

# 地球シミュレータの応用成果

## Simulation Results on the Earth Simulator

陰山 聡\*  
Akira Kageyama

高橋 桂子\*  
Keiko Takahashi

大淵 濟\*  
Wataru Ohfuchi

渡邊 國彦\*  
Kunihiko Watanabe

草野 完也\*  
Kanya Kusano

佐藤 哲也\*  
Tetsuya Sato

### 要 旨

地球シミュレータの能力を最大限に生かすために、地球シミュレータセンターでは様々な研究・開発を行っています。その中から実際に我々が地球シミュレータを利用して行っているシミュレーション研究、特に、大気・海洋シミュレーション、固体地球シミュレーション、連結階層シミュレーション、全球-領域・大気・海洋・陸面・海水結合シミュレーションと、それらの成果について紹介します。

Computer simulations performed by research groups in the Earth Simulator Center are presented. Our research field spans broad spectrum of science and technology relating to the Earth Simulator. Among them, results on geoscientific simulations are focused in this paper, including global circulations of the atmosphere and ocean; a geodynamo simulation; a holistic simulation of aurora formation; and a multiscale, coupled simulation of the atmosphere, ocean, land surface, and sea-ice.

### 1. まえがき

地球シミュレータセンターの使命は、様々な研究開発を通じて地球シミュレータの能力を最大限に生かし、社会に貢献することです。そして、実際に地球シミュレータを活用し、最先端のシミュレーション研究によって成果を挙げることが我々の重要な任務の1つです。地球シミュレータセンターには6つの研究グループがあり、約30名の研究者が地球シミュレータを活用した様々なシミュレーション研究に取り組んでいます。

地球シミュレータを利用するための「共同プロジェクト」は、年に一度公募され、課題選定委員会の厳正な審議を経て選定された研究課題のみが採択されます。平成16年度には37件、平成17年度には44件の共同プロジェクト課題が

採択されました。その中には、地球シミュレータセンターの研究グループが中心となって推進している課題も含まれています。その中から本稿では地球環境の過去・現在・未来を知るために行っている我々のシミュレーション研究の成果をいくつか紹介します。

第2章では、大気と海洋のシミュレーション研究を紹介します。地球シミュレータ開発プロジェクトの当初から、ハードウェアと同時に大気大循環シミュレーションコード (AFES) と海洋大循環シミュレーションコード (OFES) の開発が進められました。この2つのコードは、その当時すでに実績のあった大気、および海洋の大循環シミュレーションコードをベースとして、地球シミュレータ向けにチューニング、機能拡張したものです。AFESは、地球シミュレータの稼働直後に、理論ピーク性能比で64.9%という驚異的な性能を出し、HPC (High Performance Computing) に関わる世界中の人々に衝撃を与えました。地球シミュレータセンターでは、AFESコードに加えて、海洋大循環シミュレーションコード (OFES)、さらには大気 (AFES) と海洋 (OFES) に、陸面、海水モデルを組み合わせた結合シミュレーションコード (CFES) を開発し、大きな成果を挙げています。

第3章では、地球の内部を解明するためのシミュレーションを紹介します。地球内部を扱う研究分野は固体地球科学と呼ばれることがあります。我々が現在この分野の中で特に興味をもって研究しているのは、地球磁場の起源 (地球ダイナモ) のシミュレーションと、マントル対流のシミュレーションです。これらの現象の時間スケールは、数万年から数十億年というオーダーです。我々の日常生活や、大気・海洋現象の時間スケールと比較すると、これは長すぎる時間スケールにも思えますが、地球の歴史が約46億年であることを考えると、このようなスケールの時間発展こそが地球の歴史にとって重要だといえます。

自然界には階層構造が現れます。平衡状態の存在を仮定

\* 海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター  
The Earth Simulator Center, JAMSTEC, Japan

する熱力学というマクロな理論体系は、ミクロな理論体系とは独立に構築されました。熱力学はミクロな階層の理論体系の確立、それどころかミクロな階層の基本的な実体、つまり原子の存在さえ仮定していません。自然界が階層に分離していることをうまく利用して、これまでの科学、そしてシミュレーションは発展してきました。しかしながら、現実の世界は平衡状態にはありません。つまり、階層を完全に分離することはできないのです。地球シミュレータのユーザである我々は、シミュレーションの新たな方法論の必要性を痛感しています。我々は、次の時代のシミュレーションの基盤となるであろう概念を「連結階層シミュレーション」と呼んでいます。第4章では、この連結階層シミュレーションと、その典型例として最近我々が行ったオーロラのシミュレーションについて紹介します。

上述したように、第2章の大気と海洋のシミュレーションコード（AFESとOFES）は、以前からあったコードをベースとしています。それに対して第5章で述べるコードは、より先進的な大気・海洋・陸面・海水結合シミュレーションコードを、地球シミュレータセンターにおいてゼロから独自に開発しているものです。このコードが扱う時間・空間スケールは広く、都市域スケールの気象や気候を扱う領域シミュレーション（時間スケールは数日から数ヶ月）から、全地球規模の大気・海洋変動を扱う全球シミュレーション（時間スケールは約1, 2年）まで及びます。全球シミュレーションと領域シミュレーションを切り替えることはもちろん、両者を連続的に結合することも可能です。この野心的な「全球-領域・非静力学・大気・海洋・陸面結合シミュレーションコード」は、開発が始まってからまだ2年ほどしか経っていないにもかかわらず、台風の進路予測に成功するなど、本格的な予測シミュレーションの実現に向けて大変有望な成果が得られています。

