

# 国際宇宙探査における 科学探査の位置付けについて

令和2年(2020年)2月5日

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

藤本 正樹

## 第31回宇宙科学・探査小委員会(2019年9月5日)における主なご意見

- ✓ 宇宙科学・科学探査が、国際宇宙探査にどのように貢献するのか、国際宇宙探査の機会をどう活用できるのか、といった国際宇宙探査における宇宙科学・科学探査の位置付けについて、議論が必要ではないか。
- ✓ 火星や火星以遠の探査まで見据えながら、日本として何に取り組むべきか、国際宇宙探査の機会をどう活かすのか、といった課題や、科学的な意義についてもISASとコミュニティが協力して整理し、宇宙基本計画改定の議論にも反映していく必要があるのではないか。

## ISASとコミュニティによる検討

- 宇宙科学・探査小委員会におけるご意見に対し、宇宙理工学委員会 国際宇宙探査専門委員会に設けた理学・工学検討チームを中心に、コミュニティとの議論を重ね、検討を進めた。
- 「日本のアルテミス計画参加に向けた理学的・工学的検討」報告書(案)をまとめ、理工アカデミア・メンバーによるレビューを実施した(2019年12月7日 宇宙科学研究所にて)。
- 報告書へのご意見として、「理学と工学をより融合すること、日本がアルテミス計画へどのように係っていくかを判断できる材料になることが望ましい」があった。
- 以上を踏まえ、Executive Summaryをまとめた。
- 宇宙科学・探査小委員会での議論を踏まえ、「日本のアルテミス計画参加に向けた理学的・工学的検討」報告書、Executive Summaryを完成した(2020年1月)。

## 「日本のアルテミス計画参加に向けた理学的・工学的検討」 Executive Summary

2019年10月18日の宇宙開発戦略本部決定「米国提案による国際宇宙探査への日本の参画方針」においては、当面の協力項目として4点

- ①第1段階ゲートウェイへの我が国が強みを有する技術・機器の提供
- ②HTV-X、H3によるゲートウェイへの物資・燃料補給
- ③着陸地点の選定等に資する月面の各種データや技術の共有
- ④月面探査を支える移動手段の開発

を挙げつつ、「今後の宇宙基本計画の改定に向けた検討において、それ以降の本計画への参画のあり方も含め、我が国の科学探査を含む国際宇宙探査全体のあり方を検討・整理し、翌年以降の宇宙基本計画工程表に反映させる」とされた。宇宙科学アカデミアにおいて月探査は議論されてきたが、ここであらためて、従来の実績や積み上げられてきた今後の発展方向性に関する議論に照らしつつ、アカデミアとして、有人探査をコアとする月探査プログラム総体(アルテミス計画)に貢献すること、あるいは、アルテミス計画を成果創出機会として活用することを検討した。

直接に投げかけられた問いは、

問1) 月に水はあるのか？あるとしたら、どれくらい？どの深さに？

問2) もしQ1に答えられないなら、どうすれば分かるか？

問3) 国際宇宙探査を通して、理学コミュニティが参加する科学的意義は何か？

の3つであった。それに答えつつ、アカデミアとしてのアルテミス計画への取り組みについて、3つのレイヤーからなる検討を行った。

(A) 月極域において水の探査をすること

(B) 月全球を探査すること、「月、そして火星へ」

(C) ゲートウェイを活用すること

## (A) 月極域において水の探査をすること

問1) 月に水はあるのか？あるとしたら、どれくらい？どの深さに？

答1) 月に水はあるが、その形態・存在量・深さ方向の分布については不明。

問2) もしQ1に答えられないなら、どうすれば分かるか？

答2) 月面着陸探査による水の直接分析。

月表層に利活用できる形態で水が十分に存在するのであれば、それを資源として利用することが国際宇宙探査の文脈で語られてきた。月表層に水が存在することを示す科学データは数多く報告されているものの、その存在量、存在形態、存在する深さについては不明であることを、今回、あらためて確認した。また、月の水探査は理学的にも高い意義を持つ。太陽系外縁から内惑星領域への水の輸送過程の理解は、地球が生命惑星となった過程を紐解く上で必須であり、広範囲の学問分野を横断するテーマである。地球に水がもたらされた過程を同様に経験したであろう月で水探査を実施することならではの、このテーマに貢献可能な道筋があると考えらる。

