

球面上の偏微分方程式解についての

2004年国際ワークショップ報告*

佐藤正樹^{*1}・三浦裕亮^{*2}・小峯賢治^{*3}・肖鋒^{*4}
 北内英章^{*5}・松村崇行^{*6}・津川元彦^{*7}・田中幸夫^{*8}
 室井ちあし^{*9}・富田浩文^{*10}

1. はじめに

The 2004 Workshop on the Solution of Partial Differential Equations on the Sphere (球面上の偏微分方程式解についての2004年国際ワークショップ)が独立行政法人海洋研究開発機構において2004年7月20日から23日にかけて開催された。本ワークショップは大気海洋モデリングにおける数値計算法および力学コアの最新の話題・問題点を議論するもので、特に球面上の偏微分方程式の解という切り口から、大気海洋モデル研究者だけでなく、流体力学、数値計算法、数学、計算工学を専門とする研究者間の議論の場を提供する。また、PCMDIの主導する気候モデル比較実験のうち力学コア比較実験についての実験設定・結果の議論を行う。本会議は、特定の学会の主催するものではな

く、共通の問題意識をもつ国際的な研究グループにより開催されており、ほぼ2年に一度国際会議が開かれている。

実質的な運営の中心メンバーは、D. Williamson (NCAR), J. Drake (ORNL), P. Swarztrauber (NCAR)であり、それぞれの開催地における責任者が加わって会議を開催している。過去4回の会議は以下の場所で開催された：Toronto, Canada, Fields Institute, トロント大学主催 (2002年8月), Montreal, Quebec, Canada, カナダ気象局主催 (2001年5月), San Francisco, CA, U. S. A., PCMDI, LLNL 主催 (1999年11月), Gatlinburg, TN, U. S. A., ORNL 主催 (1998年4月)。

今回の会議は、地球環境フロンティア研究センター主催で、気象庁、日本気象学会、日本流体力学会の後援を受けている。過去の会議は北米中心で行われており、筆者らもこれらの会議に定期的に参加してきたが、前回トロントでの会議の後、オーガナイザーのD. Williamson から「次は日本で開催してみてもどうか？」との打診を受けた。折しも、日本では地球シミュレーターでの計算が少しずつ成果をあげつつある時期でもあったので、良い機会であると考え快くお引き受けした。

今回は、米国、カナダ、英国、ドイツ、イタリア、中国、インド、ロシアなど海外から約35名、国内からも約35名の参加があった(第1図)。特に、招待講演としてニュージャージー州立大学のD. Haidvogel 博士にはスペクトル要素法による海洋大循環モデルのレビューを、また地球シミュレーターセンターの渡邊國彦博士には地球シミュレーターの紹介をお願いした。

このワークショップは、各講演と質疑の時間を十分にとり、活発な議論を行うことを奨励していることが

* Report on the 2004 Workshop on the Solution of Partial Differential Equations on the Sphere.

^{*1} Masaki SATOH, 地球環境フロンティア研究センター/埼玉工業大学.

^{*2} Hiroaki MIURA, 地球環境フロンティア研究センター.

^{*3} Kenji Komine, 地球シミュレーターセンター.

^{*4} Feng Xiao, 東京工業大学.

^{*5} Hideaki KITAUCHI, 地球環境フロンティア研究センター.

^{*6} Takayuki MATSUMURA, 気象庁.

^{*7} Motohiko TSUGAWA, 地球環境フロンティア研究センター.

^{*8} Yukio TANAKA, 地球環境フロンティア研究センター.

^{*9} Chiashi MUROI, 気象研究所.

^{*10} Hirofumi TOMITA, 地球環境フロンティア研究センター.

© 2005 日本気象学会

特色である。各セッションは3-4個の講演のみとし、セッションの間の休憩時間を1時間程度とっている。長い休憩時間は、質問のためのバッファとしている。今回は発表件数（発表総数：60件）が多かったため、講演時間を16分としたが、場合によっては質疑応答が30分以上に及ぶこともあった。このワークショップではこれまでポスター発表を行ってこなかったが、今回は発表件数の都合で、8件についてポスター発表をお願いした。そのかわり、会期中はポスターを常時展示して、いつでも議論が行えるように配慮した。

