

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540452
 研究課題名 (和文) 世界最高速の 3 次元マントル対流シミュレーションプログラムの開発
 研究課題名 (英文) Development of world-class program for three-dimensional numerical simulation of mantle convection
 研究代表者
 亀山 真典 (KAMEYAMA MASANORI)
 愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授
 研究者番号：70344299

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、応募者が中心となって開発してきた固体地球シミュレーションツール群を融合し、世界最高レベルの 3 次元マントル対流シミュレーションプログラムを開発した。このプログラムにより、現実のマントル物質の性質を取り入れた対流シミュレーション、及び世界でも類を見ない高解像度での大規模 3 次元シミュレーションの実行を可能にした。また本研究で開発したプログラムのソースコード一式を応募者ホームページ内よりアクセス可能にした。

研究成果の概要 (英文)：

In this study we have developed a suite of numerical programs for world-class simulations of three-dimensional mantle convection. The suite, including the models with Cartesian and spherical shell geometries, enables us to conduct simulation studies of mantle convection with extremely high spatial resolutions as well as those with physical properties of modeled fluid relevant to terrestrial mantle materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：マントル対流、数値シミュレーション、並列計算、インヤン格子、多重格子法、局所時間刻み法、クリロフ部分空間法、非弾性流体近似

1. 研究開始当初の背景

応募者は本研究の開始まで、地球シミュレータに代表される超並列計算機上でマントル対流の大規模シミュレーションを可能にす

るための研究開発を行ってきた。その成果は (i) マントル対流に適した新しい数値解法 (以下「ACuTE 法」) の考案 (Kameyama et al., J. Comput. Phys., 2005)、(ii) 3 次元箱型マントル対流の世界最高速シミュレーショ

ンプログラムの構築 (Kameyama, J. Earth Simulator, 2005)、及び (iii) 現実的なマントルダイナミクスの問題に対する ACuTE 法の有効性の実証 (Kameyama and Yuen, Geophys. Res. Lett., 2006)、として結実した。これにはハードウェアの進歩もさることながら、ソフトウェアの進歩の寄与も大きい。マントル対流シミュレーションでは一般に、高粘性かつ非圧縮の流体の定常流れ場を各時間ステップで求める作業に計算時間の9割以上が費やされ、この部分の高速化がとりわけ重要であった。応募者の開発した ACuTE 法は、多重格子法と併用することでマントル対流の流れ場を高速かつ精度よく計算することができるだけでなく、良好なベクトル化・並列化特性を持つことが示されている (Kameyama, J. Earth Simulator, 2005)。応募者は、ACuTE 法の優れた性能が、大規模な3次元箱型シミュレーションを初めて可能にした、との自負を持っている。

一方、本研究の開始前の時点における3次元球殻マントル対流シミュレーションに関しては、日本国内の研究者の手によって (i) 岩瀬のもの (Iwase, J. Geomag. Geoelect., 1996)、(ii) 鈴木のもの (Tabata and Suzuki, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 2000)、(iii) 吉田のもの (Yoshida and Kageyama, Geophys. Res. Lett., 2004) の3種類のプログラムが既に開発されてきた。しかし残念ながら、これらはいずれも大規模計算を念頭に置いて開発されたものとはいい難く、実際の大規模モデルに適用された実績が非常に少なかった。その大きな原因は、これらのプログラムで使用されている流れ場解法アルゴリズムが大規模計算向きではなかったためだと考えられる。言い換えれば、流れ場解法アルゴリズムを変更することによって、大規模な3次元球殻シミュレーションも十分実用的に行えると期待できる。

上記のような背景を受けて、数値解析の観点から ACuTE 法のアルゴリズムを再検討したところ、この方法はモデルの形状によらず適用可能であることが分かった。このことから、ACuTE 法を現実のマントル対流に相当する3次元球殻形状モデルに適用することによって、世界最高速の3次元球殻マントル対流シミュレーションプログラムが構築できると確信するに至った。

2. 研究の目的

本研究ではまず (i) ACuTE 法を球殻形状モデルに適用することにより、世界に誇れる3次元球殻領域内マントル対流シミュレーションプログラムの構築を行う。また (ii) 開

発したプログラムによって世界最高レベルの3次元球殻マントル対流シミュレーションを実施する。これは、マントル対流研究に貢献することだけでなく、本研究で開発したシミュレーションプログラムの優れた性能をアピールすることも目的とする。これと並行して (iii) 応募者によって既に開発済の3次元箱型マントル対流プログラムとも併せてソースコード一式を公開し、日本国内のみならず広く世界の研究者の便に供することも目標とする。