## 2. 大気・海洋シミュレーション

地球シミュレータの技術工学的な目標は、全システムのピーク性能（40TFLOPS）比の12.5%、すなわち、5TFLOPSを実アプリケーションで達成することでした。そのために、コード・ネームTF5（ティーエフファイブ）と呼ばれる大気大循環モデルのソフトウェアの開発が、ハードウェアである地球シミュレータの開発とともに行われました。プログラマーのチームと気象学者のチームが1つのグループとして協力し合うようになった頃には、その大気大循環モデルはAFES（エーフェス）と命名され、目標値を大きく上回る26.58TFLOPS、ピーク性能比64.9%を達成しました<sup>1)</sup>。その数値がいかに驚異的なものであるかは、HPCにかかわっている方々には理解していただけたと思います。それにより、米国ボルチモア市で開催されたスーパーコンピューティング2002でゴードン・ベル賞を受賞しました。

現在、我々のグループではAFES<sup>2)</sup>に加え、海洋大循環モデルのOFES<sup>3)</sup>、さらには、AFESとOFESなどを結合し

た大気・海洋・陸面・海水結合モデルであるCFESを地球シミュレータ上で駆使し、大規模シミュレーションによる大気・海洋変動の研究を行っています<sup>4)</sup>。以下に、OFESによる海洋大循環シミュレーションの例と、地球シミュレータの稼働よりも前から懸念はしていたのですが、研究を通して改めて実感している大気・海洋科学におけるHPCの将来の課題を紹介します。

大気の変動は、日常的に肌で感じることもできますし、気球や人工衛星、レーダなどの観測なども比較的豊富です。それに対し、電波などの電磁波の透過が極めて悪い海洋中の変動を観測することは非常に困難です。そのため、海洋大循環変動の四次元時空間構造を得る最善の方法は、現在のところ数値シミュレーションと言っても過言ではありません。

図1はOFESによる0.1度メッシュ準全球海洋大循環シミュレーションで得られた、100m深での海流の速さの瞬間値の例です。海洋はこのように渦に満ち満ちているのです。このような認識は人工衛星からの海水面高度の観測や、先駆的な高解像度シミュレーションによってすでに得られてはいたのですが、地球シミュレータとOFESの組合せによって、「疑似」観測の時間スケールを、これまでの10年程度から100年程度まで延長することができました。それにより、数十年スケールの海洋変動の四次元時空間構造を初めて得ることができました<sup>5)</sup>。

図1は、ある初期条件から出発したコンピュータシミュレーションによる1つの結果ですが、この結果から新たな観測計画などへの提案を行い、海洋科学、気候力学のさらなる進歩に貢献する努力をしています。

地球シミュレータの威力とOFESの性能を考えると、時間はかかりますが、海洋の深層循環の時間スケールである数千年のシミュレーションを詳細に行うことも理論上は可能です。しかしながら、科学的に十分な四次元時空間構造を得ようとする、膨大なデータを出力しなければなりません。100年程度のシミュレーションでも、数十TBのデータとなります。これは相対的なものなのですが、地球シミュレータの現状から考えると、大気・海洋シミュレーションにおいては、CPUパワーよりも、巨大データのハンドリング・パワーが極端に不足しています。将来の大気・海洋科学におけるHPCでは、CPUパワーよりも、ハードディスクや磁気テープ、もしくは代替メディアの巨大化ならびに高速化、さらには高速な描画ソフトウェアやデータ圧縮技術などの方がより重要であると考えています。

## 3. 固体地球シミュレーション

約78万年前、地球磁場は逆転しました。それ以前には、方位磁石のNの針は、今とは逆に南を指していたのです。なぜこのような逆転が起きたのでしょうか？ そもそも方位磁石が地球の南北を指すのはなぜでしょうか？ このような疑問に答えようとするのが地球ダイナモのシミュレー

