

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：10101
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540427

 研究課題名（和文） 月および小型惑星のマントルオーバーターンの理論的数値的研究
 研究課題名（英文） Theoretical study on mantle overturn processes in the moon and small rocky planets.

研究代表者

 倉本 圭 (KURAMOTO KIYOSHI)
 北海道大学・大学院理学研究院・教授
 研究者番号：50311519

研究成果の概要（和文）：月および小型惑星を構成する物質組成の多様性を原始惑星系円盤の形成進化モデルを用いて推定し、これら天体の内部構造の進化について数値的・理論的解析を行った。月マグマオーシャンの固化に伴い形成される不安定に成層した一連の沈積岩は、地質学的に短時間で安定な配置に向かい転倒する。転倒時に Mg に富む橄欖岩沈積層は再融解を引き起こすと予想される。この結果は月の裏側に Mg に富む苦鉄質鉱物が存在することと調和する。また安定な配置に達した後の月慣性能率因子は現在の月の観測値とほぼ一致する。一方、水星に予想される還元的な化学組成が、水星探査機の最新の観測によって確認され、さらに重力場データからケイ酸塩マントルの厚さが極めて薄いことが示唆された。これらを反映した水星構造を想定し、熱史シミュレーションを行ったところ、液体核は現在でも十分熱対流を起し、ダイナモ活動を容易に維持できる可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：Theoretical and numerical studies on the evolution of the interiors of the Moon and small rocky planets were performed on the basis of the consideration about the variety of raw materials of these bodies by using a model of proto-planetary disk. A series of cumulate rock layers, formed in the early Moon due to cooling and solidification of a magma ocean, should have overturned toward stable structure. During the overturn process, Mg-rich olivine cumulate likely becomes to melt again, which is consistent with the exposure of Mg-rich mafic minerals on the lunar far-side. The present moment of inertia factor of the Moon is explained by the density profile after the completion of overturn. Recent spacecraft data shows that Mercury has a significantly reduced composition enriched in sulfur as well as E-chondrites, which is consistent with our disk model, and also has a thin silicate mantle with thickness less than about 400 km. We performed thermal history simulations considering such a new structure. It is suggested that the liquid core of Mercury is thermally convective until present, allowing dynamo action producing the intrinsic magnetic field of Mercury.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：月、マグマオーシャン、マントルオーバーターン、マントル対流、水星、熱史、慣性能率

1. 研究開始当初の背景

月・水星・火星は、固体惑星内部の進化過程を実証的に解明するための極めて重要な研究対象として位置づけられる。これらの天体は小型で内部が急速に冷えたため、形成直後から現在までの、内部進化の痕跡を豊富に留めていると考えられるからである。

最近の我が国の「かぐや」探査の結果、月の表側と裏側で、非調和元素の濃度だけでなく、衝突クレーターのアイソスタシー回復の度合にも鮮明な違いがあることが発見された。この結果は月の熱源分布や熱的状态に、深部に達する全球規模の不均質性が存在し、しかもそれが月形成のごく初期に形成されたことを強く示唆している。

月内部構造の標準的な理解は、マグマオーシャンモデルに基づく。これは、月全球を覆ったマグマオーシャンの結晶分化作用によって、厚い斜長岩地殻と、相補的な化学組成をもつ一連の岩石種が作られたことを主張する。月マグマオーシャンの形成は、広く受け入れられている原始惑星間の巨大衝突による月誕生モデルときわめて整合的である。しかしながら、粘性のきわめて低いマグマオーシャンのような系ではほぼ水平様に冷却が起こると考えられ、そのままでは月の表裏に見られる組成や熱的状态の非対称性は説明できない。

