

地球シミュレータ上の「仮想地球」*

榎本 剛**・大淵 済**

1. はじめに

気象学の基本は観測であることは論を俟たないが、観測事実や理論的予想を検証するためには、実験が必要である。実際の大気は実験道具として不便なので、回転水槽や数値モデルを利用した実験が行われる。コンピュータ上に「仮想地球」をつくり、そこで様々な条件を変えて実験を行う。数値モデルによる実験は、計算資源の制約を受ける。計算資源の不足により、現実的な時間内に計算できない問題も存在する。地球シミュレータ（以下ES）は、卓越した計算能力により、これまで実行が困難であった計算を可能にした。

ESは、計算機科学と地球科学を振興するために故三好甫氏らにより計画され、2002年3月に完成した。2002年6月から2004年6月までESは世界最速であるとされ、現在でも、トップクラスのスーパーコンピュータである。エネルギーや軍事目的のスーパーコンピュータが多い中、主に地球科学のために利用されている点でESはユニークな存在である。

本稿は、ESの概要と成果を紹介するものであるが、成果のすべてを包含するものではなく、筆者が関わっている大気大循環モデルAFESに関連した話題に限定される。温暖化予測、領域雲解像モデルによるメソ擾乱のシミュレーション、全球非静力学モデルや大気海洋結合モデルに炭素循環や動的植生モデルを組み込んだ地球システムモデルの開発等は、ESならではの実施可能になった重要なテーマであるが、これらは

別のいくつかの解説で取り上げられることになろう。ここでは、研究の道具として、我々がES上に構築したさまざまな「仮想地球」とそれらを用いた研究の動向について紹介することにする。

2. 地球シミュレータの概要と最適化

ESは、スーパーコンピュータ（計算ノード）が2台ずつ詰められた冷蔵庫のような筐体が320台、これらをつなぐ結合ネットワーク、及びディスクシステムから構成されている。主記憶容量は10TBで、ピーク性能は40Tflopsである。メモリを共有する各計算ノードに8つのベクトル・プロセッサがある。

結合ネットワークとして、双方向に12.3GB/sでデータ転送が可能なクロスバー・スイッチを備えており、大規模データを高速に転送できる。計算機の性能は、計算速度のみで測られることが多いが、データ転送速度等、総合的な性能のバランスのよさが、実アプリケーションを効率よく実行するためには必要である。

ESでプログラムを効率よく動作させるためには、計算ノード間、計算ノード内、プロセッサ内（ベクトル）の3層の並列化を施す必要がある。大気大循環モデルAFESは、CCSR/NIES AGCM 5.4.02¹⁾を参考にして、ES用に開発されたスペクトルモデルであるが、Fortran 90で一から書き直し、並列化を徹底した結果26.59Tflops（ピーク性能比で約65%）という記録的な実行性能を達成し、2002年のゴードンベル賞を受賞することができた²⁾。

3. 地球シミュレータを用いた研究

AFESは有志によって支えられており、「受益者負担」の原則で研究目的に応じて自由に改変されている。AFESを利用して様々な「仮想地球」がES上に

* “Virtual Atmosphere and Ocean” on the Earth Simulator.

** Takeshi ENOMOTO, Wataru OHFUCHI, 独立行政法人海洋研究開発機構地球シミュレータセンター,
eno@jamstec.go.jp

© 2007 日本気象学会

構築されている。最初に高解像度シミュレーションについて述べるが、他にも、AFESを利用したものとして、大気海洋結合モデル、アンサンブル・カルマン・フィルタを用いたデータ同化システム、火星大循環モデル等もある。

3.1 全球メソスケール解像実験

2002年8月我々は解像度 T1279L96 (水平格子間隔約10 km, 96層) の AFES を用いて、寒気内小低気圧、梅雨前線、台風を対象とした実験を行ない、それぞれの現象の発生・発達について調べた^{3,4,5)}。AFES は、静力学近似を仮定し積雲対流をパラメタ化しているので、対流活発域の表現には当然限界があるが、従来の領域モデルの解像度で全球を計算しているの、より広い水平スケールの中で相互作用が表現される。例えば、初期渦なしでも台風は自然に発生する。

第1図は、梅雨前線のシミュレーションにおける積分開始6日目の950 hPa 面相当温位である。華南から日本の南岸にかけて非常に傾度の大きな前線が形成されている。日本付近をよく見ると、山岳の風下に相当温位が高い領域がある。図は省略するが、上層では低相当温位の空気が太平洋まで侵入しており、差分移流により潜在不安定が形成されている。高解像度シミュレーションでは、前線のような水平傾度の大きな領域、渦位や相当温位等が細長くのばされた構造(フィラメント構造)ばかりではなく、より精緻に表現され

