

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03724

研究課題名(和文)系外地球型惑星マントル対流シミュレーション:大きさ・組成・圧縮の効果の統合的理解

研究課題名(英文) Numerical experiments of mantle convection of extrasolar terrestrial planets

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・教授

研究者番号：70344299

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：大きさや平均組成の異なる多様な地球型惑星のマントルダイナミクスの統合的な理解を目指して、数値シミュレーションによる検討を行った。地球質量と比べて約4倍以上の質量をもつ地球型惑星では、断熱圧縮がマントルの対流様式に大きく影響を及ぼすことを見出した。さらに、対流容器たるマントルの「まるい」形状によって断熱圧縮の効果の強さは変化するものの、特に地球の10倍の質量を持つ惑星内では、強い断熱圧縮の効果と物性(粘性率、熱伝導率など)の空間変化との相互作用によって「深部成層圏」とでもいべき温度の安定成層で特徴づけられる構造がマントルの最深部に発達する可能性があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系外地球型惑星の発見によって、太陽系内には存在しえない大きさ・平均組成をもつ地球型惑星を想定した研究の現実味だけでなく、「地球のほかに生命を宿す星があるか?」という宇宙生物学的な興味も高められた。多様な地球型惑星のマントル対流の様相を調べることは、固体地球物理学の観点からこの問いに答えることとなる。なぜならマントルのダイナミクスは惑星表層のテクトニクスを支配すると同時に、その下にある金属核の冷却過程やダイナモ作用にも影響することにより、その惑星の表層環境が生命の発生・維持に適しているかを規定することになるからである。

研究成果の概要(英文)：A series of numerical experiments had been carried out in order to obtain a comprehensive understanding of mantle dynamics of terrestrial planets with various sizes and mean compositions. The effect of adiabatic compression turned out to be significant on the mantle dynamics of terrestrial planets whose mass is more than four times the Earth's. In addition, a structure called "deep stratosphere" of stable thermal stratification can be formed at the lowermost part of the mantle of massive planets with 10 times the mass of the Earth's owing to the interaction between the adiabatic compression and spatial variations in physical properties (such as viscosity and thermal conductivity), although the strength of the effect of adiabatic compression varies depending on the spherical geometry of the convection vessel of mantle.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：太陽系外地球型惑星 マントル対流 数値シミュレーション 断熱圧縮

1. 研究開始当初の背景

多種多様な地球型惑星が太陽系外に発見されたことで、太陽系内には存在しえない大きさ・平均組成をもつ地球型惑星を想定した固体地球惑星物理学的研究の意義が高められたことに加え、「地球のほかにも生命を宿す星があるか?」という宇宙生物学的な興味の範囲をも拡大されることとなった。

2. 研究の目的

大きさや平均組成の異なる太陽系内外の多様な地球型惑星のマンテルダイナミクスを整合的に理解することを究極の目標として、惑星の大きさ、マンテル物質の物性値やマンテルの幾何形状(マンテルの厚みや中心核の大きさ)がマンテル対流の様式に与える影響を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

非弾性流体近似に則って定式化した数値流体力学モデルを用いて、地球型惑星のマンテル対流のシミュレーションを系統的に実施する。シミュレーションには2次元箱型形状あるいは(半)円環形状のモデルを主に使用するが、問題によっては半径方向1次元モデルによる半解析的な方法も併用する。

4. 研究成果

(1) マンテル対流に与える断熱圧縮の効果、および惑星サイズによる違い

まず最初に、惑星サイズの違いによってマンテルの熱対流の描像がどのように変化するかを調べた(Miyagoshi et al., 2018)。その結果の一例を図1に示す。ここでは、惑星の質量  $M$  を地球の質量  $M_{\text{Earth}}$  の1倍から最大で約10倍まで変化させた条件で、下部からの加熱のみによって駆動される熱対流のシミュレーションを行っている。ただし温度依存性によってマンテル内にもたらされる粘性率のコントラスト  $\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}}$  はいずれの場合も  $10^5$  で一定にとっている。

