

# 地球シミュレータを用いた 顕著現象のシミュレーション研究

榎本 剛\*

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

## 概要

地球シミュレータのような高速な計算機を効率的な利用することにより、全球の流れと局地的な現象を一つのモデルの中に再現することができる。このことにより、スケール間の相互作用を調べることが可能となった。この講演では、地球シミュレータ用大気大循環モデル AFES の概要について述べた後、顕著現象のシミュレーションの事例をいくつか紹介し、今後の大気シミュレーションについて展望する。

## 1 はじめに

災害につながるような顕著現象の多くは、局地的に発生する。局地的な現象は、より大きなスケールの場合から影響を受けて、発生・発達することがある。今回取り上げるのは、偏西風帯上を伝播する定常ロスビー波が砕波することによって生じる低気圧や高気圧である。偏西風帯上の定常ロスビー波の波長は数千 km 程度で、エネルギーは東西風速の最大2倍の速さで東に伝播する (定常ロスビー波の伝播経路については直江 (1995) を参照)。背景の西風が弱くなる場所でエネルギーが集積し、砕波が起き、より小さな渦や細長い糸状の構造が作られる。

これまで全球大気大循環モデルで用いられてきた解像度では、このような現象を十分に再現することはできなかった。領域モデルでは、切離低気圧自体は詳細に再現しうるが、境界にうまく情報を与える必要がある。地球シミュレータ

を利用することではじめて可能となった、全球高解像度シミュレーションでは、定常ロスビー波の遠方からの伝播も、砕波の過程も同時に再現することが可能である。

地球シミュレータがどのようなシステムか概観しておくことにする。地球シミュレータは、640 台 (ノード) のスーパーコンピュータを高速な回線で接続したシステムである。ひとつひとつのノードは、8つのベクトル・プロセッサと共有メモリから成り立っている。そのため、地球シミュレータの性能を最大限に活かすためには、ベクトル化、ノード内並列化、ノード間並列化の3つの並列プログラミングを施さなければならない。

## 2 AFES の構成と特徴

地球シミュレータ用大気大循環モデル AFES は、CCSR/NIES AGCM 5.4.02 を参考にし、3つの並列プログラミングを駆使して新たに書かれたコードで、理論値 40.96Tflops の約 65%にあたる 26.58Tflops という実用的なプログラムとしては、突出した計算性能を達成している。AFES は、力学過程、物理過程、及び入出力から成り立っている。力学過程では、渦度、発散、気温、水蒸気、地表気圧が水平や鉛直に流される「移流」等を計算する。物理過程では、雲や放射等の計算を行なう。入出力は、大気場の初期条件や境界条件としての海面水温や海水の分布等を読み込んだり、結果を出力したりするサブルーチンから構成される。

\*eno@jamstec.go.jp

## 2.1 球面スペクトル変換法

AFESでは緯度経度座標上に格子点を配置し物理過程や非線型項を計算しているが、球面上の波（スペクトル）に展開して、水平微分を計算したり、気象学的なノイズである高速の波の除去したりしている。時間ステップ毎に物理空間とスペクトル空間とを行き来するので、この方法はスペクトル変換法と呼ばれる（球面スペクトル変換法についての詳細は石岡（2004）を参照）。球面に固有の関数である球面調和関数（図1）を利用する。東西方向には三角関数でし、南北方向にはルジャンドル陪関数で展開する。東西波数  $m$  と全波数  $n$ （南北波数は  $|n - m|$ ）とを同じ切断波数  $M$  で打ち切るものを三角切断と呼ぶ。切断波数が159、鉛直48層の場合、T159L48と表示する。差分法に対するこの手法の利点をいくつか挙げて見よう。

- 微分や線型の波の位相速度が正確。
- 三角切断では、球面上のどこでも解像度が一様（多数の格子点を球面上に一様に配置することは不可能）。
- 解像度を高めると誤差が指数関数的に収束（差分法では線型的に収束）。
- 最小の波は、水平格子間隔の最大約3倍で表現（差分法では一つの波を表すのに最低約6点程度必要）。

球面スペクトル変換法の欠点として、

- ギブスの現象（アンデス山脈のような急峻な地形を解像できないときに、両側に現れるノイズ）。
- 高解像度での非効率なルジャンドル変換。

があげられる。ギブスの現象は高解像度でも残るが、その程度は軽減される。理論的には、ルジャンドル変換は高解像度になると不利だが、AFESは高解像度でのベクトル化効率向上により、計算量の増大を軽減している。水平格子間隔10km程度までは、差分法よりも効率よく計算することができる。

