

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870314

研究課題名(和文) 高解像度探査データに基づく月の溶岩流組成と噴出年代の調査

研究課題名(英文) The relationship between the compositions and eruption ages of mare basalt of the Moon

研究代表者

諸田 智克 (Morota, Tomokatsu)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号：30415898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では月マンツルの組成分布と熱進化を観測的に制約するために、海の溶岩流の組成推定を行い、マグマ噴出年代との関係を調査した。その結果、嵐の大洋・雨の海領域では23億年前にチタン量の増加が起こったことがわかり、これはマグマソースが変化したことを示している。一方、他の領域では増加は観測されなかった。噴出年代の分布から嵐の大洋・雨の海領域では23億年前以降に一時的にマグマ噴出量が増加したことが知られている。これらの結果を統合して我々は、嵐の大洋・雨の海領域直下のマンツルにおいて23億年前にチタンを多く含むホットブルームが発生し、火成活動のピークと高チタンマグマの噴出を引き起こしたと推定している。

研究成果の概要(英文)：In order to place constraints on the composition and thermal history of the lunar mantle, in this study, we investigated the relationship between the eruption ages and Ti contents of mare basalts. We found that an increase in Ti content occurred at 2.3 Ga in the Oceanus Procellarum and Mare Imbrium regions, suggesting a possible magma source transition. The eruption ages of mare basalts suggest that a peak of volcanic activity may have occurred from 2.3 to 1.5 Ga. From these results, we propose a hypothesis that a high-Ti hot plume ascending from the core-mantle boundary generated the increase in Ti content and the peak of volcanic activity.

研究分野：惑星科学

キーワード：月 火成活動 マンツル チタン マグマ クレーター年代学

### 1. 研究開始当初の背景

月は地球型惑星の中の小型端成分である。そのために地球や他の固体天体に比べて、月は早い段階で主な地質活動が終了し、初期に起こった様々なイベントの記録が残されている。つまり月は地球型惑星の初期進化を探る上での絶好のアナログ天体として位置づけることができる。

月初期におけるマグマオーシャンの固化にともなったマンツルの形成過程や、その後の進化過程に関しては様々なモデルが提案されているもの [e.g., Zhong et al. 2000; Wiczorek & Phillips 2000; Parmentier et al. 2002]、未だに解明されていない。それを解決するための手がかりとして、月マンツル組成の水平・垂直分布を調べることは圧倒的に重要であり、そのために表面の玄武岩は有用である。月の玄武岩にはチタン含有量の多様性があることが知られており、それらはマグマの分化度だけでは説明できないため、マグマソース域の組成を反映していると考えられている。チタンは液相に濃集しやすいため、マグマオーシャン固化段階において、マンツル内で浅部ほど高チタン量となるような鉛直分布を作ったと考えられる [Shearer et al. 2006]。一方、チタンは比重が高いため、そのような分布が重力不安定を引き起こした可能性があり、もし重力不安定が完全に解消されれば、深部が高チタンとなるような構造へと変化したはずである [Hess & Parmentier 1995; Parmentier et al. 2002]。これらの過程は月形成から1億年足らずで起こったと考えられている。このように、チタンの分布は月マンツルの初期進化過程を紐解く上で重要な示唆を与えてくれる。

一般に、月は比較的単純な熱進化をたどったと考えられている。月の熱史シミュレーション研究によると、マグマオーシャン固化後に（もし重力不安定による密度構造逆転 [Hess & Parmentier 1995] が起こったならば、その後）マンツルが再熔融し、その部分熔融域はリソスフェアの成長とともに浅部から冷却した。この描像に基づいて、初期のマグマはより浅部を起源とし、後期のマグマは相対的に深部を起源とする傾向があると考えられている [e.g., Spohn et al. 2001]。つまり、溶岩流の年代情報と組成情報を組み合わせることで、簡易的な月マンツルの3次元組成構造の復元が可能となる。

月面のチタン含有量は紫外-可視域の分光データから見積もることが可能である [Lucey et al. 1998]。しかし後で述べるように、過去の探査データでは溶岩流のチタン量を正確に決定するには空間分解能が不足しているという問題があった。同様に、月惑星表面の年代はクレータの数密度から決定可能であるが [Neukum 1983; Neukum & Ivanov 1994]、溶岩流の噴出年代についても、クレータの数密度を精度良く決定するに足