図より  $M$  が増大するにつれて、核-マンテル境界から上昇する高温のプルームの活動性が著しく弱まっていることが分かる。この原因は、流体塊の上昇に伴う断熱膨張に起因する温度変化によって、高温のプルームのもつ周囲との温度差が失われることにあると理解できる。これとは対照的に、表層から沈降する低温のプルームの活動性は  $M$  が増大してもほとんど失われていないのだが、この違いは温度が低いと断熱温度勾配が緩やかになり、流体塊の下降に伴う断熱圧縮による温度上昇の影響がさほど大きくないことを反映している。またこのような断熱圧縮の効果は、惑星の質量  $M$  が地球質量  $M_{\text{Earth}}$  の4倍程度以上の大きさになると顕著になってくることも見てとれる。加えて対流の熱輸送効率も、ブシネスク近似に基づく予測と比べて大幅に低下していることも分かった。

また本研究の結果からは、惑星の質量  $M$  が大きくなるにつれて、表層に発達する低温の固い流体の層(リソスフェア)が厚くなる一方で、対流の流れの速さはほとんど変化しないことが結論づけられる。この結果は、断熱圧縮の効果を伴わないブシネスク近似に基づいた予測とは大きく異なるものであり、スーパー地球のマンテル対流の様相やプレート運動の起こりやすさを検討する際には断熱圧縮の

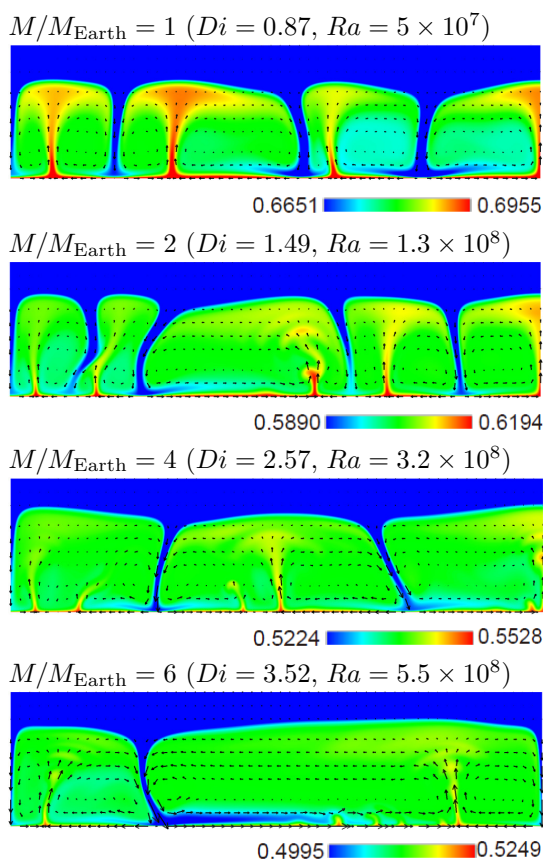


図1 Snapshots of the distribution of the non-dimensional potential temperature  $T_{\text{pot}}$  (color) and fluid velocity (arrows) at various values of the mass  $M$  of the terrestrial planets. Note that the colorscale of  $T_{\text{pot}}$  and the thickness  $d$  of the convecting layer differ from panel to panel depending on  $M$ .

効果を考えることが決定的に重要であることを意味している。

(2) 強い断熱圧縮のもとでの熱対流の起こり始めに関する線形解析、および対流容器の形状による違い

次に、物性が空間的に大きく変化する高圧縮性流体の熱対流の起こり始めに関する線形解析を行った (Kameyama, 2021)。対流容器の形状として、2次元箱型、2次元円環形状、3次元球殻形状の3通りを考える。モデル流体の熱力学量 (熱膨張率、基準密度) の深さ方向の変化は、地球の10倍の質量を持つ巨大地球型惑星「スーパー地球」のマントル物質を想定して与える。いっぽう熱伝導率  $k$  と粘性率  $\eta$  はそれぞれ深さと温度に指数関数的に依存すると仮定している。

