

大気海洋波浪結合モデルのスーパー台風発達への最適化

課題責任者

森 信人 京都大学防災研究所

著者

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

^{*1}日本電気株式会社, ^{*2}金沢大学理工研究域, ^{*3}京都大学防災研究所, ^{*4}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のため、地球シミュレータで効率的に実行できる高解像度大気海洋波浪結合モデルの開発を行った。大気、海洋および波浪モデルに対してベクトル化促進の最適化を行い、各モデルのベクトル化率を 96%、99%および 94%を達成した。この最適化により、地球シミュレータ 353 ノードを用いて、高解像度台風 Haiyan シミュレーションの 5 日積分が 21.7 時間で実行可能となった。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(以降、COAWST 大規模モデルと呼ぶ)を開発することである。

本年度は、平成 29 年度に開発した高解像度大気海洋波浪結合モデルをベースに、さらなる演算性能の改善と並列化効率の改善を行った。また、開発した高解像度大気海洋波浪結合モデルを用いて、2013 年の台風 Haiyan の再現実験を行った。さらに、台風の最大風速・最低気圧などの台風強度に対する、大気モデルの地表面フラックススキーム、大気・海洋・波浪モデル間の相互作用の効果および海洋混合層深さの影響などを調査した。

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。昨年度は、小規模モデルを対象に、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。今年度は、COAWST 大規模モデルを対象に、さらなる演算性能改善を行った。大気・海洋・波浪モデルの各ルーチンの最適化前後の性能を図 1 に示す。COAWST 大規模モデルで計算コストが大きかったルーチンを対象に VPU 利用効率改善の最適化を行い、各ルーチンの実行時間を 42%から 99%削減した。さらに、並列化効率改善のため、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、負荷を均等化するように計算機資源の配分を最適化した。これらの VPU の利用効率と並列化効率の改善の最適化により、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[9]、COAWST 大規模モデルを用いた台風 Haiyan の 5 日間のシミュレーションにおいても、ノード数を 512 ノードから 353 ノードに減らして、実行時間 21.7 時間を達成した。

3. 計算スキームとパラメタ

COAWST 大規模モデルを用いた、2013 年の台風 Haiyan のシミュレーションにおける、経路・最低気圧・最大風速など再現性改善のため、地表面フラックススキーム、大気・海洋・波浪モデル間の相互作用の効果および海洋

混合層深さによる影響などを調査した。一例として、図 3 に台風中心の海面気圧を示す。図 3(a) から地表面フラックススキームとして Monin-Obukhov Janjic Similarity scheme (sf_sfclay_physics=2) を使用した COAWST の結果 (COAWST(sfclay=2) が最も観測値 (Obs) に近いことが分かる。しかし、観測値比べて、海面気圧が低く、台風が過発達であることが分かる。台風の発達過程における海洋混合層深さの影響を調べるため、海洋混合層深さを平年値よりも大きく減らした場合を調べた。その結果を図 3(b) に示す。海洋混合層深さを減らすことにより台風の発達が若干は抑えられたが、観測値とは依然として差があり、この差の主な要因は海洋混合層深さではないことが分かった。地表面フラックススキームを含め使用したスキーム・パラメータを表 1 に示す。

4. まとめと今後の予定

地球シミュレータにおいて大規模 COAWST モデルの開発および計算性能最適化を実施した。また、WRF と ROMS のベクトル化率は、それぞれ 96% と 99% を達成した。また、地球シミュレータ 353 ノードを利用して台風 Haiyan の高解像度の 5 日積分を約 22 時間で実行することができた。さらに、地表面フラックススキーム、大気・海洋・波浪モデル間の相互作用の効果および海洋混合層深さによる台風発達への影響を調べ、台風中心気圧の発達に対して、海洋混合層深さの影響に比べて、地表面フラックススキームとモデル間の相互作用の効果は、大きいことが分かった。

今後の予定として、今回開発したモデルを用いて、台風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-Obukho 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

表 2 VPU 利用効率を改善するための最適化戦略一覧

No.	最適化戦略
1	データ依存関係の除去
2	演算 do ループからの I/O 文の除去
3	演算 do ループからのサブルーチン呼び出しの除去
4	ループ入れ替え
5	ループ融合
6	if 分岐の最適化
7	メモリフットプリントの制御