る高空間分解能のデータが欠落していた。

一方、近年、日本が打ち上げた月周回衛星「かぐや」をはじめとして、各国の月探査衛星が立て続けに打ち上げられ、かつて無いほどの膨大な高解像度画像データが取得されはじめている [Kato et al. 2008; Haruyama et al. 2008]。それにより、小クレータの数密度から溶岩ユニットの精密な年代決定が成され [Morota et al. 2009; 2011; Cho et al. 2012]、同様に溶岩流の組成も正確に決定することが可能になりつつある。

### 2. 研究の目的

このような背景下において、本研究では近年蓄積されてきた月全球の高解像度データのアドバンテージを活かし、月マンツル組成の水平・垂直構造に制約を与えるため、月の溶岩流のチタン含有量を正確に決定する。更にそれぞれの海において、得られた組成情報と、近年「かぐや」データから決定された溶岩流噴出年代 [e.g., Hiesinger et al. 2011; Morota et al., 2011] との相関関係を調査する。このような月面溶岩流の詳細元素組成研究は、月の熱史モデルにおける制約条件となると共に、将来の月探査計画立案においても重要な基礎データになると期待される。

### 3. 研究の方法

惑星探査データを用いた溶岩組成決定における本質的な問題点は、度重なる天体衝突の結果として、月面は周辺領域や深部起源の様々な物質が混合されたレゴリス層に覆われているため、表面の組成が実際の岩石の組成を表わしていないという点に集約される。そこで本研究では、レゴリス層を掘抜いた小クレータや周囲からの放出物の影響を除いた領域においてチタン含有量を計測する事で溶岩流組成の正確な測定を行う。過去の探査データでは分光画像データの空間分解能の欠如のために、そのような領域の判読は達成できていなかった。本研究では、主にこの点において、近年の高解像度探査データの利点を活用するものである。

本研究の具体的な作業としては、(1)「かぐや」と米探査機 LRO で得られた高空間分解能画像を用いて地形的特徴、分光学的分類に基づき、溶岩流の地質ユニットを再決定する。次に、(2) 地形的特徴、分光額の特徴に基づき、周辺ユニットや下位層からのコンタミネーションのない領域は判別し、各ユニットのチタン含有量を決定する。チタン量の見積もりには Lucey 法 [Lucey et al. 1998; Otake et al. 2012] を用いる。(3) それぞれの海においてチタン含有量と、先行研究で調査された溶岩流の噴出年代 [e.g., Hiesinger et al. 2011; Morota et al., 2011] との相関性を調査し、溶岩流のチタン量の時間変化について議論する。

#### 4. 研究成果

月の表側にある嵐の大洋、雨の海領域や、静かの海、晴れの海、湿りの海、豊かの海、雲の海、神酒の海、裏側にあるモスクワの海、東の海、南極エイトケン盆地にある海において、260 に及ぶ溶岩流ユニットについて、組成と年代の関係を調査した。

チタン量はそれぞれの海によって、また、海の中の溶岩流ユニットによっても大きく異なっており、この結果はアポロ玄武岩試料で見られるチタン量の多様性と整合的である [Papike et al. 1976; Neal & Taylor 1992]. このような玄武岩のチタン量の多様性は月マントルの組成不均質を表していると考えられる。それらの平均値は4 wt%程度であり、火成活動が活発であった嵐の大洋・雨の海領域とそれ以外の領域で大きな差は見られない。一方、嵐の大洋・雨の海領域では23億年前以降に噴出したマグマは選択的に高～中チタン量をしめしており、平均チタン量が23億年前に4 wt% から7 wt%へと増加したことがわかった。この結果は23億年前にマグマソースが変化したことを示唆している。一方で他の領域ではこのようなチタン量の増加は観測されなかった。

