

最先端並列計算機における次世代気候モデル開発に関わる

第3回国際ワークショップ報告*

山岸米二郎**・志村和紀**・宮内敦**
石田信浩***・荒川隆**・沈学順**

1 はじめに

標記ワークショップが2001年3月28日～30日の3日間、財団法人高度情報科学技術研究機構の主催により東京大学先端科学技術研究センターの講堂で開催された。このワークショップは科学技術振興調整費総合研究「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究」(研究代表者、住 明正(東京大学))の大気・海洋分科会の活動の一環として開催されたもので、米国(ハワイ, 1999年)、欧州(トゥールーズ, 2000年)について今回のアジア(東京)での開催が3回目となる(第1回については山岸他(1999)の報告がある)。今回は住 明正(東京大学)、M. Blackmon(NCAR)、J. C. Andre(CERFACS)、杉 正人(気象庁気象研究所)をコンビーナとして実施された。

ワークショップは4つのセッションで33の発表があったが、その内訳は次の通り。()内は国外からの発表である。

セッション1: 将来の大気大循環モデル 13 (3)

セッション2: 高性能計算機 5 (1)

セッション3: 領域モデル, 雲モデル, 海洋モデル
9 (3)

セッション4: カップラーとシステム 6 (4)

国外からの発表は11件で内訳は次の通り。2(中国),

1(仏), 1(独), 1(韓国), 1(スイス), 1(英), 4(米)。

このワークショップは大気科学・海洋学の専門家、計算技術者、計算機メーカーなど異質の分野の専門家が一堂に会して議論し、意見・情報の交換を行って将来の方向を探るといふ、ユニークな性格を持っている。最初に今回のワークショップ全体の特徴を述べ、個別事項はその後で紹介する。

2 全体のまとめ

今回のワークショップの特徴は以下のようにまとめられる。

(1) 国外からの発表が11件と全体の1/3に上り、分野も気象、計算技術、データ処理と多分野にわたった。予告期間の短さ(3か月)を考えると多い参加者といえる。このワークショップのユニークな性格が評価されていることの証拠とみなしてよいであろう。

(2) 日本ではこれまでベクトル計算機が主体で、分散メモリ型大規模並列計算機の経験が少なく、この話題では過去2回は専ら聞き役であった。しかし日本でも東京大学、気象庁等で分散メモリ型大規模並列計算機の運用が始まり、経験に基づく発表があり議論の活発化に貢献した。

(3) 全球モデルの計算効率化について日本からルジャンドル変換の高速化など4件の発表があった。日本でもようやく高分解能全球モデルの運用が現実になりつつあることの反映であろう。

(4) 計算機の高度化により研究面でも実務面でも非静力学モデルの利用が多くなりつつある。今回はスイス気象局と日本気象庁から非静力学モデルの運用についての発表があり、また日本からは全球非静力学モデルについての発表もあった。

(5) 高性能計算機の出現により、高分解能モデルを用いたシミュレーションは可能となる。しかし大量

* The 3rd International Workshop on Next Generation Climate Models for High Performance Computing Facilities.

** YAMAGISHI Yonejiro, SHIMURA Kazunori, MIYAUCHI Atsusi, ARAKAWA Takashi, SHEN Xueshun.

財団法人高度情報科学技術研究機構(RIST).

*** ISHIDA Nobuhiro 財団法人高度情報科学技術研究機構(RIST)(当時、現財団法人日本気象協会).

© 2001 日本気象学会

データを効率的に処理し、有効情報を効果的に抽出する問題は依然としてネックである。日本の気象界ではこれまで具体的提案はあまりなかった。今回ドイツと日本からこのワークショップでは初めて効率的データベースの試作、可視化に関する発表があった。

(6) カップラー等、モデル運用の面から気象/気候のシミュレーションを支援する発表は日本からはこれまで皆無であった。今度初めてカップラーや多重ネスト構造を含む並列支援ソフトの発表があった。

