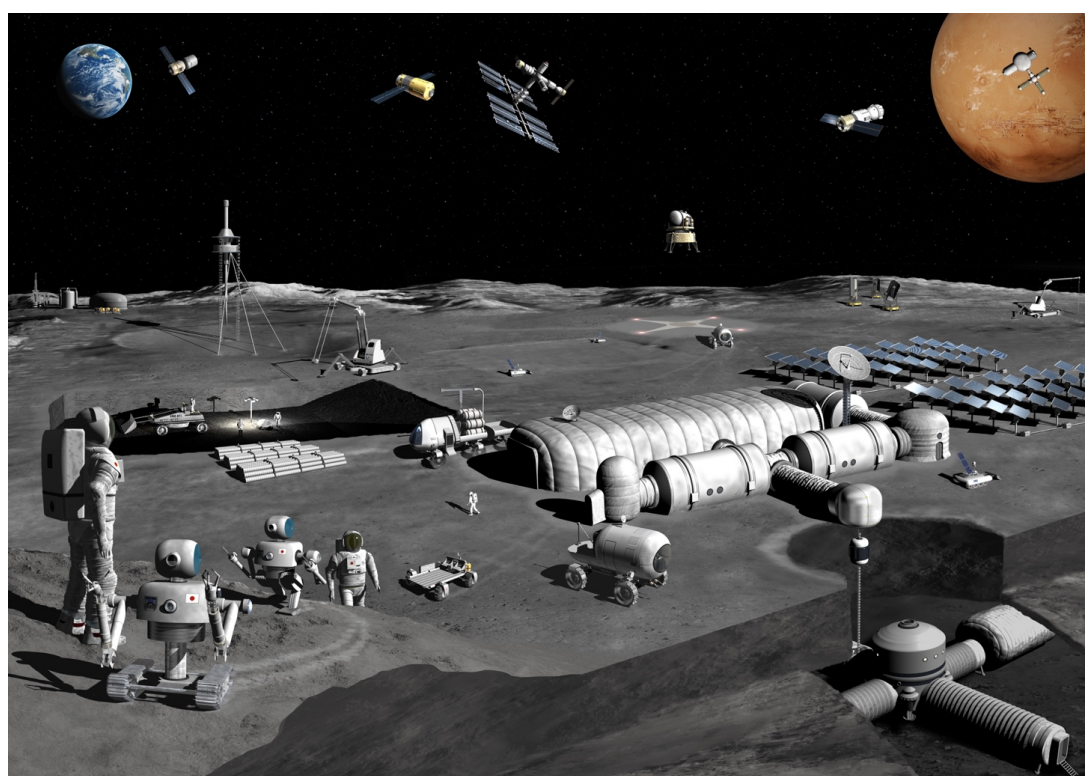


国際宇宙探査専門委員会中間報告書 (要約抜粋版)



2019 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 宇宙理工学委員会

国際宇宙探査専門委員会

目 次

1. はじめに

- 1.1 宇宙探査専門委員会の目的
- 1.2 宇宙探査専門委員会メンバ

2. 宇宙探査シナリオへの提言

- 2.1 月極域探査タスクフォース報告(抜粋)
- 2.2 月近傍ミッション Gateway の科学探査タスクフォース報告(抜粋)
- 2.3 HERACLES 計画の科学探査タスクフォース報告(抜粋)
- 2.4 火星探査計画の科学探査タスクフォース報告(抜粋)

3. 理学検討(抜粋)

- 3.1 理学目標(大目的, 目標, 課題)
 - (1) 惑星科学の大目的
 - (2) 惑星科学の3大目標

4. 工学・技術検討(抜粋)

- 4.1 工学技術ロードマップについて
- 4.1.8 ミッション例
 - A. 小型プローブ(ペネトレータ)
 - B. 縦穴探査
 - C. 小型プローブ(子機探査)

5. 国際宇宙探査と宇宙科学探査

- 5.1 探査の定義
- 5.2 宇宙科学探査の位置付け

6. まとめ

付録

- ・専門委員会開催日時および議題

第 1 章 はじめに

1. はじめに

月や火星を対象に、国際協働による宇宙探査の検討が活発に行われ、15 カ国の宇宙機関より構成される国際宇宙探査協働グループ (ISECG) が、シナリオ検討および技術検討を行っている。現在、月極域探査、月周回拠点のゲートウェイ (GateWay) 計画、月サンプルリターン (HERACLES) 計画、火星探査計画、月・火星有人探査などが議論されている。

昨今の国際宇宙探査の状況を鑑み、宇宙科学コミュニティ全体として、科学情報の助言・提言、探査情報の共有を行うことが必要となっている。そこで、宇宙理工学委員会のもとに、国際宇宙探査専門委員会が 2017 年 9 月に設置された。本専門委員会では、宇宙理工学委員会および国際宇宙探査センターと連携し、情報共有および活発な議論を行うとともに、タスクフォースを設置し、各ミッション計画に対して専門家の意見も含めた助言や将来構想をとりまとめている。

本報告書 (サマリー版) は、国際宇宙探査専門委員会での議論を中間報告としてまとめたものである。紙面の都合で要約・抜粋版となっているが、詳細は別途、WEB などで入手できるようにする。第 2 章では、4 つのテーマに関して、本委員会委員を含む専門家に依頼し、独立したタスクフォースとしてまとめてもらった提言のサマリーを掲載する。また、タスクフォースとは別に、第 3 章と第 4 章では、宇宙科学に関して、理学的観点と工学的観点でまとめている。第 5 章は、国際宇宙探査と宇宙科学探査の位置付けについてまとめている。

1. 1 国際宇宙探査専門委員会の目的

国際宇宙探査専門委員会の主たる目的は以下のとおりである。

- ・国際宇宙探査に宇宙科学コミュニティの意見を反映すること
- ・国際宇宙探査の情報共有を行うこと
- ・国際宇宙探査と宇宙科学探査の位置付けの明確化

1. 2 国際宇宙探査専門委員会メンバ

国際宇宙探査専門委員会のメンバを表 1-1 と表 1-2 にまとめる。

表 1-1 : 2017 年度国際宇宙探査専門委員会委員

荒川政彦	神戸大学院理学研究科・教授	
石上玄也	慶応義塾大学理工学部・准教授	
大竹真紀子	ISAS 太陽系科学研究系・助教	
河合誠之	東工大・理工学研究科 基礎物理学専攻・教授	理学委員
久保田孝	ISAS 宇宙機応用工学研究系・教授	
小泉宏之	東大大学院新領域創成科学研究科 准教授	
澤井秀次郎	ISAS 宇宙飛翔工学研究系・准教授	工学委員
斎藤義文	ISAS 太陽系科学研究系・教授	
塩谷雅人	京都大学生存圏研究所・教授	理学委員
白石浩章	ISAS 太陽系科学研究系・助教	
津田雄一	ISAS 宇宙飛翔工学研究系・准教授	工学委員
寺田直樹	東北大学大学院理学研究科・准教授	
春山純一	ISAS 太陽系科学研究系・助教	
藤本正樹	ISAS 太陽系科学研究系・教授	理学委員
宮本英昭	東京大学大学院工学系研究科・教授	
山岸明彦	東京薬科大生命科学部分子生命科学科・教授	理学委員
若田光一	JAXA 有人宇宙技術部門有人宇宙技術センター長	オブザーバ
上森規光	JAXA 有人宇宙技術部門事業推進部長	オブザーバ
佐藤直樹	JAXA 国際宇宙探査推進チーム長	オブザーバ
張替正敏	JAXA 研究開発本部戦略部長	オブザーバ
稲場典康	JAXA 研究開発部門システム技術ユニット長	オブザーバ
國中均	ISAS 宇宙飛翔工学研究系・教授	オブザーバ
佐々木宏	ISAS 科学推進部長	オブザーバ
青柳孝	ISAS 科学推進部計画マネージャ	オブザーバ
東覚芳夫	ISAS 科学推進部国際調整主幹	オブザーバ

表 1-2 : 2018 年度国際宇宙探査専門委員会委員

荒川政彦	神戸大学院理学研究科・教授	
石上玄也	慶応大学工学部・准教授	
稲富裕光	ISAS 学際科学研究系・教授	工学委員
臼井寛裕	ISAS 太陽系科学研究系・教授	理学委員
大竹真紀子	ISAS 太陽系科学研究系・助教	
河合誠之	東工大・理工学研究科 基礎物理学専攻・教授	理学委員
久保田孝	ISAS 宇宙機応用工学研究系・教授	
小泉宏之	東大大学院新領域創成科学研究科 准教授	
澤井秀次郎	ISAS 宇宙飛翔工学研究系・准教授	工学委員
斎藤義文	ISAS 太陽系科学研究系・教授	
塩谷雅人	京都大学生存圏研究所・教授	理学委員
白石浩章	ISAS 太陽系科学研究系・助教	
津田雄一	ISAS 宇宙飛翔工学研究系・准教授	工学委員
寺田直樹	東北大学大学院理学研究科・准教授	
春山純一	ISAS 太陽系科学研究系・助教	
藤本正樹	ISAS 副所長	
宮本英昭	東京大学大学院工学系研究科・教授	
山岸明彦	東京薬科大生命科学部分子生命科学科・教授	理学委員
佐々木宏	国際宇宙探査センター長	オブザーバ
筒井史哉	JAXA 有人宇宙技術部門 ISS プログラムマネージャ	オブザーバ
上森規光	JAXA 有人宇宙技術部門事業推進部長	オブザーバ
佐藤直樹	JAXA 国際宇宙探査推進チーム長	オブザーバ
唐牛 護	JAXA 宇宙探査システム技術ユニット主任研究開発員	オブザーバ
張替正敏	JAXA 研究開発本部戦略部長	オブザーバ
稲場典康	JAXA チーフエンジニアリング室長	オブザーバ
三好寛	ISAS 科学推進部長	オブザーバ
青柳孝	ISAS 科学推進部計画マネージャ	オブザーバ
東覚芳夫	ISAS 科学推進部国際調整主幹	オブザーバ

第2章 宇宙探査シナリオへの提言



2018 年 5 月 18 日

月極域探査タスクフォース最終報告 (抜粋版)

月探査 TF



目 次

1. 要旨	2.1-2
2. TF メンバー	2.1-5
3. TF の目標	2.1-4
4. 惑星科学・太陽系科学における月科学の重要性	2.1-5
5. TF からの提言	2.1-7

1. 要旨

月極域探査タスクフォース(TF)は惑星科学・太陽系科学における月科学の重要性に鑑みて、国際宇宙探査委員会に対して、太陽風と表層環境の相互作用(セクション 5.1), 地殻形成史の解明(セクション 5.2), 太陽系内の水輸送(セクション 5.3), 科学探査プラットフォーム(セクション 5.4), という 4 つの科学的課題から提言を行う。さらに、水(氷)探査に関する科学的助言(下記のタスク(1))として、物理探査とボーリング探査の必要性について言及している(セクション 5.5)。しかし、残念ながら本報告ではタスク(1)について深く踏み込むことはできなかった。

(1) 水(氷)探査に関する科学的助言

水保持層の地質と水捕獲機構に関係があるかに注目(5.2)

早急に物理探査とボーリング探査の研究者を月極域探査のメンバーに招聘し、開発体制を根本的に補強すること(5.5)

(2) 水(氷)探査の結果から得られる科学の整理

月表層に存在する岩石またはレゴリス試料に含有されている水の起源として、(i) 太陽風と月面との相互作用、(ii) 月形成後の小惑星や彗星による供給、(iii) 月形成時に取り込まれた成分に由来、が考えられる。D/H 比や O 同位体比に基づく水の起源の同定(質量分析計, 微量水分計, 熱重量計)。ただし、太陽風起源の水素以外は、同位体比の差が比較的小さく測定誤差を超えて区別することが困難な可能性もある。(5.1)

岩石またはレゴリス試料中の He や Ar の測定から、太陽風照射年代決定および太陽風と相関する非太陽風起源 ^{40}Ar の起源解明(質量分析計, 試料加熱装置)(5.1)

極域での玄武岩発見と生成条件の推定(イメージング分光計, 微量水分計)(5.1)

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)には初期地殻らしき地域が認められる。初期地殻の発見は世界初の成果となる(イメージング分光計)。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、斜長岩直下の地殻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(イメージング分光計)。(5.2)

地質学的状況証拠によって LHB 期の水が同定できれば、D/H 比から衝突体を推定することが可能(5.3)

(3) 月極域での科学探査の提言

太陽風プロトンダイナミクス，日陰への侵入プロセス，月面帯電の定量的解明（月面プラズマ粒子観測器(プラズマ粒子計測器と磁力計)）重イオン分析（質量分析計）(5.1)

高精度同位体分析に基づく水の起源の同定，特に太陽風以外を起源とする場合の上記(ii)，(iii)の区別・同定(5.1)

南極エイトケン盆地の形成史解明（年代測定装置等，サンプルリターン）(5.1)

その場分析による年代測定により地殻からマントルまでの各地層の形成年代を確定する．(5.2)

サンプルリターンによる詳細分析により微量元素から各地層が形成された際のマグマの組成や体積を推定したり，微量水の定量から月への水の供給や水の蒸散の時期を特定する．(5.2)

サンプル取得して年代測定．LHB 期の水が同定できれば，LHB 時期の絞り込み．さらに，玄武岩，斜長岩地殻，レゴリスなど多層的なサンプルが採取・分析できれば，Grand Tack 期と LHB 期の水の供給源を区別できる可能性(5.3)

(4) 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

月面定点プラズマ観測（太陽風や磁場）により，宇宙天気および地球磁気圏環境のダイナミックな変動の理解(5.1)

地球磁気圏からの影響について過去に遡り知見を得ることにより，月—地球系の進化過程の理解(5.1)

月表層試料（特に玄武岩や Pyroclastic deposit 等）の揮発性成分量測定，およびそれに基づく物質移動・分布や月全球での揮発性元素量の推定(5.1)

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．(5.2)

細かな月地質年代の測定は，太陽系小天体の衝突進化の履歴を反映しており，LHB の理解に必須(5.3)

今後の月探査は資源利用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すること．そのような目的のために，資源利用・科学ミッションに共用できる以下のようなインフラを構築すること(5.4)

2. TF メンバー

TF リーダー	並木則行 (自然科学研究機構 国立天文台)
TF サブリーダー	春山純一 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)
TF メンバー	吉田二美 (千葉工業大学 惑星探査研究センター)
	三浦弥生 (東京大学 地震研究所)
	佐伯和人 (大阪大学 大学院理学研究科)
	大竹真紀子 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)
	臼井英之 (神戸大学 大学院システム情報学研究科)

3. TF の目標

この TF は国際宇宙専門委員会から、極域探査に関して以下の事項について検討および提言をまとめることを諮問されている。

(1) 水（氷）探査に関する科学的助言

モデル機器(表 3-1)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 3-1)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。

表 3-1 モデルミッション機器

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

4. 惑星科学・太陽系科学における月科学の重要性

日本の月科学と月探査を牽引してきたコミュニティの多くは地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)と日本惑星科学会に所属している。それぞれのコミュニティは宇宙科学研究所の要請に応じて RFI をまとめており、本 TF も月科学の重要課題を抽出し、検討方針を定めるための基礎資料としている。

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)
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)

太陽地球惑星系科学分野 (STP 分野) がまとめた RFI においては分野全体を A) 地球磁気圏・宇宙プラズマ, 地球大気圏・電離圏と, B) 惑星電磁気圏・大気圏に区分する。そして, B) に関わる探査として, (i) 生命や生命圏環境の探査, (ii) 巨大惑星系-衛星系の電磁気圏・大気圏探査, (iii) 地球型惑星の電磁気圏・大気圏探査, (iv) 太陽・太陽圏探査, (v) 月探査に細分している。さらに, (v) 月探査に関しては, 有人月面活動に向けた重要課題の一つとして, 月極域の水の質と量の調査が提唱されている。

SGEPSS の RFI では, 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、(v) 月探査を通して(i) 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。太陽風プロトンの月面分布の理解には、STP 分野が宇宙天気研究で培ってきた太陽風や小天体の帯電などの宇宙環境の知見の活用とその更なる発展が求められる。また、磁気圏を持たない天体表層が太陽風にさらされて、どのような影響を受けたかを知ることは SGEPSS RFI における主要テーマの一つである。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。

