

月のリモートセンシング地質学： 月の地殻 – マントル境界からの岩石露頭の地質構造

山本 聡¹⁾・大竹 真紀子²⁾・唐牛 譲³⁾・鹿山 雅裕⁴⁾・長岡 央⁵⁾・石原 吉明⁶⁾・春山 純一⁷⁾

1. はじめに

惑星科学の主な目標のひとつは、月や地球などの固体表面を持つ地球型惑星がどのように形成され、進化してきたかを理解することです。地球を始めとする大きな惑星は、火成活動やプレートテクトニクスにより形成初期の情報が失われています。一方、月は他の惑星と比べ小型であるため、熱的活動が比較的早く弱まり、初期状態や進化の過程に関する情報がよりよく保存されていると考えられています。そのため、月について詳しく知ることは、地球や他の地球型惑星の形成と進化を理解する上で重要な手がかりを与えると考えられています。

この解説記事では、リモートセンシングを使った月の内部構造の研究事例として、月の地殻-マントル境界からの岩石露頭の地質構造を明らかにした研究成果 (Yamamoto *et al.*, 2022) についてご紹介したいと思います。

2. 月のマントル物質探査

アポロ有人探査や旧ソ連の探査機で持ち帰られた月の石、月から地球に飛来したと考えられる月隕石、月探査機や地上望遠鏡によるリモートセンシングデータ等の研究により、月の形成とその進化について様々なモデルが提唱されてきました。代表的なものとして、巨大衝突説と月マグマオーシャン説があります (玄田, 2021; 大竹・長岡, 2021)。巨大衝突説とは、今から 45 億年より前に原始地球に火星サイズの天体が衝突し、周囲に撒き散らされた物質が再集結して月ができたとする説です。激しい衝突を得た結果、形成直後の月表面は岩石が溶けた状態のマグマの海に覆われていたと考えられています。このマグマの海が冷えて固まる過程で、月の内部構造が出来上がったと考えるのがマグマオーシャン説です。マグマの海が冷却するに

したがって、珪酸塩鉱物である「カンラン石」が最初に晶出し、次に「Ca に乏しい輝石(斜方輝石)」が晶出し、共にマグマの海の深部に沈んで月のマントルを構成したと考えられています。その後冷却が進むと、「斜長石」が晶出します。斜長石は周囲のマグマよりも密度が低いいため、表層に浮上し月の斜長岩地殻を形成したと考えられています。

一方、これらのマントルと地殻がどのような進化を経て現在の姿になったかについてはよくわかっていないため、月のマントル内の組成や鉱物の割合、空間方向の構造や不均一性など具体的なことは不明なままです。理由としては、マントルを構成するカンラン石や斜方輝石は、通常では月の深部にあり、月の表面から直接見ることができないからです。しかし、月の表面には 38 億年より昔に形成されたと考えられる大規模な天体衝突の痕跡が見ついていることから、大規模衝突により地下深部にあるマントル物質が掘り起こされ、月表面にもたらされたと考えられています。そのため月内部の手がかりを得るという目的で、これまで地上望遠鏡や月周回衛星で測定された分光反射率データの解析によるマントル由来の岩石露頭の探査が行われてきました (山本・唐牛, 2021)。特に日本の月周回衛星「かぐや」(SELENE) 搭載の Spectral Profiler (略して SP) で取得された月の全球データに対するデータマイニング解析により、月表面で数 100 m ~ 数 km に渡ってカンラン石に富む岩体が露出している場所が見つかりました (Yamamoto *et al.*, 2010)。SP は、月表面の分光反射率データを 6 ~ 8 nm の高波長分解能で連続的にスペクトルを取得するセンサー (ハイパースペクトルセンサーと呼ばれます) で、鉱物や岩石組成の違いを判別する能力を持っています (SP を始めとする SELENE 搭載の光学センサーの詳しい説明については https://www.selene.jaxa.jp/ja/equipment/tc_j.htm, 閲覧日: 2023 年 12 月 8 日)。カンラン石サイトと呼ばれるこれらの場所は、現在まで月

