

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340127

研究課題名(和文) 固液2相系・多成分系を扱う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 Three-dimensional Simulation Programs of Mantle Convection with Multiple Phases and/or Components

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円、(間接経費) 1,950,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究代表者が中心となって開発してきたマントル対流の3次元シミュレーションプログラムを発展させ、固液2相系・多成分系へ拡張し、さらには超高温・超高压力条件下でのマントル物質の流動を熱力学に正しい形で取り扱うことを可能にした。このプログラムを用いたシミュレーションにより、(i) マントル内の化学的不均質構造の発達過程、(ii) マントル遷移層に停滞するスラブと「大きなマントルウェッジ (BMW)」のダイナミクス、(iii) 巨大地球型惑星「スーパー地球」のマントル対流、などに代表される固体地球惑星科学の諸問題に関する重要な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study we have developed three-dimensional simulation programs of mantle convection with multiple phases and/or components under extreme conditions with high temperature and pressure, by combining and improving a suite of numerical programs based on our own algorithm with an excellent performance. The new suite enabled us to conduct numerical simulation studies on the mantle dynamics of terrestrial planets including (i) the development of chemical heterogeneities in the Earth's deep mantle, (ii) the flows in the "Big Mantle Wedge" (BMW) above the stagnant slabs in the mantle transition zone, and (iii) the fundamental roles of adiabatic compression in the thermal convection in the mantles of massive "super-Earths".

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 熱・組成対流 浸透流 沈み込み帯 断熱圧縮

## 1. 研究開始当初の背景

近年、マントル対流の分野でも3次元モデルによるシミュレーション研究がようやく主流になりつつある。その一方、地球マントルの内部にいくつも存在する特異な構造の成因を物質科学的視点から解釈するにあたり、マントル物質の固液2相系・多成分系としての性質を熱力学的に正しい形で考慮することの重要性が高まっている。しかしこの3次元シミュレーションには高い計算負荷が求められるため、これまでのシミュレーション研究では残念なことに、重要な素過程のモデル化に大胆な近似が施されているものが多いのが実状であった。同様に、近年さまざまな太陽系外惑星が発見されたことにより、マントル対流シミュレーションの「守備範囲」が地球より大きな地球型惑星にまで広がってきているにもかかわらず、そこで期待される超高温かつ超高圧力条件下でのマントル物質の流動を熱力学的に正しい形で取り扱っているものが極めて少なかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的の1つは、固液2相系・多成分系流体のマントル対流の3次元シミュレーションの基盤技術を構築することである。本研究代表者にはこれまでに512×512×128あるいは1024×1024×256のメッシュ分割という、世界最高レベルの空間解像度を用いた3次元の大規模計算を行ってきた実績があるが、その実現には計算機ハードウェアの進歩もさることながら、自ら開発した3次元流れ場解法アルゴリズム(ACuTE法)の優れた性能が決定的に重要であった。この流れ場解法アルゴリズムの性能を生かすことによって、近似の度合を下げた3次元固液2相系・多成分系流体のシミュレーションを実施することが、本研究のもう1つの目的である。

## 3. 研究の方法

固液2相系・多成分系マントル対流3次元シミュレーションプログラムの開発には、ACuTE法を用いて構築された3次元箱型プログラムをベースとし、これに必要な機能を順次追加していくことによって実施する。また開発したプログラムを用いて、固体地球惑星のマントルダイナミクス分野のいくつかのテーマに焦点を当てたシミュレーション研究を実施する。

## 4. 研究成果

本研究で実施した具体的な作業は、技術開発を主とするものとシミュレーション研究を主とするものの2つに大別される。以下では各々の成果について記す。

### 4.1 技術開発

#### 4.1.1. 移流方程式ソルバ

本研究では異なる2種類の移流方程式ソルバを整備し、3次元対流計算プログラムに導入した。まず1つは本研究の代表者らが共同で開発した、CIP-CSLR法に基づく方法であり、解析解と数値解の比較によりその有効性も確認したほか、本研究で実施する2成分からなる混合流体の熱・組成対流シミュレーションの基盤的ツールとして活用されている。もう1つは、FCT法によるもので、このソルバは発散を伴う流れ場による物理量の輸送をうまく取り扱うことができる。その結果Darcy則に基づく固相と液相の相対運動の計算、及び2相系流体の運動と熱対流運動のカップリングがある場合の求解が可能になった。