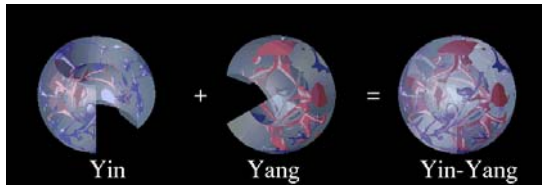
本研究によって、国産品の優れたマントル対流プログラムが誕生するという事は、(プログラム本体の開発には直接携わっていない、という意味での) 「一般ユーザ」たる国内の研究者にとっても十分意義深いものであるはずである。これまでに日本国内の研究者によって行われてきた3次元マントル対流シミュレーション研究では、その多くでアメリカ製のプログラムが使われていたのが実状である。研究者とプログラム開発者の距離の遠さは、研究者が独自に機能の拡張を試みる際、あるいはバグが発見された場合の対処に著しい困難を引き起こしていたことは否めない。しかしながら国産品のプログラムを使うことによって、ユーザはそのプログラムの開発者を格段に身近な存在として感じるようになるであろう。これによってユーザは、独自の機能開発のためのサポートを受けやすく、あるいはプログラムのバグの除去などの要望を出しやすくなるなど、その恩恵は大きいものとなるだろう。これにより、日本国内でのマントル対流シミュレーション研究の裾野を広げていくことに貢献したい。同時に将来は世界をリードするシミュレーション成果が日本国内から盛んに発信できる環境の醸成に寄与したい。

3. 研究の方法

本研究の目標は、(i) 世界に誇れる3次元球殻領域内マントル対流シミュレーションプログラムの構築、(ii) 開発したプログラムによる、世界最高レベルの3次元球殻マントル対流シミュレーションの実施、及び (iii) 開発した3次元箱型及び球殻領域マントル対流プログラムのソースコード一式の公開、の3点である。これを達成するため、以下の手順で初年度及び次年度以降の研究を進める。

初年度は、3次元球殻マントル対流シミュレーションプログラムの根幹部分の開発を集中的に行う。この開発には ACuTE 法を用いた3次元箱型プログラムをベースとし、空間離散化の基準となる座標系を直交デカルト座標系から球座標系に変更することによって実施する。

本研究で開発するモデルの大きな特徴の1つは、球殻領域のメッシュ分割に「インヤン格子」(Kageyama and Sato., *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2004; 下図参照)を用いることである。インヤン格子とは3次元球面領域での効率的なメッシュ分割法の一つであり、極(補緯度が0または π)付近での特異性の影響を避けるために考案された。またこの格子系は、マントル対流問題に適用された実績(Yoshida and Kageyama, *Geophys. Res. Lett.*, 2004)が既にあるだけでなく、大規模かつ高分解能な計算でより一層その威力を発揮する(Kageyama et al., SC2004, 2004)ことが示されている。インヤン格子上での領域分割、及び多重格子法計算の大規模並列化の特性を考慮して、プログラムの開発は (i) 非並列化



版、(ii) インヤン並列化版、(iii) 動径方向領域分割版、及び (iv) 空間3方向領域分割版の4つのステージに分けて実施する。

次に、3次元球殻マントル対流シミュレーションプログラムのテスト計算を実施する。これには簡単な熱対流計算でのベンチマークテスト、及び大規模並列計算時のベクトル化・並列化効率の測定も含む。この時点で良好な性能が得られなかった場合には、十分な改善が得られるまでプログラムの最適化作業も並行して行う。この段階までの成果は内外の学会で発表するとともに、論文の形で公表する。

次年度以降は、開発した3次元球殻プログラムを用いて現実のマントルダイナミクスの諸問題の解明に貢献すること、及び開発したソースプログラムの公開に向けた作業を行う。具体的には以下のような工程を予定している。

- (1) マントル物質の流体モデルの高度化により、現実的なマントルの物性を考慮したシミュレーションを可能にする。ここでは、モデル物質の状態方程式を高度化して、熱力学的に整合性のとれた形で圧縮性の効果を取り入れること、及びマントル物質の固相-固相転移が対流に与える効果を含めることを目的とする。
- (2) 高性能の輸送方程式ソルバを実装し、マントル物質の組成の違いの効果をモデル化できるようにする。まずは人工拡散の少ない輸送方程式ソルバ(CIP法をその候補とする)を3次元箱型モデル及び球殻モデルに実装し、物質の違いやその輸送過程を追跡できるようにする。
- (3) 3次元箱型モデル及び球殻モデルのソースコードの公開に向けた準備を進める。

