



ムーンショット型研究開発事業
新たな目標検討のためのビジョン策定

「誰もが自由にアクセスできる
宇宙利用に関する調査研究」
調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「宇宙を誰もが自由にアクセス・利用できる空間へ」

チームリーダー：稲守 孝哉（名古屋大学 大学院工学研究科 准教授）

サブリーダー：柞淵 紀世志（名古屋大学 大学院工学研究科 准教授）

チームメンバー：松岡 健（名古屋大学 大学院工学研究科 准教授）

五十里 哲（東京大学 大学院工学系学研究所 助教）

中澤 知洋（名古屋大学 大学院理学研究科 准教授）

松尾 太郎（名古屋大学 大学院理学研究科 准教授）

酒匂 信匡（キヤノン電子株式会社 衛星システム研究所 所長）

目次

I. MS 目標案のコンセプト

1. MS 目標案
 - 1.1 MS 目標案の名称
 - 2.Targets(当該 MS 目標の達成シーン。2050 年(及び 2030 年)に何が実現しているか)
 - 3.当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等
 - 3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが、今必要である理由
 - 3.2 目標達成の社会的意義
 - 3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要
 4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題(科学技術的・社会的課題)や必要な取組
2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰
3. 当該目標に関連する研究開発の動向(全体)、海外動向及び日本の強み

III. 社会像実現に向けたシナリオ

- 1.挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題
- 2.2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標(マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果)
- 3.目標達成に向けた国際連携の在り方
- 4.目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方
5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)
(目標達成に向けて取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

IV. 結論

V. 参考文献

I. 提案する MS 目標案のコンセプト

1. MS 目標案

1.1 MS 目標案の名称

「2050 年までにすべての人、そして地球が宇宙と繋がり宇宙と共生し恩恵を享受する社会を実現」

2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか)

2050 年には宇宙技術の産業化、商業化が進展し、安価な小型人工衛星をはじめとして、宇宙機を研究開発する時代から生産し個人で使用する時代に移行する。推進機や通信機などの宇宙用コンポーネントの高性能化、複数機による編隊飛行や群衛星などの大量の宇宙機が軌道上で協調的に運用される。これにより宇宙利用の要求(ミッション)ごとに最初から宇宙機を設計・開発して打ち上げる時代から、宇宙機は既に打ち上げてあり、**要求が生じたらソフトウェア開発しアップリンクするだけでミッションを達成する時代に移行する**(図 1)。これは H/W の革新的な進歩と高度に洗練化されたインターフェース (I/F) により、H/W を S/W と独立で開発し予め軌道上での待機が可能となることによる。

以上のように H/W 開発が S/W 開発と独立して進められるようになるなかで、特に、H/W において宇宙機システムの機械的・電気的 I/F が高度に規格化・統一化され、コンポーネントレベルでの開発、打ち上げが容易となる。推進機と高精度軌道・姿勢制御技術の発展により宇宙機が高精度かつ高い機動性を獲得することで、従来、一つのミッションのために毎回宇宙機を一機ずつ打ち上げるスタイルではなく、予め要求を予測し先に軌道上でランデブー・ドッキングし宇宙機の一部の機器を交換して H/W のバージョンアップを図るメンテナンスを行う。また、宇宙機のメンテナンス基地において推進剤の補給や修理を行うなど、あたかも自動車のような運用が可能となる。これにより H/W の再利用が可能となり、打ち上げ回数・質量も高度に最適化される。2050 年には、従来のシステムに代わり、一部の H/W を先に打ち上げ環境整備が完了しているなかで、ユーザーや宇宙機を利用する会社は S/W 開発をメインに進めるという新たな開発スタイルが導入される。

このようにソフトウェア開発が主となるなかで「全てを開発しない、再構成しシェアする」という考え方が定着する。この宇宙機のシェアにより従来にない発想を宇宙で試す機会の増



図 1 (上図)従来の宇宙機開発(下図)提案する社会における宇宙機開発

大と準備期間の短縮が大幅に見込め、宇宙技術と宇宙利用の爆発的な発展が見込める。さらに既に打ち上げて基本動作は保証されている宇宙機を用いることと、S/W ベースの開発がメインとなっているため失敗の可能性が極端に低くなることから、現状の宇宙システムに特有用な「失敗すると何も得られない 0 か 1 かの世界」から脱却でき、宇宙技術の大きな発展も見込める。

地上から地球低軌道への投入に要する膨大なエネルギーが宇宙への障壁であり、このため巨大なロケットが開発、運用されている。S/W ベースの開発スタイルにおいては、質量を持たない情報 (S/W) の輸送 (送信) が中心となるためコストを各段に低減することができる。ここから、全てを地球から宇宙に運ぶのではなく、輸送するものは最小限にとどめ可能な限り現地 (宇宙) のものを使用する考え方が芽生えてくる。このような「全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る」の考え方のもと、宇宙探査などでは、現地で燃料などの消耗品を調達する宙産・宙消の考え方が主流となる。全てを地球から持っていく必要がなくなるため、スラスタの燃費 (比推力) に加えていかに現地の資源・エネルギーを使用できるかが重要となる。通常の宇宙機器はロケット打上げ時の厳しい荷重条件を基に設計される。原材料は地上から再使用ロケットにより輸送、もしくは月面等で採取し、3D プリンタ等^[1]で宙産された宇宙機器は、余分な構造がそぎ落とされた簡素なものとなり、宇宙利用がより活性化する。

宙産・宙消がさらに発展し、宇宙太陽光発電^[2]による電力や、宇宙工場での生産物等^[3]宇宙で得たものを地球で消費する宙産・地消の考え方により、エネルギー、環境面でも宇宙が人類にとって欠かせないものとなる。図 2 に将来像を示す。