#### 4.1.2 固液2相の相対運動のモデル化

ここでは固相に対する液相の相対運動を浸透流としてモデル化する方法を採用した。なおこの取り扱いの基本となる手法は1次元の剪断帯モデルにも適用され、地球科学的問題に対する有効性も実証済である。加えて、固相と液相の両方がそれぞれに運動する状況の取り扱いを可能にした。この際、固相の運動は、固相と液相の混合比の違いによる密度変化によって駆動されるものと仮定している。液相が固相より軽い場合と重い場合、及び浸透流の効果が大きい場合と小さい場合、のそれぞれの状況でテスト計算を行い、プログラムの正常動作が確認できた。

#### 4.1.3 体積変化を伴う固相の流れ場ソルバ

ベースとなるACuTE法を用いた3次元箱型プログラムのうち、流れ場解法の求解ルーチンを改良し、(圧縮による密度変化の効果を無視した)ブシネスク近似のみならず非弾性流体近似に基づいた場合の取り扱いを可能にした。これと合わせて、断熱圧縮による温度変化の効果を熱力学的に整合的な手法で取り入れることにより、静水圧下の強い断熱圧縮の効果がある場合のマントル対流のモデル化を可能にした。

#### 4.1.4 異方的な粘性率の取扱い

多成分流体の成分ごとの力学的性質の違いを反映するものの1つとして「粘性率の異方性」を考慮した3次元熱対流シミュレーションプログラムを開発した。このプログラムはマントル対流の3次元シミュレーションでは世界で初めて粘性率に異方性がある場合の取り扱いを可能にしたものであり、線形解との比較によりその正常動作を確認できた。

### 4.2 シミュレーション研究

#### 4.2.1 体積変化を伴う固相の流れ場ソルバ

3次元箱型プログラムを用いて、静水圧下での強い断熱圧縮の影響を考慮した熱対流シミュレーションを実施した。並行して行った半解析的手法による結果とシミュレーション

ョン結果とを比べ合わせることにより、近年太陽系外に相次いで発見されている巨大地球型惑星「スーパー地球」内のマントル内の熱対流の様式が地球のそれと大きく異なることを見出した。この成果は3編の論文として既に掲載済みであり、さらに2編が投稿中・投稿準備中である。

#### 4.2.2 沈み込み帯の固相流れ場モデリング

今後の固液2相系でのシミュレーション研究の適用事例の1つとして、プレート沈み込み帯に注目したモデリングを実施した。ここではまずプレート沈み込みによって駆動される固体マントルの流れ場を求める手法を確立し、予備的なシミュレーションを実行することにより、マントル遷移層で停滞するスラブの上部も含んだ「大きなマントルウェッジ (BMW)」内で上昇ブルームが発生するまでの新たなシナリオを提案した。なおこの成果をまとめた論文は既に掲載されたほか、さらに1編が投稿準備中である。

#### 4.2.3 2成分系流体の熱・組成対流

地表面付近で生じる火成活動によって起こる物質分化の効果を(擬似的にはあるが)取り入れたマントル対流シミュレーションを系統的に実施した。これは本研究の代表者らが共同で開発したCIP-CSLR法に基づく高度な移流方程式ソルバを用いて、密度の異なる2成分からなる混合流体の熱・組成対流シミュレーションプログラムを高度化したものにあたる。その結果、現在の地球で想定される程度の量の海洋性地殻の沈み込み・堆積の効果のみでは、地球内部で観察されているLarge Low Shear Velocity Provinces (LLSVPs)様の大規模な化学的不均質構造を形成するには不十分であることを指摘した。この成果は現在、地表面に「大陸」という力学的性質の異なる構造の影響も加味したシミュレーションに発展し、これらの結果を踏まえた上で論文のとりまとめを進めている。

