

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

坂倉耕太^{*5}、二宮順一^{*3}、後藤浩二^{*2}、平陽介^{*2}、志村智也^{*1}、撫佐昭裕^{*2,4}、竹見哲也^{*1}、森 信人^{*1}

*1 京都大学防災研究所, *2 日本電気株式会社, *3 金沢大学理工研究域, *4 東北大学サイバーサイエンスセンター
*5 計算科学振興財団

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のため、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による評価手法の開発を行った。本モデルを用いて、気候変動に伴う大型台風を想定し、台風 Haiyan 級の大型台風がフィリピン他の地域へ上陸する場合を評価する手法の開発と検証を行った。

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

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、防波堤などのグレイ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、平成29・30年度に開発した高解像度大気海洋波浪結合モデルを使用し、2013年のHaiyanと同程度の強度の台風が他の国・地域へ上陸した場合を想定した数値実験(以降、仮想地形実験と呼ぶ)を行い、台風による沿岸災害評価のための手法開発を行った。

2. 高解像度大気海洋波浪結合モデルの開発

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[4])、海洋モデル(ROMS[5])、波浪モデル(SWAN[6])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[7])から構成されている。本結合モデルのパラメタ(解像度、格子数、使用スキーム、初期値・境界値データ等)を表1に示す。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)[8]

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[9]。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を最適化した。これらの最適化により、台風 Haiyan の5日間のシミュレーションにおいて、実行時間はそのままに、ノード数を512ノードから353ノードに減らすことに成功した。また、高解像度計算として、WRF単体による大規模計算モデルを整備し、512ノードで8時間積分を約1日で実行可能とした。

3. 地形ざらし実験

過去の再現は1つの計算例となるが、2013年のHaiyanがフィリピンの他地域へ上陸した場合を仮定した実験は、他地域における極端な沿岸災害評価のため重要である。このため、標高・海底地形・海陸マスクなどのデータを-2度から+5度まで1度刻みで南北にずらし、8種類の地形データを作成した。これらの地形データの作成には、大気モデル(WRF)の前処理システム(WPS)の中のプログラム(geogrid)を改造し、使用した。これらの地形データに合わせて大気モデル及び海洋モデルの初期値・境界値をそれぞれ作成し、仮想地形実験を行った。仮想地形実験で使用した8種類の地形データ(標高データ)と台風経路を図2に示す。台風は移動した地形の分だけ経路

が南北に移動していることがわかる。また、最低気圧と最大風速の時間変化を図 1 に示す。さらに台風上陸時における有義波高の分布を図 3 に示す。最低気圧と最大風速の時間変化については、台風が上陸する 203 年 11 月 7 日以前は大きな違いは見られない。

地形をずらしたことにより、台風が上陸する時刻は数時間前後する。上陸時間が前後する影響は、図 1 の最低気圧の時間変化にもみられる。地形を北へ 3 度ずらしたケースが最も早く上陸しており、最低気圧の上昇と最大風速の低下も地形を北へ 3 度ずらしたケースが最も早く、上陸順と整合している。

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、地形をずらした仮想的な地形における台風をシミュレーションできる環境を整備した。8 種類の仮想台風を実験した結果、台風の強度、上陸時間と地形の相関の妥当性を確認した。

今後の予定として、今回開発したモデルを用いて、台風の特性に対する温暖化の影響を実験する。さらに、高解像度モデルを開発し、高波、高潮におけるマングローブ林の減衰効果の実験を計画している。

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「グリーンインフラを用いた気候変動に伴う沿岸災害の減災評価手法の開発」(2-1712) 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., 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*, Vol. 39, pp. 2569–2584, 2016.
- [3] Nobuhito Mori, Tetsuya Takemi, “Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean”, *Weather and Climate Extremes*,

Volume 11, 53-69, (2016)/

<https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.09.002>.

