

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05633

研究課題名(和文) 月初期における火成活動史解明に向けたマグマ組成の調査

研究課題名(英文) Magma compositions in mare volcanism on the early Moon

研究代表者

諸田 智克 (Morota, Tomokatsu)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：30415898

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)：月初期のマグマ活動については未だに解明されていない。本研究は重力異常データから発見された、太古の時代のマグマ貫入の痕跡と考えられる線状の重力異常(LGA)に着目し、貫入岩路頭の探索とマグマ組成の調査から、月の冥王代とも言える時代の火成活動の復元を目指すものである。月周回衛星搭載のマルチバンドデータを用いた探索の結果、複数のLGAにおいて玄武岩質のスペクトルを示す領域が発見され、これはLGAがマグマ貫入起源であることを支持する初めての物質化学的証拠と言える。それらの岩石は低チタン玄武岩に分類され、月のマグマオーシャン固化後の特定の深さの層を起源とするマグマである可能性が高い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星初期の熱進化の理解は惑星の初期状態を理解する上で重要であるが、太陽系初期における活発な天体衝突によってその記録は不鮮明であった。本研究は月の初期に地殻に貫入したと思われる玄武岩を発見し、そのマグマ組成に制約を与えることに成功した。この成果は月初期のマントル構造とマグマソースの深さを制約するものであり、月の初期状態復元に向けて基礎情報となるものであり、学術的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：The magnitude of magma activity before the basin-forming period (>3.9 Ga) remains unknown, because these magmas could hardly extrude to the surface before topographic lows were formed by basin-forming impacts. In order to verify the existence of pre-basin basalts and estimate its total volume we investigated whether the intrusive materials are exposed around large craters superposed on Linear Gravity Anomalies (LGAs). We found regions with high Fe content (12-14 wt%) and mineral abundance ratio close to the basaltic composition compared to the lower crustal material. It is highly likely that the high Fe-rich material is originated from intrusive materials that constitute the LGA.

研究分野：惑星科学

キーワード：月 海の火成活動 マグマ組成 線状重力異常

1. 研究開始当初の背景

月はマグマオーシャン (LMO: Lunar Magma Ocean) の状態から始まり、LMO の固化過程においてマントルと斜長岩地殻に分化した。その後、マントルが再溶融し、生成されたマグマが表面に噴出して、月の海が作られた。アポロ計画で得られた岩石試料の放射年代や探査データに基づく層序学的研究から、LMO の固化は約 45~44 億年前には完了し、海の形成は少なくとも 39~20 億年前の間に起こっていたことが知られている。一方で、両者をつなぐ、LMO 固化から再溶融までの月の初期段階における熱進化についての理解は極めて限定的である。特にマントル再溶融が起こった年代や火成活動初期段階におけるマグマソースの深さや組成については多くの不明であり、月の熱進化をシームレスに繋ぐ上でのミッシングピースとなっていた。

一方で近年、米国の月探査機 GRAIL による高空間解像度の重力分布から、線状の正の重力異常 (LGA: Linear Gravity Anomaly) が見つかった。LGA は重爆撃期につくられた巨大衝突によって部分的に消されていることから、重爆撃期の終了よりも前に形成されたことがわかっている。これらの状況証拠から、Andrews-Hanna et al. (2013) は以下のような LGA の形成仮説を提案した。(1) LMO 固化後のマントル再溶融により月は全球膨張し、表層の引張応力により、割れ目構造が形成。(2) 再溶融で生成されたマグマが上昇し、割れ目構造に貫入。

近年の日本の月周回衛星「かぐや」をはじめとする各国の月探査衛星の成功により、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ている。特に「かぐや」搭載マルチバンドイメージャによって高解像度の多波長画像データが月全球において揃いつつある。それによって、LGA の起源となった貫入岩の路頭の探索と岩相調査が月全球において可能となってきた。

2. 研究の目的

そのような背景下で、本研究では線状重力異常 (LGA) に着目し、太古のマグマ活動の痕である貫入岩路頭の探索とマグマ組成の調査から、月の冥王代とも言える時代の火成活動の復元を目指す。これを実現するために、本研究では近年の月探査ミッションによって蓄積されてきた高解像度画像データを活用する。

