

## 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」

コンピーナー：

中村 尚 (東京大学理学部/地球フロンティア)

第23回メソ気象研究会は、2003年度気象学会春季大会の前日(5月20日)、つくば市の気象研究所講堂にて開催された。今回は標記のテーマで、本格稼働を始めて1年(研究会開催当時)になる「地球シミュレータ(Earth Simulator:以後ES)」を利用した高解像度の全球大気モデリングに焦点を当てた。

ご存知のように、ESは現在世界最高の演算処理性能を持つ並列型ベクトル計算機である。その高い演算性能により、全球大気のシミュレーションが、メソスケール現象をかなりの程度解像できる分解能でも可能になった。つまり、従来は全球モデルにネスティングされた領域モデルでしか表し得なかったメソ現象の振舞いが、全球モデルの中で表現できるようになって来た訳で、大規模循環の研究とメソ気象研究との間の垣根が低くなったとも言えよう。これを機に両分野の研究交流が一層活性化するよとの期待から、メソ気象研究連絡会幹事の坪木和久氏(名大大気水圏研)と吉崎正憲氏(気象研)より、大気大循環を専門とする筆者が研究会のコンピーナーを任されたのであった。

当日の研究会ではそうした「ESを利用したメソ解像の全球大気モデリング」について、地球シミュレータセンターと地球フロンティア研究システム(FRSGC)が共同で開発を行っている高解像度全球大気循環モデル(AFES)や、気象研究所が行っている同様な高解像度モデリングを中心に、最新の成果を紹介して頂いた。話題性も手伝ってか会場は満席となり、講演後は活発な議論が繰り広げられた。以下、各講演者から当日の講演内容の概要を紹介して頂く前に、当日会場の設営に当たられ、多大な便宜を図って下さった吉崎正憲氏を始めとする気象研究所の方々に、この場を借りて厚く御礼申し上げたい。

## 1. ESとAFESの概要説明

大淵 濟 (地球シミュレータセンター)

ESは、少なくとも私を含む現場の人々は誰も頼んでもいないのに出来てしまい、現在稼働中である(Sato *et al.*, 2002)。全世界のスーパーコンピュータの演算処理速度を競うTop500リスト<sup>1)</sup>でも、2003年6月現在圧倒的首位を誇っている。また、米国Time誌の認定する、荣誉ある2002年度最高発明品にも<sup>2)</sup>、日本からはESが犬語翻訳機「パウリンガル」とともに選ばれた。

思うに、ESは超大規模計算のために作られたものである。40Tflops<sup>3)</sup>を誇るピーク演算性能と10TB<sup>4)</sup>の巨大メモリを切り刻んで使うのならば、わざわざESを使う意味はない。即ち、ESで究極的に目指すべきは、大気大循環モデル(AGCM)で言えば、いわゆるT106<sup>5)</sup>やT213のようなスペクトル分解能(水平格子間隔約100~50kmに相当)ではなく、T1000とかT1500(水平格子間隔10km以下)である。前者のような分解能のモデリングならば、何もESを使わなくても、普通のスーパーコンピュータで時間をかければ可能である。また、5Tflops性能のマシンを8台、日本全国津々浦々に作った方がより安価であり、各地に散らばる多くの中規模計算ユーザーには寧ろ好都合であったに違いない。

しかしながら、ES上で超大規模計算をしなければ意味が無いという要請の下で、この凄い計算機を思う存分使ってやろうと野心的であった人々は、少なくとも気象の分野では皆無に等しかったとしか思われなない。でなければ、全球10km相当の分解能のメソスケール解像全球大気循環シミュレーションを、我々のような若輩者が世界に先駆けて行うことにはならなかったであろう(第1図)。勿論、このようなシミュレーショ

<sup>1)</sup> 毎秒  $4 \times 10^{13}$  回の浮動小数点演算。

<sup>2)</sup> 1TB =  $10^{12}$  バイト。

<sup>3)</sup> スペクトル水平波数三角切断の最大波数106; 赤道上で水平格子間隔約100kmに相当。

<sup>1)</sup> <http://www.top500.org/>

<sup>2)</sup> <http://www.time.com/time/2002/inventions/>

© 2004 日本気象学会

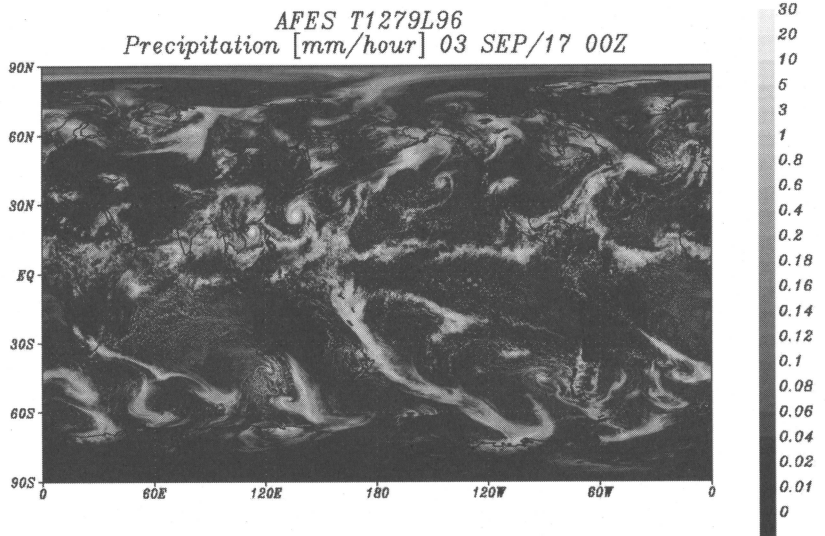
に科学的な意味を見出しに行くことは容易なことではない。解像度を高めさえすれば全てが上手くゆくと言うのなら、誰も苦勞はしない。また、現行の AGCM における物理過程のパラメタリゼーションが破綻するのではないかなど、超高解像度化に関する懸念も多い。そして、いかに ES といえども、全球シミュレーションを 10 km 格子よりさらに細かい分解能で行うことは、その計算資源上不可能である。ところが、この 10 km という格子間隔は、個々の雲を解像できる訳でもなく、いかにも中途半端

