

大気・海洋・波浪モデルを用いた近年の日本に上陸した顕著台風に対する沿岸災害ハザード影響評価

課題責任者

森 信人 京都大学 防災研究所

著者

後藤浩二^{*1}、二宮順一^{*2}、松本圭太^{*3}、片海健亮^{*3}、志村智也^{*4}、撫佐昭裕^{*1,5}、竹見哲也^{*4}、森 信人^{*4}

^{*1} 日本電気株式会社, ^{*2} 金沢大学理工研究域, ^{*3} NEC ソリューションイノベーション株式会社, ^{*4} 京都大学防災研究所, ^{*5} 東北大学サイバーサイエンスセンター

気候変動に伴う台風災害の激甚化が懸念されている。地球温暖化時の台風による沿岸災害の定量的評価と気候変動適応に加え、沿岸における高波・高潮・強風に対する減災が期待されるマングローブ林の減災効果の定量的評価を目的に大気海洋波浪結合モデル(COAWST)を地球シミュレータ向けに開発してきた。本年度はCOAWSTの新地球シミュレータ(ES4)への移植とさらなる計算性能向上のための計算性能評価・分析を行った。COAWSTをES4のVE搭載ノード(ES4VE)とCPUノード(ES4CPU)へ移植し、2013年の台風Haiyanを対象とした5日積分のシミュレーションを行い、旧地球シミュレータ(ES3)と同様の結果が得られることを確認した。また、実行時間についても、ES4VE、ES4CPUのどちらもES3と同様に24時間以内に計算可能であることを確認した。

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。

今年度は、昨年度まで開発してきた高解像度大気海洋波浪結合モデル[3][4][5]を新しい地球シミュレータ(以降、ES4と呼ぶ)へ移植した。また、ES4での計算性能改善に向けた性能評価・分析を行った。

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])から構成されており、旧地球シミュレータ(ES3と呼ぶ)では、VPU(Vector Processor Unit)[10]の利用効率改善のため

の最適化と計算負荷インバランスを改善するための各モデルコンポーネントへの計算機資源割り当ての調整を行うことにより、台風Haiyanの5日間のシミュレーションを約21.6時間で実行できていた。

3. ES4への移植と性能評価・分析

ES3向けに最適化してきた本結合モデルをES4へ移植し、まずは、ES3での実行時間と同程度の実行時間達成を目指す。

ES4は計算機アーキテクチャの異なる3つの計算機から構成されたマルチアーキテクチャ型のスーパーコンピュータである[11]。まずはES3と同じベクトル計算機アーキテクチャであるES4のVE搭載ノード[11]のVector Engine(以降、ES4VE)へ移植した。ES4VEへの移植では、コンパイルオプションの変更とコンパイラ指示行の変更・置換等を行った。ES4のCPUノード(以降、ES4CPU)[11]への移植では、コンパイルオプションの変更だけでなく、WRFとSWANについては、いくつかソースコードの修正も行った。移植後の動作確認として2013年の台風HaiyanのシミュレーションをES4VE、ES4CPUそれぞれで行った。台風Haiyanのシミュレーションに使用した結合モデルのパラメータを表1に示す。この実行では、ES4VEは1412コアを使用し、ES4CPUでは1256コアを使用した。5日積分の実行時間は、ES4VEでは約22.7時間、ES4CPUでは約22.3時間と、どちらもES3での実行時間とほぼ同等である。また、ES3、ES4VE及びES4CPUでの計算結果の確認として、台風の経路を図1に示す。ES4VE及びES4CPUの結果は、ES3の結果とほぼ同様の経路となっていることを確認した。