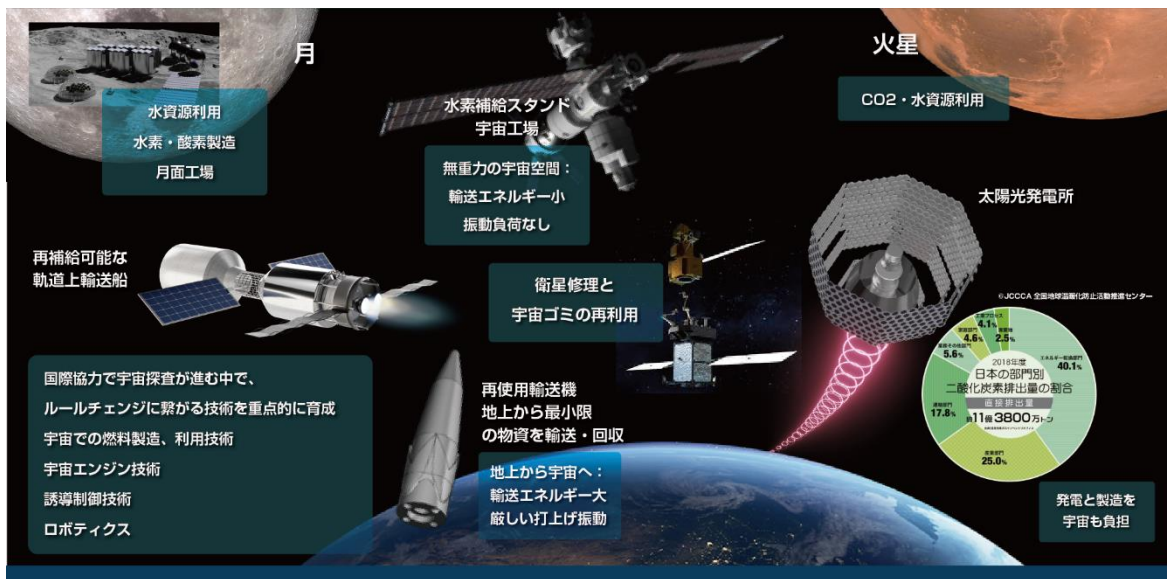


図 2 宙産・宙消と宙産・地消による宇宙利用の変革

以上のような「全てを開発しない、再構成しシェアする」「全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る」という2つの新たな考え方により、人々の日常生活がより「宇宙との繋がり」のあるものに変化していく。現在の宇宙システムはメインミッションが明確に定義され、必要のないものは完全にそぎ落とされ、極めて固いシステムであることが特徴となっていた。2050年には少し試す遊び心、無駄が許されるようになる。例えば科学研究においても試すこ

とへの敷居が下がり、偶然に思いもよらない新しい発見が期待できる。宇宙でなんとなく試す無駄の大切さも認識され、例えば製品コマーシャル、夜空を利用したショー^[4]、スポーツ^[5]、レースといった娯楽、エンタテインメントから、宇宙芸術^[6]を目的とした宇宙機、性格を持たせたサテロイドなど新たな価値や文化を切り開くことができる。人が宇宙を使って新しい発想を得られる機会もでてくる。さらに S/W ベースの開発への移行により多くの人々が宇宙機にアクセス・利用できるようになり、宇宙はもはや専門家だけのものではなくなる。国際的にも宇宙の格差問題が解消され国籍に関係なく宇宙技術の恩恵を受けることができる。

このように多くの人々が宇宙を利用する社会において「宇宙からの視点」がより重要となっていく。これは、S/W ベースで開発された大量の宇宙機が周回するなか、要求が生じたら宇宙でのデータを取得するのではなく、ミッションが始まる前から継続的に地上や宇宙空間が観測されており、その観測データが軌道上でクラウド化され絶えず情報が軌道上で蓄積されている。通信の制約があるなかで全てを地上にダウンリンクするのではなく軌道上で継続観測されアーカイブされた過去の観測データを必要なときに宇宙機から取得することができ、時間・空間の制約から解放された地球規模の宇宙データ利用・リモートセンシングが可能である^[7]。これにより例えば災害が発生した場合でも、後で宇宙機に蓄積された過去のデータを遡り、災害が生じた経緯や因果関係の検証が容易となる。さらに過去のみならず、地球環境、人類活動の未来予測も可能となり、これまで後手であった科学技術の進歩に対する環境問題等に対し先手を打って対処が可能となる。以上のように空間・時間スケールともに従来の宇宙システムを凌駕した宇宙データ利用が可能となる。

このような宇宙との関わりが強くなるなかで「宇宙との共生」の考え方も芽生えてくる。従来のように宇宙機全てを打ち上げるのではなく、S/W といった情報の送信や一部の H/W コンポーネントを打ち上げることにより目的を達成できるようになる。これにより、全てを地球から宇宙に運ぶのではなく、輸送するものは最小限にとどめ可能な限り現地のものを使用する考え方が主流となる。例えば、月や火星での探査・活動拠点の構築においては資材やエネルギーを全て地球から持っていくのではなく、現地で調達することがより重視される。このような宙産・宙消の考え方が主流となるなかで、例えば輸送系においては従来のエンジンの効率に加えて現地で燃料が調達できるかが重要となる。例えば推進剤であれば、月の水から水素、酸素の製造、火星であれば水の他、二酸化炭素の利用が挙げられる^[8]。岩石から建造物や各種機器を製造することも可能となる。さらに月や火星での活動拠点が築かれると、宇宙で生産したものを地球に輸送する宙産・地消の考え方が生まれてくる。従来は地球の中での資源やエネルギーの循環系で考えられてきたが、これにより地球なかで閉じた循環系は宇宙への開かれた系となり、宇宙を含めた循環系を積極的に利用する概念が浸透する。