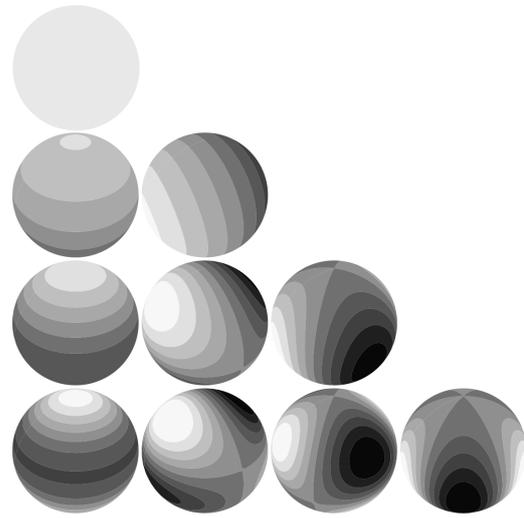


図1: 球面調和関数の模式図。上から下に全波数  $n$  が、左から右に東西波数  $m$  が増加する。  $P_0^0$ （左上）から  $P_3^3$ （右下）までを示す（榎本他、2006より）。

## 3 顕著現象のシミュレーション

AFES T1279L96（水平格子間隔10 km、鉛直48層）を用いたポーラーロー（寒気内小低気圧）、梅雨前線、台風のシミュレーション結果は、中村他（2004）及び大淵他（2004）等に報告されている。これらのシミュレーションはより低解像度のシミュレーションのある日を初期値した実験で、メソ現象の再現性を調べるためのものであった。これに引き続き、実際に発生した現象のメカニズムや予測可能性を調べるために、T639L48（水平格子間隔20 km、鉛直48層）のAFESを用いて以下の3つの事例のシミュレーションが行われた。

- 2002年8月中欧に洪水をもたらした切離低気圧
- 2002年11月スペイン沖タンカー座礁事故につながった小低気圧
- 2004年7月関東地方に猛暑をもたらした高気圧の発達

これらの事例は、いずれも定常ロスビー波束が砕波して発生した顕著現象である。2004年7月の事例は、榎本（2005）が提案したメカニズムにより発生したことが、榎本・中村（2005）及び

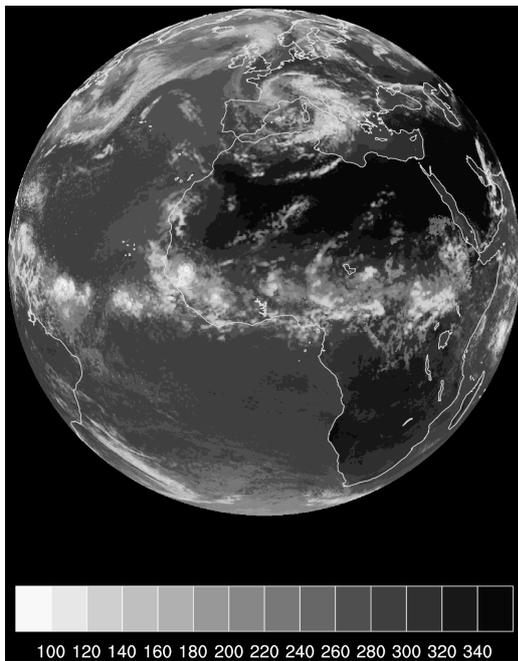


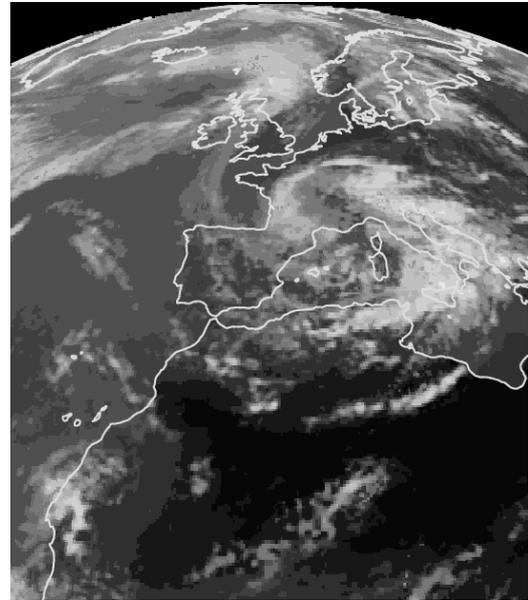
図 2: AFES T639L48 により計算された 2002 年 8 月 11 日 11 時 (世界協定時) の外向き長波放射量 ( $W m^{-2}$ ) の分布. 初期時刻は 8 月 8 日 0 時 (世界協定時).

原田ら (2006) の解析で示されている. また, シミュレーションでも 5 日前からそのプロセスがよく再現されている. 以下, 2002 年 8 月の事例での低気圧の再現性について見てみよう.

図 2 は, AFES により計算された初期時刻から 83 時間後の外向き赤外放射量でみた雲の様子である. 白いところほど高い雲があることを示している. サハラからアラビア半島にかけての沙漠地帯やアフリカから大西洋にかけての熱帯収束帯の雲等, 概ね気象衛星による赤外面像 (図は省略) の特徴を再現している. 一方, 欧州付近を見ると渦を巻いた雲が認められる. これが切離低気圧である.

これを拡大した図 3a と図 3b の Meteosat 7 号の画像とを比較すると, 若干北東への進行が遅れているものの南欧から北アフリカにかかる雲の様子がよく再現されていることが分かる. メソスケールをある程度表現できるような解像度を用いることにより, 切離低気圧やその内部構造を現実的に再現することが可能となった.