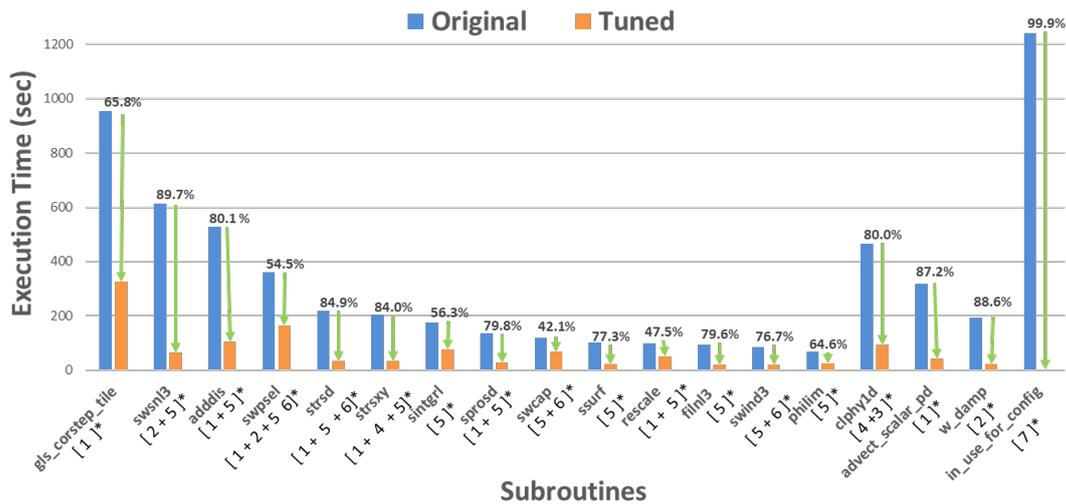


図 1 大気・海洋・波浪モデルの各ルーチンの最適化前後の実行時間(6時間積分での評価)。ルーチン
の下番号は、そのルーチンへ適用した最適化戦略(表 2 参照)である。

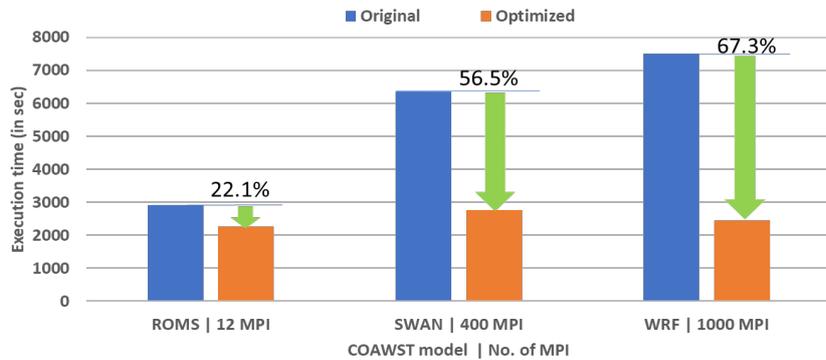


図 2 演算性能最適化と並列化効率改善のための各モデルコンポーネントへの計算機資源を割り当て
の最適化による各モデルコンポーネントの実行時間削減効果(6時間積分での評価)。