である。しかし、結局は実際にやってみなくては何も分からないし、何も始まりはしない。若気の至りとは自覚しているが、我々は楽観的であり野心的である。我々の悪戦苦闘ぶりは以下 3 つの報告の通りである (Ohfuchi *et al.*, 2003 も参照)。

我々が ES 上で利用する AFES (AGCM for the ES) は、東京大学気候システム研究センターと独立行政法人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、FORTRAN90 で全面的に書き直された並列コードである (Shingu *et al.*, 2002, 2003, 2004)。プリミティブ方程式系、スペクトル・オイラー移流、鉛直  $\sigma$  座標など従来型の仕様だがコードの書換えにより ES 上での計算効率が極限にまで引き上げられている。その計算効率に対しては、2002 年秋に米国ボルチモアで開催された「高性能計算に関する国際会議 (SC2002)」にて最も権威あるゴードン・ベル賞の最高性能部門賞が授賞された<sup>16</sup>。

こうして開発された AGCM, AFES に対して、我々のグループでは、様々な空間解像度や幾つかの異なる積雲対流パラメタリゼーションを試すため、数多くのテストを重ねつつ研究を進めている。研究遂行にはハイウェイ大学/FRSGC の国際太平洋研究センター (IPRC) の研究者達から力強い協力も得ている。そして、以下 3 つのレポートで紹介されているように、格子間隔

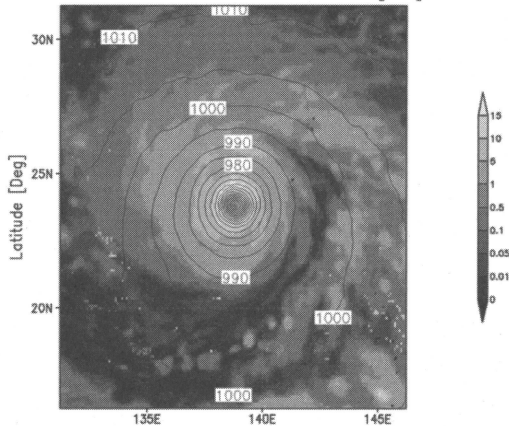
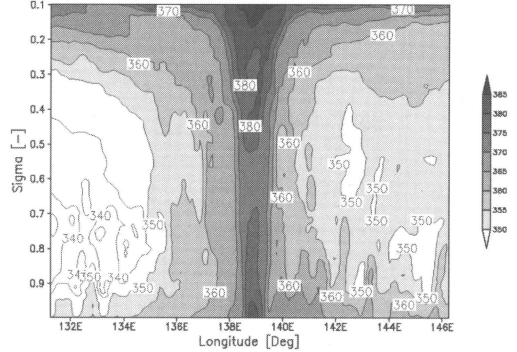
<sup>16</sup> [http://sc-2002.org/news\\_nrp\\_conclude.html](http://sc-2002.org/news_nrp_conclude.html)



第 1 図 T1279L96 (水平約 10 km メッシュ; 鉛直 96 層) の AFES シミュレーションで得られた 6 時間平均降水量 (mm/h) の全球分布図の例。降水量の多い領域ほど白色で表示される (右端のスケール参照)。

10~20 km 相当の解像度で「気象」研究を行っている。これにより、時間発展する大循環場中のメソ現象やメソ循環・メソ対流系の自己組織化の理解を深めることを目指している。また、20~40 km 相当の解像度で「気候」研究も始めている。それにより、細かい地形の影響をより正確に表現しつつ局地的な気候変動を理解したり、黒潮続流域などのような局所的に非常に強い海面温度傾度の効果をより深く理解することを目指している。更に、鉛直高分解能で成層圏準二年周期振動や重力波の鉛直伝搬の研究も行おうとしている。

我々のグループは、ES という希有の計算資源を最も効率的に活かすことのできるグループの 1 つであると自負している。上記のように、AFES を ES で走らせることによってできる研究の可能性は大きい。にも拘わらず、諸般の事情により、我々のグループは小さく、かつ縮小されつつある。そのような状況下においても、数値実験の実行に追われてその結果の解析が疎かになるような計画は立てないよう、可能な限りの配慮はしている。それでもやはり、膨大な出力データを十分に解析するには、我々のグループは余りに小さいと言わざるを得ない。また、超高分解能化に伴う様々な面でのモデルの見直しにも十分に手が回っていない。そこで、我々のシミュレーションをより効果的に活用するためのデータ公開、AFES のさらなる改良を行うためのオープン・ソース開発の準備を進めているところで

a) T1279L96 Day=11, hr=15, PRCP[mm/hr], SLP[hPa]  
lon=138.75, lat=23.7594, Min=920.673[hPa]b) T1279L96 Day=11, hr=15, Equiv.Poten.Temp [K] T3  
lon=138.75 lat=23.7594

