

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 22日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2012

課題番号：20340114

研究課題名（和文）比較惑星内部進化モデリング

研究課題名（英文） A modeling study of mantle evolution in planets

研究代表者

小河正基（Masaki Ogawa）

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：30194450

研究成果の概要（和文）：2次元火成活動・マンテル対流結合系の数値シミュレーションを行い、火星のマンテル進化モデルを完成すると共に、地球のマンテルは、25億年前の太古代・原生代境界におけるテクトニクスの変化に対応して、2段階にわかれて進化したというモデルを構築した。

研究成果の概要（英文） A model of mantle evolution in Mars is constructed based on two-dimensional simulation of a coupled magmatism-mantle convection system. Similar model is developed for the Earth, too, and it is suggested that the Earth has evolved in two stages corresponding to the Archean-Proterozoic transition.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
20年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
21年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
22年度	800,000	240,000	1,040,000
23年度	600,000	180,000	780,000
24年度	600,000	180,000	780,000
総計	9,900,000	2,970,000	12,870,000

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：マンテル進化・マンテル対流・火成活動・比較惑星・数値モデリング

1. 研究開始当初の背景

(1)1980年代以降大きく発展した大陸の構造発達史の研究により、40億年前から現在までのプレート・テクトニクスに代表される地球活動の様式の変遷史がおぼろげに見えてきていた。

(2)国内外の惑星探査の進展により、火星の火山活動や表層環境の歴史が明らかにされた。また、金星についても、過去3-7億年程度の火山活動の起こり方が見えてきていた。

(3)これらの観測との比較に耐えられるマン

テル進化のモデルは存在しなかった。

2. 研究の目的

マンテルの進化は、マンテル対流による熱・物質輸送と、火成活動による物質分化及び熱・物質輸送の結果起こる。火星に代表されるプレートテクトニクスの起きていない惑星と、地球に代表されるプレートテクトニクスの起きている惑星それぞれについて、そのマンテルの進化を支配する素過程を明らかにし、その上でマンテル進化の大枠の数値モデルを構築する。特に、(1)火星では、最初の10億年ほど活発な火山活動が続いたのに、な

ぜその後急速に減衰したのか、(2)地球ではなぜ25億年前の太古代・原生代境界でテクトニクスの様式が大きく変化したのか、を理解する事を主目的とする。

3. 研究の方法

筆者はすでに、マントルを2次元矩形領域で数値モデル化して、その中で、火成活動やプレート・テクトニクスを含めたマントル対流を再現する事に成功している。本研究では、このモデルを、火星と地球のマントルで想定される条件下で用いて、それぞれの場合にマントル進化の数値シミュレーションを実行する。特に、モデルの中に存在する様々なパラメータを動かして、そのマントル進化への影響を見る事で、マントル進化の素過程の性質を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 火星のマントル進化。

以下の図1、2に火星のマントル進化のモデルの例を示す。図1aに示されたように、形成直後の火星ではマントル最上部にマグマ・オーシャン発達し、このマグマが分離し、地表面に噴出して玄武岩の地殻を形成する。(図1b, 0.01Gyr 参照。) このマグマ・オーシャンによる物質分化の結果、全体としてマント

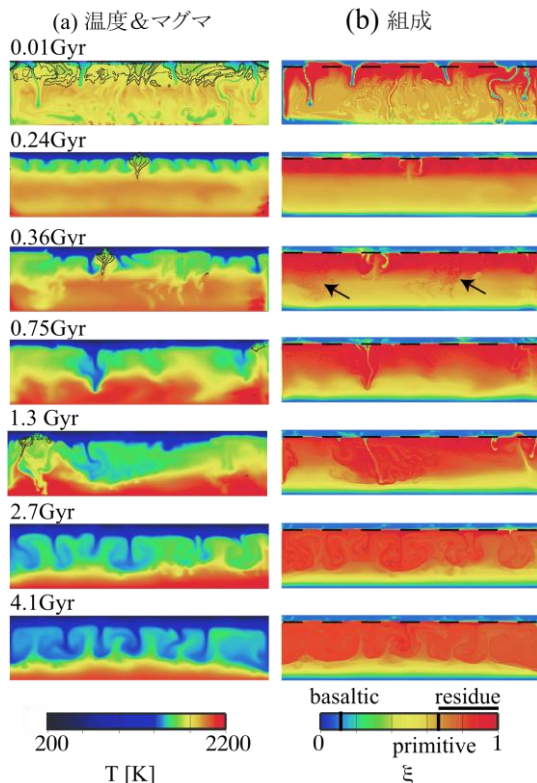


図1. 火星のマントル進化のモデル。(a)温度(カラスケール)・マグマの分布(等値線)及び(b)化学組成の分布の時間変化をスナップショットで示す。(b)で、青は玄武岩、赤は玄武岩が抜けた後の残渣物質を表す。