た地形の周りの流れの再現性も向上する。渦位や相当温位のフィラメントが思ったより安定して存在することは驚きであった。

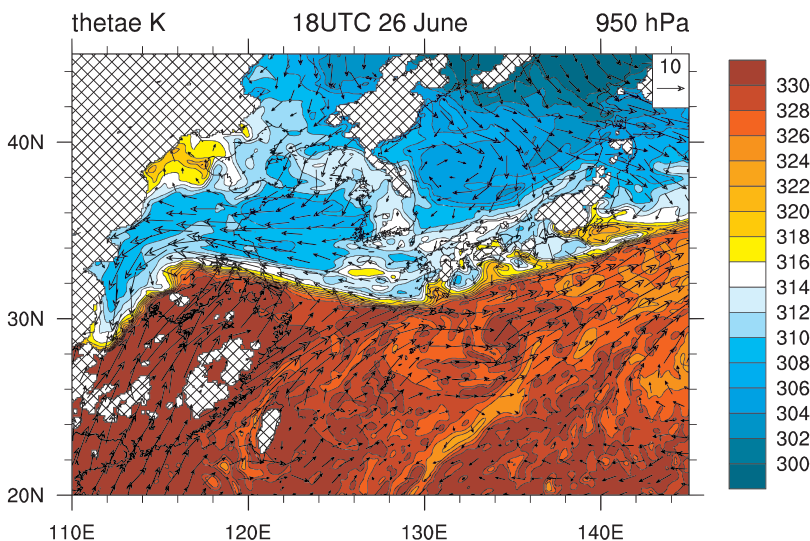
全球メソスケール解像実験は、THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験) の科学計画策定の時期に前後して行われた。中村一前数値予報課長のご推薦や Shapiro 博士 (米国海洋大気庁) との出会いがあり、地球シミュレータを天気予報研究にも使うべきだという気運が高まった。Shapiro 博士のすすめで、筆者らは2002年8月⁶⁾及び11月⁷⁾に欧州に風水害をもたらした小低気圧のシミュレーションを行うこととなった⁸⁾。その後、2003年夏の欧州⁹⁾や2004年7月20日の関東地方の猛暑¹⁰⁾などシミュレーションを行ない、大規模場の影響による顕著現象の発生メカニズムの研究を行なっている。

全球高解像度大気大循環モデルを用いた顕著現象の研究は、今後も行われるであろうが、決定論的予報にもこのような解像度が使われ始めている。欧州中期予報センターは既に TL799L91 (水平格子間隔約25 km) を現業化し、気象庁も2007年春に TL959 L60 (水平格子間隔約20 km) の現業化を予定している。

3.2 高解像度大気海洋結合モデルによる局所大気海洋相互作用の研究

大気海洋結合モデル CFES¹¹⁾は、大気海洋結合系研究のための「仮想地球」である。CFESは、AFESと

海洋大循環モデル OFES とを結合したものである。結合モデルでは、データを交換するためのカブラと呼ばれるプログラムを用意することが多い。並列計算機では、カブラは1つのプロセスとして動作することになるが、データ交換の際には、カブラを実行するノードにデータが集中するため非効率的である。これを避けるために、CFESは、AFES、OFESそれぞれにデータをやり取りするサブルーチンを組み込み、直接 AFES と OFES とがデータを交換する方式を採用した。



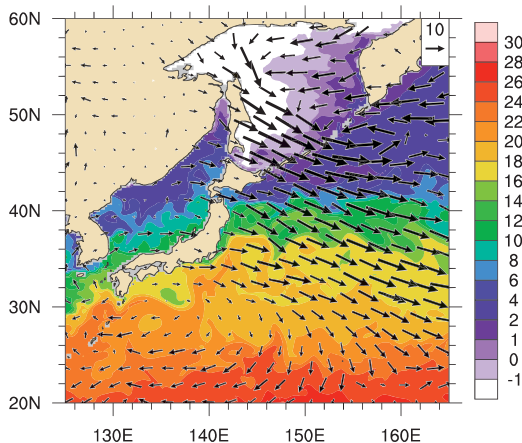
第1図 解像度 T1279L96 の AFES を用いた梅雨前線のシミュレーション。積分6日目18 UTC (世界協定時) における950 hPa 面上の相当温位 (K)。網かけ域は地形によりデータがないことを示す。