以上のような「全てを開発しない、再構成しシェアする」「全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る」という2つのルールチェンジにより宇宙機をはじめとする宇宙システムは個々の組織で異なる目的で所有するものではなく、社会の中で再構成しシェアする社会システムとなる。これにより 2050 年には様々な人が自由に試して利用できる公共の空間となり、「宇宙との繋がり」、「宇宙からの視点」、「宇宙との共生」に根差した、「すべての人、そして地球が宇宙と繋がり宇宙と共生し恩恵を享受する社会」となる。

3.当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等

3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由

社会において宇宙への敷居は依然として高いものの新たなフロンティアとしての期待は高い。宇宙への敷居を下げる試みとして小型衛星や低コスト・再使用のロケットをはじめとした宇宙システムが研究され、これらを用いた新たな宇宙ビジネスが始まっている。現在は米国、ロシア、ヨーロッパ、中国、日本などで新たなプレーヤーの参入による群雄割拠の時代にある。このように宇宙ビジネスは2040年には国際市場規模が3倍となるという試算もある^[10]。一方、IoT、クラウド、ブロックチェーン、AIなどの発展著しいなか、宇宙機は依然、一世代前の電子機器や情報処理系を用いている。これは宇宙システムの特徴として放射線などの特殊な宇宙環境と非修理系であることから新しい技術を用いるには敷居が高く、枯れた技術が好まれることが挙げられる。以上より、宇宙への期待は高いものの地球上で使われる技術とは大きな差が生じつつある^[9]。

宇宙を社会で使えるようにするためには、さらに敷居を下げるため、斬新な考え方に基づく新たな宇宙工学を築く必要があり、現状の宇宙システムとその利用を変えた国が今後の主導権を握っていくと想定される。従ってこの時期に宇宙技術の新たな枠組みを提案・導入して研究開発を進め工業化、さらには商業化へとつなげていくことが重要である。

3.2 目標達成の社会的意義

2020年ごろまでの従来システムでは、多くの宇宙機は要求が生じたら、宇宙機を設計し開発、初期運用（セットアップや試運転）して宇宙機を健全化してからはじめてデータを取得することが可能であった。特に従来の通常サイズの衛星の場合、長い年月をかけて開発され、最悪の場合、打ち上げや初期運用に失敗してデータを取得できなかった。結果として宇宙技術の発展はゆるやかなものとなっていた。このような状況のなかで少しでも社会の要求に応えるため即時観測衛星など開発期間の短縮とリアルタイム性の確保を目指した研究開発が進められてきた。以上の状況のなかで宇宙機の開発と打ち上げが必須であるという考え方が定着していた。今回の提案する社会では「**全てを開発しない、再構成シェアする**」「**全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る**」の2つの大きなルールチェンジを起こし、宇宙技術の大きな変革を起こすことを狙ったものである。

この未来の社会ではもはや宇宙機の開発や打ち上げが必須ではなく、ソフトウェア(S/W)をアップリンクするだけで即時に目的を達成できる。より手軽に短い期間で新たな技術を試しデータを取得することができ、技術と利用の爆発的な進展が期待できる。

ソフトウェア(S/W)をアップリンクするだけで即時に目的を達成できることで新たな「**宇宙との繋がり**」が社会に根付く。一見“無駄”と思われる試みにより新たな価値と文化を切り開くことができるようになる。さらにS/Wベース開発への移行により多くの人が宇宙にアクセスできるようになり国際的にも宇宙の格差問題が解消され国籍に関係なく宇宙技術の恩恵を受けることができるようになる。

このように多くの人が宇宙機を扱えるようになるなか、宇宙から地球を見るリモートセンシングやデータ利用分野が活発となり、新たな「**宇宙からの視点**」を得ることができる。ミッションが生じてから宇宙でデータを取得するのではなく、ミッションが始まる前から継続的に地上や宇宙空間が観測されオンデマンド化により時間・空間の制約されることのない地球規模の新たな宇宙データ利用・リモートセンシングが可能となる。これにより、情報取得の手段、研究の手段、方法が根本的に変わり災害のみならず、国土管理、森林管理、水資源管理、食料安全保障を始めとしたリモートセンシング^[11]、天文や気象などの理学観測の様々な分野で変革を及ぼすことができる。達成できれば宇宙技術分野は勿論のこと、軌道上にクラウド化したデータにアクセスすることでリモートセンシング、天文や気象などの理学観測といった様々な分野で大きなインパクトが期待できる。

S/W を中心とした宇宙機開発においては現地で物資を調達する宙産・宙消の考え方が根付くようになる。これにより宇宙のエネルギーや資源、空間を使う技術発展が活発となり、宇宙で生産したものを地球で利用する宙産・地消の考え方もでてくる。このような宙産・宙消、さらには宙産・地消の新たな考え方のなかで、資源やエネルギーの新たな循環系を構築への道が開け「**宇宙との共生**」に根差した社会となる。従来は地球の中での循環系で考えられてきたが、新たな考え方のもとでは循環系は宇宙への開かれた系として捉えることが可能となる。これは、サステナブルで豊かな社会を、地球を越えたより大きな枠組みで達成する選択肢を与えるものである。

以上のように社会が宇宙とつながる枠組みを構築することで、生活、視点、循環の点で大きな変革をもたらす。2050年には宇宙は自由な時間・空間のなかで様々な人が自由に試して利用できる公共の空間となり、宇宙技術に根差した新たな社会となる。