他方、日本惑星科学会がまとめた RFI(2018 年 1 月 29 日版)では、アストロバイオロジーという世界的潮流の中で、日本の惑星探査は「太陽系生命環境の持続」の解明に向かうことが提唱されている。特に今後 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。この科学目標は、「A. 生命生存可能環境の普遍性」(天体環境群がいかに形成したのか?)と、「B. 生命生存可能環境の多様性」(反応ネットワークをもつ天体がどこにどれだけ存在するか?)に区分され、さらに

- A1. 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給
- A2. 惑星・衛星の形成・初期分化
- B1. 生命前駆物質の形成・進化
- B2. 地下熱水環境：鉱物—水—有機物反応系
- B3. 大気（海洋）散逸・光化学反応
- B4. 生命およびその痕跡

という 6 テーマに細分化されている。

月科学は上記の A1 と A2 に深く関与する。A1 では、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。このような観点から、月極域の水探査は、A1 の鍵となる。現在、惑星間空間から地球にもたらされる水は、ことごとく地球の大気海洋の汚染を受けて、地球外「水」のサンプルとして調査することができない。月極域の水は、我々が地球上で手に入れることができる貴重な地球外「水」のサンプルなのかもしれない。もしそうなれば、隕石の化学分析によって太陽系形成論が大きく進展したように、月極域の水分析によって「A. 生命生存可能環境の普遍性」を探求する科学が花開く可能性がある。だが残念ながら、月極域の水を直ちに地球大気・海洋の材料と見做すことはできない。月極域の水には太陽風起

源や月内部起源も含まれるからである。月極域探査では、まず太陽風起源、月内部起源、外来起源の水フラックスを定量化することが第一に求められる。

A2 では、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。月は地球に最も身近な天体として、他の太陽系内天体に比べて、これまで最も詳しく調査されてきた。岩石天体の形成・進化過程の礎石である。火星や金星にくらべてもアクセス性が格段に良く、誕生から進化までを観測から実証できる唯一の天体といっても過言ではない。小天体の熱進化から単純に重力天体の進化が外挿できるわけではないが、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、「A. 生命生存可能環境の普遍性」探求において非常に重要である。

また、月探査には人類居住圏の拡大という固有な科学テーマがある。純粋科学の枠内に収まり切れないかも知れないが、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。

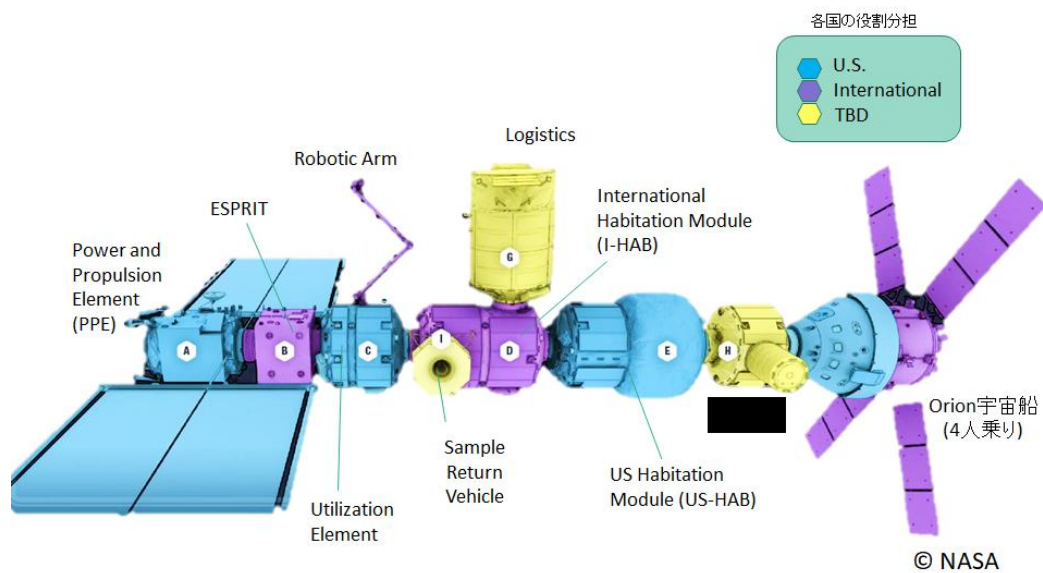
上記の課題は SGEPS と日本惑星科学会とで共通のものもあれば、相補的に関連付けられるものもあり、国際的競争力のある意義深い科学課題が浮かびあがってくる。欧米に比して小さな科学コミュニティ、中国よりも限定的な資金投資を考慮すれば、日本の月探査は絞り込んだ科学課題に集中せざるを得ない。そうした観点から、本 TF では SGEPS と日本惑星科学会の掲げる科学課題をベースに、日本が優先的に行うべき月探査の検討を行うことにする。

5. TF からの提言

4 章で述べた月科学の重要性に鑑みて、TF では 5.1 太陽風と表層環境の相互作用、5.2 地殻形成史の解明、5.3 太陽系内の水輸送、5.4 科学探査プラットフォーム、という 4 つの科学的課題について提言を行う。この報告書では、それぞれの課題についてまず「(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。一方で、「(1) 水（氷）探査に関する科学的助言」としては、特に 5.5 において物理探査とボーリング探査の必要性について言及している。

Gateway 科学探査タスクフォース報告

深宇宙探査ゲートウェイタスクフォースチーム



目 次

1. 本 TF の設置について	2.2-1
1.1 設置の経緯	2.2-1
1.2 国内外の状況	2.2-1
1.3 目標	2.2-1
1.4 活動方針	2.2-2
1.5 メンバー	2.2-2
2. 要旨	2.2-3

1. 本 TF の設置について

1.1 設置の経緯

宇宙理工学合同委員会は、国際協働による宇宙探査を実現しようという国際的な議論の高まりに呼応して、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を設置した。

第 2 回国際宇宙探査フォーラム(ISEF2)の結果を踏まえ、JAXA では新たに月や火星を対象とした国際宇宙探査センターを設置して、月近傍有人拠点や月着陸探査活動の開発の着手に向け、検討とともに科学コミュニティとの連携もさらに本格化させた。それを受けて、国際宇宙探査における科学の検討を深め、科学コミュニティとの連携をより一層深めるために以下の **Gateway 科学探査 TF** が設置された。

1.2 国内外の状況

欧米では Gateway 利用の意見収集・検討が本格化している。その一例として 2018 年 2 月に米国で開催された Deep Space Gateway Concept Science Workshop の概要を以下に示す。

- ・ 探査で可能となる、宇宙生命・物理学、太陽系物理学、月・惑星科学、天体物理学、地球観測の各分野に特化したセッションと、分野横断的なセッションの 2 種類のセッションが中心。
- ・ Gateway で可能となる科学、データ取得に必要な機器、Gateway が提供するリソース、Gateway をサンプルリターンや通信の経由地とする構想が議論された。
- ・ 講演数：約 180 件、参加者：約 300 名（政府関係、研究者、産業界、国外から）。

TF 発足時（2018 年 11 月）における国内科学コミュニティの状況は以下の通りであった。

- ・ 宇宙惑星居住科学（人類の活動領域拡大を目指す科学）分野では、Gateway 利用を含む深宇宙での研究について、TF 発足以前から将来計画やロードマップを独自に策定し、意見収集等主体的に対応していた。
- ・ 宇宙理学・工学分野、アストロバイオロジー分野では、Gateway 利用にて具体的に何を観測・実験するのか決まっておらず、関連科学コミュニティからの意見収集が喫緊の課題であった。

1.3 目標

深宇宙探査ゲートウェイ計画に関して、以下の事項に関して検討および提言をまとめ、2019 年 2 月中旬を目処に国際宇宙探査専門委員会に提示する。

1. 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言
2. 深宇宙探査ゲートウェイを用いた科学探査の助言
3. 深宇宙探査ゲートウェイに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言
4. 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

1.4 活動方針

2018 年 11 月半ばから開始する 90 日間スタディとして、多岐にわたる分野を対象とした集中的な検討を行う。その際に、科学コミュニティに対する Gateway 利用テーマに関する意見収集と共に、シンポジウムやワークショップ等の機会を利用してより広く意見交換を行い、取り纏めの参考とする。

1.5 メンバー

限られた TF 活動期間内にて、Gateway 利用が想定される科学分野を網羅することは困難である。従って、国際宇宙探査専門委員会、宇宙環境利用専門委員会および ISAS 内での意見を参考に、TF チーム長の判断により TF メンバー構成を表 2.2-1 の通りとした。

表 2.2-1 TF メンバー一覧 (敬称略、順不同)

氏名 (所属)	専門分野	備考
宇宙惑星居住科学分野		
石川 正道 (理化学研究所)	微小重力科学	・ 宇宙環境利用専門委員会 副委員長
【チーム長】 稲富 裕光 (ISAS)	宇宙環境利用科学	・ 宇宙工学委員会 委員 ・ 宇宙環境利用専門委員会 幹事 ・ 国際宇宙探査専門委員会 委員
北宅 善昭 (大阪府立大学)	生態工学	・ 生態工学会 会長
高橋 秀幸 (東北大学)	宇宙生命科学	・ 宇宙環境利用専門委員会 委員長
アストロバイオロジー分野		
【副チーム長】 山岸 明彦 (東京薬科大学)	生命科学	・ 宇宙理学委員会 委員 ・ 国際宇宙探査専門委員会 委員
宇宙理学分野		
臼井 英之 (神戸大学)	月・惑星科学	・ 月極域探査 TF メンバー ・ 地球電磁気・地球惑星圏学会 メンバー
河合 誠之 (東京工業大学)	宇宙物理学	・ 宇宙理学委員会 委員 ・ 国際宇宙探査専門委員会 委員
宇宙工学分野		
澤井 秀次郎 (ISAS)	飛翔システム	・ 宇宙工学委員会 委員

2. 要旨

国際宇宙専門委員会にて設置された Gateway 科学探査 TF は、90 日間スタディとして深宇宙探査ゲートウェイ計画に関して検討および提言をまとめ、2019 年 2 月中旬を目処に国際宇宙探査専門委員会に提示することを目標としている。TF メンバーは宇宙惑星居住科学、アストロバイオロジー、宇宙理学、宇宙工学分野の専門家で構成され、幅広い視点での検討を進めた。その際に科学コミュニティへの意見収集、シンポジウムやワークショップにおいて参加者との意見交換を行った。その結果、科学コミュニティおよび民間企業は深宇宙探査ゲートウェイ利用について以下の可能性を期待していると考えられた。

- ・ 月近傍・地球環境に左右されないという特徴を活用した新しい観測・実験・実証試験拠点の形成
- ・ 将来の月面における重力・宇宙放射線・太陽光環境を利用した実験を見据えた、ISS そして深宇宙探査ゲートウェイの活用によって広がる新しい研究
- ・ 将来の火星有人探査をも見据えた、科学コミュニティと民間企業などの連携・分担
- ・ 宇宙分野だけでなく幅広い分野を巻き込むことで実現する、科学成果の社会還元

この状況を踏まえて、国際宇宙探査専門委員会からの諮問に対して以下の通り答申する。

1. 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言

【宇宙理学】

月面数千 km の軌道および月面アクセスを利点とした様々な高度（月面下も含む）での月環境データの取得、長期常時観測の実現、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、リモート撮像による地球電磁気圏の大局的な理解、地球環境に左右されない高精度天文観測

【宇宙工学】

擾乱抑制などの天文観測やアストロバイオロジーを成立させる技術、補給船の高性能・高信頼性を実現するための電気推進系・航法センサを含む諸技術の実証、将来深宇宙探査に向けた月面資源利用、高性能推進系、通信系などの諸技術の獲得

【アストロバイオロジー】

前生物の有機物合成の解明のために：宇宙環境、原始地球環境での有機物合成過程を模擬する場として利用した実験および人工物をさけた宇宙塵捕集。

生命の誕生進化と本質の理解のために：宇宙環境での微生物生存の測定、人工物をさけた微粒子捕集。知的生命と未来に関わる研究を推進する場とする。

【宇宙惑星居住科学】

微小（低）重力環境を利用した流体力学・結晶成長・物理化学・材料科学・燃焼・生物科学など学際的研究分野の基礎科学と応用科学（微小重力科学）、工学的手法を駆使した物質循

環系・閉鎖生態系の解明・構築とその生命維持システムへの応用（生態工学）、微小（低）重力や宇宙放射線などの深宇宙特有の環境を利用した生物学・深宇宙滞在のための課題を解決する宇宙医学・健康科学・宇宙農学（宇宙生命科学）、人類の宇宙居住を可能にする学際的基礎・応用科学

2. 深宇宙探査ゲートウェイを用いた科学探査の助言

【宇宙理学】

地球惑星科学：

太陽地球惑星系科学(STP: Solar-Terrestrial Physics)

- ・ プラズマ電磁環境計測（イオン質量分析、磁場・プラズマ計測、地球磁気圏尾部観測、宇宙電磁波計測、Gateway 環境アセスメント、月面磁気異常領域プラズマ観測、月面ダスト計測、重イオン、負イオン（H-や O-）、中性粒子計測）
- ・ 月表層、地下環境計測（ローバー搭載 GPR による月表層地下構造・層序の広域探査、着陸機/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、月表層・浅地下の含水鉱物・水関連物質・有機物の検出）
- ・ 地球惑星磁気圏、大気圏撮像（地球磁気圏 X 線可視化、UV による太陽系惑星電磁気圏リモートセンシング、月からの地球散逸大気撮像）

固体地球惑星科学：

- ・ 月面固体環境計測（月面衝突閃光観測から探る隕石の衝突頻度と超高速衝突発光物理の解明）
- ・ 隕石、ダスト計測（微小隕石・彗星ダスト分析並びに外来天体による月への揮発性成分の供給機構の解明）

天文学：

- ・ 活動銀河核やブラックホール、重力波、軟ガンマ線観測
- ・ 月表面 Mg、Al、Si、Fe の蛍光 X 線分析による月地殻の形成過程研究
- ・ X 線干渉計 MIXIM
- ・ 宇宙再電離の解明に向けた中性水素の 21 cm 輝線観測
- ・ 宇宙ニュートリノ源の探索

【宇宙工学】

高性能・高運用性を有する電気推進系、高精細・高信頼性でより安全性が高い接近センサ、など深宇宙探査ゲートウェイへの無人補給船の高性能化・高信頼性化を実現するための諸技術の獲得

【アストロバイオロジー】

- ・ 諸技術の獲得原始惑星環境・宇宙環境の模擬実験の場としての深宇宙ゲートウェイ利用
- ・ 模擬原始地球の水圏環境における前生物学的実験
- ・ 宇宙塵連続計測と定期サンプルリターンによる、月近傍固体微粒子環境の解明
- ・ 地球生物の宇宙曝露実験に基づく長期宇宙生存可能性の検証

- ・ 人工デブリが全くない地球・月圏での宇宙塵や月起源微粒子の非破壊捕集

【宇宙惑星居住科学】

ISS で研究されてきた重力の制約が無い物理・化学・生命現象の普遍性を追求し、地球以外の重力天体でも通用する科学知識の獲得を行う。その成果に基づき、基礎科学、応用科学を惑星探査活動の観点から融合・発展し、人類の活動を惑星へと拡大する長期居住に必要な科学技術を構築する。

微小重力科学：

- ・ 材料科学： 無容器プロセッシングを用いた高温融液の熱物性計測およびそれを用いた材料プロセス設計
- ・ 流体科学： 面張力が支配的因子となる気泡・液滴・液膜に関連した気液界面現象の解明と熱物質輸送制御
- ・ 燃焼科学： 微小重力利用による燃焼素過程解明と燃焼限界の取得
- ・ 化学工学： 重力変動の影響を受けにくい宇宙環境での持続可能なリサイクルシステムの構築
- ・ コロイド界面科学： 微小重力、低重力、可変重力場での物理、化学、生物など分野を横断するコロイド界面科学の再考
- ・ 基礎物理： プラズマおよび低温環境における多体系量子・物理現象の解明

生態工学：

- ・ 有人宇宙滞在技術（生命維持・環境抑制制御）としての閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）および再生型環境制御システム（ECLSS）構築の研究加速

