月科学コミュニティの活性化に向けた取り組み ～2024 年度活動報告～

小野寺 圭祐[1], 松本 晃治[2], 山下 光葉[3], 于 賢洋[3], 西山 学[4],長岡 央[5], 仲内 悠祐[5], 西谷 隆介[6],荒木 亮太郎[7], 大竹 真紀子[8]*, 諸田 智克[3]

（要旨）本稿では, 我々が 2024年度に実施した「月科学コミュニティの活性化」を目的とした活動に関して報告を行う. 前半は, 月科学コミュニティメーリングリスト(Moon-next)の運用状況および情報共有の場の整備状況について報告する. 後半では, 2025年3月に奥州宇宙遊学館にて開催した第16回月地殻研究会について紹介する.

1. はじめに

我々は,月科学コミュニティの縦横のつながりを強化すべく,2022年より二つの取り組みを開始した[1]. 一つ目はコミュニティメンバーが新着論文・最新の研究成果・公募などの情報共有が行える場の整備,二つ目は月科学に特化した研究会の開催である.以下ではそれぞれの取り組みに関して,2024年度の実施報告をする.

2. 月科学に関する情報共有スペースの整備状況

2.1 メーリングリスト Moon-next の運用状況

Moon-next に関しては,前回の報告より8名の新規メンバーを追加し,計66名となった(2025年3月31日現在).本メーリングリストでは,月科学に関する研究会やセミナー等の案内,新着論文の共有,公募案内などを行なっている.メーリングリストに参加を希望する場合は,管理者(moonnext@gmail.com)まで問い合わせ願う.

2.2 論文情報共有スペースの運用状況

新着論文リスト(2023年以降に出版)は, 2025年3月31日時点で132件に達している.特定のメンバーからの書き込みが多く,まだまだ分野の偏りが見られるものの,データベースとして拡大が見られるのは吉報である.今年度は本コミュニティのメンバーの論文(例えば[2-5])もいくつか出版されており,今後も最新の成果をコミュニティ内で共有・議論できる場を提供していきたい.

2.3 惑星科学会の月科学研究会のWikiページのリニューアル

昨年の報告にて,課題として提示した惑星科学会ホームページの月科学研究会のWikiページのリニューアルについては未だ実際の作業に臨めていない.月科学コミュニティ内での議論内容や近年の月科学の動向などを学会全体にフィードバックする場としての活用を想定しているため今後数年以内に該当ページの整備を行いたい.

[1]岡山大学惑星物質研究所
[2]国立天文台
[3]東京大学
[4]ドイツ航空宇宙センター
[5]立命館大学
[6]宇宙航空研究開発機構
[7]大阪大学
[8]会津大学, *現在は岡山大学惑星物質研究所
konodera@okayama-u.ac.jp

表1: 研究会タイムテーブル.

(a) 企画時のタイムテーブル

1日目（3/26）	2日目（3/27）	3日目（3/28）
	招待講演II (山本聡さん) 9:30~12:00	総合ディスカッション 9:30~12:00
	お昼休憩 & 写真撮影 12:00~13:20	お昼休憩 12:00~13:00
開会の挨拶/趣旨説明 14:00~14:20	SLIM初期成果紹介(宮崎理紗さん) (13:20~14:20)	まとめ&次回に向けて 13:00~14:30
招待講演I (池田あやめさん) 14:20~16:50	LUPEX紹介(井上博夏さん) (14:30~15:30)	
	若手講演 (25分×3名) 15:35~16:50	

(b) 修正後のタイムテーブル

1日目（3/26）	2日目（3/27）	3日目（3/28）
キャンセル	招待講演I (山本聡さん) 9:30~12:00	招待講演II (池田あやめさん) 9:30~12:00
	お昼休憩 & 写真撮影 12:00~13:20	お昼休憩 12:00~13:00
	SLIM初期成果紹介(宮崎理紗さん) (13:20~14:20)	総合ディスカッション 13:00~14:30
	LUPEX紹介(井上博夏さん) (14:30~15:30)	
	若手講演 (25分×3名) 15:35~16:50	