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

2) 会津大学 コンピューター理工学部 〒965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴岡

3) 大阪大学 コアファシリティ機構 〒565-0871 大阪府茨木市美穂が丘 8-1

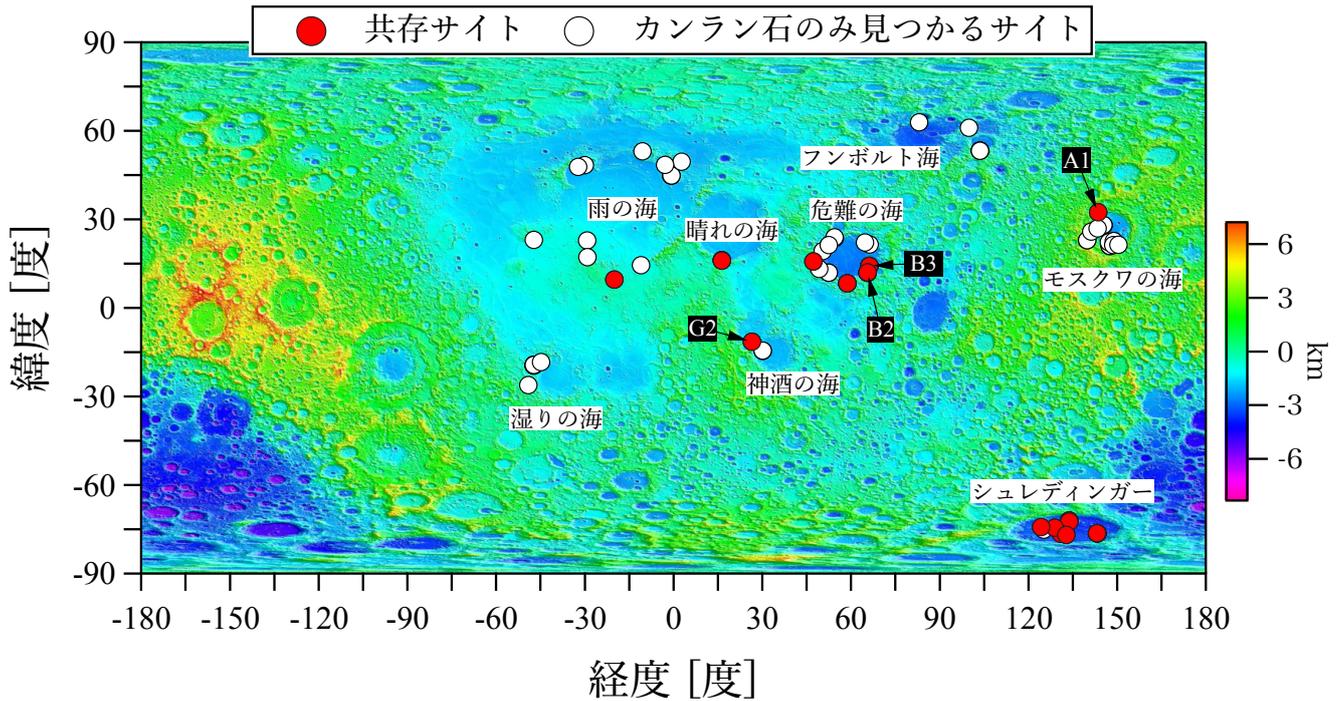
4) 東京大学 大学院総合文化研究科 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

5) 立命館大学 総合科学技術研究機構 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

6) JAXA 国際宇宙探査センター 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

7) JAXA 宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

キーワード: リモートセンシング, 地質層序解析, 月, カンラン石, 斜長石, 分光学, マントル物質, 地殻物質



第1図 月面上のカンラン石に富む岩体（カンラン石サイト）の全球分布図 (Yamamoto et al., 2010). 赤丸はカンラン石に富む岩体と純粋斜長岩が共存するところで、カンラン石に富む岩体のみ見つかるサイトは白色で示している。各名称は巨大衝突盆地に相当（図中では「盆地」は省いています）。A1, B2, B3 および G2 は解説論文で使用されているサイトの指標番号。背景は SELENE による高度データ (Araki et al., 2009, 2013)。

