

# 宇宙環境利用の目指すもの

石川 正道 (理化学研究所)

## The Prospect of Space Environment Utilization

Masamichi Ishikawa

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

E-Mail: masamichi.ishikawa@riken.jp

Abstract: The Moon is the next target of space development beyond Low-Earth Orbit, because the distance is only 3 days travel from the Earth. Many findings of microgravity researches executed in ISS are further verified and extended using the low-gravity environment (0.17G) on the Moon, which interpolates the phenomena between 0G and 1G. Moreover, the Moon environment is characterized as a combination of important physical parameters, such as very low temperature, ultrahigh vacuum, zero-magnetic field, strong solar radiation, etc. Experimental sciences (physics, life science, applied science) on the Earth are further re-evaluated and integrated to the universal science.

Key words; Human habitation in space experiment, International space station, Moon exploration

### 1. はじめに

2016 年は、民間宇宙ビジネスの進展に関する報道が多くありました。世界の趨勢に押されてか、日本でも昨年 11 月に国際的な宇宙ビジネスの拡大を目指す「宇宙活動法」と商業衛星画像の利用や管理を認める「衛星リモートセンシング法」の二つの法律が国会で可決されました。これにより、民間企業がロケット打上げに参入し、一般の企業においても小型衛星などを商業的に運用、サービスを提供することができるようになります。

当然のことながら、宇宙環境を広く社会、産業の利用に供することを目指してきた私たちにとって、このような法整備の進展を見ることは大変喜ばしいことです。しかしながら、私たち研究者は、宇宙環境利用の可能性をさらに拡大し、社会全体として取り組むべき理由を一層明らかにすることが期待されていると考えるべきではないでしょうか。現状、宇宙環境の民間利用は、通信・放送、地球観測に限られています。さらに何が、人類の宇宙環境利用を牽引するのでしょうか。これに答えるために、ここでは、ヒトが地球外の惑星で活動する状況を思い描き、そのような惑星探査活動が地球社会にもたらすイノベーションに注目し、宇宙環境利用が目指すものを明らかにしたいと思います。

### 2. 宇宙惑星居住科学の課題

宇宙惑星居住科学連合が、昨年 30 回宇宙環境利用シンポジウムの開催に合わせて、宇宙環境利用 4 学会(日本マイクロ重力応用学会、日本宇宙生物学会、日本宇宙放射線研究会、日本宇宙航空環境医学学会)を基幹学会として発足しました。現在は、新たに生態工学会が加わり、5 学会体制となっております。

ヒトが惑星に居住するという視点を持ちますと、地球は、生命の進化によって優れて希少な惑星であり、また、生

命を取り巻く自然環境は、奇跡的としか言い様のないバランスを保って存在していることを実感します。現在、世界の国々が求める果てしない経済成長は、深刻な全球的課題を生み出し、地球環境のバランスを破壊し、地球生命との共生さえ、脅かそうとしています。

このような差し迫った社会状況において、私たちは、「宇宙惑星居住科学」の大目標の下、どのような研究テーマに取り組むべきでしょうか。以下が、私たちの考える目標設定です。

第一に、地球の重力場を離れて物理学、化学、生命科学の諸現象がどのように変化するか、1G という地球の重力場の制約がない科学の普遍性を追求します。これによって、重力が地球と異なる重力天体でも通用する科学知識の獲得を行います。

第二に、その成果に基づき、様々な基礎科学、応用科学を惑星探査活動の観点から融合・発展し、さらには人間科学、社会科学とも連携し、叡知を結集して、人類の活動を惑星へと拡大する長期居住を目指します。

これら研究活動を通じて、惑星居住と言う観点から、地球という惑星において私たちの安全な生活が、科学技術によって如何に達成されるかを明らかにします。これによって、生命を育む地球環境の成り立ちを深く洞察し、これを保全することの意義を社会に訴えたいと考えます。

また、このようなテーマを追求するためには、我が国が進める宇宙科学・探査ロードマップとの整合が必要となります。今後は、ISS 実験をもって最終とすることなく、人類が惑星進出する飛び石と位置づけ、当面の実行戦略として、月面及び月周回軌道の利用へと発展させることを提案いたします。

