

JSASS 宇宙ビジョン 2050



2021 年 7 月 日本航空宇宙学会

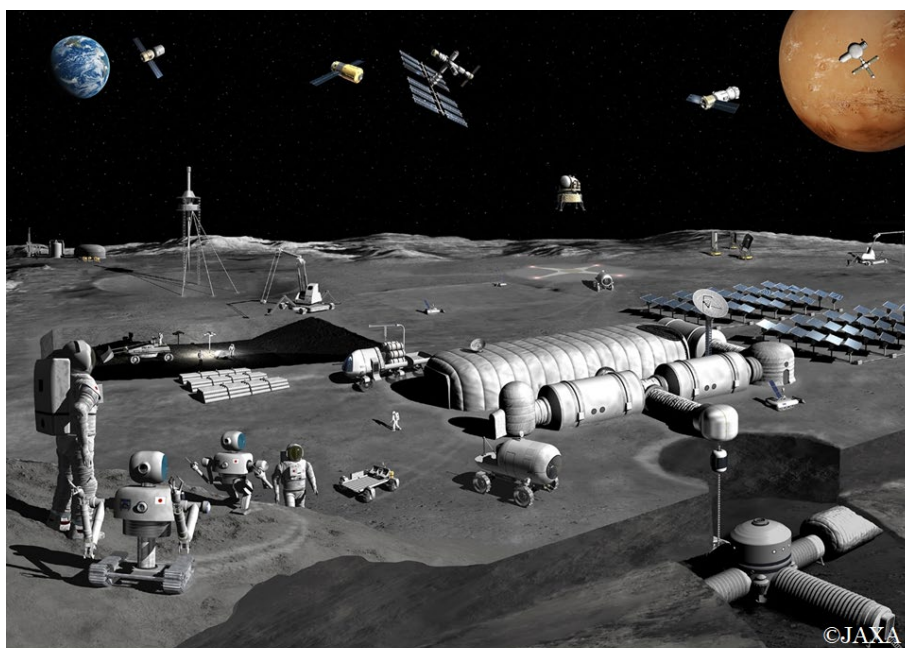


JSASS 宇宙ビジョン 2050 では地球近傍活動, 月・火星圏の活動, 深宇宙探査と科学活動の発展性, を科学技術と総合政策ロードマップとともに示した。以下には, 本ビジョンのハイライトを3枚のイメージ図として示す。



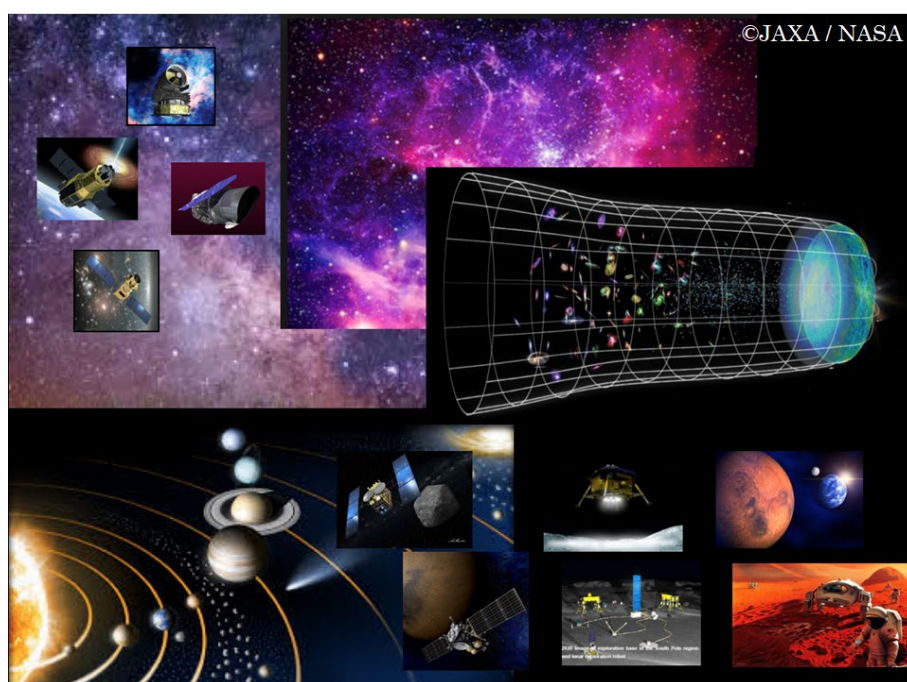
2050年における地球近傍の宇宙利用

地球近傍(低軌道, 静止軌道等)における宇宙活動が加速している。弾道飛行宇宙旅行が一般になり, 国家資本・民間資本による複数の有人拠点がビジネスで活用されている。革新的な再使用型宇宙機の実現により観光用の弾道飛行と地球近傍軌道への頻繁なアクセスの両方を活性化させている。宇宙輸送ネットワークは, 複数の有人基地, 燃料補給港, 宇宙船整備港などからなり, それらの建設は軌道上サービスドローン(ロボット)によって実現される。従来はロケットの寸法制約のために実現できなかった規模の大型観測センサが軌道上で組み立てられている。



2050年における月面基地における宇宙活動

宇宙に進出した人口が指数関数的に増大し、地球近傍から月、火星圏の宇宙空間において、人類が水・エネルギー・推薬等の資源を地産地消しながら生活している。



2050年における宇宙科学発展

火星以遠の太陽系領域の無人探査や、宇宙の果てと始まり、生命の誕生プロセスを観測・解明する科学衛星群が、太陽系と宇宙の真理を明らかにし、国際的な協調のもと豊かな知性と科学のさらなる発展が続いている。

目次

1. はじめに	p.1
2. 宇宙ビジョン2050	p.3
3. 宇宙ビジョン2050を達成するためのロードマップ	
a) 宇宙科学技術ロードマップ	p.7
b) 宇宙総合政策ロードマップ	p.47
4. おわりに	p.84
【資料】 日本の宇宙活動の歩み	p.86

1. はじめに

日本航空宇宙学会は1968年7月に前身の日本航空学会から名称を変更して、2018年に50年目を迎えた。学会名に「宇宙」を取り入れてからの50年であることを機に、第50期理事会は「宇宙長期ビジョン」を学会から提言する決定を行った。2019年4月に開催される年会講演会で公表することを目標に設定し、航空宇宙ビジョン委員会が中心となり、その検討を行うこととなった。臨時委員会である航空宇宙ビジョン委員会は航空と宇宙の二分野のビジョンを検討する委員会であり、それぞれの分野に二つずつ小委員会を有している。今回は宇宙に特化したビジョンを検討することから、宇宙分野に関連する宇宙科学技術ビジョン小委員会と宇宙総合政策ビジョン小委員会が協力して、議論を進めることとした。

今回策定する宇宙長期ビジョンの目標とする年代は2050年およびそれ以降とした。2050年は現在から約30年後である。逆に、現在から30年前を思い浮かべれば、その間に様々な社会的ならびに技術的な発展があったことが理解できる。30年後を想定することで、数多くの発展が予想できるので、2050年およびそれ以降を念頭においた検討を行うこととした。従って、策定する宇宙長期ビジョンの名称は2050年を意識して「宇宙ビジョン2050」とした。さらに、学術の学会であるから研究者・実務者を対象とするビジョンの策定とし、研究者・実務者に新たな研究開発・新規事業に取り組んでいただくことを学会は願っている。

宇宙ビジョン2050を策定するだけでなく、それに至る開発の道筋を示すロードマップも策定することとした。ロードマップは、科学技術の発展を念頭に置いた「宇宙科学技術ロードマップ」と法律や国際関係などの人文社会科学の課題を念頭に置いた「宇宙総合政策ロードマップ」の二本立てとすることとした。従って、今回策定する宇宙ビジョンと各ロードマップは右図

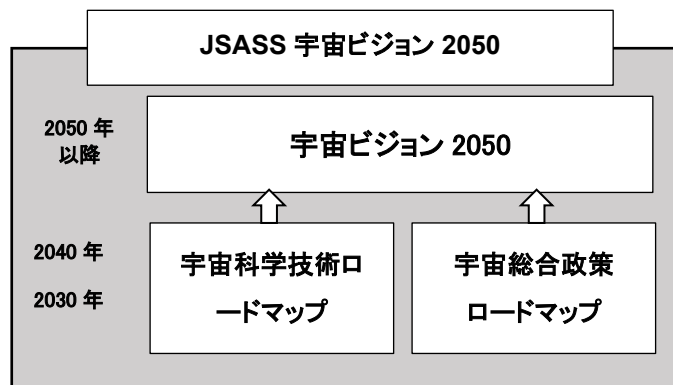


図1 JSASS 宇宙ビジョン 2050 の構成

に示す構成とし、全体を「JSASS宇宙ビジョン2050」と呼ぶこととした。宇宙ビジョン2050は、専門分野に限らない有識者の意見を取り入れて、理想の2050年以降の宇宙活動を描くものである。従って、トップダウンの検討を行った。一方、二つの宇宙ロードマップは専門家の現在の認識から10年後や20年後に実現可能な内容を示すものである。こちらはボトムアップの検討を行った。そして、両者を連続的につなぐことで「JSASS宇宙ビジョン2050」を完成させた。

将来のことを予測することは非常に難しいことである。もしあれが開発されれば、この課題が解決できたという仮定を前提に急激な進展が予測されることもある。今回のJSASS宇宙ビジョン2050にはこのような詳細な仮定は含めておらず、仮定を提案・実現するのはこのJSASS宇宙ビジョン2050の読者である研究者・実務者が担うものと信じている。地道な努力が発展を築くこともあれば、思わぬ挑戦結果が急激な進展を生むこともある。様々な分野で将来の希望に満ちた社会を導く研究者・実務者が、このJSASS宇宙ビジョン2050を活用して、人々の豊かさに向けた挑戦を続けていただければ幸いである。

2. 宇宙ビジョン2050

1) 宇宙ビジョン2050の構成

宇宙ビジョン2050は、2050年に人類がどこでどのような宇宙活動を行っているのか、その活動が何をもたらしているのか、をイメージするところを出発点として、それぞれを構成する項目についてその概要を記述する。尚、宇宙長期ビジョンの中で用いる言葉の定義を以下にまとめる。

【1】研究者・実務者

研究者とは理系・文系を問わず宇宙に関連する学問の研究を専門職とする人であり、技術者を含む。実務者とは宇宙に関連した実際の業務に関る人。

【2】宇宙労働者

操縦士、技術者、科学者等、地球近傍を含む宇宙での仕事をなりわいにする人。国や民間の制度で認定された宇宙飛行士も含まれる。

【3】宇宙旅行者・宇宙に滞在している宇宙労働者の家族

仕事以外の目的で、宇宙に滞在する人。

I. 人類はどこで活動しているか？

【地球近傍】

地上に限定されていた人間社会が地球近傍の宇宙に広がっている。様々な方法で宇宙にアクセスできるようになり、宇宙労働者や研究者・実務者以外の人も宇宙活動に参加している。

【月】

国家資本・民間資本により建設・運用されている月面基地が複数存在し、宇宙労働者を中心とした宇宙滞在者による人間社会が形成されている。宇宙労働者や研究者・実務者以外の人も宇宙旅行者として月に短期滞在している。

【火星】

宇宙飛行士により火星探査計画が推し進められ、人類の活動する宇宙領域を拡大している。

【太陽系】

人類は無人探査機を利用して太陽系のどこにでも行ける能力を獲得している。また、情報技術の発展により探査能力が格段に向上している。

【太陽系外】

人類は太陽系外への移動手段の開発に挑戦している。

II. 誰が宇宙活動を行っているか？

【国・宇宙機関】

国・宇宙機関は、月や火星に滞在する宇宙飛行士を定期的に送り込んでいる。太陽系全域に人類の宇宙領域が拡大し、更に太陽系外へと広がりを見せている。

【研究者・実務者】

研究者・実務者は互いに協力し、宇宙活動の持続的発展に向けて尽力している。研究者は深

化・拡大した様々な学問領域に取り組み、新しい視点・論点を提供している。また、先端的な技術開発を行っており、時として想定外の変革を社会にもたらしている。実務者は新技術の社会実装に取り組み、新しい課題を解決している。

【宇宙滞在者】

宇宙にいる宇宙労働者が人類の活動領域を拡大すべく地球近傍、月や火星の表面や軌道上で活躍している。特に月面基地においては宇宙労働者とその家族が人間社会を形成しており、宇宙旅行者が定期的に訪れている。

【産業界】

全ての人が宇宙活動に参加することをサポートするビジネスが展開している。民間企業が地上のスペースポート、地球低軌道や月を拠点として複数のビジネスを展開し、宇宙労働者が働いている。新しい輸送システムの確立による人や物資の大量輸送が実現することで、宇宙で生産されたデータ・物・エネルギーに基づく産業が様々な分野に展開しており、全ての人がその恩恵を受けている。

【宇宙労働者や研究者・実務者以外の人】

宇宙旅行に興味がある人にとっては、弾道飛行体験や低軌道有人宇宙ステーションに滞在することが日常的になり、月の短期滞在も可能になっている。また、宇宙に直接的な興味のない人も様々な情報機器を通じて宇宙活動に参加しており、その恩恵を受けている。

III. 宇宙活動は何をもたらしているか？

【人類の課題解決】

宇宙活動は持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals, SDGs)の実現に貢献している。また、次世代の産業界の課題を解決し、人間生活の利便性・快適性の向上に役立っている。

【産業構造の変革】

地上と宇宙空間間の大量輸送や、情報・ロボット技術の進化等が、産業構造に変革をもたらしている。異業種企業や新興企業の参入だけではなく既存企業の新規分野開拓を、様々な民間資本が後押しするとともに、関連した法整備等が進んでいる。

【新しい価値観の醸成】

人の生活圏が地上から地球近傍に広がることにより、「人類の宇宙進出」や「地球環境の保護」等に対する、新しい価値観が醸成されている。

【知の獲得】

太陽系外を含めた宇宙活動を通して、学問領域が深化・拡大し、生命や宇宙の起源に対する理解が深まっている。科学、工学、人文社会科学の専門家が知見を持ち合い、人類の宇宙活動(地球上の活動を含む)の推進・発展に貢献している。

【人類の生活圏拡大】

地球から離れた月や火星の滞在者は、地球外における人間社会の確立に向けた第一歩を踏み出している。

【宇宙活動の持続性確保】

宇宙活動の結果として顕在化した問題や宇宙環境の保護に取り組むことで、我々は持続可能な人類の宇宙活動を実現している。国の枠を超えた統一的な宇宙交通管制が実現し、誰もが安全に宇宙活動を行っている。

IV. まとめ

宇宙ビジョン2050では、2050年に人類がどこでどのような宇宙活動を行っているのか、その活動が何をもたらしているのか、をイメージするところを出発点として、その概要をまとめた。2050年には宇宙に対する興味のありなしに関わらず、全ての人類が宇宙とつながりを持ちながら暮らしている、そのような未来を想像してみた。

研究者・実務者は、新しい産業の創出や人類の課題解決を通じて、研究成果を広く社会に還元するように努めることが望まれる。刺激的で挑戦し甲斐のある宇宙活動にチャレンジするにあたっては、研究者・実務者は社会からのサポートを積極的に求め、一体となって取り組むことが大切である。そのためには研究成果を挙げるだけでなく、「研究の面白さ」や「宇宙開発が人々に恩恵をもたらしていること」を社会に向けて発信する必要がある。宇宙活動の意義を伝えるコミュニケーターを養成することも大切である。

宇宙ビジョン2050は国際的な協力なしには実現できない。私たちは宇宙活動の持続可能な発展を人類として実現するために、私たちの宇宙ビジョンを示すことで、国際的なパートナーと宇宙活動の展望を共有したい。

謝辞

宇宙ビジョン2050の作成にあたっては、以下の外部有識者の方に議論にご参加頂き、貴重なご意見を頂きました。ここにお名前を記載させていただきますとともに、感謝の意を表します。

川端 裕人	科学ジャーナリスト
中野 不二男	科学ジャーナリスト
金山 秀樹	シー・エス・ピー・ジャパン株式会社
Courtney Covington	英語講師

(敬称略)

参考) 航空宇宙ビジョン委員会メンバーの構成:

上野 誠也(委員長)	横浜国立大学
今村 太郎(幹事)	東京大学
渡辺 重哉	宇宙航空研究開発機構
千葉 一永	電気通信大学
小木曾 望	大阪府立大学
荻原 慎二	東京理科大学
川崎 繁男	宇宙航空研究開発機構
藤本 秀	(株)IHI
西本 光男	(株)SUBARU
藤川 貴弘	九州工業大学
藤田 将一郎	川崎重工業株式会社
西脇 賢	全日本空輸(株)
小室 卓磨	川崎重工業株式会社
越岡 康弘	宇宙航空研究開発機構
武市 昇	首都大学東京
河野 功	宇宙航空研究開発機構
関口 毅	宇宙航空研究開発機構
豊嶋 守生	情報通信研究機構
船木 一幸	宇宙航空研究開発機構

ビジョン小委員会兼任

平子 敬一	慶応義塾大学
船木 一幸	宇宙航空研究開発機構
水野 素子	宇宙航空研究開発機構
菊地 耕一	宇宙航空研究開発機構

JSASS理事会兼任

大林 茂(会長)	東北大学
渡辺 重哉(担当理事)	宇宙航空研究開発機構

3. 宇宙ロードマップ

a) 宇宙科学技術ロードマップ

1) JSASS宇宙科学技術ロードマップの構成

宇宙ビジョンで描く2050年代には、宇宙輸送と宇宙機システムの発展が、宇宙建築やロボット・情報アーキテクチャの発展と互いにリンクしながら成熟し、様々なサービスが提供されているだろう。各関連分野の発展状況は、「宇宙利用」と「宇宙探査活動」の二つの進展状況を描いたマップに従って予測することとした。これら二つのマップは、宇宙ビジョンが実現する道筋、あるいは、宇宙ビジョンとシステム・アーキテクチャとの接続を示す。

1-1) 宇宙利用の発展マップ

宇宙利用ならびに探査の状況は、地球からの距離を基準に整理すると解釈しやすいことから、距離を基準に整理した。図3a.1のように、低軌道往還・滞在者が加速的に増加し、市民活動が宇宙領域へ展開している。

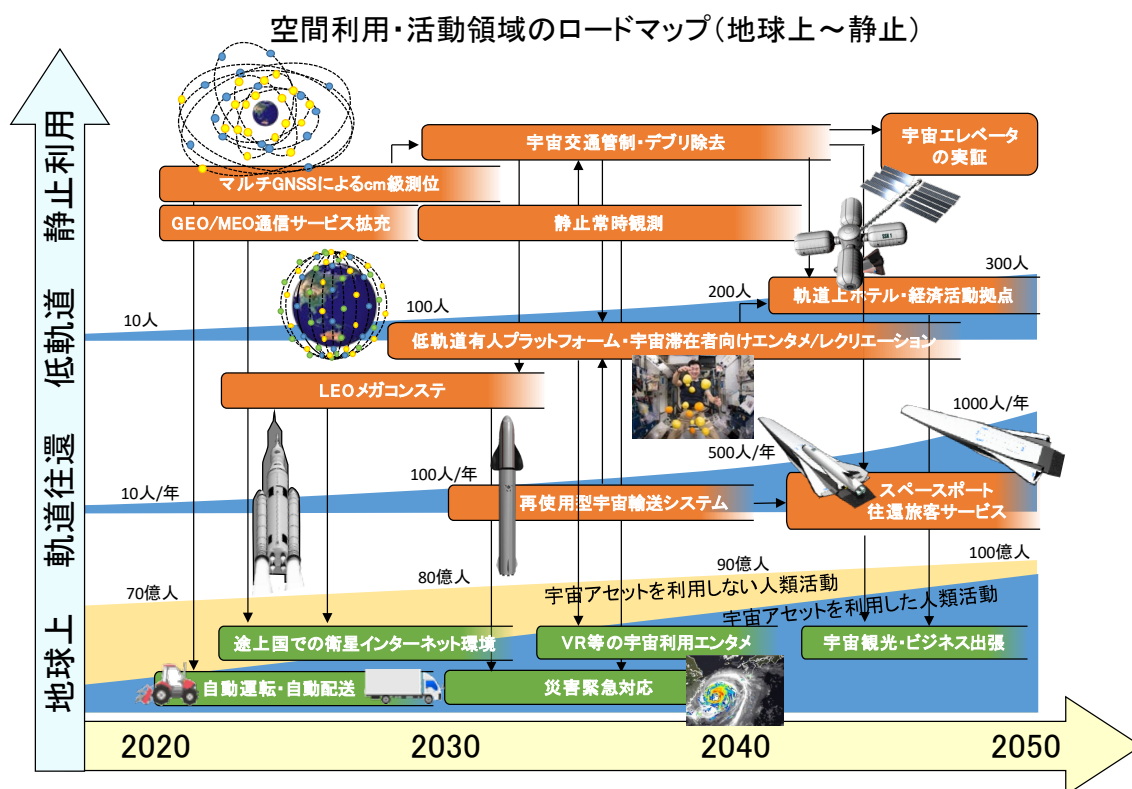


図3a.1. 宇宙利用の発展マップ

まず、静止軌道も含めた地球近傍における宇宙利用については、再使用輸送系の発展によって2020年以降急激に増加し、観光が盛んになり、ビジネスユースが広まる。2040年には低軌道への往還飛行は年千人規模となり、低軌道プラットフォームへは年数百人規模が利用するようにな

ると想定する。その結果宇宙輸送系ビジネスが更に活性化し、また、スペースポートや低軌道上での建築物や通信等のインフラ整備が進むであろう。これらに伴い、活動圏としての月利用が2020年代後半から広がり、月周回居住モジュールに2040年に数十名が、月面拠点には10名程度が常駐するようになるだろう。2050年には月への観光目的の短期滞在も可能となり、その頃には火星における居住技術も確立することから、医療を含むインフラと「エンターテインメントを含む」サービスが月・火星空間まで広がる。具体的な発展イメージを下記に記した：

地球上

- 2020年代にはGNSSの高精度化、衛星通信サービスのグローバル展開とAI技術の進歩により、自動運転・自動配送サービスが開始される。自動運転は陸域・海域・空域で広がり、地球上の移動・輸送のコストが低減する。
- 2030年代までには途上国の開発が進み、世界人口の多くは衛星インターネット環境や宇宙利用エンターテインメント等、宇宙アセットの利用を意識せずに行うようになる。
- 2040年までにはLEOメガ・コンステレーション、及びGEOからの常時観測により、災害時の緊急対応が迅速化する。また、環境変動や災害予兆などの常時モニタ環境が整備され、災害被害は減少する。

低軌道（滞在、及び、地上との往還）

- 再使用型宇宙輸送システムなどの宇宙輸送技術の進歩により、軌道上への物資輸送コストが下がり、大型宇宙構造物の整備が進む。
- 2040年頃までには、大型宇宙構造物の整備や静止以遠の活動拠点として、低軌道には常時数百人規模の滞在者があり、宇宙旅行者向けのエンタメコンテンツや長期滞在者向けのレクリエーション環境が整備される。
- 更にTSTO/SSTOなどの宇宙輸送技術の進歩により、地上-軌道間の往還者が急増する。

静止軌道

- GEO/MEO利用によるGNSS、通信衛星、及び、GEO常時観測衛星は増加の一途を辿る。
- その一方で、軌道上が混雑し、また、軌道上の人類の滞在者数が増えることで、宇宙交通管制や宇宙デブリ除去の要請が高まる。

1-2) 宇宙探査活動の発展マップ

宇宙探査活動の発展マップを以下に記した。2050年代の火星は有人探査活動の最前線となるが、これとは相補的に月・火星の極限領域を自在に探査するロボットや外惑星等太陽系内のより遠くの空間を目指した無人探査が、国際的な協調のもとで盛んになっている。月面長期居住・火星有人探査へ向けて、インフラ整備と医学面の研究が発展すると共に、広い太陽系内を自在に航行してその場の探査のための技術開発が進歩する他、探査ロボットと地球での操作者を繋ぐVR技術が飛躍的に向上して遠隔での宇宙探査活動が実現する。またこの技術を活用して多くの人が探査をリアルタイムで楽しむことができるようになっている。

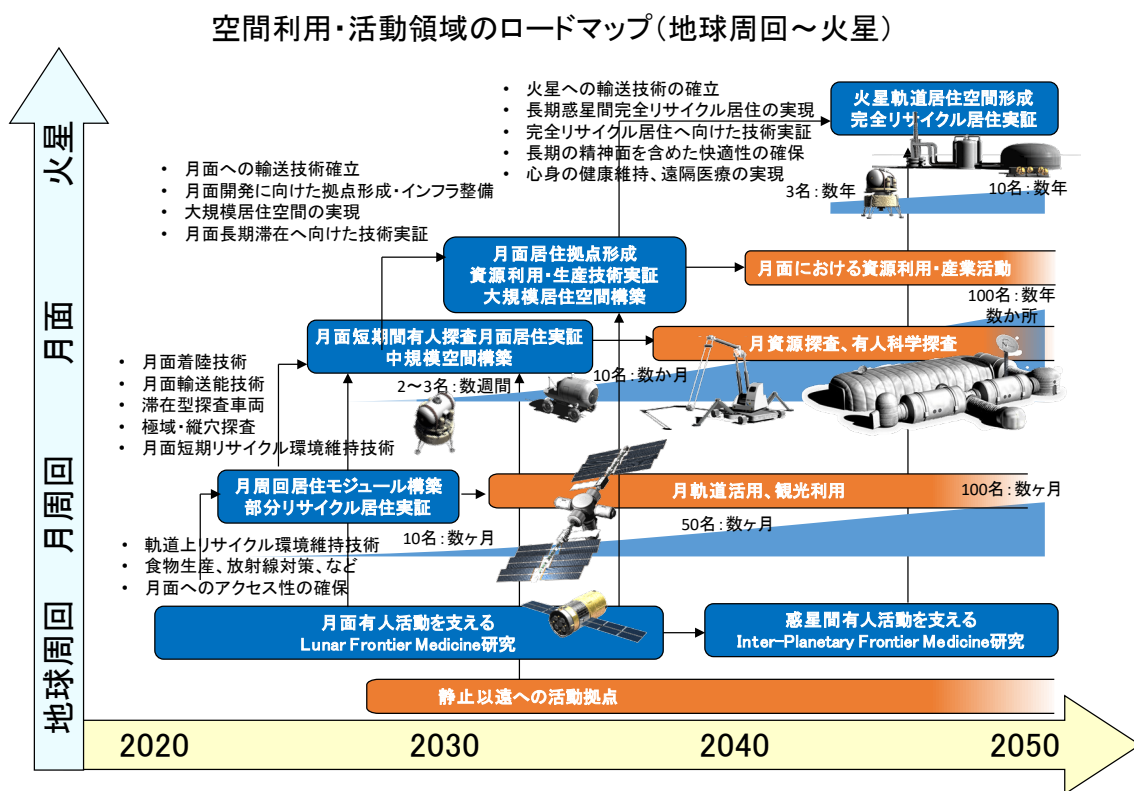


図3a.2. 宇宙探査活動の発展マップ

具体的な発展イメージを下記に記した:

- 2020年代に構築が進む月周回プラットフォームを中心として、2030年代に月面の有人探査が展開する。
- 2040年代には、月面への到達技術の成熟に合わせて、月面での本格的な産業活動が実現する。
- 月周回プラットフォームを拠点として、2050年代には火星の有人宇宙探査が開始する。
- 低軌道利用は観光などの利用に加えて、月・火星へのインフラとして規模を拡大していく。
- 月面有人探査に呼応する形で、1/6 G環境やレゴリスの健康影響など 月面居住に特化し、

月面長期居住を実現するための医学(Lunar Frontier Medicine)が発展する。

- 火星への有人探査実現へ向けて、遠隔医療、遠隔診断、長期孤立の健康影響など、惑星間長期移動を実現するための医学(Inter-Planetary Frontier Medicine)が発展する。
- 宇宙と生命の起源を探る観測技術も、国際的な協力のもとで更に進展し、多くの新しい物理的かつ根源的な発見が実現している。

2) 宇宙科学技術ロードマップの概要

2050年代の宇宙利用と宇宙探査の発展を予測した上で、本文書では、宇宙利用と宇宙探査のそれぞれの発展を支える宇宙輸送・宇宙建築・宇宙機・宇宙情報の各展望を、技術ロードマップとしてまとめた。以下は各分野の概要である：

宇宙輸送	使い捨てロケットに置き換わる形で低コストかつ信頼性の高い再使用ロケットへと技術革新が進み、地球近傍の宇宙活動の活性化と、月から太陽系内の活動が拡大する原動力となっている。
宇宙建築	宇宙への大量輸送の発展は、地上から宇宙へと物資を運んで各種構造物を製造・構築する宇宙アーキテクチャ(宇宙建築)の革新へと繋がり、さらには部材や材料を宇宙で用意して再利用する循環型製造技術へと発展して広がっていく。
宇宙機	衛星等の発展を支える宇宙機技術は、小型・分散と大型高性能の2方向で成熟化し、宇宙と地上の双方のインフラとしての重要度を増している。
宇宙ロケット・情報	宇宙輸送技術と宇宙機技術の双方の発展は、情報通信技術の発展と融合して無人探査活動を活性化し、特にロボティクスやAI、VR等の活用により、探査の質とリアルタイム性が向上し、研究者・実務者以外の人も直接的かつリアルタイムで探査に参加可能になっている。
宇宙科学・探査	月・火星圏の極限領域を「より自在」に、土星圏や外惑星衛星などに向けて「より遠く」へ、無人機による宇宙探査活動は拡充していく。
関連分野	これらシステムやアーキテクチャを補完する形で、宇宙における医療の充実やエンターテインメントの重要性も指摘されており、人間社会が宇宙空間へと広がる過程において、宇宙におけるサービスや文化的活動が盛んになっていく。

3) 宇宙科学技術ロードマップの詳細

3-1) 宇宙輸送系ロードマップ

輸送効率の向上による地球近傍の大衆化と太陽系内活動領域の拡大が生じ、これらを再使用化と安全性向上による高頻度大量輸送及び高性能化による深宇宙領域への高速アクセスが支える。宇宙輸送系は宇宙開発利用の根幹をなすインフラである。本ロードマップでは輸送系再使用化の道筋に絞った。

