

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03959

研究課題名（和文）月南極域における地質解析

研究課題名（英文）Geological analyses of the lunar south polar region

研究代表者

佐藤 広幸（Sato, Hiroyuki）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任研究開発員

研究者番号：70816082

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、月南極域（ $>60^\circ\text{S}$ ）において紫外～近赤外域のマルチバンドモザイク画像を作成し、世界で初めて、同地域の高解像度（ $>20\text{m/pixel}$ ）スペクトル解析を可能にした。各種岩石・化学組成マップや宇宙風化度マップを作成し、スペクトルを利用した地質解析を行った結果、これまで認知されていなかった規模の範囲に広がる多数のエジェクタ堆積物の存在が明らかとなった。また宇宙風化が中緯度から極点へ向かって弱まっている事や、カンラン石に富む地域が新たにSouth-pole Aitken盆地（月最大の衝突盆地）に存在する事を発見し、宇宙風化の主要因や月の地殻・マントル構造に関する重要な示唆を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、技術的な難しさ故にこれまで手付かずの状態だった月南極域の反射率マップを、精密な較正処理によって試行錯誤の末作成した。空間解像度が高く、かつスペクトル解析に耐えうる精度の月極域データはこれが世界で初めてであり、世界中の宇宙機関や民間企業で現在計画中の月極域探査において、基礎データとして広く活用されるだろう。また、南極域（ $>60^\circ\text{S}$ ）でのスペクトル解析により、宇宙風化のメカニズムや月の地殻・マントル物質についての理解が今後進むだろう。本研究で試行した精密な測光補正や位置ずれ補正などの較正処理技術は、他の観測データを利用した極域での処理にも応用が効くものであり有用と考えられる。

研究成果の概要（英文）：We derived lunar south-polar ($>60^\circ\text{S}$) multi-band mosaics in the UV to near-IR wavelength range, which enables high-resolution ($>20\text{ m/pixel}$) spectral analyses of this region for the first time. We also derived various rock and chemical composition maps and space weathering maps. The results of geological analyses using these maps revealed the existence of numerous ejecta deposits spread over a previously unrecognized area. We also found that the space weathering effect weakens from mid-latitudes to the poles. The olivine-rich regions are also newly discovered along the south edge of the South-pole Aitken Basin (the largest impact basin on the Moon). These findings provide important insights into the dominant causes of space weathering and the crustal/mantle structure of the Moon.

研究分野：惑星リモートセンシング

キーワード：月極域 測光補正 宇宙風化 SPA盆地

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

月南極域は、月の内部構造やマントル物質の理解、月地殻成長モデルの再検証、水資源の探索、宇宙風化作用の主要因検証、等に繋がる科学的・資源的に重要な地域でありながら、十分な研究が行われてこなかった。原因の一つは、信頼性の高いスペクトルデータの不整備であり、常に太陽が低い月極域における正確な測光補正の難しさが障壁となっていた。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では以下3つの項目を目的とした。(1) 最新の観測データ・較正処理・測光補正技術を用い、高解像度 (>20m/pixel)・複数波長 (16バンド) からなる月南極域 (70°~90°S) の反射率マップを製作する。(2) 地形のみを基に作成された既存の地質図を更新し、極域の地表構成物質・地質構造を正しく把握する。(3) 月科学における3つの課題：①月地殻成長プロセスとマントル物質、②永久影内部および周辺の構成物質、③宇宙風化の主要因、を月極域で検証する。

3. 研究の方法

(1) データセット

本研究では反射率データとして、日本月周回衛星 SELENE 搭載のマルチバンドイメジャー(MI)、および米国月偵察衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 搭載の広角カメラ (WAC) によって撮像された画像データのうち、緯度 60° 以南を含むものを全て使用した。各バンドの中心波長および空間解像度は、MI では可視域：415, 750, 900, 950, 1000 nm ; 20 m/pixel、近赤外域：1000, 1050, 1250, 1550 nm ; 60 m/pixel、WAC では紫外域：321, 360 nm ; 400 m/pixel、可視域：415, 566, 604, 643, 689 nm ; 100 m/pixel である[1, 2]。また座標投影や測光補正に使用した地形には、LRO 搭載のレーザー高度計 (LOLA) および SELENE 搭載の地形カメラ (TC) 両データを基にしたデジタル地形モデル[3]を使用した。

