

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25287110

研究課題名(和文)地球型惑星のマントル進化：3次元球殻モデルを用いた系統的数値シミュレーション

研究課題名(英文)Mantle evolution in planets: a systematic numerical study based on a three-dimensional spherical model

研究代表者

小河 正基 (Ogawa, Masaki)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：30194450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず二次元モデルを用いた数値シミュレーションにより、火成活動やマントル対流の結果、地球など様々なサイズの惑星においてマントルは45億年の歴史を通じてどのように進化するかを探求した。さらに、この研究で明らかになったマントル対流と火成活動の相互作用やプレートテクトニクスによるマントルの不均質構造形成などの進化の主要な特徴が、三次元球殻マントルにおいても同様に発現するかを解明するため、三次元数値モデルを開発し、将来の惑星進化のリアリスティックなモデリングへの展望を開いた。

研究成果の概要(英文)：We first explored how the mantle evolves through its 4.5 billion year-history in terrestrial planets of various sizes as a consequence of magmatism and mantle convection, based on a series of two-dimensional numerical simulation. Through these works, we identified the elementary processes that dominate mantle evolution such as formation of global scale structure by tectonic plates and a positive feedback that operates between magmatism and upwelling flow of the solid-mantle. Then, we developed three-dimensional numerical models of magmatism and mantle convection including plate tectonics to see if these processes operate in a three-dimensional spherical mantle to shape the mantle evolution in the manner expected from our two-dimensional studies.

研究分野：固体惑星科学

キーワード：マントル進化 火成活動 マントル対流 プレートテクトニクス 比較惑星 数値モデリング

1. 研究開始当初の背景

(1) 1990年代以降活発に行われた人工衛星による月、水星、火星及び金星探査の結果、地表面を岩石で覆われたいわゆる地球型惑星の進化とその惑星のサイズの間に明瞭な相関があることが明らかとなった。すなわち、月や水星のような小型の惑星では火成活動は35億年以上前をピークに減衰し現在はほとんど活動していないのに対して、金星や地球のような大型の惑星では、現在も火成活動やテクトニックな活動は活発に起こっている。サイズがこれら二つのグループの中間にある火星では、火成活動は概ね35億年前までに終息したが、一部ごく最近まで続いた。この系統性は、地球型惑星の内部進化は比較的簡単な物理プロセスにより支配されており、数値シミュレーションによりその全容を解明することが可能であることを示唆している。

(2) 従来この系統性を理解するため、惑星内部の熱収支をモデリングにより見積もるといった研究が世界的になされていた。これは、小型惑星は熱容量が小さいため早く冷えて活動が停止したが大型惑星はその大きな熱容量のためなかなか冷えず現在に到るまで活発な活動が継続したという仮説に基づくものであった。しかし、熱収支の計算から得られるマンツルの平均温度の変遷史をその惑星の火成活動などの活動の歴史と関連づけることは簡単ではなく、当時の研究では憶測の域を出ることはなかった。さらに、観測データに基づく惑星内部の温度の実証的な見積もりは現在の地球でも困難であり、まして過去の月や火星など他の惑星では全く展望が開けず、従来の熱収支のモデルを検証することは不可能であった。

2. 研究の目的

1-(2)に述べた困難を解消し検証可能なマンツル進化モデルを構築するためには、単なる熱収支の見積もりの枠を超えて、火成活動や特に地球ではプレートテクトニクスなどの活動のもっと具体的なモデリングを行い、惑星の冷却や放射性元素の壊変によるマンツルの内部加熱の減衰の結果これらの活動の活発さや様式が時代とともにどのように変遷するかを、リアリストックにシミュレートする必要があった。筆者らはこの研究の開始以前にすでに、プレートテクトニクスを含むマンツル対流と火成活動の二次元モデルを開発し、地球や火星について予備的なマンツル進化のシミュレーションを行っていた。本研究では、第一にこれらの研究をさらに発展させ、月から地球まで様々なサイズの惑星におけるマンツル進化のモデルを系統的に構築し、これらのモデルの中でマンツル進化を支配している物理的素過程を解明することを目指した。第二に、この過程で明らかになった素過程のいくつかはモデル空間の次元(二次元か三次元か)や形状(球殻か

矩形の箱かなど)に依存することが明らかであったため、マンツル対流と火成活動の3次元球殻モデルを構築し、将来の惑星内部進化の数値シミュレーションへの展望を開くことを目指した。