3. 第 16 回月地殻研究会の開催報告

3.1 趣旨

月地殻研究会は，月科学者間の交流・密な議論を通じて,「他分野への理解・自身の分野との関連性の明確化・新しい研究テーマの発掘」を主目的としている．研究会での議論を通じて,「そもそも月について何がわかっていて何がわかっていないのか?」,「新しい情報を得るためにはどのような観測が必要か?」,「現在検討されているミッションでどこまで迫れるのか?」等を研究者間で共有し，今後のコミュニティの活性化・月科学の進展につなげていくことを目指している[1].

3.2 テーマ

今回のテーマは「スペクトルデータおよび画像データから探る月の表層進化」と設定し，以下の二名に招待講演を依頼した．研究会の趣旨に則り，研究者間の密な議論を促すため，各講演者には二時間半の発表時間を配分した.

招待講演者(敬称略):

- 山本聡 (産業技術総合研究所)
- 池田あやめ(産業技術総合研究所)

3.3 開催情報

日時:2025年3月26日(水)～ 3月28日(金)

会場:奥州宇宙遊学館

開催形態:ハイブリッド

参加人数:18人(うち学生4人)

タイムテーブル:

研究会のタイムテーブルを表1に示す．当初は1日目に招待講演の一つを予定していた(表1a)ものの,強風による東北新幹線運休のため,多くの現地参加者が会場に辿り着けず,初日のプログラムをキャンセルすることとなった(表1b).2日目には,招待講演セッションの他にSLIMの初期科学成果や将来月極域

表2:若手講演一覧.

発表者 (所属)	タイトル
神田恵太朗 (東北大)	嫦娥 4 号地中レーダー観測による月地下の岩石サイズ-頻度分布調査
山下光葉 (東大)	月の衝突盆地放出物の分布と表層物質の関係
于賢洋 (東大)	火成活動とマントル対流による月の内部進化のモデリング

探査機プロジェクトLUPEXの紹介時間を設けた。また, 例年通り若手講演セッションも設け, 学生三名の発表を行った(表2).3日目には,初日に実施することができなかった招待講演を午前中に行い,午後から総合ディスカッションを実施し,全体を通しての追加質問・世話人から提供した話題(嫦娥の月サンプル分析の動向と結果の解釈)に対する議論・今後の研究会の方針や運営体制について議論した.研究会および懇親会の様子を図1～図3に示す.

3.4 招待講演内容の概要

招待講演 I:山本聡(産業技術総合研究所)

山本さんには「月マントル物質:リモートセンシングデータからの理解」というタイトルで分光観測による鉱物同定手法の解説や月マントル物質に関連した研究のレビューをしていただいた.発表の前半では,「分光学ってなんやねん」という山本さんらしさ全開の語りで幕が上がり,反射分光リモートセンシング観測で得られるスペクトル吸収形状の物理的な解釈や宇宙風化に伴うスペクトル形状の変化について丁寧に解説いただいた.それに続いて,月科学におけるマントルの重要性をレビューいただき,月面上のどこでマントル物質に関する情報が得られるかについて,地球のフィールドの例や過去の研究例を提示しながら紹介いただいた.キーワードとして,巨大衝突盆地とカンラン石に富むサイトが挙げられた.

発表の中盤では,かぐや以前と以後に分けて月マントル物質研究の歴史を概説いただき,前述の二つの領域における過去の議論をレビューいただいた.地球の上部マントル成分がカンラン石に富むことから,1980 年代には地上望遠鏡を用いた月面のカンラン石露頭の探索が行われ,Copernicus craterとAristarchus craterで発見された(例えば[6]).当時はクレータの空間スケールから推定される掘削深さが10 km程度と浅かったため,マントルの露出ではなく,カンラン石に富んだ下部地殻(トロクトラ

図1. 集合写真(奥州宇宙遊学館にて).

