

ヘラクレス計画の科学探査タスクフォース

中間報告書

2019 年 2 月 28 日

本報告について

米国は 2018 年 2 月に、各国と共同で月の周回軌道に有人拠点を構築するという、月軌道プラットフォームゲートウェイ計画を発表した。JAXA はこの構想を利用して月面の広域調査を行い、15kg 程度の試料を地球に持ち帰るという「ヘラクレス計画(HERACLES, Human Enhanced Robotic Architecture for Lunar Exploration and Science)」を、国際宇宙探査と呼ばれる国際協働の枠組みの中で検討している。

同計画の国際科学ワーキンググループは、2026 年頃の計画実施を目指して精力的に検討を進めている。JAXA 国際宇宙探査専門委員会では 2018 年 12 月に「ヘラクレス計画の科学探査タスクフォース」を新設し、この計画に対する提言を取りまとめることにした。

ヘラクレス・国際／国内ワーキンググループ活動の報告をタスクフォースがレビューしたところ、ワーキンググループが与えられた時間的制約は厳しく、その中で適切な検討が行われているとはいえ、必ずしも配慮が十分にできない部分が残ることは仕方がないとの認識を持った。本報告ではそうした要素の中で、特に留意することが望ましい点を挙げ、これを提言とした。

ヘラクレス計画の科学探査タスクフォース・委員構成

TF 長	宮本英昭（東京大学）
TF 副長	春山純一（JAXA）
理学委員	荒川政彦（神戸大学）・惑星探査学 小河正基（東京大学）・惑星内部進化学 栗谷豪（北海道大学）・岩石学 玄田英典（東京工業大学）・理論惑星科学 小林桂（岡山大学）・分析科学 小松吾郎（ダヌンツィオ大学）・惑星地質学 佐伯和人（大阪大学）・鉱物学 寺田直樹（東北大学）・惑星空間物理学 早川基（JAXA）・惑星探査学 三河内岳（東京大学）・隕石学
工学委員	川勝康弘（JAXA）・工学とりまとめ 大槻真嗣（JAXA）・月表面活動 佐藤泰貴（JAXA）・サンプル・カプセル 津田雄一（JAXA）・大型探査機システム 福田盛介（JAXA）・着陸航法・誘導
事務局	新原隆史（東京大学）・隕石学
オブザーバ	唐牛譲（JAXA）・ヘラクレス取りまとめ

2019 年 2 月 28 日版

Executive Summary

TFの目的

JAXA国際宇宙探査専門委員会から2018年12月に、以下を90日間で検討するよう指示を受けた：

1. ヘラクレス計画で行うサイエンス、観測機器、サンプリング地点などに関する科学的助言
2. ヘラクレス計画に関わる先導する工学・確立すべき技術の提言
3. 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

TFの検討方法

- ・ 委員以外の意見の反映を狙い、ヘラクレスSWGが理工学委員会等で既に行ったRFIの結果を参考にしつつ、これがカバーしきれなかった地球科学・工学諸分野⁽¹⁾にRFIを行った⁽²⁾
- ・ 集まった意見を参考に、一部提案者に直接ヒアリングを行いつつ、タスクフォース委員で提言をまとめた

⁽¹⁾日本地球惑星科学連合の全セクション（宇宙惑星科学、大気水圏科学、地球人間圏科学、固体地球科学、地球生命科学）、惑星科学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、火山学会、地質学会、地球化学会、鉱物科学会、土木学会、日本応用地質学会、地盤工学会、資源地質学会、岩の力学連合会

⁽²⁾最初のRFIと今回のRFIで合計100件近いご意見をいただいたが、特に後者は年末の短い期間（おおよそ2週間程度）の意見募集で、コミュニティの重要な全ての意見が集まったとは考えていない

検討の前提条件

- ・ 本TFが活動を開始した段階で、既に科学テーマ5つに絞られ、着地点候補の詳細解析が行われる段階であった
- ・ SWGは科学テーマの優先順位と、科学観測機器案の提案をステアリングチームから要請されていた
- ・ iSDTは優先順位の高いテーマに対し着陸地点絞り込み・走行経路検討等を行い、2020年中期までに着陸地点を決定する予定

TFの意見

- ・ 優先すべき科学テーマを新たに議論することは、ヘラクレス計画の上位組織（iSDT）として既に困難な状況と判断
- ・ SWGが与えられた時間的制約は厳しいが、その中で適切な検討が行われていると認識した
- ・ スケジュールに配慮しつつ、有用な要素と国内における対応について重点的に議論を行い提言することとなった
- ・ ①国際ミッションとして必要になる点と、②我が国として将来的に重要である点について、提言することとした
- ・ 新たな項目として、月利用に資する新しい科学／工学の検討を推奨する

関連の深い学会における工程表との関連

日本惑星科学会・工程表の科学目標：

A. 「生命生存可能環境の普遍性」

- | | |
|-----|--|
| A1. | 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給：月、小惑星、彗星 |
| A2. | 惑星・衛星の形成・初期分化：月、水星、火星、分化小惑星（ベスタ、E型小惑星など） |

B. 「生命生存可能環境の多様性」

- | | |
|-----|------------------------------------|
| B1. | 生命前駆物質の形成・進化：彗星、始原的小惑星、惑星間塵 |
| B2. | 地下熱水環境：鉱物-水-有機物反応系：火星、氷衛星、始原的小惑星 |
| B3. | 大気（海洋）散逸・光化学反応：火星、金星、タイタン、系外惑星（大気） |
| B4. | 生命およびその痕跡：火星、氷衛星、タイタン |

月探査は、初期太陽系における惑星移動や物質輸送、スノーライン以遠から内側太陽系への揮発性成分の持ち込み、ジャイアントインパクトを伴う地球型惑星形成の理解という意味で重要。

地球電磁気・地球惑星圏学会STP分野の目標：

太陽の影響を受ける多様性に満ちた地球・惑星系の大気圏・電磁気圏を理解し、また太陽がどのように太陽圏の環境を作り出しているかを解明すること。
太陽圏を宇宙ガスの実験室ととらえ、粒子加速や磁気再結合、無衝突衝撃波などのプラズマ・大気物理現象の素過程を明らかにすること。
波及効果には、生命圏環境や系外惑星系の理解に貢献すること、「宇宙天気」などの人類の宇宙進出を支える知識基盤を構築すること、が含まれる。

月極域の水の量と質の調査が、有人月面活動に向けた重要課題の一つとして挙げられている。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、こうした研究は生命圏環境の理解に資する。

ヘラクレス計画も含め、JAXAの国際宇宙探査計画と関連学会のロードマップが調和的に位置づけられるよう、引き続き関連学会とJAXAが協力して検討することが望ましい

提言の背景①：惑星科学的な視点

地球惑星科学の方向と、月科学の位置づけ

1. 太陽系がいか形成されたか？

太陽系形成の標準モデルの問題点（巨大ガス惑星の成長時間）が、ペブル集積モデルで説明されつつある。これは巨大衝突が必然的に生じる寡占成長モデルと、必ずしも一致しない。火星は地質学的には高温起源だが、微惑星集積時の重力エネルギー解放と成長速度との関係は低温起源を示唆し、月はこれと逆の矛盾がある。この本質をえぐるには、月と火星を同時に調べるのが鍵。

3. 天体の初期進化を読み解けるか？

地球は内部進化、生命、テクトニック活動で情報が消失した。火星はその活動度が低く情報が残る。月はもっと早期に活動が沈静化し、さらに情報が残る。地球の形成過程との密接に関連で、形成過程から内部進化までの記録を持つ。

2. 形成直後の天体はどのようなものか？

最新の太陽系形成論の枠組みの中で、巨大衝突による月形成仮説を再考する必要がある。特に月は高温起源（高地地殻の存在は、マグマオーシャン＝高温起源を支持）なのか、低温起源（重力探査や火山活動は、低い熱収縮度＝低温起源を示唆）か。後者は、太陽系形成論の寡占成長モデルと複数回の巨大衝突による地球形成、その破片の集積による月形成でも説明可。表と裏の二分性と膠着物質の関係も重要。

4. 地球は生命を育む星へどう進化したか？

地球や金星は大きな天体であるため素過程が絡み合い全容解明が困難。月と火星は小さいため有利。ただしホットスポット型火山の有無や火成活動とマントル湧昇流の相互フィードバックの有無という意味で、月と火星は異なる。月のマントル対流の強さや温度（深部起源水の含有量）、火成活動の規模・組成の時間変動を系統的理解することが本質的。

月科学の優先的探査項目

地殻構成物の多様性

地殻・マントルのバルク組成把握、マグマ・オーシャン期の分別過程解明、高地地殻の放射性年代測定と地質調査

揮発性物質と月環境

極域および高地の揮発性成分調査（組成、起源、年代的变化の把握）。太古の地球起源大気の影響、磁場情報の獲得、高エネルギー粒子・帯電・ダスト環境、電位変動と浮遊ダスト、磁気異常と静電バリア形成過程

火山活動の精査

高分解能で組成分布を理解・岩石学的スケールで高度分析。重なり合う火山噴出物、異なる年代の地域での火山岩岩石学、火山地域の地下構造把握、火山地質と比較惑星火山学

太陽系内衝突史

太陽系衝突史の痕跡、太陽系クレーター年代学の基礎、岩石形成年代とインパクトメルト・ベズンの岩石学、若い溶岩流のクレーター年代と年代学高精度化、40-38億年前の隕石衝突フラックスの連続性と太陽系初期ダイナミクス

月の内部進化の理解

金属鉄コアの組成、サイズ（地震探査による月深部構造探査）、熱流量、月、形成直後の内部熱・化学状態の推定、月の膨張収縮テクトニクス解明、海の放射性年代測定、異なる年代における典型的岩石の系統的地球化学的情報

衝突・レゴリスプロセス

太陽系に普遍的に存在する地殻構成物質の破砕物（レゴリス）としての形態、挙動の把握。隕石ガーデニングによる成熟、微小隕石のフラックス、宇宙風化効果

地球がどのようにして、生命の宿る星となったのか？ 小惑星から内・外惑星まで、プログラム化した探査が重要

小惑星：

太陽系の素材
限られたプロセスのみ経験

月：

最小の地球型惑星
系統的理解を助ける端成分。形成・初期進化の鍵

火星：

絶妙の大きさ
地球と月を結ぶ進化過程の鍵

地球：

大きい＝複雑な進化過程
なぜ生命が宿る星へ？

金星：

地球同程度に大きい
なぜ地球と異なる環境に？

提言の背景②：月開発に向けた月科学・工学の視点

LOPG時代の動向

科学は重要な要素だが、今後の月での活動の主役は必ずしも惑星科学だけでは無い

宇宙探査は予算と伝統的技術を持つ国家のみが実施という時代は去った：中国(CNSA)は既に各国の中で抜き出た。インドの存在度も高まる。

経済的価値の変化：月面への機器や物資の効率的輸送、エネルギーや原料を含めた資源確保を目的とした活動が活発化

民間の活動は既に不可欠：SpaceX社の打ち上げペースは、ほぼ2週間に1回。相次ぐ民間資本による月探査計画の公表。

NASAは相次いで月探査を含む民間支援の方策を発表：Commercial Lunar Payload Services (CLPS), Commercial Lunar Lander, MROによる支援

Image credit: NASA

月開発に向けた優先的探査検討項目

月は安定した軌道を持つ地球に最も近い固体天体。フィードストック（原料）としての必要性は高く、地殻濃集元素を最も効率的に獲得できる。

月資源の可能性の把握

フィードストックとして利用可能な主要元素の分布と存在形態、極域および火砕物に含まれる水素や、その他の揮発性成分の存在度と存在形態の調査がまず重要。GRSやNSによる元素マップよりもはるかに高い解像度・精度での調査が必要。

月環境の把握

放射線環境や表面の帯電状態、プラズマ、微小隕石のフラックス、ダストの帯電・移動・付着、温度や表面起伏、ボルタ存在度など、月面の環境を精密に把握する必要がある。

月での活動への準備

レゴリス（ほぼ普遍的に固体天体を覆う岩石の破砕物の総称）の挙動や特性（粒径分布、鉱物組成、機械特性など）はよくわかっていないが、これは月面での移動や人工物の敷設、人工物との相互作用、スラスタによる巻き上げ評価、インフラ整備には不可欠。掘削や土砂採取法、越夜技術や電力維持法の開発なども必須となる。

Image credit: NASA/JSC/LPI/CLSE

惑星科学と月開発関連の研究は重複する要素も多い

惑星科学

(ヘラクレス計画で矛盾なく実施可能)

月開発

地殻構成物の多様性の把握

火山活動の精査、熱組成進化の精査、地質学的コンテクストの把握

太陽系内衝突史の把握

若い溶岩流のクレーター年代とサンプル年代

揮発性物質と月環境

太陽風、地球起源イオンのインプラネーション、地球起源大気や地場情報の獲得、電位変動と浮遊ダスト、磁気異常と静電バリア形成過程

衝突・レゴリスプロセス

普遍的に存在する地殻構成破砕物の特性、挙動の把握、ガーデニング、宇宙風化の効果

月の内部進化の理解

月深部構造探査、熱流量、地殻内部構造、組成分布

共通する要素

詳細地質調査、地質コンテクスト+複数地点で系統的サンプリング

適切なサンプル取得、保存技術、キュレーション

放射線、プラズマ、帯電環境、微小隕石のその場観測

着陸探査、ローバ移動、掘削、サンプリング、地表面詳細観測

月資源の可能性の把握

フィードストック：金属、地殻濃集元素の濃集度、水平・垂直分布、濃集形態、鉱物組成、濃集過程
揮発性成分：極域および火砕物のH、その他揮発性成分の存在度、存在形態、詳細な分布、深度方向の分布、濃集過程

月環境の把握

放射線環境、プラズマ相互作用、太陽風、微小隕石のフラックス、ダストの帯電、移動・付着

月活動への準備

レゴリスサイエンス、ダスト粒子挙動、プロセッシング、人工物との相互作用、スラスタによる巻き上げ

Image credit: NASA/GSFC/ASU

提言の概要

A) サイエンス、観測機器、サンプリング地点などに関する科学的助言

【提言A-1】 試料採取の最適化とサンプル分析体制の充実を
月隕石と比したサンプル優位性の明確化が必要
サイエンスに応じた場所・試料選定の最適化をすべき
サイエンス価値を最大にするサンプル量と試料採取法に
黄色字 キュレーション施設と体制の強化は国際競争力の増大に

【提言A-2】 着地点選定／運用WSの開催を
国際協調であるがゆえの、適切な情報提供が必要
サンプル採取まで、マルチスケールの検討が必要
黄色字 国内開催のWS/検討会を定期的開催しコミュニティ拡大へ

【提言A-3】 着陸機も含めた測器の公募と検討が必要
ローバ・着陸機への機器提供は、国際協調とすべき
アイディアは広く公募すべき
黄色字 国内版の機器RFIを、至急実施すべき

B) ヘラクレス計画にかかわる先導する工学・確立すべき技術について

【提言B-1】 技術実証ミッションの目的の精査が必要
共同ミッションとしてのミッション目的の精査が要る
黄色字 我が国としてのミッション目的を精査・設定すべき

【提言B-2】 我が国として獲得を目指すべき技術を明瞭化すべき
有人着陸機技術につながる技術検討も
月面探査技術の獲得を
離陸技術の検討を

【提言B-3】 現状のベースラインの改善
離着陸機離脱後の着陸機運用と着陸機への通信系・電源系搭載
小型の離陸・直接帰還機の搭載の検討
新規技術の開発リスクへの対応

C) 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

【提言C-1】 黄色字 我が国で基盤測器と競争力のある測器の開発が必須
天体内部探査の標準化
地質探査技術の着実な獲得

【提言C-2】 黄色字 我が国での月利用の基盤作りをこの機会に進めるべき
表面状態・環境の把握は古くて新しい科学工学
異分野異業種交流が鍵

【提言C-3】 黄色字 我が国で科学探査を支える幅広い体制作りが必要

*黄色字は特に我が国のコミュニティにとって重要なポイント

目次

1	背景	1
1.1	タスクフォースへの要請、検討方法	1
1.2	タスクフォース検討の前提条件	2
1.3	タスクフォースの判断	2
1.4	月表層探査の歴史	2
1.5	整えられつつあるリモセンデータ	3
1.6	諸外国による月探査の動向	4
1.7	ヘラクレス計画現状の整理	5
1.8	日本の各種工程表との関連	5
2	月探査が注目される理由とヘラクレス計画の関連	7
2.1	月の地球惑星科学的位置づけ	7
2.1.1	月は貴重な情報源	7
2.1.2	月の起源と進化の考え方	8
2.1.3	月科学として取り組むべき優先的課題	8
2.1.4	太陽系形成論と月・火星探査	10
2.1.5	地球型惑星内部進化と月・火星探査	10
2.2	月開発に向けた月科学・工学	11
2.2.1	月資源の可能性の調査	11
2.2.2	月環境の把握	12
2.2.3	月面での活動に向けた準備	12
2.2.4	科学探査との調和的な重複	12
3	サイエンス、観測機器、サンプリング地点などに関する科学的助言	15
3.1	【提言】試料採取の最適化とサンプル分析体制の充実を	15
3.1.1	月隕石と比した優位性の明確化	15
3.1.2	サイエンスに応じたサンプリングサイト、試料の選定の最適化が必要	16
3.1.3	必要なサンプル量と試料採取方法、サイエンス価値の最適化の検討	17
3.1.4	キュレーション施設と体制の充実は国際競争力増大の基盤となる	17
3.2	【提言】情報提供を兼ねた着地点選定／運用ワークショップの継続的開催を	18
3.3	【提言】着陸機も含めた科学を早急に検討すべきである	20
4	ヘラクレス計画に関わる先導する工学・確立すべき技術の提言	21
4.1	【提言】技術実証ミッションの目的の精査	21
4.1.1	共同ミッションとしてのミッション目的（HERACLES ORD）の精査	22
4.1.2	日本としてのミッション目的の精査・設定	22
4.2	【提言】獲得を目指すべき技術を明瞭化すべき	22
4.2.1	有人着陸機技術	22
4.2.2	月面探査技術	22
4.2.3	離陸技術	22
4.3	【提言】現状のベースラインの改善	23
4.3.1	離陸機離脱後の着陸機運用と着陸機への通信系・電源系搭載	23
4.3.2	小型の離陸・直接帰還機の搭載	23
4.3.3	新規技術の開発リスクへの対応	23
5	将来の月惑星探査につながる提言	25
5.1	【提言】我が国で基盤測器と競争力のある測器の開発が必須	25
5.1.1	天体内部探査の検討を	25
5.1.2	地質探査技術の着実な獲得を	26
5.2	【提言】新しい宇宙資源・利用工学の基盤作りをこの機会に進めるべき	26
5.3	【提言】我が国で科学探査を支える幅広い体制作りが必要	27
6	Appendix	29
6.1	参考文献	29
6.2	RFI 回答の要約	30



