe, O., Goto, K., and Shimura, T., “Optimization of Atmosphere-Ocean-Wave Coupled Model Using HPC Technique,” *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2017–March 2018, 69–70, 2019.
- [4] Singh, K. S., Sakakura, K., Saha, S. Mathur, R., Sharma, C., Goto, K., Watanabe, O., and Musa, A., “Optimizations of COAWST for a Large Simulation on the Earth Simulator,” 2018 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), Belfast, 629–636, 2018.
- [5] Sakakura, K., Ninomiya, J., Goto, K., Taira, Y., Shimura, T.,

Musa, A., Takemi, T., and Mori, N., “Optimization of Coupled Atmosphere-Ocean-Wave Model – Test Simulation of Typhoon Haiyan –,” *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2019–March 2020, I-6-5 – I-6-7, 2020.

[6] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., “A Description of the Advanced Research WRF Version 3,” NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, (2008).  
<http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>

[7] Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C., “The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model,” *Ocean Modelling*, 9(4), 347–404, (2005).

[8] Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C., “The SWAN wave model for shallow water. In: *Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering*,” 1, 668–676, (1996).

[9] Larson, J., Jacob, R., & Ong, E., “The Model Coupling Toolkit: A New Fortran90 Toolkit for Building Multiphysics Parallel Coupled Models,” *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 19(3), 277–292, (2005).  
<https://doi.org/10.1177/1094342005056115>

[10] Ryusuke Egawa, Kazuhiko Komatsu, Shintaro Momose, Yoko Isobe, Akihiro Musa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi., “Potential of a modern vector supercomputer for practical applications: performance evaluation of SX-ACE,” *The Journal of Supercomputing*, 73(9), 3948–3976, (2017).  
<https://doi.org/10.1007/s11227-017-1993-y>

[11] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535.

表 1 モデルパラメタ

大気モデル (WRF)			
項目名	値	項目名	値
水平解像度	領域 1:3km 領域 2:1km	地表面フラックス (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov (Janjic) scheme
水平格子数	領域 1: 1334x667 領域 2: 2001x705	大気境界層 (bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme
鉛直層数	55 層	陸面 (sf_surface_physics)	thermal diffusion scheme
雲微物理 (mp_physics)	Lin et al. scheme	初期値・境界値データ	NCEP FNL + pseudo global warming (C0, C1, C2, and C3)
短波放射 (ra_sw_physics)	Dudhia scheme	地形データ	GTOPO30
長波放射 (ra_lw_physics)	RRTM scheme		
海洋モデル (ROMS)			
項目名	値	項目名	値
水平解像度	領域 1:3km	初期値・境界値 データ	SODA3.4.2/4deg 5day + pseudo global warming (C0, C1, C2, and C3)
水平格子数	領域 1:1334x667	海底地形データ	GEBCO
鉛直層数	40 層		
波浪モデル (SWAN)			
項目名	値	項目名	値
水平解像度	領域 1: 3km	初期値・境界値データ	初期値: computed from local wind, 境界値: NOAA WWIII Global 30 min.
水平格子数	領域 1: 1334x667	海底地形データ	GEBCO
方位分割数 x 周波 数分割数	36x24		