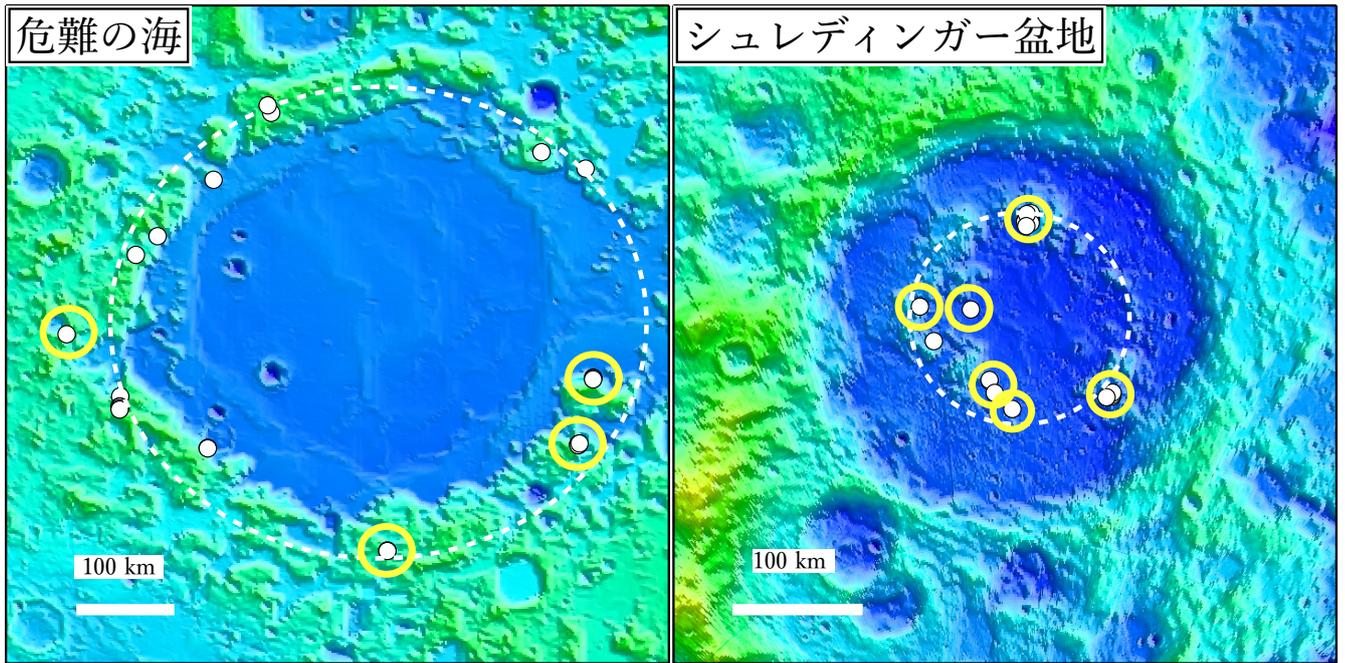
面全体で 50 箇所程度しか見つかっておらず、月表面上では極めて稀有な存在です。いずれのサイトも巨大衝突盆地で掘削されたと予想される場所に分布することから、月の深部にあるマントル上部が掘り起こされたものであろうと考えられています。一方、これらのカンラン石サイトの 2 サイトにおいて、98% 以上が斜長石からなる純粋斜長岩の岩体がカンラン石に富む岩体に隣接もしくは近接（数 100 m 以内）していることが報告されていました（以下では、このようなサイトのことを共存サイトと呼びます）。純粋斜長岩は月の形成初期のマグマオーシャンが冷却する過程で形成された原始地殻の名残であると考えられています（長岡・大竹, 2021）。マントル由来のカンラン石に富む物質と原始地殻由来の純粋斜長岩は、どのようにして隣接する形で月の表面に露頭として存在することになったのでしょうか？

3. リモートセンシングを使ったカンラン石サイトの層序解析

このことを調べるために、SELENE 搭載の Multiband Imager (略して MI) で取得されたリモートセンシングデータ画像を使って、カンラン石サイトの層序解析を行いました。

MI は、月表面で反射された太陽光を $0.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ の様々な波長帯で高空間分解能画像を取得する光学センサーで、鉱物や岩石の月表面分布を数 10 m のスケールで明らかにできます。すでに見ついているカンラン石サイトについて MI を使って鉱物・岩石分布を調べ、カンラン石に富む岩体周囲での純粋斜長岩露頭の有無の調査を行いました。第 1 図に調査結果についてまとめた全球分布を示します。この解析により、カンラン石サイト 49 箇所のうち、14 箇所が共存サイトである事が確認されました（第 1 図の赤丸点）。