3. 研究の方法

まず筆者らがこれまでに開発した火成活動・マンツル対流結合系の二次元シミュレーション用の数値コードを使用して、月から地球まで惑星サイズに応じて、どのような物理的素過程がマンツルのダイナミクスを支配するかを系統的に調べた。その上で特に重要な素過程を特定し、その3次元(球殻)モデルを開発し、現実の惑星のマンツルにおけるそれらの素過程の機能を究明した。このために、連携研究者である亀山が開発した固体マンツル対流の数値シミュレーション用コードACuTEを改良し、火成活動とプレートテクトニクスを三次元球殻で再現できるようにした。さらに、このコードを用いて予備的なシミュレーションを実行した。

4. 研究成果

(1) まず二次元モデルを用いた数値シミュレーションにより、様々な惑星のマンツル進化を、(a) マンツルの熱対流安定性、火成活動による(b) サーモスタット効果と(c) 放射性元素の地殻への濃集、(d) 火成活動・マンツル湧昇流(MMU)フィードバック、(e) バースト、(f) プレートテクトニクスの六つの素過程により系統的に説明した。

月：その小さなサイズのためマンツル対流の有無は内部熱源の強さに支配される。マンツルは化学成層する。火成活動は弱く数億年の時間スケールで持続的に起こる。火成活動はそのエネルギー源である放射性元素をマンツルから奪い地殻へ濃集することでそれ自身を減衰させる。火成活動によりマンツルの温度はソリダス以下に抑えられる(サーモスタット効果)。

水星：マンツルは惑星形成直後に化学成層するが、その後対流のため徐々に攪拌均質化される。洪水玄武岩の存在から、マンツル湧昇流により引き起こされる火成活動は湧昇流自身を強化した(MMUフィードバック)と推測される。このフィードバックには火成活動を間欠的にし、サーモスタット効果を強化する働きがある。

火星：水星と同様マンツルは惑星形成期に化学成層し、その後はマンツル対流により徐々に攪拌均質化される。火成活動は放射性元素の地殻への濃集のため初期に減衰するが、プルームによる火成活動はその後も最近まで局所的に継続する。この火成活動はMMUフィードバックのため間欠的に起こる。

金星：マントルは、強力な MMU フィードバックのため惑星形成直後に強く攪拌均質化され、その後二段階で進化する。初期には、マントルに還流する玄武岩地殻物質の高圧相転移に起因するバースト（高温の下部マントル物質の突然の湧昇とそれによる激しい火成活動）が繰り返す。後期に入るとバーストは沈静化しマントル対流はより定常的な一層対流になる。火成活動は初期に還流した地殻を熱源として 45 億年間継続する。

地球：金星にプレートテクトニクスの効果を加えると地球の進化モデルが得られる。マントルはバーストに支配されプレートがカオティックに動く初期と、バーストが沈静化しより安定したプレート運動が起こる後期の二段階で進化する。後期には、還流した地殻はコア・マントル境界上にたまりグローバルなスケールでの熱・組成的不均質構造を生じる。

さらに、スーパー地球では、強い断熱圧縮・膨張の効果のため対流は弱く、テクトニックな活動も弱いと期待される事を示した。

(2) モデルの三次元化にあたり、まず図 1 に示すように ACuTE コードを用いて三次元球殻マントルにおける熱対流の数値シミュレーションを実行し、コアサイズや粘性率の温度依存性の強さなどのパラメーターを広い範囲で変化させて対流が起こる条件を明らかにした。この結果、火星より小さな惑星では、放射性元素による内部加熱が十分強くないとマントル対流が維持できないことを明らかにした。



図 1. 三次元球殻マントルにおける熱対流のシミュレーションの例。中心の濃い緑の球面はコア・マントル境界。その上の薄い緑の曲面はブルームの目安となる等温面。

その上で、(1) で述べたマントル進化の物理的素過程のうち特に重要な火成活動・マントル湧昇流フィードバックとプレートテクトニクスの三次元数値シミュレーションに着手し、技術的問題を解決した。

前者のフィードバックは、マントル対流の湧き出し口で岩石が浮上すると、圧力の低下によりマグマが生成され、マグマの持つ浮力のため湧き出しの流れが強化されるというものであり、そのシミュレーションにはマグマの生成とマトリックス中の浸透流による

移動を計算する必要がある。このため、ACuTE コードを改良し図 2 に示したような計算を実行した。一連の計算により実際にこのフィードバックは三次元空間でも機能することを確認した。