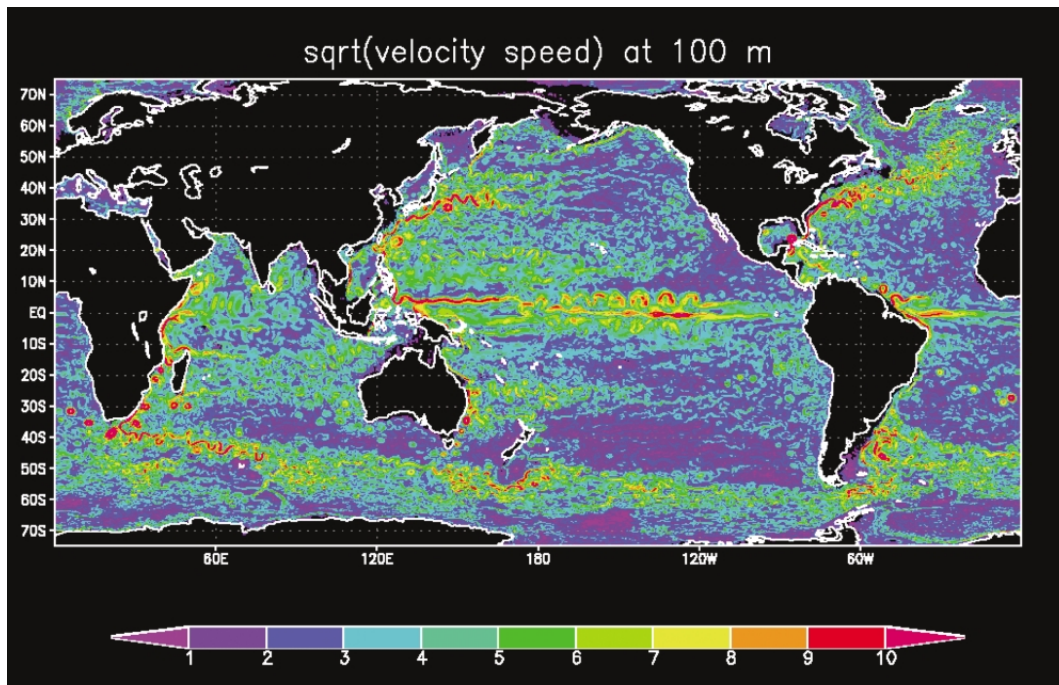


図1 海洋大循環モデル。OFES による0.1度メッシュ準全球海洋大循環シミュレーションで得られた、100m 深での海流の速さの瞬間値の例。単位は m/s。  
Fig.1 Example of 100m depth ocean current simulated by OFES.

ションです。ダイナモとは発電機を意味します。この言葉が示すとおり、地球磁場は地球内部の発電作用で作られた電流によって生み出しています。その電流は地球内部の核（コア）にあります。よく知られているとおり、地球磁場はほぼ双極子磁場になっているので、コアにはリング状の電流が流れていることになります。現在の地球磁場は北極がS極となっていることから、そのリング電流は西向きに流れていることが分かります。地表で測った地球磁場の強さから概算すると、そのリング電流の強さは1億アンペアにも達します。

地球の半径は約6,400kmで、コアの半径は、約3,500km

です。コアは鉄でできていて、2層構造になっています。その外側は外核と呼ばれ、地球内部の高温のために溶けています。内側は内核と呼ばれ、高圧のために固体になっています。外核の液体鉄は、熱対流運動をしていて、その運動エネルギーが磁気流体力学（Magnetohydrodynamics：MHD）ダイナモ機構を通じて磁場のエネルギーに変換されているのが地球ダイナモです。

我々は地球磁場の再現と理解をめざした計算機シミュレーションを行っています。シミュレーションのモデルは次のようなものです。外核を想定し、2つの球面に挟まれた球殻状の容器を考えます。内側の球面は内核、外側の球面

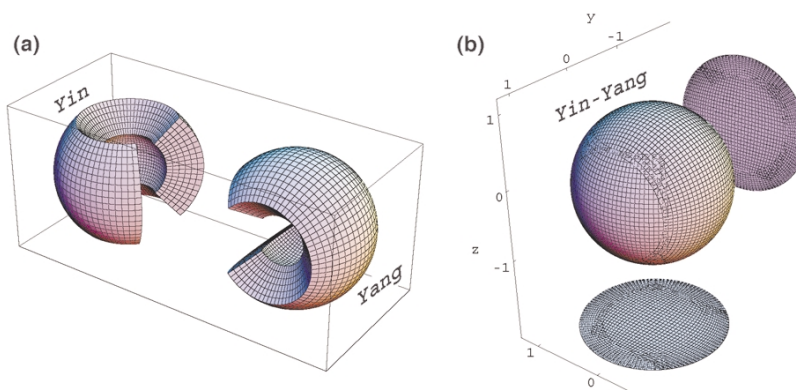


図2 インヤン格子。(a) 球座標格子（緯度経度格子）を、赤道のまわり南北に90度、経度方向に270度切りとったものがインヤン格子の要素格子です。この要素格子を2つ（イン格子とヤン格子）相補的に組み合わせ、(b)のように球面全体を覆います。イン格子とヤン格子の境界上の値は補間で決めます。インヤン格子は、球面に応用されたキメラ格子の一種です。

Fig.2 Yin-Yang grid.

