

月惑星探査の来る10年：第三段階パネル報告

渡邊 誠一郎¹

(要旨) 月惑星探査の来る10年の第三段階パネルでは、第二段階で提案されたミッション案・搭載機器案をベースに、惑星科学コミュニティに呼びかけた検討会による議論を経て、月年代学探査、火星複合科学探査、トロヤ群小惑星探査の3計画が中型ミッション案として提出された。第三段階パネル委員会では、提出されたミッションコンセプトのポリッシュアップを図る活動を行い、それを踏まえた提案の最終案が2014年4月に提出された。ここでは提出された3つの最終案に対して、共通の評価項目を設けて行った評価を示す。評価は順位をつけるというスタイルではなく、今後、しっかりとした理学ミッション提案とするために必要なことと改善すべき問題点を指摘する形を取った。なお、第三段階パネルの活動中において月惑星探査を取り巻く状況が大きく急速に変化しており、それについても最後に述べる。

1. はじめに

月惑星探査の来る10年(以下、「来る10年」)の第三段階パネルは2012年4月に開始され、2014年8月まで行われた。パネル委員は渡邊誠一郎(委員長)、向井利典、芝井広、川勝康弘、田中智の5名であった。ここでは、第三段階パネルに提出されたミッション案に対する評価のサマ리를報告する。本稿の文責は渡邊にあるが、評価の内容は全委員の合議によってまとめられたものである。

第三段階パネル委員の当初の会合でまとめられた方針は次のようなものであった。さまざまな学問分野を内包し、探査においては後発の日本の惑星科学コミュニティは、「ボトムアップで暖められた探査提案を厳しい議論と共同作業を通じて鍛えながら集約し、コミュニティとして推すプロジェクトを絞っていく」という経験をこれまでほとんど積み上げられてこなかった。しかし、国の宇宙科学予算の逡減により、特に300億円規模の中型ミッションの打上げ機会は減少する中で、そのわずかな機会を巡っての他分野との厳しい競争を勝ち抜くには、魅力があり他分野に対しても十分な説

得力を持つミッションをまとめ上げ、工学系や他分野の協力を得ながら、惑星科学コミュニティが主体的にそれを推進していく体制が必要である。そこでコミュニティとして、今後の探査の位置づけと進め方を明確にする「中期ビジョン」の構築し、そのビジョンに位置づけられた惑星探査ミッションを説得力のある「ミッションコンセプト」として提示することを目標とした。

そのため、「月惑星の構造と進化の比較学」と「生命に至る宇宙物質の進化学」という二つの大テーマを設定し、第二段階のミッション案提案者を中心に、関心のある惑星科学研究者や他分野の有識者などに参加してもらい、2012年9月に「セクション別検討会」を実施した。そして、そこでの話し合いをもとに、第二段階での各ミッション案を規模感や国際協力の可能性を踏まえて中期ビジョンの中に位置づけた上で、特に中型ミッションとして提案するべきミッション案を選び、そのミッションコンセプト(MC)を同年12月までに提案いただくことにした。その結果、

- (1) その場年代計測装置による月惑星年代学探査計画
- (2) 火星着陸機・ローバ生命探査を主とする複合科学探査計画
- (3) ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星

1. 名古屋大学大学院環境学研究科
seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp

探査計画

の3件が提案された。これらはいずれも上記の2大テーマ両方に関係するものであった。

提出されたMCを第三段階パネル委員が検討する中で、それぞれの提案のサイエンス的意義は高いが、その検討の熟度には不十分な点があるという認識が共有された。そこで、通常の意味での審査を行うのではなく、よりよいミッション案にしていくためのアドバイスを行っていくという方針を採ることにした。提出されたMCについて、パネル委員が提案グループと会合を持ちながらブラッシュアップをしていく活動を行った。その結果、MCの最終案が2014年4月までに提出された。これらのMCや提案書は日本惑星科学会ホームページで公開されており、ニュース→「月惑星探査の来る10年」公開ページ→第三段階とたどって参照いただきたい[1]。

3つの提案に共通する問題点として、すでにJAXA宇宙科学研究所(ISAS)の理工学委員会でプリプロジェクト化もしくはワーキンググループ(WG)化されていた関連計画(月着陸探査SELENE-II プリプロジェクト、火星複合探査WG、ソーラー電力セイルWG)との関係が不明確なことであった。いずれも、当初は2010年代の打上げをめざした計画であったが、実現が遅れていたため、2020年代の将来ミッションを標榜していた「来る10年」の提案との整合性がとれない状況になっていた。そのため、第三段階のポリッシュアップの作業では、先行計画と各提案の関係を整理いただくことを促した。その結果、「来る10年」の火星探査提案は火星複合探査WG計画に、トロヤ群探査提案はソーラー電力セイルWG計画に一致させた内容となり、月惑星年代学探査提案はSELENE-2実現後を想定したミッション案として位置づけられることとなった。