#### 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13件)

1. C. Tachinami, M. Ogawa, and M. Kameyama, Thermal convection of compressible fluid in the mantle of super-Earths, *Icarus*, 231, 377-384, 2014. (査読有)
2. A. Miyauchi, M. Kameyama, and H. Ichikawa, Linear stability analysis on the influences of the spatial variations in thermal conductivity and expansivity on the flow patterns of thermal convection with strongly temperature-dependent viscosity, *Journal of Earth Science*, 25, 126-139, 2014. (査読有)
3. T. Miyagoshi, C. Tachinami, M. Kameyama, and M. Ogawa, On the vigor of mantle convection in super-Earths, *Astrophysical Journal*, 780:L8, 5 pages, 2014. (査読有)
4. M. Kameyama, and Y. Kinoshita, On the stability of thermal stratification of highly compressible fluids with depth-dependent physical properties: Implications for the mantle convection of super-Earths, *Geophysical Journal International*, 195, 1443-1454, 2013. (査読有)
5. A. Miyauchi, and M. Kameyama, Influences of the depth-dependence in thermal conductivity and expansivity on thermal convection with temperature-dependent viscosity, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 223, 86-95, 2013. (査読有)
6. H. Ichikawa, M. Kameyama, and K. Kawai, Mantle convection with continental drift and heat source around the mantle transition zone, *Gondwana Research*, 24, 1080-1090, 2013. (査読有)
7. H. Ichikawa, K. Kawai, S. Yamamoto, and M. Kameyama, Supply Rate of Continental Materials to the Deep Mantle through Subduction Channels, *Tectonophysics*, 596, 46-52, 2013. (査読有)
8. M. Kameyama, H. Ichikawa, and A. Miyauchi, A Linear Stability Analysis on the Onset of Thermal Convection of a Fluid with Strongly Temperature-dependent Viscosity in a Spherical Shell, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 27, 21-40, 2013. (査読有)
9. M. Kameyama, and R. Nishioka, Generation of ascending flows in the Big Mantle Wedge (BMW) beneath Northeast Asia induced by retreat and stagnation of subducted slab, *Geophysical Research Letters*, 39, L10309, 2012. (査読有)
10. K. Ujiie, M. Kameyama, and A. Yamaguchi, Geological record of thermal pressurization and earthquake instability of subduction thrusts, *Tectonophysics*, 485, 260-268, 2010. (査読有)
11. 亀山 真典, マントル対流 -- 「固体」地球内部の「流れ」-- 日本機械学会誌, 116 (1136), 478-480, 2013. (査読無)
12. 亀山 真典, マントル対流の流体力学, 油空圧技術, 51 (13), 17-22, 日本工業出版, 2012. (査読無)

13. 亀山 真典, マントル対流 -- 地球深部で「流れる」「固体」--, 日本流体力学会誌「ながれ」, 30, 305-310, 2011. (査読無)

[学会発表](計 29 件)

1. H. Ichikawa, M. Kameyama, H. Senshu, K. Kawai, and S. Maruyama, Influence of Majorite on mantle convection, 第 2 回地球生命研究所 (ELSI) 国際シンポジウム (平成 26 年 3 月 24 日~26 日、東京)
2. H. Ichikawa, M. Kameyama, K. Kawai, Mantle convection simulation with heat source around the mantle transition zone, The 3rd Global-COE International Symposium on Deep Earth Mineralogy (平成 25 年 3 月 4 日、松山)
3. M. Kameyama, and Y. Kinoshita, On the stability of thermal stratification of highly compressible fluids with depth-dependent physical properties: Implications for the mantle convection of super-Earths, The 3rd Global-COE International Symposium on Deep Earth Mineralogy (平成 25 年 3 月 4 日、松山)
4. T. Miyagoshi, C. Tachinami, M. Kameyama, and M. Ogawa, Mantle convection in super-Earths with high compressibility, high Rayleigh number, and strongly temperature-dependent viscosity, The 3rd Global-COE International Symposium on Deep Earth Mineralogy (平成 25 年 3 月 4 日、松山)
5. A. Miyauchi, M. Kameyama, and H. Ichikawa, Influences of the spatial variation in thermal conductivity and thermal expansivity coefficient on the horizontal / vertical flow patterns in the mantle, The 3rd Global-COE International Symposium on Deep Earth Mineralogy (平成 25 年 3 月 4 日、松山)
6. A. Miyauchi, M. Kameyama, and H. Ichikawa, Numerical investigations of effects of spatial variations in physical properties on the mantle convection patterns, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (平成 25 年 5 月 19 日、千葉)
7. M. Kameyama, On the stability of thermal stratification of highly compressible fluids with depth-dependent physical properties, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (平成 25 年 5 月 19 日、千葉)
8. 宮腰 剛広、立浪 千尋、亀山 真典、小河 正基, 高レイリー数、高圧縮性、及び強い温度依存粘性を考慮したスーパー地球のマントル対流シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (平成 25 年 5 月 20 日、千葉)
9. 亀山 真典、宮腰 剛広、古市 幹人、中川 貴司、柳澤 孝寿、中久喜 伴益、小河 正基, マントル対流シミュレーションの HPC: これまでとこれから, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (平成 25 年 5 月 20 日、千葉)
10. 立浪 千尋、小河 正基、亀山 真典, スーパー地球のマントル対流の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (平成 25 年 5 月 20 日、千葉)
11. H. Ichikawa, M. Kameyama, and K. Kawai, Mantle convection simulation with subducted continental materials as a heat source, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (平成 25 年 5 月 21 日、千葉)
12. M. Kameyama, Ascending flows in the Big Mantle Wedge (BMW) beneath northeast Asia induced by retreat and stagnation of subducted slab, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (平成 25 年 5 月 23 日、千葉)
13. 亀山 真典, マントル対流の数値シミュレーション: その数理的背景から成果の概観まで, 第 42 回数値解析シンポジウム [特別講演] (平成 25 年 6 月 13 日、松山)
14. M. Kameyama, Generation of ascending flows in the Big Mantle Wedge (BMW) beneath northeast Asia induced by retreat and stagnation of subducted slab, Asia Oceania Geosciences Society 2013 Annual Meeting (平成 25 年 6 月 28 日、オーストラリア・ブリスベン)
15. 小河 正基、亀山 真典, 惑星内部研究における計算科学と計算機, 計算惑星科学シンポジウム (平成 25 年 11 月 23 日、石垣島)
16. 市川 浩樹、河合 研志、亀山 真典, 遷移層付近の熱源が大陸移動に与える影響, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (平成 24 年 5 月 21 日、千葉)
17. M. Kameyama and R. Nishioka, Generation of ascending flows in the Big Mantle Wedge (BMW) induced by retreat and stagnation of subducted slabs, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (平成 24 年 5 月 22 日、千葉)
18. 宮内 新、亀山 真典、市川 浩樹, マントル物性の空間変化が対流パターンに与える影響に関する数値流体力学的研究, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (平成 24 年 5 月 23 日、千葉)
19. A. Miyauchi, M. Kameyama, and H. Ichikawa, Numerical investigations of effects of spatial variations in physical properties on the mantle convection patterns, 13th Symposium on