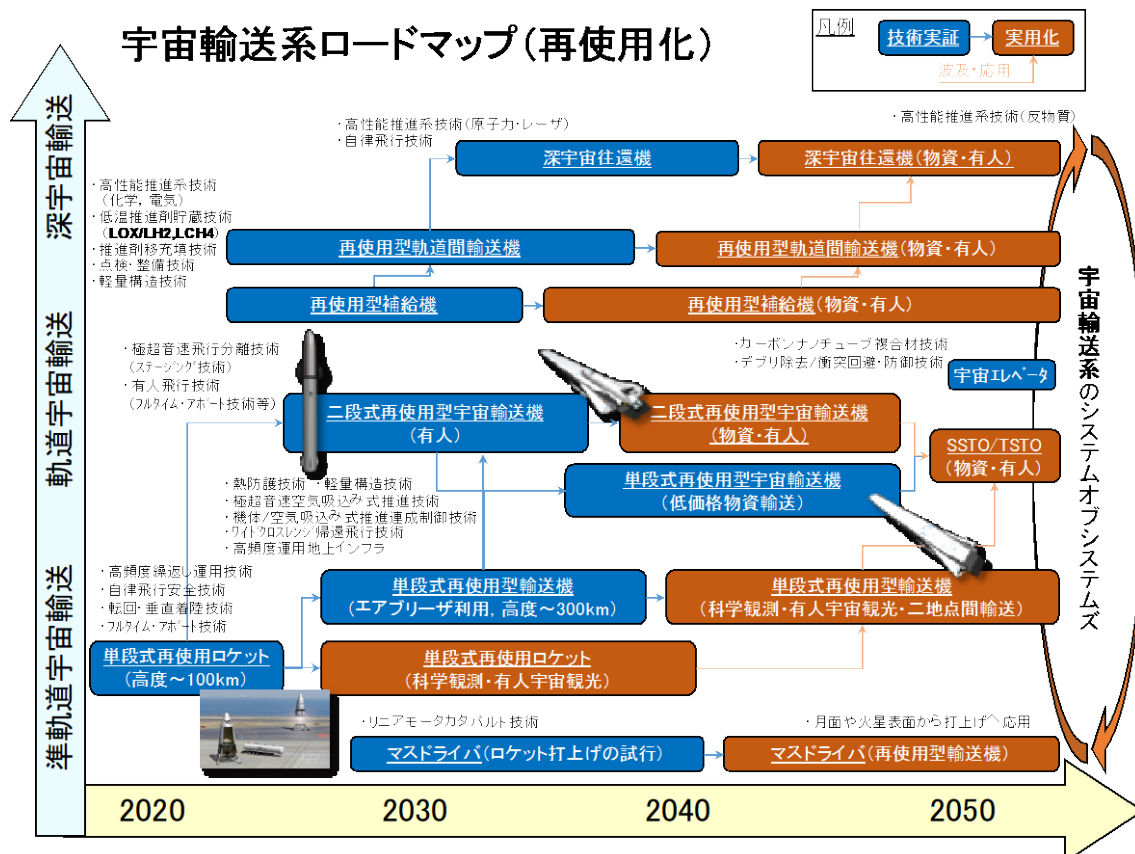


図3a.3.宇宙輸送系ロードマップ

- 2020年代に新しい技術(推進系, 構造系, 熱防護系)の研究が加速して再使用型宇宙輸送機実現の見通しがつく。
- 2020~2030年代は使い捨て輸送系と再使用型輸送系を適切に組み合わせて運用する時代である。
- 2040年代末までに、地上から深宇宙(火星)をつなぐ輸送系ネットワークが構築される(高性能推進系技術が鍵)。
- 2050年頃の高頻度大量輸送の実現の鍵は、再使用型宇宙輸送システム(SSTO/TSTO)の構築である。
- 地上のマズドライバ(ここではリニアモーターカーの技術を応用した飛翔体の加速射出装置

＝電磁カタパルトをイメージ)は、航空機による空中発射方式と競合するが、月や火星表面からの打上げに重要な技術となる。

3-2) 宇宙建築(宇宙アーキテクチャ)ロードマップ

宇宙での製造・構築技術の確立と、部材・材料の再利用による、循環型宇宙構造システムが実現する。

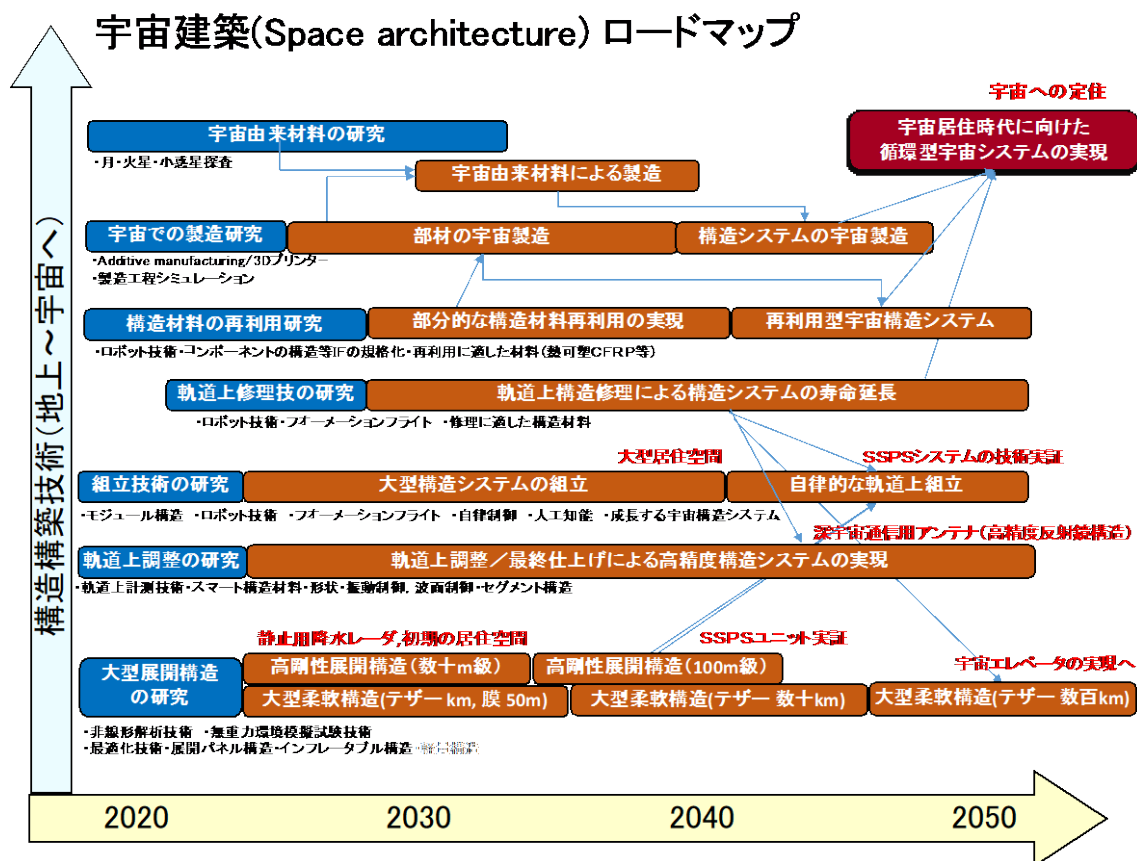


図3a.4. 宇宙建築(宇宙アーキテクチャ)ロードマップ

- 地上での製造から宇宙での製造へ 現在は地上で構造物を製造、宇宙に打ち上げ後、利用しているが、将来的には宇宙で行われる構造物に対する作業の割合が増加する(軌道上調整⇒軌道上組立⇒軌道上製造)。さらに宇宙由来材料(月のレゴリスなど)を用いた建築の実現が期待される。
- 循環型の宇宙構造システム 宇宙ゴミの低減のため、ミッションを終了した宇宙機のコンポーネント(大型アンテナ構造など)や材料を再利用する技術が求められる。
- 展開構造と組立構造の融合 SSPSなどの、より大型の構造システムを建築するために、大型展開構造物ユニットを軌道上で組立てる技術が必要となる。

上サービス技術の助けも必要とする。

- 自律化・自動化の推進 宇宙構造物の構築から小型宇宙機や宇宙デブリの除去といった様々な宇宙インフラを支える技術である。ロボットなどメカ技術や確実・正確な動作を確保するための自律的・知能的に制御する技術を高度化し、宇宙機上で活用させられるかが鍵となる。
- 宇宙デブリ抑制の取り組み 宇宙空間を安全に持続的に活用するためには、宇宙活動拡大に伴い深刻化する宇宙デブリ問題への対策が不可欠となる。発生・増加の抑制や衝突回避のみならず、積極的に除去することや、自らデブリ化しない方策の適用が重要である。今後、衛星コンステレーションの台頭で重要度はさらに増す。
- 衛星コンステレーション 小型宇宙機を多数配置して高いパフォーマンス(観測、通信等)を狙うアプローチは、ベンチャー企業にも新規参入しやすく、将来は多くの大規模コンステレーションの展開が予想される。その成否には、要素技術の発展だけでなく周波数問題解決(光通信化)や宇宙デブリ問題への対処もポイントになる。

3-4) ロボット・情報ロードマップ

VR技術の活用により、宇宙ロボットが探査で得た知見がHMDや小型端末等で広く共有できるようになり、VR宇宙体験の大衆化や商業利用が進む。

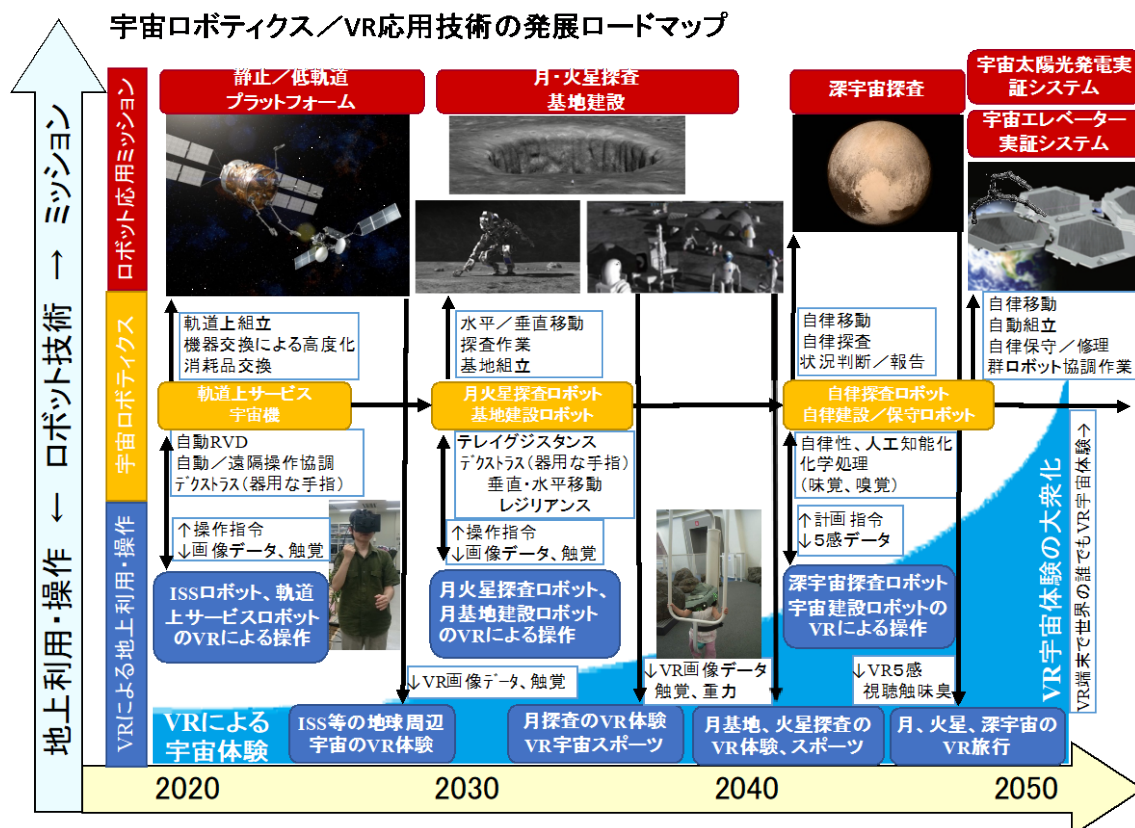


図3a.6.宇宙ロボット・情報ロードマップ

- 宇宙ロボティクスを応用したミッションは、地球周回低軌道/静止軌道プラットフォームの建設から軌道上サービス、月/火星探査や月面基地建設、さらには深宇宙探査へと活動領域を拡げている。
- 宇宙ロボット技術の発展により、得られる情報が視覚中心から触覚、さらには化学処理が可能な(味覚や臭覚を含む)五感ロボットへと発展する。また、活動領域の拡大に伴い、ロボットの自律化や人工知能化が進む。
- 宇宙ロボットから得られた五感情報は、VR技術により地上の操作者に伝えられ、没入感のあるテレグジスタンスロボットを自動/遠隔操作で融合制御して、器用な作業ロボットが実現する。軌道上サービスや基地建設、探査などのミッションで人間の代替/支援で活躍している。
- 探査や基地建設で得られた五感情報は、VR技術によりVR宇宙体験ゲームなど大衆による地上の利用が進む。探査の高度化とIT技術の高度化により、地球上の過半がスマホのような小型端末でVR宇宙旅行を体験可能になり、一大産業になっている。

3-5) 宇宙科学・探査ロードマップ

月・火星圏の極限領域を「より自在」に、土星圏や外惑星衛星などに向けて「より遠く」へ、無人機による宇宙探査活動は拡充していく。

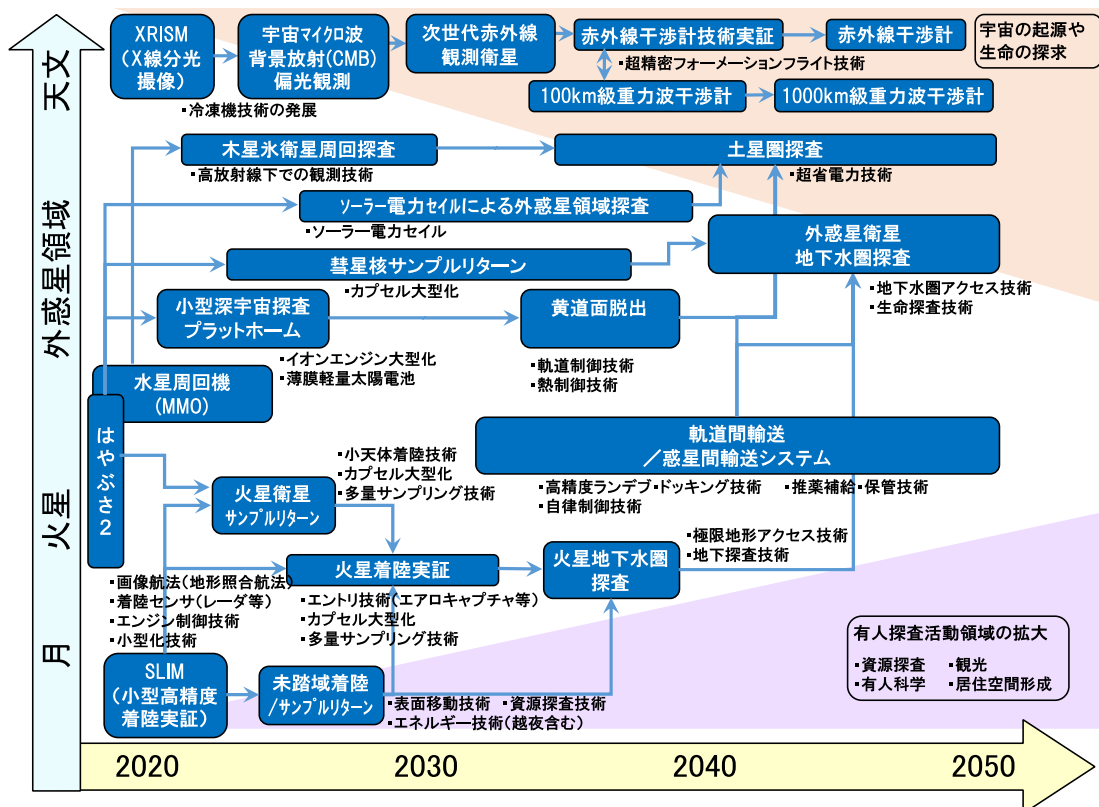


図3a.7. 宇宙科学・探査ロードマップ

- 2050年には有人探査の活動領域が火星圏にまで拡がり、月・火星の無人探査は有人探査のプリカーサ的な役割に加え、有人がアクセスしにくい極限領域（急斜面や地下など）で活躍している。
- また、より遠方を開拓する無人探査は、ソーラー電力セイルや軌道間/惑星間輸送システムなどのインフラ技術を獲得し、土星圏探査や外惑星衛星の地下水圏探査などに乗り出している。
- これらの探査は、超精密フォーメーションフライト技術による干渉計システムを獲得した天文分野と融合しつつ、宇宙の起源や生命の探求において大きな役割を果たしている。

4) JSASS宇宙科学技術ロードマップ2050 まとめ

宇宙ビジョンで描く2050年代には、宇宙輸送と宇宙機システムの発展が、宇宙建築や情報・ロボットアーキテクチャの発展と互いにリンクしながら成熟し、様々なサービスが提供されているだろう。本ロードマップでは、各関連分野の発展状況を、「宇宙利用」と「宇宙探査活動」の二つの進展状況を描いたマップに従って予測した。これら二つのマップは、宇宙ビジョンが実現する道筋、あるいは、宇宙ビジョンとシステム・アーキテクチャとの接続を示す。その上で、宇宙利用と宇宙探査のそれぞれの発展を支える宇宙輸送・宇宙建築・宇宙機・宇宙情報の各展望を、技術ロードマップとしてまとめた。ロードマップの中には、既存技術の延長線上にあるものもあるが、技術が不連続的に発展する際には、いわゆるイノベーションと波及効果による機能性能の不連続的向上が期待される。変革的で不連続的な技術の発展と利用の拡大が、2050年代の様々な宇宙活動を支えていくであろう。

なお、本技術ロードマップを検討した宇宙技術ビジョン小委員会のメンバーは、所属する組織の意向の影響を受けないような公共機関・大学等から選出し、種々の分野から宇宙長期ビジョンの到達を目標とする種々の分野のロードマップを中立的な視点で議論した。また、宇宙輸送、宇宙機、有人活動など、宇宙活動全域をカバーするメンバーに参加いただくと共に、有人活動の観点からは、宇宙飛行士にヒアリングしてその意見を取り入れた。

本ロードマップは目指すべきシステムまたはアーキテクチャ毎に作成しており、各技術分野における将来研究の課題識別の機会を提供できることを期待している。

参考) 宇宙科学技術ビジョン小委員会メンバーの構成:

平子 敬一(主査)	慶應義塾大学
船木 一幸(副主査)	宇宙航空研究開発機構
上森 規光	宇宙航空研究開発機構
河野 功	宇宙航空研究開発機構
木村 真一	東京理科大学
田中 宏明	防衛大学校
徳留 真一郎	宇宙航空研究開発機構
中島 佑太	宇宙航空研究開発機構
中村 揚介	宇宙航空研究開発機構
福田 盛介	宇宙航空研究開発機構
森馬 純一	宇宙航空研究開発機構

5) 人間が定住する月拠点建設へのロードマップ【2019 年度・2021 年度増補】

第2章に示した宇宙ビジョン2050では、宇宙探査活動が有人・無人に関わらず地球低軌道を超え、飛躍的にその範囲を拡大する発展ビジョンを描いた。中でも月面に関しては、有人での本格的探査に留まらず、拠点形成などのインフラ整備を踏まえた産業活動の開始も視野に入れるなどその項目は多岐にわたる。そこで2019年度に、月面での長期滞在・資源利用・産業活動を支える上で必須の人類の定住地、「有人拠点の建設」について、より具体的な技術ロードマップを策定することを目的とした有識者の参加を得て検討した。研究会に参加したメンバーは本項の最後に示す。人類が月＝「地球と大きく異なる環境」で永続的に生存し発展を続けていくためには、その生命活動を維持する様々な「人が月で生きるための技術」が必要となる。その中で本文では、宇宙科学技術ロードマップ（2018年度版）では言及されていない、有人拠点建設・発展に必要な技術課題にフォーカスし、「ロボット」「建設」「エネルギー」「放射線防護」「健康管理」「物質循環（水・空気・廃棄物処理）」「食料生産」の各項目について、その展望をまとめた。

ここで言う「有人拠点」は、未来の宇宙を舞台とした SF 作品等で登場するような半透明の大きなドームで覆われた都市や施設等、一般的に想像されるいわゆる「月の表面にある拠点」ではない。本項では、マリウスヒル等に点在する「月の縦穴」とそれに繋がる地下空洞に数人～数十人規模の居住空間を建設することを想定している。月には地球のような大気がないため、日照と日陰での温度差が非常に大きく、また多量の宇宙放射線が降り注いでいることは周知の事実である。研究会ではまず、このような過酷な状況を月面で基地を建設したうえで回避する方法を検討した。その結果、宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV) サイズの居住モジュール 1 基を月面に設置し、その 4 分の 3 の表面を厚み 60cm のレゴリスで覆う（残り 4 分の 1 は埋没させることを前提）ことで軽度の宇宙放射線遮蔽を実現すると仮定しても数 100 トンのレゴリスが必要となることが明らかとなった。重度の放射線遮蔽を前提に、厚さ数 m の遮蔽レゴリスドームを建造することは、拠点建設としては非常に困難と言える。これに対して、地下空洞は放射線防御のためにシールドが必要なくインフレータブル構造をそのまま使用できるなど構造材の重量・体積を桁違いに軽減できる。また静の海の縦孔の場合温度環境は-20℃程度で安定している事が予想されており、地球上の寒冷地と同程度の温度環境を獲得できる可能性がある。月周回通信衛星が無くても地球とのダイレクトリンクが取れる。地球周辺の GNSS（測位衛星システム）を利用する事で基地周辺の測位システムを比較的容易に構築できる。また、月表面のレゴリスを縦孔底に落とすことにより発電する重力エネルギー発電は縦孔の特徴を生かした利用法である。以上のような検討から、月の地下空洞を活用しながら有人拠点を確立していくことは、今後恒久的に人類が生存可能な拠点を月に建設するための第一歩として妥当と考え、これを前提とした技術課題の展望を検討した。

これに続き、2021年度は主に「ロボット」「建設」について深掘りを進めるとともに、「月資源のその場利用 (ISRU : In Situ Resource Utilization)」を新たに検討項目に追加した。これらは拠点建設の初期から人間の月での生存を支える上で重要であるだけでなく、輸送やエネルギー問題とも深くかわることから、長期的視野で且つ系統だった課題解決と技術の向上が必要といえる。

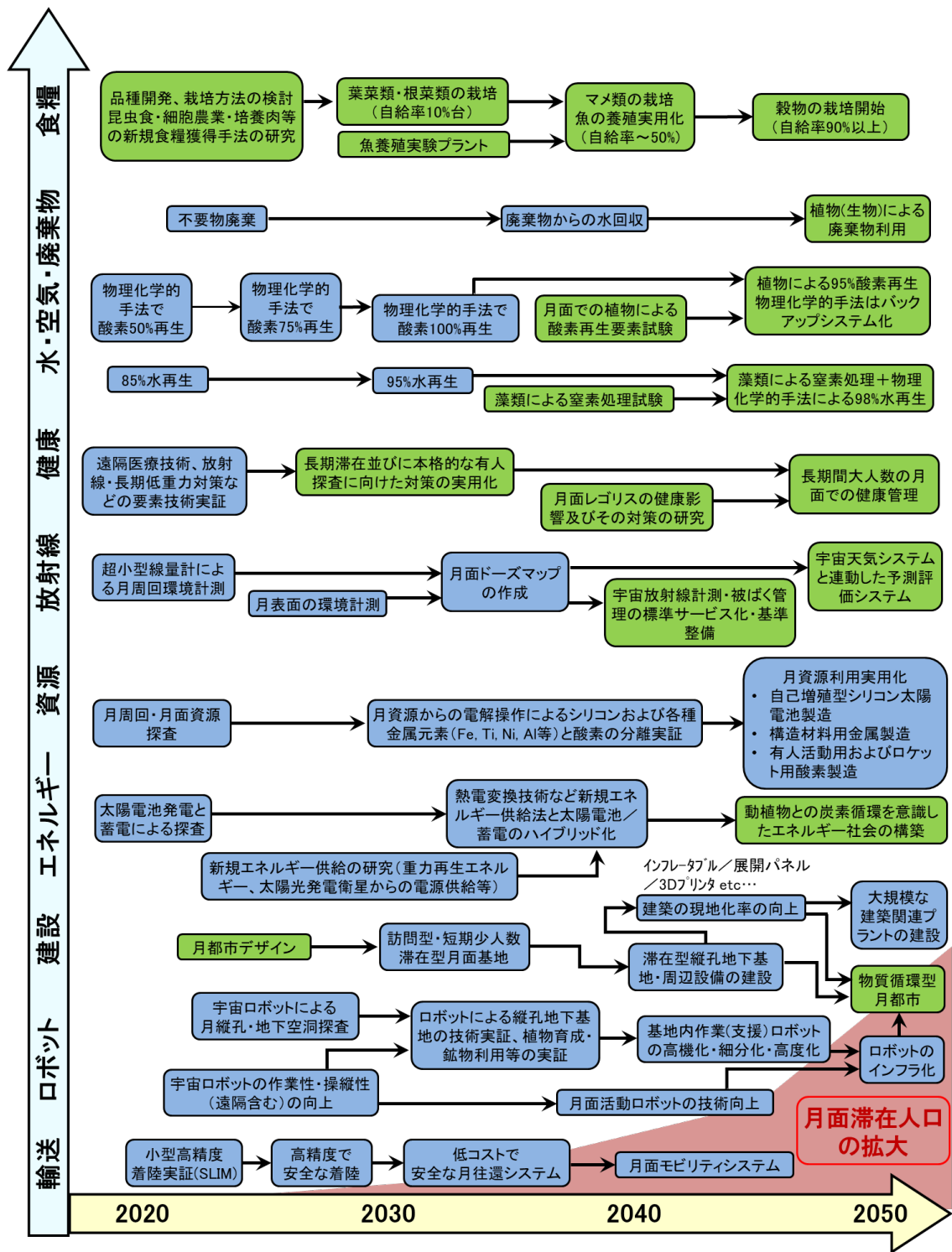


図3a.8 人間が定住する月拠点建設へのロードマップ

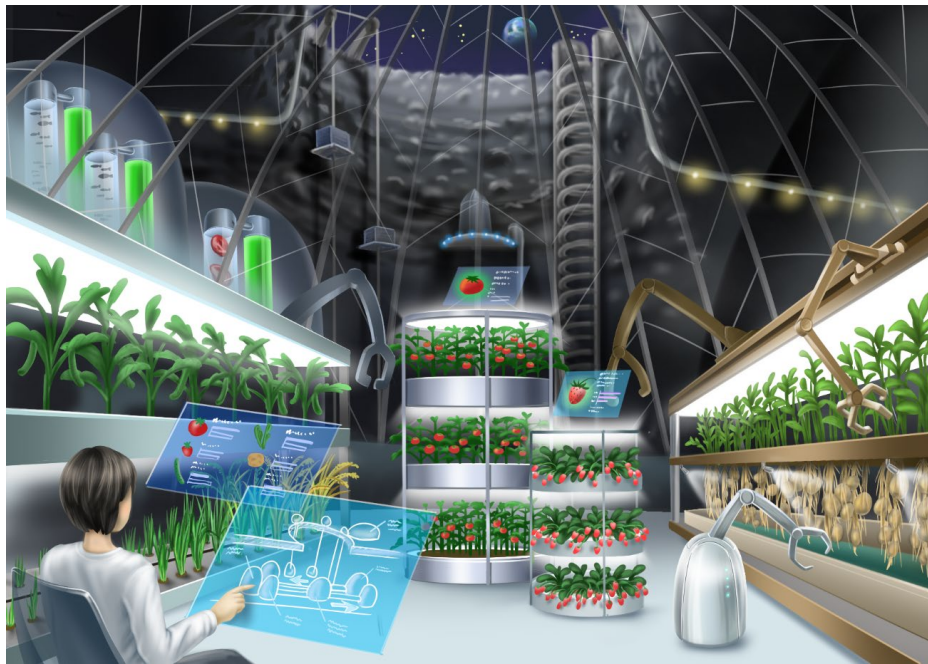


図3a.9 人間が定住する月面拠点想像図

【ロボット】

宇宙輸送技術と宇宙機技術の双方の発展は、情報通信技術の発展と融合して無人探査活動を活性化すると期待される。特にロボティクスや AI, VR 等の活用により、探査の質とリアルタイム性が向上し、研究者・実務者以外の人も直接的かつリアルタイムで探査に参加可能になると考えられる。一方で、拠点建設に関わるロボットに対する要求は、主に基地建設の進捗・規模によって大きく機能が異なっていくと想定される。そこで本項では、①月縦孔・地下空洞の探査、②月面地下基地の実験運用、③月面地下基地の建設・運用・維持の 3 ステップで必要とされるであろうロボット機能の検討から、そこに至る技術ロードマップを検討した。

① 月縦孔・地下空洞の探査

2020 年代の初期探査は『月面表面上に宇宙システム機材を維持することなく進める』ことを前提とし、縦孔底にダイレクトに着陸・探査可能な無人ロボットが必要と想定される。着陸機は、例えば Perseverance の火星着陸のように縦孔底面に数 m から落下着陸し、そのまま地下空洞の一定範囲を探査可能であることが望ましい。そのためには、地球との通信、電力、各種センサ機能による地図作成・自己位置同定技術機能、自律性等の確立が急がれる。我が国は国際宇宙ステーション「きぼう」のロボットアームなど作業ロボットを開発してきたが、従前の「すぐに修理が可能な状態で、予め規定された単純作業のみを作業者からのコマンドや操作に応じて実施するロボット」では有効性に乏しい。そのため、より先進的な「故障時にも稼働性を維持し、操作ミスや状況変化・通信途絶でも操作安全性を確保し、環境との接触を基盤とする自律性の高いロボット」が必要である。

② 月面地下基地建設に向けた実証

2030-40 年代は、本格的な基地建設に先駆けて、地下月面基地と月資源利用の可能性を探るための、ロボットベースのさまざまな技術実証を行う。特に、初期の月探査を担った機能の拡張・高度化のみならず、月で生存する人間の生活面での支援へと、ロボットへの要求は多岐にわたると考えられることから、各種支援活動に特化した作業ロボットの高度化が望まれる。

③ 月面地下基地の設置・運用・維持

2040 年代以降は、上記の実験フェーズを経て、恒久的な月着陸場・輸送システム・月面地下基地を展開する。持続的な有人拠点維持のため、ロボット技術の多様化・細分化・複雑化が進み、より広範な範囲での支援の実現が不可欠となっていると考えられる。

ここで、ロボットへの具体的な機能例を下記に示す。地球周辺の GNSS(測位衛星システム)受信機を持ち、基地に置いた GNSS 受信機を基準局として、月面上での差分 GNSS 技術が開発され、これを使って基地周辺で移動探査を行う。一部機能ではすでに地球上での実用化が進むものもあり、今後月拠点での適用にむけた開発が望まれる。

