

HPC 技術適用によるシミュレーションモデルの高度化

課題責任者

森 信人 京都大学 防災研究所

著者

森 信人^{*1}, 平 陽介^{*2}, 竹見 哲也^{*1}, 二宮 順一^{*3}, 坂倉 耕太^{*2}, 撫佐 昭裕^{*4}, 渡部 修^{*2}, 後藤 浩二^{*2}, 志村 智也^{*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

台風起因する沿岸災害およびマングローブの減災効果評価に利用する大気海洋波浪結合モデルについて、地球シミュレータ上での演算特性の解析と効率的なシミュレーションを可能にするモデル高度化を行った。大気、波浪モデルに対して重点的に高度化施策を実施し、ベクトル化率、ベクトル長を改善した結果、実行性能は約3倍に向上した。ただ、現時点でのベクトル化率は95%にとどまっており、今後さらなる改善を目指す。また、本モデルを用いた台風 Haiyan を対象とした再現実験を行った。その結果、大気モデル単体では台風強度はやや弱かったものの、経路は良く一致しており、高精度な結果が得られた。結合モデルでは、発達期の変化は大気モデル単体を上回る精度で観測と良く一致した。今後、再現精度向上のため、結合モデル計算条件の最適化を実施する予定である。

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. 目的

本研究の目的は、大気海洋波浪結合モデルをスーパーコンピュータに実装し、高解像度シミュレーション（格子サイズ 3km 以下）を実現し、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の大規模計算を一定時間内にシミュレーションすることである。本年度は、地球シミュレータを対象として、本結合モデルの演算特性の解析を行い、効率的なシミュレーションが可能な高解像度用結合モデルを開発する。そして、3km/1km のネスト格子の大気モデルと 3km 格子の海洋モデルと波浪モデルの結合モデルを用いて、2013 年にフィリピンに上陸した台風 Haiyan の再現実験を行う。

2. 手法

2.1 高解像度用結合モデルの開発

地球シミュレータにおいて大気モデル (WRF[1])、海洋モデル (ROMS[2])、波浪モデル (SWAN[3]) のそれぞれの演算特性を VPU の使用状況をもとに解析する。具体的には、VPU の使用率をあらわすベクトル演算率とベクトル命令あたりの VPU 利用効率をあらわすベクトル長を解析する。そして、ベクトル演算率とベクトル長を高める実装方式を検討し、効率的にシミュレーションができる高解像度用結合モデルを開発する。

また、地球シミュレータは、最大 2,048 ノードを高速ネットワークで結合した並列計算機として利用でき、地球シミュレータでの高効率な演算を実現するためには、ベクトル命令の利用以外に並列処理の効率化が必要となる。本結合モデルはすでに MPI (Message passing interface) による並列化が行われているが、各コアにおける演算バランス (ロードバランス) によって実行性能が大きく変わっ

てくる。大気モデル、海洋モデル、波浪モデルのそれぞれにおける演算特性から各モデルに割り当てるコア数の検討を行う。そして、地球シミュレータにおいて大規模シミュレーションが効率的に実行できる並列実行方式を開発する。

2.2 高解像度用結合モデルの数値実験

地球シミュレータを用いて高解像度用結合モデルによる台風 Haiyan の再現実験を行い、Haiyan の観測データとの比較を行う。表 1 が本実験の主なシミュレーションパラメータである。

3. 結果、考察

3.1 高解像度用結合モデルの開発

大規模シミュレーションが地球シミュレータで効率的に実行できる高解像度用結合モデルを開発するために、各モデルプログラムのコスト分布を分析し、高コストルーチンを中心に高度化施策を実施した。

小規模テストデータ (大気: 200*150*31、海洋: 197*147*21、波浪: 198*48*36*24) を用いて各モデルの並列コストを分析した結果、大気、海洋、波浪モデルのコスト比は 48:1:64 であった。海洋モデルは大気、波浪モデルと比較して非常にコストが小さいため、高度化の優先度を下げ、大気、波浪モデルを中心に高度化施策を実施した。実施した高度化施策を表 2 に示す。主にベクトル化阻害要因の削除、ベクトル長拡大のコード修正を行った結果、大幅な計算時間の短縮を実現した (図 1)。オリジナルコードで最もコストを要していた波浪モデルの wav2ocn_coupling、swsln3 ルーチン、大気モデルの clphy1d、atmfwav_coupling ルーチンは、ほぼ無視できう