はマントルとの境界です。対流の駆動源としては単純な熱対流を仮定し、内側の球面は高温、外側の球面は低温に固定する境界条件を与えます。この球殻状の容器に外核の鉄を想定した電気伝導性の流体が入っているものとします。そして球の中心方向に向かって重力が働き、系全体は一定の角速度で回転（自転）しているものとします。この系を記述する基礎方程式は、MHD方程式です。この方程式は、電磁場の時間発展を記述するマクスウェル方程式と、流体運動を記述するナビエ=ストークス方程式を組み合わせた式です。

MHD方程式に限らず、球ジオメトリで方程式を数値的に解くためには、その離散化に工夫が必要です。球面上に計算格子を設定するには、球座標の上で緯度線、経度線に沿って格子を設定するのが一番単純ですが、こうすると極域に格子が不必要に集中してしまい、効率が悪く、特に大規模な並列計算機で用いるには実用的ではありません。この問題点を回避するために我々は、地球シミュレータのように大規模な並列計算機に特に適した新しい球面格子系を考案し、それをインヤン（Yin-Yang）格子<sup>5,6)</sup>と名付けました（図2参照）。インヤン格子を用いることにより、これまでよりも格段に高解像度の地球ダイナモシミュレーションが可能となりました<sup>7)</sup>。インヤン格子を用いた地球ダイナモシミュレーションコードは、512ノードでピーク性能の46%（15.2TFLOPS）の性能を記録し、2004年に米国ピッツバーグ市で開催されたスーパーコンピューティング2004でゴードン・ベル賞を受賞しました<sup>8)</sup>。また我々はこのインヤン格子を、マントル対流シミュレーションにも応用しています<sup>9)</sup>（図3参照）。

マントル対流の方程式は、通常非圧縮流体シミュレーションとは異なります。圧力だけでなく速度場に対しても楕円型の方程式を解く必要があるだけでなく、マントル物質は温度や圧力、変形速度などによって粘性率が何桁も変化することから、解くべき楕円型の境界値問題は非常に悪

条件なものとなってしまいます。我々は、地球シミュレータ上でマントル対流の計算機シミュレーションを高速・高精度で実行するために、独自のアルゴリズム「ACuTE法」を考案しました<sup>10,11)</sup>。これは、マルチグリッド法、疑似圧縮法、局所時間刻み法という3つの数値手法を組み合わせ、マルチグリッド法の計算部分に最適化を施した解法です。ACuTE法の実装により、地球シミュレータ64ノードを用いた計算で、ベクトル演算率98.079%、並列化率99.8517%を得ることができ、1,024×1,024×256メッシュという世界最高レベルの高分解能なマントル対流シミュレーションが可能となりました。

#### 4. 連結階層シミュレーション

計算機シミュレーションは一般に基礎方程式などに基づく計算モデルに従って実行されます。それゆえ、モデルに含まれないミクロな素過程は少数のパラメタとして取り込まれるとともに、モデル領域より大きなシステムの情報は境界条件や外力として取り扱われてきました。しかし、激しい時間変動や強い輸送を伴う非平衡ダイナミクスにかかわる先端的課題のシミュレーションを実現するためには、こうした単一モデルの方法論を単に高精度化するだけではもはや十分ではありません。

たとえば、太陽フレアに代表されるプラズマ中での爆発的エネルギー解放現象では、大規模なプラズマ流体のダイナミクスとプラズマ粒子の微視的運動との相互作用が本質的役割を果たします。また、地震のトリガ問題や材料開発において重要な固体の破壊現象は、ミクロな分子構造の歪みとバルク物質のストレス変化のフィードバックの結果として発生すると考えられます。さらに、大規模気象現象と雲微物理プロセスとの相互作用、高速反応過程における分子反応動力学と流体ダイナミクスの相互作用など、異なる物理階層におけるプロセス間相互作用が多くの先端的課題で本質的に重要な役割を果たすと考えられています。

したがって、こうした複雑現象のシミュレーションを実現するためには異なる階層のモデルを連結した新たな方法論を開発する必要があります。地球シミュレータセンターでは次世代のシミュレーションを担う基盤的技術を確立するために「連結階層シミュレーション研究プログラム」を平成16年度より開始しました。現在、同プログラムではプラズマ、気象、化学反応、固体など様々なシステムに関する連結階層シミュレーションの開発が進行しています。その一例としてオーロラ形成過程のシミュレーションの概略を以下に紹介します。

極域に現れるオーロラはその美しさゆえに歴史的に広く興味の対象となってきました。オーロラは宇宙空間から電離層に向かう磁力線に沿った高速電子流が高層大気分子を励起する結果生じる発光現象ですが、高速電子流の出現機構には磁気圏（地磁気が存在する宇宙空間）における電磁流体（MHD）不安定性とプラズマ粒子の運動論的不安

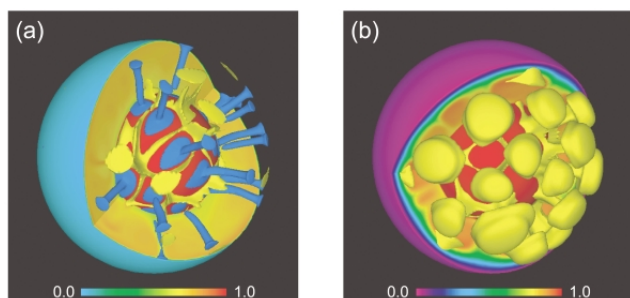


図3 マントル対流シミュレーションの例。温度変化（各深さでの平均温度からのずれ）の等値面を示します。青は冷たく、地球中心に向かって沈んでいる領域、黄色は暖かく、浮かび上がっている領域を示します。(a)は放射性物質によるマントルの内部発熱の効果を考慮に入れた場合。(b)はマントル物質の粘性率が温度に強く依存する効果を考慮に入れた場合の計算を示します。

Fig.3 An example of mantle convection simulation.