README ファイルを含めたドキュメントを整備し、ユーザからの要望があればソースコードに解説も加える。

4. 研究成果

本研究の成果は (i) 3次元球殻マントル対流プログラムの開発、(ii) マントル対流シミュレーションに用いる流体モデルの高度化、及び (iii) 外部の「一般ユーザー」へのサポート、の3つに大別される。以下では各々の成果について記す。

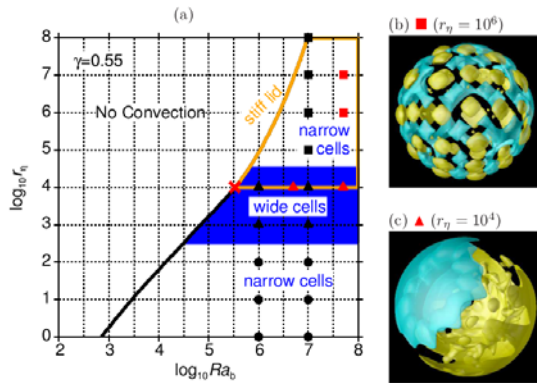
(1) 球殻プログラムの開発

まず、3次元球殻マントル対流シミュレーションプログラムの根幹部分の開発を集中的に実施した。具体的には、本プログラムの基盤技術の1つである ACuTE 法の基礎方程式を球座標系での表式に変換して空間離散化し、かつインヤン格子系への移行に不可欠な、要素格子間の境界値補間ルーチンを新設することで実装した。また、計算領域の領域分割を空間3方向に柔軟にとれるように工夫したことにより、大規模な並列計算にも適用が可能になっている。加えて、箱型モデルでの ACuTE 法の最適化と同様の手法をインヤン格子での多重格子法計算にも実装し、大規模並列時にも計算効率を保つ工夫を施している。地球シミュレータや PC クラスタを用いた並列計算により、最大 128CPU を用いた場合でも十分な計算効率を得られていることも確認した。この結果、有限体積法ベースのコードでは世界最高レベルの空間分解能での3次元球殻マントル対流シミュレーションが可能となった(Kameyama et al., 2008)。これに加えて、線形代数の観点からも検討を重ねることにより、流れ場の数値解法の性能の向上を図った。具体的には、多重格子法をクリロフ部分空間法と併用することによって ACuTE 法の加速を試みた。その結果、流れ場の反復解法の収束性が向上し、特に格子分割数の多い大規模モデルを扱う場合の ACuTE 法の計算量を大きく軽減させることに成功した。

次に、上で開発した3次元球殻マントル対流シミュレーションプログラムのテスト計算を実施した。系統的な熱対流シミュレーションを行い、ベンチマークテストの結果と比較したところ、一様粘性流体の場合だけでなく、温度依存粘性をもつ場合でも精度のよい解が得られていることを確認した。

さらに、マントル対流を特徴づける重要な要素の1つである、粘性率の空間変化

のある場合に対するプログラムの頑健さを向上させる試みも行った。具体的には、ACuTE法の反復の過程で、流れ場から剛体回転成分などの不定性を除去する方法に見直しを加えた。その結果、ACuTE法の反復収束との親和性が向上し、特に粘性率の空間変化が大きい問題を扱う場合の計算量の大幅な低減を達成した。さらにこの改良により、対流層内で粘性率に10の7乗倍ものコントラストがある場合でもシミュレーションを安定的に行うことが可能となった。この結果、粘性率コントラストが10000倍程度の条件下で予想されている、熱対流の流れ場の長波長化 (“sluggish-lid” mode)、及びさらに粘性率コントラストが大きい条件下で期待される stagnant-lid 型の対流様式 (下図参照) が再現できることも確認できた (Kameyama and Ichikawa, submitted)。

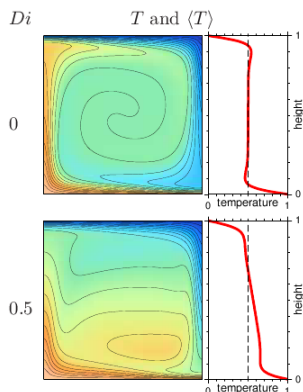


(2) 流体モデルの高度化

より現実的なマントルダイナミクス問題の解明に向けての取り組みの第一歩として、対流シミュレーションに用いる流体モデルの高度化も行った。

第1に、従来のマントル対流モデルでよく用いられている「非圧縮性流体」という近似を改め、「非弾性流体」近似に基づくモデルへと改良した。これにより、断熱圧縮による密度変化の影響だけでなく、力学