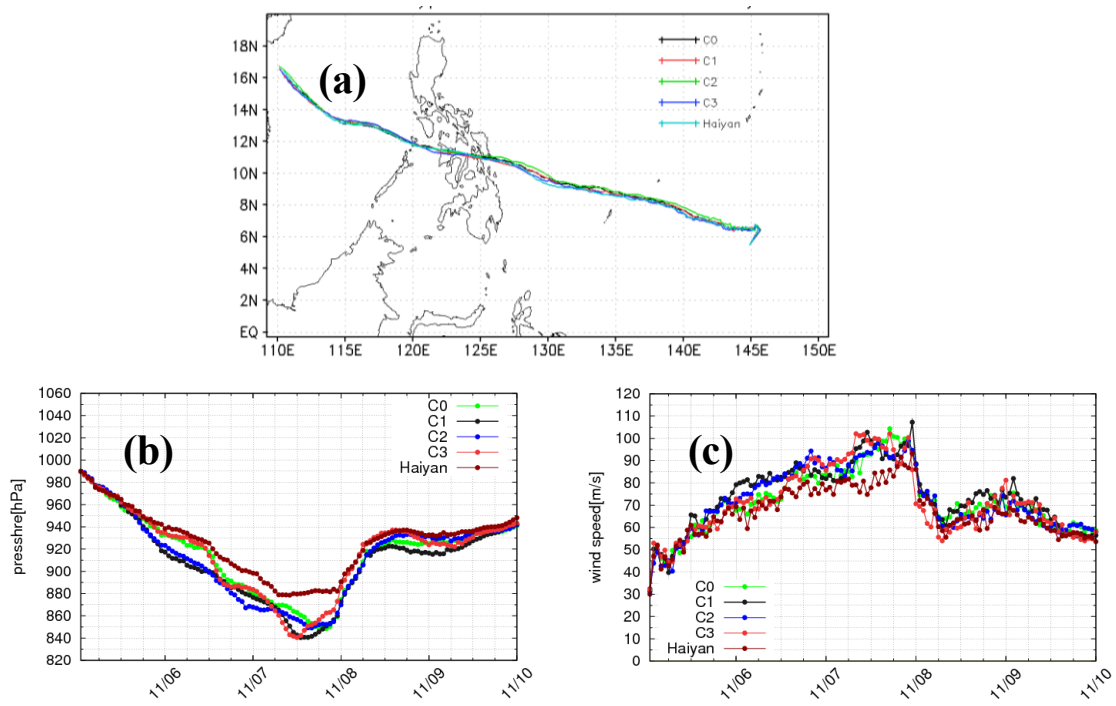


図 1 擬似温暖化実験における台風の経路(a), 最低気圧(b)と最大風速(c)

# Evaluation of Global Warming Impact Assessment on Extreme Typhoon Hazards

## Project Representative

Nobuhito Mori      Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

## Authors

Junichi Ninomiya <sup>\*1</sup>, Kouji Goto <sup>\*2</sup>, Yosuke Taira <sup>\*2</sup>, Tomoya Shimura <sup>\*3</sup>, Akihiro Musa <sup>\*2, \*4</sup>, Tetsuya Takemi <sup>\*3</sup>, Nobuhito Mori <sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Kanazawa University, <sup>\*2</sup> NEC Corporation, <sup>\*3</sup> Kyoto University, <sup>\*4</sup> Tohoku University

We have developed and optimized a high-resolution, high-speed atmosphere-ocean-wave coupled model in Earth Simulator to understand damage caused by super typhoons. Typhoons have become larger and more powerful due to global warming, and created many victims and extensive infrastructure damage. We evaluate the impact of global warming on typhoons using our coupled model. We simulate Typhoon Haiyan that struck the Philippines in 2013 using four kinds of projected atmospheric conditions from CMIP5, and the minimum central pressure and the maximum wind velocity in each condition decreases and increases, respectively.

**Keywords:** Optimization, HPC Technique, Atmosphere-Ocean-Wave Coupled Model, Typhoon Haiyan,

## 1. Introduction

A typhoon is a meteorological disaster that causes floods, landslides, storm surges, and storm waves. In 2013, an enormous, extremely intense tropical cyclone struck the Philippines; it would be named Typhoon Haiyan (known as Yolanda in the Philippines). There were 34,802 casualties, and infrastructure and agricultural damage was estimated at USD \$802 million [1]. Global warming has been increasing the strength of typhoons, which increases the scale of their damage [2]. A numerical simulation that can accurately estimate typhoon damage is necessary to understand the damage caused by more powerful typhoons. Therefore, we have developed a high-resolution atmosphere-ocean-wave coupled model in Earth Simulator [3][4][5]. In the work reported here, we evaluate the impact of global warming on typhoon phenomena using our model.

