

地球シミュレータを使った全球メソスケール解像 大気・海洋シミュレーション*

大淵 済^{*1}・中村 尚^{*2}・升本 順夫^{*3}・佐々木 英治^{*4}

1. はじめに

地球シミュレータ (The Earth Simulator ; ES) は 2002年3月に稼働を始め, 3年目を迎えている. ES は 40 Tflops^{†1}を誇るピーク演算性能と10 TB^{†2}の巨大メモリとを擁する世界最大・最速の汎用型スーパーコンピュータである. その構築には約400億円が投資された上, 毎年数十億円もの運用費が税金によって賄われており, 我々ES利用者には, それ相応の社会への貢献が求められている.

ESの開発経緯については, ESセンター(ESC)のホームページに詳細が掲載されているが, 極言すれば, 地球温暖化予測のために開発されたと言ってよからう.

行政改革による予算削減のあおりでESの稼働が一時危ぶまれたが, 文部科学省の特別な計らいにより, 新世紀重点研究創生プラン(RR2002)環境分野「人・自然・地球共生プロジェクト」, いわゆる「共生プロジェクト」が立ち上げられ, 現在ではその一部の課題の予

算を通じてESの運用費の一部が捻出されている.

「共生プロジェクト」の主目的の1つは, 地球温暖化研究, 特に, 「気候変動に関する政府間パネル」(Intergovernmental Panel on Climate Change ; IPCC) の第4次報告に貢献することである. 「共生プロジェクト」の選定は非常に厳しく行われ, 日本国内はもちろん, 少数ながら海外からも, 超一流の研究者がこの非常にチャレンジングな研究に取り組んでいる. 2004年8月現在, 一部の「共生プロジェクト」には, 合計でESの過半の計算機資源が占有的に供与されており, それを活かした画期的成果が, 日本からIPCC第4次報告書に提出されるのではないかと期待が高まる.

その一方で, IPCCには直接関係しないが, ESの高速演算性能を最大限に活用しようとする大気・海洋のシミュレーション研究も行われている. その中で, 筆者らがやっている, (準) 全球大気・海洋の超高解像度シミュレーション研究(Ohfuchi, 2003 ; Sasaki, 2003 ; Ohfuchi *et al.*, 2004a) を紹介するのが本稿の目的である. また, シミュレーション結果の詳細は, ESCが最近創刊した査読誌 Journal of the Earth Simulator (JES) に掲載されている(Ohfuchi *et al.*, 2004b ; Masumoto *et al.*, 2004) ので, 適宜参照して頂ければ幸いである. 因みに, JESの大気海洋分野の論文査読は, 英国 Reading 大学の J. Slingo 教授が担当している.

2. 全球メソスケール解像大気シミュレーション

(独) 海洋研究開発機構の研究者を中心とした我々のグループの, 全球メソスケール解像大気シミュレーション研究に関しては, 2003年度春季大会前日に開催された第21回メソ気象研究会で発表され, その概要は既に本誌で紹介されている(中村ほか, 2004).

我々のシミュレーションは, AFES (エイフェス :

* Meso-scale resolving simulations of the global atmosphere and ocean on the Earth Simulator.

*1 Wataru OHFUCHI, 海洋研究開発機構地球シミュレータセンター, ohfuchi@jamstec.go.jp
http://www.es.jamstec.go.jp

*2 Hisashi NAKAMURA, 東京大学理学部/海洋研究開発機構 地球フロンティア.

*3 Yukio MASUMOTO, 東京大学理学部/海洋研究開発機構 地球フロンティア.

*4 Hideharu SASAKI, 海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター.

