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、飯田康生*4、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, *³NEC ソリューションイノベータ株式会社, *⁴京都大学防災研究所,

気候変動に伴う台風災害の激甚化と関連する沿岸部の災害の拡大が懸念されている。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・緩和に加え、沿岸における高波・高潮・強風災害に対する減災のため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。これまでのCOAWSTでは波浪モデルに浅海域をターゲットしたスペクトル型波浪モデルSWANを使用していた。本課題では、新たに外洋での予測精度向上と計算速度向上を目的に、波浪モデルにNOAA 開発の WaveWatchIII を使用し、

WaveWatchIII の ES4 の VE 搭載ノード向けの高速化を行い約 8.6 倍高速化した。また、COAWST の ES4 の CPU ノード向けの高速化も行い、約 1.4 倍高速化した。さらに高速化した COAWST を用いて、海洋モデル・波浪モデルの有無による台風発達に対する影響を調べる感度実験を行った。

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 Jebi

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。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[1]。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を統合的に評価するため、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。統合的な評価には、多くの再現実験を行う必要があり、地球シミュレータ(ES4)を構成する計算機の効率的利用が必要となる。ES4の計算機リソースとしては、ベクトル計算機である VE 搭載ノード(ES4VE) だけでなく、スカラ計算機である CPU ノード(ES4CPU) についても利用可能である。そこで、ES4のリソースを最大限有効活用するには、ES4VE および ES4CPU のどちらにも最適化する必要がある。

今年度は、昨年度 ES4 へ移植した COAWST[7] v3.7 に対し、ES4CPU 向けの高速化も行った。また、COAWST v3.7 から利用可能となった波浪モデル WaveWatchIII[5] (WW3) の ES4VE 向けの高速化も行った。WW3 については引き続き高速化が必要である。

最後に、ES4CPU 向けに高速化した COAWST v3.7 を用いて、2018 年の台風 21 号(Jebi)を対象に、海洋・波浪モデルや水平解像度に対する感度実験を行った。

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て使用する。新しい COAWST (ver3.7)では、大気モデル(WRF[2])、海洋モデル(ROMS[3])、波浪モデル(SWAN[4]もしくは WW3)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[6])から構成されている。波浪モデルとしては、外洋での精度改善を期待し、WW3 を使用する。

3. WaveWatchIII の ES4VE 向け高速化

これまで開発してきた高解像度大気海洋波浪結合モデ ル[8][9][10]では、波浪モデルとして SWAN を使用してお り、SWAN についてはES4VE 向け最適化も行ってきている。 波浪モデルとして WW3 を使用するため、WW3 の ES4VE 向け 高速化を行う。高速化のため、まずは ES4VE を 16VE (128 プロセス)使用し、表1に示す計算設定にて12時間積分 を行い、ftrace 性能情報を採取した。演算処理に関して は、プロセス間で大きな差異がないことを確認した。そこ で rank0 における WW3 の ftrace 性能情報(表 4)をもとに 性能分析をおこなった。表 4 から実行時間の約 40%を W3SRC4MD::W3SDS4 ルーチン(以降、W3SDS4 ルーチン)が占 めていることが分かる。W3SDS4 ルーチンのベクトル演算 率(V. OP RATIO)は約62と低く、ベクトル長(AVER. V. LEN) も約37と短い。W3SDS4ルーチンのソースコードを分析し たところ、ネストループ内の Fortran の組み込み関数 dot_product や sum がベクトル化されており、それらの関 数の前後にある演算についてはベクトル化されていなか った。また、dot_product 関数や sum 関数のループ長は方

^{*5} 東北大学サイバーサイエンスセンター

位角分割数 (24)であり、ベクトル長が短い。組み込み関数のループへの書き換え、そのループを展開し、外側にあるループでベクトル化することで、do_product の前後にある演算も含めてベクトル化する最適化を行った。この最適化により、W3SDS4 ルーチンのベクトル演算率は約91に改善し、実行時間も約52 秒へ短縮し、約8.6 倍高速化した。さらに呼び出し回数の多いW3GSRUMD::W3DIST_R4ルーチンをインライン展開し、呼び出しオーバーヘッドの削減も行った。これらの最適化により、プログラム全体の性能は約2.2 倍高速化した。なお、来年度以降、さらなる高速化を検討する予定である。

表1WW3の計算格子数

ネスト	水平解像度 (水平格子数)	方位分割数 x 周波数 分割数
ネスト0	約 28km (640x361)	24x25
ネスト1	5km (472x501)	24x25

3. COAWST の高速化

COAWST を実行するには、複数の実行方法があり、最適な方法を見出すため、性能評価をした。今回は、ES4のES4CPUでのCOAWSTの実行方法として、以下の3点について評価を行った。