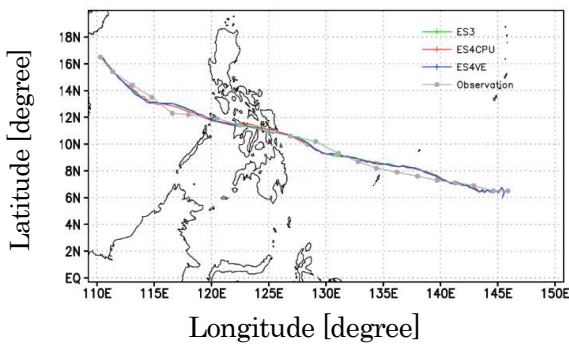


図 1 ES3, ES4CPU 及び ES4VE における COAWST の Haiyan シミュレーション結果と観測値。

ES4 では NEC MPI/Vector-Scalar Hybrid MPI を利用することで、ベクトル計算機である ES4VE とスカラー計算機である ES4CPU を跨った MPI 並列が可能であり、モデルコンポーネントの特性に応じて、使用する計算機を選択することができる。あるモデルコンポーネントはベクトル計算機で実行し、それ以外のモデルコンポーネントはスカラー計算機で実行し、両者を連成して計算することで、より効率よく計算することもできる。本年度は、各モデルコンポーネントが ES4VE と ES4CPU のどちらに向いているか、各モデルコンポーネントを ES4VE と ES4CPU でそれぞれ単独で実行し、計算性能を分析した。各コンポーネントのパラメタは表 1 と同じである。ただし、各モデルコンポーネントは独立して実行しており、連成はしておらず、外力となるデータは別途用意した。使用コア数は、ES4VE 及び ES4CPU のどちらについても、ROMS16 コア、SWAN128 コア、WRF1000 コアとした。ここでは、Byte/FLOP (以降、B/F) の指標に着目し、各モデルコンポーネントの性能分析を行った。B/F は ES4VE にて FTRACE[12] を使用して採取した。実行時間については、ES4VE では FTRACE[12] を使用し、ES4CPU では TAU[13] を使用して、採取した。各モデルコンポーネントにおける計算コスト上位 10 ルーチン程度の実行時間と B/F 値を図 2、図 4 及び図 6 に示す。また、これらのルーチンのベクトル長とベクトル演算率を図 3、図 5 及び図 7 に示す。

図 2、図 4 及び図 6 から、B/F 値の大きいルーチンは、ES4VE の実行時間の方が ES4CPU の実行時間よりも短い傾向にあることが分かる。これは ES4VE のメモリバンド幅が ES4CPU のメモリバンド幅より大きいことによるものである。特に ROMS (図 2) ではその傾向が顕著である。ROMS では計算コスト上位のルーチンでは B/F が 0.8 以上であるが、SWAN (図 4) や WRF (図 6) では一部のルーチン (SINTGRL と MYJPBL) を除くと B/F 値は 0.1 以下と低く、実行時間は ES4CPU の方が ES4VE よりも短いルーチンがほとんどである。SWAN の SINTGRL ルーチンについては、B/F が 0.28 と比較的高いが、このルーチンの処理は総和型演算がほとんどであり、さらにベクトル長が 20 程度と短いいため、SINTGRL の実行時間は、ES4CPU の方が ES4VE よりも短くなったと考えられる。WRF については B/F が低いことに加え、ベクトル長・ベクトル演算率 (図 7) も低いため、ほとんどのルーチンの実行時間は、ES4CPU の方が ES4VE よりも短くなったと考えられる。ただし、WRF の F_PACK_INT と F_UNPACK_INT の 2 つのルーチンでは、3 次

元配列と 1 次元配列との間のデータのパッキング・アンパッキングを行っており、浮動小数点演算ないため B/F やベクトル長・ベクトル演算率が小さいが、実行時間は、ES4VE の方が ES4CPU よりも短くなった。以上より、ROMS は ES4VE で、SWAN と WAR は ES4CPU の実行により、演算時間を最短にできる可能性があることを明らかにした。

