

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」

## 委託業務成果報告書

2022年3月15日

株式会社シード・プランニング

本報告書は、文部科学省の令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、株式会社シード・プランニングが実施した令和4年度「将来宇宙技術の予測調査」の成果を取りまとめたものです。

# 目次

調査概要	7
1. 業務題目	7
2. 業務の目的	7
3. 業務の内容	7
4. 調査方法	8
第1章 将来(20~30年後)に想定される社会課題	10
【1】社会課題解決の整理	10
【2】労働力人口の減少	11
(1) 背景	11
(2) その結果危惧される社会課題	12
【3】高齢化・加齢に伴う疾患	13
(1) 背景	13
(2) その結果危惧される社会課題	14
【4】社会インフラの維持管理	15
(1) 背景	15
(2) その結果危惧される社会課題	15
【5】自然災害の増加	16
(1) 背景	16
(2) その結果危惧される社会課題	17
【6】食料不足	18
(1) 背景	18
(2) その結果危惧される社会課題	19
【7】温暖化・気候変動の社会/個人への影響	20
(1) 背景	20
(2) その結果危惧される社会課題	20
【8】スペースデブリ(人工衛星活動の安全確保)	22
(1) 背景	22
(2) その結果危惧される社会課題	23
【9】エネルギー・金属資源不足	24
(1) 背景	24
(2) その結果危惧される社会課題	25
第2章 将来宇宙利用技術	26
【1】将来宇宙利用技術の整理	26
【2】測位衛星	27
(1) 概要	27
(2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術	28
(3) 要素技術	29

(4) 今後必要とされる技術.....	31
<b>【3】 観測衛星.....</b>	<b>32</b>
(1) 概要.....	32
(2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術.....	35
(3) 要素技術.....	37
(4) 今後必要とされる技術.....	44
<b>【4】 宇宙ステーション.....</b>	<b>45</b>
(1) 概要.....	45
(2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術.....	46
(3) 要素技術.....	47
(4) 今後必要とされる技術.....	51
<b>【5】 軌道上サービス.....</b>	<b>52</b>
(1) 概要.....	52
(2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術.....	55
(3) 要素技術.....	56
(4) 今後必要とされる技術.....	61
<b>【6】 月面・火星・小惑星・彗星等.....</b>	<b>62</b>
(1) 概要.....	62
(2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術.....	64
(3) 要素技術.....	65
(4) 今後必要とされる技術.....	72
<b>【7】 今後必要となりうる技術開発.....</b>	<b>73</b>
(1) 宇宙空間への移動手段の拡大.....	73
(2) 宇宙での居住環境整備.....	73
(3) 宇宙農業.....	73
<b>第3章 将来衛星開発技術.....</b>	<b>75</b>
<b>【1】 コア技術における最新動向と課題.....</b>	<b>75</b>
(1) オンボード解析技術.....	77
(2) 3D プリント技術.....	78
(3) バッテリー技術.....	79
(4) 光衛星通信技術.....	81
(5) ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術.....	83
<b>【2】 コア技術の現状と将来予測(俯瞰図).....</b>	<b>86</b>
<b>【3】 国内外の主な最新研究開発事例.....</b>	<b>87</b>
(1) 概要.....	87
(2) オンボード解析技術.....	104
1) アルウェットテクノロジー株式会社.....	104
2) 株式会社 QPS 研究所.....	105
3) Intel Corporation.....	106

4) OroraTech.....	108
5) 金沢大学.....	110
6) 京都大学.....	110
7) 東京工業大学.....	111
8) 明星電気株式会社.....	111
9) 国立高専 10 校.....	112
(3) 3D プリント技術.....	113
1) 三菱電機株式会社.....	113
2) 株式会社ニコン.....	115
3) Fleet Space Technologies.....	117
4) Relativity Space.....	118
5) 3D Systems.....	120
6) Rocket Lab.....	120
7) Skyrora.....	121
8) Boeing.....	121
9) Space Systems Loral (SSL).....	122
10) EOS.....	122
11) ESA.....	123
(4) バッテリー技術.....	124
1) 日立造船株式会社.....	124
2) 株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー.....	126
3) 日本電気硝子株式会社.....	127
4) ジュネーヴ大学.....	129
5) ワシントン州立大学.....	130
6) Morrow Batteries.....	131
7) Pleione Energy.....	132
8) Eagle Picher.....	133
9) EnerSys.....	133
10) SAFT.....	134
11) GomSpace.....	134
12) AAC Clyde Space.....	135
(5) 光衛星通信技術.....	136
1) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA).....	136
2) 情報通信研究機構 (NICT).....	139
3) 日本電気株式会社.....	142
4) 三菱電機株式会社.....	144
5) 株式会社ワークスペース.....	146
6) Mynaric.....	147
7) Tesat-Spacecom.....	148

8) Sony Space Communications Corporation (SSC) .....	149
9) ロイヤルメルボルン工科大学 .....	149
10) Skyloom .....	150
11) ESA.....	150
(6) ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術 .....	151
1) 名古屋大学 .....	151
2) 千葉大学 .....	156
3) 産業技術総合研究所 .....	159
4) パナソニックホールディングス株式会社 .....	162
5) 北海道衛星株式会社(現 Iris 株式会社) .....	166
6) 国立研究評議会(CNR).....	167
7) Kuva Space.....	168
8) Satellogic .....	168
9) ドイツ連邦地球科学天然資源研究所(BGR) .....	169
10) NEO .....	169
11) Pixxel .....	170
12) Orbital Sidekick.....	170
第4章 適時調査・事実確認.....	171
【1】 軌道の利用状況 .....	171

# 調査概要

---

## 1. 業務題目

将来宇宙技術の予測調査

## 2. 業務の目的

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まれており、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。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することを目的とする。

## 3. 業務の内容

### 1) 将来宇宙利用技術の予測

将来(20～30年後)に想定される社会課題に対して、現在の宇宙関連技術を発展・適用していくことで、その解決に貢献できると考えられる。また、今後の宇宙利用促進や新たな産業育成等にも貢献できると考えられる。これらを踏まえて、想定される5件以上の社会課題に対して、以下の項目について特に調査する。

- 想定される将来の課題に対し、解決のために必要とされる宇宙利用技術は何か。
- これらに解決に必要な要素技術は何か。
- 今後必要となりうる技術開発は何か。

### 2) 将来の衛星開発技術の予測

世界動向を鑑み、将来(20～30年後)必要となる衛星開発において、コアとなりうる技術について、5件以上を選定すること。選定するにあたり、選定理由及び日本がその技術を研究開発する場合の課題、現在の技術成熟度(TRL)、開発想定期間、適用対象分野等についてまとめる。

なお、TRLについては、JAXA資料もとに4段階に簡略化して用いることとする。(「(参考)技術成熟度(TRL)」参照)

### (再掲) 技術成熟度(TRL)の定義

- TRL9 : ミッション等で実際に使用・運用するレベル
- TRL6～8: 実環境下においてサブシステム以上で実証するレベル
- TRL3～5: 重要部分の成立性評価と実験室レベル以上での試作試験、環境
- TRL1～2: アイデア提案、基本原理の発見、応用対象の明確化

JAXA「独立行政法人 宇宙航空研究開発機構における研究開発評価について」より

### 3) 適時調査・事実確認

上記(1)、(2)に関係する範囲内で文部科学省 研究開発局宇宙開発利用課が指定する事項について、適時調査(A4で5～10枚程度)を6件程度、事実確認(A4で1枚以内)を最大24件程度行う。随時かつ即時に対応する。適時調査のうち最大4件程度まで、原則として国内若しくはオンラインで開催されるワークショップや会合等への出席を要する調査を実施する。

### 4. 調査方法

調査の内容に応じて以下の方法等から最適な手段を用いて調査を行った。

- 報道発表等の公開情報の定期的な調査
- 書籍、報告書、論文等の参照
- シンポジウムやセミナー等への参加による情報収集
- 関係者へのヒアリング、インターネット等を通じた調査

本調査において、下記の方々へヒアリングを実施した。

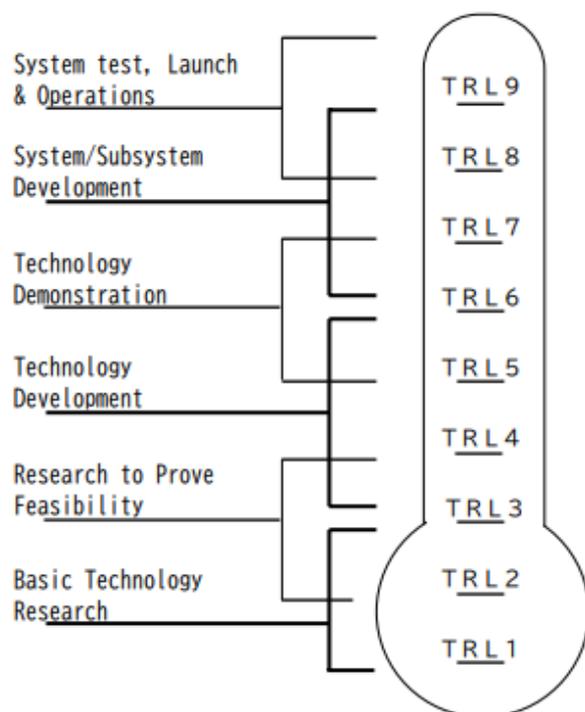
- 慶応義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授 白坂 成功 氏
  - 情報通信研究機構 上席研究員 笠井 康子 氏
  - 東京大学大学院 医学系研究科 国際保健政策学 橋爪 真弘 教授
  - 日本航空宇宙学会第53期会長 河野 功 氏
  - 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 研究開発部門
  - 株式会社 ispace
  - 株式会社アストロスケールホールディングス など
- (順不同)

(参考)技術成熟度(TRL)

## TRL (Technology Readiness Level) について

TRLは、新しい技術をシステムやサブシステムに導入するに先立ち、その技術の成熟度を評価するために用いられる指標であり、1980年代にNASAが開発した(下図参照)。他にもDOD(国防省)が定義している。いずれも1~9の9レベルで構成され、レベルが上がるほど成熟度が高くなる。JAXA総合技術研究本部では、以下の4段階に簡略化して使用している。

- ① TRL 9 : ミッション等で実際に使用・運用するレベル
- ② TRL 8~6 : 実環境下においてサブシステム以上で実証するレベル
- ③ TRL 5~3 : 重要部分の成立性評価と実験室レベル以上での試作試験、環境試験
- ④ TRL 2~1 : アイデア提案、基本原理の発見、応用対象の明確化



NASA Technology Readiness Levels

JAXA「独立行政法人 宇宙航空研究開発機構における研究開発評価について」より

# 第1章 将来(20~30年後)に想定される社会課題

## 【1】社会課題解決の整理

本章では、将来 20、30 年後に想定される社会課題の解決について整理している。社会課題を整理する上で、官公庁やシンクタンク、業界団体等の報告書の文献調査及び有識者ヒアリング、業界団体等が主催する勉強会・フォーラムにおいて情報収集を行った。これらの内容を踏まえて、現在日本が有する社会課題(必然的な流れ)から、将来 20、30 年後に想定される社会課題(顕在化するであろう課題)を導き出し、その結果危惧される社会課題を整理した。

本調査では、「1. 労働力人口の減少」、「2. 高齢化・加齢に伴う疾患」、「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」、「7. デブリ(人口衛星活動の安全確保)」、「8. エネルギー・金属資源不足」の 8 つの社会課題を対象とする。なお、前述の課題の他に「安全保障問題」や「科学技術力の低下」等が挙げられたが、情報収集が難しい点や将来宇宙技術との親和性が低いなどの判断の結果、対象から外している。

図表 1-1-1 将来 20、30 年後に想定される社会課題

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
■ 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"> <li>・ 経済の脆弱化、国際競争力の低下</li> <li>・ 少子高齢化による社会保障基盤の弱体化</li> <li>・ 地域公共交通の衰退</li> </ul>
	2. 高齢化・加齢に伴う疾患	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 医療コスト増加による皆保険制度の見直し</li> <li>・ 医療負担・介護負担の増加</li> </ul>
■ 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"> <li>・ 道路、橋、水道管等の安全確保、事故の増加</li> <li>・ 国・自治体の財政難によるインフラ維持・更新困難化</li> </ul>
	4. 自然災害の増加	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 社会や経済活動の抑制</li> <li>・ 企業の持続的発展や日常業務の停滞</li> </ul>
■ 地球温暖化・気候変動の進展 ■ 天変地異 ■ 環境破壊・環境汚染	5. 食料不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 食料事情の悪化、食料供給の不安定化、食料自給率の低下</li> <li>・ 水産資源確保、農業生産の向上</li> </ul>
	6. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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)</li> <li>・ 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</li> <li>・ 極端な高温による産科合併症と早産の増加</li> <li>・ 労働災害の増加、対人暴力の増加</li> <li>・ 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)</li> </ul>
■ 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"> <li>・ 通信障害、測位・観測衛星の消滅</li> <li>・ デブリ貫通、落下による被害</li> </ul>
	8. エネルギー・金属資源不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 金属資源の飢渴・価格の高騰</li> <li>・ 化石燃料からの脱却の遅れ</li> </ul>



## (2) その結果危惧される社会課題

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。

こうした人口減少・少子高齢化による経済へのマイナスの負荷が需要面、供給面の両面で働き合って、マイナスの相乗効果を発揮し、一旦経済規模の縮小が始まると、それが更なる縮小を招くという「縮小スパイラル」に陥るおそれがある。「縮小スパイラル」が強く作用する場合には、国民負担の増大が経済の成長を上回り、実際の国民生活の質や水準を表す一人当たりの実質消費水準が低下し、国民一人一人の豊かさが低下するような事態を招きかねない。

また、このような人口減少・少子高齢化は、都市圏と地方圏で傾向が異なり、地方圏から三大都市圏へ著しく人口が流出しているために、地方圏における人口減少・少子高齢化は特に深刻な状況となっている。また、地方圏では自家用車の利用が増え、公共交通機関のシェアは近年低下している状況である。地方圏における地域公共交通は、利用者が減少することにより、交通事業者の経営状況が圧迫され、赤字路線を廃止せざるを得ない等、維持が困難な状況にある。地域公共交通はますます衰退し、今後必要な公共交通サービスを受けることのできない地域住民が増加する等、危機的な状況にある。

地方圏の自動車交通の特徴として、自ら自動車を運転する高齢者の割合が多く、高齢者の交通事故が増加している。車を運転することができない高齢者は、日常生活において不便な思いをしていることが多く、例えば買い物をするために非常に不便な思いをする「買い物難民」の増加等が問題視されている。このような、地方圏の交通不便地域に住む高齢者等に向けて、地域公共交通による移動支援が喫緊の課題となっている。

### 【3】 高齢化・加齢に伴う疾患

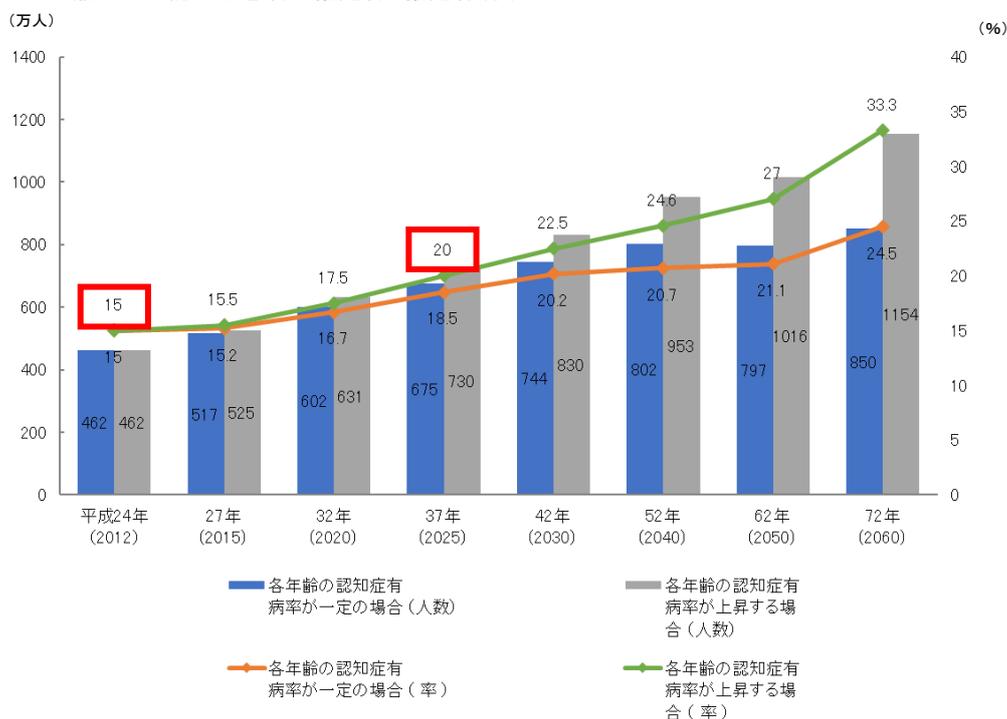
#### (1) 背景

急速に少子高齢化が進む中、日本では、2025 年までにいわゆる「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」(男性 398、女性 434)、「悪性新生物(がん)」(男性 395、女性 203)となっている。外来では、「高血圧性疾患」(男性 1,373、女性 1,682)、「脊柱障害」(男性 975、女性 961)となっている。高齢者の死因をみると、死亡率(65 歳以上人口 10 万人当たりの死亡数)は、2015 年において、「悪性新生物(がん)」が 930.4 と最も高く、次いで「心疾患(高血圧性を除く)」532.5、「肺炎」348.9 の順になっており、これら 3 つの疾病で高齢者の死因の半分以上を占めている。

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、2025 年には、約 5 人に 1 人になるとの推計もある。<sup>3</sup>

図表 1-3-1 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)をもとに作成

(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。

<sup>3</sup> 内閣府、第 1 章 高齢化の状況(第 2 節 3) [https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2017/html/zenbun/s1\\_2.3.html](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2017/html/zenbun/s1_2.3.html), (参照 2023-03-01)

## (2) その結果危惧される社会課題

日本における医療及び介護の提供体制は、世界に冠たる国民皆保険を実現した医療保険制度及び創設から22年目を迎え社会に定着した介護保険制度の下で、着実に整備されてきた。しかし、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。

一方で、介護ニーズについても、医療ニーズを併せ持つ重度の要介護者や認知症高齢者が増加するなど、医療及び介護の連携の必要性はこれまで以上に高まってきている。特に、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。また、人口構造が変化していく中で、医療保険制度及び介護保険制度については、給付と負担のバランスを図りつつ、両制度の持続可能性を確保していくことが重要である。

こうした中で、医療及び介護の提供体制については、サービスを利用する国民の視点に立って、ニーズに見合ったサービスが切れ目なく、かつ、効率的に提供されているかどうかという観点から再点検していく必要がある。また、高齢化が急速に進む都市部や人口が減少する過疎地等といったそれぞれの地域の高齢化の実情に応じて、安心して暮らせる住まいの確保や自立を支える生活支援、疾病予防・介護予防等との統合も必要である。

## 【4】社会インフラの維持管理

---

### (1) 背景

日本では、高度経済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。橋梁の建設は高度経済成長期以降、急速に活発化し、1970 年代から 1980 年代前半は 8,000～16,000 橋程度/年が建設された。その後建設数は年々減少し、2016 年には 645 橋、2017 年には 343 橋となった。橋梁の寿命は設置環境や交通量など諸条件によって異なるが、財務省では耐用年数は 50 年としている。今後は橋梁の架替や新規建設は減少し、既存橋梁を維持管理しながら長寿命化させていくことが重要になる。

また、日本にはトンネルが約 1.1 万箇所あり、このうち、地方公共団体が管理するトンネルは約 0.8 万箇所と、約 7 割を占めている。全長 100m 以上 500m 未満のトンネルが 50%と、高い割合を占める。トンネルの建設は高度経済成長期以降活発になり、1980 年代後半から 2000 年台前半にかけて 180～300 程度/年のトンネルが建設された。その後建設数は年々減少し、2016 年には 52、2017 年には 20 となった。トンネルの寿命は設置環境や交通量など諸条件によって異なるが、多くの地方自治体が策定するトンネルの長寿命化修繕計画では、50 年経過したトンネルを「老朽化している」と表現している。

道路舗装の定期点検は、「アスファルト舗装のうち損傷の進行が早い道路等(分類 A、B)」、「アスファルト舗装のうち損傷の進行が緩やかな道路等(分類 C、D)」、「コンクリート舗装」の 3 種ごとに要領が定められている。アスファルト舗装はコンクリート舗装と比べると初期コストが小さく路面が滑らかで補修が行いやすい反面、わだち掘れができやすいという特徴があるが、日本の舗装の 9 割超がアスファルト舗装である。その他、水門、下水道管、港湾などの社会インフラがあるが、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。

こうした現状を踏まえて、日本ではインフラの長寿命化と補修費削減のため適切な維持管理が求められており、2014 年からは橋梁とトンネルの点検について「近接目視により 5 年に 1 回の頻度を基本」に実施することが定められた。道路舗装については、道路法施行規則第 35 条の 2 第 1 項第二号の規定に基づき、2016 年 10 月に「舗装点検要領」が策定された。

### (2) その結果危惧される社会課題

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。今後ますます社会インフラの老朽化が進み、一層の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。

このように限られた人員と財源で安全・安心を守る工夫が求められている背景から、近年社会インフラの維持管理の効率化を図るスタートアップのサービスが普及してきている。

## 【5】 自然災害の増加

### (1) 背景

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。

2019 年は、山形県沖を震源とする地震、8 月の前線に伴う大雨、令和元年房総半島台風による暴風と大雨、令和元年東日本台風による大雨と暴風、10 月の低気圧等による大雨など、各地で自然災害が相次いだ。特に令和元年東日本台風では、静岡県や新潟県、関東甲信地方、東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨が発生し、各地で国管理河川を含む多数の河川の堤防が決壊し、大規模な浸水被害が生じた。

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。<sup>4</sup> こうした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。