次節では、3提案に対して第三段階パネル委員が2014年夏までに行った評価を記載する。それぞれ、共通の評価項目毎に記載されている。

2. 第三段階パネル委員会によるミッション案に対する評価

2.1 「その場年代計測装置による月惑星年代学探査計画」に対する評価

(1) ミッション定義審査(MDR)項目

(1.a) 計画の科学目的が明確かつ適切に絞りこまれ、目的に応じたミッション(目的にいたる手段や考え方までを含む)の先鋭化がなされているか。

太陽系科学において、太陽系形成過程から現在に至る様々な事象を絶対的な時間軸で関連づけることの重要性は論を俟たない。その標準的手法はクレータ年代学であるが、物質科学的な実証データとの対比はアポロデータのみ限定された状態に留まっている。本計画の科学目的は、月面のAristillusクレータ原にある新鮮な小クレータ近傍の岩石の年代を計測する事により、(A)月の熱的進化史の復元による月形成モデルの検証、および、(B)小天体のサイズ分布進化の復元に重要な証拠を供すること、とされている。研究背景から具体的な科学目的の説明には説得力があり、この科学目的は明確かつ適切に絞り込まれていると評価できる。科学目的を達成するためのミッションとして「ピンポイント月着陸探査によるその場絶対年代測定により、10-20億年前の衝突で形成されたクレータ内の衝突溶融岩の固化年代を10%の精度で決めること」が、掲げられている(MCには、このミッションを端的に記載すべきである。また精度の記述については(1.b)を参照)。科学目的に応じて当該ミッションが、適切かつ最善なものであることをより明確に記載する必要がある。

(1.b) 科学目的から導かれるプロジェクトとしての成功基準とミッション要求が明確であるか。

MCには記載がないが、提案書(1.4節)にはサクセスクライテリアの記載がある。しかし、その記述は技術的側面に偏り、科学的視点が弱い。サクセスクライテリアは、科学目的に照らして成功基準が適切に設定されていることを具体的に書くべきであり、ミッション要求の記述と対になっているべきだが、提案書の記述はそうにはなっていない。記載のミニマムサクセスでは科学目的達成には不十分であり、記載のノミナルサクセスがミニマムサクセスレベルではないか。

図4-1は以下の改訂が必要：科学目的を(1.a)の(A)と(B)からスタートし、「Aristillusクレータの形成年代を15%の精度で決定する」を探索目標とすべきである。(なおサクセスクライテリアには年代決定精度は10%と記載されているが、図4-1等の精度記述では、15%とあり整合していない。)[「観測・運用項目」の整理が必要(岩石の選別、岩石研磨面観察、K計測、Ar計測、年代決定)、「観測・運用要求」の各数字の根拠(あるいは不定性)を明確にすべきである。なお、提案書のミッション要求(5章)には、システム要求が混在している。

なお、一般的コメントとして、システム工学においては、科学目的→ミッション要求→システム要求(ただし、要求だけでなく、制約条件も考慮)という紐づけが明確化されるべきであるが、宇宙プロジェクトに未経験な人、あるいは、システム工学的思考経験のない理学研究者に対しては然るべき指導が必要であろう。ただし、これはプロジェクト移行時までには固めればいいので、WG設立後でも遅くはない。

(1.c) JAXA/ISASの「プロジェクト」として実施することが適切であるか。

適切である。ただし、月探査に関しては過去に宇宙理学委員会の下にWGが設立され、一方、宇宙工学委員会の下でSELENE-Bの検討があり、現在はSELENE-IIがブリプロジェクトとして活動中である。また、イプシロン搭載小型科学衛星3号機のAOに対して、SLIMと月ペネトレータ実証計画が応募した。さらに、phase A段階にあるNASAのResource Prospector Mission (RPM)へ日本から着陸機の提供が検討されているとも聞く。このようにいくつもの月探査が必要なのか、そして、本ミッションが他の惑星探査よりも優先してやるべきミッションなのか、コミュニティとしてのクリアな説明が求められるであろう。K—Ar年代計測装置について、Mars2020搭載機器には採択されなかったが、海外ミッションへの機器提案の可能性は念頭に置いておくべきである。

(1.d) 該当研究分野の国際的な動向を踏まえてその価値が高いか。日本の特技や独自性を活かす提案になっているか。

価値は高く、独自性を生かす提案になっている。

ただし、本ミッションのターゲットを選定した理由として、海外ミッションとの競合性・相補性を考慮したと記述されているが、その具体的な説明が記載されていない。その場合年代測定がサンプルリターンに対して持つ優位性に関して、より精密に検討すべきである。その場合年代計測は科学的意義が高いために海外でも精力的に検討されているはずだが、本ミッションのLIBS-QMSを用いたアイソクロン法によるK-Ar年代計測技術は日本が一步先んじていると書かれている。ただし、海外でのその場合年代測定装置の開発状況をレビューすべきである。なお、技術的な観点として、米国研究グループからのMars2020ローバ搭載の共同提案や日本の火星生命探査ミッションの搭載機器候補にも挙げられていることが述べられている(ただし、残念ながらともに落選した)。

(1.e) 科学目的が当該研究分野の長期計画の中に適切に位置づけられ、当該研究分野のコミュニティの中で、最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているか。また、提案ミッションが国内外でのその後の惑星科学・探査計画へ及ぼす効果がどの程度か。

