

宇宙環境利用科学の大目標～宇宙惑星居住科学～

石川正道（日本マイクログラビティ応用学会 会長）

Unified Scientific Program of Space Environment Utilization and Human Planetary Habitation

Masamichi Ishikawa*, The President of JASMA

*RIKEN, 2-1 Hirosawa Wako, Saitama 351-0198, Japan

E-Mail: masamichi.ishikawa@riken.jp

Abstract: It is ultimately impossible for life on the earth to survive in space without the science and technology of human beings. To enable human and life on the earth of inhabiting sustainably in space environment outside the Earth using the cosmic resources, energies etc., we create the new system of space science and technology by integrating existing physical science, life science, applied science, social science and art, etc. A unified program of Space Environment Utilization experiment on the Moon as the post ISS program of ISAS/JAXA is proposed.

Key words; Space experiment, Post ISS, Lunar exploration, Human planetary habitation

1. はじめに

日本は、2015 年 12 月に国際宇宙ステーション (ISS) 計画への参加期限を 2024 年に引き延ばす決定を下しました。JASMA はこの決定に先立つ 9 月に ISPS-6 を京都で開催し、その直後にこの延長決定のニュースを世界の仲間に発信できたことは大きな喜びです。

さらに皆様に重要な報告があります。宇宙環境利用 4 学会（日本マイクログラビティ応用学会、日本宇宙生物科学会、日本宇宙放射線研究会、日本宇宙航空環境医学会）は、「宇宙惑星居住科学連合」を発足させました。これによって私たちが対象とする宇宙環境は、地球低軌道から月、火星など惑星環境にまで拡大することになります。

本基調講演は、研究コミュニティが掲げる惑星居住科学の大目標に対して、ISAS の活動は今後どうあるべきか。その在り方を皆様と共に議論することを目的に設定いたしました。テーマは、「Post ISS を見据えた宇宙環境利用科学の在り方」です。本テーマは、本年度新たに活動を開始した「宇宙環境利用専門委員会」に問われている課題そのものでもあります。すなわち、「ISAS が実施するに値する宇宙環境利用科学の大目標を設定し、その実現に向けて ISAS の進める中型・小型計画および小規模プロジェクトと整合性のあるテーマを抽出し、その育成を強力に推進すること」にあります。

それ故に、本専門委員会はコミュニティが大同連合して共同提案する「宇宙惑星居住科学」に大きな関心をもっています。単に関心をもつのみならず、ISAS が提供できるリソースと整合性ある研究計画の立案に、積極的に協力する考えでいます。

私の講演では、宇宙環境利用専門委員会の位置

づけと活動目標を明らかにし、現在進行中の ISS 計画を最大限活用しつつも、ISS のみに依存しない、ISAS 抜きでは実現不可能な Post ISS 計画の概念を明らかにします。高橋秀幸先生（日本宇宙生物科学会）には「宇宙惑星居住科学連合の発足とそのめざすもの」、大西武雄先生（日本宇宙放射線研究会）には「Post ISS 計画をめざして—ISAS が進める小型・中型計画、小規模プロジェクトへの期待」と題して、連合構想および所属するコミュニティの観点から ISAS への期待をご提示いただきます。また、國中 均先生（JAXA）には、昨年 7 月に JAXA に発足した「宇宙探査イノベーションハブ」についてご紹介いただきます。

2. 宇宙環境利用専門委員会の活動目標

昨年度をもって宇宙環境利用科学委員会は廃止され、新たに宇宙環境利用専門委員会が発足しました。本専門委員会は、宇宙理学委員会および宇宙工学委員会の下部組織に位置づけられ、研究コミュニティの代表者により構成されます。コミュニティのメンバーは、旧科学委員会班員、WG/RT のメンバーを中心に現在 85 名の方に参加登録いただいております。専門委員会は、委員長、副委員長、幹事を含む計 17 名の委員により構成されます。

宇宙研が実施する宇宙科学・探査プロジェクトは、中型・小型計画および小規模プロジェクトのカテゴリーに区分して推進されます。テーマ提案にはこの考え方に従った参加が求められますので、以下にその概要を説明します。