図表 1-5-1 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

出典：国土交通省国土地理院 HP<sup>5</sup>の内容をもとに作成

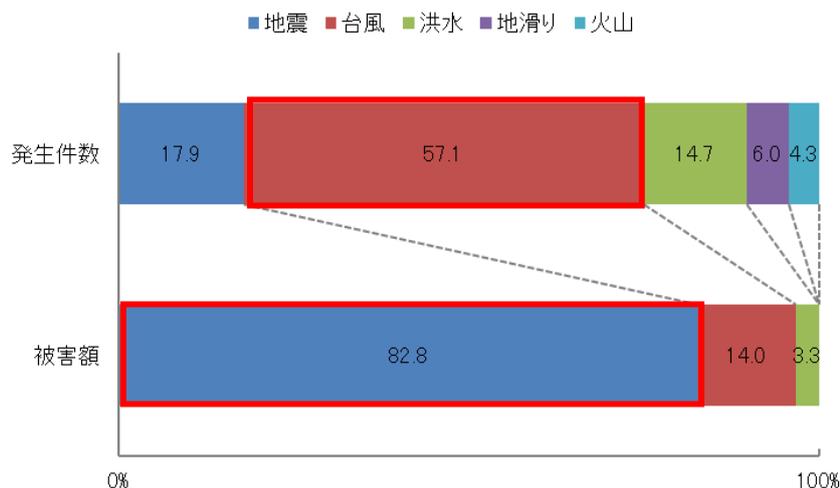
<sup>4</sup> 気象研究所. 報道発表(令和 2 年 8 月 25 日). [https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/020825/press\\_release020825.pdf](https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/020825/press_release020825.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>5</sup> 国土交通省国土地理院. 近年の災害ダイジェスト版. <https://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho41067.html>, (参照 2023-03-01)

## (2) その結果危惧される社会課題

中小企業庁が作成した「我が国における自然災害による被害」の内訳によると、発生件数は「台風」が57.1%と最も多く、次いで「地震」、「洪水」が多い。被害額は、一たび発生すれば広域に甚大な被害をもたらす「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(図表 1-5-2 参照)。<sup>6</sup>

図表 1-5-2 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



出典：ルーパン・カトリック大学疫学研究所災害データベース(EM-DAT)をもとに作成

(注)1.1985年～2018年の自然災害による被害額を集計している。2.2018年12月時点でのデータを用いて集計している。3.EM-DATでは「死者が10人以上」、「被災者が100人以上」、「緊急事態宣言の発令」、「国際救援の要請」いずれかに該当する事象を「災害」として登録している。

内閣府は、2011年3月に発生した東日本大震災による経済的被害は甚大なものであったと発表している。社会インフラ等経済ストック(社会資本・住宅・民間企業設備)の被害額については、震災発生から2週間足らずを経た3月23日に、内閣府から月例経済報告等関係閣僚会議において報告されている。これによると、その被害額は約16～25兆円と試算された。さらに震災の約3か月後の6月には、内閣府から、各県及び各府省からの被害額に関する提供情報に基づき、推計被害額は約16.9兆円に達すると公表されている。<sup>7</sup>

また、国土交通省がまとめた2021年の国内の水害被害額(暫定値)は3,700億円で、5年間の平均で初めて1兆円を超えた。5年ごとの平均被害額を分析すると直近の2017～2021年は1兆320億円で2012～2016年の3,820億円の約2.7倍だった。2021年は広範囲での河川の氾濫や土砂災害などが相次ぎ、浸水や倒壊・流失といった被害を受けた建物は約15,000棟に上った。面積換算では宅地や農地など約18,000ヘクタールに影響が及んだ。被害額は建物といった物的な損失のみを集計しているため、人的被害や交通機関、被災企業の生産活動などに及ぼす影響を含めれば、経済的な被害はさらに大きくなる。このように、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。

<sup>6</sup> 中小企業庁.我が国における自然災害の発生状況.[https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyoy/2019/2019/html/b3\\_2\\_1\\_2.html](https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyoy/2019/2019/html/b3_2_1_2.html), (参照 2023-03-01)

<sup>7</sup> 内閣府.地域の経済 2011 第2節 震災の経済への影響.<https://www5.cao.go.jp/j-j/cr/cr11/chr11020201.html>, (参照 2023-03-01)

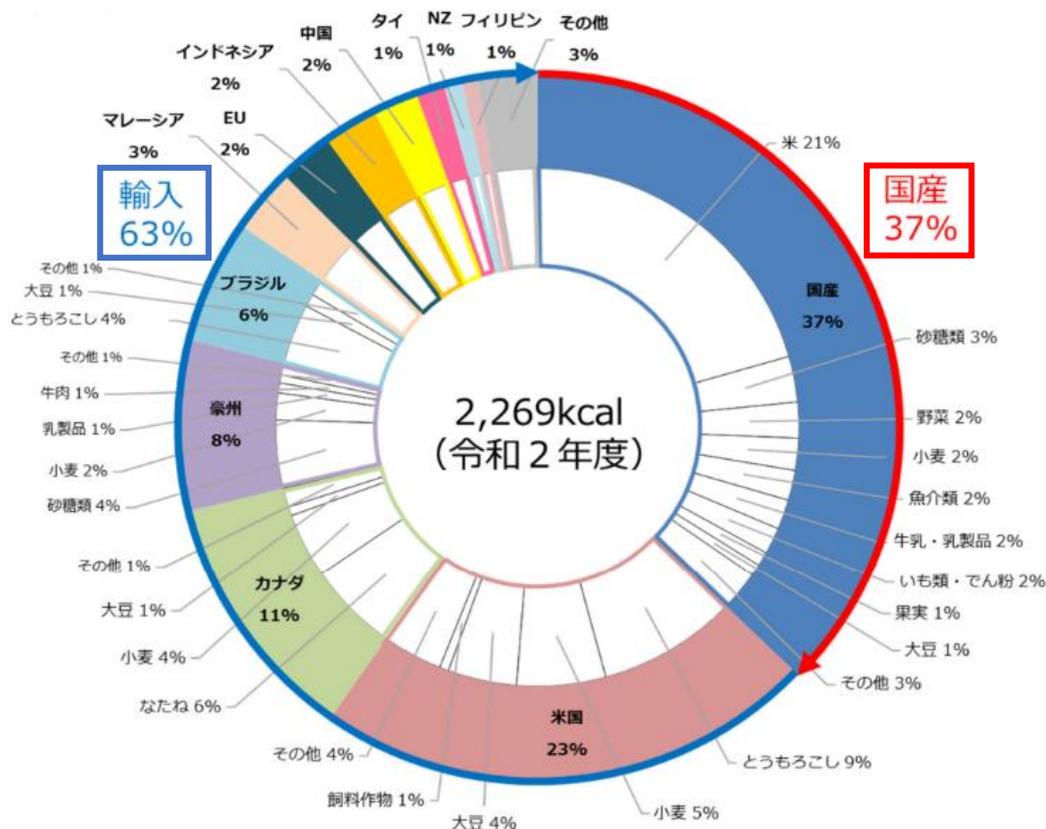
## 【6】食料不足

### (1) 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。供給カロリーの多い順に、米国(23%)、カナダ(11%)、豪州(8%)、ブラジル(6%)となり、国産とこれら主要4ヶ国分とを合わせると、供給カロリーの約9割(85%)を占めている(図表1-6-1参照)。<sup>8</sup> これら4ヶ国はいずれも国土面積が広大で、とうもろこし、小麦、大豆、なたね等の穀物や油糧種子、飼料作物といった土地利用型作物と、それを活かした畜産物が主な輸入品目となっている。

図表 1-6-1 我が国の供給カロリーの国別構成(試算):令和2年度



出典:農林水産省「食料の安定供給に関するリスク検証(2022)」について」の一部追記

<sup>8</sup> 農林水産省.食料の安定供給に関するリスク検証(2022)」について.[https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/attach/pdf/risk\\_2022-2.pdf](https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/attach/pdf/risk_2022-2.pdf), (参照 2023-03-01)

## (2) その結果危惧される社会課題

現在の私たちの食生活を前提として、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。農林水産省の調査によると、農業従事者は 2015 年から 2020 年にかけて約 45 万人減少している<sup>9</sup>。また、水産庁の調査では、漁業就業者が 2003 年から 2017 年にかけて約 8 万人減少していることが分かっている<sup>10</sup>。国内における食料生産の担い手が減ってきていることが明らかである。

そこで農林水産省は、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」などをあげている。

また、食料生産には水が不可欠である。食料の多くを輸入に頼っている日本は、間接的に大量の水を各国から輸入していることになる。環境省は、「バーチャルウォーター」について以下のように説明している。

11

- ・ 食料を輸入している国(消費国)において、もしその輸入食料を生産するとしたら、どの程度の水が必要かを推定したものであり、ロンドン大学東洋アフリカ学科名誉教授のアンソニー・アラン氏がはじめて紹介した概念です。
- ・ 例えば、1kg のトウモロコシを生産するには、灌漑用水として 1,800 リットルの水が必要です。また、牛はこうした穀物を大量に消費しながら育つため、牛肉 1kg を生産するには、その約 20,000 倍の水が必要です。つまり、日本は海外から食料を輸入することによって、その生産に必要な分だけ自国の水を使わないで済んでいるのです。言い換えれば、食料の輸入は、形を変えて水を輸入していることと考えることができます。
- ・ 日本のカロリーベースの食料自給率は 40%程度ですから、日本人は海外の水に依存して生きているといえます。つまり、日本はバーチャルウォーターの輸入を通じて海外とつながっており、海外での水不足や水質汚濁等の水問題は、日本と無関係ではないのです。2005 年において、海外から日本に輸入されたバーチャルウォーター量は、約 800 億立方メートル<sup>\*</sup>であり、その大半は食料に起因しています。これは、日本国内で使用される年間水使用量と同程度です。

つまり、日本は水の豊かな国だが、世界を見れば水資源が乏しい地域もあり、そういった国の水不足が日本の食卓に打撃を与える、ということは十分起こりうるということである。

※ 東京大学生産技術研究所 沖教授らのグループでは 2000 年のデータをもとに約 640 億立方メートルという値を算出している。今回の推定値は、データを 2005 年に更新した上で、木材等新たな産品を追加し、沖教授のご指導を受けて、環境省と特別非営利活動法人日本水フォーラムが算出したものである。

<sup>9</sup> 農林水産省.2020 年農林業センサス.<https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2020/>,(参照 2023-03-01)

<sup>10</sup> 水産庁.水産白書. (3)水産業の就業者をめぐる動向. ア 漁業就業者の動向

<sup>11</sup> 環境省. バーチャルウォーター.[https://www.env.go.jp/water/virtual\\_water/](https://www.env.go.jp/water/virtual_water/),(参照 2023-03-01)

## 【7】 温暖化・気候変動の社会/個人への影響

### (1) 背景

気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)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。IPCC の目的は、各国政府の気候変動に関する政策に科学的な基礎を与えることである。世界中の科学者の協力の下、出版された文献(科学誌に掲載された論文等)に基づいて定期的に報告書を作成し、気候変動に関する最新の科学的知見の評価を提供している。これまで、1990 年、1995 年、2001 年、2007 年、2014 年の 5 回にわたって評価報告書が発表された。

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。

図 1-7-1 1986-2005 年平均に対する世界平均地上気温の変化

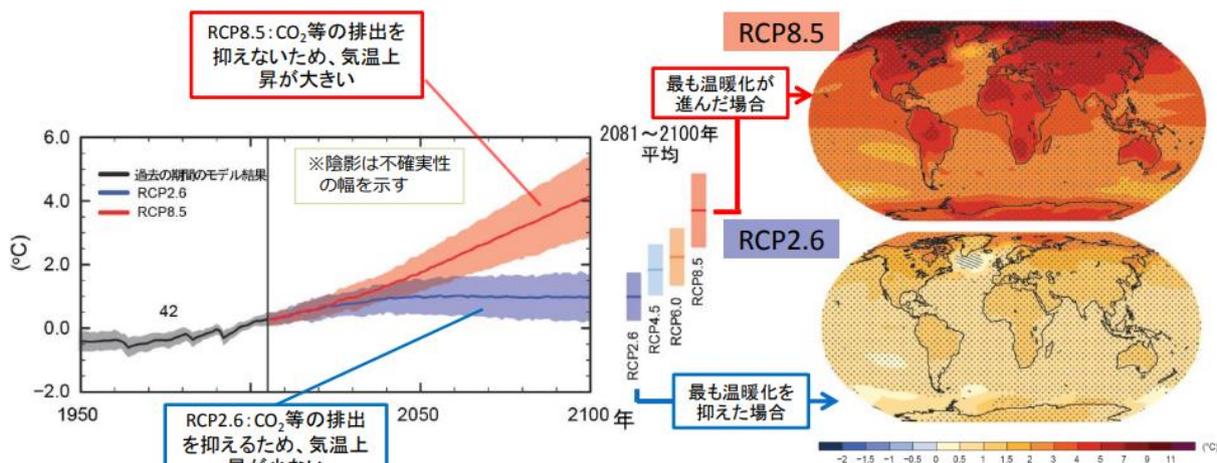


図. 1986-2005年平均に対する世界平均地上気温の変化  
CMIP5の複数モデルにより  
シミュレーションされた時系列(1950年から2100年)

出典: 図, IPCC AR5 WG I SPM Fig. SPM.7(a)

図. 年平均地上気温の変化  
(1986-2005年平均からの偏差)  
2081~2100年におけるRCP2.6と  
RCP8.5のシナリオによるCMIP5複数モデル平均の分布図  
北極域は世界平均より速く温暖化し、陸上における平均的な  
温暖化は海上よりも大きくなるだろう(非常に高い確信度)  
(IPCC AR5 WG I SPM p.20, 21-22行目)

出典: 環境省「IPCC 第 5 次評価報告書の概要 -第 1 作業部会(自然科学的根拠)-」

### (2) その結果危惧される社会課題

こうした背景から、世界の医療関係者や公衆衛生に携わる人々のあいだで気候変動に対する早急な対策が必要との認識が高まっている。2022 年 5 月 19～20 日にドイツ・ベルリンで開催された G7 保健大臣会合では、「COVID-19 パンデミックの克服」の他に「気候変動と健康」が主要議題として取り上げられた。既にこれまでも、気候変動が以下の点を増加させる懸念について指摘されてきた。

- 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

これらに加えて、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。2022年2月28日に公表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次評価報告書(AR6)第2作業部会(WG2)報告書の政策決定者向け要約(SPM)<sup>12</sup>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。

日本においては、環境省が「気候変動影響評価等小委員会」を設置して「気候変動影響評価報告書」を出している。最新版は2020年12月に公表された。<sup>13</sup>この報告書によると、健康分野への影響は「暑熱」と「感染症」が大きく分けられている。3つの指標(重大性、緊急性、確信度)で評価しているが、「暑熱」は、3指標とも高く、重大な影響が認められており、喫緊の課題と捉えられている。「感染症」の中で特に重大性・緊急性が高いと評価されているのは「節足動物媒介感染症」である。

その他、「温暖化と大気汚染の複合影響」として、光化学オキシダントのオゾン等は、気温が高くなると濃度が高くなるので、相乗的な影響が懸念される。特に高齢者や小児・基礎疾患有病者等は、気候変動に対して脆弱であり、よりフォーカスしたケアが必要とされる。東京大学大学院 橋爪教授によると、「メンタルヘルスが含まれる「その他の健康影響」も、決して重要性が低いわけではないが、メンタルヘルスに関する知見がまだ十分に蓄積されていないので、なかなか評価されにくく、単独の項目としては挙げられていない。近年、研究が進んできており、一定程度の評価は可能ではないかと考えている。」とのことだった。

社会への影響としては、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。総務省消防庁によると、2022年5月1日～8月7日の国内の熱中症による救急搬送人員は5万2452人(速報値)で、前年同期間の3万6255人(確定値)より1万人以上多い水準となった<sup>14</sup>。

国立環境研究所の予測によると、気温の上昇がそれほど大きくない気候モデルに基づいた場合、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。しかし、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。

実際には熱中症以外に、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。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。

その他、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、交通事故の増加、対人暴力の増加、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などの事例も考えられる。いずれもその因果関係の確からしさや深刻度の評価が十分になされているものではないが、気候変動がもたらす影響は幅広いことが明らかである。

<sup>12</sup> 環境省.AR6 WG2 政策決定者向け要約.<https://www.env.go.jp/content/900518554.pdf>, (参照 2023-03-01)

<sup>13</sup> 環境省.気候変動影響評価報告書(総説).<https://www.env.go.jp/press/108790.html>, (参照 2023-03-01)

<sup>14</sup> 総務省消防庁.熱中症情報.<https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post3.html>, (参照 2023-03-01)

## 【8】スペースデブリ(人工衛星活動の安全確保)

### (1) 背景

近年深刻になりつつあるのが、増え続ける「スペースデブリ(宇宙ゴミ)」の問題である。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 10 cm 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 1 cm 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。<sup>15</sup>

さらに、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。

すでに、デブリによる衝突事例が挙がっている。米国の通信衛星イリジウム 33 号とロシアの軍用通信衛星コスモス 2251 号の衝突など、活動中の衛星がデブリに衝突したことが確認できているのは 3 例ある。この他に故障の原因の可能性の一つとしてデブリ衝突が疑われるものや、デブリの軌道が急に変わるなど、デブリが衝突したと思われる例も多数ある。また地上に持ち帰られた宇宙機の表面検査により、デブリの衝突痕が多数発見されている。

図表 1-8-1 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。

図表 1-8-2 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。

出典：JAXA の HP<sup>16</sup>をもとに作成

<sup>15</sup> 経済産業省. 令和元年度内外一体の経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業(宇宙状況把握データプラットフォーム形成に向けた各国動向調査). 調査報告書. [https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2019FY/000054.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000054.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>16</sup> JAXA. スペースデブリに関してよくある質問(FAQ). <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/debris/deb-faq.html>, (参照 2023-03-01)

## (2) 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。

このような宇宙システムへの高い依存度と宇宙空間の脅威・リスクの高まりの中で、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。具体的には、宇宙状況監視(SSA)能力強化や宇宙利用に関する国際ルール作り推進とともに、宇宙システムの機能保証の強化に取り組み、宇宙空間における異変が我が国の安全保障や国民生活、経済社会活動に悪影響を及ぼすことを防止することが必要である。

スペースデブリ対策については、スペースデブリに係る研究者の情報交換の場として設立された、先進国を中心とした宇宙機関で構成される委員会である国際宇宙機関間スペースデブリ調整委員会(IADC: Inter-Agency Debris Coordination Committee)で検討されてきており、2002年にIADCスペースデブリ低減ガイドラインが制定された。これを踏まえ、宇宙活動の研究援助・情報交換、法及び原則の確立等の検討を目的とした国連COPUOS(Committee on the Peaceful Uses of Outer Space)で議論が進められ、2007年に国連COPUOSスペースデブリ低減ガイドラインが策定されている。

JAXAでは、レーダ、光学望遠鏡、解析システムから成る宇宙状況把握(SSA: Space Situational Awareness)システムを通じ、スペースデブリの軌道把握、JAXA衛星への接近解析、再突入予測を行っており、同システムの能力向上・更新を目指している。また、(株)アストロスケールホールディングスと提携し、世界初の大型デブリ除去を目指す、商業デブリ除去実証プロジェクトを始動させており、2023年度に100kg級の技術実証衛星を打ち上げる予定である(2023年3月1日時点)。

## 【9】 エネルギー・金属資源不足

---

### (1) 背景

近年、エネルギーをめぐる問題は世界中で不確実性が高まっている。とりわけ大きな問題は、世界的なエネルギー価格の高騰である。2021年1月、日本でも寒波が襲来したことに加えてLNG(天然ガス)が不足し、電力需給がひっ迫した。日本だけでなく、同様の状況は世界各地で起こっている。

その要因のひとつは、2015年以降、原油価格の下落で化石燃料への投資が停滞し、さらに脱炭素化の流れが重なって、供給力不足が深刻になったことである。また、新型コロナウイルスによる経済の停滞が回復するにつれて、各国でエネルギーの需要が増えたことも挙げられる。これにより、世界のガス火力への依存度が上がり、とくに欧州が世界で天然ガスや原油などを買い求めたことで、ガスの価格が上昇しました。

その一方で、悪天候が続いて風力などの再生可能エネルギー(再エネ)が期待通り動かなかったことも影響している。これに、ロシアによるウクライナ侵略が燃料の価格上昇に拍車をかけた。とりわけ欧州では、天然ガスや石油など化石燃料をロシアに頼っている国が多く、大きな影響が出ている。こうしたさまざまな状況によって、化石燃料の輸入価格も急激に上がっており、人々の生活に影響を与えている。

こうした地球の天然資源の急速な枯渇は、重要な材料を得るため、また膨大な富から利益を得るために、宇宙採掘の必要性を高めている。宇宙採掘は資本コストが高いにも関わらず、地球の資源が枯渇した時の最後の手段としてますます利用されるようになっていく。<sup>17</sup>

2019年3月、米国は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)が協力することに対し、NASA(米国航空宇宙局)との協定に調印している。2021年7月に日本航空宇宙学会が発表した「JSASS 宇宙ビジョン 2050」<sup>18</sup>には以下の記載がある。

- ・ 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がる。
- ・ 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。

---

<sup>17</sup> Debanjan Biswas.Space Mining Market Show Maximum Potential Growth at a CAGR of 23.5 by 2030 Know More with Emergen Research

<sup>18</sup> 日本航空宇宙学会.JSASS 宇宙ビジョン 2050.<https://www.jsass.or.jp/wp-content/uploads/2021/08/f8f3e1ff5286673fb4cf443bb7d4276d.pdf>, (参照 2023-03-01)

2017年にJAXAの国際共同研究チームは、日本の月周回衛星「かぐや」に搭載された電波レーダ、月レーダサウンダーで取得したデータを解析し、月の火山地域の地下、数10m～数100mの深さに、複数の空洞の存在を確認した。確認された地下空洞の一つは、「かぐや」が発見した縦孔を東端として、西に数10km伸びた巨大なものである。

地下空洞の存在を確実にした今回の成果は、科学的にも将来の月探査においても重要なものである。溶岩チューブのような地下空洞内部は、月の起源と進化の様々な課題を解決出来る場所であり、また月における基地建設として最適の場所だからである。縦孔は、こうした地下空洞への入り口の可能性があるが、縦孔の数は非常に少なく、科学的探査や基地を作ることのできる地下空洞は希少なものとされている。

## (2) 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。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。<sup>19</sup>

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、月極域探査ミッションを、インド等との国際協力により実施する。(2023年度打上目標)

この探査の機会を活用して、水資源の利用可能性の確認のみならず、重力天体表面探査技術の確立を目指す。また、機会を活用して、科学的成果創出にも貢献する。<sup>20</sup>

<sup>19</sup> 田島孝敏(大林組).マイクロ波を用いた月面模擬砂の焼成実験.宇宙科学技術連合講演会講演集.2021

<sup>20</sup> 内閣府.宇宙政策委員会 宇宙科学・探査小委員会.第22回会合(<https://www8.cao.go.jp/space/comittee/27-kagaku/kagaku-dai22/siryou3-2.pdf>)(参照 2023-03-01)

## 第2章 将来宇宙利用技術

### 【1】将来宇宙利用技術の整理

将来宇宙利用技術について、(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(③ISS 国際宇宙ステーション、④軌道上サービス、⑤月面・火星・小惑星・彗星等)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。

