

特集「月揮発性成分の研究による科学と探査」 月極域探査タスクフォースの紹介

並木 則行¹, 春山 純一², 吉田 二美³, 三浦 弥生⁴, 佐伯 和人⁵,
大竹 真紀子², 臼井 英之⁶

1. 月極域探査タスクフォースの経緯と目標

月や火星を対象に国際協働による宇宙探査を実現しようという機運が国際的に高まり[1], JAXAでは新たに国際宇宙センターを設置して, 月の極域に着陸して資源探査を行う月極域探査の検討を開始した[2]. 宇宙科学研究所の宇宙理工学合同委員会はこの動きに呼応して, 宇宙科学コミュニティと国際宇宙探査に関する情報を共有し, 同時に国際宇宙探査計画へ宇宙科学コミュニティの意見を反映させるために, 2017年9月に国際宇宙探査専門委員会(委員長 久保田孝)を設置した[3]. 月極域探査の科学を更に深めるために, 国際宇宙探査専門委員会の依頼を受けて2018年2月に月極域探査タスクフォース(TF)が組織された. 月極域探査TFは90日間スタディとして, 集中的な活動を行い, 5月18日に最終報告書を国際宇宙探査専門委員会に提出した. この最終報告書は日本惑星科学会のサーバーを通して公開されている[4]. 本稿ではTFの活動と最終報告の概略を紹介する. 詳細は是非, TF最終報告書の本編[4]を参照されたい.

月極域探査TFとして, 国際宇宙探査専門委員会から検討および提言をまとめることを諮問されたタスクは以下の通りである.

(1) 水(氷)探査に関する科学的助言

モデル機器(表1)を用いて, 水(氷)を発見/探索するために役立ちそうな科学技術を助言する.

(2) 水(氷)探査の結果から得られる科学の整理

モデル機器(表1)から得られる観測データを使って, 資源探査にとどまらない科学成果を上げることができるか, 検討を行う.

(3) 月極域での科学探査の提言

水(氷)の資源探査から視野を広げて, 月極域科学全体へ寄与しうる観測の提言を行う. その際には, RFI提案や新しいセンサの提案を含めて考慮する.

(4) 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

将来月惑星科学に貢献する観測について, 太陽系科学, 惑星科学, 天文学の観点から検討する.

上記の諮問を著者らの中の並木が受けて, 月極域探査TFメンバーの選定を行った. TFの活動期間はおおよそ90日間という目安が提示されていたので, 並木は全ての月科学を網羅的に扱うことは避け, 月極域探査に特に結びつきの強い4つのテーマ, (a)月表層環境, (b)同位体化学分析, (c)月の岩石・鉱物, (d)太陽系内水輸送, について深い検討を行うための専門家を候補者として選んだ. その際に並木は, トップダウン型の政策ミッションに対して科学コミュニティが独自の視点を持つことが重要であると考えて, TFは月極域ミッション定義チームとは独立に科学提言を行うことを目指した. 科学コミュニティと国際宇宙探査の架け橋であるべきTFが, 先行している月極域探査ミッション定義チームの提案する科学目標や観測計画を安易に後追いしないよう, ミッションの実行者と提案者, 評価者は各々の立場を明確に区別するように心

1. 自然科学研究機構 国立天文台
2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
3. 千葉工業大学 惑星探査研究センター
4. 東京大学 地震研究所
5. 大阪大学 大学院理学研究科
6. 神戸大学 大学院システム情報学研究科
nori.namiki@nao.ac.jp

表1: モデルミッション機器(月極域探査ミッション定義チームから提供)

番号	観測機器	測定量・精度
1	地中レーダー	地下の状況を識別 深度2 mまでを探査
2	イメージング分光計	水氷の吸収・反射を測定 波長範囲: 可視～近赤外
3	中性子分光計	Hの存在量を測定 水素含有量: 100 ppm(水0.1 wt%)
4	熱重量分析計	揮発性物質の含有量を測定 試料質量: 1 g～ 測定分解能: 1 mg 温度範囲: ～900 K
5	質量分析計	化学種の特定 質量範囲: ～100
6	微量水分計(CRDS)	DH比を測定 検出限界: (数ppb)

懸けた。もちろん、現状の月極域探査の検討状況を把握し、情報交換することも必要なので、国際宇宙探査専門委員会や月極域ミッション定義チームメンバーも交えて本稿の著者らによる月極域探査TFチームが構成された。