- Study of the Earth's Deep Interior (2012年7月6日、英国・リーズ)
20. M. Kameyama and R. Nishioka, Generation of ascending flows in the Big Mantle Wedge (BMW) induced by retreat and stagnation of subducted slabs, Conference on Geophysics of slab dynamics (平成24年8月20日、韓国・済州島)
  21. 立浪 千尋、小河 正基、土屋 卓久、亀山 真典, スーパー地球のマントル対流: 断熱圧縮の効果, 日本惑星科学会 2012年大会 (平成24年10月26日、神戸)
  22. H. Ichikawa, M. Kameyama, K. Kawai, Mantle convection with continental drift and heat source around the mantle transition zone, American Geophysical Union Fall Meeting 2012 (平成24年12月3日、サンフランシスコ)
  23. H. Senshu, M. Kameyama, H. Ichikawa, S. Maruyama, The role of piled-up granite at the transition zone on the evolution of thermal convection pattern beneath a supercontinent, American Geophysical Union Fall Meeting 2012 (平成24年12月3日、サンフランシスコ)
  24. 亀山 真典, 化学的不均質と大陸移動の影響を考慮した2次元マントル対流シミュレーション, 東京大学地震研究所特定共同研究(B)「地球内部境界層の構造と全地球ダイナミクス」研究集会 (平成23年3月11日、東京)
  25. 市川 浩樹、河合 研志、亀山 真典、土屋 卓久, マントル深部へ沈み込む大陸地殻の量の推定, 日本地球惑星科学連合2011年大会 (平成23年5月23日、千葉)
  26. M. Kameyama and M. Fukuda, Two-Dimensional numerical simulations of mantle convection with chemical heterogeneity and continental drift, 日本地球惑星科学連合2011年大会 (平成23年5月25日、千葉)
  27. A. Miyauchi, M. Kameyama and H. Ichikawa, Numerical investigations of the effects of spatial variations in physical properties on the mantle convective patterns, 日本地球惑星科学連合2011年大会 (平成23年5月26日、千葉)
  28. H. Senshu, M. Kameyama, H. Ichikawa and S. Maruyama, The Effect of Subducted Granite on the Thermal Convection of Mantle, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting (平成23年12月9日、サンフランシスコ)
  29. H. Ichikawa, K. Kawai and S. Yamamoto and M. Kameyama, Supply Rate of Continental Materials to the Deep Mantle, American Geophysical Union

2011 Fall Meeting (平成23年12月9日、サンフランシスコ)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
研究代表者のホームページ  
<http://earth.sci.ehime-u.ac.jp/~kameyama/>  
以下の「自作ソフトウェア」より、本研究のシミュレーションの基盤となった3次元対流シミュレーション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