(1.a)で述べたように、太陽系科学において、その形成から現在に至る様々な事象を絶対的な時間軸で関連付ける事の重要性は論を俟たないし、本ミッションの科学目的と位置づけについては説得力がある。ただし、(1.c)に述べたように、本ミッションが惑星科学分野の長期計画の中にどのように位置づけられているかはクリアでない。ただし、この点は提案グループだけの問題ではなく、惑星科学コミュニティ全体の問題として今後議論が深められるよう要望する。一方、その場合年代計測の技術的な観点での波及効果は十分大きいと評価できる(1.d参照)。

(1.f) ミッションの絶対的な意義・価値だけでなく、必要なコスト・リソースを考慮した時に、“サイエンス/コスト”の観点で価値が十分に高いか。

コストは中型規模(SELENE-B程度)とされているが、現時点では、これはコスト見積もりというよりも制約条件である。今後、WG活動等を通じてコスト見積もりをしていく必要がある。本ミッションが上記のコスト制約の下で達成されるとすれば、その科学的意

義の高さと期待される成果に比して妥当と思われる。
 なお、本ミッションに直接関わる人数はさほど多くなく、直接的な成果としての論文数は限定されたものになるであろうが、その成果は太陽系の起源と進化に関わる様々な研究に引用され、長く名を留めるものと期待される。一方で年代学という目的に関して、サンプルリターンと比べてその場測定の優位性を「サイエンス／コスト」で精査して欲しい。（増強型）イプシロン搭載ミッションとしての可能性も検討すべきである。

(1.g) 当該分野の中でプロジェクトの実施主体が明確であるか。

現時点での検討の主体はプロジェクト未経験の理学研究者であるが、年代計測で使用する質量分析器の開発メンバーに宇宙プラズマ研究者などを引き込む等の増強を図っている。しかしながら、(提案者も認識しているように)本ミッションを成立させるためにはシステム工学的な面から様々な技術検討が必要であり、WG設立後、工学メンバーを増強する必要がある。併せて、何らかの指導体制、あるいは、アドバイザーグループを持つことが望ましい。

(2) システム要求審査(SRR)相当項目(ただし、MDRにおいても概略は提示する必要がある)

(2.a) 運用要求(外部施設の整備や海外局の利用等を含む)やプラネタリープロテクション、リターンサンプルキュレーション、データ解析などを含むプロジェクトの制約条件が明確化されているか。

WG設立前の段階の検討としては概ね十分であるが、着陸精度と科学観測データ量、軌道設計などは今後検討を深めていく必要がある。なお、本ミッションでは、プラネタリープロテクションやリターンサンプルキュレーションは無関係である。

(2.b) ミッション要求と制約条件を満たすシステム要求が明確かつ適切であるか。

WG設立前の段階の検討として、SELENE-Bからの情報に基づいた予察的な段階と判断される。今後、検討を深めていく必要がある。

(2.c) システム要求を満たすミッション系を含むシステムの技術的な成立性が適切に検討されている

か。特にミッションクリティカルなキー技術が識別され、その開発検証計画が明らかになっているか。ミッションクリティカルなキー技術の開発リスクが識別され、リスクへの対応が開発検証計画に適切に反映されているか。【実際のSRRでは、技術成熟度(TRL)については、JAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン(BDB06005A)で定義されるTRLに従って、バスシステムのTRLは5以上、ミッション系のTRLは4以上であることを目安とされ、TRLがこれ以下である項目については開発・検証計画をより詳細に記述することが求められる】

まずは、TRLの評価をした上で、ミッションクリティカルなキー技術が識別し、検討を深めていく必要がある。

(2.d) スケジュール(プロジェクト準備段階からプロジェクト終了までの全スケジュール)・コスト(総資金に加えて、開発フェーズ・年度毎のコスト見積もりを含む)・実施体制(探査機開発／搭載機器開発／サイエンス検討体制など、国際協力を含む場合には国際協力体制を含む)を含めたプロジェクト終了までの開発・検証・実施計画が検討・設定され、ある程度明確化されているか。

ほぼ、未検討であり、評価するには時期尚早である。

(2.e) (2.c)、(2.d)を踏まえて、計画の実現性が高いか。

現在は判断できる段階ではない。

(2.f) (1.g)から(2.a)－(2.e)の検討結果に基づいて、プロジェクト実施のリスクが網羅的に識別され、その対策方針が検討され、明確になっているか。

現在は検討できる段階にない。

(2.g) 識別されたリスクとその対処方針に応じて、設計、スケジュールに適切なマージンを設定しているか。総資金の見積もりの不確定性を適切に認識しているか。

現在は検討できる段階にない。

(2.h) 質量や電力などのリソースに余裕がある場合

には、ミッションの本来の目的以外のオプション機器の搭載の可能性を残すことも考えられる。オプション機器に対しては、上記(1.a)から(2.g)までが明確化していることを要求とはしない。しかし、その境界条件の考え方と進め方のスケジュールは明確になっているか。

ローバがその候補に掲げられ、期待される成果の増大が見込まれているが、その具体的検討はこれからであり、評価は時期尚早である。

(3) ワーキンググループ活動としての観点

(3.a) ミッション準備を進めていく研究活動(データ解析・モデリングを含む)に関して、外部資金の獲得を含めて、見通しが立てられているか。

これまで科研費等の外部資金を獲得して、概念設計や観測機器のコンポーネントの開発を進めている。また、データ解析・モデリングの面では「かぐや」の人的・予算的な実績が継続されている。