表1 台風 Haiyan のシミュレーションパラメータ

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) or Revised MM5
水平格子数	領域 1: 1334x667 領域 2: 2001x705	大気境界層 (bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic or YSU
鉛直層数	55 層	陸面 (sf_surface_physics)	thermal diffusion
雲微物理 (mp_physics)	WSM6	初期値・境界値データ	NCEP Final Analysis MGDSST
短波放射 (ra_sw_physics)	Dudhia	地形データ	GTOPO30
長波放射 (ra_lw_physics)	RRTM		
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	Initial: computed from local wind, Boundary: NOAA WIII Global 30 min.
海底摩擦	GEN3	海底地形データ	GEBCO

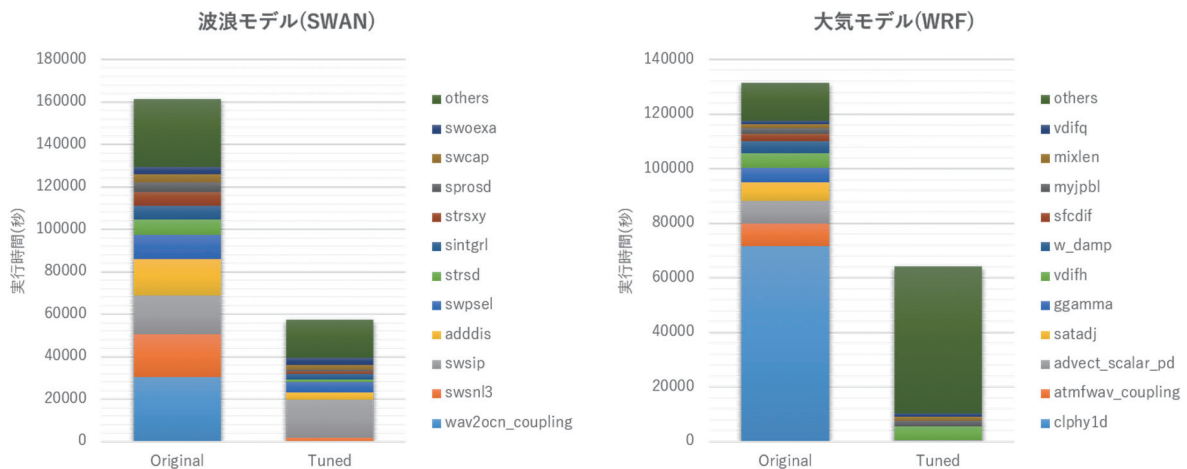


図1 高度化施策適用前後の高コストルーチンの処理時間小規模テストデータで5日積分3MP実行(各モデルはシリアル実行)左:波浪モデル (SWAN)、右:大気モデル (WRF)

るレベルのコストとなった。

例として、WRFの最コストルーチン clphy1d の高速化修正の概略を図2に示す。clphy1d のオリジナルコードでは最深ループ内でサブルーチンコールがあり、コンパイラのベクトル化を阻害していた。また、ベクトル化対象ループkのループ長は96で、地球シミュレータの性能を発揮するには十分ではなかった。

最適化施策として、ベクトル化阻害要因であるサブルーチンコールをインライン展開し、iループをサブルーチン clphy1d 内で処理するように修正したところ、ベクトル化率は38.59%から98.68%、ベクトル長は69.2から144.2に

それぞれ向上し、実行時間は345秒から26.4秒と10分の1以下になった。clphy1dの高速化前後の性能詳細を表3に示す。

大気、海洋、波浪結合モデルの高速化の効果を表4に示す。ベクトル化率、ベクトル長を向上した結果、各モデルにおける実行性能は2~3倍となった。ただ、現時点で各モデルにおけるベクトル化率は95%前後であり、地球シミュレータをさらに効率的に使用するためには99%程度にすることが望ましい。さらなる高度化は今後の課題としたい。また、高解像度用結合モデルへの高度化の結果、大気、海洋、波浪の各モデル間の並列コスト

表2 高解像度用結合モデル開発のための高度化施策

高度化施策	具体的な実装方法
ベクトル化阻害要因の削除	ループ内 read/write 文の削除
	依存関係がないループへのベクトル化指示行の付加
	インライン展開
ベクトル長拡大	ループ融合
	多重ループの入れ替え
処理の削減	冗長演算の削減
	IF 分岐のループ外処理
大規模計算への対応	並列特性の調査
	各モデルへの計算資源の適切な割り当て
	MPI/Open-MP 並列
	通信・待ち時間、各モデル間のインバランスの解消
その他	ソルバの選択、改良調査
	高速化による計算誤差の調査
	高速化技法の x86 機への展開