各セッションは明確なテーマによって分けたものではないが、以下にそれぞれのセッションについて担当者から報告する。（佐藤正樹）

2. 球面上の浅水波モデル

7月20日の午前のセッションでは、従来より球面を一様に覆う格子として注目されてきた正20面体格子および立方体格子上で浅水波モデルについての講演が行われた。

R. D. Nair (NCAR) は、立方体格子における Discontinuous Galerkin 法を用いた浅水波モデルについて講演を行った。彼らのモデルでは有限体積法と有限要素法を組み合わせることで、質量の保存と高精度な計算を可能にしている。Williamson *et al.* (1992) が提案した浅水波方程式に関する標準試験2の結果から、水平解像度の増加に伴い精度が指数関数的に良くなること、また、標準試験5の結果から、スペクトル法のモデルで見られるような偽の振動が回避できていることが紹介された。W. M. Putman (NASA) は、立方体格子における有限体積法について講演を行った。現在、彼らの大循環モデルは緯度・経度格子上で有限体積法による離散化を行っているが、極付近での CFL (Courant-Friedrichs-Levy) 条件の制約を回避するため、立方体格子の利用を検討し



第1図 地球環境フロンティア研究センター、地球シミュレータセンター棟を背景に記念撮影。

ているそうである。発表では、Lin and Rood (1996) の移流スキームによる標準試験2の結果が紹介された。室井 (気象研究所) は、立方体格子におけるモデル開発結果について講演を行った。浅水波モデルを用いた標準試験5の結果は良好なものであり、リファレンスとなる高解像度モデルの結果と比較しても同等な結果を示していた。また3次元化したモデルの初期的な結果とともに、将来的な開発方針を示していた。L. Bonaventura (MPI) は正20面体格子において3角形を制御体積とし、水平離散化に Arakawa-C 格子を用いた浅水波モデルの結果について講演を行った。彼のモデルは Ringler and Randall (2002) と同様な手法によりエネルギーやポテンシャルエントロピーなどの保存をみたくように離散化されている。三浦 (地球環境フロンティア研究センター) は正20面体格子上で水平離散化に ZM 格子を用いた浅水波モデルについて講演した。ZM 格子は Ringler and Randall (2002) により提案された方法で質量は制御体積の中心で、速度は制御体積の頂点で定義する。Ringler and Randall (2002) の方法では、標準試験2で赤道から極側に質量が流れる欠点があったが、精度の良い傾き演算子を用いることで問題が解決されることを示した。W. Sawyer (ETHZ) は前述の Bonaventura の方法を六角形/五角形格子に適用する試みについて紹介

を行った。歪んだ格子に対する移流スキームや、RBF (Radial Basis Function) を用いた高精度の傾き演算子の離散化方法など、将来的に重要な課題に対し新しい試みを行っていた。

筆者は、今回のワークショップのような数値計算に特化した会議に出席したのは初めての経験であったが、様々な先進的な手法に触れることができ、とても刺激になった。(三浦裕亮)

3. スペクトル法, 格子系

7月20日の午後のセッションでは、スペクトル法と格子系に関する6つの発表と地球シミュレータに関する招待講演が行われた。

C. Temperton (ECMWF) は、次世代の高解像度モデルの開発に向けて2重フーリエ法における基底関数のとり方と極問題について考察し、浅水波方程式でのテストを今後行っていくことを紹介した。今後の進捗に期待が持てる。また、現行のモデルで T511L60 と T799L91 の計算コスト分布を示し、スペクトル変換にかかるコストが無視できなくなることを報告した。榎本(地球シミュレータセンター)は、T2000を超える解像度におけるルジャンドル変換の精度について考察した。従来の方法では数値演算の誤差が無視できないほど大きくなることを示し、Swarztrauber(1993, 2002)のフーリエ法を用いたガウス重みとルジャンドル陪関数の計算法を使用することで、T2559までの解像度における誤差を低減できることを報告した。スペクトル法モデルの高解像度化をする際には必ず考察すべき事項である。P. N. Swarztrauber (NCAR) はベクトル球面調和関数を用いた浅水波方程式の解法について提案し、過度発散型よりもロバストで保存性が良いことを理論と数値実験の両面から報告した。彭(地球シミュレータセンター)は、重合格子の一種である Yin-Yang 格子に CIP-CSLR (Constrained Interpolation Profile - Conservative Semi-Lagrangian scheme with Rational function) 法を導入した。重合格子間に質量保存則を満たす特別な補間法を適用し、大きい時間刻みの場合でも非負で高精度な移流を実現した。なお、同じ格子系が後日のセッションでも R. J. Purser (NCEP) から Bi-Mercator 格子として報告があり、今後発展していく可能性があると思われる。S. Janakiraman (CDACB) は、Schmidt 変換の適用方法を工夫することによってスペクトル格子を赤道付近に集中させる方法について報告した。富田(地球環境フロンティア