図2. 研究会の様子.

図3. 懇親会の様子.

イトなど)の貫入岩体を見ていると解釈されていた[7]. 1990年代に入るとクレメンタイン探査機搭載のマルチスペクトルセンサーによるカンラン石に富むサイトの探索が行われた.前述の二つのクレータよりも空間スケールの大きい南極エイトケン(SPA)盆地であれば大規模なカンラン石の露出が見えると期待されていたが, 実際の観測からはそのような結果は得られなかった.最終的には,Tompkins & Pieters (1999)[8]やPieters et al. (2001)[9]によりカンラン石に富むサイトとして6つの地点(クレータの中央丘やSPA盆地内の丘)が提示された.2000年代に入り,日本の月周回衛星かぐや搭載のスペクトルプロファイラ(SP)による高波長分解能のスペクトルデータを用いた全球的なカンラン石の探索が行われた.その結果,MoscoviencesやCrisumなどの盆地の周辺に分布することが示された[10].一方,Matsunaga et al. (2008)[11]は,先行研究[8,9]で提示された 6つの地点の調査を行い,Theophilus craterを除く5つの地点のスペクトルは輝石と斜長石の混合による「カンラン石似のスペクトル」であることを示した. Yamamoto et al. (2010)[10]で示されたカンラン石の分布は後にGRAILの重力場観測で推定された地殻厚マップ[12]や衝突シミュレーションの結果[13]と比較がなされ,かぐやで観測されたカンラン石がマントル由来である可能性が支持されることとなった.

発表の後半では,「カンラン石/低カルシウム輝石(LCP)サイトの全球マッピング」や「斜長岩とカンラン石岩体の共存サイトの解釈」,「カンラン石と LCPの分布に基づくマントル構造の推定」(Yamamoto et al., 2022[14],2023[15])について紹介いただいた.以下では,特に斜長岩とカンラン石岩体の共存サイトに関して概説する.Yamamoto et al. (2022)[14]ではかぐや搭載のMultiband Imager(MI)データを用いて特定の鉱物に対する吸収マップを作成した(鉱物ごとに特定の波長バンドでの吸収深さに基づいて作成).更にDigital Elevation Model(DEM)と組み合わせることで,吸収マップを三次元化し観察を行った.その結果,いくつかの巨大クレータや衝突盆地(例えば,Theophilus crater, Schrödinger basinなど)の壁面や中央丘斜面でカンラン石に富む岩体と斜長岩の共存が確認された.カンラン石のみが確認されるサイトと斜長岩との共存サイトを比較したところ,露出パターンや空間スケールなどに違いが見られず,地質的観測だけではその成因の説明が困難であった.月科学コミュニティでは,「地殻と上部マントルの機械的混合」「衝突溶融による分化晶出」「下部地殻(トロクトライト/ノーライト)からの貫入岩体」の三つの観点から議論されているが,未だ合意には至っていない.ただし, Yamamoto et al. (2010)[10]の反射スペクトルのモデル計算結果に基づくとスペクトルの吸収形状に加えて絶対反射率も観測データの解釈では重要な制約になることを提唱しており,斜長石成分を多く含むトロクトライトでは観測されたスペクトルを説明するのは困難であることが提案されている.

招待講演 II:池田あやめ(産業技術総合研究所)

池田さんには「月周回衛星画像から探る表層進化過程」というタイトルで,「ボルダー」をキーワードに月の表層物質の劣化プロセスや物質移動に関して講演いただいた.発表の前半では,アポロ計画や近年の月周回衛星により取得された画像を示しながら,月面で観測されるボルダーやボルダー崩れに伴って生成されるトレイルを紹介いただいた.特に後者については,トレイルの特徴(幅など)からレゴリスの物性を推定する研究 [16]を提示いただき,物質移動に伴い副次的に形成される地形的特徴の利用可能性について解説していただいた.