3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要

今回の研究提案では「**全てを開発しない、再構成しシェアする**」「**全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る**」の2つの大きなルールチェンジを起こし、宇宙技術とその利用で大きな変革を狙ったものである。提案する社会の実現には宇宙空間という人類共有の場を利用するため、日本国内における技術開発・産学官連携のみならず、他分野との新たな連携、国際的な協力のもと進めることが必要である。

技術開発では、宇宙機のサブシステムの高機能化である推進機、通信機、情報処理機器の高機能化や宇宙機の量産化などの困難な課題を解決する必要がある、大学・研究機関・企業研究者の英知を結集させることが必須である。

他分野との連携では、たとえば自動車産業の大量生産やリーン開発など世界を牽引してきたノウハウ・技術を宇宙分野に積極的かつ柔軟に取り入れる必要も出てくる。さらに化学や材料科学分野の研究成果が活かされる。これにより、提案するルールチェンジに向けて、日本の存在感を十分に示した上で、2050年の目指すべき社会の実現に近づくことが可能となる。さらに宇宙という新たな産業を支える生産技術を有した中小事業者も含めた小規模

新規宇宙プレーヤーも重要となる。また、今回の提案する社会では全ての人が宇宙との繋がりをもつことになる。このように人々が宇宙まで活動領域を広げるなかで倫理的な教育と価値観の育成も重要となる。

国際協力では、他天体の資源採取などの繊細な国際問題を扱うこととなる際、宇宙条約^[12]に定められる平和的な宇宙利用のために、技術協力はもちろんのこと、法制度や各国の取り組み姿勢などについても国際的な協力が不可欠である。

4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

提案する社会では宇宙機のリース料と S/W 開発の知識があれば、宇宙機特有の H/W の知識がなくても簡易に宇宙を利用することが可能であるため、様々な国や分野の人がアクセスでき宇宙利用の格差是正を解消する。これにより、宇宙機のリースやデータ利用をもとにした宇宙利用産業や宇宙機の H/W、S/W の開発を担う宇宙機器産業が発展する。特に宇宙からのデータは地上データと合わせて解析することで様々な分野の課題に対し解法を提供することが期待され、多くの産業の競争力強化に貢献する駆動力となる。

社会構造の変化として、宇宙技術の利益を国の科学技術レベルに関わらず多くの国で享受できることにより宇宙に関わる人口が飛躍的に増加する。これにより宇宙から地球を客観的に捉える視点^[13]も一般的となる。さらに一見無駄と思われることが許されるようになるため、芸術や文化、娯楽での新たな活用が見いだされ、宇宙を通じて地球規模での理解が深まり、価値観を共有することができる。

さらに産・地消の段階に至ると宇宙輸送業のみならず、宇宙空間や月面を利用したエネルギー分野、環境分野、製造分野等の多様な産業が生まれ、社会・産業構造に変革が起きる。宇宙が人類活動にとってより欠かせないものとなり、宇宙が社会生活に根付く時代が到来する。

II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取り組み

人々が日常生活で新たに宇宙との繋がり、宇宙からの視点をもつことでより地球を深く知り、さらに宇宙との循環系を構築した社会を目指すには以下の科学技術的課題、社会的課題がある。

①科学技術的課題

提案する社会で重要となる「宇宙との繋がり」「宇宙からの視点」「宇宙との共生」で重要となる技術課題を図 3 に示す。「宇宙との繋がり」では S/W を中心として H/W をいかにリコンフィギュラブルな構成にするかの技術が重要となる。また、H/W の更新のためにはインターフェースの標準化、編隊飛行技術、ドッキング、宇宙構造物の建造技術が重要となる。「地球からの新たな視点」では、情報処理系技術、複数の宇宙機による編隊飛行技術、ユーザーに分かりやすい I/F などが重要となる。さらに「宇宙との繋がり」では産・地消を支える現地での資源を有効活用する技術、推進剤などを現地で入手し宇宙機へ補給するための技術、プロペラント・レス推進（地球・惑星磁場や星間物質の利用）、遠隔操作などのロ

ロボット技術などが求められる。付随する研究分野として、高性能推進系技術、微小重力下での極低温液体推進剤の管理技術、液体水素を始めとする極低温推進剤の貯蔵技術等が重要となってくる。図中のWGはムーンショット目標WGを表しており、これらと発展を共にする分野も存在する。