TFは最初に上記のタスク(1)～(4)についての目標共有を図った。そのために月極域探査ミッション定義チームから、2018年2月当時のモデル機器の例として表1の提供を受けたのであるが、この情報だけでは観測精度、分解能、観測限界、要求リソース等の情報が不足しており、タスク(1)に応えることは困難であると予想された。そこで(a)および(b)、そして(c)と(d)について、まず「(4) 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言」のために将来月惑星科学に貢献する重要な科学データを抽出し、そのために必要な観測を「(2) 水(氷)探査の結果から得られる科学の整理」(モデルミッション機器によるデータ取得)と、「(3) 月極域での科学探査の提言」(理想的な観測装置の提案)に分けて記述することとした。また、(a)～(d)とは別に、タスク(4)に関して科学プラットフォームの提言も行っている。最後に「(1) 水(氷)探査に関する科学的助言」として、物理探査の必要性を言及することとした。

TFの検討内容に惑星科学コミュニティからの意見を反映させるために、2回の機会を設けた。1回目は重力天体着陸探査シンポジウム(2018年3月16日)において、TFの中間報告を公表し、意見を受け付けた。

2回目は最終報告に対して2018年5月に学会メーリングリストを通して意見募集を行った。いずれの機会にも貴重なコメントを頂くことができたので、可能な限り、最終報告[4]に反映させている。

2. TF最終報告の概要

2.1 日本の月惑星探査ロードマップ

TFでは、第一に惑星科学・太陽系科学における月科学の重要性を再確認するために、日本の月科学と月探査を牽引してきた地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)と日本惑星科学会のロードマップをレビューした。それぞれは宇宙科学研究所の呼びかけ(RFI)に対する回答としてまとめられている[5, 6]。

太陽地球惑星系科学分野(STP分野)がまとめたRFI回答[5]においては、月の水の分布を理解する為には太陽風プロトン起源の水酸基・水分子生成を含む「水の生成・濃集原理」の理解が重要であると書かれており、月探査を通して生命や生命圏環境の探査へ貢献するという方向性が示されている。太陽風と表層環境の相互作用は複雑で、実測データなしには把握が困難な課題である。地球に身近な月で太陽風と表層環境の相互作用を調べることは、太陽地球系物理学における普遍性を追求するという知的興味からも、水資源の月面上の輸送過程と保護状態を理解するという実用性からも重

要であると考えられている。

他方、日本惑星科学会がまとめたRFI回答[6]では、今後20年程度の太陽系探査の科学目標として、「太陽系における生命生存可能環境の形成と進化の探求」が挙げられている。「惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給」というテーマに関して言えば、太陽系年代学の基準としての月年代学を再検討し、小惑星・彗星探査の知見と組み合わせることで惑星材料物質の供給過程が明らかとなる。特に生命前駆物質の移動という点では、「水」は非常に重要である。また、「惑星・衛星の形成・初期分化」というテーマに関して、月のマグマオーシャンから固化した初期地殻の形成過程が最重要課題として挙げられている。地球からは抹消されてしまったマグマオーシャンの記録と、初期地殻のサンプルが月で手に入るという点は、生命生存可能環境の普遍性の探求において非常に重要である。将来の月面居住圏や、月以遠への活動領域拡大に資する科学もまた、今後の月探査の重要課題に含まれるであろう。

上で述べた月科学の重要性に鑑みて、TFでは2.2 太陽風と表層環境の相互作用、2.3 地殻形成史の解明、2.4 太陽系内の水輸送、2.5 科学探査プラットフォーム、2.6 物理探査・ボーリング探査のススメという5つの科学的課題について提言を行っている。

2.2 太陽風(SW)と表層環境の相互作用

本項目は三浦と臼井が担当した。リモートセンシング観測や月試料分析、さらに地上実験から、月表層の岩石やレゴリス試料中にはHまたはOH基が存在することが報告されており[例えば、7-9]、その一部はH₂Oの形態で存在している可能性があるが、現時点では不確定性も大きい。そのため、極域に着陸して直接観測を行い水の存在量・形態・起源を明らかにすることは、月の進化や現在の表層環境を知る上でも、また、将来の資源探査の可能性を探る上でも、重要である。

月面での太陽風直接観測は、太陽風プロトンダイナミクスの定量的理解という理学的な観点からも大変重要であるが、さらに、太陽風プロトンによる水資源生成、および水分子のスパッタリングの可能性を議論する上でも非常に重要である。「(3)月極域での科学探査の提言」の観点から、月面での太陽風プラズマ環境の直接観測が望まれる。かぐや衛星のプラズマ環境観測

