

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

「将来宇宙技術の予測調査」

委託業務中間成果報告書(概要版)

令和4年10月31日(月)

株式会社シード・プランニング

〒113-0034 東京都文京区湯島3-19-11 湯島ファーストビル 4F

TEL : 03-3835-9211(代) / FAX : 03-3831-0495

1. 調査業務の実施方針

- 将来20、30年後に想定される社会課題に対して、必要となる宇宙利用技術及び衛星開発技術を予測し、今後の宇宙開発の発展に資する内容を取りまとめる。

背景

- 2020年6月、日本の宇宙開発利用に関する「宇宙基本計画」の改定が行われ、地球規模課題解決への貢献、経済成長やイノベーションへの貢献などが目標として掲げられた。
- 2021年度予算案では、政府全体の宇宙関係予算は前年度比14%増の3,414億円となり、20年度の補正予算との合計では4,496億円と、初めて4,000億円を超えた。国内の宇宙ベンチャー企業は50社を超え、宇宙産業への期待が高まっている。
- 宇宙開発利用は、産業の発展、安心・安全で豊かな社会の実現等に貢献する分野であり国家戦略の1つとして、文部科学省 研究開発局宇宙開発利用課において推進している。
- 宇宙開発は欧米を含め世界中で研究開発に取り組みされており、日本の宇宙開発においても世界の最新の技術動向を踏まえ、今後の宇宙開発を検討していく必要がある。

目的

- 本調査において、現在日本が有する社会課題を踏まえて、将来の日本の状況を予測し、必要と予測される宇宙利用に関する技術の調査、および将来必要となる衛星開発技術について調査を実施する。

実施方針

- 文部科学省研究開発局宇宙開発利用課と連携のもと、落札後契約する委託業務契約を遵守し、本事業の実施を行う。
- 将来20、30年後に想定される社会課題に対して、必要となる宇宙利用技術及び衛星開発技術を予測し、今後の宇宙開発の発展に資する内容を効率的にとりまとめることを実施方針とする。
- 調査を進めるにあたって、複数の有識者にご意見を頂く場を設けることによって、中立性を保ちながら調査を進めることができると考える。加えて、不足している観点を補いながら調査を進めていくことを目指す。

本事業の全体的な流れ

(3)

適時調査・
事実確認

(1)

将来宇宙利用
技術の予測

①社会課題の抽出

官公庁の報告書等の公開情報をもとに、2040年～2050年に想定される社会課題をリストアップする。

②論文検索

抽出した社会課題×宇宙関連技術で論文検索を行い、社会課題5件以上とその解決に資する宇宙関連技術を抽出する。

③有識者ヒアリング

有識者ヒアリングを行い、2040～2050年に想定される社会課題5件以上に対し、その解決に資する宇宙利用技術、要素技術、今後必要となる技術開発について明らかにする。

④学会等への参加

本件調査に関係する発表等がある場合は、参加し情報収集を行う。

⑤とりまとめ

将来20、30年後に想定される社会課題（5件以上）の解決のために必要とされる宇宙利用技術及び要素技術、技術開発について整理する。

中間成果報告会

(2)

将来の衛星開発
技術の予測

①世界動向の把握

国内外の最新動向を網羅的に調査し、コアとなりうる技術のヒントを得る。

②有識者ヒアリング

コア技術の選定理由及び課題、TRL、開発想定期間、適用対象分野等について資料として整理し、5件以上の選定に向けたヒアリングを行う。

③とりまとめ

(2) ①、②の調査結果をもとにコア技術を図式化する。

最終間成果報告会

3. 将来想定される社会課題

3-1. 社会課題の整理

- 必然的な流れから今後顕在化するであろう課題を考察し、本事業においては以下の8つの社会課題を対象とする。

必然的な流れ	顕在化するであろう課題	その結果危惧される社会課題
<ul style="list-style-type: none"> ■ 人口の減少・少子高齢化の加速 	1. 労働力人口の減少	<ul style="list-style-type: none"> ・ 経済の脆弱化、国際競争力の低下 ・ 少子高齢化による社会保障基盤の弱体化 ・ 地域公共交通の衰退
	2. 高齢化・加齢に伴う疾患	<ul style="list-style-type: none"> ・ 医療コスト増加による皆保険制度の見直し ・ 医療負担・介護負担の増加
<ul style="list-style-type: none"> ■ インフラ老朽化 	3. 社会インフラの維持管理	<ul style="list-style-type: none"> ・ 道路、橋、水道管等の安全確保、事故の増加 ・ 国・自治体の財政難によるインフラ維持・更新困難化
<ul style="list-style-type: none"> ■ 地球温暖化・気候変動の進展 ■ 天変地異 ■ 環境破壊・環境汚染 	4. 自然災害の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・ 社会や経済活動の抑制 ・ 企業の持続的発展や日常業務の停滞
	5. 食料不足	<ul style="list-style-type: none"> ・ 食料事情の悪化、食料供給の不安定化、食料自給率の低下 ・ 水産資源確保、農業生産の向上
	6. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ 救急医療の負担増加（熱中症、熱ストレスによる心血管系疾患、感染症、食中毒等救急搬送の増加） ・ 山火事の煙暴露によるぜんそく、慢性閉塞性肺疾患を有する患者の呼吸困難の発症 ・ 極端な高温による産科合併症と早産の増加 ・ 労働災害の増加、対人暴力の増加 ・ 気温の上昇、気象・気候の極端現象に起因するメンタルヘルス問題の増加（ストレス反応、うつ病、不安・恐怖、睡眠障害等）
<ul style="list-style-type: none"> ■ 科学技術の進歩 	7. スペースデブリ（人工衛星活動の安全確保）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通信障害、測位・観測衛星の消滅 ・ デブリ貫通、落下による被害
	8. エネルギー・金属資源不足	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属資源の飢渴・価格の高騰 ・ 化石燃料からの脱却の遅れ

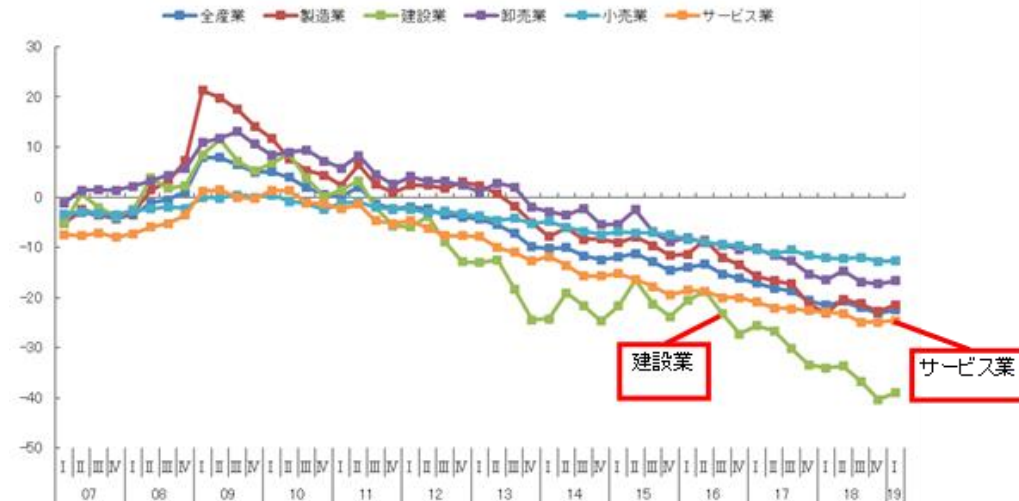
3. 将来想定される社会課題

3-2. 労働人口の減少

- 労働力人口は2014年6,587万人から2030年5,683万人、2060年には3,795万人へと加速度的に減少していく。

<p>背景</p>	<ul style="list-style-type: none">・ 日本は少子高齢化の進展に伴い、生産年齢人口が減少し、労働力の減少が見込まれる。人口急減・超高齢化に向けた現状のままの流れが継続していくと、労働力人口は2014年6,587万人から2030年5,683万人、2060年には3,795万人へと加速度的に減少していく。<u>総人口に占める労働力人口の割合は、2014年約52%から2060年には約44%に低下することから、働く人よりも支えられる人が多くなる。</u>・ 中小企業の手不足感は強く、従業員数過不足DI（「過剰」－「不足」）をみても6期連続で低下している。産業別で見ても全ての業種で不足感が高まっている。特に建設業やサービス業といった労働集約的な業種で人手不足感が顕著に表れている。
<p>その結果危惧される社会課題</p>	<ul style="list-style-type: none">・ 経済活動はその担い手である労働力人口に左右される。急速な人口減少が、国内市場の縮小をもたらすと、投資先としての魅力を低下させ、更に人々の集積や交流を通じたイノベーションを生じにくくさせることによって、成長力が低下していく。・ 加えて、労働力不足を補うために長時間労働が更に深刻化し、ワーク・ライフ・バランスも改善されず、少子化が更に進行していくという悪循環が生ずるおそれもある。

■業種別従業員数過不足DIの推移



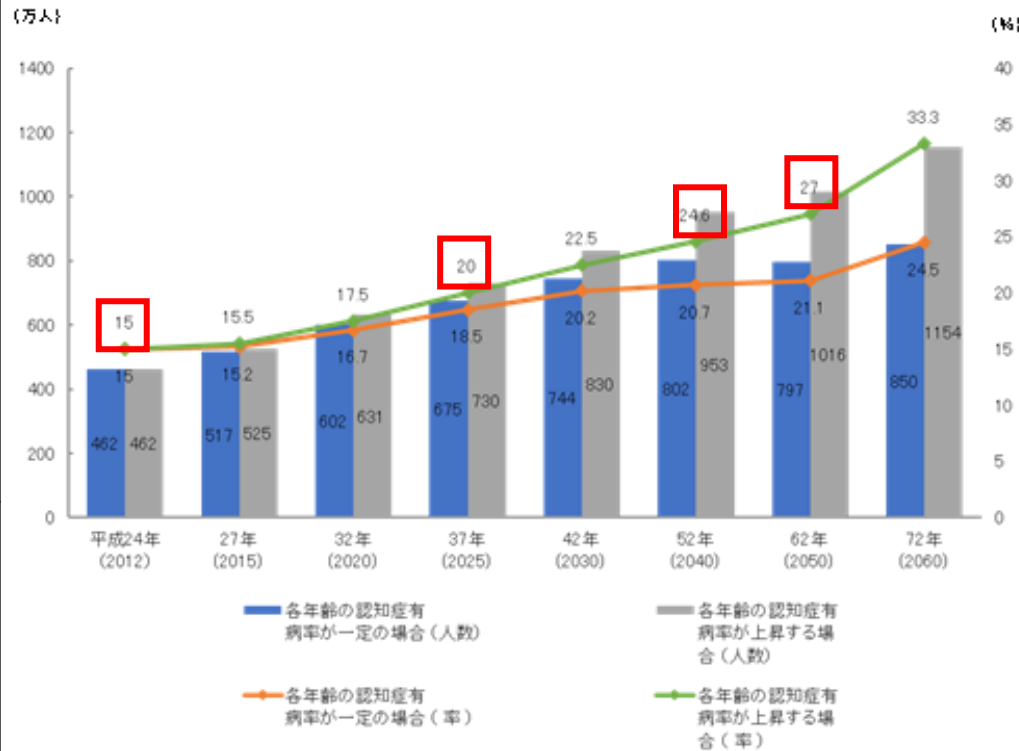
3. 将来想定される社会課題

3-3. 高齢化・加齢に伴う疾患

- 65歳以上の認知症高齢者数と有病率の将来推計についてみると、2025年には約5人に1人になるとの推計もある。

<p>背景</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日本では、2025年までに「団塊の世代」が全て75歳以上となり、超高齢社会を迎える。こうした中で、国民一人一人が、医療や介護が必要な状態となっても、できる限り住み慣れた地域で安心して生活を継続し、その地域で人生の最期を迎えることができる環境を整備していくことは喫緊の課題である。 ・ 内閣府によると、65歳以上の高齢者の受療率（人口10万対）が高い主な傷病は、入院では「脳血管疾患」、「悪性新生物（がん）」となっている。外来では「高血圧性疾患」、「脊柱障害」となっている。 ・ 65歳以上の認知症高齢者数と有病率の将来推計についてみると、2012年は認知症高齢者数462万人と、65歳以上の高齢者の約7人に1人（有病率15.0%）であったが、<u>2025年には20%（約5人に1人）、2040年には24.6%、2050年には27%になるとの推計もある。</u>
<p>その結果 危惧される 社会課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高齢化の進展に伴う高齢者の慢性疾患の罹患率の増加により疾病構造が変化し、医療ニーズについては、病気と共存しながら、生活の質（QOL）の維持・向上を図っていく必要性が高まってきている。 ・ 認知症への対応については、地域ごとに、認知症の状態に応じた適切なサービス提供の流れを確立するとともに、早期からの適切な診断や対応等を行うことが求められている。

■65歳以上の認知症患者の推定者と推定有病率



出典：内閣府, 第1章 高齢化の状況(第2節3)よりシード・プランニング作成
 (注) 長期の縦断的な認知症の有病率調査を行っている福岡県久山町研究データに基づいた。

・各年齢層の認知症有病率が、2012年以降一定と仮定した場合
 ・各年齢層の認知症有病率が、2012年以降も糖尿病有病率の増加により上昇すると仮定した場合

※久山町研究からモデルを作成すると、年齢、性別、生活習慣(糖尿病)の有病率が認知症の有病率に影響することが分かった。本推計では2060年までに糖尿病有病率が20%増加すると仮定した。