マグマオーシャンの結晶分化が起こると、時間の経過とともにより Fe に富む鉱物が沈積層に堆積してゆくため、上部ほど高密度で流体力学的に不安定な化学成層が形成される。月の表裏の非対称性の成因には、この不安定なマンテル化学成層のオーバーターン(転倒)によるとする仮説が有望視される。実際、平板流体層の不安定理論を用いて予察的な理論解析を行うと、月マグマオーシャンの理想的な結晶分化によって形成される不安定化学成層は、数 10 万年の時間スケールでオーバーターンを起こす。またその上昇下降セルの水平サイズは月半径と同程度になると見積もられる。これに球殻の幾何学と地球潮汐力の作用を考慮すると、月には単一の上昇流域と下降流域が生じ、非調和元素分布や熱的状态などに非対称性をもたらすと予想される。

マグマオーシャンの固化に伴うマンテルの不安定成層の形成とそのオーバーターンは、月だけでなく、固体惑星一般に発生が期待される。特に小型の惑星である水星と火星においては、月同様にマンテルオーバーターンが現在も残る内部不均質をもたらした可能性がある。実際に火星においては、南北半球間で平均高度や平均クレーター年代に明瞭な違いがみられ、これもオーバーターンに起因するかもしれない。その一方、天体によ

って、サイズや重力加速度、隣接天体からの潮汐力、マンテル鉱物の流動則や密度に大きな影響をもつ揮発性物質や FeO 濃度など、種々の条件に違いがあるため、マグマオーシャンの固化による不安定化学成層の形成とそのオーバーターンの過程に違いがあると予想される。

2. 研究の目的

本研究では月・水星・火星それぞれの条件下における、マグマオーシャンの固化による不安定化学成層の形成とそのオーバーターンについて、数値的ならびに理論的に明らかにすることを試みる。各天体の重力・地形・表面組成・磁場等の既存の探査データに加え、内部構造解明を主目的の一つとする我が国による一連の探査計画(水星: Beppi-Colombo 2014 年周回機打上予定, 月: 2015 年頃着陸機, 火星: 2020 年前後着陸機検討中)の得る、新しいデータの統合的な解釈に貢献することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 惑星組成モデリング

申請者が独自に構築してきた惑星原物質の酸化還元状態をコントロールする有機物と H₂O の分別輸送過程を考慮した原始惑星系円盤化学進化モデルならびに、気相・ケイ酸塩マグマ・金属間の惑星元素分配モデルに基づき、月・水星・火星のマグマオーシャンがとりうる組成範囲を定量的に評価する。この推定結果はマンテルオーバーターンの解析のための境界条件を与えるだけでなく、探査研究と相補的に各天体の内部構造と進化を制約する理論的基盤を提供する。

(2) 長期進化の出発条件と大規模不均質性の予測

マンテルオーバーターンはマグマオーシャンの固結後に、短い時間スケールで起こると予想される。したがって本研究は各天体内部の長期進化の出発条件に理論的制約を与える。またオーバーターンの結果形成される大規模な組成的・熱的内部不均質性を理論的な予測は、各天体の全球地形、重力場、表面組成等の統合的な解釈だけでなく、これからの月惑星探査の主目標の一つに設定されている内部構造探査に向けた理論的基盤を提供する。

(3) 比較惑星学のアプローチ

マンテルの化学成層の形成とそのオーバーターンの様式が、各天体の持つ種々の条件によってどのように変化するかを調べることにより、月・水星・火星だけでなく、地球や系外惑星を含む固体惑星一般の内部進化の理解に応用可能な知見を得る。

4. 研究成果

(1) 組成モデリング

原始惑星系円盤における物質混合過程について、分子雲コアからのガス供給と乱流混合を考慮した 1 次元軸対称円盤モデルを用いて解析した。特に原始惑星系円盤への流入年代と、最高到達温度に応じてガスを区別し、それぞれを独立した成分とみなして乱流による濃度拡散を計算した。

主な結果として、まず、同位体組成は乱流粘性が大きいほど早く均質化される。これは粘性拡散時間が短くなることを反映している。一方結晶質ケイ酸塩の存在度は、分子雲コアの角運動量が大きいほど小さくなる。これは分子雲コアの角運動量が大きいほど、中心星から離れた領域にガスが流入し、高温環境を経験し結晶化するケイ酸塩の質量比が小さくなるためである。