## 2. High-resolution atmosphere-ocean-wave coupled model

Our high-resolution atmosphere-ocean-wave coupled model based on COAWST developed by the US geological survey consists of an atmosphere model (WRF [6]), an ocean model (ROMS [7]), a wave model (SWAN [8]), and a model coupling toolkit (MCT [9]). Each model was vectorized and parallelized in Earth Simulator. A five-day simulation of the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan uses a high-resolution model with a 3-km/1-km nested atmosphere model, a 3-km ocean model, and a 3-km wave model. It took 21.7 hours using 353 nodes of Earth Simulator [5].

## 3. Pseudo global warming experiment

We simulate Typhoon Haiyan with our high-resolution atmosphere-ocean-wave coupled model using the projected atmospheric conditions of RCP 8.5 global warming scenario. Table 1 lists the parameters of the experiment. The initial and boundary data of the WRF model are calculated from the results of 28 projected global warming models for the period of 2075 through 2099. These models are accepted by the 5<sup>th</sup> phase of the Coupled Model Inter-comparison Project. C0 is the ensemble averages of the 28 models. C1, C2, and C3 are based on the cluster analyses of sea surface temperatures in the 28 models.

Figure 1 shows the results of the pseudo global warming experiment: the tracks of typhoons, the time variations of minimum central pressures, and the time variations of maximum wind velocities. Haiyan indicates the simulation results of the weather conditions in 2013. Each simulated typhoon roughly follows the same track. Meanwhile, the minimum central pressures and maximum wind velocities in four global warming conditions are lower and higher than those in Haiyan, respectively.

## 4. Summary

We evaluate the impact of global warming on typhoons, such as Haiyan, using our high-resolution atmosphere-ocean-wave coupled model, which has been developed in Earth Simulator. The results show that global warming can increase typhoon power. Moreover, the results determine that the pseudo global warming experiment is an effective approach for evaluating the impact of global warming.

## Acknowledgement

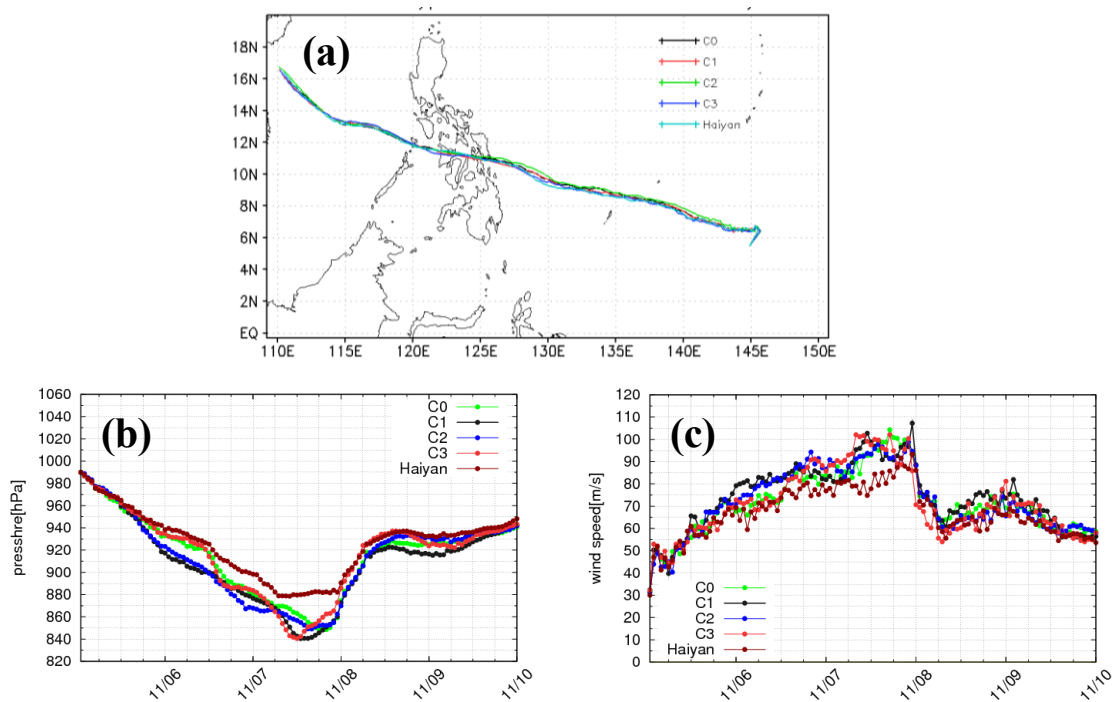
This research was supported by the Environment Research and Technology Development Fund S-18 (3-2) of the Ministry of the Environment, Japan, and MEXT/JSPS KAKEN.