【Original】	【Tuned】
<pre>do i=its,ite !loop length=197 do j=fts,jte do k=kts,kte qvz(k)=qv(i,k,j) enddo call cphys1d(qvz,...) enddo subroutine cphys1d(qvz,...) do k=kts,kte !loop length=96 call satadj ... enddo</pre>	<pre>do j=fts,jte call cphys1d(qv(ix,kx,j))... enddo subroutine cphys1d(qvz,...) do k=kts,kte do i=its,ite !vector loop length=197 call satadj !inline expansion ... enddo enddo</pre>

図2 サブルーチン cphys1d の高速化修正前後のイメージ

比は 12:1:16 となった。このコスト比は小規模テストデータでの結果であり、実際にはこのコスト比をベースに各モデルの解像度、ネストの有無、計算資源の割り当てプロセス数を見積もる必要がある。さらに、各モデルの x 方向の分割数はベクトル長の長短に影響を与えるため、並列軸の分割方法にも留意が必要である。

3.2 高解像度用結合モデルの数値実験

開発した高解像度用結合モデルを用いて、大気+海洋+波浪結合モデルと大気+海洋結合モデルでターゲットである台風 Haiyan 再現実験のテスト計算を実施した。計算には地球シミュレータ 512 ノード (2048 プロセス) を使用し、大気+海洋+波浪結合モデルでそれぞれ 1484、372、384 プロセス、大気+海洋結合モデルでそれぞれ 1856、192 プロセスを各モデルに割り当てた。実行時間は大気+海洋+波浪結合モデルで 24 時間弱であり、台風による波浪とマングローブの防災効果について現実的な時間内にシミュレーションをすることが可能となった。図3は大気モデル単体 (WRF)、大気+海洋結合モデル (WRF+ROMS)、大気+海洋+波浪結合モデル (WRF+ROMS+SWAN)、および観測値 (observed) の台風経路を示している。どの結果も観測値に近く、誤差は 90km 未満に収まった。図4は最低気圧の時間変化を示したものである。結合モデルでは大気モデル単体と比較し

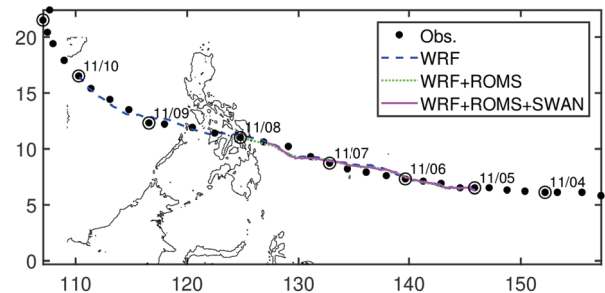


図3 台風 Haiyan の経路

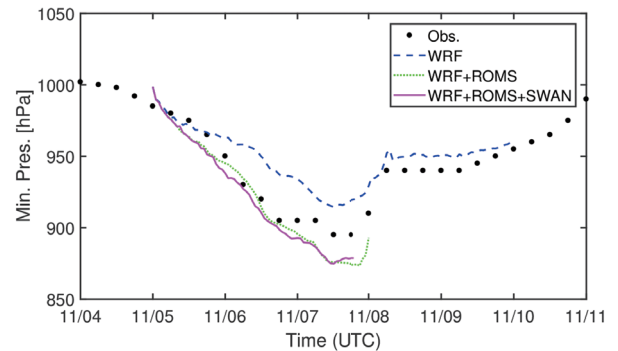


図4 台風 Haiyan を対象とした再現実験での最低気圧の時間変化

表3 cphys1d の高速化前後の性能比較 小規模テストデータで 40 分積分、シリアル実行

	FFQUENCY	EXCLUSIVE TIME [sec]	AVER. TIME [msec]	MOPS	MFLOPS	V.OP RATIO	AVER. V.LEN	VECTOR TIME	ADB HIT ELEM.%
Original	2780064	345.008	0.124	1020.3	233.5	38.59	69.2	14.032	94.51
Tuned	14112	26.392	1.87	16554.5	4159.2	98.68	144.2	18.642	90.24

表4 各モデルにおける高速化の効果 小規模テストデータで 3 MPI 実行 (各モデルはシリアル実行)