従来大型化方針に対して、現在は中型以下の規模の計画が主流です。中型計画は戦略的に決定される計画で、総額が 300 億円以下となります。

H2 クラスの大型ロケットの利用を想定し、10 年に 3 回程度実施します。小型計画は、100 億～150 億円の予算規模で公募制にて選定されます。イブシロンでの打上げを想定し、2 年に 1 回程度実施します。小規模プロジェクトは、ISS、観測ロケットなどの利用、海外ミッション参加など、多様なプロジェクト群が想定されています。予算規模は 10 億円／年程度となります。

ISAS は、宇宙科学・探査ロードマップおよび実行戦略を策定する目的で、宇宙理学・工学・環境利用の全分野にまたがる研究コミュニティに対して、RFI (Request for Intention) の提出を求めました。

その結果、最終的に 5 件の統合を経て、32 領域からの回答が寄せられました。その内、6 領域が宇宙環境利用関連のものでした。RFI は、宇宙理学および工学委員会の下に設置されたタスクフォースによって分析され、実行戦略およびプロジェクト化に向けた検討が進められています。

次に現在とりまとめが進んでいるビジョンと実行戦略のポイントを紹介します。そのビジョンは、

- 1) 宇宙・物質・空間は何故できたのかの解明、
- 2) 太陽系と生命はどのように生まれてきたかの解明、
- 3) 衛星・探査機などの宇宙機システムおよび宇宙輸送システムに関わる宇宙工学技術の先導および革新、とされています。

また、実行戦略は次のとおりです。

- (1) 宇宙理学分野（天文学・宇宙物理学／太陽系探査科学）

広範な国際協力のもと、宇宙空間からの観測によって、宇宙の誕生と現在宇宙の多様性に至る過程の理解を目指すとともに、太陽系内における観測・探査から、我々の太陽系と系外惑星系の構造及び起源と進化、並びに生命の存在できる環境を理解する。

- (2) 宇宙工学分野（宇宙航行・宇宙輸送／衛星・探査機）

多面的かつ先進的な科学観測や太陽系探査活動に向けた宇宙への自在なアクセスと宇宙でのモビリティを確保し、より高度な宇宙活動を展開するため、様々な宇宙科学の飛翔機会を活用して宇宙工学研究を創造的・実証的に遂行し、宇宙科学のみならず宇宙開発利用全体の将来に向けた貢献や人類的課題の解決に向けた先駆となす。

これらを見てお気づきのとおり、タスクフォースの検討資料には、宇宙環境利用に関する内容が明記されていません。その理由は、旧宇宙環境利用科学委員会においてロードマップの検討作業が進まず、提出された RFI が団体毎に極めて個別的であったため、分析作業が進まなかったとされています。

ここに、本専門委員会の活動の意義があります。すなわち、タスクフォースが策定を進める実行戦略に、私たち環境利用分野のコミュニティがめざす目標を伝え、実行戦略への環境利用研究に関する追記を実現するというものです。次が、現時点で想定する追記案です。

ビジョンには、第 4) 項を設け、「人類の活動領域を惑星環境にまで拡大し、人類の宇宙での長期居住を目指す。」を追加する。実行戦略には、第 (3) 項として「宇宙環境利用分野（微小重力科学／宇宙生命科学／宇宙医学）」を追加し、以下を記載するというものです。

「人を含む地球上の生命あるいはその集団が、地球外の宇宙環境、惑星などにおかれた状況で、宇宙空間で得られる資源、エネルギー、場を能動的に利用し、生命あるいは人間集団が持続的に生存することを可能とする。そのような未来を実現するために、既存の学問分野を横断する総合的かつ戦略的な宇宙科学・工学・医学を構築する。」

3. 宇宙環境利用の大目標

宇宙惑星居住科学は、宇宙環境を有効に利用して、従来 ISS で研究されてきた物理・化学・生命現象の普遍性を明らかにするために、微小重力効果の本質の解明に迫る物理科学、生命科学をさらに追求することによって、惑星探査活動という観点から様々な応用科学、工学を融合・発展し、さらには人間科学、社会科学とも連携、英知を結集し、人類の活動を惑星へと拡大する長期居住を目指します。