(3.b) ミッション準備を進めていく体制(PIの適性、参加者の広がり、役割分担)は妥当か。

PIの努力/適性は評価できる。しかし、システム検討を進めるためには工学系の体制強化が必須である(1.g参照)。また、観測機器開発やサイエンス検討にもより広範な研究者の参加が望まれる。

2.2 「火星着陸機・ローバ生命探査を主とする複合科学探査計画」の評価

(1) ミッション定義審査(MDR)項目

(1.a) 計画の科学目的が明確かつ適切に絞りこまれ、目的に応じたミッション(目的にいたる手段や考え方までを含む)の先鋭化がなされているか。

「地球生命が宇宙で唯一の生命かどうか」という人類の根源的な問いが、宇宙探査の多大な投資に見合うテーマであることは明らかであり、その有望かつ現実的な探査対象として火星を目指すことは、一つの合理的な選択である。

この大目標に対して、本計画では、火星生命の存在についての答えを地球型生命の基本要素を直接検出することによって得ることを科学目的としており、明確に絞り込まれているといえる。このアプローチを選択した理由も何点が記載されていて、適切な絞り込み過

程を経ていると推察されるが、ミッション提案に向けては、諸外国が採っている他のアプローチとのトレードオフの形で整理されることが望ましい。また、生命存在の証拠が得られれば大成果であることは疑いないが、否定的な結果の場合、もしくは判定が不明確な場合の成果(科学的価値)についてはさらに強化すべきである。その意味では、生命前駆環境進化の解明という観点からの整理も必要であろう。生命存在の可能性についてどこまで制約することを目的とするか、そのためにどのようなアプローチをとるか、という立場を明確にすることで、後述される「他の表面探査手段」を、速やかにミッション目標に統合できる可能性がある。「火星生命の直接検出」という目的に対しては、その手段は直接的・合理的であり、また検出感度等、具体的・定量的なミッション要求も設定されていて、ミッション要求は先鋭化されているといえる。一方、生命存在の可能性について制約を与えるための試料採取地点の選定条件や、採取地点の環境の評価方法については、整理の余地がある。これまでの委員会からの指摘に対応して、他の表面探査手段についても幅広く組上に載せ、科学成果の最大化を図っていることは評価できる。ただし生命探査と、これらの新しい探査手段を組み合わせ、どのように全体の科学目的を構成するのかについては、まだ議論中のようであり、2014年中とされるミッション提案に向けて整理が望まれる。提案書に記述されているように、もう一つの柱を立てるという考え方もあるが、上述のように、生命存在の可能性について制約を与えるという観点での環境評価という観点から、MCに記述されているように生命探査を補強する形にすることで、ミッション目標の統一感を図れるのではないかと考える。なお、提案書の記載では、ところどころ、工学実験・技術実証もミッションの目的に含まれているのではないかと、思わせる部分もあるが、以降、理学ミッションに対象を絞って、評価を進める。

(1.b) 科学目的から導かれるプロジェクトとしての成功基準とミッション要求が明確であるか。

提案書1.2項では、科学目的を実現するための機器・装置の仕様・構成、着陸点選定等の運用条件が記載されていて、そこからは検出感度や、探査地域が満たす条件、観測地点の数等のミッション要求も読み取れる。

しかし、システム要求、設計結果が混在して書かれている部分もあり、ミッション意義・目的との対応を明確にするためにも、ミッション提案に向けては整理が望まれる。とくに、ミッション要求を満たすためには本来、複数のシステム構成の選択肢がありうるが、暗黙のうちにシステム構成・分界まで限定してしまっていないか、という観点からも、ミッション要求を切り出すことは重要である。

成功基準は、提案書1.3項に記載されているが、本来、ミッション要求に対応して設定されるべきところが、ミッション要求が整理されていないためにその対応が不明確になっている。また、技術的なステップに対応する形で記載されている項目もあったので、今後、ミッション要求と平行して整理していく必要がある。ミニマム／フル／エクストラで相対的な差をつけることに腐心しているようにも見えるが、まずは、ミッション要求との関係で、フルサクセスを設定することが重要である。そして、整理していく中で、サイエンス(生命探査)としてミニマムサクセス(「機器の動作」ではなく)も定義されていくことを期待する。

(1.c) JAXA/ISASの「プロジェクト」として実施することが適切であるか。

ミッションの科学目的は、JAXA/ISASのスコープに含まれることは確かである。ただし、我が国の宇宙科学の限られたリソースの中での本計画の優先度を議論する際には、我が国の宇宙科学の中での生命探査分野の位置づけ・体制が課題として取り上げられるであろう。そのため、今回の提案でも図られているが、表面探査に関わる他の分野を有機的に巻き込みつつ、先鋭性も保持できるようなミッション構想を組み立てる取り組みが重要である。また、今回の提案では、大雑把な経費として300億円が提示されていて、宇宙科学ロードマップにおける戦略的中型計画の規模となっているが、システム構成や、必要な技術の新規性を考慮すると、実際の経費がこの額を上回る可能性は決して低くはない。その場合、本計画を実行に移すためには、科学的価値以外の政策的意義が求められることになる。なお、生命探査顕微鏡(LDM)についてはNASA MARS2020ローバの搭載機器に提案されたことが言及されているが、残念ながら落選となっている。