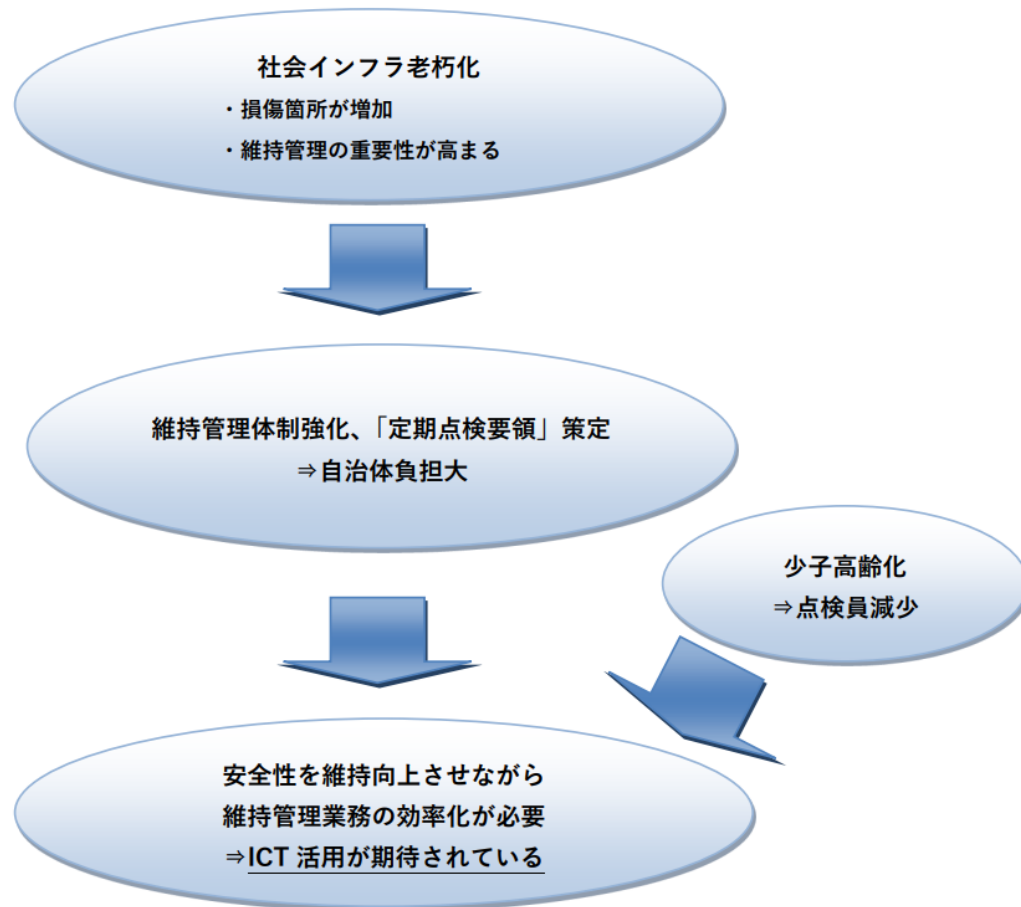
3. 将来想定される社会課題

3-4. 社会インフラの維持管理

- 橋梁、トンネル、道路舗装の他、水門、下水道管、港湾などの社会インフラが、今後20年で建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなるといわれている。

背景	<ul style="list-style-type: none">・ 日本では、高度経成長期に整備した橋梁、トンネル、道路舗装を中心とした社会インフラが老朽化を迎えつつある。・ 日本には橋梁が約73万橋あり、このうち、地方公共団体が管理する橋梁は約66万橋と、9割以上を占めている。橋梁の耐用年数は50年、トンネルも50年を経過すると「老朽化」と判断される。・ その他、水門、下水道管、港湾などの社会インフラも含め、<u>今後20年で建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなると言われており、インフラの長寿命化と補修費削減のための適切な維持管理が求められている。</u>
その結果危惧される社会課題	<ul style="list-style-type: none">・ 社会インフラの老朽化に伴って点検要領が改定されたことで、維持管理のための予算や人員の少ない自治体では点検に追われ、修繕の実施が遅れているなどの実態がみられる。・ 今後、維持管理業務増加が予想される一方で、少子高齢化に伴い労働力人口は減少し点検員が不足していくことが危惧されている。

■ 社会インフラが抱える課題



3. 将来想定される社会課題

3-5. 自然災害の増加

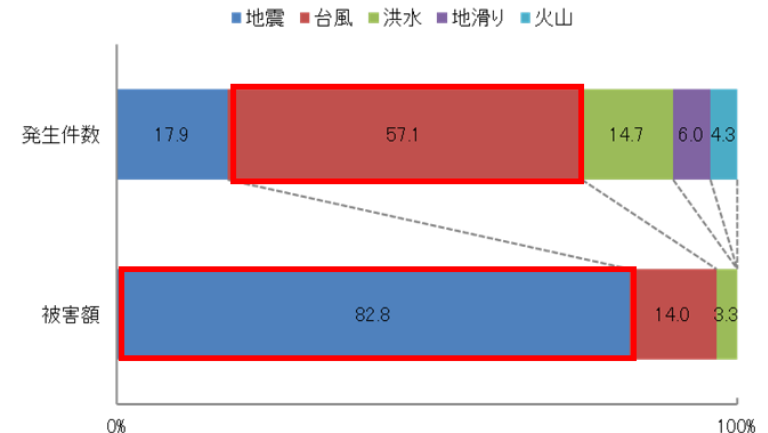
- 気候変動の影響による水害・土砂災害の頻発・激甚化、南海トラフ巨大地震・首都直下地震等の巨大地震の発生等も懸念されることから、自然災害対策の重要性はますます高まっている。

<p>背景</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日本の国土は、気象、地形、地質等が極めて厳しい状況下であり、毎年のように地震、津波、風水害・土砂災害等の自然災害が発生している。 ・ 中小企業庁によると、発生件数は「台風」が最も多く、次いで「地震」、「洪水」が多い。被害額は、「地震」が8割超を占めており、次いで「台風」、「洪水」の順となっている ・ 気象庁気象研究所が行なった過去40年間の台風を分析した研究では、東京など太平洋側の地域に接近する台風の数が増えていることが分かった。これらの接近する台風については、強度がより強くなっていること、及び、移動速度が遅くなっていることも分かった。 ・ これは、被害が甚大化しやすい傾向がうかがえ、背景に日本付近の気圧配置の変化や海面水温の上昇などが原因と考えられている。
<p>その結果 危惧される 社会課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自然災害は社会や経済活動に大きな影響をもたらすだけでなく、企業の持続的発展や日常業務を妨げる可能性がある。 ・ 国民及び企業等は、将来起こりうる自然災害の影響に備えて、リスクを回避したり軽減したりする対策が必要である。

■日本における近年の主な災害

災害種別	災害名	発災日
(1)地震動による災害	阪神・淡路大地震	1995年1月17日
	新潟県中越地震	2004年10月23日
	熊本地震	2016年4月14日、16日
	北海道胆振東部地震	2018年9月6日
(2)津波による災害	北海道南西沖地震	1993年7月12日
	東北地方太平洋沖地震	2011年3月11日
(3)風・水による災害	平成30年7月豪雨	2018年6月28日～7月8日
	令和2年7月豪雨	(最終確定はされていない)
(4)火山による災害	雲仙岳噴火	1990～1996年
	三宅島噴火	2000～2002年
	西之島噴火	2013～2015年、17、18年

■日本における自然災害の発生件数及び被害額の災害別割合



3. 将来想定される社会課題

3-6. 食料不足

- 日本の食料生産や供給をめぐる国内外の状況は刻々と変化しており、特に近年、新型コロナウイルスの感染拡大やロシアによるウクライナ侵略といった新たなリスクの発生により、食料安全保障上の懸念は高まりつつある。

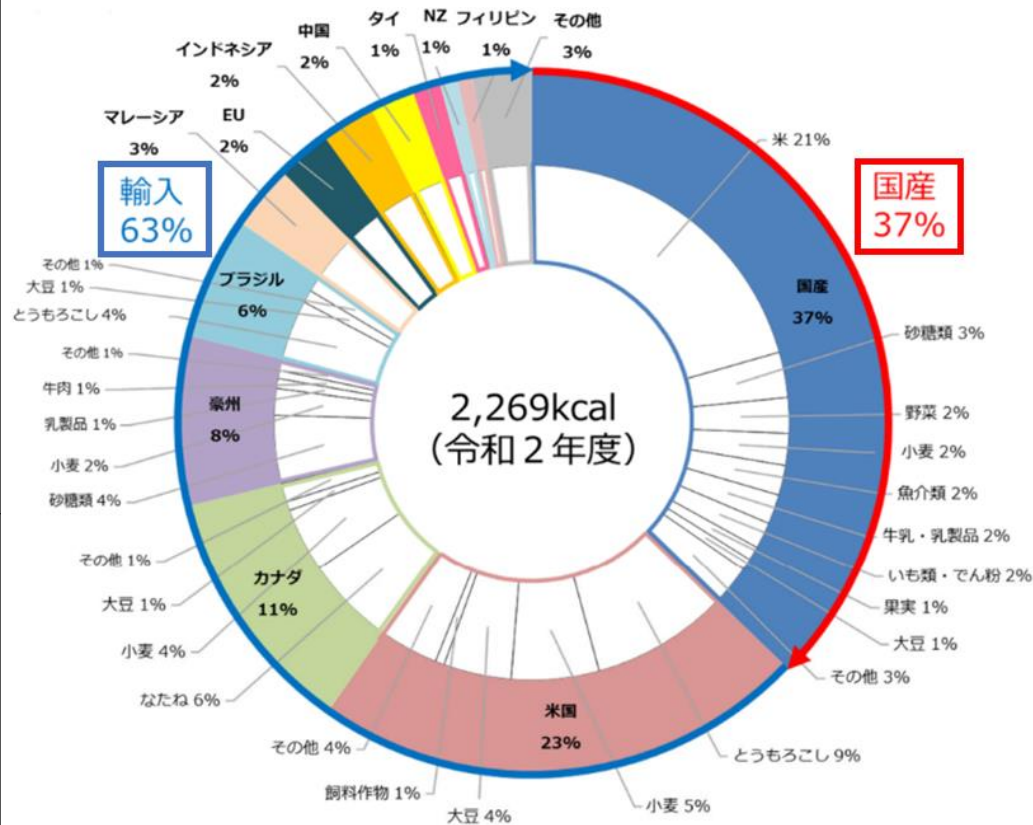
背景

- 日本の食料生産や供給をめぐる国内外の状況は刻々と変化しており、特に近年、新型コロナウイルスの感染拡大やロシアによるウクライナ侵略といった新たなリスクの発生により、食料安全保障上の懸念は高まりつつある。
- 加えて、日本各地で地震、異常気象に伴う豪雨や暖冬、干ばつ等の大規模自然災害が頻発している。降雨量の増加等に伴う災害の激甚化により農林水産分野への被害発生も増加しており、自然災害が生産活動に大きく影響を与えるおそれがある。
- 農林水産省の報告によると、日本の供給カロリー（2020年度：2,269kcal/人・日）のうち37%は国内生産によって賄われているが、この裏返しでもある残りの63%は海外から輸入する農林水産物・食品に頼っていることとなる。

その結果危惧される社会課題

- 今後の食料供給の安定性を維持していくためには、これらの輸入品目の国産への置き換えを着実に進めるとともに、主要輸入先国との関係を維持していくことも必要不可欠となる。
- まずは日本の食料自給率を向上させる必要があるが、日本の農業従事者や漁業就業者が減少傾向にある。食料自給率向上のために必要なこととして「担い手の育成・確保」「農業の大規模化」「スマート農業の導入」などの課題が挙げられる。

■我が国の供給カロリーの国別構成（試算）：令和2年度



3. 将来想定される社会課題

3-7. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響

- 気候変動の進展に伴って救急医療システムの維持が問題視されている。熱中症以外に、増加する気象災害や火災による被災者、呼吸器系疾患・心血管系疾患の急性患者、各種感染症や食中毒患者も救急医療の対象になることが予想される。