(2) 各種マップ製作と地質解析

MI・WAC 両データは DN 値から反射率へ変換後、測光補正によって位相角・入射角 60°、出射角 0° の条件へ標準化した。その後、MI・WAC それぞれについてバンドごとに、緯度 60° 以南の地域を含む全データを用いてモザイク画像を作成した。重複観測がある地域では、全画素値の中央値を利用した。これにより、1回の観測に比べ S/N 比を向上させる。

完成した複数バンドのモザイク画像を用い、疑似カラー、TiO₂、FeO、宇宙風化度 (OMAT)、主成分分析 (PCA)、Mg-Fe 比 (Mg#) の各種マップを作成した。これらのマップを用いて、地表構成物の違い (鉱物組成や宇宙風化度など) を反映した月南極域地質図を作成した。また、比較的若いエジェクタ堆積物の分布、SPA 盆地付近の鉱物組成、そして宇宙風化の緯度依存性などを検証した。

4. 研究成果

(1) モザイク画像製作

① MI 画像データのモザイク作成では、重複観測部分における画像間の位置ずれが顕著であり、中央値を利用したモザイク画像が不鮮明になる恐れがあったため、まず位置ずれの補正を行った。前述のデジタル地形モデルと、視線方向が異なる MI の2バンド画像同士を用いてステレオ視で自己生成される地形モデルとの間で3次元マッチングを行い、地形と MI 画像とのずれを検出することで、SELENE の位置情報を更新し、位置ずれを最小化した。この処理は同時に、SELENE の軌道・姿勢精度改善にも繋がっており、MI と同時観測を行った機器データの位置ずれも改善される。

② WAC 画像データのモザイク作成では、影/日なた境界周辺での異常な値が頻繁に認められた。地軸の傾きが小さい (約 1.5° 以下) 月の極域では太陽が常に地平線沿いを移動し、手前の地形で部分的に遮られた太陽に照らされる月面の領域が、低緯度域に比べ頻繁に発生する。このような領域では太陽ディスク全体に照らされる場合より暗く、かつ太陽周縁の特徴によりスペクトルも異なるため、正確な反射率を求めるのは困難である。その為本研究では、光線追跡シミュレーションにより、WAC の各観測場所・観測時刻における太陽ディスクの割合を求め、80%を下回る観測については影領域と共に排除した。これにより、影領域周辺での異常値が大幅に減少した。

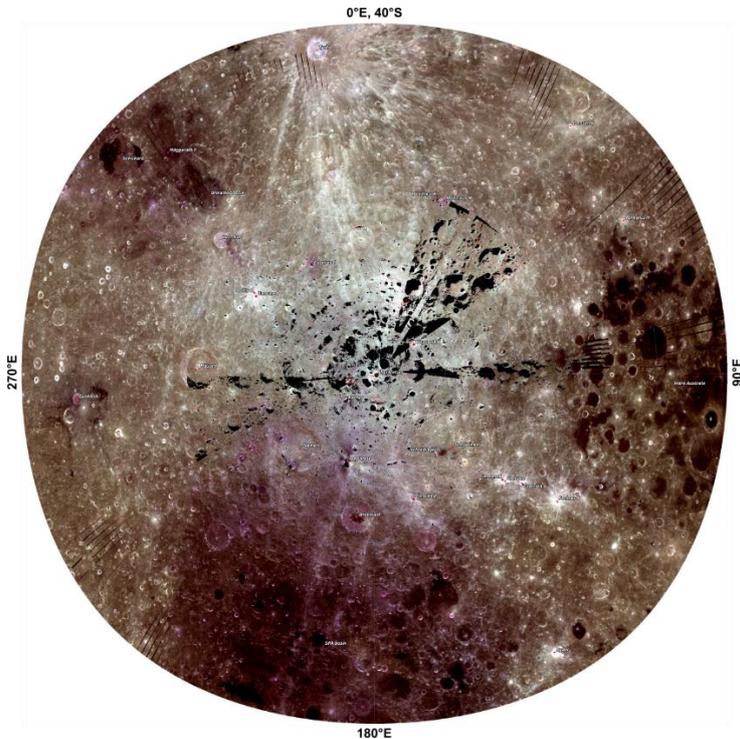


図 1. MI モザイク画像を用いた疑似カラーマップ。南極点を中心とする、南緯 40° から 90° の領域。赤：1550nm, 緑：950nm, 青：750nm の 3 バンドを使用。