モデル		ベクトル化率	ベクトル長	実行性能比
大気モデル WRF	オリジナル	75%	91	1.0
	高解像度用結合モデル	95%	110	3.3
海洋モデル ROMS	オリジナル	95%	51	1.0
	高解像度用結合モデル	96%	85	2.3
波浪モデル SWAN	オリジナル	72%	52	1.0
	高解像度用結合モデル	94%	123	3.3

て台風はより発達し、最低気圧は観測値に近づく傾向が見られた。大気+海洋+波浪結合モデルと大気+海洋結合モデルが同等の結果であることから、大気海洋間における運動量・熱交換パラメタリゼーションや、海洋モデルからの海面水温の寄与が高いものとの推測される。今回の数値実験では結合モデルによる結果の改善が見られたが、通常は台風による海面表層の混合により海面水温が下がり、台風の発達が抑えられると考えられており、あらためて結合モデルの最適化を検討する必要があることが分かった。今後、以下のように結合モデル最適化を検討する予定である。

- ・ 海洋の初期値・境界値の最適化
- ・ SODA MERRA 等による差の確認
- ・ 海面での表層混合過程の最適化
- ・ 波エネルギー散逸率の海洋混合への影響

謝辞など

本研究は環境省環境研究総合推進費により実施された。

文献

- [1] 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 (2008): A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp. doi:10.5065/D68S4MVH
- [2] Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams (2005): 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.
- [3] Booij, N., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C. (1996): The SWAN wave model for shallow water. In: *Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering*, vol. 1, pp. 668-676.

Optimization of Atmosphere-Ocean-Wave Coupled Model Using HPC Technique

Project Representative

Nobuhito Mori Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Authors

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

*1 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, *2 NEC Corporation, *3 College of Science and Engineering, Kanazawa University, *4 Cyberscience Center, Tohoku University

This research aims to mount, develop and optimize the high-resolution, high-speed atmosphere-ocean-wave coupled model on Earth Simulator. Atmosphere- and wave models were optimized to overcome the existing insufficient computational efficiency. The execution performance was improved about 3 times. Targeting at Typhoon Haiyan, the testing cases using the improved atmosphere-model showed reasonable results in which good agreement was found in the track of typhoon while the typhoon intensity was a little weak. The coupled model gives better results of typhoon development compared with the result of atmosphere-model. On the next stage, we will focus on optimizing the computational conditions of the coupled model to improve the reproducibility.

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

1. Objectives

This research aims to mount, execute and optimize the high-resolution atmosphere-ocean-wave coupled model on HPC, and to evaluate the effect of mangroves on coastal disasters caused by typhoons based on large-scale and high-speed simulations. Last year, we analyzed computational characteristics of the coupled model, and developed the high-resolution coupled model with high-computational efficiency on Earth Simulator (ES). Targeting on Typhoon Haiyan landing on the Philippines at 2013, the testing cases were carried out by using the coupled model with 3 km / 1 km nested atmosphere-model, 3 km ocean- and wave-model.

2. Methodology

2.1 Development of High-Resolution Coupled Model

Computational characteristics of atmosphere- (WRF [1]), ocean- (ROMS [2]) and wave- model (SWAN [3]) were analyzed from VPU usage. In detail, vectorization rate (VR) and vector length (VL), which respectively represent VPU usage rate and VPU usage efficiency per vector instruction, were analyzed. The improved methods of VR and VL were examined, and a high-resolution model with efficient execution was then developed.

This coupled model has already been mounted with parallelization by MPI (Message Passing Interface), and the execution balance (load balance) on each core greatly affects the execution performance. The number of cores for each model are optimized based on the execution performances of atmosphere-, ocean- and wave-model.

2.2 Design of Test Case using High-Resolution Coupled Model

Hindcast of Typhoon Haiyan was carried out using the high-resolution coupled model on ES. Spatial resolution is 3 km (only WRF has 1 km nested domain). Topography was made from GTOPO30 and GEBCO. Initial and boundary conditions are NCEP Final Analysis, MGDSST, SODA3.4.1 and NOAA WIII Global 30 mins.

3. Results and Discussion

3.1 Optimization of High-Resolution Model

The result of analyzing computational characteristics showed that the ocean-model has smaller computational cost when compared with the other models. Therefore, the optimization was conducted only on the atmosphere- and wave-models. Mainly deletion of vectorization obstruction factors and expansion of VL were possible to shorten the calculation time greatly (Fig. 1). The effect of optimization is shown in Table 1. The improvement of VR and VL raised the execution

Table 1 Effect of optimization on each model.