研究センター) は、全球雲解像モデル NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) の正二十面体格子に Schmidt 変換を適用した局所集中格子を提案した。本格子によって領域モデルを必要とせずに雲微物理過程の導入が効率的に行われ、スコールラインの再現実験で良好な結果を得ていた。上記の2件は、Schmidt 変換をスペクトル法と有限体積法の格子に適用し、双方とも成功している点が興味深い。最後に、渡邊(地球シミュレータセンター、招待講演)は地球シミュレータと今年度採択されたプロジェクトの概要を紹介した。計算機の稼働率、プロジェクト平均のプログラムの実行効率ともきわめて高く、地球シミュレータが有効に活用されていることを報告した。(小峯賢治)

4. 移流スキーム

ワークショップ全体を通して移流スキームの研究に対する関心度が依然として高く、その重要性がうかがわれる。2日目(7月21日)には、移流スキーム絡みの発表が8件あった。

最初は M. Zerroukat (UKMO) が彼らにより開発された SLICE (Semi-Lagrangian Inherently Conserving and Efficient) 法の球面座標への拡張について紹介した。SLICE 法は一次元の3次補間関数を用いたポリウム・マッピングスキームである。ポリウム・マッピングが従来のセミラグランジアン法のポイント・マッピングと異なり、フラックスに基づく保存スキームと等価の定式化であるため保存を保証する。その多次元化についてはカスケードスプリットングで行う。特に今回の発表では極点計算問題について簡単に回避できたことが強調された。佐藤(埼玉工業大学/地球環境フロンティア研究センター)は速度と過度を連立して統一の補間関数を用いる手法を発表した。この手法によれば過度法に必要なとされる楕円型方程式を解かなくて済む利点があり、また計算精度の向上も期待できる。せん断不安定流れにおいて数値実験の結果が報告され、その更なる発展についても論じた。P. H. Lauritzen (DMI) からは、非保存のポイントベース数値モデルに対してトレーサの数値解法に CISL (Cell-Integrated Semi-Lagrangian) を適用した場合の力学コアとの整合性についての発表があり、力学コアの連続方程式も同一保存スキームで解く必要があることを主張していた。また、現業の HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) へのセミインプリシット

法の導入についても紹介した。吉村(気象研究所)はJMA-GSM (Japan Meteorological Agency-Global Spectral Model) におけるセミラグランジアンスキームの改良と時間積分方式についての研究を発表した。セミラグランジアンスキームについて、三次元の計算を水平方向と鉛直方向にわけ、鉛直方向には保存スキームを置き換えることにより熱帯対流圏にあった cooling bias が改善されることを報告した。また、2レベル時間積分の計算効率と安定化の手法についても紹介があった。M. Hortal (ECMWF) からは, SETTLS (Stable Extrapolation for Two-Time Level Scheme)-セミラグランジアンスキームを実装した ECMWF 現業モデルの計算ノイズの問題点とその解決策についての発表があった。冬の極渦の移動に伴い、極地域成層圏に生じる局所的な計算不安定の結果を提示した。鉛直速度が激しく変化する場合に SETTLS による計算不安定性が原因だったことを示した。その対策として、鉛直方向の軌跡計算の際に速度場にフィルターをかけるのが有効であるという研究結果を報告した。

午後の最後のセッションにおいて、まず J. Pudykiewicz (MSC) が球面上における移流・拡散・反応方程式の有限体積法の研究結果を報告した。非構造格子として正20面体測地線格子を用い、高次補間により数値流束を計算し、高次ルンゲクッタ法によって時間積分を行った。また、移流スキームの単調性について Flux Correction 法と Explicit Local Adaptive Dissipation 法の比較を行った。河野(東京工業大学)からは、最近開発された多種類積分平均値を用いた有限体積法の一般成層流体への適用についての発表があった。この手法では、従来型の有限体積法と異なり、体積分平均値と面積分平均値の2種類の積分平均値を予報変数として離散化モデルを構築する。この手法による衝撃波を含む浅水波問題と圧縮性非静力大気モデルのベンチマーク問題の計算結果を報告した。最後に、肖(東京工業大学)が移流問題に対して1つの簡単な保存スキームを発表した。このスキーム (PRM: Piecewise Rational Method) は従来の PPM (Piecewise Parabolic Method) と違い、2次補間関数の代わりに有理関数を用いる。有理関数の「凹凸保証」の性質を利用し、極めて簡単な無振動スキームを構築した。また、従来の PPM に比べ、計算精度や数値分散などにおいて優れた数値実験結果を示した。(肖 鋒)

5. スペクトル要素法

スペクトル要素法に関する講演はポスターを含めた全講演数の約1割に当たる6件あった。ここでは、筆者の独断で、講演順ではなく研究の関連する順番に報告し、最後に私見を簡単に述べたいと思う。