1 背景

JAXA 国際宇宙探査専門委員会に設置されたヘラクレス計画の科学探査タスクフォースは、関連分野の有識者を委員に集めつつ、委員以外の意見の反映を狙い、地球科学・地球工学諸分野に RFI を行った。集まった意見を参考にしながら、一部提案者に直接ヒアリングを行いつつ、タスクフォース委員で提言をまとめた。ただし本タスクフォースが活動を開始した時点で、既に科学テーマや着地点候補は絞られており、優先すべき科学テーマを全く新たに議論することは、ヘラクレス計画の国際的上位組織として既に困難な状況と判断された。そのためスケジュールに配慮しつつ、①国際ミッションとして必要になる点と、②我が国として将来的に重要である点について、重点的に提言することとした。

我が国は無人・有人機双方を駆使し地球外空間における資源・科学探査を行うことを掲げている。本格的な月探査・利用時代が迫っていることを見据えれば、深宇宙での諸活動を支える科学技術基盤の確立にとどまらず、インフラ構築にむけた研究体制の整備も進めることが急務といえる。

ヘラクレス計画は月近傍拠点（LOPG、以下 Gateway）を活用して月面へのアクセスおよびサンプル収集、Gateway への輸送を行うというもので、大型月広域・回収探査ミッションであると同時に、月の本格的な探査・利用の実現に向けた有人月探査機のサブスケール技術実証ミッションという位置づけを持つ。この機会をうまく有効利用できれば、いずれ習得が必須となる重力天体への着陸技術やローバの本格探査への利用、大量のサンプリングとその回収技術などを、短期間で獲得できる可能性がある。これらの技術は将来の有人探査にも直結するものであり、日本が獲得することは将来の有人宇宙計画の中で強い発言権を保持することにもつながる。

JAXA 国際宇宙探査専門委員会はこうした背景から、ヘラクレス計画に対し科学的観点からの提案や助言を行うこととした。そこで同専門委員会の下にヘラクレス・タスクフォースを設置し、集

約的に議論を行うこととした。

1.1 タスクフォースへの要請、検討方法

2018 年 12 月、JAXA 国際宇宙探査専門委員会はヘラクレス・タスクフォースを設置し、以下の事項に関し検討・提言のとりまとめを要請した。

- (1) ヘラクレス計画で行うサイエンス、観測機器、サンプリング地点などに関する科学的助言
- (2) ヘラクレス計画に関わる先導する工学・確立すべき技術の提言
- (3) 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

タスクフォースではこれを受け、90 日スタディを開始し、2019 年 2 月 14 日に中間報告を行い、2019 年 2 月 22 日に中間報告書を提出することとなった。

時間的制約がある一方で、委員以外の意見も適切に反映するため、ヘラクレスサイエンスワーキンググループ（SWG）が理工学委員会等で行った RFI(Request For Information)の結果を参考にした。さらに、この RFI がカバーしきれなかつ

た地球科学・工学諸分野¹を対象として、RFIを行った。この際、情報は本提言をまとめるためにタスクフォース委員が参考にすると同時に、ヘラクレス SWG に提供するという形とした。なお年末の短い期間（おおよそ2週間程度）での意見募集であり、コミュニティの重要な全ての意見が集まったとは考えていない。

本提言は、ここで集まった意見を参考にしながら、一部提案者に直接ヒアリングを行いつつ、タスクフォース委員でまとめた。

1.2 タスクフォース検討の前提条件

ヘラクレス計画は国際共同計画として検討が進められている。科学検討に関しては SWG がヘラクレスステアリングチームにより組織され、JAXA は SWG 担当者を2017年12月に指名し科学的検討が始まった。SWG では国際的な科学コミュニティの意見収集を目的としてヘラクレス国際科学定義チーム（HERACLES International Science Definition Team; iSDT）を組織し、着陸地点検討や科学観測用搭載機器の検討を進めることとした。SWG の JAXA 担当者は、日本の科学コミュニティの意見を反映するため宇宙理工学委員会や日本惑星科学会に対して2018年5月にRFIを発出し、6月にiSDT日本人メンバを7名国際宇宙探査専門委員会に推薦し承認を得た。

RFI 回答文書(8月3日締切)については、iSDT 日本人メンバを含む月科学コミュニティが議論し、iSDT に対して日本のコミュニティが推薦する「優先すべき月の科学テーマ」を5つに絞った（マントル組成、斜長岩地殻初期組成、クレータ年代学高精度化、月への物質供給機構、内部構造探査）。この5つのテーマを9月に開催されたiSDT キックオフ会議に提出し、iSDT はここで提出された5つの科学テーマについて今後議論を進めることとして合意した。さらに、これら5つの科学テーマを検討するにあたり、5つの地域に対して詳細検討を行うこととした（ジャクソンクレータ、シュレディンガー盆地、PKT 領域の若い玄武岩領域であるフラムスチードクレータ、モスクワの海、コペルニクスクレータ）。

つまり本タスクフォースが活動を開始した段階で、既に科学目標は5つの科学テーマに絞られており、着地点候補も詳細解析が行われる段階であった。タスクフォースの90日スタディの間にもiSDT の議論が行われており、SWG は2019年3月までに科学テーマの優先順位を決定するようミッションステアリングチームから要請を受けていた。さらに、ストローマンペイロードという形で科学観測機器のセットを提案することも要請されていた。iSDT はさらに優先順位の高いテーマに対しての着陸地点の絞り込み・および走行経路検討等を順次進めており、2020年中期までに着陸地点

決定を予定しているとのことであった。

1.3 タスクフォースの判断

以上の状況から、優先すべき科学テーマを新たに議論することは、ヘラクレス計画の上位組織(iSDT)として既に困難な状況と判断した。ただし SWG が与えられた時間的制約はかなり厳しく、その中で適切な検討が行われているという認識も持った。

そこでスケジュールに配慮しつつ、有用な要素と国内における対応について重点的に議論を行い、①国際ミッションとして必要になる点と、②我が国として将来的に重要である点と考える点について、提言することとした。また新たな項目として、月利用に資する新しい科学／工学の検討を推奨することとした。

その一方でタスクフォースは、背景となる探査の歴史や国際状況、さらに世界的な月科学の動向や月探査の方向性、重要項目などは前提条件として整理しており、これも提言に添えることとした。

1.4 月表層探査の歴史

過去の月の探査は3段階のステップを踏んで進んだ。第一段階は、1969年から1972年までのアポロ11-17号による有人探査である。この探査で382kgの月岩石が採取され、高地が斜長岩、海が玄武岩と判明するなど月の構成岩石の理解が一気に進んだ(Ringwood, 1970)。

ここで見つかった厚い斜長岩地殻は、マグマオーシャンモデルで説明された。含有するチタンの量が大きく異なる玄武岩グループや、カリウム、リン、希土類元素に富む岩石(KREEP と呼ばれる)の存在も判明した(Wakita and Schmitt, 1970)。リターンサンプルの年代測定により、クレータによる相対地質年代区分に絶対年代が対応付けられ、惑星年代学の基礎となった(Shoemaker.E.M. et al., 1970)。

次の段階は1990年代のリモートセンシング探査の時代である。1994年打ち上げのクレメンタイン探査機の可視・近赤外カメラによりほぼ全球が撮像され、アポロ試料との比較から、FeO、TiO₂ 全球分布マップが作られた(Lucey et al., 1995)。レーザー高度計による標高マップも完成した(Smith et al., 1997)。さらに1998年打ち上げのルナプロスペクタはウランやトリウムの分布を明らかにし、極域に水素（水かもしれない）をとらえた(Feldman et al., 1999; Lawrence et al., 2006)。

こうして月の地質地域はおおまかにPKT（嵐の大洋 KREEP 地域）、FHT（長石質高地地域）、SPA（南極エイトケン盆地地域）に三分されるようになった（図1-1）。SPA は熱源物質の濃度が低く、

¹ 日本地球惑星科学連合の全セクション（宇宙惑星科学、大気水圏科学、地球人間圏科学、固体地球科学、地球生命科学）、惑星科学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、火山学会、地質学

会、地球化学会、鉱物科学会、土木学会、日本応用地質学会、地盤工学会、資源地質学会、岩の力学連合会に対してRFIを行った

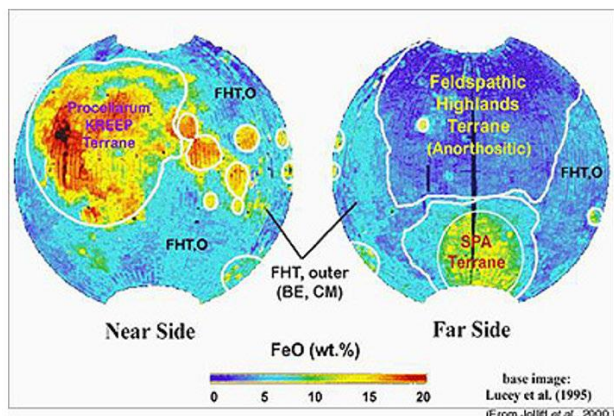


図1-1. 月の三大地質地域(ベースはクレメンタインのFeO分布図)

PKT と SPA の地域差はマントル深部にまで及ぶことが示唆されている (Jolliff et al., 2000; Lucey et al., 1995)。

その後「かぐや (2007 年打ち上げ)」による鉱物マッピングや、GRAIL (2011 年打ち上げ) による重力異常分布図などの全球データが獲得され、月の地質の多様性が裏付けられた。さらに LRO (2009 年打ち上げ) の高分解能カメラでは、月面の小地形や岩石分布すら判別できる解像度で現在も撮像が続けられている。

1.5 整えられつつあるリモセンデータ

これらの探査により得られたデータは、整備され広く一般に公開されつつある。

(1) クレメンタイン探査の時に Lucey らによって発明された FeO、TiO₂ マップ作製手法は改良されながらも今も最も着陸地点評価によく使われている (Lucey et al., 1995; 図 1-1)。可視近赤外反射率データを使うことから高空間解像度のデータが得られることと、宇宙風化の効果と化学組成の違いとをうまく分離する手法なので、地質区分との親和性が高く、宇宙風化度も評価できる便利なデータである。元々クレメンタイン UVVIS カメラ用の手法であったが、現在ではもっと高解像度の「かぐや」のマルチバンドイメージャー (MI) のデータを元データとして使う場合が多い。また、「かぐや」の MI データは可視近赤外反射率を使った応用マップにもよく使われている (例えば Ohtake et al., 2012; 図 1-2)。

(2) 可視近赤外光データとしては、近年、チャンドラヤーン 1 号に搭載された M3 (エムキューブ) のデータも使われ始めた。運用温度が予定より高温となったために大変ノイズで、補正に注意が必要であるが、短波赤外領域のデータがあ

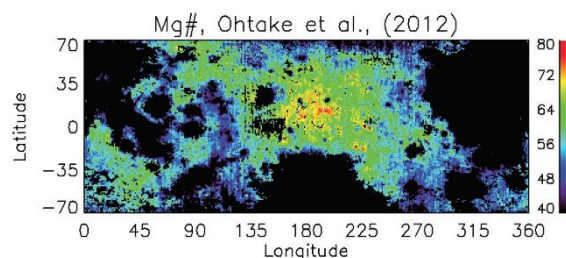


図1-2. MIデータからMg#(=Mg/(Mg+Fe))分布図を作った例。月の表と裏の高地地殻の組成の差を示唆している。Ohtake et al. (2012)

るため、水の検出の研究に活用され始めている²。また「かぐや」のスペクトルプロファイラーを使って山本らによってシリーズとして発表されている各鉱物種の分布マップ (例えば Yamamoto et al., 2010; 図 1-3) は、国内外の着陸地点評価に使われている。

- (3) 地形を調べるレーザー高度計は、様々な月探査機に搭載されている。最初の全球地形データとしてはクレメンタインのものが有名だが、近年では「かぐや」のデータがよく使われている。地形特徴を調べるためだけでなく、着陸探査中の日陰領域の遷移を調べるためにも使われる。面白い活用例としては、国土地理院が赤色立体地図化した月地形図を公開している (<http://gisstar.gsi.go.jp/selene/index-J.html>)。また、高空間解像度のデータが必要な場合は、立体視画像からつくられた地形図を使う。LRO の WAC や、「かぐや」の地形カメラ (TC) を処理したデータなどが使われている。
- (4) 地下構造を推定するためには GRAIL の重力異常分布図が最高精度データとして活用されている。「かぐや」の重力異常分布図は GRAIL によって高精度に上書きされた。さらに地下構造を推定するためのデータとしては、U や Th などの放射性元素の地表分布データが重要である。放射性元素は、マグマが固結する際に液相に濃集する元素であるために、地下の物質

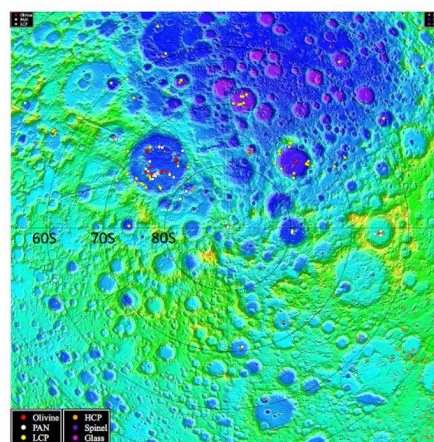


図1-3.山本聡氏の一連の研究成果をコンパイルした南極域の鉱物農集地点プロット

² ただし可視近赤外反射率データ全般に言えることであるが、光源の位置による反射率の補正が必須であり、高緯度のデータでは補正うまく機能していない疑いがあるので、高緯度のみに特殊な分布があるような結果は慎重にとらえる必要がある。ま

た、比較に標準的に使われているブラウン大学の分光反射率実験室 (RELAB) の鉱物スペクトルデータベースは基本的に室温で測定されたものであるため、高温や低温の観測データと比較する際は、注意が必要である。

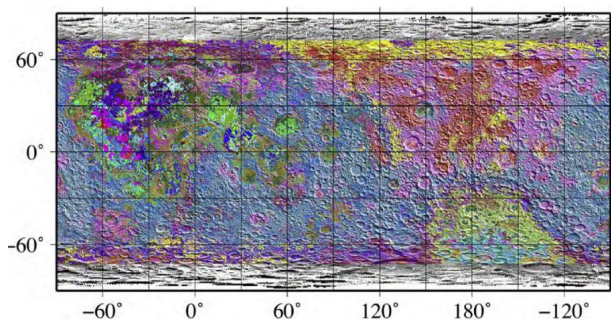


図1-4.主として「かぐや」のSPデータからスペクトル特徴を分類して作成した一種の地質図

移動を示唆することと、放射性元素は熱源となる元素でもあるので、天体分化を駆動する熱源の空間分布を知るという意味でも重要である。これら放射性元素分布の元データとしてはルナプロスペクタのデータが良く使われているが、「かぐや」のガンマ線分光計のデータの活用も期待される。

- (5) 表面状態を知るには、LRO の高空間解像度の画像データが活用される。カバー領域が限られてはいるが、最高空間解像度 50cm/画素の月面写真が得られるので、着陸地点の岩石分布や詳細地形の調査に有用である。すでに着陸探査が行われた場所であれば、着陸探査（サーベイヤー、アポロ、最近では嫦娥のデータなど）のデータがはるかに高解像度な画像として活用できる。
- (6) 月面の地質図としては、地上望遠鏡観測による色の違いに着目したものや、その手法を裏側へ拡張したものが古くからあったが、近年では、可視近赤外全球データが充実しているので、新しい時代の地質図が期待される。そのような試みで最新のものが、(Hareyama et al., 2019) による月面地質図(図 1-4)である。
- (7) 月のプラズマ・電磁場環境は SELENE によって初めて総合的な観測がおこなわれた。プラズマ観測器 PACE のデータはプラズマと月面の相互作用の解析に広く用いられている。また、PACE のイオン質量分析データによって月の外圏の生成メカニズムに制約が与えられた。SELENE の LMAG データおよび Lunar Prospector の MAG データを用いて月磁気異常の高精度マップが作られ、月面の磁場モデルとして標準的に利用されている。このマップから、過去における月ダイナモ活動を示唆する結果が得られている。SELENE の LRS スペクトルデータおよび波形データは、プラズマ波動の診断に用いられている。また、LRS のサウンダー

のデータは月面の電気伝導度の推定などに用いられているほか、地下構造の推定に使用されている。

1.6 諸外国による月探査の動向

米国では 2004 年より NASA のサポートにて Lunar Exploration Analysis Group (LEAG) が組織され、将来の月探査および月の利用が検討されている。2007 年に National Research Council により米国が進める月探査の方針が示されたことをうけ、2018 年の報告書で科学探査目標が示された。なおこれらの科学目標はヘラクレス計画で提案されているどの科学目標とも相反しない。