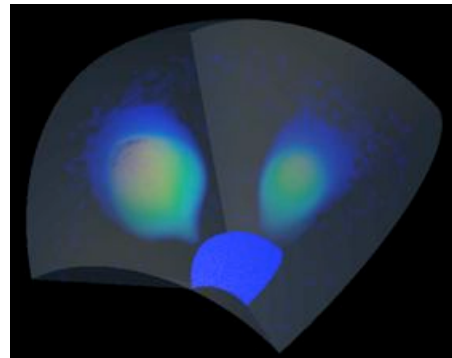


図 2. 三次元球殻マントルにおけるマグマ生成・移動の数値モデル。深部の青い曲面はコア・マントル境界。扇型領域の側面に沿って二箇所マグマが生成されている様子が見える。

後者のプレートテクトニクスのモデリングでは、すでに筆者らの二次元シミュレーションにより、岩石の流動特性の応力履歴依存性が本質的な役割を果たしていることがわかってきた。すなわち、プレートにひとたび大陸衝突などの理由で応力集中が起き高い応力のため岩石が破壊され、プレート境界が形成されると、応力が下がった後もプレート境界の割れた状態は維持される。これが過去のプレートの分裂によってできた境界がその後も長く安定に存在し、プレート運動が数億年にわたって持続していられた理由である。本研究では、図 3 に示すように、この応力履歴依存性を考慮したマントル対流の 3 次元数値シミュレーションに成功した。図で再現された「プレート」はまだリソスフェアの薄片という程度のサイズ (1000km) しかないが、この計算のために開発した技術を使って、今後地球に見られるような差し渡し数千 km の大きなプレートの剛体の板としての運動を再現できる見通しが立った。

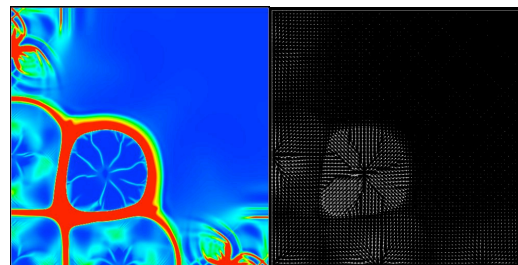


図 3. 三次元矩形の箱におけるプレート運動を伴うマントル対流の数値モデル。得られた流れのパターンを上から見た図。左はプレートがどの程度割れているかを示したもの。赤いところほど破壊の程度が進んでいる。右は地表面における対流の水平速度分布。矩形の中央より左下の部分でプレートが断片に分かれて、剛体の板のように動いている様子が見える。

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 12件)

以下全ての雑誌論文に査読あり

- Ogawa, M., The effects of magmatic redistribution of heat producing elements on the lunar mantle evolution inferred from numerical models that start from various initial states, *Planet. Space Sci.*, 151, 43-55, 2018.
- Miyagoshi, T., M. Kameyama, and M. Ogawa, Extremely long transition phase of thermal convection in the mantle of massive super-Earths, *Earth Planet Space*, 69, 46, doi:10.1186/s40623-017-0630-6, 2017.
- Ogawa, M., Evolution of the interior of Mercury influenced by coupled magmatism-mantle convection system and heat flux from the core, *J. Geophys. Res.*, 121, 118-136, doi:10.1002/2015JE004832, 2016.
- Yanagisawa, T., M. Kameyama, and M. Ogawa, Numerical studies on convective stability and flow pattern in three-dimensional spherical mantle of terrestrial planets, *Geophys. J. Int.*, 206, 1526-1538, doi:10.1093/gji/ggw226, 2016.
- Kameyama, M., T. Miyagoshi, and M. Ogawa, Linear analysis on the onset of thermal convection of highly compressible fluids: Implications for the mantle convection of super-Earths, *Geophys. J. Int.*, 200, 1064-1075, 2015.
- Miyagoshi, T., M. Kameyama, and M. Ogawa, Thermal convection and the convective regime diagram in super-Earths, *J. Geophys. Res.*, 120, 1267-1278, doi:10.1002/2015JE004793, 2015.
- Miyagoshi, T., C. Tachinami, M. Kameyama, and M. Ogawa, On the vigor of mantle convection in super-Earths, *Astrophys. J. Lett.*, 780:L8, doi:10.1088/2041-8205/780/1/L8, 2014.
- Tachinami, C., M. Ogawa, and M. Kameyama, Thermal convection of compressible fluid in the mantle of super-Earths, *Icarus*, 231, 377-384, 2014.
- Ogawa, M., Two-stage evolution of the Earth's mantle inferred from numerical simulation of coupled magmatism-mantle convection system with tectonic plates, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 2462-2486, doi:10.1002/2013JB010315, 2014.
- Ogawa, M., and T. Yanagisawa, Mantle evolution in Venus due to magmatism and phase transitions: From punctuated layered convection to whole-mantle convection, *J.*

Geophys. Res. planet, 119, 867-883, doi:10.1002/2013JE004586, 2014.