ルは化学成層する。(図1b, 0.24Gyr 参照。)特に、マントル最上部は、玄武岩マグマが抜けた後の、組成的に低密度な残渣物質で占められる。以降のマントル進化は、この化学成層構造の緩和過程として起こる。

まず、残渣物質からなるマントル最上部で対流が起こり、この残渣層の底でブルームが発生し上昇する。この対流の結果、残渣層の下より始原的な層が浸食される。このような対流浸食により、41億年後には、コア・マントル境界付近を除き、マントルはほぼ均質となる。マグマ・オーシャンが消失して以降の火成活動は、この残渣層内を上昇するブルームによって引き起こされる。この火成活動は効率よくマントルから熱を奪うため、サーモスタットのようにマントルの平均温度をマントル物質の融点以下に押さえる。

図2(上)に、ブルームによる火山活動の結果、マグマがどれだけ地表面に噴出するかを示す。最初の15億年ほどはブルームによる火成活動は活発だが、その後火成活動は急速に衰え、25億年頃を最後に完全に止まっている事が図から見て取れる。火星の火成活動は、現在でも一部で続いてはいるが、全体としては、30億年前までに終息しており、図2

(上)の結果は観測結果と整合的である。火成活動がこのように短期間しか続かない原因を探るために、放射性元素が地殻へ濃集せずマントルに一様に分布し続けた場合の火成活動の歴史を図2(下)に示す。この場合は50億年にわたって火成活動が続いている。このことから、惑星の進化において、火成活動の歴史は火成活動によりどれだけ

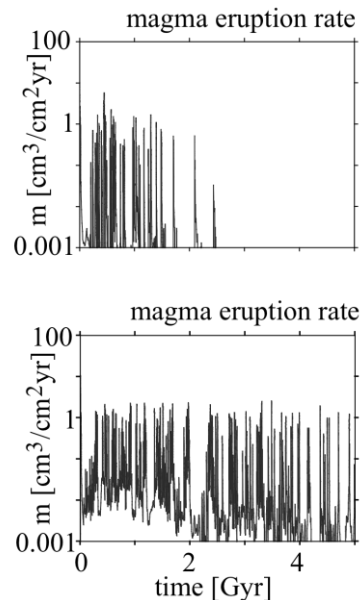


図2. マグマの噴出率の時間変化。上は図1に示したケース、下は、図1の計算で放射性元素の地殻への濃集をなくしたケースの例。

マントルから放射性元素が奪われ地殻に貯蔵されるかで決定される事がわかる。

(2) 地球のマントル進化

地球のマントル進化のシミュレーションは火星のように45億年通して行うところまではいかなかったが、初期の、マントルに放射性元素が豊富に有り強く内部加熱されていたステージと、後期の放射性元素が減衰し内部加熱が弱かったステージの2つのステージがあった事を示唆する結果を得た。さらに、この2つのステージの閾値となる内部熱源の強さは、太古代・原生代境界の地球に期待される値である事がわかった。以下、それぞれのステージについて説明する。

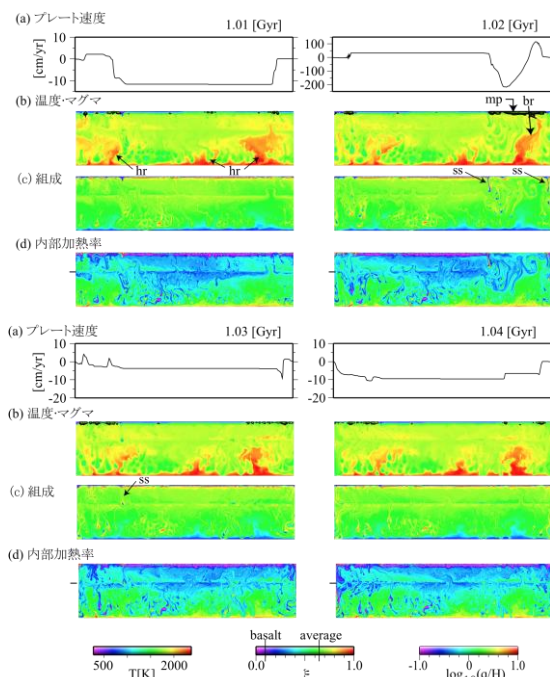


図3. 初期ステージでの(a)地表面における水平速度(プレート速度)、(b)温度とマグマの分布、(c)組成分布、(d)放射性元素の分布のスナップショット。放射性元素の量はマントルの平均値で規格化してある。