LEAG の提示した深宇宙探査における月探査・利用のロードマップでは、探査目標を科学目的のもの、将来の火星などの深宇宙探査に向けたもの、有人の持続的な滞在に向けたものにわけて設定し、月の商用利用、国際協力の重要性も示した。米国政府はこれを受け、月探査への民間参入を要請しており、月ミッションにスピード感が生まれつつある。NASA のディスカバリー計画の AO (2019 年 2 月予定) にも、月探査が提案されるだろう。

ESA の近年の基本活動方針はコズミックビジョン 2015-2025 というプログラムにまとめられている。月に関連するミッションは、LunarEx - A Lunar Penetrator Mission と呼ばれるペネトレータで月の科学と宇宙生物学を目指したミッションに限られる。つまり深宇宙ゲートウェイのコンセプトが出てくるまで、ESA の月に関する関心はあまり高くなかったが、今後この状況は大きく変わっていくだろう。

中国は 2018 年に月裏側着陸用のリレー衛星を打ち上げ、2019 年には月の裏側への着陸（嫦娥 4 号）を成功した。嫦娥 4 号にはヨーロッパから提供された機器が搭載されており、今後ともヨーロッパとの結びつきを深め探査に臨んでいく可能性がある。

米国、ロシアの月着陸実施実績はすでに 50 年近くも前のものになっており、実際に月への着陸技術としては、中国のみが持っているともいえる情勢が生まれている。中国は更に 2019 年に月表側からの試料回収を企画しており、中国の月探査、月開発における地位は、一歩抜け出したものになる。ロシアは、2020 年代前半から立て続けに月探査を計画している。インドも、2019 年には着陸を予定し、その後日本への着陸機提供も目指している。

現在のところ判明している近い将来の月探査は、主に氷探査³、火山地域探査⁴、南極エイトケン盆地探査⁵、に大別される。どれもアポロ計画未踏の地質地域である⁶。一番乗りが強調されがちである

³ 日本とインドが共同で着陸探査を計画(2023 年予定)している他、ロシアや中国も着陸やサンプルリターンを計画している。

⁴ 中国の嫦娥 5 号が嵐の大洋の北部のドーム地形（または周辺?）からのサンプルリターンを計画中。

⁵ 中国の嫦娥 4 号が 2019 年 1 月に着陸。

⁶ 裏側高地も重要な地質地域であるが、他地域に比べたやや地味な印象と高い着陸難易度のためか、現状では敬遠されている。しかし、各所の一番乗りが落ち着いたあたりで当然着目されるべき地域である。クレータ中央丘探査も重要で、日本の初期の着陸探査計画(SELENE-B)では着陸候補地点であった。ただしロ

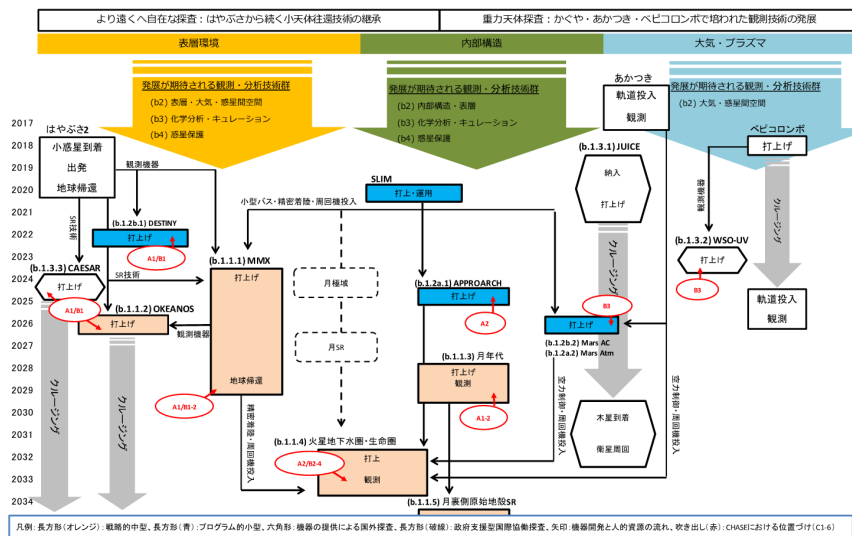


図1-5. 日本惑星科学会が提案する惑星探査のロードマップ

表 1-1. 惑星科学／太陽系科学研究領域の目標・戦略・工程表（2017年版）における探査の科学目標

A. 「生命生存可能環境の普遍性」	
A1.	惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給：月、小惑星、彗星
A2.	惑星・衛星の形成・初期分化：月、水星、火星、分化小惑星（ベスタ、E型小惑星など）
B. 「生命生存可能環境の多様性」	
B1.	生命前駆物質の形成・進化：彗星、原始的小惑星、惑星間塵
B2.	地下熱水環境：鉱物一水一有機物反応系：火星、氷衛星、原始的小惑星
B3.	大気（海洋）散逸・光化学反応：火星、金星、タイタン、系外惑星（大気）
B4.	生命およびその痕跡：火星、氷衛星、タイタン

が、どの地域も地域内での多様性は存在するので、一度の探査で解明ができる範囲に制限がある点は留意する必要がある。

1.7 ヘラクレス計画現状の整理

以上の月に関する知見を踏まえ、ヘラクレス計画の検討が進められている。この計画はヨーロッパ宇宙機関(ESA)主導の元、カナダ宇宙庁(CSA)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の3機関共同で月からサンプルリターンを行うもので、2026年の打ち上げを目指している。現時点では不確定な部分も多いが、本タスクフォースの検討時に与えられた情報は、おおよそ以下の通りである。

打ち上げはESAのArian-6で行い、重量約10.5tを想定している。開発は着陸機(wet質量6800kg)をJAXA、離陸機(wet質量1200kg)をESA、ローバ(質量500kgもしくは330kgクラス)をCSAが担当する。Gatewayからの有人支援を運用の前提としており、サンプル輸送も一旦Gatewayへ輸送後、有人で地球帰還を想定している。

ローバ走行距離は35km以内、走行許容傾斜角15°許容高低差は30cm程度である。6地点での試料採取および3地点でのその場観測を予定し、採取する月面試料の総重量は15kg(コンテナを含めて22kg)とされる。ローバの月面での活動期間は70地球日で、越夜するが、500kgローバの場合は

RTG(放射性同位体熱電気転換器)、330kgローバの場合はRHU(放射性同位体ヒーターユニット)を利用する。搭載予定の測器(アーム、ツール、観測機器、サンプルコンテナ)を合わせると120kgで、ローバは地球からオペレーションを行う。ローバは試料採取後に着陸機へ戻り、採取試料を離陸機に収容する。その後ローバは長距離の走行による観測を行う。離陸機はGatewayへ試料を輸送する。着陸機には電源が搭載されないため、離陸機の後分離後は電源を喪失する。

着陸地点の選定は、2019年春には科学面から複数の候補地点の提言がiSDTにてまとめられ、2020年中旬頃に工学的観点も考慮し最終決定される。着陸地点の選定においては、軌道からの制約はほぼ無い。最終的な着陸地点の選定においては、安全であり将来の有人探査が行われる候補地点(SPAなど)の近くとなる可能性も高い。

1.8 日本の各種工程表との関連

このように月および宇宙探査に関する情勢は刻々と変化しているが、日本の関係各所ではその変化に応じた各種工程表を作成するなどの対応をしている。

JAXAは小型月着陸実証SLIMを足がかりに、月移動体探査SELENE-R⁷、月広域・回収探査(HERACLES)、そしてその先に月本格的探査・利

一バの不整地走行性能の問題や2km級の山岳の近くに着陸せねばならないという着陸難易度の問題もあり、欧米では着目度がやや低い。その他の月面の特殊なローカル地質の地域は、大きな地質ブロックの探査が進んだ後に計画されてくるはずであるが、現時点では優先順位が低いようだ。

⁷ SELENE-Rについては、場合によっては、後発探査となる故に、より日照率が高く、着陸に安全で、更に通信視野がよいような場所の可能性が少なくなる可能性がある。水の有無の調査については、アメリカ民間、ロシア、中国、インドの各国が先行する可能性がある。先に他国が資源としうる十分な水を見つけた場

合、探査場所について、計画変更を検討することになる可能性がある。一方、先行ミッションが十分な水を見つけられずとも、水が無いということの証明になるとは言いがたく、SELENE-Rのミッション(水発見調査)については影響を受けないと言うことは可能であろう。現在、SELENE-Rの着陸についてはインドが請け負うことになっているが、インドは、その実証を2019年に企画している。インドの着陸実証の成否は、SELENE-Rの実施、あるいはスケジュールに少なからず影響を与えると考えられる。

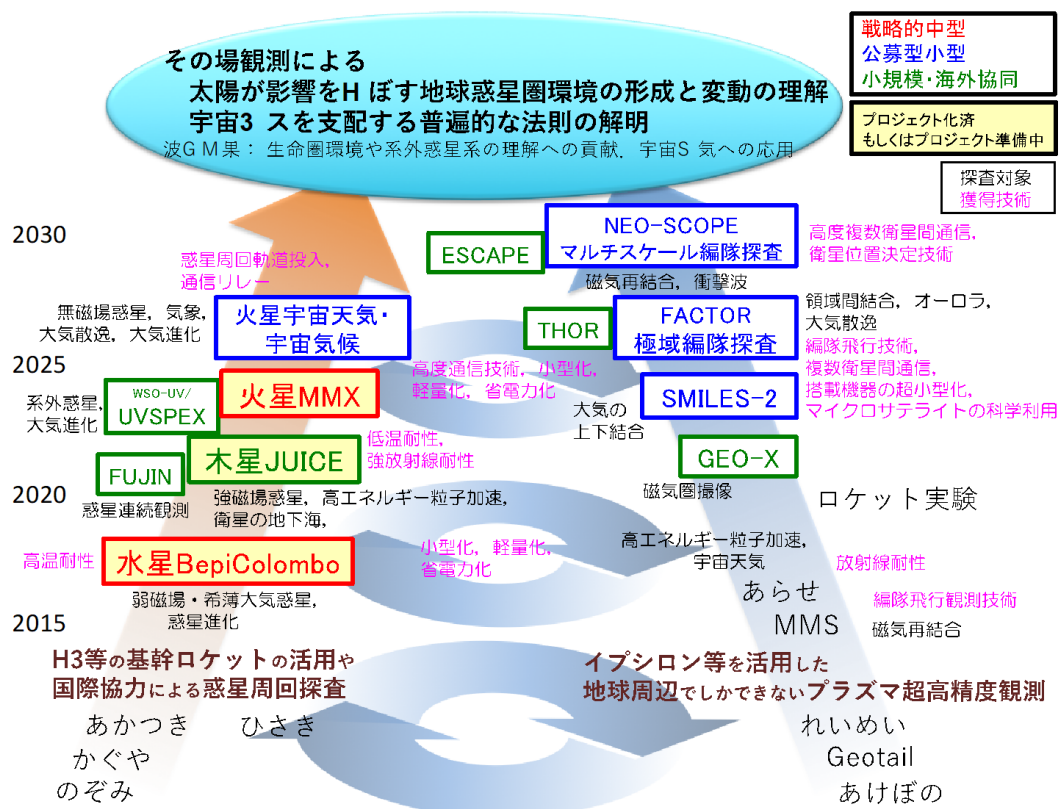


図1-6.太陽地球惑星系科学分野（STP分野）が提案する地球・惑星探査のロードマップ

用を目指すロードマップを引きつつある。JAXA の有人宇宙探査シナリオでは、1) SELENE の観測成果を基に、国際共同で月南極域の水氷探査を行い、2) 米国の「月近傍拠点」計画に参画し、深宇宙での有人宇宙飛行機会を獲得する。その後 3) 2025 年ごろから準備が始まる国際協働での有人月面探査にキー技術で参画し、日本人宇宙飛行士の月面到達権利を得て、4) 国際協働で、月何極域に推薬生成プラントや再使用型着陸船を構築し、5) グローバルな月資源・化学探査を実施するとしている。ヘラクレス計画は、これらの目標に資する計画といえる⁸。

関連学会の活動における月探査の位置づけは次のようになっている。惑星科学会のロードマップ(2017 年度、図 1-5、表 1-1)⁹は月探査を、初期太陽系における惑星移動や物質輸送、スノーライン以遠から内側太陽系への揮発性成分の持ち込み、

ジャイアント・インパクトを伴う地球型惑星形成の理解という意味で重要と位置付けた。地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) の太陽地球惑星系科学分野 (STP 分野) のロードマップ(2017 年度版、図 1-6)¹⁰ でも、人類の活動領域を月以遠に拡大するにあたり、STP 分野が宇宙天気研究で培ってきた放射線・高エネルギー粒子・帯電などの宇宙環境の知見の活用と更なる発展という意味で重要と位置づけた。

一方、国際宇宙探査の一環として月極域探査が現在検討されており、極域での月の水資源調査が計画されている。ヘラクレス計画も含めた JAXA の国際宇宙探査計画を関連学会のロードマップに調和的に位置づけられるよう、科学目標や探査内容に関して引き続き関連学会と JAXA が協力して検討することが望ましい。

⁸ 水星探査計画ベピコロomboなどで培われた JAXA と ESA の協力関係を強化することが、ヘラクレス計画で可能になると考えられる。JAXA と ESA は全般に技術レベル、探査の実績など似た面を持ち、その協力関係においてはそれぞれが主体、従属的なポジションにならないことが期待できる。

ヘラクレス計画では、SLIM の「ピンポイント着陸のための画像航法システム」を採用するシナリオの可能性もあるが、SLIM の成否、他国探査で使用される予定の着陸方法の成否で変わる可能性もある。ヘラクレスは、サンプルの一時回収 Gateway に頼るため、Gateway 建設に大きく影響させられる。Gateway は 2022 年ごろから建設が始まるが、その進捗がヘラクレス計画の実施時期に直結する可能性が高い点には注意が必要である。

⁹ 今後 20 年程度の太陽系探査の目標を、太陽系における生命生存可能環境の形成と進化の探求とした。この達成に「A. 生命生存可能環境の普遍性」と「B. 生命生存可能環境の多様性」と

いう 2 つの課題を設定しているが、月は特に課題 A に適した探査対象である。

¹⁰ 特に「人類の宇宙進出を支える知識基盤を構築すること」という目的に資するとして、環境探査、資源探査、およびそれらの基礎となる科学探査の側面を有する。環境探査としては、地球周辺探査で培ってきた放射線・高エネルギー粒子・帯電環境などの「人類の宇宙進出を支える宇宙環境計測技術・知見」を、月着陸探査に展開すること、資源探査としては、月極域探査で獲得した月極域における水資源の濃集原理と濃集環境の理解を、中低緯度とその昼夜分布に拡大すること、科学探査としては、SELENE や Gateway などの月周回探査で獲得した太陽風と月の相互作用の大局的理解 (数 10 km ～ 数 1000 km スケールの理解) を、電子運動スケールを分解する局地的理解 (m ～ 数 km スケールの理解) へと発展させることが目的と位置づけられる。

2 月探査が注目される理由と ヘラクレス計画の関連

ヘラクレス計画は、有人月探査のプリカーサ、科学探査という2つの位置づけがある。それぞれの観点における優先順位や探査項目の差異はあるが、一方で観測装置や探査法には重複する部分が多い。そのためこの2つの目的を矛盾なく追及することが可能と考えられる。

2.1 月の地球惑星科学的位置づけ

人類は200機以上の探査機を70個以上の天体に送り込み探査を行っている。太陽系内の主だった天体の姿や構成物質の理解は進み、天体の起源・進化過程の概略は把握できたため、単純な観測機器でも探査機を飛ばしさえすれば大きな発見につながる、という時代は既に過ぎ去った。

そのため各国の宇宙機関は共同し、既存の探査データを精査し科学を最大化するよう戦略を練り、新技術に基づく高精度の科学測器を駆使した探査ミッションを時間と労力をかけ提案している。

こうした流れの中で月の科学的価値は次第に明

瞭化しており、特に地球では失われてしまった太陽系形成初期から現在に至るまでの貴重な情報が残っていると期待される点、地球と類似した分化天体という意味で条件の異なる端成分とみられる点などが重視されている。

2.1.1 月は貴重な情報源

月は地球と太陽系の形成と初期進化を読み解くロゼッタストーンである。地球が中心核とマントル、大気海洋に分化し、さらに生命が誕生したとされる45億年前から40億年前（冥王代）の情報は、その後のテクトニックな活動より今ではほとんど失われている¹¹。これに対して月は、早い

¹¹ 長年にわたる地震学的・地質学的手法による調査が明らかにしつつある地球内部の進化は、古典的な地球形成モデルとは相容れないものである。古典的モデルでは、地球は鉄とシリケートの混合物である微惑星が集積することで形成された。この集積に伴い解放される重力エネルギーは、地球内部に深いマグマ・オーシャンを形成し、コアとマントルに分離し、さらにマグマ・オーシャンにおける結晶分化のためマントルは化学成層し生命誕生の

舞台となった地球の大枠を形作ったとされる。この化学成層はそれに伴う密度コントラストが非常に大きいため、後のマントル対流で攪拌することは困難である。しかし今日の地球では沈み込んだスラブはCMBまで到達しており、また、太古代（40-25億年前）の大陸の地球化学的研究から、当時マントルは対流により強く攪拌されていたことが推測されている。この矛盾は、我々の地球形成過程から初期進化に至るまでの理解がどこかで本質的に