噴出年代の分布から嵐の大洋・雨の海領域では23億年前以降に一時的にマグマ噴出量が増加したことが知られている [Hiesinger et al. 2003; Morota et al. 2011]. これらの結果を統合して我々は、嵐の大洋・雨の海領域直下のマントルにおいて23億年前にチタンを多く含むホットプルームが発生し、火成活動のピークと高チタンマグマの噴出を引き起こしたとするホットプルーム仮説を提案する (図1)。そのシナリオは以下の通りである。(1) 月初期のマグマオーシャン固化後、上部マントルの再溶融が起こり、39～35億年前に火成活動のピークが起こった。それにより月の海の大部分が形成された。上部マントルは次第に冷え、マグマ活動は減衰した。(2) 月の深部ではマグマオーシャン固化直後に深部にチタンと共に沈み込んだ放射性元素による加熱が起こり [Zhong et al. 2000; de Vries et al. 2010; Zhang et al. 2013]、嵐の大洋・雨の海領域の直下のマントルにおいて約20億年前にホットプルームが発生した。プルームの発生によって嵐の大洋・雨の海領域で活発な高チタンマグマによる火成活動が起こった。このシナリオはまだ仮説の域をでないが、今後の嵐の大洋・雨の海領域の地形的研究、月の熱史の理論研究から検証されると期待される。

また、溶岩流のチタン量測定に基づいて、本研究ではマグマの噴出条件の検討を行った。月のマグマのリキダス密度は地殻を構成する斜長岩の密度よりも大きいため [Wieczorek et al. 2000]、マグマは地殻の薄い領域で選択的に噴出できると考えられている [Solomon 1977; Head & Wilson 1992].

本研究では溶岩流の体積を測定したところ、高チタンマグマが噴出している衝突盆地では、その他の衝突盆地に比べてマグマ噴出量が少ないことがわかった。例えば、5～10wt%のチタン量を含むマグマが噴出したアポロ盆地のマグマ体積は4,400～7,400 km<sup>3</sup>であるが、同程度サイズの衝突盆地を埋めるモスクワの海や湿りの海では10,000～100,000 km<sup>3</sup>の体積がある。この結果は、高チタンマグマはリキダス密度が高い傾向があり [Wieczorek et al. 2001]、マグマの浮力が小さいために噴出量が少なくなっていると解釈できる。この結果は月におけるマグマの噴出過程と、噴出量の空間的不均質性を理解する上で重要である。

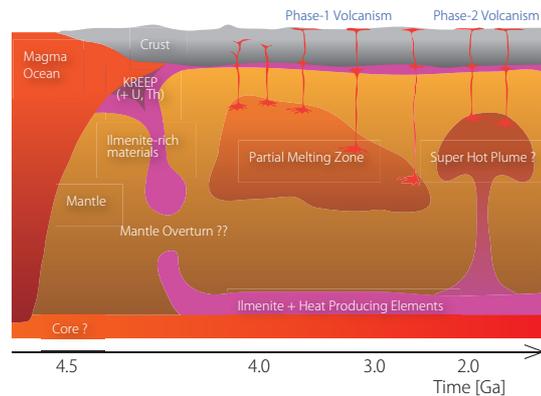


図1 23億年前のチタン量の増加と噴出のピークを説明するホットプルーム仮説。月初期のマグマオーシャン固化後にチタン、放射性元素に富む上部マントルは重力不安定により月深部に沈み込んだと考えられている。それらがその後の加熱により浮力を得て、再度上昇したとすると、観測された23億年前の高チタンで、噴出のピークを持つ火成活動を説明することが可能である。

#### 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 17 件)

- (1) Yamamoto, S., R. Nakamura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Ishihara, T. Morota, N. Hirata, M. Ohtake, T. Hiroi, Y. Yokota, and J. Haruyama (2013) A new type of pyroclastic deposits on the Moon showing unique visible absorption bands: possible Fe-bearing spinel, *Geophysical Research Letters*, 39, L13201, doi:10.1029/2012GL052098, 査読有.
- (2) 長勇一郎, 三浦弥生, 諸田智克, 杉田精司 (2013) K-Ar法を用いた惑星探査におけるその場年代計測法の開発, *日本惑星科学会誌・遊星人*, 22, 132-145, 査読有.
- (3) 山本聡, 中村良介, 松永恒雄, 小川佳