一連の解析の結果、粘性率の温度依存性と熱伝導率の深さ依存性が強い場合では、熱対流の臨界レイリー数は  $10^8$  から  $10^9$  のオーダーとなることが分かった。この値は地球の10倍の質量をもつ「スーパー地球」のマントル対流のレイリー数の見積もりと近いことから、地球と似通った組成をもつ「スーパー地球」のマントル対流は臨界条件に非常に近い stagnant-lid 型になっている可能性が高いことが示される。また、強い断熱圧縮の効果のもとでの stagnant-lid 型の熱対流の構造は、熱伝導率の深さ依存性の強さの違いによって大きく異なることも示された。3次元球殻形状で得られた熱対流の臨界状態の例を図2に示す。図のいずれの場合も粘性率の強い温度依存性 ( $\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}} = 10^8$ ) によって stagnant lid (固くて動かない「ふた」) が低温の外側境界沿いに厚く発達しているが、とりわけ熱伝導率の深さ依存性の強い場合 ( $k_{\text{bot}}/k_{\text{top}} = 100$ ) には流れの弱い層が高温の内側境界直上にも形成されることが分かった。詳細な解析の結果、粘性率の低い深部の高温領域にこのような層が形成される理由は、温度成層の安定化にあることが理解できる。深さ方向への熱伝導率の増加が十分に大きいと鉛直方向の温度勾配が緩やかとなるが、それが断熱温度勾配よりも緩やかとなった場合には温度成層は安定化し、鉛直方向の流れを大きく妨げるようになる。さらに、このような温度の安定成層構造の発達は対流容器の形状が「まるい」ほど妨げられるが、その原因が深部ほど表面積が小さくなることによって鉛直方向の温度勾配が急になった結果、温度成層の安定性が低下したためであることが示された。これらのことから、熱伝導率が深さ (あるいは圧力) によって強く増加する場合には、巨大地球型惑星「スーパー地球」のマントルにおける stagnant-lid 型対流では (対流容器の「まるい」形状の影響によってその発生が抑制される傾向はあるものの) 流れの弱い層がマントル底部にも発達している可能性が推測される。

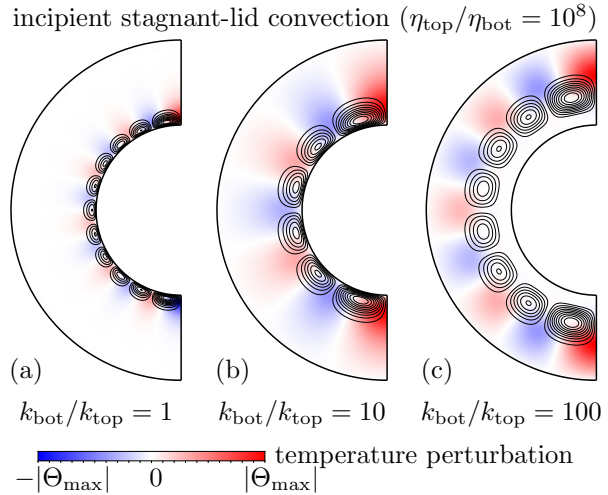


図2 Schematic illustrations on the meridian planes of the structures of incipient flows obtained for the cases with strong temperature-dependent viscosity  $\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}} = 10^8$  in the three-dimensional spherical shell geometry together with the values of the depth-dependence in thermal conductivity (a)  $k_{\text{bot}}/k_{\text{top}} = 1$ , (b) 10 and (c) 100. Shown in color are the distributions of infinitesimal perturbations in temperature  $T'$  normalized by their maxima  $\Theta_{\text{max}}$ . For the color scale for the distribution of  $T'/\Theta_{\text{max}}$ , see the scale bar at the bottom of the figure. Shown in solid lines are the contour lines of a “potential”  $\psi$  of the mass flux  $\bar{\rho}\mathbf{v}'$ . The contour lines are drawn for  $0.1 \leq |\psi/\psi_{\text{max}}| \leq 0.9$  with the interval of 0.1, where  $\psi_{\text{max}}$  is the maximum of  $|\psi|$ .