さらに SELENE 搭載の Terrain Camera (略して TC) のステレオ画像を基に作成されたデジタル標高データと MI の鉱物・岩石分布データを組み合わせて対象域の鳥瞰図を作成し、カンラン石に富む岩体と純粋斜長岩露頭の位置関係や地質構造を詳細に調べました。その結果、共存サイトのカンラン石に富む岩体および純粋斜長岩の岩体は、巨大衝突盆地が形成されたときに地殻深部またはマントル物質が隆起して出来たピークリングと呼ばれる部分で見つかることがわかりました（第 2 図）。また、どちらの岩体もピークリングの急斜面や小さな衝突クレーターで見つかります。第 3 図に解析結果の例として、4 箇所の共存サイトを示します。これらの図の中では、カンラン石に富む岩体



第2図 危難の海およびシュレディンガー盆地周辺のカンラン石に富む岩体の分布(白丸)。黄色丸が今回の研究で明らかとなった純粋斜長岩と共存するサイト。点線丸は衝突盆地のピークリングに相当する部分。背景は第1図と同じSELENEによる高度データ。

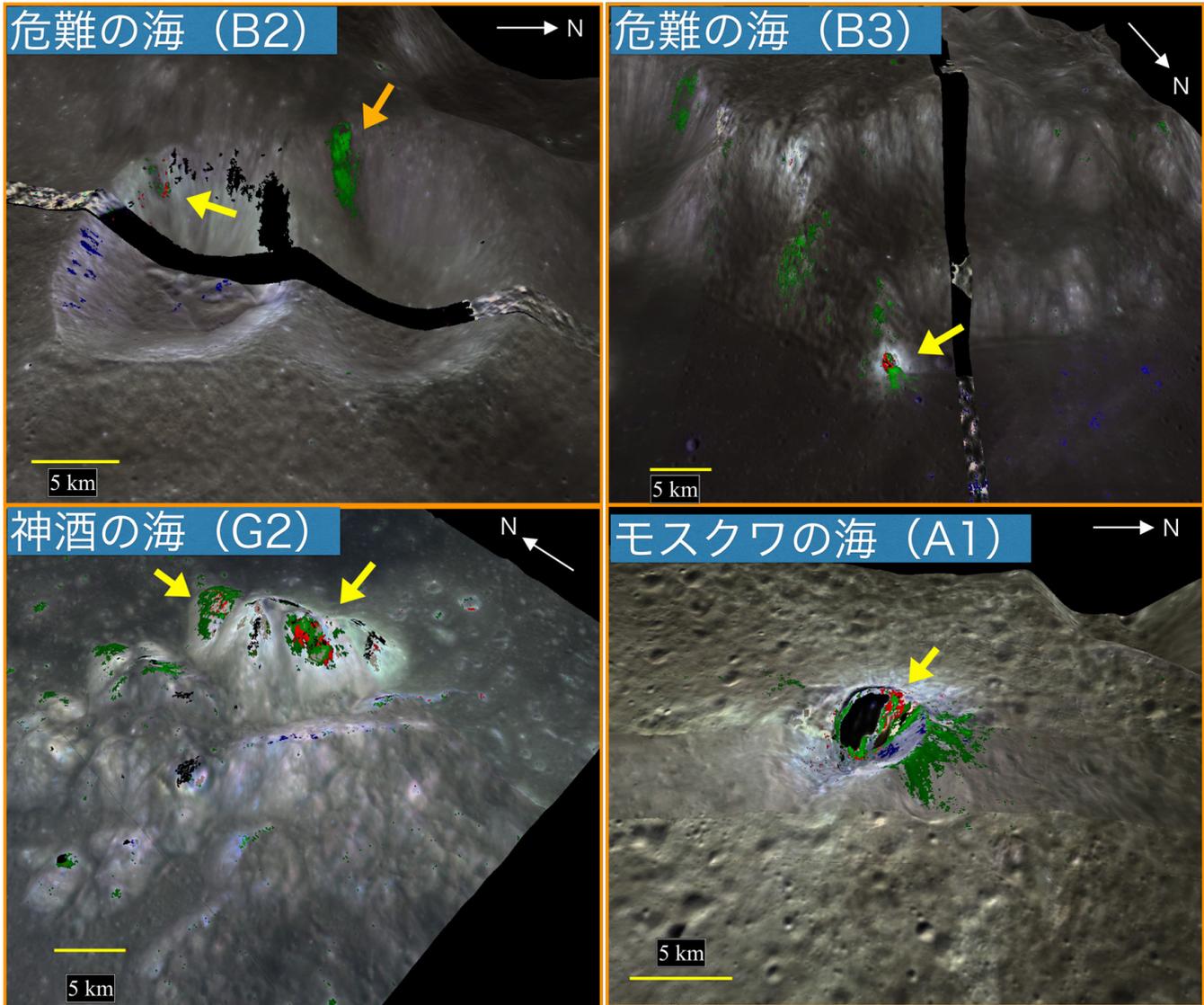
を緑色、純粋斜長岩を赤色で示しています。B2 サイト(第3図左上)では、2つの衝突クレーターが重なった場所で共存が見つっていますが、カンラン石に富む岩体と純粋斜長岩は、クレーター壁面の縁近くの急斜面で見つかりました(黄色矢印)。その右隣りにあるクレーターの壁面ではカンラン石に富む岩石の露頭のみが見つかりました(橙色矢印)。どちらの露頭もクレーターの底に向かって斜面崩壊したように細長く伸びた特徴を示しているのがわかります。B3 サイト(第3図右上)では、ピークリングの崖の麓にある直径1 kmサイズのクレーターで共存が見つかりました(図の黄色矢印)。また、G2 サイト(第3図左下)では、ティオフィラスと呼ばれるクレーターの中央丘の斜面で共存が見つかりました。ここも斜面が崩れたところでカンラン石に富む物質と純粋斜長岩が露出しています(黄色矢印)。A1 サイト(第3図右下)では、直径が2 km くらいの衝突クレーターの内壁部分で、共存が見つかりました(黄色矢印)。