宇宙生命科学：

- ・ 微小重力や月重力（0.165G）への長期曝露が生物の重力応答、発生、成長、生殖、生物間相互作用、生活環、継世代、進化に及ぼす影響の理解
- ・ 深宇宙特有の宇宙放射線や太陽光紫外線の生物影響の理解と計測・遮蔽技術の開発
- ・ 微小・低重力と宇宙放射線・紫外線と心理的ストレスの複合的生物影響の理解と被曝管理
- ・ 心・血管等循環器系の重力変化に対する応答と対抗策
- ・ 筋・骨等運動器系の重力変化に対する応答と対抗策
- ・ 内耳・深部知覚等平衡感覚系とそれを介した調節系の重力変化に対する応答と対抗策
- ・ 船外活動用装置の医学的・人間工学的開発と検証
- ・ 複合的な環境要因に起因するストレス応答と対抗策
- ・ 筋・骨萎縮や酸化ストレス軽減・予防のための機能食材の開発と創薬
- ・ 微生物学的管理目標の設定と有用微生物の利用
- ・ 植物栽培、宇宙植物工場の実証試験
- ・ 月部分（低）重力下における植物栽培の最適化
- ・ 月レゴリスの有機化と利用
- ・ 宇宙植物の栄養分析と宇宙食の開発

3. 深宇宙探査ゲートウェイに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言

【宇宙理学】

以下の測器に関する技術開発が必要となる。長期安定観測を実施するためには、観測装置の小型化、省電力化、放射線耐性、低温耐性などの技術を更に成熟させる必要がある。

月周回衛星かぐや搭載機器の技術やノウハウを継承発展

- ・ 電場、磁場計測装置および電波計測装置
- ・ イオン・電子エネルギー分析装置、イオン・中性粒子質量分析装置
- ・ ダスト計測装置
- ・ 地球磁気圏 X 線撮像装置・紫外撮像装置

月面および月面下の環境を計測するために必要

- ・ 地中レーダ・電磁探査装置
- ・ 月表層・浅地下物質を計測する赤外分光装置

固体惑星科学分野関連で Gateway 上に必要

- ・ 微小隕石及び彗星ダスト取得・フィルターやエアロゲルなどの収集装置
- ・ 月面衝突閃光 (Lunar Impact Flash : LIF) 観測用の可視光・多色カメラと熱赤外カメラ

【宇宙工学】

擾乱抑制技術を含め、他の科学分野と連携し、それらの科学研究において必要とされる諸技術の獲得・実証

【アストロバイオロジー】

曝露・観測実験のための共通曝露プラットフォームの開発

深宇宙探査ゲートウェイでの実験を実現するうえで共通する技術は深宇宙探査ゲートウェイの環境を利用して宇宙環境で実験装置を運用し、あるいは実験装置を回収し、場合により実験装置を地球に帰還させるという点である。アダプターの設置が計画されているが、比較的大型の装置を想定されている。そこで、共通プラットフォームを開発してアダプターに設置することで、小型の装置の設置、回収、電力供給、信号授受を容易にすることを提言する。

宇宙惑星居住科学

有人月惑星探査・宇宙惑星居住を推進するためには、衣・食・住、エネルギー、通信、その場製造、リサイクル、資源開発など、地球上とはまったく異なる宇宙・惑星環境で、いかに生命及びヒトの活動を維持する環境を創造できるかにある。深宇宙探査ゲートウェイは、そうした持続的な探査活動を支える前哨基地であり、ひいては近未来の有人月面活動・居住に必要な研究開発の場を提供する。

微小重力科学

- ・ その場製造 (3D プリンター) : ①月レゴリスの静電浮遊熱物性評価、②レゴリス利用積層造形のための熔融凝固シミュレーション、③宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化
- ・ 熱エネルギー開発 : ①ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム、②月

で得られる水素を利用した循環型燃焼装置（熱源）の開発、③パーシャルグラビティ環境での火災安全プロトコルの構築

- ・ 月面資源開発（レゴリス利用）：①プラズマ・レゴリス相互作用による微粒子制御と水素回収、②月レゴリスからの酸素、水素および水の製造技術、③その場資源利用を可能とする鉱物製錬・抽出プロセス
- ・ 水・空気環境浄化：①マランゴニ流を用いた水浄化実験、②匂い環境計測及び光触媒による浄化実験、③自己集積型コロイド光触媒
- ・ 生活安全・リサイクル（非平衡コロイド分散系）：①微小重力環境下および低重力環境下における種々のコロイド分散系の崩壊プロセス・安定性評価、②宇宙惑星居住に必要なとされる食品、日用品などの生活資材の加工、③閉鎖循環型分解・再資源化プロセス
- ・ 光格子時計による共通時間標準（超高精度周波数標準）：①天体観測や月・地球観測の精度向上、②月面ローバー探査測位・精密自動制御、③月地殻変動の測定、④月面重力アノマリー観測の基づく資源探査
- ・ 簡易実験手段（小規模実験プラットフォーム）：①ISSでは容易には達成できない極低温実験、②強力な太陽光および放射線影響評価、③観測機器等実験装置の宇宙環境における評価実証、④将来の宇宙開発に生きる自律的な制御機器の実証

生態工学

- ・ 閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）の中核となる宇宙植物工場での食料生産の実証および月面宇宙環境の植物影響解明
- ・ 水を用いた放射線防御および藻類を用いた空気再生、排水処理、食料生産
- ・ 宇宙環境下での再生型環境制御システム（ECLSS）における廃棄物利用の高度化
- ・ 月など地球由来以外から得た物質が生物に及ぼす影響調査

宇宙生命科学

- ・ 植物、線虫、魚類、マウス等のモデル宇宙実験系の開発・改良
- ・ 宇宙環境で機能する植物栽培・動物飼育技術の開発・改良
- ・ ヒトの重力応答障害の対抗策と心理的ストレスの緩和策
- ・ 機能性食材の開発と創薬
- ・ 宇宙放射線・紫外線の計測・予測技術と遮蔽・防護技術の開発
- ・ 生体反応のその場解析装置（イメージングや成分分析や遺伝子発現など）の開発
- ・ 環境制御装置や解析装置やサンプリング装置のAI・自動化と遠隔操作技術
- ・ 新規植物機能の利用・応用技術
- ・ 月レゴリス・資源の利用・応用技術

4. 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

【宇宙理学】

STP および惑星固体科学の分野では、(1) Gateway 観測により得られる月プラズマ電磁環境の理学的知見は、太陽系内の大気を持たない惑星/小惑星、衛星と太陽風プラズマの相互作用

用の理解にとって非常に有益、(2) 今後、月以外の惑星/小惑星や衛星に人類が資源や居住環境を求めて探査を進める際には非常に重要な知識、である。

STP

- ・ プラズマ電磁環境計測の火星など他の天体環境計測への応用
- ・ 月表層、地下環境計測による水資源や水関連物質探査（分布、量、形態）、月極域資源探査やヘラクレスとの連携。将来の火星などの惑星表層探査の予行演習をいう位置付け
- ・ X線、紫外線を用いた地球以外の惑星の磁気圏、大気圏撮像、それらの全体構造の俯瞰的理解

惑星固体科学

- ・ 月表面の精密資源探査マップ作成（核ガンマ線イメージング分光カメラ利用）
- ・ HERACLES や他のミッションでのローバーによるサンプルリターンとの連携による外来天体による月への揮発性成分の供給機構の解明

天文学

- ・ 電波干渉計（宇宙 VLBI）
- ・ 月面天文台のパイロット計画

【宇宙工学】

月資源を推薬として利用した推進システムやその推進薬生成・運搬技術、遠隔操作技術、深宇宙や天体表面に到達するための宇宙航行技術、地上などの遠隔地から深宇宙への高度で柔軟なアクセスを可能にする通信技術・テレグジスタンス技術

アストロバイオロジー

前生物的有機物合成とその曝露実験の結果は、今後検討される月惑星およびその衛星の探査で宇宙由来有機物がどの程度各天体に到着し、残存しているかを推定する上での資料となる。天然の微生物移動（パンスペルミア過程）の検討が惑星保護および生命探査を検討する上での指針作成に重要である。宇宙・月・惑星での居住の検証の場として微小重力下における多孔質体中での水分移動機構の解明の提案がある また深宇宙探査ゲートウェイは将来の火星等からの帰還サンプルの中間分析場所として検討価値がある。そのための惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発提案がある。

【宇宙惑星居住科学】

月面の重力場（0.165G は、0G と 1G を補間する）を利用して ISS で行われた微小重力科学研究の成果を実証・発展させることによって、民間を中心とした SDGs（持続可能な開発目標）、Society 5.0 などのイノベーション戦略と連携し、産官学が協力して日本発の月探査ミッションを推進する。

微小重力科学

- ・ 材料科学：レゴリスなど惑星鉱物資源を原材料とした材料プロセス、その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬、材料加工
- ・ 流体科学：探査居住モジュール熱制御技術、宇宙機流体制御、微小重力下・低重力下での積層造形（3D プリンター）
- ・ 燃焼科学：宇宙火災安全確保、月面極域に存在する水素を利用した熱源の開発と利用

システム、燃焼による廃棄物の減容処理

- ・ 化学工学：有人探査に向けた空気再生および水再生など生命維持・リサイクル、水素・酸素・水の循環的利用を可能とする光触媒プロセス、日本の強みである環境技術を微小重力・低重力・可変重力場での単位操作
- ・ コロイド界面科学：粒子の自己組織化原理の材料プロセス、リサイクル、面活性剤による界面制御、物理表面の濡れ制御、電場効果のバイオテクノロジー、食品の保存処理、日用品など生活関連技術
- ・ 基礎物理：レゴリスのプラズマ特性評価と材料プロセス、生命と真空・高エネルギー環境との相互作用の解明、光格子時計を用いた月／惑星／宇宙空間における時間・位置測定など各種精密測定
- ・ 共通技術・実験手段：化学分析、ゲノム、プロテオーム、メタボローム解析、遠隔地での実験の自動化・遠隔操作などテレサイエンスの高度化、有人／無人衛星・月面プラットフォームなど手段の多様化および手段間の連携

生態工学

- ・ 長期有人宇宙滞在技術（生命維持・環境抑制制御）としての閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）および再生型環境制御システム（ECLSS）構築

宇宙生命科学

- ・ 深宇宙環境長期曝露に伴う医学的リスクの回避・医療
- ・ 長期滞在するクルーの健康管理、ストレス軽減、メンタル面の改善
- ・ 月面植物工場・制御生態系・宇宙農業の実証・確立
- ・ 生命維持システムの実証・確立
- ・ 月のレゴリスや水などを含む資源開発・利用
- ・ 火星等、さらなる深宇宙への人類の進出
- ・ 月旅行・エコツーリズム
- ・ 月人類社会・文化の形成
- ・ 地球の課題解決と近未来の創造

ヘラクレス計画の科学探査タスクフォース

中間報告書・サマリー版

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する「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 (東工大)・理論惑星科学
小林桂 (岡山大学)・分析科学
小松吾郎 (ダモンツィオ大)・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
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)・サンプラ

津田雄一 (JAXA)・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)・ヘラクレス取り纏め

サマリー版について

このサマリー版は、中間報告書の抜粋で作られたものであるため、前後関係も含め必ずしもこの文書だけで論理的に成立していない部分がある。また本来は記載されていた重要な図表は省かれており、引用文献も省略されている。またもともと含まれていた脚注や、前提となる科学的知見のまとめも省略されている。これらについてはサマリー版でない中間報告書をご参照願いたい。

タスクフォースの目的・前提条件等

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と考える点について、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

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・ベーズンの岩石学、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

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

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の解明、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

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

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、地質学的コンテキストの把握

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メンテーション、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、地質コンテキスト+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

提言の概要・1

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

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

国内開催のWS/検討会を定期的で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

国内版の機器RFIを、至急実施すべき

***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**

1.1 【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

1.1.1 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。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ペ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。

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。

1.1.2 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定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観点とローバによるその場観察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。むろん、当初のサイエンスプラン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。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こなうなど、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。

1.1.3 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。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变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。

また岩石試料については、塊状の溶岩試料だけでなく、目的に応じて火山砕屑物（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。

1.1.4 キュレーション施設と体制の充実が国際競争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。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、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

一步となる。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。

1.2 【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帯探査はこれからであるし、表側高地と裏側高地との比較という大問題もある。これら大区分の地質地帯の調査では、同じ地質地帯であっても地域内多様性を認識するために複数の場所で探査を行い、各地質地帯の特徴を捉えることが重要である。また局所的に他と異なる特徴を持った地域も多数ある(Head and McCord, 1978; Whitaker, 1972)。これらの地域は、単に局所的で特異な地質現象の産物かも知れないが、地質現象の多様性の端成分を調べることで、むしろ全球的な分化のプロセスの解明につながる可能性もある。そのどれが重視されるかは、周辺科学の進展度合いによっても変化する。

その意味では、モデルプランとして国際チームが現段階での着地点候補を絞り込むのは妥当である。しかし打ち上げ直前まで変更の可能性を残しオープンディスカッションを実施するのが望ましい。ここでの経験は、着陸後に具体的なサンプル取得地点を決定する上でも、継続的に議論が行えるという意味でも利点がある。さらに、今後も高頻度で実施される月表面探査計画においても、有意義な情報が効率よく収集でき、かつ人材的にも継続的に維持発展できると期待される。

着地点のみならずサンプル取得地点も、常に最先端の月科学の解釈によって調整されるべきものなので、実際に月面に着陸しサンプルを選別する時まで、継続的に議論を重ねることができる研究者グループを組織することと、活発な活動を維持し続けることが重要である。現在日本では月地殻研究会がそれに近い活動をしているが、各種月探査の着陸地点検討会や月科学関連のタスクフォースグループなども含んだ大きな組織を形成すべきである。着陸後に地表でみる岩石は衛星軌道上から観察するほど単純ではなく、狭い地域にもある多様性に翻弄される可能性がある。その意味では、野外地質調査の経験がある研究者の協力が不可欠であろう。

参考までに、最近の NASA や ESA の無人惑星着陸探査、特に火星ミッションでの着陸点選定プロセスを紹介する。通常、惑星科学のコミュニティから広く意見を募ったあとで、着陸点選定のワークショップを数回開催し、その都度投票で候補地を絞り決定する。宇宙機関は現在活動中の探査機による最新情報など、評価に多くの材料を提供する役目を負う。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。

1.3 【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のが重要である。

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 JAXA 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。

提言の概要・2

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

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

*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

2.1 【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。

2.1.1 共同ミッションとしてのミッション目的 (HERACLES ORD) の精査

HERACLES ORD では、「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」に区分してミッション目的が提示されているが、各目的間の優先度について、今後、協力機関と議論し、調整していくべきである。また「サンプルリターン」に基づくミッション目的は、欧州の立場を重視して記載されている感があるが、日本の立場（実績と将来戦略）に基づく目的を検討し、要すれば追記・修正の可能性を検討すべきである。

2.1.2 日本としてのミッション目的の精査・設定

現状、日本としてのミッション定義文書は制定されていないが、たとえば開発分担案として提示されている「着陸エレメント」に関連する技術実証に限定するのは、機会活用の観点から適切とはいえない。HERACLES ORD で提示されている各項目について、日本の立場（現状の技術レベル、将来の技術戦略、技術ギャップと獲得計画）を精査し、日本としての技術実証ミッションの目的を整理・優先度付けした上で、国際協力・分担の議論に反映すべきである。

2.2 【提言】獲得を目指すべき技術を明瞭化すべき

現状、HERACLES で想定されているミッション・シナリオを前提として、各フェーズごとに、日本の現状の技術レベル、将来の技術戦略と技術ギャップを表 3-1 にまとめた。これを元に、HERACLES において獲得を目指すべき技術として以下の 3 点を抽出した。

2.2.1 有人着陸機技術

将来の国際分担において日本が有人着陸機を担当することを目指すのであれば、日本が技術を保持していることの実証（デモンストレーション）としては、安全性等の面で有人仕様の着陸機システムを構築する可能性を検討すべきである。また、要素技術（着陸誘導、障害物回避、着陸衝撃管理、等）の面でも有人着陸機を想定した機能・性能要求の向上や、人が介在した機能の実現の要否を検討すべきである。さらに、将来の有人月面探査を見据え、複数の着陸ミッションに渡る技術戦略（先行する着陸機を航法標識として使用する等）についても議論の対象に加えるべきである。

2.2.2 月面探査技術

月表面での越夜運用は、将来の月面探査活動では必須の技術である。HERACLES においてローバが越夜運用を想定しているのであれば、そのための重要技術において何らかの形での参画を検討し、技術獲得を目指すべきである。また、将来の国際分担において日本が有人ローバを担当することを目指すのであれば、安全性等の面で有人仕様のローバ実現に向けた必要課題（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。