- ・縦孔地下基地建設・維持管理
- ・与圧空間での食物育成・管理
- ・有人空間の環境制御・生命維持
- ・月面有人活動支援
- ・縦孔エレベータ等月面輸送・移動・探査システムの構築・維持管理
- ・月資源その場利用

【建設（有人拠点としての観点から）】

月の有人拠点は、人が生活や活動をするための様々な機能を集約したものであり、その用途により、望ましい形態は異なるが、最終的には 2 通りの役割が考えられる。月表面等での短期間の探査活動を支える「少人数・訪問型」の基地と、月地下空洞内の安全で長期滞在が可能な「滞在型」の居住空間環境である。これらは相互補完的な関係にあり、人の生活に変化とバランスをもたらすことができると期待される。ここでは、月の縦孔と地下空洞の利用を前提とし、月面活動を支えるインフラや、長期滞在における人の心理面へも配慮した月拠点建設に向けた技術的方向性を検討している。

- ・2020 年代には、現在の ISS における微小重力環境で蓄積された建築技術を、低重力環境にも対応できるよう技術開発を進める。特に、低反力の掘削技術等の地盤工事、シャフト構築や構造物の安全な設置、舗装等、建設の基礎となる技術の確立が必要となる。一方で、建築計画や工法の検討は、最終的な建造物に応じてなされる。したがって、将来的な技術向上による修正を加味した上で、2050 年代に建設する拠点コンセプト・デザインを進める。
- ・2030 年代からは、月の無人・有人探査の進行に合わせて短期滞在に適した探査用の少人数・訪問型基地建設が開始される。並行して、最終的な拠点建設計画に即した現地での技術開発や実証が進められる。ここでは、ISS では考慮することの無かった月面のレゴリスに関わる建築的な対応策、より頻繁となる外部空間との出入りに関わる導線計画などの技術開発が必要になると考えられる。

- ・2040 年代からは、地下空洞を利用した滞在型の拠点系建設が開始される。地球から輸送された建築物のモジュール設置に留まらず軽量の空間構築材料（インフレータブル構造、展開パネル構造等）、現地で建設工事作業の一端を担うことのできるインフレータブル、及び展開パネル型の建設技術を発展させる。最終的には 3D プリンティングによるレゴリス等の現地材料を建築部材として加工できる技術も含め、建築技術の現地化割合の向上を目指す。そして 2040 年代以降、本格的な建設活動が行われ、探査拠点や居住エリアに加え、建設工事関連施設、農業関連施設、エネルギー、及びライフラインに関わる施設の拡充を進め、安全、且つ快適で、美しい宇宙建築物の構築を目指してゆく。

【エネルギー】

- ・2020 年代は、ECLSS(Environmental Control Life Support System)技術との物質およびエネルギー収支を考慮した発電／蓄電デバイスの適正化・高度化を図る。並行して、エネルギー消費量が月での活動内容及び物質循環の度合いに直結することや、輸送手段や拠点整備の計画、さらには月特有の環境を考慮したエネルギー供給手法の最適化検討を進める必要がある。
- ・2030 年代以降は、将来の長期滞在を支えるエネルギー供給実現に向けた技術開発を進める。特に、太陽電池での発電が困難な長期越夜等、月での自立型滞在を可能にするための課題は多い。それらを踏まえたうえで月環境に適したエネルギー供給確立を実現するため、夜間の保温技術としてのレゴリスの有効利用や、熱電変換技術の導入によるバッテリー／燃料電池／熱電変換の複合化、月表面から拠点を建設する地下空洞までの落差を利用した重力エネルギー発電、太陽光発電衛星からの電源供給等、新たな技術の獲得を目指す。
- ・2040 年代以降、食料生産を含めた植物利用へとシフトし炭素の循環を進めた完全循環型 ECLSS が達成されていく中で、エネルギー利用による水素／酸素製造、植物を含む生体活動による炭酸ガス生成、炭酸ガス固定化によるエネルギー再生産を循環系としてとらえたエネルギー社会を実現する。
 - 月ではレゴリスが酸素を固定している。このレゴリスを適度に加熱することで、還元体と酸素を同時に生成できる。太陽光が利用可能な日中に酸素を分離回収しておき、これを貯蔵することで、酸素は呼吸に利用できるうえ、発電の酸化剤としても使用可能である。
 - 酸素製造時に発生している還元体は、月の真空環境では長期にわたり還元状態を維持し続けることができる。これを夜間には適宜酸化することで、酸化反応に伴う発熱を用いた夜間保温が可能になる。
 - 夜間の月面の低温と、酸化反応時の発熱との間の温度差は、熱電変換により電力に変換することも可能である。
 - 水を電気分解することで酸素／水素を生成させ、これを燃料電池や呼吸に用いる試みは ISS 等の宇宙空間では想定されてきた。月面という特殊環境は、従来の発想に縛られない熱生成が可能な環境であり、これを利活用する社会構成が進むものと期待する。

【放射線防護】

- ・2020 年～2030 年代は, ISS 宇宙実証（新型計測機器の軌道上実証, 生体・生物影響評価, 惑星探査に向けた被ばく管理手法の確立検討）および月・火星近傍の周回ミッションへの新型計測機器の軌道上実証を実施し, 宇宙放射線計測および防護関連技術を用いた産業界への応用・利用を促進させる. 並行して, 日本人宇宙飛行士および日本の産業利用で使用する放射線計測機器および被ばく管理の手法を確立する.
- ・2030 年代以降, 非与圧ローバーによる月面（縦穴および地形・場所によるドーズマップ作成）のための実環境計測の実施. ISS および衛星による軌道上実証の結果から, 月面ローバー内の放射線計測システムの提案および被ばく管理手法を提案する. さらに, 1/6G の影響, 放射線や低線量長期被ばく影響の検討・対策から, 経口や摂取による放射線影響の低減ができる放射線防護剤の軌道上実証を計画・実施する.
- ・2040 年代以降, これまでの地磁気圏外の実測環境およびシミュレーション技術を基にした宇宙滞在者への宇宙放射線計測・被ばく管理の標準サービス化・基準整備を開始. 並行して, 宇宙天気システムと連動した評価予測システムを実装する.

【健康管理】

- ・2020 年代は, 現在の ISS での実験などを活用しながら, 遠隔医療技術, 放射線の健康影響対策, 長期低重力対策などについての研究を展開し, 得られた知見を月周回プラットフォーム及び月面探査に活用する. また, デジタルメディシンなど地球映像などの精神的効果への研究を進める.
- ・2030 年代以降の長期滞在並びに本格的な有人探査に向けて, 遠隔医療技術, 放射線の健康影響対策, 長期低重力対策を実用化するとともに, 月面のレゴリスの健康影響及び対策技術など月面開拓医学についての研究を進める.
- ・2040 年代以降, 月面拠点建設によってより大きな空間を確保・維持していく段階で, 長期間大人数の月面での健康管理を実現するとともに, 長期滞在に関する精神面を含めた健康対策を実用化する.

【物質循環（水・空気・廃棄物処理）】

有人基地の建設には, 循環型 ECLSS の開発が重要となってくる.

- ・2020 年代は, 現在の ISS 宇宙実証を踏まえた物理化学的手法による ECLSS 技術の月周回プラットフォームへの適用を進める.
- ・上記と並行して, 空気・水の再生率を向上させる新技術の実用性向上を図り, 2030 年代以降の長期滞在向けに, 順次手法・システムを更新することで, 再生率を向上させる. 最終的には物理化学的に酸素再生率 100%, 水再生率 95%を目指す.
- ・2040 年代以降, 月面拠点建設によってより大きな空間を確保・維持していく段階で, 食料生産を含めた植物利用へとシフトし炭素の循環を進めた完全循環型システムの確立を達成する. ただ

し月面での実用化にあたっては、それまでの周回軌道すなわち微小重力に対して 1/6G の環境になることから、システムにも重力に対応した補器・レイアウト・機能が必須となる。

- 空気再生では物理化学的手法をバックアップシステムとして機能させることで、生物システム固有のエラーにも対応可能な、ロバスト性の高いシステムを構築する。
- 水再生は、植物（藻類）による含有窒素分の分解ののち、物理化学的な処理を行う2段階構成とすることで、それぞれの機能のメリットを生かしたシステムとすることを想定している。
- 廃棄物処理は、圧縮しての廃棄ないし水分回収の後廃棄が主な手段であるが、月面拠点を建設し、そこでの植物の生産が本格的に稼働した場合は、堆肥としての活用が可能となる。これにより、より完全な物質循環を達成する。

【月資源のその場利用技術（ISRU）】

月での拠点における資源消費は、現在の地球からの輸送のみで賄う方法だけで支えるのは困難であると予想される。資源調達の地球への依存度を下げるには、インフラ整備に係る資源についてもその場利用技術（ISRU）の確立が重要となってくる。なお、ここでは月資源利用に係る法規制は考慮せず、ISRUが人類の月での定住生活を支えるようになるまでの技術的方向性のみ検討している。

- ・2020 年代には、月資源（金属（Fe, Al, Ti, Ni, U, Th 等）と水素、酸素等）の埋蔵状況の把握が可能となる月面及び月周回からの探査網の構築を行う。例えば、リモートセンシング、有人月面探査を通じた定常的なサンプルリターン等を行い、有用資源開発に効果的な月面資源が埋蔵された地域の把握を行う。
- ・2030 年代からは、先の検討で決定した調査地の詳細な資源量の実地調査により、月面での定量的な資源量の確定を行い、各々の資源の種類に応じた月面での分離回収試験を行う。これにより、月鉱物に含まれる金属と酸素への分離を実証し、熔融塩からの金属回収などその後の実用プロセスの目途を得る。さらに、資源回収システムのプラント化等インフラ整備を開始する。一方で、得られた金属はすべからく活用すべき資源である。したがって、その活用方法は資源回収手法と並行して、例えば、「月レゴリス由来の Si を用いた太陽電池製造」のように、その後の拠点建設・維持を支える一貫したプロセスとして確立する必要がある。
- ・2050 年ごろまでには、月レゴリス由来のシリコン太陽電池で一定程度自給的に電力を供給する月面太陽電池—エネルギーネットワークを構築する。また、太陽電池合成の際に得られる副生産物である Fe, Al, Ti, Ni 等は、構造材料として、月面基地の建築資材等に利用する。さらに、レゴリスの電解で大量に得られた酸素は、生命維持用、燃料電池用さらには、ロケット用推進剤として活用する。最終的には、月での有人活動で要するインフラを月のその場資源により一定程度構築することを目指す。

◎ 金属製錬

月面で入手可能な金属酸化物のうち、特に酸素との結合力が比較的弱い酸化鉄 (Fe_2O_3) に関しては、既に地上で実用化されているプロセスを宇宙技術として発展させることで資源として回収することが期待できる。地球より持ち込む水素（持ち込んだ水の電気分解で得られる水素でも良い）で水素精練を行えば副産物として水を生成することも可能である。一方、鉄以外の酸化物 (SiO_2 , Al_2O_3 など) は、地上では重力により選別されるが、月面では遠心分離や磁力選別などの技術を適用する必要がある。チタンに関しては、月面の高真空、すなわち極低酸素分圧雰囲気を利用した分離技術を検討したが、多量のエネルギー消費、高温に堪えられるプラント整備など、他の技術と深くかかわる課題が生じると予想される。

いずれの金属についても、構造材料として所望の特性を発揮するためには、合金元素の添加や圧延・鍛造などの加工プロセスの確立も必須となるであろう。

【食料生産】

- ・2020年代はISS、月周回軌道、月面探査いずれにおいても食料自給を必要とするような長期ミッションとはならず、また食料生産に必要なスペース確保も難しいことから、食料生産は実施されず地球からの補給に頼ることになる。その間、宇宙環境でも生育可能な品種開発や閉鎖環境下での効率的な栽培方法、昆虫食、培養肉、代替肉といった新しい食料供給手段などの研究・実証を実施する。
- ・2030年代以降、拠点が建設されることで長期滞在並びに食料生産可能なスペースやシステムが実現、食料生産が開始される。
- ・生産する食料の品種及び生産量は、滞在人数の増加とともに段階的に拡大される。並行して、自律農作業ロボットによる栽培等、効率的な生産体制を確立していく。
- ・2040年代以降、穀物の栽培を開始し、最終的な食料自給率は90%以上を達成する。

《食料生産を含む生命維持システムとエネルギー供給システムの検討》

また、宇宙探査活動の発展マップに基づき、月面での探査人数を2020年代2～3人、2030年代10人、2040年代50人、2050年代100人と設定する。

本検討では、表3a.1に示すように5つの月面食料自給率について物質の再生率と必要電力を比較した。食料生産と生命維持システムの関係については、月面農場WGのデータとモデルを用いた。食料生産に必要な電力は一人当たり25kWと仮定した。生活に必要な電力と合わせ、全体で一人当たり30kWと設定する。水の使用量を1日一人当たり10Lと設定すると月面食料自給率14% (No. 2) で水再生率100%を超える。一方、食料生産による酸素の再生率は必要量の20%にとどまり、物理化学的な再生が必要である。必要な酸素をすべて食料生産により再生するためには、廃棄物処理による酸素の消費がない場合で、月面食料自給率60%程度 (No. 3とNo. 4の間) が必要である。

表 3a.1 月面食料自給率と生命維持システム(一人当たり)

No.	月面食料 自給率	摂取エネル ギー kcal	水再生率 (10kg 比)	酸素再生率 (0.835kg 比)	必要電力 kW	作物群
1	4%	106	0.4	0.1	1	作物群1:キュウリ, トマト, レタス, イチゴ
2	14%	370	1.4	0.2	3	作物群1 + 作物群2: ジャガイモ, サツマイモ
3	38%	1,017	3.9	0.7	10	作物群1 ~ 2 + 作物群 3:ダイズ
4	92%	2,439	10.6	1.6	23	作物群1 ~ 3 + 作物群 4:イネ
5	100%	2,650	—	—	25	作物群1 ~ 4 + 動物性 たんぱく

表 3a.2 No.4 (月面食料自給率 92%) 100 人のための 3 MW 自立型
水素エネルギー供給システム

	仕様		質量
発電システム	発電量	3[MW]	174[t]
	発電効率	0.5	
	容積	435[m ³]	
	本体面積	174[m ²]	
	設置面積	435[m ²]	
水素生産設備	水素製造原単位	8[MWh]	603[t]
	水素製造量	2,010[Nm ³ /h]	
	消費電力	8[MW/h]	
ソーラー パネル	発電量(越夜用)	8[MW]	54[t]
	発電量(昼用)	3[MW]	
	面積(昼用+越夜用)	63,296[m ²]	
システム合計質量			831[t]
消費水素	消費純水素体積	2,010[Nm ³ /h]	61[t]
	14 日間越夜用水素体積	675,360[Nm ³]	
消費水素質量			61[t]

東芝 H2Rex 次世代 100 kW, 水素生産設備 H2 One (200 kW 級 SOEC),
ソーラーパネル H2 One の仕様を参考に計算

次に、食料生産システムを含む生命維持システムのための自立型電力供給システムの仕様を東芝の自立型水素エネルギー供給システムの仕様を基準に求めた。全体システムは、発電システム、水素生産設備、ソーラーパネル（将来の軽量化を含む）の 3 つのサブシステムからなる。表 3a.2 は、No. 4（月面食料自給率 92%）で 100 人の食料を生産するための 3 MW 型水素エネルギー供給システムである。昼用の発電は 3 MW であるが、2 週間の越夜用の水素製造に 8 MW の発電が必要となり、ソーラーパネルは 11 MW 相当の設備が必要である。このときソーラーパネルの面積は約 6.3 万平方メートルになる（月面に大気がないことを考えると 30%程度減らせる可能性はある）。2 週間の越夜を考慮したシステム全体の質量は 831 トン、水素 61 トンである。水素は地球から供給し再利用し、酸素は月面資源から製造する。

次に、自立型水素エネルギー供給システム（太陽光と水素燃料電池の組合せ）と、他の 3 つの方式、太陽光と重力蓄電、原子力発電、レーザー方式宇宙太陽光発電システム(Space Solar Power Systems, SSPS)のシステム質量を比較する。ベースラインは、文献 1-4 より決定した。太陽光を利用するものは、線形スケーリング、原子力発電はルートスケーリングを用い 3,000 kW 級の質量に変換した。

重力蓄電に利用する設備の総量は 79,024 トンで、そのうち 10%を地球から輸送する（残りの 90%は月面レゴリスを利用）と仮定する。原子力発電、レーザー方式 SSPS の設備はすべて地球から輸送すると仮定する。

今回参照した SSPS の仕様は、静止軌道に設置した場合の仕様であるため、SSPS を地球と月のラグランジュポイント 1（EML1）に設置することを想定し、各種効率等を表 3a.4 のように仮定した。ここで、EML1 と月面施設との距離は 58,000 km と想定した⁶⁾。月面上の設備は、EML1 と月面の距離を考えると、受光電力は小さいが、地球上と同規模もしくはそれ以上の受光設備が必要と考える。レーザー方式 SSPS の受光効率 65%は今後の技術向上を考慮した値である。将来のこの効率の向上結果によっては月面の受光設備の大きさがさらに大きくなる可能性がある。今回の仮定では、レーザー方式 SSPS の月面受光設備は 27 トンとなる。また、軌道上の設備は、線形スケーリングで 23 トンとなった。ただし、SSPS の軌道維持の推薬等は考慮していない。また、レーザーは他の発電方式の送電技術と捉えることもできる。

また、小型原子炉 FPS（発電量 40 kW、質量 7 トン）を利用した場合、越夜用の蓄電が不要になり、3 MW のみの供給で済み、3 MW 級小型原子炉の質量は 61 トンとなる。

ここまでの検討から、発電設備は、原子力発電、もしくはレーザー方式 SSPS が質量面で有利である。

発電設備の質量のみで比較すると、原子力と水素燃料電池の差は 14.6（ $\div 891/61$ ）倍、レーザー方式 SSPS と水素燃料電池の差は、17.8（ $\div 891/50$ ）であり、原子力発電、もしくはレーザー方式 SSPS なしでの食料生産は難しいといえる。このとき、月面では酸化鉄等から酸素 O_2 の調達のみを行い、窒素 N_2 、炭素 C、水素 H_2 を地球から輸送する。原子力発電や SSPS を利用した場合、水素の輸送を 40 トン程度減らすことができる。

表 3a.3 エネルギー供給システムの検討

	太陽光 + 水素燃料電池 ¹⁾	太陽光 + 重力蓄電 ²⁾	原子力発電 FPS ³⁾	レーザー方式 SSPS ^{4,5)}
ベースライン	3,000 kW 891 mT	8.2 kW 216 mT	40 kW 7 mT	6,500 kW 50 mT
3000kW 換算 質量, mT	891	7,902	61	23 (軌道上) 27 (月面設備)
地球から輸送 する構造質量	100%	10%	100%	100%
地球から輸送 する資源	N ₂ , C, H ₂			
月面で調達する 資源	月面 O ₂	月面 O ₂ , レゴリス	月面 O ₂	月面 O ₂

表 3a.4 EML1 設置の SSPS の軌道システムと月面システムの検討

レーザー方式 SSPS ^{4,5)}	月軌道 (EML1)
季節変動	1
蝕による影響 (伝播効率)	0.968
集光効率 (1 次ミラー)	0.95
集光効率 (2 次ミラー)	0.95
レーザー発振効率	0.19
ビーム制御部の反射率	0.95
大気透過率	1
晴天率	1
受光効率	0.65
月面電力網配電効率	1
トータルエネルギー効率	0.102
供給出力, MW	3.09
月面受光設備 (φ 200 m), m ²	31,400
月面受光設備質量 (0.85 kg/m ²), kg	26,690

参考文献

1. Miyajima H., Life Support System Design for Habitation in Lunar Lava Tubes, International Conference on Environmental Systems, ICES-2020-85, 2020.
2. 武笠敏夫, 重力再生エネルギー研究所, 重力を利用した蓄電法の力学, 2021
3. Mason, L., and Poston, D., “Fission Surface Power System Initial Concept Definition,” National Aeronautics and Space Administration and Department of Energy, 2010.
4. 藤田辰人, 鈴木拓明, 吉田裕之, 瀬在俊浩, 木皿且人, 福室康行, 森雅裕, JAXA における宇宙エネルギー利用システム(SSPS)の研究の現状, 信学技法, SPS2008-01
5. 鈴木 拓明, レーザー方式宇宙太陽光発電の開発現状と展望, レーザー研究第 39 巻第 1 号, 2011.
6. Cheng Yi and Lu Jim McClanahan, NASA JSC Lunar Surface Concept Study Lunar Energy Storage, U.S. Chamber of Commerce Programmatic Workshop, 26 February 2009.

【人間が定住する月面拠点建設へのロードマップ（増補）まとめ】

JSASS 宇宙ビジョン 2050 のハイライトの 1 つは「宇宙に進出した人口が指数関数的に増大し、地球近傍から月、火星圏の宇宙空間において、人類が水・エネルギー・推薬等の資源を地産地消しながら生活している」と想定している。本増補では、これを実現する人類の拠点に必要な要素について検討するとともに、いくつかの技術についてそのロードマップを策定した。しかしながら、ここで示した展望はごく限られた期間・参加者による検討であり、輸送や拠点建設手法など、十分に議論できなかった技術分野が数多くあることもまた事実である。これはひとえに、宇宙に向けた人類の生存圏拡大が、現在の科学技術力をもってしても非常にチャレンジングであることを端的に表すとともに、その実現に向けた研究開発の「伸びしろ」の大きさ、従来の「航空宇宙工学」ではカバーしきれない、まさに総合科学としての在り方を示すものと言える。

そもそも、地球から遠く、環境も全く異なる月に有人拠点を建設する意義はどこにあるのか。研究会では「国際貢献」「地球規模課題の解決への寄与」「科学技術発展への寄与」の点で、その意義を主張する。

1. 国際貢献

我が国は ISS 計画に参画し、JEM「きぼう」や HTV「こうのとり」の開発・運用を通して重要な国際的役割を果たし、高い信頼を得て来た。ISS に続き、アメリカを中心として国際協力で建設される月面基地に我が国の科学技術力で貢献し、短期間、低コストで実現可能な方式を提案する。我が国の理学者が発見した月の縦孔・地下空洞に、我が国に蓄積のあるロボット技術を使ってインフレータブル構造の基地を建設する事により、放射線や隕石に対して安全な基地を低コスト（月の表面に穴を掘る方式の 1 桁下）で建設可能になる。我が国が低コストの基地建設構想を示す事で、米国中心の基地の実現可能性を高め、国際的な月面探査において中枢的な一翼を担ってゆくことが期待される。

2. 地球規模課題の解決への寄与

少子高齢化, エネルギー, 食料, 地球温暖化など, 我が国も直面している地球規模の大きな課題の解決に必要な技術を, 月地下空洞基地の建設, 維持, 運用という人類のフロンティアで磨くことによって, 積極的に新しい社会技術(閉鎖空間で完全循環型社会を目指す)を作り上げて, 地球の SDGs 社会の構築のための知見としてフィードバックする。これにより, 我が国の次期産業を育成することができる。

3. 科学技術の発展

理学的な知見を活かし, 工学的な技術開発で国際社会に貢献する事で, 我が国の科学技術を大きく発展させる事ができる。本構想は宇宙工学だけでなく, 幅広い学術分野の発展に 寄与できる。また, 「はやぶさ2」や「きぼう」, 「こうのとり」の開発で磨いてきた技術を発展させて, 先端技術の開発を国際的に取り組んで行く事で, 若者の理科離れを防ぎ, 青少年の健全な育成に貢献し, 次世代の人材育成, 科学技術力の強化にもつながる。

本検討を端緒に, 宇宙ビジョン実現に向けて, 今後も学際的な交流や新たな研究分野からの参入を含め, 幅広い研究開拓や技術開発の促進など, 日本航空宇宙学会が主導的な役割を積極的に果たすことを目指したい。

参考) 人類が定住する月面拠点建設へのロードマップ検討メンバーの構成(五十音順):

太田 光彦	日本製鉄株式会社【資源その場利用】
河野 功	日本航空宇宙学会 学会長【全体企画, ロボット】
木村 真一	東京理科大学【健康管理】
後藤 琢也	同志社大学【資源その場利用】
桜井 誠人	宇宙航空研究開発機構【主査, 全体企画】
島 明日香	宇宙航空研究開発機構【幹事, 物質循環, 編集】
庄司 研	大成建設【建設】
十亀 昭人	東海大学【建設】
曾根 理嗣	宇宙航空研究開発機構【エネルギー】
永松 愛子	宇宙航空研究開発機構【放射線防御】
春山 純一	宇宙航空研究開発機構【全体企画】
宮嶋 宏行	国際医療福祉大学【全体企画, 食料生産, システム検討】
向井 千秋	東京理科大学【健康管理】
若林 靖史	元 宇宙航空研究開発機構【ロボット】
【協力】	
上土井 大助	宇宙航空研究開発機構【エネルギー】
武笠 敏夫	重力再生エネルギー研究所【エネルギー】
山田 武	重力再生エネルギー研究所【エネルギー】

6) 有人宇宙輸送システムのロードマップ【2021 年度増補】

生命は海で生まれ、陸地へそして空へと、住み慣れた環境を離れて活動領域を拡大してきた。我々人類も、元来の活動領域であった陸上にとどまらず、船で海上を移動し、自在に空を飛んで移動するようになった。その歴史は、生命の活動領域拡大になぞらえることができる。しかし、遺伝子の変化によって体の構造を変えて適応してきた他の生命の領域拡大に対し、人類は、自ら新しい環境に乗り出そうとする意志と、それを可能にする技術力で拡大してきたところが、根本的に異なる点である。

はるかな昔、どこかの海辺で誰かが丸木舟を漕ぎ出したように、ライト兄弟が手作りの飛行機で空に挑んだように、有人宇宙輸送技術は 1961 年にはじめてユーリ・ガガーリンを宇宙へ送り出し、無事に帰還させることで産声を上げた。しかし、60 年にわたり多大な努力が払われてきたものの、ほぼ誰もが気軽にその恩恵を受けられるまでに成熟した海洋航海や航空技術と比較すれば、現在の有人宇宙輸送システムは人命の危険性が高く高コストであり、宇宙飛行士など限られた者しか輸送できないのが現状である。1 年間に宇宙に飛び立つ人数は、未だ 10 人／年のレベルで停滞している。

宇宙利用の発展マップ(図 3a.1)で示されているように、宇宙飛行の人数を 2050 年に 1000 人／年まで高め、また、月拠点ロードマップで示されているように 100 人規模の月定住人口を 2050 年に実現するには、有人宇宙輸送技術における(1)信頼性、(2)安全性、(3)コスト、(4)快適性の課題を改善し、現代の客船や航空機のレベルに近づいていくよう、進歩させる必要がある。

本ロードマップは、2018 年度版の宇宙利用の発展マップ、宇宙輸送系ロードマップ(図 3a.3)をベースとして有人宇宙輸送技術にフォーカスし、上記(1)～(4)を実現するための取り組みを具体化するべく専門家による検討をおこない、ビジョンとしてまとめたものである。

まず、上述に示されている 2050 年の宇宙利用像を想定したときの有人宇宙輸送における日本の役割、日本が有人宇宙輸送システムを保有する意義価値を整理した。次に、機械学習・人工知能(AI)、自動制御、情報通信技術等の進歩の視点や今後進むエンターテインメント活動などの観点、バーチャルリアリティ(VR)・テレイグジスタンス技術(TE)の進歩を想定し、有人宇宙輸送を再定義した。続いて、2050 年へ向けて、地上～低軌道(LEO)有人輸送システム、LEO 以遠の有人輸送システム(LEO 拠点、軌道間輸送、月着陸／離陸／月基地／月周回基地、地球帰還)、宇宙機の環境制御、生命維持技術について検討した。その後、輸送機のシステム(ハードウェア)にとどまらず、自動制御技術、VR・TE 技術、人間側視点、宇宙港・射場・着陸場、法制度・規制面のビジョンと課題についてまとめた。

なお、有人宇宙輸送技術はそれ単独で貢献できる意義価値にとどまらず、LEO 拠点、月周回拠点、月面拠点等の輸送中継点や目的地と緊密な連携をとりながら整備や開発を進めていくことが重要である。また、技術的にも、社会的にも非常に難度の高い挑戦であり、産・官・学の協業、わが国独自の取り組みと国際協力との組み合わせ、等の広い視野を持って目標実現に向け努力していく必要がある。

【有人宇宙輸送における日本の役割】

スペースシャトル退役後、有人宇宙輸送システムは露中のみ保有していたが、2020年に米国 SpaceX 社の Crew Dragon がデビューし、2021年には中国が有人宇宙船を独自の宇宙ステーションとドッキングさせるなど、有人宇宙輸送技術は新たなフェーズに入ろうとしている。また、Virgin Galactic 社のサブオービタル宇宙観光の機体開発や、将来的な完全再使用有人輸送を視野に入れた SpaceX 社 Starship 等をはじめとして、官民を問わず、世界的に有人宇宙飛行への期待感と投資熱が高まっている。

その中で、これまでの有人宇宙飛行の意義(国際社会における国の威信、最先端科学技術の推進、次世代人材の育成等)に加え、人類の活動の場の拡大・科学技術促進のプラットフォーム・民間も含めた経済活動の発展という新たな意義が見出され、月惑星における質の高い探査活動、LEO 商業飛行、月への商業飛行など多種多様な有人ミッションが創出されようとしている。

2050 年までには宇宙技術と航空技術が融合され、地球上の2地点間を高速で結ぶ Point to Point(P2P)などの事業が一般化し、有人宇宙輸送技術は人とモノの重要な輸送手段の一つとなる。商業民間活動に加えて、安全保障面でも有人宇宙輸送の重要性が高まることが想定されるため、日本として有人宇宙輸送技術の土台を早期に築く必要性がある。

これまで国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」や補給機「こうのとり」のミッションで有人宇宙技術の経験を蓄積してきた我が国が、今後、有人宇宙『輸送』技術について取り組みを推進するにあたり、重要なポイントおよび目標を記す。

- 宇宙開発における国際的な協調と競争が同時進行し、我が国の存在感と立ち位置の重要性が増すこれからの時代を見据え、重要性が増す有人輸送技術のコア技術を国内で自律的に保有すること。
- 有人宇宙輸送が可能な拠点を早期に国内に確保し、人流・物流の拠点へと発展させていくこと。
- LEO までの有人輸送システムおよび類似の機体構成となる P2P 高頻度輸送システムについて、世界全体の 10%以上のシェアを確保すること。
- 月以遠の有人輸送ミッションについても、国際協力開発等に存在感をもって参画できる有人宇宙輸送技術を国内に確保すること。
- 有人宇宙輸送との関連が深い技術(自動制御技術、地上～軌道上～月の高速大容量通信技術、AI、VR、TE 技術等)を促進すること。