- [4] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G Powers, “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, (2008). <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- [5] Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams, “The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model”, *Ocean Modelling*, 9(4), 347-404, (2005).
- [6] 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”, vol. 1, 668–676, (1996).
- [7] 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>
- [8] 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>
- [9] S. Kumar Singh et al., “Optimizations of COAWST for a Large Simulation on the Earth Simulator”, 2018 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), Belfast, 629-636, (2018), DOI: 10.1109/CLUSTER.2018.00080

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 Final Analysis, MGSST
短波放射 (ra_sw_physics)	Dudhia scheme	地形データ	GTOP030
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. 1 1/4deg 5day
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	浅海碎波	GEN3
水平格子数	領域 1: 1334x667	4 波共鳴相互作用	GEN3
方位分割数	36	3 波共鳴相互作用	GEN3
周波数分割数	24	波の指数関数的発達	KOMEN
波の線形的発達	GEN3	伝播(移流) (PROP)	BSBT
白波碎波	GEN3	初期値・境界値データ	初期値: computed from local wind, 境界値: NOAA WWIII Global 30 min.
海底摩擦	GEN3	海底地形データ	GEBCO

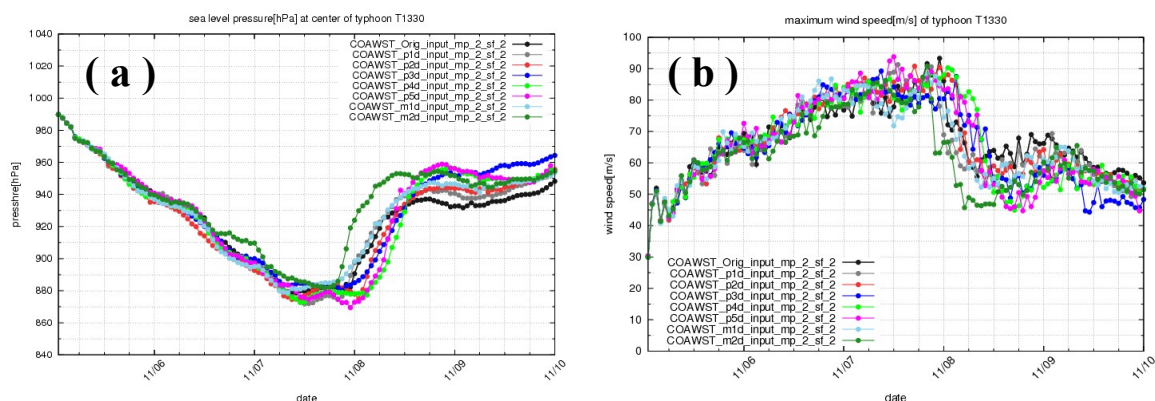


図 1 仮想地形実験における台風の最低気圧(a)と最大風速(b)の時間変化

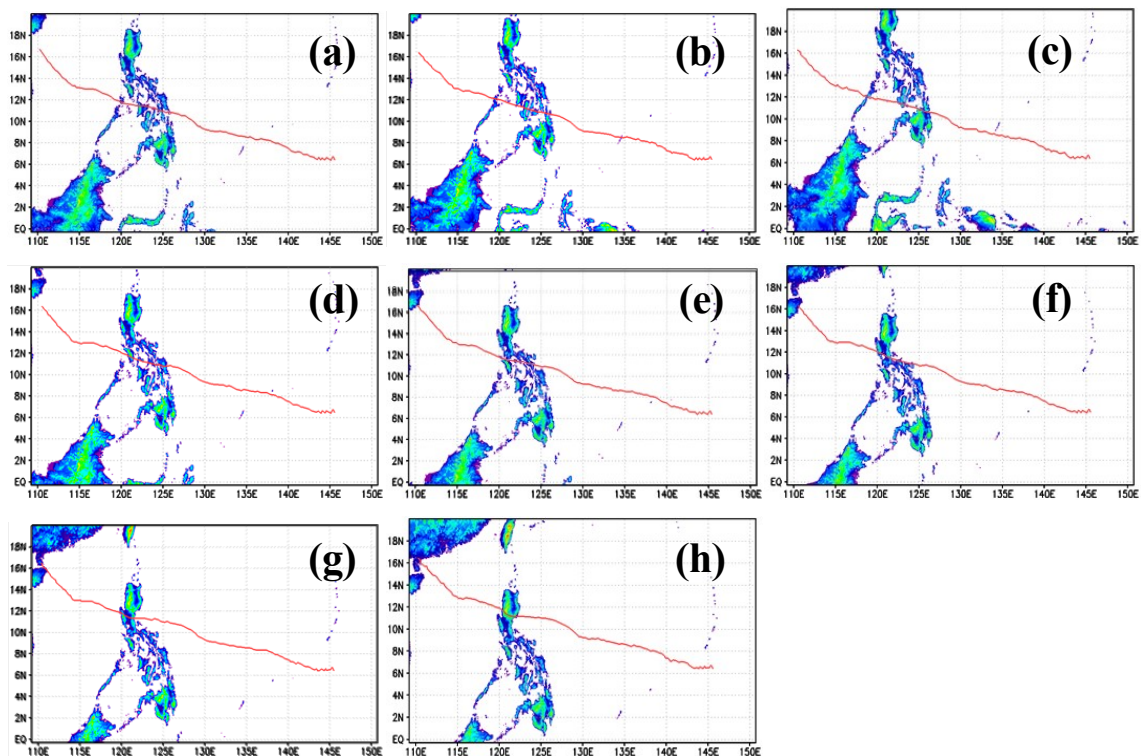


図 2 仮想地形実験における領域 1 の標高データと台風経路。(a) オリジナルケース (b) 北へ1度ずらしたケース (c) 北へ2度ずらしたケース (g) 南へ1度ずらしたケース (h) 南へ2度 (i) 南へ3度 (j) 南へ4度 (k) 南へ5度

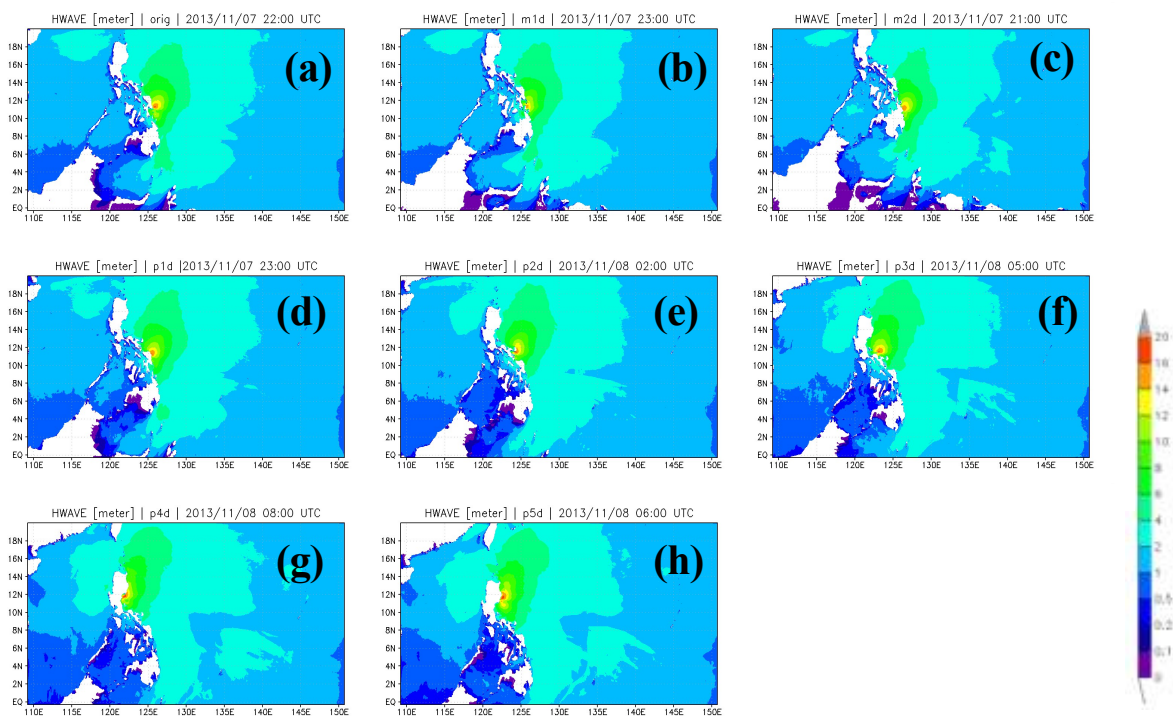


図 3 仮想地形実験における台風上陸時の有義波高の分布。(a) オリジナルケース (b) 北へ1度ずらしたケース (c) 北へ2度ずらしたケース (d) 南へ1度ずらしたケース (e) 南へ2度 (f) 南へ3度 (g) 南へ4度 (h) 南へ5度