2.2.3 離陸技術

将来の国際分担において日本が有人着陸機を担当することを目指すのであれば、月からの離陸について、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。

2.3 【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。

2.3.1 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。

2.3.2 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。

2.3.3 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。

提言の概要・3

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

*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

3.1 【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

3.1.1 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。

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、基地建設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。

3.1.2 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、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。

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にすることも有益であろう。

3.2 【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。

3.3 【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いく行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。

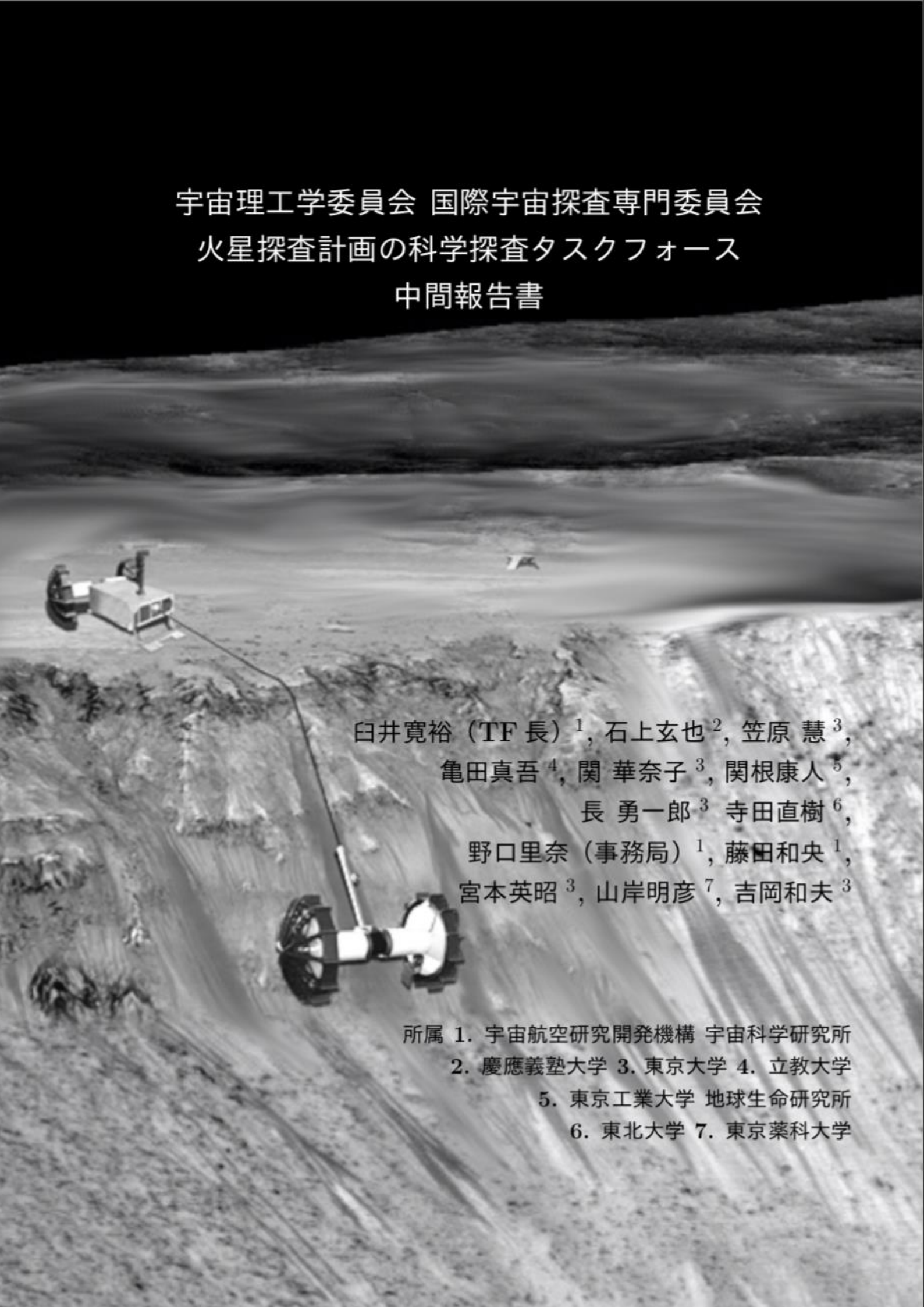
一方、国際宇宙探査は、有人月火星探査を目指しており、そのミッション規模から推察すると日本社会は、資源探査や有人探査を行うなら当然、月火星探査の科学的な成果も期待すると思われる。

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。



宇宙理工学委員会 国際宇宙探査専門委員会 火星探査計画の科学探査タスクフォース 中間報告書

白井寛裕 (TF 長)¹, 石上玄也², 笠原 慧³,
亀田真吾⁴, 関 華奈子³, 関根康人⁵,
長 勇一郎³ 寺田直樹⁶,
野口里奈 (事務局)¹, 藤田和央¹,
宮本英昭³, 山岸明彦⁷, 吉岡和夫³

所属 1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
2. 慶應義塾大学 3. 東京大学 4. 立教大学
5. 東京工業大学 地球生命研究所
6. 東北大学 7. 東京薬科大学

緒言

国際宇宙探査の枠組みで、火星有人探査に向けた火星探査計画の検討が各国で行われている。日本は、火星衛星探査計画（MMX）に続き火星無人探査を計画し、国際宇宙探査におけるメインプレーヤーとしての役割を果たすことが求められている。そのためには、国際的な競争と協力の環境下で日本が果たすべき役割を明確に認識し、その中でプログラム戦略をもってミッションを構築してゆくことが必要となる。そこで、将来の戦略的火星探査プログラムを構築するにあたり、2018 年 11 月、国際宇宙探査専門委員会の下に火星探査計画の科学探査タスクフォース（以下、火星 TF）が設置された。我々、火星 TF チームは、11 月より 90 日スタディーを行い、その過程において、「戦略的火星探査計画に対する意見募集」という形で広くコミュニティからの提言を求めた。コミュニティから頂いた提言を踏まえ、90 日スタディーの結果を（１）国際宇宙探査における日本の火星科学探査、および（２）火星探査に関わり先導する工学・確立すべき技術、の 2 つの観点に基づき提言にまとめた。本稿はその提言の概略であり、詳しくは詳細版を参照いただきたい。

1. 惑星科学における火星探査の意義・科学目標

火星は、内側太陽系の外縁部、すなわちスノーラインに近接する位置に存在するため、外側太陽系からの物質輸送や巨大ガス惑星の移動による影響を最も鋭敏に受けてきたことが予想される。また、初期火星の表層には豊富に水が存在し、生命生存可能な表層環境が地質年代に渡って存在していたことが、これまでの探査から明らかになっている。内部海が存在する氷天体は太陽系にも複数存在するが、表層に液体の水が長期間存在していたのは、地球を除けば火星のみである。このように「A. 生命生存可能環境の普遍性」、「B. 生命生存可能環境の多様性」という両方の根源的問いに対し、火星は唯一無二の重要性を持つ。数多ある太陽系天体のなかでも、火星は上記の両方の問いに迫ることのできる理想的な天体と言っても過言ではない。

そこで、火星 TF では火星探査の科学的意義と探査内容を、惑星科学における科学目標に沿って、以下の 6 項目に整理した（図 1）。

「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

A2. 惑星・衛星の形成・初期分化

「B. 生命生存可能環境の多様性」

B1. 地下熱水環境：鉱物—水—有機物反応系

B2. 生命前駆物質の形成・進化

B3. 大気（海洋）散逸・光化学反応

B4. 生命およびその痕跡

火星探査では、これらを広い時空間スケールを見渡す視点で理解するためのミッション計画が重要となる（以上、6項目に対しまとめた日本の火星探査戦略に関する詳細は詳細版 1.3 節を参照されたい）。

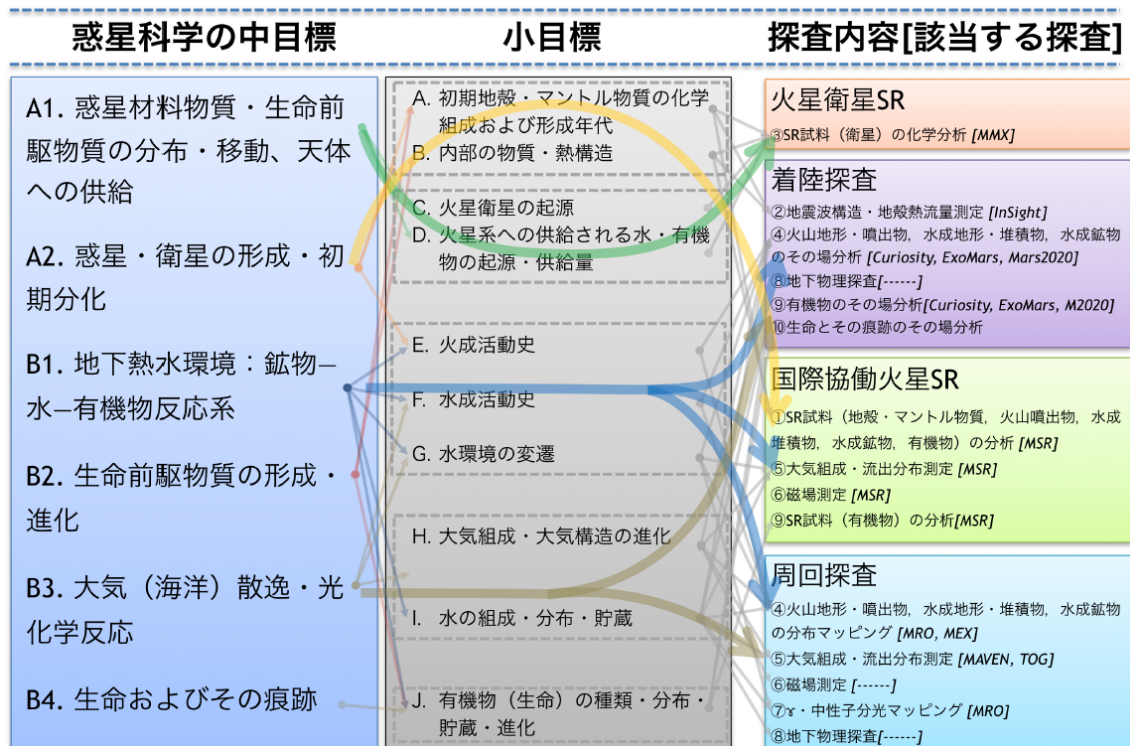


図1：火星探査プログラムにおける科学目標

2. 戦略的火星探査プログラム提案

火星 TF では、2030 年代の「火星地下水圏・生命圏探査火星着陸探査」を今後 20 年のマイルストーンと見据え、2020 年代の「MMX (Martian Moons eXploration)」および、それに続く「小型周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画」の 3 つからなる、**戦略的火星探査シリーズ**を提案する。なお、各探査の意義および惑星科学における位置づけは詳細版 1.3 節、各探査の詳細は詳細版 2.2 節を参照されたい。

我々の提案する戦略的火星探査シリーズは（図 2）、工学および観測装置の技術開発の観点において、月探査やその他の惑星探査ミッションと紐づけられ（図 3）、国際宇宙探査の視点で JAXA 全体の惑星探査ロードマップに組み込まれるよう策定した。つまり、（1）2020 年代中盤の MMX を端緒に、同時期に実施される月着陸探査（SLIM・月極域探査など）で獲得される重力天体着陸技術を生かしながら、（2）2020 年代後半から 2030 年代初頭にかけて、火星での着陸実

証技術の獲得を目指した火星周回機探査を行い、（3）2030年代の本格的火星着陸探査へとつなげていく。また、2020年代から2030年代にかけては、国際協働でのMSR計画が実施される。日本がMSRに主体的に参画していくためには、技術協力やリターンサンプルの共有などで国際化の進みつつあるMMXを参考に、火星周回探査においても国際協働の枠組みでの実施を検討すべきである。



図 2: 火星 TF の提案する戦略的火星探査プログラム案の概略 (JAXA 検討案を一部改訂)

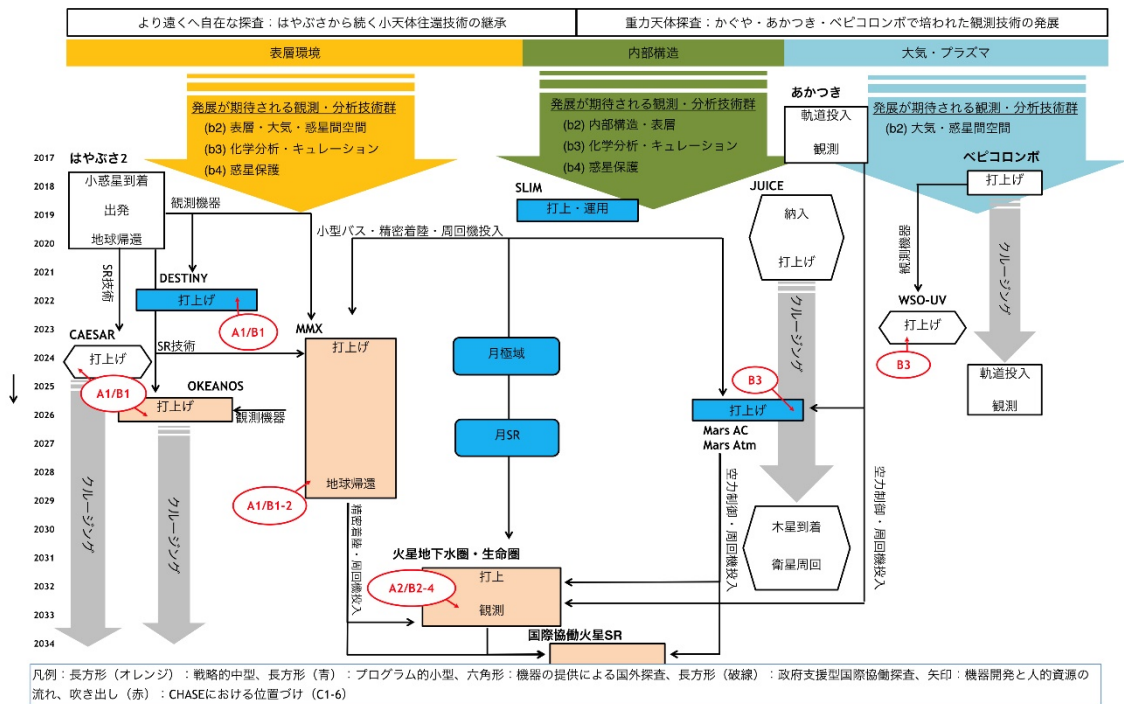


図 3: 惑星探査プログラムにおける惑星探査技術の開発・発展と戦略的火星探査プログラムとの関連(2018 年惑星科学会 RFI 資料を基に改定)

3. 技術開発戦略

3.1 戦略的火星探査に必要な技術

本稿で提案する戦略的火星探査を実現するためには多様な技術が必要である。最終ゴールを火星表層へのアクセスと火星地下水圏・生命圏の探査（2 節参照）と想定し、これを実現するために必要な技術のマトリックスと現在の技術到達度（TRL）の概要を表 1 に示す。いくつかの技術については、既に TRL の高い水準に到達しているが、火星特有の環境や、期待する技術要求が現在の能力を超えること考慮すると、既に宇宙応用が進んでいる技術についても TRL は低くなる場合がある。例えば、深宇宙通信技術は既に多くの探査ミッションで実用化されているが、火星探査アーキテクチャでは大容量通信が望ましいことを考慮すれば、その TRL は低いと考えることができる。大気突入技術は既に地球圏においては実用化されているが、火星大気においては未経験である。

本稿で提案する戦略的火星探査を実現するために特に重要な技術は、大気を有する重力天体の探査目標地点近傍へ正確に着陸する（Entry-Descent-Landing; EDL）技術（詳細版 3.3 節）、着陸点から探査目標地点へアクセスする技術（詳細版 3.4 節）、探査目標地点において試料等を採取する技術、そしてそれらの試料を分析する技術である（詳細版 3.5 節）。また、火星表層環境における熱・電