発表の後半では,ボルダー崩れの誘因について過去の文献(例えば[17-22])を引用しながら月震・天体衝突・熱疲労の三つの要因について議論された. 以下, 要点を記載する.アポロ月震データの解析から月浅部では比較的マグニチュードの大きいイベント(浅発月震)が発生していることが知られており[23],斜面に配置されたボルダーが月震によって不安定な状態となり,ボルダー崩れが発生する可能性がKumar et al. (2016, 2019)[17,18]により示されている.ただし, 彼らの加速度推定法では,地動をかなり過剰に見積っており,課題を多く残した上での推定結果であるとの見解を述べられた.Bickel et al.(2021)[20]では,グローバルスケールでテクトニックな地形とボルダー崩れの分布を比較し,両者には明瞭な相関が見られないことを示している.彼らの研究によ

れば,ボルダーの供給源は天体衝突により基盤岩が破砕されることで生成され,新しい地形では熱疲労による破砕作用で,古い地形では更なる天体衝突によりボルダー崩れが発生するのではと推察している.Ikeda et al. (2022)[21]では,先行研究[17,18]で解析対象となったクレータ斜面のボルダー崩れに関して,天体衝突による加速度の定量評価や斜度,風化度,小クレータ分布との詳細比較を行い,天体衝突でもボルダー崩れが発生することを示した.この結果は,ボルダー崩れがテクトニックな地形以外でも観測されていることを説明できるものであり,Bickel et al. (2021)[20]の主張とも調和的である.一方,熱疲労の影響評価に関しては実験的・理論的研究(例えば[22])は存在するものの,実際に観測されているボルダーの空間スケール(10 mオーダー)に適応できるかどうかについては未だ疑問が残る点であり,他二つの要因と比較すると更なる研究が求められている分野であるとのことである.

3.5 参加者の感想

- 時差の都合上,全ての発表は拝見できなかったのですが,かぐやの頃の話から将来探査に渡るまで大変勉強になりました.ありがとうございました.
- 非常に楽しかった.
- Great!
- ピュアにサイエンスの話ができるこの会は貴重だなとあらためて思いました.
- 反射スペクトルの解釈やマントル物質推定の歴史,ボルダー生成過程と月震との関連性など色々な話を一度に聴講でき,非常にためになった.今後も続けていってもらいたい.
- 私にとっては初めての参加で,初めてお会いする方も多くいましたが,対面参加者の人数が10人程度であったおかげで親睦を深めやすかったように感じました.また,招待講演のお二方は研究分野の背景レビューも含めて発表してくださり,非常に勉強になりました.
- 今回も大変勉強になり,聞きながらいろいろ自身の宿題もできました.今回は特にイレギュラー対応大変だったかと思いますが,ロジ周りありがとうございました.
- 月のスペクトル解析手法の原理やボルダー進化の基礎を学ぶことができ,またその研究状況を詳細に知ることができました.月表層の高解像度データの取得により,解析できる幅が拡大していることを実感できました.
- 今回は強風のため物理的参加ができませんでした.リモートとの違いを実感しました.
- 学会発表を聞くだけでは分からない反射スペクトルの基礎を学ぶことができ,大変有益でした.自身はしばらく月の研究ができていませんが,議論を通してやはり月は面白いと再認識しました.来年以降も可能な限り参加したいです.

3.6 今後の研究会へのリクエストなど

- 会としての目標やゴールを決めたほうが議論に力が入ると思う.
- もし発表者の方がOKを出していただけるのであれば,講演のZoom録画をお願いしたいです.聞き逃した発表を追えるようにしていただけると嬉しいです.
- 発表時間だけでなくしっかり議論,質疑時間がある方がよいですね.
- モデリング屋さんは,月の歴史についてかなり単純化した描像を描いていますが,これに対して,最近のリモートセンシングや月試料分析により描かれた月の総合的な描像がどうなっているか,是非伺いたいと思います.