以下、情報技術、モデリング支援システム等技術的側面を重点にセッション毎に簡単に紹介する。なお複数発表者の場合も講演者氏名のみ記す。

なお、各講演の要旨と発表スライドは以下の URL から得ることができる。

<http://www.tokyo.rist.or.jp/workshop/tokyo/agenda.htm>

3 各セッションの紹介

3.1 セッション1—将来の大気大循環モデル。

J. C. Andre (CERFACS) は PRISM 計画 (統合地球システムモデルのためのヨーロッパ協力) を紹介した。この計画の目標は高度な気候モデルを開発し、改良し、統合してゆくためのソフトウェア環境とハードウェア環境を進展させることである。計画にはヨーロッパの10か国から気象局、大学、研究所、予報センター (ECMWF)、民間会社 (CERFACS) など17の機関と4つの計算機メーカーの在欧現地法人が参加している。

PRISM のパイロットプロジェクトの目的は2つある。1つはヨーロッパの多くの機関で気候/地球システムシミュレーションを実行するための長期計画を策定し、調整し、実行してゆく管理組織を創設することである。2番目の目的はポータブルで、高性能で、利用しやすい共用の気候/地球システムモデルを開発すること、また標準的コーディングルールで記述され、ヨーロッパの誰でもアクセス可能な解析/可視化ソフトを開発することである。これを実現するため次の5つの作業項目が設定されている。(i)地球システムモデルの各構成要素モデルがお互いの間で交換すべき情報を定義すること。(ii)定義された情報を交換するカップラーと各構成要素モデルに必要なインタフェースライブラリーを開発すること。(iii)現存する構成要素モデルを物理的、技術的に PRISM システムと連結すること。(iv)共通な解析 (診断)・可視化ツールを開発す

ること。(v)以下のことをインターネット環境で可能にするインターフェースを開発すること：異なる構成要素モデルから気候/地球システムモデル (複数あり得る) を組み立てること、組み立てたモデルを異なる計算機システムで実行すること、モデルの作動状況を監視すること、モデルの実行結果のデータベースへの記録を制御すること、モデルの出力と診断・可視化ツールを連結すること。

つまりモデルの開発は分散的に行われ、シミュレーションも分散した機関で実施される。講演では地球システムモデルの構成要素として参加機関が所有する、大気モデル、大気化学モデル、領域気候モデル、陸面モデル、海洋生物-地球化学モデル、海洋モデル、海水モデルの7つが挙げられている。

以上の説明でわかるように PRISM 計画は気象/気候の物理的側面のみならず情報技術に関する側面を多く含んでいる。CERFACS はカップラー開発のしにせて、ヨーロッパの多くの気象機関、研究所が CERFACS のカップラーを使用しているという実績がある。こういう背景もこの構想のベースにあるのだろう。

齊藤 (気象研究所) は円筒正距座標を用いた方程式系の全球非静力学モデル (等緯経度、 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ の解像度) で、実データを初期値とした36時間予報の結果を示した。方程式系が球面上の直交曲線座標系で記述されているのでマップファクターの選択で球面座標系や各種等角投影法が選択できる便利さがある。

富田 (地球フロンティア) は球面をほぼ均等な大きさの多角形でカバーする格子モデルの開発を報告した。正20面体を標準的な方法で分割して得られる測地線上の座標位置を、ノイズを抑え計算精度が向上するように修正する工夫がなされている。まだ浅水方程式系のみ扱いであるが物理過程を含む三次元モデルの結果が期待される。

全球モデルの計算効率化に関連しては結合コンパクト差分 (二瓶 (名古屋大学)), 二重フーリエ展開を用いる方法 (赤堀 (名古屋大学), 吉村 (気象研究所)), 高速ルジャンドル変換アルゴリズム (須田 (名古屋大学)) の4つの講演があった。吉村はセミラグランジュ-セミインプリシット法モデルで二重フーリエを使用している。通常ルジャンドル変換は $O(N^3)$ の計算時間を要するが須田の近似解法では $O(N^2 \log N)$ とのことである。これらの方法が気候モデルの長時間積分でも非常に有効なのか興味あるところである。