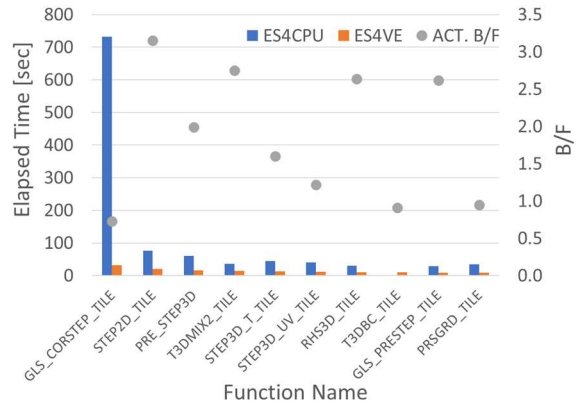


図 2 ROMS における計算コスト上位ルーチンの実行時間 (ES4CPU:青棒, ES4VE:橙棒) と B/F 値 (灰色点)。

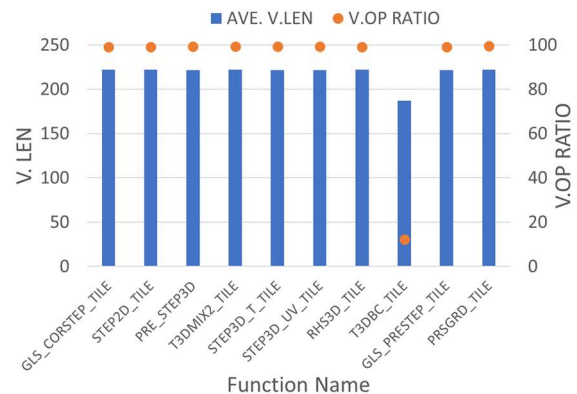


図 3 ROMS における計算コスト上位ルーチンのベクトル長 (青棒) とベクトル演算率 (橙点)。

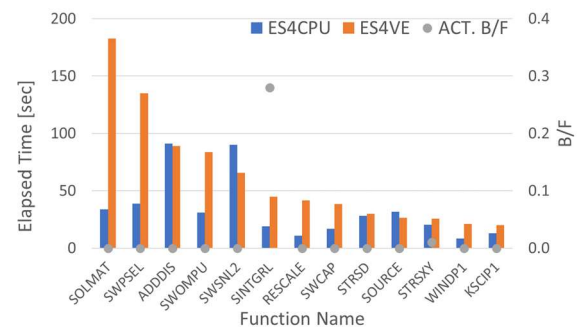


図 4 SWAN における計算コスト上位ルーチンの実行時間 (ES4CPU:青棒, ES4VE:橙棒) と B/F 値 (灰色点)。

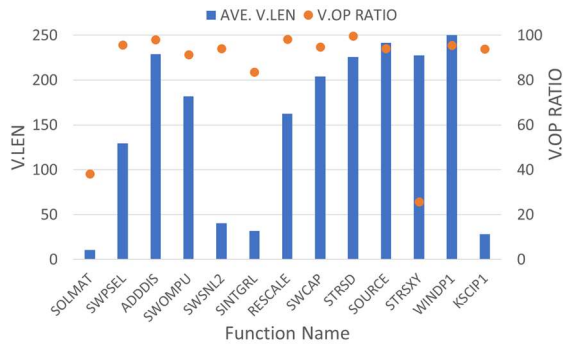


図 5 SWAN おける計算コスト上位ルーチンのベクトル長(青棒)とベクトル演算率(橙点)。

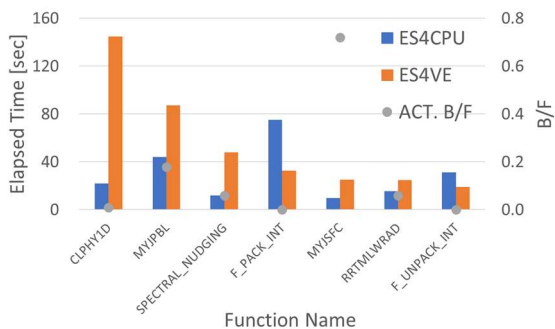


図 6 WRF における計算コスト上位ルーチンの実行時間 (ES4CPU:青棒, ES4VE:橙棒)と B/F 値(灰色点)。

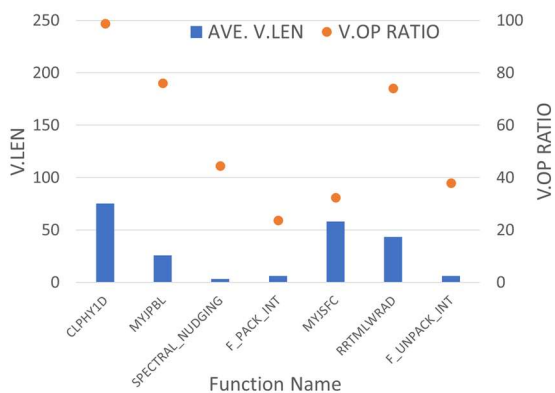


図 7 WRF おける計算コスト上位ルーチンのベクトル長(青棒)とベクトル演算率(橙点)。

4. まとめと今後の予定

これまで ES3 上で開発してきた COAWST 大規模モデルを ES4 へ移植し、妥当な結果が得られることを確認した。また、ES4 の実行時間についても、ES3 と同等の実行時間で計算ができることを確認した。さらに、ES4VE と ES4CPU において、B/F に着目して COAWST の各モデルコンポーネントの性能評価・分析を行い、B/F の大きくかつベクトル演算率・ベクトル長も大きいルーチンでは、ES4VE での実行時間が ES4CPU の実行時間よりも短い傾向にあることが分かった。特に ROMS は、B/F の大きく、ベクトル演算率・ベクトル長も大きいルーチンが計算コスト上位を占めており、ES4VE での実行が適していることが分かった。SWAN は、ベクトル演算率は比較的高いが、ほとんどのルーチン

