

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340164

研究課題名(和文)月隕石と「かぐや」月探査衛星データの戦略的融合研究による月バルク組成決定への試み

研究課題名(英文) Determination of lunar bulk composition by integrated study of lunar feldspathic meteorite and Kaguya data

研究代表者

荒井 朋子 (Arai, Tomoko)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員

研究者番号：10413923

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,700,000円、(間接経費) 2,910,000円

研究成果の概要(和文)：月地殻の鉱物分布は月初期のマグマオーシャン組成推定の鍵である。本研究は、月地殻岩石を含む月隕石鉱物分析と月地殻岩盤露出地域の「かぐや」衛星の反射分光データ解析により、月地殻鉱物分布を決定した。結果、月初期地殻は斜長石とかんらん石から成り、月地殻への隕石衝突の熱変成により、かんらん石から二次的に輝石が生じることがわかった。近赤外域で10%程度の輝石共存によりかんらん石の吸収が見えなくなるため、輝石の混在により初期地殻中のかんらん石は衛星分光観測から検知できない。従って現在の月地殻のかんらん石存在度は衛星データで検知されるよりはるかに高く、初期地殻のかんらん石存在度はさらに高いと結論付けた。

研究成果の概要(英文)：To determine the mineral abundance of the lunar crust which formed by lunar magma ocean crystallization, we conducted an integrated study of mineralogical and reflectance spectral analyses of feldspathic lunar meteorites, and data analyses of multiband Imager of Kaguya lunar mission on lunar crust exposed on Copernicus crater. These studies showed that olivines in the lunar crust are replaced by low-Ca pyroxenes by secondary heating events. Numerous meteoroid impacts on the lunar crust after the magma ocean crystallization should have heated and melted the olivine-bearing initial crust, causing replacement of the primary olivines by low-Ca pyroxenes. Thus, the secondary heating of the lunar initial crust likely altered an initial abundance of olivine in the primary lunar crust. Further, lower detectability of olivine than low-Ca pyroxene in visible-near infrared reflectance spectra may further bias the real abundance of olivine in the present lunar crust.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：月 月隕石 かぐや 地殻

1. 研究開始当初の背景

月は、原始地球に火星サイズの天体が衝突し、地球マントルと衝突天体の一部から形成したという仮説が最も有力である一方、月全体の化学組成(バルク組成と呼ぶ)がよくわかっていないため、化学的に上記の仮説を支持する十分な証拠は得られていない。形成直後の月は、ほぼ全球が溶融した「マグマオーシャン」状態であったため、マグマオーシャン組成は月バルク組成と近似できる。高温溶融状態を経ると蒸発しやすい元素及び蒸発しにくい元素(アルミニウムやカルシウムなど)の元素分別が起こるため、アルミニウムの元素量が月の出発物質の制約となる。月表層の約7割を覆う月高地地殻はマグマオーシャンの結晶化物であるため、地殻の鉱物分布と化学組成はマグマオーシャン組成推定の鍵である。月地殻は斜長石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)と少量のかんらん石($[\text{Mg},\text{Fe}]_2\text{SiO}_4$)と輝石から成る。斜長石がかんらん石と共に結晶化するか輝石と結晶するかはマグマ組成のアルミニウム濃度に依存する。従って月地殻中のかんらん石と輝石の分布は、月バルク組成ひいては月の起源の理解に直結する。

月地殻の鉱物分布の手掛かりとしてアポロ試料と月隕石があるが、アポロ試料中の地殻岩石は主に斜長石と輝石から成るのに対し、月隕石中の地殻岩石は斜長石とかんらん石からなるため、月地殻の鉱物組合せがはっきりしない状態である。月の表側赤道付近で回収されたアポロ試料と違い、月隕石は月面への無作為な隕石衝突により月面を飛び出し地球に落下したものであるため、アポロ試料よりも全球月地殻の鉱物決定に適する。また、日本の月探査衛星「かぐや」に搭載された反射分光装置の観測データの初期解析が完了し、ようやく月全球地殻の鉱物分布解析ができる時期に来ている。

2. 研究の目的

月隕石由来の月地殻岩石の鉱物分析と「かぐや」衛星の反射分光データ解析により、月全球地殻における斜長石、かんらん石、輝石の分布、組成、産状を調べ、それらのデータをもとに、マグマオーシャンから結晶化した鉱物組み合わせ(斜長石+かんらん石 or 斜長石+輝石)を明らかにし、マグマオーシャン組成(特にアルミニウム濃度)を推定する。

3. 研究の方法

①月地殻岩石を含む月隕石を入手する。南極産隕石については、NASA及び国立極地研究所から借用する。砂漠産隕石は購入する。また、比較のために、月地殻を含むアポロ16号及び17号試料をNASAより借用する。