浅野 (北陸先端科学技術大学院大学) は地球シミュ

レータ利用を目指して作成された並列気候モデルプログラム, NJRの並列特性を述べ, 吉田(電力中央研究所)は地球シミュレータを想定して各種気候モデルの並列計算高度化を論じた。地球シミュレータの完成(2002年春)を目前に多くの情報が待たれる。

杉(気象研究所)は気候研究の立場から, 隈(気象庁)は気象予測の立場から, 最終的には20 km 格子間隔を目指す高分解能モデルを論じ, 物理過程改善の重要性を指摘した。Y. Luo(中国気象局気候センター)は季節予報に使用する大気・海洋結合モデルシステムを紹介した。大気モデルはT63, 海洋モデルもT63相当の分解能である。

D. Williamson(NCAR)は以下のような問題設定に基づく検討結果を論じた。過去10年の気候研究ではモデルの分解能をT42に抑え, 計算機性能向上の資源をアンサンブルシミュレーションやより長期間の積分に振り向けてきた。大規模場のシミュレーションはT42の分解能で十分なのか? NCARの気候モデル(CCM2, 3)の分解能をT42からT170まで変え, 物理過程の効果と力学効果を分離するように工夫して多数の実験を行い, シミュレーション結果の収束という観点から検討した。ハドレー循環, 北半球中緯度海洋上の低気圧経路, 地域気候の対象となる広さへの水蒸気フラックスの大きさなどに着目して検討し, 着目する観点により異なるがCCMではおおむねT95が必要という結論を述べた。但し地形の影響で特定の場所に生ずる降水のシミュレーションはこの程度の分解能では無理なので対象外である。

3.2 セッション2 高性能計算機

吉田(地球シミュレータ研究開発センター)は地球シミュレータの最新の状況を説明し, 平成13年秋から一部の試験運用が始まることを明らかにした。

金田(東京大学)は東大基盤情報センターにおける大型計算センター運用の経験からHPCにおける実行稼働率の向上, 連続運転の維持, ライブラリー整備等ユーザーサポート充実のための労力の多さと重要性を指摘した。

G. Wenes(IBM)はマイクロプロセッサ, Powerシリーズの最新製品であるPower4と蛋白質の構造解析に特化した計算機Blue Geneを紹介した。

相原(日立製作所)はCOMPASと呼ばれるノード内並列化や疑似ベクトル機構などSR8000シリーズの独自の工夫について説明した。

高原(日本電気)はSXシリーズを想定した可視化ソ

フトを紹介した。可視化手法は高分解能モデルの解析に必須のツールである。高度なりアルタイム可視化が実現すれば大きな意義を持つであろう。

3.3 セッション3 領域モデル, 雲モデル, 海洋モデル

このセッションの講演は静力学近似モデル3, 非静力学モデル3, 海洋モデル3の構成であった。

坪木(名古屋大学)は170 km×120 kmの領域を水平解像度400 mで覆い, ドップラーレーダとゾンデ観測から得られた初期値を用いて, GAME/HUBEXで観測されたスコールラインのシミュレーション結果を示した。

志村(RIST)は高橋(桜美林大学)が開発したビン(BIN)法雲物理の3次元モデルのシミュレーションで, 凝結核, 氷晶核の分布, 上層と下層の降水粒子間の相互作用が降水増強に及ぼす効果を論じた。日本で実行されている唯一のビン法3次元モデルである。更に多様な状況でのシミュレーションを期待したい。