図表 2-1-1 2050年までの社会課題とその解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術

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"> <li>・ 建機・農機の自動走行</li> <li>・ 自動運転</li> <li>・ 航海支援</li> <li>・ ドローン</li> <li>・ 物流・運行効率化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 衛星測位システム</li> <li>・ RTK 測位</li> <li>・ AIS 受信機搭載衛星</li> </ul>
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"> <li>・ 微小重力等宇宙環境を利用した研究(物質科学、生命科学)</li> <li>・ 宇宙医学、再生医療</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人工重力発生装置</li> <li>・ 高品質タンパク質結晶生成</li> <li>・ 立体臓器創出技術</li> <li>・ ホロポーテーション</li> <li>・ 超遠隔手術ロボット</li> </ul>
3. 社会インフラの維持管理	(1)人工衛星を利用 ②観測衛星	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 道路・橋・水道管等のモニタリング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SAR</li> <li>・ 光学センサ</li> <li>・ DPR, CPR</li> <li>・ 赤外サウンダ、雷センサ</li> </ul>
4. 自然災害の増加		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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)</li> <li>・ 台風、線状降水帯等の高精度予報</li> <li>・ 土砂災害、河川氾濫等災害リスク予測</li> <li>・ 災害後の被害状況把握</li> </ul>	
5. 食料不足		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 最適耕作地探査</li> <li>・ 農作物の生育予測</li> <li>・ 海洋データ取得、魚群探査、養殖監視</li> </ul>	
6. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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)</li> </ul>	
7. スペースデブリ(人工衛星活動の安全確保)	(2)宇宙空間を利用 ④軌道上サービス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スペースデブリ除去技術(EOL/ADR)</li> <li>・ 人工衛星の寿命延長・移動・除去</li> <li>・ 宇宙状況把握(SSA: Space Situational Awareness)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 捕獲・ドッキング・軌道離脱</li> <li>・ 宇宙ロボットアーム</li> <li>・ 軌道上燃料輸送</li> <li>・ 宇宙状況把握(SSA)</li> </ul>
8. エネルギー・金属資源不足	(2)宇宙空間を利用 ⑤月面・火星・小惑星・彗星等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 資源探査(テラヘルツ波による観測等)</li> <li>・ 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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ テラヘルツ波センサ</li> <li>・ ローバー、探査用ロボット</li> <li>・ 月面推薬生成プラント、循環型再生エネルギーシステム</li> <li>・ 小惑星探掘</li> <li>・ バッテリー技術(レアメタルを使用しない)</li> </ul>
9. その他	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 宇宙空間への移動手段</li> <li>・ 宇宙での居住環境整備</li> <li>・ 宇宙農業</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 宇宙エレベーター</li> <li>・ 3Dプリンタ</li> <li>・ ロボット</li> <li>・ 閉鎖型植物工場(宇宙植物工場)</li> </ul>

## 【2】 測位衛星

### (1) 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ある。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。

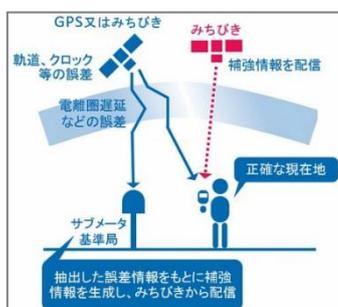
図表 2-2-1 各国の測位衛星の概要 (2022年9月現在運用中の人工衛星)

国名	測位衛星	稼働基数	打上げ開始年
中国	北斗	44	2000
米国	GPS	30	1978
ロシア	グロナス	23	1982
欧州連合	ガリレオ	22	2011
インド	NavIC	7	2013
日本	みちびき	4	2010

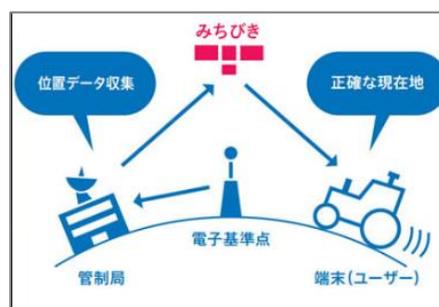
測位衛星は、高度 20,000 km から地球同期軌道 (35,786 km) までの中軌道上に配置されている。日本の準天頂衛星「みちびき」は、高度 36,000 km の位置の静止軌道上にある。

日本の準天頂衛星「みちびき」は、GPS と一体で利用可能なため、「みちびき」の数を増やして GPS を補完することで、複数の衛星から位置情報を取得でき、より安定的な測位を実現できるようになる。また、地球の大気上層部に存在し、電波を反射する性質を持つ「電離層」は、衛星からの電波に影響を与え、誤差を生む原因となっているが、「みちびき」はこの誤差を解消するための補強電波(サブメータ級測位補強情報)を送信し、精度向上を実現している。このため、「みちびき」は GPS に対して“補完”と“補強”の二つの役割を持ち、従来の GPS と「みちびき」を組み合わせることで、今まで誤差数メートル単位であった位置測定の精度が、より安定的に、数センチにまで高精度になる特長を持っている。自動運転車などでは超高精度の測位が不可欠であるため、期待が大きい。なお、「みちびき」は 2022 年 12 月に改訂された「宇宙基本計画工程表」において、7 基体制(2022 年現在は 4 基)で運用することが閣議決定されている。

図表 2-2-2 サブメータ級測位補強サービス(SLAS)<sup>21</sup>



図表 2-2-3 センチメータ級測位補強サービス(CLAS)<sup>22</sup>



出典:みちびき(準天頂衛星システム:QZSS)公式サイト

<sup>21</sup> みちびき.サブメータ級測位補強サービス.[https://qzss.go.jp/overview/services/sv05\\_slas.html](https://qzss.go.jp/overview/services/sv05_slas.html), (参照 2023-03-01)

<sup>22</sup> みちびき.センチメータ級測位補強サービス.[https://qzss.go.jp/overview/services/sv06\\_clas.html](https://qzss.go.jp/overview/services/sv06_clas.html), (参照 2023-03-01)

## (2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術

測位情報の利用により可能になった宇宙利用技術の中で、社会課題解決に資する技術は、①建機・農機の自動走行、②自動運転、③航海支援、④ドローン、⑤物流・運行効率化等である。これらの技術は社会課題の中でも「1.労働力人口の減少」の解決策となる。

図表 2-2-4 測位衛星を利用した技術による社会課題解決策

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	①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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>衛星測位システム</u></li> <li>・ <u>RTK (Real Time Kinematic)-GNSS</u></li> <li>・ <u>AI</u></li> </ul>
	②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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>衛星測位システム</u></li> <li>・ 車載カメラ、センサ (LiDAR、ミリ波レーダ)</li> <li>・ AI</li> <li>・ 高精度 3 次元地図データ</li> <li>・ V2X 技術 (路車間通信、車車間通信) 等</li> </ul>
	③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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>AIS 受信機搭載衛星</u></li> <li>・ AR 航海情報表示システム</li> <li>・ AI</li> </ul>
	④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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>衛星測位システム</u></li> <li>・ <u>RTK 測位</u></li> <li>・ 運行管理システム (UTMS)</li> </ul>
	⑤物流・運行効率化	物流業者の配送ルートの効率化、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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>衛星測位システム</u></li> <li>・ <u>CLAS (測位補強情報)</u></li> <li>・ <u>RTK 測位</u></li> </ul>

※要素技術のアンダーライン項目は宇宙関連の要素技術

### (3) 要素技術

#### 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。

人工衛星は個体を識別する信号(コード)と時刻情報(送信時刻)を一定間隔(1秒間に1,000回)地球に向かって送信している。ユーザーセグメントの受信機内部の時計が衛星内部の時計に同期していれば、衛星からの信号の受信時刻を計測することで、到達時間(信号が送信されてから受信するまでに掛かった時間)がわかる。到達時間がわかれば、それに光(電波)の速度を掛けたものが衛星までの距離になる。

ユーザーセグメントの受信機は、最低4つの衛星までの距離がわかれば、各衛星までの距離を半径とする4つの球面の交点が計測地点の3次元位置になる。球面の中心は各衛星の現在位置で、衛星からの信号に含まれる軌道情報から計算できる。しかし、衛星の軌道情報や衛星の時計にも誤差があり、また、上空の状況(電離層や対流圏)によっては、電波の進む速度も変化するため、取得する位置情報には数メートル程度の誤差が生じてしまうことが一般的である。上記のような測位法は、「単独測位」と呼ばれ、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」とは Real Time Kinematic の略で、相対測位のこと。予め正確な位置把握ができていない「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。

ソフトバンク株のサービス「ichimill(イチミル)」は、GNSSから受信した信号を利用してRTK測位を行うことで、誤差数センチメートルの高精度測位を可能にする位置測定サービス。自社が保有する全国3,300カ所以上の基地局を独自基準点とした測位を行う。どの観測点でも周辺10km以内に2~5カ所の基準点が存在しているため、移動に合わせて最適な基準点を自動的に切り替えることができ、安定的な測位が可能になる。この独自基準点が受信した信号を基に、「測位コアシステム」で補正情報を生成し、ソフトバンクのモバイルネットワークを通して農機や建機、自動運転車、ドローンなどに搭載されたGNSS受信機(移動局)へ補正情報を配信する。この補正情報と、GNSS受信機が受信した信号を活用してRTK測位を行うことで、誤差数センチメートルの高精度な測位がリアルタイムで可能になる。<sup>23</sup>

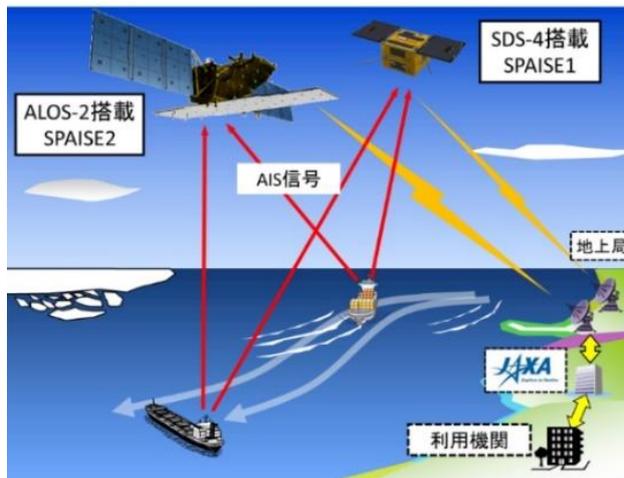
<sup>23</sup> ソフトバンク 業界別ユースケースで見る高精度測位サービスで実現する産業自動化。 <https://biz.tm.softbank.jp/rs/000-KOY-740/images/cid964-ichimill-whitepaper.pdf>, (参照 2023-03-01)

### 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。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。

図表 2-2-5 衛星搭載の船舶自動識別装置(AIS)



図表 2-2-6 AIS と SAR の複合利用による船舶動静把握

<p><b>AIS信号による船舶モニタ</b></p>	<p><b>合成開口レーダ(SAR)による船舶モニタ</b></p>
<p>船舶自動識別装置(AIS)(※)から取得した情報を地図上にマッピング ※自船の情報(識別番号、船名、位置、針路、速力、目的地など)をVHF帯電波で送信。</p> <p>長所: 5,000kmの範囲で個々の船舶情報が分かる 短所: AIS信号非発出船等を見落とす</p>	<p>ALOS-2/PALSAR-2の広域観測モードで観測した350km×350kmのSAR画像から、30分で船舶を自動検出</p> <p>長所: AIS非発出船も含めた広い海域の船舶分布を把握できる 短所: 個々の船舶情報が分からない</p>
<p><b>SAR+AIS複合利用による船舶モニタ</b> AISとSARを同時搭載したALOS-2では、広範囲の「船舶情報」と「AIS非発出船を含めた船舶分布」の両方を把握することが可能。</p>	

出典: JAXA「海洋状況把握(MDA)に役立つ衛星データの種類」<sup>24</sup>

<sup>24</sup> JAXA. 海洋状況把握(MDA)に役立つ人工衛星データの種類. <https://earth.jaxa.jp/ja/application/mda/technology/index.html>, (参照 2023-03-01)

また、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、2023 年年度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(2023 年 3 月 1 日時点)。

2022 年 1 月、公益財団法人日本財団は、世界で初めて小型観光船の無人運行に成功した。船には、画像解析による小型船の検出を目的としたカメラと、GNSS、AIS 受信機等を設置。これらにより他船等の障害物を回避しながらの自立航行が可能になった。有人でも操船が困難とされる離岸や着岸時も、自立操船システムにより無人での操船を実現。日本国内には旅客船が約 2,000 隻あり、離島との交通手段等に利用されているが、その船員は 2000 年以降の 20 年間で約 1 万人から約 7,000 人に減少。このため、船員不足と船員一人当たりの負担増加が課題になっているが、無人運行技術の小型船への転用が可能となれば、将来的な船員不足の解消に期待できる。<sup>25</sup>

#### (4) 今後必要とされる技術

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、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 データ受信などであった。

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	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		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	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。

<sup>25</sup> 日本財団。無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」世界初の小型観光船の無人運航実証、横須賀市猿島で成功。<https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2022/20220111-66456.html>(参照 2023-03-01)

### 【3】 観測衛星

#### (1) 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。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 400～1,000 km 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。

各国とも公的利用が中心だが、欧米では衛星データ利用の拡大と商業化を前提として、アンカーテナンシー（民間の産業活動において、政府が一定の調達を保障することにより、産業基盤の安定を図ること。米国 NASA が進めてきた ISS への物資・人員の輸送プログラムなど。）や、PPP（Public-Private-Partnership: 官民提携事業方式）により、民間の活力を活用した方策が取られている。

また、ベンチャー企業を中心に安価な数十基以上の小型・超小型コンステレーション構築が進んでおり、高い撮像頻度の需要に対応している。他方、昼夜天候を問わず観測可能な SAR（Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダ）衛星でも小型化の技術が進展している。今後は SAR 衛星と光学衛星のコンステレーション市場が拡大することが予想される。

我が国では、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。

図表 2-3-1 運用中/予定の日本の地球観測衛星

名称	概要
ひまわり 8 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>気象庁が開発、三菱電機が製造、三菱重工業と JAXA が 2014 年に打ち上げた静止気象衛星。</li> <li>日本及び東アジア・西太平洋域内の各国における天気予報、台風・集中豪雨、気象変動などの監視・予測、船舶や航空機の運航の安全確保、地球環境の監視を目的とする。</li> <li>可視赤外放射計 16 チャンネルを搭載しカラー画像が作成可能に。</li> </ul>
ひまわり 9 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>2016 年に「ひまわり 8 号」のバックアップ機として打上げ。2022 年から交代し、2028 年まで運用される予定。機能は「8 号」と同じ。（2023 年 3 月 1 日時点）</li> </ul>
いぶき	<ul style="list-style-type: none"> <li>GOSAT（Greenhouse gases Observing SATellite）。環境省、国立環境研究所、JAXA が共同で開発した温室効果ガス観測技術衛星。2009 年打上げ。</li> <li>温室効果ガス観測センサ、雲・エアロゾルセンサ搭載。二酸化炭素、メタンを観測。</li> </ul>
いぶき 2 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>GOSAT-2。2018 年打上げ。世界最高分光分解能を有する分光計を搭載。太陽光の地表面での反射光の大気による吸収と大気からの熱放射光を同時に観測。</li> <li>温室効果ガスの吸収・排出量をよりの確に把握するため、観測したい対象エリアに合わせて地上観測ポイントを設定できる機能を備える。また、「一酸化炭素」が観測対象に加わる。</li> </ul>

名称	概要
しずく	<ul style="list-style-type: none"> <li>水循環変動観測衛星 (GCOM-W) (GCOM: Global Change Observation Mission)。2012 年打上げ。設計・製造のプライムメーカーは NEC。</li> <li>全地球観測システム(GEOSS) 10 年計画に沿い、10～15 年程度の期間、全地球上の降水積雪量や水蒸気量、雲、エアロゾル(大気中の微粒子)、植生などの物理データを観測し、そのデータを気候変動予測や気象予測、水や食料資源管理等に利用し、有効性を実証することを目的とする。</li> <li>高性能マイクロ波放射計 (AMSR2) 搭載。主に降水量、水蒸気量、海洋上の風速や水温、陸域の水分量、積雪深度を観測する。</li> </ul>
しきさい	<ul style="list-style-type: none"> <li>気候変動観測衛星 (GCOM-C)。2017 年打上げ。プライムメーカーは NEC。</li> <li>地球表面の大気の色や温度を観測することができる可視～熱赤外多波長光学イメージャ SGLI を搭載。雲・エアロゾル、海色、植生、雪氷等を全地球規模で長期間観測することで、将来の気温上昇量の正確な予測に必要な放射収支、および炭素循環の変動メカニズムの解明に貢献する。</li> </ul>
だいち 2 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) (ALOS: Advanced Land Observing Satellite)。三菱電機がプライムメーカーとして製造。2014 年打上げ。</li> <li>フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ PALSAR-2、地球観測用小型赤外線カメラ CIRC、船舶自動識別信号受信機 SPAISE2 搭載。</li> <li>JAXA が地図作成、地域観測、災害状況把握、資源調査などへの貢献を目的として開発した「だいち」の後継の地球観測衛星。地震による地殻変動を 2 センチの精度で計測できる。レーダ衛星なので夜間でも画像を確認でき、CIRC、SPAISE2 を搭載することにより、海上における船舶の識別も可能。</li> </ul>
だいち 3 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>先進光学衛星 (ALOS-3。プライムメーカーは三菱電機。H3 ロケット 1 号機で 2022 年度打上げ予定。(2023 年 3 月 1 日時点)</li> <li>従来の地球観測衛星では達成できなかった高分解能 (80 cm)、広域観測幅 (70 km) と連続撮像可能時間 (地球 1 周回 100 分のうち 10 分:4,000km 分) の両立を狙って開発された。</li> <li>全地球規模の陸域を継続的に観測し、蓄積した平時の画像や災害発生時の画像を防災・災害対策を含む広義の安全保障に活用。国内や途上国の高精度な地理空間情報の整備・更新に貢献するほか、多様な観測バンドによる沿岸域や植生域の環境保全への利用・研究等、様々な分野での活用が期待されている。</li> <li>データ配布事業者は(株)パスコ。</li> </ul>
だいち 4 号	<ul style="list-style-type: none"> <li>先進レーダ衛星 (ALOS-4)。プライムメーカーは三菱電機。2023 年度打上げ予定。(2023 年 3 月 10 日時点)</li> <li>L バンド合成開口レーダ PALSAR-3、船舶自動識別信号受信機 SPAISE3 搭載。</li> <li>高い空間分解能 (3m) を維持しつつ、観測幅は ALOS-2 の 4 倍 (200 km)。観測幅の拡張により観測頻度が向上し (日本の観測頻度は年 20 回)、地殻、地盤変動による異変の早期発見、広域の災害状況把握、森林資源管理の高度化等に寄与する。</li> </ul>

名称	概要
ASNARO-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 世界的な小型衛星の需要の高まりに対応するため、経産省が所管となり、開発と製造を NEC、地上運用系開発・運用をパスコが担当し、小型、軽量、低コスト、高分解能を両立させることを目指して開発した光学衛星。2014 年打上げ。</li> <li>・ 重量 450 kg、設計寿命 3 年、分解能 50 cm 以下、観測幅 10 km、開発費は約 50 億円。</li> </ul>
ASNARO-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2018 年打上げのレーダ衛星。開発と製造は NEC、そして三菱電機製の X バンドレーダを搭載。重量 570 kg、設計寿命 5 年。</li> <li>・ スポットライトモードでは分解能 1m 以下・観測幅 10 km 以上、ストリップマップモードでは分解能 2m 以下・観測幅 12 km 以上、スキャン SAR モードでは分解能 16 メートル以下・観測幅 50 km 以上の性能で地表を観測できる。一基の価格は約 80～90 億円。</li> </ul>
LOTUSat-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ベトナム政府に対する ODA(円借款)基金を活用し、2020 年 4 月、NEC が開発・製造・打上げサービス調達と地上システムの整備、衛星開発プロセスにおける現地人材育成プログラムを一括受注。</li> <li>・ 受注金額は約 200 億円。ASNARO-2 の同型機。衛星の打ち上げは 2023 年の予定。</li> </ul>

## (2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術

観測衛星情報の利用により可能になった宇宙利用技術の中で、社会課題3.「社会インフラの維持管理」の解決に資する技術は、①道路・橋・水道管等のモニタリング、社会課題4.「自然災害の増加」の解決に資する技術は、②環境モニタリング、③台風、線状降水帯等の高精度予測、④土砂災害、河川氾濫等災害リスク予測、⑤災害後の被害状況把握、社会課題5.「食料不足」の解決に資する技術は、⑥最適耕作地探査、⑦農作物の生育予測、⑧海洋データ取得、魚群探査、養殖監視、社会課題6.「温暖化・気候変動の社会/個人への影響」の解決に資する技術は、⑨環境モニタリングである。

図表 2-3-2 観測衛星を利用した技術による社会課題解決策

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	① 道路・橋・水道管等のモニタリング	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"> <li>・ <u>SAR</u></li> <li>・ <u>SAR データ解析</u></li> <li>・ ANATIS(衛星 SAR データによるインフラ変位監視ツール)等</li> </ul>
4. 自然災害の増加	② 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)	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"> <li>・ <u>温室効果ガス観測センサ</u></li> <li>・ <u>雲・エアロゾルセンサ</u></li> <li>・ <u>高性能マイクロ波放射計</u></li> <li>・ <u>多波長光学放射計</u></li> <li>・ <u>SAR</u></li> <li>・ <u>AI</u></li> <li>・ <u>スーパーコンピュータ</u></li> </ul>
	③ 台風、線状降水帯等の高精度予測	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"> <li>・ <u>GPM マイクロ波放射計</u></li> <li>・ <u>DPR(二周波降水レーダ)</u></li> <li>・ <u>赤外サウンダ</u></li> </ul>
	④ 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"> <li>・ <u>GPM マイクロ波放射計</u></li> <li>・ <u>DPR(二周波降水レーダ)</u></li> <li>・ <u>SAR</u></li> <li>・ <u>光衛星間通信システム</u></li> <li>・ <u>AI</u></li> </ul>
	⑤ 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"> <li>・ <u>SAR</u></li> <li>・ <u>光学センサ</u></li> <li>・ <u>光衛星間通信システム</u></li> </ul>
5. 食料不足	⑥ 最適耕作地探査	地球観測衛星のデータから雨量や地表面温度、日照量等の情報を集め、人工知能で分析することで最適耕作地を見つける。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>SAR</u></li> <li>・ <u>光学センサ</u></li> <li>・ 筆ポリゴン(農地区画情報)</li> <li>・ <u>NDVI(植生指標)</u></li> <li>・ <u>AI</u></li> </ul>