この宇宙惑星居住科学の大構想は、専門委員会においてコミュニティ代表者より紹介され、宇宙科学・探査ロードマップとの整合性の観点から、参加委員より次のような意見を得ています。

「これまでの宇宙環境利用科学は、ISS を利用した実験を実施の最終目標としてきた。しかしながら、ISS 計画の終了が迫る中、今後 20 年 ないし 30 年を視野に入れた『宇宙惑星居住科学』の長期構想のみでは不十分である。当面の実行戦略として、月および月周回軌道の利用を目指して、我が国の月探査計画および国際探査計画との整合性を図るべきである。」

4. 当面の目標として月を設定する理由

それでは、宇宙環境利用の観点から月探査計画はどのように位置づけられるのか、まずは月と地球の環境データを比較してみます。その利用価値は、次のような月固有の環境特性にあります（表 1 参照）。

- 1) 月面の重力場 (0.17G) は、0G と 1G を補間す

る重力場であることから、ISS で行われた微小重力科学研究の成果の実証・発展が可能となること。

2) 極低温、極高真空、無磁場、地震がなく振動がない、強い太陽粒子線など、月面環境固有の特性と、低重力を組み合わせることによって、地球では困難な科学研究を推進できること。

3) 月は地球から 38 万キロメートルと 3 日間程度で到着できる距離にあり、ISS に続く次の人類活動の場として最有力候補であること。また、月には鉱物資源があり、資源開発・利用が可能となれば、惑星探査計画の推進に大きく寄与する。

表 1 月と地球の環境データ比較^{1), 2)}

特性	月	地球
1. 重力	1.62 m/sec ² (1/6 G)	9.81 m/sec ² (1 G)
2. 最低・最高気温	-238℃(南極) ~ 107℃(中緯度)	-89℃ ~ 58℃
3. 大気	10 ⁴ (昼) ~ 10 ⁵ (夜) 分子/cm ³	2.5 × 10 ¹⁹ /cm ³
4. 磁場	0	24 ~ 56 A/m
5. 地震エネルギー	2 × 10 ¹⁰ J/Yr (隕石衝突を除く)	10 ¹⁷ ~ 10 ¹⁸ J/Yr
6. 自然放射線	100 ~ 7000 mSv (太陽粒子線)	2.4 mSv (世界平均)

月面環境の科学的意義を基に、JASMA および JSBSS が提出した RFI をベースにして、環境利用科学の研究戦略およびプロジェクトを図 1 のように体系化してみました。

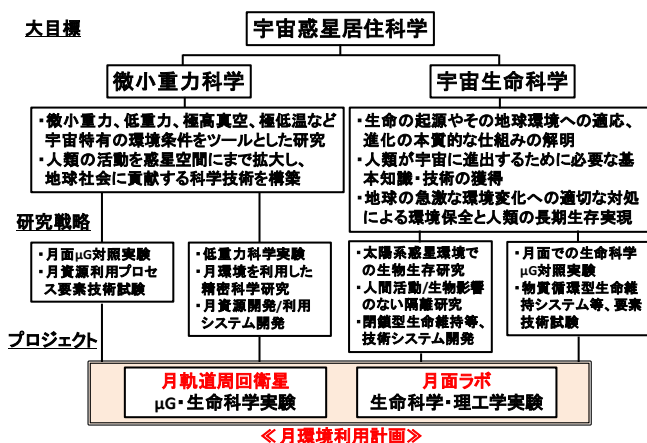


図 1 宇宙惑星居住科学の研究戦略および共通プロジェクトとしての月環境利用計画

宇宙惑星居住科学の大目標の下に、微小重力科学と宇宙生命科学の推進を位置づけますと、それぞれ次のような研究戦略および研究プロジェクトが着想できます。

- 1) 微小重力科学：微小重力、低重力、極高真空、極低温など宇宙特有の環境条件をツールとした研究。人類の活動を惑星空間にまで拡大し、地球社会に貢献する科学技術を構築する。
- 2) 宇宙生命科学：生命の起源やその地球環境への適