②上記の月地殻岩石の鉱物分布、組織、組成を、電子線分析器及び二次イオン質量分析器により分析する。

③二次元可視近赤外分光分析装置を開発・製作し、上記の月地殻岩石の鉱物分光分析を行

う。

④月地殻岩石が露出する地域(月表側コペルニクスクレータ中央丘など)の鉱物分布特定のため、かぐや衛星搭載のマルチバンドイメージャの反射分光データ解析を行う。

⑤上記分析及び解析結果に基づき、月マグマオーシャン組成の推定を行う。

4. 研究成果

(1)可視近赤外波長域(0.4-2.6ミクロン)の可搬型二次元分光分析装置(Spectral Reflectance Imager:SRIM)(図1)の開発製作を行った。この装置により、実験室内での月地殻岩石切断面の二次元分光分析が可能となった。



図1 Spectral Reflectance Imager の写真

(2)月隕石由来の月地殻岩石(DaG 400, Dhofar 908, Dhofar 409, NWA 5000, NWA 482)及びアポロ17号(76535, 77215)の月地殻試料の分光分析及び化学組成分析を行った結果、衝突溶融を経た月地殻岩石試料(Dhofar 908)にのみ、かんらん石と斜長石からなる岩石が、二次的熱変成により、かんらん石が輝石に変化していることを明らかにした。

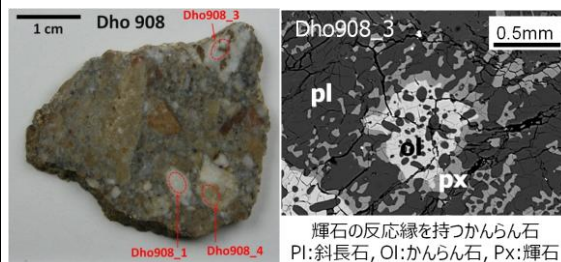


図1(左上) Dhofar908 隕石写真赤丸は反射分光測定点。(右上) Dhofar908-3 付近の反射電子像。斜長石とかんらん石の結晶粒界に輝石の反応線が見える。

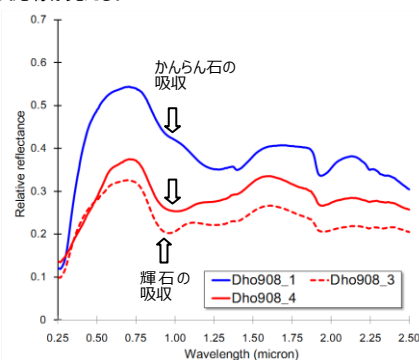
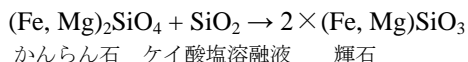


図2 図1測定点の反射分光特性。点-3に輝石の吸収が見える。

かんらん石から輝石への変化は下記の化学式に示す反応式で説明できるもので、地球岩石学で一般的に知られる相関係とも調和的である。



従って、輝石は熱変成によるかんらん石の二次的生成物であり、マグマオーシャンの結晶化過程では斜長石とかんらん石からなる初期地殻が形成されたことを明らかにした。本成果は 2012 年の月惑星科学会議で口頭発表を行い、国際論文誌に投稿し、現在査読過程である。

(3) かぐや月探査衛星の反射分光観測機器マルチバンドイメージャが観測した、コペルニクススクレータ中央丘の反射分光データの解析を行い、コペルニクススクレータ地域に露出する月地殻には、斜長石とかんらん石しか存在しないこと、隕石衝突により生じた衝突溶融メルトにのみ輝石が存在することを示した(図3)。従って、初期地殻は斜長石とかんらん石から成ることを明らかにした。本成果は、2013年の月惑星科学会議で口頭発表を行い、国際論文誌に投稿し、現在査読過程である。

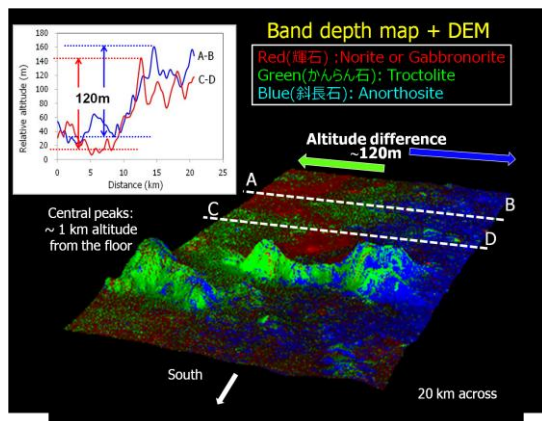


図3 かぐや衛星搭載マルチバンドイメージャの反射分光データが示すコペルニクススクレータ中央丘に露出する地殻岩盤の鉱物分布。地殻岩盤はかんらん石(緑)と斜長石(青)から成り、輝石(赤)はクレータ底の溶融物質にのみ存在する。