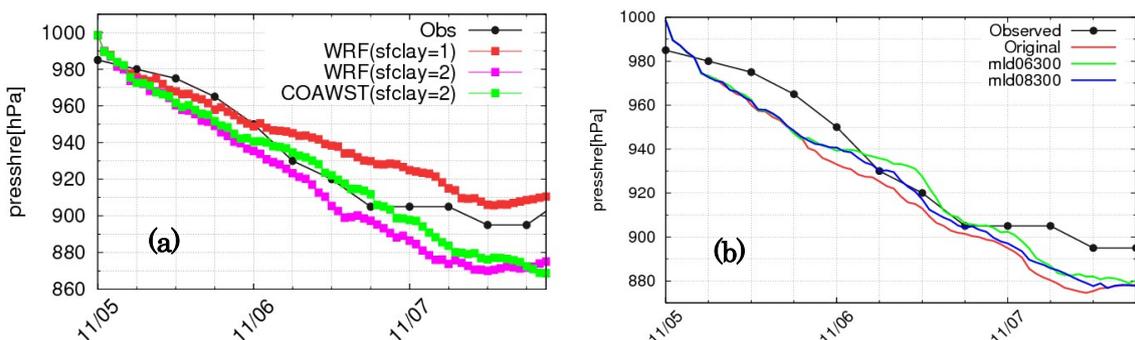


図 3 台風 Haiyan 再現実験における台風中心の海面気圧。(a) 地表面フラックススキームと海洋・波
浪モデルの海面気圧への影響評価。WRF(sfclay=1)は大気モデルの地表面フラックススキームとして
Monin-Obukhov Similarity scheme (sf_sfclay_physics=1)を使用した場合の結果。WRF(sfclay=2)は
大気モデルの地表面フラックススキームとして Monin-Obukhov-Janjic Similarity scheme
(sf_sfclay_physics=2)を使用した場合の結果。COAWST(sfclay=2)は WRF(sfclay=2)に海洋・波浪モ
デルを結合した COAWST の結果。(b) 海洋混合層深さの海面気圧への影響評価。Original は(a)の
WRF(sfclay=2)の結果。mld06300 は海洋混合層深さを大きく減らした場合の結果。mld08300 は海
洋混合層深さを平年程度に減らした場合の結果。

Optimization of Coupled Atmosphere-Ocean-Wave Model for Super Typhoon Development

Project Representative

Nobuhito Mori Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Authors

Kota Sakakura¹, Junichi Ninomiya², Kouji Goto¹, Yosuke Taira¹, Tomoya Shimura³, Akihiro Musa^{1,4}, Tetsuya Takemi², Nobuhito Mori³

¹NEC Corporation, ²Kanazawa University, ³Kyoto University, ⁴Tohoku University

We have optimized the high-resolution, high-speed coupled atmosphere-ocean-wave model for typhoon modeling that was developed on the Earth Simulator for use in investigating the intensity of coastal damage caused by super typhoons and the effect of mangrove forests on reducing the intensity. This optimization increased the vectorization ratios of the atmosphere and ocean models from 95 to 96 % and from 96 to 99 %, respectively, which reduced the time needed for high-resolution simulation over the most intense five days of Typhoon Haiyan using 353 nodes of the Earth Simulator from about 24 hours to slightly less than 22 hours. Tuning of the computational schemes and parameters of the model enabled realistic reproduction of the physical phenomena of Typhoon Haiyan.

Keywords: Optimization, High-Performance Computing, 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 increasing the intensity of loss and damage [1]. To provide an understanding of the damage caused by more powerful typhoons and the mitigative effect of mangrove forests, we optimized the high-resolution high-speed coupled atmosphere-ocean-wave model (COAWST) [2] developed by the United States Geological Survey on the Earth Simulator [3, 4]. By increasing the vectorization ratios of the model, we were able to perform high-resolution simulation of Typhoon Haiyan with 30 % fewer nodes of the Earth Simulator in 10 % less time. Moreover, tuning the computational schemes and parameters of COAWST enabled the physical phenomena of Typhoon Haiyan to be realistically reproduced.

2. Optimization of COAWST

COAWST consists of the Weather Research and Forecasting (WRF) model [5], the regional ocean modeling system (ROMS) model [6], and the Simulating WAVes Nearshore (SWAN) model [7]. Each model had previously been vectorized on the Earth Simulator [3, 4], and vectorization ratios of 95 %, 96 %, and 94 %, respectively, had been achieved. High-resolution simulation of the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan over the most intense

five days using a 3-km/1-km nested atmosphere model, a 3-km ocean model, and a 3-km wave model took about 24 hours using 512 nodes of the Earth Simulator.

We have now further vectorized the WRF and ROMS models, increasing the vectorization ratios to 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 ROMS, SWAN, and WRF was 1:4:10. As shown in Figure 1, the execution times of the SWAN and WRF models were reduced by more than half. This reduced the time needed to simulate the most intense five days of Typhoon Haiyan to 21.7 hours using 353 nodes, reductions of 10% and 30%, respectively.