A. St-Cyr (NCAR) は、要素間境界で従属変数の連続を要請するスペクトル要素法で、球面上の浅水波方程式を数値的に解くモデルを開発した。格子系には、球に内接する立方体を球の中心から球面に射影(心射方位図法)してできる球面上の6つの正方形をそれぞれ矩形要素分割する立方体格子系を用いた。そして、動的に数値解に適合しながら局所的に矩形要素を分割する適合格子細分化 (AMR: Adaptive Mesh Refinement) 法を導入した。各矩形要素内での従属変数の展開関数には求積点で定義されるラグランジュ補間関数を用い、時間積分法にはセミラグランジアン移流スキームまたは Operator-Integration-Factor Splitting (OIFS) スキーム (Maday *et al.*, 1990) を用いた。この AMR-スペクトル要素法-浅水波モデルを、浅水波モデルの標準試験 1, 2, 5 (Williamson *et al.*, 1992) に適用した結果、高次の空間離散化法であるスペクトル要素法に対しては、時間積分法にセミラグランジアン移流スキームより OIFS スキームを用いた方が、最大で約3.7倍高速に計算できることを示した。S. J. Thomas (NCAR, St-Cyr 代講) は、水平方向にスペクトル要素法を鉛直方向に差分法を用いた全球大気大循環モデル (HOMME: High Order Multiscale Modeling Environment) の開発状況を報告した。水平格子系には立方体格子系を用い、球面上の正方形の矩形要素分割には球面上の正方形を等間隔に分割する方法 (EAP: Equi-Angular Projection) を用いた。鉛直格子系には、ハイブリッド座標系を用いた。展開関数には Gauss-Lobatto-Legendre (GLL) 求積点で定義されるラグランジュ補間関数を用い、時間積分法には陰陽解法のクランク-ニコルソンスキームを採用した。このモデルを、Held-Suarez の標準試験 (Held and Suarez, 1994) に適用した結果、時間積分法に陽解法より陰陽解法を用いた方が、約3倍高速に計算できることを示した。これに関連して、B. Spatz (SNL) は、HOMME の陰陽解法に起因する線形ソルバーの並列計算機でのパフォーマンスについて報告した。展開関数に求積点で定義されるラグランジュ補間関数を用いるスペクトル要素法では、質量行列が対角であるため、時間積分法には線形ソルバーが必要のない陽解法が従

来使われてきたが、陰陽解法を用いることで陽解法より時間刻み幅を大きくすることができる。依然、線形方程式系を解かなければいけないが、それでも約3倍高速に計算できることが示された。数値実験では、8938 CPUを使用し1CPUあたり約33 MFLOPSを達成したことを報告した。F. Giraldo (NRL) は、水平方向にスペクトル要素法を鉛直方向に差分法を用いた全球大気循環モデル (NSEAM: NRL Spectral Element Atmospheric Model) の開発状況を報告した。水平格子系には、St-Cyr *et al.* 同様、立方体格子系を用いたが、球面上の正方形の要素分割には、矩形または三角形を用いる。展開関数には、求積点で定義されるラグランジュ補間関数を用いた。鉛直格子系には σ 座標系を用い、時間積分法には陰陽解法を採用した。このモデルを、浅水波モデル標準試験2 (Williamson *et al.*, 1992) と中緯度ジェットのテスト (Galewsky *et al.*, 2004) に適用した結果、要素分割に矩形より三角形を用いた方が高精度であることを示した。また、中緯度ジェットの傾圧不安定 (Jablonowski and Williamson, 2002) と地形がある場合の Held-Suarez のテストにも適用し、ともに結果は良好であった。一方、R. D. Nair (NCAR) は、要素間境界で従属変数のフラックスの連続を要請するスペクトル要素法 (DGM: Discontinuous Galerkin Method) を用いて、球面上の浅水波モデルを開発した。格子系は立方体格子系であるが、球面上の正方形の矩形要素分割には立方体の正方形を等間隔に分割して射影する方法 (EDP: Equidistant Projection) または EAP を用いた。展開関数にはルジャンドル関数を用い、要素間境界での数値フラックスには Lax-Friedrichs スキームを用いた。時間積分法には、3次の TVD (Total Variation Diminishing) ルンゲクッタスキームを用いた。この DGM-浅水波モデルを、浅水波標準試験1, 2, 5 と Deformational Flow および Rossby-Haurwitz 波に適用した。その結果、従来のスペクトル要素法-浅水波モデルと比べて、DGM-浅水波モデルは同等かそれ以上の高精度であることを示した。また、矩形要素分割に EDP より EAP を用いた方が、高精度であることを示した。

これまでの講演の研究目的が全球大気循環モデルであるのに対して、招待講演の D. B. Haidvogel (ニュージャージー州立大学) は、複雑な海岸線を有する領域海洋循環モデルでの非構造格子法の有用性を概観した。その中で、要素内の求積点が構成する格子間境界で従属変数のフラックスの連続を要請する DGM