(a)



(b)

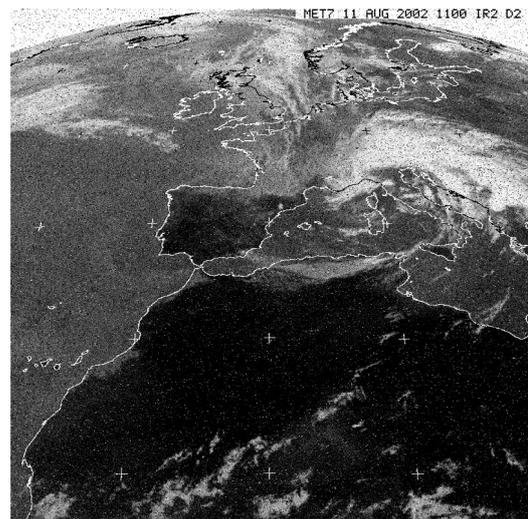


図 3: 2002 年 8 月 11 日 11 時 (世界協定時) 欧州付近における雲の様子. (a) Meteosat 7 号の画像 (©2002 EUMETSAT). (b) 図 2 を拡大.

## 4 気象シミュレーションの近未来

**全球メソスケール解像度予報** これまで見たように、メソスケールを表現できる解像度を用いることで、メソ現象の再現性は飛躍的に高まるものと期待される。地形の表現が良くなることも重要である。欧州中期予報センターでは、既に決定論的予報で TL799L91 (水平格子間隔 25 km) という高解像度を用いている。気象庁でも来年 (2007 年) 春頃にこれを上回る TL959L60 (水平格子間隔 20 km) が用いられる予定である。

**観測との融合** モデルを複数の初期条件から時間積分することにより、予測の誤差情報が得られる。この情報は、観測から初期条件を作る「データ同化」の際に利用できる。その利用法の一つがアンサンブル・カルマンフィルタと呼ばれる方法である。我々のグループでは、気象庁や大学の研究者と共同でこの方法を地球シミュレータ上で試しており、良好な結果をえている。世界気象機関 WMO の下、2 週間先までの顕著現象の予測精度向上を向上させるための研究計画 THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験) が実施されている (大淵・榎本, 2006 参照)。この計画では、追加の観測をして顕著現象の予測精度の向上をはかろうとしている。追加の観測をどこで実施すれば良いかという情報は、成長モードの計算やアンサンブル予報等から得られる。観測データを同化し、モデルの初期値とする一方通行から、モデルから得られる情報を観測に利用する双方向に進展しつつある。

**大気海洋結合モデルによる季節予測** 現在気象庁の季節予報は、大気海洋結合モデルで予報された海面水温を用いているが、大気モデルのみで行なわれている。結合モデルで行なっている海外の機関もあるが、低気圧の構造や海洋の渦を表現するには十分な解像度とはいえない。我々のグループでは、大気が T239L48, 海洋が  $1/4^\circ$  の大気海洋結合モデルを開発している。予備的な実験では、局所的な大気海洋相互作用が再現されることが分かってきた。結合モデルの高解像度化が予測精度向上につながるかどうかは、これから調べていきたいと考えている。

## 参考文献

参考文献は、受講者の便を考慮し、和文の教科書や論文や解説等で図書館に行けば手に入るものを選んだ。

石岡圭一, 2004: スペクトル法による数値計算入門. 東京大学出版会, 232 ページ.

榎本 剛, 2005: 盛夏期における小笠原高気圧の形成メカニズム—2003 年度山本・正野論文賞受賞記念講演—. 天気, **52(7)**, 523–531.  
榎本 剛・中村 尚, 2005: 日本の夏の天候を左右する二つのジェット気流—北欧と地中海にある冷夏・猛暑の種—, 特集 異常気象のメカニズムを探る. 科学, **75(10)**, 1146–1149.

榎本 剛, 佐々木英治, 小守信正, 2006: 全球大気海洋の高解像度シミュレーション. 応用数理, **16(2)**, 19–27.

大淵 濟・榎本 剛, 2005: 「第 1 回 THORPEX 研究会」報告—中期予報の精度向上にはどのような知見が必要か. また、何ができるのか—. 天気, **52(11)**, 885–889.

大淵 濟, 中村 尚, 升本順夫, 佐々木英治, 2004: 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. 天気, **51(10)**, 759–763.

原田やよい, 遠藤洋和, 榎本 剛, 2006: 2004 年 7 月に猛暑をもたらした高気圧の成因. 月刊海洋, 号外 **44**, 151–159.

直江寛明, 1995: 順圧大気中でのロスビー波伝播とその波束光路. グロスベッター, **34**, 6–23.

中村 尚, 大淵 濟, 吉岡真由美, 高谷康太郎, 榎本 剛, 室井ちあし, 永戸久喜, 河合芳雄, 2004: 研究会報告第 23 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(2)**, 142–148.