

# 『月惑星探査の来る10年』 検討・第三段階報告：パブリックコメント

並木 則行<sup>1</sup>, 小林 直樹<sup>2</sup>, 出村 裕英<sup>3</sup>, 大槻 圭史<sup>4</sup>

(要旨) 『月惑星探査の来る10年』検討では第三段階で3つのミッションコンセプト案を取りまとめ、各ミッションコンセプト案を第三段階委員会のレビューとパブリックコメントの集約という2通りの方法で評価した。本稿ではパブリックコメントの集約結果を報告する。評価の規準は(1) 科学目標の重要性, (2) 技術的実現性, (3) 資金概算, (4) システム成立性, (5) スケジュール, (6) 体制, という五項目である。多くのコメント提供者は(1), (2)については多様な意見を提示しているが, (3)~(6)については経験の不十分さから評価することの困難を述べている。惑星科学コミュニティは今後も同様なトレーニングを繰り返すことで、宇宙探査の実現のための実力を養成する必要があるだろう。

## 1. 「月惑星探査の来る10年」の 第一・第二段階の経緯

日本惑星科学会 将来惑星探査検討グループでは、日本の惑星探査の長期的な展望を検討し、その検討結果をまとめた報告書の作成を目指してきた。この検討活動は惑星科学のコミュニティが惑星科学会会員、非会員を問わず、自らの責任において将来像を描いていく作業である[1]。また、この検討作業では各段階で学会・シンポジウム等での中間報告を繰り返して広く意見聴取を図ることも活動の重要な一部と考え、日本惑星科学会のwebページ([https://www.wakusei.jp/decade\\_sec/wiki/open/](https://www.wakusei.jp/decade_sec/wiki/open/))を使って広範な惑星科学コミュニティとの意見交換を図ってきた。2010年1月から始まった本検討作業の第一段階は2011年5月に終了[2]、続いて同年6月からは第二段階に移行し[3]、2012年4月から第三段階を開始した。当初想定していた以上に長く続いた本検討作業も、第三段階ミッションコンセプトの評価によって終了した。その最終報告

を、本稿と渡邊による第三段階委員会報告[4]によってまとめる。

本検討作業の第一段階の目的は、今後10年のトップサイエンスについての意見をボトムアップな提案からまとめることであった。最初に2010年地球惑星科学会連合大会にて検討作業の概要説明を行い、2010年9月10日に神戸大学理学研究科 惑星科学研究センター(CPS)の後援により公開討論会を行った。神戸大学のメイン会場からTV会議システムを利用して複数会場(北海道大学、会津大学、東京工業大学、JAXA相模原キャンパス、他)との多地点会議を行い、各パネルのとりまとめ方針は勿論、「月惑星探査の来る10年」のあり方についても活発な議論を行った。

2010年9月10日の公開討論会では予定していた半日では到底議論を尽くすことができなかったため、パネル毎の分科会を開催することとなった。アストロバイオロジーパネルは11月25日に千葉工業大学に於いて、地球型惑星固体パネルは12月7日に東京大学地震研究所に於いて、小天体パネルは12月10日に国立天文台三鷹キャンパスに於いて、木星型惑星・氷衛星・系外惑星パネルは2011年1月22日に東京大学地震研究所に於いて、それぞれ開催された。各パネルの報告は2011年5月1日に日本惑星科学会webページにアッ

1. 国立天文台 RISE月惑星探査検討室/総合研究大学院

2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

3. 会津大学 先端情報科学研究センター

4. 神戸大学 大学院 理学研究科

nori.namiki@nao.ac.jp

ブロードされ、パブリックコメントを受け付けた(2011年6月末まで)。そして、『月惑星探査の来る10年』検討・第一段階報告として遊・星・人2011年Vol. 20, No. 4 [2]にまとめた。

科学のみの議論に的を絞った第一段階に対して、第二段階では将来ミッション・プロジェクトの創成を意図して進められた。第一段階の議論が進行している間に第二段階委員を依頼し、2010年5月26日、9月10日、2011年2月16日、5月25日の4回にわたって第二段階委員会の役割について議論した。そして「具体的なミッション提案、観測機器提案を公募し、その科学的重要性を評価する」という目的のもと、第二段階委員会はまずミッション提案と観測機器提案の募集を行った。募集にあたって第二段階提案書の雛形を2011年7月1日から日本惑星科学会webページで公開した。この提案書では、科学目標や期待される成果、関連分野に与えるインパクト等のサイエンス面を強調するとともに、計画遂行のための体制(人的、予算的)やスケジュールについても書ける範囲で記載することが要望された。2011年10月23日の委員会では受付手続きの確認を行い、2011年10月の惑星科学会総会、11月の宇宙科学研究所・太陽系科学シンポジウムで第二段階委員と事務局が提案募集の目的と記載項目の説明を行った。提案書の受付は最終的に12月19日に締切り、13件の応募があった[3]。