以上を踏まえ、月極域での水探査は、二つのステップで進めるべきである。

ステップ1) リモートセンシングデータに基づいて選ばれた重要地点における水の存在量、存在形態、深さ分布の調査

ステップ2) 極域内の複数地点の探査による水分布の水平方向分布の把握と、サンプルリターンによる詳細な物質科学的分析

## (A) 月極域において水の探査をすること(続き)

ステップ1)は、月極域探査での中～大型規模の着陸ミッションにより実行することで可能となる。ステップ2)は、ゲートウェイの利用も視野に入れた、超多点探査および超多点サンプルリターンを可能とする超小型プローブ、そして小型探査機・サンプルリターン機を導入することで可能となる。

「月極域での水資源探査」は、「月への揮発性成分(特に水)の供給過程の理解」という学術テーマとの共通性が高く、かつ、探査機が実施すべき項目における親和性も高い。JAXAはアカデミアと十分に協調可能なスキームにより探査計画を実施されたい。

ステップ2)(多点探査)が必要であることから推察されるように、極域のある地点を他国がJAXAに先んじて探査したとして、その時点でJAXAの計画の価値が下がるということはない(探査地点や計画の位置づけが変化することはあり得る)。逆に言えば、極域探査を構想する時点で、国際協調の枠組みを進めていく努力がJAXAには求められる。また、ステップ2)は超小型機を活用することで現実的な案になると考えるが、この方式は人材育成にも効果的であり、かつ、より広い範囲から民間企業の参加を促すことにも効果的であると考える。

## (B) 月全球を探查すること、「月、そして火星へ」

問3) 国際宇宙探查を通して、理学コミュニティが参加する科学的意義は何か？

答3) 国際宇宙探查と戦略を共有して一連の小天体探查計画や重力天体探查を補完し、相乗効果を上げること。

月極域の広い範囲での水探查を可能とするシステムを構築すれば(上述のステップ2)を実現すれば)、月全球探查への道筋も見えてくる。これらにおいて必要とされる技術は大きくは変わらないためである。全球への探查システム展開への要求は、科学以外の側面からも出てくるであろう。惑星科学では、ネットワーク観測が重要となってくる内部構造探查を筆頭に、複数サンプルの詳細物質分析・年代決定が必要な天体衝突史・火成活動史把握の価値が特に高い。これら二つの科学テーマは、従来から「月ならでは」のテーマとして構想されてきたが、現実的な**多点探查**の方策が見えていなかった。それを超小型機で実現する方向性が見えた時点で、**実現に向けて加速される**ことが期待される。

また、月全球探查の時代においては大量の月探查データが流れ込むことが予想される。そこでは、現時点で実施されている惑星科学の手法ではなく、地球科学や情報科学なども含めた学際的なアプローチにより月科学を深化させていくことを考える必要がある。それは、**データ・サイエンス的手法を取り込んでいくべき**であること、そこから月科学の新たなテーマの発掘、さらには**新たな地球惑星科学の創生を世界に先駆けて指向すべき**であること、そして、自由に相互参照や



## (B) 月全球を探查すること、「月、そして火星へ」(続き)

加工をすることが可能なデータを保持することの強みを活かした日本の宇宙科学のプレゼンス向上を意味するものである。

さらに、月面上の2次元に加え、掘削等による鉛直方向へのアクセスも含めた3次元的天体表面探查技術を、月というアクセスが比較的容易な探查現場において確立することは、生命が発生する環境を把握する上で必要とされる火星での物質探查の準備を効率的に進めることに繋がる(「月、そして火星へ」)。したがって、月極域広域での水分布把握ということを端緒に、理工連携での3次元探查技術開発を進めていくことの波及効果は大きい。

「生命惑星の形成」というテーマが惑星科学探查において本格化することを受け、火星探查の重みは高まっている。2020年夏には欧米、さらには中国が火星表面を探查するローヴァーを打ち上げる。NASAのローヴァーは、2026年に開始される火星サンプルリターン(MSR:火星本体の表面からサンプルを帰還させる計画。2031年帰還予定)への準備でもある。JAXAでは、火星衛星(フォボスあるいはデイモス)からサンプルリターンを行うMMXを2024年の打ち上げを予定し準備中である。これは、「太陽系初期における水輸送」というJAXA小天体探查プログラムでの役割を果たしつつ、将来の日本の火星探查の端緒となることも狙う。実際、火星衛星フォボスの表面には、火星への衝突イベントの際に飛び出した火星表面物質が

## (B) 月全球を探查すること、「月、そして火星へ」(続き)

降り積もっており、MMXはMSR的要素を持つとも考えられる。JAXAの小天体探查プログラムの価値の高さを認めた欧米からの国際協力は大規模なものであるが、加えて、このMSR的要素があること、そして、MSRと相補的な役割をタイミングよく果たすであろうという期待が、MMXへの世界からの評価を高めている。さらに、将来の有人火星探查まで見据えれば、火星衛星フォボスを有人探查拠点とする構想があること、MMXが人類初の火星圏往還を実施することの価値の高さを指摘できよう。