第2図 台風T3の最盛期(中心気圧:921hPa)における(a)瞬間降水量分布(mm/h換算;右端のスケール参照。降水量の多い領域ほど白色で表示される),及び(b)相当温位(K;右端のスケール参照)の東西鉛直断面図(鉛直は地表面から $\sigma=0.1$ のレベルまで;東西は台風中心最低気圧を中心として経度15度の範囲)。

ある。膨大なデータ量故の技術的困難はあるが、出力データの解析やモデル開発に興味を持たれた研究者の皆様のお力添えを、我々は強く希望している。

## 2. AFESで再現された台風の構造と時間発展

吉岡真由美(地球シミュレータセンター),  
栗原宜夫(地球フロンティア研究システム),  
大淵 濟(地球シミュレータセンター),  
及びAFESワーキングチーム

ESが(潜在的に持つ)ピーク性能40Tflopsに対し、ES上で高速高解像度の実行が可能ないように最適化されたAFESがはじき出した約65%というピーク性能比の凄さ、全球大気スペクトルモデルで格子間隔10kmという細かさには数値モデルを扱う多くの人間は驚かされたと思われる。しかし、ESの稼動後早くも1年余りが経過し、「ハードウェアの凄さはそろそろ聞き飽きた。ES上でAFESを使ってどんな研究ができるのかについて知りたい。」という声が高まりつつあるものと思われる。そんな折、本研究会でメソスケール現象も再現できる全球モデルから得られる結果を紹介する機会を与えて頂いた。

研究会ではAFESを用いた超高解像度実験に現れた台風について報告した。先行して行われた水平解像度T319鉛直24層(T319L24)での12年分の感度実験(大淵ほか,2002)において、台風と見られる熱帯低気圧性擾乱が確認されていた。その時期を選び、T319L24積分の3年目9月6日9時<sup>17)</sup>を初期値として、解像度

T1279L96でのAFES積分を16日間実行した。複数の積雲対流スキームを試した後、全般的に最も現実的な循環場が得られたArakawa-Schubertスキームを用いた。積分期間中、台風と見なし得る低気圧性擾乱が4個確認された。うち3個は積分期間内に発生し、その後台風の条件を満たすまでに発達した。本研究会では、3番目に西太平洋域で発生し、その後北上して九州上陸後に温帯低気圧化した台風(T3)の構造の時間発展を中心に報告した。静力学平衡を仮定しながらも格子間隔10km相当の水平解像度を有するAFESでは、台風のような個々のメソスケール現象の特徴的な構造を表現できるとともに(第2図)、通常ネスティングで行われる大規模場との相互作用も、単一のモデル内で整合的に表現できたと考えている。

しかし、モデル出力の評価や実験のあり方等について厳しいコメントも頂いた。「メソ降水系に伴う個々の雲システムを表現し得ない10kmという解像度は中途半端ではないか。」というコメントを新野 宏さん(東大海洋研)から頂いた。また、加藤輝之さん(気象研)からは、「やはり非静力学モデルでない対流・降水現象の表現に問題があるのではないか。」といった、ご自身の研究(Kato,1997;Kato and Saito,1995)に基づくコメントを頂いた。一方、佐藤正樹さん(埼玉工大/FRSGC)からは、「現在他のモデルではできないのだから、AFESを用いて超高解像度でのパラメタリゼーションの正当性に関する評価などを行って欲しい

<sup>17)</sup> 以後、時刻は全て日本標準時。

い。」というコメントを頂いた。どれに対しても真摯に受け止め、検証してゆきたいと考えている。

すでに領域モデルでは、10 km 程度の解像度の静力学モデルを用いた実験が多く報告されていることから、研究会では後者の利点についてもっと示すべきであった。筆者のこうした至らない点にもかかわらず、「AFES のように全球モデルでメソ現象を扱うことが、メソ現象に関する理解を深めるのに役立つだろうから今後に期待したい。」という温かい励ましのお言葉を、メソ気象研究会世話人の坪木和久さんから頂いた。

常から実際の現象を見つめることの大切さを説いておられる廣田 勇先生（京大名誉教授）からは、「モデルにおける現象の再現性を確認するために、観測との比較をどの程度行っているか？」など、気象学の研究者にとって然るべき姿勢を再確認させられる質問とコメントを頂いた。今回の報告はアニメーション中心の構成だったため、現象の理解に対する姿勢に懸念を持たれたのは当然で、それは筆者の不徳の致すところである。今回の筆者らが AFES で行った実験に基づく、雲の流れのような降水量分布のアニメーションは、その見事さについて自画自賛、感心してしまいがちである。しかし、我々が AFES を用いて成すべきことが、美しいアニメーションの作成だけで済まされるものではないのは充分認識している。加えて、廣田先生からは「AFES (AGCM for the ES) の名前は misleading である。大気現象を記述するモデルがハードウェアに対して“For”であってはならない。」という、気象学の研究を行う者はあくまで使う立場にあるべきとの点を強調されたコメントも頂いた。これこそまさに我々 AFES チームが常に心していることであることを、今後の活動を通じて示してゆきたい。