【有人宇宙活動の広がりと有人宇宙輸送の再定義】

これまでの有人宇宙活動は、体力・知力的な観点から厳しい選抜を受けた宇宙飛行士が、探査、実験、技術実証などをおこなうミッション(LEO および月面)が大勢を占めていた。2050 年へ向けて、宇宙を訪れる人も、行われるミッションも多様化が進む。

それに加え、種々の技術領域(自動制御、ロボット、AI、VR、TE 等)の発展により、実際に宇宙に行くことなく宇宙を体験する、あるいは、サブオービタル飛行や気球、P2P 飛行により軌道速度

へ到達しない宇宙観光なども大きく進展する。本ロードマップでは、その考え方にもとづき、有人宇宙輸送の定義を広げた。

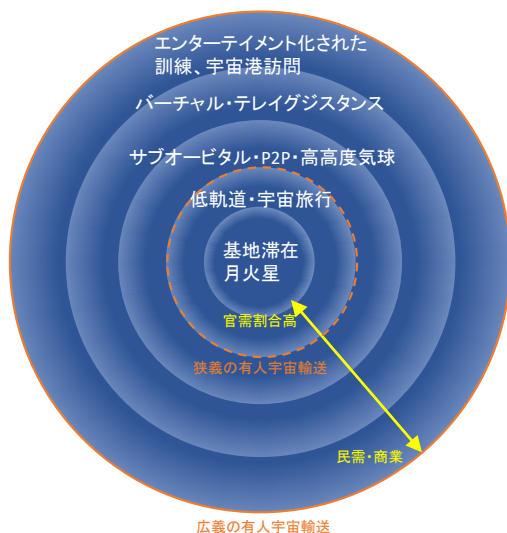


図 3a.10 新たな有人宇宙輸送の定義

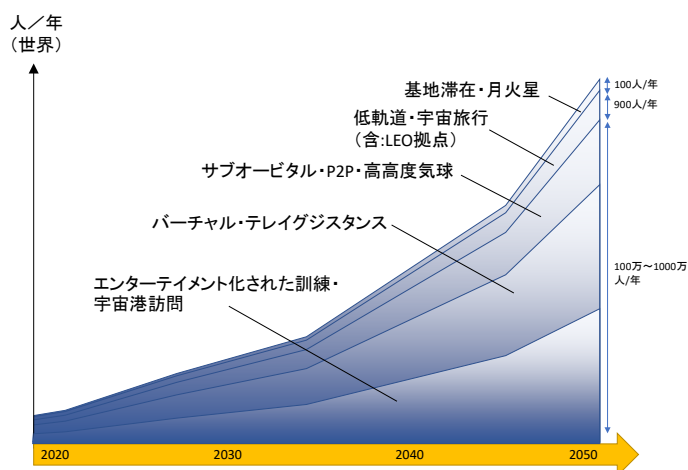


図 3a.11 有人宇宙輸送の広がり

図 3a.10 の同心円状の図に示すように、たとえば、地上における飛行訓練や宇宙飛行の地上拠点を訪れ訓練に参加するところから、エンターテインメントとしての有人宇宙輸送に含まれると位置づける。通信技術やロボット技術などが進歩し、現在よりもはるかに高精細、高没入感、体感度を増しリアルタイム性を確保した、VR や TE 技術によるバーチャル宇宙飛行が実現する。たとえば、身体に障がいがあったり、健康面で課題を抱えたりする方にとっても、VR や TE により、家族や友人と一緒に宇宙飛行を楽しみ、思い出作りができるようになる。

また、サブオービタル飛行や気球による成層圏観光など、軌道速度未満の機体による飛行、P2P（地上二地点間高速飛行）途中で短時間の宇宙飛行体験などが楽しめるようになり、それも広義の有人宇宙輸送と位置付けられる。

2050 年に向けて、有人宇宙活動全体が民間商業主体となっていくなかで、同心円中央の活動（月惑星探査や基地建設、滞在など）のように、官需が比較的重きを占める活動と並立している状態となる。

図 3a.11 に示すように、この広義の有人宇宙輸送を何らかの形で体験する人数は、2050 年までに全世界で 100 万～1000 万人／年に達し、その中で狭義の輸送（軌道速度を越え低軌道以遠への有人宇宙輸送）は 1000 人／年となる。

【地上～低軌道(LEO)有人輸送システム】

図 3a.10 に示した有人宇宙輸送のうち、まずは、地上～LEO 間の往還を担う有人宇宙輸送システムのロードマップについて述べる。主要課題である信頼性と安全性を確保する手段について、過去のアプローチを簡潔にまとめた。

- 黎明期の有人宇宙輸送システム(ロシア:ボストーク、米国:マーキュリー)では、当時の弾道ミサイルベースのロケットの上に、緊急脱出機能付きの有人カプセルを配置することで、ロケットの信頼性の低さを補い、有人安全性を確保した。
- 米国スペースシャトル(1981～2011)では、ロケットと有人機体を統合し、100 回あまりの飛行を達成したが、結果として十分な有人安全性が得られなかった。
- ロシアソユーズ宇宙船と、中国の有人宇宙船は、ロケット+緊急脱出機能付きカプセルのシステムで飛行経験を蓄積した。米国の商業乗員輸送開発(CCDDev)にて開発された SpaceX 社 Crew Dragon とボーイング社 Starliner も同思想を踏襲し、Crew Dragon は複数回の有人ミッションを成功裏に達成している。

2050 年に宇宙飛行人数 1000 人／年のビジョンに向けて、現在、有人宇宙輸送技術を保有していない日本がとるべき2つのアプローチを想定する。

①緊急脱出機能を備えた有人カプセル型を発展させるアプローチ

現在、有人宇宙輸送技術で先行している諸外国(米国、ロシア、中国)に対し、出遅れている日本が迅速かつ効率的に有人宇宙輸送技術を獲得する手法として、ソユーズや Crew Dragon で実績のある、ロケット+緊急脱出機能付きカプセルのアプローチがある。

2021 年時点で日本の基幹ロケット(H2A, H2B, イプシロン)の成功率は 98%以上、ここ 10 年は全機成功している。再突入カプセル技術についても、宇宙ステーション補給機(こうのとり)7号機から分離した小型回収カプセル技術実証に成功するなど、基礎的技術を獲得している。カプセル宇宙船と緊急脱出技術を開発し、現行のロケット技術を基盤として有人宇宙輸送システムへと発展させていくことは十分に実現性が高く、かつ比較的短期間での開発を可能にする。

本アプローチは、有人カプセルが実現するまでの中間段階ターゲットとして、無人大型回収カプセルを置く。軌道上実証機器やサンプル等を安全に地上回収する技術は、有人宇宙輸送のみならず、幅広い宇宙科学技術分野の研究開発サイクルを加速する効果を持つ。その後、生命維持技術と緊急脱出技術を開発、適用し、有人化を図る。

2050 年ビジョン(宇宙飛行人数 1000 人／年)の達成へ向けて、打ち上げロケットの信頼性を一層高めることで安全性を向上させる必要がある。そのためには無人ミッション(衛星打ち上げ)との機体共有化によってフライトとデータ蓄積の機会を確保し機体や設備の稼働率を高く維持すること、実負荷が印可された機体のフライト後にダメージや健全性を詳細に確認、分析できる機会を得られる機体再使用化を進めることが重要となる。このアプローチによって、安全性と信頼性の実績を積み上げて有人化を実現する。

信頼性や安全性の向上においては、緊急脱出や帰還に係る技術、故障検知などを含めた安全

確保技術、人-機械 I/F 技術など、信頼性・安全性の評価方法の構築が技術的なチャレンジとなる。

最終的には、カプセルと2段機体を統合化あるいは別々に回収することで、全段回収/再使用可能な輸送システムとして発展させることで主要課題の一つであるコストを削減し解決を図る。また、カプセル型に秒速 7.8km/s を越える速度での再突入技術を付与することで、LEO 以遠(月等)からの有人帰還ミッションへの発展ポテンシャルをもつ。

宇宙船1機あたりの搭乗人数を 10 名程度とおき、全世界で 1000 人／年の有人宇宙輸送の1割を日本が担うとして、年間打ち上げ回数は 10 回となる。無人(衛星)打ち上げが有人の 10 倍の頻度で行われるという仮定のもとで、世界で年 1000 回程度、国内で年 100 回程度の打ち上げ頻度となる。表 3a.5 に輸送規模を示す。

表 3a.5 有人カプセル型を発展させるアプローチによる 2050 有人輸送の規模(ビジョン)

	宇宙船 1 機あたり搭乗員	宇宙輸送総人数	有人フライト頻度	衛星(無人)打ち上げ頻度	総打ち上げ数 有人+無人
世界	10 名	1000 名／年	100 回／年	1000 回／年	1100 回／年
日本	10 名	100 名／年	10 回／年	100 回／年	110 回／年

②有翼往還機(航空機タイプ)型を発展させるアプローチ

滑走路から離陸可能な航空機の上段として、有翼往還機(航空機タイプ)の有人宇宙船を付加して軌道速度を達成するタイプの宇宙機は、既存空港等を宇宙港として利用し、滑走路から離発着が可能な有人宇宙輸送システムを実現できる。

一方、亜音速(離陸直後および着陸直前)、超音速・極超音速(加速中および再突入中)、真空(軌道上)の様々な環境条件に機体が曝されるなかで効率的に稼働するエンジン技術、同じく、様々な環境条件に対応しつつ空力を活用できる機体、翼形態、補助翼機構、熱防御システム等に適切な解を見つけること、および有人飛行に相応しい安全性、信頼性を確保することが技術的なチャレンジとなる。

本アプローチでは、中間段階ターゲットとして、宇宙観光のようなサブオービタル飛行を置く。比較的短時間の宇宙飛行体験を提供する商業フライトを継続的に繰り返し行うことで、亜音速～真空までの環境下で稼働可能なエンジンや、機体形態、翼形態についての知見を高め、研究開発を推進する。そのうえで、空気吸い込み式エンジン技術など地球大気を利用する技術の活用により機体規模や搭乗員への身体負荷を小さくして航空輸送サービスから宇宙輸送サービスへとシームレスに発展させる。商業利用により機体の稼働率を高め、入手できる豊富な実フライトデータを活用して技術改良を進め、発生可能な増速量を向上させることで、最終的に P2P 飛行および低軌道へ到達可能な機体を実現する。なお、低軌道輸送や P2P 技術確立後は、サブオービタル宇宙観光は P2P 輸送サービスの中に包含される(P2P の移動途中に短時間の宇宙観光を楽しむ)ようになる。

有翼往還機型アプローチで描く 2050 年の有人宇宙輸送ビジョンは、ほぼ毎日のように世界中で P2P 輸送機が宇宙港に離着陸し、その 1%程度が低軌道行の有人宇宙輸送となる。世界の P2P 輸送の規模を 100 万人／年、低軌道への有人輸送を 1000 人／年、1機あたりの搭乗人数を P2P で 100 名程度、低軌道への宇宙輸送で 20 名程度とおいた場合の人数規模を表 3a.6 に示す。世界で年間 1 万回程度の P2P フライトおよび 50 回程度の有人飛行が実施される。日本はその 1 割を担うビジョンである。

表 3a.6 有翼往還機型のアプローチによる 2050 有人輸送の規模(ビジョン)

	宇宙輸送搭乗員 (1機あたり)	宇宙輸送総人数 (低軌道)	有人フライト頻度
世界	20 人	1000 人／年	50 回／年
日本	20 人	100 人／年	5 回／年

	P2P フライト搭乗員 (1機あたり)	P2 P フライト総人数	P2P フライト頻度
世界	100 人	100 万人／年	1 万回／年
日本	100 人	10 万人／年	1000 回／年

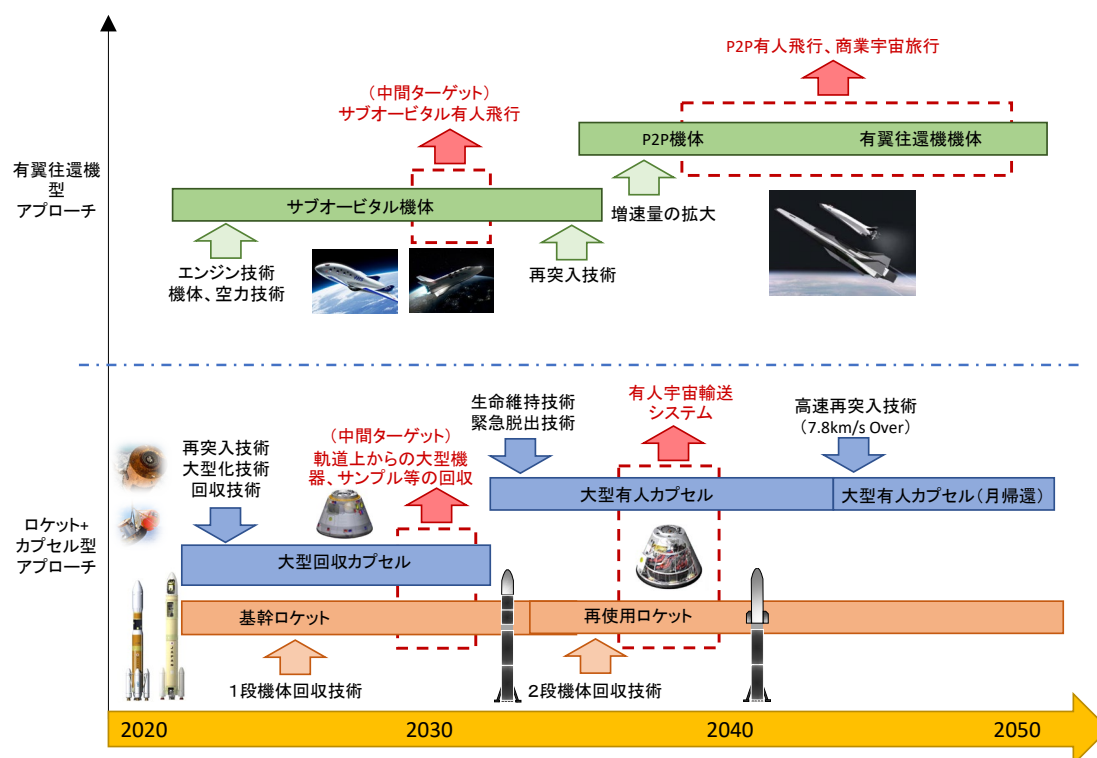


図 3a.12 有人宇宙輸送システムの発展アプローチ

この項では、2種類の有人宇宙輸送実現のアプローチ(①有人カプセル型を発展させるアプローチと②有翼往還機型のアプローチ)により、それぞれの2050年の有人宇宙輸送のビジョンを描いた。現実には、実現時期をずらして両方が実現したり、両方が目的ごとに棲み分けたり、あるいは中間的な機体(ロケット型の上段に有翼往還機が搭載される)が実現するなどの様々な発展パスの可能性がある。

両方のアプローチに共通する要素として、有人飛行の安全を確保する技術と安全基準の確立が挙げられ、日本が有人宇宙輸送実現に取り組むために早期に着手すべき課題である。

【LEO 以遠の有人輸送システム・拠点】

2050年のLEO以遠の有人輸送システム・拠点について、①LEO有人拠点、②軌道間輸送システム、③月着陸／離陸／月面基地／月周回基地、④地球帰還のビジョンを記す。

日本がシステムレベルでの自律性を確保しつつ官需および商業ミッションを遂行できることを目標とするLEO有人輸送システムに対し、LEO拠点およびLEO以遠にまたがるこれらの分野では、国際的な政府間協力あるいは民間商業活動に存在感をもって参画できる重要技術を我が国が開発し保有することを目標と置く。なお、火星への有人輸送システムについてはここではフォーカスしない。

①LEO 有人拠点

過去に構築された主な有人LEO拠点として、1973年～1979年に米国が打ち上げ運用したスカイラブ、1986年～2001年に旧ソ連が打ち上げ運用したミール、1998年～2011年に建造され現在運用中の国際宇宙ステーション(ISS)、2021年から建造が開始された中国の宇宙ステーション天宮などがある。

LEO 有人拠点には以下のメリットがあり、2050年の有人宇宙輸送ビジョンを描く上でも不可欠の要素である。

- 到着までに必要な増速量が小さく、地上から輸送しやすい。
- 長期の運用経験が蓄積されている。
- 地上との通信状態が良い。(通信速度と通信遅延の面で有利)
- 地球帰還に必要な ΔV や着陸までに要する時間が短く、緊急帰還しやすい。
- 眺望がよい(地球がよく見える)ため、宇宙旅行の目的地や滞在用ホテルとして適している。

2050年に向けた今後のLEO 有人拠点のビジョンを以下のようにおく。

- 各国政府の拠出で構築・運用されている現在のISSから、民間商業利用を含んだ複合的な有人拠点へと変化する。
- 複数のLEO 有人拠点が構築・運用される。眺望に向いたホテル等の商業滞在利用を主眼とした拠点、月やさらに遠くの目的地へ向かう際の中継基地としての拠点に、合計数百人が滞在している。宇宙旅行の短期／長期滞在者、軌道上実験や研究開発を担う要員、月探査へ

向けてトレーニングや無重量環境順応中の飛行士、および拠点の維持管理担当オペレーターや対人サービス提供者が含まれる。

- 商業滞在利用拠点は、滞在者の快適性(眺望, 内装, スペース, プライバシー, 人工重力発生等)を重視した設備となる。
- 中継基地拠点は、月等の探査計画に参加する宇宙飛行士の訓練場や機器の動作テストを行う場として活用される。また、軌道間輸送機用の推薬を貯蔵し、再補給をおこなう推薬デポの機能を持つとともに、拠点に係留中の軌道間輸送機や LEO 有人輸送機、その他の人工衛星などの点検、修理、部品交換等の作業拠点となる。
- 交換用部品は、当初は地上から完成品が輸送され、徐々に軌道上で 3D プリンタ等による現地製造が行われる。宇宙機の軌道上修理や寿命延長にとどまらず、アップグレードや性能向上を目的とした改造、改良サービスが本格化する。
- 宇宙利用が活発化するにつれて、スペースデブリ問題が深刻化する。LEO 有人拠点や輸送機等の安全を守るため、デブリ警報・回避システム、交通管制システムが整備される。故障した宇宙機のデブリ化防止や、デブリ除去の商業サービス化が進む。
- LEO 有人拠点は宇宙機の修理/改造工場の機能にとどまらず、エンターテインメントや芸術活動、衣食住に関わるサービス提供、無重量を利用した創薬や新材料の軌道上実験室、食料品製造のための宇宙農場、発電基地、無線エネルギー送電サービスなど、総合的な人類活動の場となる「宇宙都市・コロニー」へと徐々に発展していく。

②軌道間輸送システム

アポロミッションでは、サターン V ロケットによって直接月遷移軌道へ有人カプセルを打ち上げたが、2050 年では LEO 軌道上に複数の有人拠点が構築されることから、月やそれ以遠の深宇宙への輸送をサポートする軌道間輸送システムがネットワークとして整備される。月へ向かう軌道間輸送システムのビジョンを以下に示す。

- LEO 以遠への深宇宙に向かう宇宙飛行士、物資、機材、宇宙船等は、LEO 中継基地拠点で軌道間輸送機に乗り込み、あるいは軌道間輸送機とのドッキングをおこなう。
- 軌道間輸送機は中継基地拠点から推薬再補給を受け、飛行士や物資と共に月遷移軌道へと投入される。月までの片道飛行期間は約 1 週間程度。
- 軌道間輸送機は、宇宙機としての基本機能(熱制御、姿勢制御、電力制御等)のほか、推薬補給機能を持ち、軌道上で繰り返し長期にわたって使用できる能力を持つ。
- 月遷移軌道投入 ΔV あるいは月到着後の ΔV が大きいことから、極低温推薬(酸素、水素、メタン等)を用いた推進系/エンジンが採用される。極低温推薬の長期軌道上保管を可能にする断熱技術・冷凍機技術および、人員輸送の使用に耐えうる有人宇宙船と同等レベルの安全性、信頼性を確保していくことが課題。
- LEO 以遠における放射線被ばくのリスクを軽減するため、太陽活動予測技術や、軌道間輸送機内に被ばく量を軽減するシェルターを設けるなどの対策が重要となる。

- 軌道間輸送システムによる月への輸送人員規模は 100 人／年、輸送人数を 10 人／回、輸送頻度を年 10 回とする。

③月着陸／離陸／月面基地／月周回基地

軌道間輸送機によって月遷移軌道に投入された宇宙船は、月周回軌道上で減速したのち、月周回基地に立ち寄り着陸機へと乗り換えるか、もしくは直接月面への着陸を行う。

2050 年の月着陸／離陸／月面基地／月周回基地のビジョンを以下に示す。

- JAXA-SLIM プロジェクトでの研究開発成果に加え、2050 年には月測位技術や基地への誘導・航法システムが整備されることで、月面基地（縦孔を活用して月面各所に建造される）の近接発着場へのピンポイント着陸が行われる。
- 月面基地および月周回基地には推進剤貯蔵機能があり、着陸機はそこで推薬を再補給することができる。極低温推薬貯蔵に対応した断熱技術と冷凍機技術が開発されている。
- 極低温推薬のうち、酸素は月面でのレゴリス電解によって現地での生産が可能となっている。水素燃料の現地入手性は、月面の水氷の埋蔵量に依存する。その多寡によって、推進薬の現地生産が可能かあるいは主に地球圏から輸送されるか決定される。また酸素、水素、メタンの生成および貯蔵システムは、月面基地の生命維持システムの一部として、統合循環サイクルの中に組み込まれる。
- 月面有人活動のサポート、緊急避難場所、月面測位システムや月面での通信ネットワークの一部、そして軌道上推薬補給の機能を併せもった月周回基地が運用される。

④地球帰還

月面を離陸した宇宙船は、地球周回の長楕円軌道に移動後、軌道間輸送機とカプセル宇宙船を分離し、カプセルを大気減速させパラシュートで回収する方式で地球に帰還する。大気圏突入速度が大きいと、LEO 有人往還システムで述べたカプセル型がベースとなり有人月帰還用へと発展する。

カプセルと切り離され無人となった軌道間輸送機は、近地点でのエンジン噴射による減速マヌーバあるいは大気減速によるエアロブレーキ技術などを実施し、LEO 拠点に戻して推薬補給＆再使用される。

①～④で述べた LEO 以遠の有人輸送システム・拠点への有人輸送規模のビジョンを図 3a.13 にまとめる。LEO 有人拠点には 300 人、月面拠点には 100 人が常時滞在しており、平均滞在期間は 1 年である。図中の矢印は 1 年間に移動する人数を示しており、地上→LEO 拠点へは年間 1000 人が、LEO 拠点→月面・月周回基地へは年間 100 人が輸送される。

地球への帰還人数は LEO 拠点から年間 900 人、月拠点からは年間 100 人となる。火星への有人往還は若干名と想定する。

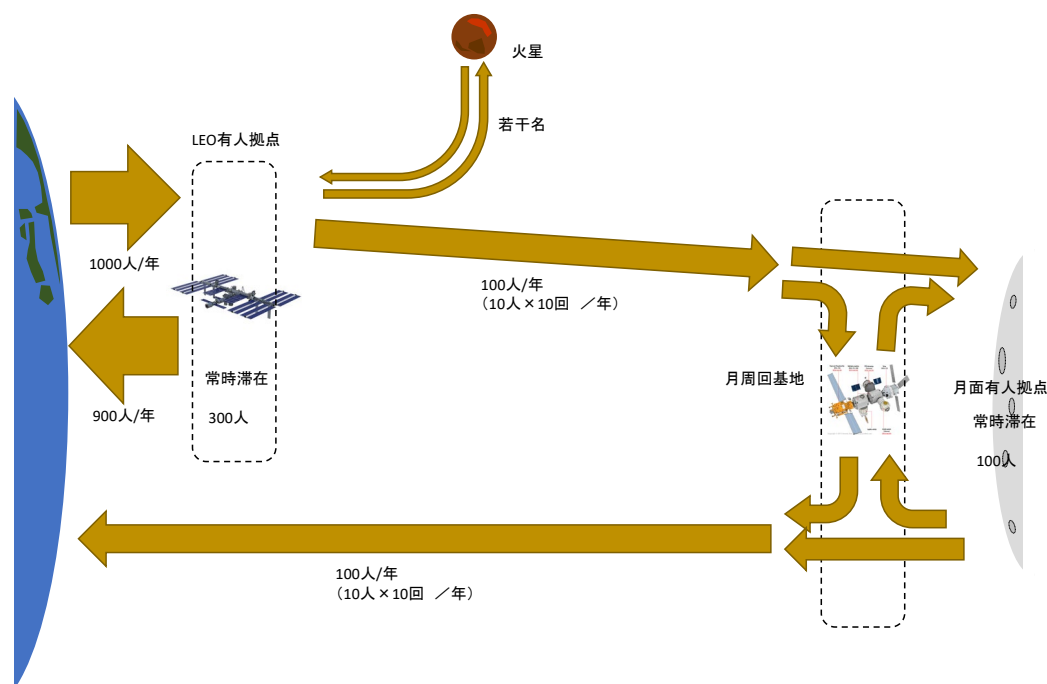


図 3a.13 LEO 以遠の有人輸送規模(2050 ビジョン)

【宇宙機環境制御, 生命維持技術】

有人宇宙活動の開始とともに、それを支える技術として宇宙機環境制御および生命維持技術 (ECLSS: Environmental Control and Life Support System) が開発され、かつ進歩してきた。宇宙における ECLSS 技術は、有人宇宙活動の先達であるロシア・米国が圧倒的に先行している。宇宙飛行士の代謝に必要となる、水供給、閉鎖空間で酸素濃度を適切に制御するとともに、二酸化炭素や微量有害ガスを除去する機能を提供する重要技術である。ISS では、実績のある部分再生型 ECLSS が採用されてきたため、宇宙飛行士の代謝を維持するための水や酸素を補給船による定期的な物資輸送が必要となっている。しかし、LEO 以遠で長期滞在を考えると補給に頼らない完全再生型 ECLSS が必要となるため、ISS を使用した完全再生型 ECLSS 技術への実証が計画されている。

有人宇宙輸送システムにおいても、有人宇宙船内での滞在期間、クルーの搭乗人数などのミッション規模に応じて、コンパクトで簡易な非再生 ECLSS から、補給を伴わない再生型 ECLSS まで最適なシステム選択がおこなわれる。

我が国の ECLSS 技術の取り組みは、ISS での技術実証、大型回収カプセル、サブオービタルフライト、P2P 等のミッションを開発段階でのテストベッドとして活かす等の取り組みにより技術開発を進め、LEO 有人輸送システムの ECLSS 技術の自律性確保へつなげる。そのうえで、月近傍への往復輸送に用いられる ECLSS についても、重要技術として国際協力ミッション等に参画できる技術力を確保する。

LEO 有人輸送や、月近傍ミッションであれば稼働期間は 1 週間程度であり、非再生 ECLSS による酸素・水供給、二酸化炭素除去システムが採用される。

月以遠、火星までの有人輸送では、片道 6 か月程度かかることから、補給を伴わない完全再生型 ECLSS が必要となる。例えば、900 日、6 人の火星ミッションを前提とした場合、人の生命維持のためには水と酸素がそれぞれ約 16 トン、約 5 トン必要となる。それらを打上時に全量搭載あるいは途中で補給することは困難であるため、搭載量を最小限として、水・酸素を効率的に再生利用される。同時に、有人宇宙船に搭載できるようシステムの高効率化を図り、小型・軽量化も合わせておこなわれる。

宇宙向け ECLSS のコンパクトかつ高効率なシステムの追究は、我が国が主導する 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現に向けた技術に通ずるものであり、相互技術のスピニアン・アウトにより技術レベルを飛躍的に向上させ、持続可能社会の実現(SDGs)への貢献が可能である。

【自動制御技術、バーチャルリアリティ(VR)・テレプレゼンス(TE)技術】

計算機技術の飛躍的な進歩により、複雑かつ高速な宇宙機の制御を自動で行うことが可能になった。最近の代表的成果として SpaceX 社 Falcon9 ロケットの 1 段機体回収が挙げられる。2050 年には AI 技術等のさらなる進歩を取り込み、有人宇宙輸送システムの運用、有人拠点の維持管理等に対して、より高度な制御、故障検知、迅速な自動回復処置等が実現するようになり、有人宇宙輸送の信頼性、安全性が高まる。

情報通信技術やロボティクス技術の領域においても革新が進み、2050 年の VR・TE 技術は、人の五感に高度に働きかけ、現在よりも臨場感のある映像、音響、振動・加速度等による高没入感を提供するとともに、遠隔での複雑かつ高度なマニピュレーションを可能にする。地上に居ながらにして LEO 宇宙旅行を体験し、月面基地、月周回基地、あるいは地上から遠隔でロボットを操作して月面・月縦孔洞窟内の探査ミッションや基地建設作業をおこなう、あるいは逆に月面や軌道上滞在者に対し、地上のリアルな自然風景や家族・友人との交流を楽しみメンタル面での癒しを提供するようなサービスが提供される。

これらを実現するために、LEO-地上間、月面-月基地間、月-地球間において、大容量、低遅延および遅延耐性の通信ネットワークが強化され、あるいは構築される。また、宇宙環境および月面環境に適応したロボット技術が高度化される。

【人間側視点】

有人宇宙開発黎明期は、地上との通信も限定的で、宇宙飛行中に受けられる地上支援も限られていた。当時はコンピュータ等の技術水準も低く、宇宙船内の少人数(時には 1 名)で膨大な作業をこなしつつ、任務を確実に成功させる高い能力が求められていたため、宇宙飛行士には、心身共に強健で緊張下でも高い任務遂行能力を有する人物が選抜され、その後も能力向上の為、長く厳しい訓練がおこなわれた。

その後、技術的進歩により通信環境が改善され、コンピュータの性能向上による自動制御技術の向上、有人宇宙飛行の経験蓄積と相まって、飛行の安全性が向上し、宇宙飛行士への任務負担は軽減された。他方で、宇宙空間の利用が広がる事で、宇宙で多種多様な技術業務を行う必要性が増大すると共に、地上の管制官を含む多くのチームメンバーと協力して仕事を進めるチームワーク力への要求が高まった。そこで、幅広い任務に対応可能なバランスの取れた能力と、チームワーク力に優れた人物が選抜され、多種多様な任務への対応力を向上させる為の長期の訓練がおこなわれている。

2050 年の宇宙空間の利用は人文科学分野や芸術、スポーツなどへ広がり、宇宙旅行の一般化とも重なり、多種多様な人々が宇宙飛行を行うようになる。また、宇宙飛行をサポートするため操縦、機器保守、拠点維持管理などを行う飛行士の需要も高まる。2050 年の有人宇宙活動を分類すると共に、その動向を人間的側面から分析する。