60° S) において既存モザイクと一致しなかったため、MI データの絶対値補正を追加で行った。まず、先行研究[5]で利用されてきたアポロ 16 号着陸地付近のスペクトル標準地点、および本研究で独自に設定した中緯度域 (約 60° N) のサンプリングサイト[6]の全観測画像を用いて測光補正パラメータを計算し、サンプル画像の測光補正を行った。中緯度域を追加したのは、位相角・入射角の値の範囲を増やすためであり、アポロ 16 号地点と最も近いスペクトルを示す場所を SELENE に同じく搭載されたハイパースペクトル観測機 (SP) のデータで探索し、領域を設定した。測光補正された反射率の中央値が、先行研究[5]の値に一致するよう各バンドごとに係数を設定した。この係数および上記サンプルサイトの測光補正パラメータを用いて、最終的な MI モザイク画像を作成した。

上記処理の結果、月南極域のスペクトル解析を低ノイズかつ高い空間解像度 (>20m/pixel) で実現する、広域モザイク画像が初めて作成された。

(2) 各種マップ製作と地質解析

① 本研究で作成された MI・WAC 両モザイク画像を用い、疑似カラーマップ (図 1 参照)、TiO₂ 量比マップ、FeO 量比マップ、宇宙風化度 (OMAT) [7] マップ (図 2 左参照)、主成分分析 (PCA) マップ、Mg-Fe 比 (Mg#) マップ、かんらん石/輝石/斜長石 (相対量) 分布マップを作成した。なお、疑似カラー、FeO 量比、OMAT マップについては、既存の中・低緯度域 MI モザイク画像と本研究の南極域 MI モザイク画像 (>60°S) を結合後、南半球全体を包括する画像を用いて作成し、低緯度側との比較を行った。

② TiO₂ 量比マップでは、従来の可視・近赤外波長を用いるアルゴリズム[8]、紫外・可視域でチタン鉄鉱の量比を推定するアルゴリズム[9]に加え、新たに輝石中の 2wt%以下のチタン量を推定するアルゴリズム[10]を基にしたマップを作成した[11]。これらのマップから、低緯度から南極点付近の高緯度に近づくにつれ微量ながら相対的にチタンに乏しくなる傾向が見られた。

③ 上記の各種マップをもとに堆積物判読を行い、周囲より相対的に若いエジェクタ (隕石衝突により地表が剝離され、周囲に再堆積した物質) の分布領域判別・数値地図化を行った。その結果、これまで認知されていなかった広範囲もしくは線状で長距離に渡る複数のエジェクタの分布が明らかとなった。例えば中緯度域 (43° S) に位置するクレータ (Tycho) から伸びる細長いエジェクタ (レイ) が南極点を縦断している事がわかった。また、77° S に位置する直径 56km のクレータ (De Forest) のエジェクタが広大な領域 (半径約 300km) に広がる様子が明らかになった。このエジェクタは、月で最大 (直径>2000km) の衝突盆地である South Pole-Aitken (SPA)

③ WAC の測光補正は、10 年以上に及ぶ連続長期観測で得られる高密度な重複観測と、広い視野角で得られる幅広い出射角 (地面と観測者の成す角) により、全域で独自の測光補正パラメータを計算することが可能である。そこで約 30km 四方の領域ごとに、各地域に最適なパラメータを計算し、それを用いて測光補正を行う手法[4]を用いた。この手法により、Hapke パラメータから成るマップが副産物として生成され、地表面の物性を検証するマップとして利用できる。一方 MI では、極点付近には十分な重複観測はあるものの、緯度 70° 付近では重複観測が少なく、WAC と同じ手法は適用できなかった。よって比較的一様な地形・地質地域をサンプリング区域に設定し、そこに最適なパラメータを各波長につき 1 セットずつ計算し、その値を全データの測光補正に用いた。

