

特集「月科学の最先端と今後の展望：月はどこまでわかったのか？」

月科学と月探査：今後の展望

荒井 朋子¹

(要旨) 今号と次号の特集「月科学の最先端と今後の展望：月はどこまでわかったのか？」では、地球惑星科学の理論・観測・実験・分析などの多岐に渡る研究分野における月科学研究の最新研究成果を紹介する。本稿では、特集記事を概観しつつ、「月の起源と進化」に係る現状理解と課題を整理するとともに、ほんとうの月の起源と進化シナリオに迫るための、月科学及び月探査の今後の展望を述べる。

月は我々の住む地球の衛星であり、最も近い地球外天体である。それゆえに、人間の手により採集された岩石試料と地上望遠鏡や周回衛星によるリモートセンシングデータが揃う恵まれた研究対象である。月は太陽系固体天体の一つとしての位置付けと、地球-月系としての位置付けの二つがある点で、惑星科学と地球科学の分野を跨る。また、宇宙飛行士により試料採集地点の地質・地形情報や緯度経度が記録されている点で、主に母天体不明の隕石試料を対象とする惑星物質科学とは異なり、地球科学(地学)研究に通じる。従って、惑星科学における理論・観測・実験・分析などの多岐に渡る研究分野はもとより、地球科学の幅広い分野の手法や知見を総動員することにより、月の全体像の総合的な構築と起源と進化の正しい理解が可能になると考えている。

知的探究心のもと文明発展と活動領域の拡大を続けてきた我々人類が、地球を飛び出し、太陽系の大海原へと漕ぎ出す日はそう遠くないはずである。地球外天体への第一歩は、間違いなく月であり、さらなる活動領域拡大に必要な技術獲得のための重要な足固めの場となることが予想される。地球の第8大陸となりうる月の成り立ちを研究する月科学(月学)は、地球科学(地学)として地球の成り立ちを探究し続けるのと同様、人類の必然なのかもしれない。

1960-70年代のアポロ探査以降、月科学は探査機及

び望遠鏡による遠隔観測と試料研究の両輪により着実に発展してきた。これまでの月科学研究の歴史には、4つの大きな転機があった。一つ目はアポロによるサンプルリターンである。アポロ試料の分析結果に基づき、月の起源と進化に係る二つの仮説が提唱された。一つは、月高地から発見された斜長石に著しく富む岩石の起源を説明するために提唱された「マグマオーシャン説」である [1]。もう一つは、初期地球に火星サイズの天体が衝突して月が形成したとする「ジャイアントインパクト説」[2]であり、月試料が地球試料と同等の酸素同位体比を持つこと、及び、推定される月のバルク(全体)組成が地球と比較して揮発性元素(ナトリウムやカリウム)が乏しく、難揮発性元素(カルシウム、アルミニウム、トリウムなど)に富むことが主な根拠である。両説ともに現在の月科学の通説となっている。

二つ目の転機は、1990年代のクレメンタイン及びビュナプロスペクタ衛星の観測により、ほぼ全球表層の組成分布が得られたことである。観測元素は、鉄、チタン、カリウム、トリウムなどに限られるが、アポロの着陸地点の組成特異性や表裏の表層組成の二分性や不均質性が示された [3]。これにより、アポロ試料が月全球表層地質を代表していないという知見が得られた。アポロ着陸地点を含む月表側西半球はトリウムなどの微量元素に富むが、この微量元素に富む物質(カリウム、希土類元素、リンなど)にも富むことから K R E E P と呼ぶ)は マグマオーシャンの最終残渣に由来すると考

1. 千葉工業大学惑星探査研究センター
tomoko.arai@it-chiba.ac.jp

えられている。KREEP物質が月表側西半球に濃集することは、マグマオーシャンが全球均質に結晶化しなかった可能性を示唆している。

三つ目は、裏側高地起源の月隕石が発見されたことである。裏側高地起源の月隕石は、アポロ16号が表側高地から採集した岩石と鉱物分布と組成が異なることがわかり [4]、高地を構成する月地殻組成は全球均質でない可能性がでてきた。月地殻組成の表裏二分性の起源については、マグマオーシャンから結晶化した地殻岩石組成が表と裏で異なるためなのか、表側と裏側で熱的条件が異なったためなのか、あるいは表裏の地殻が同一のマグマオーシャン起源でないためなのか、様々な仮説が立てられている [5]。