(3) 強い断熱圧縮のもとでの2次元熱対流シミュレーション、および「深部成層圏」発達の可能性

(2) の線形解析で得られた理論的な予測に基づいて、2次元 (半) 円環領域内での高圧縮性流体の熱対流の数値シミュレーションを行った (Kameyama, 2022)。モデル流体の物性やその変化は Kameyama



(2021) の線形解析と同じものを用いている。一連の数値シミュレーションの結果、断熱温度変化と粘性率・熱伝導率の空間的な変化の相互作用によって引き起こされた特徴的な流れ構造が存在することを明らかにした。図 3 に結果の一例を示す。すなわち、粘性率の温度依存性が強く、かつ熱伝導率が深さとともに大きく増加する場合には、マントル最上部には低温かつ高粘性の stagnant lid が発達する一方で、マントルの最深部には「深部成層圏」とでもいうべき安定な温度成層が形成されることが分かった。この「深部成層圏」では、高温かつ低粘性であるにもかかわらず、流体の運動 (特に鉛直方向の運動) は非常に弱くなっている。また Kameyama and Yamamoto (2018) の 2 次元箱型モデルの結果との比較から、本研究の 2 次元 (半) 円環形状の実験では「深部成層圏」の発生が抑制される傾向があることも確認できた。さらにこれらの結果は (2) で実施した線形解析の結果と極めて調和的であることから、3 次元球殻容器内のマントル対流では「深部成層圏」の発生がいっそう抑制されることが期待される。

以上の成果をまとめると、大きさや平均組成の異なる多様な地球型惑星のうち、地球質量と比べて約 4 倍以上の質量をもつ地球型惑星では、断熱圧縮がマントルの対流様式の理解に極めて重要であることを見出した。それに加えて、熱膨張率や基準密度といった熱力学量だけでなく、粘性率や熱伝導率といった物性もが空間的に大きく変化することが想定される巨大地球型惑星「スーパー地球」のマントル