Model		VR	VL	Rate of Execution Performance
Atmosphere WRF	Original	75%	91	1.0
	Developed	95%	110	3.3
Ocean ROMS	Original	95%	51	1.0
	Developed	96%	85	2.3
Wave SWAN	Original	72%	52	1.0
	Developed	94%	123	3.3

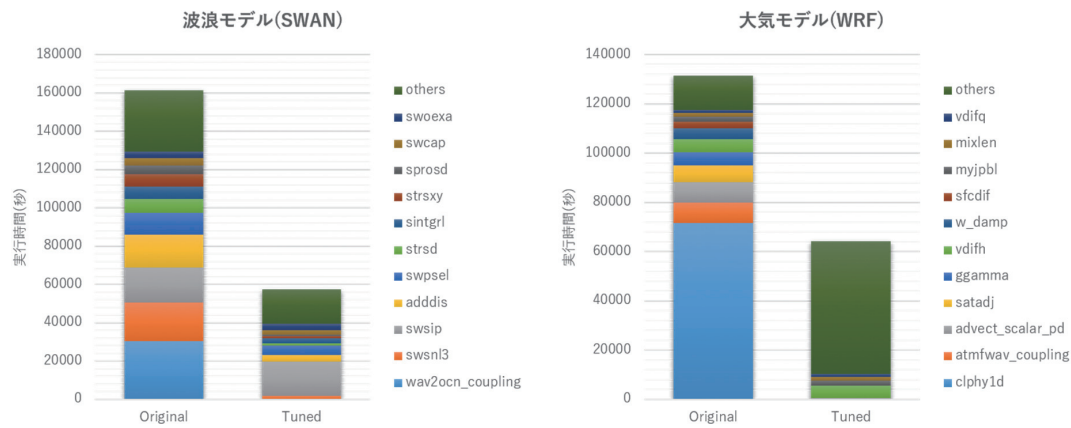


Fig. 1 Comparison of the processing time of high cost (high-cost?) routine to adapt optimization method (left: wave-model, right: atmosphere-model).

performance of each model 2 - 3 times. However, VR remains at 95 %. The desired effective usage of ES is 99 %. Thus, a further advancement is the future task.

3.2 Test Case Targeting on Typhoon Haiyan

Hindcasts targeting on Typhoon Haiyan using developed coupled and single model were carried out. The calculation used 512 nodes (2048 processes), and 1484, 372 and 384 processes were used for the atmosphere-ocean-wave coupled model, 1856 and 192 processes were used for the atmosphere-ocean coupled model. Figure 2 shows the typhoon tracks of each hindcast case and BestTrack. The tracks agree with BestTrack, and the error settled within 90 km. Figure 3 shows the time series of the minimum pressure. The coupled model gives developed typhoon compared with single atmosphere-model, and rapid intensification agrees with BestTrack. We will consider about optimization of the computational condition of the coupled model.

Acknowledgement

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

References

- [1] 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 (2008): A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp. doi:10.5065/D68S4MVH
- [2] Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams (2005): 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.
- [3] Booij, N., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C. (1996): The SWAN wave model for shallow water. In: *Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering*, vol. 1, pp. 668-676.

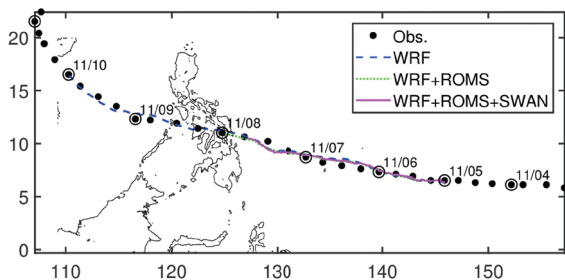


Fig. 2 Typhoon tracks of Haiyan hindcasts (dashed, dotted and solid lines) and BestTrack (circle).

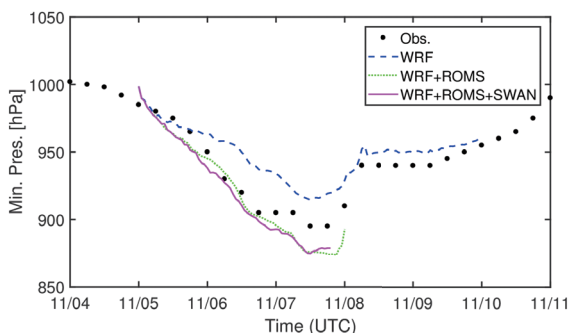


Fig. 3 Time series of the minimum pressure of Haiyan hindcasts (dashed, dotted and solid lines) and BestTrack (circle).