こうして、まだまだ歩き出したばかりの AFES を用いたメソスケール解像実験であるが、今後はこの特性を活かす解析や将来の実験が可能かを検証して行く段階にある。世間では頼みもしないのに作ってくれたという意見もあるが（木本, 2003）、ES という魅力的なハードウェアがあり、折角その性能を活かし得るモデルがあるのだから、それを実際に使いつつ大切に育てようというのが我々の立場である。今後手間暇かけて健やかに育てたいと考えている。見守るなり、手を貸すなり温かいご支援を頂けることを AFES チーム全員で切に願う。最後に、講演の機会を与えて下さったコンピーナーの中村 尚さんに感謝したい。

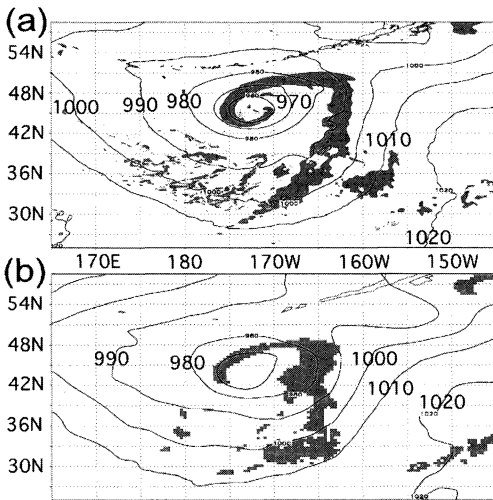
### 3. AFES でシミュレートされた温帯低気圧と寒冷渦

高谷康太郎（地球フロンティア研究システム）

ES 上で AFES を用いて行われた現在世界最高の水平解像度 (T1279L96) の全球大気大循環シミュレーションのうち、本発表では冬の北半球中緯度に見られた総観規模低気圧および寒冷渦についての解析結果を紹介する。この10日間の積分の初期値としては、T319L24で行った積分の中で真冬の特定の日のデータを用いた。第3図 a は、T1279の高解像度モデルで積分開始後4日目に見られた、冬の総観規模低気圧の海面気圧 (SLP) と降水分布である。対応する地表付近の温度場の水平勾配（前線に対応）や、温位・水蒸気・風速などの各物理量の鉛直分布などを見ると、この低気圧には Neiman and Shapiro (1993) 等で指摘されている低気圧の「T-bone」構造に近い構造が（中村・高藪, 1997も参照）、明瞭に表現されていることが分かる。即ち、後屈温暖前線、寒冷前線の断裂、及び低気圧中心付近の下層の温暖核などが明瞭である。一方、第3図 b は解像度 T319でシミュレートされた同じ低気圧である。T1279の場合と比較して背景場の大規模な循環はほとんど変わらず（図省略）、また低気圧の総観規模構造も同様であるが、良く見ると寒冷前線が弱く、細かい降水分布も表現できていないことが分かる。また、寒冷前線の背後においては、地表付近の風に平行に分布する比較的背の低い積雲の組織化が余り顕著でない。

一方、解像度 T1279での積分においては、日本海上でメソ  $\alpha$  スケールの寒冷渦（ポーラーロウ）の発生が見られた。これは、対流圏中上層の気圧の谷に付随してフィラメント化した高渦位偏差と、大陸と日本海との間の傾圧帯とが相互作用して生じたものであるが、解像度を T319まで落とすとほとんど表現されなくなる。さらに、T1279の解像度では、日本海及び太平洋上の筋状の雲や、寒気吹き出しに伴う日本海側の降雨雪のような地形性降水の組織化も、現実的に再現されていることを確認した。

積雲対流スキームを含む物理過程のパラメタリゼーションなど、高解像度版の AFES にはまだまだ改善の余地がある。しかし、領域モデルをネスティングせずとも、全球モデルにおいてメソスケール現象が解像出来る点が画期的で、擾乱の下流発達 (downstream development) により急発達する総観規模低気圧（いわゆる爆弾低気圧）がもたらす豪雨の予測再現実験などに、このモデルが貢献することが期待される。計算速



第3図 (a) 解像度 T1279L96 (水平約10 km メッシュ; 鉛直96層) の AFES シミュレーションで積分開始後4日目に見られた冬の総観規模低気圧。北太平洋域 (25 (N~60 (N, 165 (E~140 (W) の海面気圧 (等値線: 10 hPa 毎) と瞬間降水量分布 (1時間降水量換算で20 mm 以上の領域に陰影)。 (b): (a) と同様。但し解像度 T319L24 (水平約30 km メッシュ) でシミュレートされた同じ低気圧。

度やデータ容量の関係上、10日程度の積分しか出来ないため、メソ対流系の大規模場へのフィードバックなどの評価はなかなか難しいが、この視点からの解析も進める予定である。最後に、AFES ワーキングチームの皆様がこの場を借りて謝意を表したい。