### 3. SFU に学ぶ月・火星探査

2016 年は、SFU 回収 20 周年に当たります。国立科学

博物館(上野)にて記念講演会が開催され、プロジェクト主査である栗木恭一先生、回収を行った若田光一宇宙飛行士はじめ、当時の計画を担った重鎮が一同に参集されました。宇宙から帰還した SFU は、今、国立科学博物館地球館 2 階に展示されています。

さて、皆様は、SFU についてどの程度のご認識をもっていらっしゃいますでしょうか。そもそも SFU は、スペースシャトルの限界から生まれたアイデアで、人工オーロラ実験として知られる SEPAC にて、シャトルの飛行安全を担保する観点から軌道上で分離して実行することを考えたことが、発想の原点にあります。

宇宙実験・観測フリーフライヤー Space Flyer Unit (SFU)とは、文部省/宇宙科学研究所 (ISAS)、科学技術庁/宇宙開発事業団(NASDA)及び通商産業省 (MITI) /新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) /無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF) の3省庁4機関が共同して実施しました。

SFU は、汎用、多目的のフリーフライヤーであり、ミッション遂行後に回収され、再使用可能なスペースクラフトとして、その後の利用機会の増大、コスト低減を狙った極めて意欲的なプログラムでした。そのために、実験者と打上/回収機の橋渡し、ユーザーテナント方式の採用、規格化された宇宙実験室の提供、スペースシャトルとの編隊飛行による運用など、多くの技術実証を行いました。その形状寸法は、8 角形 4.46m(直径)×3.07m(高さ)、太陽電池パドル 24.4m(展開時)×2.40m(巾)。重量は、打上時 3846kg、回収時 3492kg。電力は、発生電力 3kW、実験用供給電力 850W。加速度環境は  $10^{-4}$  G 以下です。

SFU では、以下に列記した 11 の実験ミッションが行われました。

#### (1) 宇宙科学研究所 (ISAS)

##### ①宇宙赤外線望遠鏡 (IRTS: Infrared Telescope in Space)

極低温超流動液体ヘリウム冷却による近赤外線・中間赤外線分光器 (1.4 $\mu$ m~11.7 $\mu$ m) 及び遠赤外線分光器による、黄道光スペクトルによる惑星間空間塵組成、星間塵赤外線未同定バンド放射、星間塵熱放射、炭素イオンの遠赤外輝線、進化の最終段階の星、赤外線宇宙背景放射観測。

##### ②2次元展開/高電圧ソーラーアレイ (2D/HV: Two-Dimensionally Deployable/High Voltage Solar Cell Array Experiment)

二次元展開アレイの完全な展開と収納試験。

##### ③電気推進実験 (EPEX: Electric Propulsion Experiment)

MPD (Magneto-plasma dynamic) アークジェットによる宇宙推進システムの動作実証。「はやぶさ」のイオンプラズマ推進器として使われた。

##### ④プラズマ計測装置 (SPDP: Space Plasma Diagnostic

Package)

可視分光器、磁力計、電子密度変動検出器の試験、材料劣化試験。

##### ⑤宇宙生物実験 (BIO: Space Biology Experiment)

イモリの初期発生に及ぼす重力の影響、生命維持・実験機能の宇宙実証。受精・産卵・発生が地上と変わることがないことが確認された。

##### ⑥凝固・結晶成長実験 (MEX: Material Experiment)

鋸刃状ファセット界面の形態形成メカニズムの解明、サリチル酸フェニルの凝固に伴う固液界面形状の温度分布のその場観察。

#### (2) 宇宙開発事業団 (NASDA)

##### ①SFU 搭載実験機器部 (EFFU: Exposed Facility Flyer Unit)

「きぼう」暴露部要素技術実験として、熱流体ループ熱制御実験、装置交換機構実験、微小重力環境特性実験、材料暴露実験。

##### ②気相成長基礎実験装置 (GDEF: Gas Dynamics Experiment Facility)

プラズマ CVD 法、ダイヤモンド薄膜成長、プラズマ分光による薄膜形成反応観測が行われ、高品質薄膜ダイヤモンドの形成を確認、プラズマ電子温度の顕著な低下が高品質化に寄与することを明らかにした。