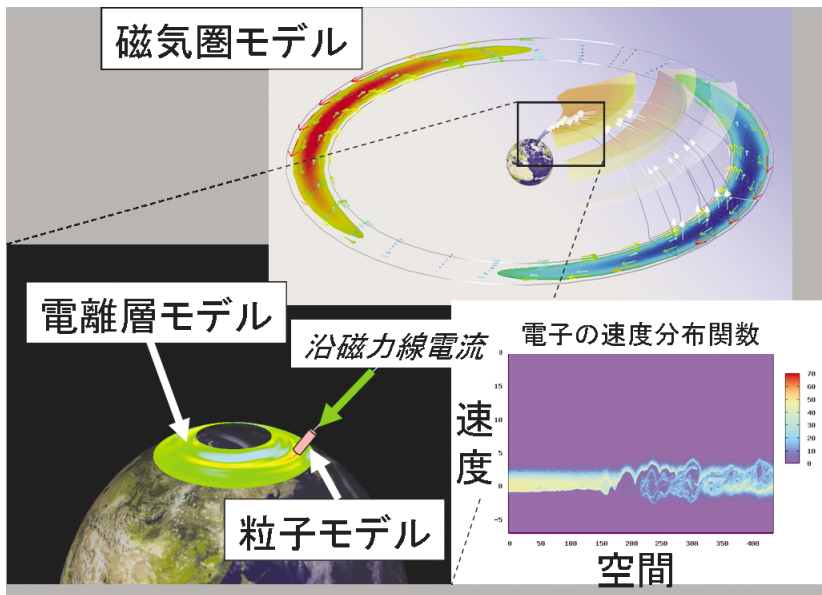


図4 連結階層オーロラシミュレーションの階層構造とその結果。磁気圏モデル(上)は磁気圏全体の3次元電磁流体ダイナミクスを、電離層モデル(左下)は電離層の電子密度と流れをそれぞれ計算します。粒子モデルは電流密度の高い点で磁力線に沿った電子の粒子運動を計算し、動的に磁気圏電離層モデルと結合されます。右下は粒子モデルが計算した電子密度分布を示します。

Fig.4 Model structure of the multiple scale simulation of auroral arc formation.

定性の両者が複雑にかかわっています。しかし、従来のシミュレーション研究では流体モデルや粒子モデルなど特定のモデルのみが使われていたため、オーロラ形成の全体像を統一的に理解することはできませんでした。

そこで我々は、アルフベン波の共鳴不安定性と、その結果として形成されるプラズマ粒子の運動論的不安定性をセルフコンシステントに計算する連結階層シミュレーションモデルを開発しました。このシミュレーションは、磁気圏のプラズマ流体運動を計算するMHDモデル、電離層の電子流を計算する部分電離プラズマモデル、および粒子加速を計算する静電粒子モデルの連結によって成り立ちます。MHDおよび部分電離モデルは領域分割により、粒子モデルは粒子分割によりMPIを使って並列化され、それぞれコミュニケータを形成しています。

各モデルの連結構造を図4に示します。MHDモデルの計算領域はオーロラ帯に対応する緯度帯(北緯70度より72度)に足を持つ双極子磁場に沿った空間に対応します。電離層モデルはMHDモデルの地球側境界面に対応し、電離層における閉じた電流系の構造を計算します。一方、粒子モデルは磁気圏電離層境界における磁力線に沿った1次元空間に対応し、沿磁力線電流を担う電子流が微視的な不安定性を通して高速電子を加速する過程を計算します。高速電子流は電離によって電離層のプラズマ密度を増加させることにより電離層モデルと結合しています。

シミュレーションの結果、粒子モデルで計算されたイオン音波不安定性が電子を加速することにより電離層におけるオーロラアークの生成を強める効果のあることが見出さ

れました。さらにこのシミュレーションでは電離層へ入射される電子の速度分布関数を計算することができるため、これに基づいてより現実に近いオーロラ発光過程を再現することに成功しました。

連結階層シミュレーションでは、計算効率を飛躍的に高める独自の工夫が必要です。オーロラシミュレーションにおいてはイオン音波不安定性を駆動する電子流速が存在しない限り、粒子計算の影響は現れないため、すべての領域で粒子計算をする必要はありません。それゆえ、効果的な連結を実現するため、計算過程でイオン音波不安定性の閾値を超える高電流密度領域のパターンを抽出し、それぞれのパターンを代表する粒子計算プロセスを動的に起動しました。一方、異なる階層モデルでは単位計算時間に対する物理時間の進行(計算率)が違うため、計算の進行とともに階層間で物理時間に差が生じます。そこで、階層間の時間差に関する最大許容値を設け、最大許容値を超える場合には先行するコミュニケータの計算を一時的に休止することにより同期性の確保を近似的に保障するアルゴリズムを開発しました。