で B/F がかなり小さいため、ES4CPU での実行が適していると考えられる。WRF は、B/F が小さい上、ベクトル長・ベクトル演算率も小さいため、ES4CPU での実行が適していると考えられる。今後は、各モデルコンポーネントに適した計算機を使用し、結合モデルの実行時間の短縮と計算機資源の有効利用を目指し、ES4VE と ES4CPU の連携計算を行う予定である。さらに、これまで開発してきた疑似温暖化実験の手法を、過去の日本に襲来した顕著な台風事例等に適用し、気候変動に伴う台風強度の長期評価手法の検証を進める予定である。

[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] <https://www.jamstec.go.jp/es/jp/system/>

[12] https://www.hpc.nec.com/documents/sdk/pdfs/g2at01-NEC_Ftr ace_Viewer_User_Guide_ja.pdf

[13] <https://www.cs.uoregon.edu/research/tau/home.php>

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 (CO, C1, C2, and C3)
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	SODA3.4.2/4deg 5day + pseudo global warming (CO, 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 WWII 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 × 周波 数分割数	36x24		

Assessment of Coastal Hazard for Recent Severe Typhoons Landfall in Japan using Coupled Atmosphere-Ocean-Wave Models

Project Representative

Nobuhito Mori Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Authors

Kouji Goto ^{*1}, Junichi Ninomiya ^{*2}, Keita Matsumoto ^{*3}, Kenryo Kataumi ^{*3}, Tomoya Shimura ^{*4}, Akihiro Musa ^{*1, *5}, Tetsuya Takemi ^{*4}, Nobuhito Mori ^{*4}

^{*1} NEC Corporation, ^{*2} Kanazawa University, ^{*3} NEC Solution Innovators, ^{*4} Kyoto University, ^{*5} Tohoku University

We have developed and optimized a high-resolution, high-speed atmosphere-ocean-wave coupled model, called COAWST, in the Earth Simulator 3 (ES3) to understand the damage caused by super typhoons. Due to global warming, typhoons have become larger and more powerful, resulting in many victims and extensive infrastructure damage. In this study, we ported the model to the vector engine (VE)-equipped nodes (ES4VE) and central processing unit (CPU) nodes (ES4CPU) in the new earth simulator (ES4) and evaluated the sustained performance of the model on ES4. The model can simulate Typhoon Haiyan during its most intense five days took 22.7 hours and 22.3 hours on ES4VE and ES4CPU, respectively. We also analyzed the model for using an NEC MPI/Vector-Scalar Hybrid MPI environment. It is clarified that ES4VE is suitable for ROMS, and ES4CPU is suitable for SWAN and WRF in decreasing their execution times.

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 named Typhoon Haiyan (known as Yolanda in the Philippines). There were 34,803 casualties, and infrastructure and agricultural damage estimated at USD 802 million[1]. Global warming has been increasing the strength of typhoons, which increases the scale of their damage[2]. Therefore, 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, called COAWST, in the Earth Simulator 3 (ES3)[3][4][5]. In this study, we ported the model to the vector engine (VE)-equipped nodes (ES4VE) and central processing unit (CPU) nodes (ES4CPU) in the earth simulator 4 (ES4) and analyzed its sustained performance on ES4.

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

Our high-resolution atmosphere-ocean-wave coupled model is based on COAWST developed by the US geological survey and 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 ES3. A five-day simulation of the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan used 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 in ES3.