社会課題	観測衛星利用技術	解決策	要素技術
	⑦ 農作物の生育予測	気象データと人工衛星画像を基に圃場ごとの生育状況や食味を予測。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SAR</li> <li>・ <u>光学センサ</u></li> <li>・ <u>筆ポリゴン(農地区画情報)</u></li> <li>・ <u>NDVI(植生指標)</u></li> <li>・ AI</li> </ul>
	⑧ 海洋データ取得、魚群探査、養殖監視	衛星データと海洋データを組み合わせ、人工知能で解析することで漁場の予測や養殖環境のモニタリングを行うことができ、水産資源の確保・安定供給に貢献。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>高性能マイクロ波放射計</u></li> <li>・ <u>多波長光学放射計</u></li> <li>・ SAR</li> <li>・ <u>光学センサ</u></li> <li>・ AI</li> </ul>
6. 温暖化・気候変動の社会/個人への影響	⑨ 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"> <li>・ <u>温室効果ガス観測センサ</u></li> <li>・ <u>雲・エアロゾルセンサ</u></li> <li>・ <u>高性能マイクロ波放射計</u></li> <li>・ <u>多波長光学放射計</u></li> <li>・ SAR</li> <li>・ AI</li> <li>・ スーパーコンピュータ</li> </ul>

※要素技術のアンダーライン項目は宇宙関連の要素技術

### (3) 要素技術

#### 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(人工物か、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。

現在、合成開口レーダを搭載した小型衛星による衛星コンステレーション構築において、最も先行しているのは、フィンランドの ICEYE 社。2018 年 1 月に、実験衛星「ICEYE X1」を打ち上げ、2019 年 8 月には「解像度 1m 以下」を達成。同年 10 月からは衛星 3 基体制による、SAR 衛星で撮影したデータの一般向け販売を開始している。目標は“Every Square Meter, Every Hour”(1 m<sup>2</sup>単位、1 時間単位)で、地球全面の高分解能観測、高頻度観測を目指す。2022 年 9 月現在、同社の SAR 衛星数は 21 基で世界最多。

米国最初の商用 SAR 衛星ベンチャーである Capella Space 社は、2018 年に小型 SAR 衛星 1 号基を打ち上げ、その後 7 基を追加。将来的に 36 基のコンステレーションを構築し、地上局インフラに Amazon 社の AWS クラウドを使い、受注から数時間以内に撮像画像を顧客に届ける予定である。同社は既に米国の国家地球空間情報局(NGA)、国家偵察局(NRO)、海軍、空軍と契約しており、安全保障上の役割も担う。

日本では「九州・パイオニアズ・オブ・スペース」こと、(株)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。

内閣府による「ImPACT(革新的研究開発推進プログラム)」プロジェクトの成果を応用し、「地上分解能 1m、重量 100 kg、コスト 5 億円の小型 SAR 衛星」開発に取り組んでいるのが 2018 年 2 月設立の(株)Synspective である。同社は 2020 年 12 月に最初の衛星打ち上げに成功した。2020 年現在、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の開発を進めており、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。さらにクライアントのニーズに合わせ、解析したデータを活用するアプリケーション開発も進める予定である。

## 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)」（ヒトの目で見える波長域の光）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（パンクロ・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。

2023年3月7日に打ち上げ予定の「先進光学衛星 ALOS-3(だいち3号)」は、初代「だいち」搭載光学センサの広視野(直下70km幅)を維持しつつ、約3倍の高分解能(直下GSD 2.5m→0.8m)を有する広域・高分解能センサを搭載。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ことを目的としている。(2023年3月1日時点)

## 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、「熱帯降雨観測衛星(TRMM)」搭載の「降雨レーダ(PR)」(1997～2015年)、「全地球降水観測(GPM)計画」<sup>26</sup>の「GPM主衛星」搭載の「二周波降水レーダ(DPR)」(2014年～)を開発し、20年以上にわたり降水レーダ観測を実施している。衛星搭載の降水レーダは、全球降水量とその3次元構造を高精度で観測可能な、我が国が強みを有する独自技術である。

二周波降水レーダ DPR(Dual-frequency Precipitation Radar)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。

2018年1月、米国NASA等の「衛星地球観測に関わる今後10年の地球観測の指針(Decadal Survey)」において、「エアロゾル(A)、雲・対流・降水(CCP):AOS(ACCP)」が最優先(大型予算)観測対象として選定され、2021年5月から概念検討段階へ移行した。JAXAの降水レーダは、このAOS(ACCP)ミッション

<sup>26</sup> 「全地球降水観測(GPM)計画」は、「GPM主衛星」と、マイクロ波放射計を搭載した世界各国の衛星群によって、全球の降水の、高精度・高頻度観測を目的とする国際ミッション。NASAが開発したGMP主衛星本体に、日本が開発を担当した「二周波降水レーダ(DPR)」とNASAが開発した観測装置の「GPMマイクロ波放射計(GMI)」を搭載し、2014年に打ち上げられた。

ン<sup>27</sup>において世界初のドップラー降水速度観測を行い正確な降水把握を担う。AOS (ACCP)ミッション参画によって、気象・気候モデルの改良に貢献し、更なる気象予報精度向上につなげる事が期待される。

28

「EarthCare (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explore)」は、日本と欧州が協力して開発を進める地球観測衛星で 2023 年度打上げ予定である(2023 年 3 月 1 日時点)。搭載する 4 つのセンサ(雲プロファイリングレーダ、大気ライダー、多波長イメージャ及び広帯域放射収支計)により、雲、エアロゾルの全地球的な観測を行い、気候変動予測の精度向上に貢献する。雲プロファイリングレーダ (CPR: Cloud Profiling Radar) の設計・製造は日本が担当している。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、これにより全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。<sup>29</sup>

図表 2-3-3 AOS(ACCP)において JAXA 降水レーダが担う役割



出典: 文部科学省 宇宙開発利用部会資料 62-3

<sup>27</sup> ACCP が目指す最終ミッションは、異常気象や気候変動を駆動する「エアロゾル-雲-対流-降水」のプロセスを明らかにすること。国際協力(米・日・仏・加・独が検討に参画)で構築する複数衛星によるコンステレーション、航空機による同時観測でミッションを実現する。

<sup>28</sup> JAXA.「GMP/DPR 後期利用における成果、並びに米国 ACCP ミッションにおける降水レーダ後継機の検討状況について」  
[https://www.mext.go.jp/kaigisiryoyou/content/20210927-mxt\\_uchukai01-000018059\\_3.pdf](https://www.mext.go.jp/kaigisiryoyou/content/20210927-mxt_uchukai01-000018059_3.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>29</sup> JAXA.「EarthCare/CPR」  
<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/earthcare/index.html>, (参照 2023-03-01)

#### 4) 赤外サウンダ、雷センサ

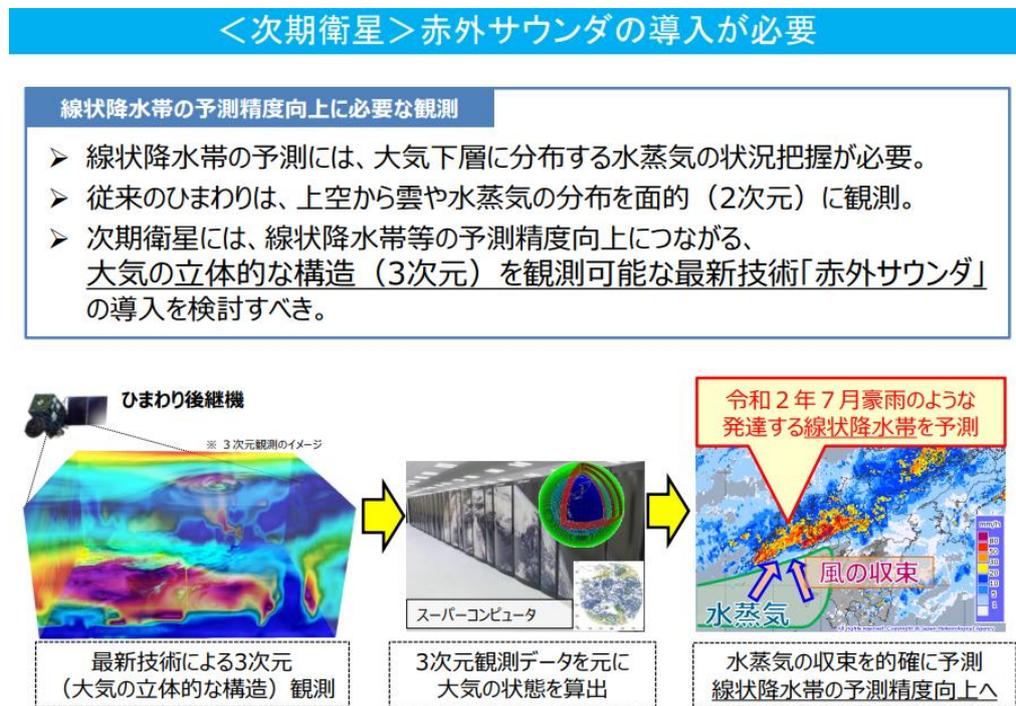
世界気象機関(WMO)は、衛星を含む様々な観測を統合して取り扱う「WMO 統合全地球観測システム(WIGOS: WMO Integrated Global Observing System)」を推進しており、「WIGOS ビジョン 2040」で、2040年頃の静止気象衛星に求められる機能として、①高頻度・多波長イメージャ、②ハイパースペクトル赤外サウンダ、③雷センサ、④紫外・可視・近赤外サウンダが推奨されている。

日本では、2022年5月20日、「宇宙基本計画工程表改訂に向けた重点事項」(宇宙開発戦略本部決定)の中の「基本方針 特に重点的に取り組むべき事項」として、下記のように記載されている。

・ 線状降水帯等の予測精度向上に向け、大気の3次元観測機能など最新の観測技術を導入した次期静止気象衛星を、2023年度を目途に製造に着手し、2029年度の運用開始を目指す。<sup>30</sup>

次期気象衛星(「ひまわり8号・9号後継機)については、「静止衛星観測に関する懇談会」が令和元(2019)年から開催されており、2022年6月に発表した「中間とりまとめ」においては、「令和5(2023)年度を目途に製造開始する次期気象衛星に、線状降水帯対策等のため、大気を3次元観測できる赤外サウンダを搭載することなどを検討する」よう提言がなされた。<sup>31</sup> (図表は、「中間とりまとめの概要」資料<sup>32</sup>より抜粋)

図表 2-3-4 赤外サウンダ



出典:「静止衛星観測に関する懇談会 中間とりまとめの概要」

<sup>30</sup> 内閣府.「宇宙基本計画工程表改訂に向けた重点事項 基本方針 特に重点的に取り組むべき事項」  
[https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy04/juten\\_gaiyo.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy04/juten_gaiyo.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>31</sup> 気象庁.報道発表 [https://www.jma.go.jp/jma/press/2206/21b/20220621\\_kondan\\_chukan.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/press/2206/21b/20220621_kondan_chukan.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>32</sup> 静止気象衛星に関する懇談会.[https://www.data.jma.go.jp/sat\\_info/himawari/kondan/chukan/torimatome\\_gaiyo.pdf](https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/kondan/chukan/torimatome_gaiyo.pdf), (参照 2023-03-01)

「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。

静止衛星に搭載される「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。

「2019 年度将来の静止衛星観測に関する検討会活動報告書」<sup>33</sup>によれば、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ための指標として利用できると期待される。また、地上の雷観測網では推定精度が必ずしも高くない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などの領域で数値予報モデルの改良に貢献することが期待される。

---

<sup>33</sup>「2019 年度将来の静止衛星観測に関する検討会活動報告書」(2020 年 6 月) <https://www.sal.t.u-tokyo.ac.jp/RsTaskforce/2019MInT.pdf>(参照 2023-03-01)

## 1) 光衛星間通信システム

2020年11月、JAXAの「光データ中継衛星」(データ中継衛星1号機)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で中継するとともに、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。

LUCASの通信容量は1.8Gbpsとなり、従来のマイクロ波(電波)の7倍以上の、ギガビット級高速・大容量通信が可能になり、地球観測衛星の基数増加による撮影の高頻度化、観測幅や分解能の向上による個々の撮影データの大容量化に対応する。また、通信を光にすることで、小型・軽量の通信機器を実現することができ、衛星への搭載性も高まった。必要とされるアンテナは、地球観測衛星側はわずか10cm、光データ中継衛星側も15cm程度である。さらに、光通信は通信を妨害・傍受されることが技術的に難しいことから、データの秘匿性も確保できる。ただし、光通信は衛星間のみで行われ、光データ中継衛星と地上局との通信には従来通り電波を使うことになる。これは、光通信は天候(雲)や大気の揺らぎ等に影響を受けやすいからである。なお、地球観測衛星用の光通信装置は、2022年度に打ち上げ予定の「だいち3号(ALOS-3)」に搭載され、実利用が開始される。(2023年3月1日時点)

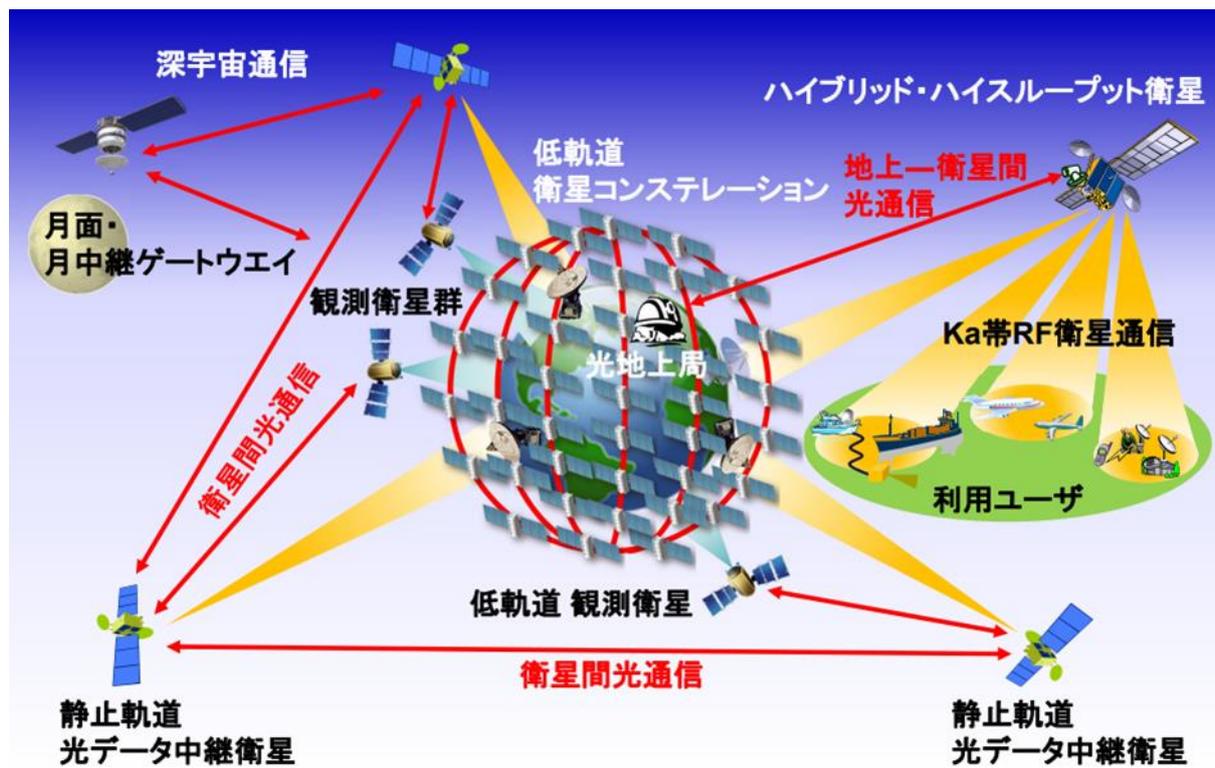
光通信の宇宙システム利用については、データ中継システムに加え、静止軌道衛星ベースの汎用衛星通信放送システムの高速度化(HTS: High Throughput Satellite 化)や、低軌道衛星ベースのコンステレーションにおけるネットワーク構築手段としても注目を集めている。日本電気(株)は世界最高水準の通信速度である10Gbpsで動作する光通信機向けの技術開発を行っており、2023年度打ち上げ予定の「技術試験衛星9号機(ETS-9)」にそのプロトタイプが搭載され、動作確認が行われる予定である。

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、伝送レートの向上(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。(図表2-3-5参照<sup>34</sup>)

<sup>34</sup> 情報通信研究機構 NICT.「光通信新時代」.

<https://www.waseda.jp/fsci/giti/assets/uploads/2021/06/e0326805a473aafd0610f88c86868916.pdf>, (参照 2023-03-01)

図表 2-3-5 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: NICT

#### (4) 今後必要とされる技術

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、「衛星の市民化」と「actuation (作動)ができる人工衛星」であった。

将来宇宙技術	目的	説明(ヒアリングから)
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	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、様々な飛行体が活躍する。「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。
actuation(作動)ができる人工衛星	災害等に迅速に対応	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】宇宙ステーション

---

### (1) 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 400 km 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、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)である。

中でも「微小重力」の特徴として、以下のようなことが挙げられる。

- (ア) 生物の体の変化: 重さの負荷がかからないため、筋肉や骨が弱くなったり、免疫機能が低下したりするなど、生命活動に遺伝子発現レベルからの様々な変化がみられる。その原因や対策を調べることは、骨粗鬆症や免疫機能低下等に対する治療・予防法の確立につながる。
- (イ) 沈降がない: 地上では重いものは沈み軽いものは浮かぶが、微小重力環境では、水と油のように比重の違う物でも均一に分散するため、規則性の高い高機能な材料を作成できる可能性がある。
- (ウ) 熱対流がない: 地上では熱せられた液体や気体は比重が軽くなり、対流が発生する。しかし微小重力環境では比重差による対流が発生しないため、対流に邪魔されて地上ではできないような高品質なタンパク質結晶や材料組織を作ることができる。
- (エ) 容器なしで浮遊: 地上では液体を貯めておくために容器が必要だが、微小重力環境では容器を用いずに液体を浮遊させることができる。そのため容器からの汚染や影響を受けずに、物質の性質の測定や合成が可能になる。

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。

宇宙ステーションは、将来宇宙や地球以外の天体で人間が生活するために必要な知識を得るために重要である。また、宇宙ビジネスを進める足掛かりとしての役割も期待される。米国は、地球周辺ではなく、月を周回する宇宙ステーション「月周回有人拠点 Gateway ゲートウェイ」の建設計画を推進している。月面に宇宙飛行士を送るアルテミス計画と連動しており、ISS に参加する日本、欧州、カナダが建設への協力を表明している。ゲートウェイは、月面及び火星に向けた中継基地として、2028 年の完成を目指している。

(2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術

宇宙ステーションの利用により可能になった宇宙利用技術の中で、社会課題2.「高齢化・加齢に伴う疾患」の解決に資する技術は、①微小重力等宇宙環境を利用した研究(物質科学、生命科学)と②宇宙医学、再生医療である。

図表 2-4-1 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

社会課題	ISS 利用技術	解決策	要素技術
2. 高齢化・加齢に伴う疾患	① 微小重力等宇宙環境を利用した研究(物質科学、生命科学)	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"> <li>・ <u>人口重力発生装置</u></li> <li>・ ポータブル計測・モニタリング機器</li> </ul>
	② 宇宙医学、再生医療	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"> <li>・ <u>高品質タンパク質結晶生成</u></li> <li>・ <u>立体臓器創出技術</u></li> <li>・ <u>ホロポーテーション</u></li> <li>・ <u>超遠隔手術ロボット</u></li> </ul>

※要素技術のアンダーライン項目は宇宙関連の要素技術

### (3) 要素技術

#### 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。JAXA 有人宇宙技術部門主幹研究開発員で宇宙医学実験を担当していた大島博氏によると、「宇宙旅行では骨粗鬆症の 10 倍の早さで骨量が減少する。6 カ月間の宇宙滞在では大腿骨近位部の骨量は CT で平均 15%減少し、帰還後の骨量回復には約 3~4 年間を必要とするので、骨量減少と尿路結石のリスクが高まる」「無重力の宇宙旅行初期は、ふくらはぎの筋肉は毎日 1%ずつ萎縮し、約 6 カ月間の宇宙滞在では筋量・筋力は約 10~20%、最大 30%低下する」<sup>35</sup>という。そのため、「宇宙医学は加齢変化の加速モデルの側面がある」<sup>36</sup>。

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。筑波大学の高橋智教授、工藤崇准教授らの研究グループは、この装置を使い ISS でマウスを飼育して、地上で飼育しているマウスと比べて、ヒラメ筋という後ろ足にある筋肉がどのように変化するかを調べた。

マウスは ISS で 35 日間飼育され、ISS の微小重力、1G の人口重力、地上の 1G のもとで飼育したマウスのヒラメ筋を比較したところ、微小重力環境で飼育したマウスのヒラメ筋は地上のマウスに比べて筋肉の重量が 15%減少したのに対し、人口重力を加えたマウスのヒラメ筋は地上のマウスと違いは確認されなかった<sup>37</sup>。また、人口重力で飼育したマウスでの遺伝子の働きは地上のマウスと似ていて、筋肉を形作る筋繊維のタイプも変化することもなかったことから、人口重力でも筋肉の衰えを抑えることがわかった。<sup>38</sup>

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。

---

<sup>35</sup>JAXA. 「宇宙医学に学ぶ健康管理」 [http://www.j-sda.or.jp/kenkyu/27taikai/youshi/toku\\_02.pdf](http://www.j-sda.or.jp/kenkyu/27taikai/youshi/toku_02.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>36</sup> 同上

<sup>37</sup> 同上

<sup>38</sup> 同上

## 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、筋ジストロフィー、歯周病、アルツハイマー、乳がん等に関するタンパク質のきれいな結晶をつくることに成功し、治療薬の開発や人工血液の製品化が進められている。<sup>39</sup>

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。微小重力環境下での地上とは異なる粒子の集合状態の維持など、将来の地上・宇宙での三次元培養技術開発につながる知見が得られたところである。