①有人深宇宙探査(月および火星)

2050 年の有人深宇宙探査では、月および火星での基地建設や探査が進展する。深宇宙探査では、放射線防護や地球との通信遅延、輸送コスト、地球への緊急帰還に時間を要するなどの多くの課題があり、2050 年までの技術的進歩を勘案しても、現在の低軌道宇宙活動と同等もしくは上回るリスクが存在する。VR・アバターを活用したテレプレゼンス(TE)の船外活動が活用され、リスク軽減が図られる。日本は、得意とする小型・高機能・高信頼性化の技術、ロボット技術等を生かし貢献する。飛行士に求められる能力の観点では、ミッションに参加する1回あたりの飛行士数も地上からの支援も限られるため、現在の国際宇宙ステーションでのミッション以上に宇宙飛行士は多岐にわたる任務を行うため LEO 拠点が訓練活動の場として使用される。深宇宙探査での健康管理はメンタル面を含めて大きな課題となる。遠隔医療や AI 診断技術、VR 技術などの最新の技術を積極活用し、生活環境改善やスペースにゆとりを持たせること、および月面縦孔(基地)内では放射線被ばく量が低く抑えられることにより、飛行士は1年程度の平均月基地滞在を可能にする。

②LEO 有人拠点における宇宙環境利用

LEO 拠点での微小重力環境での宇宙実験等を行う宇宙環境利用は、各国や民間企業等の参入が増加し活発化する。2050 年には、LEO での有人宇宙活動の実績と経験が蓄積され、リスクの低下と低コスト化が進む。そのほか、実験の域を越えた創薬・材料開発の場や、芸術文化、スポーツ、エンターテインメントなど、微小重力環境等を活かした新たな LEO 拠点の需要が増大する。その様な状況において、LEO 拠点での業務も増大し、扱うミッションは多岐にわたる。VR 技術等の活用により訓練の安全性や効率を高めた飛行士や拠点利用者の養成が本格化する。軌道上拠点滞在者は、健康管理技術の進歩と住環境の改善により、LEO 拠点での滞在期間が1年以上に延びる。また、輸送手段の発展(打上げ、帰還時の環境改善等)により、飛行士や拠点利用者の健康管理基準の緩和が進み、より多様な人間へと門戸が広がる。

③宇宙旅行

LEO 有人拠点を中心に、観光や娯楽、保養を目的とした宇宙旅行が活発化する。宇宙船が現在の旅客機並みの安全性・快適性を備えることで、旅行者に要求される事前訓練が緩和され、かつ、VR 技術等を活用して訓練自体を楽しめるエンターテインメント・アトラクションとしての特徴を備えるようになる。宇宙船の安全性・快適性の向上により、現在の航空機の乗客と同様に、旅行者の特別な健康管理は不要となる。

宇宙旅行が一般化し、多数の旅行者が旅行するようになり、旅行をサポートする専門のスタッフが必要とされる。現在の民間航空機パイロットやキャビンアテンダントと同様の役割を担うための訓練育成体制や健康管理体制も整備される。

2050 年の宇宙飛行士/宇宙旅行者の飛行人数を表 3a.7 に示す。飛行士のタイプ分類は便宜上のものであり、実際は同一の飛行士が幅広い業務を担当する。

表 3a.7 2050 年の宇宙飛行士/拠点利用者/宇宙旅行者(ビジョン)

目的	主な活動場所	タイプ	年間飛行人数 (世界)	備考
有人 深宇宙 探査	月 (火星)	探査系	50 人／年	月基地滞在者 100 人が平均 1 年ごとに交代する 火星探査は少数に留まる
		拠点維持管理	25 人／年	
		対人サポート	25 人／年	
低軌道 利用	LEO 拠点	利用活動	100 人／年	LEO 拠点滞在者 300 人が平均 1 年ごとに交代する LEO 拠点への旅行者サポートスタッフを含む
		拠点維持管理	100 人／年	
		対人サポート	100 人／年	
宇宙 旅行	LEO 拠点	旅行者	600 人／年	数十人規模の月旅行者を含む
合計			1000 人／年	

【宇宙港・射場・着陸場】

FAA の定義では、垂直型・水平型を問わず、Launch Site(射場)と Reentry Site(着陸場)を併せて Spaceport(宇宙港)と呼んでいる。2050 年に向けて様々なタイプの有人輸送システム(サブオービタル、P2P、LEO 有人輸送)が実現するとともに、宇宙港も様々なタイプが必要とされる。

有翼往還機型の宇宙輸送システムは、毎フライトで宇宙港に着陸する。カプセル型の場合、当初は海上着陸からスタートし、陸上(宇宙港)へのピンポイント着陸が可能になるように発展していく。有人宇宙輸送、無人宇宙輸送、地上2地点間高速移動(P2P)等の商業活動が活発化することで、人・モノの輸送ハブ拠点として位置付けられるようになり、宇宙港を保有するか否かによりビジネスや安全保障の面で大きな格差が生まれる。諸外国に後れを取らないよう、日本国内において

早期に宇宙港を確保し、発展させていくことが重要である。

宇宙旅行が一般化していくにつれ、宇宙港、射場は宇宙機の展示や過去の宇宙開発の歴史に触れることができ、VR や TE によるバーチャル宇宙飛行、エンターテインメント化された訓練、教育プログラム、および搭乗、飛行、管制までを対象とする、総合的設備へと発展する。

【法制度・規制】

毎年 1000 人が宇宙飛行し、その中に多くの商業宇宙旅行者が含まれる 2050 年には、有人宇宙輸送システムの信頼性と安全性を担保するための法制度や規制の体系が国際的に、かつ各国で整備されている。LEO 有人輸送システム、サブオービタル、P2P などから整備され、LEO 拠点や軌道間輸送、月着陸機へと展開されていく。その実現にあたっての現状と課題は以下である。

2021 年現在、米国では連邦航空局 (FAA) がサブオービタルを含めた有人宇宙活動に係る公衆安全や搭乗員訓練等に対して規定を行っている。将来的に搭乗員安全やミッション保証も含めて認証制度を築くことを掲げているが、日本においても有人宇宙輸送に係るにあたり、法制度・規制を整備していく必要がある。なお、P2P に関しては現状 FAA においても規定対象とされていないが、今後の有人宇宙輸送の発展に伴い、各国で整備が行われていく可能性があることから、日本でも有人宇宙輸送システムの対象の一つとして検討を進めていくことが望まれる。

以下に法制度・規制の対象として考えられる項目を示す。

- 機体：型式・製造・改造等の認定制度、耐空証明、環境規制等
- 乗員：宇宙飛行士やパイロット等の宇宙専門職の資格認定、訓練システムや健康管理システム(身体検査など含む)に関する規定、出入国管理制度等
- 地上設備：宇宙港(射場含む)や管制システムの適合認定、スタッフ訓練に関する規定等
- 事故発生時：賠償・補償制度、捜索・救助制度等
- その他：テロ対策・セキュリティ対策等

実際には認定制度などを設けていくにあたって、法制度・規制を満足すると判断可能な技術的基準・指標も必要となってくるため、技術的基準・指標の検討も法制度・規制の整備と並行して整備していくことが重要である。

また、P2P などには国家間での移動を含み、LEO 拠点なども国際的な拠点として整備される可能性があることから、国際的に共通性のある枠組みとして整備される必要があり、国際協力が不可欠である。信頼性・安全性を担保するための適切な規制を行いながら有人宇宙輸送の商業利用を促進するために官民連携も重要である。

【まとめ】

図 3a.14 に 2050 年までの有人宇宙輸送ロードマップを示す。地上～LEO までの有人輸送システムは、日本が自律的にシステムレベルの自律性を確保することを目標とする。ロケット+カプセル型と有翼往還機型の2つのアプローチを併記している。

LEO 拠点および LEO 以遠の有人輸送システムについては、日本が重要技術分野で存在感を

確保し国際協力システムへ参画することを目標とする。

輸送ハードウェア以外の分野においても、図中に示す複数の重要分野等における取り組みを推進し、2050 年の有人宇宙輸送ビジョンの実現へつなげる。

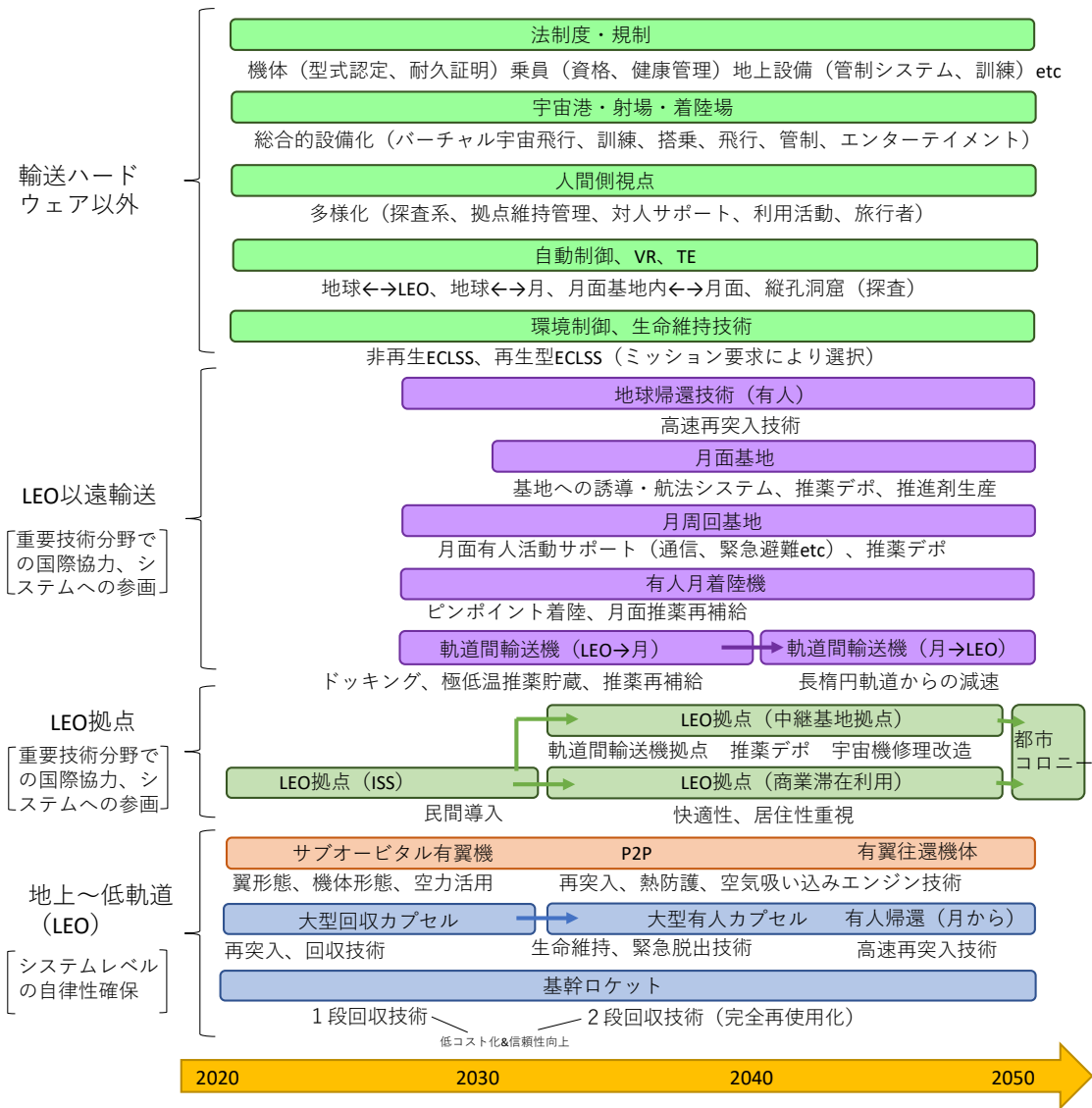


図 3a.14 有人宇宙輸送ロードマップ

参考) 有人宇宙輸送システムロードマップ検討メンバー

後藤大亮	宇宙航空研究開発機構【とりまとめ】
飯森祥子	宇宙航空研究開発機構
内山崇	宇宙航空研究開発機構
大西卓哉	宇宙航空研究開発機構
小松伸多佳	国際投資アナリスト
田邊宏太	宇宙航空研究開発機構
姫野武洋	東京大学
丸祐介	宇宙航空研究開発機構
山崎直子	一般社団法人スペースポートジャパン
油井亀美也	宇宙航空研究開発機構

b) 宇宙総合政策ロードマップ

1) 宇宙総合政策ロードマップの構成と概要

宇宙総合政策ロードマップは、宇宙に関する政策と法(宇宙法政策)の歴史を振り返ることから検討を開始した。宇宙活動の発展・拡大に対して、法政策はどのように展開してきたのか。その歴史を踏まえて、今後、JSASS宇宙ビジョン2050を実現するために、どのような議論と研究が必要になるのか。さらには、法政策以外の人文社会科学は、宇宙活動にどのように寄与しうるのか。総合政策ロードマップは、法政策の他、広く人文社会科学の研究者・実務者に向けて、今後必要になると考えられる研究の方向性を示すものである。

2) 宇宙活動と法政策の歴史と展望

2-1) 米ソ宇宙競争の時代:1950年代～1970年代

第2次世界大戦後の東西冷戦初期は世界の宇宙活動の黎明期にあたる。米国は1958年に米国航空宇宙局(NASA)を設立、フランスは1962年に国立宇宙研究センター(CNES)を設立、日本は1969年に宇宙開発事業団(NASDA)を設立し、国の宇宙機関による宇宙開発が始まった。この時代は、1957年の人工衛星スプートニク1号打上げ(ソ連)、1961年のガガーリン宇宙飛行士による有人宇宙飛行(ソ連)、1969年のアポロ11号による有人月着陸(米国)など、人類初の宇宙活動と併せ、国際法体系の構築が急速に進んだ時代でもある。宇宙関連条約としては、1967年署名の宇宙条約をはじめとして、1968年の宇宙飛行士救助返還協定、1972年の宇宙損害賠償条約、1975年の宇宙物体登録条約という、現在の宇宙活動の原則・基盤を形成する条約が次々と成立した。宇宙開発を行う国が少なかったとはいえ、条約の成立、各国の批准に必要なエネルギー(労力×時間)を考えると、これらの条約の成立は、人類の大きな成果であると言える。

宇宙関連条約の成立を主導したのは、スプートニク打上げを機に1958年に国際連合の暫定委員会として設立され、1959年に正式に常設委員会として設立された宇宙空間平和利用委員会(COPUOS)である。全会一致による意思決定を特徴とするCOPUOSであるが、当初参加国は24か国と少なかったこと(現在は87か国)、また、冷戦における米ソ宇宙競争の過熱に対する東西両陣営の危機意識を背景に、「宇宙は平和目的に限り、人類の利益のために利用される」とする宇宙条約をはじめとする宇宙関連条約の成立に至ったものである。なお、核兵器・ミサイル開発関係では、1963年に部分的核実験禁止条約が、1968年に核兵器不拡散条約が米英ソ三か国により、1977年には環境改変兵器禁止条約が国連において成立している。宇宙関連条約の成立は、冷戦という時代背景と宇宙科学技術の発展の両方を併せて考える必要があろう。

一方で、1979年に成立した月協定は、日本を含む主要な宇宙活動国の賛同・批准を得られておらず、現在まで実質的に機能していない。また、現在は、宇宙条約が前提としていた国単位の宇宙活動に加えて、民間企業も主体的に宇宙活動を行う時代に入っている。今後は、宇宙条約をはじめとする宇宙関連条約に基づくレジーム(宇宙条約レジーム)の見直しが必要となると考えら

れる。

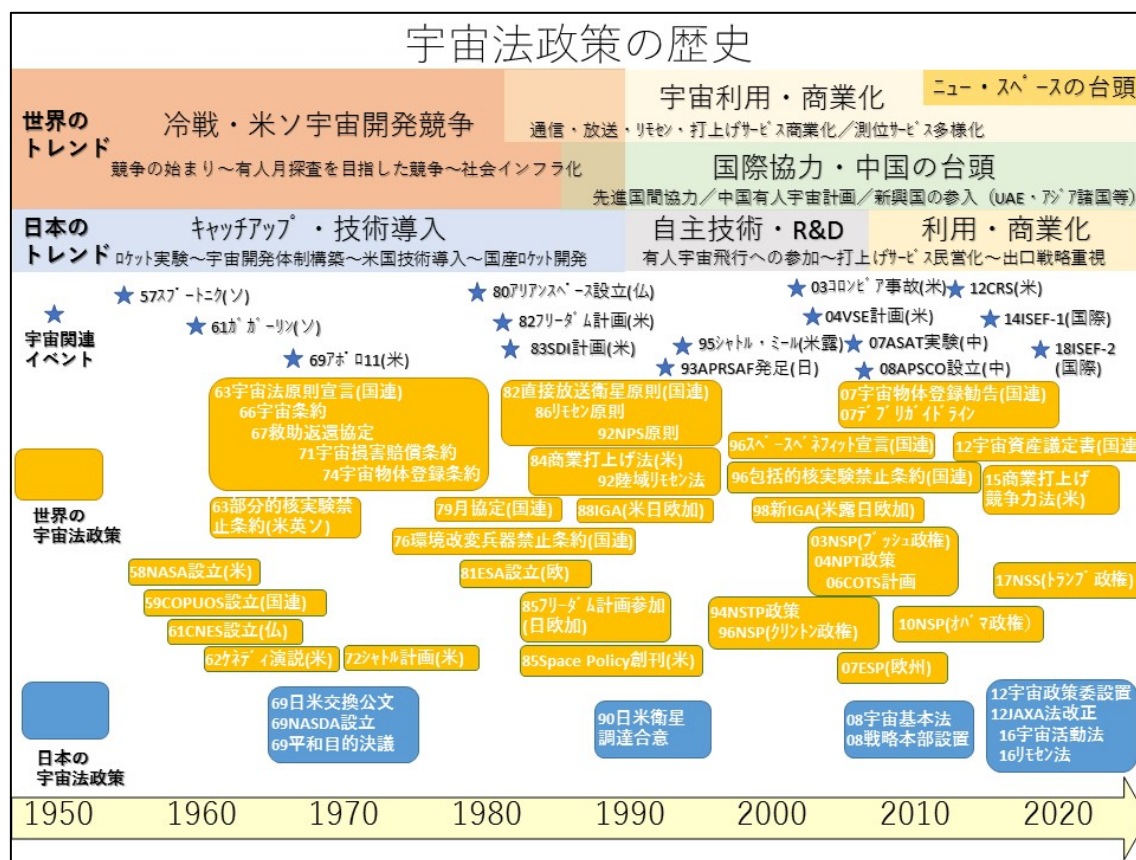


図3b.1. 宇宙法政策の歴史

2-2) 国際協力・商業化の時代: 1980年代～1990年代

冷戦時代の米ソの宇宙活動は、米国が(あるいはソ連が)行っているからソ連も(米国も)行うという構図であり、競争相手国の存在、イデオロギーの勝利が宇宙活動の理由となり得た。一方で、1970年代は、アポロ計画後、1975年のアポロ・ソユーズ計画に象徴されるように米ソ間でも宇宙協力を行うようになり、米国のスペースシャトル計画に西側先進国は参加し始め、1980年代にはスペースシャトル計画、そして宇宙ステーション計画に本格的に参加するようになった。

米国が1984年のロンドン・サミットにおいて、フリーダム宇宙ステーション計画への参加を日欧加の国々に呼び掛けたことは、宇宙活動が米ソだけでなく他の先進国によっても行われるようになり、外交や国際政治の文脈で議論されるようになった表れであった。宇宙政策に関する研究も、スプートニク・ショックやアポロ計画などに関する先駆的な研究がそれまでにも行われていたが、この頃から本格化し、1985年には国際学術雑誌『Space Policy』が刊行されている。フリーダム計画は1985年に日欧加が参加を表明し、その後、冷戦終結後にロシアの参加を得て国際宇宙ステーション計画に発展した。スペースシャトルによる実験ミッションや、1994年から1998年まで実施さ

れたシャトル・ミール計画を含め、有人宇宙飛行の分野は国際協力の舞台となった。

地球観測の分野では、1984年にG7サミットの下で地球観測衛星委員会(CEOS)が設立され、地球観測に関する政策・計画の情報共有や調整が行われてきた。現在、CEOSは、第3回地球環境サミットの下で設立された地球観測に関する政府間会合(GEO)が構築する全球地球観測システム(GEOSS)の衛星部分の構築を担っている。

国連では、関係国の増加に伴って条約の制定が難しくなる中、それに代わるものとして、1982年に直接放送衛星原則、1986年にリモートセンシング原則、1992年に原子力電源利用(NPS)原則が採択され、宇宙活動の原則の設定が進んだ。これらの原則は、各国の宇宙活動の基盤になるとともに、特に前者の二つの原則は、国際協力と商業化の基盤にもなった。

フランスでは、1980年にアリアンスペース社、1982年にスポットイマージュ社が設立され、それぞれ商業宇宙輸送、商業衛星画像販売の国際市場で大きなシェアを獲得した。欧州は、1975年に設立した欧州宇宙機関(ESA)を通じた地理的再配分方式(ジオグラフィカルリターン)により出資国に利益を還元する一方で、特定の企業を育成するナショナルチャンピオン政策を推進して、宇宙活動の商業化を牽引することとなった。

米国では、1984年に商業打上げ法、1992年に陸域リモートセンシング商業化法、1998年に商業宇宙法が成立。クリントン政権は、1994年に国家宇宙輸送政策、1996年に国家測位政策を策定して、宇宙活動の商業化と商業市場の拡大を進めた。米国は商業市場でのシェア確保を目指した政策を推し進めたが、一方で、国際武器取引規則(ITAR)により、衛星やロケット技術の輸出を厳しく制限したことから、輸出規制と輸出拡大のあいだでジレンマを抱えることとなった(その後、2009年からのオバマ政権において、輸出拡大政策の一環として商業衛星の輸出規制が緩和された)。

競争相手国の存在が宇宙活動の理由となり得た時代を経て、冷戦終結後の1990年代に入り、民生宇宙活動はイデオロギーの勝利以外の国の政策課題への貢献(科学技術の発展、経済的な波及効果、教育など)を一層求められるようになった。一方、軍事宇宙活動は、湾岸戦争において、軍事作戦に必要な活動となり、その後、アフガン戦争、イラク戦争を経て、宇宙活動は軍事作戦の一部となった。

2-3) 多様なプレイヤーの時代:2000年代～2010年代

2003年のスペースシャトル・コロンビア号墜落事故を経て、2004年に米国ブッシュ大統領は宇宙探査ビジョン(VSE)を発表し、有人で月・火星を目指すとして、コンステレーション計画(Aresロケット、Orion宇宙船の開発)を開始した。しかし、続くオバマ政権は、同計画のコストとスケジュールに

疑義を呈したオーガスティン委員会の報告書を踏まえ、計画の中止を決定。2010年の国家宇宙政策では、米国の有人宇宙飛行の次の目的地を小惑星とした。しかし、次世代の国際宇宙探査計画を議論する国際宇宙探査協働グループ(ISECG)の参加国の多くは月を志向し、米国内でも宇宙関連議員や有識者の間から月に戻るべきとの声が上がった。2013年には小惑星捕捉ミッション(ARD)計画が発表されたが、議会は同計画に予算を付与せず、NASAの方向性が定まらない時期が続いた。2017年にトランプ政権は次の有人宇宙飛行の目的地を月に戻し、NASAは月近傍のDeep Space Gateway計画を発表した。現在、日欧加は同計画を利用した月着陸ミッションを検討しており、NASAの大型ロケットSLS、Orion宇宙船も活用した、次世代の有人宇宙探査の方向性が見え始めている。

宇宙活動の商業化に関しては、ISSへの商業物資・クルー輸送を実現するため、NASAは2006年に商業軌道輸送サービス(COTS)計画を開始。2011年にはSpaceX社が初のISSへの商業物資輸送に成功し、その後の同社の躍進を後押しすることとなった。今後、ISS運用の商業化を含め、地球低軌道(LEO)は商業活動の場になっていくことが期待されている。

2000年代初期は、SpaceX社に代表されるNew Spaceと呼ばれる新興宇宙企業の躍進により特徴付けられる。New Spaceは、独自のビジョンをもって宇宙活動を推進し、IT起業家など、政府以外からも資金を得ることによって、国の政策目標に縛られない新たな宇宙活動のプレイヤーとなっている。現在、New Spaceは、火星移住や月探査などのビジョンを掲げ、再使用型輸送機や有人宇宙船の開発、数千機の小型衛星によるメガ・コンステレーション計画、宇宙資源探査計画などを提案、事業を展開している。

欧州は、欧州宇宙機関(ESA)が宇宙機の研究・開発・運用を担い、欧州連合(EU)が衛星測位のGalileo計画や地球観測のCopernicus計画など欧州の政策実現のための宇宙活動に資金拠出することで、欧州において宇宙利用の拡大を図る仕組みを構築し、2007年にEUとESAは欧州宇宙政策を策定した。また、欧州は、国連を通じてアフリカ諸国との協力を進めている。

中国は、独自の測位衛星計画や有人宇宙計画・月探査計画を進め、急速に宇宙活動国としての地位を向上させた。さらに、国際協力の面では、2003年にアジア太平洋宇宙協力機構(APSCO)を設立して、小型衛星開発などの分野で東南アジア諸国との連携を進めている。

日本は、2000年代初頭に相次いだロケット・衛星の不具合を経て、H-II A/H-II Bロケットの着実な打上げ、ISS計画における有人宇宙活動、小惑星探査機「はやぶさ」による宇宙探査などを通じて、宇宙先進国としての地位を確立した。国際協力の面では、1993年に開始したアジア太平洋地域宇宙機関会議(APRSAF)の枠組みを通じて、人材育成や災害監視(センチネルアジア)などの国際協力を進めている。

インドは従前、発展途上国の宇宙活動として宇宙利用に特化するとしていたが、現在では月探査・火星探査計画や有人宇宙飛行計画を進めている。

その他、新興国の宇宙活動への参入も活発化しており、アラブ首長国連邦(UAE)の火星探査、新興国の超小型衛星開発など、新たなプレイヤーの出現が続いている。

他方、2007年の中国による衛星破壊実験(ASAT)、2009年の米国Iridium衛星とロシアのCosmos衛星の衝突事故を契機として、宇宙デブリ問題への国際的な関心・懸念が急速に高まっている。2007年に国連で宇宙物体登録勧告とデブリガイドラインが採択され、また、透明性信頼性醸成措置(TCBM)、行動規範(Code of Conduct)、長期持続性(LTS)ガイドラインなどが議論されてきた。現在のCOPUOSにおいては、全会一致による条約の採択は難しくなっており、既存のハードローと新規のソフトローを組み合わせた法基盤の整備が現実的であると考えられている。一方、米国は宇宙状況認識(SSA)の能力増強に取り組んでおり、豪、加、仏、独、英、日との机上演習を実施するなど、監視網の拡大を図っているほか、国家宇宙戦略に基づき、宇宙交通管理(STM)構築の検討を始めている。

以上のように、宇宙活動とプレイヤーの拡大・多様化が進む中で、宇宙活動の活性化と規則・規制のバランスをどう取るか、世界の宇宙活動のガバナンスの在り方が、今後の宇宙法政策の課題になるであろう。

2-4) 日本の宇宙法政策

宇宙法政策の黎明期における日本の役割は小さくない。松平康東国連常駐大使は1958年に国連の宇宙空間平和利用の暫定委員会(1959年にCOPUOSとして設立)の議長を務め、東京大学の畑中武夫教授(天文学)は科学技術小委員会の設立準備会合のメンバーを務めた。

その後は委員会のメンバーとしての役割が中心であったが、2012年～2013年には元JAXA理事の堀川康氏がCOPUOS議長を務め、2017年の第54期科学技術小委員会では宇宙飛行士の向井千秋氏が議長を務めた。宇宙基本法の理念に従って、今後も日本発の国際人材の活躍が期待されている。

国内法政策としては、1969年に日米交換公文により米国の技術を導入しつつ、ロケット・衛星技術の国産化を図った。1985年に参加を決定した米国のフリーダム計画とその後のISS計画においても、有人宇宙技術の効率的な獲得に繋げるなど、日本はロケット・衛星・有人宇宙技術を戦略的に獲得してきた。1994年にはH-IIロケットにおいて国産化率100%を達成し、米国の技術に頼らずに開発利用を行えるようになった。

一方で、日本は、日米通商摩擦に関連して、1990年の日米衛星調達合意により、政府及び関係機関が実用衛星を国際競争入札により調達する自主的措置を決定した。世界貿易機構(WTO)を中心とした国際自由貿易体制の構築に向けた流れがあったとはいえ、当該合意は日本の宇宙活動の商業化に楔を打ち込むこととなった。それでも、世界レベルに到達したロケットの国際市場参入を見据え、1998年には宇宙開発事業団法を改正し、宇宙開発事業団(NASDA)が民間企業からロケット打上げを受託する制度を導入した。これにより、第三者損害賠償責任についても米欧の例にならって保険が義務づけられるとともに、保険でカバーできない損害は国家予算で対応することでビジネスリスクを低減した。

2003年には宇宙開発事業団(NASDA)と宇宙科学研究所(ISAS)、航空技術研究所(NAL)を統合して宇宙航空研究開発機構(JAXA)を設立し、宇宙科学と航空を含め、宇宙航空分野の研究開発を一体的に推進する体制を整えた。さらに、2007年にはH-II Aロケットの打上げサービス事業の民間移管を実現した。

日本は宇宙条約をはじめ宇宙関連条約(月協定を除く)を批准しているが、政府及び政府の宇宙機関が中心となって宇宙活動を実施してきたことから、民間企業を含めた宇宙活動に関する国内法の整備は遅れていた。宇宙活動とプレイヤーの拡大・多様化が進む中で、2008年、宇宙基本法が成立し、日本は、宇宙開発戦略本部が司令塔となって国全体で宇宙活動を推進する体制に移行し、研究開発中心の宇宙開発から利用を重視する宇宙開発に舵を切った。また、同時に平和目的に限るとしていた宇宙活動について、安全保障利用の道を拓いた。今後はSSAなど安全保障当局間の協力や情報共有の促進などが期待される一方、デュアルユース技術の扱いなどの議論が必要になると考えられる。

2016年には宇宙活動法が成立し、民間企業も含め、宇宙活動を実施するための法的基盤が整備された。現在、日本においてもNew Spaceと言えるベンチャー企業が出現してきており、政府金融機関や民間企業等からの投資・支援を受けて事業を展開している。宇宙活動の規制の一方で、宇宙産業基盤の維持と宇宙産業の振興は、引き続き法政策上の課題となるであろう。