MMXの先にある日本の火星探查プログラムは火星地下圏を狙うべきであるという考えから、2020～2030年代にかけたシリーズ展開を構想する。これは工学および観測装置の技術開発の観点において、月探查やその他の惑星探查ミッションと紐づけられる。本格的火星着陸探查で実施する地下水圏の探查においては、月の水資源探查で獲得されるであろう、傾斜地へのアクセス技術・走破技術や掘削・サンプリング技術の発展的利用が必須である。日本においては、月・火星・小惑星といった天体ごとに探查目標・探查技術の切り分けを行うのではなく、獲得技術の展開が可能となるような中長期戦略に基づく探查プログラムが必須である。

## (C)ゲートウェイを活用すること

前述の月極域広域探査、月全球探査においては、月面上の小型機が最大限に活躍するためにゲートウェイの活用も考えることが効果的である。より一般的には、小型機の月面活動等がゲートウェイや月を活用した軌道間輸送技術等による宇宙輸送インフラの高度化により容易となり、地球・月圏全体を民間企業も含めた多くの国民にとっての活動圏とするという発想が必要であろう。最も単純には、ゲートウェイ計画に伴って月周回軌道への物流が増えれば、小さな追加負担で運んでもらうことが可能な小型探査機は、ゲートウェイから月面へと飛翔する機会を頻繁に得ることが期待でき、我が国にとって超小型探査機による天体表面技術を獲得する絶好の機会である、と言えよう。

(その名が示すように)ゲートウェイは、深宇宙への出口として位置付けて考えることもできる。日本としてゲートウェイに投資するのであれば、それがどのような日本の深宇宙探査シナリオに接続させるのかという構想を描く必要があるだろう。この観点から、将来シナリオ構築において効果的であると思われる技術要素についての検討を、NASAによる資料も参照しながら、あらためて工学アカデミアにおいて実施した。そこでは、我が国の科学・探査の実績、強みを活かし、成果が今後の科学・探査の構想に寄与するという視点で、超小型機の活用、電気推進エンジンの活用、地球一月間の大容量データ伝送システム等のインフラ整備、がキーワードとして挙げられている。

## (C)ゲートウェイを活用すること(続き)

一方で、ゲートウェイから月面へのアクセスは必ずしも容易ではないことに留意すべきである。必要となる軌道変換能力( $\Delta V$ )を比較すると、ゲートウェイから月低高度周回軌道への投入や深宇宙への離脱は、超小型機に装備される推進装置で可能であると考えられる。月面へのアクセスには、より大きな $\Delta V$ が必要となり超小型機が自力で行うことは合理的ではないと考える。ついては、複数の小型機をゲートウェイから月面へと輸送するシステムの構築等を検討する必要がある。これらのゲートウェイからの小型機展開を段階的に進化させるシナリオについて、工学アカデミアにおいて初期検討を行った。

また、ゲートウェイ経由で火星以遠にアクセスにすることは、様々な前提が成立した際にはエネルギー効率が良いかも知れない選択肢の1つとして保持するとしても、唯一最適の拠点という強い優位性がある訳では無いので、この経路に一本化するのにはリスクが大きい。計画規模や目標天体によってはゲートウェイを経由しないミッションも数多く残るであろう。地球と火星の間の何処かに拠点が必要とは思われるが、それは必ずしも月圏ではなくても良いし、また、月に水が無ければ火星大規模輸送が不可能というわけでもないだろう。この議論の上で、軌道間輸送を活用した宇宙進出の第一歩としてゲートウェイを位置づける時、その意義は高く評価される。

今回の検討を踏まえれば、2019年10月18日の宇宙開発戦略本部決定「米国提案による国際宇宙探査への日本の参画方針」において当面の協力項目とされた、

- ①第1段階ゲートウェイへの我が国が強みを有する技術・機器の提供
- ②HTV-X、H3によるゲートウェイへの物資・燃料補給
- ③着陸地点の選定等に資する月面の各種データや技術の共有
- ④月面探査を支える移動手段の開発

に関して、アカデミアがアルテミス計画への日本の参画を好機と捉えて科学を推進することを意識し、以下の新規項目提案を踏まえた次期宇宙基本計画及び工程表のさらなる検討が望ましいと考える。