こうして開発されたシミュレーションモデルは宇宙プラズマにおける世界で初めての流体粒子結合モデルとして、オーロラの科学を探る強力なツールとなると考えられます。地球シミュレータセンターでは、地球シミュレータを利用した様々な現象の連結階層シミュレーション研究が計画されているとともに、次世代のシミュレータを念頭に置いた新たなアルゴリズムの開発も進められる予定です。

## 5. 全球 領域・大気・海洋・陸面・海水結合シミュレーション

我々は、全球から都市域の気象や気候まで予測できる先進的な大気・海洋・陸面・海水結合シミュレーションコードの開発に平成15年度から取り組んでいます<sup>12~14)</sup>。このコードが扱う時間スケールは幅広く、全球シミュレーションでは1~2年の気候予測、都市スケールに代表される領域シミュレーションでは、数日から数ヶ月(季節)をターゲットとし、大気、海洋、陸面の相互影響を考えた予測シミュレーションにより、予測精度をどれだけ向上できるかという課題にチャレンジしています。これは、日本の来年の夏あるいは冬は、どれくらい暑いか、寒いか、についての予測であり、言うまでもなく社会的インパクトやニーズがとて高い課題です。しかし、これまではチャレンジすることすら困難でした。その理由には、日々のお天気の積み重ねから数値計算した統計値としての気候が、厳密に再現できなかったことにも一因があると考えられます。どれくらい長い時間、どれくらいの空間スケールなら、どの程度の精度で予測可能か否かについては、現時点では明らかな回答は存在しません。地球システムを構成する大気や海洋、陸面過程を、実際に起こっている物理現象にできるだけ近い定式化を行い、シミュレーション予測を行った場合、どの程度まで予測が可能なのでしょうか、また、予測精度にどれだけの影響があるのでしょうか。これらの問題に回答を与えることは、地球シミュレータを最大限に活用してこそ可能になるグランドチャレンジです。

この結合シミュレーションコードの1つの特徴は、大気、海洋、陸面シミュレーションコード共に、第3章で述べたインヤン格子系を採用していることです。この採用によって、計算時間を制約する条件が緩和できるとともに、南極や北極などの特異点を回避でき、さらに、これまで蓄積してきた計算性能最適化の技法を大いに応用できる利点があります<sup>15)</sup>。大気、海洋を流体として扱い、流れを解くことは従来のコードと同様です。大気では、雲の単位まで射程に入れ、雲微物理過程を導入し、全球を雲モデルとしてシミュレーションが可能になっています。また、大気、海洋共に、全球と領域シミュレーションのどちらにも対応可能ですし、全球と領域を連続的に結合することも可能です。さらに、複合的なマルチスケール現象である気象、気候現象の予測を行うには、結合モデルである必要があるため、大気、海洋、陸面、海水間の相互関係を取り入れた結合シミュレーションコードとして、シミュレーションコード全体が構成されています。

平成15年から16年にかけて、この全球-領域・非静力学・大気・海洋・陸面結合シミュレーションコードの第一次開発をほぼ完了しています。ここでは、本結合モデルの中の大気コンポーネントを用いて台風進路の予測シミュレーションを行った結果と、海洋コンポーネントを用いて伊豆から東京湾までの季節進行の様子を再現した結果を紹介します。いずれも、観測値に見劣りしない結果が得られました。図5は、水平解像度11km、鉛直32層の全球大気シミュレーションを72時間実行し、得られた台風進路予測結果です。この台風の例では、東京管区气象台から公表され

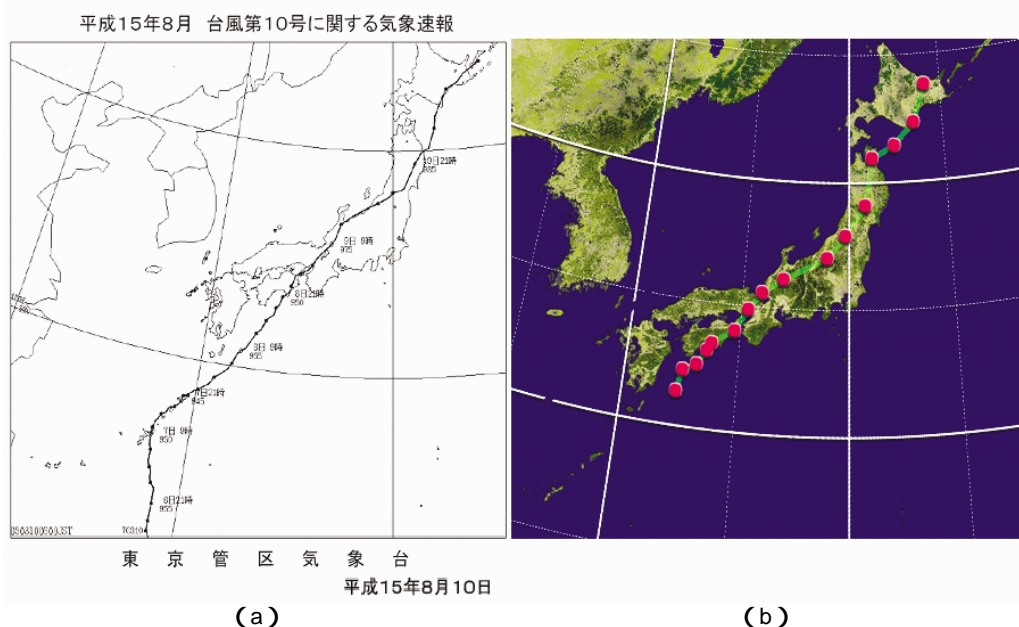


図5 全球 領域・非静力学・大気・海洋・陸面・海水結合シミュレーションコードによる、平成15年台風10号の進路予測結果。(a) 東京管区气象台より発表された台風の中心の経路。(b) 本シミュレーションコードによって得られた72時間の予測結果。

Fig.5 Path forecasting result of Typhoon 10 in 2003.