4. まとめと将来展望

国内月科学コミュニティの活性化を目的として,情報共有の場の整備および研究会の運営を行なった.前者については,昨年度に引き続きMoon-nextメーリングリストの登録者数ならびに新着論文数の増加が見られ,徐々にではあるがコミュニティが拡大してきていると考える.後者に関しては,第16回月地殻研究会を開催した.今年度は某ミッションの審査会準備などに伴い,昨年度(23名)よりは少なく,18名の参加ではあったものの,各講演セッションでは活発な議論が行われ,研究会の理念に沿った形で運営ができたのではないかと思う.特に毎年新規参入者が加わっていることは吉報であり,今後も他分野の

研究者や学生の参入をエンカレッジしていきたい.

我々の活動は月科学者間の交流に加え,学生・ポスドクの育成にも注力している. 今年度は運営メンバーに新たに四名のポスドク及び学生を加えたことで,若手メンバーが当事者意識を持ってコミュニティ運営に関われたのではないかと考える.今後もコミュニティメンバーが研究者として成長できる環境の整備,若手メンバーの声が通りやすい雰囲気作りに努めていきたい.

5. 謝辞

月地殻研究会の参加者には心より感謝申し上げたい. 特に招待講演を快諾してくれた産業技術総合研究所の山本聡さん・池田あやめさんには,研究会の趣旨に沿った形で話題を提供いただき,有意義なディスカッションの契機を与えてくれたことに深く感謝する.また,奥州宇宙遊学館・国立天文台水沢の関係者の方々には,研究会の会場やゲストハウスを提供いただいた.ここに感謝の意を示したい.

6. 引用文献

[1] 小野寺ほか, 2023, 遊星人 32, 2, 153.
[2] Onodera, K., 2024, Journal of Geophysical Research: Planets 129, e2023JE008153.
[3] Ohtake, M. et al., 2024, The Astrophysical Journal 963, 124.
[4] Nishiyama, G. et al., 2024, Journal of Geophysical Research: Planets 129, e2023JE008034.
[5] Yamamoto, S. et al., 2025, Journal of Geophysical Research: Planets 130, e2024JE008663.
[6] Pieters, C. M., 1982, Science 215(4528), 59.
[7] Pieters, C. M. and Wilhelms, D. E., 1985, Journal of Geophysical Research 90(S02), C415.
[8] Tompkins, S. and Pieters, C. M., 1999, Meteoritics & Planetary Sciences 34(1), 25.
[9] Pieters, C. M. et al., 2001, Journal of Geophysical Research 106, 28001.
[10] Yamamoto, S. et al., 2010, Nature Geoscience 3, 8, 533.
[11] Matsunaga, T. et al., 2008, Geophysical Research Letters 35(23), L23201.
[12] Wieczorek, M. A. et al., 2013, Science 339, 671.
[13] Milijković, K. et al., 2015, Earth and Planetary Science Letters 409, 243.
[14] Yamamoto, S. et al., 2022, Journal of Geophysical Research: Planets 127, e2021JE007077.
[15] Yamamoto, S. et al., 2023, Journal of Geophysical Research: Planets 128, e2023JE007817.
[16] Hovland, H. J. and Mitchell, J. K., 1973, The Moon 6 (1-2), 164.
[17] Kumar, P. S. et al., 2016, Journal of Geophysical Research: Planets 121(2), 147.
[18] Kumar, P. S. et al., 2019, Geophysical Research Letters 46(14), 7972.
[19] Bickel, V. T. et al., 2020, Nature Communications 11, 2862.
[20] Bickel, V. T. et al., 2021, Journal of Geophysical Research: Planets 126(10), e2021JE006824.
[21] Ikeda, A. et al., 2022, Journal of Geophysical Research: Planets 127, e2021JE007176.
[22] Molaro, J. L. et al., 2017, Icarus 294, 247.
[23] Nakamura, Y. et al., 1979, Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference X, 2299.