このようなパラメータの範囲内で、太陽系に対して観測的に与えられる円盤質量(～0.01 太陽質量)や結晶質ケイ酸塩の存在度を同時に説明することのできる解が得られた。

この段階から惑星原物質の生成までに、さらに固体成分の選択的な円盤中心方向への移動が起こる。円盤形成期に強い熱変性を受けなかった固体成分が円盤中心部に移動し、揮発成分が蒸発することで円盤に酸化還元度の勾配が生じると考えられる。これにより水星・地球・火星のマンテル中の FeO 含有量の違いが説明できる可能性がある。

(2) マグマ・オーシャンの固化による成層構造形成とオーバーターン

月マグマオーシャンの冷却固化に伴い形成される沈積層の密度、化学組成、温度分布を推算した。岩石学分野で広く用いられている相平衡計算ソフトウェアは、大溶融度系に対しては実験データと整合しないため、経験的分配則を併用して推算を行った。

マグマオーシャンの初期組成や深さにあまり依らず、結晶分化の進行に伴い、浅部ほど密度が上昇する重力的に不安定な成層構造が形成され、そこから数値的に見積られるオーバーターンの時間スケールは、月の年齢よりも十分に短いことが確認された。

また、不安定な成層が、上下混合なしに理想的にオーバーターンした場合の慣性能率を求めた。その結果、いずれの初期組成から出発しても、観測値に極めて近い値が得られた。これは、結晶分化による密度差の形成によって、月の慣性能率因子が密度一様球よりもわずかに小さいことをほぼ説明でき、金属核を持たない月内部構造が許容される。

さらに、固化した鉱物がリキダス温度を保持していると仮定し、温度分布を求めた。その結果、結晶分化完了時には沈積層全体で数

百 K の温度差が生じる可能性が示された。ここから沈積層下部の鉱物の上昇に伴い、減圧融点降下によって再溶融が生じる可能性が高いことも分かった。これは月の表面に存在する苦鉄質鉱物が高い Mg 濃度を持つという観測結果と整合的である。

(3) 薄いマンテルを有する水星の熱進化

2012年に水星探査機MESSENGERの得た重力データが公開され、水星のケイ酸塩マンテル層の厚さが従来の推定よりも極めて薄く、同時に核には大量の硫黄が含まれているらしいことが明らかになった。後者は円盤モデリングからの考察と基本的に合致する。

これを取り入れた水星マンテル対流の数値シミュレーションを行った。その結果、水星岩石圏は急激に冷え、対流活動は初期の数億年で衰えるが、熱伝導のみによっても深部の冷却が進行し、溶融核の対流運動が現在まで持続する新たな解を得た。これは水星がダイナモ起源の固有磁場を有していることと調和的である。

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 6 件)

①諸田 智克, 倉本 圭, 高橋 太, 月進化の全貌の理解へ向けた月歴史図の作成, 遊・星・人(日本惑星科学会誌), 査読なし, 21, 57-63, 2012.

②Sasaki, Y. Takehiro, S., Kuramoto, K., Yoshi-Yuki Hayashi, Weak-field dynamo emerging in a rotating spherical shell with stress-free top and no-slip bottom boundaries, Phys. Earth Planet. Int., 査読あり, 188, 203-213, 2011.

③Kimura, J. Kawamura, T. Morito, H. Morota, T. Honda, C. Kuramoto, K and Okada, T., Sublimation's impact on temporal change of albedo dichotomy on Iapetus, Icarus, 査読あり, 214, 596-605, 2011.

④大谷栄治, 倉本 圭, 他 18 名, 「月惑星探査の来たる 10 年」検討・第一段階報告, 遊・星・人(日本惑星科学会誌), 査読なし, 20, 349-365, 2011.