(1.d) 該当研究分野の国際的な動向を踏まえてその価値が高いか。日本の特技や独自性を活かす提案になっているか。

「地球生命が宇宙で唯一の生命かどうか」という人類の根源的な問いが、宇宙探査の多大な投資に見合うテーマであることは明らかであり、有望かつ現実的な探査対象として火星を目指すことは、一つの合理的な選択である。また、諸外国も火星における生命探査を実行／計画していることから、国際的に見ても、その価値が高いことは明らかである。諸外国の探査計画が、過去の生命の痕跡の検出に焦点を絞っている中、それと一線を画し、世界に先駆けて生命体の直接検出を試みる、という点で、一定の独自性があり、本計画を進めることで、氷衛星など他の天体での生命探査構想にも波及する我が国の特技に発展する潜在力がある。ただし、(1.a)に述べた否定的な結果の場合における科学的価値については検討が不十分である。

また本ミッションを、より広く「火星着陸探査」と捉えたと、その重要性に比して、我が国の立ち位置が欧米に対して大きく遅れていることは明らかである。本ミッションを通じてEDL技術を獲得することで、技術ステップの差を縮めることの価値も評価できる。

(1.e) 科学目的が当該研究分野の長期計画の中に適切に位置づけられ、当該研究分野のコミュニティの中で、最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているか。また、提案ミッションが国内外でのその後の惑星科学・探査計画へ及ぼす効果がどの程度か。

本計画が、アストロバイオロジーの分野で重要なプロジェクトとして位置づけられるのは明らかであるが、むしろ問題となりうるのは、我が国の宇宙科学における生命探査分野の位置づけであろう。今回の提案でも図られているように、表面探査に関わる他の分野を巻き込むことについては、生命探査自身の価値を高めるという観点はもちろん重要であるが、当該研究分野のコミュニティの中でも価値があることとして、戦略的に位置づけられることが重要である。

提案書でも述べられているように、首尾よく生命が検出されれば、生物学そのものに変革をおよぼすほどの巨大な効果があるのは明らかだが、そうでなくともアストロバイオロジー分野の道を拓くことで、小天体・

水衛星における生命環境探査ミッションの構想や国際協力ミッションへの参加の資格が得られる。また、火星表面探査の実現は、火星や他の天体での着陸探査の実現可能性を大きく引き上げ、国際有人探査の中での我が国の立場の向上につながる。

また本ミッションを、より広く「火星探査」と捉え、火星に関しては、2機のオービターによる火星大気散逸探査の検討が理学委員会の下でWGで進められている。また、イプシロン・ロケット搭載ミッションについても検討がされている。NASAやESAに対して後塵を拝している日本が、火星に対してどのような戦略で探査を進めていくのか、「火星を探査対象とするコミュニティ」として長期計画を議論していく必要がある。

- (1.f) ミッションの絶対的な意義・価値だけでなく、必要なコスト・リソースを考慮した時に、“サイエンス/コスト”の観点で価値が十分に高いか。

生命が検出された場合のサイエンス/コストが十分に高いことは明らかであるが、その可能性が十分には見通せない状況にあるので、生命が検出されない場合のサイエンス/コストを十分に評価する必要がある。「本ミッションでは生命が検出されなかった」という結果により、火星における生命存在可能性をどれだけ制約することができるか、ということであるが、現時点では十分に高いかどうかを判断できる材料はない。また、プラネタリープロテクションへの対応等までを考慮してのサイエンス/コストを考える必要がある。

- (1.g) 当該分野の中でプロジェクトの実施主体が明確であるか。

MCや提案書6章には、体制が記載されている。主ミッションとなる生命探査装置の担当者や、システム検討を担う主要メンバーは、プロジェクト化後も活動にたずさわる意欲が高いと考えられ、メンバーの補充・強化は今後必要なものの、プロジェクトの実施主体は明確である。

(2) システム要求審査(SRR)相当項目(ただし、MDRにおいても概略は提示する必要がある)

- (2.a) 運用要求(外部施設の整備や海外局の利用等を含む)やプラネタリープロテクション、リター

ンサンプルキュレーション、データ解析などを含むプロジェクトの制約条件が明確化されているか。打上ウィンドウや、海外衛星によるデータ中継、プラネタリープロテクションなど、いくつかの重要な点について、制約条件が明確に示されている。ただし、ミッション提案に向けては、より網羅的に制約条件を整理していく必要がある。特に本ミッションでは生命がいそうな場所に到達することが必須条件だが、そのためには「着陸分散円半径 < ローバ走破距離」が十分な余裕を持って満たされていることが必要であり、その点をより明確にすべきである。

- (2.b) ミッション要求と制約条件を満たすシステム要求が明確かつ適切であるか。

検討のステップとしては、ミッション要求が把握されつつあり、それを満足するシステム設計例が示されている段階にあるといえる。したがって、ミッション要求を満足するための十分条件となるようなシステム要求までが定義されている段階にはない。