3. Porting to ES4 and performance analysis

ES4 is a multiarchitecture system that consists of three different architectural nodes; CPU nodes (ES4CPU), VE-equipped nodes (ES4VE), and graphics processing unit (GPU)-equipped nodes (ES4GPC) [10]. Generally, these nodes can perform well by vectorization of programs. To vectorize the code of COAWST on ES4VE and ES4CPU, we modified some of source codes, which were vectorized on ES3 but not on ES4VE and ES4CPU. The high-resolution simulation of the physical phenomena caused by Typhoon Haiyan during its most intense five days takes 22.7 hours and 22.3 hours using 1,412 cores of

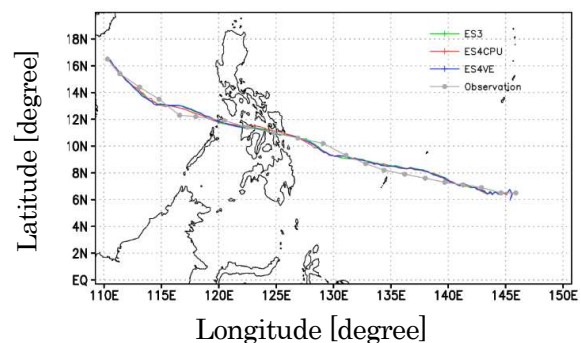


Fig. 1 Tracks of typhon on each simulation.

Table 1: Computational schemes and parameters.

Parameters	Atmosphere model (WRF)	Ocean model (ROMS)	Wave model (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, MGSST	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 Morin-Obukho Janjic scheme Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme thermal diffusion scheme		GEN3 KOMEN

ES4VE and 1,256 cores of ES4CPU, respectively. These execution times are about the same as that on ES3. Table 1 lists the computational schemes and parameters of COAWST. Figure 1 shows the typhoon track for each simulation, and the results on ES4VE and ES4CPU are similar to that on ES3.

ES4 has an NEC MPI/Vector-Scalar Hybrid MPI environment that supports MPI communications between ES4VE and ES4CPU, and both ES4VE and ES4CPU can be used as a single system image. Therefore, each program function of COAWST can be executed on either ES4VE or ES4CPU more suited for improving its performance. We evaluated the execution times of the main functions of COAWST on ES4VE and ES4CPU. Figures 2, 4, and 6 show the execution times and bytes per flop rate (B/Fs) of the functions in ROMS, SWAN, and WRF, respectively. Here, the blue and orange bars indicate the execution times on ES4CPU and ES4VE, respectively. The gray points indicate B/Fs. ROMS, SWAN, and WAR use 16, 128, and 1,000 cores of ES4VE and ES4CPU, respectively. Figures 3, 5, and 7 show the vector-operation ratios (V.OP RATIO) and average vector lengths (AVE. V.LENs) in ROMS, SWAN, and WRF on ES4VE, respectively.

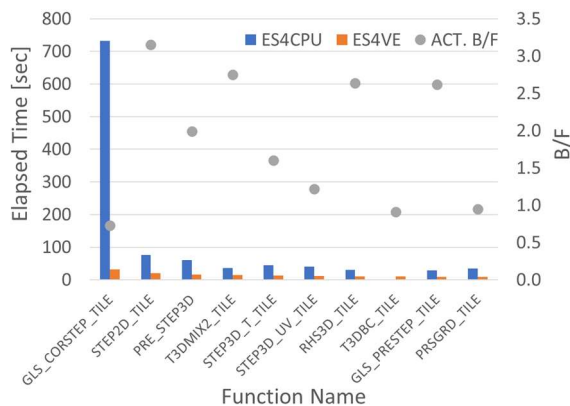


Fig. 2 Execution times and B/F of main functions in ROMS.

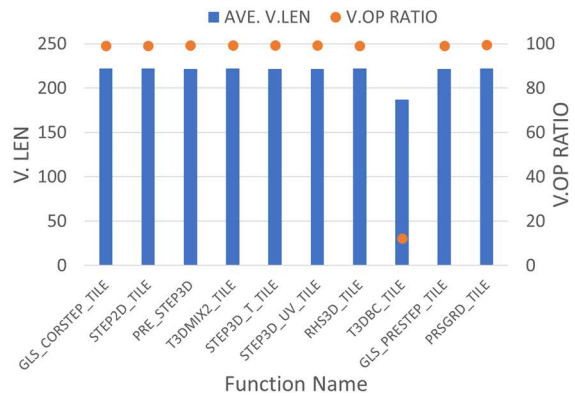


Fig. 3 Vector Operation Ratios and Average Vector Lengths of main functions in ROMS.

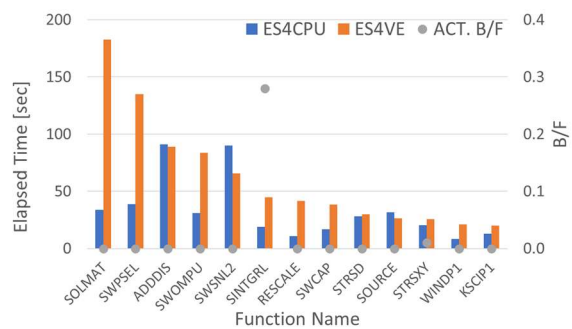


Fig. 4 Execution times and B/F of main functions in SWAN.