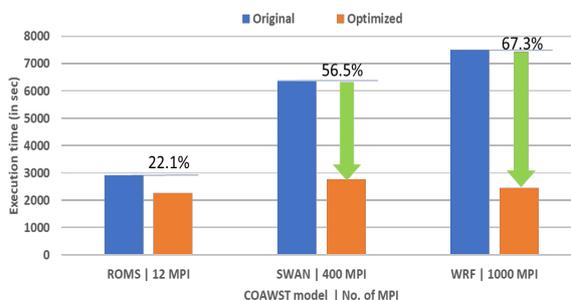


Fig. 1: Effect of optimization on execution times

3. Computational schemes and parameters

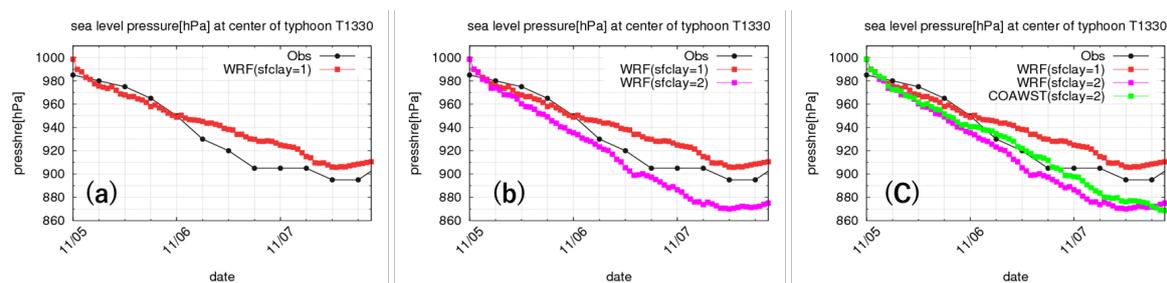


Fig. 2: Sea level pressure of Typhoon Haiyan. (a): Surface realm layer scheme (sfclay=1) on WRF, (b): Surface realm layer scheme (sfclay=2) on WRF, (C): Surface realm layer scheme (sfclay=2) on COAWST.

Table 1: Computational schemes and parameters.

Parameters	Atmosphere model (WRF)	Ocean model (ROMS)	Wave model (SWAN)
Spatial resolution	Region 1: 3 km	Region 1: 3 km	Region 1: 3 km
	Region 2: 1 km		
Number of grids	Region 1: 1334 × 667	Region1: 1334 × 667	Region 1: 1334 × 667
	Region 2: 2001 × 705		
Number of vertical layers	55	40	36
Initial and boundary data	NCEP Final Analysis, MGDSSST	SODA 3.4.1, 1/4 deg., 5 days	Computed from local winds, NOAA WWIII Global 30 min.
Topographic data	GTOP030	GEBCO	GEBCO
Schemes	Lin et al. scheme Dudhia scheme Monin-Obukho-Janjic scheme Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme thermal diffusion scheme		GEN3 KOMEN

The computational schemes and parameters of COAWST (Table 1) were tuned in order to realistically reproduce the physical phenomena of Typhoon Haiyan. As an example, Fig. 2 shows the effect of the surface layer scheme (sfclay) on the sea level pressures of the typhoon. The pressure differed between schemes sfclay=1 and sfclay=2 on the WRF model. Scheme sfclay=2 reduced the sea level pressure. The used of sfclay=2 on COAWST is thus suitable for the two days during the typhoon development phase. We thus used this scheme in our simulation.

4. Summary

We have optimized the COAWST model that was developed on the Earth Simulator, thereby increasing the vectorization ratios of the WRF and ROMS models from 95 to 96 % and from 94 to 99 %, respectively. High-resolution simulation of the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan during its most intense five days took 21.7 hours using 353 nodes of the Earth Simulator, reductions of 10 and 30 %, respectively. These results show that the time and resources needed to simulate typhoons can be reduced, thereby facilitating investigation of the damage caused under various scenarios.

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

the mitigative effects of mangrove forests.

Acknowledgments

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] Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., Zambon, J. B., “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., 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, p. 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.