Optimization of Coupled Atmosphere-Ocean-Wave Model -Test simulation of Typhoon Haiyan-

Project Representative

Nobuhito Mori Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Authors

Kota Sakakura ^{*5}, Junichi Ninomiya ^{*2}, Kouji Goto ^{*1}, Yosuke Taira ^{*1}, Tomoya Shimura ^{*3}, Akihiro Musa ^{*1,4}, Tetsuya Takemi ^{*2}, Nobuhito Mori ^{*3}

^{*1}NEC Corporation, ^{*2}Kanazawa University, ^{*3}Kyoto University, ^{*4}Tohoku University, ^{*5}Foundation for Computational Science

We have developed and optimized a high-resolution, high-speed coupled atmosphere-ocean-wave model on Earth Simulator in order to provide an understanding of coastal hazard intensity caused by super typhoons and the reduce effect of mangrove forests. The atmosphere and ocean model vectorization ratios were increased to 96 % and 99 %, respectively, which reduced the processing time needed to simulate with high resolution Typhoon Haiyan during five days to 21.7 hours using 353 nodes of the Earth Simulator. We have run the simulation using the original topographic data and using the same data serially displaced from minus two degrees to plus five degrees in latitude, called “virtual topographic data”.

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

1. Introduction

Typhoons often cause dangerous storm surges and storm waves, which can claim many lives and severely damage infrastructure. The increasing strength of typhoons due to global warming is expected increasing the intensity of hazard and damages [1]. To provide an understanding of the damage caused by more powerful typhoons and the mitigative effect of mangrove forests, we have developed and optimized a high-resolution coupled atmosphere-ocean-wave model, COAWST [2] developed by USGS, on Earth Simulator [3, 4]. In the work reported here, the performance of the model was improved, and the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan, which struck the Philippines in 2013, were simulated using virtual topographic data.

2. Optimization of COAWST

COAWST consists of an atmosphere model (WRF [5]), an ocean model (ROMS [6]), and a wave model (SWAN [7]). Each model had previously been vectorized on Earth Simulator [3, 4], and vectorization ratios of 95 %, 96 %, and 94 %, respectively, were achieved. Simulation of the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan for five days using a high-resolution model with a 3 km / 1 km nested atmosphere model, a 3 km ocean model, and a 3 km wave model took 24 hours using 512 nodes of Earth Simulator.

We have now further vectorized the WRF and ROMS models, achieving vectorization ratios of 96 % and 99 %, respectively. We also analyzed the parallel performance of COAWST and optimized the load-balance among the processes. The performance was best when the ratio of the number of nodes for OMS, SWAN, and WRF was 1 : 4 : 10. The processing time needed to simulate the five days of

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	36
Initial and boundary data	NCEP Final Analysis, MGDSST	SODA 3.4.1, 1/4 deg., 5 days	computed from local winds, NOAA WWIII Global 30 min.
Topographic data	GTOP030	GEBCO	GEBCO

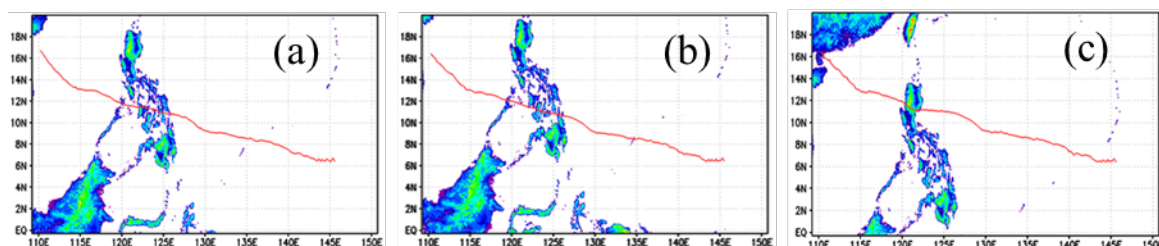


Fig. 1: Tracks of typhoon. (a): Track of Haiyan on original topography data, (b): Track on displacement of minus two degrees, (c) Track on displacement of plus five degrees.