そして四つ目となる最新の転機は、「かぐや」探査である。「かぐや」は2007年9月に打ち上げられ、高度100kmの月周回軌道から15種類の観測機器の同時観測を行った後、2009年6月にミッション期間を十二分に全うし、その役目を終えた。その結果、全球規模において、世界最高のエネルギー分解能、空間分解能、高精度の主要・微量元素分布、鉱物分布・組成、重力場、磁場、地形画像を取得することに成功した [6]。「かぐや」の成功により、人類はようやく月の全体像を正しく理解し、月全球の物理化学データに基づき起源と進化を議論できる時代に入った。引き続き、チャンドラヤーン1号やルナ・リコナイスランス・オービタ(LRO)も更なる高空間分解能の地形画像や分光データを取得し、エルクロス(LCROSS)は極域の水探査を行った。

リモートセンシングによる観測データとサンプル分析による物質科学データは相補的な関係にあり、これまでも多くの融合研究がなされてきた。しかし、空間分解能とデータの質において、両者の間には大きな隔たりがあり、相補的效果は不十分であった。ここに来て、「かぐや」により数メートル空間分解能の地形画像や数10メートルオーダーの反射スペクトルデータが入手可能となり、リモートセンシングデータとサンプルの空間解像度のギャップは格段に縮まってきた。また、「かぐや」の良質なスペクトルデータにより、実験室で測定されるサンプルの反射スペクトルデータと直接比較・照合することが可能になり、地殻組成の決定精度は飛躍的に向上している。「かぐや」データを手にした今、ようやくサンプル研究とリモートセンシング研究の融合が有機的に機能する 때가来たと言

える。これまでに各観測機器の初期成果が発表され注目を集めてきたが、今後引き続き、「かぐや」で得られた月の物理・化学データとサンプル分析研究との融合により、月の起源と進化への更なる制約条件が得られることが期待される。

メートル単位の全球表層地形や組成情報が得られた今、月の周回軌道からなし得るほぼすべての観測がなされたといっても過言ではない。しかし、探査により明らかにされた表層組成の多様性及び組成や地形の表裏二分性は、月の形成史を紐解く重要な記録である一方、それらの起源を理解することは容易ではない。なぜなら、月の今日像は、火山活動などの内因的要素と隕石様物体の衝突による外因的要素が長期間に渡り複雑に絡みあった積算結果であるからだ。月の起源から現在の月に至るまでの月の進化シナリオは、本来ひとつしかないはずだが、現時点では複数のシナリオが可能性としてあり、ほんとうの進化シナリオに辿りつくためには制約条件が足りない。

理論・観測・実験・分析などの多岐に渡る月科学研究の最新研究成果を踏まえ、今後の月科学そして月探査の展望と戦略を議論するには、かぐやの初期成果が出揃った今が絶好のタイミングである。そこで本号と次号の特集では、「月科学の最先端と今後の展望：月はどこまでわかったのか？」というテーマで、惑星科学、地球科学、地盤工学の様々な分野で月科学研究をされている方々に論文を執筆頂いた。

玄田英典氏による論文 [7]では、最新の観測データや物質科学データに照らし合わせ、月の起源に係る諸説の再検討を行った結果、現状最も有力である巨大衝突説に弱点があることを示している。巨大衝突説の更なる評価には、正確な月バルク組成が必要であり、そのためには月内部情報が不可欠であると指摘する。酒井理沙氏らによる論文 [8]では、マグマオーシャン説を想定し、月の斜長岩質地殻を形成するために必要なマグマオーシャンのFeO組成範囲を、高温高圧実験とモデル計算から制約するという、新しい手法による岩石学的研究結果を報告している。モデル計算、実験的手法及び物質科学データを有機的に組み合わせた筆者ら独自の手法であり、他の元素についての今後の研究結果にも期待したい。唐牛讓氏による論文 [9]は、「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計が定常運用時の100km高度軌道で取得したデータによるこれまでの成