⑤Tanaka, S. Mitani, T. Iijima, Y. Otake, H. Ogawa, K. Kobayashi, N. Hashimoto, T. Hoshino, T. Otsuki, M. Kimura, J. and Kuramoto, K. The Science Objectives of Japanese Lunar Lander Project SELENE-II, 42nd Lunar and Planetary Science Conference, 査読なし, paper#2778, 2011

⑥佐々木洋平, 竹広真一, 林 祥介, 倉本 圭, 上端応力無し, 下端滑り無し条件を課

した回転球殻中に出現する弱磁場ダイナモ、
ながれ 29 別冊, 査読なし, 211, 2010.

〔学会発表〕(計 22 件)

- ①中山陽史, 倉本 圭, 還元的な組成を持つ水星の内部構造と熱進化, 地球惑星科学連合大会 2013, 2013 年 05 月 20 日, 幕張メッセ (千葉市)
- ②Tanaka, S. Mitani, T. Otake, H. Ogawa, K. Kobayashi, N. Hashimoto, T. Hoshino, T. Otsuki, M. Wakabayashi, S. Kimura, J. and Kuramoto, K., Present Status of the Lunar Lander Project SELENE-2, 44th Lunar and Planetary Science Conference, 2013 年 03 月 18 日~2013 年 03 月 22 日, The Woodlands Waterway Marriott Hotel and Convention Center (USA)
- ③Kimura, J. and Kuramoto, K., Formation of a conductive core, grooved terrains, and strongly differentiated interior of Ganymede due to dehydration of primordial hydrous rock with implication for the dichotomy from Callisto, European Planetary Science Congress 2012, 2012 年 09 月 23 日~2012 年 09 月 28 日, IFEMA-Feria de Madrid (Spain).
- ④木村 淳, 倉本 圭, ガニメデ内部の鉱物脱水作用がもたらす金属核形成と地溝帯形成, 地球惑星科学連合大会 2012, 2012 年 05 月 20 日~2012 年 05 月 25 日, 幕張メッセ (千葉市)
- ⑤田中 智, 三谷烈史, 大嶽久志, 小川和律, 小林直樹, 飯島祐一, 橋本樹明, 星野 健, 大槻真嗣, 木村 淳, 倉本 圭, 佐伯和人, 次期月探査計画 SELENE-2 の現状と科学搭載機器の開発状況 (2), 地球惑星科学連合大会 2012, 2012 年 05 月 20 日~2012 年 05 月 25 日, 幕張メッセ (千葉市)
- ⑥Tanaka, S. Mitani, T. Iijima, Y. Otake, H. Ogawa, K. Kobayashi, N. Hashimoto, T. Otsuki, M. Kimura, J. and Kuramoto, K., Overview of Candidate Instruments On Board the Lunar Lander Project SELENE-2, 43rd Lunar and Planetary Science Conference, 2012 年 3 月 19-23 日, The Woodlands Waterway Marriott Hotel and Convention Center, Texas (USA)
- ⑦Kimura, J. and Kuramoto, K., Dehydration of primordial hydrous rock in Ganymede: formation of the conductive core, the grooved terrain, and the contrasting interior from Callisto, American Geophysical Union, Fall Meeting 2011 2011 年 12 月 5-9 日, The Moscone Center San Francisco (USA)
- ⑧Sasaki, Y. Takehiro, S. Kuramoto, K. Hayashi, Y.-Y., Weak-field dynamo

emerging in a rotating spherical shell with stress-free top and no-slip bottom boundaries, AGU Fall Meeting 2011, 2011 年 12 月 5 日 the Moscone Center, San Francisco (USA).