- 子, 石原吉明, 諸田智克, 平田成, 大竹真紀子, 廣井孝弘, 横田康弘, 春山純一 (2013) かぐやスペクトルプロファイラが発見した新しいタイプの月の火山碎屑物, 日本惑星科学会誌・遊星人, 22, 186-193, 査読有.
- (4) 加藤伸祐, 諸田智克, 山口靖, 大嶽久志, 大竹真紀子 (2013) 月の海の玄武岩組成が示唆する月マントルの進化史, 日本惑星科学会誌・遊星人, 22, 194-199, 査読有.
- (5) Ishihara, Y., Y. Saruwatari, A. Sawada, T. Morota, and Y. Hiramatsu (2014) Quantitative measurement method for impact basin characteristics based on localized spherical harmonics, *Icarus*, 228, 315-323, 査読有.
- (6) Yokota, Y., K. Gwinner, J. Oberst, J. Haruyama, T. Matsunaga, T. Morota, H. Noda, H. Araki, M. Ohtake, S. Yamamoto, P. Gläser, Y. Ishihara, C. Honda, N. Hirata, and H. Demura, Variation of the lunar highland surface roughness at baseline 0.15-100 km and the relationship to relative age, *Geophysical Research Letters*, 41, 1444-1451, 査読有.
- (7) Yamamoto, S., T. Matsunaga, Y. Ogawa, R. Nakamura, Y. Yokota, M. Ohtake, J. Haruyama, T. Morota, C. Honda, T. Hiroi, S. Kodama (2014) Calibration of NIR 2 of Spectral Profiler onboard Kaguya/SELENE, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52, 6882-6898, 査読有.
- (8) Ohtake, M., K. Uemoto, Y. Yokota, T. Morota, S. Yamamoto, R. Nakamura, J. Haruyama, T. Iwata, T. Matsunaga, Y. Ishihara (2014) Distribution of ultramafic rock and location of impact melt pool within the South Pole-Aitken basin, *Geophysical Research Letters*, 41, doi:10.1002/2014GL059478, 査読有.
- (9) 長勇一郎, 三浦弥生, 亀田真吾, 岡崎隆司, 諸田智克, 杉田精司 (2014) 惑星探査での年代測定に向けた開発の動向, *地球化学*, 48, 231-243, 査読有.
- (10) Morota, T., Y. Ishihara, S. Sasaki, S. Goossens, K. Matsumoto, H. Noda, H. Araki, H. Hanada, S. Tazawa, F. Kikuchi, T. Ishikawa, S. Tsuruta, S. Kamata, H. Otake, J. Haruyama, and M. Ohtake (2015) Lunar mare volcanism: Lateral heterogeneities in volcanic activity and relationship with crustal structure, in *GSL Special Publications 401: Volcanism and Tectonism Across the Inner Solar System*, edited by T. Platz, M. Massironi, P. K. Byrne, H. Hiesinger, pp. 127-138, doi:10.1144/SP401.11, Geological Society of London, 査読有.
- (11) Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, T. Morota, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, H. Araki, K. Matsumoto, E. Tajika, K. Kuramoto, and F. Nimmo (2015) The relative timing of Lunar Magma Ocean solidification and the Late Heavy Bombardment inferred from highly degraded impact basin structures, *Icarus*, 250, 492-503, 査読有.
- (12) Cho, Y., S. Sugita, S. Kameda, Y. N. Miura, K. Ishibashi, S. Ohno, S. Kamata, T. Arai, T. Morota, N. Namiki, and T. Matsui (2015) Quantitative potassium measurements using laser-induced breakdown spectroscopy under high vacuum conditions for in situ K-Ar dating of planetary surfaces, *Spectrochimica Acta Part B*, 106, 28-35, 査読有.
- (13) Yamamoto, S., R. Nakamura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Ishihara, T. Morota, N. Hirata, M. Ohtake, T. Hiroi, Y. Yokota, and J. Haruyama (2015) Global occurrence trend of high-Ca pyroxene on lunar highlands and its implications, *Journal of Geophysical Research (Planet)*, 120, doi:10.1002/2014JE004740, 査読有.
- (14) 諸田智克, 平田成 (2015), クレータサイズ頻度分布から探る月惑星表面の地質進化, *遊星人*, 24, 214-224, 査読有.
- (15) Kameda, S., H. Suzuki, Y. Cho, S. Koga, M. Yamada, T. Nakamura, T. Hiroi, H. Sawada, R. Honda, T. Morota, C. Honda, A. Takei, K. Takamatsu, Y. Okumura, M. Sato, T. Yasuda, K. Shibasaki, S. Ikezawa, S. Sugita (2015) Detectability of hydrous minerals using ONC-T camera onboard the Hayabusa-2 spacecraft, *Advances in Space Research*, 56, 1519-1524, 査読有.
- (16) Yamamoto, S., R. Nakamura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Ishihara, T. Morota, N. Hirata, M. Ohtake, T. Hiroi, Y. Yokota, and J. Haruyama (2015) Featureless spectra on the Moon as evidence of residual lunar primordial crust, *Journal of Geophysical Research (Planet)*, 120, 2190-2205, 査読有.
- (17) Yamada, T., K. Ando, T. Morota, H. Katsuragi (2016) Timescale of asteroid resurfacing by regolith