果を紹介するとともに、低高度軌道運用時に取得したデータから、より高空間解像度・高精度な元素分布図(ウランやトリウム)が得られることが報告している。現在、鋭意解析が進められており、高空間分解能・高精度の元素分布が得られることで、月バルク組成の推定精度の向上が期待される。洪鵬氏らによる論文 [10] は、人工衝突を起こし表層を掘削して月の極域の水探査を行う LCROSS 月面衝突実験の地上観測結果を報告するもので、地上望遠鏡と探査機による同時観測という非常に貴重な機会を生かした研究結果である。放出物の検出については否定的な結果になったものの、既存のクレータ形成モデルの新たな問題点や将来の衝突探査への重要な指針を提示している。松島亘志氏らによる論文 [11] は、月面表層土の粒子物性や力学特性を、土質力学・地盤工学の手法で解析した結果を報告している。これらのデータは、リモートセンシングで得られる月面分光データ解釈の基礎データとして重要であるとともに、今後の月着陸探査における表層土の工学的影響評価にも必要不可欠である。

上記の論文からの指摘や月科学の最新知見を踏まえると、月の起源を突き止め、真の月の進化シナリオに迫るために必要な情報は、「月バルク組成」及び「月史の標石となる重要地点の物質科学データ」である。この二つの情報を得るために今後の月科学が目指すべき方針は、①内部探査、②重要地点の地質調査及びサンプルリターン、そして③継続的な月試料分析、の三つである。

ジャイアントインパクトによる月の起源説の更なる検証には、より正確な「月バルク組成」が不可欠だ。全球の表層組成分布と内部構造・組成分布の双方が揃って、初めて正しい「月バルク組成」を求められる。従って、「内部物理探査」(地震波や地殻熱流量測定)が重要となる。アポロ探査で行われた地震波データに基づき内部構造が推定されているが、精度は粗い。また、地震計の設置場所の制約から、限られた地域のデータしか得られていない。従って、精度のよい地震計による未探査地域の内部探査が急務である。次号では、アポロの月震データ解析に基づく月内部構造の最新研究を紹介する予定である。

月の複雑多様な進化プロセスを正しく辿るためには、月史上重要な現象を記録する地点の年代と地質データが必須である。重要地点の例としては、マグマ

オーシャンから形成した初期地殻が残存する地点、太陽系最大の隕石衝突クレータである南極エイトケン盆地、最新の火山活動が記録される地点などが挙げられる。これらの重要地点の詳細な地質や岩石・鉱物調査により、その地点に記録された現象を理解することができる。さらにその地点のサンプルリターンを行い、試料の同位体年代を分析することで、進化年表に新たな点を加えることができる。アポロ探査当時、全球の物理化学データが無かったため、図らずも着陸地点の多くは、表側の微量元素に富む地域に集中する結果となった。しかし、40年経った今、我々はかぐや探査で得られた月全球の元素分布、地形情報、重力場・磁場情報を持ち合わせており、月の進化における重要地点を特定することができる。従って、そのような重要地点の「地質探査」と「サンプルリターン」が実現されれば、月科学は次なる転機を迎え、ほんとうの月の進化シナリオ解明へまた一步近づくことができると確信している。

上記の月探査と並び、継続的な月試料分析も月科学の一翼を担う。40年前に持ち帰られたアポロ試料の分析は現在も続いており、新たな分析技術により得られるデータに基づき、新たな知見が得られている。月隕石は飛来地域の特定が難しいが、月面へのランダムな隕石衝突の産物であるため、月全球表層のランダムサンプリングと考えられる。2010年5月現在の月隕石の総重量は57 kgで、アポロ試料(約382 kg)の約15%に相当する。月隕石は、アポロ試料とは異なる岩石種、化学組成、同位体組成・年代を持つものも多く含むため、月の全体像構築と月の進化シナリオ解明への重要な手掛かりである。アポロ試料や月隕石分析の最新研究については次号で掲載を予定している。