#### (3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) / 無人宇宙実験研究開発機構 (USEF)

高性能化合物半導体開発のための新たな知見の獲得、宇宙環境で長期運用に耐える電気炉装置の機能検証を目的とした各種材料プロセス技術の実証試験。

##### ①温度勾配炉 (複合加熱炉) (GHF: Gradient Heating Furnace)

ブリッジマン法 GaAs InP: 平坦な成長界面、均一な組成、微小なポロシティ形成。

気相成長法 CdS InGaP: 拡散輸送機構、均一な欠陥分布、均一な膜圧・組成。

##### ②イメージ炉 (焦点加熱炉) (MHF: Mirror Heating Furnace)

THM 法 (Traveling Heater Method) InP、InGaP。双晶発生の低減、無成長縞、混晶組成変動の低減、転移の均一化を確認。

##### ③等温加熱炉 (単熱炉) (IHF: Isothermal Heating Furnace)

ブリッジマン法 CdTe: 非接触結晶界面にて単結晶成長、容器接触の問題点明確化。

溶液成長法 AlGaAs: 基板成長における平坦性及び膜圧の均一性が向上を確認。

SFU 実験に参加して学んだことを、整理すると次のようになります。

- 1) 有人ミッションの制約は甚大であり、無人であるからこそ可能となる実験ミッションは多い。
- 2) 中型実験機を用いた長時間の本格実験ミッションは、研究テーマの深化と独自技術の確立をもたらす。
- 3) NASA の有人ミッションと連携できる本格的宇宙機の運用は、日本の宇宙開発の総合力を養い、最前線で活躍する宇宙技術として結実する。  
特筆すべきことは、日本はシャトルによる SFU 回収においてランデブー技術を習得したからこそ、「こうのとりの HTV) の運用が成功し、自らの宇宙機により ISS に物資輸送を行うことができるようになったことです。今後、NASA が進める有人惑星探査ミッションに対して、日本独自の無人機ミッションが補完的な役割をもつことになれば、惑星探査ミッションの進展に大きな貢献となるはずで

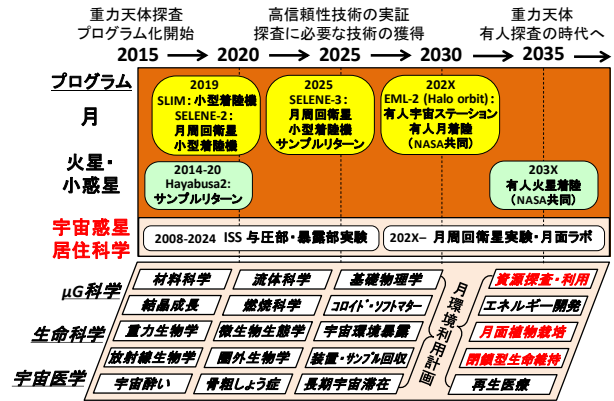


Fig. 1 In Concert with Solar System Exploration.

次に興味深い月探査ミッションをご紹介します、具体的な研究のイメージを説明いたします。

#### 4. 我が国の月面環境利用計画

それでは、宇宙惑星居住科学の観点から月ほどのように位置づけられるのか、月と地球の環境データを比較することによって、その際だった特徴は、次のように整理できます。

- 1) 低重力場(0.17G)。
- 2) 極めて希薄な大気の下で、極低温から高温までの大きな温度差(ΔT=355K)。
- 3) 無地場。
- 4) 太陽風プラズマの下での強力な放射線。
- 5) 大気によって遮られることのない強い太陽光と地球と異なる日変動、季節サイクル。
- 6) レゴリスと呼ばれる月面土壌などの鉱物資源の存在。

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 年に公表されました。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。

具体的な計画として、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。その後、SELENE-2 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 (Fig. 1)。

2025 年以降の SELENE 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に向けた研究開発、提言活動が有望とされています。そのためになすべきこととして、月面利用に係わる科学的問題を明確にする、必要な実験装置の開発、試験、最適化が必要となります。

#### 5. SLIM から月面ラボ計画へ

月面環境の興味深い事例として、月極地域の永久影があります。月は、軸の傾斜が小さいために、極近くの窪みは永久的に太陽光が射さず極低温(25~80 K)の環境が生み出されます。このような条件が成立することは、太陽系惑星では極めてまれです。