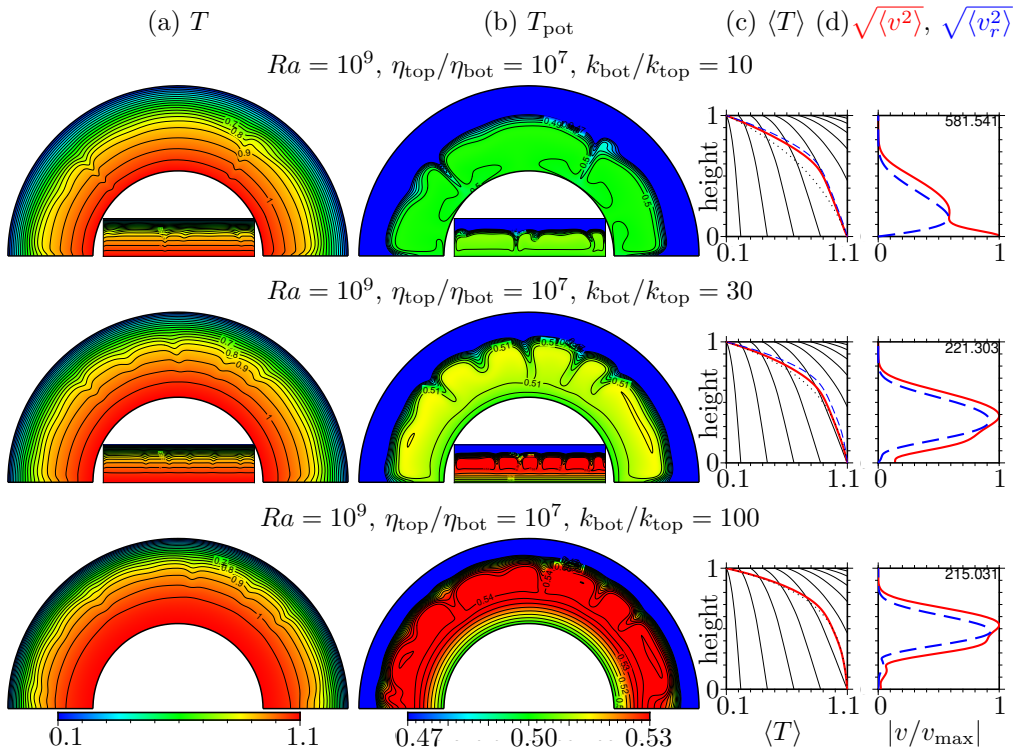


図 3 Comparison of overall structures of the thermal convection calculated with various values of  $k_{\text{bot}}/k_{\text{top}}$  together with  $Ra = 10^9$  and  $\eta_{\text{top}}/\eta_{\text{bot}} = 10^7$ . (a) The distributions of temperature  $T$ . The contour interval is 0.05. The colour scale is indicated at the bottom of the figure. (b) The distributions of potential temperature  $T_{\text{pot}}$ . The colour scale is indicated at the bottom of the figure. The contour lines for  $T_{\text{pot}}$  are shown at the interval of 0.005 only in the range of  $T_{\text{pot}} \geq 0.47$ . (c) Plots against dimensionless height from the bottom boundary of the horizontally averaged temperature  $\langle T \rangle$  (thick red lines) at the height of  $r$ . Plotted by the thin blue dashed lines are those obtained for the calculations in 2-D Cartesian box. Also shown for comparison by thin black lines are the plots of several adiabats against  $r$ , while by dotted black lines are the radial profiles of temperature by steady 1-D heat conduction in the radial direction. (d) Plots against  $r$  of the root-mean-squares of the magnitude of (red) velocity vector  $\sqrt{\langle v^2 \rangle}$  and the radial velocity  $\sqrt{\langle v_r^2 \rangle}$  at the height  $r$ , normalized by the maximum values  $v_{\text{max}} = \max(\sqrt{\langle v^2 \rangle})$  for given conditions, whose values are indicated in the figure. Also shown for comparison by the insets for  $3 \leq k_{\text{bot}}/k_{\text{top}} \leq 30$  in (a) and (b) are the distributions obtained for the calculations in 2-D Cartesian box by Kameyama and Yamamoto (2018).

ダイナミクスに対しては、対流容器の「まるい」形状の効果が、大局的な熱構造の変化を介して熱対流の構造にも大きく影響を及ぼす可能性があることを示した。

今後は、マントル内部に分布する放射性元素による発熱や、公転の際の潮汐加熱など、惑星内部の大局的な熱構造に影響すると期待される効果をさらに取り入れたシミュレーションを行い、多様な太陽系外地球型惑星のマントルダイナミクスの理解の一層の深化を目指したい。その一方で、惑星表面にプレートテクトニクスが起こるか否かがその惑星の居住可能性を規定する可能性が指摘されていることを鑑みれば、低温の惑星表層部分のレオロジー（流動特性）のモデルを高度化し（例えば Miyagoshi et al., 2020）、地球以外の地球型惑星でプレートテクトニクスが発現する条件を検討することや、マントル内に沈み込んだプレートの挙動を解析すること（例えば Tsuchida and Kameyama, 2020）も重要な課題となるであろう。