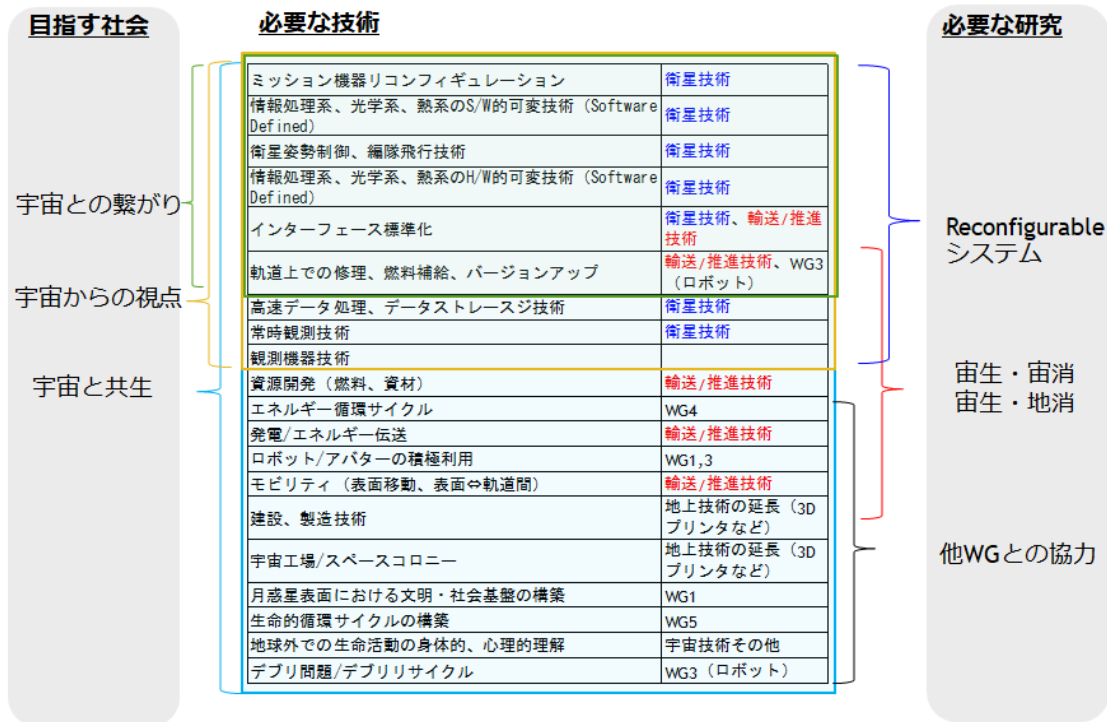


図 3 当該 MS 目標を達成するために必要な技術

②社会的課題

多くの人が宇宙に活動の場を移し、宇宙産業やビジネスが盛んになるなかで生じる様々な社会的課題がある。宇宙の商業化が進むなかで私法としての民法、宇宙活動法や個人情報保護法といった公法の整備が重要となる。特に提案する社会では、多様な国々の人々が宇宙へと活動領域を拡大するため、活動の活性化と規則・規制のバランスの枠組みを国際的に取り決めることが求められる。また、宇宙まで活動領域を広げるなかで倫理的な教育と価値観の育成も重要となる。国際協力では、宇宙条約に定められる平和的な宇宙利用のために、電波などの周波数、静止軌道などの有用な軌道資源、他天体の宇宙資源など国際的なガバナンスに基づいた国際的な協力が求められる。

2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰

提案する社会では宇宙機の開発とその目的軌道までの輸送技術が重要となる。

宇宙機では 2050 年までに小型・分散指向と大型高性能指向に二極化した技術発展が予想されている^[14]。高精度化された大規模な宇宙構造に基づいた宇宙機、また小型衛星のコンステレーションによる宇宙機、それに伴うデブリ問題などを対処する宇宙機などが想定されている。特に 2000 年ごろから小型衛星をはじめとする小型宇宙アプリケーションの発展が著しく、さらに高精度、高分解能化、複数機による新しい宇宙利用などが研究されてきた。より低コスト、短期間で以下に宇宙機を開発するか、短期間開発衛星など以下に開発期間を短くするかが課題として捉えられ、さらに新たなミッションのためには宇宙に打ち上げる打ち上げ手段の確保が敷居として認識され努力されてきた。より低コスト、短期間で複数の宇宙機ミッションなどの新たなミッションや高解像度を得るミッションに耐える宇宙機が求められている。

輸送系では、低コストで目的地まで観測器やミッション機器を輸送するためいかに低燃費、低コストで達成するかが検討されてきた。近年、この低コストを達成するものとして、地上から地球低軌道までの輸送を担うロケットの再使用化が一つのキーワードとして研究開発が進められている^[14]。そこから静止軌道、月・惑星への遷移には地球から全ての燃料を持っていくことを前提とした研究開発が想定されており、燃料効率（比推力）が重要な指標となっている。より低コスト、低燃費で目的地まで輸送できる宇宙システムが求められている。さらに、推進剤の月、火星での製造が可能となると、推進剤の長期貯蔵や補給に関連する技術研究が必要となる。

宇宙空間用のエンジンに関して俯瞰する。図 4 は Specific Impulse（比推力、エンジンの燃費）と出力 Output Power（推力に比例）を各種エンジンについてマッピングしたものである。従来の化学推進（Chemical）は、広い推力範囲をカバーするが、比推力が低く燃費が悪い。従来のロケットエンジンの更なる高性能化・高機能化に加え、デトネーションエンジンを始めとする先進的な化学推進の研究も進んでいる。その他は電気推進（プラズマ推進）を示しており、高い比推力が特徴だが、出力すなわち推力が低い。マップの右上の領域、すなわち大推力・低燃費のエンジンはいまだ実現されておらず、世界的に宇宙用エンジンの研究はこれを実現する方向性に進んでいる。この流れに加え、今後は前述の宙産・宙消、すなわち推進剤の現地調達性も重要な指標となってくる。