(SVM: Spectral Finite Volume Method) を紹介した。この SVM モデルを、矩形領域内の浅水波方程式と括れた水路内の流れおよび北大西洋の循環に適用した。各計算領域は矩形要素に分割し、展開関数には GLL 求積点で定義されるラグランジュの補間関数を用いた。いずれも結果は良好であった。

以上、スペクトル要素法に関する講演を概観した。

Patera (1984) がスペクトル要素法を考案してから20年経った。スペクトル要素法やそれから派生した DGM や SVM を用いた、全球大気循環モデルと領域海洋循環モデルの開発とそれらの理想系への応用まで進歩した。今後、実用的な系への応用が期待される分野である。 (北内英章)

6. 大気モデル

7月22日の午前中には大気現業モデルに関する発表があった。T. Davies (UKMO) は英国気象局が運用している統一モデル (UM: Unified Model) について、J. Cote (MSC) はカナダ気象局が運用している全球モデル (GEM モデル: Global Environmental Multi-scale model) について紹介した。また、D. Chen (CMA) は中国気象局が開発を進めている新数値予報モデル (GRAPES: Global Regional Assimilation and Prediction System) について、H.-M. H. Juang (NCEP) は米国環境予測センターが開発を進めている新全球モデル (FGM: Flexible Global Model) について、M. Tolstykh (RHRC) はロシア水文気象研究センターが開発を進めている新全球モデルについて紹介した。これら現業数値予報センターに共通するモデル設計思想は、ひとつのプログラム体系でありながら全球モデルにも領域モデルにも用いることができる、あるいは気候研究モデルにも天気予報モデルにも用いることができる汎用性と柔軟性を重視している点にある。力学では浅水近似や静力学近似の除去、数値計算ではセミラグランジアン化やチャーニーフィリップス格子の採用、プログラム記述ではモジュール化・構造化など、次世代数値予報モデルへの方向性が共通している点も興味深い。

F. Mesinger (NCEP) は米国環境予測センターが現業利用している領域モデル (ETA: Eta 座標モデル) について紹介した。最近の検証結果によると ETA は全球モデル (GFS: Global Forecast System) や非静力学メソスケールモデル (NMM: Nonhydrostatic Mesoscale Model) と比較して降水量予測精度が優れ

ている。ただし、GFSはETAよりも解像度が粗く、NMMは導入直後で物理過程等の最適化が十分でないためとの指摘もある。一方、ETAモデルに特徴的なステップマウンテンの採用は、山岳の風下斜面においてしばしば不自然な振動を引き起こし、このため“ETAモデルは高分解能モデルに向かない”との風評があった。彼はこれについて反論し、気圧傾度力項の扱いを精緻化することでこの問題を克服できたことを報告した。S.-J. Lin (GFDL)はゴダード宇宙飛行センターが開発したフラックス型セミラグランジュ法の有限体積法モデルを、地球流体力学研究所の大気大循環モデル (AM2: Atmospheric Model 2) に組み込んで、気候再現実験を行ったことを報告した。従来のAM2と比較して、対流圏高度場や熱帯低気圧発生数、成層圏水蒸気の年周変化などが良好に再現されたことなどを示した。A. Kasahara (NCAR)は非静力学深水方程式系のノーマルモードを用いたスペクトルモデルを提案した。浅水プリミティブ方程式系に比べて扱いが難しいノーマルモード分解の手法について紹介した。R. J. Purser (NCEP)は陰陽格子とほぼ等価である双メルカトル格子による全球モデルを提案した。2つのメルカトル格子の接合部分にメジアン曲線を採用することで、接合部分の冗長性が最小限に止まることを示した。多面体格子を導入する場合と比較して、コンパクト差分やカスケード補間の導入が容易であることも示した。余談だが、彼がこのテーマをこのワークショップに投稿したところ、予稿集をみて日本のグループが既に陰陽格子として実装モデルを稼働している事実を知り啞然としたらしい。片山(気象庁)は地球シミュレータで実行している20 km メッシュ全球モデルの再現性能と計算効率について紹介した。高解像度モデルを用いることで、台風や中緯度帯の総観規模現象がより現実に近く再現できることを示した。また、気象庁が2005~2006年に導入する新しい計算機システムの概要について述べた。それによると2006年3月時点では、HITACHI SR11000の3システム構成で総計210ノード(ピーク性能27.5 TFlops)となり、現有機(HITACHI SR8000, 80ノード, 768 GFlops)の約36倍に相当する。これにより気象庁は20 km メッシュ全球モデル等の実用を目指すとしている。その20 km メッシュ全球モデル開発に関連して、宮本(地球科学技術総合推進機構/気象庁)はリデュースド格子モデルを紹介した。高緯度帯での冗長な格子数を最適化し、計算効率を向上させる手法である。彼はさらに、リ