#### <引用文献>

- ① M. Kameyama and M. Yamamoto. Numerical experiments on thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity: Implications for mantle convection of super-Earths. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 274:23-36, 2018. (doi:10.1016/j.pepi.2017.11.001)
- ② T. Miyagoshi, M. Kameyama, and M. Ogawa. Effects of adiabatic compression on thermal convection in super-earths of various sizes. *Earth, Planets and Space*, 70:200, 2018. (doi:10.1186/s40623-018-0975-5)
- ③ T. Miyagoshi, M. Kameyama, and M. Ogawa. Tectonic plates in 3D mantle convection model with stress-history-dependent rheology. *Earth, Planets and Space*, 72:70, 2020. (doi:10.1186/s40623-020-01195-1)
- ④ M. Tsuchida and M. Kameyama. 2-D numerical simulations on formation and descent of stagnant slabs: important roles of trench retreat and its temporal change. *Front. Earth Sci.*, 8:117, 2020. (doi:10.3389/feart.2020.00117)
- ⑤ M. Kameyama. Linear analysis on the onset of thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity in spherical geometry: Implications for the mantle convection of super-Earths. *Earth, Planets and Space*, 73:67, 2021. (doi:10.1186/s40623-021-01499-w)
- ⑥ M. Kameyama. Numerical experiments on thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity in 2-D cylindrical geometry: implications for mantle convection of super-Earths. *Geophys. J. Int.*, 231(2):1457-1469, 2022. (doi:10.1093/gji/ggac259)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kameyama Masanori	4. 巻 231
2. 論文標題 Numerical experiments on thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity in 2-D cylindrical geometry: implications for mantle convection of super-Earths	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1457 ~ 1469
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggac259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kameyama Masanori	4. 巻 73
2. 論文標題 Linear analysis on the onset of thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity in spherical geometry: implications for the mantle convection of super-Earths	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01499-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Miyagoshi Takehiro, Kameyama Masanori, Ogawa Masaki	4. 巻 72
2. 論文標題 Tectonic plates in 3D mantle convection model with stress-history-dependent rheology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01195-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tsuchida Mana, Kameyama Masanori	4. 巻 8
2. 論文標題 2-D Numerical Simulations on Formation and Descent of Stagnant Slabs: Important Roles of Trench Migration and Its Temporal Change	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/feart.2020.00117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Miyagoshi Takehiro, Kameyama Masanori, Ogawa Masaki	4. 巻 70
2. 論文標題 Effects of adiabatic compression on thermal convection in super-Earths of various sizes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 8 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-018-0975-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計34件(うち招待講演 4件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 亀山 真典
2. 発表標題 強い圧縮性を考慮したスーパー地球マントル内熱対流の2次元数値シミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荷見 拓生、亀山 真典、小河 正基
2. 発表標題 三次元球殻モデルによる月内部マントルの対流安定性についての数値実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳澤 孝寿、亀山 真典、小河 正基
2. 発表標題 対流する固体のマントルにおけるマグマの生成・移動・集中・再固結の三次元モデリング
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土田 真愛、亀山 真典
2. 発表標題 上盤プレートの力学的性質によって誘起されるプレート沈み込み帯ダイナミクスの多様性に関する2次元数値シミュレーション研究
3. 学会等名 海洋科学の未来とレジリエンスサイエンスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀山 真典
2. 発表標題 惑星内部対流計算でのチューニング問題点 (仮)
3. 学会等名 富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀山真典、宮腰剛広、柳澤孝寿、小河正基
2. 発表標題 マントル対流の数値モデリング: 月から地球まで、さらにスーパー地球まで
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀山真典
2. 発表標題 擬似圧縮法を用いた三次元球殻マントルにおける対流の数値シミュレーション: 月への応用
3. 学会等名 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 荷見拓生、小河正基、亀山真典
2. 発表標題 三次元球殻プログラムによる月内部マン托ルの対流安定性についての計算実験
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年度秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 土田真愛、亀山真典
2. 発表標題 2次元円環状モデルを用いたスラブ沈み込みに伴う上盤プレート挙動とマン托ル内の流れに関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀山真典