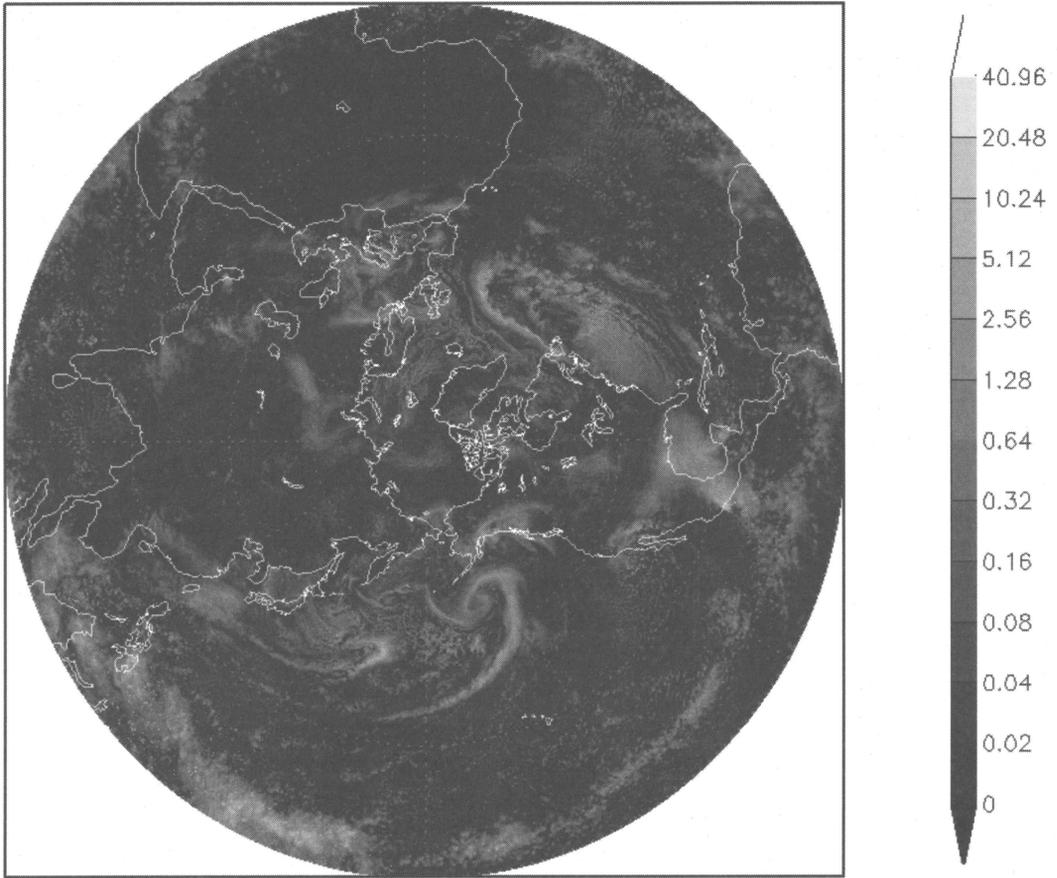
†1 毎秒 4×10^{13} 回の浮動小数点演算.

†2 1 TB = 10^{12} バイト.

—2004年8月16日受理—

—2004年9月13日受理—

AFES T1279L96 Precipitation [mm/h]



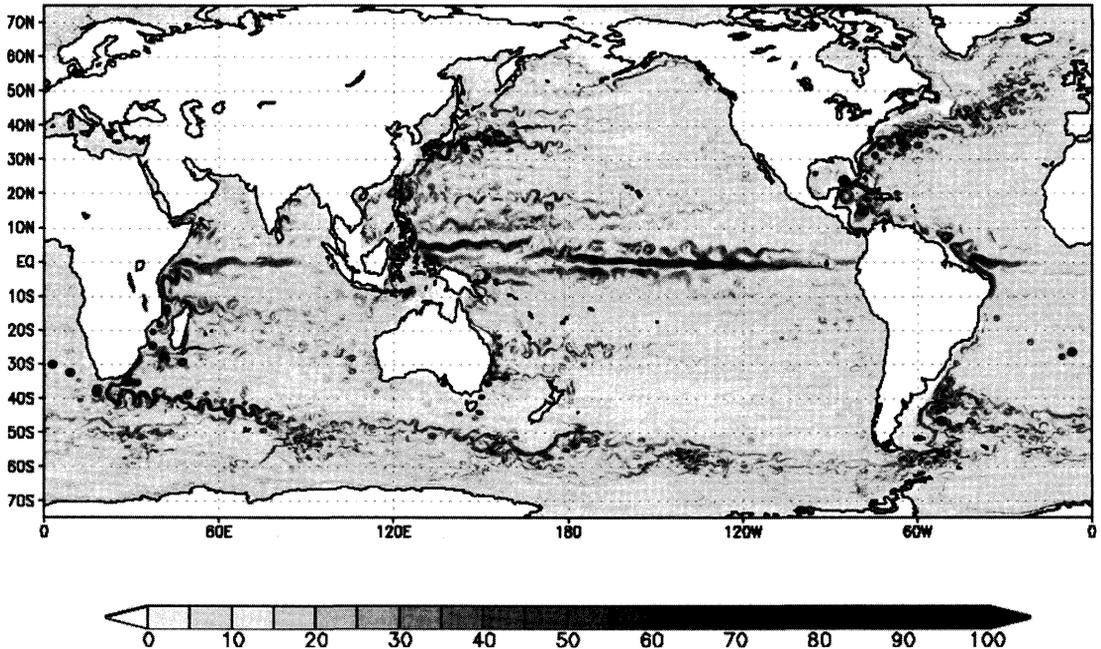
第1図 北半球冬季の全球10-km メッシュ大気大循環シミュレーションの、ある3時間の平均降水強度(Ohfuchi *et al.* 2004b).