- · 大気モデル(WRF)のハイブリッド並列化
- · 各モデルコンポーネントのCPUバインド
- ・ 各モデルコンポーネントのコア数配分の調整

WRF では、OpenMP と MPI によるハイブリッド並列化が可能である。WRF を ES4CPU の 64 コアで実行する場合において、IMPI プロセスあたりのOpenMP スレッド数を変えて、実行時間への影響を評価した(表 2)。IMPI プロセスあたりのOpenMP スレッド数がI の場合に比べて、IMPI もしくは4 スレッドとした方がIMPI 20%程高速であることが分かった。

表 2 WRF におけるハイブリッド並列実行

MPI プロセス数	0pen MP スレッド数	実行時間 [sec]		
64	1	8536		
32	2	7097		
16	4	7062		

次に COAWST の各モデルコンポーネントの CPU バインド 方法による性能への影響を評価した。IntelMPI ライブラリを使用し、ES4CPU の 128 コアで COAWST を実行する場合、各モデルコンポーネントのプロセスの CPU の NUMA node への割り付け方法には、主に sequential (図 1) と cyclic(図 2)の2つの方法がある。CPU バインドの設定をしなかった場合、各モデルコンポーネントは、図 2のように、CPU の NUMA node に順番(sequential) に割り当てら

れる。

実行評価により、図 1のように各モデルコンポーネン トを割り付けることにより、図 2の割り付け方法に比べ て、約20%高速であることが分かった。ES4CPUのCPU(EPYC 7742) は、1 つの CPU ソケットの内部が 4 つの NUMA node に分かれており、NUMA node 毎に計算機資源(メモリチャ ンネルやL3 キャッシュ)を共有している。COAWST の各モ デルコンポーネントと MPI プロセスは、rank0 から7まで が海洋モデル(ROMS), rank8 から 63 までが波浪モデル (WW3), rank64 から 127 までが大気モデル(WRF)のように なっている。図 2のように、MPI プロセスを NUMA node に 割り当てると、1つのモデルコンポーネントが特定の NUMA node を使用することになる。一方、図 1のように 割り当てた場合、各 NUMA node を 3 つのモデルコンポー ネントが使用することになる。各モデルコンポーネント の必要とする(ボトルネックとなる)計算機資源(メモリ バンド幅や L3キャッシュ使用量)が異なっている場合、 図 1のように割り当てることにより、必要とする計算機 資源量が平均化され、性能が改善したと思われる。

NUMA		:	MPI	rank			
node	0	:	0	8	16	24	112 120
node	1	:	1	9	17	25	113 121
node	2	:	2	10	18	26	114 122
node	3	:	3	11	19	27	115 123
node	4	:	4	12	20	28	116 124
node	5	:	5	13	21	29	117 125
node	6	:	6	14	22	30	118 126
node	7	: 1	7	15	23	31	119 127

図 1 MPI プロセス(rank)の CPU の NUMA node への cycli c 割付例

NUMA		:	MPI	rank	<u>.</u>			
node	0	:	0	1	2	3	 14	15
node	1	:	16	17	18	19	 30	31
node	2	:	32	33	34	35	 36	47
node	3	:	48	49	50	51	 62	63
node	4	:	64	65	66	67	 78	79
node	5	:	80	81	82	83	 94	95
node	6	:	96	97	98	99	 110	111
node	7	:	112	113	114	115	 126	127

図 2 MPI プロセス (rank)の CPU の NUMA node への seque ntial 割付例

最後に、COAWST の各モデルコンポーネントが使用するコア数の最適化を行った。各モデルコンポーネントは 10 分間隔でデータを交換し、計算を行っている。このデータ交換の際に、各モデルコンポーネントは同期するようになっており、計算が速く進んだモデルコンポーネントは、交換相手となるモデルコンポーネントがデータ交換のタイミングとなるまで待つことになる。各モデルコンポーネントの積分の速度は、計算負荷(演算量)に応じた計算機資源(例えば、コア数)の配分によって調整することが

できる。モデルコンポーネントの積分の速度を揃えることにより、データ交換時の待ち時間が少なくなり、COAWSTの実行時間短縮へつながる。実際、表 3 のように、WW3 のコア数を 52 と減らし、WRF のコア数を 68 (=34x2) と増やすことにより、実行時間は、コア数調整前の 6398 秒から5745 秒へ、11%ほど短縮した。

ハイブリッド並列化におけるスレッド数、各モデルコンポーネントのCPUバインド方法の選択、各モデルコンポーネントへのコア数配分の調整により、実行時間は8289 秒から5745 秒へ短縮し、約1.4 倍高速となることが分かった。