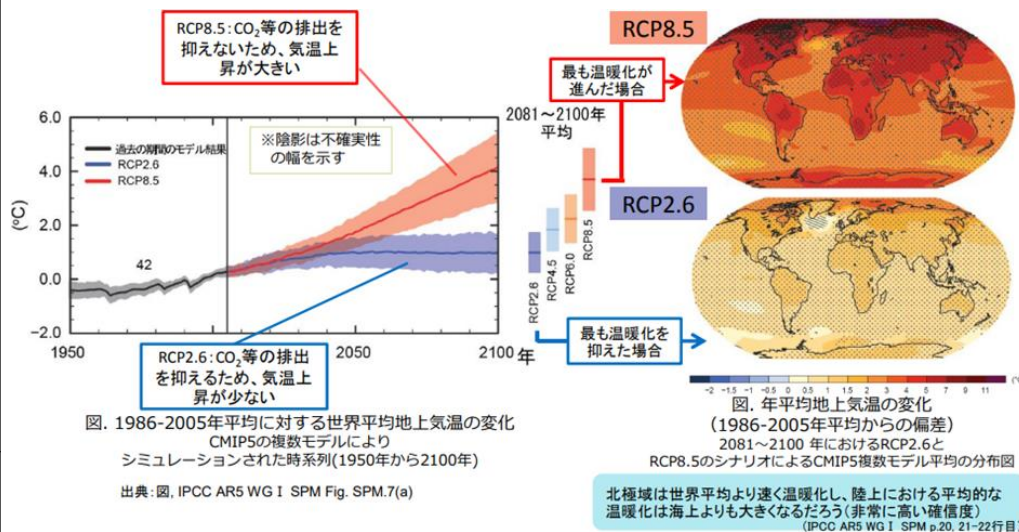
背景

- 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、世界気象機関（WMO）及び国連環境計画（UNEP）により1988年に設立された政府間組織で、2022年現在、195の国と地域が参加している。
- 2014年に発表されたIPCC第5次評価報告書では、20世紀末頃（1986年～2005年）と比べて、有効な温暖化対策をとらなかった場合、21世紀末（2081年～2100年）の世界の平均気温は、2.6～4.8℃上昇（赤色の帯）、厳しい温暖化対策をとった場合でも0.3～1.7℃上昇（青色の帯）する可能性が高くなると予測されている。さらに、平均海面水位は、最大82cm上昇する可能性が高いと予測されている。

その結果 危惧される 社会課題

- 足元で急速に関心が高まっているのは、気候変動とメンタルヘルスとの関係である。IPCC報告書のなかで、「気候変動は、評価された地域の人々のメンタルヘルスに悪影響を及ぼしている」と記されている。
- また、国立環境研究所の予測によると、2030～40年ぐらいでは熱中症患者の発生数に顕著な増加は認められないが、2100年になると患者数が今の2倍に増加するとされる。より大きな気温上昇を予測しているモデルの場合には、2倍では収まらず、地域によっては3倍あるいは4倍になることも予想されている。
- 救命救急の現場は、これまでの常識とは異なる状況に直面する可能性がある。

■1986-2005年平均に対する世界平均地上気温の変化



■気候変動による懸念点 (G7保健大臣会合より)

- ①気象災害や火災による死傷者
- ②大気汚染による呼吸器系疾患
- ③熱ストレスによる熱中症や心血管系疾患
- ④衛生害虫・宿主動物の活動活発化による節足動物媒介感染症や人獣共通感染症
- ⑤海水中や淡水中の細菌類増加による水系感染症
- ⑥食品の細菌汚染・増殖による食品媒介性感染症など

+
メンタルヘルス

3. 将来想定される社会課題

3-8. スペースデブリ(人工衛星活動の安全確保)

- 近年、小型・超小型衛星などを用いた大規模コンステレーション等を含む民間企業による打上げも活発になっていることから、運用終了後の衛星等に対し適切な廃棄措置を執らなければ、低軌道域は更に混雑し、デブリの数も増加し続けることが予測されている。

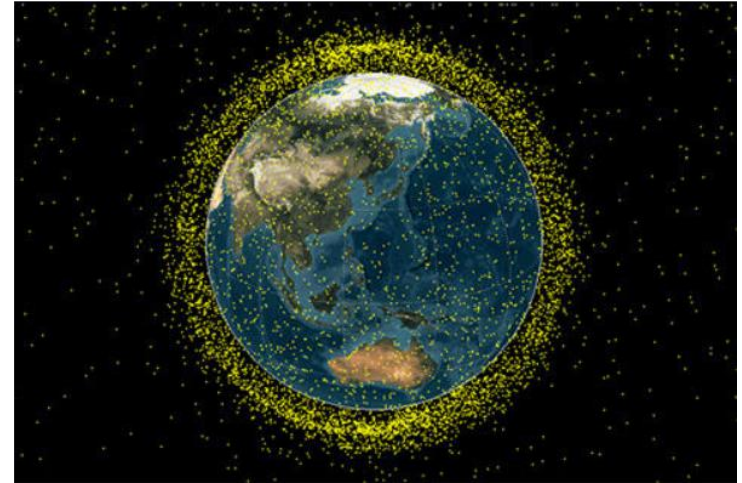
背景

- ・ スペースデブリとは、地球周回軌道上にある不要な人工物体の総称とされ、具体的には、使用済みあるいは故障した人工衛星・ロケット上段、ミッション遂行中に放出される部品、爆発・衝突により発生した破片、固体ロケットモータのスラグ（燃えカス）などが挙げられる。
- ・ 軌道上物体の数は年々増加しており、特に21世紀に入り破壊実験や衝突により急増している。現在、地上からレーダ観測で追跡できる（直径約10cm以上の）軌道上物体の数は約3万4000個あり、追跡できない直径1cm以下の小さなデブリは128万個以上あると推定されている。

その結果 危惧される 社会課題

- ・ 宇宙空間は、測位、通信・放送、気象観測等に利用され、国民生活や経済社会活動にとって重要な役割を果たしてきただけでなく、情報収集や指揮統制等に活用され、安全保障の基盤としても死活的に重要な役割を果たしている。
- ・ その一方で、軌道上に存在する人工衛星やスペースデブリの急増に伴う衛星衝突等のリスク、対衛星兵器の開発やサイバー攻撃・ジャミング能力の向上、宇宙天気の影響等、宇宙システムに対する脅威・リスクは増大している。国民生活や経済社会活動の維持及び安全保障の観点から、宇宙空間の安定的利用を確保することが喫緊の課題となっている。

■スペースデブリイメージ



■主なデブリ衝突事例

年	衝突事例
1996	フランス軍事観測衛星 CERISE にアリアンロケット破片が衝突、ブーム損傷。
2009	米国の通信衛星イリジウムに使用済みロシア衛星が衝突、大破。
2013	エクアドル小型衛星 NEE-01 Pegaso に旧ソ連ロケット破片衝突。高速回転し衛星通信途絶。

■微小デブリ衝突が疑われる主な事例

年	衝突事例
2006	ロシア通信衛星 Express-AM11 故障。冷却液が噴出、衛星の姿勢が失われ機能不全に。
2007	欧州気象衛星 Meteosat-8 不具合。軌道が突然変化し東西方向の位置制御スラスタ破損。
2013	ロシア小型技術実証衛星 BLITS 故障。突然スピンのレート及び高度が変化。

3. 将来想定される社会課題

3-9. エネルギー・金属資源不足

- 月面基地の建設に必要な資源を地球から運ぶには膨大な費用がかかるため、現地での資源調達が必要と考えられている。それが可能になれば大幅な低コスト化を図ることができる。

背景

- 2019年3月、アメリカは2024年までに米国宇宙飛行士による月面着陸を目指すことを表明した。ギリシャ神話の月の女神にちなんで名づけられた「アルテミス計画」には、月を周回する有人宇宙ステーション“Gateway”、月面に人類を着陸させるシステム（HLS）、月面基地、月面車（LTV）等の開発、月面基地を拠点とした火星への輸送計画も含まれる。
- その後、日本は2019年10月に「アルテミス計画」への参画を表明した。2020年7月にはISSにおける現在の協力を継続すると同時に、アルテミス計画に日本のJAXA（宇宙航空研究開発機構）が協力することに、NASA（米国航空宇宙局）との協定に調印している。

その結果危惧される社会課題

- 月面基地の建設等に必要な資源を地球から運ぶには膨大な費用がかかるため、現地での資源調達が必要と考えられている。これまでの観測結果から、月の極域には一定量の水が存在すると考えられており、各国は2020年代前半に、この水資源の利用可能性調査を目指した月極域探査を計画している。
- 日本としても各国に遅れることなく、月極域における水の存在量や資源としての利用可能性の確認を主目的とし、さらに、比較的穏やかな環境で、持続的な探査が可能かつ拠点構築にも有利な月極域地域の探査を行う。

■ JSASS宇宙ビジョン2050（日本航空宇宙学会が発表） ※一部抜粋

- 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。

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-1. 将来宇宙利用技術の整理

- 将来宇宙利用技術について、以下の2分野5項目に分けて、社会課題解決のための技術を整理した。
 - (1) 人工衛星を利用：①測位衛星、②観測衛星
 - (2) 宇宙空間を利用：③宇宙ステーション、④軌道上サービス、⑤月面・火星・小惑星・彗星等

■将来宇宙利用技術の全体イメージ

社会課題	宇宙技術分野	課題解決策となる宇宙利用技術	必要となる要素技術
1. 労働人口の減少	(1)人工衛星を利用 ①測位衛星	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建機・農機の自動走行 ・ 自動運転 ・ 航海支援 ・ ドローン ・ 物流・運行効率化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衛星測位システム ・ RTK測位 ・ AIS受信機搭載衛星
2. 高齢化・加齢に伴う疾患	(2)宇宙空間を利用 ③宇宙ステーション	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微小重力等宇宙環境を利用した研究（物質科学、生命科学） ・ 宇宙医学、再生医療 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人口重力発生装置 ・ 高品質タンパク質結晶生成 ・ 立体臓器創出技術 ・ ホロポーテーション ・ 超遠隔手術ロボット
3. 社会インフラの維持管理		<ul style="list-style-type: none"> ・ 道路・橋・水道管等のモニタリング ・ 環境モニタリング（温室効果ガス、水循環変動、陸域観測、気候変動観測等） ・ 台風、線状降水帯等の高精度予報 ・ 土砂災害、河川氾濫等災害リスク予測 ・ 災害後の被害状況把握 ・ 最適耕作地探査 ・ 農作物の生育予測 ・ 海洋データ取得、魚群探査、養殖監視 ・ 環境モニタリング（気候変動、気象観測、気温、大気汚染物質等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ SAR ・ 光学センサ ・ DPR、CPR ・ 赤外サウンダ、雷センサ ・ 光衛星間通信システム
4. 自然災害の増加	(1)人工衛星を利用 ②観測衛星	<ul style="list-style-type: none"> ・ デブリ除去技術（EOL/ADR） ・ 人工衛星の寿命延長・移動・除去 ・ 宇宙状況把握（SSA: Space Situational Awareness） 	
5. 食料不足	(2)宇宙空間を利用 ④軌道上サービス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 資源探査（テラヘルツ波による観測等） ・ 宇宙の工業基地化（月面基地、宇宙作業ロボット、ランダー、ローバー等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ テラヘルツ波センサ ・ ローバー、探査用ロボット ・ 月面推薬生成プラント、循環型再生エネルギーシステム ・ 小惑星採掘
6. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響			
7. スペースデブリ (人工衛星活動の安全確保)			
8. エネルギー・金属資源不足			

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-2. 測位衛星 [1/4]

- 測位衛星利用技術は、1. **労働人口の減少** の解決に資すると考えられる。

■測位衛星の概要

- 測位衛星は位置情報の計測を目的とする人工衛星で、高度20,000kmから地球同期軌道(35,786km)までの中軌道上に配置されている。主に建機・農機の自動走行や自動運転、航海支援、ドローン、物流・運行効率化等に使われている。
- 米国の「全地球測位システム(GPS)」、欧州の「ガリレオ(Galileo)」、ロシアの「グロナス(GLONASS)」、中国の「北斗(BeiDou)」の4つが世界展開しており、これらを総称して「GNSS(Global Navigation Satellite System:全地球航法衛星システム)」という。日本の「準天頂衛星(QZSS)みちびき」とインドの「NavIC」の運用は、自国周辺に限定されている。

■測位衛星を利用した技術による社会課題解決策

※要素技術の★の項目は宇宙関連の要素技術(次頁以降に詳細を記載)

社会課題	測位衛星利用技術	解決策	要素技術
1. 労働人口の減少	建機・農機の自動走行	・ 無人ダンプトラックやロボットトラクター等の自動走行技術を導入することで、工事現場や圃場での省力化が可能に。	★衛星測位システム ★RTK (Real Time Kinematic) -GNSS ・ AI
	自動運転	・ 人手不足により運行困難となったバス等の交通機関に自動運転システムを導入することで、交通インフラを保つことが可能に。	★衛星測位システム ・ 車載カメラ、センサ (LiDAR、ミリ波レーダ) ・ AI ・ 高精度3次元地図データ ・ V2X技術 (路車間通信、車車間通信) 等
	航海支援	・ 退職が進むベテラン航海士に代わり、航行技術を支援し、海上交通の安全確保のための情報等を提供する。 ・ 船員の高齢化、人手不足を補う自動操船、遠隔操船により、安全運航や省力化を実現する。	★AIS受信機搭載衛星 ・ AR航海情報表示システム ・ AI
	ドローン	・ ドローンを利用して配送することで、配送業者の人手不足を補う。 ・ 農業分野ではドローンによる肥料や農薬の散布、播種、受粉等により省力化を図る。	★衛星測位システム ★RTK測位 ・ 運行管理システム (UTMS)
	物流・運行効率化	・ 物流業者の配送ルート効率化、バスやタクシー等交通機関の運行管理システムの効率化により、最適人数での配送・運行が可能に。	★衛星測位システム ★CLAS (測位補強情報) ★RTK測位

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-2. 測位衛星 [2/4]