## References

- [1] Mori, N., Kato, M., Kim, S., Mase, H., Shibutani, Y., Takemi, T., Tsuboki, K., and Yasuda, T., “Local amplification of storm surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf,” *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5106–5113, (2014).  
<https://doi.org/10.1002/2014GL060689>.
- [2] Murakami, H., Mizuta, R., and Shindo, E., “Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60 km-mesh MRI-AGCM,” *Climate Dynamics*, 39, 2569–2584, 2016.
- [3] Mori, N., Taira, Y., Takemi, T., Ninomiya, J., Sakakura, K., Musa, A., Watanabe, O., Goto, K., and Shimura, T., “Optimization of Atmosphere-Ocean-Wave Coupled Model Using HPC Technique,” *Annual Report of the Earth Simulator, April 2017–March 2018*, 69–70, 2019.
- [4] Singh, K. S., Sakakura, K., Saha, S., Mathur, R., Sharma, C., Goto, K., Watanabe, O., and Musa, A., “Optimizations of COAWST for a Large Simulation on the Earth Simulator,” *2018 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER)*, Belfast, 629–636, 2018.
- [5] Sakakura, K., Ninomiya, J., Goto, K., Taira, Y., Shimura, T., Musa, A., Takemi, T., and Mori, N., “Optimization of Coupled Atmosphere-Ocean-Wave Model – Test Simulation of Typhoon Haiyan –,” *Annual Report of the Earth Simulator, April 2019–March 2020*, I-6-5 – I-6-7, 2020.
- [6] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., “A Description of the Advanced Research WRF Version 3,” *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, (2008).  
<http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
- [7] Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C., “The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model,” *Ocean Modelling*, 9(4), 347–404, (2005).
- [8] Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C., “The SWAN wave model for shallow water. In: *Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering*,” 1, 668–676, (1996).
- [9] Larson, J., Jacob, R., & Ong, E., “The Model Coupling Toolkit: A New Fortran90 Toolkit for Building Multiphysics Parallel Coupled Models,” *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 19(3), 277–292, (2005).  
<https://doi.org/10.1177/1094342005056115>.
- [10] Ryusuke Egawa, Kazuhiko Komatsu, Shintaro Momose, Yoko Isobe, Akihiro Musa, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi., “Potential of a modern vector supercomputer for practical applications: performance evaluation of SX-ACE,” *The Journal of Supercomputing*, 73(9), 3948–3976, (2017).  
<https://doi.org/10.1007/s11227-017-1993-y>.
- [11] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535.

**Table 1 Simulation parameters**

Parameters	Atmosphere model	Ocean model	Wave model
Model	WRF	ROMS	SWAN
Spatial resolution	Region 1: 3 km Region 2: 1 km	Region 1: 3 km	Region 1: 3 km
Number of grids	Region 1: 1334 × 667 Region 2: 2001 × 705	Region1: 1334 × 667	Region 1: 1334 × 667
Number of vertical layers	55	40	-
Number of grids in spectral space	-	-	36 x 24
Initial and boundary data	NCEP FNL + Pseudo global warming (C0, C1, C2, and C3)	SODA 3.4.1, 1/4 deg., 5 days + Pseudo global warming (C0, C1, C2, and C3)	Computed from local winds, NOAA WWIII Global 30 min.
Topographic data	GTOP030	GEBCO	GEBCO
Scheme	Lin et al. scheme, Dudhia scheme, RRTM scheme, Monin-Obukhov scheme, Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme, thermal diffusion scheme		



**Fig. 1. Simulation results. (a):** Tracks of typhoon, **(b):** Time variations of minimum central pressure, **(c):** Time variations of maximum wind velocity.