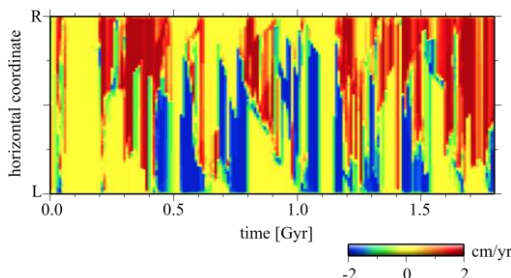


図4. 時間と水平座標の面上で示したプレート速度の分布。青は水平座標で示された時刻にプレートが地表面を左に、赤は右に動いている事を意味する。

(2-1) 初期ステージ; カオティックなプレート・テクトニクスの時代

図3、4にこのステージでのマントル対流の様子を示す。

図3から、このステージでは、マントル深部に比較的玄武岩成分に富む(図3cでやや青みがかった部分)高温の領域が有り、そこから、頻繁に強い上昇流(バースト)が生じ、地表面にマグマの池を作っている様子が分かる(図3b)。この激しい火成活動により生じた玄武岩の一部はコア・マントル境界まで沈むが、バーストによる攪拌のため、多くはマントル物質と混ざっている。すなわち、火成活動による物質分化にも関わらずマントルは火星と比べて均質に保たれている。プレート運動(図3a)により多くの地殻物質がマントルにリサイクルしているため、マントルが放射性元素に欠乏する事はなく、この火成活動は時間と共に減衰する事なく定常的に数十億年にわたって持続する。

バーストは、プレート運動の起こり方にも強い影響を持つ。図4で赤い領域と青い領域が入り乱れている事からわかるように、プレート運動は強い時間依存性を示しており、また、プレートは顕著に変形している(図3a)。

以上のバーストによる激しい火成活動とカオティックなプレート運動は、太古代に形成された大陸の詳しい調査から明らかになった太古代のテクトニクスの特徴と調和的である。

(2-2) 後期ステージ; 秩序だったプレートテクトニクスの時代

図5、6にこのステージでのマントル対流の様子を示す。

図5から、後期ステージでは、初期ステージと違いバーストが起きず、そのかわりコア・マントル境界上に沈み込んだ玄武岩(海洋地殻)のピイルが発達している事がわかる(図5c)。そして、ここから時折プルームが生じ、火成活動を引き起こしている(図5b)。さらに、図6から、このステージではプレート運動が初期ステージより安定して定常的に起こっている事がわかる。これは、バーストが起きないため、プレート運動がかき乱される事がないからである。

このように後期ステージが初期ステージと異なるのは、放射性元素による内部加熱率が低いため、コア・マントル境界上に玄武岩ピイルが安定して存在できるためである。初期には、この様な玄武岩ピイルがたとえできたとしても、強い内部加熱のため温度が上昇し、熱膨張による浮力のため対流不安定を起こして、バーストとなったはずである。このように、玄武岩ピイルの安定・不安定が初期と後期ステージを分ける原因となっている。

この後期ステージの安定したプレート運

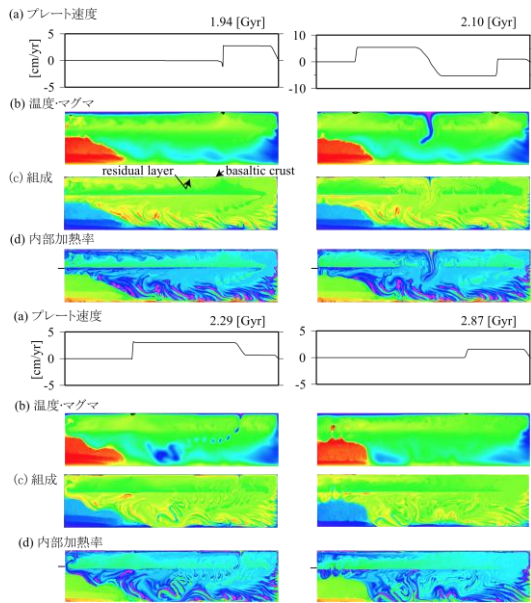


図 5. 図 3 と同じ。ただし、後期ステージの結果。

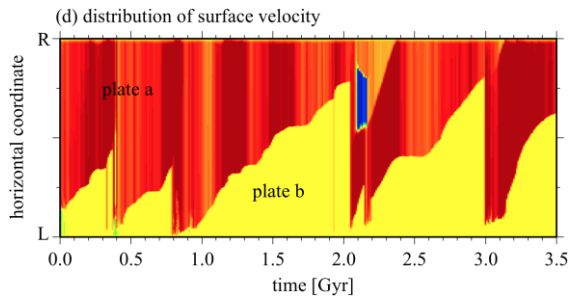


図 6. 図 4 と同じ。ただし、後期ステージの結果。

動は、今日我々が見るプレートテクトニクスと整合的である。また時折起こる玄武岩パイルからのプルームによる火成活動は、洪水玄武岩に代表される巨大火成岩岩石区 (LIP) に対応すると考えられる。実際、図 6 でプルームによる火山活動が起こっているとき (例えば 2 Gyr) 海嶺 (図中の黄色い領域と赤い領域の境目) が大きくジャンプしており、プルームが新たなプレート境界を形成している様子がわかる。これは、実際に地球上で起こっている LIP による超大陸分裂と整合的である。