CFESは、現在水平格子間隔が大気50 km 海洋25 kmという気候モデルとして世界トップクラスの高解像度を用いており、局所的な大気海洋相互作用を再現することができる。我々が着目しているのは、黒潮流域での海面水温と降水量との関係や熱帯低気圧の通過に伴う海洋亜表層の応答、オホーツク海の海水分布と総観規模擾乱の発達との関係等である。第2図に積分5年目の2月1日の日本付近における海面水温と10 m風の分布を示す。寒気の吹き出しや低気圧の通過は、海水の張り出しを促す。他方、海水分布は、低気圧の発達の位置や程度に影響すると考えられる。この他、まだ十分調べられていない多数の興味深い現象が存在しているはずである。我々のグループだけでは十分な解析は出来ないため、より多くの大気海洋相互作用の研究者によりCFESによるシミュレーションの結果を解析していただきたいと考えている。

3.3 AFES-LETKF データ同化システム

少しずつ異なる初期状態からのアンサンブル予測を行えば、誤差の発展についての統計的な情報を得ることができる。これを利用すれば、随伴モデルを用いずに、データ同化を行うことができる。随伴モデルは、時間を逆行する射影を表す演算子に対応するものであり、線型化が必要であるが、湿潤過程等では容易ではなく、モデルの改良の度につくり直す必要がある。アンサンブル予測を利用する場合は、最新の予測モデルを直ちに利用することができる。

局所アンサンブル・カルマン・フィルタ

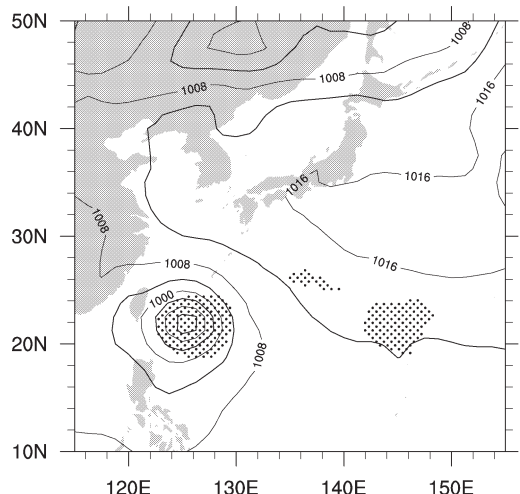


第2図 CFESによるシミュレーションの例。積分5年目2月1日の海面水温（陰影）と10 m風（ベクトル）。網かけ域は陸上であることを示す。

(LETKF)は、アンサンブル予測を用いたデータ同化の一手法である¹²⁾。三好建正博士（気象庁数値予報課）がMaryland大学で使っていたLETKFのコードをES用に最適化したものを、山根省三博士（千葉科学大学/地球環境フロンティア）がAFESと結びつけてAFES-LETKF同化システムを構築した¹³⁾。

LETKFなどアンサンブル予測を利用する同化システムの精度には、予測モデルの精度が大きく影響する。AFESは予報モデルとしての実績がないので、実用になるか不明であった。2004年8月の予報実験で評価したところ、ECMWFや気象庁のようなトップクラスには及ばないが、韓国気象庁等、現業センターの成績と比肩しうることが分かった¹⁴⁾。

このシステムを用いて、2005年5月から1年超の実験的な再解析を実施した¹⁵⁾。衛星データを同化していないので、とくに南半球での精度は劣るが、北半球では通常の再解析と遜色がない。従来の再解析と異なり、誤差情報が得られる。第3図は、40メンバーで行なったAFES-LETKF実験的再解析の一例で、2005年7月17日の海面気圧のアンサンブル平均とスプレッド（ばらつきを示す量）である。台風第5号のまわりでスプレッドが大きい（ボーガスと呼ばれる衛星観測等から推定した中心付近の気圧分布を取り入れる工夫は用いていない）。台風の東、135°E～150°Eにのびた



第3図 AFES-LETKFを用いた実験的再解析の例。2005年7月17日00 UTC（世界協定時）における日本付近の海面気圧分布（hPa）のアンサンブル平均値（等値線間隔4 hPa）とスプレッド（1 hPa以上の領域に陰影）。

領域でもスプレッドが大きい。これは、気象衛星の赤外画像と比較すると、対流が活発な領域に対応しているようである。スプレッドの力学的な意味については、より多くの事例を調べ、検討していきたい。