13件の提案の内訳は8つのミッション提案と、5つの機器提案である。第二段階委員会は受け付けた提案を個別に精査し、より良い提案のための要望、コメントを分担してまとめた。2012年2月15日に第六回目の委員会を開催してレビューレポート作成方針を確認し、最終的な文案の修正を終えた上で、3月15日に各提案者へレビューレポートが返信された。各提案者は、このレビューレポートをもとに、提案のブラッシュアップを行い、2012年5月24日の地球惑星科学連合大会「来る10年の月惑星探査」セッションで修正提案の発表を行った。その際の質疑応答をさらに取り込んで再修正を行い、遊星人2012年Vol. 21, No. 3, 特集「月惑星探査の来る10年：第二段階」にまとめられた[5-15]。

## 2. 第三段階の概要

2012年6月からは第三段階へ移行した。第三段階における議論の焦点は、第二段階における13の提案をいかにして少数の具体的なミッションコンセプトにまとめあげていくかにあった。第三段階委員会における議論の詳細は[4]に詳述されており、最終的に『月惑星探査の来る10年』検討の目指す中型フラッグシップミッションは火星生命探査、月惑星年代学探査、木星トロヤ群探査の3案に絞りこまれた。

各ミッションコンセプト提案グループは、2013年5月の地球惑星科学関連連合大会、8月の月惑星シンポジウム、9月のMCブラッシュアップ提案の報告会(於ける神戸大学CPS)において講演を行い、その内容を惑星科学コミュニティへ周知するように務めた。その間に第三段階委員会からミッションコンセプトのブラッシュアップについてのコメントを受けながら改訂を進め、2013年12月に最終案が『月惑星探査の来る10年』事務局に提出された。事務局は各ミッションコンセプト案を日本惑星科学会webページにアップロードしてパブリックコメントを受け付けた。一方、第三段階委員会では各ミッションコンセプト案の評価を開始した。本稿では2014年7月21日までに事務局に寄せられたパブリックコメントの集計結果を報告する。第三段階委員会評価は[4]にまとめられている。本稿と[4]における評価は、惑星科学コミュニティ内部の自己評価と宇宙探査の専門家による外部評価という相補的な役割があり、読者には是非本稿のみならず[4]にも目を通していただくことを願う。

### 2.1 パブリックコメント概要

2014年7月の締め切りまでに延べ21件のパブリックコメントを受領した。評価者は14名で、内訳は、火星生命探査に8件、月年代学探査に8件、トロヤ群小惑星探査5件であった。これらの数を多いと思うか少ないと思うかについては多様な見方があるであろうが、中型のフラッグシップミッションを支える基盤としては少ないと言わざるをえない。この点については、著者は「ミッションに関わった経験を持たないものには評価項目(表1)の内容が難しく、コメントすることへの敷居が高く感じられた」という意見も耳にした。

今後も同様な検討作業を継続する場合にはご意見を参考にし改善に努めたい。

寄せられたコメントの観点やレベルは様々であった。ただし、どのコメントも共通して評価に対する真摯な姿勢と、各ミッションコンセプト提案グループへの敬意を読み取ることができた。評価を送ったコメント者に感謝申し上げたい。提出された夫々の評価シートは、更なる提案の改善のために各ミッションコンセプト提案グループの代表者に送付された。

## 2.2 火星生命探査へのコメント

### (1) 科学目標の重要性

火星生命探査の科学目標には理学と工学両面の要素があり、総合評価が難しい。理学目標として生命探査は重要である一方、当たり外れが大きい。ロードマップ中での日本のアストロバイオロジーの位置づけが不十分だが、波及効果は大きいと考えられる。日本の独自性については意見が分かれる。工学的には着実な成