#### 4. AFES で再現された低気圧の下流発達

榎本 剛 (地球フロンティア研究システム),  
大淵 濟 (地球シミュレータセンター),

中村 尚 (東京大学理学部/地球フロンティア),  
Melvyn A. Shapiro (米国大気科学研究センター)  
及び AFES ワーキングチーム

欧州・北大西洋域においては、2002年8月と11月に典型的な低気圧の下流発達が見られた。8月の事例では、チェコ、ドイツ、オーストリアを中心に歴史的規模の洪水が発生し、この3か国だけで約200億ユーロにのぼる被害をもたらした。東京大学の中野史剛君と中村 尚助教授の解析によると、低気圧の急速な発達は、対流圏上層を上流から伝播し西欧に入射した定常ロスビー波束の砕波が契機となっていると考えられる。この定常ロスビー波束は、7月中旬から8月中旬までの

約1か月にわたり、砕波と発達を繰り返しつつ、ゆっくりと北半球中緯度を亜熱帯ジェットに沿って伝播していたという。一方、11月には、1か月に4つもの明瞭な波束が見られた。個々の波束に伴って低気圧の下流発達が起こり、主に北米から欧州にかけての各地に寒波、強風、豪雪、洪水などが発生したが、このうち最も象徴的だったのはスペイン沖のタンカー座礁事故だろう。

これらの災害をもたらした低気圧の中には、予測がかなり困難であったものがある。8月の事例では、欧州中期予報センター (ECMWF) による48時間先のアンサンブル予報は各予報のばらつきが小さく、中歐に洪水をもたらした低気圧が正しく予想されているのに対し、144時間先の予報ではばらつきが非常に大きかった。一般的な予測可能性は高々1週間程度とされているので、この事例も例外ではなかったと納得してしまうこともできる。しかし、(傾圧性擾乱を含む)ロスビー波束は南半球の場合、緯度円を2周するものまで観測される (Chang, 1999) ほど、長距離を一貫した構造を保ったまま伝播するので、個々の擾乱よりもその予測可能性が高いと考えられる (Lee and Held, 1993)。実際、8月の事例でも、ある幅の緯度帯で平均した南北風でみると、波束の伝播は振幅の点でも位相の点でも1週間前から正しく予想されている。

このように予測可能性が比較的高い現象も存在するという認識の下で、社会的に影響の大きい現象の予測精度向上を目的とした国際研究計画が実行に移されつつある。この「THORPEX 全球大気研究計画 (The Observing System Research and Predictability Experiment)」と呼ばれる計画は、Thorpe 教授 (英国 Reading 大) と Shapiro 博士 (米国大気科学研究センター) らが中心となって進めているもので、各国の予報センターのみならず大学・研究機関も複数参加している。アジアでは気象庁が中心となっており、AFES ワーキングチームは、低気圧の下流発達のような半球規模からメソスケールまでの空間規模の広がりを持つ現象こそ全球高解像度モデル AFES に好適な対象であると考え、その予測再現実験を通じ計画に協力することとした。

本講演では、解像度 T639L48 の AFES を用いた、8月11日及び11月15日までの各々96及び168両予報時間の再現実験について、初期段階の解析結果を紹介した。初期値は、地球流体電脳倶楽部及び東京大学喜連川研究室に保存されている気象庁客観解析データ (GPV)

を利用して頂いた。第4図に8月11日21時におけるモデルでシミュレートされた降水と海面気圧、及び同時刻の人工衛星の赤外面像を示す。積分開始から84時間経過しているにもかかわらず、地中海にある小低気圧に伴う降水帯が赤外面像の低輝度域によく対応している。この降水帯は、前に述べた中欧における洪水を引き起こしたものである。

AFESでは気象庁予報モデルより高い解像度ながらも、100時間を越える予報では、8月・11月の両事例とも観測とは大きく異なる

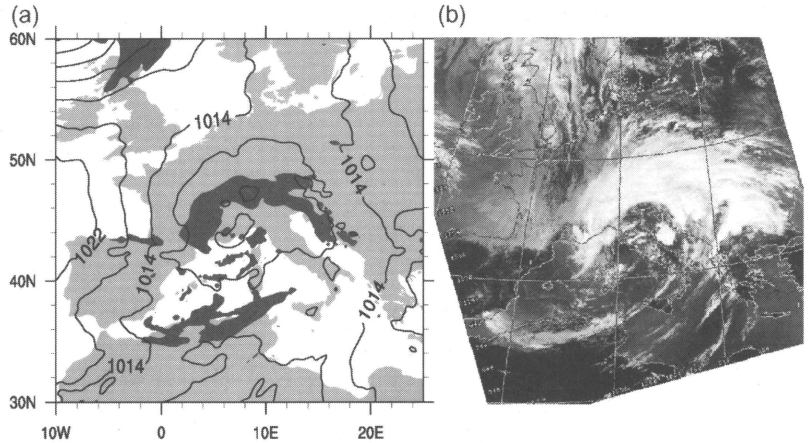
海面気圧の分布となった。そのパターンは、「模範解答」である気象庁の予想と類似していた。このことは、モデルの差異よりも初期値の影響が大きいことを示唆している。ロスビー波束の群速度や伝播の経路が十分に予想できなかったことも予報が外れた一因と考えている。高解像度の実験結果を活用して、ロスビー波束の伝播やそれに伴う渦位分布の時間発展に関する力学的な解析を進めている。2003年秋に北大西洋で実施されるTHORPEX集中観測からの系統的な観測データに基づき、関係者と協力してそのインパクト評価の実験も進めていきたい。