応、進化の本質的な仕組みの解明。人類が宇宙に進出するために必要な基本知識・技術の獲得。地球の急激な環境変化への適切な対処による環境保全と人類の長期生存を実現する。

これら研究戦略を実現するために、月軌道周回衛星による微小重力・生命科学実験、月面上での生命科学ラボ・理工学ラボを用いた研究プロジェクトを立案し、有人惑星探査に向けた基盤的技術の開発を進める、というものです。

比較参考のために、NASA が月探査分析グループ (LEAG) に委託して検討を進めている研究課題を表 2 に示します。このスタディの検討結果は、月探査ロードマップ (LER : Lunar Exploration Roadmap) として公表されています。表 2 より読み取られるように、月環境をツールとして利用する課題は、基礎物理学、流体物理・熱輸送、燃焼、材料プロセッシング、生命科学の 5 領域を対象とし、微小重力科学研究のテーマが前面に押し出され、重要領域として認識されていることが分かります。

表 2 NASA の月環境利用計画

研究領域	目 標	課 題
基礎物理学	月面でしか得られない環境(無地震・無振動、低重力、極低温、極高真空、無磁場)をツールとした精密科学計測	①大型光学干渉計システム ②原子時計における時間標準精度の向上 ③相対性理論・等価原理の検証 ④素粒子物理現象の計測
流体物理・熱輸送	微小重力研究を補完する低重力場での浮力流れと関連する諸現象との相互作用、及び複雑流体現象の解明	①多相流モデル系 ②界面流れ(温度・濃度差マランゴニ対流) ③粒状系の挙動 ④超臨界水中における相分離挙動
燃焼	月面における火災安全性の確保のための燃焼-対流過程に関する研究	①低重力における燃焼-浮力対流の相互作用 ②可燃物燃焼の挙動 ③混合相燃焼過程と低重力との相互作用
材料プロセッシング	月表面レゴリス(石質粒状物質)からの酸素生成、流動層反応を含むスケールアップ・プロセスの構築	①酸素製造 ②液相燃焼 ③長期環境暴露試験
生命科学	地上生命(微生物、植物、動物、ヒト)の長期低重力、太陽放射線、ダストなど月面固有の複合環境への適応、継世代過程の解明、火星有人探査に向けた技術開発	①微生物、植物、動物への影響 ②ヒトの健康、筋骨格系への影響 ③継世代生物影響 ④重力変化(0G, 1/6G, 1G)が及ぼす発生再生、遺伝的安定性、老化への影響 ⑤植物の成長性、生産性、味、栄養成分への影響

Ref. Lunar Exploration Analysis Group (LEAG): Lunar Exploration Roadmap Ver. 1-3 (2013).

各領域の具体的な研究目標は、次のとおりです。

- 1) 基礎物理学：月面でしか得られない優れた環境(無地震・無振動、低重力、極低温、極高真空、無磁場)をツールとした精密科学計測。
- 2) 流体物理・熱輸送：微小重力研究を補完する低重力場での浮力流れと関連する諸現象との相互作用、及び複雑流体現象の解明。
- 3) 燃焼：月面における火災安全性の確保のための燃焼-対流過程に関する研究。
- 4) 材料プロセッシング：月表面レゴリス(石質粒状物質)からの酸素生成、流動層反応を含むスケールアップ・プロセスの構築。
- 5) 生命科学：地上生命(微生物、植物、動物、ヒト)の長期低重力、太陽放射線、ダストなど月面固有の複合環境への適応、継世代過程の解明、火星有人探査に向けた技術開発。

5. 日本の月探査戦略への貢献

我が国の月探査戦略は、宇宙開発戦略本部に設置された「月探査に関する懇談会」の報告書として2010年7月に公表されました³⁾。報告書によれば、日本の強みは無人探査技術にあるとされており、月面へのピンポイントの軟着陸技術を手始めとして、月の南極域にて世界初の基地を構築し、さらには小規模のサンプルリターンを実現しようとする戦略です。