- (2.c) システム要求を満たすミッション系を含むシステムの技術的な成立性が適切に検討されているか。特にミッションクリティカルなキー技術が識別され、その開発検証計画が明らかになっているか。ミッションクリティカルなキー技術の開発リスクが識別され、リスクへの対応が開発検証計画に適切に反映されているか。【実際のSRRでは、技術成熟度(TRL)については、JAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン(BDB06005A)で定義されるTRLに従って、バスシステムのTRLは5以上、ミッション系のTRLは4以上であることを目安とされ、TRLがこれ以下である項目については開発・検証計画をより詳細に記述することが求められる】

提案書の3章において、探査機システムやローバについての概念検討結果が示されており、システムの技術的な成立性の検討は進められている。この検討を通じて、提案者側ではミッションクリティカルなキー技術は認識されていると推察するが、明示的に整理されていない。今後、ミッション提案に向けて、技術成熟度の評価、開発検証計画の策定を進める必要がある。

(2.d) スケジュール(プロジェクト準備段階からプロジェクト終了までの全スケジュール)・コスト(総資金に加えて、開発フェーズ・年度毎のコスト見積もりを含む)・実施体制(探査機開発／搭載機器開発／サイエンス検討体制など、国際協力を含む場合には国際協力体制を含む)を含めたプロジェクト終了までの開発・検証・実施計画が検討・設定され、ある程度明確化されているか。

ほぼ、未検討であり、評価するには時期尚早である。

(2.e) (2.c), (2.d)を踏まえて、計画の実現性が高いか。

とくに資金概算の内容・精度について、その妥当性を確認する材料がないので、計画の実現性は評価できない。

(2.f) (1.g)から(2.a)－(2.e)の検討結果に基づいて、プロジェクト実施のリスクが網羅的に識別され、その対策方針が検討され、明確になっているか。現在は検討できる段階にない。

(2.g) 識別されたリスクとその対処方針に応じて、設計、スケジュールに適切なマージンを設定しているか。総資金の見積もりの不確定性を適切に認識しているか。

現在は検討できる段階にない。

(2.h) 質量や電力などのリソースに余裕がある場合には、ミッションの本来の目的以外のオプション機器の搭載の可能性を残すことも考えられる。オプション機器に対しては、上記(1.a)から(2.g)までが明確化していることを要求とはしない。しかし、その境界条件の考え方と進め方のスケジュールは明確になっているか。

現状、必須とされている搭載観測装置は生命探査顕微鏡と気象パッケージであり、その他の装置(環境モニタカメラ、LIDAR、LIBS、等)はオプション選定中とされている。ただし、これらは「リソースの余裕を見て搭載を考慮する」というよりも、「ミッション全体の科学目的の構成を検討中であり未確定」というステータスにあり、ミッション提案に向けて確定していくものと考えられる。

(3) ワーキンググループ活動としての観点

(3.a) ミッション準備を進めていく研究活動(データ解析・モデリングを含む)に関して、外部資金の獲得を含めて、見通しが立てられているか。

昨年度までは宇宙探査委員会下の、今年度からは宇宙工学委員会下のWGとして活動している。外部資金等の状況に関する記述はない。

(3.b) ミッション準備を進めていく体制(PIの適性、参加者の広がり、役割分担)は妥当か。

MCや提案書6章には、体制が記載されている。観測機器については、数多くの研究者名がリストアップされているが、関与の度合い、経験について十分な情報を持っていないので、妥当性の判断は難しい。工学については、ミッション準備段階で重要な、新規開発技術(ローバ、エアロシエル、空力誘導・制御等)の研究者、システム設計に関わる技術者は確保されているように思えるが、これに加えて、プロジェクト管理(コスト、スケジュール、リスクの管理)の経験を有する技術者を加えることが望ましい。

2.3 「ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星探査計画」の評価

(1) ミッション定義審査(MDR)項目

(1.a) 計画の科学目的が明確かつ適切に絞りこまれ、目的に応じたミッション(目的にいたる手段や考え方までを含む)の先鋭化がなされているか。

科学目的は、木星トロヤ群小惑星の形成過程を調べることによって原始太陽系円盤内の揮発性物質分布および惑星移動プロセスに重要な制約を与えること、とされている。この科学目的は太陽系形成過程を明らかにする上で第一級の価値を有するが、より絞り込む必要がある。なお、クルージング・フェーズでの宇宙赤外線背景放射・ γ 線バースト・惑星間塵の観測が掲げられているが、これらは副次的な目的であるので、オプション扱いとして、「来たる10年」の評価においては考慮しない。科学目標を達成するためのミッションとして、「木星スイングバイを活用したソーラー電力セイルによってトロヤ群小惑星の一つにランデブーし、リモートセンシング観測を行うとともに、子機を天体表面に着陸させ、試料を採取してその場分析を行い、可能であれば親機が試料を地球に持ち帰り地上分析を行

うこと」が掲げられている。これは成功すれば科学的意義は大変大きいですが、ミッション期間が到着までも14年、帰還までなら26年という長さになるため、他の太陽系探査との優先度については慎重な検討が必要である。また、トロヤ群のうちの一つの小惑星に行くことで普遍的な科学目的のどこまでが達成可能なのかについて検討を要する。