- 測位衛星利用技術の要素技術は、主に以下の3つである。

- 1) 衛星測位システム
- 2) RTK測位
- 3) AIS受信機搭載衛星

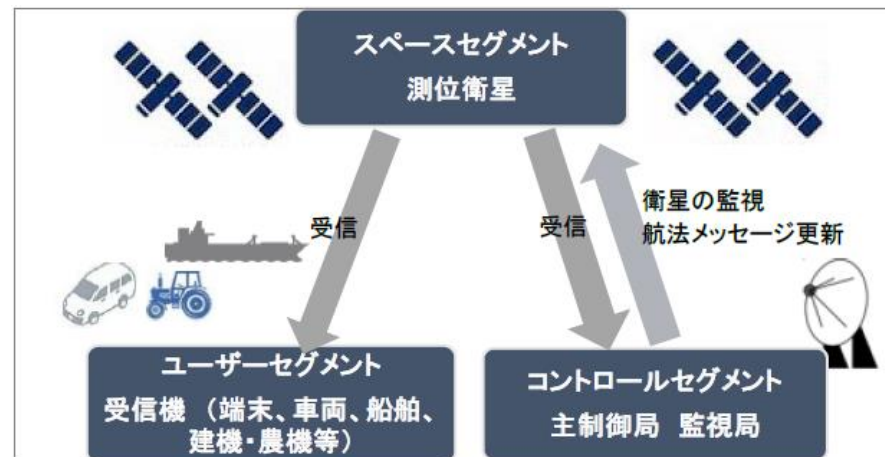
1) 衛星測位システム

- 人工衛星を利用した測位システムは、「スペースセグメント（測位衛星）」「コントロールセグメント（地上局）」「ユーザーセグメント（受信機）」の3つから成る。「測位衛星」は最低4基必要。
- 地上の「コントロールセグメント」は主制御局と監視局に分類され、衛星の軌道や時刻、状態を監視して衛星の軌道情報を予測し、航法メッセージを常に更新している。「ユーザーセグメント」となる受信機は、衛星から発信された信号を受信する。衛星からの信号を捕捉かつ追尾しながら解読し、位置推定に必要な情報を探し出し、それらを利用して位置、速度、時刻を推定する。
- 単独測位は、飛行機や船舶が位置を知るために用いられるほか、カーナビシステムやスマートフォンの地図アプリの歩行ナビ、位置情報を公開・共有できるSNSなど、様々な用途に活用されているが、より高精度な位置情報が求められる分野には適していない。

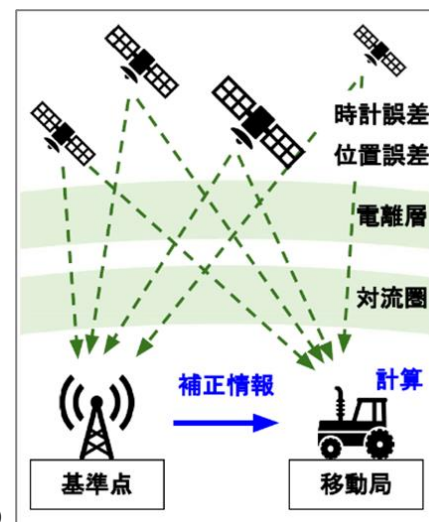
2) RTK測位

- 「RTK (Real Time Kinematic) は相対測位のことを指す。予め正確な位置把握ができて「基準点」とドローンや農機等の「移動局」の2つの受信機のそれぞれが衛星の位置データを取得し、お互いのデータを組み合わせることで移動局側の位置を相対的に推定する。
- それぞれの受信機間で情報を交換しズレを補正することによって、単独測位よりも精度の高い位置情報を得ることができる。RTKでは、誤差範囲を数センチメートル以内に抑えられることが最大の特徴で、主に、農機や建設機械、ドローンの自動走行など、より正確な位置情報を求められている分野で活用される。

■衛星測位システム



■RTK測位



4. 将来宇宙技術の予測調査

4-2. 測位衛星 [3/4]

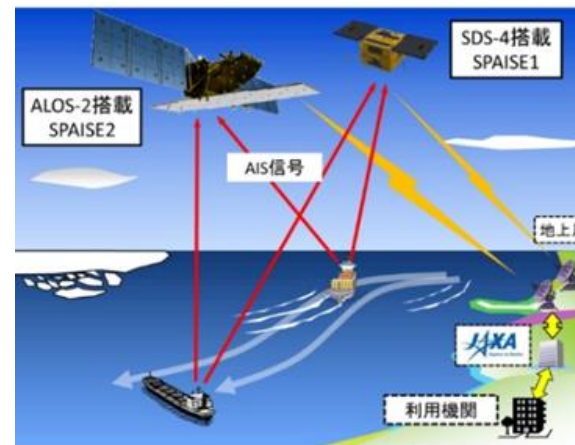
- 測位衛星利用技術の要素技術は、主に以下の3つである。

- 1) 衛星測位システム
- 2) RTK測位
- 3) AIS受信機搭載衛星

3) AIS受信機搭載衛星

- AIS(Automatic Identification System: 船舶自動識別装置)とは、船舶の識別符号、種類、位置、針路、航行状態及びその他の安全に関する情報を自動的にVHF帯電波で送受信し、船舶局相互間及び船舶局と陸上局の船行援助施設等との間で情報の交換を行うシステムのことである。一定の基準(国際航海に従事する300総トン以上のすべての船舶、国際航海に従事する全ての旅客船、国際航海に従事しない500総トン以上のすべての船舶)を満たす船舶にはAIS搭載が義務付けられている。
- 基本的に、AISは専用の受信機が陸上(沿岸部)に設置されており、船舶からのAIS信号を受信してデータを取得している。しかし陸上局では、AIS信号を受信できるカバーエリアが20~30海里(約37~55km)程度に限られているため、船が沿岸部から離れてカバーエリアから外れてしまうと、AIS信号を受信できなくなる。そこで近年では、人工衛星にAIS受信機を搭載し、陸上から検知できない船を宇宙から検知する仕組みが開発されている。AIS受信機を衛星に搭載することで、衛星から約5,000kmの範囲の船舶の情報を知ることができる。
- 合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)を利用すると、衛星から電波(マイクロ波)を地表に向かって照射し、船舶から反射した電波を受信することで、船舶の位置情報を知ることができる。このAISとSARを組み合わせることにより、AIS信号を発信していない船舶の位置情報を含めて、広範囲の「船舶情報」を把握することが可能になり、海上交通の安全確保、領海警備、海難救助、漁船航行管理等に活用することができる。陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)「だいち2号」にはAISとSARの両装置が搭載されており、2022年打上げ予定の先進レーダ衛星(ALOS-4)「だいち4号」にも両装置が搭載される。

■衛星搭載の船舶自動識別装置(AIS)



■AISとSARの複合利用による船舶動静把握



4. 将来宇宙技術の予測調査

4-2. 測位衛星 [4/4]

- 有識者ヒアリングから得られた、測位衛星に関連した将来宇宙技術は以下の3つである。

- 1) 地図と測位衛星の連携
- 2) 歩行者が持つGPS端末
- 3) 海上ブイによるGPSデータ受信

■測位衛星に関連した将来宇宙技術（有識者ヒアリングより）

将来宇宙技術	目的	説明（ヒアリングから）
1) 地図と測位衛星の連携	自動運転による交通事故減少	<ul style="list-style-type: none">● cm単位で道路を計測し、自動運転のためのデジタル地図と連携させる。精度高い道路の計測が自動運転の安全につながる。● 例えば、「横断歩道に近づいたら減速する」「ここまでが車道」というようなデジタルデータを自動運転システムに組み込めば、高齢運転者による交通事故等が防止できるようになる。
2) 歩行者が持つGPS端末		<ul style="list-style-type: none">● 歩行者（特に子供や高齢者）がGPS端末を持ち、周りの車に知らせることができるようになれば、自動運転車が人を撥ねるようなことが無くなり、過疎地での無人運転バスが実現したり、子供が安全に学校に通えるようになったりする。
3) 海上ブイによるGPSデータ受信	台風、線状降水帯の予報、津波予報	<ul style="list-style-type: none">● 測位衛星を使って水蒸気を測定できるので、海上のデータを収集するため、無人ブイを浮かべ観測網を密にすることで、台風や線状降水帯の予報精度を上げる。● また、海上沖合にGPS受信ブイを並べ、波の高さを測ることで、「何分後に津波が来る」ことを正確に予報できるようにする。

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-3. 観測衛星 [1/8]

- 観測衛星利用技術は、以下の社会課題解決に資すると考えられる。

3. 社会インフラの維持管理
4. 自然災害の増加
5. 食料不足
6. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響

■観測衛星の概要

- 地球観測衛星は、電波、赤外線、可視光を用いて地球を観測する人工衛星で、リモートセンシング衛星ともいう。気象観測、防災、災害対策、環境監視、資源探査、地図作成、情報収集等の目的ごとに開発・利用されている。多くの地球観測衛星は、高度約400~1,000kmから、一定の地域を周期的に観測し、一定期間で地球全体を観測している。
- 日本では、静止気象衛星「ひまわり」、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」、水循環変動観測衛星「しずく」、気候変動観測衛星「しきさい」、陸域観測技術衛星「だいち」等が政府の出資により開発・運用されており、高分解能の光学衛星ASNAROにおけるPPPなど、官民連携による取り組みも拡大しつつある。

■観測衛星を利用した技術による社会課題解決策

※要素技術の★の項目は宇宙関連の要素技術（次頁以降に詳細を記載）

社会課題	観測衛星利用技術	解決策	要素技術
3. 社会インフラの維持管理	道路・橋・水道管等のモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ● 目視による点検に代わり、衛星データを利用することでインフラを広域かつ高頻度で監視することができるようになり、点検の効率化や定期測量の空間的・時間的な補完が可能となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ★SAR ★SARデータ解析 ● ANATIS(衛星SARデータによるインフラ変位監視ツール)等
4. 自然災害の増加	環境モニタリング（温室効果ガス、水循環変動、陸域観測、気候変動観測など）	<ul style="list-style-type: none"> ● 地球温暖化の原因となる温室効果ガスやエアロゾル、気候変動を宇宙から測定することで、科学的な理解を深め、解明を目指す。 	<ul style="list-style-type: none"> ★温室効果ガス観測センサ ★雲・エアロゾルセンサ ★高性能マイクロ波放射計 ★多波長光学放射計 ★SAR ● AI ● スーパーコンピュータ
	台風、線状降水帯等の高精度予測	<ul style="list-style-type: none"> ● 宇宙から降水量分布を高頻度・高精度に測ることで気象予報モデルの改善、精度向上に貢献。 	<ul style="list-style-type: none"> ★DPR（二周波降水レーダ） ★CPR（雲プロファイリングレーダ） ★赤外サウンダ ★雷センサ

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-3. 観測衛星 [2/8]

■観測衛星を利用した技術による社会課題解決策

※要素技術の★の項目は宇宙関連の要素技術（次頁以降に詳細を記載）

社会課題	観測衛星利用技術	解決策	要素技術
4. 自然災害の増加	土砂災害、河川氾濫等災害リスク予測	・ 地表面の微細な変動を把握することにより、地すべりが大規模に滑動する前兆現象を抽出する。また、SARデータと降水データを組み合わせることで洪水予測が可能になる。	<ul style="list-style-type: none"> ★GPMマイクロ波放射計 ★DPR（二周波降水レーダ） ★SAR ★光衛星間通信システム ・ AI
	災害後の被害状況把握	・ 蓄積された地形や建物のデータを基に災害前後のデータを比較して被害状況を迅速に把握することができる。	<ul style="list-style-type: none"> ★SAR ★光学センサ ★光衛星間通信システム
5. 食料不足	最適耕作地探査	・ 地球温暖化の原因となる温室効果ガスやエアロゾル、気候変動を宇宙から測定することで、科学的な理解を深め、解明を目指す。	<ul style="list-style-type: none"> ★温室効果ガス観測センサ ★雲・エアロゾルセンサ ★高性能マイクロ波放射計 ★多波長光学放射計 ★SAR ・ AI ・ スーパーコンピュータ
	農作物の生育予測	・ 宇宙から降水量分布を高頻度・高精度に測ることで気象予報モデルの改善、精度向上に貢献。	<ul style="list-style-type: none"> ★DPR（二周波降水レーダ） ★CPR（雲プロファイリングレーダ） ★赤外サウンダ ★雷センサ
	海洋データ取得、魚群探査、養殖監視	・ 地表面の微細な変動を把握することにより、地すべりが大規模に滑動する前兆現象を抽出する。また、SARデータと降水データを組み合わせることで洪水予測が可能になる。	<ul style="list-style-type: none"> ★GPMマイクロ波放射計 ★DPR（二周波降水レーダ） ★SAR ★光衛星間通信システム ・ AI
6. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響	環境モニタリング（気候変動、気象観測、気温、大気汚染物質等）	・ 地球温暖化の原因となる温室効果ガスやエアロゾル、気候変動を宇宙から測定することで、科学的な理解を深め、解明を目指す。	<ul style="list-style-type: none"> ★温室効果ガス観測センサ ★雲・エアロゾルセンサ ★高性能マイクロ波放射計 ★多波長光学放射計 ★SAR ・ AI ・ スーパーコンピュータ