力技術については、既存の技術の延長上にあるものの季節変化や希薄な大気による影響が顕著な火星表層環境での実績がないため、研究開発が必要な重要技術の一つと考えられる。深宇宙通信技術については、既に探査ミッションにおいて実績があるものの、性能向上が強く期待されている。火星よりダウンリンク可能なデータ容量が増加すれば、探査の成果拡大が期待できるとともに、宇宙エンタテインメント等の需要が高いスピンオフも期待できるからである。しかし、一般に通信容量を増加するにはアンテナ規模を大きくし電力を増加させなければならず、探査機の規模を小さくできないという本質的な制約を与えてしまう。要すれば、小規模の送受信システムを用い低電力で大容量の通信を可能とする通信技術を獲得することが望ましい。

技術	TRL	備考
深宇宙大容量通信	5	深宇宙通信については実用化されているが、戦略的火星探査では、大容量で小型・省電力の通信技術を獲得することが望ましい
高精度軌道決定・軌道制御	9	既に実用化されている
大気突入減速・耐熱	8	地球では実用化されているが火星圏では実証されていない
空力誘導	8	地球ではHSRCによる実証が完了している
超音速パラシュート	4	BBM実証まで完了も、現在は開発プログラムが休止状態にある
自律航法誘導(TRN)・障害物回避軟着陸	5	月圏での実証・実用化の計画が進められているが、現時点では低TRLに留まっている
着陸推進系	8	HTV等のRCSの利用が可能と考えられるが、重力環境では未実証である
探査ロボット・表面自律移動	5	地上でのフィールド試験に留まる。月圏での実証・実用化の計画が進められているが、本質的に火星表層では異なる技術となる
サンプリング技術・機構	5	はやぶさのサンブラは微小重力環境下のみで使用可能で、異なる技術が必要となる
火星表層環境での計測・分析	5	既存の測器で利用可能なものもあるが、多くは新規開発が必要である
表層環境での熱・電力制御 (越夜・越冬技術)	3	実用化された既存技術の延長上にあるが、火星表層環境では机上評価に留まる。
重力天体用の構造・機構	4	重力環境では未実証であるが、地上での評価が可能と考えられる
ダスト環境での機構・潤滑	4	月圏での実証・実用化の計画が進められているが、火星表層環境では本質的に異なる
惑星保護技術 (滅菌設備・検査設備)	4	カテゴリIVはパイロットプラントを用いた基礎研究がおこなわれている段階である

表 1: 戦略的火星探査に必要な技術と技術到達度(TRL)の概要

3.2 戦略的火星探査におけるアーキテクチャと技術開発ロードマップ

戦略的火星探査の実現に必要な技術のすべてを、一つの火星探査ミッションを実行する活動の中で獲得することは、コスト、時間、人的リソースの点でも極めて困難である。従って、個々の必要技術の研究開発を進めながらも、利用でき

る実証済みの技術は最大限活用し、また他の宇宙ミッションで獲得されることが期待されるものを適切に取り込み発展させることによって、火星探査ミッションの実行時にすべての必要技術が獲得されている状況を作り出すことが望ましい。他の宇宙ミッションで獲得される技術を最大限活用するためには、他のミッションとの時系列な相関の中で、火星探査に必要なすべての技術が効率良く最短時間で獲得され、また他のミッションにおける実績や技術の熟成によって高い信頼性を担保できるように、戦略的な技術開発を行わなければならないことを意味する。

戦略的火星探査においても、一度にすべての技術を用いるミッションを実行するのはリスクが高く、必要な技術を前駆的なミッションによって段階的に実証することが適切であろう。この場合、前駆的なミッションに用いられるアーキテクチャと技術は、主ミッションで用いられるそれらと本質的に同じものでなければならないことは言うまでもない。また、将来我が国が国際協働有人火星探査へ参加し、そのアーキテクチャの中で主要な役割を担うことを最終的な目標としている観点からは、火星有人アーキテクチャと調和的な技術の獲得を選択的に行うことが望ましい。火星探査において後発国のわが国は、このような基本的な戦略を採用しなければ、効率的に（最小コストかつ最短時間で）最終ゴールに近づくことができず、将来の国際協働有人火星探査では限定的な参加に留まることが危惧される。このような観点から、本稿で提案する火星地下水圏・生命圏の着陸探査を実現し、また将来の国際協働有人火星探査においても独自の火星探査を継続的に行うことを想定し、これに最も適合性の高いのアーキテクチャ候補および搭載科学観測装置群の検討を行った（表 2-4）。詳細は詳細版 3 章をご参照いただきたい。

#	アーキテクチャ	概要
1	定点着陸実証機	EDLシステムとサービスモジュールから構成される着陸探査に特化した実証機で、MELOS提案の小型版。表層環境へのアクセスが可能で、表層環境探査に必要なほぼすべての技術実証が可能だが、オービタを有しない。
2	化学推進オービタ+オプション地上系	化学推進により軌道投入されるオービタにオプション地上系として飛行機、ペネトレータ、あるいは簡易な着陸機等を搭載したもの。比較的小型のシステムで実現可能だが、表層環境探査のためのEDL実証は極めて限定的。一方、表層環境へアクセスできる点は価値が高い。
3	化学推進オービタ+EDL実証機	化学推進により軌道投入されるオービタにEDL実証を取り込んだもの。表層環境探査に向けたEDL実証のレベルに応じて規模・コストが異なる。最もEDL実証の達成度が大きいものは1を取り込んだ初期MELOS形態となるが、極めて規模が大きなミッションとなる。
4	エアロキャプチャオービタ(MACO*)	エアロキャプチャ（AC）によりオービタを投入するもの。ACによって定点着陸に必要な技術（着陸を除く）の実証が可能であると同時に、科学観測や通信リレー用の軌道プラットフォームが得られるが、表層環境へのアクセスはできない。
5	MACO+オプション地上系	4にオプション地上系（2を参照）を搭載したもの。中型システムで実現可能で、ACにより着陸を除くEDL技術実証も可能。表層環境へアクセスできる点も価値が高いが、表面探査技術の実証は限定的。
6	MACO+EDL実証機	4にEDL実証機を取り込んだもの。EDL実証のレベルに応じてACと重複する部分が発生する可能性が高く、システムも大規模となる。

表 2: 前駆ミッションのアーキテクチャ候補

TRL	3	5	9	8	8	4	5	8	5	5	5	3	4	4	4	
■ = 火星での実証が重要な項目																
	軌道上プラットフォーム	深宇宙大容量通信	高精度軌道決定・軌道制御	大気突入減速・耐熱	空力誘導	超音速パラシュート	自律航法誘導・障害物回避	軟着陸	推進系	探査ロボット・表面自律移動	サンプリング技術・機構	地上での計測・分析	表層環境での熱・電力制御（越冬技術）	重力天体用の構造・機構	ダスト環境での機構・潤滑	惑星保護技術（滅菌設備・検査設備）
1 定点着陸実証機	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	中
2 オービタ+オプション地上系	○	○	○	△	×	△	×	×	×	×	△	×	△	×	○	中
3 オービタ+EDL実証機	○	○	○	○	×	○	△	△	△	△	○	○	○	△	○	中
	完全EDL				○		○	○	○	○				○	○	大
4 エアロキャプチャオービタ (MACO)	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	小
5 MACO+オプション地上系	○	○	○	○	○	△	×	×	×	×	△	×	△	×	○	中
6 MACO+EDL実証機	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	○	○	○	△	○	中
	完全EDL						○	○	○	○				○	○	大

表 3: 前駆ミッションのアーキテクチャと獲得可能な火星探査技術

	Mission	MMX	周回機	着陸機
	Missionのカバーするサイエンス	火星衛星の起源と歴史、 火星の天体衝突・大気 散逸史	太陽に駆動される火星大 気散逸の物理・化学と、 表層及び浅部地下水	38億年前以前に起きていた地 殻熱水活動に伴う地下水圏・ 生命圏
観測の対象	観測器名	観測器とmissionのリンクと開発ステップ		国内開発状況・実績等
内部構造	短周期地震計+広帯域地震計	→ ○		地上基礎開発中、
	熱流量・熱伝導率計測システム	→ ○		LUNAR-A向け開発実績あり、
	小型アクティブ地震計	→ ○		地上基礎開発中、
	地下探査レーザサウンダ	→ ○	→ ○	SELENEに搭載、 高周波化・軽量化などに向け開発中、
	宇宙探査用ミュオグラフィ	→ ○		地上基礎開発中、
	重力偏差計	→ ○		地上基礎開発中、
内部構造、 周辺環境（太陽風）	磁力計	→ ○	→ ○	ERG、MIOに搭載、小型・軽量化に向けた開発中、
表層環境	AOTFを用いた小型近赤外分光画像装置	→ ○	→	MMXに向け搭載品の開発中、
	分散観測用小型分離カメラ	→ ○	→ ○	MMXに向け搭載品の開発中、
	ハイパースペクトラルイメージャー	→	→ ○	SELENE-Rに向け開発中、
	レーザー誘起プラズマ発光分光計	→	→ ○	SELENE-Rに向け開発中、
	ラマン分光計	→ ○	→ ○	MMXに向け開発中、
	K-Ar年代計測器	→	→ ○	地上基礎開発中、
	能動型蛍光X線分光計	→	→ ○	SELENE-Rに向け開発中、
	サンプリングアーム	→ ○	→ ○	MMXに向け開発中、
	サンプリングパッケージ（弾丸型）	→	→ ○	OKEANOSに向け開発中、
	GCシステム	→	→ ○	OKEANOSに向け開発中、
	赤外ファイバを用いた小型レーザ分光器	→	→ ○	地上基礎開発中、
	生命探査顕微鏡	→	→ ○	地上基礎開発中、
	フルカラー3Dイメージング装置	→	→ ○	地上基礎開発中、
	月惑星表面長期その場観測ユニット	→	→ ○（衛星）	地上基礎開発中、
	火星大気中インフラサウンド （微気圧波）計測マイク	→	→ ○	観測ロケット（S-310-41号機）搭載実績あり、低周波 特性の改善などに向け開発中、
表層環境、大気	中性ガス・イオン質量分析器	→ ○	→ ○	SELENE、ERG、Cassiope、MIOなどに搭載実績あり、 また、MMXに向け搭載品の開発中、SELENE-R、 OKEANOSに向けても開発中、
大気	テラヘルツ分光器	→ ○	→ ○	ISS/SMILESの搭載実績あり、小型軽量化のための開発 中、
	紫外線分光器	→	→ ○	ひさき、PROCYONの実績あり、
	高コントラスト光学	→	→ ○	地上基礎開発中、
	中間赤外カメラ	→	→ ○	あかつき、はやぶさ2に搭載、火星に向けた高感度化な ど、開発中、
周辺環境（太陽風）	水素吸収セル	→	→ ○	のぞみに搭載、高性能化に向けた開発中、
	太陽起源高エネルギー電子分析器	→	→ ○	ERG、MIOに搭載、小型・軽量化に向けた開発中、

※)MMXについては、搭載決定機器のみをマークしている。

表 4: 火星探査ミッションに向けて国内で開発すべき機器

4. 戦略的火星探査プログラムの推進体制

4.1 着陸探査学連携ネットワーク

我々が次世代へのマイルストーンとして目指す、2030年代の火星地下水圏・生命圏探査では、重力天体への軌道投入および着陸（EDL）を基礎技術として習得・実証することが最低限、求められる。EDL技術は、MMXおよびSLIMでの習得が可能である。一方、火星探査の歴史を振り返るに、EDLに関しては可能な限り火星での実証試験を行うべきである。そこで、本格的な火星着陸探査のプレカーサーとして、周回機探査との組み合わせも含めた着陸技術実証も視野に入れながら検討を進める（海外先行例：ExoMars Trace Gas Orbiter）。

EDLに加え、我々が目指す火星地下圏探査では、高度着陸、地下観測、掘削といった多くの新規技術を必要とする。これらの新規技術に関しては、宇宙研工学グループおよびイノベーションハブなどとの所内連携による開発に加え、大学共同利用連携を軸に加速させていくべきである（例えば、着陸探査学連携ネットワークの設置）（図4）。着陸探査学連携では、MELOS計画の検討段階より協力関係にある慶応大学・東北大学・千葉工業大学などを中心に、産業界を広く

取り込んだ連携を考えている。着陸探査学連携ネットワークでは、高度着陸・地下観測・掘削に加え、高度な自立走行技術の獲得や、それらの技術獲得に必要な惑星模擬フィールドの整備も行う。これら地上でのロボティクス技術開発の場を提供する着陸探査学連携は、宇宙空間での観測装置・バス系の技術開発・実証を主目的とした深宇宙連携ネットワーク（東京大学宇宙惑星科学機構（UTOPS）が例の1つ）と相補的な協力関係が見込まれる。

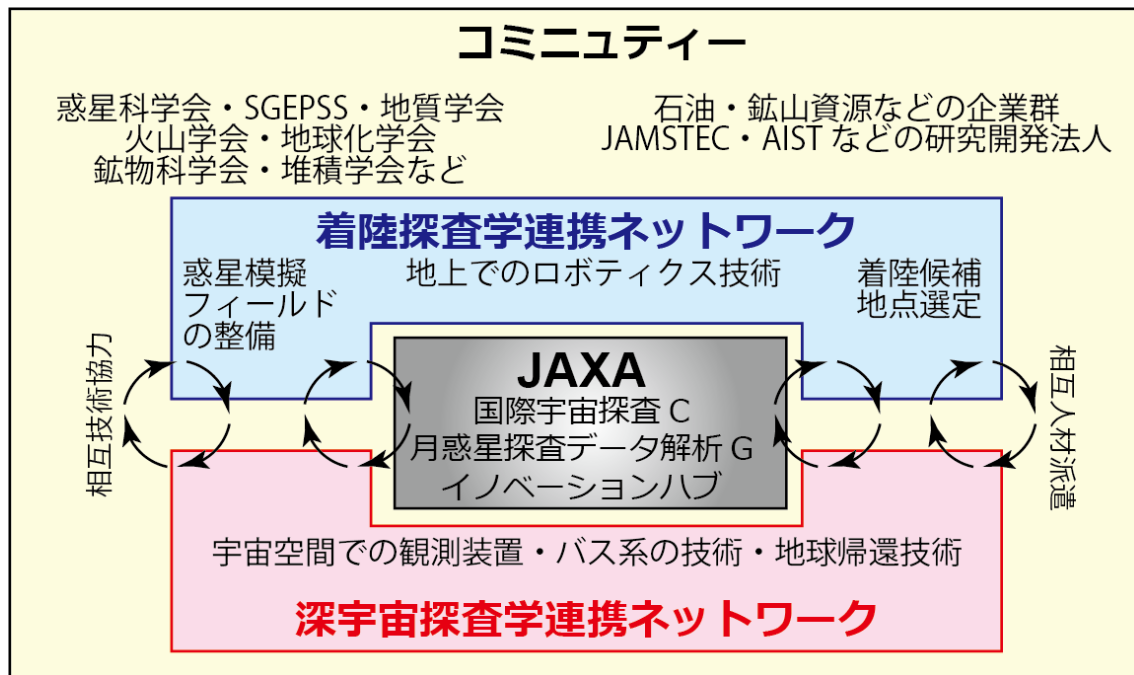


図 4： 推進体制

着陸探査学連携と深宇宙連携との協力で得られる地上および宇宙空間での探査技術の応用先は火星着陸探査にとどまらない。例えば、国際協働での検討が進められている月の極域探査・有人探査では、天体表面移動および掘削が日本の提供すべきキー技術として提案されている。月での技術実証は、自立性が必要とされる火星探査と、地球上での技術実証をつなぐという点において、高い戦略的価値を創出する。月や火星での技術実証により信頼性の担保された各要素技術は、その先にある火星SRや氷衛星探査などの国際協働プロジェクトにおいて、日本のプレゼンス向上に貢献するであろう。

地質学的に多様な天体である火星への着陸探査では、着陸地点の選定が探査のサイエンス価値に直結する。リュウグウなどの小天体とは対照的に、火星に限らず多くの重力天体では、既存の表面分光観測データが充実している場合が多く、それらのデータベースを活用した着陸探査計画立案が求められる。着陸探査学連携では、月惑星探査データ解析グループを受け入れハブとした大学連携の

役割も担う。米国と比較した際、日本の惑星探査コミュニティは地球科学分野（地質学・火山学・水文学など）の研究者の取り込みが十分とは言えない。一方、地球科学の諸分野も、生物学などとの融合を進めつつあるが、同時に地球外にも未開拓のフロンティアを強く求めている。火星は両者の融合に最適な研究対象であり、“地球・惑星科学”を文字通り“地球惑星科学”とする可能性を秘めている。