			,, w	, 204 - Midary		
(MPI ブ	コア数 ロセス スレット	数 x0pen 数)	実行 時間 「[sec]	備考		
WRF	WW3	ROMS	[960]			
64x1	56	8	8289	flatMPI		
64x1	56	8	6886	flatMPI+cyclic CPUバインド		
30x2	60	8	6398			
32x2	56	8	6075	インバランスの		
34x2	52	8	5745	調整		
36x2	48	8	7443			

表 3 COAWST におけるコア数の調整

4. 感度実験

台風発達・減衰に対する海洋モデル・波浪モデルの影響を調べるため、大気モデル単体と COAWST で感度実験を行った。また、水平解像度の影響を調べるため、水平解像度2km(図 3)と9km(図 4)で感度実験を行った。

高解像度(図 3)では、COAWST の結果は大気モデル単体よりも台風の最低中心気圧が弱く評価され、最大風速が減少する結果が得られた。海洋モデル・波浪モデルとの結合により、台風下の海面水温の低下や強風による海面上の波の抵抗など、台風の発達が弱まる可能性が考えられる。一方、低解像度(図 4)では、海洋モデル・波浪モデルの結合による影響は小さい。

台風経路については、海洋モデル・波浪モデルの影響や水平解像度による影響はほとんどなく、4つのケースでほぼ観測と同じ経路となっている。また、海洋モデル・波浪モデルの結合の有無によらず、水平解像度が高い方が最低気圧は低く、最大風速が大きくなっている。

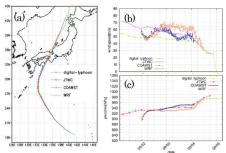


図 3 高解像度(2km)でのシミュレーション結果. (a)台風経路, (b) 最大風速, (c) 最低気圧

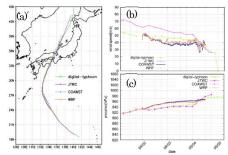


図 4 高解像度(9km)でのシミュレーション結果. (a)台風経路, (b) 最大風速, (c) 最低気圧

5. まとめと今後の予定

COAWST ver3.7 の ES4 向けの高速化を行った。WW3 は ES4VE 向けの高速化により約2.2 倍高速化した。また、波 浪モデルとして WW3 を使用した COAWST は、ES4CPU 向けの 高速化により約1.4 倍高速化した。

高速化した COAWST を使用し、海洋モデル・波浪モデルの有無による感度実験と水平解像度による感度実験を行った。海洋モデル・波浪モデルと大気モデルを結合することにより、台風強度は弱まる傾向にあることが確認できた。また、水平解像度が向上することにより台風強度は強まる傾向にあることが確認できた。

今後は、ES4向けに高速化した COAWST ver3.7 と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。

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。

猫文

[1] 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.

[2] 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

[3] 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).

[4] Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C., "The S WAN wave model for shallow water. In: Proceedings of 2 4th International Conference on Coastal Engineering," 1, 6 68–676, (1996).

- [5] The WAVEWATCH III Development Group (WW3D G), User manual and system documentation of WAVEWAT CH III version 6.07, Tech.Note 333, NOAA/NWS/NCEP/
- MMAB, College Park, MD, USA, (2019).
- [6] 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
- [7] COAWST git repository https://code.usgs.gov/coawstmodel/COAWST.git
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10]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.

表4 WW3のftrace性能情報

	1—10—117							
No.	FREQUENCY	EXCLUSIVE TIME[sec]	%	MFLOPS	V. OP RATIO	AVER. V. Len	PROC. NAME	
1	450574	449. 4	39. 6	493.8	62. 19	36. 6	W3SRC4MD::W3SDS4	
2	218	196. 9	17. 4	0.0	25. 55	66. 1	W3WAVEMD::W3WAVE	
3	221883164	106.8	9. 4	256. 5	0	0.0	W3GSRUMD::W3DIST_R4	
4	96	90. 3	8. 0	3. 0	26. 98	65. 9	WMINIOMD::WMIOHG	
5	1920	72. 2	6. 4	765. 1	64. 06	255. 8	W3PR03MD::W3XYP3	
6	1169420	54. 5	4. 8	3669. 0	90. 58	48. 3	W3SRC4MD::W3SIN4	
7	26	34. 3	3. 0	83. 5	0. 15	228. 8	W3IOGOMD::W3OUTG	
8	1	32. 5	2. 9	20. 7	0. 19	52. 0	WMGRIDMD::WMGHGH	
9	1	15. 9	1.4	0.0	24. 66	64. 0	WMINITMD::WMINIT	
10	450574	11. 8	1.0	6514. 6	98. 8	200. 7	W3SNL1MD::W3SNL1	