## 5. ES向けNHMの概要および高解像度シミュレーション

室井ちあし（気象研究所予報研究部）

気象研究所では1980年代から非静力学モデル(NHM)の開発を開始し、大学・研究機関の研究者にも幅広く利用されている他、気象庁では近い将来その現業運用の実施を目指して準備が進められている。その一方、気象研究所では気象庁数値予報課、地球科学技術総合推進機構と共同で、「人・自然・共生プロジェクト」の一環としてESを利用し、大気モデルを用いた研究を実施している。我々のグループでは気象庁NHMをESに移植・最適化し、雲解像シミュレーションを実行している。

その一環として、2001年に日本に接近した台風15号

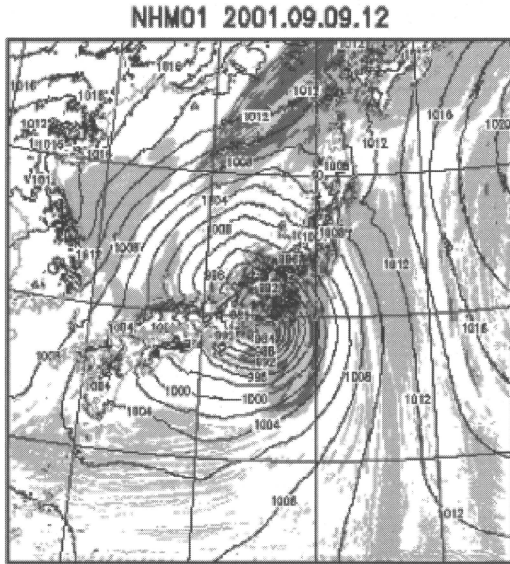


第4図 AFES（解像度 T639L48；水平約20 km メッシュ、鉛直48層）を用いた予報再現実験でシミュレートされた2002年8月11日21時における欧州域の10分間平均海面気圧（等値線：4 hPa 毎）と10分間平均降水量（1時間降水量換算で0.5 mm 以上の降水域には濃影）。積分開始時刻は8月8日9時。(b) 同時刻における人工衛星（NOAA）からの赤外面像。

(DUNUS)について、モデルの水平解像度を1 km、シミュレーション領域を2000 km 四方（格子数2000×2000；鉛直38層）に設定し、予報再現実験を実行した。モデルの初期条件・境界条件は、水平解像度20 km (TL1023L40) の全球スペクトルモデル (GSM) の結果から水平解像度5 km のNHMへネスティング、さらにその結果を水平解像度1 km のNHMへとネスティングを行った。2001年9月9日21時を初期値として水平解像度1 km で6時間シミュレーションを実行した結果の中から、海面更正気圧と前10分間降水量を第5図に示す。台風15号の中心は静岡県沖にあり北東進している。台風の東側では強い降水域が計算されている。この雨雲は、日本の南から北上してきたものが中部山岳でさらに強化されたものである。周辺の弱い降水域とともに、微細な構造が表現されていることがわかる。詳しい解析や観測との比較は行っていないが、定量的には精度が不十分なところもあり、さらに調査・改良が必要であると考えている。

ESに移植・最適化する際に最も困難であった点は、ノード内並列化機能の有効利用である。コンパイラによる自動並列化だけでは不十分で、指示行の挿入やソースコードの改良が有効である。また積分結果の再現性に関わる問題にも苦慮したが、コンパイラオプションの指定により問題を回避することができた。

研究計画では、この雲解像モデルを用いて地球温暖化研究のためのシミュレーションを実行することと



第5図 水平解像度1 kmの気象研究所雲解像モデルを用いた2001年台風0115のシミュレーション。海面更正気圧(等値線:2 hPa毎)と前10分間降水量(陰影:降水の多い領域ほど濃影)。

なっている。水平解像度1 kmで長期間積分を実行することは、たとえESといえども不可能であるが、期間中の顕著な擾乱について等の限られた事例に対しては、高解像度モデルを有効に活用できると考えている。

## 6. ES向けNHMでシミュレートされた日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)上に発生する带状雲

永戸久喜(気象研究所予報研究部)

冬季の日本海上では、大陸からの寒気の吹き出しに伴い朝鮮半島の根元から南東に伸びる顕著な降雪バンド(带状雲)がしばしば発生し、北陸・山陰地方沿岸に大雪をもたらすことがある。これは日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)と呼ばれる下層の水平風収束帯上に発生することが知られている。JPCZと带状雲についてはこれまでに数多くの研究がなされており、静力学モデルを用いた研究(Nagata *et al.*, 1986; Nagata, 1991)では、JPCZの形成には主に3つの下部境界(朝鮮半島北部の山岳、海面水温分布、朝鮮半島と日本海の高陸分布)が寄与していることが示された。この他にもいくつかの観測的研究(Hozumi and Magono, 1984; メソ気象調査グループ, 1988など)から、その構造についての概念モデルが示された。しかし、带状雲のメソスケール・マイクロスケールの構造に着目し