表2-1 地球型惑星の進化の系統性

	「見えている」 地殻の形成年代	火成活動のタイプ	テクトニクス
月	MO ca.4.5Ga 海の活動は後期 重爆撃期以降減衰	億年スケールで連 続的	膨張収縮
水星	二次的 ^{a,b} 、後期 重爆撃期以降減衰	北半球でLIP ^c ?	収縮
火星	二次的 ^{a,b} 、後期 重爆撃期以降減衰	LIP ^c ? ホットスポットetc	一部水平移動? (マリネリスの南)
金星	二次的 ^a 、最近 数億年も火山平 原を形成	LIP ^c ホットスポット etc.	一部水平移動 (Ishtar etc.)
地球	二次的 ^a 、現在 も活発	LIP ^c ホットスポット プレート関連	プレート・テ クトニクス ^d

^aマグマ・オーシャン(MO)固結後の火成活動による地殻という意味。
^bこれらの惑星ではそもそもマグマ・オーシャンがあったかどうか必ずしも自明のことではない。^c Large Igneous Provinceの略。洪水玄武岩などの大規模でパルス的な火成活動。^d原生代(25-5.4億年前)以降に誕生した大陸の構造は今日我々が見るプレート・テクトニクスによるものと同様であったが、それ以前に誕生した大陸の構造は、この時代のテクトニクスが今日のものと異質であったことを示唆している。しかし、それがどのようなものであったのかは、未だ明らかではない。

段階で内因的活動が沈静化したため、地球の形成過程と密接に関わっている形成過程からマグマ・オーシャンによる内部進化まで、地球では決して得られない時代の貴重な記録を今もとどめている。

さらに月は内部進化を考える上で不可欠な存在である。太陽系の地球型惑星の進化とその惑星のサイズとの間には、ある程度の系統性が見出されるが(表2-1参照)、特にマントル進化を支配する主要な素過程が惑星サイズに応じて系統的に変化する点は重要である。そのため月を起点として火星・金星と順に大きな惑星に探査の対象を広げることが、地球の深い理解をもたらすと期待される。

このように月は最小の地球型惑星として、「我々生命を育んだ地球とはどのようなものだったのか」という根源的な問いに答える上で特別な位置を占めている。

2.1.2 月の起源と進化の考え方

上の理由から、月の起源と進化は月科学における最重要項目である。月は巨大衝突で形成されたとする説が定着して久しいが(Canup, 2004)、実は90年代以降活発になった月のリモートセンシングの重要な成果と近年の太陽系形成論の発展により、最新の太陽系形成論の枠組みの中で根本的に再考する必要性が生じている。

高地地殻の存在は、高温のマグマ・オーシャンが形成初期のマントルの最上部に発達していたことを意味する。この高温マントルは巨大衝突説が示唆する月の「高温起源」と整合的であり、このことが、巨大衝突説が広く受け入れられる一つの根拠となっていた。

ところが、リモートセンシングによる詳細な重力探査によると、月は最初の数億年間熱膨張し、その後もそれほど顕著には熱収縮しなかったようだ。すると最上部マントルはマグマ・オーシャン期以降、一方的に冷えたことになり、マントル深部の温度は時代とともに上昇したことを、従って形成直後はそれほど高くなかったことを意味する(図2-1の矢印参照)。また海の活動は40-35億年前頃がピークで、それより前はそれほど活発ではなく、それ以降は一部を除き急速に衰えた。マントル進化の数値シミュレーションによると、こうした状況は初期のマントル深部はそれほど高温ではない場合に再現できることから、月の海の火山活動もやはり「低温起源」の熱史モデルを支持する(Solomon, 1977)。

このように、近年の探査結果は月の「低温起源」を指し示しており、従来の巨大衝突説とは矛盾している。しかし月に事実上コアがないことから、月が巨大衝突により地球から放出された岩石を主体として誕生したこと自体は揺るがないだろう。月の低温起源は、例えば太陽系形成理論で提唱される寡占成長モデルが主張するように、地球は複数回の巨大衝突により誕生し、各々の衝突で飛び散った破片が時間をかけて集積し月が誕生したとすると説明できる可能性がある(Kokubo and Ida, 2002)。月の表と裏の二分性も、この集積の際に膠着する物質の化学組成に地域差があったとすれば説明できる。いずれにせよ月の形成過程は地球のそれと密接に関わっており、その解明は太陽系形成過程の最終段階や地球の初期史に直接の制約を与える可能性がある。

2.1.3 月科学として取り組むべき優先的課題

こうした背景を考えると、現在の月科学として取り組むべき優先課題が見えてくる。以下、優先順位と関係なく課題を列挙する。

a) 月の内部進化の理解

分化天体の進化を知る上で、月は根源的な情報元となる。形成直後の内部の熱的・化学的狀態を推定する上での根拠となる観測を充実することが重要で、月の膨張・収縮テクトニクスや海の火成活動といった地質学的情報に加え、現在の月内部の温度分布(Khan et al., 2014; 図2-1参照)や地殻・マントルの構造を明らかにするための内部構造探査、特に多地点での同時地震観測と、熱流量観測、さらに海の岩石の放射年代測定、異なる年代における典型的な岩石の地球化学的情報をあわせて議論することが重要である。

b) マグマ・オーシャンと地殻構成物の多様性

月の地殻は、かつて想定されていたような、単純なマグマ・オーシャンの冷却・固化モデルでは説明しにくい、遥かに複雑な構造を持っていることが明らかになりつつある。この構造を調査しマグマ・オーシャンの歴史を解明するためには、高

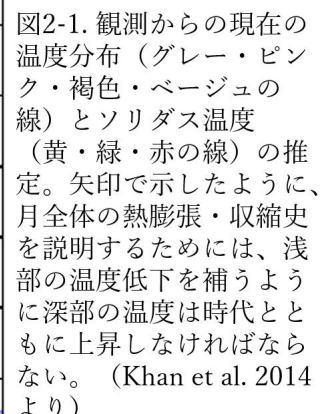
地殻の詳しい分析は、月のバルク組成を決定する上で必要である¹²⁾。月の主要元素である Mg, Si, Al, Ca の存在度のこれまでの見積もり値には、ファクター10程度の大きなばらつきがある。これらを正しく求めるには、地殻のバルク組成、マントルのバルク組成、金属鉄コアのサイズを決定する必要がある。特にマントルのバルク組成の推定が重要であり、このために月の表の玄武岩組成だけでなく、裏側の玄武岩組成を明らかにする必要がある。

上と関連するが、より詳細に火成活動史を読み解くことで、マグマ・オーシャン期の分化過程を解明することは重要である。詳細な放射年代測定に裏打ちされた高地地殻の地質調査は、特に重要度が高い。また複雑に重なり合う溶岩流や火砕物について、年代の異なる地域における岩石学的研究を行うこと、火山地域の地下構造の把握と詳細な火山地質調査による比較惑星火山学を進めることも意義深い。

d) 極域の調査と揮発性物質、月環境の理解

関連して、太陽風や太鼓の地球起源大気の影響や、地場情報の獲得、高エネルギー粒子の影響、電位やダスト帯電、ダスト浮遊、磁気異常や静電バリア形成過程などを素過程から読み解くことは、月のみならず電磁気圏の理解に重要な意義がある。

¹² 火星は原始惑星の生き残りと考えられている。一方、月を作った衝突天体も、1つの原始惑星と考えられる。地球は原始惑星がすでに複数あつたものであることから、個々の原始惑星の情報が混ざってしまっている。衝突天体、つまり原始惑星がど



一方で磁気異常では、太陽風プロトンの月面への降り込み空間非一様が生じる)。この太陽風降り込みの空間構造は、宇宙飛行士の滞在に適したドーム領域を提供するとともに、プロトン降り込みによる表層物質の風化や水酸基・水分子の生成に、 ~ 1 km 以下の幅の局所構造がつくられる可能性がある。

e) 太陽系内の衝突史をひも解く

火星や水星も含め、太陽系のクレータ年代学の基礎となっているのが、アポロ月サンプルに依存した月のクレータ頻度分布である。隕石衝突史として大きな不確定性の残る比較的若い溶岩流の年代決定は、年代学の高精度化に必須である。

のようなものであったのか（バルク組成は？）がわかれば、生き残りである火星（原始惑星）との比較を通して、太陽系で地球型惑星の元となる原始惑星の形成環境を解読することができるかもしれない。

サンプル分析によって決定することができれば、これまで議論されていた隕石衝突フラックスのピークがローカルな現象ではなく、グローバルな現象であるのかどうかに強い制約を与えることが可能となる。

f) 衝突、レゴリスプロセスの理解

固体天体表面に、ほぼ普遍的に存在する地殻構成物質の破砕物（レゴリス）の組成や形成史の把握は、表面の科学探査結果を適切に理解する上で不可欠である。またレゴリスの挙動は表面におけるいかなる無人・有人活動を行う上でも重要となる。

2.1.4 太陽系形成論と月・火星探査

月と火星、さらには小惑星や金星、地球の探査をプログラムの進めることは、太陽系科学における極めて重要な問題の本質的な理解につながると考えられる。以下では特に重要な太陽系形成論、天体進化論に関する展望を述べる。

月の内部探査から究明される形成直後の内部の熱・化学的狀態から地球の形成過程を制約するためには、背景として太陽系形成論の知識が必要である。太陽系形成の標準モデルでは、ダストから微惑星、さらに原始惑星が形成され惑星へと成長するとされる。しかしこのモデルでは、木星や土星のコアが成長するのに時間がかかりすぎて、円盤ガスが晴れてしまう前に巨大ガス惑星を形成できない点が、以前から問題とされていた。

この問題を克服するモデルとして、近年、ペブル集積モデルが注目を浴びている。このモデルでは、ダストの合体により 10cm~1m 程度まで成長したペブルが、円盤ガスの抵抗を受け太陽へ急速に落下する。その際、木星や土星のコアの種となる天体が、落下してくるペブルを効率よく集めることで、円盤ガスが散逸する前に急速に成長することができる。

このモデルは、伝統的な寡占成長モデル(微惑星集積により火星サイズの原始惑星が地球型惑星形成領域に 10~20 個形成され、それらが衝突合体し地球サイズにまで成長)と必ずしも一致しない。寡占モデルでは、必然的にジャイアント・インパクトが起こり、その過程で月が形成されると期待されるが、ペブル集積モデルに基づく月の起源については、改めて考える必要がある。逆に言えば月の形成過程と月の内部探査から究明される初期状態とを比較することで、太陽系形成過程が制約できると期待される。

太陽系形成過程は、月に加えて火星探査を行うことによりさらに制約される。太陽系形成の古典的標準モデルでは、惑星は全て微惑星の集積により形成されたものであるとされていた。しかし、このモデルに従うと、火星サイズ程度以下の惑星ではマグマ・オーシャンが発達したかどうか自明のことではなかった。さらに、微惑星の集積の際に解放される重力エネルギーは、原始惑星がある程度の大きさに成長するまでは、その内部を温めるのに十分な量に達しない。このため形成直後の惑星内部では中心部分にいわゆる”cold primordial”

と呼ばれる領域ができてしまい、たとえマントル上部にマグマオーシャンができたとしても、火星程度のサイズの惑星は「低温起源」になると期待される(Senshu et al., 2002)。しかし最初期の火星には、固有磁場と表面全体を覆う地殻を作った大規模な火成活動があった。これは、火星が「高温起源」であるとした方が理解しやすい。

このように、標準モデルでは、月とは逆の意味で火星の形成過程とその後の進化の理解の間に齟齬が生じている。寡占成長モデルやペブルモデル、さらには今後も提案されるであろう様々な惑星形成モデルによる初期状態と月や火星の観測データとの整合性を探求することでモデルの検証が進み、太陽系形成過程という大きな謎に迫れると期待される。

2.1.5 地球型惑星内部進化と月・火星探査

地球の内部は、その大きなサイズのため様々な素過程が絡み合って進化しており、その全貌を実証的に明らかにすることは困難を極める。月や火星のような小さく限られた素過程しか働かない惑星の内部進化をまず究明し、その延長線上で「生命を宿す」地球を理解することは、有力な研究戦略である。数値シミュレーションにより同定されたこれらの素過程のうち、特に重要なのは以下の 5 つである。

- (1) 火成活動による放射性元素の地殻への濃集：火成活動はマントルから放射性元素を奪い近くに濃集させるため、その惑星の火成活動やテクトニックな活動を減衰させる (Cassen et al., 1979)。
- (2) マントル対流の有無：マントル対流はある程度惑星が大きくなると十分発達しない。従って、マントル対流の一形態であるブルームによるホットスポット型の火成活動も小さな惑星では起こらない(Yanagisawa et al., 2016)。
- (3) 火成活動・マントル湧昇流(MMU)フィードバック：マントルにおける湧昇流は火成活動を引き起こす。惑星が十分大きい時、生成されたマグマの浮力は湧昇流自身を強化する。このフィードバックにより火成活動はパルス的かつ激しくなり、マントルは強く攪拌される(Hernlund et al., 2008; Ogawa, 2018)。
- (4) バースト：下部マントルを有する惑星では、強い内部加熱により活発な火成活動が起きている時、上部・下部マントル間の流れは脈動し、この脈動は MMU フィードバックの助けを借りてパルス的で激しい火成活動と強いマントルの攪拌を引き起こす(Fujita and Ogawa, 2009)。
- (5) プレート・テクトニクス

これらの素過程の組み合わせにより、表 2-1 に示した地球型惑星の特徴は以下のように理解される。(1) はすべての惑星で働く。これが月や火星のような地殻がマントルにリサイクルしない惑星では、惑星サイズによらず火成活動が最初の 10 億

年ほどで減衰する理由である。(2)のマンテル対流の有無は、ホットスポット型の山体を持つ火山が存在しない月と存在する火星・金星・地球を分けた。(3)は、火星・金星・地球で働き、これらの惑星でLIP活動を引き起こす。(4)は金星と地球で働きこれらの惑星で地殻をリサイクルさせる。さらに地球では(5)による地殻のリサイクルも顕著である。これが、地球や金星でその歴史を通じて現在まで活発な火成活動やテクトニックな活動が起こった理由である。さらに、(4)はマンテルが放射性元素を豊富に含む惑星史初期にのみ働くため、金星や地球の内部をバーストが支配する初期と沈静化する後期の二段階で進化させる(Ogawa, 2014; Ogawa and Yanagisawa, 2014; 表2-1)。

以上の予想を念頭に、地球の内部進化の理解を最終目的とする系統的な惑星探査を以下の方針で進めることを提案する。

- (A) (3)のMMUフィードバックは惑星サイズとともに強くなる。さらに、金星ではバーストも働く。このため月では、マグマ・オーシャンや海の火成活動のためマンテルが化学成層するが火星・金星と惑星サイズが大きくなるに従い、マンテルは均質化するはずである。この予想に基づき、月・火星のマンテルの地震探査をデザインする。
- (B) マンテル対流の強さは、内部の温度分布を見ることにより検証できる。このためには、月について図2-1に示した温度推定の精度では不十分であり、 ± 100 度程度の誤差まで観測を向上させる必要がある。温度の推定に大きく影響するのがマンテルの水の含有量である。このため、地殻を構成する岩石に含まれる深部起源の水の計量も、温度推定に重要な意味を持つ。
- (C) MMUフィードバックの有無は火成活動の時系列を決める。フィードバックの働かない月の海の火成活動は連続的なものに対し、火星の表面を覆う溶岩を生成した火成活動やその後の火成活動はパルス的なはずである。現在の不確定性の大きな火成活動の時系列の観測の精度をこの予想の検証を念頭に置き向上し、月や火星の地殻の構造発達史を解明する。
- (D) 金星の地殻は二段階で進化したはずである。放射年代測定により、バーストが重要な役割を果たしたと思われるテセラテンと、バーストが沈静化した後に形成されたと思われる火山平原の形成の時系列を明らかにする。

惑星のサイズを大きくするに従いマンテル・ダイナミクスの性質がどのように変化するかを実証的に解明することは、地球のマンテル進化を冥王代から現在まで一貫して理解するための鍵となる。月はその起点として重要な位置を占める。月は何も起こらない「退屈な天体」であるからこそ探査する意義がある。偶然にも我々の太陽系には、月と金星・地球の中継点として、素過程(1)-(3)

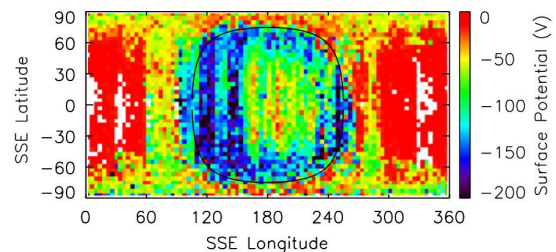


図2-2. Lunar Prospectorの電子計測による太陽風中での月面電位(周辺の宇宙空間に対する電位)の中央値(Halekas et al., 2011)。SSE座標の緯度・経度0度は太陽直下点に対応。太陽擾乱時には-4.5 kVに達する電位を計測(Halekas et al., 2007, 2009)。

は働くが(4)と(5)の働かない火星があり、このことがシステムティックな惑星進化の実証的研究を可能にしている。この幸運を利用しない手はないであろう。

2.2 月開発に向けた月科学・工学

莫大なコストがかかる宇宙探査は、予算と技術に優れた国家のみが実施する、という描像が急速に変わりつつある。月の裏側に初めて着陸に成功させたのは中国であるし、インドの月探査計画も進む。2018年には、ほぼ2週間に1回程度の打ち上げをSpaceX社が請負民間資本の活動は既に宇宙開発に不可欠なものとなったし、Astrobotic社やSpaceIL社、Blue Origin社、ispace社などが民間資本による具体的な月着陸計画を公表するなど、これまでと異なる形で月と係わる活動が活発化している。