図3b.2. JSASS宇宙ビジョン2050の実現に向けた法政策上の課題

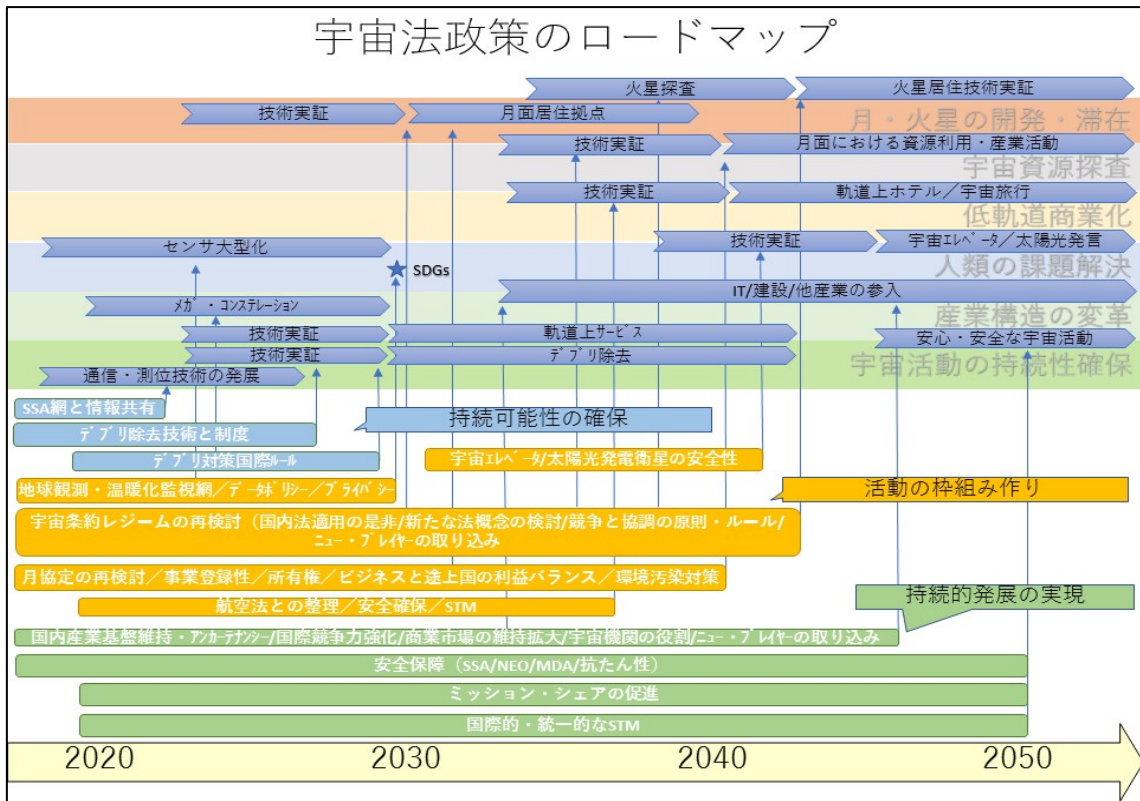


図3b.3. 宇宙法政策ロードマップ

3) JSASS宇宙ビジョン2050の実現に向けた研究課題

JSASS宇宙ビジョン2050を実現するためには、技術のみならず法政策の発展が不可欠である。本項では、宇宙ビジョン2050の実現に向けて研究の推進が望ましい研究課題の例をいくつか紹介する。

3-1) 法規形成メカニズム

今日の宇宙活動を律する宇宙条約レジームは、米ソ宇宙競争を背景として1960年代を中心に国連宇宙空間平和利用委員会(COPUOS)で作成されており、宇宙開発利用の進展に伴い、実態との乖離が生じている。しかし、COPUOSはコンセンサス方式のため、宇宙諸条約の改正や新たな条約の作成は困難な状況にある。

そのため、宇宙活動のガバナンスについて、COPUOSをはじめとする国際機関の役割を明らかにし、機能を強化する可能性についての研究があり得るだろう。COPUOSでは近年、法的拘束力のない国連総会決議等のソフトローを作成し、国際社会の共通理解を示し国家に一定の行動を促す取組みがなされているが、どの程度実効性があるのかは興味深い研究テーマである。また、COPUOSは平和目的の宇宙活動のみを対象としており、安全保障目的の宇宙活動は別途の場で国際的な話し合いがなされている。また、宇宙活動に不可欠な周波数調整は国連の専門組織である国際電気通信連合(ITU)が調整を担っている。そのため、国際組織法の観点から、国連での宇宙活動に係る国際調整を効果的に行うための示唆も有益だろう。

さらには、国連とは別の場での法規形成の可能性、例えば、宇宙活動当事国が合意を積み重ねる形で宇宙開発利用の普遍的なスキームを形成していく可能性について、他分野との比較を含む研究も求められるだろう。

3-2) 民間事業者を対象とした国際レジーム

2050年には宇宙開発利用の主役は民間事業者になっているだろう。しかし、今日の宇宙活動を律する宇宙諸条約は、1960年代を中心に作成され、当時の状況から国の活動を主たる対象として制度設計がなされている。すなわち、非政府団体の宇宙活動については、国が許可及び継続的監督の責任を負い(宇宙条約6条)、一般に国内法を経由する形で間接的に規制されている。

宇宙条約を受容して作成された各国の国内法にはどの程度の共通性や相違点があるだろうか。宇宙条約第6条(非政府団体への許可及び継続的監督)の受容として、国内法を制定して許可(ライセンス)制度を導入する事例が多くみられるが、ライセンスを義務付ける対象や許可条件等の詳細は各国の国内法に依存している。そのため、海運における便宜置籍船のように、国内法の不在や規制内容によりビジネスの本拠地を選択するフォーラムショッピングの懸念もある。そのような事態を避けるため、各国の関連国内法を比較分析し、国内法での規制の均質化を促す研

究も有益であろう。

コンセンサス方式のCOPUOSでは宇宙諸条約の改正や新条約の作成が困難であるため、国連とは別の枠組みで、宇宙交通管理(STM)の概念などにより、民間宇宙活動を直接的に規制する手法の研究も求められている。

3-3) 新たな宇宙事業に対応した国内立法

測位衛星を活用した自動運転技術や、サブオービタル宇宙旅行など、新たな民間宇宙事業を実現するためには、法制度の制定・改廃が必要となる。

例えば、米国では宇宙旅行や宇宙資源探査等の新たなベンチャーに対応した先導的な国内立法を迅速に行って、将来の有望産業として促進している。サブオービタル宇宙旅行用機体は新たな技術であるため一般に安全基準の検討には時間を要するが、米国ではその時点で最善のものを定め、事後的な技術発展に対応して改訂を重ねていく手法を取っている。また、政府が機体の安全性を完全に保証できない段階でも、その旨を搭乗者に適切に書面で説明して事前合意を得るインフォームド・コンセント方式により、いわば搭乗者の自己責任に基づく形で宇宙旅行事業を可能とし、世界に先駆けて宇宙旅行市場を拓いた。

日本は宇宙条約に1967年に加盟したが民間宇宙活動を律する宇宙活動法の成立は2016年であり、少なくとも米国との比較において、新規立法に慎重な傾向が見られる。また、インフォームド・コンセントのように国家の責任と個人の責任を明確に切り分けて、政府が安全を保障できない段階で自己責任を前提として事業を認可する制度も一般に見られない。このような法文化の違いは、どのような背景によるのかを明らかにする研究も興味深い。また、国内外における技術の発展に対応した法政策事例(ベストプラクティス)の蓄積や、新規技術を用いた前例のない事業をタイムリーに認可するための法技術に関する研究も有益だろう。

3-4) 民間宇宙事業促進に資する法制度や官民連携手法

多くの国においては今日でも、宇宙企業の最大の顧客・スポンサーは国・公的機関であり、民間宇宙事業を促進するための行政手法についても研究が必要だろう。

米国ではスペースシャトルの事故による引退を受けて、地球近傍の宇宙輸送(有人を含む)について、政府は民間が開発する機体の顧客となるとの政策を打ち出した(2004年宇宙探査ビジョン)。この新たな市場を目指して、有人宇宙ロケットという事業に多くのベンチャーが挑戦し、SPACE-Xのような革新的な成功事例が生まれた。米国ではさらに近年、ISSを含む地球低軌道全体について、国・宇宙機関は開発者ではなく民間が開発したサービスを購入する方式に移行する方針を打ち出し、地球低軌道の新たな市場を創出し、商業化を進めている。

このように、民間産業を促進し先導するための法政策について、他国・他分野のベストプラクティスを蓄積する研究も求められる。また、PPP・PFIなどの具体的な産業連携手法や、国・公的機関における新たな契約手法・調達技術の開発について、契約法・行政法・経営学・金融工学などの視点も含めた研究が必要だろう。また、知的財産権や標準化に関する法政策や、技術マネジメントやナレッジマネジメントの手法について、他国との比較を含む研究も必要である。さらには、技術開発を支える高度な人材を継続的に育成・排出するための教育学・経営学などの観点での検討も必要である。

3-5) 宇宙デブリ問題への対応

近年、宇宙デブリ問題が深刻化している。希少な環境である静止軌道の有効活用のために宇宙デブリ対策は重要である。近年宇宙デブリは急激に増加しており、宇宙活動全体の持続性への大きな脅威となっている。2050年の地球低軌道では、メガ・コンステレーションや宇宙旅行を含む様々な宇宙活動が増加し、宇宙デブリ問題のさらなる深刻化が懸念される。宇宙活動の持続性を確保するため、産業の振興に配慮した上で、宇宙デブリを適切に管理するレジームが緊急の課題である。

主要宇宙機関は自らの活動に起因する宇宙デブリの発生を抑止する対策を講じているが、民間宇宙活動も対象としたユニバーサルな対策が必要である。COPUOS科学技術小委員会で宇宙活動の長期持続性(LTS)のためのガイドラインが検討されたが、コンセンサスが成立せず不調に終わった。そのため、宇宙交通管理(STM)の概念から実務的なルールやベストプラクティスを積み上げていく手法も提案されている。ISOの宇宙デブリ標準が商業市場での競争力の源泉として普及すれば、事実上の拘束力持つガイドラインとなる可能性があるだろう。また、宇宙環境の汚染問題ととらえて、環境保全の観点からサステナブルな宇宙開発利用のあり方について示唆を得ることも有益だろう。

3-6) 月・火星等への基地の建設

宇宙条約では月その他の天体上の基地の建設は一般に認められている(第12条等。なお、軍事基地・軍事施設・防備施設の設置、軍事実験・軍事演習は禁止(第4条))。

一方、宇宙条約2条により月を含む天体の取得は明確に否定されており、基地を建設し一定の区域を占拠したとしても、天体(月)の一部を自国領土として主張することはできない(民間事業者も、天体の土地等の所有権を主張することはできない)。

宇宙条約9条は、他の当事国の活動に潜在的に有害な干渉を及ぼすおそれがある場合の国際協議義務を規定するが、具体的にどのような場合に協議が必要なのかなどの詳細は示されてい

ない。基地の建設は長期的な土地の占有を伴うものであり、紛争を生じさせないための調整メカニズムを形成していく必要がある。例えば水資源が期待される月の極付近などでは複数国（およびその管轄下の民間事業者）による資源探査プラントの開発競争の可能性がある。月等の天体・宇宙空間における恒常的施設の建設に関する具体的な調整メカニズムの研究が求められる。

3-7) 宇宙資源の開発利用

近年米国をはじめ、複数の国・企業が月・火星などへの宇宙探査を積極的に推進している。宇宙探査には大量の物資が必要であり、地球からの輸送コストに鑑み天然資源をいわば地産地消として宇宙空間で開発・販売するビジネスが現実味を帯びている。特にロケットのエネルギー源としても活用できる水資源をめぐる争奪戦が予想される。米国は宇宙資源の獲得と販売等を目論む米国の民間事業者の権利を守りビジネスを促進する法律を早くも2015年に制定し、新たな宇宙ベンチャーを歓迎して積極的に保護育成する姿勢を明らかにしている。これに、宇宙ベンチャーの誘致に積極的なルクセンブルグなどが続いている。

本来、国内法での対応の前提として、宇宙資源開発に関する国際ルールが必要である。宇宙条約上、天体と分離された天然資源の獲得や販売について否定はされていないが、商業的な宇宙資源探査の扱いについて、早急な明確化が必要である。なお、月協定は、主要宇宙活動国も参加しておらず、締約国が少ないため、一般に実効性がないものとされているが、発効はしているため慎重な分析が必要である。また、COPUOSが作成して1996年に国連総会決議として採択された「スペース・ベネフィット宣言」や近年、有識者・産業界等が構成した「ハーグ宇宙資源ガバナンスワーキンググループ」が作成した宇宙資源開発を促進するための国際ルールの草案も研究対象となるだろう。

また、宇宙条約9条に基づく、宇宙資源による地球環境汚染対策としては、一般に国際学会（COSPAR）が作成したガイドラインが一般に遵守されている。しかし学会のガイドラインでは拘束力に課題があり、民間活動の増加を踏まえて有効な対策の研究が必要であろう。

3-8) 新たな法概念の可能性

人工衛星や月基地等の宇宙物体・施設及びその乗員に対しては、宇宙条約第8条及び登録条約に基づく登録により、登録国が管轄権および管理の権限を確保することができる。民間事業者が国に頼らず自身の資金と技術で宇宙探査や月・火星基地の建設を行う場合でも、当該宇宙物体・施設の打上げ国による登録が、宇宙物体に対する所有権などの私的な権利に対する国内法上の権利について他国に対抗するための前提となる。このように、これまでは、宇宙条約に基づく登録により取得した管轄権をもとに、登録国の国内法を宇宙空間の活動に適用していく方式で対処されてきている。

しかし、月・火星で人類の恒久的な居住地域の開発運用が始まっている2050年には、地球とは独立的に運営発展していくコミュニティに恒常的に居住する市民の間で、宇宙条約の前提を超えたコミュニティ独自の新たな法が誕生する可能性がある。つまり、2050年の社会では、現在の地球という生存圏が低軌道まで拡大するのに伴って、地上の法概念も拡大すると同時に、月や火星のように、地上の延長とまでは考えられない新しい生存圏においては、新しい法概念の芽生えもあるのではないだろうか。そのような新たな法の理念、合意形成方法やそれを支える立法・行政機構など、国際法のみならず行政学・社会学を含む幅広い人文社会分野の知見も得た学際的な研究が必要であろう。

3-9) 小括

社会の発展において、技術と法政策・制度の発展は両輪である。近年宇宙法政策の研究に関心が高まっているが、いまだに国際法の一領域である宇宙法を中心とした分析が中心である。さらに幅広い分野と連携した学際的な研究により、実務にも資する様々な示唆や法政策上の選択肢を得ることができるだろう。

4) 宇宙開発に関する人文社会科学系領域の研究について

4-1) 今後必要になる宇宙開発における人文社会科学領域の役割と主なアジェンダ例

宇宙ビジョン2050では、例えば、月・火星の居住が実現したり、宇宙旅行がレジャーの一つになったり、民間活動が拡大し誰もが宇宙におけるプレイヤーとなり得るとしていたり、端的に言えば、人間の生活圏たる社会が地球から宇宙に広がることを基礎に想定をされている。新たに広がる社会を「豊か」にするための考え方・方針・実施案の示唆や方策の創出が人文社会科学領域に求められていることだとすると、具体的に、どのようなことがアジェンダとして考えられるのだろうか。

社会の豊かさ(幸福)とは何か、そしてそれは測定可能か、ということについてはさまざまに議論しうるところであるが、近年では国際的に調査研究も進展しており、社会の豊かさ・幸福のフレームワークや測定手法についての具体的な提案も行われるようになってきている。注目すべき社会の「豊かさ」の構成要素についての考え方として、2009年9月に出された「経済パフォーマンスと社会の進歩の測定に関する委員会(CMEPSP)報告¹⁾」がある。報告書では主に8つの観点で社会の豊かさを議論している。すなわち、「物質的生活水準」・「健康」・「教育」・「仕事を含めた個人活動」・「政治的発言と統治」・「社会的関係性」・「環境」・「経済的不安・物理的危険」である。報告書では、各観点の趣旨や各観点における各国・各地域の評価結果などを議論しているが、委細は割愛し、これら観点を新たに広がりつつある人間社会としての宇宙、として読替えてみると次のようなことが言えるのではないだろうか(表3b.1.)。

表3b.1. 「豊かさ」の8つの観点と宇宙領域への読替えの例

8つの観点	宇宙領域での目標
1. 物質的生活水準	宇宙における経済社会機能の確立
2. 健康	宇宙における健康の維持
3. 教育	宇宙生活のノウハウの一般化
4. 個人活動(仕事含)	宇宙における活動の自由の担保
5. 政治的発言と統治	宇宙における活動のガバナンス
6. 社会的関係性	宇宙活動の意義の多様化と相互理解
7. 環境(現在・過去)	宇宙活動の継続的な安全性
8. 経済的不安・物理的危険	宇宙における権利の担保と保護

¹ Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress (CMEPSP)フランスのサルコジ大統領主導で2008年に作られた。GDPに代表される現在の統計では経済社会の実態を正確に捉えていないのではないかという問題意識の下、社会の豊かさ・幸福度を測定するにふさわしい指標を創出することを目的に提言。委員長は、コロンビア大学のジョセフ・スティグリッツ教授がつとめ、ハーバード大学のアマルティア・セン教授がアドバイザーの他アメリカ、イギリス、フランス、インドの専門家25名で構成。

4-2) 今日までの宇宙開発における人文社会科学領域が果たしてきた役割

宇宙開発領域は自然科学領域の研究だけでなく、人文社会科学領域の研究も従前から進められており、近年になり特にその多様性が広がってきている。例えば、古くは1984年に「社会科学と宇宙開発²」として宇宙開発と人文社会科学各7分野(経済学・歴史学・国際関係学・哲学・政治学・心理学・社会学)について、宇宙開発にどう貢献してきたのか、そして、宇宙からどう影響を受けたのかを先行研究を整理し総括している。

今回、今日までの宇宙開発における人文社会科学領域が果たしてきた役割を概観するにあたり、本邦において、どのような研究が宇宙開発文脈の下各人文社会科学分野で行われてきたか代表的な研究を整理した。人文社会科学領域においても多くの分野で宇宙開発と社会の関係性について多様な研究が行われていることがわかる。その上で、前項目で提示を試みた社会の豊かさの8つの観点の内特にどの観点に関係する研究が行われているかを把握するために代表的な研究をプロットした(表3b.2)。

実績は少ないものの各分野の代表的な研究がそれぞれ、社会の豊かさの中で特にどの観点で注目していたかをこの方法で考察すると、特に、人文科学系統において「なぜ人は宇宙開発を進めるのか」、「宇宙活動とは何なのか」といった宇宙活動の意義について比較的多くの考察が行われていることがあった(一例として、宇宙と人の関係性の研究の一環として作成された「宇宙芸術年表」を参照。人類は太古の昔から、宇宙に対する畏敬の念と未知の世界へ挑む対象として宇宙芸術も生み出してきた。<http://space-art-tanegashima.jp/pdf/chronology.pdf>)。一方で、JSASS宇宙ビジョン2050の実現に向けては、実業に近い領域である社会科学系統や学際系統でも研究の一層の促進が望ましい。

4-3) 今後、宇宙開発における人文社会科学領域が果たすべき役割

これまでの70年間の歴史の中で、限定的な政府原資を宇宙開発に配分するべきなのか、あるいは、宇宙へのアクセスが安定的に運用される公共インフラとしてどのように開発を進めるべきなのか、という段階では宇宙活動の目的そのものや、あるべき姿についての議論は必要だった。しかし、近年の民間主体の宇宙活動の広がりを見れば、政府の政策方針があろうとなかろうと、人間社会の宇宙への継続的な伸長は確実なものになってきている。そのためには、そうした哲学的な議論からさらに踏み込んで、人間社会が宇宙に存在することをそもそも所与とした場合に、そうした社会における人間活動を直接支える研究が必要なのではないだろうか。

具体的には、宇宙活動にどのような秩序が必要か、どのように秩序や活動の安全性を確立するべきなのか、或いは、人類が地球を離れ宇宙へと活動領域を広げた場合心身の健康はどのように維持されるべきか、といった研究は、近年その萌芽が多数見受けられるようになったものの、

² NASA “Social Science & Space Exploration” (1984)

依然研究業績の積算が求められると考えられる。宇宙ビジョン2050を実現するために、宇宙に広がる人間社会をいかに豊かにするかという観点において、宇宙に行くことの意義の研究から、より実質的な段階へと人文社会科学系領域の研究の発展の方向性が求められている。当然ながら、そうした新たな段階の研究を進める上でも、また、宇宙ビジョン2050実現のためにも、更なる関心・プレイヤーの増加が望まれるのは確かである。

表3b.2. 宇宙における社会の「豊かさ」に求められる項目と現在の研究業績例の関係

			生活水準	健康	教育	仕事/ 個人活動	発言・ 統治	社会的 関係	環境	不安・ 危険
宇宙文脈として			経済活動 確立	健康維持	ノウハウ 一般化	自由の担保	ガバナンス 確立	活動意義 多様化	継続的 安全性	権利の 保護・担保
カウント			8	1	5	4	5	11	3	5
(領域)			(代表研究例)							
人文 科学 系統	文化人類学	宇宙人類学						○		
	倫理学	宇宙倫理学						○		
	宗教学	宇宙研究と宗教研究	○					○		
	哲学	宇宙を哲学する	○					○		
	教育学	宇宙箱舟ワークショップ			○			○		
	考古学	宇宙考古学						○		
学際 系統	情報学	ビッグデータの適用	○						○	
	総合科学	宇宙開発分野ジャーナリスト					○	○		○
	国際関係論	宇宙開発と国際政治	○				○		○	○
	心理学	宇宙航空心理学		○	○					
	芸術	宇宙芸術	○			○		○		
社会 科学 系統	経営学	宇宙開発社会・経済波及効果	○			○		○		
	統計学	統計計算宇宙物理学			○					
	法学	宇宙基本法				○	○		○	○
	政策学	科学技術ガバナンス			○			○		○
	社会学	宇宙開発世論の分析				○	○	○		
	経営学	訓練マネジメント能力開発	○		○					
	金融論	宇宙機器リース	○				○			○

参考) 宇宙総合政策ビジョン小委員会メンバーの構成:

水野 素子(主査)	宇宙航空研究開発機構
菊地 耕一(副主査)	宇宙航空研究開発機構
相原 素樹	宇宙航空研究開発機構
青木 節子	慶應義塾大学
岩城 陽大	宇宙航空研究開発機構
岩下 明弘	三宅・今井・池田法律事務所
岩渕 泰晶	宇宙航空研究開発機構
大久保 倫子	宇宙航空研究開発機構
落合 美佳	宇宙航空研究開発機構
金山 秀樹	シー・エス・ピー・ジャパン(株)
川口 淳一郎	宇宙航空研究開発機構
北村 尚弘	センチュリー法律事務所
楠本 維大	楠本法律事務所
栗山 育子	宇宙航空研究開発機構
小菅 敏夫	デジタルハリウッド大学
小塚 莊一郎	学習院大学法学科教授
小山田 裕彦	種子島宇宙芸術祭事務局
坂本 香子	宇宙航空研究開発機構
相良 由里子	中村合同特許法律事務所
佐藤 雅彦	宇宙航空研究開発機構
竹内 悠	宇宙航空研究開発機構
永井 希依彦	有限責任監査法人トーマツ
橋本 靖明	防衛研究所
羽生 哲也	三菱総合研究所
村山 裕三	同志社大学
吉富 由稀	宇宙航空研究開発機構
渡邊 浩崇	大阪大学
城山 英明	東京大学
中谷 和弘	東京大学
龍澤 邦彦	立命館大学
堀川 康	宇宙航空研究開発機構
山北 和之	日本航空宇宙工業会
宇治 勝	日本航空宇宙工業会

5) 宇宙の人文・社会科学研究のロードマップ【2019 年度増補】

5-1) 背景及び検討の目的

第 2 章に示す「宇宙ビジョン 2050」の実現に向けて人文・社会科学と宇宙との関わりについての検討を 2019 年度に行った。宇宙法政策委員会の下部組織である人文・社会科学小委員会での検討を行うことになり、同小委員会の有志と外部有識者の参加を得て開催された研究会で本項がまとめられた。研究会に参加したメンバーは本節の最後に示す。

研究会では、まず宇宙の人文・社会科学研究に関連する各方面のこれまでの活動を総括し、「月の人間社会」が 22 世紀後半には実現すると想定した際に不可欠になる人文・社会科学分野の主要な研究課題を抽出、これを基にして、「宇宙の人文・社会科学研究のロードマップ」を構想することを主な目的とした。なお、本項は短期間における試行的検討であるが、宇宙の人文・社会科学研究の重要性が浮き彫りになっている。

5-2) 宇宙の人文・社会科学研究への期待³—宇宙物理学や天文学の視点から

古来より人は星や宇宙への関心を持ち続けて天文学が育まれ、算術、幾何、音楽とともに人類が取り組んだ最も古い学問と言われる。人は天を読んで暦を編み出し、為政者は暦を祭祀と政治に活用し、人々は農業を始めとした日常生活に暦を利用した。人は夜空の星を見上げて悠久の宇宙に思いをはせた。星の光は宇宙の森羅万象を示す言葉であり、天文学はこの言葉を読み解こうとする営みでもあった。

20 世紀後半、人類に新たな視点が加わった。それはアポロ計画の月面着陸がもたらした人文的インパクトというべきものであった。宇宙空間に浮かぶ地球の姿が「宇宙船地球号」を彷彿とさせ、地球人類に新たな地球観や生命観を育んだ。そして 1995 年以降の数々の系外惑星の発見、特にハビタブルゾーンに位置している多数の系外惑星の発見が、我々の宇宙観や生命観に衝撃的なパラダイムシフトをもたらそうとしている。地球外生命体の発見と交流による「地球人類を俯瞰する新たな視点」の獲得に近づいているという期待である。このパラダイムシフトは理工学上の発見を遥かに超えて、生命に関する根本的な課題を提起し、地球人類の文化や営みにも根源的な影響がもたらされるだろう。そのような宇宙時代を迎えている今、「宇宙の生命原理」と「地球生命の歴史と将来」を総合的に追究するために、理学(宇宙物理学や天文学)・工学(多様な技術開発)・生命科学(医学を含む)の研究のみならず宇宙に関連した人文・社会科学研究をも組み込んだ「文理融合の総合的取り組み」が不可欠な時代が到来している。

³ 縣秀彦『ヒトはなぜ宇宙に魅かれるのか 天からの文を読み解く』(2019)

一宇宙への人類の活動領域拡大の視点から

ISS「きぼう」利用を中心に推進されてきた宇宙環境の利用，その初期利用段階の裾野拡大を指して，次の方向で「宇宙の人文・社会科学分野」の取り込みが模索されてきた。（図 3b.4.）

- 「宇宙と人間との関係がより身近なものに感じられる文化、芸術、人文科学等の活動を推進する」という国の方針⁵(1996)を踏まえて、宇宙環境の人文社会的利用に対する可能性が検討された(1996～1999)。(国際高等研究所への委託研究として実施された。)
- その結果を踏まえ、芸術を人文社会的利用の先導的分野と位置付けた「きぼう」利用準備が進められ、当該分野では世界初の宇宙実験ミッションが実施された(2003～2012)。
- 一方、人文・社会科学全般に対しては、国際高等研究所の課題研究「宇宙開発・宇宙環境利用の問題—人文・社会科学からのアプローチ」⁶が進められた(2003～2009)。
- その後、「有人宇宙活動に対して人文・社会科学研究が担うべき役割と当該分野の活動の望ましいあり方」についての検討が行われた(2012～2016)⁷。

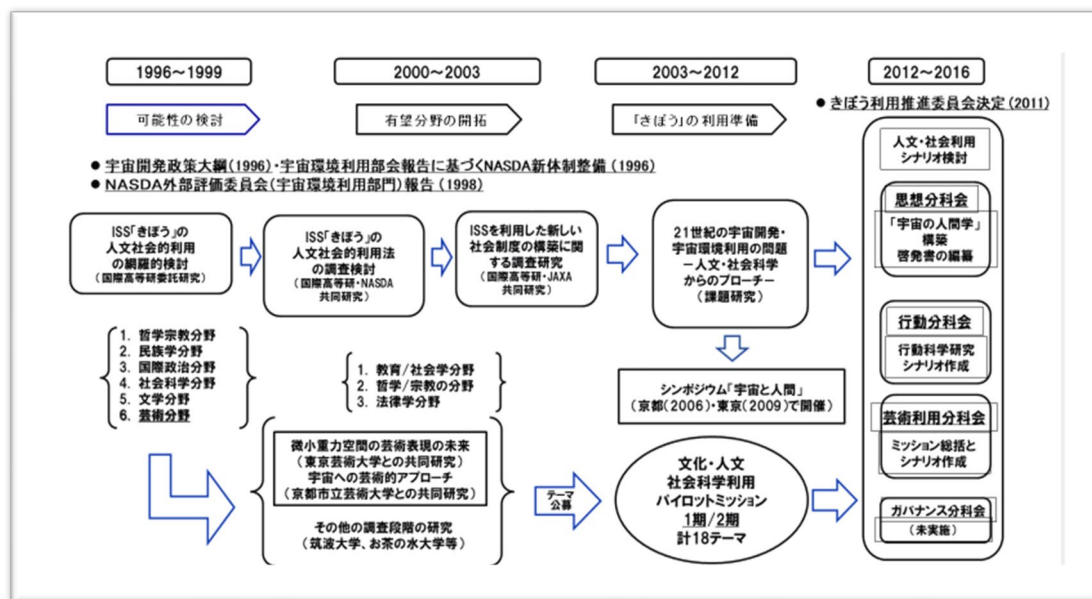


図 3b.4. 「宇宙の人文・社会科学」の検討の流れ

(<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/561720>)

(ii) 「宇宙の人文・社会科学研究」の位置づけ(ISS「きぼう」利用)

2009 年に「きぼう」の本格的な軌道上運用が開始されたのを受けて、2020 年までの約 10 年間の「きぼう」利用の重点課題の検討が行われて“「きぼう」利用シナリオ 2020”がとりまとめた(2010)。そのシナリオでは、「宇宙環境利用の研究領域」として図 3b.5.に示す分野の広がりがある前提とされた。