3. 研究の方法

貫入岩の元素・鉱物組成を把握するためには、それらが表面に露出している必要がある。幸いにも以下のような考え方から、LGA の貫入岩の一部は表面に露出している可能性が高い。

重力異常データから LGA の起源物質である貫入岩の上端深度は 10~20km 程度と推定されている。クレータのスケールリング則に従うと、もし 100~200 km のサイズのクレータが LGA 上に作られた場合、内部に存在した貫入岩は掘り起こされ、周囲に撒き散らされるはずである。多くの LGA の上には 100km サイズのクレータが存在しており、貫入岩を掘り返している可能性が高い。本研究では、このような貫入岩露出の組成を、月周回衛星「かぐや」搭載のマルチバンドイメージャ、スペクトルプロファイラのデータを用いて調査する。また貫入岩を掘り返した大クレータの年代をクレータ年代学によって推定することで、LGA 形成の下限値を制約する。

4. 研究成果

- (1) 貫入岩露出の探索のために、マルチバンドイメージャデータを用いた玄武岩質物質の判別手法の検討を行なった。一般に月の玄武岩は 15 wt%以上の FeO 量を持ち、高 Ca 輝石を主要成分とするため、950 nm から長波長側に広がった吸収スペクトルを示す。これらの特徴を活かし、950 nm 吸収の深さに対する 1050 nm、1250 nm 吸収の深さを用いた玄武岩判別法を構築した。実際の月試料のスペクトルデータを用いた検証を行い、玄武岩と、月の下部地殻物質であると考えられるノーライトとを区別できることが確認された。
- (2) 上記手法を実際のマルチバンドイメージャデータを用いて月面に適用する手順の検討を実施した。月面の風化した領域ではスペクトルの吸収は弱くなるため、吸収深さを精度良く定量することは困難となる。そこで本研究では、まず宇宙風化度指標 OMAT による新鮮領域の抽出を行い、さらに高 FeO 量領域を抽出した上で、950 nm での吸収深さに対する 1050 nm、1250 nm での吸収深さで玄武岩露頭の探索を行なった。この手順で実際の玄武岩物質が抽出されることを月の海領域で確認できた。
- (3) 20 領域の LGA において上記の解析手順を適用し、貫入岩露頭の探索を実施した。月の表側にある大部分の LGA 上では、後の時代のマグマ活動によって表面が汚染されているため、太古の貫入岩の探索は困難であったのに対し、月の裏側の LGA はその後の時代のマグマ活動が限定的であるため、貫入岩探索を実施できた。裏側の LGA の中で特に、LGA2、LGA4、LGA20 の周辺では玄武岩質物質の路頭が発見された。
- (4) LGA4 は Crisium 盆地と交差している。Crisium リングの複数の領域で小規模ながら玄武岩

質組成を持つ領域が見つかった。発見された領域は数百 m サイズのクレータに対応しており、周囲からの飛来物ではなく、リングの構成岩石を掘削したものと考えられる。このことは Crisium 盆地形成以前にマグマ活動が起こっていたことを示す。同様に、LGA2, LGA4 の上にあるクレータ Roche, Edison, Lomonosov の放出物上にもマグマ起源と考えられる高鉄量物質が散在していることを発見した(図1)。この結果は、LGA の周辺の地下において、高鉄量物質が存在していたことを示しており、LGA がマグマ貫入起源であることを強く支持する初めての物質化学的証拠である。衝突シミュレーション iSale を用いた掘削深さの見積もりから、それらの貫入岩が存在した深さの下限は5-7kmと推定される。

- (5) 一方で、最大の LGA である LGA1 上でも数十 km サイズの大クレータが存在するものの高鉄量を示す領域は発見されず、貫入岩の存在は確認できなかった。この領域は重力異常データから、斜長岩地殻が厚いことがわかっており、表面付近までマグマが貫入できなかったために、その後のクレータ形成によって露出しなかった可能性が考えられる。
- (6) 本研究で発見された玄武岩は、海のマグマ活動の時代に噴出した玄武岩と比較してチタン含有量とその多様性が低く、低チタン玄武岩に分類される。月のマグマオーシャン固化後の特定の深さの層を起源とするマグマである可能性が示唆され、月のマグマオーシャンで形成された直後の上部マントル組成を制約する重要な情報である。