民間資本による活動は、いかに経済的価値を生み出すかという目的を持ち、そのためにどのように月に機器を持ち込むか、資源を開発するか、エネルギーを獲得するか、といった点が重視される。科学探査は引き続き重要な位置づけにあると考えられるが、月面での活動において惑星科学的な視点での探査が主役では無くなる可能性もある。

2.2.1 月資源の可能性の調査

月は安定した軌道を持つ最も地球に近い固体天体であり、フィードストックとしての必要性は高い。特に宇宙空間で比較的豊富に存在している始原的隕石とは異なり、地殻濃集元素が高い濃集度で存在することが期待されるため、この形態や鉱物組成、分布を精密に調べることは、実利用を考える上で最も重要な位置づけにある。Al、Ti、その他親鉄元素、REE、白金族などはフィードストックとしての可能性について頻繁に議論されている。

揮発性物質は、ライフサポートや燃料、還元剤の獲得などの意味で重要である。極域における水素の濃集可能性が注目を集めており、今後は着陸探査で検討が進むと考えられる。太陽風のインプラントレーション起源や彗星起源などのシナリオ

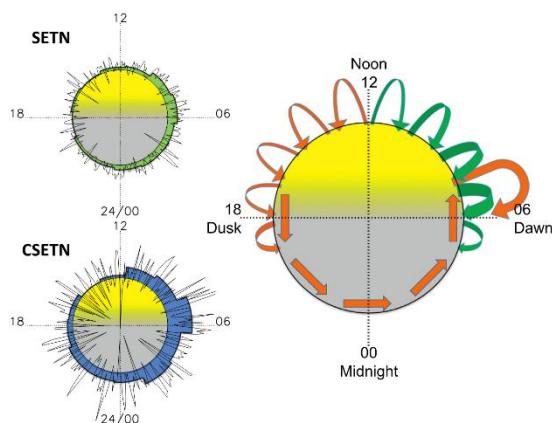


図2-3.月面における水の輸送・濃集原理
(Livengood et al., 2015)

を考えても、濃度が場所によって異なる可能性が高く、複数地点での観測が極めて重要となるだろう。

水素やその他の揮発性成分、有機物などはアポロサンプルでも検出されている。こうした揮発性成分を調べるには、10ppm レベルでの H の検出や、異なる場所でのサンプリングが望ましい。GRS, NS, GCMS での検出は重要な意味を持つ可能性はあるが、おそらくこれだけでは不正確で、サンプリング・地上分析が必要になるであろう。そもそも揮発性成分は安定的に解析することが困難であるため、サンプル法や保存技法の開発が必要となるが、将来有人での分析のターゲットとなるかもしれない。

2.2.2 月環境の把握

今後月面での活動が活発化することを見越すと、機器の最適設計や有人活動の安全性などの意味で月面環境の適切な把握が不可欠となる。たとえば中低緯度帯では日陰で数 100 ボルトに達し、太陽擾乱にตอบสนองして数 1000 ボルトまで変動する月面の負電位を持つことが知られている (Halekas et al., 2007; Halekas et al., 2009; Halekas et al., 2011; 図 2-2)。また月面は地球外の活動を考える上で、貴重な実験場という位置づけも持つ。

こうした理由から、月面の環境を精密に把握する必要性が生じる。温度や表面起伏、ボルダ存在率、放射線環境、表面の帯電状態、プラズマとの関連、太陽風の影響、微小隕石のフラックス、ダストの帯電や移動・付着の可能性、ダストのコヒージョン、放射線シールド性能などの調査は、異なる場所でひとつひとつ精密に実施することとなるだろう。

2.2.3 月面での活動に向けた準備

月面はレゴリスと呼ばれる岩石の破碎物で覆われており、その粒径や密度、鉱物組成、機械特性などは地域性も含めあまりよくわかっていない。ところが月面での移動や人工物の敷設、建築などインフラ整備、資源利用などを考えると、レゴリスの特性を理解することが必須となる。ほかにも表

面ダスト粒子の挙動や人工物への付着、掘削や土砂採取、人工物との相互作用やスラストによる巻き上げ、越夜の電力維持など、将来の月面での活動を考えると不可欠な情報・技術が数多く存在する。

2.2.4 科学探査との調和的な重複

月開発に向けた新しい月科学・工学は今後注目を集めると考えられるが、こうした分野の研究は従来の惑星科学的な探査と調和的に進めることができる。

たとえば月資源の可能性を把握するには、フィードストックとして期待される金属や地殻濃集元素や、燃料や還元剤としての揮発性成分について、それぞれの分布や濃集形態、濃集機構を調べるのが重要となる。これにはガンマ線や中性子線スペクトルメータなどによる元素マッピングよりも数段高い解像度で元素分布を把握する要があり、詳細な地質調査が鍵を握る。地質学的コンテキストの理解や複数地点におけるサンプリングなども不可欠となるが、これらは惑星科学的にも重要な要素である。というのも地殻構成物の多様性の把握や火成活動の詳細調査などで実施すべき探査手法・項目、ほぼ重複するからだ。

揮発性成分の資源利用には、その分布や地域性を把握し濃集機構を理解することが早道かもしれ

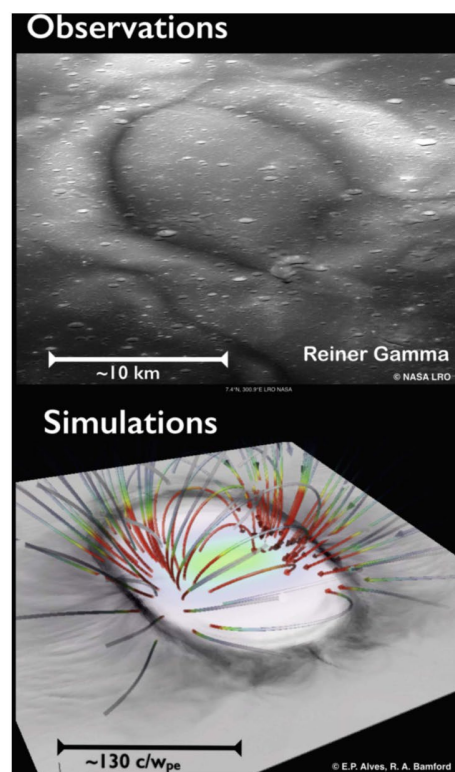


図2-4. (上) 磁気異常でみられるスワール（白色の模様）の Lunar Reconnaissance Orbiter による観測、(下) 磁気異常における太陽風相互作用の数値シミュレーション。下図の黒色部分はプロトン密度が高い領域を示す (Bamford et al., 2016)。

ない。たとえば月極域探査で獲得した月極域における水資源の濃集原理と濃集環境の理解を、ヘラクレス計画により中低緯度とその昼夜分布に拡大することで理解が深まるかもしれない。なお月面における水(氷)の濃集は、水関連分子の中低緯度から極への輸送、昼から夜への輸送により生じると予測されている(Livengood et al., 2015; 図 2-3)。中低緯度における水関連分子(太陽風起源、彗星や小惑星起源、内部起源)の供給・輸送の原理と環境を、明らかにすることは、科学的にも重要となる。

アポロサンプルは、サンプル取得法やその後のハンドリングが必ずしも万全でなく、既に消失した可能性が指摘されており、サンプルのハンドリングと適切なキュレーションを考慮することが重要となる。これは太陽風や地球起源イオンの月面表層へのインプランテーションを調べる科学的なニーズとも調和的である。プラズマ観測機を設置し、昼面および日陰境界における太陽風プロトンの観測を行うことや、磁気異常やクレータ周辺における太陽風相互作用の物理素過程の微細構造や太陽擾乱に対する応答、表層物質の宇宙風化過程の理解が重要となる(Bamford et al., 2016; 図 2-4)が、こうした観測はそのまま有人飛行に向けたプラズマ環境の把握につながる。

またレゴリスサイエンスを進めるには、着陸ミッションが必須となるし、ここで得られる粒径、密度、鉱物組成、機械特性、ダスト粒子挙動などはガーデニングの効果や宇宙風化を理解する上で不可欠な情報となる。

月面における将来の活動に資する研究を行う場合でも科学機器と同様に過去の実績(ヘリテージ)が重視されることになるはずだ。そのため、ある程度の基礎的な手段/手法の獲得はなるべく早いうちに実施することが望ましい。



Image Credit: USGS Astrogeology

3 サイエンス、観測機器、サンプリング 地点などに関する科学的助言

A) サイエンス、観測機器、サンプリング地点などに関する科学的助言

【提言 A-1】 試料採取の最適化とサンプル分析体制の充実を

月隕石と比した優位性の明確化が必要
サイエンスに応じた場所・試料選定の最適化が重要
サイエンス価値を最大にするサンプル量と試料採取法に
我が国のキュレーション施設の強化は国際競争力増大の基盤

【提言 A-2】 着地点選定／運用WSの開催を

国際協調であるがゆえの、適切な情報提供が必要
サンプル採取まで、マルチスケールの検討が必要
国内開催のWS/検討会を定期的に開催しコミュニティ拡大へ

【提言 A-3】 着陸機も含めた測器の公募と検討が必要

ローバ、着陸機への機器提供は、国際協調とすべき
具体的なアイディアは広く公募すべき
国内版の機器 RFI を至急実施すべき

月でサンプルを採取し地球で分析すること自体は、既にアメリカのアポロ計画やソ連のルナ計画で実施されている。さらに月隕石も数多く発見されていることから、過去のリターン試料や月隕石と比して優位性のあるサンプルの入手が、革新的な研究の展開に必須となる。学術的な意義を増大するには、強いサイエンスに裏付けされた探査戦略が必須である。

3.1 【提言】 試料採取の最適化とサンプル分析体制の充実を

3.1.1 月隕石と比した優位性の明確化

1960～70年代にアポロ・ルナ探査で獲得された月試料は総計約 400 キログラム近くある¹³。これに加えて 80 年代に月起源隕石が発見され、現在ではその総数はベアを考慮した上でも優に 100 個を超えた。そのバルク化学組成分布は月表面化学組成の分布と良い一致を示すことから、月表面全体からの広範なサンプリング試料に対応すると考えられる (図 3-1)。

月起源隕石の多くは強い衝撃変成作用を受けた痕跡を有するが、アポロ試料で示されたように、月の表面に存在する試料でもすでに衝撃を強く受けているものが多く、この点ではあまり月起源隕石との差異はないと言える。「宇宙風化」の発見に月のレゴリス試料が果たした役割は甚大であった (Keller and McKay, 1997) ことを顧みても、やはり大気の無い天体表層から直接採取したリターン試料の意義は大きいのだが、ただ漫然と表面物質をサンプルとして取得するだけでは、月起源隕石と比しての優位性が期待するほど高くない可能性がある点は留意が必要である。

したがって、月隕石が月表面での起源が正確に確定できない「転石」試料に相当するのに対し、リターン試料は地質学的なコンテキストを理解した上で採取できる点、さらに言えば、重要な地質構造の情報を保持した「露頭」試料が採取可能である点を強く意識したミッションを構築することが極めて重要となる。

太陽系物質科学研究のフロンティアは、確実に

¹³ この分析はマグマオーシャン説の提唱 (例えば Wood et al., 1970) など、惑星科学におけるパラダイムシフトをもたらした (マグマオーシャン説はその後、小惑星ベスタなどの分化天体に

対しても唱えられており (例えば Ikeda and Takeda, 1985)、惑星分化過程の最も主要な初期プロセスの一つと認識されている (例えば Schaefer and Elkins-Tanton, 2018)。

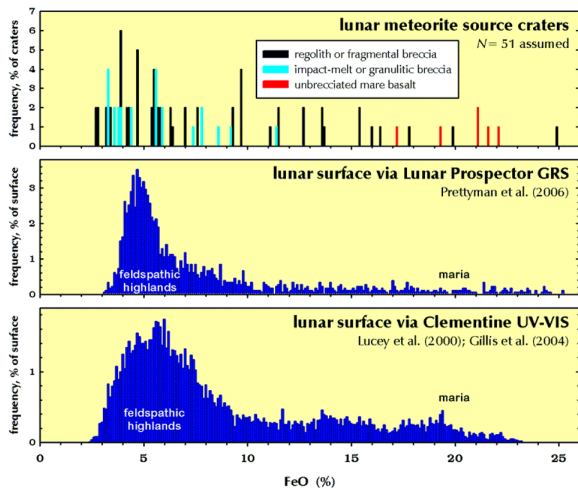


図3-1.月隕石と月探査によって得られた月表面のFeO量分布の比較図
(http://meteorites.wustl.edu/lunar/moon_meteorites.htm)。

サンプルリターンの時代へと移っている。その中で、ヘラクレス計画はその先鞭として、月の物質科学研究のみならず今後の分化天体探査におけるサンプルリターン計画のステップアップに貢献しうるミッションとしてデザインされるべきである。

3.1.2 サイエンスに応じたサンプリングサイト、試料の選定の最適化が必要

リターン試料を用いたサイエンスにおいて、隕石試料において考慮せざるを得ない月面からの放出時や地球環境への暴露などより生じる不確実性を極めて小さくできる点は極めて魅力的である。

ただし、月表層は激しい衝撃変成履歴を経ており、露頭試料であってもマクロ的には転石試料と変わらない可能性もあるため、周回探査機によるグローバルな視点とローバによるその場観察¹⁴の結果を合わせてリターン試料の採集場所を最終的に選定する必要がある。また具体的な獲得試料の決定には、目的に応じた適切な配慮が求められる。

例えば、月マグマの進化過程を追うためには、なるべく二次的な変成の影響が少ない試料をそのサンプリングサイトから選別することが重要となるのに対し、試料に残る水に注目する場合¹⁵には、逆に二次的な変成を受けた試料が望ましい場合があるであろう。むしろ、当初のサイエンスプラン

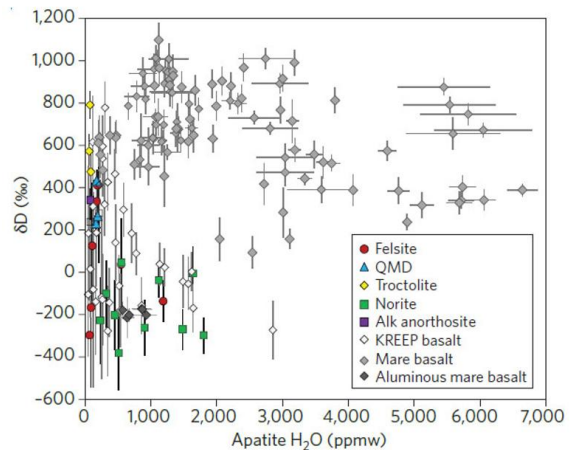


図3-2.各種月試料アパタイト中の含水量とその水素同位体組成 (Robinson and Taylor 2014)。海の玄武岩が他の試料よりも含水量が多い。水素同位体については大きな幅があり、どのような起源物質によるものか議論が続いている。

に沿った試料採取を目指すことが第一義的に重要であるが、個々のサンプリングサイトや採取可能試料の多様性に関する知識が不足している以上、サイエンスプランにその場観察の情報を柔軟に取り入れつつ落とし込めるような、臨機応変な計画立案が必要であることも考慮されたい。

同位体組成¹⁶は、各天体の試料分析・観測で得られつつあるデータとの比較の観点からも特に重要である。特に、地球と月の酸素同位体組成が極めて一致していることをジャイアント・インパクト説が容易には説明できない点は注意が必要である¹⁷。リターン試料に対して、最新の酸素同位体分析技術 (例えば Tanaka and Nakamura, 2017) を適用し、月形成論に対してより精密な制約条件を与えうる可能性は高い。しかし、全般的には、地球帰還後の揮発性物質のコンタミネーション (試料汚染) をいかにして最小化するかが鍵となる。その観点からも、揮発性成分の分析に関しては、その場分析 (とりわけ定量分析) を視野に入れたローバ搭載機器開発と関連して、将来の探査計画を踏まえた上で検討するべきである。

サンプルリターンの意義をより明確にするためには、Gateway 内や地球帰還後のコンタミネーションを、揮発性成分に限らず最小限に抑えることは重要である。サンプル採取においては多種の岩

¹⁴ 科学目標に対して適切な試料選択のためのその場観測が必要な情報、サンプリング方針を検討しておくことが重要である。

¹⁵ アポロ・ルナ探査の時代には、分析装置の精度の問題から月試料は完全にドライな岩石だと考えられていたが、近年の分析装置の発展により、水が月試料に含まれていることが明らかになった (例えば Saal et al. 2008; Anand et al. 2014; Robinson and Taylor, 2014; 図 3-2)。また月面に氷が存在する可能性も指摘されており、揮発性物質全般を含めて包括的に月の進化過程を解明する必要がある。

¹⁶ 月の水素同位体は、起源を地球の水の起源と合わせて議論できるよう配慮したサンプリングが望まれる。ほかの良い例は、タングステンの同位体組成である。月試料と地球マントル試料と

で有意に異なっていることが示されている (例えば Kruijer et al. 2015; Touboul et al. 2015; 図 3-3) が、これは元々が同じタングステン同位体組成であったが、地球は後から $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ の低いコンドライト質物質が付加したことから、地球へ “late veneer” が起こった証拠とされている。

¹⁷ 酸素同位体組成の一致は、(1)衝突天体の酸素同位体組成が地球と同じであった可能性、(2)月形成プロセスで月材料物質と地球物質がよく混合し、同位体的に均一化された可能性、(3)衝突条件を模索し、月材料物質が主に地球マントル起源となる可能性が議論されているが、月の起源に直結する新たな観測的制約条件を見出さないことには、月の起源について最終的な決着つけられない状態にある。