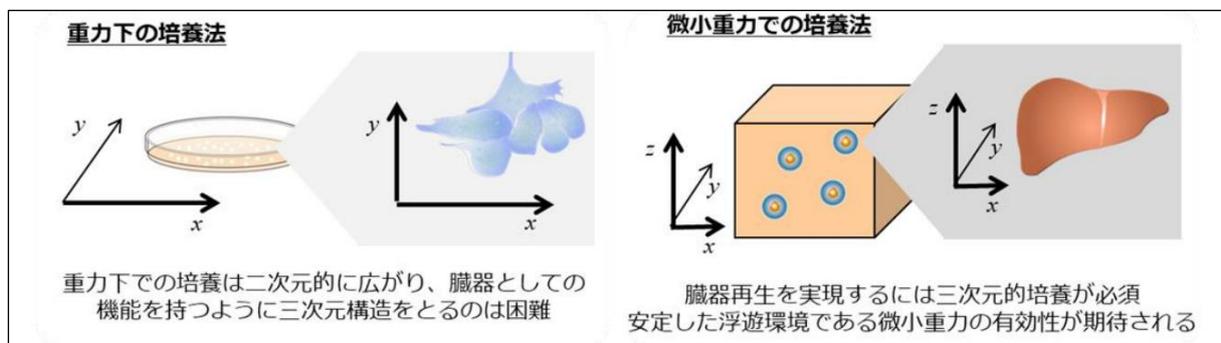
図表:2-4-2 高品質タンパク質結晶生成実験

**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><b>デュシェンヌ型筋ジストロフィー治療薬開発への貢献</b></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><b>歯周病の治療薬開発に向けた貢献</b></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し大学にて動物実験が進行中</p> 
<p><b>イヌ・ネコ用人工血液の製品化に向けた貢献</b></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><b>乳がん治療薬の開発への貢献</b></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>創薬ベンチャー企業において研究が進行中</p> 

出典: JAXA 「国際宇宙ステーション (ISS) における成果創出活動の状況について」 “多数の創薬関連物質の構造を解明、地上の創薬プロセスを加速”

図表 2-4-3 立体臓器創出技術の検証実験<sup>40</sup>



出典: JAXA 「国際宇宙ステーション (ISS) における成果創出活動の状況について」 “ヒト臓器原基・3次元培養に係る基礎的知見を獲得”

臓器移植は末期の臓器不全に対する唯一の根本的治療法であるが、ドナー不足は世界的に深刻な問題となっている。将来のヒト臓器創出を実現するためには、オルガノイド(試験管内などで幹細胞から作るミニチュア臓器のこと)培養技術の活用は、一つの有効な手段である。微小重量環境下では、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。このような実験成果を活かし、将来的には移植可能なヒト臓器の再構成に向けた研究が進展することが期待されている。

<sup>39</sup> JAXA. 「国際宇宙ステーション (ISS) における成果創出活動の状況について」 2021 年 11 月 12 日 [https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/content/20211112-mxt\\_uchukai01-000018823\\_2.pdf](https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/content/20211112-mxt_uchukai01-000018823_2.pdf), (参照 2023-03-01)

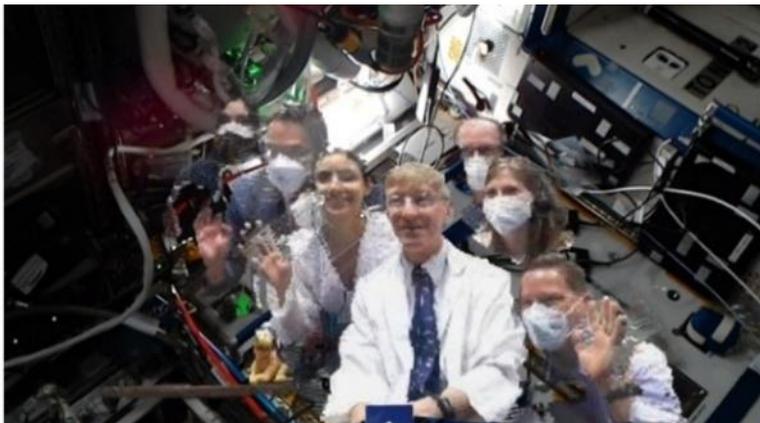
<sup>40</sup> 同上

### 3) ホロポーテーション

「ホロポーテーション (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。3D で再現された人物を見るには、「HoloLens」という AR (拡張現実) ゴーグルを使う。マイクロソフト社が開発したホロレンズカメラと複合現実を用いたソリューションを提供する AEXA Aerospace 社が開発したソフトウェアを使用して実現した。

NASA は、2021 年 10 月、ISS へのホログラム映像の転送に成功。フライトサーजन (宇宙飛行士の健康管理に携わる専門医) の Josef Schmid 氏と AEXA Aerospace 社スタッフが、まるで ISS 船内にいるかのように宇宙飛行士 Thomas Pesquet 氏とリアルタイムでの会話を行い、地球から宇宙へと“ホロポート”した最初の人間となった。<sup>41</sup> NASA は、次の計画では地球上の人物をホロポートすると同時に、ISS のクルーも地球にホロポートさせる予定。今後はクルーの健康診断や医学的な会議、地上にいる家族とのふれあいや VIP との面会などのために利用する。

図表 2-4-4 ISS に“ホロポート”したシュミット医師ら



出典： ESA (European Space Agency) astronaut Thomas Pesquet

将来的には、ホロポーテーションと 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。ホロポーテーション技術は、地球上でも利用できる。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。

<sup>41</sup> NASA. Innovative 3D Telemedicine to Help Keep Astronauts Healthy. <https://www.nasa.gov/feature/innovative-3d-telemedicine-to-help-keep-astronauts-healthy>, (参照 2023-03-01)

#### 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 は重さ約 2 ポンド(約 900g)と小型であるため、長期宇宙ミッションの狭いスペースや質量要件の中で使用するのに理想的。形は白い棒のようなもので、片方の端に小さな腕のようなアタッチメントが 2 つ付いており、これらのアタッチメントに装着された器具を使い、切開等の外科的作業を行う。

ISS のミッションでは、人体実験を行うわけではなく、微小重力環境下でシステムが適切に作動するかどうかを確認、微調整する。電子レンジサイズの実験用ロッカー内で、模擬組織の切断や小さな物体の操作など、手術に使用されるものを模擬した活動を行う予定している。ISS 内での通信帯域を節約し、宇宙飛行士が実験に費やす時間を最小限にするために、ISS 搭載の MIRA は自律的に動作するようにプログラムされており、宇宙飛行士がスイッチを入れると実験が開始するようになる。

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。これまでの事件では、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。<sup>42</sup>

---

<sup>42</sup> CNET. Remote Surgical Robot Could Join Astronauts on Future Mars Missions . <https://www.cnet.com/science/space/remote-surgical-robot-could-join-astronauts-on-future-mars-missions/>, (参照 2023-03-01)

#### (4) 今後必要とされる技術

有識者ヒアリングから得られた、ISS 国際宇宙ステーションに関連した将来宇宙技術は、「デキストラロボット、レイグジスタンスロボット」と「無重力下でも動く点滴」であった。

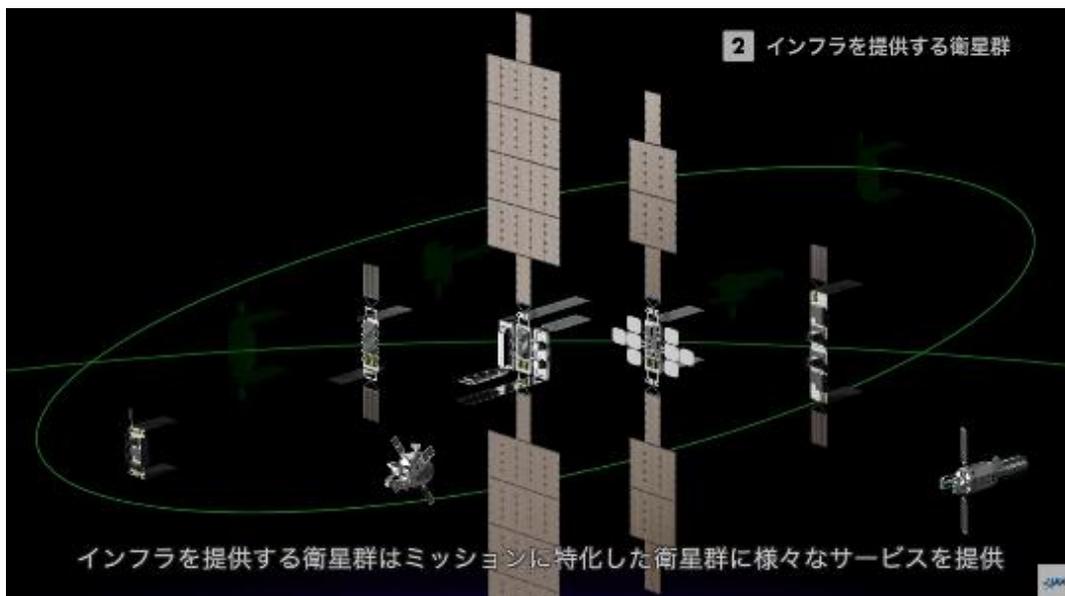
将来宇宙技術	目的	説明(ヒアリングから)
デキストラロボット、レイグジスタンスロボット	遠隔で操作できる器用なロボットが、人間に代わり宇宙空間での作業を行う	地球上の人間の手の動きと連動して動作をする器用な(dexterous)、レイグジスタンス(tele-existence)ロボットを制御して、人間が行くことが困難な場所での危険作業等を行う。 この技術は、過疎の町でのバスの運転や遠隔医療にも活かせる。災害時の被災者捜索や津波が来た時の水門閉鎖、原発の廃炉作業など、日本が抱える色々な問題が解決できるようになる。
無重力下でも動く点滴	無重力下での医療行為	宇宙で病気になる人が出た場合に、必ず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ないものは限りなくある。

## 【5】軌道上サービス

### (1) 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。

図表 2-5-1 軌道上サービスの将来像



出典: JAXA

図表 2-5-2 軌道上サービス(静止軌道プラットフォーム)の将来像

サービス衛星の役割	サービス衛星*	概要
1. ミッションに特化	①地球観測衛星 ②気象観測衛星 ③商用小型衛星	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ ミッション機器は軌道間輸送機により静止軌道まで運搬され、ロボットサービス機によりミッションに特化した衛星に取り付けられる。</li> <li>① 地球観測衛星では、ロボットサービス機により観測ミッション機器を取り付け、所定の軌道位置まで移動し地球観測を行う。</li> <li>② 気象観測衛星では、ロボットサービス機により観測機器を交換し、気象観測を継続する。</li> <li>③ 静止軌道での商用小型の通信・観測衛星では、主要な衛星バス機能をインフラ衛星群がサポートする。</li> </ul>
2. インフラを提供	①全体管理・電力伝送衛星 ②データ収録・処理衛星 ③地上との通信衛星 ④光通信データ中継衛星 ⑤ロボットサービス機 ⑥衛星監視サービス	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ インフラ衛星群は、ミッションに特化した衛星群に様々なサービスを提供する。</li> <li>① 衛星群全体管理とエネルギー伝送等を担うインフラ衛星は、機動的に動くミッション衛星へのエネルギー伝送サービスを行う。</li> <li>② ミッション衛星をサポートするため、データ収録とデータ処理を担うインフラ衛星は、大量の観測データを取得する観測ミッション衛星へのデータ処理サービスを行う。</li> <li>③ 地上との通信衛星は、ミッション衛星とのデータ送受信や地上局との通信サービスを行う。</li> <li>④ 光通信によるデータ中継を担うインフラ衛星は、低軌道衛星や月周回衛星、月面システムとの光による高速データ中継サービスを行う。</li> <li>⑤ ロボットサービス機は、インフラ衛星群とミッション衛星群のメンテナンス等を担うロボットサービス機を行う。</li> <li>⑥ 衛星監視サービスでは、二つの衛星群を見守る監視サービスを行う。</li> <li>□ 将来は墓場軌道にある衛星を再生し、静止軌道プラットフォームへの部品・材料の提供も目指す。</li> </ul>

出典: JAXA ユーチューブ「軌道上サービスの将来像」よりまとめ<sup>43</sup>

<sup>43</sup> JAXA.「軌道上サービスの将来像」.<https://www.youtube.com/watch?v=kiD9fZitMQQ>, (参照 2023-03-01)

地球低軌道においては、今後大規模なコンステレーション<sup>44</sup>計画が実現されれば、軌道上に大量の衛星が配置されることに加え、頻繁な打上げと運用終了後の廃棄処分を含めて、軌道上の更なる混雑とそれに伴う衝突リスクの増加が予想され、衛星をスペースデブリや他の衛星との衝突から守ることが重要になる。これは、現在は主に宇宙状況把握(SSA: Space Situational Awareness)によって担われており、地上のレーダーや光学望遠鏡、解析システムにより、軌道上の物体やその軌道を把握しているが、更なる精度の向上が求められている。

現状、ロケットや衛星などの宇宙機は使い捨てが基本であるが、将来にわたって宇宙活動を行うには、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)を行うような循環型経済(circular economy)に移行していく必要がある。そこで進められているのが、軌道上サービス(OOS: on orbit service)の開発である。その中で、スペースデブリの除去はすでに技術実証が始まっており、軌道上で宇宙機の修理や燃料補給などを行うことも目指されている。使い捨てされていた宇宙アセットの保守、延命、再利用を可能にすることによって、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。<sup>45</sup>

国内外では、既に軌道上サービスに参入している企業が多くあり、2030年までには、次に示すような様々な軌道上サービスが事業化される。

---

<sup>44</sup> コンステレーション(constellation)の意味は「星座」。数十から数千の通信・放送衛星や地球観測衛星を連携させて、星座のように地球を覆うことで、広範囲の地表面をカバーする方式を指す。複数の比較的小型の衛星が協働することで、コストパフォーマンスよく時間的な分解能(同じ地点の観測頻度)が高い観測体制を作ることができる。

<sup>45</sup> (株)アストロスケールへのヒアリングの回答より

図表 2-5-3 主な軌道上サービス参入企業

企業名、団体名	国	衛星名/サービス名	サービス、事業化状況
Airbus	欧州	<a href="#">0_CUBED_Services</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>静止軌道の通信衛星を対象とした、寿命の延長、新しい軌道への移動、機能のアップグレード、廃棄サービス</li> <li>低軌道に打ち上げられた衛星を静止軌道に輸送するサービス、コンステレーション衛星が搭載されたデイスベンサーを輸送し、所定の位置に配置するためのサービス</li> <li>軌道上のデブリを除去するサービス</li> </ul>
SpaceLogistics LLC (Northrop Grumman 子会社)	米国	<a href="#">MEP: Mission Extension Pod</a> <a href="#">MEV: Mission Extension Vehicle</a> <a href="#">MRV: Mission Robotic Vehicle</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>【MEV】2020年2月、MEV-1が通信衛星インテルサット901にドッキングし、2025年まで寿命を延長。2021年4月、MEV-2がインテルサット通信衛星にドッキングし、2026年まで寿命を延長。</li> <li>【MRV】ロボティクスに関する幅広いサービス。MEVの働きをするポッド (MEP) をクライアント衛星に取り付け、寿命の延長 (検査・修理) や新しい軌道への移動サービスを提供する。</li> </ul>
Thales Alenia Space を中心としたコンソーシアム	欧州	<a href="#">EROS+</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証時期は不明。衛星寿命の延長、新しい軌道への移動、廃棄サービスを提供予定。</li> </ul>
Space Systems Loral (Maxar Technologies 子会社)	米国	<a href="#">OSAM-1 (Restore-L)</a> : On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>NASAのミッションによる軌道上組立、製造、燃料補給など様々なサービスの実証衛星を2025年以降に打上げ予定。</li> </ul>
Tethers Unlimited	米国	<a href="#">LEO Knight</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボットアームKRAKENと整備ツール、燃料補給コンポーネントを統合したマイクロサットクラスの宇宙ロボットLEO Knightを開発中。スペースデブリを捕獲してリサイクルハブに輸送し、小型衛星に燃料を補給して修理する能力を提供する。2022~2023年に実証予定。</li> <li>長期の有人ミッションや、太陽系の探査と定住に必要なインフラの構築をサポートし、持続可能な宇宙空間での製造を可能にするため、宇宙で材料を入手する方法から、それらの材料を価値のあるものに交換する方法、そして宇宙で製造された部品を使用して宇宙と地上の顧客に新しいサービスを提供する宇宙製造まで、「宇宙サプライチェーン」の全範囲に対応することを目指す。</li> </ul>
Infinite Orbits	フランス等	<a href="#">Orbit Guard</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2025年から衛星の寿命延長サービスを開始予定。</li> <li>2022年と2023年に打ち上げ予定の2つのOrbit Guardは、衛星のランデブーやドッキングのために、遠距離と近距離の両方のナビゲーションが可能な自律型航法システム。SSA (宇宙状況把握) や点検ミッションにも対応可能。</li> </ul>
Weintraus	米国	<a href="https://www.fgs.com/weintraus/inc/">https://www.fgs.com/weintraus/inc/</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球低軌道、地球中軌道、地球同期軌道の衛星オペレータに、打上げ仲介、軌道配置サービス、捕獲・再配置サービス、軌道上修理・軌道上燃料補給サービスなどを提供予定。</li> </ul>
Monmomentus Space	米国	<a href="#">VIGORIDE</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型衛星向けの推進機器VIGORIDEを開発し、ロケットから放出された後に小型衛星を特定の軌道まで輸送する2022年6月に打ち上げ予定のSpaceX社のトランスポーター5号機で初飛行する。</li> <li>衛星を特定の軌道に移動させた後は、ミッション期間中、継続的に電力供給、軌道維持、姿勢制御、通信を行うために、接続されたままであることを想定している。</li> </ul>
D-Orbit	イタリア	<a href="#">InOrbit NOW</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型衛星の打上げアレンジや軌道投入を行うサービス「InOrbit NOW」を提供。複数の小型衛星を収容してロケットで打ち上げる小型衛星放出システム「ION Satellite Carrier」を利用して宇宙空間に到達後、ロケットから放出される。その後、自らの推進機能により軌道投入位置付近まで自律航行し、小型衛星を軌道へ投入する。小型衛星以外に、宇宙空間で試験や観測を行うための各種計測機材も収容可能。</li> <li>2021年2月に、丸紅と業務提携し、D-Orbitが提供するサービスの日本向け独占販売代理店契約を締結。</li> </ul>
Orbit Fab	米国	<a href="#">燃料補給ポートRAFTI™</a> <a href="#">推進剤補給基地Tanker-001 Tenzing</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>宇宙ガソリンスタンド。2021年7月、1号機となるタンクを地球周回低軌道に打ち上げ。LEO、GEO、cis-lunarの宇宙空間で宇宙船の推進剤をユビキタスに供給する。燃料補給サービスは、さまざまな軌道にある燃料補給基地と、そこからクライアントの宇宙船に燃料を届けるシャトルで構成されている。</li> <li>アストロスケールのLEXI™のようなクライアントの宇宙船には、Orbit Fab社のRAFTIサービスバルブが装備されている。</li> </ul>
アストロスケール	日本	<a href="#">ELSA-d</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年4月、デブリ除去技術実証衛星「ELSA-d (エルサディー、End-of-Life Services by Astroscale - demonstrationの略)」による、模擬デブリ (クライアント) への誘導接近の実証に成功。2030年までに捕獲衛星の打ち上げを予定。</li> <li>衛星運用終了時のデブリが防止 (EOL) サービス、既存デブリの除去 (ADR)、寿命延長 (LEX)、故障機や物体の診断、状態の観測・点検等のサービスを提供予定。</li> </ul>
川崎重工業	日本	<a href="#">DRUMS</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型模擬デブリへのランデブ等を行う衛星DRUMSを開発、2021年11月に打ち上げ運用中。</li> </ul>
GITAI JAPAN	日本	<a href="#">GI, SI, HI</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>宇宙での作業ロボット、ロボットアームを開発。2023年7月、ISS船外用自立ロボットによる技術実証実験を行う。</li> </ul>

出典: 各社 HP 等をもとに作成

## (2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術

軌道上サービスの利用により可能になった宇宙利用技術の中で、社会課題 7.「スペースデブリ(人工衛星活動の安全確保)」の解決に資する技術は、①デブリ除去技術(EOL/ADR)、②人工衛星の寿命延長・移動・除去、③宇宙状況把握(SSA: Space Situational Awareness)である。

図表 2-5-4 軌道上サービスを利用した技術による社会課題解決策

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)	① スペースデブリ除去技術(EOL/ADR)	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"> <li>PRO(rendezvous and proximity operations: ランデブー・近傍運用)</li> <li>捕獲・ドッキング・軌道離脱</li> <li>宇宙ロボットアーム</li> <li>センシング、コンピュータ・ビジョン</li> </ul>
	② 人工衛星の寿命延長・移動・除去	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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌道物体の位置・回転の地上観測(SSA)</li> <li>高効率推進系(電気推進等)</li> <li>回転抑制</li> <li>制御落下</li> <li>軌道上燃料輸送</li> <li>軌道上機器追加・交換</li> </ul>
	③ 宇宙状況把握(SSA: Space Situational Awareness)	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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌道上製造(積層等)</li> <li>軌道上材料加工(切断、材料リサイクル等)</li> <li>インターフェイス(ドッキング、流体、電力、データ通信、熱)</li> <li>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)</li> </ul>

※要素技術は全て宇宙関連の要素技術

### (3) 要素技術

#### 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。

##### 【EOL:End-of-Life Service】

(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。最終的には捕獲機が模擬デブリの高度を下げる軌道離脱マヌーバまで行い、捕獲機と模擬デブリは大気圏に落ちて燃え尽きる。同社は2024年には、最初のデブリ捕獲衛星の打ち上げを予定しており、2020年代半ば頃までには実際の商業衛星の捕獲を実証する計画。既に米OneWeb社のコンステレーション衛星群(2022年6月現在で428基打ち上げ)の一部には、同社のドッキングプレートが搭載されており、2020年代後半から30年代には、必要に応じて捕獲・除去が実用化されるようになると予想している。

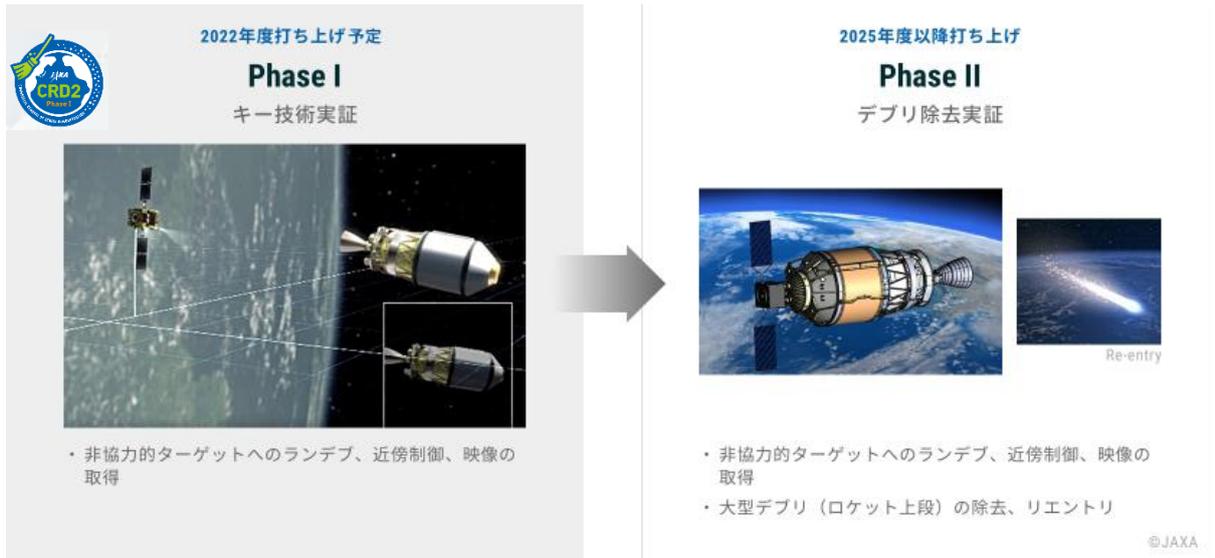
また、人口流れ星をビジネス化する取り組みで知られる宇宙ベンチャーの(株)ALEは、事前に人工衛星にカーボンナノチューブ電子源と小型軽量の誘電性テザー(EDT: Electrodynamic Tether)を用いた装置を搭載し、ミッション終了後に軌道降下させる計画をJAXAとともに進めている。<sup>46</sup> 誘電性のテザーに電流を流すことで、地球磁場との干渉で衛星軌道運動方向とは逆向きに「ローレンツ力」が発生し、衛星の高度が落ちて行く。その際、軌道降下に地球磁場を利用するため、万一衛星本体の電源系が故障していても受動的な軌道降下が可能であり、衛星本体のデブリ化を防止できる。