4.2 サンプルリターン探査（MSR・MMX）に向けた PP およびキュレーション体制

太陽系の歴史、惑星進化、宇宙と生命の起源の解明を目指す惑星科学・惑星探査はこれまでも我が国の宇宙科学における中心的なプロジェクトとして選定されてきた。探査のなかでもサンプルリターン探査は重要な特徴を持っている。世界初の小惑星サンプルリターンに成功した「はやぶさ」が世界に与えた影響は大きく、実証科学と技術開発の重要性を格段に高め「はやぶさ2」の追い風となった。「はやぶさ2」以降も、火星衛星からのサンプルリターン（MMX）や火星からのサンプルリターン（MSR）への参画が検討されている。サンプルリターンは持ち帰ったサンプルを地上での大型の高性能の分析装置で解析することを可能にするという点で、探査機での現場分析に比べて格段に分析精度を上げることができるという利点を持っている。

また惑星等の天体探査では惑星保護（Planetary Protection: PP）も重要な活動となる。惑星保護活動では二つの観点での検討が必要となる。それは探査対象となる天体の将来の探査を妨げないように天体を保護する活動と、サンプルリターンにおいて探査天体から地球環境を汚染する物質を不用意に持ち帰らないように地球環境を保護する活動である。

サンプルリターン探査から科学的成果を最大限に引き出すためには、試料採取装置（サンプラー）開発、キュレーション、帰還試料分析との間の連携が非常に重要となる。本項ではこれらサンプルリターン探査技術および惑星保護に関してまとめる。内容は基本的に日本惑星科学会 RFI 文書

<https://www.wakusei.jp/~RFI_kaitei2017/for_all/>を参考にしている。

第 3 章 理学検討

3. 理学検討

本文書は、JAXA 宇宙探査シナリオの改訂に資するものとして、

- ・理学目標
- ・理学ロードマップ
- ・ミッション例

について、国際宇宙探査専門委員会に提示することを目的として、以下のメンバーによりとりまとめられたものである。

とりまとめ：

春山純一（JAXA）、白石浩章（JAXA）

執筆委員：

大竹真紀子（JAXA）、寺田直樹（東北大）、宮本英昭（東京大）、
山岸明彦（東京薬科大）

執筆援助者：

倉本圭（北海道大）、佐伯和人（大阪大）、田中智（JAXA）、長岡央（JAXA）、
西野真木（名古屋大）、諸田智克（名古屋大）
（敬称略・順不同）

なお、3.3 節で挙げたミッション例は、本報告書では月・火星についてのみ対象としており、JAXA 宇宙科学研究所のRFIに対する倉本圭氏（惑星科学 会会長 当時）による回答「惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表」（2015 年）の改訂版（2018 年）を参考としている。

この中で、月探査ミッション例については、「月裏側原始地殻サンプルリターン探査」と「月面その場観測による KREEP 物質・年代測定のプロセス探査」は、戦略型中型ミッション候補、「ペネトレータ技術実証探査」はプログラムの小型計画案、「月の地下空洞直接探査」は将来探査コンセプト提案と位置づけられている。

火星探査ミッション例については、「火星地下水圏・生命圏の着陸探査」は戦略型中型ミッション候補、「火星地下空洞直接探査」は将来探査コンセプト提案、「火星周回大気探査」は将来探査コンセプト提案、「火星宇宙天気・宇宙気候探査」はプログラムの小型計画案として位置づけられていることを特記する。

3.1 理学目標（大目的、目標、課題）

(1) 惑星科学の大目的

惑星科学の大目的は「ハビタビリティ」にかかわる知識を増やしていくことである。すなわち、

- (1) 過去にどのように生命や生命を育んだ環境「生命圏」が生まれ、その後、進化維持されたかという「持続条件」といった知識を増やしていくこと
- (2) 今後、我々人類の住む世界「居住圏」を宇宙へと「拡大」していくうえで必要な宇宙の知識を増やしていくこと

である。

(2) 惑星科学の3大目標

上記の大目的を達成するため大きな目標として以下の3つを置くことができる。

1. 太陽系の様々な形態を見せる天体が、どのようにして形成したのかを知る【起源】
2. 太陽系天体という場で提供された様々な環境が、いかに複雑な物質進化を可能にしたのか、また一部では生命発生・進化をも可能にしたのか、その道筋を理解する【進化】
3. それが宇宙の中でどれくらいに普遍的なのか、あるいは特殊なのかを知る【現況】

こうした認識にたち、太陽系探査の戦略指針は、

- 小天体（小惑星、彗星、太陽系外縁天体）探査
- ガス/氷惑星（木星・土星・天王星・海王星）とその衛星系
- 岩石惑星（水星・金星・地球・火星）と月探査

のそれぞれにおいて、大目的、大目標を意識して策定される。

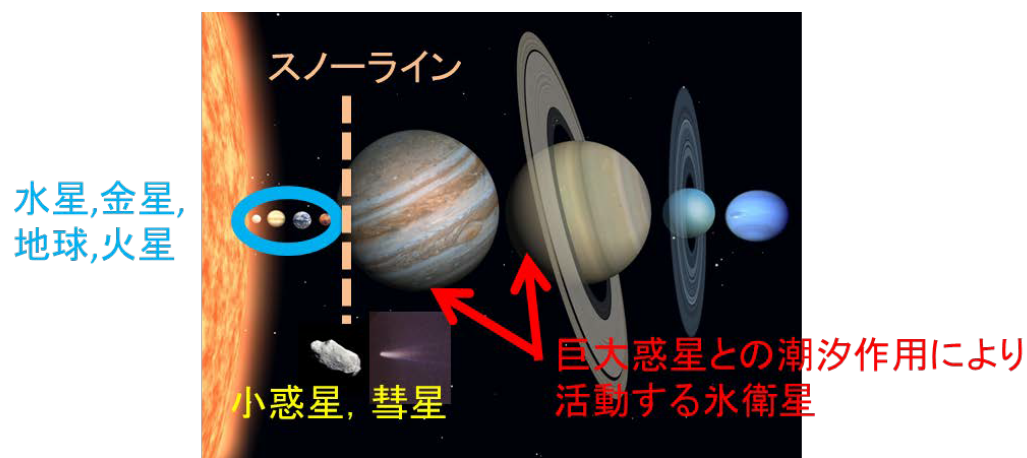


図 2.1-1 太陽系の構造

国際宇宙探査の今後、喫緊の対象である月・火星探査は、すなわち「地球型惑星領域での『ハビタビリティ』の知識を増やしていく探査」に貢献する。上記の戦略指針に沿って掲げている解決を目指すべき課題は、

- ① 「ハビタビリティ」の成立・持続/変化・終焉にかかわる天体での現象（物質・エネルギーの循環，固定，散逸・消失）を理解する
- ② 「ハビタビリティ」の成立・持続/変化・終焉にかかわる天体への外部からの物質・エネルギーの供給を理解する

ことであろう。その課題解決に向けて何を調べるべきなのか，そしてそれを目指す現行・準備中の探査の対応関係を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 解決を目指すべき課題,調査対象，探査の関係

課題	調査対象	現行・準備中(プロジェクト化した)探査例
①「ハビタビリティ」の成立・持続/変化・終焉にかかわる天体での現象 (物質・エネルギーの循環，固定，散逸・消失)を理解する	・天体内部 3 層 -地殻, コア, マントル ・天体表層下 -水圏, 岩圏, 生命圏 ・天体表面 -(外部因子) 太陽光・放射線・プラズマ粒子, 隕石・ダスト -(内部因子) 水, 大気, ダスト, 溶岩, 磁場, 放射性物質, 生命 ・天体上層 -海洋圏, 大気圏, 電離圏・磁気圏, (輪・衛星)	金星周回探査:あかつき(JAXA) 水星周回探査:BepiColombo(JAXA/ESA) 月着陸探査:SLIM(JAXA) 木星探査:JUICE(JAXA/ESA)
②「ハビタビリティ」の成立・持続/変化・終焉にかかわる天体への外部からの物質・エネルギーの供給を理解する	・(生命)関連物質(水, 炭素・窒素等元素, アミノ酸等有機物)ならびに生命(細胞) ・太陽光・放射線・プラズマ粒子, 隕石・ダスト	小惑星 SR ^(#) :OSIRIS-REx(NASA) 小惑星 SR:はやぶさ 2(JAXA)

* 下線は国内で実施かつ打ち上げ済みの探査, 斜字は国内もしくは国際協力により準備中の探査. 他は海外の探査.

(#) SR: サンプルリターン

第4章 工学・技術検討

4.1 工学技術ロードマップについて

国際宇宙探査において、SLIM ミッションにて高精度着陸技術を獲得したあとに、月極域探査、月周辺有人探査、月サンプルリターン、火星着陸表面探査、有人探査計画などが議論されている。これらのミッションを推進するにあたって、日本として戦略的に工学技術をプログラマ的に研究開発することが重要である。すべての項目を日本単独で開発するというよりも、得意な分野および獲得が必須の項目を推進し、他の技術は、諸外国との共同で進めるものもあり、今後の詳細な議論が必要である。専門委員会で議論したロードマップの案を図 4.1 に示す。

国際宇宙探査を推進するにあたって、必要な工学技術の項目を以下に列挙する。詳細については、別途述べる。

- ・ 自立システム技術（電源・熱・通信・宇宙機内無線化技術）
- ・ 軌道決定（3Way ドップラ・Real-Time ΔDoor）
- ・ 着陸技術（無人探査・有人探査、推進系（化学推進・電気推進））
- ・ 表面移動技術（探査ローバ、長距離移動、広域分散探査、サンプル採取、有人探査車）
- ・ 自動化・自律化技術（イメージングデバイス・3次元計測技術・環境認識・行動計画）
- ・ 深部・内部探査（掘削技術）
- ・ 小型プローブ（子機探査・ペネトレータ）
- ・ ランデブドッキング
- ・ 月面拠点へのステップ（拠点構築・越夜技術・放射線防護技術）
- ・ 有人探査支援技術（有人探査支援技術、環境制御、生命維持技術（ECLSS））
- ・ 地上系（通信システム、ネットワーク、高度化（AI、予兆検知））

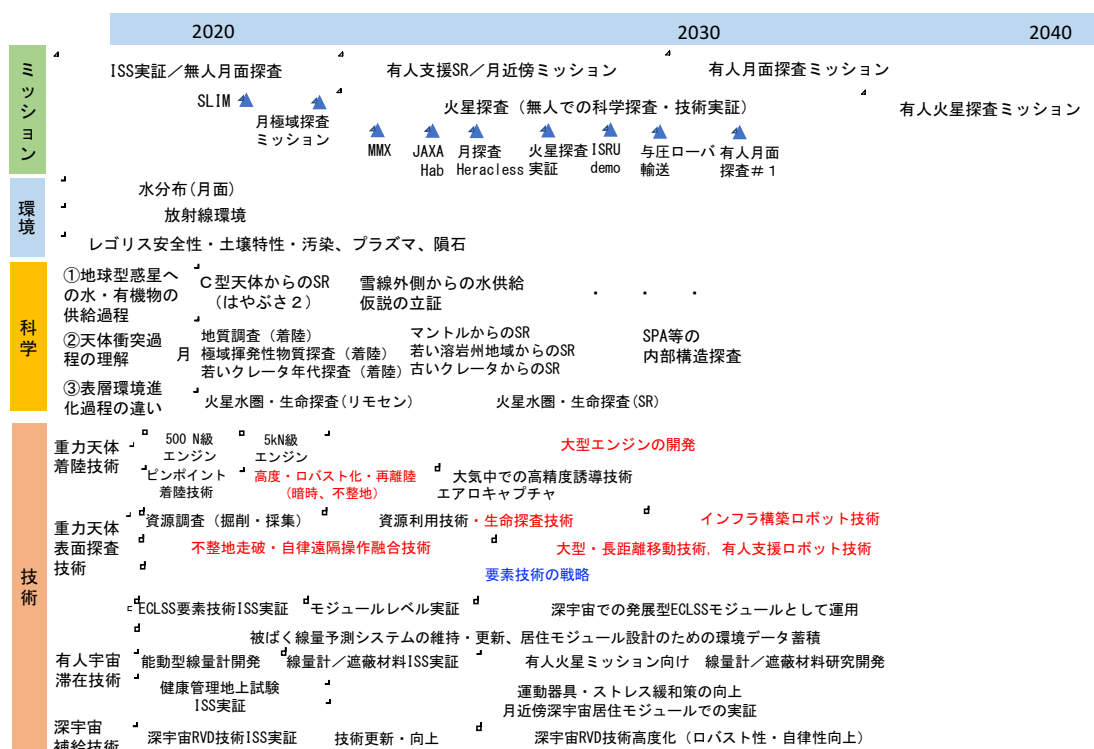


図 4.1：統合ロードマップ

4. 18 ミッション例

ここでは工学的観点から工学技術実証かつサイエンスをあわせて行うミッション例を示す。

- A ペネトレータミッション
- B 縦穴探査ミッション
- C 子機探査ミッション

A. 小型プローブ（ペネトレータ）

ペネトレータは周回衛星から分離し高速（秒速 300m 程度）で貫入させる観測プローブのことである。ここでは極域（資源）探査の一つとして、ローバやランダが容易に調査できない日陰領域探査として提案する。

(1) ペネトレータとは

「ペネトレータ」は周回衛星の数十 km 上空から分離後、軌道速度をキャンセルし自由落下によって月面到達時に約 300m/s の速度で表層下数 m 程度貫入する槍型のハードランダ観測装置である。我が国では 1990 年からプロジェクト化した LUNAR-A 計画の科学搭載機器である。月面の場合、赤道域における表層下の温度は約-20℃で非常に安定しているため、熱制御を必要とすることなく科学観測およびデータ送信が長期間可能である。ペネトレータの最大のメリットは軟着陸機に比較して軽量で月面に観測装置を直接設置できる点である。1 回のミッションで複数機を搭載することも可能であり、LUNAR-A 計画の場合は本体と分離装置をあわせて 46kg のシステムを 2 機搭載し、月の地震（月震）、熱流量を約 1 年間にわたって観測する計画であった。本プロジェクトは 2007 年に母船の老朽化やペネトレータの技術開発の遅れからキャンセルとなった。ペネトレータ自体はその後開発を続行し、2011 年に技術開発を完了させた。

ペネトレータは日本だけでなく、他国でも開発され、ロシア MARS96、米国の DS-2 ミッションは打ち上げ実績があるが、いずれも成功していない。

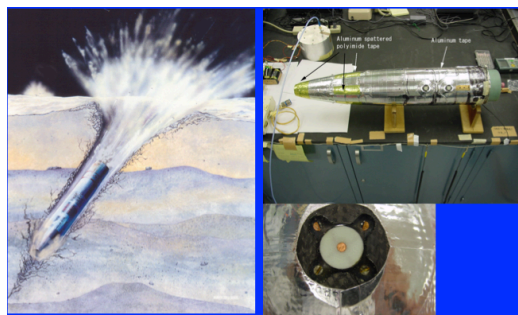


図 4. 18. A-1：宇宙科学研究所で開発を行った月探査用ペネトレータ構想図（左）FM 仕様機体（右上）全長約 800mm，最大直径約 15cm．熱物性計測センサ（右下）（センサ直径約 10mm）

(2) ペネトレータによる極域探査のメリットとデメリット

ペネトレータを極域の探査に用いることにより、考えられるメリットは下記の 3 点である。

- a) 軟着陸機では設置困難（もしくは不可能）な地域、例えば、長期日陰領域のクレータ内部などに、設置を試みるのが容易である。観測目的によって、重量を軽減させることも可能である。軟着陸機からローバなどによって目的地に到達する手段も考えられるが、長期日陰領域の中心付近など到達困難（もしくは不可能）な地域に直接投下することで設置することができる（LUNAR-A プロジェクトで設計した投下位置精度は 10km 程度）。

- b) ペネトレータは、月レゴリスに数十 cm～数 m 貫入するために、最表層野状態ではなく、表層地下の情報を得ることが可能である。これはリモートセンシング探査では得ることが困難もしくは不可能な情報である。
- c) 上述したように、1機の重量が軟着陸機と比較して比較的軽量（数十 kg 程度）であるため、複数機の観測プローブを複数のターゲット地点に設置することが可能である。
- 一方、下記の2点が主要なデメリットである；
- d) ローバのように観測点付近を面的に動けず、物質分布の「2次元的」な調査はできない。複数機を搭載することである程度このデメリットは緩和できるが、面的な調査はできない。
- e) 高速で地面に衝突貫入するために搭載機器、構造体は高い衝撃耐性を必要とする。このために、搭載できる観測機器は制約をうける。