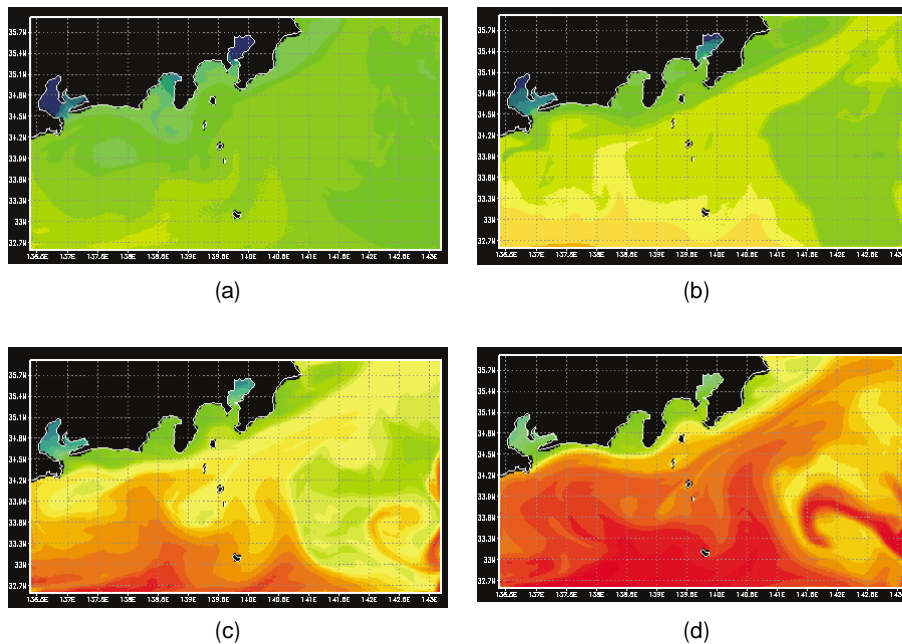


図6 全球 領域・非静力学・大気・海洋・陸面・海水結合シミュレーションコードによる，伊豆から東京湾における冬(a)から夏(d)にかけての海水温度の変化。(a),(b),(c),(d)の順番で時系列を表します。

Fig.6 Ocean temperature change from winter to summer among Izu area and Tokyo Bay.

ている観測データと予測結果がとてよく一致していることが分かります。図6は，海洋コンポーネントの結果です。図中の伊豆から東京湾領域を，水平1.4km幅の格子に分割し，鉛直42層に設定し，一般に公開されている海の表面温度データを海洋コンポーネントの表面に与えながら，湾内，外洋の季節進行が再現できるかを試した実験です。この解像度での結果は，従来ごく狭い海洋領域に限られてきたのですが，図6から，外洋の黒潮の影響を受けながら湾内の温度が変化していく，広範囲での相互作用の様子がよく分かります。

現在，本結合モデルによる本格的な予測シミュレーションを開始しており，その予測精度へのインパクト評価も進めています。今後は，さらに現実に近い降雨過程モデルの導入と，先進的計算アルゴリズムの導入により，飛躍的に精度の高い，高速シミュレーション予測の実現をめざします。

## 6. むすび

地球シミュレータの登場は，HPCの世界に衝撃を与えました。将来，HPCの歴史が書かれるとき，そこに地球シミュレータの名が刻まれていることは間違いのないでしょう。我々，地球シミュレータセンターの研究者は，この素晴らしい並列計算機の性能を最大限に生かすことで社会に貢献しようと，研究と開発に日々，努力を続けています。

さらに我々は，地球シミュレータを実際に活用することでかいま見ることのできた未来，つまり地球シミュレータの次の世代に実現されるべき新しいシミュレーションの世界を，率先して実現すべく努力しています。その鍵となる中心概念は連結階層シミュレーションだと我々は考えてい

ます。

地球シミュレータによって，一躍世界をリードすることになった日本のシミュレーション科学・シミュレーション技術が，さらにもう一段階の飛躍的な発展を遂げることを心から願っています。