- Ogawa, M., A positive feedback between magmatism and mantle upwelling in terrestrial planets: Implications for the Moon, *J. Geophys. Res. Planet*, 119, 2317-2330, doi: 10.1002/2014JE004717, 2014.
- Fujita, K., M. Ogawa, A preliminary numerical study on water-circulation in convecting mantle with magmatism and tectonic plates, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 216, 1-11, 2013.

[学会発表] (計 24件)

- 小河正基、地球型惑星最初期進化の惑星サイズ依存性、日本地球惑星科学連合大会、2017
- 亀山真典、宮腰剛広、柳澤孝寿、小河正基、マントル対流シミュレーションの技術開発：地球型惑星内部の解明に向けて、日本地球惑星科学連合大会、2017
- 柳澤孝寿、亀山真典、小河正基、対流する固体マントル中での軽い液相の分離様式、日本地球惑星科学連合大会、2017
- 宮腰剛広、亀山真典、小河正基、スーパーアースのマントル対流シミュレーション：惑星サイズ依存性、日本地球惑星科学連合大会、2017
- Ogawa, M., Evolution of the earliest mantle caused by the magmatism-mantle upwelling feedback: Implications for the Moon and the Earth, American Geophysical Union fall meeting, 2017.
- 小河正基、火成活動・マントル対流と岩石惑星の進化、日本天文学会、2016
- 宮腰剛広、亀山真典、小河正基、スーパーアースのマントル対流シミュレーション、日本天文学会、2016
- 小河正基、惑星内部進化のモデリング、日本地球惑星科学連合大会、2016
- 宮腰剛広、亀山真典、小河正基、巨大スーパーアース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大会、2016
- Ogawa, M., Two-stage evolution of the Earth's mantle, Goldschmidt Conference, 2016.
- 小河正基、月内部進化の初期温度依存性、日本惑星科学会秋期大会、2016
- Ogawa, M., Kameyama, M., and Yanagisawa, M., Numerical studies of mantle evolution in planets of various sizes, American Geophysical Union, fall meeting, 2016.
- 宮腰剛広、亀山真典、小河正基、大質量スーパーアースのマントル対流の活発さと対流レジームダイアグラムについて、日本地球惑星科学連合大会、2015
- 柳澤孝寿、亀山真典、小河正基、小さいコアをもつ球殻マントルでの対流パターン：粘性の温度依存性の影響、日本地球惑星科学連合大会、2015

小河正基、大きなコアを持ちプレート運動を伴う地球型惑星のマンテル進化、日本惑星科学会秋期大会、2015

宮腰剛広、亀山真典、小河正基、スーパーアースにおけるマンテル対流とスタグナントリッドの形成について、日本惑星科学連合大会、2014

小河正基、初期マンテルに於ける化学成層と対流攪拌：惑星サイズの効果、日本地球惑星科学連合大会、2014

小河正基、月のマンテル進化の数値シミュレーション、日本地球惑星科学連合、2014

小河正基、水星のマンテル進化、日本惑星科学会秋期大会、2014

Miyagoshi, T., Kameyama, M., Ogawa, M., On the vigor of mantle convection and stagnant lid formation in Super-Earths, Asia Oceania Geosciences Society, 2014.

小河正基、**The thermal history of the mantle and its two-sate evolution**, 日本地球惑星科学連合大会、2013

小河正基、地殻のリサイクリングと地球型惑星の進化、日本惑星科学会秋期大会、2013

柳澤孝寿、小河正基、火成活動と組成分化を組み込んだ金星マンテルの進化モデル、日本地球惑星科学連合大会、2013

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性粘性を考慮したスーパー地球のマンテル対流シミュレーション、日本地球惑星科学連合大会、2013

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小河 正基 (Ogawa Masaki)
東京大学・大学院総合文化研究科・准教授
研究者番号：30194450

(2) 研究分担者

柳澤 孝寿 (Yanagisawa Takatoshi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員
研究者番号：20359186

宮腰 剛広 (Miyagoshi Takehiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員
研究者番号：60435807

(3) 連携研究者

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

(4) 研究協力者

()