装置[10]に相当するプラズマ環境計測器を月面に設置することにより、月極域領域における太陽風プラズマのフラックス量を直接計測することが提案されている。

月表層に存在するらしい水の起源については、大別して、(i)太陽風と月面との相互作用、(ii)小惑星や彗星などの外来物質に由来、(iii)月内部からの供給、が考えられる。「起源物質の絞り込み」のための情報源として、D/H比で10 %、O同位体比で数%程度の誤差での測定がなされれば有意義である。この程度の観測精度は、Curiosityに搭載されたTLS(Tunable Laser Spectrometer)の実績を踏まえれば十分に可能と思われる。そこで、「(2)水(氷)探査の結果から得られる科学の整理」としてHとOの同位体比分析が提言された。

2.3 地殻形成史の解明

本項目は佐伯が担当した。月周回探査や月隕石研究により、月の初期の地殻である高地部分にも地域差があり、同じ斜長岩地殻でもMg/Feの異なるバリエーションを持つことが分かってきた[11, 12]。マグマは冷却とともに自らのMg/Feよりも高いMg/Feを持つ輝石やカンラン石をだんだんと晶出させるので、初期地殻はMg/Feが高いと考えられる。月の初期地殻である斜長岩の場所による化学組成の変化や、斜長岩地殻直下の岩石種がわかれば、マグマオーシャンや月全球の化学組成が制約できるかもしれない。そうなれば、月-地球系の起源に迫る研究成果となる。また、放射性物質が高濃度に濃集した地域がみつければ、マグマの分化が最も進んだ状況を確認できるほか、将来の深宇宙探査のための原子力電池用核燃料の採掘鉱山となる可能性もある。

初期地殻の有力候補として、北極周辺(特に裏側)と南極周辺の表側(南極エイトケン盆地の影響を受けていない部分)が考えられている。もし月極域探査で初期地殻が発見できれば、世界初の成果となる。また、南極では高純度斜長岩が分布する地域や、高Ca輝石の多い地域や低Ca輝石の多い地域もあるので、斜長岩地殻の化学組成や、斜長岩地殻直下の岩石種が斑レイ岩かノーライトかを解明する手がかりが見つかる可能性がある。

2.4 太陽系内の水輸送

本項目は吉田が担当した。太陽系の微惑星は太陽系

の温度勾配にしたがって、太陽に近い領域から無水微惑星、含水微惑星、氷微惑星のゾーンに分かれて形成された。原始太陽系星雲がまだ残る中でそれらの微惑星が衝突合体して原始惑星へと成長する中で動径方向の移動が生じ、原始惑星周辺の微惑星が散乱、広い範囲で混合されたという仮説(Grand Tackモデル[13])がある。惑星移動による動乱期は、Grand Tackの後にもう一度あったという予想があり(Niceモデル[14])、それが後期重爆撃期(アポロサンプルの年代分析や月のクレーターのサイズ分布などから推測される、月に太陽系の天体が集中して衝突した時期)に相当すると考えられている。

太陽系の惑星形成期とその後の惑星が現在の軌道に落ち着くまでの期間の我々の知識は明確な理解には程遠く、数値シミュレーションで探るには限界がある。観測的証拠の蓄積が必要であり、正にその一つが月面の観測で予想される後期重爆撃期の真偽の調査である。もし後期重爆撃期があったとすれば、その時の天体の種類と流入量の見積もりもまた重要な観測量となる。

太陽系内の水輸送に関して第一の課題は、後期重爆撃期に流入した天体の種類(大別すればメインベルト小惑星か、より揮発性物質の多い彗星のどちらか、あるいはどちらも)を探ることである。もしも衝突天体の残滓を発見できるならば、2.2節で挙げられたD/H比、O同位体比等の測定から手がかりが得られるかもしれない。

第二の課題は、Grand Tack期に運び込まれた水の同定である。[13]によると、地球型惑星形成に使われたのは大部分が無水微惑星と付加された含水微惑星である。この時代にはまだ地球や月は出来上がっていないので、微惑星の形で運び込まれた水は地球や月の材料物質となり、それらの内部(マントル)に取り込まれる。後期重爆撃期には月の地殻表面は衝突で混合されるとしても、衝突天体から付加された水はマントル深部には到達しないと思われるので、マントル起源の水のD/H比と地殻表面とでD/H比を測定し違いを見ることで、Grand Tack期に取り込まれた微惑星起源の水(マントル)と、後期重爆撃期にカイパーベルトやメインベルトから落ちてくる天体起源の水(月の表層部)を区別できるのかもしれない。

2.5 科学探査プラットフォーム

本項目は並木が担当した。今後の月探査では資源利用・有人活動ミッションと科学ミッションがスコープを共有し、一貫した戦略の下で実現されることで相乗の効果を上げることが期待できる。そのような目的のために、月極域探査では将来の資源利用・科学ミッションの基盤を構築することが大変重要と考えられる。こうした月研究基盤を最終報告では科学探査プラットフォームと呼んでいる。