##### 【ADR: Active Debris Removal】

ADRについては、JAXAで「CRD2(商業デブリ除去実証)」プロジェクトが進行している。JAXAのH2Aロケットの上段(全長約11m、直径約4m、重量約3トン)が比較的デブリになる可能性が高いため、それをターゲットに、フェーズIでは、接近、近傍制御を行い、世界的にも情報の少ない軌道上に長期間放置されたデブリ(ターゲットロケット)の運動や損傷・劣化がわかる映像を取得する。フェーズIIでは、フェーズIと同様にデブリへ接近、近傍制御し、更なる映像を取得。ターゲットの除去とリエントリにより、デブリ除去技術の軌道上実証を行う。フェーズIIでは、実際に捕獲するための機工、アームのようなものを衛星に装備する。この計画は2030年までに実行される予定である。

<sup>46</sup> 株式会社ALE(エール)。「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-ale.com/news/2020/03/25/2026088.html>、(参照 2023-03-01)

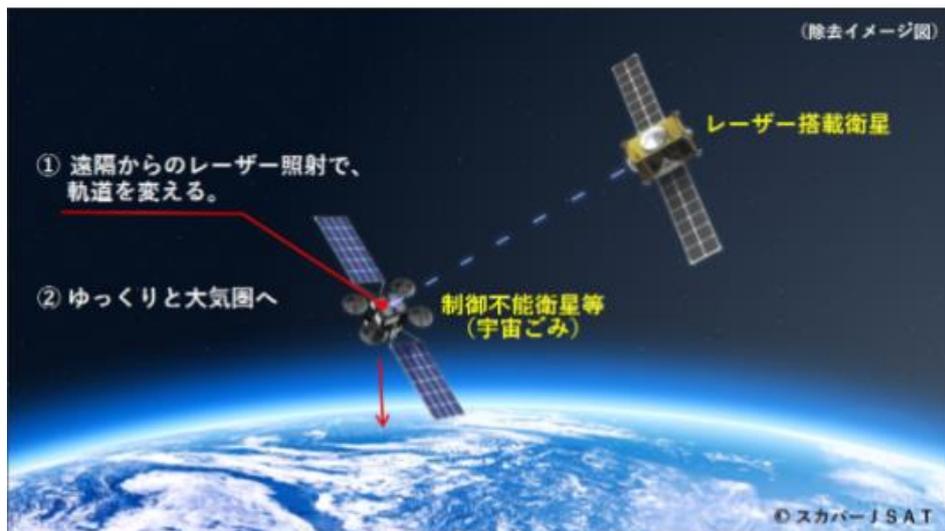
図表 2-5-5 ADR:JAXA CDR2 プロジェクト



出典：JAXA「商業デブリ除去実証の概要」<sup>47</sup>

その他、スカパーJSAT(株)は、「レーザブレーション」方式を使ったスペースデブリ除去衛星の開発を進めている。<sup>48</sup> 「レーザブレーション」は、物質にレーザ光を高エネルギーで照射した際に物質がプラズマ化や昇華することにより、物質が表面から放出される現象。これを利用して推進を発生させ、スペースデブリ等を移動(除去)する。レーザ方式は、衛星に搭載する太陽光発電システムの電力でレーザを照射するので、デブリを移動させるための燃料を宇宙空間まで運搬する必要がなく、低コストで除去が可能。また、不要衛星側の設計変更が不要であるため、既存のデブリの除去、ADR に適している。サービス開始は2026年を予定している。

図表 2-5-6 レーザブレーションによるスペースデブリ除去



出典：スカパーJSAT(株)プレスリリース

<sup>47</sup> JAXA. 商業デブリ除去実証の概要. <https://www.kenkai.jaxa.jp/crd2/project/>, (参照 2023-03-01)

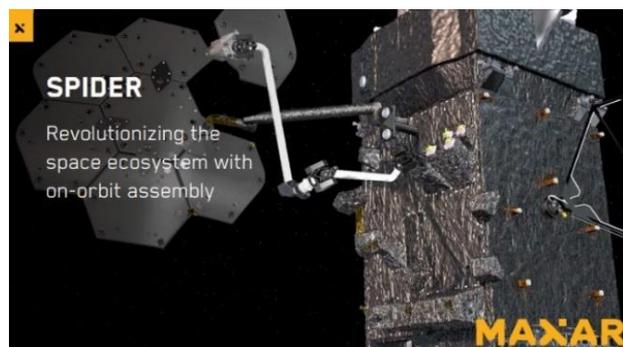
<sup>48</sup> 「世界初、宇宙のごみをレーザで除去する衛星を設計・開発」(2020年6月11日)  
<https://www.skyperfectsat.space/news/detail/sdgs.html>, (参照 2023-03-01)

## 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。Maxar 社が製造し、2025 年以降に打ち上げられる予定である。その目的は、①ロボットアームで衛星を把持し、絶縁体や配線を切断してボルトを緩め、衛星の燃料タンクにアクセスし、ホースを取り付けてヒドラジン燃料を送り込むことと、②SPIDER(Space Infrastructure Dexterous Robot)と呼ばれる別のロボットを配備して、宇宙で新しい構造物を構築すること。打ち上げ後は、SPIDER の 3 本のロボットアームを使い、7 つのアンテナ反射板を組み立て、3m の通信アンテナを形成。地上局との Ka バンド通信を実証する。

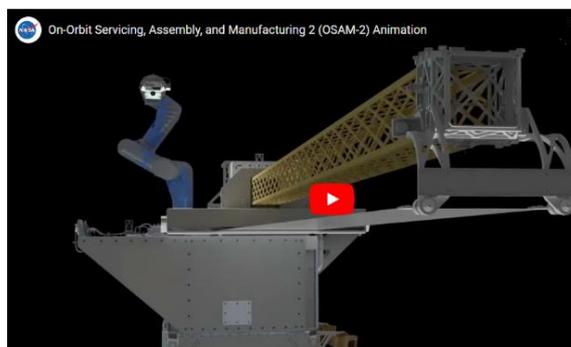
OSAM-2 は、正式名称が“Archinaut”(Architect: 建築士と Astronaut: 宇宙飛行士の造語)で、2024 年頃打ち上げられる予定である。3D プリンティング技術を用いて、太陽光発電パネルのための複合梁を建造する予定で、ロボットアームを用いた組み立て実証試験によって軌道上で巨大宇宙船を建造する能力を検証する。従来のロケットでは宇宙へ運ぶには大きすぎる梁や支柱などの構造物を宇宙空間で製造することができれば、構造物を原材料のまま宇宙に運ぶことができ、ロケットのサイズを抑えることができる。将来的には、大型の通信アンテナや望遠鏡、超大型のハードウェア等も宇宙空間で製造することが想定される。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。

図表 2-5-7 SPIDER アンテナ反射板を組み立て



出典: Maxar<sup>49</sup>

図表 2-5-8 OSAM-2 複合梁を製造



出典: NASA<sup>50</sup>

GITAI Japan は、①宇宙ステーション船内外の作業、②軌道上サービス(衛星への寿命延長、宇宙デブリ除去)におけるドッキング、寿命延長、メンテナンス作業、③月面探査・基地開発作業の領域において、作業を安価・安全に遂行可能な宇宙汎用型ロボットの開発を進めている。

2022 年 2 月には同社のロボット「GITAI SI」が JAXA の宇宙船外模擬環境において、ソーラーパネルの組み立てやバッテリーモジュール交換作業を自立制御によって実施し、その全作業に成功。TRL (Technology readiness levels) における Level6(地上でのシステムとしての技術成立性の確認)を達成した。この技術実証により、2023 年に予定されている ISS 船外での実証で TRL Level7(宇宙空間でのシステムとしての技術成立性の確認)達成を目指す。

<sup>49</sup> MAXAR. Spider. [https://cdn.mediavalet.com/usva/maxar/z8ullxbV1U29PHN9aCq\\_wA/yiUZqbkemEGjy0IRUSB3GA/Original/60004-handout-spider-09-2020.pdf](https://cdn.mediavalet.com/usva/maxar/z8ullxbV1U29PHN9aCq_wA/yiUZqbkemEGjy0IRUSB3GA/Original/60004-handout-spider-09-2020.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>50</sup> NASA. On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 2 (OSAM-2). [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/tdm/osam-2.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/osam-2.html), (参照 2023-03-01)

GITAI S1 は、宇宙ステーション船内外や軌道上サービス、月面基地開発における特定の作業を遂行することを目的に開発された半自立・半遠隔ロボット。AI を用いた自立制御と地上のオペレータが専用の GITAI ロボット操縦システム「H1」を用いて行う遠隔操作を組み合わせることで、従来の特化型ロボットアームでは困難であった汎用的な作業(スイッチ操作、工具操作、捕獲作業、組み立て作業、負荷の高い作業等)を1台のロボットアームで遂行できる性能を実現している。

同社は、2022年8月には、宇宙ロボットの作業性能を大幅に拡張する“シャクトリ虫”型ロボットアームを開発、設計検証試験(TRL3)を完了した。<sup>51</sup>この「GITAI IN1(Inchworm One)」は、柔軟な接続機能により、様々なツールと接続して用途の異なる作業が可能な「タスク性能」、ローバーや人工衛星などの移動体と接続して広範囲に仕事を行うことが可能な「移動性能」を同時に実現。検証実験は、同年2月に発表した月面作業用ロボットローバー「GITAI R1」<sup>52</sup>と協調して、JAXA相模原の模擬月面環境で行われた。GITAI R1 は、模擬月面環境で、①走行・移動・障害物走破試験、②ソーラーパネル組立試験、③月面資源採取試験、④斜面(砂丘)走破試験に成功しており、2020年代半ばの月面実証を目指している。

### 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。低軌道、静止軌道等の宇宙空間に、衛星燃料を積んだタンカーと OTV(Orbital Transfer Vehicle)と呼ばれる宇宙の軌道上を自由に動く燃料輸送船を配置し、必要に応じて人工衛星に燃料を注入する。2019年にはISS国際宇宙ステーションにおいて水を使った燃料注入実証実験を実施。2021年6月にはグリーン推進剤のHTP(High-Test Peroxide)燃料を積んだ世界初の軌道上燃料補給タンカー「Tanker-001 Tenzing」を低軌道(太陽同期軌道)に打ち上げている。

2022年現在、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」を打ち上げ予定としている。Tanker-002は、側面と上部に7つの燃料タンクを持ち、太陽電池パネルが取り付けられている。最大15年間宇宙を漂うことができ、必要な時に必要な場所へ燃料注入のために移動できるという。

同社は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。価格も既に設定されており、100kgあたり2,000万ドル(約28億円)。既にアストロスケール社(2026年以降打ち上げ予定のEOL:寿命延長サービス衛星LEXI)や、英国のClearSpace社(ADR:アクティブ・デブリ除去衛星)と契約している。燃料補給のための重要な独自技術が「RAFTI™(Rapidly Attachable Fluid Transfer Interface)」と呼ばれるバルブで、既存の衛星の燃料充填バルブを代替できるポートである。従来の充填・排出バルブの代わりにRAFTY給油ポートを追加するだけで、衛星への給油が可能になる。地上、軌道上いずれの給油にも対応でき、既に米国政府の4つのミッションと100以上の商業衛星の設計に組み込まれている。<sup>53</sup>Orbit Fab社は、今後5~10年以内に数十の燃料タンカーと燃料輸送船を打ち上げ、地球低軌道、静止軌道、地球と月の間(Cislunar)に配備する予定である。

<sup>51</sup> GITAI. NEWS. <https://gitai.tech/2022/08/17/gitai-develops-inchworm-type-robotic-arm/>, (参照 2023-03-01)

<sup>52</sup> GITAI. NEWS. <https://gitai.tech/2022/02/10/gitai-develops-lunar-robotic-rover-r1/>, (参照 2023-03-01)

<sup>53</sup> GITAI. NEWS. <https://www.orbitfab.com/clear-mission>, (参照 2023-03-01)

#### 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 10 cm 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。<sup>54</sup>

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。同社は 2022 年 3 月、Spire Global と契約し、3 基の衛星を発注。2023 年の早い時期に打ち上げられる。将来的には「Skylark」と名付けた 52 基のコンステレーション衛星群を構築。従来の SSA を宇宙情報・知能(Si2: Space Information & Intelligence)のレベルまで高め、ほぼリアルタイムにタイムリーで正確な軌道決定、衝突回避、ナビゲーションサービス、サイバーセキュリティのための近接警告等を世界の衛星コミュニティに提供する。

(株)アストロスケールホールディングスは、2022 年 9 月、NorthStar 社と戦略的パートナーシップを締結。両社は、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。アストロスケール社は、この提携により、軌道上の物体に関する重要な宇宙安全情報の提供や、捕獲対象となる宇宙船の追跡・捕獲をサポートするために必要な ISSA サービスを前進させることを目指している。

図表 2-5-9 NorthStar 社の宇宙からの SSA サービス



出典: satnews<sup>55</sup>

<sup>54</sup> (株)アストロスケールヒアリング回答より

<sup>55</sup> Satnews. <https://news.satnews.com/2021/08/25/northstars-planned-satellite-constellation-obtains-authorization-for-requested-rf-spectrum-from-canadas-ISED/>, (参照 2023-03-01)

#### (4) 今後必要とされる技術

有識者ヒアリングから得られた、軌道上サービスに関連した将来宇宙技術は、「ランデブー技術、ロボット技術」と「人工衛星の長寿命化」であった。

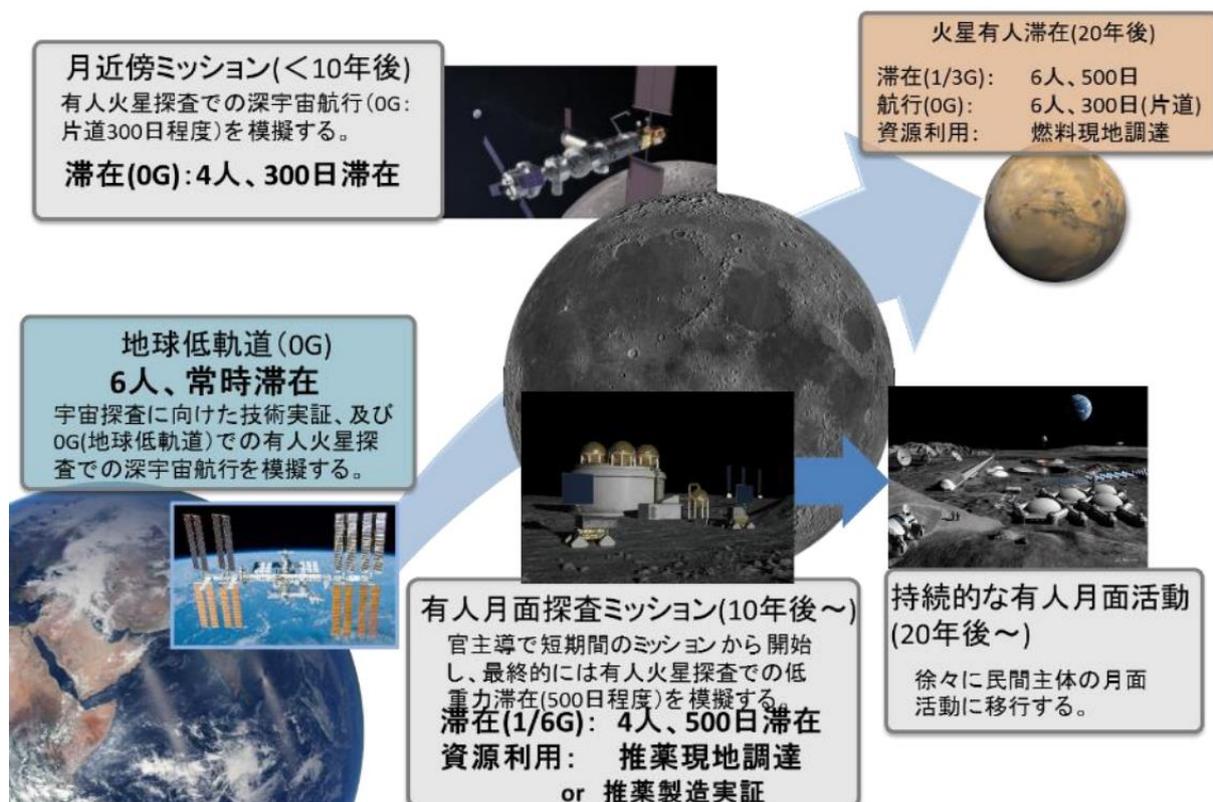
将来宇宙技術	目的	説明(ヒアリングから)
ランデブー技術、ロボット技術	スペースデブリ除去	デブリ除去のために必要なのは、ETS-VII(技術試験衛星VII型「きく7号」)で開発したようなランデブー技術とロボット技術。これを静止軌道で作る。
人工衛星の長寿命化	スペースデブリを増やさない	燃料や電池を補給して使い続ける。観測装置のカメラなどが高性能化したら、カメラだけ取り換えられるようにする。

## 【6】月面・火星・小惑星・彗星等

### (1) 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)の有人火星探査を一つの目標として設定。「20 年後までには、有人月探査の中で有人火星探査での低重力滞在(500 日程度)の模擬を行い、資源利用としての燃料製造実証も行う。最終的には、20 年後頃には燃料の現地調達により 6 人で 500 日の火星有人滞在を行うことを目標とする。」<sup>56</sup>としている。

図表 2-6-1 宇宙探査での「有人活動」の長期的な目標



出典:「日本の国際宇宙探査シナリオ案(2021)」JAXA<sup>57</sup>

NASA が計画している「アルテミス計画」では、2022 年 11 月に「アルテミス 1 号」として無人のオリオン宇宙船を月周回軌道に投入し地球に帰還する。2024 年に予定されている「アルテミス 2 号」は有人ミッションで月周回軌道から往復。2025 年以降の「アルテミス 3 号」が有人月面着陸のミッションとなる。

このミッションに先立ち、有人着陸船(Human Landing System)を軌道に投入するミッションが行われ、「アルテミス 3 号」の 2 人のクルーが HLS に移動。HLS は降下して月の南極付近に着陸する。着陸クルーは 6.5 日間を月面で過ごし、その後 HLS は月面から打ち上げられ、月の周回軌道で待機しているオリオン宇宙船とドッキングし、地球に帰還する予定である。

<sup>56</sup> JAXA,日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2021.<https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021.pdf>, (参照 2023-03-01)

<sup>57</sup> 同上

2026年に予定されているアルテミス4号は、月周回軌道上の宇宙ステーション「ゲートウェイ」に向かう有人ミッションとなる。ゲートウェイを構成する2つのモジュールが支援ミッションにより事前に運ばれることになっている。2028年には、月面に宇宙飛行士が継続して滞在できる基地建設を始め、水などの資源を開発するとされる。

月には66億トン近くの水が存在すると推定されている。<sup>58</sup> 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も期待が大きい(月の引力は地球の1/6なので低コストで打ち上げが可能)。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。

株式会社 ispace では、月の資源開発について、短期(今後10年)ではロケットの燃料補給や生命維持として水が、中期(今後15~20年)ではインフラ構築や機械用途として月の砂「レゴリス」や金属が、長期(今後20年~)では地球に輸送される資源としてプラチナ・パラジウム等の白金族(PGMs)が資源として開発されることを予想している。<sup>59</sup> 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、有機物等を含む黒色のC型が大半。他に、鉄やニッケルを多く含むM型等がある。

今後科学技術が進歩して、仮に直径3kmのM型の小惑星を地球に持ち帰ることができれば、200億トンの(酸化鉄ではなく)金属状態の鉄と1億トン以上の白金族を手に入れることができるとされる。これは産業革命以来200年をかけて人類が利用した金属鉄の総生産量を上回り、プラチナも総生産量の2倍以上に匹敵する量である。<sup>60</sup> たとえ地球に持ち帰らなくとも、太陽光発電、原子力、イオンエンジンなどのエネルギーを駆使して小惑星を移動させ、月の周回軌道に投入し、有人宇宙ステーションとドッキングさせれば、月の表面で精錬することもあり得るかもしれない。<sup>61</sup>

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)と推定されている。<sup>62</sup>

図表 2-6-2 小惑星リュウグウ



<sup>58</sup> Shuai Li. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1802345115>, (参照 2023-03-01)

<sup>59</sup> 株式会社 ispace. 月面ビジネス市場拡大と輸送需要. [https://www.mext.go.jp/kaigisiryō/content/20210118-mxt\\_uchukai01-000012441\\_2.pdf](https://www.mext.go.jp/kaigisiryō/content/20210118-mxt_uchukai01-000012441_2.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>60</sup> 宮本 英昭. 「太陽系探査の現状と宇宙資源の考え方」環境資源工学 68:3-9(2021) [https://www.istage.jst.go.jp/article/rpsj/68/1/68\\_3/pdf](https://www.istage.jst.go.jp/article/rpsj/68/1/68_3/pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>61</sup> IBM. 「宇宙資源の開発に挑む—やがて飢渴する資源を宇宙に求める時代に備えて」<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/mugendai-9608-interview-development-of-space-resources/>, (参照 2023-03-01)

<sup>62</sup> Asterank. <https://www.asterank.com/>, (参照 2023-03-01)

## (2) 課題解決策となる宇宙利用技術、必要となる要素技術

「月面・火星・小惑星・彗星等」の利用により可能になる宇宙利用技術の中で、社会課題 8.「エネルギー・金属資源不足」の解決に資する技術は、①資源探査(テラヘルツ波による観測等)、②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)である。