ルナー・プロスペクター (NASA) による興味深いデータがあります。中性子分光データの解析によると、月の極地域の永久影の部分に大量の水素(あるいは水)が存在する可能性が大きいことがわかりました。存在量は、北極、南極を合わせて水に換算すると 60 億トンと推定されています。ただし、水として存在するかどうかは不明です。

極地域は、高温の表面に隣接していることから、高温地域で揮発成分の蒸気圧に応じて真空中に昇華した成分が、極地域の表層土に長年に渡って低温トラップされ続けていると考えられます。それ故、極地域には高濃度の水素(水)が存在すると同時に、太陽系の歴史に渡って長く、水素、水などの揮発成分の変遷を、記録・保存している科学的に極めて価値の高い場所と考えられます。

Table 1 Promising Subjects of the Science on the Moon

研究分野	テーマ(科学的意義)	研究課題
資源探査・利用	【月極地域サンプルリターン及びその場資源利用(Lunar Pole ISRU)】 月の極地域は、永久的に太陽光が射さず極低温(25~80K)の環境、揮発成分の低温トラップ現象により、太陽系の歴史に渡ってその資源を保存する極めて貴重な科学現場。	・表層土採取により、高温度の水素、水の存在を検証する。 ・同位体組成、層序学的分布の測定、極域表層土と揮発成分との相互作用評価により物質フラックスを解明。 ・月面での掘削、資源抽出のための地処理技術開発、資源採取に伴う揮発成分の再放出、ダスト拡散などの環境汚染評価。
月面植物栽培	【月面環境に対する生物適応と応答】 植物は原則から不動性の故に代謝変化によって環境に適応してきた。植物は、短・中・長期にわたる宇宙環境暴露が生物に与える影響を評価する実験において、理想的なバイオセンサーとして機能する。	・GFP遺伝子組換えにより、環境変化応答バイオセンサーとして機能するよう改変。 ・蛍光発光をデジタル画像により遠隔観測。 ・各種環境変化に対する応答観測:大気組成、圧力、温度、輸送時及びその場での放射線、重力、表層土暴露など。
閉鎖型生命維持	【人工知能支援による月面植物栽培実験システム】 月面での植物栽培実験を実現することは、植物を活用した先進的な閉鎖型生命維持システムの開発にむけた第一歩となる。月面表層土の生物安全性試験も兼ねる。	・表層土壌の利用と種子からの育成、成長、蛍光発光観測など、一連の植物科学研究に必要なシステム構築の明確化。 ・月面上での制約を考慮した実験システム設計及び開発。 ・月面環境模倣試験及びシステム最適化。

極地域環境の研究は、宇宙科学と探査におけるその場資源利用という応用上の目的とも合致します。今後は、SLIMのサンプルリターン計画など、世界が競って極地域でのサイエンスを目指すと思われます(Table 1)。

## 6. 宇宙環境利用専門委員会の活動

これまで宇宙環境利用を引っ張ってきた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。コミュニティメンバーは、現在 100 名の方に登録いただいております。専門委員会は、2 年間で I 期として活動し、本年度で第 I 期が終了します。この 2 年間の活動を総括すると次のようです。

- ①宇宙環境利用科学実行戦略の策定
  - ・大目標統合ロードマップ骨子の作成。
  - ・宇宙科学実行戦略(ISAS)への提案。
- ②短時間微小重力実験機会の提供
  - ・H27 年度:航空機実験 5 件、落下塔実験 1 件。
  - ・H28 年度:航空機実験 4 件、落下塔実験 1 件。
- ③小規模計画候補課題の選定と育成
  - ・観測ロケットを利用した宇宙ダスト研究。
  - ・植物栽培研究(生育状況モニタリング、曝露栽培)。
- ④海外連携課題のプロジェクト化に係る検討
  - ・TEXUS ロケットを用いた燃焼科学実験。
  - ・酸素分圧制御下での高温合金融体の熱物性計測。
- ⑤宇宙環境利用シンポジウムの開催
  - ・第 30 回:講演数 45 件、参加者数 107 名(延べ)。
  - ・第 31 回:講演数 36 件、海外講演者を含む。
- ⑥その他
  - ・微小重力科学と宇宙生命科学におけるコミュニティとの情報共有。