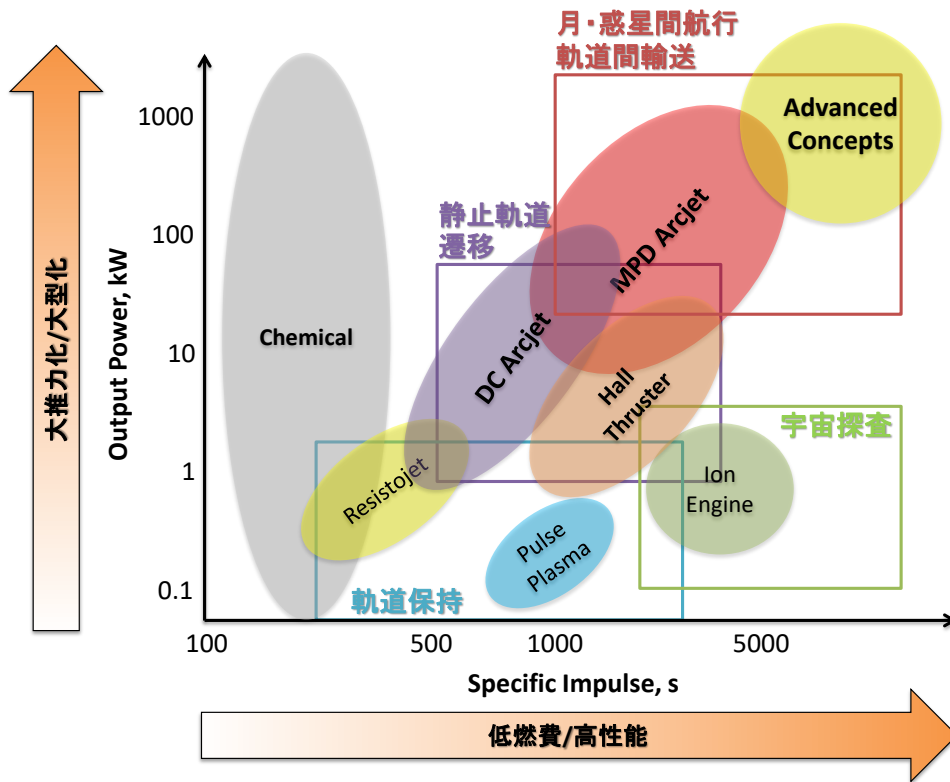


図 4 電気推進の作動範囲とその用途 (Specific Impulse VS Output Power)

3. 当該目標に関連する研究開発の動向 (全体)、海外動向及び日本の強み

宇宙への敷居を下げる試みとして、近年、低コスト、短い開発期間を目的とした宇宙機の小型化が著しく、特に 600 kg 以下の小型衛星の占める割合が急増している^[15]。小型衛星では米国が半分以上の機数を占めており、続いて中国、日本、ヨーロッパ諸国と続く^[15]。これは米国、中国と小型衛星によるビジネスが始まっていることによる。日本でもベンチャー企業がいくつか立ち上がり商用化が進んでいるが米国、中国には及んでいない。このようななかで宇宙工学の研究が進められている大学のなかでは、小型衛星の研究開発機数の上位 10 位の大学のうち日本からは 2 つの大学が入るなど、日本では大学や研究機関での研究開発が盛んである^[16]。以上のように日本では大学や研究機関で非常に活発に宇宙工学の研究とさらには宇宙実証が行われている。従って、日本では宇宙機のシェアといった宇宙への敷居を下げる新たなアイデアや研究開発を進めていく素地があり、大学や研究機関でいち早く宇宙で実証し、新たな研究分野を開拓する土壌が整っている状況にある。

また今回の提案する宙産・宙消について、その一部のコンセプトである。In-space Manufacturing の特許出願数は増加傾向にある^[17]。特に米国では政府の該当分野への研究費が増えている^[17]。各国が力を入れるなかで特に日本では推進系において、はやぶさ 2 で代表されるように宇宙探査に必須のものとして研究開発が活発である。例えばはやぶさ及びはやぶさ 2 の主推進システムであるイオンエンジンに代表される電気推進技術に関し、

日本は多くの大学が活発に研究に取り組んでいる背景がある。さらに、宙産・宙消の鍵となる液体水素を始めとする極低温推進剤の宇宙空間での利用技術を有する国は限られており、日本の強みの一つと位置付けることができる。日本は 1970 年代から継続して液体水素・液体酸素ロケットの開発・運用を続けており、最新機 H3 ロケットの開発と並行して、再使用ロケットの研究が進められている。このような状況のなかで、In-space Manufacturing をさらに大きな枠組みから「全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る」というコンセプトのもと宙産・宙消を進め、推進剤の現地調達・補給、それに対応したエンジン、新たなプロペラント・レス推進、太陽光発電などをいち早く進めていく必要があり、該当分野をさらに強固なものとするのが求められている。

III.社会像実現に向けたシナリオ

1.挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題

①挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域 (Area and field to promote challenging R&D)

より低コスト、短期間で複数の宇宙機ミッションなどの新たなミッションや高解像度を得るミッションに耐える宇宙機が求められている。また、より低コスト、低燃費で目的地まで輸送できる宇宙システムが求められている。宇宙機においては、構成するサブシステム（電源系、情報処理系、通信系、熱系、構造系、姿勢系、軌道系、推進系、光学系など）において、いかに打ち上げ後に構成を変更可能な Reconfigurable なシステムとするか基礎から応用までの研究が求められる。輸送系においては宇宙への敷居を下げる低コストの地上-地球低軌道間の輸送システムに加え、宙産・宙消に貢献する宇宙軌道間の輸送システムが必要となる。この輸送システムには、水素、酸素、メタン、二酸化炭素のような月・惑星で製造・補給可能な推進剤を利用でき、かつ高効率の推進系が必須である。これらの推進剤は低温液化もしくは固体にて搭載されるため、貯蔵性を高める研究や、微小重力下での取り扱いに関する研究も求められる。軌道上での修理・部品交換が浸透しつつも、エンジンには軌道間の複数回往復に堪える長寿命も要求される。材料の損耗を抑える必要があり、はやぶさ 2 のイオンエンジンに代表される無電極放電や、磁場を利用した非接触のプラズマ制御などの技術が求められる。

また米国、ヨーロッパ、さらには中国の発展が著しいことを考慮し、従来検討されている枠組みのなかでの研究開発を進めていては、日本の宇宙技術でより大きな存在感を示すことは望めない。そこで宇宙機では「全てを開発しない、再構成しシェアする」、輸送系については「全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る」という既存の考えを覆す二つのルールチェンジを目指す。