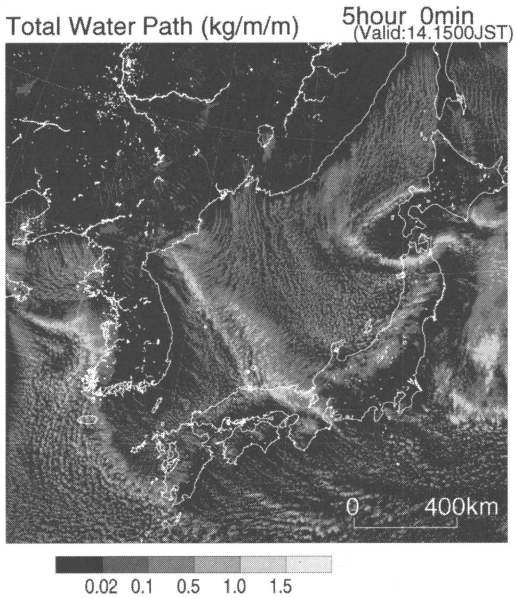
た観測的研究は少なく、数値的研究はこれまで行われてない。Murakami *et al.* (2002)は2001年1月14日に発生した带状雲について、気象観測用航空機による詳細な観測を行い、その内部構造を詳しく調べた。本講演では同じ事例について雲解像モデルによる再現実験を行い、その内部構造に着目して航空機観測と比較した結果を報告した。

数値モデルは気象庁及び気象研究所で開発中のNHMを用いた。NHMは世界最速のスーパーコンピュータであるESに移植され、現在最適化が進められている(前掲の室井の報告)。これによって高解像度・広領域の雲解像シミュレーションを実行することが可能となり、水平規模が約1000 kmと比較的大きく、且つそれを構成する個々の対流雲のスケールが数kmと小さい带状雲の再現実験も実現した。今回はES上で、水平分解能5 km(5 km-NHM: 予報領域2500 km四方)と水平分解能1 km(1 km-NHM: 予報領域2000 km四方)の2つのNHMを、1月14日9時を初期値とする気象庁領域モデル(RSM)に同日10時よりネスティングを開始して、それぞれ12時間分と6時間分の積分を実行した。

第6図は1 km-NHMによる全凝結水物質の鉛直積算量の5時間予報値を示す。1 km-NHMは、朝鮮半島の根元から山陰・若狭湾に伸びる带状雲やその両側に広がる筋状雲の様子など、衛星観測で得られた雲の水平分布の特徴を良く再現していた。5 km-NHM(図略)も带状雲や筋状雲の走行など定性的な様子は良く表現していたが、雲の大きさや間隔などが粗く、1 km-NHMの方がより観測に近い様子を再現していた。次に带状雲に直交する方向の鉛直構造を調べた(図略)。带状雲を挟んで南西側の気流の方が北西側の気流よりも暖かく、各領域に発生していた筋状雲は前者の方が背が高かった。また、带状雲の南西端付近に最も活発な対流雲域が存在していた。これらの特徴は航空機観測から得られたものと良く一致していた。

ただし、带状雲中のTモード<sup>\*8</sup>の雲域については、航

<sup>\*8</sup> 衛星写真で見た雲の走向が、冬季モンスーン的一般風向(北西風)に対して、見掛け上直交(Transverse)する雲域。これに対して、雲の走向が一般風向に見掛け上平行(Longitudinal)な場合を「Lモード」と呼ぶ。尚、シアー流中の熱対流については、シアーに対する雲列(ロール状対流)の走向を以って、「Tモード(直交型ロール状対流)」と「Lモード(平行型ロール状対流)」とに分類されるので注意が必要。



第6図 水平解像度1 kmの気象研究所雲解像モデルで予報された全凝結水物質の鉛直積算量の水平分布。積算量 ( $\text{kg m}^{-2}$ ) の多い領域ほど白色で表示される(下端のスケール参照)。2001年1月14日10時を初期値とする極東域の5時間予報値。

空機観測からは、活発な対流雲域から吹き流された雪や氷粒子が「かなとこ (anvil) 状」に分布するものと指摘されていたが、モデルではその効果は小さく、寧ろ帯状雲に直交して吹き込む下層風に沿ってできたロール状の対流雲が卓越していた。Tモード雲域については、気象レーダー観測や衛星観測などからもanvilとロール状対流雲各々の存在を示唆するような結果が得られている。今後は、今回の事例も含めた様々なケースについて、より詳細な観測と数値実験結果の比較解析を行い、その構造をより明確にする必要がある。

## 7. CCSR/NIES AGCMでシミュレートされた梅雨前線と重力波

河谷芳雄・高橋正明

(東京大学気候システム研究センター)

我々はCCSR/NIES AGCMにおける梅雨前線の再現性を調べた(Kawatani and Takahashi, 2003)。モデルの解像度はT106L60で、積雲対流スキームはArakawa-Schubert型を用いた。シミュレートされた6月の大規模循環場の特徴は、梅雨前線が形成される

ための必要な条件(Ninomiya, 1984)と一致しており、日本南岸に梅雨前線に相当する東西に伸びた降水帯が形成された。また下層ジェット、比湿の強い水平勾配、湿潤中立成層の形成という数100 kmの構造が極めて良く再現された(図省略)。下層ジェットや前線帯での上昇流等は、低解像度では難しかった定量的な面においても観測と良く一致した結果が得られた。モデル中のメソ $\alpha$ スケール擾乱の位相速度や波長等も、観測と類似した特徴が再現された。