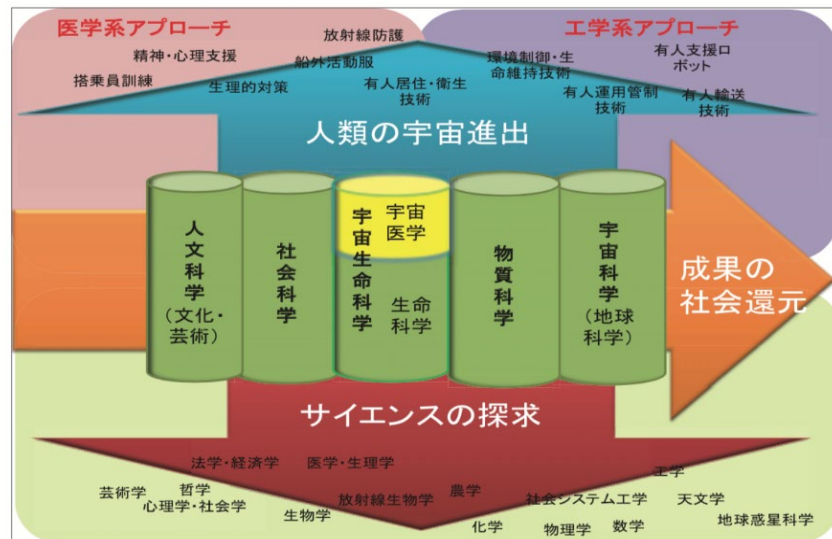


図 3b.5. 宇宙環境(@ISS)を利用した研究領域

(iii) 宇宙芸術の芽生えー「きぼう」初期利用段階の人文社会の取り組みー

「きぼう」利用(「重力がない世界」という環境場の利用)の成立性も考慮され、下記の考え方に沿って、芸術という切り口で初期段階の ISS「きぼう」の人文社会的利用の取り組みが進められた。

- 「重力の無い世界」では地上における五感の働きが阻害されるために、人の認識、感覚、感情や記憶のプロセスが変化する。
- 芸術の創作活動で重要な環境認識や自己認識が地上とは異なる「重力がない世界」において、環境の受容や芸術表現がどのような形式を取るのかという疑問の本質に迫るために、精神・心理を含む分野横断の課題を、芸術を軸として検討する。

その流れを図 3b.4.の下段に示すが、具体的には、準備段階での複数の大学と NASDA/JAXA との共同研究や利用多様化のためのフィジビリティスタディ(アイデア公募と、提案者と NASDA/JAXA との共同研究)が実施された。その成果を踏まえ、「文化・人文社会科学利用パイロットミッション」⁸として2回のアイデア募集が行われ、ISS 利用として世界初の人文社会分野の宇宙実験ミッション(計 18 テーマ)が実施された(2008～2012)。この実験ミッションは、「芸術家(テーマ提

⁸ JAXA 特別資料『文化・人文社会科学利用パイロットミッション成果報告書』(2015)
<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/559609>

案)」、「JAXA 技術者(実験準備)」、「宇宙飛行士(実験実施)」の三者が協働して創り上げた、全く新しい概念の「芸術共同実験」であった。

(iv) 多彩な活動の展開

JAXA での ISS「きぼう」での宇宙芸術実験を皮切りに、宇宙芸術を中核とした人文・社会科学分野の様々な取り組みが加速した。また、国立天文台でも独自の科学文化創造事業が推進されてきた。これらの活動に参加したアーティスト、キュレーター、宇宙機関職員などの有志を中心に宇宙芸術の研究と実践を行う宇宙芸術コミュニティ「beyond⁹」も 2010 年に結成され、東京都現代美術館『ミッション[宇宙×芸術]』展(2014)¹⁰、種子島宇宙芸術祭(2017-)、宇宙芸術年表¹¹の作成等、芸術を切り口に宇宙と社会・人類をつなぐ多彩な活動が様々な場面で展開されている。

5-4) 宇宙滞在の普及がもたらす意識や社会の変化

歴史的にも地動説の「コペルニクスの転回」など、科学技術の進歩により、人類は新たな視座を得てきた。JSASS2050 が実現する未来では市民が宇宙に滞在しており、人類の意識と社会に以下のような様々な変革をもたらすだろう。

(i) 地球近傍の宇宙旅行～重力・地球環境からの解放～

地球周回低軌道の大型宇宙構造物等を訪れる人々は、重力から開放された環境でレクリエーションやアクティビティを楽しむだろう。芸術には人をリラックスさせる効果があり、物理法則の違いを実感できる墨流し水球や舞踊などの芸術体験は、感性にも強く訴えるだろう。そして、地球に帰還した際は、重力や大気などの地球の環境や現象に新鮮な認識を持つだろう。

(ii) 月旅行～「俯瞰的な視点」の広まり～

アポロ計画で人類が目の当たりにした宇宙空間に浮かぶ閉じた系としての儚い地球は、「宇宙船地球号」に象徴される俯瞰的な視点を提起し、地球環境問題への意識向上につながった。多くの人が月から地球を眺め、人為的な国境のない地球、漆黒の中に青く美しく輝く儚い姿を目の当たりにし、俯瞰的な視座を得る実体験が一般に広まれば、地球環境や平和の大切さへの認識が高まるだろう。

(iii) 宇宙における人類の生活様式の変容～宇宙生活デザインの形成～

われわれは暮らしの中に求められる道具・日常品のデザインを最適化し適応してきた。月での生活で、地上とは異なる環境要件が求められる中で、新たな「月生活」を想定したデザインを提唱し、適合するように努める必要がある。

⁹ <https://www.facebook.com/beyond.spaceart>

¹⁰ <https://www.mot-art-museum.jp/exhibitions/cosmology/>

¹¹ <http://space-art-tanegashima.jp/pdf/chronology.pdf>

(iv) 地球外生命体の発見～人類概念や宇宙の連続性・一体性の認識～

利休は、想像力により狭い茶室に無限の世界(宇宙)を見出した。また、ISS 宇宙実験「光跡を伴う彫刻 Spiral Top」(2008-11)は、DNA の二重らせんと宇宙のスパイラル構造のつながりを視覚化した¹²。天文学の発展で地球外生命体が発見されるなら、理工学を超えて、哲学や宗教を含む人類の社会・文化に根源的な影響をもたらすコペルニクス以来の新たなパラダイムシフトとなる可能性がある。そして、地球外生命体と対峙する存在として人類全体を俯瞰的にとらえ、人類共通の価値観や平和を重視する「人類概念」が構築される可能性がある。一方、地球外生命体と人類に科学的な共通点が確認された場合、地球上の生命の起源に新たな可能性を提示する。さらに、元素レベルの物理的な組成では、地球もヒトも宇宙の一部であること、すなわち、宇宙(universe)とは「神羅万象」に象徴されるように、地球と対峙する存在ではなく本来地球との連続性を有することも再認識するだろう。

(v) 「宇宙社会」の建設～国家概念を超えたコスモポリタンの形成～

様々な国籍の人々が国家・文化の違いを超えて月に社会を形成すれば、領土や国民を前提とする従来の国家概念と異なる新たな領域概念(宇宙社会、コスモポリタン)が生まれる可能性がある。そのような社会の統治はどのような形で形成されるのか、法政策分野での検討が必要となる。宇宙社会のガバナンスを適切に行うためには、宇宙環境での行動の変容について、生物学・社会学・心理学などを含む総合的な検討も必要となるだろう。宇宙社会においては地球の環境・文化から解放された新たな芸術も創造され、やがて新たな文化や文明が形成されるだろう。

5-5) 「宇宙に対する人類の取組み」と「月の人間社会」構築の道筋

ー「月の人間社会」構築に向けた「宇宙の人文・社会科学研究」のビジョン(案)ー

「人類の宇宙進出」で人文・社会科学研究が担うべき役割は何か？ この問いに答えるには、「宇宙と人間の関わり」を文理融合の立場から総合的に捉える適切な視座が必要になる。この目的から、「宇宙への人類の(当面の)取組み」の姿を鳥瞰的に捉える試みがなされた(第 5-3)項の脚注 7 参照)。それが「図 3b.6. 宇宙への人類の取組み(宇宙曼荼羅図)」ある。人類の宇宙進出の流れを示すこの図から、①「人類の宇宙進出」の発展段階の可視化、②各段階における「自然科学・工学・技術開発面での課題」、そして、③各段階で顕在化する「人文・社会科学面の課題」を示し、「自然科学・工学・技術開発」と「人文・社会科学」の協働の取組みとして進められるべき「人類の宇宙進出」の姿が浮き彫りになってくる。「月の人間社会」についても、その構築の段階的取組みをこの図に投影することで、「宇宙の人文・社会科学研究」の位置付け(役割)がイメージしやすくなる。

¹² 逢坂卓郎「光跡を伴う彫刻 Spiral Top」(2008-2011)

https://tsukuba.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=28818&item_no=1&attribute_id=17&file_no=1

(i) 宇宙曼陀羅図

宇宙を対象とした自然科学・工学系と人文・社会科学系の連携した活動の様相を把握しやすくするために、密教の「曼荼羅図」の名を借りて「宇宙曼陀羅図」と称したが、その概要は：

- 縦軸は 18 世紀末から 300 年程度の範囲で、「憧れ/好奇心/パイオニア精神」が端緒となる。
- 左端の「宇宙システムの発展」は宇宙機や運用システムなどインフラ群の発展段階を示す。
- 「低軌道往還」や「月面探査」の宇宙システムが稼働し始めた頃、地上の活動では、自然科学と人文科学それぞれの分野で様々な可能性追究の試みがなされた。
- これら諸活動が、宇宙システムへの新たな要求になって次の段階への発展を後押しし、その結果、自然科学・工学活動と宇宙システム開発並びに人文・社会科学活動とが「共進」的に発展した。
- 次の「低軌道常時滞在」の段階では、活動規模の拡大に伴って自然科学・工学系と人文・社会科学系の連携活動が不可欠となり、地球と宇宙の協調行動がより一層強調されるだろう。
- 更に進んで月や火星を含む「深宇宙の探索活動」の段階では、宇宙滞在が常態となり、「生存・活動圏の拡大、地球と宇宙の調和、人類の福祉」などの諸課題への取り組みがなされるだろう。

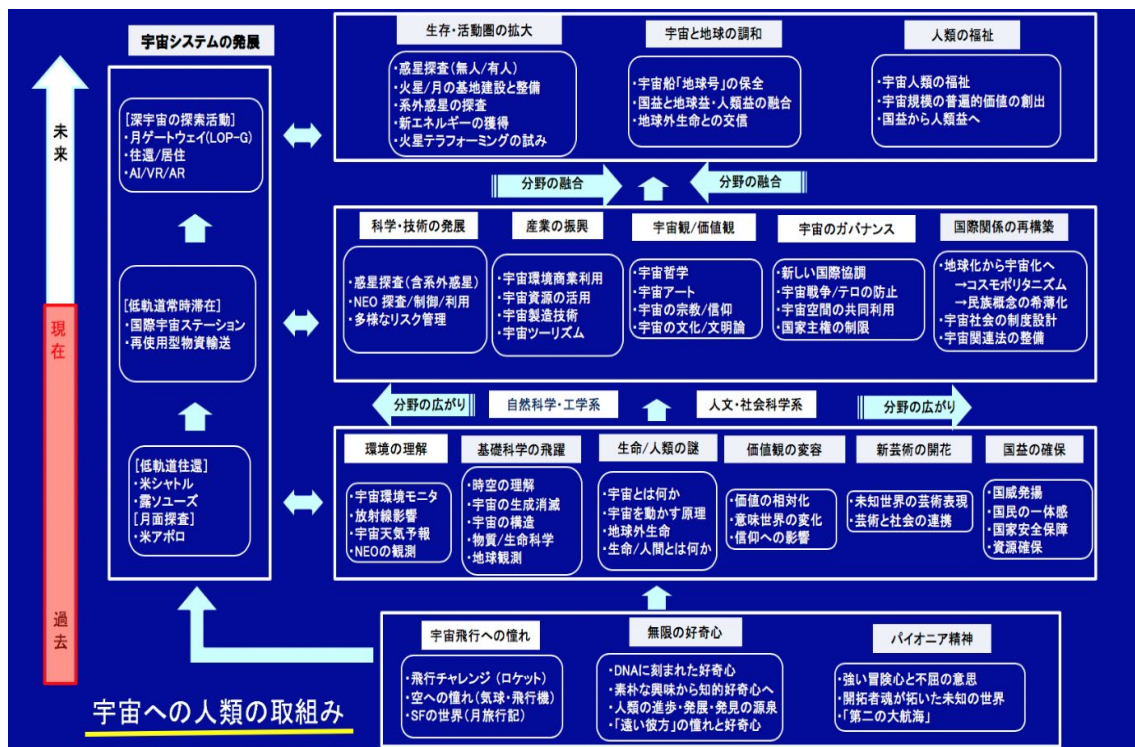


図 3b.6. 宇宙への人類の取り組み (宇宙曼陀羅図)

(ii)「月の人間社会」構築への道筋と人文・社会科学研究のロードマップ(案)

「月の人間社会」がどのように構築されるのか、その道筋に対応した人文・社会科学面の研究課題を抽出するために、「参考文献」¹³を踏まえて、次の4つの段階をその道筋として仮定した。

【第1段階】「ロボット探査ミッション」の実施,「前哨基地」の建設

【第2段階】最初の「月面基地」の建設,「月資源利用」着手,南極域での「人間活動」の展開

【第3段階】「月資源利用」の物資製造,南極域の「社会インフラ」の整備拡充,「居住環境」整備

【第4段階】南極周辺域の「居住環境」整備,全球での「社会インフラ」整備拡充,「人間の移住」

一方,「JSASS 宇宙ビジョン 2050」の「月面基地」構築は、概ね【第1段階】の初期に相当し、それに先立つ【準備段階】を追加想定した上で、宇宙ビジョン 2050 に対応する人文・社会科学研究の主要課題を抽出、当面のロードマップ(案)として集約した。これを表 3b.3 にとりまとめる。

5-6) まとめ(「宇宙の人文・社会科学研究」推進のビジョン)

第2章の宇宙ビジョン 2050 はその延長線上に「“地球を含む”宇宙の人間社会」(「月の人間社会」建設は、その最初の取り組み)を想定している。その実現には人間が介在し、宇宙の環境問題を包含する SDGs を含めた人文・社会科学研究の取り組みが不可欠なものとなるだろう。

レオナルド・ダ・ヴィンチが科学者・技術者であり同時に芸術家(アーティスト)でもあったように、かつて科学技術と芸術(アート)は共にあった。近年は異なる学問・職業として発展を遂げたが、宇宙の人間社会を実現するためには文理を融合した総合的な検討が不可欠である。すなわち、これまで宇宙開発利用に関する研究の中核をなしてきた理学・工学・技術開発・医学の分野、および、近年研究が進む宇宙法・国際政治や宇宙芸術の分野だけでなく、人文・社会科学の多彩な分野も本質的に関わってくる。

本項は、日本航空宇宙学会が初めて「宇宙の人文・社会科学」に関する検討を行った成果であるが、ごく限られた期間・参加者による検討であり、検討はまだ端緒に過ぎない。今後も日本航空宇宙学会が人文・社会科学分野の研究開拓や研究推進に取り組むとともに、学際的な交流も促進し、人類が英知を結集して宇宙の人間社会を実現するための役割を積極的に果たすことが期待されている。

¹³ 「参考文献」 David Schrunk / Burton Sharpe / Bonnie Cooper / Madhu Thangavelu : “THE MOON-Resources, Future Development, and Settlement” 2nd Ed. Springer PRAXIS (2008)

表 3b.3. 「宇宙の人文・社会科学研究」のビジョン(案)＜当面の研究課題の展望＞

分野	現在までの活動実績 (ISS 等での活動)	【準備段階】の主要課題 現在～2030 頃	【第 1 段階】(初期)の主要課題 2030 頃～2050 頃
ガバナンス	1. 宇宙条約(1967) 2. 月条約(1979) (その他、国連の「宇宙の平和利用に関する委員会」の活動が継続中) 3. 宇宙ステーション計画 IGA(1988) 及び MOU(1989) 4. JSASS 宇宙法政策委員会の活動	「月のガバナンス」の理念構築と法体系整備 1. 宇宙開発利用の法体系に関わる国際合意 2. 月資源利用の国際取り決め 3. 民間事業者の月開発利用の国際協働プロジェクト参入に関わる法律整備並びに国際合意 4. 「月のガバナンス」の理念構築 5. 「月政府」の理念並びに概念の提案	1. 「月のガバナンス」設立の準備活動 2. 専門要員の養成確保(専門教育・人員養成のための国際教育機関の設置と運営) 3. 「地球と月の連携活動」(NGO・NPO・各種民間事業者の参入を含む)を可能にする法体系の整備 4. 「月から地球への貢献」に関わる法的枠組み整備
人文学	1. 国際高等研究所の取り組み(1996-2008) 2. NASDA/JAXA の取り組み(1996-2015) 3. 京都大学の取り組み(宇宙総合学ユニット:人文学を含む総合的な取り組み)(2008-) 4. 宇宙人類学の挑戦 5. (日本文化人類学会)	主として、「月への生活圏拡大」、「地球社会と月社会の協力連携」、及び「地球と月の持続的発展」のための理念構築(「月のガバナンス」の理念に反映) 1. 「人類の宇宙進出」・「月の開発利用」・「月の人間社会の建設」に関わる基本理念の構築 2. 「地球への貢献」に関わる基本理念の構築	主として、人文学に関わる地球と月の連携活動の促進 1. 文化・教育面での地球と月の連携 2. 月から地球への貢献(新たな「宇宙の視座」、「観光資源としての月の価値」等) 3. 月の文化創生の取り組み 4. 月を足場にした「宇宙と人間」の取り組みの模索
社会科学	(これまで宇宙や月に特化した取り組みはない) (地球の南極基地の越冬隊員に関するに社会科学的研究の実践実績あり)	地球外人間社会のガバナンス構築のための社会科学実験(月社会を中核とした地球外人間集団の社会ルール構築) 1. 「軌道上施設」での小規模人間集団に関する行動科学研究(精神・心理学を含む) 2. 「月面基地」並びに「月の人間社会」を想定した大規模人間集団に関する行動科学研究(精神・心理学を含む)	「月の人間社会」の成立のための社会科学の実践的取り組み(科学実験) 1. 月の閉鎖環境での滞在に対する精神・心理問題の対処 2. 月の居住環境・生活環境・レクリエーション環境の提案(バックミンスター・フラーの活動と類似の活動の模索) 3. 「月の人間社会」を想定した異文化交流の試み
芸術	1. 「きぼう」利用の文化・人文社会科学利用パイロットミッション(2009-2012) 2. 宇宙芸術を対象とした展覧会(企画展)等 (その他、多様な取り組みが存在)	新たな「アート概念」の提案・創出の試み 1. 月での芸術活動を視野にいった「宇宙芸術」の模索 2. 人類が宇宙で生活することを前提とした「宇宙生活デザイン」領域の研究	初期の月面基地での「月アート」実践 1. アーティストによる月での宇宙芸術の取り組み 2. 「宇宙生活デザイン」の実践と研究開発 3. 旅行者への普及啓発
月のSDGs	「月」に特化した SDGs の取り組み実績なし (Sustainable Development Goals)	「月の SDGs」の設定に向けた活動 1. 「地球の SDGs」に対応した「月の SDGs」の概念構築 2. (「月の社会的共通資本」の概念検討)	1. 「地球と月」を人間の活動圏・生活圏と見なした際の「包括的 SDGs」の設定 2. (「地球と月」を包括した「社会的共通資本」の理論構築の試み)

参考) 宇宙の人文・社会科学研究のロードマップ検討研究会のメンバーの構成(五十音順):

縣秀彦	国立天文台【話題提供】
逢坂卓郎	筑波大学【話題提供】
大塚成志	宇宙航空研究開発機構
内丸幸喜	高エネルギー研究所
坂本香子(幹事)	宇宙航空研究開発機構【5-4)執筆・全体編集】
清水順一郎	元宇宙航空研究開発機構【5-3), 5-5)執筆】
中島史朗	宇宙航空研究開発機構
堀川康	元宇宙航空研究開発機構
水野素子(主査)	宇宙航空研究開発機構【全体企画・編集】
室山哲也	元NHK
森山朋絵	東京都現代美術館【話題提供】
森脇裕之	多摩美術大学【話題提供】
柳川孝二	元宇宙航空研究開発機構【5-3), 5-5)執筆】

6) 宇宙ビジネスのロードマップ【2021 年度増補】

現状では、宇宙ビジネスというものは限られたものである。特に、多くの宇宙ビジネスが、政府の予算を使うことでおこなわれてきた。それに対し、一般のビジネスでは、民間が必要なものやサービスを受けるためにお金を出し、それを提供することで対価をえるという形式をとっている。しかし、現在では、宇宙ビジネスでこの形態でおこなわれるものは限られている。そして宇宙は遠い存在でもある。一般の人が宇宙に行く世界を多くの人が夢見てきたが、実際には宇宙に行ったことのある人は人類史上600人に満たず、そのほとんどがプロの宇宙飛行士である。では、2050年の地球を離れた場での人類の経済活動としての宇宙ビジネスはどのようなになっているのか。もちろん正確に予測することは不可能である。しかしながら、2050年の宇宙ビジネスを思い浮かべながら、そこに向かって今からビジネスをつくりあげていくことを目指している専門家がいても事実である。本項は、将来の宇宙ビジネス実現を目指して第一線で活躍している専門家の考える2050年の宇宙ビジネスと、そこに至る道筋を記載したものとなっている。また、宇宙ビジネスを实践する上では、将来においてより高い目標を設定し、そこを目指すことが重要である。そのため、本項の2050年における目標値は、他で想定されているものよりも大きくなっていることがある。それは、不確定な2050年の将来像においてより大きなビジネスを実現することを目指している検討メンバーであるからこそ、高めに設定してあると理解していただきたい。（月面活動、さらには火星での活動などは同じビジネスを検討している人たちの間でも大きく差がある。本章では差があることは理解した上で、その差を埋めることなく記載している。）本項では、宇宙ビジネスをまず大きく3つのカテゴリーに分類する。一つ目は、宇宙ビジネスの前提となる宇宙輸送にかかわるビジネスである。二つ目は、場所による宇宙ビジネスを俯瞰したものとして、地球近傍拠点および月拠点でのビジネスである。三つ目は、それらの場所でおこなわれると考えられる人々の宇宙活動や生活に関わる具体的なビジネスをまとめたカテゴリーである。三つ目の具体的なビジネスとしては、食ビジネス、ヘルスケアビジネスおよびエンターテインメントビジネスについて述べる。

- 1) 宇宙輸送にかかわるビジネス
 - ① 宇宙輸送ビジネス
- 2) 地球近傍拠点および月拠点でのビジネス
 - ① 地球近傍におけるビジネス
 - ② 月におけるビジネス
- 3) 人々の宇宙活動に関わるビジネス
 - ① 食ビジネス
 - ② ヘルスケアビジネス
 - ③ エンターテインメントビジネス

もちろん、一般の人々の活動圏が月にまで拡大していると想定される 2050 年において、宇宙ビジ

ネスがこれらに限定されるわけではない。しかしながら、これらの分野において 2050 年の宇宙ビジネスとそこに至る道筋を、専門家がどのように考えているかを示すことは価値のあることであるとする。

6-1) 宇宙輸送にかかわるビジネス

① 宇宙輸送ビジネス

(a) 2050 年のビジネス状況

2050 年は様々な輸送システムの実現により、宇宙へのアクセスが容易にできる時代となる。低軌道への無人及び有人輸送サービスは民間企業によって安定的に提供され、輸送システムは再使用型であることはもちろんのこと、環境にも配慮した輸送システムが運用されているだろう。

今後新たに生まれ大きく成長すると想定される輸送ビジネスを 5 つに整理した。なお、現時点で既に存在する低軌道や静止軌道への人工衛星等の輸送ビジネスについては割愛する。

- サブオービタル飛行: 数十分～数時間の準軌道飛行サービス。
- オービタル飛行: 数日～1 週間の軌道上ホテルなどの低軌道プラットフォームや低軌道滞在型サービス。
- P2P (Point to Point: 高速 2 地点間移動): ビジネスパーソン及び富裕層を対象とし、太平洋や大西洋横断をマッハ 3～5 の速度で高速飛行するサービス。物流における高速輸送も対象となる。
- 月輸送: 月面開発及び基地の維持に必要な人や物資の輸送サービス。
- 火星輸送: 火星開発及び基地の維持に必要な人や物資の輸送サービス。

これらの輸送サービスにおける地球側の拠点となるのがスペースポートである。図 3b.7 のように、スペースポートにはヒトやモノが集まり、将来の宇宙産業の中心的位置付けとなる。今後各国がスペースポート誘致に力を入れ、スペースポートを中心とした巨大な経済圏が生まれることになる。世界各地のスペースポートから毎日のように宇宙便が出発する光景が見られるだろう。スペースポートを制するものは宇宙産業を制するとも言える。

(b) 2050 年に至るまでのロードマップ

2020 年から 2050 年にかけての輸送ビジネスの市場発展マップを図 3b.8 に示す。(a)で説明した5つの輸送ビジネスカテゴリーにおいて、まだ開発途上で市場が立ち上がっていない段階から、市場初期、成長期、成熟期、衰退期と市場の発展の段階を時系列で示す。

2050 年における各ビジネスの予測は以下である。

- サブオービタル飛行: 世界で 20 箇所のスペースポートからそれぞれ毎日 2 便の宇宙行きが出発。年間の旅行者は約 10 万人。

- オービタル飛行: 5 カ国 (米国, 英国, UAE, 中国, 日本) のスペースポートから毎日 1 便 1 便が出発. 年間の旅行者は数千人~約 1 万人.
- P2P: 太平洋及び大西洋横断の 20 路線においてそれぞれ 1 日 2 往復, 50 人乗りのスペースプレーンが出発. ロサンゼルスー東京間のフライトは 11 時間から 2 時間に短縮. 年間の利用者は約 150 万人. 人の輸送に加え, 高速輸送による新たな物流市場の開拓が期待される.



図 3b.7 将来のスペースポートのイメージ(スペースポートシティ構想図)

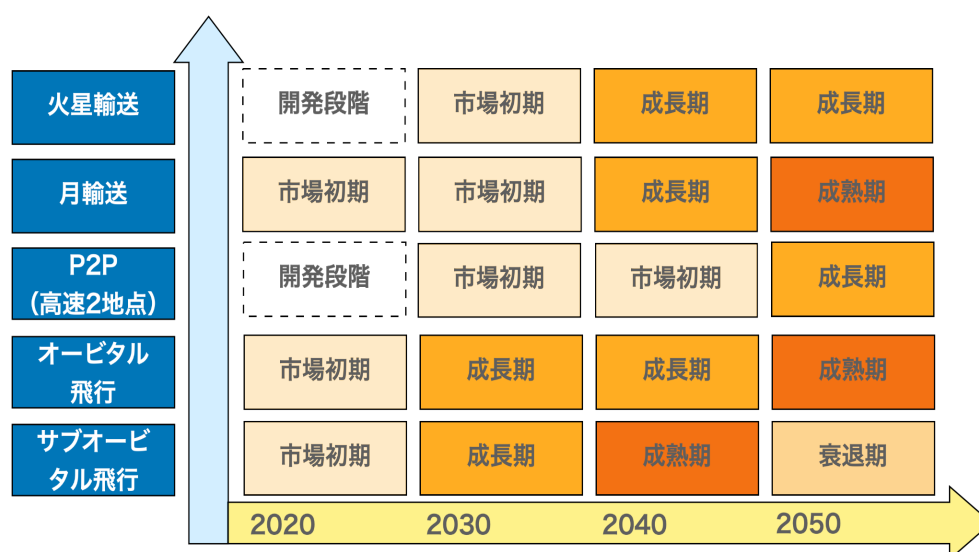


図 3b.8 輸送ビジネスの市場発展マップ

- 月輸送: 年間 100 人～数百人程度が月に出発し滞在。
- 火星輸送: 民間企業次第ではあるが、年間最低数百人、最大で数十万人が渡航する可能性もある。火星は旅行や往復飛行ではなく片道切符で移住する人が大多数。

これらの輸送サービスを提供する複合的なスペースポートが世界で複数必要となり、既存の空港関連市場に匹敵する市場となる可能性がある。

6-2) 地球近傍拠点および月拠点でのビジネス

①地球近傍におけるビジネス

(a) 2050 年頃のビジネス状況

- ・ 輸送コストの劇的な低下、有人往還機の実現等により、地上から最も近い低軌道の宇宙空間と地上との行き来が高頻度化され、複数の軌道において、特定の機能に特化した分散型拠点を民間企業が運営している。また、同じ軌道上にある拠点間を、軌道間輸送機、ロボティクス軌道上サービス機が複数行き来している。各拠点は、地上における産業、研究、学校教育から日常生活に至る各エコシステムの一部を担う、一つのユニークなプラットフォームとしてビジネス利用され、持続的に地上へ成果を還元し、地上でのビジネス創出に貢献している。
- ・ 低軌道衛星コンステレーション群との通信中継・データ処理拠点、同衛星の修理・回収あるいは除去・軌道上製造(材料を再利用)・衛星放出等の循環型エコサービスを提供する拠点、静止軌道や月以遠探査等への支援サービスを行う拠点も、民間企業により運営される。
- ・ また、滞在拠点も民間企業により運営され、常時往来する民間旅行者は、船外活動体験、軌道間輸送による別モジュール訪問等、多様なアクティビティを体験できる。
- ・ 回転式の巨大宇宙コロニーも民間により運営され、太陽エネルギーを活用し、一部都市が建設され、人口増・エネルギー不足・環境汚染等の課題に対する、宇宙との新たな共存の時代に移行する。



図 3b.9 2050 年代の地球近傍の活動イメージ(上記の各イラストは©JAXA)

(b) 2050 年代に至るまでの想定シナリオ

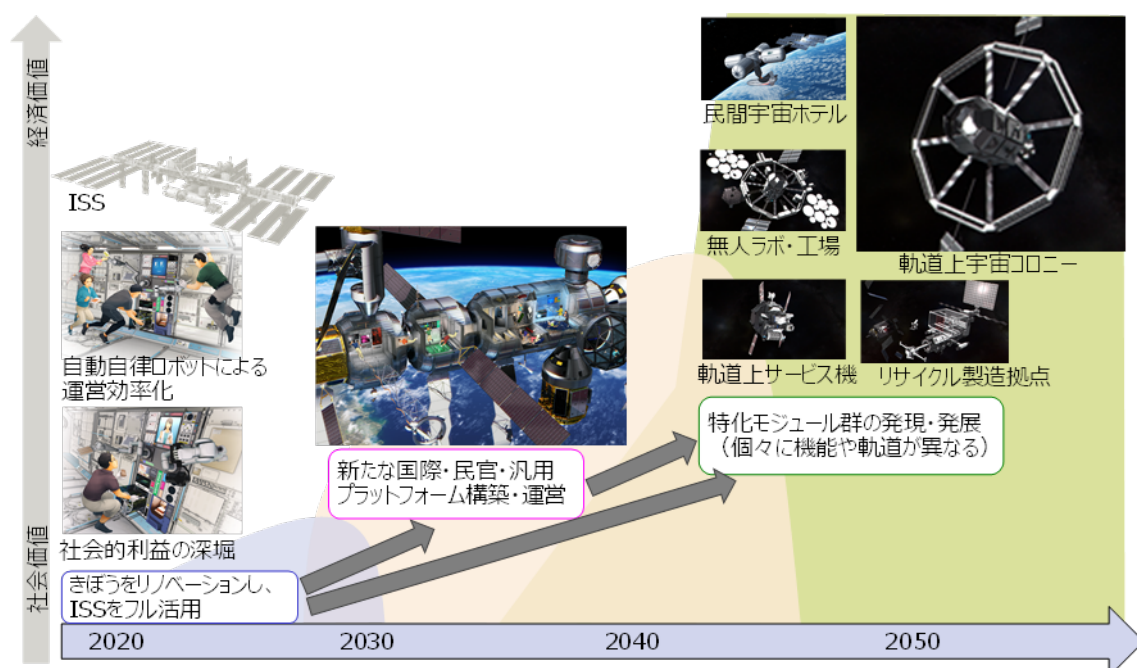
複数のシナリオが想定され、ISS(International Space Station)運用終了後は、そのまま機能特化型・分散拠点へ移行する可能性もあり、時期も変化し得るが、ポジティブなシナリオとしては以下の通りである。

(ア)2020 年代は、ISS「きぼう」のリノベーションにより機能・性能が向上し、科学技術実験や宇宙探査に向けた技術実証の場、そして、多様な事業・軌道上サービスを実証する場としてフル活用される。拠点の運営は、主に地上からの民間遠隔操作サービス、軌道上での自動化・自律化サービスで実施される。また、定期的に民間宇宙旅行者が訪問する。

(イ)2030 年代は、ISS のノウハウを生かし、官民連携、国際協力を前提とした新たな汎用プラットフォームの構築・運営が始まる。より民間主体のプラットフォームとして運営され、多様な民間サービスが提供され、低軌道における人類の社会・経済活動が徐々に拡大していく。

(ウ)2040 年代は、民間ビジネスとして成立するサービスに特化した拠点が複数分散して運営される(ホテル専用、実験ラボ・工場、リサイクル・再生プラントなど)

(エ)2050 年代は、人口増・エネルギー不足・環境汚染等の社会課題に対する新たな解決策として、巨大宇宙コロニーが運営され、一部都市が建設される。宇宙コロニーでは、水、酸素、炭素、窒素、ケイ素、各種金属などの主要元素の物質循環がおこなわれ、地球からのリソース供給にほぼ依存せず、自立した軌道上システムとして継続的に発展できるようになる。また、無線エネルギー送電によりコロニー間、宇宙機間でエネルギーの供給や融通がおこなわれる。



② 月にかかわるビジネス

(a) 2050 年の月面社会の概況

2020 年 10 月にアルテミス合意が締結され(2021 年 7 月現在 12 か国が参加), 有人月周回ステーション Gateway の建設開始が 2024 年に予定される等, 国際的な月探査の潮流が活発化している。日本でも民間主導の産業コンソーシアムに延べ約 200 社の企業が参加し, 2040 年~2060 年頃を見据えた月面社会と民間ビジネスの在り方を検討している。検討結果の一例を図 3b.11 に示す。

現在から約 30 年後の月には, およそ数 100~数 1000 人の常時滞在人口からなる月面社会が形成されている¹⁴。これは精密な予測に基づくものというよりも, 国内外の官民の構想や目標設定に基づく推定値であり, そのため幅のある表現になっている点に留意されたい。

現在, 地球上の南極には年間約 2000 から 4000 人程度が滞在するが, 近しい規模の生活圈及びインフラが 2050 年頃の月面及び月周回軌道上¹⁵に築かれている必要がある。月面と地球の南極の大きな違いは, 真空, 熱環境(極高温・極低温), 放射線等の宇宙空間特有の環境要素に加え, 月が地球から 38 万 km にあるため物資や支援の供給源との距離が非常に遠方にあることであり, 有人滞在が継続, 拡大していく上で, 輸送のアクセスコストの低減のみならず, 月面での地産地消の資源利用の確立(水資源に基づく水素エネルギーや太陽光, 鉱物資源)等, あらゆる面で持続可能性維持のための施策が必要である。2050 年にはこれらの課題が一定のレベルで解決していると共に, より多くの人々が安定的に生活を営んでいくための, 生活利便性や QoL(Quality of Life)に関わるサービス・インフラが必要となる。

(b) 2050 年の月ビジネス

月面での有人滞在が前提となる 2040 年代以降には, 既存の月ビジネスに加えて, 月面及び月周回軌道上の人々の社会経済の利便性と質を高度化するための機能やサービスの重要性が一層高まるだろう。

具体的には, 旅客や物資を運ぶ月-地球間の往還輸送, 月面上の輸送, 水資源・鉱物資源や太陽光を活用した資源取得から発電・送電に至るまでのバリューチェーン運用, 月面と月周回軌道が一体となった通信ネットワークの運用, 食や生活を支える各種サービス, 月旅行・観光といった産業が主となる。これらのビジネスには BtoB, BtoC の要素が多く含まれ, それまで以上に民需市場のプレゼンスが高まると想定する。月を開拓し社会を形成することの経済合理性がさらに高まるためには, 月独特の環境条件や, 既存のインフラや法規制, 慣習が存在しないといった社会条件を踏まえた, 技術・産業のイノベーションが創出され, その成果が月面社会のみならず地球

¹⁴ 各機関の 2040 年の月面・月周回軌道の想定人口より推定: United Launch Alliances "Cislunar 1000"では月面および月周回軌道に 1000 人、ispace の"Moon Valley 2040"構想、商業月利用研究会、フロンティアビジネス研究会、SPACE FOODSPHERE では月面に 1000 人、内閣府委託「月の開発利用に係る技術動向調査」(有人宇宙システム)では年間延べ 100 人

¹⁵ 月面社会を支える周回軌道上の衛星インフラや中継輸送拠点等

社会にも還元される経済的な循環が非常に重要であり、現時点では想定しえないビジネスの創出にも期待をしたい。なお、この時代におけるビジネス概要を整理すると表 3b.4 のようになる。

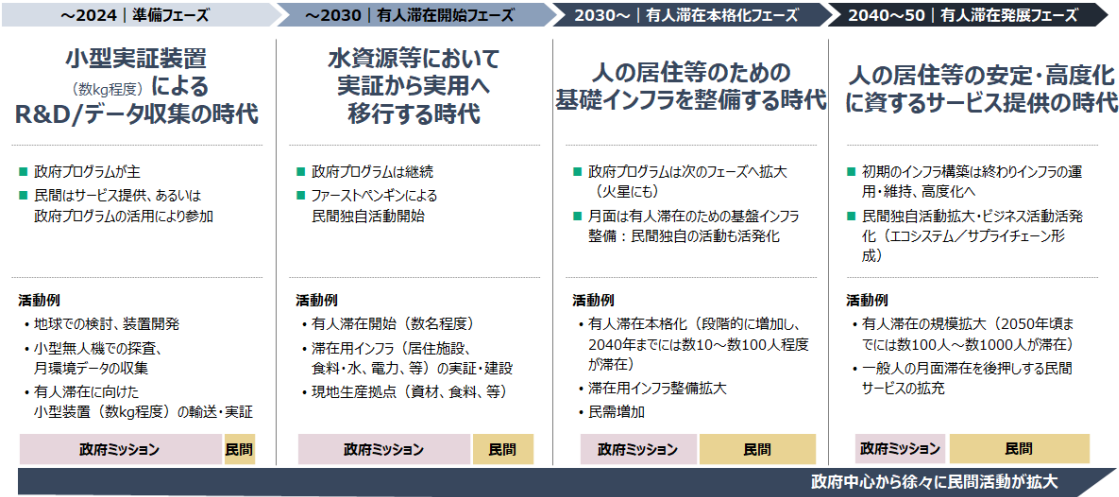


図 3b.11 2050 年の月面社会に向けたロードマップと民間市場¹⁶

表 3b.4 2050 年の月ビジネスの概要

業種		サービス概要
輸送	地球-月	ロケット, 周回機, 着陸船の運航
	月面-月周回軌道	着陸・上昇宇宙船の運航
	月面表面	ローバー等モビリティ運用
資源・エネルギー	資源採掘・精製・保管	水や鉱物資源採掘・太陽光パネル設備運用
	発送電	無線送電ネットワーク運用
通信	通信衛星網・無線通信網	通信サービス
測位	測位衛星網(LNSS)	測位データサービス
水・食糧	月面農場・食品工場	食品加工・提供サービス
施設運用	生活拠点・設備運用	有人滞在施設の運用
	スマートインフラ	インフラノード間をつなぐメッシュネットワーク管理
旅行	ホテル・観光	旅行関連施設やツアー等の運営
エンターテインメント		コンテンツ・ビジネスやスポーツ等の事業運営
その他		月発イノベーション及び地球社会への還元

¹⁶ 出所:「商業月利用研究会」資料より作成。月面に滞在する人数予想は他の部分と異なるが、出典のまま記載してある。

6-3) 人々の宇宙活動に関わるビジネス

① 食ビジネス

(a) 2050 年のビジネス状況

地球から 38 万 km に位置する月や 5600 万～1 億 km に位置する火星における持続的活動を想定した場合、食料の安定的な確保や地球からの補給量削減、極限環境における QOL の確保という観点において、資源循環型食料供給システムと食に関連した QOL マネジメントシステムが不可欠となり得る(図 3b.12)。基地の運営主体に対する当該システムの販売と月面基地や火星基地におけるシステム運用サービスにかかるビジネスの他、当該システムを開発する過程で生じる技術等が地上技術の高度化にも繋がり、相応の地上波及効果が想定される。



図 3b.12 高度資源循環型食料供給システムと QOL マネジメントシステム要素のイメージ

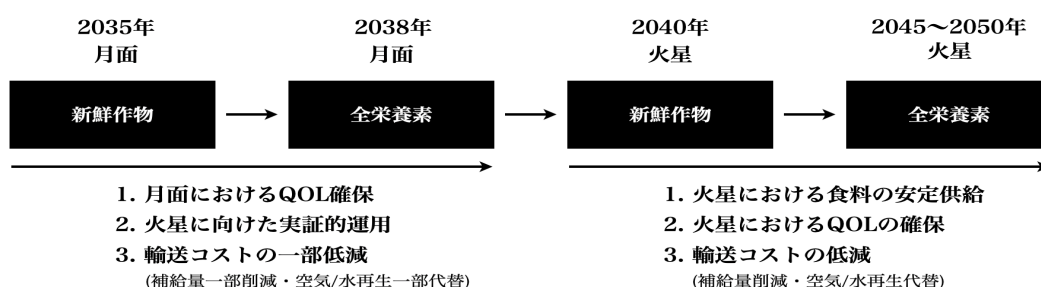


図 3b.13 高度資源循環型食料供給システムと QOL マネジメントシステムの実装ロードマップ

(b) 2050 年に到るまでのロードマップ

SPACE FOODSPHERE においては、2030 年代半ばにかけて資源循環型食料供給システムと QOL マネジメントシステムの研究開発を実施し、月面をテストベッドとして実装/運用、2040 年代

には火星に同システムを実装するロードマップを想定している。また当該システムを開発する過程で生じる技術等は順次地球上のビジネスとして活用する想定である。

② ヘルスケアビジネス

(a) 2050 年のビジネス状況

低軌道においては民間企業が運営する滞在拠点の往来が高頻度化することで、滞在者や旅行者の健康管理に不可欠なビジネスとしてヘルスケアサービスが提供されている。宇宙特有の環境における心身の健康管理から医療分野まで、日常生活において共通的に必須となる項目は滞在日数に応じて宇宙旅行等のパッケージに組み込まれるとともに、快適な宇宙滞在のための個々人の健康管理状態に応じたオプションサービスも多様化され、地上での事前訓練や地球帰還後のリハビリ含めて宇宙旅行ビジネスの一端を担っている。関連する職業として地上で支援を行う航空宇宙医師(フライトサーजन)ビジネスが活発化すると共に、軌道上ホテルには宇宙旅行者向け医師(スペーストラベルサーजन)が常駐している。

月・火星及びその周辺滞在においては、職業宇宙飛行士を主な対象とした健康管理サービスを提供する事業者が、国や民間企業向けに事業を展開している。具体的には、月・火星、宇宙船内における低重力や宇宙放射線などの宇宙環境への対応、長期閉鎖・地球からの隔離環境への対応としての遠隔医療、遠隔診断、長期孤立への健康影響対応など、健康管理から医療分野までの全ての領域(治療、診断・検査、予防、環境対策)に対応したヘルスケアサービスが提供されている。月面基地等の滞在拠点においては、滞在人数に応じて複数の医師が常駐するなど、医療・ヘルスケアサービス体制が整備されている。

また、低軌道、月・火星等に向けて生み出されたヘルスケア関連技術及びサービスは、地上における新規ビジネス創出にも貢献し、持続的に成果を地上に還元している。

(b) 2050 年に至るまでのロードマップ

ヘルスケアビジネスは、有人宇宙滞在技術の一つとして、宇宙旅行者を含む滞在人数に応じて当面は指数関数的に成長する分野である。よって、低軌道ビジネス、月・火星探査の発展状況に応じることを前提となるが、現時点でのポジティブな段階的シナリオは以下の通りである。

- ・2020 年代は、ISS への商業宇宙旅行のスタートに合わせ、これまでの ISS における健康管理運用の成果なども活用し、主に富裕層旅行者に向けた高付加価値のヘルスケアサービスが複数創出される。また、月面及び月周回における職業宇宙飛行士を対象に、各々の環境に応じて必須となる健康管理・医療支援サービスの宇宙機関向けへの提供が開始される。
- ・2030 年代は、低軌道上における民間主体で運営されるプラットフォームにも滞在者向けのヘルスケアサービスが組み込まれる。月面基地への常時滞在がスタートし、高度化された技術をベースとした健康管理・医療体制に移行し、一部のサービスを民間がビジネスとして担う。また、低軌道宇宙旅行ビジネスや地上への成果還元も進む。
- ・2040～2050 年にかけて、月・火星滞在におけるヘルスケア事業がビジネス実装されるとともに、低軌道への滞在人数の増加に合わせて複数のヘルスケアサービス事業者がビジネス展開する。

③ エンターテインメントビジネス

(a) 2050 年の宇宙エンターテインメントビジネス状況

有人宇宙開発は、宇宙における生存のためのインフラづくりが活動の中心であった。しかし、宇宙空間や月面での長期生活が始まると、快適な生活や楽しさ・生きがいといったポジティブな QOL を生み出す“文化”創出が重要となる。その楽しさや生きがいを創出するために不可欠なのがエンターテインメント(娯楽)である。

宇宙での生活や旅行が軌道にのり、宇宙ならではの体験価値を楽しむエンターテインメントに多くの人たちの期待が集まる。これまで宇宙産業に関わりのなかった企業や文化人がこの B2C マーケットのポテンシャルに着目し、それぞれもつ専門性を活かし、宇宙エンターテインメントビジネスへの参入が加速し始める。宇宙旅行の訪問&滞在先である宇宙空間拠点は、ホテル設備をもった“宙の駅”として物流や人流の要となり、微小重力体験を自在に楽しめる宙アミューズメントスポットとしてにぎわう。特に船外での宇宙遊泳が人気を集めるだろう。

エンターテインメントは、旅行者だけでなく月で働き生活する人たちにも、厳しい環境での生活が余儀なくされる日々、QOL の維持、心と身体のリフレッシュのために欠かせない。月でのエンターテインメントは、まずは憧れの月面スポット(地球の出や月面最初の一步など)を訪れるところから始まるが、微小重力や 6 分の 1 重力で楽しむスポーツエクササイズのような、宇宙ならではの体験として人気が高い。翼をつけて空中を舞えるムーンフライングといったものも登場している。さらに、月面でスポーツ競技をしようという構想も本格的には計画段階となり、まずはロボットやアバターたちによる地球からの遠隔操作のサッカー試合などからスタートしている。宇宙での音楽や絵画といった創作活動も盛んになり、映画やミュージック・ビデオの撮影やアーティストによるライブコンサートも生中継され、多くの地球ファンを魅了している。このように月や宇宙空間に滞在している人向けのエンターテインメントだけではなく、月で得た情報を地球に送り、地球上で VR/AR で擬似的に宇宙を楽しむ多くの人たちを対象としたエンターテインメントビジネスも盛んとなっているであろう。

地球と月はすでにひとつの経済圏・生活圏になっており、その中心となるのが、宇宙へのリフトオフサイト・Spaceport City と、宙の駅である宇宙空間拠点、そして月の基地である。この 3 つのゾーンは大容量光通信・テラヘルツ通信によってリアルタイムで繋がり、宇宙へのビジターはもちろん、宙スポットや月で生活する人たち、さらには地球にいる多くの家族や友人、仲間たちに多彩な時・体験を提供してくれる。3 ゾーンの人たちが共に楽しめる(“共楽”)統合型リゾート(IR)として宇宙エンターテインメントビジネスゾーンとして捉えられている。(図 3b.14)

宇宙エンターテインメントの分野でも様々なパフォーマーの登場により新たなエンターテインメントジャンルを形成している。宇宙エクササイズを考案した宇宙パフォーマーや、宇宙をモチーフにしたお笑い芸人、さらには宇宙を面白おかしく話すお笑い芸人も登場し、ますます宇宙に関心をもつ子供たちが増えている。このように、メディア・文化を含めた宇宙エンターテインメント界の拡大は宇宙産業全体の活性化に貢献している。世界各国の人たちは、自動翻訳機によるスムーズな会話も楽しめるようになり、皆地球人としての自覚をもって参加している。

(b) 2050 年に至るまでのロードマップ

2020 年から 2050 年にかけてのロードマップを図 3b.15 に示す。2020 年代にはサブオービタル宇宙体験や ISS への滞在などの宇宙旅行が開始される。その後、民間主体のプラットフォームである宇宙空間拠点での滞在や、月周回へと拡大し、さらに月面に滞在する宇宙旅行が始まっていくと考えられる。その先には、火星への旅行へとつながっていくと考えられる。放送・通信やデジタル技術などの革新により、地球と月、その近傍の3つのゾーンでは、音楽やスポーツ、アートなど様々な文化イベントが実現し、地球をベースにその領域を拡大していくであろう。



図 3b.14 2050 年における “3 zone Space Integrated Resort 構想”

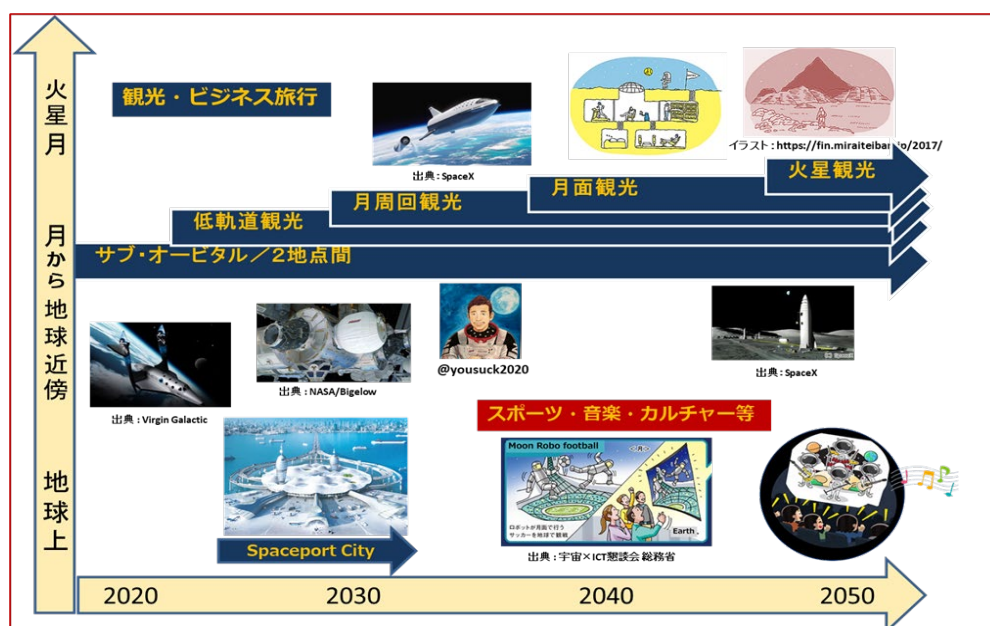


図 3b.15 宇宙エンターテインメントビジネスのロードマップ

6-4) まとめ

ここでは、2050 年の宇宙ビジネスについて大きく3つのカテゴリー、6つの観点から、その分野の専門家の意見をまとめた。宇宙輸送システム、軌道上拠点、月面基地などのインフラが整い、一般の人も宇宙に行く時代となり、それに呼応する形で食やヘルスケアやエンターテインメントなどのビジネスが花開く、そのような世界観が描かれていることが印象的である。まさに宇宙文明としての人類の姿がそこには存在する。しかしながら、実際には、2050 年の宇宙ビジネスは6つだけに限られるものでないと考えている。実際に一般の人が宇宙で生活をするということは、一般の人が地上で生活するために必要な全てのものやサービスが必要となる。しかし、そのほとんどはまだ手付かずの状態である。現在、地球上でビジネスをしているプレイヤーが、宇宙にまで進出してビジネスをおこなうこともあるだろう。あるいは、新たなプレイヤーが宇宙用の製品やサービスとしてビジネスをはじめること也是十分考えられる。どちらにしても、まだ手付かずのブルーオーシャンが少し先には広がっており、そこを考え始めているプレイヤーが世界中でうまれ始めている。まさに宇宙ビジネスはこれから大きく広がるそのスタート時点にあることを感じてもらいたい。

参考) 宇宙ビジネスロードマップ作成メンバー

白坂成功	慶應義塾大学【全体まとめ】
石田真康	SPACETIDE【全体まとめ】
岩本裕之	宇宙航空研究開発機構【全体まとめ】
佐藤将史	SPACETIDE【全体まとめ・月ビジネス】
小正瑞季	SPACE FOODSPHERE【食ビジネス】
菊池優太	宇宙航空研究開発機構【ヘルスケアビジネス】
荒井誠	宙ツーリズム推進協議会【エンターテインメントビジネス】
青木英剛	Space Port Japan【輸送ビジネス】
高田真一	宇宙航空研究開発機構【地球近傍におけるビジネス】

4. おわりに

2050年を念頭に置いて宇宙空間で展開が期待される「宇宙ビジョン」を描いた。そこには地球近傍の宇宙はすでに人類の活動の場としての地球社会の一部となっており、月や火星には人類が定常的に滞在する世界が見えた。人々が宇宙を観光旅行することが日常的となり、人類は様々な場面で宇宙活動の恩恵を受けている社会が築かれていた。知の探究活動である宇宙探査では、研究者のみならず多くの人々から新たな発見に期待が寄せられており、多数の探査機が太陽系内を移動していた。宇宙活動の発展により、人類は豊かな世界を手中にしていた。このような宇宙ビジョンの世界は突然現れるものではなく、各分野の発展により実現するものである。科学技術領域ならびに人文社会科学領域での発展の道筋をロードマップとして示した。

科学技術領域では、宇宙活動の成果が人々の暮らしの豊かさに還元される社会を生み出す「宇宙利用」と人間の持つ知の探究への欲望が人々の好奇心を騒ぎ立てる「宇宙探査」の二本柱の発展状況を示した。この発展を支える分野として、宇宙輸送、宇宙建築、宇宙機、宇宙ロボット・情報、宇宙科学探査の各展望を技術ロードマップとしてまとめた。これらの分野が互いにリンクしながら成熟し、様々なサービスを生み出すことで宇宙利用と宇宙探査活動の発展を支え、宇宙ビジョンに繋がる道筋を示した。既存技術の延長線上にある継続的向上もあれば、急激な発展による不連続的向上もある。出口を見据えた技術開発の重要性を示すとともに、第六感が生み出すイノベーションに期待する萌芽研究の重要性も見えてきた。豊かな宇宙社会を構築するためには、成果重視の深みを評価する開発研究のみならず、発想重視の広さを評価する萌芽研究も同等に発展させることを期待したい。

法政策をはじめとした人文社会科学領域でも意欲的な研究の推進が不可欠である。近年の宇宙法政策分野の研究への関心の高まりに伴い、JSASSは2017年度に宇宙法政策委員会を臨時委員会として新設し、研究の促進に向けた環境の整備に着手している。今後より幅広い法政策分野でも研究が推進されることにより、宇宙法政策に関する研究が質量ともに高まり、宇宙法政策の実務にも資することが期待されている。未来の宇宙開発利用を支える新しい法政策の形成のためには、多様な分野の視点を取り込む必要があり、学際的な研究が求められている。人文社会科学領域の全てが法政策・行政実務や経済・実業に直接的につながるものではないが、人と宇宙の関わりを根源的に探求する研究は、宇宙開発利用の理念を明らかにして活動の支柱となる普遍的な価値も有することを忘れてはならない。本ビジョンを契機に、法政策分野はもちろん、幅広い人文社会科学分野において、宇宙に関する研究への関心が高まり、様々なバックグラウンドのプレイヤーが連携し切磋琢磨し、実りある研究成果が多く創出されることを期待したい。

様々な分野の研究開発を支えているのは、やはり人である。描いた宇宙ビジョンならびにロードマップを実現する主役は人である。人無くして、発展なし。宇宙活動の発展を支える研究者・実務者を育てる人材育成が重要であることは周知の事実であるが、この活動を広く人々に伝えるコミュ

ニケーターの育成も強化しなければならない。人々が宇宙活動の恩恵を受けていることを知り、宇宙活動への期待を膨らませるには、情報伝達の担い手であるコミュニケーターが重要な役割を担っている。宇宙活動は人類の共通したひとつの土俵の上で展開されている。人類が一丸となるには、研究者・実務者は国際的な活動を強化して国境なき活躍舞台を構築し、その成果や効果を情報発信することで世界中の人々が宇宙活動に関心を持つことが必要である。宇宙活動を通して、地球上の人々が共通の認識を持ち、全ての人々が豊かな社会を手中にすることを期待している。

宇宙における人類の活動は過去50年間に目覚ましい発展を遂げた。その発展の速度は今後も加速していくことが予想される。この発展を継続させるためには常に新たな宇宙ビジョンを持つことが必要不可欠である。当「JSASS宇宙ビジョン2050」は2018年度に議論した内容に、増補版である第3章a)5)項と第3章b)5)項を2019年度に追加したものである。今後も宇宙活動が発展を持続し続けるならば、日本航空宇宙学会としても新たな宇宙ビジョンを発信し続ける必要がある。次の宇宙ビジョンの発信は5年後あるいは10年後になるかは現時点では断言できない。しかし、宇宙活動の発展に応じて宇宙ビジョンを改訂して頂くことを将来の学会にお願いしたい。

【資料】 日本の宇宙活動の歩み

日本航空宇宙学会が日本航空学会から名称を変更して半世紀が経った。その間に日本の宇宙活動は目覚ましい進展を遂げた。当資料では、日本の宇宙開発の歴史を創成期から現在に至るまでをまとめたものである。

表A.1 日本の宇宙活動の歩み(1955年～1984年)

打上げ実績		関連事項	
1955	ペンシルロケットの飛翔実験が行われ、宇宙時代が幕開け	1957	国際地球観測年に日本が参加し、宇宙活動の国際協力が開始
		1959	国内で開催される宇宙関係の国際会議ISTS ⁽¹⁾ が開催
1960	カッパ8型ロケットが高度200kmを越えて、電離層を観測	1960	宇宙科学技術シンポジウム(後の宇宙科学技術連合講演会)が開催
		1963	日米間TV中継が開始され、放送への衛星利用が開始
1966	ラムダ3H型ロケットが高度1800kmを達成し、バンアレン帯などを観測	1967	日本航空学会がIAF ⁽²⁾ へ加盟し、国際的な宇宙関係学会へ進出
		1968	日本航空学会が日本航空宇宙学会へ名称変更し、翌年に社団法人化
		1969	宇宙開発事業団が設立され、本格的な宇宙事業が展開
1970	日本初の人工衛星「おおすみ」がラムダロケット(L-4S-1)で打上げ	1972	開発から運用の中心となる宇宙開発事業団の筑波宇宙センターが開設
1975	2段目に初の液体エンジンLE-3を搭載したN-1ロケットが打上げ		
1977	初の静止衛星となる技術試験衛星きくⅡ型が打上げ	1977	実用衛星(気象:ひまわり、通信:さくら、放送:ゆり)の打上げが開始
1982	技術試験衛星きくⅣ型が打上げられ、イオンエンジンの動作実験を実施	1984	NHKがBSによる衛星放送(1987年から24時間放送)を開始

ISTS:宇宙技術および科学の国際シンポジウム

IAF:国際宇宙航行連盟

表A.2 日本の宇宙活動の歩み(1985年～2018年)

打上げ実績		関連事項	
1985	初の人工惑星となるハレー彗星探査機「さきがけ」「すいせい」が打上げ	1989	宇宙科学研究所が東京都から相模原市へ移転
1990	初の月周回衛星「ひてん」が打上げられ、月スイングバイを実施	1990	民間人の秋山氏による宇宙飛行が実施され、日本人宇宙飛行士が誕生
		1992	CS放送が開始され、民間企業による衛星放送事業がスタート
1994	初の国産ロケットであるH-IIロケットが打上げ	1993	衛星設計コンテストが開催され、アマチュア衛星による宇宙活動が展開
1998	火星探査機「のぞみ」が打上げられ、2003年に火星へ到達・観測		
1998	技術試験衛星きくⅦ型が打上げられ、ランデブードッキング実験を実施		
2003	小惑星探査機「はやぶさ」が打上げられ、サンプルリターンを実施	2003	宇宙三機関を統合して宇宙航空研究開発機構が発足
		2003	東大・東工大が小型衛星を打上げ、大学等の小型衛星製作が活性化
2005	衛星「きらり」が打上げられ、欧州衛星ARTIMESと光通信実験を実施		
2007	月周回衛星「かぐや」が打上げられ、2009年まで月観測を継続	2009	国際宇宙基地の「きぼう」実験棟が完成し、本格運用を開始
2010	金星探査機「あかつき」が打上げられ、2015年に金星周回軌道へ投入		
2010	「イカロス」が打上げられ、ソーラーセイル推進を実証		
2010	小惑星探査機「はやぶさ」が帰還し、小惑星「イトカワ」の岩石を回収		
2013	固体ロケットのイプシロンが内之浦の鹿児島宇宙空間観測所から打上げ	2012	日本航空宇宙学会は一般社団法人へ移行

JSASS宇宙ビジョン2050

2019年3月 初版発行

2020年4月 2019年度増補版追加

2021年7月 2021年度増補版追加・修正

©一般社団法人 日本航空宇宙学会