J. Quiby(スイス気象局)はルーチン化を目指してテスト中の非静力学モデルの実用上の問題点を論じた。モデルは水平解像度7 km, 格子数385×325で西ヨーロッパの大部分を覆う。鉛直は45層で解析と後処理を含め48時間予報が90分のことである(SX-5使用)。実用化の観点で問題点を2つ指摘した。1つは山岳地帯の降水分布で山の頂上で降水が増え, 谷が乾燥する傾向がでることである。地形を平滑化するか, モデルの分解能を今より遙かに細かくすることで解決される。しかし前者の方法は高解像度モデルの意義を無にしかねないし, モデルの解像度を更にあげるとは計算機能力から無理というジレンマがある。もう1つは急斜面で計算誤差が拡大することで, 最終的には地形に沿う座標系からz系かp系に変える必要があるとの見解を述べた。この2つの問題点は他でも指摘されていることであるが, 山国スイスでは深刻であろう。スイスで非静力学モデルをルーチン化という動きは著者等には1つの驚きであったが, これには国際協力の背景がある。小規模モデリングのための国際借款(COSMO)の枠組みでドイツ気象局の支援のもとにイタリア, ギリシア, ポーランド, スイスの気象局が協力して非静力学メソスケールモデル(Local Model: LM)を開発している。これのスイスへの適用版である。なお, これについては斉藤他(2000)に詳しい説明がある。

室井(気象庁)は気象庁の領域スペクトルモデルの

分散共有メモリ型並列計算機 (SR8000) での並列特性を示した。ノード内は自動並列、ノード間は MPI でデータ交換をし、36ノードでピーク性能の22%という実行効率を報告した。

M. Lee (ソウル大学) はソウル大学で開発された全球モデル (この実験では T31, L20) で雲と放射の相互作用に着目して熱帯域の季節内振動の特性を調べた結果を示した。

Y. Lie (中国気象局気候センター) は NCAR の第2世代領域気候モデル (RegCM2) を中国で実用化するための、放射、境界層、陸面等のパラメタリゼーションの改良と、全球モデルへのネステングについて説明した。1998年の揚子江流域の記録的な豪雨時の実験結果が示された。

S. Varlamov (立正大学) は日本海における原油流出事故時の流出原油モデリングシステムについて述べた。システムは気象データ処理システム、海流予想システム、流出原油予想システム、結果処理表示システムから構成される。気象データには気象庁の領域予報モデルの結果を用いる。流出原油予想システムは粒子追跡法であるが、漂流中の油滴の物理特性 (密度、大きさ、粘性等) の変化も予想される。第2回ワークショップではナホトカ号事故時のシミュレーション結果を議論し、今回は1997年4月3日に対馬海峡で発生した事故時のシミュレーション結果を示した。

栗原 (気象庁) は上部境界を剛体壁とした場合の海洋モデルで生ずる楕円型方程式の解法として直接法、繰り返し法、多重格子法を比較し、並列計算機では多重格子法で PSOR (並列逐次過緩和法) を使用するのが経済的であると述べた。

石崎 (気象研究所) はモデルの北極をグリーンランドに移し、極付近で線形計算安定条件によりタイムステップが小さくなるのを避けた全球海洋モデルを示した。並列計算機ではバロトロピック部分の計算で、袖領域を広くして MPI によるデータ交換の回数を減らすのが効率的であると述べた。

3.4 セッション4: カップラーとシステム

セッションの表題がカップラーでもあり、説明の都合上講演順を無視してはじめにカップラー関係を述べる。

セッション4では4つの発表がカップラーあるいはそれを含むモデリングシステムに関するものであった。またセッション1で発表された J. C. Andre の講演も PRISM 計画に関連してカップラーの構成を論じ

ていた。個別紹介の前にカップラーの一般論を少し述べる。

気候モデルが複雑化した現在、同一の場所で少人数でモデル全体を構築することは不可能に近い。必ずしも同一でない場所で異なる専門分野の大勢の協力作業によって、気候モデルの構成要素である大気、海洋、海水、陸面過程等のサブモデルを高度化してゆく体制が重要である。この場合ある約束事のもとに構築されたサブモデルを1つのシステムとして効率的に結合するカップラーは気候モデルの必須の構成要素といえる。

大気と海洋の境界面でのエネルギー、運動量、物質の交換を処理することからスタートしたカップラーであるが、モデルシステムが複雑化し、大規模並列計算が前提となる現在ではカップラーに要求される特性は次のように多様である。サブモデルの取り替え、サブモデルの構成数の変更、サブモデル間のデータ交換の回数や量の変更が容易であること、結合にあたってサブモデルの修正ができるだけ少ないこと、また各サブモデルに割り当てる資源の変更が容易であることなど。これらはカップラーの柔軟性といえる。