- ①ゲートウェイを契機とした、地球・月圏を人類の活動圏とするための通信・物流インフラ整備方策の実行(国際協力、民間の参画)
- ②電気推進式輸送機によるゲートウェイおよびその以遠への大量物資輸送(我が国の強みを活かす、国際協力、民間の参画)
- ③我が国の科学・探査の実績、強みを活かす探査(我が国の強みを活かす、民間の参画、人材育成)
  - ピンポイント着陸技術を生かした月極域での科学探査
  - 火星探査を見据えた3次元的天体表面探査技術の開発
  - 月面に限らない深宇宙探査における超小型探査機の活用
- ④超小型探査体による超多点探査で得た月全球の各種データや技術の共有(我が国の強みを活かす、国際協力、民間の参画)

# 付録

## 第32回宇宙科学・探査小委員会(2019年10月1日)においてJAXAから提示:

### 検討の進め方

- 惑星科学全体による将来計画検討の結果・経緯を踏まえ、惑星科学コミュニティと議論し、宇宙科学研究所として意見集約する。
- 国際宇宙探査専門部会の下で、分科会として検討チームを編成。

### 検討内容

以下の観点で20年先を見据えた当面10年を考慮し検討を進める。

- 工学理学の連携
  - ✓ 深宇宙進出の観点から月探査においても活用が見込まれる超小型探査機のシナリオの構築。
- 工学
  - ✓ 月面探査・深宇宙進出の観点からのGateway活用・月水資源活用の整理。
- 理学
  - ✓ 月全球へのアクセスが可能にする惑星科学の展開。
  - ✓ Moon- to- Marsの観点からの月面探査計画の整理・活用。

- 理学に関しては、異なる文脈においてではあるが、過去から検討がされてきたこと。一方で、工学アカデミアがこのレベルに踏み込んで検討を行うことは新しい取り組み。
- 理学、工学と課題が分かれているかのように見えるが、理工合同で検討を進めることが必要。特に、月面水資源に関する検討、超小型探査機の活用に関して、この側面が強いことを留意。
- 超小型探査機の活用に関して、日本で活用できるリソース量を考えれば、太陽系の外側領域の探査、あるいは、月・火星での多数分散探査・高頻度探査は超小型探査機を活用して行う必要がある。逆に、理工連携により超小型探査機での魅了的な探査を推進すれば、日本の強みを伸ばすことにつながる。



# 工学・技術検討におけるアクション (時系列順)

## 1. 国際宇宙探査専門委員会の機能強化を開始。

- 同委員会が果たすべき役割実現を目指して、主体的な形でJAXA国際宇宙探査センターとアカデミアを橋渡しする機能、さらにはより幅広い分野において探査に主体的に参加するプレイヤー層を拡大させる機能を充実させる。
- その端緒として宇宙工学分野のメンバーを中心とした検討チームを立ち上げ、宇宙科学・科学探査が国際宇宙探査にどのように貢献するのか、国際宇宙探査の機会をどう活用できるのか、について、「日本として獲得すべき技術は何か」という観点から早急にまとめることとした。

## 2. 以下の問いに工学・技術的視点で答えるための検討チームを結成した。

問1 「月に水があるのか、あるとしたら、どれくらい?どの深さに？」

問2 「もし問1に答えられないなら、どうすれば分かるか？」

問3 「国際宇宙探査を通して、宇宙科学コミュニティが参加する科学的意義は何か？」

- 月面の水資源利用は理工共通のキーワードと考えている。
- 軌道間輸送 OTV (Orbit Transfer Vehicle) の枠組みにおいて、Gatewayの利用や月面離着陸を検討。
- 表面移動技術、深部内部探査： 石上玄也 (慶応大)、小林泰三 (立命館大)
- ペネトレータ、材料工学： 後藤 健 (ISAS)
- 水を推進剤とする推進系： 小泉宏之 (東大)
- 輸送系： 永田晴紀 (北大)、徳留真一郎 (ISAS)、船木一幸 (ISAS)
- 超小型探査機： 船瀬 龍 (ISAS)
- 衛星システム、重力天体への着陸： 福田盛介 (ISAS)
- アストロダイナミクス： 津田雄一 (ISAS)
- OTV、MMX： 川勝康弘 (ISAS)
- 軌道決定： 竹内 央 (ISAS)
- 全般： 山崎直子 (宇宙飛行士)

3. 国際宇宙探査センターによる国際宇宙探査シナリオの説明会を2回実施  
国際宇宙探査専門委員会委員および宇宙理学・工学コミュニティメンバに対して現況報告と意見交換を行った。