convection resulting from the impact-induced global seismic shaking, *Icarus*, 272, 165-177, 査読有.

[学会発表] (計 10 件)

- (1) 諸田智克, 惑星表面のクレータ記録から探る太陽系進化史, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張, 2013/05.
- (2) 諸田智克, 杉田精司, 長勇一郎, 三浦弥生, 渡邊誠一郎, 古本宗充, 本田親寿, 杉原孝充, 石原吉明, 大竹真紀子, 唐牛讓, 石橋高, 荒井朋子, 武田弘, 寺田健太郎, 鎌田俊一, 佐伯和人, 小林進悟, 亀田真吾, 吉岡和夫, 岡崎隆司, 並木則行, 小林正規, 大野宗祐, 千秋博紀, 和田浩二, 橘省吾, その場年代計測装置による月惑星年代学探査, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張, 2013/05.
- (3) 諸田智克, 杉田精司, 長勇一郎, 三浦弥生, 渡邊誠一郎, 大竹真紀子, 小林直樹, 唐牛讓, 古本宗充, 本田親寿, 杉原孝充, 石原吉明, 石橋高, 荒井朋子, 武田弘, 寺田健太郎, 鎌田俊一, 佐伯和人, 小林進悟, 國井康晴, 大槻真嗣, 亀田真吾, 吉岡和夫, 岡崎隆司, 並木則行, 小林正規, 大野宗祐, 千秋博紀, 和田浩二, 橘省吾, 田中智, 向井利典, その場年代計測装置による月惑星年代学探査, 第 46 回月・惑星シンポジウム, 相模原, 2013/08.
- (4) 諸田智克, 春山純一, 本田親寿, 大竹真紀子, 平田成, 出村裕英, 山本聡, 松永恒雄, 横田康弘, 中村良介, 石原吉明, 渡邊誠一郎, 古本宗充, クレータ生成率モデルの修正と月進化史への影響, 日本惑星科学会秋季大会, 石垣, 2013/11.
- (5) Morota, T., Ages of farside terrains, SELENE Symposium 2014, Mitaka, 2014/03.
- (6) Morota, T., Lateral heterogeneities in volcanic activity, SELENE Symposium 2014, Mitaka, 2014/03.
- (7) 諸田智克, 月惑星表面のクレータ記録からみた後期重爆撃期, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張, 2014/04.
- (8) 諸田智克, ほか, 月の衝突盆地の放出物厚モデルにもとづくメガレゴリス厚分布, 日本惑星科学会秋季大会, 仙台, 2014/09.
- (9) 諸田智克, 月惑星表面のクレータ記録からみた天体衝突史, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張, 2015/05.
- (10) Morota, T., Stratigraphy of lunar mare basalts and importance of lunar hole studies, 30th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Kobe, 2015/07.

[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

諸田 智克 (MOROTA TOMOKATSU)  
名古屋大学大学院環境学研究科・助教  
研究者番号: 30415898

(2) 研究分担者なし

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者なし

( )

研究者番号: