

IIII 宇宙惑星居住科学連合の目指すもの IIII
(解説)

宇宙環境利用科学の大目標 “宇宙惑星居住科学”

石川 正道

Unified Scientific Program of Space Environment Utilization and Human Planetary Habitation in Space

Masamichi ISHIKAWA

Abstract

According to the detailed discussion of Microgravity Science and Space Life Science, JASMA appoint to promote “The Science Union for Human Planetary Habitation in Space (SUHPS)” in corporation with the Japanese academic societies: the Japanese Society for Biological Sciences in Space (JSBSS), the Japanese Association of Space Radiation Research (JASRR), the Japan Society of Aerospace and Environmental Medicine (JSASEM), and the Society of Eco-Engineering (SEE). Our common destination of the Union is as follows: 1) We further pursuit the validity of research outputs obtained so far, in the investigation of physical and life sciences in space. 2) According to the science and technology established during ISS operation, we integrate various applied sciences and engineering in the viewpoint of human space exploration, and aim to expand human habitation from the low-earth orbit to the planets, such as Moon and Mars, under the collaboration with the humanities and social science. 3) We contribute to overcome the critical problems of population explosion, resource depletion, global warming on the Earth by investigating the mechanisms of action that threatens the survival of life in space environment and to construct the technological systems of planetary habitation in space. The roadmaps of microgravity science toward future 20 years are depicted to communicate with the existing research communities.

Keyword(s): Microgravity, Physical and Life Science, Space Exploration, Roadmap, International Space Station

Received 28 January 2017, Accepted 4 February 2017, Published 30 April 2017

1. はじめに

民間宇宙ビジネスの進展に関する報道が活発になっている。2016年11月には、日本でも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った。宇宙環境を広く社会、産業の利用に供することを目的とする我々にとって、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ある。その一方で、宇宙環境利用の可能性を惑星探査にまで拡大し、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。

本論文では、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次なる目標を明らかにしたい。JASMAの行動原則は、「微小重力という宇宙でしか得られない環境をツールとして、地球社会に貢献する科学技術を構築する」ことにある。そのためには、基礎研究の追求、応用へのフィードバック、宇宙実験ミッションの遂行を三位一体とするこれまでの取組みを社会のニーズに合わせて継承、深化することが必要である。このような観点から、宇宙環境利用の大目標を「宇宙惑星居住科学」として位置づけ、ロードマップ化することによって、微小重力科学研究が、社会、産業のイノベーションに果たす役割を示してみたい。

2. 宇宙環境利用がもたらすイノベーション

人類の宇宙開発・利用は、最近の国際宇宙ステーション (ISS) 計画に代表される国際協力に基づく有人宇宙活動

の経験を経て、月、さらには火星への進出・長期居住を目標と目指して発展しようとしている。これまでなされた軌道上科学実験により、微小重力を含む宇宙の複合環境が、広範な物理・化学・生命現象に強く影響する事実が明らかになってきた。例えば、重力生物学分野では、生命の基本原則やメカニズムに関する従来の知見の多くが、地球の1G環境に依存していることが示された。また、物理学分野では、宇宙での微小重力環境に注目して地上では測定困難な現象が発見され、解明されている。

ヒトが惑星に居住するという視点に立つと、地球は、生命の進化にと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する。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（グローバルな）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、脅かそうとしている。このような差し迫った社会状況において、「宇宙惑星居住科学」は、次のような内容において、宇宙環境利用の大目標を指し示す。

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することができる。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を確立することができるようになる。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・発展させ、さらには人間科学、社会科学とも連携し、人類の活動を惑星へと拡大する長期居住の道を切り拓くことができる。

これら研究活動を通じて、地球という惑星において人類社会の安全な生活が、科学技術によって如何に達成されているかが、生命の宇宙進出という本質的な観点から明らかになる。生命を育む地球環境の成り立ちを惑星居住という観点から深く洞察することができれば、「宇宙船地球号」を保全することの意義は、従来以上に説得力ある姿で社会に迫ってくることになるだろう。

3. 月環境利用に向けて

「宇宙惑星居住科学」を具体性のあるサイエンスとして追求するためには、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る。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、月面及び月周回軌道の利用を次なる実行目標として、発展的に研究が進められることを望みたい。

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年に公表された¹⁾。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が明記されている。具体的な計画としては、2019年に「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る打ち上げを目指している。その後は、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標榜さ

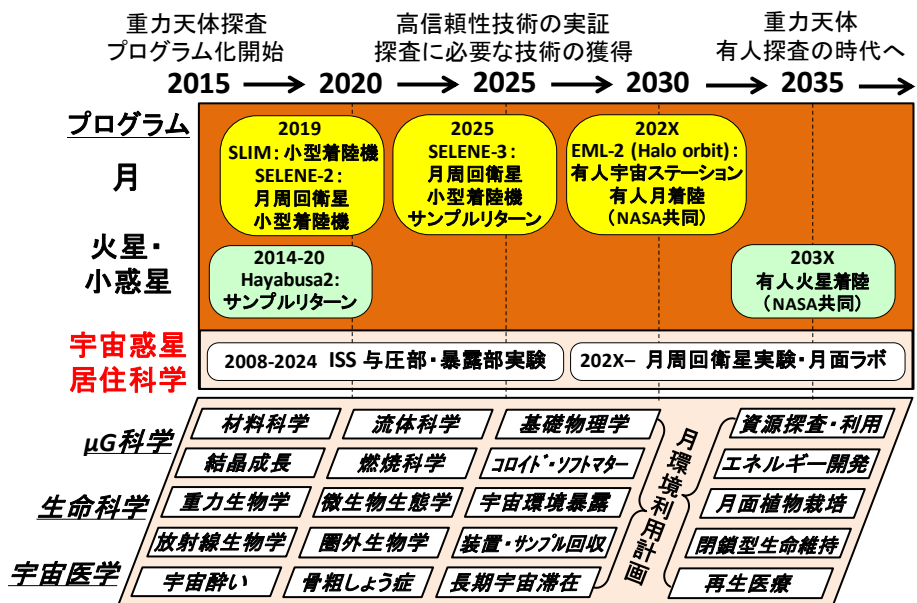


Fig. 1 Roadmap of Human Planetary Habitation in Concert with Solar System Exploration Programs.

れている。さらなる将来計画として、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²⁾に参画し、国際協力により有人月着陸を目指すことが唱えられる (Fig. 1)。

それでは、宇宙惑星居住科学の観点から、月はどのように位置づけられるだろうか。月と地球の環境データを比較することによって、その際だった特徴を列記すると次のようになる³⁾。

- ① 低重力場 (0.17 G)。火星の 0.38 G よりも小さく、微小重力の効果がより顕著である。
- ② 極めて希薄な大気の下で、25 K の極低温 (極地域) から 107 °C の高温 (赤道地域) の間で大きな温度差 ($\Delta T = 355$ K) がある。このため、希薄な大気中ながらも揮発成分の物質循環が存在すると見られている。
- ③ 無地場。マグマが存在せず、地磁気のような磁場が存在しない。このため、太陽風プラズマの防御メカニズムは効かない。
- ④ 太陽風プラズマの下での強力な放射線。太陽のコロナやフレアによって発生する荷電プラズマ粒子に加えて、核融合反応によって生じる各種放射線が絶え間なく降り注ぐ。
- 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。太陽光発電にとっては有利であるが、植物栽培など生物生存に関しては、紫外線などにより生存が脅かされる。
- ⑥ レゴリスと呼ばれる月面土壌などの鉱物資源が豊富に存在する。レゴリスは、太陽から供給される水素が大量に吸着しており、月面上での水素含有鉱物として有用である。

月面環境の興味深い事例に、月極地域の永久影がある。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る。

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あり、ルナー・プロスペクター (NASA) によって、大変興味深い発見があった³⁾。中性子分光データの詳細によると、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。存在量は、北極、南極を合わせて水に換算して 60 億トンと推定される。ただし、水として存在するかどうかは不明である。

極地域は、太陽光の当たる高温の表面が隣接し、高温地域で蒸気圧に応じて真空中に昇華した揮発成分が、極地域の表層土に長年に渡って低温トラップされ続ける。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永く、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るようになった。極地域環境の研究は、太陽系の成り立ちを解明する宇宙科学研究とその場資源利用という応用研究に関係しており、多くの研究者の興味を惹きつけている。今後は、サンプルリターン計画などをはじめとして、世界が競って極地域でのサイエンスを目指すと思われる。

以上のような月面環境の特徴を考慮した月面利用シナリオは、次のとおりである。

- ① 月が有する宇宙環境は ISS 科学研究の成果の実証・発展を可能とする。

月面の重力場 (0.17 G) は、0 G と 1 G 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・発展を可能とする。加えて、極低温、低磁場、太陽放射線など月環境固有の特性と組み合わせることによって、地球環境では困難な科学研究 (物理学、生命科学、応用科学) を推進する。

- ② 有人宇宙技術の成果を月面活動へと継続する。

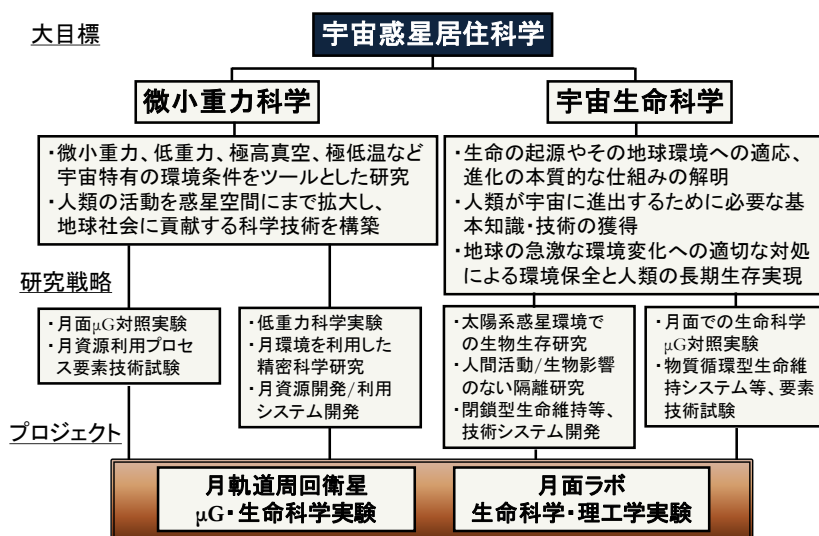


Fig. 2 Research Strategy and Projects of Human Planetary Habitation.

月面環境は、ISS がさらされている宇宙環境と類似、あるいはその延長にあり、地球からのアクセスも 3 日程度と身近にある唯一の衛星である。そのため、太陽系惑星環境での生物生存性、閉鎖型生命維持技術など、宇宙空間にてヒトが持続的に生存し、探査活動を可能とするための科学研究、技術開発・実証を発展的に継続可能である。

③月の資源開発・利用による有人惑星探査の経済性追求。

月には水素、酸素などを含む鉱物資源が存在し、月資源開発は、ヒトの生存に必要な水、推進燃料など経済的資源の供給を可能とする。月には大気がなく、重力も小さいことから、地球からの輸送と比べて大幅なコスト低減が可能となるなど、有人惑星探査に向けた物資補給の経済性追求の新たな選択肢を与える。

4. 宇宙惑星居住科学推進のための研究戦略

「宇宙惑星居住科学」は、微小重力科学と宇宙生命科学から構成される (Fig. 2)。微小重力科学は、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を推進し、宇宙生命科学は、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・技術の獲得を可能とする⁴⁾。

2025 年以降の SELENE 計画 (サンプルリターン計画を含む) 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などに係わる地上研究、ミッション開発、政策提言の推進が望まれる。そのためになすべきことは、月面利用に係わる科学的問題を明確に

し、必要な実験装置の開発、試験、最適化することである。以下に、実施内容の項目のみを列記する。

(1) 月軌道周回衛星計画

①月面科学研究を補完する微小重力実験

物理学、生命科学、応用科学研究に係わる対照実験の実施。

②閉鎖生態系生命維持システム研究

物質循環型植物栽培実験システム、重力・放射線複合環境生物影響評価、制御システム・解析技術の開発。

③理工学実験

月面上での科学研究、月資源利用等に係わる理工学実験。

(2) 月面ラボ計画

①低重力環境を用いた応用科学研究

材料プロセッシング、植物栽培実験、重力・放射線複合環境生物影響評価、継世代発生成長データ収集、微生物生態系評価、ヒトの月面環境への適応性評価、物質循環型生命維持・居住システムなど、これまでの微小重力研究、有人技術開発を補完、発展する実証研究。

②月環境に固有な科学研究

月表面は、地質的、生物的、人間活動によるノイズに起因する外乱がない環境、例えば、弱い月磁場、太陽風及び地球磁場テールのプラズマ環境、イオン化放射線環境、無大気・水及び他の揮発成分無し、地球生物圏からの隔離、大規模真空・極低温環境などを利用した科学研究の実施。

③月資源利用技術開発

物質循環・再利用プロセス実験、月資源利用水素・酸素製造プロセス開発。エネルギー開発試験。

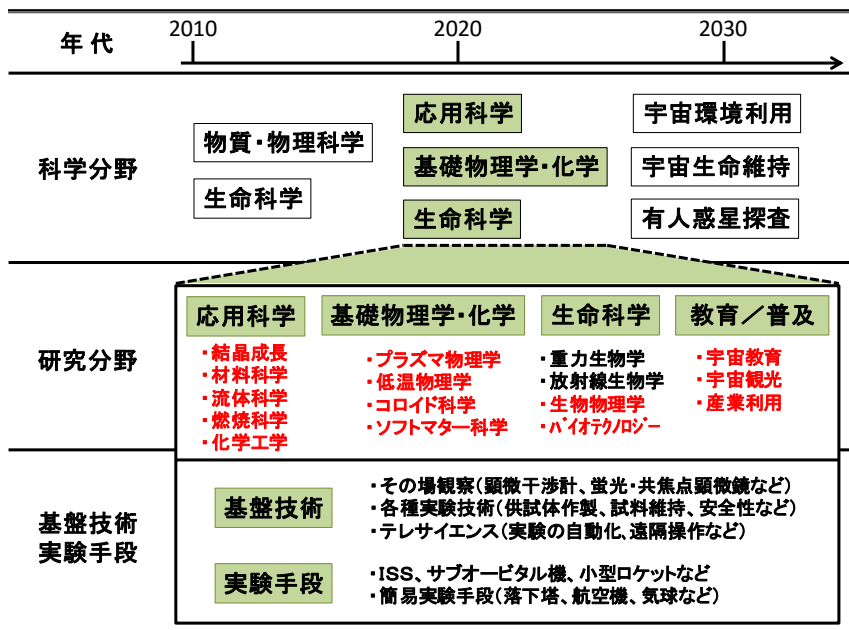


Fig. 3 Summarized Roadmap of ISS Researchers beyond 2020.

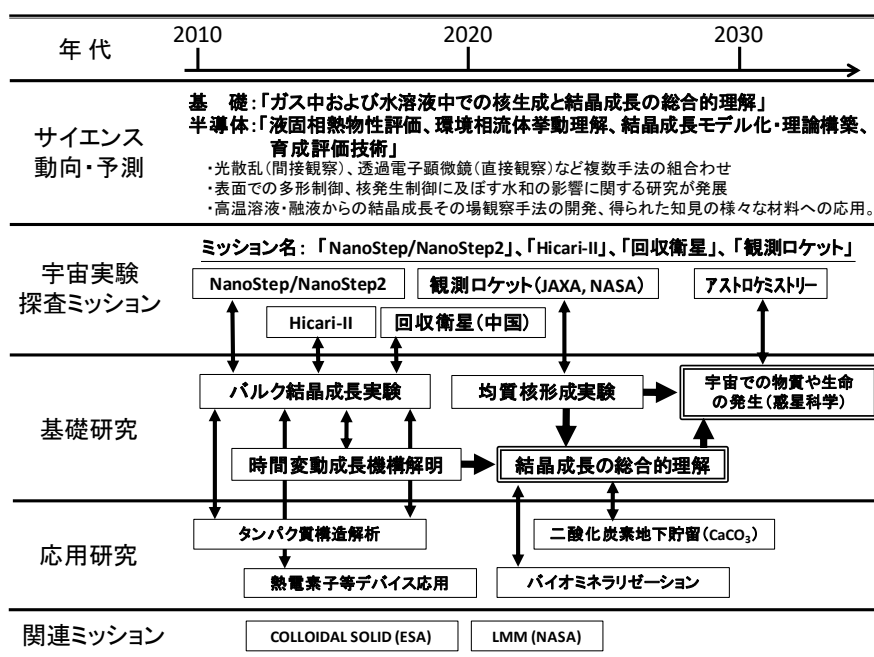


Fig. 4 Roadmap of Crystal Growth (Basic and Semiconductor Science).

5. 宇宙惑星居住科学に係わる微小重力科学研究

ヒトが惑星環境で活動することを可能とするためには、様々な科学、技術の進歩と、これを組み合わせる工学が必要となる。そのような総合的宇宙環境利用を推進する方策として、基礎研究の追求、応用へのフィードバック、宇宙実験ミッションの遂行を三位一体とする JASMA の研究戦略がある。

JASMA が所掌する微小重力下での科学を俯瞰する。

Figure 3 に示すとおり、初期には、物質・物理科学及び生命科学分野の実験テーマを中心に研究が進展し、現在は、結晶成長、材料科学、流体科学、燃焼工学、化学工学、プラズマ物理学、低温物理学、コロイド科学、ソフトマター科学、生物物理学、バイオテクノロジー、教育・普及に及ぶ研究分野(赤字記載分野)が対象となっている。「宇宙惑星居住科学」を大目標とした場合、これまでの研究が将来どのように継承され、発展していくのであろうか。JASMA では、研究分野毎のロードマップを JASMA の研究戦略に則って作成し、研究シナリオを可視化することとした⁹⁾。なお、以降に記述する分野別ロードマップは、時の経過と共に変化していくべきものである。新たな研究テーマの出現によって、大きく書き換えられることを期待したい。

(1) 結晶成長(基礎)

ガス中および水溶液中での核生成と結晶成長の総合的理解を確立する (Fig. 4)。

対流の抑制された微小重力環境下では、容器壁面の影響を受けることなく均質核生成の実験に有利である。また、結晶表面の水和層も乱されることなく観察できることから、微小重力環境下での核生成実験により、原子・分子から固体が形成する初期過程、及びその後の成長過程、結晶の完全性/不完全性との関係などを明らかにする。具体的には、宇宙ダストの生成過程の解明(アストロケミストリー)、高完全性タンパク質結晶成長による構造生物学分野などの研究に貢献する。

(2) 結晶成長(半導体)

液相・固相の熱物性の正確な把握、環境相である流体挙動の理解、結晶成長のモデル化および理論の構築、結晶育成・評価技術の高度化を図る (Fig. 4)。

ISS において「SiGe 結晶成長」と「InGaSb 三元混晶半導体結晶成長」実験が実施されている。これらの実験で得られた成果を系統的にまとめつつ結晶成長機構の把握、高温溶液・融液からの結晶成長その場観察手法の開発を行う。得られた結晶成長機構の知見を様々な組成のバルク結晶成長に応用し、半導体物性の性能向上に資する。

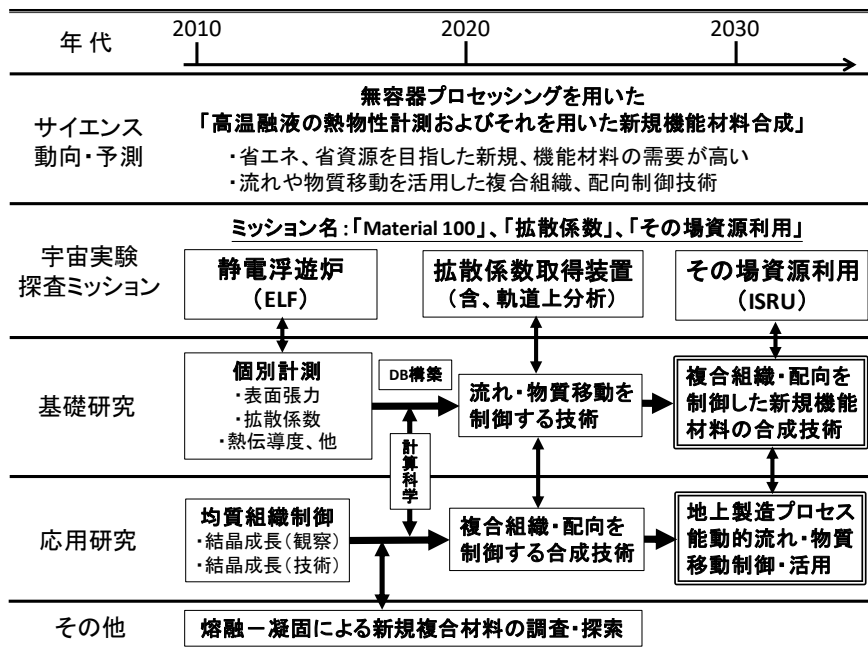


Fig. 5 Roadmap of Material Science.

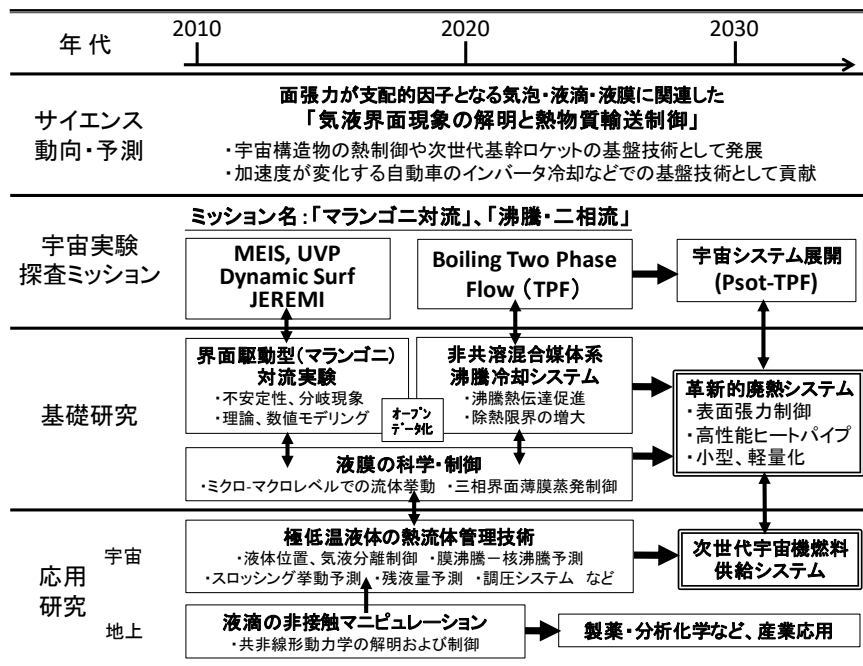


Fig. 6 Roadmap of Fluid Science.

(3) 材料科学

微小重力環境が提供する無容器プロセスを用いて容器が起因する問題を排除した高温融液の熱物性計測及びそれを用いた新規機能材料の合成を行う (Fig. 5).

地上では測定が困難な高温融体の熱物性データの測定

を行う。対象とする物性は、密度、粘度、表面張力、熱伝導率、拡散係数、比熱、電気伝導率など。無容器(静電浮遊、電磁浮遊)によって得られる大過冷却を利用し、新規機能材料の創成を行う。得られた熱物性データ、新規な組織構造と地上の計算機科学(マテリアル・インフォマティ

クス)を合わせて、機能材料の組織制御に関する基盤技術を構築する。流れや物質移動を制御する技術、複合組織や配向を制御する合成基盤技術など。確立した技術は、地上での新規機能材料の複合組織、配向を制御することを可能とする製造プロセスの実現に応用する。

(4) 流体科学

密度差による浮力対流の消失や、界面張力が支配的因子となる気泡・液滴・液膜に関連した気液界面現象の解明と熱物質輸送の制御に係わる技術開発を行う (Fig. 6)。

一連のマランゴニ対流実験 (MEIS, UVP, Dynamic Surf, JEREMI) 及び地上実験で蓄積したデータを体系的にまとめ、理論解析および数値解析結果と合わせて、界面駆動型対流の不安定性と分岐現象の総合的理解を果たす。微小重力下で顕著となる液滴の強非線形動力学の解明、濡れ挙動を本質的に理解することを目的に、分子レベルの挙動とマクロな3相接触界線 (コンタクトライン) における流体挙動を関係づける理論モデルの構築、沸騰・二相流実験 (TPF) では、世界に先駆けた精緻な実験データ取得により強制流動沸騰熱伝達の重力効果を明らかにする。また、応用としては、液滴の非接触3次元マニピュレーションにより、液滴からの製薬や分析化学分野においてブレークスルーをもたらす。液膜流や付着液滴では3相界面での薄膜蒸発を制御することによる高性能ヒートパイプの開発などに取組む。宇宙システムに利用できる革新的廃熱システム、極低温流体の熱管理技術を確立し、効率的かつ信頼性

の高い次世代宇宙機の開発につなげる。

(5) 燃焼科学

微小重力研究による燃焼現象を構成する素過程の解明と燃焼限界を取得し、燃焼科学の基礎を構築する (Fig. 7)。

排ガス等不活性成分 (CO₂, H₂O) 中での燃焼限界に関する研究と CO₂ 排出削減、環境負荷低減のブレークスルーとなりうる「酸素燃焼」システムの開発。ランダム分散液滴群の燃え広がりや群燃焼メカニズムの解明などの燃焼科学研究の推進。有人活動において必要な宇宙火災安全確保のためプロトコル (方法論) の確立を行う。特に、微小重力場における固体材料の燃焼限界が地上とは大きく異なることが明らかとなったため、微小重力下における火災現象を基礎的立場から解明すると同時に、これに基づく国際的な宇宙火災安全を確保する標準を確立する。

(6) 化学工学

重力レベルの変動に影響を受けにくい持続可能な生命活動システムを構築する (Fig. 8)。

化学工学単位操作 (吸脱着プロセス、膜分離プロセス、反応工学、移動現象、プロセスシステム工学など) について、重力の影響の小さい新技術・新プロセスとして実証的に再構築する。宇宙の極限環境、閉鎖空間では、宇宙の特殊環境に最適化した空気再生および水再生など生命維持技術の高度化は避けておれない。そのために、化学工学が培ってきた環境技術 (ゼロエミッションプロセス、再生エネルギー利用など) を、微小重力、低重力、可変重力場

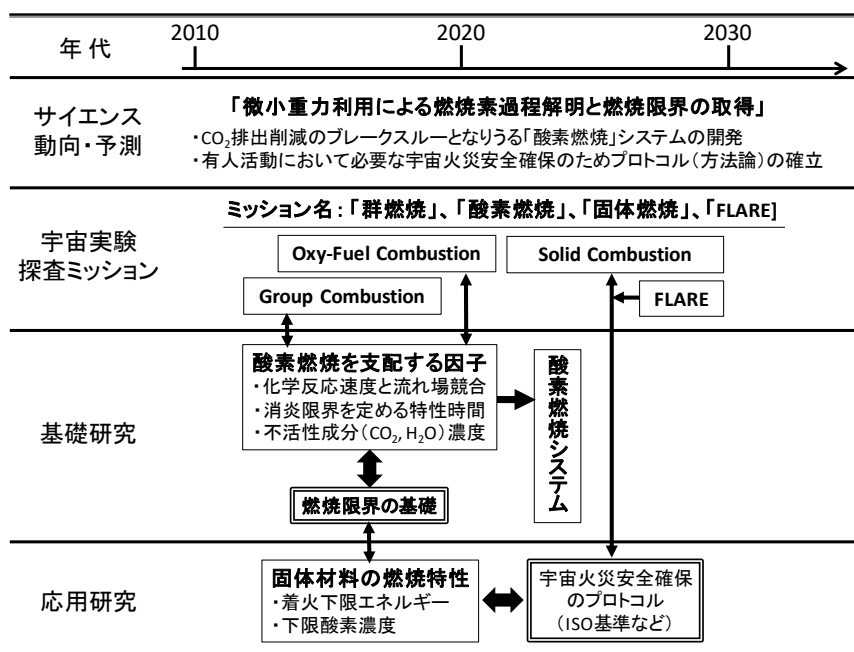


Fig. 7 Roadmap of Combustion Science.

での単位操作技術として確立する。日本は、環境技術立国を自負し、民生技術においても世界を圧倒する環境技術を保有している。このような技術蓄積を背景として、経済性の高い空気再生、水再生技術の開発に優先的に取り組む。

(7) 基礎物理学

プラズマおよび低温環境における固相・液相の物理の解明。プラズマ環境では強結合プラズマであるダストプラズ

マによる液-固相転移や臨界現象を、低温環境では 4He の量子結晶成長を研究する (Fig. 9)。

強結合プラズマの物理として、日本独自のハイパワー・ボイドフリープラズマ実験装置により、微小重力下でのダストプラズマのボイド形成メカニズムの解明及び荷電粒子系の臨界現象を世界で初めて観察する。量子固体の物理では、2020年打ち上げ予定の LiteBIRD に搭載を目指し

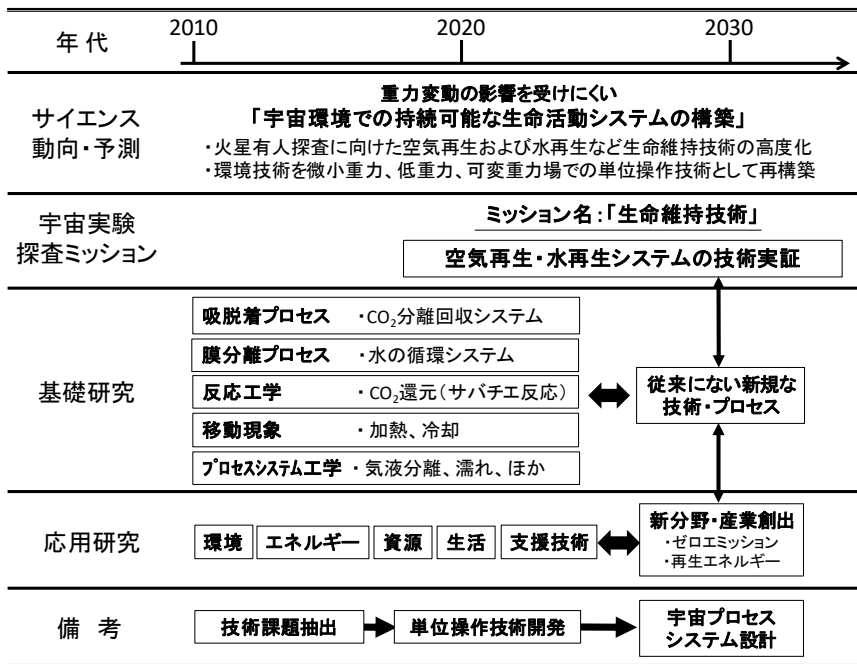


Fig. 8 Roadmap of Chemical Engineering.

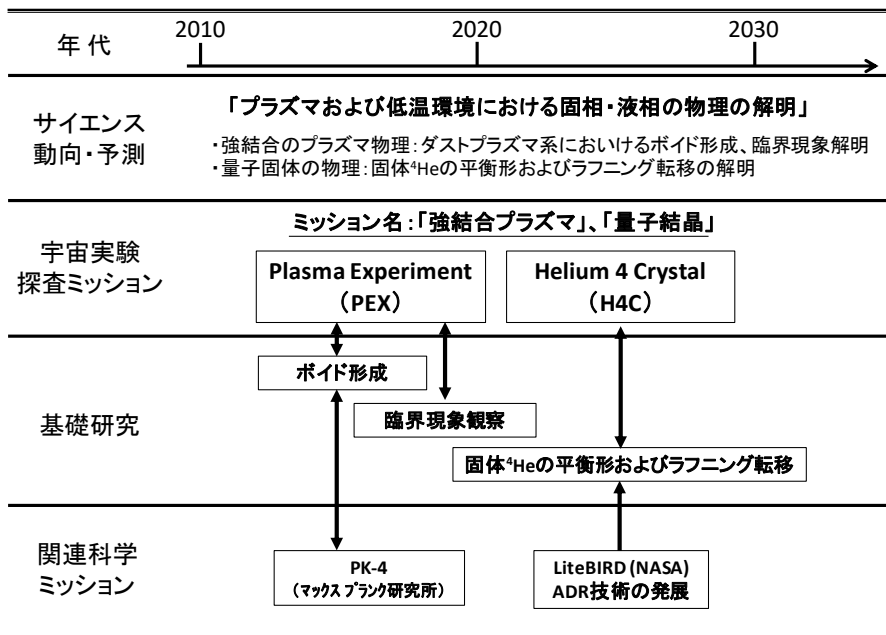


Fig. 9 Roadmap of Fundamental Physics.

て開発が進められている連続型断熱消磁冷凍機（連続型ADR）を更に発展させ、より大きな冷凍能力を持つ連続型ADRを開発し、固体4Heの量子効果が支配する平衡形およびラフニング転移の科学を構築する。

(8) コロイド科学

物理、化学、生物、材料など諸分野を横断する研究対象としてのコロイド科学研究を行う (Fig. 10)。

分野別には、1) 物理：コロイド間に働く新規な相互作用、結晶化、固体秩序化のモデル、自発的に運動する粒子（アクティブマター）、2) 化学：異方性結合粒子と制御された会合体形成による自己組織化、3) 生物：バクテリオファージを使った生体模倣的な集合体形成など生物物理モデル、4) 材料：フォトニック結晶、量子ドットやプラズモニック粒子の自己集合を利用したメタマテリアルを対象とする。これにより、コロイド分散系の構造解析と粒子間相互作用の解明、粒子間相互作用の制御による会合体形成、プラズモニック材料の創成と光学・医療領域への応用などの研究を進める。

(9) ソフトマター科学

地上で問題となる因子（泡のドレナージ、エマルションにおけるクリーミング、滴の自重による変形等）を排除することにより、不安定化などの観察時定数を拡大、不安定化プロセスの詳細観察を行う (Fig. 11)。

エマルション、泡、滴などは、多相系であり相間に密度差がある場合、重力の影響を強く受ける。さらに、石油化学、食品化学、製薬でこれらの挙動は、品質、製造効率な

ど支配するため、基礎、応用両者の観点で幅広く研究されている。宇宙におけるソフトマター研究は、「ソフトマター」という言葉を生み出したヨーロッパにおいて盛んに行われており、優れた実験ミッションが計画されている。このため、欧州研究者との連携のもとに日本が強い研究テーマを中心に共同して進める。

(10) 生物物理・バイオテクノロジー

構造生物学向け新規タンパク質の結晶化、及びタンパク質の凝集により発症する生体内過程について、沈降や流れのない微小重力環境下にて凝集初期過程の時間依存性をモデル化する (Fig. 12)。

構造解析向けタンパク質結晶化分野は、大きく次の2点の方向性がある。一つ目は、構造生物学への貢献であり、二つ目は、新規医薬品分子の設計等への貢献である。この際、1) 大型で品質の高い結晶が必要とされる中性子線回折による構造解析と、2) 非常に高品質な結晶が必要とされるX線回折による超高分解能構造解析結果を組み合わせる反応機構の解析、3) 高品質な結晶を用いたX線回折による超高分解能構造解析で、疾病関連タンパク質等と薬物との結合様式をより正確に把握することが必要となる。タンパク凝集疾病に関する凝集機構は未解明であり、コロイド粒子を用いて微小重力環境（航空機、観測ロケット、およびISS）で研究を行う。特に、凝集初期過程について、コロイド科学・結晶成長学の方法論を用いて解析する。タンパク凝集の知見と比較することで、開始点の有無の必要性、タンパク濃度の凝集速度への影響など鍵となる因子を

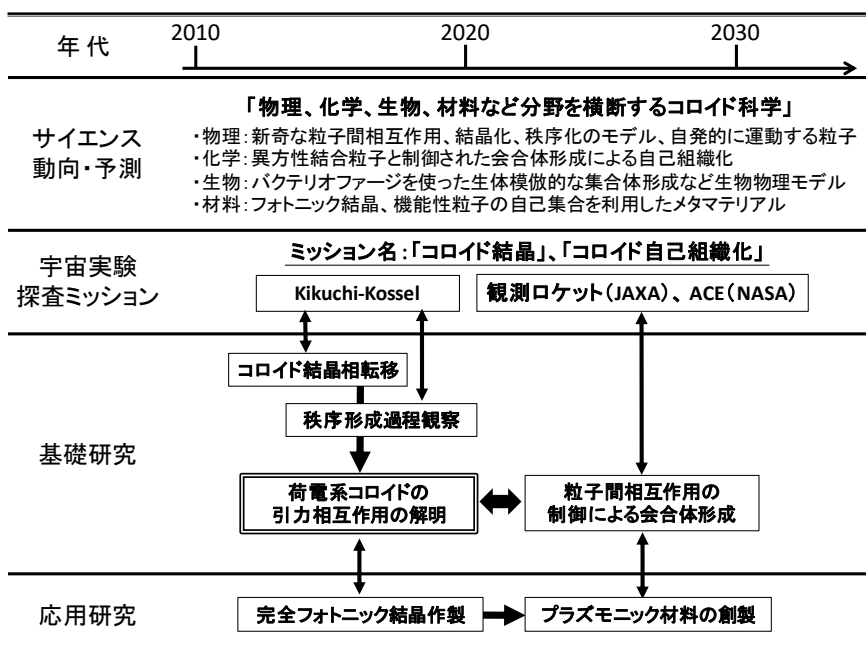


Fig. 10 Roadmap of Colloid Science.

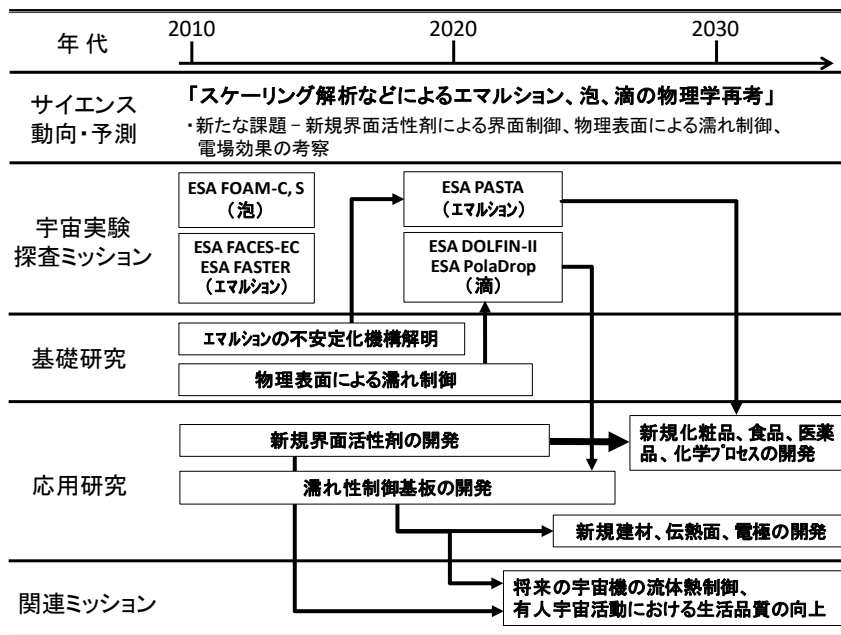


Fig. 11 Roadmap of Soft Matter Science.

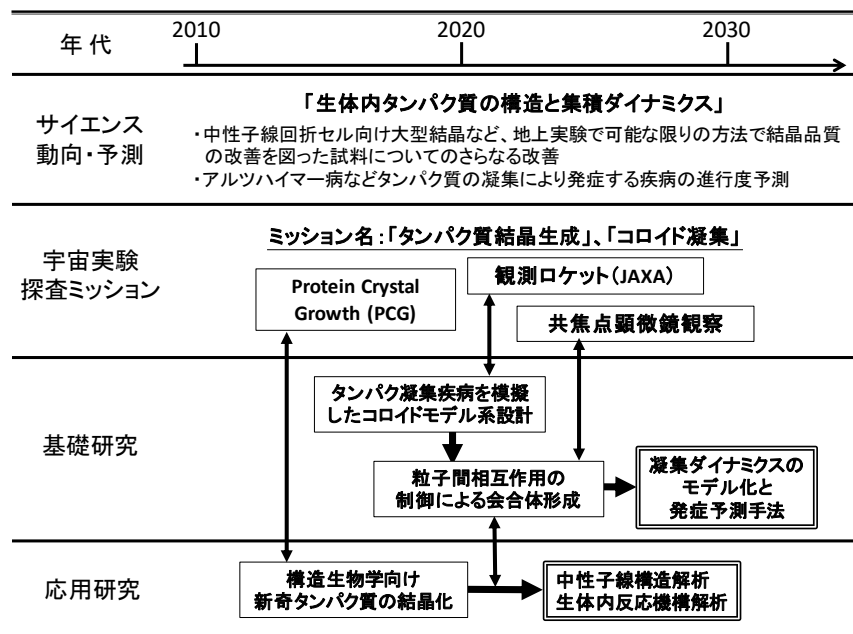


Fig. 12 Roadmap of Biophysics and Biotechnology

特定し、妥当な凝集モデルを構築する。

(11) 宇宙教育・普及

科学、生物、工学分野の微小重力実験を通して、宇宙の微小重力を実体験し、地上の科学技術を宇宙環境利用のための科学技術へと発展させる。惑星探査、惑星居住など、人類の活動を宇宙にまで拡大する次世代の宇宙開発利用ミッションの基礎となる知識体系を構築する (Fig. 13)。

低学年の育成は、JAXAの宇宙教育センターにより宇宙の基礎を伝える様々な教材、プログラムが用意されており、これを活用する。その基本方針は、1) 宇宙とのつながりを大切にしたい(意識した)活動、2) 感動体験、ほんもの体験、3) 「なぜだろう」「くふうしてみよう」という科学する心を引き出し育てる努力の試み、4) 安全に対する配慮、の4点にある。高校生、大学生向けには、航空機、落下塔

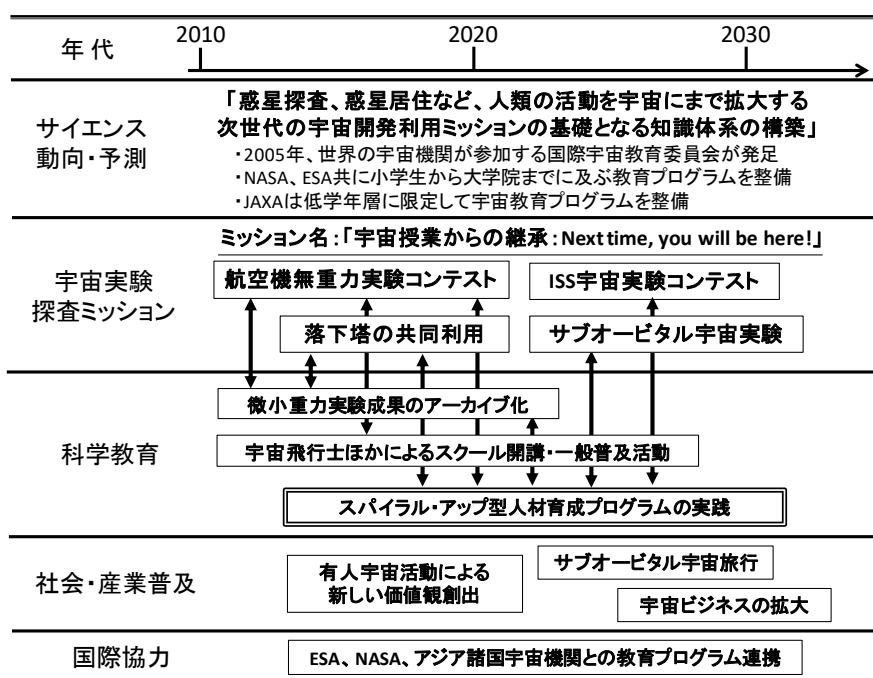


Fig. 13 Roadmap of Education and Outreach

などを利用した微小重力教育実験などにより、微小重力を実際に体験させる機会を提供する。これによって微小重力環境における物理学・工学、生命科学などに関する体験型教育を実施する。21世紀に向けて表面化しつつある、環境、資源、食料、水、健康、医療などの世界共通の課題解決のためにいかに宇宙環境を利用するかという理念を共有し、未来の地球社会を牽引する人材育成を図る。

6. おわりに

日本の本格的な宇宙環境利用計画は、第一次材料実験 (FMPT) に始まる。1983年に計画がスタートし、9年後の1992年、毛利衛宇宙飛行士による「ふわっと'92」に結実した。FMPT計画開始の翌1984年、当時の米国レーガン大統領は、年頭教書にて宇宙ステーション計画 (ISS) の推進を発表し、24年後には「きぼう」の運用が始まった。特筆すべきは、無人の宇宙機である宇宙実験・観測フリーフライヤー (SFU) を用いた宇宙実験プロジェクトである。月・火星探査に向けて多くの教訓をSFU計画から引き出すことが可能である。

SFU計画は、1983年に宇宙研にSFUワーキンググループが設置され、計画が始動。1986年に当時の宇宙開発委員会で承認を受け、設計を開始して12年後の1995年に打上げを果たし、約1年間の実験運用が行われた。SFU計画が教えることは、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。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。さらには、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している。

特に最後の学びについて付言すれば、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、「こうのとりのり」(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と言えよう。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ある。

以上、我が国の代表的な宇宙環境利用計画を例にして、そのタイムスケールといくつかの教訓をご紹介した。ISSのような超大型の国際プロジェクトであれば20年、FMPTやSFUのような中型のプロジェクトであれば10年は必要ということになる。現在40代～50代の研究者であれば、十分取組めるタイムスケールである。

2015年、宇宙惑星居住科学連合が、宇宙環境利用4学会 (日本マイクログラビティ応用学会、日本宇宙生物学会、日本宇宙放射線研究会、日本宇宙航空環境医学会) を中核にして発足した。現在は、生態工学会が加わり5学会

体制となっている。連合を通じた研究活動を踏まえて、実現性の高いフラグシップとなる中型規模のミッションを提案する。例えば、無人機による月利用計画がスタートすれば、10年後には月面実験が可能であり、20年後には有人活動も不可能ではない。国際コミュニティを巻き込んだ計画の進展に期待したい。

謝辞

宇宙惑星居住科学の構想を育むにあたって大きな刺激をいただいた大西武雄氏（奈良医大）、高橋秀幸氏（東北大）、稲富裕光氏（JAXA）に感謝する。また、JASMAにおける微小重力科学研究ロードマップの作成に携わっていただいた石川毅彦氏（JAXA）、河南 治氏（兵庫県大）、松本 聡氏（JAXA）、岡野泰則氏（大阪大）、藤田 修氏（北

大）、古川義純氏（北大）、田仲広明氏（コンフォーカルサイエンス）、山中淳平氏（名市大）、早川泰弘氏（静岡大）、足立 聡氏（JAXA）、中村祐二氏（豊橋技科大）、長谷川洋一氏（ワンアース）に謝意を表する。

参考文献

- 1) 月探査に関する懇談会：我が国の月探査戦略（2010）.
- 2) 国際宇宙探査協働グループ、「国際宇宙探査ロードマップ」第2版（2013）.
- 3) National Research Council: The Scientific Context for Exploration of the Moon (2007).
- 4) 宇宙科学研究所：コミュニティからの目標・戦略・工程表から宇宙科学の実行戦略へ，宇宙航空研究開発機構（2016）.
- 5) 日本マイクログラビティ応用学会：微小重力科学の目標・戦略・工程表（2015）.