領域分割で並列化したモデルを結合する場合、1つのモデルの (必要な) すべての領域のデータを (1つのカップラーに) 集めて処理し、それを他のモデルの各領域に分配する方式は簡明である。しかしこの方式は MPI での通信時間が多くなるし、高解像度モデルではすべてのデータを1か所に集めるにはコアメモリが足りないということが起こりうる。従って大規模並列計算ではカップラー自体も並列化し、局所的なデータ交換とするのが望ましい。結合されるサブモデル毎に領域の分割方式が異なるのが普通だし、また片方が直交座標系で他方が有限要素法という場合も起こりうる。カップラー自体が並列化され、局所的データ交換が可能で、多様な座標系への対応が可能というのが、これからのカップラーといえる。

J. Larson (ANL) および R. L. Jacob (ANL) は ANL で製作した MCN (モデル結合セット) について説明した。これは NCAR のコミュニティ気候モデル、CCSM での利用を目的としている。MCN は異なる領域分割のサブモデル間のデータ交換を局所的に行う時に、モデルとカップラー間で行うデータ転送パターンを自動的に決定する機能を持っていて、並列カップラーの製作を容易にするライブラリーである。線形計算安定条件緩和のために極付近で格子数を減らすいわゆるリデ

ユースド・グリッドのスペクトルモデル、有限要素法のモデルを含め任意の多次元配列への対応が可能である点が強調されていた。

V. Balaji (GFDL) は GFDL の FMS (柔軟性モデル作成システム) を紹介した。FMS は気候モデルの開発で多くの分野、場所での協力が容易になる環境を提供するのが目的である。気候モデルのサブモデルとしては大気、海洋、海水、陸面の4つとカップラーが想定されている。並列の領域分割はそれぞれ自由である。カップラーとサブモデルの間のデータ交換は局所的に実行できる。SPMD方式を採用しているためサブモデル間で入出力装置番号の衝突が発生する可能性があるが、各サブモデルに共通なルーチンを使用することで衝突を避けている。高度な機能を備えたシステムであるが GFDL 内部あるいは緊密に協力するグループ内での使用を前提にしている設計に思われる。外部からサブモデルを持ち込む場合にはサブモデル側の修正量がかなり多くなるのではないかと推測される。

荒川 (RIST) は RIST で開発したカップラー：風神を説明した。風神は並列化されていないモデルの並列化機能、モデルの並列化と多重ネスティング計算機能、カップラー機能など多機能なモデリング支援システムである。多機能ではあるが、今のところ局所的データ交換に対応していない、直交座標系にのみ対応可能ななどの制限がある。

露木 (気象庁) は気象庁と RIST が協力して開発している変分法を用いた4次元データ同化システムを紹介した。このシステムは分散共有メモリ型の大規模並列計算機の使用を想定して作成されている。

P. Baumann (Active Knowledge 社) は ESTEDI 計画を紹介した。HPC の進歩で高解像度モデルの実行が可能になるが、HPC の有効活用のためにはデータ処理、特に計算機とユーザーの間のデータ伝送のボトルネックを解決しなければならない。ESTEDI はヨーロッパのソフトウェアベンダーと HPC センターが協力して、HPC で生産される多次元データの保存と検索に対するヨーロッパ標準を作ろうという試みである。エンドユーザーが必要とするのは必ずしもすべての計算データではなく、時間・空間で切り取られたデータか統計的評価結果など全体からみればほんの少しのデータおよびそれらの組み合わせであるという前提で時空間データベースを作成し、ネットワークへの負荷とユーザーの負担を大幅に減らす試みである。このアイデアに基づく多次元データベースシステムの試作品

(RasDaMan) が完成し気候、宇宙、衛星画像処理、遺伝子、数値流体等の多くの分野の機関で評価が実施されている。

4 終わりに

最後にワークショップを通じての感想から2点を指摘したい。1つは包括的シミュレーションシステムの枠組みであり、もう1つはシミュレーション支援環境の整備である。

日本でもモデルを多くの研究者に公開する事例がようやくでてきた。しかしまだ事例も少ないし研究もやや個別的である。J. C. Andre が紹介した、異なる機関が異なるサブモデルを開発しつつ、地球シミュレーションシステムを総合的に進めてゆく試みである PRISM 構想はこれからの地球変動予測システムの開発に示唆を与えるものである。