②目標達成に当たっての研究課題 (Research subject for realization of MS Goal)

「全てを開発しない、再構成しシェアする」ためには地上からのアップリンクのみで宇宙機の構成を変更可能である必要がある。この構成変更の達成手法として以下 3 カテゴリーに分

類する。すなわち S/W による構成変更、H/W の非接触型変更、H/W の接触型変更に分類できる。非接触型はドッキングを伴わず、編隊飛行群などに機能追加のため宇宙機を追加することを想定しており、また接触型変更は宇宙機のドッキングなどで構成を変更することを想定している。S/W による構成変更、非接触型 H/W 変更、接触型 H/W 変更となるにつれ、コストが大きくなるが構成の大きな変更も可能となる。

以下のような研究課題に取り組む必要がある。

a. S/W による Reconfigurable 宇宙機

情報処理系の計算能力、データ容量の軌道上での変更（情報処理系）

通信系 Software defined 技術（通信系）

リコンフィギュラブル電源による I/F 使用のアップリンク変更（電源系）

アップリンクによる太陽光吸収率 α 、赤外輻射率 ε の変更（熱系）

軌道・制御則の調整による燃費 — 必要時間の変更（軌道・姿勢制御系）

アップリンクによる編隊・コンステレーション変更（プロペラント・レス）（軌道系）

アップリンクによる波長変更、超解像による解像度の変更（光学系）

メッセージボード変更（ミッション）

b. H/W による非接触型 Reconfigurable 宇宙機

フォーメーションフライトの構成変更による宇宙機編隊の機能追加、機能変更

コンステレーションの構成変更による宇宙機群の機能追加、機能変更

c. H/W による接触型 Reconfigurable 宇宙機

コンポーネント化した衛星部品の軌道上追加

可変な衛星構造

衛星部品のドッキングによる追加、燃料補充、交換

光学系の焦点距離変更

コンポーネント部品の I/F 標準化

「全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る」ためには現地の資源やエネルギーを取得する「宙産」、消費可能とする「宙消」、さらには宇宙で得た資源やエネルギーを地球で消費する「地消」の技術課題に取り組む必要がある。以下のような研究課題に取り組む必要がある。

a. 宙産

推進剤の宙産（月・火星の水からの水素・酸素の製造・貯蔵、火星大気中の二酸化炭素の利用、メタンの合成）

月土壌の建築材としての利用

b. 宙消

月・火星資源の推進剤としての利用（水素/酸素もしくはメタン/酸素を利用するロケットエンジン・デトネーションエンジン、及び水素・メタン・二酸化炭素を利用するプラズマ推進、電気推進）

推進剤の月・惑星表面・軌道上での貯蔵・補給技術

推進剤の軌道上利用技術（微小重力下での液体挙動制御、極低温下での熱制御）

エンジン高性能化・長寿命化（燃焼、磁場等によるプラズマの制御）

プロペラント・レス推進（地球・惑星磁場の利用、水素原子等の星間物質を利用する宇宙ジェットエンジン、姿勢・軌道運動の利用）

月面 He³ の利用（核融合推進、プラズマの電磁波・磁場等による無電極加熱・加速技術）

c. 宙産・地消

宇宙太陽光発電技術

月、火星、小惑星からの資源輸送技術

軌道上、月、火星での重工業製品の製造、地球への輸送技術（再突入、低速降下技術）

2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果

①. 2030 年「宇宙との繋がり」

2050 年までにすべての人、そして地球が宇宙と繋がり宇宙と共生し恩恵を享受する社会を実現するために、まずは、宇宙機を Reconfigurable なシステムとすることで技術実証を容易とし技術進歩の速度の向上と、多種多様なプレーヤーの参入による宇宙産業と商業の活性化を図る必要がある。2030 年には宇宙機の全てのサブシステムで打ち上げ後に可変となる要素が取り入れられ、異なる目的を持つ人で宇宙機をシェアすることが技術的には可能となる。また、宇宙活動に必要な法整備も徐々に進められ、新たなビジネスが始まる。これにより宇宙の産業化が進み、多種多様なビジネスが成り立つ。

②. 2040 年「宇宙からの視点」

宇宙産業化を背景に大量の宇宙機が生産される。宇宙機はよりフレキシブルなシステムとなり、地球軌道上での衛星修理や燃料補給が実現、多種多様な要望に応えることができるようになる。法律も整備され多くの企業が宇宙ビジネスに参入し、多様なサービスが始まる。大量の宇宙機を背景とした宇宙からのオンデマンドな視点が確保される。これにより多くの人が宇宙からの視点を得ることができるようになる。月、火星への技術実証衛星、資源・エネルギー探査宇宙機も頻繁に打ち上げられるようになる。

③. 2050 年「宇宙との共生」

宇宙産業の成熟を背景とした宇宙機器の工業力と、宇宙ビジネスによる資本力によって、月面開発が活発化する。月面の水資源利用を皮切りに宙産・宙消へと移行し、さらには火星への拠点形成の試みも開始される。地球周回軌道上でも宇宙太陽光発電によるビジネス、そして宙産・地消が始まり、地球でも宇宙資源の利用が重要となる。

3. 目標達成に向けた国際連携の在り方

米国、ロシア、中国、ヨーロッパに追従するのではなく新たな価値観、枠組みを見出してルールチェンジによる既存のものより、より重要な指標を見出すことが重要となる。これにより日本の存在感をアピールしつつ宇宙技術の国際動向を探ることが望まれる。宇宙機については今後の産業化を見据えて国際標準化など、世界と相互に関連することが重要である。また宇宙実証の機会を確保するためにロケットなどのロンチャーについても海外の機会も積極的に用いるべきである。研究成果を増大させるため、技術実証や宇宙科学分野において国際的な協力が必要である。また、目指す社会の達成には宇宙活動のガバナンスをどのようにとっていくのか国際的な調整の場が必要である。特に、米国、ロシアの他に、中国、ヨーロッパと協力して進めていくことが重要である。