デュースド格子モデルにおいてノード間バランスの良い並列計算を行うため、2次元分割での並列化手法についても説明した。(松村崇行)

7. 海洋モデル

今回のワークショップでは、7月22日の午後、3件の海洋モデルに関する講演が行われた。

T. D. Ringler (コロラド州立大学)は、正二十面体格子を用いた海洋大循環モデルについての講演を行った。水平方向には六角形格子上でArakawa-B格子に似たトレーサ点と速度点の配置を持つZM格子を、鉛直座標としては等密度面座標を用い、静水圧近似で記述された海洋モデルを構築している。講演では、120 km程度の解像度を持つ正二十面体海洋モデルで、黒潮やアガラス海流などの風成循環がどのように表現されているかを紹介していた。相木(地球環境フロンティア研究センター)は、非静水圧海洋モデルを用いた縁辺海のモデリングについての講演を行った。直交変換を用いてメルカトル座標を変換し、全球を覆いつつ、着目したい海域のそばの陸上に極を置くことにより、その海域を細かいグリッドで覆う手法を用いている。講演では、紅海水のインド洋への流出のシミュレーション結果を示した。この海域では、潮汐の効果が重要になり、また、細かい地形が影響してくる。そこで、アラビア半島に極を置き、格子がもっとも細かい場所で1.5 km程度になるような実験の設定を行っていた。津川(地球環境フロンティア研究センター)は立方体格子を用いた海洋モデルの開発状況について紹介した。立方体格子における差分法について、エネルギー、エンストロフィーの保存を重視した差分化と、精度を重視した差分化を示し、浅水波モデルの標準試験(Williamson *et al.*, 1992)を用いて比較を行い、保存を重視した差分化の方がよい結果を出すことを示した。さらに、浅水波モデルをベースに海洋大循環モデルを開発しており、長期積分の準備段階として、150 km程度の解像度で行った長期積分の結果を示した。

筆者(津川)は2年前、トロントで開催されたワークショップにも参加したが、そのときは、海洋モデルに関する発表は筆者のものだけであった。今回は、招待講演のD. B. Haidvogel氏のものも含めると、海洋モデルに関する講演は4件となり、どのモデルも海洋大循環モデルとして着々とその体裁を整えつつある。もちろん、今回のワークショップに参加しなかった研究機関でも、一様格子を用いた海洋モデルの開発が行

われており、これらの新しいモデルが稼働し始めるのは決して遠い将来の話ではないことが感じられた。

(津川元彦)

8. 適合格子

7月23日の午前のセッションでは適合格子(AMR: Adaptive Mesh Refinement)法に関する発表が4件、その他海洋モデルの順圧方程式に関する発表とヘルムホルツソルバーの高速化に関する発表があった。適合格子法の並列計算における計算負荷の最適分散法は幾つか提案されているが、J. Behrens(ミュンヘン技術大学)は非構造格子の負荷分散法として空間充填関数を利用した格子の順序付けを採用し、高速で最適な負荷分散が行えることを剛体回転の計算例で示した。これは空間充填関数が再帰的に計算領域を覆うことを利用したものである。A. Herrstein(カリフォルニア大学)は適合格子をGFDLで開発された海洋モデル(MOM: Modular Ocean Model)に適用した例を発表した。リーブフロッグ時間積分法、Arakawa格子に適合格子法を適用する方法について詳しく説明があった。このMOMを用いて幾つかの問題設定での誤差評価を実施した。M. Lauter(AWI)は非構造三角形適合格子、有限要素法、セミラグランジアン法を用いた球面浅水波モデルについて発表した。適合格子生成についてはamatos、行列解法にはFoSSI等のパッケージ・ソフトを用いている。C. Jablonowski(NCAR)は適合格子をNCAR/NASAの大気力学コアに導入した例を発表した。ミシガン大学の計算科学の研究者との共同発表で、彼等が開発した並列計算機用のSpherical Adaptive Grid Libraryを利用している。動的格子生成と静的格子生成の両者について検討し、動的格子生成は短期の天気予報に、静的格子生成は長期の気候研究に使用できるのではないかとの結論であった。B. A. Wingate(LANL)は海洋モデルPOP(Parallel Ocean Program)の順圧方程式の陽解法での時間ステップ幅を大きくする方法を発表した。海洋モデルを並列計算機で実行させるときに並列化効率を大きく下げる要因として順圧方程式の解法がある。POPの場合は、この方程式を陰解法で解いているので、特に工夫が必要なようである。発表された方法は順圧方程式を空間平均して得られる浅水波 α モデル方程式を順圧方程式に換えて解く方法で、時間ステップ幅が大きく取れ、また解も順圧方程式の解と大きくは変わらないことが示された。S. Loisel(マックギル