Atmospheric general circulation model For the Earth Simulator) と名付けられた大気大循環モデル (AGCM) を用いて行われて来た。これは、東京大学気候システム研究センターと (独) 国立環境研究所との共同開発による CCSR-NIES AGCM (ver. 5.4.02) をベースに、ES 上で最高の演算処理性能を得るために FORTRAN90 で全面的に書き直されたものである (Shingu *et al.*, 2003)。これに対しては、「普通の AGCM を機械的に超高解像度化しただけで、科学的な意義が見いだされない」、「セミ・ラグランジアン移流スキームの導入などの計算効率化もせず、ES というハードウェアに頼り過ぎた」等々、厳しい批判も頂いて来た。そのような批判を真摯に受け止めつつ、徐々にではあるが着実に研究を進めている。

第1図は、Ohfuchi *et al.* (2004b) で紹介した、北半球冬季の全球10-km メッシュ大気大循環シミュレーションの、ある3時間の平均降水強度を图示したものである。北太平洋上に強い低気圧に伴う顕著な T-ボーン構造、また、北大西洋のストームトラックに伴う降水などが見て取れる。中緯度擾乱が多少強過ぎるなど、仔細に見れば欠点はあるが、地球規模からメソ擾乱までが、それなりに良く再現されている。以下、Ohfuchi *et al.* (2004b) 以降の進展を紹介する。

まず、水平格子間隔10~20 km 相当の超高解像度の全球シミュレーションについては、その膨大な出力データ量を考え、「気象」研究、特に、災害を引き起こすような現象の延長予報の精度向上を目指した研究に用いている (Enomoto *et al.*, 2004)。具体的には、世

current velocity(cm/sec) at 100m (March/5/46)



第2図 準全球0.1度メッシュ海洋大循環シミュレーションから得られた100 m 深の海流の速さのスナップショット (Masumoto *et al.*, 2004).

界気象機関 (World Meteorological Organization : WMO) の大気科学委員会 (Commission for Atmospheric Sciences : CAS) の下, 世界気象研究プログラム (World Weather Research Programme : WWRP) の一環として2003年5月に発足した期間10年の国際プロジェクト, THORPEX (ソーベックス) をキーワードとして, 気象庁数値予報課や諸大学との共同研究を立ち上げつつある。THORPEX は, 2週間先までの天気予報の高精度化を目指しており, 地球温暖化研究とともに社会への貢献が期待される。また, 水平格子間隔80 km 相当の比較的高解像度での巨大アンサンブル (1000メンバー程度) の予測再現実験を計画中である。これもまた, THORPEX への貢献を目指した, 確率的天気予報の基礎的研究である。

一方, 「気候」研究であるが, 過去約20年間に観測された海面水温や海水分布などを与えた気候再現実験を, 水平格子間隔50 km 相当の高解像度で数メンバーのアンサンブル・シミュレーションを行う準備をしている。エルニーニョ・南方振動やインド洋ダイポールなどの熱帯海洋の強制に対する大気応答はもちろん, まだ良く理解されていない中高緯度の海面水温偏差や