4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方

「宇宙との繋がり」「宇宙からの視点」ではWG3でのAIとロボットが共進化による自律的なロボットが大きな役割を果たすと期待できる。さらに宇宙との共生では、アバターを通じた社会の月や火星での構築、宇宙まで考慮した資源循環を検討する際にWG4との協力が期待できる。

5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

今回の提案する社会では全ての人が宇宙との繋がりをもつことになる。社会活動が宇宙にまで広がることを考慮しての法整備が必要となる。具体的には、宇宙空間から得た資源やエネルギー、領域などの所有を定める国と国の間の取り決めである国際公法、また宇宙機同士事故などの解決方法を規定する国際私法など国をまたぐ法整備が必要となる。さらに宇宙機の打ち上げ申請や宇宙ビジネスでのレンタルなどを定める国内公法や国内私法についても一層の充実が求められる。

また、今回提案する社会では個人がリモートセンシング技術などで地球上のあらゆる場所の情報を容易に得ることができてしまうため倫理的な教育と価値観の育成も重要となる。以上のように、宇宙への活動領域の拡大と多様な人々が参加するなかで、宇宙活動の活性化と規則・規制のバランスをどう取るか、宇宙活動のガバナンスの在り方が問われる。

IV. 結論

2050年には宇宙技術の産業化、商業化が進展し、安価な小型人工衛星をはじめとして、宇宙機を研究開発する時代から生産し個人で使用する時代に移行する。宇宙での宇宙機の修理や燃料等の採取・補給が浸透し、高性能なエンジンと相まって、自在な宇宙空間での移動が可能となる。様々なビジネスが始まるなかで、エンターテインメントなどで人々の日常生活がより「宇宙との繋がり」のあるものに変化していく。このような中で大量に生産される宇宙機のなか、宇宙から高頻度に多点で観測が可能となり「宇宙からの視点」がより重要となる。宇宙との関わりが強くなるなかで「宇宙との共生」の考え方も芽生えてきて宇宙の資源やエネルギーを活用が進められる。このような社会を目指すため、現在の宇宙工学分野において「全てを開発しない、再構成しシェアする」「全てを地球から運ばない、宇宙で採る・作る」という2つのルールチェンジを引き起こし、すべての人、そして地球が宇宙と繋がり宇宙と共生し恩恵を享受する社会の実現を目指す。

V. 参考文献

[1] MadeInSpace, "FIRST COMMERCIAL 3D PRINTER IN SPACE", <https://madeinspace.us/>, (2021/7/7).

[2] 宇宙航空研究開発機構, "宇宙太陽光発電システム (SSPS) について", <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-ssps.html>, (2021/7/7).

[3] Dan Gamota, "Manufacturing In Outer Space: Not Such A Far-Out Idea", Forbes, <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2021/05/06/manufacturing-in-outer-space-not-such-a-far-out-idea/?sh=2acc9e677ce8>, (2021/7/7).

[4] ALE Co., Ltd., "TECHNOLOGY our satellite", <https://star-ale.com/technology/>, (2021/7/7).

[5] Space Future, "Space Sports", <http://www.spacefuture.com/tourism/sport.shtml>, (2021/7/7).

[6] Devon Van Houten Maldonado, "The artworks floating above the Earth", BBC, <https://www.bbc.com/culture/article/20181214-the-artworks-floating-above-the-earth>, (2021/7/7).

[7] Peter Bauer, Bjorn Stevens, Wilco Hazeleger, "A digital twin of Earth for the green transition", Nat. Clim. Chang. 11, 80-83, 2021.

- [8] 宇宙航空研究開発機構, "日揮グローバルと月面推進薬生成プラント構想に係る連携協力を開始", <https://humans-in-space.jaxa.jp/biz-lab/news/detail/001513.html>, (2021/7/7)
- [9] Chaim Gartenberg, "NASA's latest Mars rover has the same processor as an iMac from 1998", The VEGA, <https://www.theverge.com/tldr/2021/3/2/22309412/nasa-perseverance-mars-rover-processor-cpu-imac-1998>, (2021/7/7).
- [10] Morgan Stanley, " Space: Investing in the Final Frontier, Morgan Stanley ", <https://www.morganstanley.com/ideas/investing-in-space>, (2021/7/7).
- [11] 4次元サイバーシティの活用に向けたタスクフォース, "4次元サイバーシティの活用に向けたタスクフォース最終報告書", 2018.
- [12] 月その他の天体を含む宇宙空間の探査及び利用における国家活動を律する原則に関する条約, (1966年12月13日採択、第21会期国際連合総会決議2222号、1967年10月10日発効), 1967.
- [13] Douglas A. Vakoch ." Psychology of Space Exploration: Contemporary Research in Historical Perspective", Government Printing Office. ISBN 978-0-16-088358-3, 2013.
- [14] 航空宇宙ビジョン委員会, JSASS 宇宙ビジョン 2050, 日本航空宇宙学会, 2020.
- [15] BRYCE space and technology, "Smallsats by the Numbers 2020", 2020.
- [16] BRYCE space and technology, "Smallsats by the Numbers 2019", 2019.
- [17] Olivier de Weck, Afreen Siddiqi, Matthew Moraguez, Alejandro Trujillo, George Lordos, Mehak Sarang, "Commercial Space Technology Roadmap", MIT STRATEGIC ENGINEERING, 2018.