図2には、想定される惑星居住科学と太陽系探査ロードマップとの連携関係を示します。2019年には、「降りたいところに降りる」技術の習得を目指したSLIM (Smart Lander for Investigating Moon) がイプシロンロケットにより打ち上げられます。この技術蓄積を踏まえて、SELENE-2による月周回衛星による月面観測、小型着陸機の技術実証。2025年以降には、サンプルリターン (SR) を可能とする小型着陸機の打ち上げが計画されています。その後は、ラグランジュ点近傍のハロー軌道を周回する米国有人宇宙ステーション計画に参画し、国際協力により有人月着陸を可能とする、とされています。

宇宙惑星居住科学を標榜する私たちが、月探査計画に参加するためには、ISSの運用終了後を見据えたPost ISS計画を速やかに押し進め、宇宙探査計画への強い発信力を確立することが必要であることは言うまでもありません。私の考えでは、2025年以降のSELENE-3計画への合流を目指して、月周回衛星による微小重力実験、月着陸機による月面環境利用実験の実現に向けた研究開発、プロジェクト提言活動が有望と考えています。

6. まとめ

以上のような検討を踏まえて、宇宙環境利用専門委員会では、月環境利用計画の具体化を図りつつ、今後、次のような活動を積極的に進めたいと考えています。

- ・大目標統合ロードマップのとりまとめにより、宇宙惑星居住科学を宇宙科学・探査プロジェクトにおいて適正に位置づける。
- ・Post ISS計画に向けて小規模プロジェクト候補課題を抽出し、有望な課題については、SE (システム・エンジニアリング) 活動を経て公募申請を行う。
- ・宇宙理学および宇宙工学委員会に宇宙環境利用関連のWG/RGを設置する。
- ・短時間微小重力実験機会の利用を進め、有望課題の芽出しと育成を行う。

研究コミュニティの皆様には、専門員会活動にさらなるご理解をいただき、ご支援とご協力を切にお願いします。

参考文献

- 1) Paul D. Spudis (水谷 仁訳) ; 月の科学- 月探査の歴史とその将来、シュプリング・フェアラーク (2000).
- 2) G.H. Heiken, D.T. Vaniman, and B.M. French; Lunar Sourcebook - A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press (1991).
- 3) 月探査に関する懇談会 ; 我が国の月探査戦略～世界をリードするロボット月探査と有人宇宙活動への技術基盤構築 (2010).

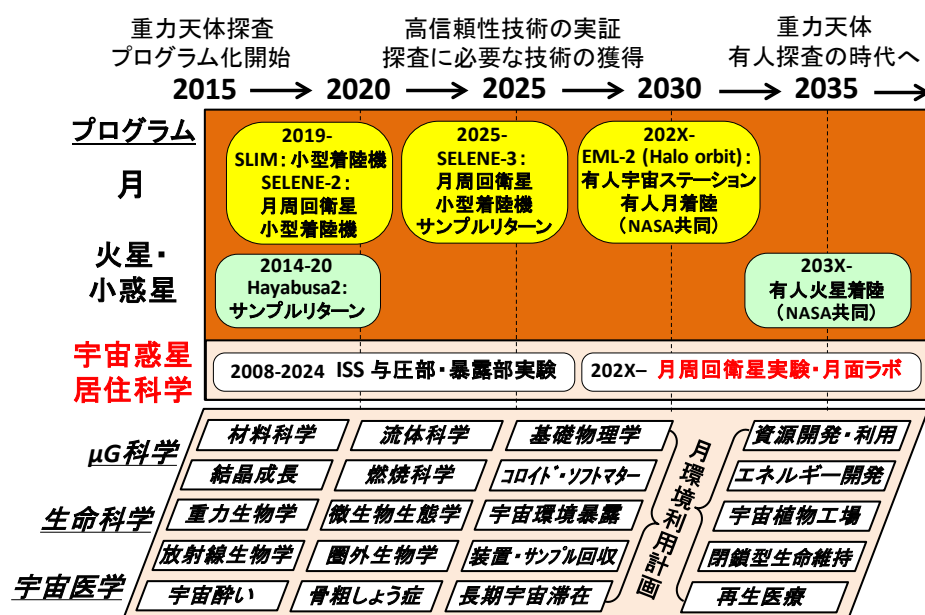


図2 太陽系探査プログラムとの連携による宇宙惑星居住科学の推進