4. Gateway利用のサイエンスを再整理するためにTFメンバーと討議開始  
初期運用と本格運用それぞれにおける成果創出可能な研究の識別から始めた。

5. NASAが提案するアーキテクチャに関連する源泉資料の入手  
以下、主要な資料。

- DSG-RQMT-001 Gateway Requirements Document
- DSG-ADD-001 Gateway Architecture Definition Document
- DSG-CONOP-001 Gateway Concept of Operations
- DSG-CONOP-002 Utilization Concept of Operations for The Gateway
- 宇宙機関Technical Interchange Meeting資料

6. “戦略的に獲得すべき宇宙科学技術”として定義されていたもので、国際宇宙探査への参加によりその獲得が加速されるものを抽出 (10/17)  
ISAS「宇宙科学技術ロードマップ 初版」を参考資料とする。

7. 工学・技術検討チームによるNASA Gateway資料の査読終了 (10/25)

「本当に宇宙科学の将来展望を可能にするものであるのか？」の視点でNASAのGateway資料を査読し、技術的成立性と新たな工学の展開可能性を改めて検討する。

## <11/25までに完了させるアクション>

- 現有の科学・探査のミッション構想に基づく既存の技術ロードマップに対して、技術のマッピングをしているが、今後、アルテミス計画の分析を進め、科学・探査との相乗効果が高い参加項目や技術開発項目を抽出していく。
- 理学検討チーム発足、TF中間報告書からの重要項目分類開始 (10/21)
- 工学検討チームによるNASA Gateway資料査読結果を理学検討チームに展開 (10/31)
- 工学検討チームによるJSEC国際宇宙探査シナリオの分析開始 (11/1)
- 宇宙科学技術連合講演会にて専門委員会活動の紹介 (11/8)
- 国際宇宙探査専門委員会にてレビュー会用資料 (ドラフト) の概要説明 (11/15)
- レビュー会に向けて4つのTF報告書 (詳細版) の一般公開 (11/21)

### A. レビュー会用資料案作成

工学と理学の検討結果をマージして、国際宇宙探査専門委員会として仕上げる。

### B. Gateway利用のサイエンスの再整理

Gateway TF中間報告の改訂作業。Phase 1とPhase 2におけるテーマ実施の切り分け含む。

## <11/25以降の検討課題>

- Gatewayに関する検討を先行しているが、今後、アルテミス計画の他の要素 (月面で何をするか) に検討を広げていく。
- レビュー会 (12/7) @相模原キャンパス大会議場

# 惑星科学界における検討状況

Q1. 月に水はあるのか？

あるとしたら、どれくらい？どの深さに？

Q2. もしQ1に答えられないなら、どうすれば分かるか？

Q3. 国際宇宙探査を通して、理学コミュニティが参加する科学的意義は何か？

■Q1, Q2については、それらへの回答が宇宙理工学委員会に設置された国際宇宙探査専門委員会のタスクフォース（月極域探査タスクフォース）の報告においてまとめられている。学界でのレビューを経てから、その内容を国際宇宙探査専門委員会の報告に盛り込む作業を行う。

- Q3に関連する検討は4つのタスクフォースにおいて行われ、それぞれ、タスクフォースレポートとしてまとめられている。そこでは、月の科学を深化させるという観点だけではなく、「月から火星へ」という視座を持つことが月での探査活動を惑星科学の推進に最大活用する上での鍵であることも述べられている。それらのレポート内容は、学界でのレビューを経てから国際宇宙探査専門委員会の報告に盛り込む作業を行う。
- これらの活動は、探査小委員の竝木（国立天文台）を中心に、臼井（JAXA・火星探査）、諸田（東大・コミュニティ代表）、大竹（JAXA、月極域探査）がコアメンバーとなり進めている。
- 上記の理学チームでの議論の結果、「月から火星へ」の探査においては、工学技術の連続性・発展性と切り離れた検討はその科学意義・価値を大きく毀損するとの結論に達し、理工の検討結果を有機的に盛り込んだレビュー会資料を作成することになった（P7）。
- 国際宇宙探査を推進していく上で惑星科学人が果たすべき役割、また、上述の活動を探査専門委員会において進めていくことについて、10月初旬にあった日本惑星科学会において議論した。
- 「月から火星へ」においては理学的には探査頻度の向上の観点から、「超小型探査機の活用」がキーワードの一つである。その観点からの討論会も惑星科学会において開催した。

## 報告書の理工アカデミアによるレビュー

- 国際宇宙探査専門委員会による報告書提出期限は年末である。12月7日、理工アカデミア・メンバーを集め、提出に向けて準備最終段階にある報告書のレビュー会を開催した。