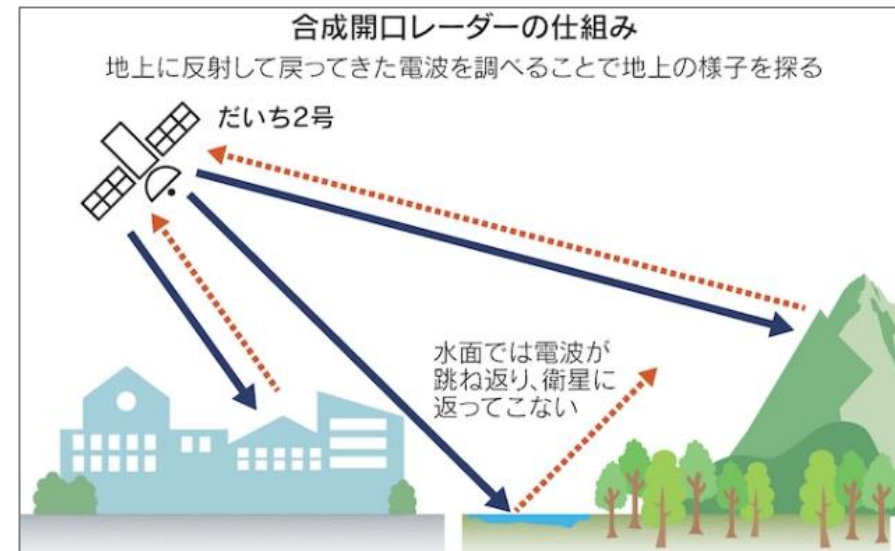
- 観測衛星利用技術の要素技術は、主に以下の5つである。

- 1) SAR
- 2) 光学センサ
- 3) DPR, CPR
- 4) 赤外サウンダ、雷センサ
- 5) 光衛星間通信システム

1) SAR

- 合成開口レーダ（SAR: Synthetic Aperture Radar）は、センサからマイクロ波を発射し、地表で跳ね返ってきた信号を分析して対象物を観測する。
- 合成開口レーダを搭載した人工衛星は、軌道を移動中に送受信を繰り返し、受信した電波をドップラー効果を考慮に入れて合成し、分解能を向上しているため、大きな開口を持ったアンテナの場合と等価な画像が得られるようになっている。反射された電波の強さから、対象物の大きさや表面の性質（人工物が、自然物か、水か）がわかる。
- 電波は雲を通過するため、雲がある地域でも地表の観測が可能。また、観測に太陽光を必要としないため、昼夜関係なく地表を観測することができる。また、電波の位相差（ずれ）を測る「干渉SAR」技術を使えば、地盤の沈下や隆起を数センチ単位で発見することができる。SAR画像は、自らが発した電波の跳ね返りを観測しているため、常に同じ条件で撮影できるのが特徴で、時間的変化を検出しやすい。
- 日本では株式会社QPS研究所が、2019年12月に民間企業として世界で3番目に小型SAR衛星「イザナギ」を打ち上げている。2021年1月には2号機「イザナミ」の打ち上げにも成功。2025年を目標に36基の小型SAR衛星を打ち上げてコンステレーションを組み、10分おきに地球のほぼどこからでも観測できる準リアルタイムデータ提供サービスを構築することを目指している。また、Synspective社は2020年12月に最初の衛星打ち上げに成功。2022年までにアジア全域をカバーできる6基体制に、将来的には30基体制で全世界をカバーする衛星開発を進めており、並行して衛星データを機械学習で解析するシステムも構築している。

■ 合成開口レーダ（SAR）の仕組み



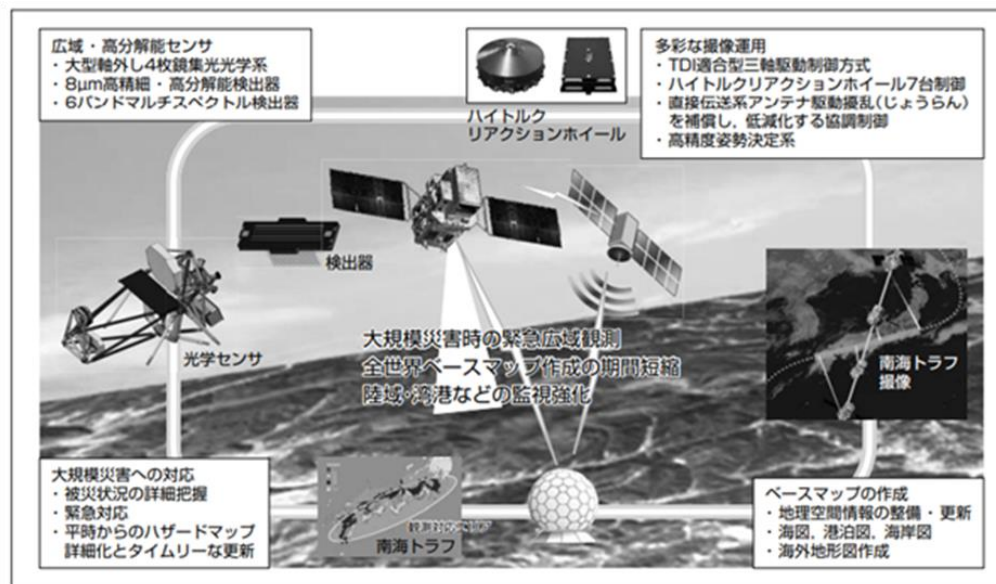
- 観測衛星利用技術の要素技術は、主に以下の5つである。

- 1) SAR
- 2) 光学センサ
- 3) DPR, CPR
- 4) 赤外サウンダ、雷センサ
- 5) 光衛星間通信システム

2) 光学センサ

- 光学センサは、衛星に搭載するセンサとして最も一般的なもので、「可視光 (VIS)」（ヒトの目に見える波長域の光）と隣接する「近赤外 (NIR)」の領域の光を集めている。太陽光の反射を見ている受動型センサで、対象物の色、大きさ、数、形状など、直感的にわかりやすい画像が得られる。そのため、土地の被覆状況、利用状況が見えるが、あくまで光の反射を見ているため、夜や雲のあるところの撮影はできない。また、太陽の当たり方で見え方が大きく変わる。
- 光学衛星は、低～高地上分解能撮像（パנקロ・マルチバンド）による陸域・海域の観測、分光による温室効果ガスの物理量測定、地球規模の気候変動のモニタなどを目的とする。
- 日本の人工衛星では、「気象衛星ひまわり8号」、「同9号」、「温室効果ガス観測技術衛星GOSAT(いぶき)」、「同2号GOSAT-2(いぶき2号)」、「気候変動観測衛星COM-C(しきさい)」が運用中の光学衛星である。「しきさい」のような可視光線以外の多くの周波数帯で観測できるセンサで観測したデータの場合には、光の三原色である赤・緑・青に相当する周波数帯（バンド）のデータを組み合わせることで、目視のイメージに近い画像を得ることができる。
- 防災・災害対策を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等の様々なニーズに対応する。

■ 先進光学衛星の役割と適用技術



4. 将来宇宙技術の予測調査

4-3. 観測衛星 [5/8]

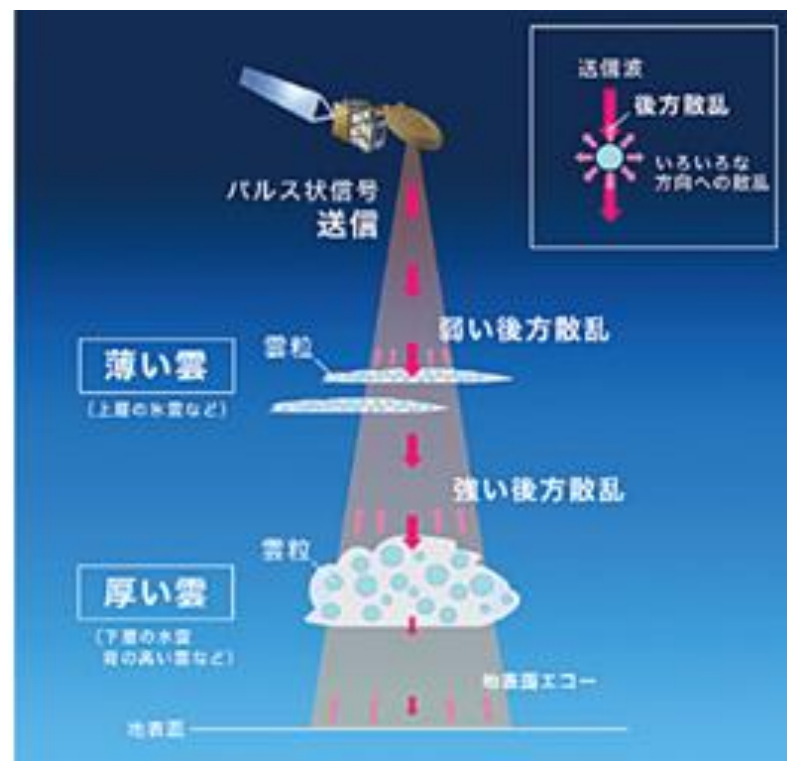
- 観測衛星利用技術の要素技術は、主に以下の5つである。

- 1) SAR
- 2) 光学センサ
- 3) DPR, CPR
- 4) 赤外サウンダ、雷センサ
- 5) 光衛星間通信システム

3) DPR, CPR

- 降水情報は、気象・気候・水循環の研究といった科学的な目的での利用のみならず、人間活動にも直結する情報として、農業、公衆衛生、水資源管理、教育など幅広い分野での利用が広がっている。近年は地球温暖化や気候変動に関連して、世界各地で干ばつや洪水といった極端現象が発生しており、世界の雨分布を監視することがこれまで以上に重要となってきた。
- JAXAは、20年以上にわたり降水レーダ観測を実施している。GPM主衛星搭載の「二周波降水レーダ（DPR）」は、全球降水量とその3次元構造を高精度で観測可能な、日本が強みを有する独自技術である。
- DPRは、弱い雨や雪の検出が得意なKa帯レーダ（KaPR）と強い雨の検出が得意なKu帯レーダ（KuPR）の2台の降水レーダで構成されており、それらを同時に使うことによって、弱い雨から強い雨まで、全球の降水量とその3次元構造を高精度で観測できる。気象庁は2016年3月からGPM主衛星データを気象予報に定常利用しており、豪雨の降水予報精度向上や線状降水帯観測に貢献している。
- 「雲プロファイリングレーダ（CPR）」は、衛星搭載用ミリ波レーダとして世界初のドップラー速度計測機能付きレーダで、これにより地球上で雲の鉛直構造だけでなく、雲の上昇や下降等の動きを知ることができる。また、台風のような厚い雲の内部までも捉えることができる。

■ CPRの観測



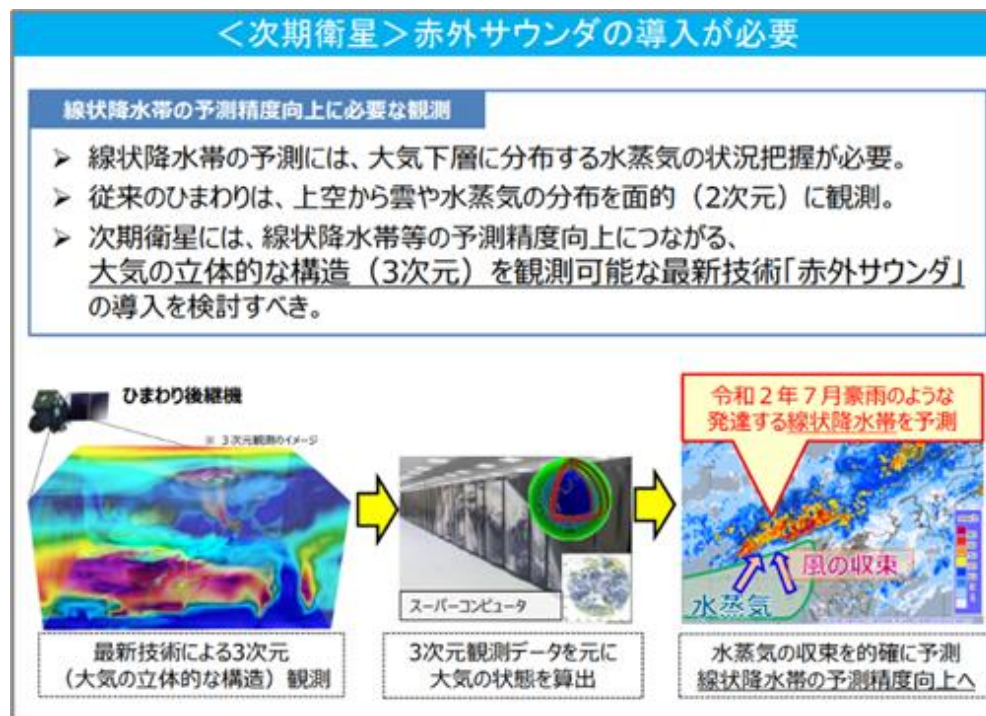
- 観測衛星利用技術の要素技術は、主に以下の5つである。

- 1) SAR
- 2) 光学センサ
- 3) DPR, CPR
- 4) 赤外サウンダ、雷センサ
- 5) 光衛星間通信システム

4) 赤外サウンダ、雷センサ

- 「赤外サウンダ」は、大気からの赤外放射を高い周波数分解能で測定し、気温や水蒸気などの大気鉛直構造を観測するセンサ。数値予報の精度向上に寄与する。特に、台風・線状降水帯の予測精度向上のために有効であり、台風の進路予測、線状降水帯の移動・発達、大雨のピークの予測が改善されることが期待されている。
- 「雷センサ」は、雷（対地雷及び雲放電）に伴う光（稲光）を検出するセンサ。地上の雷放電観測網では捉えることが困難な雲内および対地放電を連続的に捉えることができ、地上の雷放電観測と組み合わせることで下層から上層まで起こる雷放電現象を網羅的に観測することが可能になる。特に雲上部で発生する雷放電に関しては、雷放電の頻度と台風の強度変化・ダウンバーストの発生・竜巻発生との関連について知見が得られており、台風などの極端現象を予報する指標として利用できる。また、洋上の対流活動の指標として用いることができ、特にレーダ観測がない洋上で数値予報モデルの改良に貢献する。