(1.b) 科学目的から導かれるプロジェクトとしての成功基準とミッション要求が明確であるか。

ミニマムサクセスが記載されておらず、不明確である。最低でもランデブーとリモートセンシング観測の達成をもってミニマムサクセスとすべきだが、それで十分かは、科学目的に照らして検討すべきである。ミッション要求としては、トロヤ群中の探査対象天体の選定基準、理学観測の種類と内容、その場分析の目標について、より具体的な検討が必要である。この1年での検討内容の進展があまり見られない(成功基準の定義があいまいになっている点で、むしろ後退したように見える)のは残念である。

(1.c) JAXA/ISASの「プロジェクト」として実施することが適切であるか。

国際協力・分担は特に理学機器については十分に検討すべきである。

(1.d) 該当研究分野の国際的な動向を踏まえてその価値が高いか。日本の特技や独自性を活かす提案になっているか。

国際的にも関心が高く、どこかの国がいつかは行う探査といえる。太陽系空間航行の工学、特に電気推進、ソーラーセイル、サンプルリターンについては日本の特技と考えて良い。理学機器では、マルチターン質量分析器は日本独自のものだが、他には独自技術は見当たらない。

(1.e) 科学目的が当該研究分野の長期計画の中に適切に位置づけられ、当該研究分野のコミュニティの中で、最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているか。また、提案ミッションが国内外でのその後の惑星科学・探査計画へ及ぼす効果がどの程度か。

はやぶさ、はやぶさ2という日本が積み上げてきた小惑星探査の流れに乗っており、推進技術やサンプルリターン技術の継承がそれなりに期待される。しかし、発展の先としてメインベルト小惑星か、彗星か、トロヤ群かは意見が分かれるところであろう。サンプルリターンはエクストラサクセスであり、試料がもどってくるまで今から少なくとも35年かかる計画なので、このミッションだけで地上分析グループをつなぎ止めるのは困難であり、長期計画をより明確にする必要がある。

(1.f) ミッションの絶対的な意義・価値だけでなく、必要なコスト・リソースを考慮した時に、“サイエンス/コスト”の観点で価値が十分に高いか。

コストは戦略的中型計画の枠内とされ、欧米の類似ミッションより格段に経費が小さいことが示されているが、ミッション期間の長さ考えた耐久性の確保や理学機器の不確定さから、現時点のコスト見積りの精度が高いとは言い難い。また、“サイエンス/期間”の観点からの判断、特に開発に携わる研究者とデータを手にする研究者が世代を異にする点はミッションの求心力の低下につながりかねないため、慎重な検討が必要である。

(1.g) 当該分野の中でプロジェクトの実施主体が明確であるか。

2020年までははやぶさ2プロジェクトとの重複がある。理学の研究者の参加をもっと増やす必要がある。特に超長期ミッションであるので、学生・若手研究者の継続的参加が必須である。

(2) システム要求審査(SRR)相当項目(ただし、MDRにおいても概略は提示する必要がある)

(2.a) 運用要求(外部施設の整備や海外局の利用等を含む)やプラネタリープロテクション、リターンサンプルキュレーション、データ解析などを含むプロジェクトの制約条件が明確化されているか。
超長期運用になるため、体制の維持は十分に検討しておく必要がある。プラネタリープロテクションの検討も必要だが、十分検討されていないようである。サンプルキュレーションについては、カプセル等の開発のため、想定は必要だが、実際の地球帰還はずっと先

なので、施設等の具体的検討は後年で良いだろう。

(2.b) ミッション要求と制約条件を満たすシステム要求が明確かつ適切であるか。

検討が進んでいないため、判断ができない。特に理学機器については、まったく検討が進んでいないようである。子機的设计やサンプリング方式についても検討は不十分である。

(2.c) システム要求を満たすミッション系を含むシステムの技術的な成立性が適切に検討されているか。特にミッションクリティカルなキー技術が識別され、その開発検証計画が明らかになっているか。ミッションクリティカルなキー技術の開発リスクが識別され、リスクへの対応が開発検証計画に適切に反映されているか。【実際のSRRでは、技術成熟度(TRL)については、JAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン(BDB06005A)で定義されるTRLに従って、バスシステムのTRLは5以上、ミッション系のTRLは4以上であることを目安とされ、TRLがこれ以下である項目については開発・検証計画をより詳細に記述することが求められる】

TRL以前に理学機器の概念検討すら、ほとんど進んでいない。早急に検討をすべき。

(2.d) スケジュール(プロジェクト準備段階からプロジェクト終了までの全スケジュール)・コスト(総資金に加えて、開発フェーズ・年度毎のコスト見積もりを含む)・実施体制(探査機開発／搭載機器開発／サイエンス検討体制など。国際協力を含む場合には国際協力体制を含む)を含めたプロジェクト終了までの開発・検証・実施計画が検討・設定され、ある程度明確化されているか。