大学)は球面ヘルムホルツ方程式を並列計算機で解く方法として、分割した各領域ごとに反復法で解くシュワルツ反復法では収束が遅いので、改良型のシュワルツ反復解法を提案し、少ない反復回数で収束する方法を発表した。(田中幸夫)

9. ソルバー、テストケース

7月23日の午後のセッションでは5件の口頭発表が行われた。K. Smalarkiewicz(NCAR)は、非静力学大気モデルにあらわれる楕円方程式を効率よく解くためのスペクトル前処理法について発表した。解の収束を早めるためには適切に前処理を施すことが重要であるが、その一般的な方法はない。カナダの非静力学モデル(MC2: Mesoscale Compressible Community model)を用いてスペクトル前処理法の利点を報告した(Thomas *et al.*, 2003)が、今回は大規模並列に対応した非静力学モデル(EULAG: Euler/semi-Lagrangian model)に適用した。並列実行した場合はより簡単な格子点でのリラクゼーションスキームの方が計算効率は高いが、スペクトル前処理法は繰り返し計算が不要なため今後最適化することでその利点があらわれると主張した。北内(地球環境フロンティア研究センター)は、回転する球面上での定常ストークスの流れの解析解について発表した。球面の境界上で流入・流出する流れを与え、流線関数を求めた。流入した流れは球面に入った直後に西向きに転じ、境界に沿って時計回りと反時計回りの流れに分かれた。その特徴は、Imawaki and Takano(1974)の近似解や室内実験と多くの点で一致することを示した。坂上(北海道大学)は、球面上の渦層の運動についての発表を行った。2次元の渦層についてはこれまで様々な解析や数値実験による研究が行われているが、球面上で極渦による大域的な流れがある中の渦層の動きについて考察した。地球の衛星画像を見ると、大規模循環がある中で渦が発達している領域に明瞭な境界があることがあるが、これに渦層は相当する。考察の結果、大規模な流れがある中では、擾乱の低スペクトルは極渦により安定化されるため渦層の不安定化は遅れる傾向があり、巻き上げにも時間を要する一方、高スペクトルはケルビン-ヘルムホルツ不安定により急激に不安定が発達するため最終的に渦層は複雑な渦巻構造に発展することを示した。J. M. Prusa(アイオワ州立大学)は理想的なHeld-Suarez実験(Held and Suarez, 1994)の設定でアンデス山脈を表現することにより地形の気候に与

える影響について発表した。アンデス山脈は南北に長く東西に細い形状をしている。南半球の帯上流に対して壁の役割をしている。東西に細いことから、解像度を高くしないと解像できない。この問題に対処するためアダプティブメッシュを採用し、一様格子の場合と、山脈付近を高解像度化した場合との比較を行った。その結果、地形の解像が不十分であると全球気候、とりわけ赤道域に大きな影響があると報告した。J. B. Drake (ORNL) は浅水波モデルを用いたマルチスケール相互作用についての発表を行った。Williamson *et al.* (1992) の標準試験5と同様の初期場を与えるが、最初の1日で地形をゆっくり上昇させ、10日目から1日かけて下降、そのまま60日間積分することにより、擾乱が相互作用しながら減衰していく様子を調査した。解像度を上げていくと、エネルギー・エンストロフィーのカスケードを見ると、 k^{-3} でのカスケードが明瞭に見られた。こうした特徴はモデルの数値解法と関連しているので、標準試験になりうると提案した。

(室井ちあし)

10. 結語

今回、筆者(富田)は、スタッフの一人として本会議に参加した。以下、簡単ではあるが感想を述べさせて頂く。

冒頭でも述べたように、この会議はこれまで北米を中心に開催されており、今回アジアでははじめての開催である。過去の会議の参加者は、ヨーロッパと北米の研究者がほとんどで、いわゆる常連メンバーも多い。いつもより遠くでの開催地であったので、準備当初は、旅費や日程の関係で来れない方も多いのではないかと心配した。蓋をあけてみると、常連メンバーはもとより、関連する多くの研究者からの参加があり大盛況であったと思う。中国、インド、ロシアからも発表があり、おそらく、過去の会議と比べても参加者は最も多かったと思われる。これは、主催者側としてうれしい悲鳴であった。一方で、1人当たりに割り当てられる発表時間を多少短くせざるを得なくなが、十分な議論の時間を取るため、オーガナイザーらの助言により休憩時間を多めにとるなど工夫した。長めの休憩時間の設定は十分に機能し、各発表後も非常に詳細に渡っての議論が展開され、参加者にとって大変有意義であったと思われる。