このように、共存サイトが見つかる場所は巨大衝突盆地のピークリングの表層で形成された小さな衝突クレーターや、斜面崩壊地形で見つかることがわかりました。ここで示した特徴は他の共存サイトでも同様に観測されています。一方、カンラン石のみを示すサイトにおいても、同様にピークリングの上で見つかり(第2図)、その地質的な特徴も共存サイトと違いが見られないことがわかりました。

これらのことから、共存サイトかカンラン石のみのサイトかの違いは、ピークリングを構成する物質の不均一によるものと考えられます。つまり、カンラン石のみが見つかるのか、純粋斜長岩と共存して見つかるのかは、月の深部物質の不均質によるものと結論づけました。

4. 月深部物質の不均質性が意味するもの

では、ピークリングを構成する月の深部物質の不均質はどうやって生じたのでしょうか?単純な説明としては、巨大隕石の衝突によって月のマントルと地殻の境界が掘り起こされた結果、マントル物質と地殻物質が混合し不均質なピークリングが形成されたとするものです。実際、今回見つかった共存サイトおよびカンラン石に富むサイトの分布は、巨大衝突盆地の形成を模擬した天体衝突の数値計算などで予測されるマントルと地殻の混合状態や月表面上の位置関係と整合的です。一方、もう少し複雑なモデルとして、マントル中に発生したマグマが月の地殻下部に貫入し、そこでカンラン石と斜長石が再結晶化する過程で深部物質の組成的不均質を作った可能性が考えられます。この場合、第1図で示された共存サイトかカンラン石のみのサイトかの違いは、月の地殻下部における貫入岩体の組成の違いを反映していることとなります。一方、ピークリング自体が大規模な天体衝突によって出来た隆起物質であるこ



第3図 共存サイト周辺の鳥瞰図(第1図のA1, B2, B3およびG2)。緑色部分がカンラン石に富む岩体, 赤色部分が純粋斜長岩, 青色部分が輝石に富む岩体を示している。黄色矢印がカンラン石に富む岩体と純粋斜長岩が隣接している代表的な露頭。橙色矢印はカンラン石に富む岩体のみ見つかる露頭。画像中の黒い部分は衛星データが欠損している部分。

とを考えると、元々あった貫入岩体は、かなりの程度で衝突による破壊や溶融の影響を受けると考えられます。そのため、隣接する露頭としてきれいに保存されるのか、またカンラン石のみの岩体についてはどう説明するのかという点が問題となります。