図表 2-6-3 軌道上サービスを利用した技術による社会課題解決策

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	① 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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・月周回衛星</li> <li>・テラヘルツ波センサ</li> <li>・ランダー(着陸船)</li> <li>・ローバー(探査車)</li> </ul>
	② 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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・探査用ロボット</li> <li>・循環型再生エネルギーシステム</li> <li>・月面推薬生成プラント</li> <li>・小惑星採掘</li> </ul>

※要素技術は全て宇宙関連の要素技術

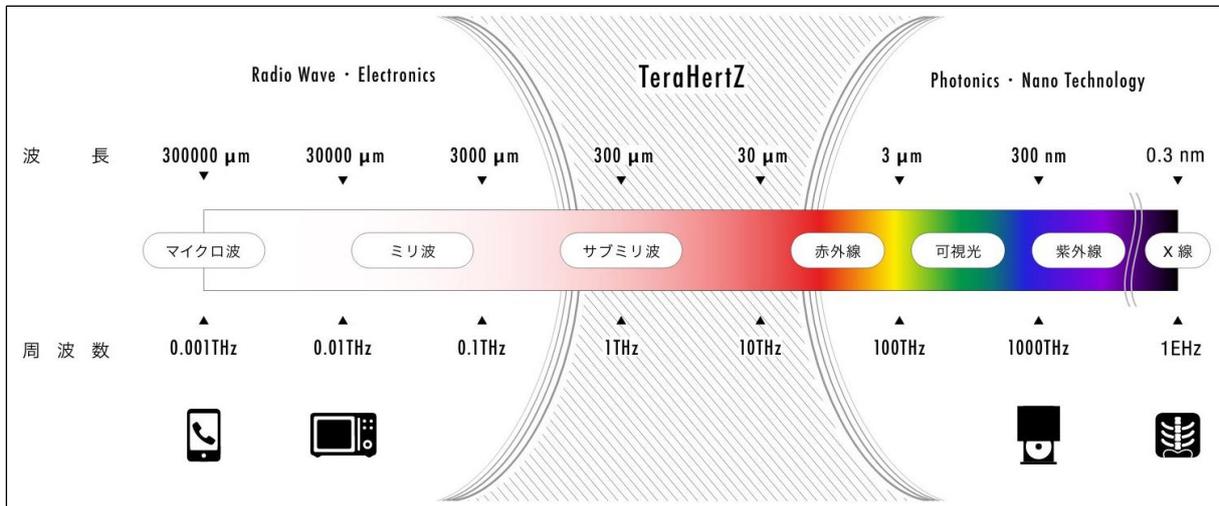
<sup>63</sup> JAXA, ONC-T によって撮影されたリュウグウ. [https://www.hayabusa2.jaxa.jp/galleries/ryugu/pages/fig9-2\\_fm40km.html](https://www.hayabusa2.jaxa.jp/galleries/ryugu/pages/fig9-2_fm40km.html), (参照 2023-03-01)

### (3) 要素技術

#### 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を指す。

図表 2-6-4 テラヘルツ波とは



出典: NICT(情報通信研究機構)<sup>64</sup>

テラヘルツ波にはいくつかの特徴がある。まず、小型軽量を可能にする。観測機器の精度は、アンテナの大きさに比例し、波長に反比例するが、テラヘルツ波は、(上記図が示すように)マイクロ波やミリ波よりも波長が短いため、同じ観測精度を実現するアンテナを小さく作ることができ、小型軽量化が実現する。また、同時に高い空間分解能を達成することができる。機器が小型であれば宇宙探査機の隙間にも搭載しやすくなる。

2番目の特徴は、大気中分子(環境負荷物質・温暖化物質・オゾン破壊物質等)や氷雲の観測が得意なこと。特に比較的質量の軽い分子( $\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$ 等)や大気中の短寿命ラジカル物質(あまりにもアクティブで物組成を変えてしまうため存在量が少ない)やイオン等の同時観測が可能である。これら多種の分子同時測定により、地球・惑星の大気組成や惑星化学進化を研究すること、さらに同位体分子の観測や分子内部の物理情報により、過去の物理化学情報を追跡することが可能になった。

また、ドップラー効果を利用した大気中の風速推定も得意であるため、連続波を利用することで、地球においては氷雲や水雲からの熱放射を、希少大気を持つ惑星からは地表面からの熱放射を観測できる。この時に観測される輝度温度は、雲表面温度だけを単純に反映するのではなく、観測波長の数倍程度に潜った部分からの放射(電磁波)も観測される。雲や地表面内部を伝わる電磁波の放射伝達式には、雲内の温度分布と媒質の複素誘電率が主に関わって来るが、2偏波での観測や、表面温等の適切な補助データを合わせることによって、媒質の複素誘電率を導出することができる。それにより、氷雲を構成する物質の種類や粒径分布・形状分布を推定することができる。<sup>65</sup>

<sup>64</sup> NICT. [https://www2.nict.go.jp/ttrc/thz-sensing/ja/about\\_Thz/](https://www2.nict.go.jp/ttrc/thz-sensing/ja/about_Thz/), (参照 2023-03-01)

<sup>65</sup> 「プロジェクト紹介:テラヘルツ波リモートセンシング」(笠井康子)Journal of The Remote Sensing Society of Japan Vol.36 No.3(2016) [https://www.jstage.jst.go.jp/article/rssi/36/3/36\\_251/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/rssi/36/3/36_251/_pdf) 部分引用

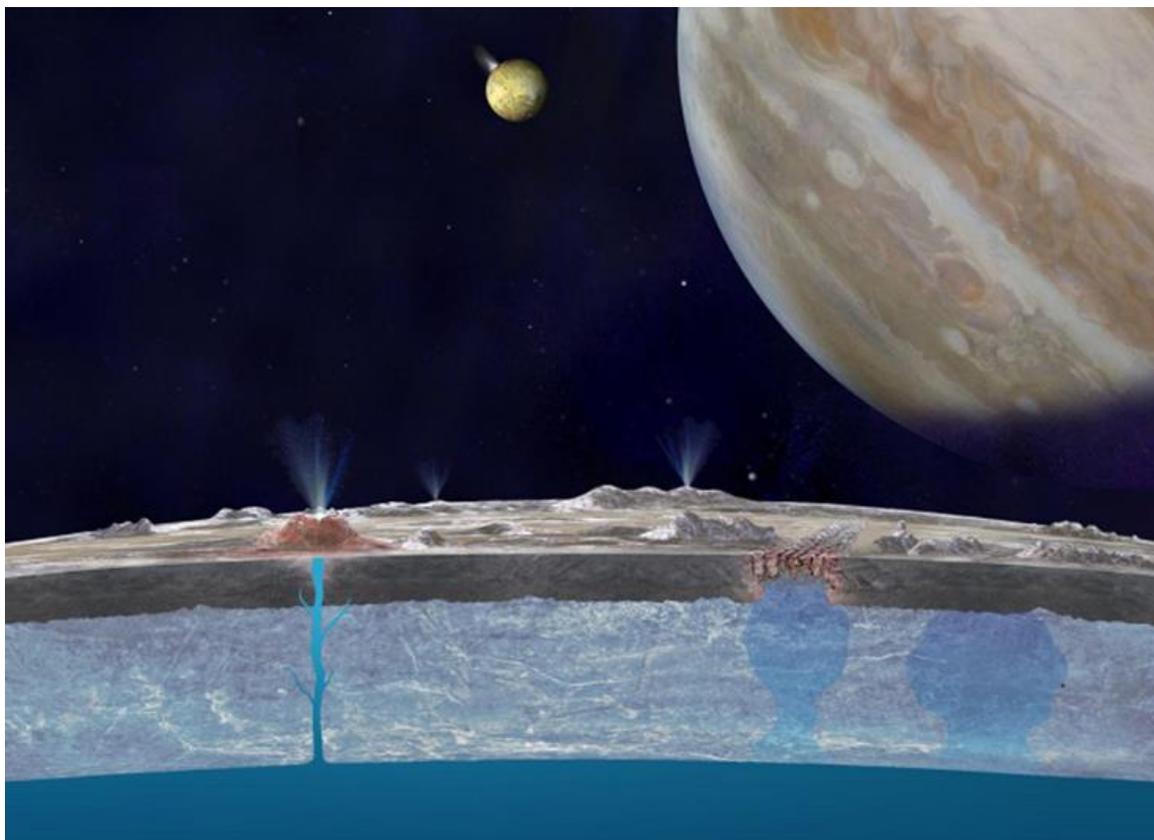
上記のような特徴により、テラヘルツ波は、水に対して、全ての電磁波の中で最も敏感で検出感度が高い。月の「表面」には南極と北極を除いて「水がない」と言われているが、水は表面より下で石に混ざっていたり、氷の形で存在していたりする。テラヘルツ波は、地表から人間が掘れる 20 cm 程度下を観測できるので、この特性を利用すれば、月の「水資源地図」を作ることができる。

「月探査プロジェクト TSUKIMI 計画」は、NICT(国立研究開発法人情報通信研究機構)と東京大学、大阪府立大学、JAXA、SpaceBD(株)を中心とした研究チームによる計画で、2021 年から開始。テラヘルツ波センサによる広域月面探査を実施し、観測した輝度温度から氷・土壌水分含有量の推定を目指している。

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。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)の探査で、それぞれの衛星の大気構造や地表面の状態などを調べる。

木星の衛星エウロパは地下に海が存在しており、地下海の一部が宇宙空間に噴出するプルームも発見されている。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。同位体比は化学的・物理的な「歴史」を背負っており、「その物質がどういう変遷を経てそこにいるのか」というメカニズムがわかる。そのため水の同位体比を調べることで、生命の起源にも迫ることが可能になる。

図表 2-6-5 木星の衛星エウロパと地下海から噴出するプルーム



出典: NASA/JPL<sup>66</sup>

<sup>66</sup> JAXA. <https://juice.stp.isas.jaxa.jp/science/>, (参照 2023-03-01)

## 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している。

日産自動車は 2020 年 1 月から共同研究に参画。量産電気自動車開発で培ってきたモーター制御技術と、電動駆動 4 輪制御技術「e-4ORCE」を応用し、砂地等の過酷な環境下において走行性能を高める技術開発を行っている。

トヨタ自動車は水素燃料電池をエネルギー源とし、車両内部を人に適した気圧にした有人与圧ローバー「ルナ・クルーザー」の開発を進めており、2020 年代後半の打ち上げを目指している。大きさはマイクロバス 2 台分よりやや大きい程度で、最大時速 20 km 程度で走行。乗車可能人数は宇宙飛行士 2 名（緊急時には 4 名）で、13 立方メートルの空間に居住して、1 回当たり地球時間 42 日間の探査を行う。

㈱ダイモンが開発した「YAOKI」は、超小型(15×15×10 cm)、超軽量(498g)、高強度(100G の衝撃に耐えるローバーである。転んで倒れても走り続ける。バッテリーで 6 時間駆動し、搭載されたカメラ画像を地球に送り続ける。YAOKI を搭載するインテュイティブ・マシーンズは、米国テキサス州にある民間宇宙企業である。NASA の商業月輸送サービスに採択され、2023 年第一四半期までに同社最初のミッション「IM-1」を実施する計画になっている。(2023 年 1 月現在)

㈱タカラトミーは、直径約 8 cm、重さ 250g の小さな球形ロボット「SORA-Q」を開発した。球体のまま月面に着陸し、変形して左右の車輪を同時に動かすバタフライ走行、個別に動かすクローリング走行に対応。前後のカメラで月面でのデータ取得を行う。2022 年 3 月現在、2022 年中に JAXA の月着陸実証機「SLIM」と ispace 社の月着陸ランダーに搭載され月に向かうとしている。

㈱ispace は、2022 年現在、月面探査プログラム「HAKUTO-R」として、自社開発のランダーにより 2022 年 11 月に月面着陸を、2024 年には自社開発のローバーにより月面探査を実現する予定である。2024 年以降は、4 輪ローバーのみに限らず、さらに複雑な地形を踏破するモビリティを導入し、極域のクレーターや縦孔等、将来の有人基地の候補となる特殊地域も探査可能とする。また、単にモビリティだけでなく、ドリルやマニピュレーター等の機能も付加し、多様な探査ニーズに対応できることを目指している。

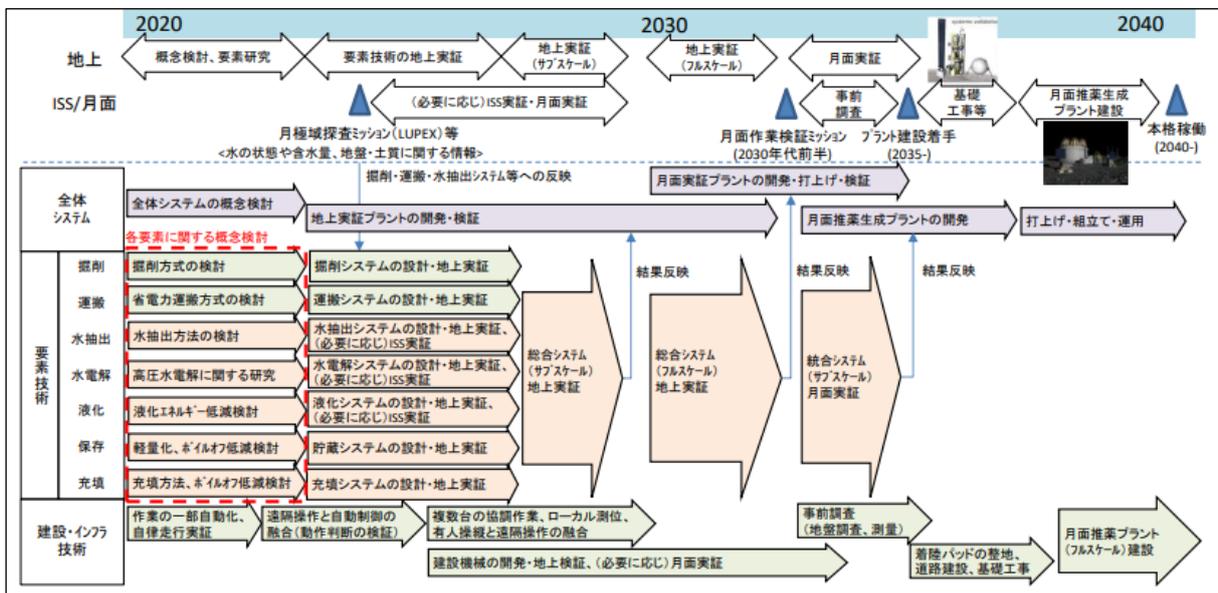
GITAI Japan(株)は、月面作業用ロボットローバー「R1」を開発し、模擬月面環境で実証実験を実施。同社は、トヨタの「ルナ・クルーザー」向けに、ロボットアームの開発も行っている。

## 1) 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。

このプラントのシステムは、月面でレゴリスを掘削→プラントまで運搬→水を抽出した後に電気分解→得られた酸素及び水素を液化→タンクに保存→再使用離着陸機に推薬を充填、という流れになる。レゴリスから水を抽出する技術については、加熱方式やマイクロ派照射方式等が検討されている。

図表 2-6-6 月面推薬生成プラントの実現に向けた技術ロードマップ



出典:「日本の国際宇宙探査シナリオ案(2021)」JAXA<sup>67</sup>

上記のように、現地の資源を利用する技術、ISRU (In-Situ Resource Utilization) は、今後の宇宙開発の基本となる。ESA (欧州宇宙機関) では、月で水や酸素の生成が可能であることを示す「ISRU 実証ミッション」を 2025 年に予定している。既にオランダの Space Applications Services 社が、月のレゴリスから酸素を生成するために FFC-ケンブリッジ法 (ケンブリッジ大学が発明した熔融塩の電気化学的脱酸素法) もしくはイルメナイト鉱の水素還元法を用いた反応器を開発・提供する契約になっている。<sup>68</sup> また、NASA も ISRU ラボを立ち上げ、月・火星探査に必要な化学プロセス用リアクターおよびシステムの設計、製作、試験を行っている。<sup>69</sup>

JAXA と Honda は、2020 年 11 月から 3 年間の共同研究協定を締結し、「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

<sup>67</sup> JAXA. 日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021 .

<https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021.pdf>, (参照 2023-03-01)

<sup>68</sup> ROOM, News European startup to produce oxygen from lunar soil for ESA 2025 mission. <https://room.eu.com/news/european-startup-to-produce-oxygen-from-lunar-soil-for-esa-2025-mission>, (参照 2023-03-01)

<sup>69</sup> NASA. <https://kscpartnerships.ksc.nasa.gov/Partnering-Opportunities/Emerging-Markets/R-and-T/ISRU#>, (参照 2023-03-01)

「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。

水素は月面を離発着する輸送機の燃料として活用。また、酸素と水素を使って燃料電池システムで発電をし、有人拠点や移動用車両などへ電気を供給する。Honda は長年水素技術の研究開発に取り組み、2002 年に世界で初めて燃料電池自動車のリース販売を開始。高圧水電解システムを使ったスマート水素ステーションの開発・設置も行っている。循環型再生エネルギーシステムは、これらの技術を活用して実現を目指す。

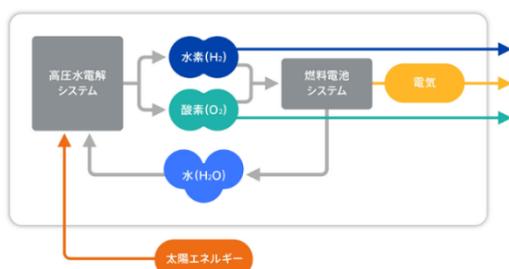
図表 2-6-7 月面での循環型再生エネルギーシステム活用イメージ



出典：JAXA/Honda<sup>70</sup>

循環型再生エネルギーシステムでは、以下チャート図が示すように、水が形を変えて循環することで、電気・水素というエネルギーと呼吸のための酸素を生み出し、一定の効率で循環する。このシステムはカーボンニュートラルにつながる技術でもあるため、地球上のサステナビリティにとっても欠かせない技術となる。

図表 2-6-8 循環型再生エネルギーシステム



出典：JAXA/Honda<sup>71</sup>

<sup>70</sup> HONDA, 人の活動領域を宇宙へと広げる挑戦循環型再生エネルギーシステム, [https://www.honda.co.jp/future/EngineerTalk\\_Junkan\\_Energy/](https://www.honda.co.jp/future/EngineerTalk_Junkan_Energy/), (参照 2023-03-01)

<sup>71</sup> 同上

## 2) 小惑星採掘

環境悪化や天然資源の飢渴が深刻化するにつれ、小惑星採掘をビジネスとしようとする企業が 2010 年代から現れた。米国の Planetary Resources 社、Deep Space Industries 社がそうである。両社は採掘の可能性が高い小惑星 1 万 5 千個を特定する衛星を設計する等、大きな貢献をしたが、小惑星の採掘に向けた開発費は法外なコストがかかるため、両社ともにそれに見合う資金を確保できず、それぞれ 2018 年、2019 年に他企業に買収された。2022 年現在、小惑星採掘に取り組む主な企業は、2022 年 1 月に設立されたばかりの AstroForge(米)、2015 年設立の TransAstra Corporation(米)、2016 年設立の Asteroid Mining Corporation(英)である。

AstroForge は、非公開であるが宇宙空間での物資精製を可能にする技術を開発しており、小惑星を砕いて採掘し、貴重な物質を地球に戻すことを計画。2023 年には SpaceX 社の Falcon9 ロケットで打ち上げ、軌道上で技術検証を行う予定である。2030 年までに小惑星からプラチナを採取することを最初の目標としている。TransAstra Corporation は、集光された太陽エネルギーを使用する同社の特許済み技術「光マイニング」(Optical Mining)を利用するように設計された無人小型採掘宇宙船「Mini Bee」を 2022～2023 年に打ち上げ、地球周回軌道上での試験を計画しており、NASA も支援している。実証試験では、模擬小惑星の発見、確保、加工を目指す。

具体的には、捕獲した小惑星を分解するために、小惑星の岩肌に太陽光を集中的に当てる「光マイニング」法を採用。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する。この加熱により、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。放出されたガス状の揮発性物質は、小惑星の破壊された粒子を押し流し、スポーリングと呼ばれる現象が起こる。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。

実証された技術を発展させた「Honey Bee」では、10m の小惑星から最大 100 トンの揮発性物質を抽出する。また、最大となる宇宙船「Queen Bee」は、超重量級の光マイニング機能と捕獲機能を備え、直径 40m までの小惑星から 5,000 トンの揮発性物質を抽出する。この揮発性物質は、ロケットの推進剤として利用できるようにする。Asteroid Mining Corporation は、2025 年に太陽同期低軌道に超小型の小惑星探査衛星宇宙望遠鏡「APS-1」を打ち上げ予定。「APS-1」は、数千個の地球近傍小惑星とメインベルトの小惑星をスキャンし、その組成を推定する。「APS-1」が取得したデータは、太陽系初の包括的な宇宙資源データベースとなる。

その後、小惑星探査衛星 II (APS-2) が打ち上げられる。「APS-2」は小惑星群に接近し、小惑星の組成、形状、大きさ、回転、地形、質量等のより詳細な情報を取得し、次の探査機「AEP-1」が着陸すべき小惑星の決定と着陸地点の選定を行う。小惑星探査機 I (AEP-1) は、「APS-2」によって特定された最良の採掘候補にランデブーし、軌道を周回して着陸。小惑星ロボット探査機が地表を探索し、コアサンプルを採取し、抽出技術をテストして、「AMP-1」の採掘場所を特定する。

小惑星探査機「AMP-1」は、「AEP-1」によって選ばれた場所に着陸し、採掘装置を設置し、20トンの白金金属を採取することを試みる。これは、世界の年間供給量の 10%に相当し、再利用可能な採掘シャトルで地球に送られる。鉱山は飢渴するまで操業し、小惑星を地球外経済の構成要因として利用する。

東北大学と Asteroid Mining 社は、2020 年に小惑星探査ロボットの共同研究に合意し、2021 年から開始。東北大学の宇宙ロボット研究室(Space Robotics Lab:SRL)は、月惑星探査ロボットの力学と制御、及び微小重力下での探査ロボットの研究開発に焦点を当てて研究を進めている。SSL では、これまでの研究成果をベースとして、新しいプラットフォームである Space Capable Asteroid Robotic Explorers(SCAR-E)の開発を行う。

図表 2-6-9 SCAR-E が小惑星の採掘をするコンセプト画



出典: Asteroid Mining Corporation<sup>72</sup>

<sup>72</sup> Asteroid Mining Corporation . Robotics . <https://asteroidminingcorporation.co.uk/robotics>, (参照 2023-03-01)

#### (4) 今後必要とされる技術

有識者ヒアリングから得られた、「月面・火星・小惑星・彗星等」に関連した将来宇宙技術は、「閉鎖環境制御技術」、「月地球輸送用ランダー」、「リターンミッション」であった。