- ⑨Kimura, J. and Kuramoto, K., Turning point in differentiation history between Ganymede and Callisto induced by dehydration of primitive hydrous rock, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 2011 年 10 月 2-7 日, La Cité Internationale des Congrès Nantes Métropole (France)
- ⑩木村 淳, 倉本 圭, 巨大氷衛星内部の鉱物脱水作用がもたらす分化史の転換点, 地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 27 日, 幕張メッセ (千葉市)
- ⑪倉本 圭, 大谷栄治, 月・固体惑星の科学: 惑星探査の将来構想に向けて, 地球惑星科学連合 2011 年大会(招待講演), 2011 年 5 月 26 日, 幕張メッセ (千葉市)
- ⑫佐々木洋平, 竹広真一, 倉本 圭, 林 祥介, 回転球殻 MHD ダイナモに対する初期磁場の影響, 地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 26 日, 幕張メッセ (千葉市)
- ⑬安達俊貴, 福井 隆, 倉本 圭, 形成期の原始惑星系円盤内の物質混合, 地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 23 日, 幕張メッセ (千葉市)
- ⑭Sasaki, Y. Takehiro, S. Hayashi, Y.-Y. and Kuramoto, K., Weak-field dynamo emerging in a rotating spherical shell with stress-free top and no-slip bottom boundaries, CPS 7th International School of Planetary Sciences, Seapal Suma (神戸市), 2011 年 1 月 10~15 日.
- ⑮田中 智, 飯島祐一, 三谷烈史, 大嶽久志, 小川和律, 小林直樹, 橋本樹明, 星野 健, 大槻正嗣, 木村 淳, 倉本 圭, 次期月探査計画 SELENE-2 の検討状況, 日本惑星科学会 2010 年秋季講演会, 2010 年 10 月 6 日, 名古屋大学 (名古屋市).
- ⑯Sasaki, Y. Takehiro, S. Hayashi, Y.-Y. and Kuramoto, K., Weak-field dynamo emerging in a rotating spherical shell with stress-free top and no-slip bottom boundaries, The 12th Symposium of SEDI, Study of the Earth's Deep Interior, 2010 年 7 月 18 ~23 日, University of California (USA)
- ⑰Tanaka, S. Mitani, T. Iijima, Y. Otake, H. Ogawa, K. Kobayashi, N. Kimura, J. Kuramoto, K., Science Objectives and Candidate Payloads of the SELENE-2 Lunar Landing Mission, 38th COSPAR Scientific Assembly 2010, 2010 年 6 月 15-18 日, Bremen Exhibition & Conference Center, Germany.
- ⑱福井 隆, 倉本 圭, 原始惑星系円盤におけ

るダストの成長、破壊、輸送：隕石学および天文観測への示唆，地球惑星科学連合大会 2010, 2010 年 05 月 28 日，幕張メッセ（千葉市）招待講演

①倉本 圭, 小林 憲正, 大谷 栄治, 月・固体惑星内部の構造、起源、進化、ダイナミクス, 地球惑星科学連合大会 2010, 2010 年 05 月 26 日，幕張メッセ（千葉市）招待講演

②佐々木洋平, 竹広真一, 林祥介, 倉本 圭, 上端応力無し条件下端粘着条件を課した回転球殻中に出現する弱磁場ダイナモ, 2010 年 05 月 25 日，幕張メッセ（千葉市）

③木村 淳, 倉本 圭, 諸田智克, 月の内部熱進化再考：地殻重力異常形成と火成活動継続期間への示唆，地球惑星科学連合大会 2010, 2010 年 05 月 24 日，幕張メッセ（千葉市）

④田中 智, 飯島祐一, 三谷 烈史, 大嶽 久志, 小川 和律, 小林 直樹, 木村 淳, 倉本 圭, 次期月探査計画 SELENE-2 科学搭載機器の検討状況(2), 2010 年 05 月 24 日，幕張メッセ（千葉市）

[図書] (計 1 件)

① 倉本 圭, 「地球惑星科学入門」第 14 章 地球の誕生と大気・海洋の起源 (p.165-173), 第 31 章 太陽系の成り立ちと運動 (p. 361-370), Box 30.1 ケプラーの法則 (p. 370), 第 32 章 惑星と衛星 (p.371-386), 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉本 圭 (KURAMOTO KIYOSHI)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：50311519

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

竹広真一 (TAKEHIRO SHIN-ICHI)
京都大学・数理解析研究所・准教授
研究者番号：30274426

(3) 研究協力者

福井 隆 (FUKUI TAKASHI)
北海道大学・大学院理学院・院生

安達俊貴 (ADACHI TOSHITAKA)
北海道大学・大学院理学院・院生