いずれにしても、どの説が正しいのか判断を行うには、今あるリモートセンシングのデータだけでは限界があります。地球の地質学同様、現地での岩石の直接測定や地球へサンプルを持ち帰っての岩石鉱物学的分析が鍵となります。例えば、共存サイトのカンラン石のマグネシウムと鉄の化学組成比や、これらの岩体サンプルの組成、微細構造、テクスチャーや、形成年代などから成因に対する重要な情報が得られると期待されます。

5. 将来の月資源探査としての重要性

共存サイトは、月のマントル上部物質と原始地殻物質が同時に得られる科学的に重要な特異な場所であり、将来の月探査サンプルリターンミッションの重要な候補地として考えられます。そこから得られる情報は、単に共存サイトやピークリング物質の不均質の成因解明につながるだけでなく、月のマントルと地殻の境界部分に対する詳細な情報を与えてくれるものです。また、イルメナイト(チタン鉄鉱)などの希少鉱物は、月のマグマオーシャンの固化過程の最終段階で地殻とマントルの境界層に濃集すると考えられています。そのため、これらの共存サイトは、今後ますます議論が盛んになる有人月探査(アルテミス計画など)や

民間も巻き込んだ月資源探査戦略においても、重要な場所として注目されていくと期待されます。

文 献

- Araki, H., Tazawa, S., Noda, H., Ishihara, Y., Goossens, S., Sasaki, S., Kawano, N., Kamiya, I., Otake, H., Oberst, J. and Shum, C. (2009) Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. *Science*, **323**, 897-900. doi:10.1126/science.1164146
- Araki, H., Noda, H., Tazawa, S., Ishihara, Y., Goossens, S. and Sasaki, S. (2013) Lunar laser topography by LALT on board the KAGUYA lunar explorer - Operational history, new topographic data, peak height analysis of laser echo pulses. *Advances in Space Research*, **52**, 262-271. doi:10.1016/j.asr.2013.02.018
- 玄田英典 (2021) 月の起源説, 地球-月系の材料物質. 並木則行・諸田智克・西野真木・佐伯和人・小河正基・大竹真紀子編, 月サイエンスブック 第一部, 月サイエンスブック編集委員会, 19-21. doi:10.18910/83227
- 長岡 央・大竹真紀子 (2021) 地殻構造と組成. 並木則行・諸田智克・西野真木・佐伯和人・小河正基・大竹真紀子編, 月サイエンスブック 第一部, 月サイエンスブック編集委員会, 59-64. doi:10.18910/83234
- 大竹真紀子・長岡 央 (2021) マグマオーシャンの初期条件と冷却・分化モデル. 並木則行・諸田智克・西野真木・佐伯和人・小河正基・大竹真紀子編, 月サイエンスブック 第一部, 月サイエンスブック編集委員会, 53-59. doi:10.18910/83233
- Yamamoto, S., Nakamura, R., Matsunaga, T., Ogawa, Y., Ishihara, Y., Morota, T., Hirata, N., Ohtake, M., Hiroi, T., Yokota, Y. and Haruyama, J. (2010) Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE. *Nature Geoscience*, **3**, 533-536. doi:10.1038/ngeo897
- 山本 聡・唐牛 讓 (2021) 表面元素組成 バルク組成推定のための表面組成の理解. 並木則行・諸田智克・西野真木・佐伯和人・小河正基・大竹真紀子編, 月サイエンスブック 第一部, 月サイエンスブック編集委員会, 21-33. doi:10.18910/83228
- Yamamoto, S., Ohtake, M., Karouji, Y., Kayama, M., Nagaoka, H., Ishihara, Y. and Haruyama, J. (2022) Global distribution and geological context of co-existing occurrences of olivine-rich and plagioclase-rich materials on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **127**, e2021JE007077. doi:10.1029/2021JE007077

YAMAMOTO Satoru, OHTAKE Makiko, KAROUJI Yuzuru, KAYAMA Masahiro, NAGAOKA Hiroshi, ISHIHARA Yoshiaki and HARUYAMA Junichi (2023) Remote sensing geology of the Moon: geological structure of rock outcrops from the lunar crust-mantle boundary.

(受付: 2023年10月30日)