2. 発表標題 惑星内部対流計算でのチューニング問題点 (仮)
3. 学会等名 富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮腰剛広、亀山真典、小河正基
2. 発表標題 マン托ル対流とプレートのダイナミクス
3. 学会等名 第2回海洋科学の未来と減災科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 土田真愛、亀山真典
2. 発表標題 Numerical experiments on stagnation and avalanche of subducting slabs: Important roles of trench migration and its temporal change
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀山真典、小河正基、宮腰剛広、柳澤孝寿
2. 発表標題 マントル対流の数値モデリング -月・プレートテクトニクス・スーパー地球を例にして-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮腰 剛広、亀山 真典、小河 正基
2. 発表標題 スーパーアースのマントル対流シミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Miyagoshi, Masanori Kameyama, Masaki Ogawa
2. 発表標題 Tectonic plates in 3D-numerical models of mantle convection with stress-history-dependent viscosity
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山 真典
2. 発表標題 強い圧縮性をもつマンツルの熱対流シミュレーション: スーパー地球のマンツル対流に対する物性変化と内部発熱の影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山 真典
2. 発表標題 回転流体における3次元熱対流シミュレーションの流れ構造の解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山 真典、小河 正基、宮腰 剛広、柳澤 孝寿
2. 発表標題 火成活動とプレートテクトニクスの3次元モデリング: 岩石惑星マンツルの熱化学進化の解明に向けた取組み
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeo Kaneko, Tomoeiki Nakakuki, Masanori Kameyama, Hikaru Iwamori
2. 発表標題 Water transport and mixing in the whole-mantle scale convection
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mana Tsuchida, and Masanori Kameyama
2. 発表標題 2-D Numerical simulations on formation and descent of stagnant slabs: important roles of trench migration and its temporal change
3. 学会等名 2019 Ada Lovelace Workshop on Modeling of Mantle and Lithosphere Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小河 正基、亀山 真典
2. 発表標題 マントル対流の数値モデリング -月・プレートテクトニクス・スーパー地球を例にして-
3. 学会等名 公開シンポジウム「京」から「富岳」へ: 大規模シミュレーションが拓く惑星科学の未来
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山 真典、宮腰 剛広、柳澤 孝寿、小河 正基
2. 発表標題 スーパー地球のマントル対流シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山 真典、小河 正基、宮腰 剛広、柳澤 孝寿
2. 発表標題 火成活動とプレートテクトニクスの3次元モデリング: 岩石惑星マントルの熱化学進化の解明に向けた取組み
3. 学会等名 2019年度先端融合研究環 (統合研究領域) シンポジウム 最新科学で迫る地球の起源・月の起源
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山 真典、土田 真愛
2. 発表標題 マントル対流とプレート沈み込みのダイナミクス
3. 学会等名 海洋科学の未来と減災科学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mana Tsuchida and Masanori Kameyama
2. 発表標題 Two-dimensional numerical simulations on the dynamics of cold descending slabs in the mantle: important roles of trench migration
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀山 真典、小河 正基、宮腰 剛広、柳澤 孝寿
2. 発表標題 火成活動とプレートテクトニクスの3次元モデリング：岩石惑星マントルの熱化学進化の解明に向けて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮腰 剛広、亀山 真典、小河 正基
2. 発表標題 粘性率の応力履歴依存を考慮した、プレート運動を伴う3次元マントル対流モデルの開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeo Kaneko, Tomoeiki Nakakuki, Masanori Kameyama, and Hikaru Iwamori
2. 発表標題 Water circulation linking with the mantle convection and hydrous mineral phase changes
3. 学会等名 The 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics (AGMT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mana Tsuchida and Masanori Kameyama
2. 発表標題 Numerical simulations on formation and avalance of stagnant slabs
3. 学会等名 The 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics (AGMT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masanori Kameyama, Mayumi Yamamoto, Mifuyu Kinoshita, Saki Nakamura, Masaya Murata, and Yuya Kinoshita
2. 発表標題 Numerical experiments of mantle convection of massive super-Earths: Roles of interaction between adiabatic temperature change and spatial variations in physical properties
3. 学会等名 The 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics (AGMT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土田 真愛、亀山 真典
2. 発表標題 スラブ挙動に対する海溝後退速度の時間変化の影響に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Masaki Ogawa, Takehiro Miyagoshi, and Masanori Kameyama
2. 発表標題 A three-dimensional numerical model of tectonic plates that develop due to a stress-history dependent rheology
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮腰 剛広、亀山 真典、小河 正基
2. 発表標題 スーパーアースのマンテル対流シミュレーショ
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山 真典
2. 発表標題 強い圧縮性をもつマンテルの熱対流シミュレーション: スーパー地球のマンテル対流に対する物性変化と内部発熱の影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------