さらに解像度と積雲対流パラメトリゼーションを変えた実験を行い、梅雨前線の再現における解像度と物理過程の影響を調べた。解像度を上げるにつれ、熱帯収束帯(ITCZ)の降水量、ITCZと南太平洋収束帯(SPCZ)の分離、梅雨前線帯がより明確になること等、全球的な降水分布が格段に良くなった。積雲対流パラメトリゼーションを湿潤対流調節型にした場合は、20°N付近で非現実的に多量の雨が降り、太平洋高気圧が東へ後退し、インドモンスーンが140°Eまで侵入するなど、梅雨前線が形成される為の主要な条件を満たしていなかった。以上の結果から、梅雨前線をAGCMで再現させるためには、水蒸気フラックスの収束幅(~500 km)や梅雨前線に特徴的な数百km規模の現象を陽に解像できる格子間隔と、梅雨前線を形成する適切な循環場を再現できる物理過程が重要であることが言える。しかしながらモデル中の梅雨前線の北上は現実無比早く、7月はうまく再現されないという問題点も見られた。

また、同モデルを用いて重力波の研究も行っている(Kawatani *et al.*, 2003)。上部対流圏から下部成層圏にかけて、梅雨前線帯に強い重力波エネルギーが見られた。今後詳細に解析する予定である。

## 参考文献

- Chang, E. K. M., 1999: Characteristics of wave packets in the upper troposphere Part II: Seasonal and hemispheric variations, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1729-1747.
- Hozumi, K. and C. Magono, 1984: The cloud structure of convergent cloud bands over the Japan Sea in winter monsoon period, *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 522-533.
- Kato, T., 1997: Hydrostatic and non-hydrostatic simulations of moist convection: Review and further study, *Meteor. Atmos. Phys.*, **63**, 39-51.
- Kato, T. and K. Saito, 1995: Hydrostatic and non-



- hydrostatic simulation of moist convection : The applicability of hydrostatic approximation to a high-resolution model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 59-77.
- Kawatani, Y. and M. Takahashi, 2003 : Simulation of the Baiu front in a high resolution GCM, *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 113-126.
- Kawatani, Y., S. K. Dhaka, M. Takahashi and T. Tsuda, 2003 : Large potential energy of gravity waves over a smooth surface with little convection, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(8), doi : 10.1029/2003GL016960
- 木本昌秀, 2003 : 専門分科会「気象学における地球環境問題」の報告, *天気*, **50**, 375-384.
- Lee, S., and I. M. Held, 1993 : Baroclinic wave packets in models and observations, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1413-1428.
- メソ気象調査グループ, 1988 : 冬期日本海における帯状雲のメソ構造—啓風丸の特別観測の解析—, *天気*, **35**, 237-248.
- Murakami, M., M. Hoshimoto, N., Orikasa, H. Horie, H. Okamoto, H. Kuroiwa, H. Minda and K. Nakamura, 2002 : Inner structures of snow bands associated with the Japan Sea Polar-airmass Convergence Zone based on aircraft observations, *Proc. Intl. Conf. Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia*, 522-527.
- Nagata, M., 1991 : Further numerical study on the formation of the convergent cloud band over the Japan Sea in winter, *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 419-428.
- Nagata, M., M. Ikawa, S. Yoshizumi and T. Yoshida, 1986 : On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter ; numerical experiments, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 841-855.
- 中村 尚, 高藪 出, 1997 : Shapiro の新しい前線・低気圧モデル, *天気*, **44**, 85-100.
- Neiman, P. J. and M. A. Shapiro, 1993 : The life cycle of an extratropical marine cyclone. Part I : Frontal-cyclone evolution and thermodynamic air-sea interaction, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2153-2176.
- Ninomiya, K., 1984 : Characteristics of Baiu front as a predominant subtropical front in the summer Northern Hemisphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 880-894.
- Ohfuchi, W., S. Shingu, H. Nakamura, M. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, S. Yamane, T. Nishimura, X. Peng, H. Fuchigami, M. Yamada, Y. Kurihara and K. Ninomiya, 2003 : 10-km mesh meso-scale resolving global simulations of the atmosphere on the Earth Simulator : Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator), To be submitted to *J. Geophys. Res.*
- 大淵 濟, 西村照幸, 山根省三, 2002 : AFES (AGCM for Earth Simulator) の積雲対流パラメタリゼーションと解像度に対する感度II, 2002年日本気象学会秋季大会予稿集, A352.
- Sato, T., S. Kitawaki and M. Yokokawa, 2002 : Earth Simulator running, *Int. Supercomputing Conf.*, June 2002.
- Shingu, S., H. Takahara, H. Fuchigami, M. Yamada, Y. Tsuda, W. Ohfuchi, Y. Sasaki, K. Kobayashi, T. Hagiwara, S. Habata, M. Yokokawa, H. Itoh and K. Otsuka, 2002 : A 26.58 Tflops global simulation with the spectral transform method on the Earth Simulator, *Proc. Supercomputing 2002*, available at <http://www.sc-2002.org/paperpdfs/pap.pap331.pdf>.
- Shingu, S., H. Fuchigami, and M. Yamada, 2003a : Vector parallel programming and performance of a spectral atmospheric model on the Earth Simulator, *Proc. 10th ECMWF Workshop on High Performance Computing in Meteorology : "Realizing Tera Computing"*, World Scientific, in press.
- Shingu, S., H. Fuchigami, M. Yamada, Y. Tsuda, M. Yoshioka, W. Ohfuchi, H. Nakamura and M. Yokokawa, 2004b : 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.