高性能計算機とシミュレーションモデルだけでは研究の進展がおぼつかない段階に達しつつある。高分解能モデルの運用が可能になった現在、大量データ処理システムの良否が研究進展の大きな要素になる。データベース、データ伝送、可視化等を高性能計算機と一体的に整備してゆく必要がある。別の用語でいえばハードウェアとソフトウェアを含めた計算技術側と地球科学側との緊密な協力の必要性である。

謝辞

ワークショップ開催からこの報告作成まで、東京大学気候システム研究センター長住 明正教授には大変お世話になりました。感謝致します。またまとめにあたり気象庁の斉藤和雄、隈 健一、室井ちあしの各氏からご教示をいただきました。お礼申し上げます。編集担当者からの丁寧なコメントにより文章を推敲できましたことにもお礼申し上げます。

参考文献

- 斉藤和雄・加藤輝之・永戸久喜・清野直子・村田昭彦、2000：第3回非静力学モデリング短期数値予報国際ワークショップ参加報告、天気、47、203-209
- 山岸米二郎、室井ちあし、保坂征宏、1999：最先端並列計算機における次世代気候モデル開発に係わるワークショップ報告、天気、46、763-768

略語表

ANL：Argonne National Laboratory (アルゴンヌ国

立研究所)

CERFACS : Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique (欧州科学計算研究訓練センター)

CCM2, 3 : Community Climate Model (version 2, 3) (NCAR の共用気候モデル (バージョン2, 3))

CCSM : Community Climate System Model (NCAR の共用気候システムモデル)

COSMO : Consortium for Small-scale Modeling

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ヨーロッパ中期予報センター)

ESTEDI : European Spatio-temporal Data Infrastructure for High-Performance Computing

FMS : Flexible Modeling System

GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (地球流体力学研究所)

HPC : High Performance Computing (高度計算技

術)

MCT : Model Coupling Toolkit

MPI : Message Passing Interface

NCAR : The National Center for Atmospheric Research (国立大気研究センター)

NJR : (地球シミュレータでの運用を目指し, NASDA, JAMSTEC, RIST が共同で作成した並列プログラム, 大気モデル, 海洋モデルがある)

PRISM : A European partnership for Integrated Earth System Modeling (統合地球システムモデルのためのヨーロッパ協力)

PSOR : Parallel Successive Over-relaxation (並列逐次過緩和)

RasDaMan : Raster Data management System

SPMD : Single Program Multiple Data (訳語省略).

分散メモリ型並列計算機で各ノードに同一のプログラムが転記され実行される方式.



第6回宇宙環境利用に関する地上研究公募のご案内

宇宙環境は、微小重力、高真空等の地上では得ることができない特徴を有しており、広範な分野にわたる研究や実験、観測等を行うことが期待されます。国際宇宙ステーション計画における我が国独自の実験棟「きぼう」等を利用した研究を目指す地上研究テーマを広く公募します。

公募対象研究分野

微小重力科学、微小重力物理学、生物科学、バイオメディカル、宇宙医学、宇宙科学、地球科学、宇宙利用技術開発の8分野

スケジュール

募集開始：平成13年12月末(予定)

締切：平成14年2月28日(木)消印有効

研究開始：平成14年8月～

問い合わせ先

財団法人日本宇宙フォーラム 公募研究推進部

電話：03-3459-1653, Fax：03-5470-8426

URL <http://www4.jsforum.or.jp/>

e-mail：koubo@jsforum.or.jp

※詳細は、平成13年12月以降、各研究機関に発送する募集要領、当財団のホームページでご案内いたします。

※資料の請求は氏名、所属、役職、住所、電子メールアドレス、希望部数を明記の上、電子メールまたはFax でお願いたします。