専門委員会は、さらに第 II 期に向けて、活動を継続、強化していく考えています。専門委員会の意義を一言で言えば、宇宙実験機会の確保に尽きると考えます。そのために、是非皆さまにお伝えしておきたい論点を二つお話しします。

第一は、宇宙研におけるファンディングの仕組みです。宇宙研の力は、宇宙科学・探査の推進のために十分な規模の宇宙機を作り上げ、これを活用したミッションをコミュニティの意思と判断によって実施できることにあります。その意義は、SFU を例にしてお話したとおりです。

2013 年、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三つのカテゴリーに分けて推進するとされました。しかしながら、昨今の厳しい予算状況の中で、小規模プロジェクトに関して、見直しがありました。ISS 利用実験は、小規模プロジェクトカテゴリーにて実施すると位置づけられているため、この変更は大変重要です。

見直し内容は次のとおりです。従来、予算規模に応じてカテゴリー A、B、C と分類して運用してきたが、今後は戦略的海外協同計画と小規模計画の二つに分けて行うというものです。

### (1) 戦略的海外協同計画

ESA、NASA が進める大型の国際プロジェクトへの戦略的参加など。

### (2) 小規模計画

多様な飛翔機会を用いたプロジェクトで、予算の規模は、最大で数億円/プロジェクト。マッチングファンド方式を基本として、研究委員会と連携して実施する。

今後は、テーマ提案者と専門委員会との関係が重要となることから、コミュニティの皆さまと協力し、一丸となって、小規模計画の条件を満たすテーマを育成することが必要と考えています。

専門委員会のもう一つの活動は、新しいテーマの芽出しを目的とした、短時間微小重力実験機会の提供です。Table 2 には、平成 27 年及び 28 年度の採択テーマを示します。

Table 2 Selected Teams of Short Period Microgravity Experiment from the Community Applications

区分	平成27年度		平成28年度	
	研究チーム名	提案者(所属)	研究チーム名	提案者(所属)
航空機実験 (MU300 GII)	気相からの核生成と宇宙ダスト	木村 勇気 (北海道大学)	気相からの核生成と宇宙ダスト	木村 勇気 (北海道大学)
	宇宙環境に対する植物反応解明のための実験系構築	北宅 善昭 (大阪府立大学)	宇宙環境に対する植物反応解明のための実験系構築	北宅 善昭 (大阪府立大学)
	月・火星など低重力環境への生体応答に関する研究班	桑井 康宏 (東京医科歯科大学)	宇宙環境に対する植物反応解明のための実験系構築	北宅 善昭 (大阪府立大学)
	タンパク質結晶の高品質化メカニズムの解明	鈴木 良尚 (徳島大学)	完全対流停止条件における結晶のらせん成長ステップの前進速度に及ぼす不純物効果	鈴木 良尚 (徳島大学)
コロイド系の過冷却状態からの結晶化速度	山中 遼平 (名古屋市立大学)	浮遊液滴非線形ダイナミクス	阿部 豊 (筑波大学)	
落下塔実験 (2.5s)	燃料液滴列の自発点火燃焼近傍の点火挙動に関する研究	野村 浩司 (日本大学)	燃料液滴列の自発点火燃焼近傍の点火挙動に関する研究	野村 浩司 (日本大学)

## 7. まとめ

### (1) 惑星探査ミッションとの融合的連携

宇宙環境利用科学研究において、ISS 実験は惑星探査に向けた飛び石と見なすべき。

微小重力科学研究/宇宙生物学研究と、惑星探査研究との融合テーマを追求する。

### (2) SFU に学ぶこと: “Moon Flyer Unit (MFU)”

無人回収型宇宙実験衛星ミッションの経験を継承して、回収型月着陸宇宙実験機(MFU)の概念を提案し、国際宇宙探査計画を牽引するミッションを企画する。

### (3) 宇宙実験機会の獲得

宇宙理学及び工学委員会に、宇宙環境利用関連のWG/RGを設置し、小規模計画の公募採択を目指す。

短時間微小重力実験の利用機会を活用し、有望課題の芽出しと育成を行う。併せて、きぼう利用戦略/FS テーマ募集を活用する。

(本稿は、基調講演での発表に基づいて作成した。)