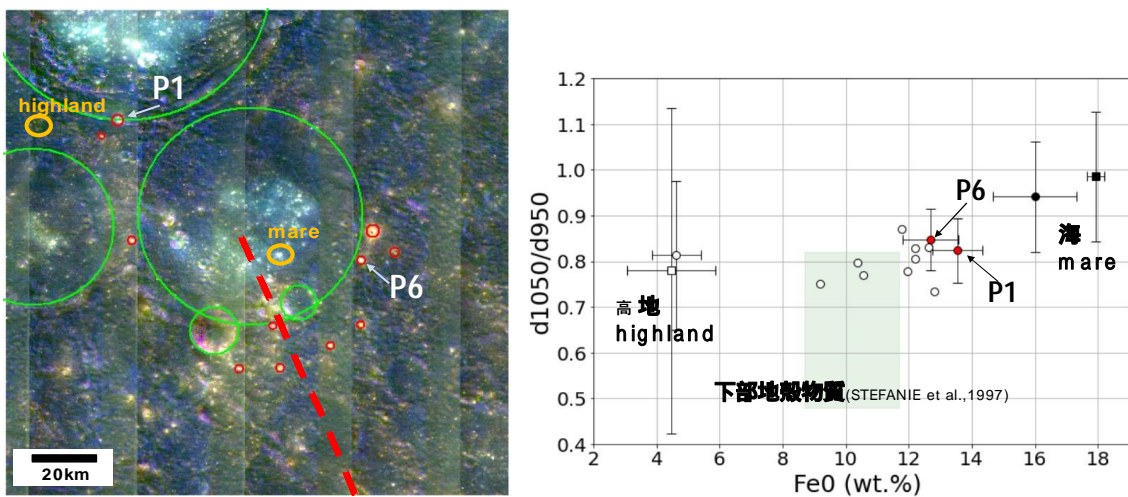


図1 LGA20での貫入岩路頭探索の例。Edisonクレータ(左図中央の緑円)、Lomonosovクレータ(左図左上の緑円)の放出物領域に下部地殻物質と玄武岩物質の混合物を示す領域が発見された(P1とP6の領域)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hareyama, M., Y. Ishihara, H. Demura, N. Hirata, C. Honda, S. Kamata, Y. Karouji, J. Kimura, T. Morota, H. Nagaoka, R. Nakamura, S. Yamamoto, Y. Yokota, M. Ohtake	4. 巻 321
2. 論文標題 Global classification of lunar reflectance spectra obtained by Kaguya (SELENE): Implication for hidden basaltic materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 407-425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2018.11.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Taguchi, M., T. Morota, and S. Kato	4. 巻 122
2. 論文標題 Lateral heterogeneity of lunar volcanic activity according to volumes of mare basalts in the farside basins	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research (Planet)	6. 最初と最後の頁 1505-1521
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2016JE005246	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kato, S., T. Morota, S. Watanabe, Y. Yamaguchi, M. Ohtake, and H. Otake	4. 巻 52
2. 論文標題 Magma source transition of lunar mare volcanism at 2.3 Ga	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1899-1915
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/maps.12896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki, H., M. Yamada, K. Kameda, T. Kouyama, E. Tatsumi, R. Honda, H. Sawada, N. Ogawa, T. Morota, C. Honda, N. Sakatani, M. Hayakawa, Y. Yokota, and S. Sugita	4. 巻 300
2. 論文標題 Initial inflight calibration for Hayabusa2 optical navigation camera (ONC) for science observations of asteroid Ryugu	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 341-359
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2017.09.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 池田 あやめ、熊谷 博之、諸田 智克
2. 発表標題 月面上の舌状衝上断層付近におけるボルダーク崩れの成因の解明：最大加速度の距離減衰式に基づく震源の推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平田 佳織、諸田 智克、杉田 精司
2. 発表標題 水星のRembrandt盆地とCaloris盆地内のマグマ噴出の量と年代
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白井 英之、西野 真木、並木 則行、稲富 裕光、大竹 真紀子、諸田 智克、白井 寛裕
2. 発表標題 アルテミス計画参画に向けた月のプラズマ・ダスト環境に関する検討
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 並木 則行、稲富 裕光、白井 英之、諸田 智克、西野 真木、大竹 真紀子、白井 寛裕
2. 発表標題 「日本のアルテミス計画参加に向けた理学的・工学的検討」報告
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 諸田智克
2. 発表標題 月の地質進化と縦孔周辺探査 2