表1：評価項目 ([https://www.wakusei.jp/~decade\\_sec/wiki/open/](https://www.wakusei.jp/~decade_sec/wiki/open/) よりダウンロード可)。

| (1) 科学目標の重要性 |                                                                                                                                                                                                             |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1.1)        | <b>長期的展望の中でのミッションの位置づけ</b><br>単発のミッションとしてではなく、その次の10年や海外ミッションとの協力・競争、宇宙研ロードマップとの整合性を見据えて長期的展望とその中での本ミッションの位置づけが提示されているか？<br>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？                                   |
| (1.2)        | <b>波及効果</b><br>その後の国内外での惑星科学、探査計画にどのように波及していくか？                                                                                                                                                             |
| (1.3)        | <b>日本の特技と独自性</b><br>我が国の地球惑星科学、宇宙科学分野の国際的位置づけが考慮されているか？<br>技術的特徴が明確であり、独自性や発展性が他分野にまで理解され得るか？<br>海外に売り込み可能な付加価値の高い技術力を生み出しているか？                                                                             |
| (1.4)        | <b>サクセスクライテリア</b><br>目的の絞り込み、ミッションの先鋭化がなされているか？<br>必須の科学観測、主要、オプション、エクストラの区分は明確であるか？                                                                                                                        |
| (2) 技術的実現性   |                                                                                                                                                                                                             |
| (2.1)        | <b>科学目標から機器仕様・運用要求へのブレークダウン</b><br>必要な精度、感度、分解能の要求は適切に設定されているか？<br>重点開発項目は明らかにされているか？<br>ミッションクリティカルなキー技術の識別が十分になされ、それを踏まえた開発計画になっているか？                                                                     |
| (2.2)        | <b>技術的課題の克服</b><br>各機器の現状の技術レベル（TRL）が明示的に評価されているか？<br>開発課題の抽出に漏れはないか？<br>開発のイメージは描けているか？<br>技術的難易度は客観的に判断されているか？<br>科学的成果と技術的難易度のトレードオフ検討がなされているか？<br>不確定性の高い技術的困難がある場合には、あえて挑戦するという判断に至る経緯が分かりやすく説明されているか？ |
| (2.3)        | <b>観測技術の共通化</b><br>他のミッションと共通に開発を行うことでリソースの節約は可能とならないか？<br>海外宇宙機関との国際協力・分担は十分に検討されているか？                                                                                                                     |
| (3) 資金概算     |                                                                                                                                                                                                             |
| (3.1)        | <b>科学成果とのバランス</b>                                                                                                                                                                                           |

|                    |                                                                                                                                                                                    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | <p>「サイエンス／コスト」の観点での価値は十分に高いか？</p> <p>類似ミッションと比較して、科学成果とコストはバランスしているか？</p> <p>科学成果とコストのトレードオフは評価されたか？</p>                                                                           |
| (3.2)              | <p><b>運用と外部施設、設備の費用</b></p> <p>運用シナリオはできているか？</p> <p>サンプルキュレーション、プラネタリープロテクション、データ解析センターなどなどに関わるコストが含まれているか？</p> <p>関税・消費税は必要か？</p>                                                |
| (3.3)              | <p><b>ミッションを支える研究活動の経費</b></p> <p>データ解析やモデリングなどミッションを支える研究活動に関して、外部資金の獲得を含めて、見通しが立てられているか？</p>                                                                                     |
| <b>(4) システム成立性</b> |                                                                                                                                                                                    |
| (4.1)              | <p><b>システム構成</b></p> <p>プロジェクトの制約条件は明確化されているか？</p> <p>オービター、着陸機、ローバーへの要求は科学目標に合致しているか？</p> <p>フライバイ・タッチダウンなどの代替手段とのトレードオフ検討はされているか？</p> <p>電力・重量・通信のリソースは科学目標に基づいて適切に設定されているか？</p> |
| (4.2)              | <p><b>先行ミッションとの関連</b></p> <p>先行する類似ミッションがある場合には、先行して実現するケース、実現しない（または遅れる）ケースに分けて、科学的価値やリスクとコストの修正が他分野にまで説明できるか？</p>                                                                |
| (4.3)              | <p><b>通信の成立性</b></p> <p>他国宇宙機関の支援が必須となる場合には、取引の材料が検討されているか？</p>                                                                                                                    |
| (4.4)              | <p><b>搭載重量の考え方</b></p> <p>マニピュレーターやスコップ、データ処理系、サンプル回収機構などなど、クリティカルな要素が想定されているか？</p>                                                                                                |
| (4.5)              | <p><b>外部施設、設備</b></p> <p>サンプルキュレーション、プラネタリープロテクション、データ解析センターなどなど科学成果達成に必要な要素が網羅され、タスクが定義されているか？</p>                                                                                |
| <b>(5) スケジュール</b>  |                                                                                                                                                                                    |
| (5.1)              | <p><b>開発段階のスケジュール</b></p> <p>BBM、EM、FM などなどの開発は段階的に、整合的に計画されているか？</p> <p>資金計画、開発体制と整合しているか？</p> <p>審査会の計画時期は適切か？</p>                                                               |
| (5.2)              | <p><b>運用・解析段階のスケジュール</b></p> <p>運用シナリオは準備されているか？</p> <p>打ち上げ延期時のバックアッププランはあるか？</p> <p>クルージングフェーズも科学観測に有効に活用されているか？</p>                                                             |
| <b>(6) 体制</b>      |                                                                                                                                                                                    |
| (6.1)              | <p><b>PI の適性</b></p> <p>経験はあるか？</p> <p>提案までのプロセスで明確なビジョンの提示、先導力の発揮などリーダーシップを発揮しているか？</p> <p>コミュニティの信頼を得ていることが外部に明らかであるか？</p> <p>技術力を有しているか？</p>                                    |
| (6.2)              | <p><b>主要観測機器の開発（国際協力体制を含む）</b></p> <p>既開発の技術・経験が体制に反映されているか？</p>                                                                                                                   |

|       |                                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------------------|
|       | 長期ミッションでは体制維持の方策が検討されているか？<br>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？            |
| (6.3) | システム検討体制<br>工学との連携は進んでいるか？<br>10人規模の開発体制が形成されているか？                  |
| (6.4) | サイエンス活動<br>学術的価値を創成し得る体制が出来ているか？<br>数十人規模の解析体制（サイエンティストの参加）が期待できるか？ |

果が期待でき波及効果も大きいですが、海外の後追いであり日本の独自性という点では弱い。

#### (1.1) 長期的展望の中でのミッションの位置づけ

地球外生命の存在可能性について現在持ち得る技術レベルで挑戦することは大変重要であり、このミッションが国内外の関連コミュニティに与える影響は極めて大きいと評価される。むしろこれまでの宇宙探査ロードマップがアストロバイオロジーをカバーしきれていないことが問題であるという指摘が多かった。

#### (1.2) 波及効果

地球外生命が発見された場合の理学的波及効果と、重力天体への着陸技術獲得という工学・政策的な波及効果の両方について大きな期待がよせられた。理学的波及効果については生命が発見されるか否かで国際的な影響は大きく異なるが、工学的波及効果は理学観測の成否に依らず一定の価値がある。(1.1)と同様に、惑星科学コミュニティあるいは我が国に具体的・現実的な戦略が欠けており、「どのように」波及するのか不明瞭であるという指摘があった。

#### (1.3) 日本の特技と独自性

探査機システム(ローバー)は後発で日本の特技・独自性あるものとは言えないが、達成される理学目標には独自性があると判断される。生命検出装置は日本で実績あるものではないが、今後安定した「お家芸」になりうるという高い評価と、地上のヘリテージ依存性が高いが故に海外へのアピール度や追従されやすさに難点を挙げる指摘とに二分された。生命検出装置以外は火星以外の天体への応用可能性があることも指摘された。

#### (1.4) サクセスクライテリア

明確/不明確で意見が割れた。不明確というコメントでは、生命探査に要する観測日数や、内部構造探査に求められる要求精度が具体的でないという指摘があ

った。

#### (2) 技術的実現性

科学目標から機器使用・運用要求へのブレイクダウンを経て、克服すべき技術的課題を識別して取り組むべきだが、それが十分か否かの意見が分かれており、検討の進め方に改善の余地がある。着陸までの工学的システム検討は十分に進んでいると評価された。

##### (2.1) 科学目標から機器仕様・運用要求へのブレイクダウン

生命検出装置に関しては、生命の有無を「膜の有無」という問題に落とし込み、それを判別するための手順が明確に示されていると評価が高い。また、ミッションクリティカルなキー技術についても、センサ以外に、火星軌道への投入、カプセルの大気突入と誘導制御と耐熱、カプセル分離後のモジュールの誘導制御、着陸、移動などの工学系技術については精力的に検討が進められ、項目の抽出がなされているという意見があった。一方で、生命探査以外の観測装置についてはクリティカルな技術の抽出や着陸地点選定を含む運用要求に関して検討を深めるべきとの指摘があった。

##### (2.2) 技術的課題の克服

分析のロジックは明確である。しかし、分析器にサンプルを回収するまでの技術的課題について技術レベルや耐環境性という点での検討の目が向けられていないという指摘がなされた。

##### (2.3) 観測技術の共通化

一部の観測機器は月探査と共通して議論されているが、生命検出装置は日本においては新規要素であり本評価基準がそもそも該当しないと判断された。データ伝送中継で国際協働によるリソース分散とリスク低減を図っていること、着陸・ローバ技術について月探査との共通化が検討されていることが評価された。国際的枠組で何を日本独自のものとし、何を共通化するの



か？といった検討を更に深めるべきというコメントがなされた。

### (3) 資金概算

工学面の開発経費見積もりが明確であるのに対して、理学機器および検疫に掛かるコストについては情報が不足していると判断された。

#### (3.1) 科学成果とのバランス

生命探査はハイリスクハイリターンであるのに対し、工学的価値とその費用対効果は分かりやすい。両者を併せた評価でも、このコストで地球外生命を発見できたら費用対効果は極めて高いが、見つけられなかった時にどう説明できるのかという疑問も指摘されている。検疫に掛かる費用を除けば適正もしくは安価であるという評価だが、着実性という観点からバランスが取れているかについて判断が分かれた。

#### (3.2) 運用と外部施設、設備の費用

プラネタリープロテクションを含めて必要な施設・設備が網羅されているが、運用シナリオは現時点ではまだ明確ではない。そのため、費用の推定が妥当であるかは判断できないと評価された。

#### (3.3) ミッションを支える研究活動の経費

検討されているようであるが、説明が不足しており、活動が十分であるという判断ができないと評価された。

### (4) システム成立性

細部に懸念が残るが、概ね検討が進んでいると判断された。

#### (4.1) システム構成

科学目標と整合させる形でどのような構成が良いか検討は進んでいる。しかし、オービターへの要求、ローバの移動距離や走破性能、崖や窪地での掘削技術など複数の懸念材料が指摘された。

#### (4.2) 先行ミッションとの関連

独自性が高いミッション提案であり、現時点では比肩しうるミッション提案は世界的にも見当たらない。従って本項は該当しないと判断された。

#### (4.3) 通信の成立性

海外衛星・海外局の支援を仰ぐことで成立させているが、それを実現するためにパーター材料として割けるリソース等の検討は不十分であると評価された。

#### (4.4) 搭載重量の考え方

概念検討されており、成立しているように見えるが、サンプル運搬機構等の細部などに懸念があり、現実的

な重量評価はまだ困難であると判断された。

#### (4.5) 外部施設、設備

惑星検疫(プラネタリープロテクション)については十分に検討されている。データ解析センター等の追加検討が指摘された。

### (5) スケジュール

検討は進んでいるが、十分かどうかの意見は分かれており、評価は困難であった。

#### (5.1) 開発段階のスケジュール

検討が進んでいることは認めつつも、十分な検討がなされているか否かについては意見は分かれる。スケジュールに余裕がないというコメントがあった。

#### (5.2) 運用・解析段階のスケジュール

不十分/十分でコメントが分かれた。ただし、不十分との判断に至る具体的な懸念は指摘されていない。

### (6) 体制

コミュニティは小さいが、国内外の研究者を巻き込めるポテンシャルがあるので、最終案に絞り込まれても体制が維持されるような工夫が望まれるとのコメントがなされた。

#### (6.1) PIの適性

過去の惑星探査に経験のあるメンバから構成されており、ワーキンググループとしてもアクティブに活動している点が評価された。

#### (6.2) 主要観測機器の開発(国際協力体制を含む)

十分に検討されている。機器開発経験者や海外の専門家を取り込んだ体制を敷いていると評価された。

#### (6.3) システム検討体制

工学側に熱意があり、着陸地点検討やローバの概念検討で理工の連携が進んでいる良い体制であると評価された。

#### (6.4) サイエンス活動

活潑であるとの評価を得た。しかし、火星研究コミュニティや生命科学・惑星科学コミュニティからの支援がまだ小さいので、更なる絞り込みを経ても体制が維持されるような工夫が必要という指摘があった。関連研究者を広く巻き込めるポテンシャルはあるというコメントがなされた。

## 2.3 月惑星年代学探査へのコメント

### (1) 科学目標の重要性

先鋭な目的のもと、日本の惑星科学を代表するに相

応しいテーマであると評価された。波及効果も期待できる。一方で、月探査ロードマップ上での位置づけは不明という指摘があった。海外類似機器に対する独自性が低いという指摘もある。

#### (1.1) 長期的展望の中でのミッションの位置づけ

着陸・表面探査・年代測定技術は月に限らず他天体探査にも繋がる重要な技術である。一方、月探査全体の展望の中でペネトレータ、SELENE-2との相対的位置づけが不明という評価であった。ただしその原因は、月探査の周辺環境がめまぐるしく変わるために、前提としてのロードマップをコミュニティが持っていないためであるというコメントがなされた。

#### (1.2) 波及効果

日本の惑星科学(惑星形成論や軌道進化)と親和性が高く、波及効果は大きい。また提案されている年代測定装置は他の惑星探査や小天体探査に応用可能である点が高評価であった。

#### (1.3) 日本の特技と独自性

提案された搭載装置には海外にも類似の開発計画があり、日本の特技と言える段階に至るためには海外の動向を見据え、即時性、戦略性を持った開発が必要とのコメントがなされた。試料の前処理を含め、実現までまだ技術的ハードルが高いという指摘もなされた。

#### (1.4) サクセスクライテリア

目的が先鋭化されている点が評価されたが、達成可能なシステムレベルをさらに明確にした上で、サクセスレベルの設定を再考すべきという判断がなされた。

### (2) 技術的実現性

実験室での検証と搭載機器開発の間の溝が埋められていない。特にサンプル採取に関わる技術的課題の抽出が必要と指摘された。

#### (2.1) 科学目標から機器仕様・運用要求へのブレークダウン

科学要求は明確であるが、ミッション要求やシステム要求へのブレークダウンは不十分と判断された。例えば、採取資料の前処理などが不明である。

#### (2.2) 技術的課題の克服

現在は実験室での検証レベルであり、衛星搭載に至る技術課題の抽出はと判断される。特にミッションのキーとなる年代測定装置は要検討と指摘された。

#### (2.3) 観測技術の共通化

火星ミッションとの共通化は必要との指摘があった。

また、国際協力に関しては賛成/反対の両方があるが、検討案としては国際協力による技術獲得の道筋も持っておくべきというコメントがあった。

### (3) 資金概算

搭載機器開発としての取り組みは妥当であるが、ミッションとしてはコストが高いという評価であった。

#### (3.1) 科学成果とのバランス

月着陸機に相乗りであればコスト的に釣り合う。しかし、単独ミッションとしてはコストがかかり過ぎると判断された。コスト削減と科学的意義の再検討の両方の努力が必要と考えられる。

#### (3.2) 運用と外部施設、設備の費用

現時点では未検討項目が多いが、問題ないと判断された。

#### (3.3) ミッションを支える研究活動の経費

資金獲得は不十分かもしれないが、科研費を獲得している点が評価された。

### (4) システム成立性

検討課題が多く、工学系との連携が必要であると判断された。

#### (4.1) システム構成

SELENE-Bに準拠して検討がなされているが、科学目的に応じてシステム要求は変わるはずである。今後は工学との連携を深めてシステム最適化の検討を進めることが必須であると判断された。

#### (4.2) 先行ミッションとの関連

月ミッションは数多く、ミッション提案はさらに多い。海外先行ミッションとの関連に気をを使うよりも、日本の月探査を宇宙探査のロードマップにいかに位置づけるかが重要というコメントがなされた。

#### (4.3) 通信の成立性

他国宇宙機関の支援の要/不要や取引材料についての説明が少なく、検討は不十分であると評価された。

#### (4.4) 搭載重量の考え方

試料採取のためのマニピュレータやその先端の採取機構、試料の受け渡し、表面加工(平面だし)のための研削(そのためには試料のグリップが必要)、研削面の清掃、研削面をレーザやカメラの焦点位置への移動など、機械工学・制御工学などの分野での開発を要するはずで、殆どの点で検討は不十分であると判断された。

#### (4.5) 外部施設、設備

まだ時期尚早であり、検討は不十分なままで良いと

思われる。

## (5) スケジュール

観測・機器運用は検討されているが、システム開発はまだ未検討である。工学者と早急にWG検討を行う必要があると考えられる。

### (5.1) 開発段階のスケジュール

観測機器(センサ部分)については、2018年MDRは非現実的である。また、SELENE-2実施が困難な現状では、資金計画や開発計画の再考が必要とのコメントがあった。

### (5.2) 運用・解析段階のスケジュール

観測機器動作の観点から運用シナリオの日割りスケジュールが提示されており、月の昼間時間内でミッションを完結するという厳しい制約にも目処を立てている点が評価された。今後はトラブルの対処等の検討も必要になるであろう。

## (6) 体制

PIを含めてサイエンスチームの活動は十分に高い。しかし、工学との連携がまだ始まっていない。

### (6.1) PIの適性

PIは理学代表として適性であり、信頼できると高く評価された。ただし、技術的には支援が必要とのコメントもあった。

### (6.2) 主要観測機器の開発(国際協力体制を含む)

搭載機器そのものよりも前処理段階に懸念があり、工学検討・運用検討のために体制を強化すべきであるという指摘があった。

### (6.3) システム検討体制

他の提案に比べて特に遅れており、工学との連携は必須であるという判断がなされた。

### (6.4) サイエンス活動

かぐやチームを引き継ぎ、十分に活発であると評価された。

## 2.4 木星トロヤ群探査へのコメント

### (1) 科学目標の重要性

ミッション期間が長いため、ミッション完了時の科学的重要性を評価することが困難である。ロードマップ上にも位置づけにくい。

#### (1.1) 長期的展望の中でのミッションの位置づけ

はやぶさ、はやぶさ2の延長であり、小惑星探査の長期的展望として高評価であった。しかしながら、全

ての開発・運用が順調に行われた場合でも、科学的成果を得る時期が非常に遅い(トロヤ群到着が2037年、サンプルの地球帰還が2049年)ため、ロードマップとの整合性や、ミッションの最適化について懸念が指摘された。

#### (1.2) 波及効果

すぐに成果が出るならば波及効果は大きいと言える。しかし、ミッションが長期間に渡る間の惑星科学・天文学の進展の予測が困難であるため、波及効果についての評価は困難である。

#### (1.3) 日本の特技と独自性

質量分析計やソーラーセイル、イオンエンジンなど、ミッション全体として重要性があり日本の独自性があるが、惑星科学分野に限れば必ずしも特技と独自性ということはいえないと思われる。

#### (1.4) サクセスクライテリア

工学側のサクセスクライテリアは明確だが、理学観測のそれは曖昧である。特に2049年のサンプル採取の意義は評価できない。

## (2) 技術的実現性

工学側の検討が進んでいるのに対し、理学側の搭載機器の検討が遅れているとの印象が強い。

### (2.1) 科学目標から機器仕様・運用要求へのブレークダウン

搭載機器に対する要求スペックのブレークダウンはまだ不明確である。とくにその場分析に関して検討が必要とのコメントがなされた。

### (2.2) 技術的課題の克服

理学搭載機器の検討が不十分である。特に海外調達機器については要注意というコメントがなされた。

### (2.3) 観測技術の共通化

一定の検証はなされているが、十分とは言えないという評価であった。

## (3) 資金概算

詳細が示されていないので現時点では楽観的と見える。

### (3.1) 科学成果とのバランス

長期間に及ぶ運用コストの検討が不十分と思われる。ミッション成果が得られる時期が遅いことは、サイエンス/コストでみると不利である。また、工学技術実証を主目的としており、サイエンスにかかるコストの考え方が不明であるという評価であった。



### (3.2) 運用と外部施設、設備の費用

概念的な運用シナリオは一通りなされているが、詳細は未検討である。特にサンプルキュレーションについては説明が不足しているという指摘があった。

### (3.3) ミッションを支える研究活動の経費

未検討/検討済み、両方の評価があった。

### (4) システム成立性

不十分かもしれない(特にサイエンスの観点から)が、検討はなされている。

#### (4.1) システム構成

着陸機、その場観測装置、サンプル採取、サンプルリターン of のいずれも検討が不十分で評価できないと判断された。

#### (4.2) 先行ミッションとの関連

トロヤ群探査の戦略として、トロヤ群のひとつの天体に絞って観測を行うことと複数の天体をフライバイ観測することのトレードオフが十分でないとの指摘があった。一つの天体に対して結果が得られてもそれがトロヤ群を代表している保証があるか? 複数天体をフライバイしたのちに一つの天体にランデブーということは不可能か? など、サイエンスの観点からさらに検討が必要であると判断された。

#### (4.3) 通信の成立性

実現性が不明である。

#### (4.4) 搭載重量の考え方

概ね検討されているが、着陸機やサンプル運搬機構等の細部に懸念があり不十分と判断された。

#### (4.5) 外部施設、設備

一通りの検討がなされているが、サンプルキュレーションについては詳細な議論がない。2049年帰還といえども、サンプリング装置やカプセルとのインターフェースについては現段階で決定しておく必要があるとの指摘があった。

### (5) スケジュール

可能である。しかし、長い。

#### (5.1) 開発段階のスケジュール

2023年頃の打ち上げはハードスケジュールである。実行不可能ではないが、着陸機の開発に懸念があると評価された。

#### (5.2) 運用・解析段階のスケジュール

概念検討はあるが、到着後の運用形態は説明がない。

### (6) 体制

工学との連携は進んでいるが、理学の体制が不足気味と思われる。

#### (6.1) PIの適性

経験とビジョンの提示について適正である。一方で、実働部隊が十分に配される必要がある。長期ミッションであるため、引継ぎについて検討を要する。

#### (6.2) 主要観測機器の開発(国際協力体制を含む)

蛍光顕微鏡が主力な機器であるが、海底物質探査用の装置を宇宙ミッション経験者が入って開発したものであり、既にBBMレベルや、構造モデル試験による環境耐性のいくつかは確認済みであるため、実現性は高い。試料採取・受け渡しを含めた全システムとしての開発にも注力すべきであるという指摘があった。

#### (6.3) システム検討体制

イカルスチームが加わっており、理工連携は進んでいる。長期に渡る探査計画では人材の維持が不可欠であるが、若手中心のイカルスチームが加わっていることは大きな利点であると評価される。

#### (6.4) サイエンス活動

惑星科学コミュニティからの支援は十分/不十分、両方の評価があった。天文学分野からの人材取り込みを期待する指摘があった。

## 3.『月惑星探査の来たる10年』検討作業を終えて

『月惑星探査の来たる10年』検討は2010年から開始され、当初の予定を大幅に超過して4年半の年月を要した。また、検討方針や運営手続きをめぐって多くの異見が出され、紛糾することもあった。これはひとえに事務局長としての筆頭著者の責任であり、ご迷惑をおかけした関係者にお詫びしたい。一方で、本検討作業の第一・第二段階で提出されたアイデアが種となって新たなミッション提案に進んでいるケースもある。そのような形で『月惑星探査の来たる10年』検討の成果があがっているとしたら、事務局一同、大いなる喜びである。

本検討作業を開始するにあたって、「惑星科学コミュニティが自らの力量を知る」という目的を掲げた。第2章のコメントを一読して頂ければ分かるように、評価は評価される側だけでなく、評価する側の力量をも鋭く映し出す。特に、各ミッションコンセプト案の科学的重要性を評価する上で、惑星探査ロードマップ

の不備を指摘する意見が多く出された。このパブリックコメントをまとめた後、2015年1月に惑星科学・宇宙科学分野の「研究領域の目標・戦略・工程表」が日本惑星科学会会長の指導の下でまとめられた。今後はこの「研究領域の目標・戦略・工程表」とミッションコンセプトを並行して議論することが必要であろう。

ミッションコンセプトを提案しブラッシュアップを繰り返した提案グループに対しても、各段階で評価を分担した委員に対しても、本検討作業は非常に重い負担を強いたと思う。多くの関係者の貢献により、惑星科学コミュニティは着実に経験と実力を増したはずであると事務局メンバーは切に希望する。しかしながら、かぐや、ルナAの実績・経験を踏まえて多少は前進はしつつも、本検討に関しては労力対効果が必ずしも高くは無かった。特に第三段階に3年もの時間をかけたことは著者らを含む、惑星探査の責任世代の実力不足であったことを猛省している。非効率性の原因と改善策については関係者一同とともに今後も考え続けていきたい。一方で本検討作業が何らかの形で今後も日本惑星科学会のさらに若い世代の自主的活動として引き継がれ、日本の宇宙探査を推進する原動力となることを期待する。

## 謝 辞

『月惑星探査の来る10年』検討は多くの提案者と、各段階委員のボランティアによって支えられた。特に第一段階委員の大谷栄治、倉本圭、今村剛、寺田直樹、渡部重十、荒川政彦、伊藤孝士、塚本尚義、渡部潤一、木村淳、高橋幸弘、中島健介、中本泰史、三好由純、小林憲正、山岸明彦、第二段階委員の向井正(委員長)、笠羽康正、杉田精司、田村元秀、中村智樹、第三段階委員の渡邊誠一郎(委員長)、向井利典、芝井広、川勝康弘、田中智の各氏に深く感謝する。

## 参考文献

- [1] 並木則行ほか, 2010, 遊星人 19, 221.
- [2] 大谷栄治ほか, 2011, 遊星人 20, 349.
- [3] 並木則行ほか, 2012, 遊星人 21, 215.
- [4] 渡邊誠一郎ほか, 2015, 遊星人, 本号.
- [5] 大竹真紀子ほか, 2012, 遊星人 21, 217.
- [6] 高橋幸弘ほか, 2012, 遊星人 21, 224.
- [7] 関根康人ほか, 2012, 遊星人 21, 229.
- [8] 荒井朋子ほか, 2012, 遊星人 21, 239.
- [9] 荒川政彦ほか, 2012, 遊星人 21, 247.
- [10] 中村良介ほか, 2012, 遊星人 21, 253.
- [11] 石橋高ほか, 2012, 遊星人 21, 260.
- [12] 長勇一郎ほか, 2012, 遊星人 21, 267.
- [13] 山岸明彦ほか, 2012, 遊星人 21, 276.
- [14] 白石浩章ほか, 2012, 遊星人 21, 283.
- [15] 新谷昌人ほか, 2012, 遊星人 21, 289.