(3) 極域でのペネトレータ搭載機器候補

LUNAR-A におけるペネトレータでは地震（月震）、地球物理学的な観測で月内部構造を明らかにすることを目的として下記のセンサ開発が進められた：

- a) 地震センサ、 b) 熱流量センサ、 c) 加速度センサ

これらの中で、b) 熱流量センサは表層の温度情報を得ることができ、極域へ設置した場合にも適用可能である。また、c) 加速度センサについても表層の地盤情報（地盤の硬さ）を得ることが可能である。しかしながら、月極域探査においては極域における水などの揮発性物質が何ほどの程度の存在量があるかがとくに注視されており、揮発成分などを定量分析できる搭載機器は我々において開発実績を有していない。しかし、打ち上げ実績のある米国の DS-2 ミッション、ロシアの MARS96 ミッションでは、元素分析、水の定量分析などを目的とした分析機器を搭載した実績がある。国際共同ミッションとして月の極域探査を実施する体制を前提とするならば、搭載機器の技術情報交換、開発された観測機器の搭載検討などは大きな障害はないだろう。

次表にそれぞれの観測機器を整理して示す。

表 4. 18. A-2：打ち上げ実績を有するか FM レベルまで開発が完了した観測センサ

観測種別	観測センサ	補足
地球物理観測機器	地震計 (L, M) , 加速度計 (L, M, D)) 熱流量, 熱伝導率, 温度 (L, M, D) 磁力計 (M)	
物質分析機器	α線スペクトルメータ (M) γ線スペクトルメータ (M) X線スペクトルメータ (M) 中性子スペクトルメータ (M)	中性子で水素検出が可能
揮発物質分析機器	水検知（レーザ加熱式）センサ (D)	
その他	カメラ (M)	

L: LUNAR-A, M: Mars96, D: DS-2

(4) 極域ペネトレータの技術的課題

極域は赤道域とは異なり非常に低温（100K 以下）と考えられ、長期間観測が困難である。我々は以前にエウロパにペネトレータを設置することを前提とし、搭載している電池を観測装置および通信だけでなく、自己発熱をさせて機能を維持させるコンセプトでミッション運用期間を算定したことがある。LUNAR-A ペネトレータと等重量の電源を搭載することを仮定したときの運用寿命は約 50 時間程度であった。観測点を固定位置で設置した後の環境測定 of データ収集や物質分析観測などを実施し、データを伝送する時間は十分に確保できると考えられる。

また、宇宙工学委員会戦略的開発研究「次世代ハードランダの研究開発、火星および木星衛生へのアプローチ」（提案代表者：後藤健）が承認された。研究主要課題は次の5点である；

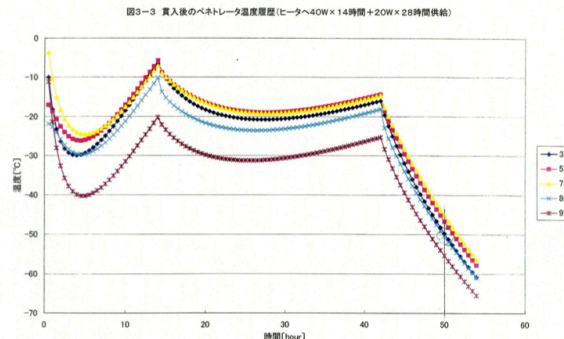


図 4.18. A-3：温度約 100K 下で内部ヒータで温度保持させたときの温度プロファイル
(それぞれの線の違いはペネトレータの先端からの位置 (mm))

- ① 極低温での熱制御技術
- ② 大気のある天体への突入，減速，着地技術
- ③ 極低温動作可能な耐衝撃蓄電および電源システム
- ④ 小型省電力な耐衝撃通信システム
- ⑤ 耐衝撃構造設計技術の高度化

これらの中で②を除く項目すべてが、月面極域ペネトレータの開発に直結しており、我々が提案するペネトレータの技術開発はすでにスタートは切った状態であると言える。また、我々は地球火山使用ではあるが、投下型ペネトレータの開発をインハウスで続行している。ペネトレータの開発については 30 年を超える長期にわたっており、その間 LUNAR-A ミッションがキャンセルされるなど、多くの困難を経験しているが、技術的なノウハウや新たな利用アイデアを求めてアクティビティを持続的に保持している。

B. 縦穴探査

日本の月周回衛星「かぐや」に搭載された電波レーダ（月レーダサウンダ）で取得したデータを解析し、月の火山地域の地下数 10m～数 100m の深さに、複数の空洞の存在を確認している。地下空洞の一つは「かぐや」が発見した縦孔を東端として、西に数 10km 伸びた巨大なものである。

月には、かつて溶岩が流れた際、地下に形成される空洞（溶岩チューブ）が存在していると考えられていた。月の地下空洞は、隕石により破壊されている月面とは異なり、かつて月に磁場があった証拠や月に取り込まれた揮発性物質（たとえば水）などが見つかる可能性があるなど、様々な科学的な課題の解決が期待できる場所として重要である。また、将来の月面基地建設地の候補としても大変重要である。地下にあることで月面の厳しい環境（微隕石の衝突や強い放射線）から機器や人を守れることや空洞内の温度が比較的安定していることなど多くの利点があるため、将来の有人活動の拠点にも適している。

惑星科学の大目標は、宇宙のハビタビリティ（生命を育んだ/育みうる惑星環境、人類の活動領域の拡大可能性）を理解することである。月の縦孔・地下空洞は生命を育んだ/育みうる惑星環境を理解するために様々な点で適していると考えられる。

縦穴へのアクセスは工学的にも挑戦的なテーマであり、以下の研究テーマがある。

- ・ピンポイント着陸技術
- ・縦方向移動技術

- ・縦穴底の不整地探査
- ・無線エネルギー伝送や通信技術など

国際宇宙探査において、月探査を行う際に、小型のプローブミッションにて、縦穴の中のモニタリングを行い、早期に縦穴探査を行うことは意義がある。その後、本格的な探査を行うかの判断が必要と考える。

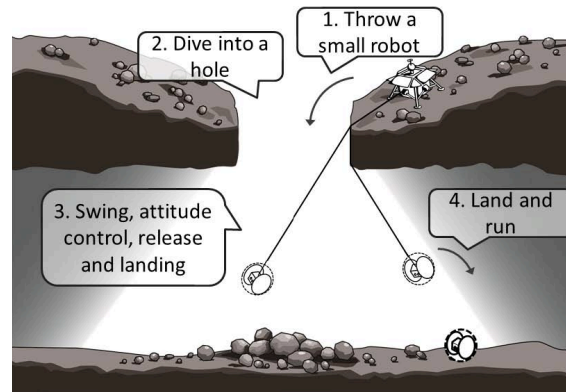


図 4.18. B-1：縦穴探査のイメージ図

C. 小型プローブ（子機探査）

【前提条件】国際宇宙探査ミッションにおいて、小型衛星の利用に関して検討する。ここでは今後約5～10年後までの探査、すなわち2020年代探査を想定する。また、一般に小型衛星とは、100 kg程度以下の衛星を指すことが多いが、共通した定義はない。ここでは150 kg以下の衛星を対象とし、特に10 kg級の超小型衛星キューブサットを想定する。本来、キューブサットは1 U = 10 cm × 10 cm × 10 cmの超小型衛星を意味していたが、近年では1 Uを単位として3U, 6U, 12U等の超小型衛星もキューブサットと述べられる。1 Uを基準として（事実上）規格化されたコンポーネントや放出機構が存在する点が利点である。

【小型衛星の能力・リソース】近年の小型衛星技術の発展および利用は目覚ましいものがあるが、その能力には当然ながら制限があるため、はじめに小型衛星の能力および可能リソースの概要を掴む。現状、通信用メガコンステの想定は150 kg超の小型衛星が主力、リモセンGSD 1 m級であれば100 kg級が主力、リモセンGSD数m級で10 kg級となる。これらはミッションによって定まるペイロード質量・体積および使用可能電力によって制限されている。また、いずれも高度なミッションを実施している小型衛星は10 kg級であっても3軸制御を達成している（PlanetのDove等）。具体的なペイロードサイズおよび電力の制限は、バス機器の性能および展開機構とのトレードオフにより定まる。例えば、65 kgの小型探査機PROCYONの例では、3軸姿勢制御と深宇宙Xバンド通信機器を装備し、フライバイ用望遠鏡（6.0 kg）、LAICA（2.1 kg）、推進系（9.9 kg）を搭載し、最大発生電力は300 Wであった。さらに、SLSキューブサット（SLS-EM1に相乗りする複数のキューブサット達）の1つである10.5 kgのEQUULEUSでは、ミッション機器（1.27 kg）、推進系（2.34 kg）、最大発生電力は51 Wの予定である。なお、発生電力の点で言えば、他のSLSキューブサットであるLunarIceCubeにおいては、最大発生電力80 Wを予定している。したがって、この2機の例では、30%前後がペイロードおよび推進系に利用されている。さらに、基本的なバス機器およびミッションペイロードの質量の他に、推進系能力に対しても大きな制約がある。そもそも2013年頃までは、推進系の搭載自体が150 kg以下の小型衛星に対して皆無であった。近年になり、100 kg超の小型衛星に対してはグリーンプロペラントによるモノプロペラント推進の適用（SkySat）、50 kg級において過酸化水素スラスタやイオンスラスタの適用（ほどよし1, 3, 4号, PROCYON）、キューブサットにおけるコールドガス（液化ガス含む）スラスタの適用が

登場した。いずれも未だ実績が浅い上に、 ΔV 能力は 10 m/s 級が多く（これは搭載推進剤質量の割合が小さい、つまりドライ質量割合が高いことに大きく起因する）、高い場合でも 100–300 m/s 級である。

【現実的な小型衛星ミッション】これらの状況を見て、2020 年代探査を想定した場合、小型衛星による単独月面探査、つまり小型衛星が運ぶ小型ローバによる探査、は相当に技術的ハードルが高い。最大のネックは月への単独着陸のための推進系である。この意味で、SLS キューブサットの 1 つである JAXA の OMOTENASHI は、キューブサットによる月面着陸計画で野心的なミッションである。しかしながら、キューブサットの大半は固体スラスタが占め、ハードランディングを想定し、月面に着陸後わずかの間生き延びることが目的である。したがって、軌道上からの月面探査支援がより現実的な小型衛星用途と考える。実際、月面において本格的な（広域かつ実用的）地質調査および採掘を行うためには、多くのインフラが必要となる。その重要要素として、通信および測位が挙げられる（例えば、KOMATSU が展開する KOMTRAX の月面バージョンのように）。特に、小型衛星の最大利点は、その軽量さおよびコストの点から、コンステレーション配置への優位性である。月軌道上にイリジウム（70 機級）や GPS（30 機級）を展開することは、2020 年代であっても輸送能力の観点から非現実的である。一方、小型衛星、特に 10 kg 級キューブサットであれば、50 機展開であっても合計 500 kg、放出展開機構をいれても 1000 kg 級と見積もられ可能性が出てくる。

【本検討の対象】月軌道における小型衛星コンステレーションによる通信網と測位システムの構築は、地上インフラシステムの自然な延長であり、既にいくつかの提案・検討がなされている。なお、両者 2 つのコンステレーションが通常路線であるが、リソースに余裕ができれば単一のコンステレーション（キューブサット）に両機能をもたせる可能性もあるだろう。本検討では、キューブサットコンステレーションによる月面測位システム（Lunar Positioning System by CubeSats Constellation: LPS-CC）に焦点をあてる。この理由は、LPS-CC に関する提案や検討が既に存在すること、測位システムでは通信に比べて特殊な装置（局）が必要になること、限定領域（後述）であれば通信網は必ずしもコンステレーションが必要ないこと等による。また、近年における、発電能力の向上（80 W by 6U キューブ）、深宇宙探査（月以遠での探査）通信技術の向上（PROCYON や EQUULEUS）、通信レートによる調整が可能、という点から、通信コンステは技術的難易度が（楽観的に見て）より低いと見ることもできる。

【測位システム構想例】測位衛星システムにおいて必須となる装置は、Space segment（人工衛星）、Ground segment（地上局）、User segment（レシーバ）の 3 者である。通信網と比較としての大きな違いは、Space segment（人工衛星）における原子時計の必要性和 Ground Segment（地上局）の存在である。特に、地上局は、原子時計のドリフトを補正するため、ならびに、Space segment 自体の測位を実施するために不可欠であり、GPS においては地球上に多数の局を有する。したがって、LPS-CC を構築するための必須課題は、

- ・コンステレーションの構築および維持能力
- ・人工衛星自体の通信能力（vs Ground Segment & vs User Segment）
- ・人工衛星における原子時計
- ・Ground segment の構築

の 4 者といえる。

LPS-CC の構想・検討例として、A. Batista, et al. (2012 @ WorldComp 2012 Proceedings - Embedded Systems and Applications) , R. Raychev, et al. (2016 @ 4th Federated and Fractionated Satellite Systems Workshop) , M. Wijne, et al. (2018 @ IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 46) 等がある。これらにおいて共通している点は、Space segment において核となる原子時計に対して、チップ型原子時計 (CSAC: Chip-Scale Atomic Clock) の適用である。この点に関しては同技術の急速な技術発展が後押しとなっており異論の余地はないであろう。一方で、意見が別れており大きな課題である項目が Ground Segment (地上局) である。これについては、大きく 3 つの方法があり、地球局、リレー衛星、そして、月面局によるものである。地球局は、地球上の”地”上局から測位を行うものであるが、受動測距では精度に問題が、能動測距では電力に課題が生じる。リレー衛星は、地球局の難点を中継役となる大型衛星により補う方法である。中継衛星の配置は、10,000 km の高高度月軌道やラグランジュ点が想定されている。月面局は月面上に配置された地上局、”月”上局、である。現地球上測位システムをそのまま延長した構想であるが、建設および維持コストの増加が一番の問題である。特に、極域においては長期間の越夜対策が大きな課題となる。

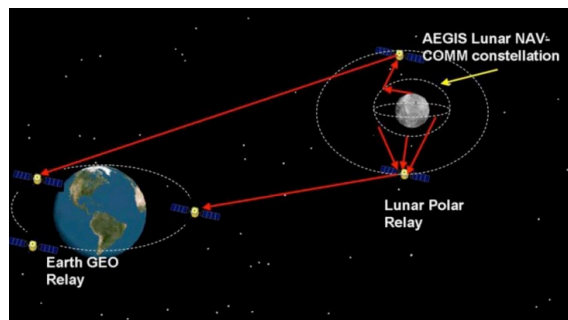


図 4. 18. C-1 地球局とリレー衛星による Grand segment の構築 (A. Batista, et al.)

【検討上のアレンジ】2020 年代における月探査支援という前提であれば、月面全域を当初よりカバーする必要は少ない。例えば、水資源の重要性を考えると初期探査として極域の重点的な探査が期待されている。したがって、最初は月面のある領域のみを集中的にカバーするコンステレーション (準天頂衛星のような) の導入からはじめ、最終的に、2030 年代以降において月面全体をカバーするインフラ構築を行うことは妥当といえる。測位には地上 (月上) から同時に最低 4 機の Space segment が見える必要であり、全球においてこれを満たすコンステレーションが GPS 等の 30 機コンステレーションである。一方で、極域限定でこの条件を考えた場合、例えば楕円軌道 6 機により常時 4 機が見通せる配置も可能である (本来は軌道面が異なる方がより良いが)。10 機以下のコンステレーションは既に、地球近傍においていくつか存在しており、放出機構等の技術的課題も少ない。

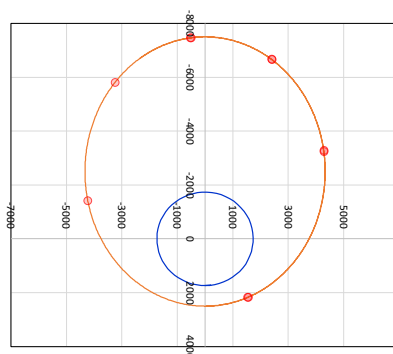


図 4. 18. C-2 月楕円軌道における 6 機配置。縦軸横軸は距離で単位は km ; 青線が月半径の円 ; オレンジ色が楕円軌道 ; 赤点がキューブサット

【コンステレーションへの課題】推進技術. Space segment の重要な要素はコンステレーションの配置ならびに維持である. 上述のように超小型推進系は登場から間もないが, これまでの宇宙技術に比べると格段に早い速度で新技術の登場・実証が進んでいる. 実際に, 2018 年春には電気推進史上初となる FEED スラスタの宇宙実証が達成された (Enpulsion). ヨウ素を利用したイオンスラスタの宇宙実証も SLS キューブサットとして予定されている (Busek). 他に, 水を推進剤としたレジストジェットスラスタ (東京大学, Deep Space Industry). 特に, 電気推進を利用した推進系では, 近い内に 1 km/s の ΔV が見えている. 月面着陸に要するような短時間噴射は不可能であるものの, キューブサット単独によるコンステレーションの構築 (大きな軌道遷移) やその維持は可能となりつつある.