検討できる段階にない。

(2.e) (2.c)、(2.d)を踏まえて、計画の実現性が高いか。

判断できる段階にない。

(2.f) (1.g)から(2.a)－(2.e)の検討結果に基づいて、プロジェクト実施のリスクが網羅的に識別され、

その対策方針が検討され、明確になっているか。検討できる段階にない。

(2.g) 識別されたリスクとその対処方針に応じて、設計、スケジュールに適切なマージンを設定しているか。総資金の見積もりの不確定性を適切に認識しているか。

検討できる段階にない。

(2.h) 質量や電力などのリソースに余裕がある場合には、ミッションの本来の目的以外のオプション機器の搭載の可能性を残すことも考えられる。オプション機器に対しては、上記(1.a)から(2.g)までが明確化していることを要求とはしない。しかし、その境界条件の考え方と進め方のスケジュールは明確になっているか。

赤外線背景放射・γ線バースト観測と惑星間塵の観測は二次的な目的であるので、オプションと位置づけるのが妥当であろう。

(3) ワーキンググループ活動としての観点

(3.a) ミッション準備を進めていく研究活動(データ解析・モデリングを含む)に関して、外部資金の獲得を含めて、見通しが立てられているか。

工学委員会の下でのWGとして活動をしている。外部資金等の状況に関する記述はない。

(3.b) ミッション準備を進めていく体制(PIの適性、参加者の広がり、役割分担)は妥当か。

工学委員会の下でのWGとして活動をしているが、理学部分については脆弱である。この1年検討がほとんど進んでいないことから、プロジェクトをリードする体制を大幅に強化する必要がある。より若く牽引力のある理学研究者が中核に参加して、理学機器の検討を真剣に進める体制を構築すべきと考えられる。イプシロン搭載ミッション等で子機による試料採取やその場分析などの宇宙実証をすべきである。

3. 月惑星探査を取り巻く状況の変化

「来る10年」第三段階の活動を進める間に、太陽系探査をめぐる状況がめまぐるしく変化していった。

2013年1月、宇宙開発戦略本部は宇宙基本計画を決定し、「宇宙科学等のフロンティア」も3つの重点課題の一つに位置づけられた[2]。そして、2013年9月には宇宙科学研究所から宇宙政策委員会の宇宙科学・探査部に「宇宙科学・探査ロードマップ」が報告され、同部会で承認され親委員会に報告された[3]。このロードマップでは、「太陽系探査科学分野は、最初の約10年を機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得と先鋭化したミッション目的を立て、10年後以降の大型ミッションによる本格探査に備える。」とされた。

一方、宇宙政策全般についても、日本を取り巻く安全保障環境の変化や宇宙産業基盤の弱体化などを踏まえた見直しが進められ、2015年1月には新たな宇宙基本計画が宇宙開発戦略本部によって決定された。そこでは、「産業界の投資の「予見可能性」を高め、産業基盤を強化するため、今後20年程度を見据えた10年間の長期整備計画とする」と謳われている。また、「新たな宇宙基本計画を「本文」と「工程表」の二部構成とし、「工程表」については、毎年、政策項目ごとの進捗状況を宇宙政策委員会において検証し、宇宙開発戦略本部において改訂する」とされた。そして、宇宙科学・探査については、「ボトムアップを基本としてJAXAの宇宙科学・探査ロードマップを参考にしつつ、今後も一定規模の資金を確保し、推進する」とし、今後10年間では、戦略的中型3機と公募型小型を5機(2年に1回のペース)打ち上げるとともに、多様な小型プロジェクトを着実に実行するとして「工程表」が示された。さらに、「太陽系探査科学分野については、効果的・効率的に活動を行える無人探査をボトムアップの議論に基づくだけでなく、プログラム化も行いつつ進める。プログラム化においては、月や火星等を含む重力天体への無人機の着陸及び探査活動を目標として、特に長期的な取組が必要であることから、必要な人材の育成に考慮しつつ、学術的大局的観点から計画的に取り組む」とある。

「工程表」の提示を受けて、2014年12月には、ISASからは「平成26年度戦略的中型宇宙科学ミッション候補の提案募集」が発出され、太陽系科学分野からは「火星着陸探査技術実証プロジェクト」と「ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査の実証」の応募があった。ただし、ともに工学実証の色彩の強い提案と

なっている。また、ISASから宇宙科学コミュニティの各研究領域に対して、「研究領域の目標・戦略・工程表」提出の要望(RFI)が出され、この提出(2015年2月)を受けて、太陽系探査科学分野においてはプログラムの構築に向けた検討が進められる見込みである。このような急速な動きの中で、当初2014年12月発刊の『遊・星・人』掲載予定だった本報告は、公表のタイミングを失い、半年遅れてしまった。本来であれば、上述のような動きを先取りし、「来る10年」のビジョンを示した上で、惑星科学コミュニティの対応を模索すべきであったが、そのようにならなかったことについては、第三段階パネル委員長として力不足をお詫びしたい。しかし、「来る10年」の取り組みとそこでの真摯な議論の経験は、今後の太陽系探査科学の検討において、大きな糧となると確信している。

参考文献

- [1] 日本惑星科学会ホームページ、月惑星探査の来る10年公開サイト、https://www.wakusei.jp/~decade_sec/wiki/open/
- [2] 秋山演亮, 2012, 遊星人 22, 102.
- [3] 渡邊誠一郎, 2014, 遊星人 23, 111.