海水被覆偏差に対する大気の応答も研究の視野に入れている。

3. 準全球メソスケール解像度海洋シミュレーション

大気観測と比較すると, 海洋観測は相対的に非常に困難であり, 海洋物理学における超高解像度シミュレーションの重要性は相対的に非常に大きい。我々のグループは, 0.1度の水平解像度の準全球 (75S-75N) の海洋大循環モデル OFES (オーフェス: Ocean general circulation model For the Earth Simulator) を用いて, 平年の大気強制による50年積分 (Masumoto *et al.*, 2004), 海洋に吸収され広がるフロン分布の変動も加えてさらに50年間積分したトレーサー実験 (Sasai *et al.*, 2004), 過去50年に観測された大気強制を与えた再現実験 (佐々木ほか, 2004) を行って来た。その例として, 第2図に100 m 深の海流の速さのスナップショットを示す。黒潮やメキシコ湾流, 南水洋などに, 強い流れとともに中規模渦が見て取れる。また, 赤道には赤道潜流が特に太平洋で強いことも見て取れる。

既に, これらの積分結果を解析したいという要望が

国内外の多くの研究者から寄せられている。実は、OFESと同程度、あるいはそれをも上回る水平解像度の海洋大循環シミュレーションは第一線を争う他の数グループでも行ってきたが、結局は計算機資源がボトルネックとなり、高々数年程度の積分に限られてしまっていた。我々の50年（総計150年）積分によって、渦や地形を現実的に表現した海洋大循環の経年変動のシミュレーション研究が初めて可能となったのである。これらのシミュレーションの社会への直接的な貢献は大気シミュレーションほどではないかも知れないが、その科学的な貢献はむしろ相対的に高いと言えるであろう。これらのシミュレーションにより、海洋大循環研究のブレークスルーが発信できると期待される。

4. おわりに

上記で紹介した、大気大循環モデル (AFES)、海洋大循環モデル (OFES) に加えて、我々のグループでは、その2つを結合したモデル (CFES: シーフェス: Coupled atmosphere-ocean general circulation model For the Earth Simulator) を開発して来ている。CFES はほぼ完成しており、主に、数年から十年程度の時間スケールを持つ大気・海洋結合現象の研究を行う予定である。

AFES/OFES の計算結果は、多少の条件付きではあるが、公開を原則とし、現在データ公開の手順の整備を行っている。また、CFES の結果も、準備が整い次第同じく公開する予定である。これら超高解像度シミュレーションの結果は、我々のような小さなグループだけでは解析しきれない膨大な情報量を持っている。できるだけ多くの会員にデータ解析を行って頂ければ幸いである。

謝辞

紹介した研究は、(独)海洋研究開発機構の研究者を中心とした、AFES、OFES、CFES タスクチームによって行われた。ES というハードウェアの開発はもとより、AFES などのソフトウェアの開発も、地球シミュレータ開発研究センター (現在、地球シミュレータセンター) の初代センター長である三好 甫先生 (故人) の献身的な努力なしには実現し得なかったであろう。ここに記して改めて感謝の意を表したい。