■ 赤外サウンダ



4. 将来宇宙技術の予測調査

4-3. 観測衛星 [7/8]

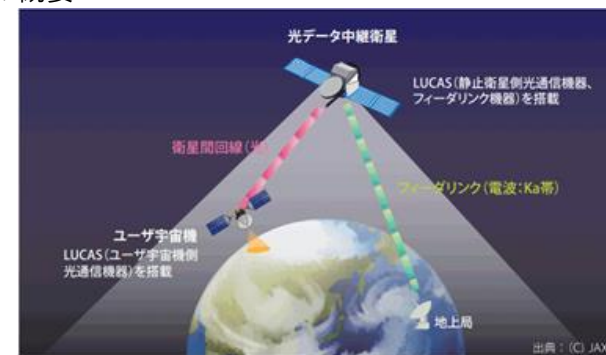
- 観測衛星利用技術の要素技術は、主に以下の5つである。

- 1) SAR
- 2) 光学センサ
- 3) DPR, CPR
- 4) 赤外サウンダ、雷センサ
- 5) 光衛星間通信システム

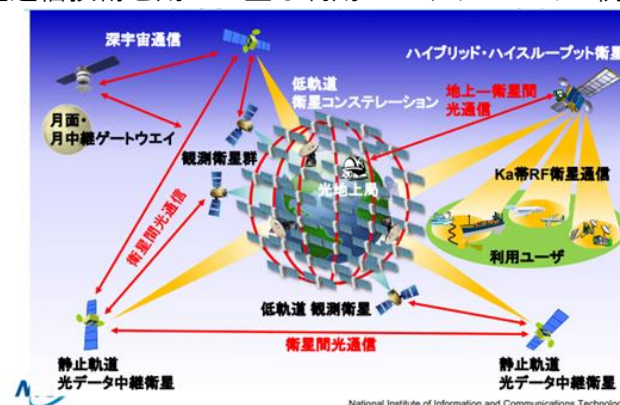
5) 光衛星間通信システム

- 2020年11月、JAXAの「光データ中継衛星」を搭載したH-IIAロケットが打ち上げに成功。静止軌道上を周回する光データ中継衛星には、JAXAが開発した「光衛星間通信システム (LUCAS: Laser Utilizing Communication System)」が搭載されている。光データ中継衛星は、地球観測衛星からのデータをレーザー光を使って中継するとともに、そのデータを地球の地上局に送り届ける役割を担う。
- 地球の赤道上空の高度約4万km上にある静止軌道上に中継衛星を置くことで、地上局1局との直接通信であれば観測衛星の地球一周（約90分）のうち10分程度、一日平均では最大1時間程度しかしか確保できなかった通信時間が、最大40分、一日平均では最大9時間まで大きく広がり、衛星からのデータをより迅速に得られるようになる。
- 光通信の宇宙システム利用については、データ中継システムに加え、静止軌道衛星ベースの汎用衛星通信放送システムの高速化 (HTS: High Throughput Satellite化) や、低軌道衛星ベースのコンステレーションにおけるネットワーク構築手段としても注目を集めている。
- 将来的には、月・惑星探査で必要とされる長距離通信において、伝送レートの上昇 (月-地球間38万kmの伝送時には700Mbps以上) の実現が期待される。また、「はやぶさ」(小惑星) や「かぐや」(月) のような探査衛星においては、より多くの画像・動画を得ることが求められるため、搭載光通信装置や光地上局のさらなる機能向上が必要とされる。

■ LUCASの概要



■ 光衛星通信技術を用いた主な利用アプリケーション例



出典:

- ・ 「JAXA、光衛星間通信の狙い 1.8Gbpsで宇宙空間を高速ネットワーク化」 (<https://businessnetwork.jp/article/8569/>)
- ・ 「光通信新時代」(情報通信研究機構NICT)
- (<https://www.waseda.jp/fsci/giti/assets/uploads/2021/06/e0326805a473aafd0610f88c86868916.pdf>)

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-3. 観測衛星 [8/8]

- 有識者ヒアリングから得られた、観測衛星に関連した将来宇宙技術は以下の2つである。

1) 衛星の市民化

2) actuation（作動）ができる人工衛星

■観測衛星に関連した将来宇宙技術（有識者ヒアリングより）

将来宇宙技術	目的	説明（ヒアリングから）
1) 衛星の市民化	小規模企業や個人が衛星を利用できるようになる	<ul style="list-style-type: none">● 今後技術革新が進めば、2050年よりも早い段階で人工衛星の低価格化が実現できる。自分専用の衛星を宇宙空間に上げ、自分が取得したい情報を得られるようになる未来が来る。● 宇宙空間も含めた3次元化した社会になり、様々な飛翔体が活躍する。「ドラえもん」に出てきた「マイ衛星」が普通になる時代が来る。
2) actuation（作動）ができる人工衛星	災害等に迅速に対応	<ul style="list-style-type: none">● 地球観測衛星は、現状ではセンシングしかできていないが、将来はそれに基づき自ら行動をするようになる。例えば洪水が起きそうだとわかれば、そこに自動運転車を送り込む指示ができるようになる。● 地上と宇宙のテクノロジーが融合される。例えば水位センサからの危険情報が人工衛星に自動的に送られ、衛星側が判断をして撮影場所を特定し撮影する。

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-4. 宇宙ステーション [1/4]

- 宇宙ステーション利用技術は、2. 高齢化・加齢に伴う疾患 の解決に資すると考えられる。

■ISSの概要

- ISS(International Space Station 国際宇宙ステーション)は、日本、米国、ロシア、カナダ、欧州の15カ国が協力して建設した、地上約400km上空にある人類史上最大の有人実験施設。6人のクルーが長期滞在している。1998年から建設が始まり2011年7月に完成。ISSの一部である日本の実験棟「きぼう」は2009年完成。ISSは老朽化が進み、運用は2024年までの予定だが、2030年まで延長される可能性が大きい。
- ISSが存在する宇宙環境の特徴は、以下の通りである。
 - ①微小重力（地上の100万分の1～1万分の1）
 - ②高真空（地上の100億分の1）
 - ③複雑な宇宙放射線（銀河宇宙線、太陽粒子線、バン・アレン帯粒子線、二次粒子線等）
 - ④広い視野（約90分で地球を一周）
 - ⑤閉鎖環境での居住（精神・心理的ストレスや微生物汚染等による健康障害の予防対策が必要）
- 日本の実験棟「きぼう」内には、上記のような微小重力環境を活かした実験を進めるため、細胞培養装置（CBEF）、溶解蛋白質結晶成長実験装置（SPCF）、小動物飼育装置（MHU）、静電浮遊炉（ELF）等が設置されている。

■宇宙ステーションを利用した技術による社会課題解決策

※要素技術の★の項目は宇宙関連の要素技術（次頁以降に詳細を記載）

社会課題	宇宙ステーション利用技術	解決策	要素技術
2. 高齢化・加齢に伴う疾患	微小重力等宇宙環境を利用した研究（物質科学、生命科学）	<ul style="list-style-type: none"> ● 微小重力環境は加齢変化の加速モデルと言われる。微小重力が身体に影響を及ぼすメカニズムを解明することによって、加齢に伴う疾患の治療につながる。 	<ul style="list-style-type: none"> ★人口重力発生装置 ●ポータブル計測・モニタリング機器
	宇宙医学、再生医療	<ul style="list-style-type: none"> ● 微小重力環境での実験は比重差による対流が発生しないため、高品質なタンパク質結晶の生成や、立体臓器の創出に利用される。 ● 宇宙飛行士の健康管理手法や手術技術は、地上での遠隔医療にも応用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ★高品質タンパク質結晶生成 ★立体臓器創出技術 ★ホロポーテーション ★超遠隔手術ロボット

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-4. 宇宙ステーション [1/3]

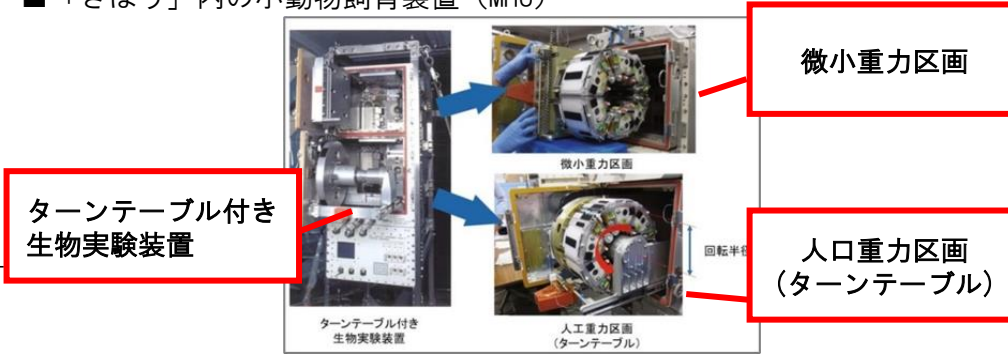
● 宇宙ステーション利用技術の要素技術は、主に以下の4つである。

- 1) 人工重力発生装置
- 2) 高品質蛋白質結晶生成、立体臓器創出技術
- 3) ホロポーテーション
- 4) 超遠隔手術ロボット

1) 人工重力発生装置

- 微小重力環境下では、重力に抗って身体を支える必要がないため、廃用性筋萎縮が進んだり、骨量の減少が進んだりする。
- ISSの日本実験棟「きぼう」には、飼育ケージの回転で生じる遠心力で地上と同じ1Gを作りだせる小動物飼育装置（MHU）が設置されているため、同じ条件で微小重力と1Gの比較ができるようになっている。
- MHUは遠心機の回転速度を変えることで、月や火星の低重力も実現可能。本格的な宇宙移住時代を迎えるにあたり、人口重力が宇宙での人間の生活に広く活用されるようになることが期待されている。また、筋肉の衰えなど加齢に伴う変化のメカニズムを宇宙実験で解明できれば、日常の医療にも役立つ可能性がある。

■ 「きぼう」内の小動物飼育装置（MHU）



2) 高品質蛋白質結晶生成、立体臓器創出技術

- ISSの日本実験棟「きぼう」では、微小重力環境下でタンパク質結晶化を行うことにより、対流や沈降の影響を排除し、地上より高い確率で高品質な結晶を生成することができる。
- JAXAでは2009年から2020年にかけて計20回以上の実験を実施し、得られた結晶からターゲットタンパク質とリード化合物との結合状態を初めて解明するなど、着実な成果を挙げてきた。これらの実験を通して、治療薬の開発や人工血液の製品化が進められている。
- JAXAは2020年12月から宇宙環境を利用した「機能性のある」立体培養の可能性の検討の実証実験を開始。微小重力環境下では、細胞は3次元的に増殖し、立体的な位置関係を保持することが可能であることから、3次元臓器の形成に有利である。将来的には移植可能なヒト臓器の再構成に向けた研究の進展が期待されている。

■ 高品質タンパク質結晶生成実験

タンパク質結晶生成実験は、JAXAがノウハウを有し世界をリードする固有の技術

<p>デュシェンヌ型筋ジストロフィー治療薬開発への貢献</p> <p>宇宙実験成果からより有効性の高い阻害剤を創出</p> <p>臨床第3相試験が進行中</p>	<p>歯周病の治療薬開発に向けた貢献</p> <p>宇宙実験成果を基にした特許を出願</p> <p>アカデミア発創薬を目指す大学にて動物実験が進行中</p>
<p>イヌ・ネコ用人工血液の製品化に向けた貢献</p> <p>人工血液を構成するアルブミンの構造を解明</p> <p>大学と企業が製品化に向け開発を推進中</p>	<p>乳がん治療薬の開発への貢献</p> <p>乳がんに関連するタンパク質と阻害薬候補の結合構造を解明</p> <p>創業ベンチャー企業において研究が進行中</p>

筋ジストロフィー、歯周病、アルツハイマー、乳がん等

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-4. 宇宙ステーション [2/3]

- 宇宙ステーション利用技術の要素技術は、主に以下の4つである。
 - 1) 人工重力発生装置
 - 2) 高品質蛋白質結晶生成、立体臓器創出技術
 - 3) **ホロポーターション**
 - 4) **超遠隔手術ロボット**

3) ホロポーターション

- 「ホロポーターション (Holoportation)」とは、カメラを通して人物の高品質な3Dモデルを生成し、圧縮して、リアルタイムでどこでもライブ配信できるキャプチャ技術のこと。遠隔地にいる参加者が実際に同じ物理空間に存在しているかのように3Dで見たり聞いたり、対話したりできるようなる。
- 将来的には、ホロポーターションとARを組み合わせて、遠隔での技術的アドバイスを可能にする。ISS内の設備が故障した場合などに、実際の設計者やエキスパートをすぐそばに呼び出し、一緒にデバイス操作ができるようになる。
- 今後予定されている火星探査では、片道最大20分程度の通信の遅延が予想され、克服しなければならない障害はあるが、医療やミッションのサポート、家族との連絡など、クルーの重要なコミュニケーション手段となることが期待されている。ホロポーターション技術は、南極などの極限環境、海上石油掘削施設、戦場などをはじめ、遠隔地の患者の診断や治療にも応用できる。