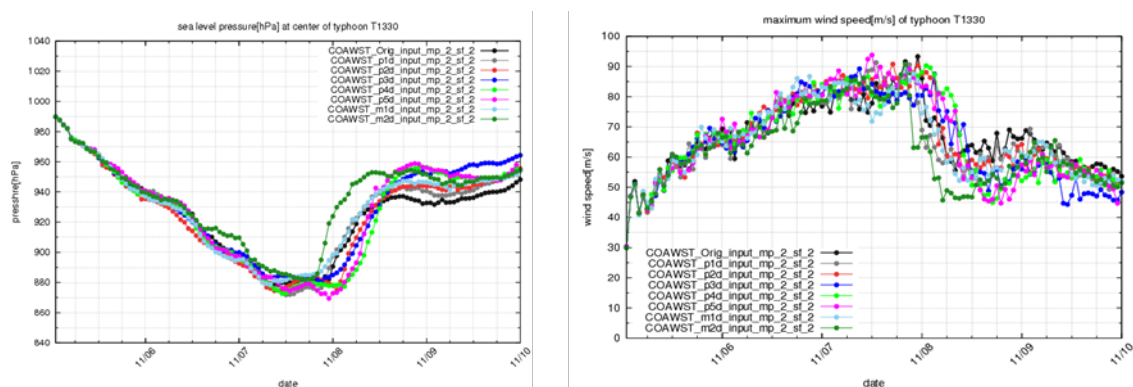


Fig. 2: Time variations of minimum central pressure (left) and maximum wind speed on each of topography data (right).

Typhoon Haiyan was 21.7 hours using 353 nodes. The simulation parameters are listed in Table 1.

3. Simulations on virtual topographic data

Analyzing the effects of disaster mitigations measures on super typhoons such as Typhoon Haiyan requires many simulations using various tracks and landing points. We ran the simulation using the original topographic data and using the same data serially displaced from minus two degrees to plus five degrees in latitude (thereby creating seven sets of “virtual topographic data”). The atmospheric field was kept unchanged. The simulation results for three tracks are plotted in Fig. 1. (a) indicates the case of original topographic data, (b) and (c) are the cases of topographic data displaced by plus five degrees and minus five degrees, respectively. The time variations of the minimum central pressure and the maximum wind speed for each track are plotted in Fig. 2. These results demonstrate that the simulation of typhoons using virtual topographic can reproduce damages caused by various tracks and landing points.

4. Summary

We have developed and optimized the COAST model on Earth Simulator. High-resolution simulation of the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan during its more intense five days took 22 hours using 353 nodes of Earth simulation. The simulation of typhoons using virtual topographic data can be used for an understanding of the damages caused by various tracks and landing points.

Future work includes investigating the effects of the global warming on typhoon intensity by simulation using the model. It also includes developing a higher-resolution model and using it to simulate the mitigative effects of mangrove forests.

Acknowledgement

This research was supported by the Environment Research and Technology Development Fund of the Ministry of the Environment, Japan.

References

- [1] Murakami, H., Mizuta, R., 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*, Vol. 39, pp. 2569–2584, 2016.
- [2] Wamer, J. C., Armstrong, B., He, R., Zambon, J. S., “Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System”, *Ocean Modeling*, Vol. 35, No. 3, pp. 230-244, 2010.
- [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, pp. 69-70, 2019.
- [4] Singh, K. S., Sakakura, K., Saha, S. Mathur, R., Sharma, C., Goto, K., Watanabe, O., Musa, A., “Optimizations of COAWST for a Large Simulation on the Earth Simulator”, 2018 IEEE International Conference on Cluster Computing

(CLUSTER), Belfast, pp. 629-636, 2018.

[5] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G Powers, “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, pp. 113, 2008.

[6] 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, Vol. 9, No. 4, pp. 347-404, 2005.

[7] 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, vol. 1, pp. 668-676, 1996.