④ 測光補正後の MI モザイク画像のスペクトルが、中緯度域 (約

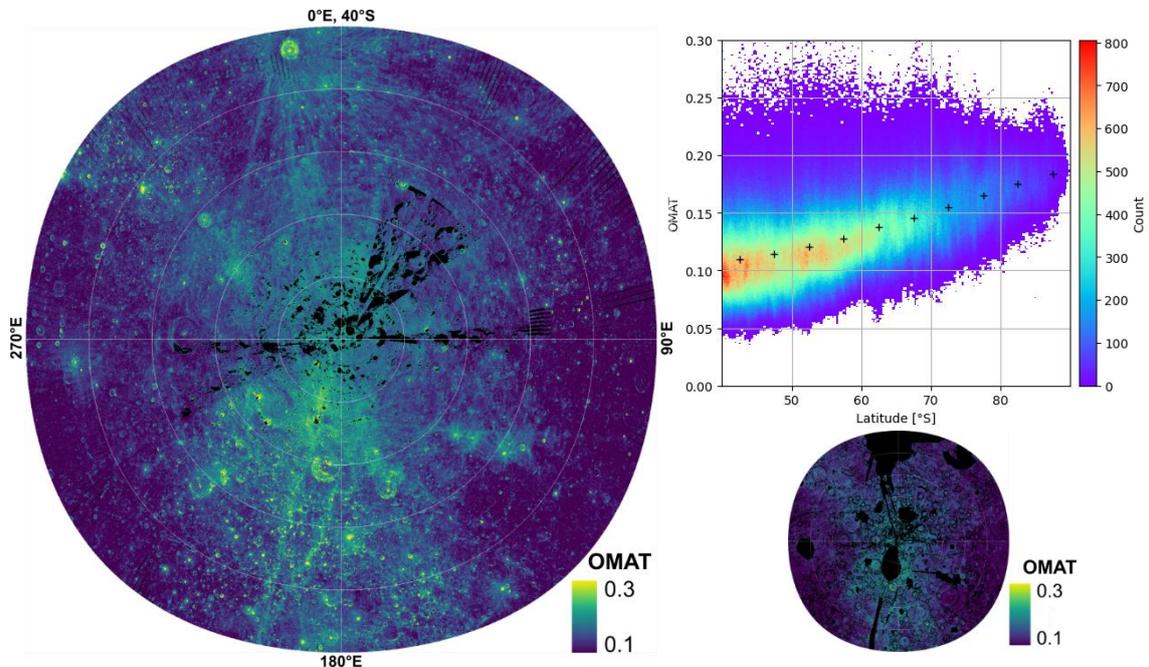


図2. 宇宙風化度 (OMAT) マップ (左)、緯度ごとの OMAT 値と 5° 毎の中央値 (右上)、右上プロット作成時に除去したエジェクタおよび斜面領域 (右下: 黒塗り部分)。宇宙風化が少ないほど、OMAT 値は増加する。

盆地の南端に位置し、周囲より鉄に富む地層が地表にエジェクタとして広範囲にまき散らしているものであり、SPA 盆地の鉱物組成や盆地の広がりを検証する上で重要である。南極点周辺には、直径 300m 以下の比較的新しいクレータも多数確認できており、現在多数の国・企業が計画している月極域探査において、科学的価値の高い候補地点となるだろう。月極域における堆積物の分布はこれまで地形のみで判別されてきたが、高解像度カラー画像を使ったスペクトルによる判別は本研究が初であり、上記のエジェクタ分布についても本研究で初めて明らかになった。

④ 本研究ではこれまで不可能だった SPA 南部 (60° S 以南) のスペクトル解析も初めて行った。SPA (巨大衝突盆地) はその大きさゆえに、削剥された月マントルの一部が地表に露出していると推定されている。月マントルの主要成分と考えられている Low-Ca 輝石の他に、今回新たに、カンラン石に富む地域が SPA 内輪の南縁付近で複数箇所発見された。これらの地域は、SPA 盆地南部にカンラン石に富む物質が集中的に露出していることを示唆していると考えられ、月の地殻・マントル構造の理解にとって重要な発見となった。

(3) 宇宙風化度の緯度依存性

南極域の緯度依存性については、低緯度から高緯度に向かって相対的に反射率が上がり、反対に宇宙風化度はほぼ線形に下がる (=OMAT 値が上がる) 傾向があることがわかった (図 2 右上参照)。前述のエジェクタ分布地域や、斜面崩壊の頻度が高い斜面領域を排除しても (図 2 右下参照)、この傾向は変わらなかった。これは中緯度から極に向かって強度が顕著に下がると予想されている、太陽風起源の宇宙風化の傾向と一致しており、月の中・高緯度域においては微小隕石衝突による宇宙風化の影響が相対的に小さい可能性がある。