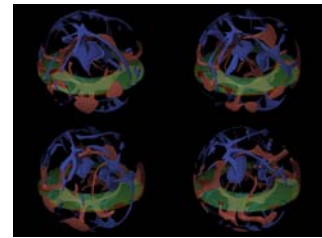
的な仕事から熱的な仕事への変換の効果も含めることが可能となった。なおこのプログラムは、最近行なわれた圧縮性マントル対流プログラムのベンチマークの1つとして採用された



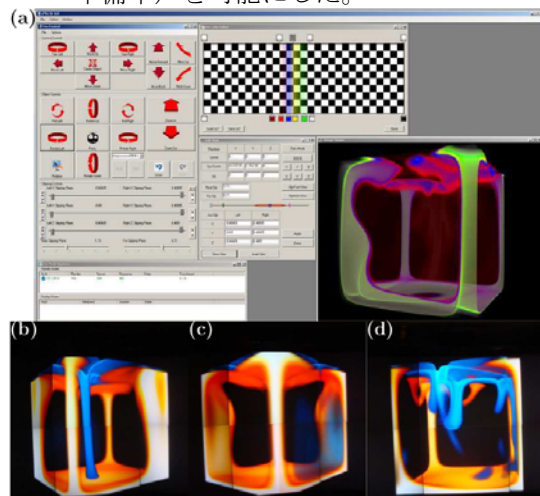
(King et al., 2010)。

さらに、CIP-CSLR法に基づいた移流方程式の高精度ソルバ (Furuichi et al., 2008; 2009) を3次元箱型プログラムに導入することにも成功した。このプログラムを用いて2成分系流体の熱・組成対流の予備的なシミュレーションを行ったところ、シャープな物質界面が正しく捕獲されるだけでなく、物質の総量が十分な精度で保存していることも示された (論文準備中)。

さらに、マントル物質の固相-固相転移 (亀山, 2008; 右図参照) や粘性率の温度・圧力依存性を扱うための流体モデルの高度化も合わせて行った。



- (3) 外部の「一般ユーザー」へのサポート
 本研究で開発した一連のシミュレーションプログラムの公開に向けて、外部の「一般ユーザー」への支援を本格的に開始した。具体的には、ミネソタ大学・東京工業大学の「ユーザー」に3次元箱型マントル対流シミュレーションプログラム ACuTEMan を提供するとともに、独自の環境でのインストールから大規模並列シミュレーションジョブの投入までをサポートした。加えて、「ユーザー」が独自の機能を追加する作業を支援し、3次元箱型対流シミュレーション結果の「対話型」可視化 (Damon et al., 2008; Greensky et al., 2008; 下図参照)、及び新たなマントル物質の固相-固相転移を取り入れたシミュレーション (論文準備中) を可能にした。



加えて、本研究で開発したプログラム一式を研究代表者ホームページよりダウンロード可能な状態に整備した

以上に述べた通り、本研究はほぼ計画通りの成果を達成することができた。とはいえ、技術開発研究の常として、本研究で開発した高度3次元マントル対流プログラムについても、その性能を維持・向上させるためには不断の保守管理が不可欠である。加えて、新たな機能の追加、及び関連分野の技術の進歩を受けてのプログラム技法の改良も極めて重要な作業である。本研究で得られた成果を新たな出発点として、今後も引き続きプログラムの開発・改良に努める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① S. D. King, C. Lee, P. E. van Keken, W. Leng, S. Zhong, E. Tan, N. Tosi, and M. Kameyama, A Community Benchmark for 2D Cartesian Compressible Convection in the Earth's Mantle, *Geophys. J. Int.*, 180, 73-87, 2010. 査読有
- ② M. Furuichi, M. Kameyama, and A. Kageyama, Validity test of a Stokes flow solver by fluid rope coiling: toward plate-mantle simulation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 176, 44-53, 2009. 査読有
- ③ M. Kameyama, A. Kageyama, and T. Sato, Multigrid-based Simulation Code for Mantle Convection in Spherical Shell Using Yin-Yang Grid, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 171, 19-32, 2008. 査読有
- ④ J. B. S. G. Greensky, W. W. Czech, D. A. Yuen, M. R. Knox, M. R. Damon, S. S. Chen, and M. Kameyama, Ubiquitous interactive visualization of 3D mantle convection using a web-portal with Java and Ajax framework, *Visual Geosciences*, 13, 105-115, 2008. 査読有
- ⑤ M. Damon, M. Kameyama, M. Knox, D. H. Porter, D. A. Yuen, and E. O. D. Sevre, Interactive visualization of 3D mantle convection, *Visual Geosciences*, 13, 49-57, 2008. 査読有
- ⑥ M. Furuichi, M. Kameyama, and A. Kageyama, Three-Dimensional Eulerian method for large deformation of viscoelastic fluid: Toward plate-mantle simulation, *J. Comput. Phys.*, 227, 4977-4997, 2008. 査読有
- ⑦ 亀山真典, マントル対流を可視化する, 可視化情報学会誌, 28, 14-19, 2008. 査読なし