In ROMS, the execution times on ES4VE are shorter than those on ES4CPU, as shown in Fig. 2. This is because of the V.OP RATIO and AVE. V.LENs are about 100% and greater than 200 at most functions, as shown in Fig. 3, respectively. Moreover, the B/Fs are larger than 0.8, as shown in Fig. 2. This means that ROMS is a memory-intensive code. Thus, ES4VE, which has a high memory bandwidth, can execute ROMS faster than ES4CPU. On the other hand, the execution times of SWAN and WRF on ES4VE are longer than those on ES4CPU. This is because V.OP RATIOS, AVE. V.LENs, and B/Fs are small, as

shown in Figs. 4 to 7, and SWAN and WRF do not make full use of the characteristics of the processor in ES4VE. The evaluations show that ROMS executes on ES4VE and SWAN and WRF execute on ES4CPU to improve the performance of COAWST by using the NEC MPI/Vector-Scalar Hybrid MPI environment.

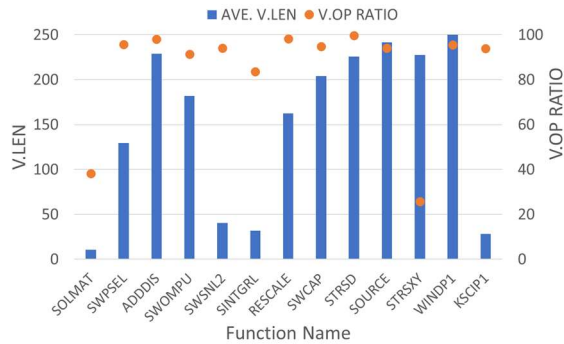


Fig. 5 Vector Operation Ratios and Average Vector Lengths of main functions in SWAN.

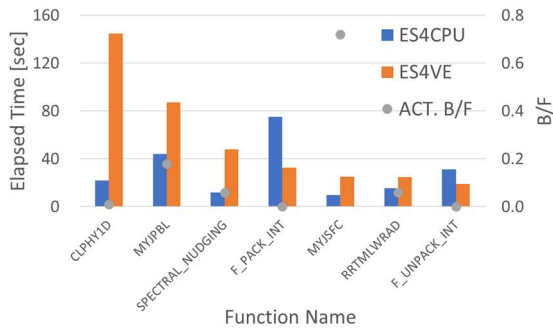


Fig. 6 Execution times and B/F of main functions in WRF.

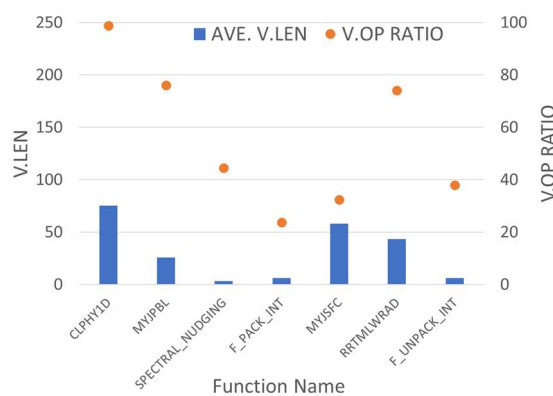


Fig. 7 Vector Operation Ratios and Average Vector Lengths of main functions in WRF.

4. Summary

COAWST, which is an atmosphere-ocean-wave coupled model, was ported to the VE-equipped nodes (ES4VE) and CPU nodes (ES4CPU) in the new earth simulator (ES4). As a result, the high-resolution simulation of Typhoon Haiyan during its most intense

five days takes 22.7 hours and 22.3 hours using 1,412 cores of ES4VE and 1,256 cores of ES4CPU, respectively. It is also clarified that ES4VE is suitable for ROMS, and ES4CPU is suitable for SWAN and WRF in decreasing their execution times.

For future work, we plan to evaluate the performance of COAWST using the NEC MPI/Vector-Scalar Hybrid MPI environment and investigate long-term effect methods of global warming on typhoon intensity through simulation using COAWST.

[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] <https://www.jamstec.go.jp/es/jp/system/>