科学探査プラットフォームの第一の例は、越夜可能な着陸機の長期利用である[1]。着陸機をステーション化することによって将来の物理探査ネットワークハブの構築や、長期間の月表層環境のモニタリング、X線やEUVを用いた撮像による地球磁気圏観測や太陽観測などの利用が見込まれる。第二の例は、多目的ローバーの設置である[1]。定型の観測パッケージをローバーが自ら交換するように設計することで、多種多様な資源利用・科学観測の需要に応えることができる。第三の例はデータリレー衛星の設置である[1]。こうしたインフラ整備は、長期的・戦略的な月探査に必須である。科学探査プラットフォームが月面上に整備・維持できれば、観測機会が増えて科学的に大きなメリットとなる。その後のミッションは小型化して必要なパーツのみを配達することで成果があがるようになり、コスト低減も期待できる。

2.6 物理探査・ボーリング探査のススメ

本項目は並木が担当した。現状の水(氷)探査では、まず月極域における水(氷)の存在確認から始まる。月極域探査を地球上の石油掘削と対比するならば、現状は石油の見つかりそうな地域について地質調査を行い、その埋蔵量や埋蔵深度を調べて、資源として採算がとれるかどうかを検討する段階であろう。そのような状況で地質調査を担うのは、「物理探査」と呼ばれる分野である。物理探査では、弾性波探査、電気探査、磁気探査、重力探査、地温探査、放射能探査といった標準的な手法が確立している[15]。また、月極域探査ではボーリングも実施されるが、地上と海洋での「ボーリング探査」からは多くの知見・経験が得られている。資源探査が中心の月極域探査実現のためには、物理探査とボーリング探査の研究者を加えて開発体制を補強

することが望まれる。

3. 政策ミッションとの共同

科学，特に理学は個々の研究者の独自性や創造性が基盤であり，理学ミッションはボトムアップのプロセスで実現される。宇宙科学研究所はワーキンググループの設置と理工学委員会における評価を通して，ボトムアップ型ミッションを実現する仕組みを構築してきた。一方で，国際宇宙探査は理学の範疇を超えて，産業，国際政治，さらには安全保障まで含んだ巨大なプロジェクトとして胎動している。国際宇宙探査のようなトップダウン型の政策ミッションに対しては，従来の宇宙科学研究所方式では対応できなくなる恐れがある。トップダウン型ミッションと研究者はどのように関わっていくべきであるか，惑星科学コミュニティは暗中模索している段階であろう。TFは新しい関係を築いていくための一つの試みであり，政策ミッションとコミュニティの架け橋となり得るのかもしれない。本稿の執筆時点において，国際宇宙探査専門委員会はさらに3つのTFを組織して，コミュニティとの対話を図ろうとしている。月極域探査TFの経験が広くコミュニティと国際宇宙探査の関係者に共有され，新しい絆が結ばれることに役立てられれば幸いである。

参考文献

- [1] International Space Exploration Coordination Group, 2018, The Global Exploration Roadmap, pp. 31, NASA HQ, Washington, <https://www.globalspaceexploration.org/>.
- [2] 大竹真紀子ほか, 2019, 遊星人, 28, 53.
- [3] 久保田孝, 2018, ISASニュース, 452, 5.
- [4] <https://www.wakusei.jp/~moon/wiki/top/?SeleneR>
- [5] 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2018, 太陽地球惑星圏の研究領域の目的・戦略・工程表(2018年2月14日版), pp. 33.
- [6] 日本惑星科学会, 2018, 惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表(2018年1月29日版), pp. 32.
- [7] Anand, M. et al., 2014, Phil. Trans. Royal Soc. London Ser. A 372, 2013.0254.
- [8] Crawford, I. A. and Joy, K. H., 2014, Phil. Trans. Royal Soc. London Ser. A 372, 2013.0315.
- [9] Hauri, E. H. et al., 2017, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., DOI:10.1146/annurev-earth-063016-020239.
- [10] Saito, Y. et al., 2008, Geophys. Res. Lett. 35, L24205.
- [11] Ohtake, M. et al., 2012, Nature Geoscience 5, 384.
- [12] Crites, S. T. and Lucey, P. G., 2015, Am. Min. 100, 973.
- [13] Walsh, et al., 2011, Nature 475, 206.
- [14] Tsiganis, et al., 2005, Nature 435, 459.
- [15] 佐々宏一ほか, 1993, 建設・防災技術者のための物理探査, pp. 219, 森北出版, 東京.