AFES-LETKFの再解析データは、地球シミュレータセンターから公開される予定である。従来の再解析のような品質が保証されたものではなく、あくまで実験的なものであるが、誤差情報を使った予測可能性研究¹⁶⁾やアンサンブル再予報、観測データの予報精度に対する影響を調べる「観測システム実験」に利用できる。興味のある方に利用していただき、問題点の報告を受けながら改良を続けたいと考えている。

3.4 惑星気象

地球シミュレータには、「仮想地球」だけでなく、水惑星や「仮想火星」、「仮想金星」がつくられ、地球流体力学や惑星気象の研究が行われている。水惑星実験は、北大や東大などと地球シミュレータセンターとの共同で行われ、熱帯性擾乱の発生、赤道波の研究¹⁷⁾や大気大循環の形成に対する海洋のフロントの役割¹⁸⁾など基礎的な研究が進んでいる。また、高橋芳幸博士(北大)やKevin Hamilton教授(ハワイ大学国際太平洋研究センター)との共同研究で、高解像度実験における大気のスเปクトルも調べられている¹⁹⁾。

4. おわりに

地球科学のための高速な計算機が出来たのは、大変好運なことであった。ESによりモデル開発が加速し、シミュレーション研究が浸透したことは間違いない。紙面の関係で全ての研究を紹介できないが、良い仲間を多く得て、さまざまな問題にAFESを用いて取り組むことができた。AFESの発展にご尽力いただいた関係者各位にこの場を借りて謝意を示したい。

ESを利用した我々の取り組みは、これで完成ではない。我々が取り組んできた全球高解像度シミュレーションや予測可能性実験は、2週間先までの顕著現象の予測精度向上を目指すTHORPEXに貢献するものである。アジア太平洋を舞台にした、大がかりな観測計画THORPEX太平洋アジア領域観測(T-PARC)が2008年頃の実施を目指して計画されているが、観測データを有効に活用する上で、地球シミュレータの計算機資源は欠かすことができない。大気海洋結合モデルCFESを用いた気候変動の研究や季節予測実験もこれから進めていく予定である。

我々はESがあることに慣れてしまっているが、天気予報等の現業とは異なり、このような資源が継続的に得られるかどうかは既定ではない。国家としての次の旗艦機は、地球科学を主たる目的にしないようである。また、我々が行うような大規模計算に適したアーキテクチャになるかもまた判断を許さない。気象学会として、大学等にある通常のスーパーコンピュータでは扱えないような大規模計算の有用性を位置づけ、計算機資源を継続的に確保するよう要望していく必要があるように思う。会員諸氏には、気象のシミュレーション研究への御理解を賜れば幸いである。

参考文献

- 1) Numaguti, A. *et al.*, 1997: CGER's Supercomputer Monograph Report, 3, National Institute of Environmental Sciences, 1-48.
- 2) Shingu, S. *et al.*, 2002: Proceedings of Supercomputing 2002, <http://www.sc-2002.org/paperpdfs/pap.pap331.pdf>.
- 3) Ohfuchi, W. *et al.*, 2004: J. Earth Simulator, 1, 8-34.
- 4) 中村 尚ほか, 2004: 天気, 51(2), 141-149.
- 5) Yoshioka, M. K. *et al.*, 2005: Geophys. Res. Lett., 32, L16802, doi: 10.1029/2005GL022716.
- 6) Enomoto, T. *et al.*, 2006: Meteor. Atmos. Phys., in press.
- 7) 榎本 剛, 2004: 2004年度春季大会予稿集, C452.
- 8) 大淵 済, 榎本 剛, 2005: 天気, 52(11), 885-889.
- 9) Nakamura, M. *et al.*, 2004: J. Earth Simulator, 2, 55-69.
- 10) 榎本 剛, 大淵 済, 2005: 2005年度春季大会予稿集, C254.
- 11) Komori *et al.*, 2006: In High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean., Springer, in press.
- 12) 三好建正, 2005: 天気, 52(2), 93-104.
- 13) Miyoshi, T. and S. Yamane: Mon. Wea. Rev. に投稿中.
- 14) 榎本 剛ほか, 2006: 2006年度秋季大会予稿集, A207.
- 15) 三好建正ほか, 2006: 2006年度秋季大会予稿集, A205.
- 16) 山根省三ほか, 2006: 2006年度秋季大会予稿集, A206.
- 17) Yamada, Y. *et al.*, 2005: Theor. Appl. Mech. Japan, 54, 289-297.
- 18) 三瓶岳昭, 2006: 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士論文.
- 19) Takahashi, Y. O. *et al.*, 2006: Geophys. Res. Lett., 33, L12812, doi: 10.1029/2006GL026429.