本特集のきっかけとなったのは、2009年11月7日に千葉工業大学で開催された「月科学研究会：月はどこまでわかったのか?」である。筆者と共同で研究会を企画・開催して頂いた並木則之氏(千葉工大)と、遊星人の本特集を提案して頂いた田中秀和氏(北大)に深く感謝する。また、本特集に原稿執筆して下さいました玄田英典氏(東大)、酒井理沙氏(東大)、唐牛讓氏(早大)、松島亘志氏(筑波大)、洪鵬氏(東大)にも感謝したい。最後に、非常に厳しい編集日程の中で査読を行っていただいた査読者の皆様にも深く御礼を申し上げたい。

参考文献

- [1] Warren, P.H. and Wasson, J.T., 1979, Proc. 10th Lunar Planet. Sci. Conf. 2051.
- [2] Cameron, A.G.W., 2000, in Origin of the Moon, 133.
- [3] Jolliff, B. L. et al., 2000, J. Geophys. Res., 105, 4197.
- [4] Takeda, H. et al., 2006, Earth Planet. Sci. Lett., 247, 171.
- [5] Arai T. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 433.
- [6] Kato, M., 2008, Adv. Space Res. 42, 294.
- [7] 玄田英典, 2010, 遊星人 本号.
- [8] 酒井理沙ほか, 2010, 遊星人 本号.
- [9] 唐牛譲ほか, 2010, 遊星人 本号.
- [10] 洪鵬ほか, 2010, 遊星人 本号.
- [11] 松島亘志ほか, 2010, 遊星人 本号.

付録：月科学研究会「月はどこまでわかったのか？」

主催：千葉工業大学惑星探査研究センター（並木則行、荒井朋子）

日時：平成21年11月7日(土)9:00-18:00

於：千葉工業大学津田沼キャンパス 7号館4階7410号室

プログラム(敬称略)：

[1] かぐや初期成果の総括

- 9：05－9：25 諸田智克(JAXA)「月の海の年代学から見た月の二分性」
- 9：25－9：45 平田成(会津大)「かぐやデータに基づく月クレーターの地形地質解析」
- 9：45－10：05 大竹真紀子(JAXA)「月地殻のMg#分布」
- 10：05－10：25 中村良介(産総研)「南極エイトケン盆地地域の地殻深部組成」
- 10：25－10：45 小林進悟(JAXA)「K, Th, Uの全球分布」
- 10：45－11：05 押上祥子(名大)「LRSデータから推定される月の海の表層構造と熱史」
- 11：05－11：25 野田寛大(天文台)「かぐやレーザ高度合計(LALT)による成果」
- 11：25－11：45 石原吉明(天文台)「かぐやによる月重力場測定とその成果」
- 11：45－12：05 武田弘(千葉工大)「月試料の鉱物学と資源的利用」

[2] 月科学のレビュー

- 13：00－13：10 並木則之(千葉工大)「かぐやデータによる統合サイエンス提案」
- 13：10－13：25 荒井朋子(千葉工大)「月試料とかぐやデータの融合研究で月はどこまでわかったか？」
- 13：25－13：50 唐牛譲(早稲田大)「月試料のバルケケミストリ」
- 13：50－14：15 三澤啓司(極地研)「Sm-Nd同位体系からみた月の初期進化」
- 14：15－14：40 三浦弥生(東大地震研)「月試料の希ガス研究」
- 14：40－15：05 倉本圭(北大)「月の熱史」
- 15：05－15：30 玄田英典(東大)「徹底比較！月の起源」

[3] 最新の月科学研究紹介

- 15：40－16：00 酒井理紗(東大)「ピストンシリンダーを用いた高温高圧実験に基づく月マグマオーシャン化学組成への制約」
- 16：00－16：20 大谷栄治(東北大)「月試料中高圧相からわかる月面衝突現象」
- 16：20－16：40 杉田精司(東大)「月の極域水探査LCROSS速報」
- 16：40－17：00 田中智(JAXA)「月震解析で月内部構造はどこまでわかったか」
- 17：00－17：20 趙大鵬(東北大)「月の地震波トモグラフィーの試み」
- 17：20－17：50 議論
- 18:00 解散