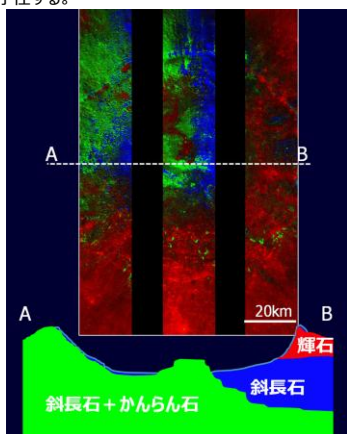


図4 かぐや衛星搭載マルチバンドイメージャの反射分光データが示すコペルニクススクレータ全域の鉱物分布から推定した深さ方向の地殻鉱物分布モデル。

(4) 上記の月隕石中の月地殻岩石分析結果及び、月地殻岩盤のかぐや衛星データ解析の結果からの研究結果をまとめると、

- ① 月地殻の構成鉱物は斜長石とかんらん石。
- ② 月地殻の輝石はかんらん石の二次生成物であることがわかった。

マグマオーシャンの結晶化により、斜長石とかんらん石から成る初期地殻形成後、現在に至るまで、大気の無い月には度重なる隕石様物体の衝突が起こり、月地殻は破壊、加熱溶融を受けてきた。この二次的加熱溶融により、月の初期地殻に含まれるかんらん石が輝石に置換されたと考えると、月地殻岩石中の輝石の存在が説明できる。

一方、かぐやデータが示す全球月地殻のかんらん石分布はクレータ中央丘やベズンリクに限定される。これは、近赤外域の反射分光特性では、数%の輝石共存によりかんらん石の吸収が見えなくなるためと考えられる。つまり、コペルニクススクレータのような、かんらん石を含む月初期地殻が保存された地域でも、少量の輝石が混在することにより、衛星による分光観測では検知が困難であることを意味する。

以上のことから、現在の月地殻のかんらん石存在度は、衛星による遠隔観測で確認されるよりはるかに高く、さらに隕石衝突を受ける前の形成初期の月地殻のかんらん石存在度はさらに高いと結論付けた。この成果も国際論文誌に投稿し、現在査読過程である。

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 23 件)

- ① Joy K. and Arai T. (2013) Lunar meteorites: new insights into the geological history of the Moon, 査読有, *Astronomy & Geophysics*, **56**, 2013, 4.28-4.32.
- ② Arai T., Hiroi T., Sasaki S., Matsui T., Origin of the lunar crust inferred from mineralogy and reflectance spectra of lunar meteorites, 査読無, *Lunar and Planetary Science XXXVIII*, 2013, abstract #1016.
- ③ Ohtake M., Pieters C. M., 他 10 名, One Moon, Many Measurements 3: Spectral Reflectance, 査読有, *Icarus*, **226**, 2013, 364-374.
- ④ 荒井朋子, 月惑星探査と月惑星試料分析との融合研究, 査読有, *ぶんせき* (日本分析化学会誌) **10**, 2012, 581-584.
- ⑤ Ohtake M., 他 11 名, Asymmetric crustal growth on the Moon indicated by primitive farside highland materials, 査読有, *Nature Geoscience* **5**, 2012, 384-388.
- ⑥ 荒井朋子, 月隕石研究による最新の月の描像, 査読有, *遊星人* (日本惑星科学)

会誌), 20, No.1, 2011, 28-35.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Arai T., Composition from SELENE data and meteorite analysis, and lunar crust formation model, SELENE Symposium 2014, 2014年3月4日, 国立天文台三鷹キャンパス
- ② 荒井朋子、月隕石 DaG 400 に含まれるトロクトライト地殻、2013年日本惑星科学会秋季講演会、2013年11月22日、石垣島市民会館
- ③ Arai T., Origin of the lunar crust inferred from mineralogy and reflectance spectra of lunar meteorites, 44th Lunar & Planetary Science Conference, 2013年3月21日、米国テキサス州ヒューストン
- ④ Arai T., Lunar Crustal Mineralogy inferred from Lunar Meteorites and Kaguya Data, 35th Antarctic Meteorite Symposium, 2011年11月18日、国立極地研究所

[図書] (計 1 件)

- ① 荒井朋子 他、朝倉書店、「月と月隕石」地球と宇宙の化学辞典 (日本地球化学会編)、2012, 479 ページ.

[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 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

<http://www.tomoko-arai.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒井 朋子 (ARAI, Tomoko)
千葉工業大学・惑星探査研究センター・上
席研究員
研究者番号：10413923

(2) 研究分担者

大竹 真紀子 (OHTAKE, Makiko)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
助教
研究者番号：30373442

三澤 啓司
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：70212230

(3) 連携研究者

()

研究者番号：