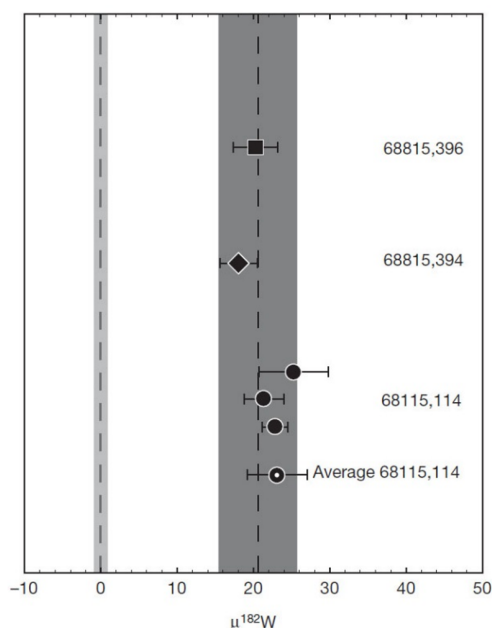


図3-3. 月試料と地球試料のW安定同位体比の比較。月試料の方が地球試料よりも $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ の値が約25 ppm高いことを示している (Touboul et al. 2015)。

石が混じらないようにサンプルごとに隔離すること、採取後は温度変化が生じないように保温すること、高密封状態で運搬を行うことが求められる。サンプリング機器からのコンタミネーションを完璧に防ぐ手立てはないが、将来のコンタミネーション評価に使えるようサンプリング・キュレーションに用いた用具と同じ原材料物質を保管するなど、評価可能な手段をあらかじめ想定することが望ましい。地球帰還後にはできるだけコンタミネーションが進行しないうちに分析を優先しておくなど、解析シーケンスの検討も必要である。但し、試料採取・運搬に際し必要以上に厳密な取り扱いをすべきではなく、実際にリターン試料の解析にあたる研究者とともに、サイエンス遂行に関して適切な（現実的な）閾値を設定する努力を継続する必要がある。

3.1.3 必要なサンプル量と試料採取方法、サイエンス価値の最適化の検討

1.5kg の試料を 10 地点から採取するという現状

¹⁸ 実際、はやぶさ 2 のキュレーションにおいては数 10mg の試料量で、70 元素の濃度分析と、Sr, Nd, Hf, Pb, Li, O 同位体組成の全岩分析を想定している。

¹⁹ 月の地殻形成に関するサイエンスにおいては、きちんとした地質構造体の調査を踏まえた解析を行わない限り、それが初成的な (LMO に対応する) PAN であるかを議論することは難しい。マントル物質に関しても、LMO で形成された地殻に対応する超塩基性岩である保証は無く、ある程度の系統的な試料採取を行わない限り、極めて不確定性の多いサイエンスになってしまう。アポロ 15 号が採取した斜長岩 (ジェネシスロック) も当初は初生的な地殻物質 (約 45 億年前に形成) であると考えられたが、帰還後の分析により地殻形成後 (約 40 億年前) に形成した岩石であることが明らかとなった (Stettler et al. 1973)。そもそも、マントル物質の詳細分析 (主構成相がオリビンであるならば、そこから得られる地球化学的情報 (微量元素、同位体) は限られたものにならざるを得ない) から、バルクシリケートムーン

の案は、ヘラクレスミッションで検討しているサイエンス計画と必ずしも調和的とは言えない。現状の分析化学において、岩石試料であれば 1g 程度の試料量があれば、ほぼ全ての元素の定量、地球化学上重要な同位体パラメータ、年代を決定することが可能である¹⁸。岩石の不均質性や岩石学的記載 (斑晶の種類やその構成量比、石基の状態、岩石全体および構成物質 (斑晶鉱物・石基鉱物・ガラス) の主要元素濃度等) を考慮しつつ、多様な試料形態 (構造情報の得られる岩片など) や、AO 分析、将来の解析に向けた保存を勘案しても、1.5kg/箇所 の試料量は、提案されているサイエンスと比してバランスに欠く印象を受ける。

岩石の化学組成の多様性や系統的変化の特徴が有効な制約条件となるような研究では、一個あたりの試料の重量を抑えてでも、多数の試料を採取した方が目的を達成しやすいことを考えると、むしろ (技術的、時間的制約を鑑みずに述べるならば) 例えば 500g x 30 試料など 1 地点の採取量を減らしてでもサンプル採取地点を増やすほうが、提案されているサイエンスの実現はより確実なものとなるのではないかと¹⁹。

また岩石試料については、塊状の溶岩試料だけでなく、目的に応じて火山碎屑物 (マグマの急冷発泡試料であるスコリアなど) の採取も検討すべきである (マグマの上昇・噴火時に抜けやすい揮発性成分の情報が、斑晶中のガラス包有物に保持されやすい)。

加えて、試料採取に際しては、その月表面上の位置だけでなく、深さ方向の情報を保持したサンプリング手法の検討も行うべきである。レゴリス層に覆われていないような斜面の露頭では、地層を上下方向に追跡することで、火成活動の変遷などを知ることができる。また月表層のレゴリス層についても、その形成プロセスとその後の月表層環境の時間発展情報を保持している可能性がある。レゴリス層の深さ方向の組成・同位体変動と、基準値としての絶対年代値の挿入によって、太陽系物質進化に関する情報のみならず、人類による将来の月利用に不可欠な、長期的な月面環境変動等に関する知見が深まると考えられる。

3.1.4 キュレーション施設と体制の充実国際競争

の組成を明らかにする、という提案は、複雑な火成作用の理解とその後の 2 次的な影響の除去、さらには月内部の物質科学的構造を踏まえなければ、制約条件を与えることは難しい。

若い玄武岩のサイエンスは、提案された中で得られる物質科学的情報と目的がマッチしていると思われる。しかしクレータ年代学の高精度化を目指すのであれば、より広範な (場所の異なる) 地点で採取された試料の年代測定が不可欠であり、ローバの活動範囲 (30 km) や採取試料数の制限から、空間スケールとのマッチング (成果最大なのか) に関する議論が不十分と思われる。また、クレータ年代学の高精度化であるならば、サンプルリターンによる限られた試料によって高精度年代測定を実施するよりも、たとえ年代測定誤差が大きくとも、K-Ar 同位体その場測定機器の開発を加速し、月面の広範囲にわたるその場年代測定の実施を将来検討する方が理にかなっている可能性もある。一方 K-Ar 年代は衝撃変成の影響を受けやすいため、衝撃変成度の評価は欠かせないだろう。

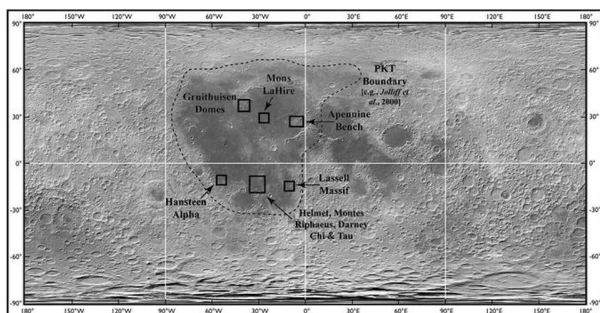


図3-4. 月のRed Spot。Whitaker (1972); Head and McCord (1978)

力増大の基盤となる

21 世紀に入り、地球惑星物質研究に必要となる分析化学（科学）的手法の開発とそれに用いる機器は長足の進歩を遂げた²⁰。月からのリターン試料解析には、一つの試料単位に複合的な手法を適用し、可能な限り包括的に物質科学的情報を抽出する戦略が重要である。さらに同位体や微量の元素に関する議論は、分析装置の精度が格段に上がったことで可能となった。同様に将来の技術革新で、より高精度な分析が可能となることは間違いない。この点を考慮した将来の科学研究に資する試料の保存・保管は極めて重要である。すなわち、実施すべきサイエンスと想定される試料の物理化学的な特性を踏まえた、回収試料のキュレーション、初期分析、公募分析に至る研究計画・デザイン²¹を、探査計画と並行して早急に進める必要がある。

とりわけ検討すべき点は、試料のキュレーションである。わが国では南極観測において採取された膨大な隕石試料のキュレーションを国立極地研究所が担い、宇宙物質の取り扱いの知見を蓄積している。一方、我が国のサンプルリターン試料のキュレーションは、現在 JAXA/ISAS において行われているが、その設備、実施体制に関する検討が必要である。ISAS におけるキュレーション設備、実施体制は、「はやぶさ」ミッションの実施を目的

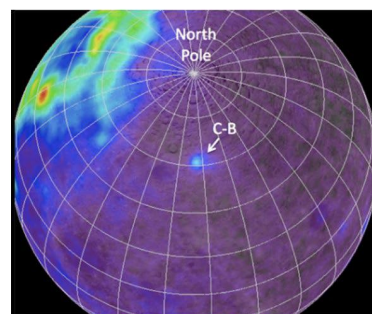


図3-5. 裏側のTh異常地域を示すTh濃度マップ (NASA/GSFC/ASU/WUSTL. Processing by B. Joliff)

として構築され、現在進行中の「はやぶさ 2」ミッションに対応できるよう改良を施している。しかしヘラクレス計画で想定している試料の量、形態、コンディションに適合したデザインで構築されていない。そのため、新たに設備、実施体制を構築する必要があるが、我が国のヘラクレス以降 (MMX のキュレーションとも関連) のサンプルリターンミッションも視野に入れた計画立案が必要である。キュレーション施設はリターン試料の受入だけでなく、初期記載の実施²²、試料の保管、公募研究等に用いる試料の提供の役割を担っており、一つのミッションのみを想定した設備・人的体制整備は無駄が多い。ヘラクレス計画の遂行を機に、知見・問題を整理してリターン試料キュレーションを我が国が主体的に実施することを明確にするならば、将来の太陽系物質科学研究において非常に重要な一歩となる。サイエンスのイニシアチブを明確にすると同時に、我が国としての恒久的なキュレーション体制の構築を目指すのであればヘラクレス計画の意義は非常に大きなものとなる。

3.2 【提言】情報提供を兼ねた着地点選定／運用ワークショップの継続的開催を

月の代表的な地質区分を見ても、現状ではごく一部しか着陸探査が実施されていない。裏側高地や南極エイトケン盆地などの大区分の地質地域探

²⁰ 誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) を用いた、ごく微量の無機元素濃度分析や同位体分析、電子線のみでなく、イオンビームやレーザー（光）を用いた局所分析技術、さらにはサブミクロンから原子レベルの物質の構造や化学的特徴の直接観察などがその好例である。また放射光やミュオン発生施設など大型の共同利用施設を用いた物質解析技術も日々新しい手法が開発されている。

²¹ 分析技術の発展は、サンプルリターンミッション等のフロンティア科学の実践に強くドライブされる。アポロミッションによってもたらされた月試料の解析によって電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) による元素濃度のその場分析など局所解析技術が飛躍的に発展したことはその好例である。今後 10 年を予測すると、分析内容や分析精度の飛躍的向上に関して目覚ましい進歩はそれほど期待できないかもしれないが、解析に必要な試料量の減少や分析時間の低減など大いに発展するであろう。したがって、様々な解析機器を用いた分析フローを構築することによって総合的な (Comprehensive) 物質科学的情報を得る手法がさらに重要になってくるのは間違いない。ヘラクレスミッションで

想定される試料は、火成岩とレゴリスであり、地球上の火山岩や深成岩、堆積岩の解析と本質的に差があるものではない。したがってより効率がよく確実な解析手法の確立にむけ、先端的な岩石学・地球化学的研究の手法を理解し、ミッションに反映させる必要がある。

²² 初期記載 (分析) については、現在進行中のはやぶさ 2 ミッションにおいては、ターゲットを絞って組織された研究者チームと、ISAS キュレーション施設と密接に連携し主体的に科学的成果の最大化を目指すフェーズ 2 キュレーション施設 (岡山大学惑星物質研究所、海洋研究開発機構高知コア研究所) を並列に行うこととなっているが、この体制作りはヘラクレスミッションにおいても参考になると考える。現状 ISAS (JAXA) には、実質的な物質科学研究を実施する環境 (施設・人的体制) が十分構築されているとは言えず、ヘラクレスミッションのミッションスケジュールを勘案した場合にそれが自動的に解消されるとは考えにくい。したがって、外部キュレーション施設 (前述の機関も含め) との連携をより強化し対応する必要があると考える。

する役目を負う。このような方法は、民主的で惑星科学のコミュニティの支持を得られやすく、多くの着陸点の可能性を探れるという利点がある。こうした着陸点選定の方法論がうまく確立できれば、火星など将来の着陸探査ミッションにおいても応用できる。

実際の運用時は、地球と月の距離が近いため地球の管制センターと宇宙機の通信はほぼリアルタイムで行えるが、それでも天体上でリモートでの地質調査やサンプル採集を行うのは容易ではないであろう。そのような運用に慣れておくため、地球上の植生の少ない砂漠や溶岩平原など、月の地表環境を想起させる場所でシミュレーションを行っておくべきであろう。その参考になる活動に NASA の Nomad Rover Field Experiment や Desert Research and Technology Studies (Desert RATS) などが挙げられる。

3.3 【提言】着陸機も含めた科学を早急に検討すべきである

人類が初めて月試料を手に入れたのが約 50 年前、その後もリモートセンシングが継続的に実施され、月の科学は「発見」の連続という段階ではない。そのため背景の明らかなサンプル取得は魅力的であり、ここに議論が集中することは当然である。しかし火星探査みたように、「地質学者の代わりとなる」ローバによる地質探査は、新たな視点を数多くもたらすだろう。ここでローバの能力に調和した空間スケールで実施可能なテーマを掘り下げることが重要である

この際、着陸機やローバに搭載される観測機器の開発も重要なポイントである。現状では主に国際チームとしてローバの科学機器の検討が行われているが、着陸機は現状で科学測器の搭載を想定していない。しかしたとえば日本が得意とする地震による内部構造探査は、将来の物質科学探査の上でも極めて重要であるが、着陸機への搭載が望ましい機器である。ところが現状ではアセンダが無くなると着陸機は電源が確保できない。電池を搭載の有無も含め、行える科学の検討を進める必要がある。

このような搭載機器はミッションが決まってから開発するのでは時間的に間に合わないこともあり、結局外国の機器が優先されることになるかもしれない。国際協力の観点から良い側面もあるが、やはり国内で独自に搭載機器を開発しているチームが実力と経験を積める方が、将来得られるサイエンスに対する貢献や機会の喪失を防ぐ意味で重要である。このため J A X A は助成を通じて早めに搭載機器開発を促すべきである。なお ESA は既にヘラクレスに関連した形で搭載機器の RFI を出している。JAXA も同様にヘラクレスの搭載機器等の RFI を出すことを要請したい。

民間による着陸実証の成功、水等の資源探査の成功があった場合は、民間着陸機・移動体への、科学機器のより安価な搭載機会が飛躍的に増大する可能性があるかもしれない。その際にも科学測

器や付加情報の提供などを通じて JAXA がプレゼンスを示しつつ関わる形もあるだろう。

4 ヘラクレス計画に関わる 先導する工学・確立すべき技術の提言

B) ヘラクレス計画にかかわる先導する工学・確立すべき技術の提言

【提言 B-1】技術実証ミッションの目的の精査が必要

共同ミッションとしてのミッション目的（HERACLES ORD）の精査
我が国としてのミッション目的の精査・設定

【提言 B-2】我が国として獲得を目指すべき技術を明瞭化すべき

有人着陸機技術
月面探査技術
離陸技術

【提言 B-3】現状のベースラインの改善

離着陸機離脱後の着陸機運用と着陸機への通信系・電源系搭載
小型の離陸・直接帰還機の搭載
新規技術の開発リスクへの対応

TF 会合で提示された資料²⁶に記載されている情報を元に、HERACLES で実施する技術実証について、工学的な観点から評価を実施した。これに基づき、技術実証ミッションの目的の精査を提言するとともに、HERACLES において獲得を目指すべき技術、現状のベースライン（シナリオ、システム）の改善、についても提言する。

4.1 【提言】技術実証ミッションの目的の精査

月表面からのサンプルリターンは、既に米露により実施され、近い将来、中国も実施する計画である。後発の我々としては、「実施することに意義がある」ミッションではなく、ミッションの意義・価値・目的を精査して計画を設定する必要がある。[資料 3]の 1.5 項では、HERACLES の目標として”Prepare human lunar surface exploration”, “Gain science and exploration knowledge about the Moon”, “Create opportunities to demonstrate and test technological and operational capabilities for future

Mars exploration missions”の 3 点が挙げられているが、技術実証ミッションとしての HERACLES において日本が重視すべきは第 1 点（有人月面探査の準備）である。日本が構想する有人月面探査において、必要となる技術、およびその開発のために必要な環境情報を整理した上で、技術についてはその検証（verification）、有効性確認（validation）、実演（demonstration）を、また環境情報についてはその取得を、その優先度にしたがって HERACLES のミッション定義に埋め込むことが重要である。

[資料 3]の 2 項では、HERACLES のミッション目的を「有人月探査の準備」「科学・探査の知識獲得」「サンプルリターン」に区分して整理している。表 2-1 には、これらミッション目的を示すとともに、TF 工学メンバの視点からの技術実証の必要性の評価、および現計画における日本の分担を記載した。日本として必要と考えられる技術獲得と、現計画での日本の分担の間にギャップがあることが推察される。以上の観点から、以下の 2 点を提言する。

²⁶ [資料 1] 森戸俊樹「有人月面探査実証ミッション（HERACLES）の概要（2018 年 12 月 4 日）」[資料 2] 「国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会メモ」および、後日、HERACLES 検討チームから提示された以下の資料、[資料 3]

HERACLES Architecture Working Group, "Human-Enhanced Robotic Architecture and Capability for Lunar Exploration and Science (HERACLES) Objectives and Requirements Document (ORD)", ESA-E3P-HERA-RS-004, August 2018.