(3) 水の循環

以上述べたマンテル対流と火成活動による物質循環の結果、マンテルの中の水はどのように循環するか、マンテルの水はどの程度表層に脱ガスするか、表層の水はマンテルにどの程度還流するか、を解明するため、さらに予備的な数値シミュレーションを実行した。水の循環は大変複雑な問題であり、その全貌をシミュレートする事はできなかった

が、本研究で得られたマンテルにおける物質循環モデルの元では、水循環には以下のような特徴がある事がわかった。

(a) 火星では、惑星形成期にマンテルに有った水の大半 (70%程度) はマグマオーシャンの時期に脱ガスし、残った水もほとんどその後のプルームによる火成活動の結果脱ガスしてしまった。マンテルにわずかに残った水は、岩石の融点を下げるため、局所的にはプルームによる火成活動の活動期間を 45 億年以上にのばす場合もある。この結果は、最近まで火星で起こっていたと推定される火成活動が水と深く関わっている事を示唆するものである。

(b) 地球では、初期ステージでは、マンテルに貯蔵できる水の総量が限られている。後期ステージでは、マンテルはより多くの水を蓄える事ができる。ただし、プレート運動によるマンテル対流の循環時間が数十億年と大変長い時間、沈み込むスラブによりマンテルに持ち込まれた水がマンテル全体に行き渡るには、地球の年齢と同程度の時間が必要である。この結果、現在のマンテルに於ける水の分布は非常に不均質である。

(b) の結果は、水がマンテル進化に及ぼす影響を研究するためには、従来行われてきたような、マンテルに還流した水はマンテル全体に瞬時に行き渡るという仮定のもとでたてられたパラメーター化したマンテル対流モデルでは不十分であり、マンテル対流のシミュレーションを行う必要がある事を示している。

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 6 件)

- (1) Fujita, K., and 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.
- (2) Ogawa, M., and T. Yanagisawa, Two-dimensional numerical studies on the effects of water on Martian mantle evolution induced by magmatism and solid-state mantle convection, *J. Geophys. Res.*, 117, E06004, doi:10.1029/2012JE004054, 2012. (査読あり論文)
- (3) Ogawa, M., and T. Yanagisawa, Numerical models of Martian mantle evolution induced by magmatism and solid-state convection beneath stagnant lithosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, E08008, doi:10.1029/2010JE003777, 2011. (査読あり論文)

- (4) Ogawa, M., Variety of plumes and the fate of subducted basaltic crusts, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 183, 366-375, 2010. (査読あり論文)
- (5) Fujita, K., and M. Ogawa, Basaltic accumulation instability and chaotic plate motion in the earliest mantle inferred from numerical experiments, *J. Geophys. Res.*, 114, B10402, doi:10.1029/2008JB006222, 2009. (査読あり論文)
- (6) Ogawa, M., Mantle convection; a review, *Fluid Dyn. Res.*, 40, 379-398, 2008 (査読あり論文)

[学会発表] (計 10 件)

- ① 小河正基, 2段階進化する地球のマントルの熱史、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、幕張メッセ, 2013
- ② 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トルの進化モデル、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、幕張メッセ, 2013
- ③ 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、幕張メッセ, 2013
- ④ 立浪千尋, 亀山真典, 小河正基, 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、幕張メッセ, 2013
- ⑤ Yanagisawa, T., M. Ogawa, Effects of water on Martian mantle evolution induced by magmatism and solid-state convection, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ, 2012
- ⑥ 小河正基, 内部熱源の減衰によって引き起こされる地球のマントルの 2 段階進化、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ, 2012
- ⑦ 立浪千尋, 小河正基, スーパー地球のマントル対流に於ける断熱圧縮の効果、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、幕張メッセ, 2011
- ⑧ Yanagisawa, T., M. Ogawa, Numerical models of Martian mantle evolution induced by magmatism and solid-state convection, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会、幕張メッセ, 2011
- ⑨ 小河正基, Mantle evolution; dynamics of the lithosphere and superplumes, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会、幕張、2009
- ⑩ 藤田邦宏, 小河正基, 最初期地球におけるスーパーブルームとプレートテクトニクスの数値モデリング、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、幕張、2008

[その他]
ホームページ等
<http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/earth/Members/ogawa.htm>

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

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：