4) 超遠隔手術ロボット

- 宇宙空間に人が滞在・居住するようになれば、外科的手術がいずれ必要になる。NASAでは、2024年のISSでのテストミッションとして、外科手術支援ロボットの搭載を予定している。
- ロボットはMIRA (Miniaturized In-vivo Robotic Assistant) の名称で、ロボットによる支援手術 (RAS : Robotic Assisted Surgery) のために、米ネブラスカ大学リンカーン校と同大発のベンチャー企業Virtual Incision社が開発したものである。
- MIRAの特徴は、小さな切開部から挿入できること。そのため、医師は低侵襲な方法で腹部手術を行うことができる。これまでの事例では、外科医がこの装置を使って結腸切除手術を行うことに成功している。
- 将来的には、火星探査にもMIRAが同乗し、盲腸等の手術を支援することも想定している。

■ ISSに“ホロポート”したシュミット医師ら



■ 手術支援ロボットMIRA



4. 将来宇宙技術の予測調査

4-4. 宇宙ステーション [3/3]

- 有識者ヒアリングから得られた、宇宙ステーションに関連した将来宇宙技術は以下の2つである。

- 1) デキストラロボット、テレグジスタンスロボット
- 2) 無重力下でも動く点滴

■宇宙ステーションに関連した将来宇宙技術（有識者ヒアリングより）

将来宇宙技術	目的	説明（ヒアリングから）
1) デキストラロボット、 テレグジスタンスロボット	遠隔で操作できる器用なロボットが、 人間に代わり宇宙空間での作業を行 う	<ul style="list-style-type: none">• 地球上の人間の手の動きと連動して動作をする器用な（dexterous）、テレグジスタンス（tele-existence）ロボットを制御して、人間が行くことが困難な場所での危険作業等を行う。• この技術は、過疎の町でのバスの運転や遠隔医療にも活かせる。災害時の被災者捜索や津波が来た時の水門閉鎖、原発の廃炉作業など、日本が抱える色々な問題が解決できるようになる。
2) 無重力下でも動く点滴	無重力下での医療行為	<ul style="list-style-type: none">• 宇宙で病気をする人が出た場合に、必ず必要になるのは点滴。しかし点滴は無重力では落ちてこない。無重力下や1/6重力下でも動くようにしなければならぬものは限りなくある。

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-5. 軌道上サービス [1/4]

- 軌道上サービスは、7. **スペースデブリ（人工衛星活動の安全確保）**の解決に資すると考えられる。

■軌道上サービスの概要

- 「軌道上サービス」とは、軌道（静止軌道、地球低軌道）上で衛星に対して行われるサービス。具体的には、軌道上に存在している動作中の衛星への補給、機能付加・交換、廃棄支援等のサービスや、機能を停止した衛星やスペースデブリを軌道から移動させ除去するサービス等がある。
- JAXAでは、2030年代に、静止軌道上にサービスを行うプラットフォームを構築する構想を掲げている。そのために、ミッションに特化した衛星を順次配置し、インフラを提供する衛星群を段階的に整備する計画である。

■軌道上サービスを利用した技術による社会課題解決策

※要素技術の★の項目は宇宙関連の要素技術（次頁以降に詳細を記載）

社会課題	軌道上サービス利用技術	解決策	要素技術
7. スペースデブリ（人工衛星活動の安全確保）	スペースデブリ除去技術 (EOL/ADR)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 打上げ前の人工衛星に装置を装着し、運用終了時の捕獲に利用する (EOL: End of Life)、アーム等を使い人工衛星を把持して落とす (ADR: Active Debris Removal) 等の技術によりスペースデブリを除去することで、増加するスペースデブリによる干渉発生を防ぐ。 	<ul style="list-style-type: none"> ★PRO (rendezvous and proximity operations: ランデブー・近傍運用) ★捕獲・ドッキング・軌道離脱 ★宇宙ロボットアーム ★センシング、コンピュータ・ビジョン ★軌道物体の位置・回転の地上観測 (SSA) ★高効率推進系 (電気推進等) ★回転抑制 ★制御落下 ★軌道上燃料輸送 ★軌道上機器追加・交換 ★軌道上製造 (積層等) ★軌道上材料加工 (切断、材料リサイクル等) ★インターフェイス (ドッキング、流体、電力、データ通信、熱) ★モジュール化 (衛星機器のモジュール化、軌道上での組み立て、構成変更可能な衛星)
	人工衛星の寿命延長・移動・除去	<ul style="list-style-type: none"> ・ 宇宙においても再利用 (reuse)、燃料補給 (refuel)、リサイクル (recycle)、修理 (repair)、除去 (remove) を行うような circular economy に移行するため、軌道上サービスが開発されている。 ・ 宇宙アセットの保守、延命、再利用により、宇宙機の寿命延長が可能になり、宇宙環境の保全につながる。 	
	宇宙状況把握 (SSA: Space Situational Awareness)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人工衛星や宇宙飛行士をスペースデブリの脅威から守るため、その軌道を正確に把握する必要がある。そのためにスペースデブリの観測や軌道情報の把握 (SSA) を行う。 	

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-5. 軌道上サービス [2/4]

- 軌道上サービスの要素技術は、主に以下の4つである。
 - 1) 捕獲・ドッキング・軌道離脱
 - 2) 宇宙ロボットアーム
 - 3) 軌道上燃料輸送
 - 4) 宇宙状況把握 (SSA: Space Situational Awareness)

1) 捕獲・ドッキング・軌道離脱

- スペースデブリの除去は、人工衛星運用終了後に速やかに軌道離脱させる方法 (EOL: End-of-Life Service) と、既に軌道上にあるデブリを取り除く方法 (ADR: Active Debris Removal) がある。
- (株)アストロスケールは、「模擬デブリ」に光学マーカーを備えた磁性体の金属のドッキングプレートを搭載。「捕獲衛星」が「ランデブーセンサ」を駆使し、ドッキングプレートを目印として近傍まで接近し、磁力で捕獲する実証実験を行っている。
- (株)ALEは、事前に人工衛星にカーボンナノチューブ電子源と小型軽量な誘電性テザー (EDT: Electrodynamic Tether) を用いた装置を搭載し、ミッション終了後に軌道降下させる計画をJAXAとともに進めている。
- スカパーJSAT(株)はレーザーアブレーション方式を使ったスペードブリ除去衛星の開発を進めている。

2) 宇宙ロボットアーム

- OSAM-1 (On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing) は、人工衛星の軌道上補給を試験するために設計されたNASAの宇宙船である。2025年以降打ち上げ予定。ロボットアームで衛星を把持し、衛星に燃料を送り込む。
- OSAM-2は、2024年頃打ち上げられる予定。3Dプリンティング技術を用いて、太陽光発電パネルのための複合梁を建造する予定で、ロボットアームを用いた組み立て実証試験によって軌道上で巨大宇宙船を建造する能力を検証する。
- 将来的には、大型の通信アンテナや望遠鏡、超大型のハードウェア等も宇宙空間で製造することが想定される。また、月や火星の表面に送電網や燃料タンクを設置する等、惑星探査にも応用できる。

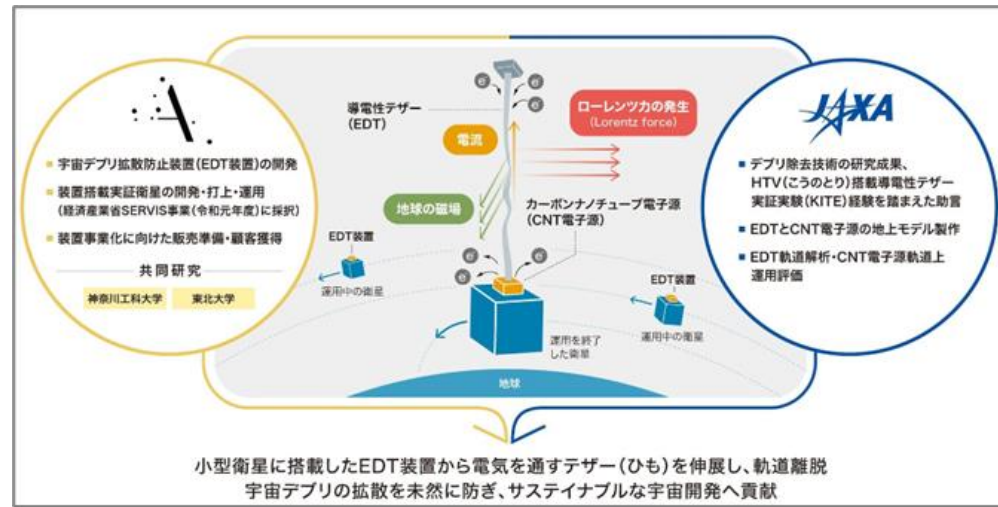
出典:

・「ALEとJAXA、宇宙デブリ拡散防止装置の事業化に向けたJ-SPARC事業共同実証を開始」 (2020年3月25日) [https://star-](https://star-ale.com/news/2020/03/25/2026088.html)

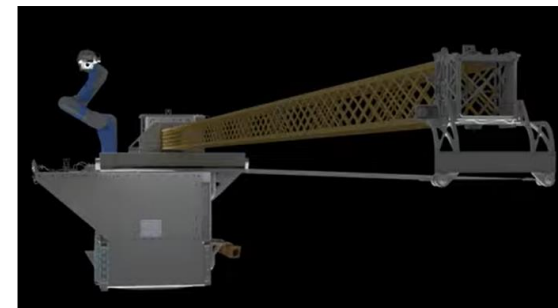
[ale.com/news/2020/03/25/2026088.html](https://star-ale.com/news/2020/03/25/2026088.html)

・NASA (https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/osam-2.html)

■誘電性テザー



■OSAM-2 複合梁を製造



4. 将来宇宙技術の予測調査

4-5. 軌道上サービス [3/4]

- 軌道上サービスの要素技術は、主に以下の4つである。
 - 1) 捕獲・ドッキング・軌道離脱
 - 2) 宇宙ロボットアーム
 - 3) 軌道上燃料輸送
 - 4) 宇宙状況把握 (SSA: Space Situational Awareness)

3) 軌道上燃料輸送

- 人工衛星の燃料は、主に衛星の軌道を制御したり、姿勢を制御したりするために使われるので、燃料が飢渴すると制御不能となる。しかし、もしも運用中の衛星に軌道上で燃料を補給することができれば、衛星の寿命を延ばし、安全な運用を長期間維持することが可能となる。
- 米Orbit Fab社は、地球軌道上で衛星用推進剤のユビキタス供給 “Gas Stations in Space™” (宇宙のガソリンスタンド) を計画している。2022年後半から2023年初め頃には、静止軌道衛星に燃料を補給するタンカー「Tanker-002」を打ち上げ予定。2025年から静止軌道上の衛星にヒドラジン燃料を供給するサービスを開始予定である。

4) 宇宙状況把握 (SSA: Space Situational Awareness)

- 従来の公的機関による宇宙状況把握 (SSA) に加えて、欧米を中心に民間SSAの開発が活発になっている。しかし、現在のSSA能力で追跡できるのは10cm以上の物体に限られていることに加え、衝突確率の予測が精確でないために必要以上の警告が発せられている。
- カナダのNorthStar Earth & Space社は、専用の光学センサを備えた衛星コンステレーションを通じ、宇宙から宇宙を監視する最初の商用サービスを開始する。
- (株)アストロスケールホールディングスは、NorthStar社とともに、SSAデータサービスの改善と将来のミッションリスク軽減を目的として、軌道上サービスを提供する宇宙機へ搭載できる新しいISSA (In-Situ Space Situational Awareness) ペイロードの研究及び開発を進める。

■ Tanker-002



■ NorthStar社の宇宙からのSSAサービス



出典：

・ Orbit Fab HP (<https://www.orbitfab.com/>)

・ satnews (<https://news.satnews.com/2021/08/25/northstars-planned-satellite-constellation-obtains-authorization-for-requested-rf-spectrum-from-canadas-ised/>)

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-5. 軌道上サービス [4/4]

- 有識者ヒアリングから得られた、軌道上サービスに関連する**将来宇宙技術**は以下の2つである。
 - 1) **ランデブー技術、ロボット技術**
 - 2) **人工衛星の長寿命化**

■軌道上サービスに関連する将来宇宙技術（有識者ヒアリングより）

将来宇宙技術	目的	説明（ヒアリングから）
1) ランデブー技術、ロボット技術	スペースデブリ除去	<ul style="list-style-type: none">● デブリ除去のために必要なのは、ETS-VII（技術試験衛星VII型「きく7号」）で開発したようなランデブー技術とロボット技術。これを静止軌道で作る。
2) 人工衛星の長寿命化	スペースデブリを増やさない	<ul style="list-style-type: none">● 燃料や電池を補給して使い続ける。観測装置のカメラなどが高性能化したら、カメラだけ取り換えられるようにする。

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-6. 月面・火星・小惑星・彗星等 [1/4]