〔学会発表〕(計19件)

- ① M. Kameyama and H. Ichikawa, Onset of Thermal Convection of a Fluid with Strongly Temperature-dependent Viscosity in a Spherical Shell, American Geophysical Union 2009 Fall meeting (平成21年12月17日、サンフランシスコ)
- ② M. Kameyama and Y. Kato, Numerical Simulations on Dynamic Behaviors of Subducting Slabs: Toward Three-Dimensional Modelling, 11th International Workshop on Modeling of Mantle Convection and Lithospheric Dynamics (平成21年6月30日、スイス)
- ③ H. Senshu, M. Kameyama, S. Maruyama, D. A. Yuen, S. Ida, and V. Wheeler, Effect of majorite on convection pattern and thermal evolution of mantle, American Geophysical Union 2008 Fall meeting (平成20年12月19日、サンフランシスコ)
- ④ M. Furuichi, M. Kameyama, and A. Kageyama, Development of Eulerian numerical procedure for free surface toward plate-mantle simulation, American Geophysical Union 2008 Fall meeting (平成20年12月17日、サンフランシスコ)
- ⑤ M. Kameyama, A. Kageyama, and T. Sato, Multigrid-based Simulation Code for Mantle Convection in Spherical Shell Using Yin-Yang Grid, American Geophysical Union 2008 Fall meeting (平成20年12月17日、サンフランシスコ)
- ⑥ 亀山真典, スラブ沈み込みの3次元性に関する数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2008年大会 (平成20年5月27日、千葉)
- ⑦ M. Damon, D. A. Yuen, M. Kameyama, M. Knox, D. Porter, E. O. Sevre and P. Woodward, Interactive Visualization and Monitoring of Large-Scale 3-D Mantle Convection Runs, American Geophysical Union 2007 Fall meeting (平成19年12月11日、サンフランシスコ)
- ⑧ M. Furuichi, M. Kameyama and A. Kageyama, Development of three dimensional Eulerian numerical procedure toward plate-mantle simulation: accuracy test by the fluid rope coiling, American Geophysical Union 2007 Fall meeting (平成19年12月10日、サンフランシスコ)

- ⑨ M. Damon, M. Kameyama, M. Knox, D. Porter, D. A. Yuen and Erik O. Sevre, 3-D Interactive Visualization with ACuTEMan, Vis 2007, IEEE Visualization 2007 (平成 19 年 10 月 31 日、サクラメント)
- ⑩ 亀山真典、陰山聡、インヤン格子と多重格子法を用いた 3 次元球殻マントル対流シミュレーションコードの開発、日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (平成 19 年 5 月 23 日、千葉)
- ⑪ 中久喜伴益、多川道雄、亀山真典、プレート・マントル対流結合系の数値シミュレーション：沈み込みの開始からスタグナントスラブの形成まで、日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (平成 19 年 5 月 20 日、千葉)

[図書] (計 3 件)

- ① M. Kameyama, Simulation Studies of Solid Earth Dynamics on the Earth Simulator -- Theoretical Backgrounds, Tools and Outcrops --, In S. Maruyama and T. Hashida, editors, The Earth Simulator, volume 8 of The 21st Century COE Program International COE of Flow Dynamics Lecture Series, pages 83-125. Tohoku University Press, 2008.
- ② D. A. Yuen, C. Matyska, O. Cadek and M. Kameyama, The dynamical influences from physical properties in the lower mantle and post-perovskite phase transition, In K. Hirose, J. Brodholt, T. Lay and D. A. Yuen, editors, Post-Perovskite: The Last Mantle Phase Transition, Geophysical Monograph. pages 249-270, American Geophysical Union, 2007.
- ③ D. A. Yuen, M. Monnereau, U. Hansen, M. Kameyama, and C. Matyska, Dynamics of superplumes in the lower mantle, In D. A. Yuen, S. Maruyama, S. Karato, and B. F. Windley, editors, Superplumes: Beyond Plate Tectonics. pages 239-267, Springer, 2007.

[その他]

ホームページ等

研究代表者のホームページ

<http://www.sci.ehime-u.ac.jp/~kameyama/>
以下「自作ソフトウェア」より、本研究で開発した 3 次元マントル対流プログラムへのアクセスが可能である。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀山 真典 (KAMEYAMA MASANORI)
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授
研究者番号：70344299

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし