

# 日本のアルテミス計画参加に向けた 理学的・工学的検討

Ver. 0.46

国際宇宙探査専門委員会  
理学・工学検討チーム

2020年1月23日

# 目次

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>はじめに</b>                             | <b>1</b>  |
| 1. 1.     | 背景                                      | 1         |
| 1. 2.     | アルテミス計画への日本の参画について                      | 1         |
| 1. 3.     | 本報告書の目的                                 | 2         |
| 1. 4.     | 検討チームの構成                                | 2         |
| 1. 5.     | 検討の経緯                                   | 3         |
| <b>2.</b> | <b>月極域の水探査</b>                          | <b>4</b>  |
| 2. 1.     | 「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？」      | 4         |
| 2.1.1.    | 月に水はあるのか？                               | 4         |
| 2.1.2.    | あるとしたら、(どこに)どれくらい？どの深さに？                | 7         |
| 2.1.3.    | どのような形態であるか？                            | 10        |
| 2. 2.     | 「Q2. もし Q1 に答えられないなら、どうすれば分かるか？」        | 13        |
| 2.2.1.    | 着陸探査の必要性                                | 13        |
| 2.2.2.    | 月面移動                                    | 14        |
| 2.2.3.    | 表層探査                                    | 15        |
| 2.2.4.    | サンプル解析                                  | 16        |
| 2.2.5.    | 観測要求と技術要求のまとめ                           | 17        |
| 2. 3.     | 工学が実現する月の水分分布の水平探査                      | 19        |
| 2.3.1.    | 超小型探査体による超多点探査                          | 20        |
| 2.3.2.    | 超多点からのサンプルリターン                          | 21        |
| 2. 4.     | 月極域の水探査における理学・工学項目の関係                   | 22        |
| <b>3.</b> | <b>月全球の探査</b>                           | <b>23</b> |
| 3. 1.     | 「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？」 | 23        |
| 3.1.1.    | 月への揮発性成分(特に水)の供給過程の調査                   | 24        |
| 3.1.2.    | 月内部進化の理解                                | 27        |
| 3.1.3.    | 地殻構成物の多様性の把握                            | 27        |
| 3.1.4.    | 衝突とレゴリスプロセス                             | 28        |
| 3.1.5.    | 浅い地下構造の探査                               | 29        |
| 3.1.6.    | 他の科学分野と連携しそれら研究において必要とされる諸技術の獲得・実証      | 29        |
| 3.1.7.    | 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          | 30        |
| 3.1.8.    | 月資源利用可能性の把握                             | 31        |
| 3.1.9.    | 有人月探査への準備                               | 32        |

|        |                         |    |
|--------|-------------------------|----|
| 3. 2.  | Gateway を活用した月全球探査技術の発展 | 33 |
| 3.2.1. | 超小型探査機                  | 36 |
| 3.2.2. | 軌道間輸送                   | 39 |
| 3.2.3. | 電気推進式輸送機                | 43 |
| 3.2.4. | 通信・測位コンステレーション          | 44 |
| 3. 3.  | 月の全球探査における理学・工学項目の関係    | 46 |
| 4.     | 月、そして火星へ                | 47 |
| 5.     | おわりに                    | 50 |
| 6.     | 参考文献                    | 54 |
| 7.     | 補足資料：重要観測項目と観測手段の一覧     | 55 |

# 1. はじめに

## 1. 1. 背景

惑星探査の中でも月や火星については今後、政策的な意義も含めて国際協力の枠組みで検討、実施される時代になろうとしている。これは、宇宙科学アカデミアにとってたいへん大きなチャンスでもある。学界諸賢においては、これまで関連する研究活動を進めて来ており、このタイミングで「国際宇宙探査への日本の参加」をキーワードとして、より組織的な対応を開始していくべきと考える。このような背景を受け、国内の理学・工学のコミュニティは、国際宇宙探査の活動にどのように参加し、機会を活用するのか、理学・工学の各分野にとって重要な科学目標や技術課題の観点から議論し、意見を集約して政府や宇宙機関に強く発信することが重要となっている。

宇宙理工学委員会の元に置かれた国際宇宙探査専門委員会（以降、探査専門委員会）は、JAXA 国際宇宙探査センター（以降、探査センター）とアカデミアとの接点である。国際宇宙探査は様々な研究分野からの参加があつてこそ推進可能であり、同委員会はその責任を負う。そして、探査センターと学術研究コミュニティの橋渡し、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の拡大を図るという役割を担っており、その活動の一環として、同委員会で昨年度まとめた4つのタスクフォース（以降、TF）（月極域探査 TF、ヘラクレス TF、火星 TF、Gateway TF）の報告書を元に、より横断的な検討を行った。

国際宇宙探査を取り巻く状況が刻々と変化していく中、タイムリーに議論を行うことが求められている。宇宙政策委員会 宇宙産業・科学技術基盤部会 宇宙科学・探査小委員会からの問いかけにタイムリーに答えることによって、国際宇宙探査を宇宙科学アカデミアにとっての大きなチャンスとしたい。合わせてその活動を通じて、日本の国際宇宙探査における存在感を高めることを期待したい。

## 1. 2. アルテミス計画への日本の参画について

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以下の4点を挙げつつも、「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」とある。これを踏まえて、基本政策部会で進められている宇宙基本計画の改定に間に合うよう、「米国提案による国際宇宙探査への日本の参画方針」の協力項目に、科学探査の立場を反映させる。別の言い方をすれば、「米国提案による国際宇宙探査（アルテミス計画）への日本の参画」は決まったが、今のままだと国際宇宙探査としての協力項目は以下の4点に限定され、科学探査の観点が欠落することが懸念される。

- ① 第1段階 Gateway への我が国が強みを有する技術・機器の提供
- ② HTV-X、H3 による Gateway 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

それ故、「これまでの科学探査の実績や、今後の方向に照らし、これ以外にアルテミス計画に貢献できる項目があるのであれば、宇宙基本計画の改定に埋め込んでおく」ことは急務である。

なお、アルテミス計画は、月面への有人着陸に関するすべてのプログラムの総体であり、Gateway 計画、SLS 計画、Orion 計画、Human lander 計画、CLPS 計画、その他の月面活動を包含した計画を指す。NASA は、月面探査だけでなく、2030 年代に火星有人着陸を目標に掲げ、それに向けて月面での持続的な活動を通じて、必要な技術を獲得しようとしている。

### 1. 3. 本報告書の目的

本報告書が作られることになった経緯、そしてどのように使われるかについて述べる。

前述の宇宙開発戦略本部決定に先立ち、2019 年 10 月 1 日、宇宙科学研究所と科学コミュニティに対して宇宙政策委員会 宇宙産業・科学技術基盤部会 宇宙科学・探査小委員会（以下、宇宙科学・探査小委員会）からの以下の問いかけがあった。

**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？**

これらの問いは、月面の水が本当に使えるのか、どのように使えるのか、新たに米国が提案をしてきたアルテミス計画に日本がどのように関わっていくかについて、宇宙科学・探査小委員会の判断に資するようにレビューすることを意図している。1.2 項に示した 4 つの協力項目は、Gateway 構想が出ている時に日本がどのような形で参加するかについての案をまとめたものであるが、その時点ではアルテミス計画はなかった。そして、アルテミス計画が出てきた段階で、宇宙科学・探査小委員会は、月面に降りて月面を経由してということがどこまで根拠があるのかを日本として検討すべきではないかという意見を提起した。2020 年 6 月に今後 10 年、20 年先を見据えた宇宙基本計画の案を政府として決めるためには、宇宙政策委員会レベルで議論して同年 3 月までにまとめる判断材料となるようなアカデミアの検討状況が必要である。よって、2020 年 3 月までに検討をまとめるために、探査専門委員会は 2019 年末を目処に本報告書を作成することとなった。

### 1. 4. 検討チームの構成

探査専門委員会の下に理学検討チームと工学検討チームが組織され、検討を行った。

#### 【理学検討チーム】

2019 年 3 月にまとめられた探査専門委員会中間報告書（火星 TF、Gateway TF、月極域 TF、ヘラクレス TF、工学検討・技術検討の活動を含む）を参考資料とした。

- ・ 理学検討取りまとめ：並木則行(国立天文台)
- ・ Gateway 利用：並木則行(国立天文台)、臼井英之(神戸大学)
- ・ 月極域探査：大竹真紀子(ISAS)、西野真木(ISAS)
- ・ ヘラクレス計画の科学探査：諸田智克(東京大学)
- ・ 火星探査：臼井寛裕(ISAS)
- ・ 工学チームとの情報共有：稲富裕光(ISAS)

#### 【工学検討チーム】

4 つの TF の報告書、NASA および JAXA 資料を元に理学検討チームと情報共有しながら、理学の要素技術、そして将来の宇宙科学の展開・人類活動圏の拡大に繋がる工学技術を検討した。

- ・ 工学検討取りまとめ、Gateway 利用、宇宙環境利用科学：稲富裕光（ISAS）
- ・ 表面移動技術、深部内部探査：石上玄也（慶応大学）、小林泰三（立命館大学）
- ・ 月の資源利用：渡辺隆行（九州大学）
- ・ 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（東京大学）
- ・ 輸送系：永田晴紀（北海道大学）、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）

## 1. 5. 検討の経緯

- 2013年9月～ 月極域探査の検討開始  
NASA との国際協力からインドとの協働実施に移行
- 2017年10月 月極域探査ミッションがプリプロジェクト候補に
- 2017年12月 月極域探査ワークショップ
- 2018年2月 月極域探査ワークショップ（その2）
- 2018年5月 探査専門委員会に月極域探査に対する科学コミュニティからの提言をまとめる TF チームが立ち上げられ、その報告書
- 2018年11-12月 火星、Gateway、ヘラクレスについて3つのTF チームが立ち上げられ、その報告書
- 2018年12月 月極域探査ワークショップ（その3）
- 2019年2月 探査専門委員会中間報告書（火星TF、Gateway TF、月極域TF、ヘラクレスTF、工学検討・技術検討の活動を含む）要約抜粋版の発行。
- 2019年7-9月 月極域探査 MDR 7月5日/同フォローアップ確認会 9月30日
- 2019年10月 宇宙科学・探査小委員会からの問いかけ**
- 2019年10月 探査専門委員会において、宇宙科学・探査小委員会からの問いかけに答えるための工学検討、理学検討チームの発足そして検討開始**
- 2019年12月 宇宙理学、宇宙工学、宇宙環境利用科学のコミュニティを主な対象としたレビュー会（「国際宇宙探査専門委員会による日本のアルテミス計画参加に向けた理学・工学検討結果」レビュー会）を開催**  
レビューア： 永田晴紀、関華奈子、山崎直子（宇宙科学・探査小委員会委員）、倉本圭（宇宙理学委員会委員長）、笠原次郎（宇宙工学委員会委員長）  
※レビュー会は報告書の内容をより良くすることを意図しているため、検討メンバーとレビューアは一部重複している。
- 2020年1月 宇宙科学・探査小委員会への回答**

## 2. 月における水（氷）探査に関する検討

### 2.1. 「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？」

#### 2.1.1. 月に水はあるのか？

##### **結論： 月に水はある**

月の水を議論する場合には月内部由来の水（月が形成し進化する過程で岩石中に取り込まれたもの）と外部由来の水（彗星の衝突などとして外部から月面にもたらされたもの）とを区別して議論することが必要。Q1 は、月極域に濃集する可能性が報告されている水（外部由来だと推定されるもの）に対する問いであることを前提とする。なお、月極域に存在する水ないしは水素の観測やその解釈に有益な実験研究に関する論文は 100 本以上出されており、その全てについてここで完全なレビューを示すことは本資料の目的とはしない。ここでは論文の主張の根拠となる各観測データが示唆する内容について以下にまとめる。またこの資料では緯度 85 度以上を極域と定義し、低緯度帯への外部由来の水の供給や水（もしくは水酸基）の観測に関しては議論しない。本資料で引用した論文の詳細な議論は日本惑星科学会誌の特集「月揮発性成分の研究による科学と探査」**[1]**および**[2]**についても参照。

これまでにリモートセンシングによる観測や飛翔体を月面に衝突させるなど多くの観測データから、月極域になんらかの水（ $H_2O$  分子または水酸基など）が存在するとの報告がなされており、極域になんらかの水が存在する可能性は十分にあると考えられている。**表 2-1** にこれまでに報告された月極域に存在する水（外部由来だと推定されるもの）に関する論文の代表的なものについて、観測手法毎に得られる情報の種類や得られているデータの質、水の存在に関する結果（肯定・中立・否定）、課題等をまとめる。なお、水があるかどうかについて議論するにはどれだけの濃度や量存在する場合に「ある」と評価するのかの指標が必要であり、この資料では JAXA が行ったとされる水（ $H_2O$  を想定）の資源利用のための技術検討を元に、0.5 wt%を仮の閾値として利用する。

##### リモートセンシングによる中性子観測、可視・近赤外波長の分光観測、飛翔体の衝突による放出物の観測、極端紫外分光観測を用いた研究

これらは観測手法の観点や得られているデータの信頼度が比較的高い。これら手法の論文では水の存在について肯定する報告が多数を占めており、水の存在を否定する論文は見つけられていない。中性子観測データの場合観測対象が水素であり水の直接観測でないこと、可視・近赤外波長の分光観測ではデータの S/N 比が低いなど課題はあり、そのため水の量の推定値には誤差があると考えられるものの、月極域における水の存在については信頼に値すると考えられる。なお、中性子観測データの空間分解能に関して解析手法の課題を指摘する論文や飛翔体衝突の放出物の観測において解析に足る十分な信号が得られなかった論文があり、これらについては中立と記載。

##### リモートセンシングによるレーダ観測

レーダ観測の結果については最も活発な論争が行われている。直接の太陽光が当たらず低温にな

る永久日陰領域にあるクレータ内に、周囲とは異なる特徴的な信号が得られていることについては多くの報告で確かめられているものの、その解釈として水（氷）なのか表面の地形や表層に存在する岩片に起因するののかという点で意見が分かれており、肯定・中立・否定それぞれが同じ数報告されている。観測手法に起因する水同定の難しさから、この手法の結果については今後も詳細な議論が必要である。

#### リモートセンシングによる永久影領域の反射率観測

この手法は月面の反射率が周囲より高い原因を表面に露出する氷だと仮定して解釈するものであり、該当地域の岩石種など地質情報や宇宙風化の程度など情報が得られない限り、本来水の存在について肯定も否定も行うことは困難である（例えば、レゴリス中に霜状に1、2 wt%の水が存在していたとしても、岩石種や宇宙風化による変動を上回って周囲よりも高い反射率として検出することは困難）。従って、水が存在すると仮定する場合には何%、水が存在していたとしても上限は何%など条件付きないしは制約を与える結果となる（そのような論文は中立と記載）。一部研究では温度との相関を見るなどして水の存在について肯定する結果も得られているが、全体として肯定・中立が同数の結果となっている。

#### その他手法

上記に加え、極域の永久日陰にあるクレータが他の場所に比べて浅くなっている結果を元に、クレータの底面に氷が濃集しているとする報告[39]や、Chandrayaan-1から放出したプローブ（CHACE）の観測から大気中の水を観測したとする報告[40]などもあるが、それぞれ直接水を観測したものではない、水の観測を主張するための源泉データが十分に示されていないなど理由から、肯定する結果ではあるものの、個々の論文の信ぴょう性については高いとは言えない。

今回引用した月面観測データを元にした約40本の論文（その他の手法で述べた論文は含めず、全体では肯定25本、中立8本、否定3本）の内容やそれぞれの観測データ信頼性等を総合的に判断し、月極域には水が存在する可能性が高いと考えられる。ただし、水の量、分布、形態（層状に存在するのか霜のようにレゴリスと混合しているのか、吸着かなど）について結論はまだ得られていない。また起源について知りたいが、それも現状では不明。月極域の水の調査については、これまでにリモートセンシングによる中性子観測、分光観測、レーダ観測、飛翔体衝突による観測、など着陸探査以外で実施可能かつ有効な観測についてほぼ網羅して実施されている。これらに加えて、より低高度での中性子観測や影領域に特化した高感度の分光観測など現状は未実施で有効な観測も残されているものの、いずれの観測でも水の存在や量、形態、分布位置などについて必要な情報を統べて得ることは困難。これらについて決定的な情報を得るためには、月極域に着陸してその場観測により直接的に水を同定・定量し、形態を調べる必要がある。

注釈：今回論文を引用するにあたり、同じ著者が複数の論文を同様の趣旨で発表している場合、代表的な論文1本に絞って引用している（そうすることで水の存在を肯定する論文数は減る方向となっている）。

表 2-1 これまでに報告された月極域に存在する水に関する論文のサマリ

| 観測手法                     | 観測対象と水の量への換算法                                 | 水の量推定値 (wt%)         | 空間分解能         | 観測深さ     | 観測手法上の信頼度          |      |        |      | 報告データの信頼度(質) | 水同定統合信頼度                               | 水の存在論文数の比                             | 観測手法やデータの課題  | 利用探査機(観測機器)   | 各論文との対応  |
|--------------------------|---|----------------------|---------------|----------|--------------------|------|--------|------|--------------|--|---------------------------------------|--|---|--|
|                          |   |                      |               |          | 水の同定               | 水の定量 | 空間分布情報 | 地下情報 |              |  |                                       |  |   |  |
| リモートセンシングによる中性子観測        | 水素. 水素の存在量を水に換算した場合の量を推定.                     | 0.5~0.7<br>0.5~4     | 15 km/pixel   | 表層<1m    | 水素 :<br>◎<br>水 : △ | ○    | △      | ○    | ○            | ○                                      | Positive:7<br>Neutral:1<br>Negative:0 | ・水なのか水酸基なのかの判別はできない<br>・空間分解能が低く、観測から推定できるのは観測領域内の平均値とした場合の存在量である。実際には空間分解能以下の領域に局所的により濃度の高い場所が存在し得る。                          | LP(NS),<br>LRO(LEND)LP(NS,GRS)&LRO(LEND)  | Positive:[3][4][5][7][8][9][10]<br>Neutral:[6]<br>Negative:NA                                  |
| リモートセンシングによる可視・近赤外分光観測   | 水(または水酸基). モデル計算による揮発性成分の吸収強度からの推定.           | 0.08~30              | 280 m/pixel   | 表層数mm程度  | ◎                  | ○    | △      | X    | △            | ○                                      | Positive:6<br>Neutral:0<br>Negative:0 | ・極域では信号強度が弱く、SNに課題(信号が不足する領域の情報も得られない)<br>・分光で観測できるのはごく表層(mmオーダー)のみであり、より深い場所の情報は得られない   | Chyandaraan-1(M3)<br>Cassini<br>Deep Impact                                       | Positive:[11][12][13][14][15][16]<br>Neutral:NA<br>Negative:NA                                 |
| 飛翔体の衝突による放出物のリモートセンシング観測 | 水や水酸基. モデル計算による揮発性成分の吸収強度からの推定.               | 5.6                  | 点観測           | 表層<1~数m  | ◎                  | ○    | X      | X    | △            | ○                                      | Positive:4<br>Neutral:1<br>Negative:0 | ・どの深さに存在したのかの情報不明<br>・信号強度が弱く、SNに課題<br>・局所的なデータであり水の分布について言えない   | LCROSS(Spectrometer, Earth observation, LAMP)                                     | Positive:[17][18][20][21]<br>Neutral:[19]<br>Negative:NA                                       |
| リモートセンシングによる極端紫外分光観測     | 水. フロストを仮定して2波長の反射率の違いから量を推定.                 | 0.1~2<br>@Tmax < 110 | 250 m/pixel   | 表層<500nm | ○                  | △    | ○      | X    | ○            | ○                                      | Positive:3<br>Neutral:0<br>Negative:0 | ・二波長の反射率の比であり、フロストを仮定した場合の推定であるため、データの信頼性の確認が困難<br>・極表層の状態しか知ることができない  | LRO(LAMP)   | Positive:[22][23][24]<br>Neutral:NA<br>Negative:NA   |
| リモートセンシングによるレーダ観測        | レゴリス内の円偏光比の増加. それが氷の存在に起因すると仮定し、そこから氷の量に換算する. | 1~10                 | 15x30 m/pixel | 表層1m程度   | △                  | △    | △      | △    | ○            | △                                      | Positive:3<br>Neutral:4<br>Negative:3 | ・表面ラフネスや岩石片の存在など水(氷)以外の要因でも類似の信号が得られるためそれらとの切り分けが困難  | LRO(Mini-RF)<br>地上レーダ観測, Clementine(レーダ), LP(NS)の統合解析<br>Chyandrayaan-1 (Mini-RF) | Positive:[27][28][29][30][31][32][33][34]<br>Neutral:[26][28][29][30]<br>Negative:[25][31][33] |
| リモートセンシングによる永久影領域の反射率観測  | 月面反射率. 反射率の高まりを表面に露出する氷に押し付けた場合の推定.           | 20, <7.5             | 10 m/pixel    | 表層数mm程度  | △                  | X    | X      | X    | ○            | △                                      | Positive:2<br>Neutral:2<br>Negative:0 | ・水氷以外に反射率を変える要因が複数あり反射率だけから氷の存在を肯定ないし否定することは困難.(1wt%レベルでの存在の否定も困難)<br>・反射率と温度(低温)との相関が良いことを根拠とする論文もあるものの、反射率が根拠として弱いことには代わりがない | LRO(LOLA)<br>SELENE(TC,MI)<br>LRO(LOLA, Diviner)                                  | Positive:[37][38]<br>Neutral:[35][36]<br>Negative:NA   |
|                          |   |                      |               |          |                    |      |        |      | 総合論文数        | Positive:25<br>Neutral:8<br>Negative:3 |                                       |  |   |  |

## 2.1.2. あるとしたら、(どこに) どれくらい? どの深さに?

### 結論： 不明

各観測データには水の存在を調べる上での手法的な限界や信号強度など課題があり、水が本当に存在するのかどうかについても 1 本の論文で誰しもが認めるような結論は出ていない。また、存在量についての各機器の測定値はばらつきが大きく信頼できない(表 2-1、報告によって 3 桁程度のばらつきがある)。また多くの測定は月表面の水しか測ることができていないため、深さ方向の分布はよくわからない。そのため、極域における水の水平分布や総量を推定することも現状困難。

### 水の水平分布についてこれまでに得られている主な情報

リモートセンシングによる中性子観測データは極域全体における水素の水平分布に関して最も信頼性の高いデータが得られる手法である。以下にその例を示す(図 2-1)。緯度 85° 以上(一番中心に近い円の内側)では場所によらず、水素濃度が低緯度帯よりも相対的に高い領域が広く分布している。0.5 wt%以上の水の量が推定されているのは比較的大きな永久影の中で特に濃度の高い領域(紫色)であるが、そのような場所は複数存在している。なお中性子観測データの空間分解能は 15 km 程度であり、実際にはそれよりも小さなスケールでこの図よりも高い、もしくは低い濃度の濃淡が存在し得る。またこれら濃度の推定値は表層 1m の深さまでの平均として求められており、深さ方向に分布の不均一がある場合(例えば地下の温度安定がおこる 50cm 程度の深さに水の濃集層が存在するような場合)には、濃度はこの図よりも高い可能性がある。

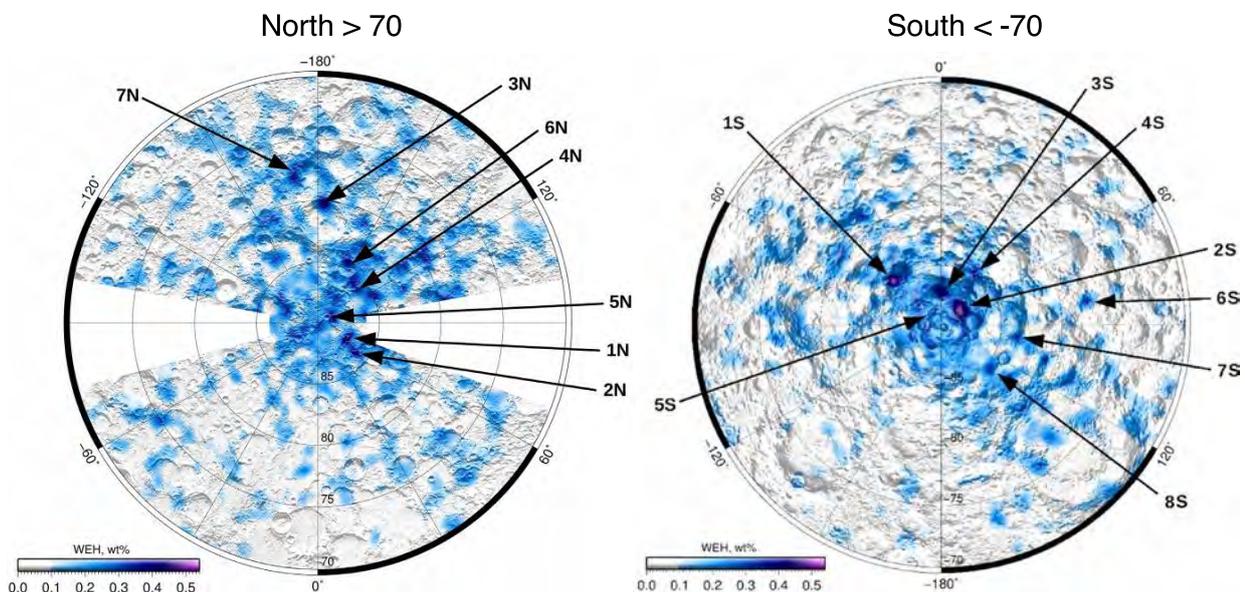


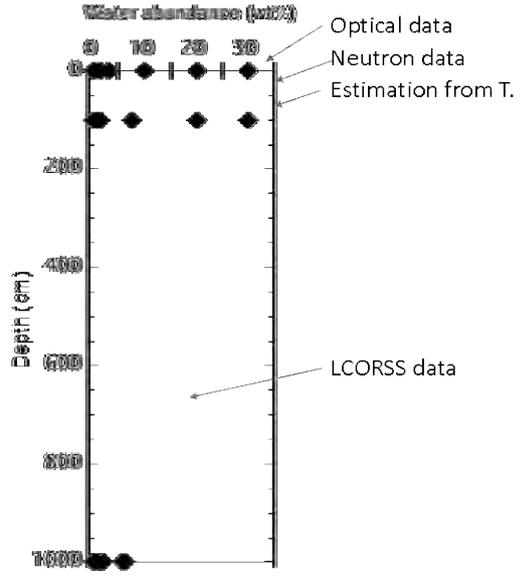
図 2-1 中性子観測による月極域の水の分布 (Sanin et al., 2017 [10])

値は水素を水に換算した場合の重量%を示す。緯度 85° 以上では場所によらず水素濃度が低緯度帯よりも相対的に高い領域が広く分布する。0.5 wt%以上の水量が推定されているのは比較的大きな永久影の中で特に濃度の高い領域(紫色)。なお、永久日陰の領域で必ず水の存在量が多いわけではない。

中性子観測データで永久影の領域で必ず水の存在量が多くなっているわけではないことの原因として、月の回転軸が過去と現在で変化しているために、現在の水の分布は過去の自転軸のもとで低温となった場所に濃集した水と、回転軸が変化した後に濃集した水の両方を検出しているためではないか、との研究も報告されている (Siegler *et al.*, 2016 [41])。

**水の量についてこれまでに得られている主な情報**

表 2-1 にまとめた論文について、各観測手法の観測深さと各論文で推定されている水の量との関係を図 2-2 にまとめる。水の量が推定されている場合はそのままプロットし、水の存在を肯定する論文で水の量推定がされていないものについては一律 1 wt%、肯定または中立の論文で水の量がある範囲で推定されている場合はその中間値、否定論文については 0 wt%としてプロットした。図の横軸は推定された水の量、縦軸が観測されている深さに対応する。水の量の推定値として統計的な処理ができるだけの論文数は無く、また論文ごとに推定値の信頼度にも違いがあるため一律に比較することは困難であるが、どの観測手法でも数 wt%程度と推定される報告が多い傾向にある。ただし、各観測手法に課題などがあり水の量について信頼度の高いデータは得られていない。



**図 2-2 表 2-1 の各論文での水量の推定値と観測領域 (深さ) の関係**

図の横軸は推定された水の量、縦軸が観測されている深さに対応する。緑、オレンジ、青色の各ハッチはそれぞれ中性子観測、天体衝突 (LCROSS) による放出物観測での観測領域 (深さ)、シミュレーションによる氷の分布深さの推定値を示す。

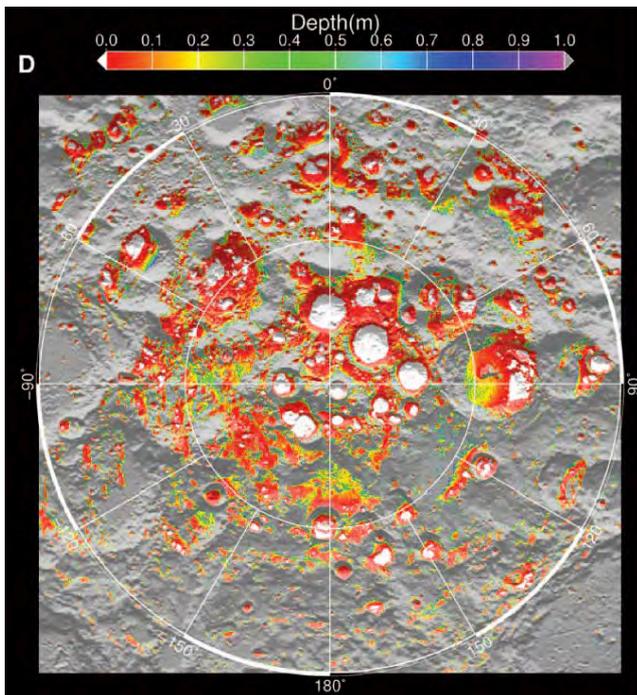
**水の存在する深度についてこれまでに得られている主な情報**

既存観測データからの情報

表 2-1 にまとめたように、各観測手法により水の存在を検知可能な深さが異なる。中性子観測データは表層約 1 m 程度まで、分光観測による月面観測データでは波長にもよるが数 mm 程度までを観測しており、飛翔体の衝突による放出物の観測では表層数 m までに存在していた水を放出させたと推定されている。これら観測手法のいずれでも水が検知されていることから、場所により多少異なる可能性はあるが表層から深さ数 m 程度の領域に水が存在する可能性が高いと考えられる。

## 表面温度からの推定

観測データではないものの、深さ方向の分布を推定するための情報として LRO の観測機器 Diviner で観測した月表面の温度データから地下の温度を推定し、各地点で水がどの深さで氷として存在し得るか（地下どの深さで昇華温度を下回るか）を推定したマップが報告されている（**図 2-3**、Paige *et al.*, 2010 [42]）。それによれば、極域の広いエリアに地下 1 m 程度までに氷が存在し得る領域が分布しており（図で白または赤から紫の色で示された領域）、この推定が正しければ 1 m 以内の深さに水が存在する可能性がある。この図は 10 億年あたりの氷の昇華量が  $1 \text{ kg/m}^2$ （純粋な氷の層があった場合に、10 億年で 1mm の厚さが昇華する速度）以下となる地下の温度領域の深さを示したものであり、実際に水があるかどうかを示すものではないので注意が必要。実際の水の分布は水の供給（天体衝突などによる直接的な供給と水の移動による供給も含む）レートと昇華速度、温度条件等に依存し、10 億年以内の期間であれば水を保持できる領域が、この外側に存在すると考えられる。また、温度データは空間分解能が 250m/pixel 程度であるのに対して、月面には実際にはもっと小さなスケールの地形に起因する影が存在するため、この図がどこまで実際の月面の温度に近いかはよくわからない点にも注意。



**図 2-3 月表面温度から推定した氷が 10 億年以上安定に存在する地下深度**

南極域緯度 80 以上の領域が示されている。10 億年あたりの氷の昇華量が  $1 \text{ kg/m}^2$ （純粋な氷の層があった場合に、10 億年で 1 mm 昇華する速度）以下となる地下の温度領域の深さを示したもの。白は表層に氷が長時間安定して存在し得る領域で灰色は 1 m の深さ以内には安定に存在し得ない領域。（Paige *et al.*, 2010 [42]）

## 水の挙動のシミュレーションからの推定

昇華・凝結を考えた場合にどのような温度条件の時に水がもっとも効率よく移動するのかをシミュレーションにより調べた研究によれば（Schorghofer and Aharonson, 2014 [43]）、温度の日変化により氷の昇華温度をまたぐ温度条件となる（平均が 105 K 以下、最高温度が 120 K 以上）場所で最も効率よく水の濃集が起こると考えられる（**図 2-4**）。著者らはこの温度差により水が昇華・凝結を何度も繰り返しつつ移動することで、レゴリスの特定の深さに濃集するようになると考え、これを pumping effect と呼んでいる。図の青で示される温度範囲が pumping effect が効率的に起こる温度範囲。従来、最高温度が昇華温度以下（図の classical cold trap で示される破線より低い温度

条件) の場所に水が濃集すると考えられてきたが、この研究により昇華温度の近傍での温度変動も重要であることを示す結果である。pumping effect が効率的に起こる温度が実現されるのは、地下の温度変動が無くなる深さ (skin depth) である地下 0.5 m 程度 (レゴリスの粒子サイズなどに依存する) であると推定されている (図 2-5)。この効果で地下に濃集するのは供給量全体の 1、2 % であるものの、どの場所・深さで水が氷として安定に存在するのかを考える上では重要な効果。また水平方向の分布としては極にごく近い領域では、赤道方向を向いている斜面で効果的に起こることが推定されている。このような水の濃集原理を考えることは非常に重要である一方、赤道方向を向く斜面でのみこのような効果が起こるのかどうかは月面の温度の推定精度に大きく依存するが、月面の各地点での (数百 m 以内の規模での) 温度は未だ十分な精度で得られていないことから、どのような場所で pumping effect が効率的に起こるのかは今後も評価が必要である。

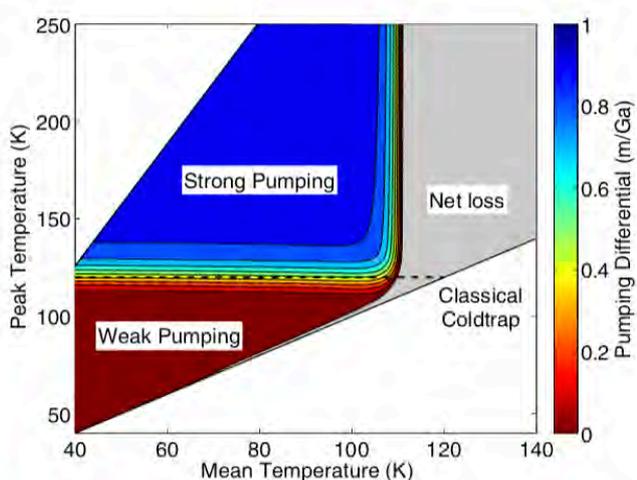


図 2-4 水が昇華・凝縮を起こす温度条件

青色で示される温度範囲が pumping effect が効率的に起こる温度範囲。赤色で示される温度範囲では弱く pumping effect が働く。

(Schorghofer and Aharonson, 2014 [43])

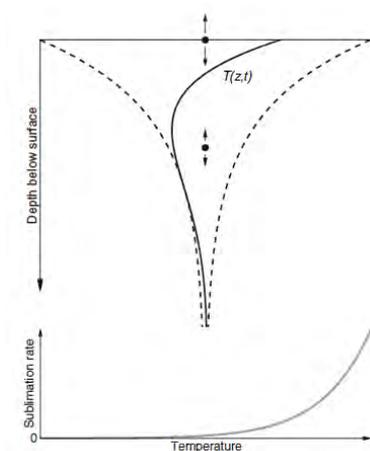


図 2-5 水が濃集する地下の温度条件 (概念図)

表面で凝結した水が昇華と、より低い温度となる地下への浸透を繰り返しながら、最終的に温度が時間によらずほぼ一定となるような深さ 50 cm 程度の位置に氷の濃集する層を形成すると推定される。

(Schorghofer and Aharonson, 2014 [43])

### 2.1.3. どのような形態であるか？

**結論： 不明**

既存観測データからの情報

極域の水を議論する場合に、水が分子として存在するのか水酸基なのか、また吸着水なのか鉱物

中に存在するのかなど水の形態に関する情報は、水の起源を考える上でもまた資源利用の観点からも重要である。これまでの観測データで、これらの識別ができていない例はほとんど無い。具体的には Colaprete *et al.* 2010 [17]による飛翔体衝突時の放出物観測により分子種を推定したとの例があるが、衝突による温度上昇により月面上に存在していた時点と放出物として観測された物の間に形態や分子種の量比の変化があり得ることなどから、形態については十分な情報は得られていない。また Li *et al.*, 2018 [16]では Chandrayaan-1 に搭載した M3 による分光観測で月表面に水氷を観測したと報告されているが、表 2-1 の課題に記述したように S/N 等の課題があり水酸基と水の識別はできていない (図 2-6)。

一方、飛翔体衝突時の放出物の極端紫外波長での観測により水素分子などに起因する蛍光発光が確認されており、これら水素分子の起源として、極域の永久日陰領域に存在する水と銀河宇宙線や太陽エネルギー粒子線との反応により生成したと考えれば、極端紫外波長による観測量の説明がつくことから、間接的に水分子が存在するとする報告もある (Jordan *et al.*, 2013 [44])。

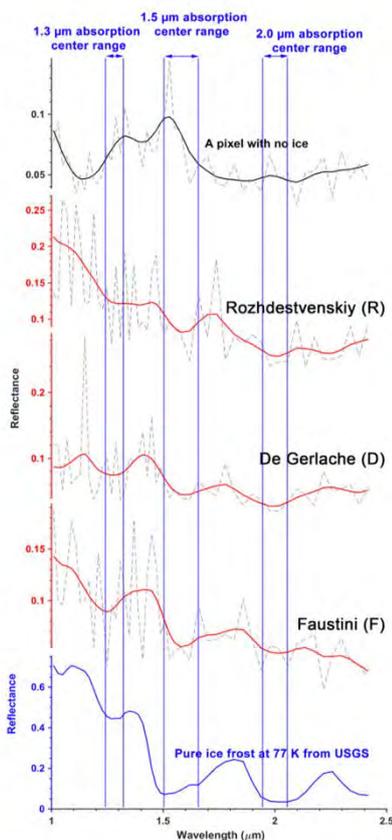


図 2-6 水氷の直接的証拠とされる反射スペクトル

赤いラインで示されているのが氷を同定したとされる月面の観測データにスムージングを掛けた結果で青いラインは純粋な霜のスペクトル。グレーの破線で示されているのが赤いラインの源泉となる生の観測シグナル。縦に引かれた青いラインは氷による吸収が存在する波長域。生のシグナルでは S/N が悪く吸収形状は認識できない。S/N に起因して水がどのような形態で含まれているのか推定することは困難。(Li *et al.*, 2018 [16])

## 引用論文

- [1] 日本惑星科学会誌 2019, 遊星人, vol 28、特集「月揮発性成分の研究による科学と探査」.
- [2] Lawrence, 2017, *J. Geophys. Res.*, 122, 21. レビュー
- [3] Feldman *et al.*, 2000, *J. Geophys. Res.*, 105, 4175.
- [4] Elphic *et al.*, 2007, *Gephys. Res. Let.*, 34, doi:10.1029/2007GL029954.
- [5] Lawrence *et al.*, 2011, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2010JE003678.
- [6] Lawrence *et al.*, 2011, *Science*, 334, 3.
- [7] Mitrofanov *et al.*, 2012, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JE003956.
- [8] Miller *et al.*, 2012, *J. Geophys. Res.*, 117, E11007, doi:10.1029/2012JE004112.
- [9] Teodoro *et al.*, 2014, *J. Geophys. Res.*, 119, 574.

- [10] Sanin, A. B. *et al.*, 2017, *Icarus*, 283, 20.
- [11] McConnochie *et al.*, 2002, *Icarus*, 156, 335.
- [12] Pieters, C. M. *et al.*, 2009, *Science*, 80, 568.
- [13] Clark, 2009, *Science*, 326, 562.
- [14] Sunshine *et al.*, 2009, *Science*, 326, 565.
- [15] McCord *et al.*, 2011, *J. Geophys. Res.*, 116, E00G05.
- [16] Li *et al.*, Proc. 2018, *Natl. Acad. Sci.*, 201802345.
- [17] Colaprete, A. *et al.*, 2010, *Science*, 80, 463.
- [18] Mitrofanov *et al.*, 2010, *Science*, 330, 483.
- [19] Hong *et al.*, 2011, *Icarus*, 214, 21.
- [20] Strycker *et al.*, 2013, *Nat. Commun.*, 4, 2620.
- [21] Heldmann *et al.*, 2015, *Icarus*, 254, 262.
- [22] Gladstone *et al.*, 2012, *J. Geophys. Res.*, 117, E00H04, doi:10.1029/2011JE003913.
- [23] Hayne *et al.*, 2015, *Icarus*, 255, 58.
- [24] Sefton-Nash *et al.*, 2019, *Icarus*, 332, doi: 10.1016/j.icarus.2019.06.002.
- [25] Stacy *et al.*, 1997, *Science*, 276:1527.
- [26] Simpson and Tyler, 1999, *J. Geophys. Res.*, 104, 3845.
- [27] Nozette *et al.*, 2001, *J. Geophys. Res.*, 106, 23253.
- [28] Campbell *et al.*, 2006, *Nature*, 443, 835.
- [29] Raney *et al.*, 2012, *J. Geophys. Res.*, 117, doi: 10.1029/2011JE003986.
- [30] Thomson, B. J. *et al.*, 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 39, 2.
- [31] Fa and Cai, 2013, *J. Geophys. Res.*, 118, 1582.
- [32] Spudis *et al.*, 2013, *J. Geophys. Res.*, 118, 2016.
- [33] Eke *et al.*, 2014, *Icarus*, 241, 66.
- [34] Patterson, *et al.*, 2017, *Icarus*, 283, 2.
- [35] Haruyama *et al.*, 2009, *Science*, 322, 938.
- [36] Zuber *et al.*, 2012, *Nature*, 486, 378.
- [37] Fisher *et al.*, 2017, *Icarus*, 292, 74.
- [38] Qiao *et al.*, 2019, *Earth Sp. Sci.*, 6, 467.
- [39] Sridharan *et al.*, 2010, *Planet. Space Sci.*, 58, 947.
- [40] Rubanenko *et al.*, 2019, *Nat. Geosci.*, 12, 597.
- [41] Siegler *et al.*, 2016, *Nature*, 531, 480. lunar polar wander
- [42] Paige *et al.*, 2010, *Science*, 330, 479.
- [43] Schorghofer and Aharonson, 2014, *The Astrophys. J.*, 788, 169.
- [44] Jordan *et al.*, 2013, *J. Geophys. Res.*, 118, 1257.

## 2.2. 「Q2. もしQ1に答えられないなら、どうすれば分かるか？」

### 結論： 月面着陸探査による水の直接分析

この問いに応えることは**2.1.2項**と**2.1.3項**で識別された knowledge gap を埋めることに等価である。knowledge gap を埋めるためにはいくつかのアプローチがあり得るが、中でも最も重要なのは月面に着陸してその場において直接水の分析を行う探査である。さらに水の存在する空間分布(水平方向の広がり、深さ)と存在量を調査し、水の存在形態を明らかにしなければならない。この目的のために**2.2節**の構成を以下のとおりとした。

- **2.2.1項**において着陸探査の必要性をまず明らかにする。
- 「水平方向の広がり」を明らかにするために月面移動(**2.2.2項**)と表層探査(**2.2.3項**)について詳述する。
- 「深さ」については表層探査(**2.2.3項**)に加えて、掘削(**2.2.4項**)を行うことでより確実な情報を得ることができる。同時に表層探査(**2.2.3項**)と掘削(**2.2.4項**)からは「存在量」を明らかにすることができる。
- 「存在形態」の解明にはサンプリングと同時に月面上でのサンプル解析(**2.2.4項**)、特に加熱と質量分析の組み合わせが必要である。これらに加えて、『点』の観測である着陸探査の成果を広範な領域内の水資源探査へ拡張させて行くためには水の供給過程についての理解が必要となる。サンプル解析(**2.2.4項**)において、環境計測を行うとともに同位体測定や希ガス測定など一歩踏み込んだ化学分析を行うことが強く望まれる。
- **2.2.5項**において、**Q2**に応えるための観測要求と技術要求をまとめた。

なお、本資料の目的は理学・工学のコミュニティが国際宇宙探査という機会を活用するための判断材料を提供することにある(**1.3節**)。月極域探査の審査を行うことではないので、この節では**Q2**の問に対して科学的見地から有用と思われるアイデアを列挙するに留める。個別の手法についてのミッション要求を明らかにすることは月極域探査のミッション定義審査に委ねることとする。

### 2.2.1. 着陸探査の必要性

月の水の有無を調べるには、日本の得意とする技術を伸ばし、特徴のある観測を実施することが重要である。リモートでは周回軌道上からの中性子観測により月面上での H マップを得ることが考えられるが、直接的に水の有無を確定するためには、**着陸機やローバを用いた月面着陸探査が必須**となる。特に観測データのレビュー(**2.1節**)からは、ローバにより永久日陰(低温で表層に水が存在する可能性がある)にアプローチし、そこで水の観測を行うことが重要と判断される。

以下、地上観測、飛翔体衝突、月周回軌道上のリモートセンシング、月面への着陸探査、それぞれの方法の検討結果を簡略にまとめる。

#### 地上観測

極域の観測が困難であり、空間解像度が低い。これまで取得された軌道上からのリモートセ

ンシングデータ(表 2-1)を上回る成果は得られない。

#### 飛翔体衝突(LCROSS 型)

特定地点での有無は判明するが、水の存在する深さは分からない。また既存データでは、水平分布にはムラがある可能性が大きく、永久影のなかですらも水の存在する水平方向の拡がりを限定することはできない(図 2-1)ため、『点』の観測だけからは資源としての有用性を評価することができない。

#### 周回軌道上

**低高度での中性子観測**で H マップの空間分解能を上げることができる。小型衛星を使った観測は重要かつ実現可能だが、LunaH-Map ミッションとしてすでに米国での計画が先行している。

「かぐや」で実績のあるレーダ観測は原理的に地下の水の検知が可能だが、実際には表面ラフネスのためにデータ解析が著しく困難である。

#### 着陸探査

その場内部構造探査(地中レーダー、地震探査、電磁気探査など)と掘削を組み合わせることで確実に水の有無、水平方向の拡がり、深度が判明する(表 2-6 参照)。

今後、開発が必要な測定装置については、第一に、直接的な測定を可能とするために 1m 程度までの掘削技術の獲得が必須である。また理学的観点では、従来のリモートセンシングで利用されてきた手法に加え、より直接的な手法による水の同定・定量、同位体測定を行うことや、月面における環境計測、例えば表層の圧力や含まれる学種の同定などが重要である。

表 2-2 着陸探査の観測手段と技術的成立性

| 観測手段   | 技術的成立性  | 備考   |
|--------|---|--|
| 軟着陸    | ピンポイント着陸                                      | SLIM での実証  |
| 月面移動   | ローバ   | 永久影深くまで侵入することは困難   |
| 表層探査   | 地中レーダなどの測器<br>水存在量を推定する測器<br><br>1.5 m 以上(掘削) | 利用可能な資源であるためには 0.5wt%以上の水氷が 1 m 以浅に存在していなければならない(有人本部が定めた基準)<br>下限は中性子観測とシミュレーションによる |
| サンプル解析 | 水素同位体比、質量分析計、<br>熱重量分析計                       | 水の起源の同定、揮発性成分の存在量評価  |

## 2.2.2. 月面移動

#### 露頭到達技術(ヘラクレス TF, 5.1.2)

ピンポイント着陸技術によって達成される場合もあるが、将来のアルテミス計画参加、重力天体探査を見越して、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を開発しなければならない。

また、傾斜地へのアクセス技術も必要である。水氷が存在する蓋然性が最も高いと考えられる永久影クレータは、同時に最もアクセスが困難な地形でもある。技術的に高いハードルがあるとしても、日本の科学技術の優位性を維持していくために避けてはならない探査対象である。親ローバ(与

圧ローバもその 1 つ) によって比較的平坦な地形を長距離走行し、チャレンジングな地形 (崖や傾斜地) 付近まで到達したら親ローバにテザーで接続された子ローバ (サンプル採取機能を有する小型プローブ) を降ろしてサンプルなどを採取してくるというシナリオが考えられる。米国 JPL では、DuAxel ローバ、日本では iSpace のローバが同じようなシナリオを考えている。

## 2.2.3. 表層探査

### その場内部構造探査(ヘラクレス TF, 5.1.1)

地上では、弾性波探査、電気探査、磁気探査、重力探査など、様々な原理に基づく物理探査法が実用されている。ただし、水・氷のみを特定して観測できる技術ではないので、キャリブレーション等が必要となる。地上における地盤調査・地質調査の専門家と連携しつつ、浅層の水・氷の探査に有効な手法の検討が望まれる。とりわけ、地上で土中水分検出に利用されている誘電率センサや放射同位体水分計を宇宙用に応用することは有望である。

重力天体に特化した観測技術として、ローバが月面を走り回りながら実施するアクティブ地震探査があげられる。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 (深度数 km くらいまで) を推定できる可能性がある。

### 着陸機もしくは小型衛星搭載レーダサウンによる月表層地下構造・層序の広域探査(Gateway TF, 4.1.2.1-2b)

月資源利用のための基礎調査に有用な技術である。ただし、着陸機/小型衛星で実現するためにはレーダサウンダの小型化が必要となる。(うまく行けば重要だが、成功の可否判断が難しい項目)

### 着陸機、ローバに関連する要素技術

関連する要素技術を表 2-3 にまとめる。いずれもさらなる深宇宙探査には必要な技術でもある。低消費電力技術は月の極域・永久影部探査で、探査機の小型・高性能化および宇宙機バスの革新的な軽量化は月面の多点観測の際に必要なものかもしれない。

表 2-3 表層探査の関連要素技術 (「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より)

| 要素技術                   | 開発・実証ステータス (TRL など)                             | 実験・実証事例と実証された時期   |
|------------------------|---|---|
| 着陸用航法センサ               | TRL4 (Flash LIDAR)                              | Flash LIDAR は ALL JAXA の課題として設定され、ISAS のチームによる開発により、HTV-X の搭載が検討されている。着陸レーダは 2000 年代半ばから ISAS で開発され、SLIM に搭載される。その先、さらなる高精度化に向け、キャリア周波数の高周波化などが望まれる |
| ランダー技術 (極限地形へのアクセスを含む) | TRL4 (SLIM)                                     | SLIM で月面へのピンポイント着陸 (斜面) を実証。火星に向けては、大気を有する重力天体特有の技術課題に取り組む必要あり (エアロキャプチャ等を含む)。展開型エアロシエルによるナノランダーミッションは SPUR として提案された。                               |
| ローバ技術 ※                | TRL8-9 (MINERVA-2)<br>TRL4 (SLIM LEV)           | 対象天体に合わせて移動機構等を最適化<br>はやぶさシリーズの MINERVA、SLIM 搭載予定の小型プローブ (LEV)  |
| 内部構造の物理探査技術            | (1) 地震計・熱流量計 :<br>月面については TRL8<br>(2) レーダサウンダ : | (1) 地震計・熱流量計 : Lunar-A プロジェクトにおける FM 製作、Selene-2、APPROACH 構想における研究開発<br>(2) レーダサウンダ : マルコポーロ提案 (~2010 年)、MMX 計画                                     |

|  |      |  |
|--|------|--|
|  | TRL3 | (2016 年～)における地下物理探査装置の宇宙応用にむけた改修・研究開発” |
|--|------|--|

※工学検討チームから以下のコメントあり。

このTRLについては、小型プローブ（限定的な理学機器のみを搭載）というカテゴリと、ローバ（主たる理学機器を運ぶために設計されたもの）というカテゴリに分けるべき。2019年時点での日本のローバは小型プローブのみであり、本格的な科学探査（サイエンスミッション目的）に資するローバという意味では、TRLはまだ4程度だと思われる。

## 2.2.4. サンプル解析

水の起源を同定するためには、D/H比やO同位体比の分析が必要となる。こうした分析データは、月面上での物質移動や分布を知る手がかりになるとともに、月全球での揮発性元素量の推定に役立つ。

### 月周辺への水の供給（月極域 TF, 5.1.2, 5.3）

月表層に存在する可能性のある水の起源を知り、地球・月周辺への外部からの水の供給過程や太陽系内における水など揮発性成分の移動に関する知見を得ることは、『点』の観測である着陸探査の結果を敷衍して、資源獲得という目的のために非常に重要である。太陽系の進化や生命発生環境の把握の上でも、火星における水を含む物質探査に繋がる。その達成にはローバによる移動技術および表面試料のその場観測技術、物理探査（レーダ、地震波など）、掘削（ボーリング）探査が重要となる。揮発性物質・有機物用の観測技術としても、その場での同位体測定や希ガス分析のために加熱や質量分析技術等、その場高質量分解能質量分析装置のパッケージが必要となる。

他方で、現在の月面への水供給過程を知ることは月環境科学の観点から、また将来の宇宙資源利用の観点からも重要である。月表面でのOH基や水分子の生成・輸送・消失には太陽風陽子が深く関わっていることが、「かぐや」やChandrayaan-1による月周回軌道での観測によって強く示唆されている。日本の月科学の強みを活かすために、月環境（陽子・重イオン、中性水素原子、負イオン、電子、ダスト、磁場、可能であれば電場）の定点観測を行うべきである。

### 資源探査（ヘラクレス TF, 2.2.1）

揮発性物質は、ライフサポートや燃料、還元剤の獲得などの意味で重要である。太陽風のインプラネーション起源や彗星起源などのシナリオを考えても、濃度が場所によって異なる可能性が高く、複数地点での観測が極めて重要となる。

### 月表層・浅地下の含水鉱物関連質有機物の検出（Gateway TF, 4.1.2.1-2c）

小型分光器による近赤外観測を開発し、掘削孔を使って月資源利用のための基礎調査を行うことが望まれる。

### 複数地点サンプリング（ヘラクレス TF, 3.1.3）

岩石の化学組成の多様性や系統的変化の特徴が有効な制約条件となるような研究では、一個あたりの試料の重量を抑えてでも、多数の試料を採取した方が目的を達成しやすい。技術的、時間的制約を鑑みなければ、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。

## 掘削、サンプリングに関連する要素技術

探査センターの国際宇宙探査シナリオ説明会資料に「Surface excavation and construction」が

入っており、科学探査から一歩進んだ「掘削や地下アクセス」が Gateway 構想に付随してくると考えられる。ここから、地球で言うところの「地盤調査から杭打ち建設」といったロードマップが読み取れる。その場資源利用 (ISRU) においても、マニピュレーション技術、物理探査技術、掘削技術は不可欠な技術になると考えられる。サンプル解析に関連する要素技術を表 2-4 にまとめる。

#### マニピュレーション

水氷探査において、サンプリングツールを直接的にハンドリングするために必須であり、観測機器の設置、深度方向へのアクセスに有用である。

#### 地下掘削技術(重力天体)

観測機器の設置、深度方向へのアクセスに有用である。サンブラ、ドリル等の小口径鉛直掘削に加え、ブレードやバケットによる掘削方法も考えられる。

#### 試料採取機構 (重力天体)

地盤にアクセスし、試料を採取できる。

表 2-4 サンプル解析の関連要素技術 (「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より)

| 要素技術           | 開発・実証ステータス (TRL など)                                       | 実験・実証事例と実証された時期                            |
|----------------|---|--|
| 質量分析等その場物質分析技術 | OKEANOS 着陸機でその場分析用 MULTUM 質量分析装置 BBM を開発中(2018 年段階で TRL4) | OKEANOS 着陸機用 MULTUM-BBM 試料採取&分析実験(2015 年～) |
| マニピュレーション      | TRL3-4  | SELENE-2 2m 級マニピュレータ MMX サンブラ、など           |
| 地下掘削技術(重力天体)   | MMX で円筒コアサンブラ開発中(2018 年段階で TRL3)                          | MMX 円筒コアレゴリス掘削実験(2016 年～)                  |
| 試料採取機構(重力天体)   | SELENE-R/ヘラクレスに向けて開発中                                     |  |

## 2.2.5. 観測要求と技術要求のまとめ

Q2 に応えるための観測手段/データ、関連する技術項目、これまでの科学・探査の実績・強み、将来宇宙探査への発展を表 2-5 にまとめる。

月極域探査については、「月の水探査」の視点だけではなく、「月、そして火星へ」という文脈で評価することも必要である。理学的観点からは、将来の宇宙探査に重要な科学技術は、サンプル解析(物質科学)、月環境計測(プラズマ科学)、内部構造探査(物理探査)に大別される。それぞれの分野において、日本の役割と強みを伸ばすために、中核となる観測装置は国内で開発し、技術を継承・発展させていかなければならない。

サンプル解析(物質科学)において第一に重要なのは同位体比測定である。日本の宇宙物質科学は、我が国が保有する大量の隕石と、「はやぶさ」「はやぶさ 2」によるサンプルリターンによって支えられ、世界の最先端を切り拓いている。近年では同位体分析が目覚ましい発展を遂げており、この優位性を失ってはならない。第二に質量分析計は、地球電磁気学・地球惑星圏科学において磨き上げられてきた観測装置であり、「かぐや」でも活躍した強みである。日本の「武器」として、国際協力プロジェクトへ積極的に売り込んでいきたい。また、海外の将来探査では計画されていない熱重量分析は土壌中に含まれる揮発成分の定量評価を可能にするため、今後取り組むべき課題と考える。

月環境計測(プラズマ科学)では、「かぐや」での科学成果を最大限に活かして、軌道上の観測デー

タを月面まで繋ぐことが望まれる。「かぐや」他で既開発の観測装置を使って OH 基や水分子の生成・輸送・消失過程を調査し、低コストで着実な成果が実現できる。第二に、月面上のダスト観測は将来の有人探査に向けて必須の観測であるのみならず、火星表面での環境計測にも発展させられる重要テーマである。第三に月面のプラズマ観測は固体惑星と太陽風プラズマの相互作用に関わる本質的理解をもたらす。これらの観測は移動を必要としないので、着陸機での観測が可能である。

内部構造探査(物理探査)は、将来の火星地下水圏探査にも必須の技術である。掘削に加えて、地震探査、レーダ探査の技術を日本独自に獲得しなければならない。地震学は日本の地球科学の強みであり、世界有数の研究レベルと研究者人口が控えている。日本独自のデータ獲得により、宇宙開発人材の急速な増大を期待することができる。近い将来国際協力により月面上に物理探査ネットワークが展開されるのは確実と予想されるので、日本独自の地震計を早期に開発、実用化しておく意義は非常に大きい。レーダ探査は「かぐや」の科学成果を活かす観測技術である。海外チームとの共同開発となる場合でも、レーダーアンテナなど主要な部品レベルの開発を日本が分担して存在感を維持することが必要である。これらの他にも電磁気探査や重力探査、誘電率センサ、放射性同位体水分計など地上技術の応用には重要かつ有用な開発要素があり、超小型探査機を用いた機会を活用して技術レベルを上げていくことが求められる。

**表 2-5 「月の水」を明らかにするための科学技術**

| 獲得すべき観測手段/データ | 求められる技術項目   | 実績・強み                                  | 将来宇宙探査への発展                              |
|---------------|---|--|---|
| 着陸技術          | 着陸用航法センサ  | Flash LIDAR 開発                         | HTV-X                                   |
| 水の水平方向の拡がり    | ローバ(長距離走行)<br>その場内部構造探査<br>レーダサウンダ                | SELENE-2 検討<br>地上の物理探査<br>「かぐや」 LRS    | アルテミス計画<br>火星地下水圏、小天体探査<br>〃            |
| 水の深さ分布        | 掘削<br>その場内部構造探査<br>小型分光器                          | 地上の物理探査<br>「かぐや」、SLIM                  | アルテミス計画<br>火星地下水圏、小天体探査<br>〃            |
| 水の存在量         | 質量分析計   | 「かぐや」                                  | 火星地下水圏、小天体探査                            |
| 水の供給過程        | 質量分析計(同位体比測定、希ガス分析)<br>加熱機構<br>月環境の定点観測           | 「かぐや」<br><br>「かぐや」                     | 火星地下水圏、小天体探査<br><br>〃<br>アルテミス計画        |
| 露頭到達          | ピンポイント着陸<br>ローバ(長距離走行)<br>ローバ(傾斜地アクセス)<br>ローバ(越夜) | SLIM<br>SELENE-2 検討                    | 火星地下水圏、小天体探査<br>アルテミス計画<br>〃<br>アルテミス計画 |
| 複数地点観測        | 超多点探査   | ミネルバ、OMOTENASHI、<br>SLIM/LEV<br>超小型探査機 | 火星地下水圏                                  |

## 2.3. 工学が実現する月の水分布の水平探査

資源利用のための水探査を『決着』させるためには、これまで述べてきたように、水の

- A) 存在形態
- B) 存在度(重量 %)
- C) 空間分布[ C1)深さと C2)水平方向の広がり ]

を知る必要がある。

A)とB)については、希ガス分析のための加熱技術や質量分析が用いられるので、一定のリソースが必要である。(超小型着陸機ではなく、中型以上の着陸機/ローバが必要)

C1)についても、現段階では1 m以上の掘削が必要と考えられ、一定のリソースが必要である。C2)についてはローバ搭載の地中レーダ探査や地震波探査、電磁波探査で調査できるかもしれない。ただし、(ローバの踏破性能) < (水資源の広がり) であるならば1台(もしくは数台)のローバでは不可。左記の条件が成り立っているかは現段階では不明。

従って、月極域探査においてA)、B)、C1) (および、場合によってはC2))の目処がたった段階で、第二弾の探査としてC2)の調査が考えられるべきである。その場合にもA)、B)、C1)の観測結果を考慮して

- 軌道上からのリモートセンシング(レーダサウンダや中性子観測など)
- 月面上での物理探査(地震計、電磁気計測器など)ネットワーク
- 超小型探査体による超多点探査

のトレードオフを行うべきである。このように、短期的には数機の着陸機ローバで水の存在と存在形態を探査することがアルテミス計画の方向性に大きなインパクトを与える。

ただし、その次のフェーズとして実際の水採取・利用を考えると、極域のどの場所で水採取・利用を行うのが効率的なのかを知る必要が必ず出てくる。それには極域全体での水の分布を細かいスケール(km以下程度)で知る必要があるので、超小型探査体による超多点探査を行い、細かいスケールでの水分布を把握する意義は大きい。(例えば既存の中性子観測の空間分解能は15km/pixelであり、着陸機・ローバで行う探査領域は数100m四方程度なので、着陸による探査領域以外の場所の情報を得るには他の観測情報が必要)。

ここでは、工学の参加項目を以下の条件で考える。

- a. アルテミス計画の方向に適合する。
  - b. 水の探査にフォーカスする。
  - c. これまでの科学・探査の実績・強みを活かす。
  - d. その成果が今後の科学・探査(月探査に限らない)の構想に寄与する。
- d. では宇宙科学技術ローマップの「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」にとどまらず新たな可能性にも紐付けた。

## 2.3.1. 超小型探査体による超多点探査

中型着陸機、親ローバ、あるいは多数の超小型着陸機から投射される、多数の超小型探査体による平面的探査。ISASの超小型探査ローバシリーズとして、ミネルバ～OMOTENASHI～SLIM/LEVと繋がっていく系譜がある。中型着陸機、親ローバから投射される超小型探査体の開発は比較的容易だが、多数の超小型着陸機が自力で月面に到達して投射する場合は、3.2.1項で述べるように技術的難易度が高いため、深宇宙輸送ネットワークを構築していく戦略の中で開発を進める必要である。

- a. 水の探査は、数機の着陸機・ローバの探査では決着できないのは明らか。
- b. 超小型探査機、OMOTENASHI、表面観測機器
- c. 他天体での多点探査、超小型探査機、超小型その場分析技術、自律運用技術
- d. 探査体の小型・高性能化（表2-6参照）

超多点での地下の空間的な水分布については、例えばアクティブな震源と超小型地震計（受信側の地震計は1個2、3 cm直径程度で実施可能との研究報告あり）を多数月面上にばら撒き、地下構造から水分布を把握する、という地震探査の手法が考えられる。しかし、地震計による探査法は土粒子間が氷で結合されるとマスとして剛性が高くなり地震波の伝わる速さが変わることを利用して地層構造を逆解析するものである。言い換えれば、土粒子の周りに水がありそれが凍っていたとしても、周囲の土粒子と結合されていなければ、水（氷）の存在を見過ごす可能性がある。また、仮に把握できるとしても、凍って硬くなっている領域（形）であり濃度まで推定するのは容易ではない。それでも長期的な視点で月惑星の内部構造探査を考える上では、水資源に限定しない地震探査は有力な候補であり、さらなる開発が期待される。

地表面での水分布であれば、RI水分計（中性子線の特徴を利用して土の水分量を計測）または簡便な土壌水分センサー（誘電率を計測）の利用が考えられる。前者は建設業界では周知の枯れた方法であり、後者は水の存在の有無は簡単に分かるが定量化するためには土壌のキャリブレーションが必要となる。これらの水分センサを搭載し、親ローバやGatewayと直接通信できる程度の出力の通信機能を有した超小型探査ローバ（限定的な理学機器のみを搭載）が上記の系譜上に沿うようなサイズ感で開発出来れば、それを親ローバが運ぶあるいは着陸機から散開するなどして、広域の探査をするシナリオが考えられる。水氷の存在形態を仮定する、または水氷探査の要求計測分解能を下げることで、ISAS超小型探査ローバシリーズのヘリテージを活かして「水氷があるか無いか」から「水氷がこの程度ありそうだ」へのステップの橋渡しが期待される。

表2-6 超多点探査の関連要素技術（「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より）

| 要素技術  | 開発・実証ステータス<br>(TRLなど)  | 実験・実証事例と実証された時期   |
|---|--|---|
| 小型軽量コンポーネント技術   | TRL3-4   | 一筐体・多機能コンポーネントや、MEMSによるワンチップ化や高密度実装を用いた小型軽量化、ドライバや電力供給部(PSU)の高効率化の試作などの研究開発を実施中（戦略研究） |
| 宇宙機バスの革新的な軽量化（例：現在の標準小型バス250 kgを150 kg級に、イプシロン余剰能力をミッション部に） | 現在の標準小型バスは250 kg級。バス機器の中には軽量小型の機器の開発が進んでいるものもあるが、組織的な検討は行われていない。 | NASA SMEXにおいては、衛星バスが150 kg級で実施されており、搭載できるミッション機器に自由度が多い。                              |

## 2.3.2. 超多点からの小型サンプルリターン

2.3.1 項を進展させ、超多点からのサンプルリターンを実現する、超小型離陸機・再突入による、小型サンプルリターン技術。自身で地球に直接戻るか、月周辺での探査機による回収。

- a. 水存在・利用可能性の精密探査の多点展開。
- b. サンプルリターン技術、小型固体ロケット、柔軟エアロシェル、小型ランデブ・ドッキング (DESTINY<sup>+</sup>、PROCYON mini)
- c. 他天体からのサンプルリターン、小型火星着陸探査、複数の探査機による探査
- d. サンプルリターン技術、惑星保護技術の発展 (表 2-7 参照)

その場で水を分析することと比較すると、サンプルリターンは難易度が相当に上がる。宇宙理工学の観点では c. のような波及効果は高く重要と考えられる。月面や Gateway 等にマストライバが建設されるならば、その利用によるカプセルの軌道投入は可能性の 1 つとして考えられる (3.2.2 項)。

表 2-7 小型サンプルリターンの関連要素技術 (「戦略的に獲得すべき科学技術リスト」より)

| 要素技術   | 開発・実証ステータス (TRL など)   | 実験・実証事例と実証された時期   |
|--|---|---|
| 突入／帰還飛行最適誘導制御技術  | TRL3-4  | 再使用実験機、再使用観測ロケットなどによるシステムレベルでの飛行実証を行う   |
| サンプルリターンカプセル技術   | TRL8-9 (はやぶさ、はやぶさ 2)<br>TRL3-4 (CAESAR など)  | 「はやぶさ」カプセルのヘリテージを利用しつつ、MMX、CAESAR、OKEANOS 等の各ミッションの要求を満足する高性能化の技術開発 (大型化・高速再突入・低温保管等) が必要   |
| アストロバイオロジー研究を可能とする往路惑星保護技術<br>(1) 火星の特別な場所へのピンポイント着陸技術<br>(2) 火星の特別な場所で着陸機を活動可能にする滅菌・汚染管理技術<br>(3) 火星&海洋天体への衝突を回避する軌道制御技術  | (1) SLIM で大気なし重力天体のピンポイント着陸の FM 実証 (2021 年に TRL9)、地上風洞・高層大気での模擬火星大気飛行実権 (2018 年段階で TRL3)、小型 EDL 実証ミッションで大気あり重力天体のピンポイント着陸の FM 実証 (2018 年段階で TRL2)<br>(2) OKEANOS 着陸機で滅菌・汚染管理技術の FM 実証 (2018 年段階で TRL3)<br>(3) はやぶさ 2 で火星“衝突回避軌道計算で COSPAR カテゴリ承認を取得 (2014 年段階で TRL9)、OKEANOS で外惑星領域小天体への近傍運用 (2018 年段階で TRL3) | (1) SLIM で FM 開発 (~2019 年)、EDL ミッションで FM 開発 (~2020 年代半ば?)<br>(2) OKEANOS で FM 開発 (2020 年代初め)<br>(3) はやぶさ 2 で宇宙実証 (~2015 年)、OKEANOS で FM 開発 (2020 年代初め)  |
| アストロバイオロジー研究を可能とする復路惑星保護技術<br>(1) 火星地下土壌・海洋天体微粒子等、COSPAR カテゴリで「制約付き地球帰還」となる採取試料の地球帰還以前の滅菌・汚染管理技術<br>(2) 同試料保管容器を搭載する地球帰還カプセル・地上回収技術・カプセル内密閉分析技術・開梱後実験室内密閉分析技術・安全確認分析技術、同試料の長期保管技術など。 | (1) BSL4 クラスの滅菌・汚染管理技術を海洋探査等から技術移転 (2018 年段階で TRL2)<br>(2) はやぶさで採取試料の「制約なし」地球帰還・地上回収・開梱後実験室内密閉分析の FM 実証 (2010 年で TRL9)、はやぶさ 2 で同左実証 (2020 年で TRL9)、MMX で同左実証 (2029 年で TRL9)。カプセル内密閉分析技術・安全確認技術・同試料の長期保存技術は、海洋探査等より技術移転 (2018 年段階で TRL2)   | (1) 海洋天体プルーム微粒子軌道上分析装置 BBM 開発実験 (2015 年~) & 国際火星着陸探査や国際海洋天体探査に機器参加して、早期から研鑽を積む (2020 年代半ば)、JAMSTEC 等近隣分野機関との連携 (2012 年~)<br>(2) はやぶさ&はやぶさ 2 で宇宙実証 (~2020 年)、MMX で FM 開発 (2020 年代初め)、JAMSTEC 等近隣分野機関との連携 (2012 年~) |

## 2.4. 月極域の水探査における理学・工学項目の関係

2章をまとめると、月極域での水探査は以下の二つのステップを進めるべきであると言える。

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

それらを実現するための理学項目と工学項目との関係を図2-7に表す。

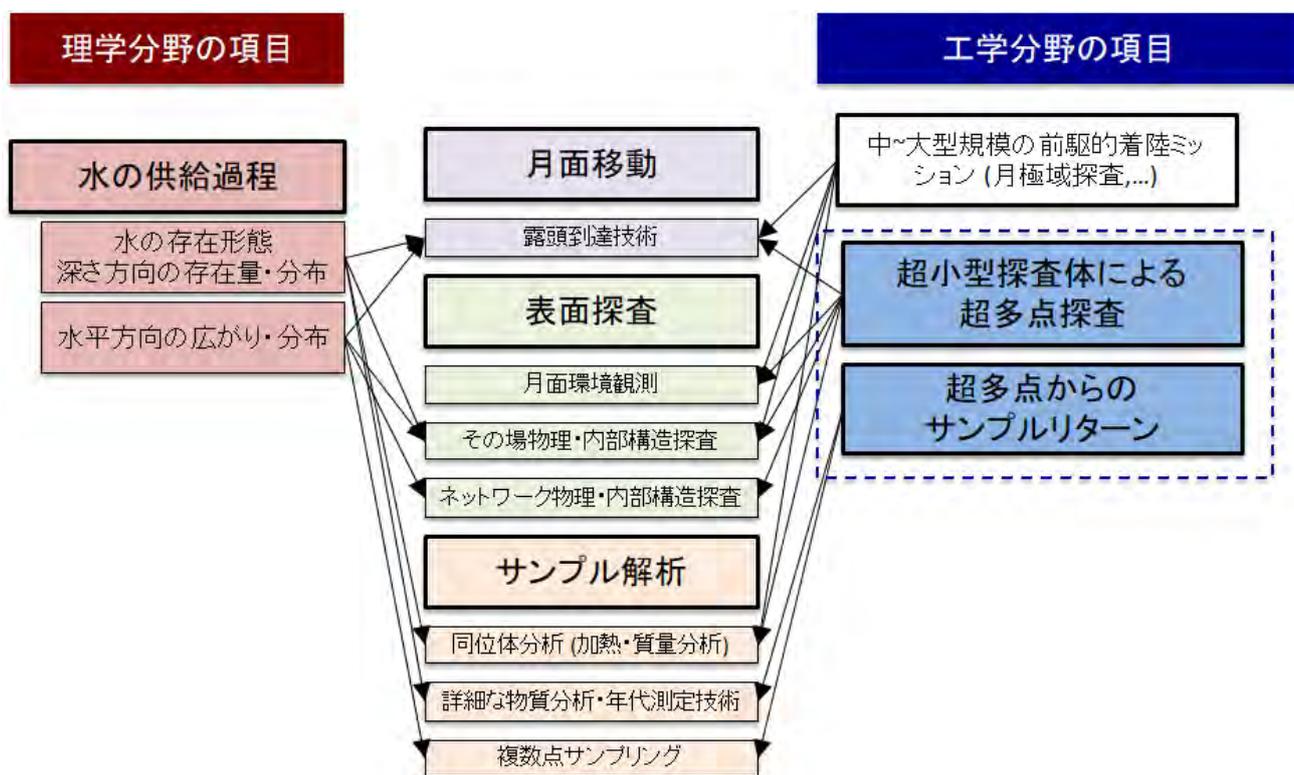


図2-7 月極域の水探査における理学項目と工学項目の関係