次回の会議は、U. S. Naval Research Laboratory の F. Giraldo のもとで2006年4月に開催される予定

である。最後に、会場運営に協力いただいた地球環境フロンティア研究センターのスタッフ・研究者の皆さん、参加者の方々、関係する全ての方々に感謝します。(富田浩文)

略語一覧

- AWI : Alfred Wegener Institute (ドイツアルフレッドウェゲナー研究所)
- CDACB : Center for Development of Advanced Computing Bangalor (インドバンガロール先端計算開発センター)
- CMA : China Meteorological Administration (中国気象局)
- DMI : Danish Meteorological Institute (デンマーク気象研究所)
- ECMWF : European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ヨーロッパ中期予報センター)
- ETHZ : Swiss Federal Institute of Technology (スイス連邦工学研究所)
- GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (地球流体力学研究所)
- LANL : Los Alamos National Laboratory (米国ロスアラモス国立研究所)
- LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory (米国ローレンスリバモア研究所)
- MPI : Max Planck Institute (マックスプランク研究所)
- MSC : Meteorological Service of Canada (カナダ気象局)
- NASA : The National Aeronautics and Space Administration (米国航空宇宙局)
- NCAR : National Center for Atmospheric Research (米国大気研究センター)
- NCEP : National Centers for Environmental Prediction (米国環境予測センター)
- NRL : Naval Research Laboratory (米国海軍研究所)
- ORNL : Oak Ridge National Laboratory (米国オークリッジ研究所)
- PCMDI : Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (気候モデル相互比較プログラム)
- RHRC : Russian Hydrometeorological Research Center (ロシア水文研究センター)
- SNL : Sandia National Laboratories (米国サンディナ国立研究所)
- UKMO : UK Met Office (英国気象局)

参考文献

- Galewsky, J., R. K. Scott and L. M. Polvani, 2004 : An initial-value problem for testing numerical models

- of the global shallow-water equations, *Tellus A*, **56**, 429-440.
- Held, I. M. and M. J. Suarez, 1994 : A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 1825-1830.
- Imawaki, S. and K. Takano, 1974 : Planetary flow in a circular basin, *Deep-Sea Research*, **21**, 69-77.
- Jablonski, C. and D. L. Williamson, 2002 : Baroclinic instability test with two jets in the mid-latitudes, *The 2002 Workshop on the Solution of Partial Differential Equations on the Sphere*, Toronto, Canada, 10.
- Lin, S.-J. and R. B. Rood, 1996 : Multidimensional upwind methods for hyperbolic conservation laws, *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2046-2070.
- Maday, Y., A. T. Patera and E. M. Ronquist, 1990 : An operator-integration-factor splitting method for time-dependent problems : applications to incompressible fluid flow, *J. Sci. Comput.*, **5**, 263-292.
- Patera, A. T., 1984 : A spectral element method for fluid dynamics : laminar flow in a channel expansion, *J. Comput. Phys.*, **54**, 468-488.
- Ringler, T. D. and D. A. Randall, 2002 : A potential enstrophy and energy conserving numerical scheme for solution of the shallow-water equations on a geodesic grid, *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1397-1410.
- Swartztrauber, P. N., 1993 : The vector harmonic transform method for solving partial differential equations in spherical geometry, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3415-3437.
- Swartztrauber, P. N., 2002 : On computing the points and weights for Gauss-Legendre quadrature, *SIAM J. Sci. Comp.*, **24**, 945-954.
- Thomas, S. J., J. Hacker, P. Smolarkiewicz and R. Stull, 2003 : Spectral preconditioners for non-hydrostatic atmospheric models, *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2464-2478.
- Williamson, D. L., J. B. Drake, J. J. Hack, R. Jacob and P. N. Swartztrauber, 1992 : A standard test set for numerical approximations to the shallow water equations in spherical geometry, *J. Comput. Phys.*, **102**, 211-224.

新刊図書案内

表題	編著者	出版者	出版年月	定価	ISBN	備考
UNIX/Windowsを使った実践気候データ解析	松山 洋 谷本陽一	古今書院	2005.01	¥3,500	4-7722-4057-8	
お天気なんでも小事典	三浦郁夫 川崎宣昭	技術評論社	2005.01	¥1,380	4-7741-2226-2	
気候のフィールド調査法	西沢利栄	古今書院	2005.01	¥3,200	4-7722-1498-4	
大気・水圏の地球化学	河村公隆 野崎義行	培風館	2005.01	¥3,900	4-563-04906-9	

注：表中で定価はすべて本体価格です（特記したものを除く）。

訂正

「天気」52巻第1号に以下の誤りがありました。お詫びして訂正いたします

	誤	正
表紙 目次 論文	「川原恭一」	「河原恭一」
同 新入会員	「56」	「39」
47ページ 右下2行目	「2005年」	「2004年」