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田 あやめ、熊谷 博之、諸田 智克
2. 発表標題 月面のクレータ斜面におけるポルダール崩れの成因の検討:舌状衝上断 層での月震と斜面上の少クレータ形成による震動の比較
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 諸田智克
2. 発表標題 月の海のマグマ噴出過程と時間変化
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 池田あやめ, 諸田智克, 長岡央
2. 発表標題 衝突盆地のリング構造を用いた月初期のマグマ活動の痕跡調
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 諸田智克
2. 発表標題 月の地質進化と縦孔周辺探査
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸田智克
2. 発表標題 クレータ統計からみた月の進化と衝突史
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（招待講演）
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 諸田智克
2. 発表標題 UZUME 計画と月の火成活動研究
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口雅子, 諸田智克, 加藤伸祐
2. 発表標題 月のマグマ噴出量から制約される噴出プロセスとマグマ生成量の表 / 裏二分性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤 伸祐、諸田 智克、山口 靖、渡邊 誠一郎、大嶽 久志、大竹 真紀子、二村 徳宏
2. 発表標題 月の後期火成活動の玄武岩組成の特徴
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諸田智克, 千秋博紀, 横田康弘, 坂谷尚哉, 巽瑛理, 杉田精司, 本田理恵, 本田親寿, 山田学, 平田成, 平田直之, 三浦昭, 山口智宏, 田中智, はやぶさ2 光学航法カメラチーム
2. 発表標題 はやぶさ2 ONGデータによるRyugu表面ラフネスの推定: 着陸点選定訓練データを用いた検討
3. 学会等名 日本惑星科学会2017年度秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤 伸祐、諸田 智克、山口 靖、渡邊 誠一郎、大嶽 久志、大竹 真紀子、二村 徳宏
2. 発表標題 「かくや」連続スペクトルデータを用いた月の後期火成活動における玄武岩の鉱物量比の推定
3. 学会等名 日本惑星科学会2017年度秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森田 晟也, 諸田 智克, 渡邊 誠一郎
2. 発表標題 フォボスのクレーター緩和評価と他天体との比較に基づく表層進化過程の検討
3. 学会等名 日本惑星科学会2017年度秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinsuke Kato, Tomokatsu Morota, Yasushi Yamaguchi, Sei-ichiro Watanabe, Hisashi Otake, Makiko Ohtake, Tokuhiko Nimura
2. 発表標題 CONSTRUCTION OF NEW RESTRICTED GAUSSIAN MODEL TO DERIVE MODAL MINERALOGY AND ELEMENTAL COMPOSITION FROM SPECTRAL DATA
3. 学会等名 49th Lunar and Planetary Science Conference
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taguchi, M., T. Morota, S. Kato
2. 発表標題 NEAR-FAR ASYMMETRY OF MAGMA PRODUCTION OF THE MOON: CONSTRAINTS FROM MARE VOLUMES WITHIN THE FAR SIDE IMPACT BASINS
3. 学会等名 49th Lunar and Planetary Science Conference
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鳥海光弘、入船徹男、岩森光、ウォリスサイモン、小平秀一、小宮剛、阪口秀、鷺谷威、末次大輔、中川貴司、宮本英昭	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 248
3. 書名 図説地球科学の事典	

〔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
連携研究者	長岡 央 (Nagaoka Hiroshi) (10707805)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員 (82401)	

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
---------	---------