ついて、将来の往還ミッション（無人・有人）に向けた必要課題（技術ギャップ）を整理し、本ミッションの中で獲得できる技術がないかを検討すべきである。

4.3 【提言】現状のベースラインの改善

ミッション・シナリオや着陸機システム設計は、精査後にミッション目的に合わせて再設定される可能性はあるが、[資料 1]に示されている現状のベースライン（シナリオ、システム）に対する改善提案として以下の 3 点を抽出した。

4.3.1 離陸機離脱後の着陸機運用と着陸機への通信系・電源系搭載

現状の着陸機には、対ローバ、対ゲートウェイ、対地上の通信系、および電源系が搭載されていないため、離陸機が離脱した後は、着陸機の運用を停止することになる。電源系・通信系を搭載することによる着陸機の運用拡張について、その得失を整理し、要否を評価すべきである。とくに通信系を搭載しないことにより、着陸技術の実証データ取得パスを他国に委ねている状態になっており、運用自由度やリスクの観点から問題がないかを精査すべきである。

4.3.2 小型の離陸・直接帰還機の搭載

何らかの形で、日本が担当する範囲において「月表面への往還」を果たすことは、将来の重力天体からのサンプルリターンミッションや、独自の有人月探査に向けての重要な技術ステップになるし、国際的なアピール度も高い。現状、想定されている深宇宙ゲートウェイに至る離陸機（ESA 担当）に加えて、地球に直接帰還する小型の離陸・帰還機を追加し、日本が担当することを検討すべきである。

4.3.3 新規技術の開発リスクへの対応

着陸機のシステム設計は、精査後のミッション目的も踏まえ、今後、検討が進められていくと考える。とくに新規性が高い重要要素技術（LNG エンジン等）を採用候補とする場合には、その開発難航がミッション全体への重要リスクとならないよう、初期の検討フェーズにおいては、複数の設計案を並置して検討を進めるべきである。

表4-1 HERACLESのミッション目的と技術実証の観点からの評価

ミッション目的		技術実証の必要性 (*1)	日本の分担(*2)
Human Lunar Exploration Preparation Objectives			
HLE-1	Implement or demonstrate crewed flight technology elements for human lunar missions.	◎	△
HLE-2	Demonstrate safe vehicle operations in environmental conditions replicating the human mission scenario.	◎	○
HLE-3	Demonstrate human-controlled mobility (>3.6 km/h) on the lunar surface.	○	—
HLE-5	Demonstrate the capability to execute coordinated and distributed operations of human-robotic systems.	◎	△
HLE-6	Advance the characterisation of potential resources on the lunar surface.	○	—
HLE-7	Assess the feasibility of an operational exploitation of lunar surface resources.	○	—
HLE-8	Characterize the lunar surface environment at different surface locations to help assessing the suitability of these sites for human exploration, and to advance the process of closing strategic knowledge gaps (dust properties, operational constraints from terrain).	○	—
HLE-9	Advance understanding of environmental factors affecting human health and operations (e.g. radiation effects and dust abrasion effect and toxicity).	○	—
HLE-10	Forge a multi-lateral international partnership for the implementation of exploration missions.	—	○
HLE-11	Engage the public to make lunar exploration a shared global adventure.	—	—
HLE-12	Demonstrate night survival of equipment	○	—
Science and Exploration Knowledge Gain Objectives			
SEK-1	Provide access to the lunar surface for the retrieval of samples from locations of high scientific interest.	—	○
SEK-2	Provide global access for in-situ science and technology payloads to the lunar surface.	—	○
SEK-3	Provide samples of sufficient quantity and quality so as to enable high value contributions to the highest priority science topics associated with samples.	—	—
SEK-4	Provide sustained communications access to the lunar far side and poles.	—	—
Sample Return Objectives			
FME-1	Identify opportunities to flight-test components that are relevant for sample return missions.	—	—
FME-2	Demonstrate the transfer operations of the sample container from the rover to the ascent vehicle.	—	—
FME-3	Demonstrate the capability to precisely perform the initial as well as the final manoeuvres of the landing phase (i.e. initial brake, orbit insertion, high gate arrival, final descent and touchdown under thrust).	◎	○
FME-4	Demonstrate sample retrieval, handling, and transfer operations using a rover on the surface.	—	—
FME-5	Open new pathway to address planetary protection requirements.	—	—

(*1) 技術実証の必要性：◎（有人月面探査のために必要）、○（より高度な有人月面探査のために必要）、—（必要なし）。

(*2) 日本の分担：○（実施）、△（部分的に実施）、—（日本は担当せず）

表4-2 月表面からのサンプルリターンにおける日本の技術レベルと技術ギャップの分析

フェーズ	日本の技術レベルとHERACLESで獲得を目指すべき技術
①ロケット打上	・開発中の基幹ロケット（H3）や、必要に応じた商用の大型ロケットの使用が想定できるので技術開発要素はない。
②月周回軌道への軌道変換	・日本は2007年に「かぐや」を打ち上げ、今後もSLIM、EQUULEUS、OMOTENASHIを運用する計画であり、月周回軌道への軌道変換に技術開発要素はない。
③月面着陸、ローバ展開	・今後SLIM、OMOTENASHIを月面に着陸させる計画であり、HERACLES実施時点で、一定の月着陸技術は有している。 ・将来の有人月面探査では、既存の着陸機・拠点への近接着陸等、SLIMを上回る高精度着陸が必要になる可能性が高い。現状の延長として、スタンドアロンの着陸機による着陸精度向上に加え、先行する着陸機を航法標識として使うような複数の着陸ミッションに渡る技術戦略についても議論する価値がある。 ・将来、有人着陸機の担当に向けたデモとしては、現状想定されている無人着陸機の構成では不十分である。有人着陸機のシステム設計（とくに安全性の面）を実施し、必要課題（技術ギャップ）を洗いだして、ミッション目的に反映すべきである。
④月面探査	・月極域探査ミッションで、ローバによる月面探査を実施する計画であり、HERACLES実施時点で、一定の月面探査技術は有している。 ・将来の高度な月面活動で必須となる長期間の越夜技術は未だ有しておらず、HERACLESにおいて何らかの形で技術獲得を目指すべきである。 ・将来、有人月面車を担当する計画がある場合は、有人月面車のシステム設計（とくに安全性の面）を実施し、必要課題（技術ギャップ）を洗いだして、ミッション目的に反映すべきである。 ・ミッション機器は、ミッション毎に目的に応じて開発するのが原則である。ただし、サンブラのように汎用的かつ、より高度な機能・性能（状態保持、コンタミ管理、深部からのサンプル等）が求められていく機器については、技術戦略に基づき技術実証を重ねることが国際競争力確保の意味でも有用である。
⑤ローバを遠隔操作	・月極域探査ミッションで、地上から遠隔操作されたローバによる月面探査を実施する計画であり、技術開発要素はない。
⑥サンプルを搭載、離陸	・ローバによる離陸機へのサンプル搭載のようなロボティクス技術については、ISSで実績があり、MMX、月極域探査ミッションでも実施する計画であり、一定の技術は有している。将来ミッションにおいても、ミッション毎に目的に応じて開発するのが原則であり、HERACLESにおいて技術実証をする必要性は低い。 ・天体からの離陸については、はやぶさ、はやぶさ2で小惑星から、MMXで火星衛星において実績、あるいは実施する計画があり、一定の技術は有している。 ・月、火星レベルの重力の天体からの離陸については、将来の往還ミッション（無人・有人）に向けた必要課題（技術ギャップ）を洗い出して、ミッション目的に反映すべきである。
⑦深宇宙ゲートウェイヘランデブ	・HTVによるISSへのランデブ技術の延長線上で対応可能であり、また、HTV-XによるLOP-G補給の議論もなされているので、HERACLESにおいて技術実証をする必要性低い。
⑧有人宇宙船でサンプル回収	・惑星間軌道からの回収運用については、はやぶさ、はやぶさ2、MMXで実績、あるいは実施する計画があり、一定の技術は有しているので、HERACLESにおいて技術実証をする必要性低い。

5 将来の月惑星探査につながる提言

C) 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

【提言 C-1】我が国で基盤測器と競争力のある測器の開発が必須

天体内部探査の標準化
地質探査技術の着実な獲得

【提言 C-2】我が国での月利用／資源の基盤作りをこの機会に進めるべき

表面状態・環境の把握は古くて新しい科学工学
異分野異業種交流が鍵

【提言 C-3】我が国で科学探査を支える幅広い体制作りが必要

5.1 【提言】我が国で基盤測器と競争力のある測器の開発が必須

5.1.1 天体内部探査の検討を

我が国は地球の地震学、火山学で学術的に極めて高いレベルを維持しており、こうした分野をベースとした内部構造探査を行うことは、月のみならず火星など他天体探査における学術的優位性を確保する上でも重要と考えられる。内部探査装置としては、ペネトレータや惑星探査用短周期地震計と広帯域地震計、熱流量・熱伝導率計測システム、小型アクティブ地震探査、地下探査レーダサウンダ、磁力計、重力偏差計等が挙げられる。それらの観測結果から、月面地下～深部の地震波速度構造、電気伝導度構造、温度構造などが得られる²⁷。

月の全球組成や構造分化プロセスの解明に得られた表層データを活かすには、地下構造の決定が不可欠である。コアサイズや地殻厚の正確な把握などは、月の起源や進化を知るうえで極めて大き

な意義がある。たとえばこれまでの物理探査により、月の金属鉄コアのサイズは、350km 以下と推定されているが、正確なサイズ・質量を求めることは、月を作った衝突の条件を制約する上で極めて重要である。衝突天体のサイズ、衝突天体がもともと持っていた金属鉄量、衝突速度、衝突角度によって、月の材料物質に金属鉄がどれくらい含まれるか依存するからである。多種の物理探査データの結果を統合して、月内部の密度、物理状態、組成、地殻厚、コアの有無などについての制約条件を制定し、月の起源と進化の議論を展開する必要がある。

地震探査を用いて、月の内部構造を調べる場合には、月面に地震計が分散して設置されていることが望ましい。互いに離れた地点に複数台の地震計を設置することで、月の内部構造の正確な推定や、月震の震源決定が可能になる。アポロによって設置された地震計は、全て月の表側に設置されており、その偏った地震計配置では、正確に震源や月構造を推定することが困難である。またアポロの地震計データでは、月の裏側で月震が捉えられ

²⁷ 地震探査について惑星科学会では、2020 年代前半に月震計による地殻厚を決定し、2020 年代後半に月面その場観測で理学的・技術的な実績を積む。そして、2030 年代に月の裏側から

のサンプルリターンを推進するというロードマップを設定している。

ていないが、これが月表側に偏在している地震計に起因する可能性がある。今後、地震計を多地点に設置するプロジェクトは、世界各国で実施されると考えられ、月面に地震計観測ネットワークが構築されると考えられる。しかし、各国の地震計の特性（周波数特性や時刻など）が異なる場合には、期待されている成果が得られない可能性がある。そこで国際的な枠組みで地震計の基準を検討し、最大限の成果を出す努力が必要である。例えば、各国の地震計が様々な地点で同時に稼働する環境を構築し、各国が協力して（月面に分散している）地震計データを中継・転送する枠組み作りが必要になると考えられる。我が国は、地震計の設置等において多くの実績を有しており、この国際的な枠組みにおいて、世界をリードできると考えられる。

さらに月震を記録するだけでなく、アクティブ地震探査をローバが月面を走り回りながら実施することで、広範囲の表層構造（深度数 km くらいまで）を推定できる。月は波動減衰が小さいため、着陸船に設置した加振源とローバに設置した地震計を利用することで、広い範囲の表層構造を推定できる可能性がある。深度数 km までの浅部構造はレーダサウンダによって推定できるが、弾性波速度を同時に取得することで、物性の推定が容易になる。アクティブ地震探査によって、広範囲の浅部地質構造を明らかにし、レゴリス層の特性（地盤強度・粒径分布・間隙率）を推定することで、レゴリスの形成メカニズムと進化、資源量の評価、基地建设に必要な地盤情報などに関する情報を得ることができる。

5.1.2 地質探査技術の着実な獲得を

着陸探査は今後高頻度で実施される可能性があり、それにみあう機器の開発・運用能力の適切な発展が望まれる。特にローバを用いた地質調査は、基礎的な周辺情報を提供する重要な位置づけを持つが、ここではリモートセンシングによる調査と異なり、小さな領域でも鍵となる岩相（露頭）の発見とその相互把握が中心となる点に留意して、必要な技術²⁸を獲得しておくべきである。また有人探査の時代には野外地質調査が月面で実施されることになるが、その橋渡しとしての役割もローバ無人探査は持つ。そのためローバ搭載機器は、有人探査においても、その場観測が可能な野外調査支援機器として有効利用されるはずであり、継続的に発展させる必要がある。

月表面は何億年にもわたる隕石の爆撃によって粉碎・混合を繰り返しているが、それでも生成時の地層が保存されている場所も存在する。例えば中央丘を代表とする大規模な地質ブロックの塊がほぼ一体となったまま移動しているケースである。クレータ中央丘には地下 5～30km ほどの深さの

地質ブロックが持ち上げられていると考えられている。また、衝突盆地形成時に大きなブロックが弾き飛ばされるような場合も考えられる。コペルニクスクレータ周辺はそういった流山のような地質かも知れない。ほかにも、表層の火成活動の痕跡が破壊されつくさずに残っているケースが考えられる。例えば火山地形や、縦孔の側壁に観られる層状構造（地層かどうかは未確認）、縦孔周辺の溶岩チューブなどは、火山活動を研究するのに最適な露頭であると言える。また、前出の特異な地域地質も、露頭が保存された場所とみることができる。

ただし月面ではいかなる地域も隕石衝突による破壊と混合のプロセスを受けている。そのため、岩石組織レベルで、オリジナルな岩石組織と破壊と混合による組織とを区別することが必要である。これは、走査電子顕微鏡の拡大レベルで元素の固体拡散を観察することで、十分に可能であるが、露頭規模でのダメージ分布の全容把握には、露頭ごとの探査での知見の積み上げが必要であろう。

こうした場所を探査するのに必要な技術としては、科学的に興味深い露頭へ到達する能力が重要となる。それは、ピンポイント着陸技術によって達成される場合や、ローバの長距離走行能力や、越夜する技術、さらには不整地や急坂を走行する技術によって達成される場合もあろう。露頭に到着してからは、その場でより多くの情報を得るための、岩石切断・研磨技術や、場合によっては地面を掘削するボーリング技術が必要である。

月惑星表面の地質着陸探査は我が国では経験が足りない分野である。ヘラクレス無人着陸探査では、その地質探査のローバ運用オペレーションにおいて目的を達成するのに必要となる具体的な手順や問題対処方法を洗い出し、地球の実験室内と野外でのシミュレーションや実際のミッションを通じて習熟することが重要になってくる。さらに有人月着陸探査の準備の一環として、有人探査時に予期される運用形態を早い段階から考慮して無人探査でもできることは試しておくというようなことも有益であろう。

5.2 【提言】新しい宇宙資源・利用工学の基盤作りをこの機会に進めるべき

月基地の建設や月資源の活用、月有人活動の展開などには、従来の枠組みを超えた幅広い専門知識を持つ人材の協力が不可欠となる。特に国際競争力の強い分野、たとえば土木建築技術やロボットなどをうまく融合することができれば、世界的にも高い競争力を得ることが可能と考える。

RFI の結果は、潜在的に興味をもたれる分野が広いことを示すが、一方で異分野の研究者に必ずしも信憑度の高い情報が届いていない状況も垣間見られた。宇宙科学・工学における情報発信にお

²⁸ 表層調査に関しては、ハイパースペクトラルイメージャー、能動型蛍光 X 線分光計、水分子検出・同位体分析装置、月惑

星表面長期その場観測ユニット等の開発に関連する技術が挙げられる。

いても JAXA を中心とした強いリーダーシップが求められる。

5.3 【提言】我が国で科学探査を支える幅広い体制作りが必要

日本は火山岩岩石学が歴史的に強く、最新の微小領域同位体分析装置、放射光実験施設を有するなど微量同位体分析や微小領域分析を含めた高いレベルでの分析科学・技術がある。また世界第2位の隕石保有国である（国立極地研究所の南極隕石が中心で、重要な月隕石も含まれる（例えば Yamaguchi et al., 2010）など、隕石学の国際的競争力も強い。はやぶさ探査機で世界に先駆けて月以外の天体からサンプルの獲得を実現し、はやぶさ2、MMX と、国際的に評価が高いミッションを実施／計画しており、サンプルリターンが今後も日本の宇宙探査の重要な軸となるだろう。

ただし国内の惑星物質科学の研究者は、原始太陽系星雲の誕生から微惑星の形成に至る「初期太陽系進化史」に主たる興味を置いており、月試料の物質科学的な分析から月の科学を展開している研究者は少数である点に留意が必要である。国内の惑星物質科学研究者の人数が減少傾向にある中で、特に分化試料の研究者数が少ないことは、今後の月サンプルリターン計画の実施やリターン試料の分析を国内的に押し進める上で、留意すべき問題点である。

ヘラクレス計画や月極域探査など国際宇宙探査は、国際宇宙探査センターが中心となって行う政策ミッションであり、ボトムアップ型で行われてきた宇宙科学探査とは科学コミュニティーの関わり方が異なっている。国際宇宙探査においては、科学コミュニティーの総意というより、国策や国際関係により政治的に探査ミッションが決定される。科学コミュニティーは、そのように決まったミッションについて、必要に応じて科学検討や科学的価値の創造が期待される。

一方、国際宇宙探査は、有人月火星探査を目指しており、そのミッション規模から推察すると日本社会は、資源探査や有人探査を行うなら当然、月火星探査の科学的な成果も期待すると思われる。