(4) 今後の展望と課題

地域ごとに最適化された測光補正を行った WAC と異なり、MI ではごく限られた地域にのみ最適化されたパラメータを全域の測光補正に使用したため、広域的なひずみが発生しやすい。現に、異なる領域で計算したパラメータを使用した MI モザイクでは、OMAT の値が約 20~30% 変化した [12]。また、Mg-Fe 比 (Mg#) マップについては有効な値が得られる領域が少なく、地域的なスペクトル異常が疑われる。重複観測が少ない MI データでもスペクトルなどが似た地域を組み合わせる観測数を稼ぐなど、地域誤差の少ない測光補正法を開発し、より信頼性の高いモザイク画像を作ることが今後の課題である。

また、本研究でスペクトルを基に区分された地質ユニットについて、クレータ年代などにより時間情報を与え層序関係を整理できると、今後の月極域探査での観測や岩石サンプルなどから得られる情報との相互参照が可能となり、月極域のみならず月全体の理解にも繋がるだろう。

<引用文献>

[1] Kodama, S. et al. (2010) Characterization of multiband imager aboard SELENE: Pre-flight and in-flight radiometric calibration. Space Science Reviews, 154(1-4), p79-

- [2] Robinson, M. S. et al. (2010) Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview. *Space Science Reviews*, 150(1), p81-124.
- [3] Inoue, H. et al. (2018) Landing site analysis for future lunar polar exploration missions. 49th Lunar and Planetary Science Conference, abstract #1738.
- [4] Sato, H. et al. (2014) Resolved Hapke parameter maps of the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(8), p1775-1805.
- [5] Ohtake, M. et al. (2010) Deriving the absolute reflectance of lunar surface using SELENE (Kaguya) multiband imager data. *Space Science Reviews*, 154(1-4), p57-77.
- [6] Sato, H. & M. Ohtake (2022) South polar color analyses of the Moon by Kaguya MI. 53rd Lunar and Planetary Science Conference, abstract #1501.
- [7] Lucey, P. G. et al. (2000) Imaging of lunar surface maturity. *Journal of Geophysical Research*, 105(E8), p377-386.
- [8] Lucey, P. G. et al. (2000) Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *Journal of Geophysical Research*, 105(E8), p20297-20305.
- [9] Sato, H. et al. (2017) Lunar mare TiO₂ abundances estimated from UV/Vis reflectance. *Icarus*, 296, p216-238.
- [10] Hapke, B. et al. (2019) Lunar reconnaissance orbiter wide angle camera algorithm for TiO₂ abundances on the lunar surface, including the highlands and low-ti maria. *Icarus*, 321, p141-147.
- [11] Sato, H. et al. (2021) New extended range WAC TiO₂ map of the Moon. 52rd Lunar and Planetary Science Conference, abstract #1031.
- [12] Sato, H. & M. Ohtake (2023) Latitudinal trend of the lunar south pole. 54th Lunar and Planetary Science Conference, abstract #1824.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Sato H., Ohtake M.
2. 発表標題 Latitudinal Trend of the Lunar South Pole
3. 学会等名 The 54th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Sato, M. Ohtake
2. 発表標題 South polar color analyses of the Moon by Kaguya MI
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤広幸, 大竹真紀子
2. 発表標題 月南極域における地質解析
3. 学会等名 日本惑星科学会 秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤広幸, 大竹真紀子, 高由芙子, 山本光生
2. 発表標題 月南極域カラーモザイクの作成
3. 学会等名 日本惑星科学会 秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Sato, B. Hapke, M. S. Robinson
2. 発表標題 New extended range WAC TiO2 map of the Moon
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sato, S. Goossens, M. Ohtake, Y. Daket
2. 発表標題 Polar color mosaic production from Kaguya MI data
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	大竹 真紀子 (Ohtake Makiko) (30373442)	会津大学・コンピュータ理工学部・教授 (21602)	
研究分担者	嵩 由美子 (Yumiko Dake) (50828035)	会津大学・公私立大学の部局等・研究員 (21602)	

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			
米国	アリゾナ州立大学	米国航空宇宙局	ピッツバーグ大学	