FEED; IFM-nanotruster

By ENPULSION

- インジウム
- 0.9 kg, 40 W, 5000 Ns, 0.35 mN, 2000 s
- 2019実証予定(SLS-EM1)

イオンスラスタ; BIT-3

By Busek Co. Inc.

- ヨウ素
- 3.0 kg, 80 W, 40000 Ns, 1.24 mN, 2600 s
- 2019実証予定(SLS-EM1)

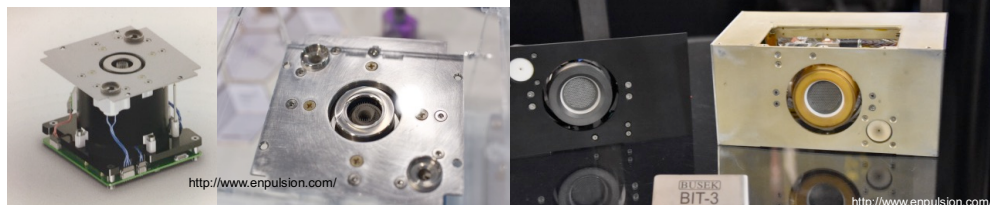


図 4. 18. C-3 キューブサット用電気推進機 :

【民間利用】また, このような月面インフラ構築およびキューブサット利用を検討する上で, 民間企業および民間投資の利用は欠かせない. 現在, 多くのスタートアップ企業が小型衛星 (10–200 kg) を軸として宇宙領域に参入し, 数億から数十億レベルの民間投資が多数注がれている (稀なケースとしてさらに桁数の多い投資も存在). 現在の主戦場は LEO であるが, 既にいくつかの企業は新宇宙へと目を向けている (Planetary resources, Astrobotic, Ispace, Deep space industry, etc). 実際, 国際月探査をビジネスチャンスと見る企業は多いと聞く. 既に, 小型衛星の量産技術を獲得している企業 (Planet, OneWeb, 等) の存在もあり, 国として国際月探査を進める上でも, 民間企業および民間投資を有効に活用することは不可欠である. 特に, キューブサットであれば, 打ち上機の余剰能力を利用して相乗りの積極的な活用が可能となる. 例えば, 民間による測位キューブサット実証機 (1–10 機) を, 官製月探査機と相乗りで募集し, 開発費用のみを民間負担とすれば現在の民間投資レベルで十分に対応可能である. また, キューブサット測位/通信システム利用 (購入) のローンチカスタムとして国が正式に契約を結ぶことも, 民間の自律的なサイクルを築くために有用である.

執筆者一覧（敬称略）

- 4.1 工学技術ロードマップについて【久保田（ISAS）】
- 4.2 表面移動技術（探査ローバ）【石上（慶応大学）】
- 4.3 表面移動技術（広域分散探査）【石上（慶応大学）】
- 4.4 深部・内部探査（掘削探査）【石上（慶応大学）】
- 4.5 ランデブドッキング【津田（ISAS）】
- 4.6 軌道決定【竹内（ISAS）】
- 4.7 自立システム技術（電源）【久木田・三好（JAXA）】
- 4.8 自立システム技術（通信）【戸田（ISAS）】
- 4.9 自立システム技術（熱）【岡崎（JAXA）・小川（ISAS）】
- 4.10 マニピュレーション（アクチュエータ）【大槻（ISAS）】
- 4.11 自動化・自律化技術（イメージングデバイス）【大槻（ISAS）】
- 4.12 自動化・自律化技術（3次元計測技術）【水野（ISAS）】
- 4.13 自動化・自律化技術（環境認識・行動計画）【久保田（ISAS）】
- 4.14 有人探査支援技術【金子（JAXA）】
- 4.15 環境制御・生命維持技術（ECLSS）【金子（JAXA）】
- 4.16 有人支援ロボット（自動化・自律化）【金子（JAXA）】
- 4.17 放射線防護技術【金子（JAXA）】
- 4.18 ミッション例
 - A. 小型プローブ（ペネトレータ）【後藤（ISAS）】
 - B. 縦穴探査【久保田（ISAS）】
 - C. 小型プローブ（子機探査）【小泉（東京大学）】

第 5 章 国際宇宙探査と宇宙科学探査

5. 国際宇宙探査と宇宙科学探査

5.1 探査の定義

ここでは、宇宙探査、国際宇宙探査、宇宙科学探査の定義を以下に記す。

- 宇宙探査
 - 国際宇宙探査（有人月火星探査）と宇宙科学探査の両方を含む日本の探査全体のこと。
- 国際宇宙探査（有人月火星探査）
 - GER に沿って JAXA が推進する有人月火星探査，もしくはその準備探査。
- 宇宙科学探査
 - 科学（理学・工学）を目的としてコミュニティがボトムアップにより立案する探査。

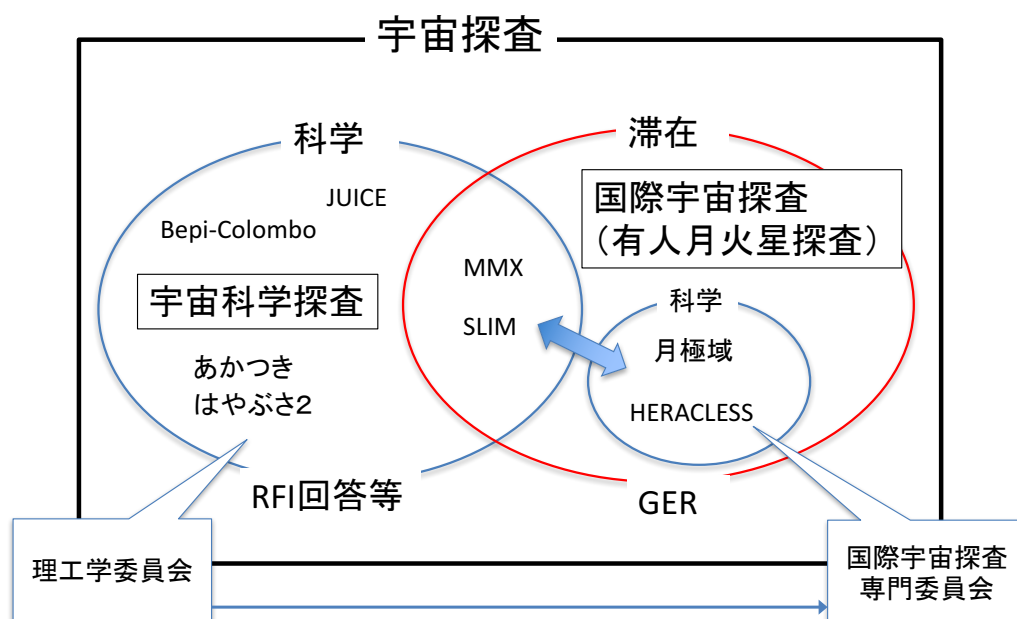


図 5-1：国際宇宙探査と宇宙科学探査

5. 2 宇宙科学探査の位置付け

探査は、科学（探査）と分けて使う場合に用いられてことがあるが、宇宙科学探査の位置づけは、科学が主目的の探査である。一方、国際協力や国際協働によって推進される国際宇宙探査では、科学は目的の一部となる。

1. GER に書かれているように科学は国際宇宙探査（有人月火星探査）の目的の一部である。
2. 場合によっては主目的となる場合もあるが、それは GER に沿った科学探査である。

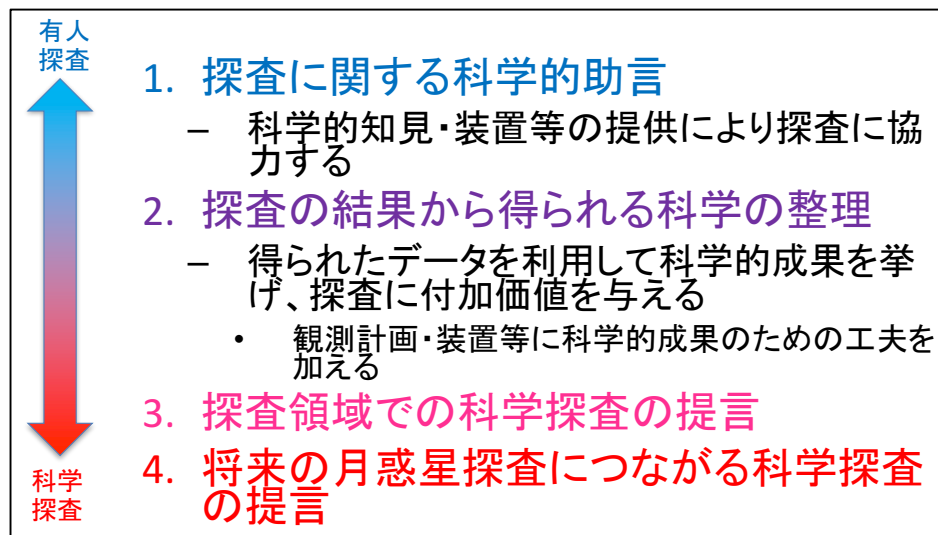


図 5-2：国際宇宙探査への科学の関わり方のレベル

第6章 まとめ

6. まとめ

本報告書は、宇宙理工学委員会の下、設置された国際宇宙探査専門委員会での議論を中間報告という形でまとめている。その間、2018年3月に東京において、ISEF2が開催され、国際協働による国際宇宙探査が議論された。また、2018年7月に、JAXAにおいて国際宇宙探査センタが設置され、国際宇宙探査に関する議論が加速している。

このような状況において、国際宇宙探査の状況を宇宙科学コミュニティと情報共有すること、及び宇宙科学（理学と工学）という観点で、国際宇宙探査への助言を行うことを目標に、国際宇宙探査専門委員会では、関連する情報を展開し、議論を行っている。

特に、月極域探査については、タスクフォースを設定し、以下の観点で報告書としてまとめてもらっている。詳細は第2章を参照されたい。

- (1) 水（氷）探査に関する科学的助言
- (2) 水（氷）探査の結果から得られる科学の整理
- (3) 月極域での科学探査の提言
- (4) 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

また、月近傍ミッション Gateway の科学探査タスクフォース、HERACLES 計画の科学探査タスクフォース、火星探査計画の科学探査タスクフォースを設置し、科学的観点から議論を行っており、その中間報告を第2章にまとめている。

本専門委員会では、国際宇宙探査を良い機会ととらえ、どういう貢献ができるか、助言や提案をまとめており、中間報告としては、月極域探査に対する提言、月近傍ミッション Gateway、HERACLES 計画、火星探査計画への提言、理学の目標と関連するミッションの紹介、国際宇宙探査を推進するにあたって必要となる工学技術や有人探査技術についてまとめた。

理学・工学検討は、さまざまなコミュニティからの RFI をもとにまとめているが、書きたりない部分もある。また、タスクフォースは、現在動いている国際宇宙探査の実際に合わせた検討に対して、主査を任命しての提言・助言をまとめたものである。今回、中間報告としてまとめたが、まだ議論が足りない部分もあることを付け加える。今後は、月極域探査をはじめ、月探査や火星探査について、さらに議論を深めて行く予定である。

本中間報告書をまとめるにあたり、多くの議論やコメントなどを頂いた。この場をお借りして多大な貢献をいただいた方に感謝する。

国際宇宙探査は、ここ数年で検討が加速すると思われる。本国際宇宙探査専門委員会の議論が、大きな貢献をすることを願う。

「探査は科学を可能にする、科学は探査を可能にする」（ISEF2 東京原則）

付 録

参考1

■専門委員会活動状況

第1回専門委員会 2017年9月11日

- ・委員長互選，副委員長・幹事の選出，国際宇宙探査の状況報告

第2回専門委員会 2017年9月25日

- ・SELENE-Rの検討状況報告，SSERVI（科学と有人の太陽系探査）

第3回専門委員会 2017年10月5日

- ・工学技術検討項目抽出

第4回専門委員会 2017年11月9日

- ・惑星科学会 RFI，GER，HERACLES の POC，惑星保護など

第5回専門委員会 2017年11月20日

- ・工学技術検討報告，理学検討報告

第6回専門委員会 2017年12月4日

- ・工学技術検討報告，理学検討報告

第7回専門委員会 2018年1月15日

- ・工学技術検討報告，有人探査支援技術報告，
- ・理学検報告討，GER3，極域探査 TF 報告，

第8回専門委員会 2017年12月4日

- ・工学技術検討報告，宇宙機刷新のための分野横断技術研究紹介
- ・理学検討報告，月極域探査 TF 報告

第9回専門委員会 2018年3月5日

- ・工学技術検討報告，理学検討報告，SSERIVI，国際宇宙探査と宇宙科学探査

第10回専門委員会 2018年6月21日

- ・国際宇宙探査センタについて，月極域探査タスクフォース検討報告，
- ・中間報告まとめ，国際宇宙探査ワークショップについて

第11回専門委員会 2018年9月10日

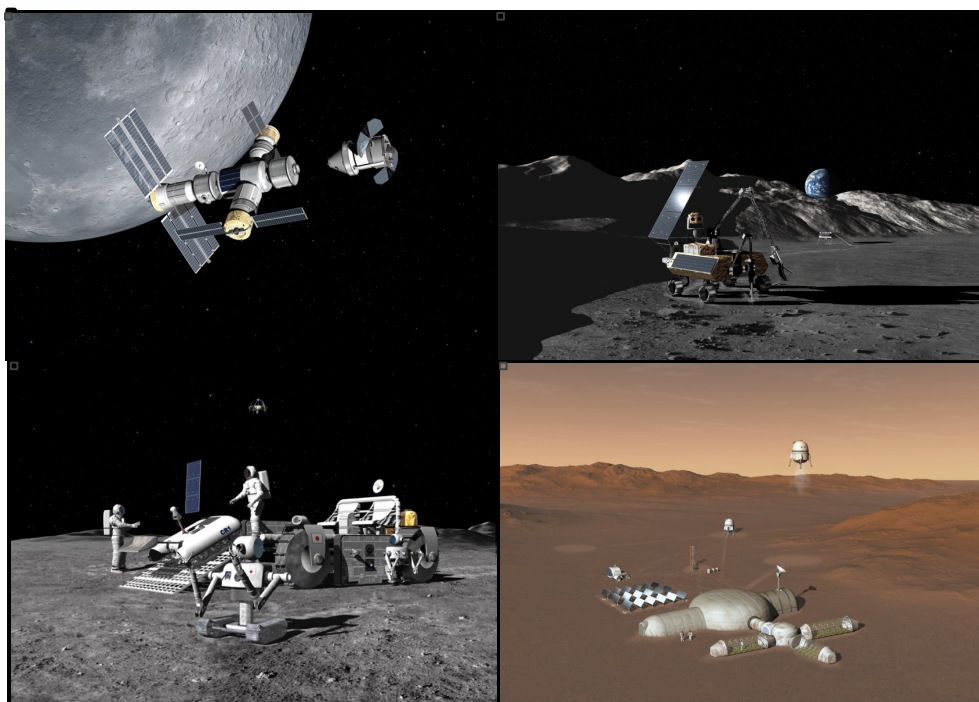
- ・国際宇宙探査の動向報告，月極域探査検討状況報告
- ・中間報告まとめについて，国際宇宙探査ワークショップについて

第12回専門委員会 2018年12月3日

- ・TF 設置について，国際宇宙探査状況報告，
- ・SSERVIE 報告，中間報告まとめ

第13回専門委員会 2019年2月14日

- ・国際宇宙探査状況報告，月極域探査検討状況報告，
- ・国際宇宙探査ワークショップについて
- ・各タスクフォース検討報告，中間報告書について



2019 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 宇宙理工学委員会

国際宇宙探査専門委員会発行