このような社会的な期待を実現するには、ボトムアップ型の宇宙科学探査しか経験してこなかった科学コミュニティーでは、人的にも予算的にも施設・設備的にも支えきれない。国際宇宙探査が実現するようになると、これまでと比べて2倍の惑星探査が実施されることになる。現在の惑星科学コミュニティーでこの数のミッションを支えることは困難で、100人規模の若手人材の育成とその人材を確保するような仕組みが必須である。

さらに様々な政策ミッションに応じた適切な科学探査を提案し、ミッション機器を提供するには、日本全国に展開する探査拠点も必要である。こうした人材育成や基礎的な研究開発に対して、定常的な必要な予算が大学の探査拠点に配分されている必要がある。

NASA では様々な視点から月探査を推進するために、NASA Lunar Science Institute(2008-2013) および対象を火星・小天体まで広めた Solar System Exploration Research Virtual Institute (2013-現在) を設立し、米国内外の研究機関を横断する体制づくりを行っている。



6 Appendix

6.1 参考文献

- Anand, M., Tartese, R., Barnes, J.J., 2014. Understanding the origin and evolution of water in the Moon through lunar sample studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 372.
- Bamford, R.A., Alves, E.P., Cruz, F., Kellett, B.J., Fonseca, R.A., Silva, L.O., Trines, R.M.G.M., Halekas, J.S., Kramer, G., Harnett, E., Cairns, R.A., Bingham, R., 2016. 3D pic simulations of collisionless shocks at lunar magnetic anomalies and their role in forming lunar swirls. *Astrophysical Journal* 830, 146.
- Canup, R.M., 2004. Simulations of a late lunar-forming impact. *Icarus* 168, 433-456.
- Carlson, R.W., Garnero, E., Harrison, T.M., Li, J., Manga, M., McDonough, W.F., Mukhopadhyay, S., Romanowicz, B., Rubie, D., Williams, Q., Zhong, S.J., 2014. How did early earth become our modern world? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol 42 42, 151-178.
- Cassen, P., Reynolds, R.T., Graziani, F., Summers, A., McNellis, J., Blalock, L., 1979. Convection and lunar thermal history. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 19, 183-196.
- Feldman, W.C., Barraclough, B.L., Fuller, K.R., Lawrence, D.J., Maurice, S., Miller, M.C., Prettyman, T.H., Binder, A.B., 1999. The Lunar Prospector gamma-ray and neutron spectrometers. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 422, 562-566.
- Fujita, K., Ogawa, M., 2009. Basaltic accumulation instability and chaotic plate motion in the earliest mantle inferred from numerical experiments. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 114, B10402.
- Halekas, J.S., Delory, G.T., Brain, D.A., Lin, R.P., Fillingim, M.O., Lee, C.O., Mewaldt, R.A., Stubbs, T.J., Farrell, W.M., Hudson, M.K., 2007. Extreme lunar surface charging during solar energetic particle events. *Geophysical Research Letters* 34, L022111.
- Halekas, J.S., Delory, G.T., Lin, R.P., Stubbs, T.J., Farrell, W.M., 2009. Lunar Prospector measurements of secondary electron emission from lunar regolith. *Planetary and Space Science* 57, 78-82.
- Halekas, J.S., Saito, Y., Delory, G.T., Farrell, W.M., 2011. New views of the lunar plasma environment. *Planetary and Space Science* 59, 1681-1694.
- Hareyama, M., Ishihara, Y., Demura, H., Hirata, N., Honda, C., Kamata, S., Karouji, Y., Kimura, J., Morota, T., Nagaoka, H., Nakamura, R., Yamamoto, S., Yokota, Y., Ohtake, M., 2019. Global classification of lunar reflectance spectra obtained by Kaguya (SELENE): Implication for hidden basaltic materials. *Icarus* 321, 407-425.
- Head, J.W., McCord, T.B., 1978. Imbrian-age highland volcanism on moon - Gruithuisen and Mairan domes. *Science* 199, 1433-1436.
- Hernlund, J.W., Stevenson, D.J., Tackley, P.J., 2008. Buoyant melting instabilities beneath extending lithosphere: 2. Linear analysis. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 113, B04406.
- Ikeda, Y., Takeda, H., 1985. A model for the origin of basaltic achondrites based on the Yamato-7308 howardite. *Journal of Geophysical Research* 90, C649-C663.
- Jolliff, B.L., Gillis, J.J., Haskin, L.A., Korotev, R.L., Wieczorek, M.A., 2000. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins. *Journal of Geophysical Research-Planets* 105, 4197-4216.
- Keller, L.P., McKay, D.S., 1997. The nature and origin of rims on lunar soil grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 2331-2341.
- Khan, A., Connolly, J.A.D., Pommier, A., Noir, J., 2014. Geophysical evidence formelt in the deep lunar interior and implications for lunar evolution. *Journal of Geophysical Research-Planets* 119, 2197-2221.
- Kokubo, E., Ida, S., 2002. Formation of protoplanet systems and diversity of planetary systems. *Astrophysical Journal* 581, 666-680.
- Kruijjer, T.S., Kleine, T., Fischer-Godde, M., Sprung, P., 2015. Lunar tungsten isotopic evidence for the late veneer. *Nature* 520, 534-537.
- Lawrence, D.J., Feldman, W.C., Elphic, R.C., Hagerty, J.J., Maurice, S., McKinney, G.W., Prettyman, T.H., 2006. Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles. *Journal of Geophysical Research-Planets* 111, E08001.
- Livengood, T.A., Chin, G., Sagdeev, R.Z., Mitrofanov, I.G., Boynton, W.V., Evans, L.G., Litvak, M.L., McClanahan, T.P., Sanin, A.B., Starr, R.D., Su, J.J., 2015. Moonshine: Diurnally varying hydration through natural distillation on the Moon, detected by the Lunar Exploration Neutron Detector (LEND). *Icarus* 255, 100-115.
- Lucey, P.G., Taylor, G.J., Malaret, E., 1995. Abundance and distribution of iron on the moon. *Science* 268, 1150-1153.
- Kayama, M., Tomioka, N., Ohtani, E., Seto, Y., Nagaoka, H., Goetze, J., Miyake, A., Ozawa, S., Seikine, T., Miyahara, M., Tomeoka, K., Matsumoto, M., Shoda, N., Hirao, N., Kobayashi, T., Discovery of moganite in a lunar meteorite as a trace of H₂O ice in the Moon's regolith, *Science advances*, 4 (5), p.eaar4378, 2018
- Ogawa, M., 2014. Two-stage evolution of the Earth's mantle inferred from numerical simulation of coupled magmatism-mantle convection system with tectonic plates. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 119, 2462-2486.
- Ogawa, M., 2018. Magmatic differentiation and convective stirring of the mantle in early planets: the effects of the magmatism-mantle upwelling feedback. *Geophysical Journal International* 215, 2144-2155.
- Ogawa, M., Yanagisawa, T., 2014. Mantle evolution in Venus due to magmatism and phase transitions: From punctuated layered convection to whole-mantle convection. *Journal of Geophysical Research-Planets* 119, 867-883.
- Ohtake, M., Takeda, H., Matsunaga, T., Yokota, Y., Haruyama, J.,

Morota, T., Yamamoto, S., Ogawa, Y., Hiroi, T., Karouji, Y., Saiki, K., Lucey, P.G., 2012. Asymmetric crustal growth on the Moon indicated by primitive farside highland materials. *Nature Geoscience* 5, 384-388.

Ringwood, A.E., 1970. Petrogenesis of Apollo-11 basalts and implications for lunar origin. *Journal of Geophysical Research* 75, 6453-6479.

Robinson, K.L., Taylor, G.J., 2014. Heterogeneous distribution of water in the Moon. *Nature Geoscience* 7, 401-408.

Saal, A.E., Hauri, E.H., Lo Cascio, M., Van Orman, J.A., Rutherford, M.C., Cooper, R.F., 2008. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. *Nature* 454, 192-U138.

Schaefer, L., Elkins-Tanton, L.T., 2018. Magma oceans as a critical stage in the tectonic development of rocky planets. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 376, 20180109.

Senshu, H., Kuramoto, K., Matsui, T., 2002. Thermal evolution of a growing Mars. *Journal of Geophysical Research-Planets* 107, E12,5118.

Shoemaker, E.M., Hait, M.H., Swann, G.A., Schleich, D.I., Dahlem, D.H., Schaber, G.G., Sutton, R.L., 1970. Lunar regolith at Tranquility-base. *Science* 167, 452-455.

Smith, D.E., Zuber, M.T., Neumann, G.A., Lemoine, F.G., 1997. Topography of the moon from the Clementine lidar. *Journal of Geophysical Research-Planets* 102, 1591-1611.

Solomon, S.C., 1977. Relationship between crustal tectonics and internal evolution in moon and mercury. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 15, 135-145.

Stettler, A., Eberhardt, P., Geiss, J., Grögler, N., Maurer, P., 1973. ^{39}Ar - ^{40}Ar ages and ^{37}Ar - ^{38}Ar exposure ages of lunar rocks, *Proceedings of the 4th Lunar Science Conference*, pp. 1865-1888.

Tanaka, R., Nakamura, E., 2017. Silicate-SiO reaction in a protoplanetary disk recorded by oxygen isotopes in chondrules. *Nature Astronomy* 1, 0137.

Touboul, M., Puchtel, I.S., Walker, R.J., 2015. Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the earth and moon. *Nature* 520, 530-533.

Wakita, H., Schmitt, R.A., 1970. Lunar anorthosites - Rare-earth and other elemental abundances. *Science* 170, 969-974.

Whitaker, E.A., 1972. Lunar color boundaries and their relationship to topographic features: A preliminary survey, *The Moon*, pp. 348-355.

Wood, J.A., Dickey, J.S., Marvin, U.B., Powell, B.N., 1970. Lunar anorthosites. *Science* 167, 602-604.

Yamaguchi, A., Karouji, Y., Takeda, H., Nyquist, L., Bogard, D., Ebihara, M., Shih, C.Y., Reese, Y., Garrison, D., Park, J., McKay, G., 2010. The variety of lithologies in the Yamato-86032 lunar meteorite: Implications for formation processes of the lunar crust. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 74, 4507-4530.

Yamamoto, S., Nakamura, R., Matsunaga, T., Ogawa, Y., Ishihara, Y., Morota, T., Hirata, N., Ohtake, M., Hiroi, T., Yokota, Y., Haruyama, J., 2010. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE. *Nature Geoscience* 3, 533-536.

Yanagisawa, T., Kameyama, M., Ogawa, M., 2016. Numerical studies on convective stability and flow pattern in three-dimensional spherical mantle of terrestrial planets. *Geophysical Journal International* 206, 1526-1538.

6.2 RFI 回答の要約

以下に RFI 回答の要約を示す（ただしヘラクレス SWG が理工学委員会等で行ったものと重複したものは除く）

(1) ヘラクレス計画で行うサイエンス、観測機器、サンプリング地点に関する科学的提案/助言

- ・地下構造の把握（大出大輔・大林組）
月地下の居住を念頭におき、地下構造の把握と建材として高強度な物質の探査を目的としている。地下シェルターについてはこれまで検討されており、月だけではなく地球上でも活用できるため、地下の探査・利用技術獲得へとつながる。
- ・太陽風プラズマによる宇宙風化過程の解明を目的とした月試料分析（三宅洋平・神戸大学）
月表層物質の宇宙風化による化学特性変化と荷電粒子フラックスを関連付けることを目的としている。深さ数メートルの深さ方向のサンプリングが望ましい。
- ・能動的実験観測による月面レゴリス移動現象の解明とレゴリス環境の形成進化の理解（和田浩二・千葉工業大学）
月・小惑星の表層に存在するレゴリスの移動・変性過程を明らかにすることは、起源や進化を明らかにすることに通じる。このために人工衝突をトリガーとしたレゴリスの移動現象の観測を行う。
- ・三点トランスデューサーによる地質構造および資源探査（鶴哲郎・東京海洋大学）
広域地下構造探査における探査手法として、三点トランスデューサーを提案する。発信周波数を連続的に変化させて探査震度と探査体操物の大きさ（不均質のスケール）を操作しながら月面下の地質構造を映像化・資源探査を行う。
- ・熱赤外カメラ（多色 Filter 付）（岡田達明・ISAS/JAXA）
温度（輝度温度）を 2 次元撮像するものであるが、温度の時間変動から表層熱物性をしる手がかりともなる。また $10\mu\text{m}$ 帯の波長特性は鉱物（珪酸塩）の種類や結晶質・非晶質の識別に用いることができる。
- ・ローバ搭載 GPR による月表層地下構造・層序の広域探査（宮本英昭・東京大学）
ローバに GPR を搭載し、月表層深さ 1.5m までに存在する 10 cm を超えるレゴリス内の微細な地下構造・岩塊、深さ 10m までに存在する 1m を超える地下層・空洞の検出を行い、掘削・試料採取前に妨げる岩塊がないかの調査を行うことが可能である。
- ・着陸機もしくは小型衛星搭載レーダサウンダによる月表層地下構造・層序の広域探査（熊本篤志・東北大学）
月面とゲートウェイ間を往復する着陸機、ないし周回小型衛星に UHF 帯レーダサウンダを搭載し、月表層深さ数 10 m までの地下

構造を広域探査し、レゴリス層・クレータエジェクタ層・溶岩層の微細構造・層序を明らかにする。

- ・月内部構造探査パッケージ（月面サバイバルモジュール）（小川和律・神戸大学）

月震計（別途提案されている短周期地震計+広帯域地震計）、磁力計、熱流量計、逆 VLBI 電波源の 4 つの地球物理学的観測機器を月面に設置して、長期間観測を行うことによって月内部構造の調査を行う。主として月面地下～深部の地震波速度構造、電気伝導度構造、温度構造、慣性モーメントが得られる。

- ・モグラ型ローバでの掘削実証（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

月面着陸後、着陸機の太陽電池から得られる電力を利用して、着陸機お真下を地下方向にどこまで掘り進めることができるか検証する。このことにより将来のインフラ整備技術の技術実証と遺棄される着陸機の有効利用を図る。

- （2）ヘラクレス計画にかかわる先導する工学・確立すべき技術の提案/助言

- ・月火星地盤の透水透気係数の影響の考察と透水係数の調査について（佐藤真理・島根大学）

月や火星など地球よりも重力の小さな天体に安定な構造物の構築するためには、透水透気係数の把握は重要である。これらは土壌の特徴や大気組成、重力の影響を受ける。このためため、高粘性ジェル・高流動性モルタルを用いてこれらの計測を行う。

- ・月・火星地質探査のためのサンプルハンドリング・ガスハンドリング技術のご提案（長勇一郎・東京大学）

サンプル採取・分析において、(1)岩石・岩盤コア採取技術、(2)岩石取り回し技術（カールセルなど）、(3)真空保持技術、(4)真空バルブ技術、(5)真空排気技術、は重要になるために HERACLES において考慮すべき点として提案する。

- ・月面における ROVER 搭載同位体分析装置（山中千博・大阪大学）

サンプルリターンの時間があると揮発性元素の同位体は散逸してしまう可能性があるため、その場での観測が望ましい。このため、ローバ搭載型の質量分析計（レーザー同位体測定装置や小型の TOF 型質量分析器の搭載が望ましい。

- （3）将来の月惑星探査につながる科学探査の提案

- ・月表面における磁場および粒子環境調査の提案（清水久芳・東京大学）

月面での宇宙線や粒子被曝量を現地にて調査把握し、これをふまえて長期探査や滞在にふさわしい環境（住環境、機器の動作環境）を準備する必要がある。そこで月面での宇宙線や粒子被曝量と、これに影響をあたえる磁場環境の調査を、月面で行うことを提案する。

- ・月広域探査における縦孔・チューブ探査に関して（廣木正行・大成建設株式会社）

将来の有人ミッションに向けて安全で安定した大規模空間が必要となる。縦孔・チューブ空間は人の活動拠点として、温度差が少なく-20℃程度で安定している、放射線が届かず、月面のように、遮蔽シェルター建設が不要、安定した環境の大空間が存在する、月面への衝突物及び衝突によるレゴリス等の飛散の影響を受けにくい、などのメリットが考えられる。

- ・レゴリスを用いたレンガの生成（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

月表面に存在する岩石を粉末にして加熱することでレンガを作ることができる。月面基地の建材として、レゴリスからレンガを作る技術の実証と実用性の評価を行う。

- ・道路整備技術の実証（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

月面基地や資源の運搬を行うとき、効率的に輸送するための道路整備技術の確立を目指し、土壌を（踏み）固める技術の実証とその効果を行う。

- ・月発電所のための展開パネルの技術検証（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

将来の月面での大規模な発電設備建設を念頭に、地球や軌道上と環境が異なる月面上での効果的、効率的な太陽電池パネルの展開機構の検証、展開技術の実証を行う。

- ・月面上で成立する構造の検証（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

将来の月面基地を建設したり、月面と LOP-G で大量の物資を輸送する場合の手段として月面版の宇宙エレベーターなどを念頭に、月環境に適した構造や LOP-G にアクセスしやすくする構造の検証を行う。

- ・植物および虫の育成の検証（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

月周辺（LOP-G 含む）に人が長期滞在することを念頭に、食料を継続的に現地調達する方法の検討（月面上での作物育成や蚕などの益虫の飼育）を行う。

- ・探査機に燃料を入れる技術の実証（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

月面で探査機に燃料（液体水素、液体酸素）を月面推薬生成プラントから補給する技術の実証実験を行う。

- ・拡張可能な電源インフラ設備の設置（竹本弥生・川崎重工業株式会社）

太陽電池パネルからローバにレーザーでエネルギーを送る実証実験を行う。中継機経由の送電実証実験も併せて行う。無線送電が可能になれば、ローバに受信機を搭載するだけで給電可能なエリアの探査が可能になり、ミッション機器の搭載割合を増やすことができる。