- 月面・火星・小惑星・彗星等利用技術は、**8. エネルギー・金属資源不足**の解決に資すると考えられる。

■月面・火星・小惑星・彗星等 の概要

- JAXAでは、宇宙探査での有人活動の長期的な目標として、20年後（2040年頃）の有人火星探査を設定している。燃料の現地調達により6人で500日の火星有人滞在を目標としている。
- 月には66億トン近くの水が存在すると推定されている。水は電気分解すれば水素と酸素に分かれ、有人活動のための用途（飲料、酸素の原料）だけでなく、燃料電池のエネルギー源、ロケットの推進剤としての期待が大きい。月資源を活用し、人工衛星や宇宙船にエネルギーを補給すること、また月を拠点として火星等への探査を実現できる可能性も高い。
- 火星と木星の間に無数に存在する小惑星は、地球近傍にはシリカと鉄やマグネシウムの酸化物で構成されるS型が多く、火星以遠では炭素、水、有機物などを含む黒色のC型が大半。他に、鉄やニッケルを多く含むM型等がある。小惑星の資源としての資産価値は高く、米Asterank社によると、日本の「はやぶさ2」が探査した小惑星「リュウグウ」（C型、大きさは約900m）には、鉄、ニッケル、プラチナ等が埋蔵しており、その価値は827.6億ドル（約12.1兆円）とされている。

■月面・火星・小惑星・彗星等を利用した技術による社会課題解決策

※要素技術の★の項目は宇宙関連の要素技術（次頁以降に詳細を記載）

社会課題	月面・火星・小惑星・彗星等利用技術	解決策	要素技術
8. エネルギー・金属資源不足	資源探査（テラヘルツ波による観測など）	● 月周回衛星にテラヘルツ波観測機器を搭載し、月面を観測。水をはじめとする月資源の「宝の地図」を作り、資源探査に活かす。	★月周回衛星 ★テラヘルツ波センサ ★ランダー（着陸船） ★ローバー（探査車） ★探査用ロボット
	宇宙の工業基地化（月面基地、宇宙作業ロボット、ランダー、ローバー等）	● 月面での水資源探査・開発から月でのものづくりが始まり、2030年以降には資源開発が本格化、2040年には月面基地の開発が進む。 ● 2050年以降、月は火星に行くための中継基地としての役割を持つようになる。また、小惑星の資源開発に取り組むための実験場として月が位置づけられる。	★循環型再生エネルギーシステム ★月面推薬生成プラント ★小惑星探掘

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-6. 月面・火星・小惑星・彗星等 [2/4]

- 月面・火星・小惑星・彗星等に関わる要素技術は、主に以下の4つである。

- 1) テラヘルツ波センサ
- 2) ローバー、探査用ロボット
- 3) 月面推薬生成プラント、循環型再生エネルギーシステム
- 4) 小惑星探掘

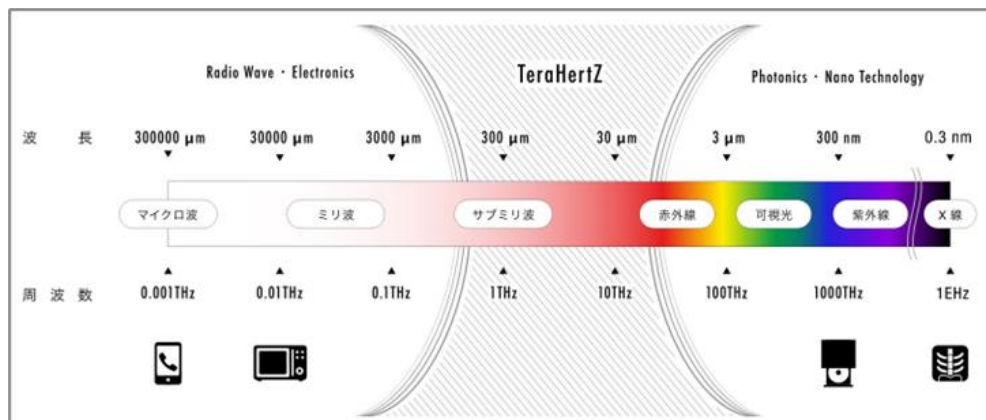
1) テラヘルツ波センサ

- テラヘルツ波は電波と光の境界域に位置する周波数の高い電磁波。水に対して、全ての電磁波の中で最も敏感で検出感度が高い。また、地表から人間が掘れる20cm程度下を観測できる。この特性を利用すれば、月の「水資源地図」を作ることができる。
- ESA(欧州宇宙機関)が主導する「JUICE: Jupiter Icy moons Explore」(大型木星氷衛星探査計画)は、日本や米国も参加する市場最大級の国際太陽系探査計画である。2023年に打上げ、2031年に木星系に到着、2034年に衛星ガニメデの周回軌道への投入が予定されている。目的は氷衛星ガニメデ、エウロパ、カリストのハビタビリティ(生命が存在可能な条件)の探査。テラヘルツ波センサは、エウロパの大気層の同位体や海中の成分組成を調査するために利用される。水の同位体を調べることで、生命の起源にも迫ることが可能になる。

2) ローバー、探査用ロボット

- ローバーは月面車。JAXAでは将来の月面探査を見据え、民間企業と共同でローバーの研究開発を行っている。また、日本の民間企業も独自のローバー、探査用ロボットを開発。
- 日産自動車、トヨタ自動車(ルナ・クルーザー)、ダイモン(YAOKI)、タカラトミー(SORA-Q)、ispace(HAKUTO-R)、GITAI Japan(R1)等が月面探査を目指して研究開発を進めている。

■ テラヘルツ波とは



■ ispaceのマイクロローバーイメージ ■ 月面作業用ロボットローバー「R1」



出典:

- NICT(情報通信研究機構) (https://www2.nict.go.jp/ttrc/thz-sensing/ja/about_Thz/)
- ispace (<https://ispace-inc.com/jpn/technology/>)
- GITAI Japan (<https://gitai.tech/2022/02/10/gitai-develops-lunar-robotic-rover-r1/>)

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-6. 月面・火星・小惑星・彗星等 [3/4]

- 月面・火星・小惑星・彗星等に関連する要素技術は、主に以下の4つである。

- 1) テラヘルツ波センサ
- 2) ローバー、探査用ロボット
- 3) 月面推薬生成プラント、循環型再生エネルギーシステム
- 4) 小惑星探掘

3) 月面推薬生成プラント、循環型再生エネルギーシステム

- JAXAでは、有人月面探査における輸送（月離着陸機、飛翔移動機等）で消費する推薬を月面のレゴリスから生成・保存・供給することを目的として、「月面推薬生成プラント」構想を計画している。2020年代にプラント全体の概念検討、要素技術検討、地上実証等を行い、2030年代にプラント建設地の事前調査や建設に着手、2040年代までに推薬プラントの本格稼働を開始する予定。

- JAXAとHondaは、「循環型再生エネルギーシステム」の実現性を検討している。これは、太陽エネルギーにより水を電気分解して酸素と水素を製造する「高圧水電解システム」と、酸素と水素から電気と水を発生させる「燃料電池システム」を組み合わせたもので、太陽エネルギーと水から継続的に酸素・水素・電気を製造する。

4) 小惑星探掘

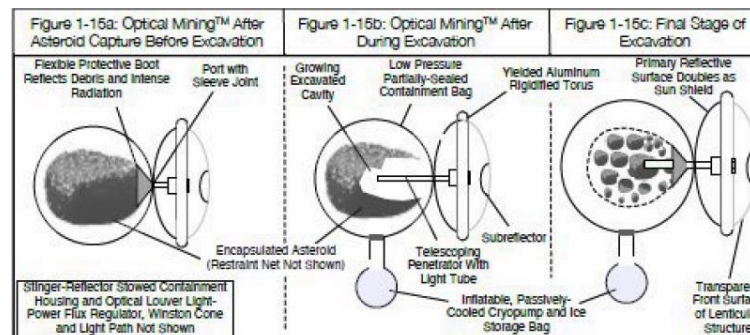
- 2022年現在、小惑星探掘に取り組む主な企業は、AstroForge（米）、TransAstra Corporation（米）、Asteroid Mining Corporation（英）等である。

- TransAstra社は、集光された太陽エネルギーを使用する「光マイニング（Optical Mining）」を利用する無人小型探掘宇宙船を2022～23年に打上げ、地球周回軌道上での実証試験を計画。模擬惑星の発見・確保・加工を目指す。光マイニングでは、短時間の集光照射を繰り返すことで、小惑星の表面層とそこに含まれる揮発性物質を加熱。この過熱により、物質の表層に熱応力による破壊が生じ、閉じ込められていた揮発性物質が放出される。放出された揮発性物質は、小惑星の破壊された粒子を押し流し、スポーリング現象が起こる。その結果生じたスポール粒子と放出された揮発性物質は別々に捕獲・貯蔵される。揮発性物質はロケットの推進剤として利用できるようにする。

■ 月面での循環型再生エネルギーシステム活用イメージ



■ 光マイニングによる小惑星加工



出典：

- JAXA/Honda (https://www.honda.co.jp/future/EngineerTalk_Junkan_Energy/)
- Asteroid Mining Corporation (<https://asteroidminingcorporation.co.uk/robotics>)

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-6. 月面・火星・小惑星・彗星等 [4/4]

- 有識者ヒアリングから得られた、月面・火星・小惑星・彗星等に関連する将来宇宙技術は以下の3つである。

- 1) 閉鎖環境制御技術
- 2) 月地球輸送用ランダー
- 3) リターンミッション

■月面・火星・小惑星・彗星等に関連する将来宇宙技術（有識者ヒアリングより）

将来宇宙技術	目的	説明（ヒアリングから）
1) 閉鎖環境制御技術	エネルギー、水、物質の循環再生	<ul style="list-style-type: none">● 月面開発で期待される技術は、エネルギー、水、物質の循環再生技術。そういう技術を作ることによって、「地球にもこういうことができる」と示してSDGsに貢献し、地球全体の環境保全にもつながる。
2) 月地球輸送用ランダー	月面開発	<ul style="list-style-type: none">● 資源開発をしたり、プラントや基地を作ったりするには、非常に大型の輸送が必要になってくる。ただし費用もかかるので、小型の輸送で頻度高く輸送できるような事業がよい。
3) リターンミッション	月から地球への帰還	<ul style="list-style-type: none">● 2030年代には国のミッションも増え、需要も出てくる。NASAがアルテミス計画で人間を月に送るので、戻ってくるシステムを作らなければならない。それをきっかけにリターンミッションの機会が増えるだろう。月から戻ってくる技術が必要。それは、ある程度大きなロケットがないと無理なので、ロケットの大型化は必要。

4. 将来宇宙技術の予測調査

4-7. 今後必要となりうる技術開発

- その他、今後必要となりうる技術開発に関連する事項として以下の3つが想定される。

- 1) 宇宙空間への移動手段の拡大
- 2) 宇宙での居住環境整備
- 3) 宇宙農業

1) 宇宙空間への移動手段の拡大

- ロケット以外の宇宙への移動や輸送システムとして、カーボンナノチューブを利用した宇宙エレベーターが利用されるようになり、高度の特性に合わせ、宇宙太陽光発電システムの設置や、惑星探査や資源採掘のための施設の建設、月や火星の重力に近い地点での研究活動が行われる。
- また従来、打ち上げていたロケットや航空機の代替手段として物資や人工衛星の輸送にも利用される。また、現在はロケット発射の信頼性が担保できないため難しいとされる放射性廃棄物の宇宙空間での処分も、宇宙エレベーターを使って確実に輸送できることになれば、宇宙空間での処分が行われる。

2) 宇宙での居住環境整備

- 地球規模で深刻化する温暖化、気候変動、火山噴火や地震、人口増加による食糧不足問題などの影響が日本の国土にも及ぶことが予想されるが、これらの解決策の1つとして宇宙への移住が考えられる。
- 地球以外で人が住める可能性がある天体として月と火星が現実的と言われ、近年、月や火星の探査が進められている。月には大気がなく、宇宙からの放射線や隕石から身を守る必要があるが、月の地下に巨大な空洞があることが分かっており、そのエリアへの基地の建設や居住が進められることとなる。基地や住居は、3Dプリンターやロボットを使い人の手を介さない建設が進められる。
- また、人が月や火星に住むことになればスペースコロニーなどの閉鎖的な空間で地球上と異なる大気や重力環境で長期滞在するための準備が必要となる。閉鎖空間ではなく、惑星自体を人類が住める環境に変えてしまうというテラフォーミング（惑星地球化計画）では、火星が有望視されている。その方法として、火星に存在する水（氷）を溶かし、大気中に水蒸気とCO₂を増やすことや、黒い微生物や藻類を用いて太陽熱の吸収を上げる方法が考えられている。

3) 宇宙農業

- 宇宙空間に長期滞在する場合、宇宙をベースとした食料生産が不可欠である。閉鎖空間における農業や昆虫の養殖では、有機廃棄物を循環させ再資源化、浄化させたりする技術が必要となる。
- 閉鎖型植物工場（宇宙植物工場）では、植物のガス交換や光強度、気温、湿度、培地水分などの環境を最適化させる技術が必要となるが、そこでは、光触媒や微生物の活用が想定される。なお、宇宙特有の環境として、微小重力や低圧環境などの影響も考えられるが、微小重力下でも植物は生育できることは過去に示されている。植物の特性によっては土を使わない水耕栽培の可能性もあるが、植物の炭に微生物を付加した人工土壌による持続可能な農業も宇宙空間には適している。
- また、宇宙空間では細胞培養肉や、微生物によるタンパク質の生産などによる食糧確保も想定される。これら、宇宙で生産された食料を商業的に販売する場合、「宇宙産」「月産」といった原産地表示がなされ、宇宙観光土産として買い求める人も出てくる。