参考文献

- Enomoto, T., W. Ohfuchi, H. Nakamura and M. A. Shapiro, 2004: Simulations of the August 2002 floods in central Europe, Proc. of the International Conference on High-Impact Weather and Climate: Understanding, Prediction and Socio-Economic Consequences, 22-24 March 2004, Seoul, Korea, 62-65.
- Masumoto, Y., H. Sasaki, T. Kagimoto, N. Komori, A. Ishida, Y. Sasai, T. Miyama, T. Motoi, H. Mitsudera, K. Takahashi, H. Sakuma and T. Yamagata, 2004: A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator), J. Earth Simulator, 1, 35-56.
- 中村 尚, 大淵 濟, 吉岡真由美, 栗原宜夫, 高谷康太郎, 榎本 剛, M. A. Shapiro, 室井ちあし, 永戸久喜, 河谷芳雄, 高橋正明, AFES ワーキングチーム, 2004: 第21回メソ気象研究会の報告「メソ気象研究における地球シミュレータの意義」, 天気, 51, 141-149.
- Ohfuchi, W., 2003: Super-high-resolution climate simulations with an atmospheric general circulation model, Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2002-March 2003, 61-65. The Earth Simulator Center, Japan Marine Science and Technology Center.
- Ohfuchi, W., H. Sasaki, T. Kagimoto and N. Komori, 2004a: Mechanism and predictability of atmospheric and oceanic variations induced by interactions between large-scale field and meso-scale phenomena, Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2003-March 2004, 57-61. The Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara and K. Ninomiya, 2004b: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator), J. Earth Simulator, 1, 8-34.
- Sasai, Y., A. Ishida, Y. Yamanaka and H. Sasaki, 2004: Chlorofluorocarbons in a global ocean eddy-resolving OGCM: Pathway and formation of Antarctic Bottom Water, Geophys. Res. Lett., 31, L12305, doi: 10.1029/2004GL019895.
- Sasaki, H., 2003: Eddy-resolving simulation of the world ocean circulation by using MOM3-based OGCM code (OFES) optimized for the Earth

Simulator, Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2002-March 2003, 49-53. The Earth Simulator Center, Japan Marine Science and Technology Center.

佐々木英治, 笹井義一, 升本順夫, 大淵 濟, 2004: 地球シミュレータを用いた全球渦解像海洋シミュレーションに向けて, 海の研究, (印刷中).

Shingu, S., H. Fuchigami, M. Yamada, Y. Tsuda, M.

Yoshioka, W. Ohfuchi, H. Nakamura and M. Yokokawa, 2003: Performance of atmospheric general circulation model using the spectral transform method on the Earth Simulator, Parallel Computational Fluid Dynamics—New Frontiers and Multi-Disciplinary Applications, K. Matsuno, A. Ecer, J. Periaux, N. Satofuka and P. Fox, Eds., Elsevier, 79-86.



日加外交関係樹立75周年・日加通商関係樹立100周年記念コンファレンス 「科学技術とビジネスにおける女性」

日 時：2004年11月29日（月）～12月1日（水）

なお、29日は09：30開演、

30日は09：15開演、

1日は14：00開演

場 所：カナダ大使館 地下2階劇場

(東京都港区赤坂7-3-38)

銀座線「青山一丁目」下車。赤坂見附方面（東へ）徒歩5分。

入場無料、同時通訳付、先着250名参加受付。

問い合わせ・申し込み先：

e-mail：mariko.takahashi@international.gc.ca

Tel：03-5412-6437（直）、Fax：03-5412-6254

郵 送：〒107-8503 東京都港区赤坂7-3-38

カナダ大使館投資・科学技術部 WSTT 係り宛

プログラム：

11月29日（月）

09：00～09：30 受付

09：30～10：30

開会式 カナダ駐日大使ロバート・ライト

基調講演 日本学術会議会長内閣府総合科学技術会議議員

東京大学先端科学技術研究センター及び
東海大学総合科学技術研究所教授

医学博士 黒川 清

10：30～12：30 セッション1

「社会科学・政治」：政府、教育及び政治的視点から

講 演 カナダ・オークヴィル市長

アン・マルヴェイル

マッギル大学教授理学博士

ラトナ・ゴッシュ

衆議院議員

野田聖子

東京大学総合文化研究科生命環境科学教授

内閣府総合科学技術会議議員

理学博士 黒田玲子

14：00～14：30 受付

14：30～16：30 セッション2

「環境科学」：地球—私達のこの慈しむべき惑星

講 演 カナダ側出席者は後日ホームページに掲載

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所助教授

理学博士 佐藤 薫

独立行政法人国立環境研究所

生物圏環境研究領域分子生体毒性研究室

主任研究員理学博士 青野光子

17：30～19：30 ワイン&チーズレセプション

ご挨拶 元文部科学大臣 遠山敦子

11月30日（火）& 12月1日（水）プログラム

http://www.canadanet.or.jp/i_st/wstt.shtml

上記カナダ大使館ホームページ参照。