## 参考文献

- 1) S. Shingu, H. Takahara, et al.; "A 26.58 Tflops global atmospheric simulation with the spectral transform method on the Earth Simulator," <http://www.sc-2002.org/paperpdfs/pap.pap331.pdf>, Proceedings of the ACM/IEEE Supercomputing SC' 2002 conference, 2002.
- 2) W. Ohfuchi, H. Nakamura, et al.; "10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator)," J. Earth Simulator, 1:8-34, 2004.
- 3) Y. Masumoto, H. Sasaki, et al.; "A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)," J. Earth Simulator, 1:35-56, 2004.
- 4) W. Ohfuchi, H. Sasaki, et al.; "Mesoscale resolving simulations of the global atmosphere and ocean on the Earth Simulator," Eos, 86(5):45-46, 2005.
- 5) A. Kageyama and T. Sato; The "Yin-Yang Grid": An overset grid in spherical geometry. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5(9):1-15, 2004.
- 6) A. Kageyama; "Dissection of a sphere and Yin-Yang grids," J. Earth Simulator, 4, 2005.
- 7) A. Kageyama; 'Yin-Yang grid and geodynamo simulation,'

- “Computational Fluid and Solid Mechanics 2005,” pp.688-692, Elsevier Ltd., K.J. Bathe ed., 2005.
- 8) A. Kageyama, M. Kameyama, et al; “A 15.2 Tflops simulation of geodynamo on the Earth Simulator,” <http://www.scconference.org/sc2004/schedule/pdfs/pap234.pdf>, In Proceedings of ACM/IEEE Supercomputing Conference 2004 SC2004, Pittsburgh, PA, USA, November 2004.
  - 9) M. Yoshida and A. Kageyama; “Application of the Yin-Yang grid to a thermal convection of a Boussinesq fluid with infinite Prandtl number in a three-dimensional spherical shell,” *Geophys. Res. Lett.*, 31(12), 2004.
  - 10) M. Kameyama, A. Kageyama, and T. Sato; “Multigrid iterative algorithm using pseudo-compressibility for three-dimensional mantle convection with strongly variable viscosity,” *J. Comput. Phys.*, 206(1):162-181, 2005.
  - 11) M. Kameyama, “ACuTEMAn: A multigrid-based mantle convection simulation code and its optimization to the Earth Simulator,” submitted to *J. Earth Simulator*, 2005.
  - 12) K. Takahashi, X. Peng, et al; “Development of nonhydrostatic coupled ocean-atmosphere simulation code on the earth simulator,” In Proceedings of 7th International Conference on High Performance Computing and Grid in Asia Pacific Region, pp.487-494, Omiya, Japan, July 2004.
  - 13) K. Takahashi; “Development of nonhydrostatic coupled ocean-atmosphere simulation code,” Annual Report of the Earth Simulator, (April 2003 – March 2004) , pp.63-67, 2004.
  - 14) 高橋桂子; 「全球・非静力・大気海洋結合シミュレーションコードの開発」, *情報処理*, 45(2):pp.134-138, 2004.
  - 15) X. Peng, F. Xiao, et al; “Conservative CIP transport in meteorological models,” *JSME International Journal (Series B)*, 47(4): pp.725-734, 2004.

## 筆者紹介



Akira Kageyama  
かげやま あきら

**陰山 聡** 日本学術振興会特別研究員，核融合科学研究所助手，助教授を経て，現在，地球シミュレータセンター・固体地球シミュレーショングループ・グループリーダー，および高度計算表現法研究グループ・グループリーダー。井上研究奨励賞，SC2004ゴードンベル賞受賞。



Wataru Ohfuchi  
おおふち わたる

**大淵 済** 1999年より，海洋科学技術センターに所属。現在，海洋研究開発機構，地球シミュレータセンター，大気・海洋シミュレーション研究グループ・グループリーダー。日本気象学会，および，米国地球物理学連合会員。



Kanya Kusano

くさの かんや  
**草野 完也**

1987年，広島大学理学部物性学科助手。1996年，助教授。1998年，広島大学大学院先端物質科学研究科助教授。2004年より地球シミュレータセンター，連結階層シミュレーションアルゴリズム研究グループ・グループリーダー。井上研究奨励賞。西宮湯川記念賞。



Keiko Takahashi

たかはし けいこ  
**高橋 桂子**

2002年4月より，海洋研究開発機構，地球シミュレータセンターに所属。マルチスケールシミュレーションによる高精度の気象・気候変動予測シミュレーション研究開発に従事。現在，複雑性シミュレーション研究グループ・グループリーダー。工学博士。



Kunihiko Watanabe

わたなべ くにひこ  
**渡邊 國彦**

1983年，カリフォルニア大学地球物理惑星物理研究所助手。1989年，広島大学核融合理論研究センター助教授。1990年，核融合科学研究所助教授。1997年，文部省核融合科学研究所教授。2003年，地球シミュレータセンター・プログラムディレクター。



Tetsuya Sato

さとう てつや  
**佐藤 哲也**

1967年より，京大物理学部助手，東京大学理学部助教授，広島大学教授。その間，NOAA，Max-Planck研究所，プリンストン大，ベル研究所招聘研究員。工学博士。核融合科学研究所教授，理論・シミュレーション研究センター長を経て，現在，地球シミュレータセンター長。核融合科学研究所名誉教授。総合研究大学院大学名誉教授。田中館賞，仁科記念賞，21世紀の偉業賞，東京クリエイション大賞等受賞。