将来宇宙技術	目的	説明(ヒアリングから)
閉鎖環境制御技術	エネルギー、水、物質の循環再生	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。
月地球輸送用ランダー	月面開発	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。
リターンミッション	月から地球への帰還	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。

## 【7】 今後必要となりうる技術開発

---

宇宙利用は従来の大型ロケットの打ち上げによる宇宙開発から、低コストでの小型ロケットや衛星の打ち上げが可能となることで、宇宙ビジネスの可能性が広がっている。今後、人工衛星からデータを受け取ること以外に、月や惑星での活動が行われていくことが予想されている。

### (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<sup>73</sup>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<sup>74</sup>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プリンタやロボットを使い人の手を介さない建設が進められる<sup>75</sup>。

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<sup>76</sup>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<sup>77</sup>(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CO<sub>2</sub>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。

長期滞在することになれば、地球から物資や食料を運ぶことも考えられるが、宇宙空間で自給自足をする方が効率的である。宇宙空間に設置した太陽電池からのエネルギーや、水や空気を循環させる環境が整い、宇宙農業や食料となる昆虫の養殖なども行われていく。

また、宇宙空間での長期滞在中、ホームシックにかかった場合はVRを通じて地球に帰ることもできる。

### (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。

---

<sup>73</sup> 大林組. 宇宙エレベーター建設構想. [https://www.obayashi.co.jp/kikan\\_obayashi/detail/kikan\\_53\\_idea.html](https://www.obayashi.co.jp/kikan_obayashi/detail/kikan_53_idea.html), (参照 2023-03-01)

<sup>74</sup> 公益社団法人原子力環境整備促進・資金管理センター. <https://www.rwmc.or.jp/disposal/high-level/2-2.html>, (参照 2023-03-01)

<sup>75</sup> SPACEFACTORY. <https://www.aispacefactory.com/marsha>, (参照 2023-03-01)

<sup>76</sup> 東京理科大学. <https://www.tus.ac.jp/rcsc/wp-content/uploads/2021/03/2020RCSC.pdf>, (参照 2023-03-01)

<sup>77</sup> 名古屋大学. <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/50naze/wakusei/48.html>, (参照 2023-03-01)

閉鎖型植物工場(宇宙植物工場)<sup>78</sup>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<sup>79</sup>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。

---

<sup>78</sup> 北宅 善昭. 長期有人宇宙活動を支える植物. 植物科学最前線 11:90 (2020) [https://bsj.or.jp/jpn/general/bsj-review/BSJ-Review11A\\_90-105.pdf](https://bsj.or.jp/jpn/general/bsj-review/BSJ-Review11A_90-105.pdf), (参照 2023-03-01)

<sup>79</sup> 株式会社 TOWING. [https://en-gage.net/towing\\_saiyo/?banner=1](https://en-gage.net/towing_saiyo/?banner=1), (参照 2023-03-01)

## 第3章 将来衛星開発技術

### 【1】コア技術における最新動向と課題

本章では、世界動向を鑑み、将来(20～30年後)必要となる衛星開発において、コアとなりうる技術を調査した。コア技術の選定にあたっては、国内外の官公庁やシンクタンク、業界団体等の報告書の文献調査及び有識者ヒアリング、業界団体等が主催する勉強会・フォーラムにおいて情報収集を行った。また第2章の調査結果も踏まえ、その中で出現した衛星に関する技術キーワードを以下の通り抽出した。

・衛星測位システム ・RTK 測位 ・AIS 受信機搭載衛星 ・SAR ・光学センサ
・DPR、CPR ・赤外サウンダ ・雷センサ ・捕獲,ドッキング,軌道離脱 ・宇宙ロボットアーム
・軌道上燃料輸送 ・宇宙状況把握(SSA) ・テラヘルツ波センサ ・ローバー,探査用ロボット ・小惑星採掘
・月面推薬生成プラント ・循環型再生エネルギーシステム ・オンボード解析技術 ・3D プリント技術
・バッテリー技術 ・スラスタ ・光衛星通信技術 ・ハイパースペクトルデータ解析技術/アプリケーション
・デブリ除去 ・GPS スプーフィング対策 ・ポインティング技術 ・LiDAR ・原子時計 ・ToF カメラ
・アクチュエーション技術 ・宇宙テザー技術 ・閉鎖環境制御技術 ・酸素発生技術

これらのキーワードのうち、衛星の共通基盤となる分野に注目した。次に、既存の国内外における研究開発動向や宇宙基本計画<sup>80</sup>などに盛り込まれる日本が今後注力していく分野や方向性を考慮し、それらに親和性の高い技術を候補に挙げた。さらに、本調査におけるヒアリングの中で、複数の有識者や民間事業者から頻出した技術キーワードや、国内の研究機関や企業が研究を進めている分野の中から、「オンボード解析技術」、「3D プリント技術」、「バッテリー技術」、「光衛星通信技術」、「ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術」の5つをコア技術として選定した。なお、特定分野のみに活用される技術は除外した。

個別の選定理由は以下の通りである。

No.	キーワード	選定理由
1.	オンボード解析技術	<ul style="list-style-type: none"><li>現状の観測衛星では、望遠鏡や電波センサで収集した膨大な量のデータをそのまま地上に送信しているため、データが活用できるまでの処理速度の遅延やダウンリンク回線への負担増が課題となっている。</li><li>オンボード処理をすることにより、これらの課題の解決が期待される技術である。</li><li>気象、災害監視衛星であれば、雲や雨、風を観測し、観測データを軌道上で処理し、速やかに地上にアラートを発信できるようになるため、災害時の人命救助などへの貢献が見込まれる。</li></ul>
2.	3D プリント技術	<ul style="list-style-type: none"><li>小型衛星を中心に衛星の打ち上げコストが大幅に下がり、宇宙事業へ民間</li></ul>

<sup>80</sup> 令和2年6月30日閣議決定。宇宙基本計画の概要。 [https://www8.cao.go.jp/space/plan/kaitei\\_fy02/fy02\\_gaiyou.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/kaitei_fy02/fy02_gaiyou.pdf), (参照 2023-03-01)

No.	キーワード	選定理由
		<p>企業の参入が増えている。20～30年後は、必要な時に必要な衛星を迅速に製造できる3Dプリント技術の活用が有用である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>さらに、3Dプリント技術は地上での活用に加え、地球からロケットで資材を調達せずとも、月面のレゴリスを原材料に3Dプリンタで建造物などを製造する方法など、実用化に向けた動きがあり期待される。</li> <li>宇宙特有の少量多品種で複雑な形状の部品が必要なときに活用される。</li> </ul>
3.	バッテリー技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>バッテリーは衛星の基盤であり、できるだけ安定的に長持ちさせる技術が必要となる。とりわけ小型軽量化や、性能、信頼性を高める研究開発が国内外で進められている。</li> <li>現状の人工衛星にはリチウムイオン電池が搭載されているが、宇宙用のバッテリーを高性能化する動きに加え、全固体リチウムイオン電池など新たなバッテリーの研究も今後ますます進展することが見込まれる。2050年カーボンニュートラルの実現に向けた動きの中で、ガソリン車からの転換を図る自動車業界でもバッテリー開発が盛んになっており、これらから衛星へ転用される可能性も秘めている。</li> </ul>
4.	光衛星通信技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星通信は電波を使って行われるが、今後、通信に利用できる帯域不足が予想されているため、別の通信技術の開発が求められる。</li> <li>そこで注目されるのが光通信である。従来の電波では、使用できる周波数に割り当てがあり、膨大なデータ量を高速に送受信するには課題が残っている。しかし、光通信は電波に比べ、それらの点をクリアできる可能性があり、利用に適している。また、情報セキュリティの面でも有利な点が多く、今後必要となるコア技術であると言える。</li> </ul>
5.	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイパースペクトルセンサは国内外の衛星開発において、研究が進められている。これまでも、ハイパースペクトルカメラを用いた温室効果ガスの排出源の特定に利用されるなど、一部で利用が進められている。このセンサを使ったデータは、工夫次第で様々なアプリケーションに用いることが可能であり、新たな宇宙データ利用サービスにつながる可能性が高く、宇宙利用の広がりにつながっていく技術である。</li> </ul>

衛星技術に関しては軍事的側面を持つ場合は特許や論文などで情報開示がされておらず、各国が独自に開発を進めているものもある一方で、民生技術が衛星に転用されるケースも散見される。

上記5つの個々の技術に関しては、論文や企業のプレスリリース等で情報が公開されているものであり、事例を収集し整理した。事例収集を通して、明らかとなった技術課題については、次頁以降に取りまとめる。

## (1) オンボード解析技術

現在、衛星で得られたデータは、いったん衛星上に蓄積したのち地上に送信して、用途に合ったデータへと処理している。しかし軌道上での蓄積と地上への送信量の制約から、データ量が膨大となる広い海域の観測などは困難だった。この問題を解決するため国内外で研究開発が進められている。

ロイヤルメルボルン工科大学の研究では、注目されている技術の一つとして機械学習(ML)を挙げている。MLは、問題解決、意思決定、パターン認識の能力が高いため、多くの困難な局面において不可欠な解決策となっている。従来の ML を用いたアプリケーションは、複雑な解析の処理に制限があり、手作業が必要とされていたが、近年は生データから自動的に特徴を学習する手法が提案されている。しかしこの方法では、学習用のデータが大量に必要であり、また、精度を上げるために生データを前処理する必要も考えられる。そのため今後は、リアルタイムで効率的に再学習させる方法が重要な研究課題として挙げられている。

国内では、JAXA においてオンボードで画像化を行う、SAR データのオンボード処理技術の研究開発を行っている。2020 年 2 月、JAXA とアルウェットテクノロジー(AT 社)は、人工衛星搭載の SAR データを軌道上で画像化する装置を共同で開発したことを発表した。本装置では、従来は地上の計算機で行っていたデータ処理を、高速処理が可能な FPGA(Field-Programmable Gate Array)に適したアルゴリズムに書き換えて最適化することにより、世界で初めて衛星搭載用の装置として実現した。

これにより、SAR 観測データを軌道上の衛星内で準リアルタイム処理することで衛星からのダウンリンク量の大幅な圧縮が可能となり、現在ニーズが高まっている海域観測や船舶の動静把握への活用が期待される。また、2022 年 12 月、JAXA と小型 SAR(合成開口レーダ)衛星を開発・運用する QPS 研究所は共同で、取得した地球観測データを軌道上で処理してサービス提供を迅速化する「オンボードコンピューティング(OBC)」の技術実証を行うことを発表した。

海外の動向として、ドイツのスタートアップ企業である OroraTech は、超小型衛星を活用して森林火災の監視サービスを提供している。2022 年 1 月、米国の企業 SpaceX 社は、OroraTech 社の非冷却型熱赤外線カメラを搭載したロケット「Falcon 9」を打ち上げた。高度 525km(±25km)で、靴箱ほどの大きさの衛星「CubeSat」が地球を周回し、地表の高解像度熱画像を連続的に撮影する。このカメラは、取得したデータを軌道上で直接 AI のアルゴリズムで解析し、地球に伝送する。これにより、火災の発見と通報にかかる時間を数時間から数分にまで大幅に短縮し、危険回避と被害防止のための時間を提供する。

2020 年 9 月には、米国のインテルが開発した人工知能(AI)チップが搭載した小型人工衛星「PhiSat-1」(パイサット-1)が打ち上げられた。実験用として打ち上げられ、同程度の大きさである他の 45 基の人工衛星とともに、約 329 マイル(約 530km)の太陽同期軌道を時速 17,000 マイル(約 27,500km)で周回している。PhiSat-1 には、赤外線ハイパースペクトルカメラとオンボード AI 処理が可能な「Intel® Movidius™ Myriad™ 2 Vision Processing Unit (VPU)」(Myriad 2)が搭載されている。VPU は地球上の多くの消費者デバイスに搭載されているが、今回初となる人工衛星への搭載となり、大量のローカルデータを処理することで、研究者の貴重な時間と衛星ダウンリンク帯域幅を節約することが可能となる。

その他、民生部品を活用した安価なオンボードコンピュータ(OBC)の実証が国内で進められている。明星電気はベトナム国家宇宙センター(VNSC)との共同研究のもと、民生部品を活用した安価で高性能なオンボードコンピュータを開発し、3U サイズのキューブサット「NanoDragon」に搭載して軌道上実証に行い、成功した。OBC に関しては国内のベンチャー企業、これから宇宙産業に進出する大手メーカーの宇宙機用として需要が高まっているが、海外でも使ってもらうためには、まず宇宙での実証実績が問われる。それに応えるため、明星電気は宇宙実証する機会を得た。

2021年11月には、日本の高専10校が共同開発した超小型人工衛星「KOSEN-1」がJAXAのイプシロンロケット5号機によって打ち上げられた。この技術実証は、超小型で低消費電力となる市販のLinuxマイコンボードを、衛星の心臓部となるOBC(Onboard Computer)に使用し、衛星で常時運用するという内容であり、OBCと連動した搭載カメラによる地球の写真撮影にも成功した。KOSEN-1衛星の地上局は全国に7局あり、衛星から受信したデータは衛星運用やミッションデータの解析に活用している。

## (2) 3D プリント技術

近年、宇宙開発における先端技術として3Dプリント技術が注目を集めている。ロケットや人工衛星は、大量生産には向かない少量多品種の部品が必要になり、金型など生産ラインを確立することが非効率で、割高な製造コストがかかる。一方、近年の3Dプリント技術では、電子ビームやレーザで金属粉末を選択的に熔融・凝固・積層することが可能となっており、質の高い技術の出現が航空宇宙のモノづくりに変革を起こしている。少量多品種生産では、3Dプリントの特徴であるCAD(Computer Aided Design)データをもとにビーム走査により金型が不要で低コスト・短納期化が期待できる。

このような技術発展に伴って、ロケットエンジンに必要な耐熱性を有した素材や、有人探査に使われるローバーなどの高い安全性が必要な素材にも対応できることから、宇宙分野への3Dプリント技術の導入は加速していくものと考えられる。世界の航空宇宙分野の動向として、欧米では政府の主導のもと、小型部品から人工衛星やジェットエンジンなどへの試作が既に始まっている。

2015年に設立された米国のベンチャー企業であるRelativity Space社は、ロケットをまるごと3Dプリンタで製造することを特徴としている。世界最大級の金属3Dプリンタ「Stargate」を使うことで、部品の点数も従来のロケットの100分の1で、製造時間は約10分の1に短縮するとしている。2017年から開発している最初のロケット「Terran 1(テラン 1)」は、2023年2月現在、同年3月に初飛行が予定されている。そして、新型ロケット「Terran R(テラン R)」の開発計画を2021年6月に発表し、現在開発が行われている。

南オーストラリアに拠点を置く衛星開発企業Fleet Space Technologies (Fleet Space社)は、2021年12月現在、世界初の3Dプリントによって製造した小型衛星「Alpha」を1年以内に打ち上げられる方針を発表した。「Alpha」は、Fleet Space社の先進的なビームフォーミング技術と特許取得済みのアンテナを統合し、より速く、より多くの場所で、より優れた接続性を実現するとしている。

また、地球外で使用する3Dプリント技術は、2016年にMade In Space(米国)が初めて国際宇宙ステーション(ISS)に3Dプリンタを設置してから、少しずつ発展を遂げている。3Dプリンタが地球外で使えるようになることで、宇宙船の故障修理や宇宙飛行士の生命維持戦略などへの活用が期待される。

ESA(欧州宇宙機関)は、地球外3Dプリンタ導入プロジェクト「IMPERIAL」をヨーロッパの幾つかの企業(OHB、Azimut Space、Athlone Institute of Technology、BEEVERYCREATIVE など)と共同で進めてい

る。2022年3月には、その最終版である IMPERIAL3D プリンタのプロトタイプが完成したことを公表した。IMPERIAL3D プリンタは重力に依存せずにポリマー部品生産が可能である。つまり、地球上で逆さまに設置しても動作できる。今後は、地球と ISS 内で動作比較を行い、改良を加えていく方針である。<sup>81</sup> IMPERIAL3D プリンタは、プリンタ自身よりも大きなサイズの部品を出力することができる。これにより、空間的制約の強い ISS 内で、プリンタ自身のサイズを抑えつつ、大きな部品を製造できる。今回の成果は、スペアパーツやツールを大量生産する必要のある将来の活動に大きな違いをもたらすと予想されている。

国内においては、2022年5月に三菱電機が3D積層造形によって人工衛星用アンテナを製造する技術を開発した。3Dプリンタと、真空中で適切な粘度を持ち紫外線による硬化安定性を持つように配合した紫外線硬化樹脂を開発することで、サポート材が不要なフリーフォーム3D積層造形が真空中で可能になった。この技術は、真空中でも安定性を持った新開発の樹脂を3Dプリンタで押出成形し、太陽光の紫外線で硬化させることで、宇宙空間において構造物を低消費電力で製造するものである。

### (3) バッテリー技術

人工衛星を含めた全ての宇宙機は電気無しでは動作しないため、宇宙機搭載のバッテリーは高寿命で高い信頼性を得る必要がある。また、打ち上げコストの低減や各種ミッション機器の搭載比率向上のため、バッテリーの小型軽量化も重要である。そして、今後ますます増えていくと思われる各国の宇宙へのミッションに向け、厳しい環境要件に耐えられるようなバッテリー設計も重要な観点となっている。

JAXA はこれまでに第3世代の宇宙用リチウムイオン電池を開発してきたが、オール電化衛星や海外製宇宙用リチウムイオン電池に対する競争力強化を目指して、第4世代リチウムイオン電池の開発を進めている。そして、さらに一層の軽量化を図るため、新たな蓄電デバイスの研究に取り組んでいる。具体的には、現在主流の第2、第3世代の宇宙用リチウムイオン電池を衛星に適用した場合に比べて、蓄電デバイス質量を半減させることを目標に、第5世代として270Wh/kg級を目指している。また、競争力の観点で、蓄電デバイスの低コスト化も必要と考えており、低コスト化に向けた研究にも着手している。

2022年8月、日立造船とJAXAが国際宇宙ステーション(ISS)の「きぼう」日本実験棟に設置した全固体リチウムイオン電池の実証実験を実施し、世界で初めて宇宙で充放電できたことを確認した。日立造船とJAXAは、宇宙探査イノベーションハブの研究提案公募の枠組みの下、2016年から全固体リチウムイオン電池の共同開発を行ってきた。この全固体リチウムイオン電池は-40℃~120℃という広い温度範囲で使用可能であり、かつ、安全性が高く破裂発火のリスクが極めて小さいため、温度差の激しい、真空中で放射線に晒される宇宙環境で利用する設備の小型・軽量化や低消費電力化に寄与することが可能である。そのため、従来宇宙で使用している有機電解液のリチウムイオン電池では難しかった省スペース化が求められる小型機器への適用や、船外実験装置などでの使用が可能になる。

海外では、現行のリチウムイオン電池を性能面、コスト面で超える数々の次世代蓄電池技術が開発されている。ノルウェーの企業であるMorrow Batteries AS(Morrow)バッテリーは、正極材料LNMO(LiNi<sub>0.5</sub>Mn<sub>1.5</sub>O<sub>4</sub>)を採用している。LNMO技術は、安価なマンガンを足場にして、その中のリチウムとニ

<sup>81</sup> ESA, IMPERIAL: 3D printing's new dimension.  
[https://www.esa.int/esatv/Videos/2022/03/IMPERIAL\\_3D\\_printing\\_s\\_new\\_dimension](https://www.esa.int/esatv/Videos/2022/03/IMPERIAL_3D_printing_s_new_dimension),(参照 2023-03-01)

ッセルをより有効に活用する持続可能なソリューションである。この技術が評価され、すでに様々な企業から支援を受けている。2025年からは、このLNMOをベースにした第2世代の電池の生産を開始する予定である。

ギリシャ企業とドイツ企業による合弁企業であるPleione Energy S.A(Pleione Energy社)は、グラフェンなどのナノ材料に焦点を当て、より持続可能なエネルギー経済のために費用対効果の高い製品を開発、設計、製造している。グラフェンは、ダイヤモンドよりも硬く、銅よりも電気伝導性が高いことから、ESAとともに研究を続けている。従来のリチウムイオン電池に超薄型グラフェンを加えるプロジェクトでは、電池の容量とサイクル寿命が向上し、また有害な溶剤を水と植物由来のセルロースに置き換えることで、より安価で環境に優しい方法で製造できるようになった。欧州宇宙標準化機構(ECSS)の規格に従って製造・試験が行われ、宇宙で使用できる品質であることを表している。

一方で、一般的にグラフェンを用いたバッテリーの商業化には、高品質のグラフェンを大量生産する効率的なプロセスの確立や生産コストの改善などが主な課題とされている。

超小型・小型衛星用のバッテリーには、民生品をスクリーニングして使用する方法と宇宙用セルを製造する企業製品を採用する例がある。EnerSys(米国)、EaglePicher(米国)、SAFT(フランス)等は航空宇宙用のバッテリー供給に長期の実績があり、代表的な製造企業となっている。超小型・小型衛星プラットフォームを製造するGomSpaceやAAC ClydeSpaceも超小型・小型衛星用に特別に設計されたバッテリーを生産している。

なかでも、SAFTは2018年2月に欧州における複数の企業とアライアンスを結び、高密度リチウムイオンおよび全個体電池技術に焦点を置いた次世代バッテリーの研究・開発および工業化のための新たなプログラムを開始することを発表した。このプログラムはエレクトロモビリティ(EV、電気バス、鉄道、海運、航空)、エネルギー貯蔵(ESS)などの分野の市場を対象としたものである。これらの次世代バッテリーは、現行のリチウムイオン製品に比べて性能、コスト、安全性の面で優れたものを目指している。また現在運用されている様々なシステム環境との統合を意識し、デジタル化した制御機能とインターフェイスを備えたバッテリーを、大手の材料サプライヤーとともに設計することも計画している。

その他、リチウムイオン電池にかわる可能性があるとしてナトリウムイオン電池が注目されている。現在、スマートフォンや電気自動車など広く使われているリチウムイオン電池は、材料のリチウムがレアメタルであるため、将来にわたる安定的な材料供給という観点に懸念が生じている。そこでリチウムに替わる材料として、注目されているのがナトリウムである。ナトリウムは地球上に豊富にあるため、リチウムに比べて安価に安定して材料供給ができるというメリットがある。しかし、ナトリウムイオン電池の性能はまだリチウムイオン電池に比べて低く、世界中の研究機関やメーカー、スタートアップが性能の向上と実用化を進めているところである。

2021年11月、日本電気硝子は、開発を進めていた全固体Naイオン二次電池について、新たに結晶化ガラスを用いた負極材の開発を行い、結晶化ガラス正極、固体電解質と一体化したオール酸化物全固体Naイオン二次電池の駆動に世界で初めて成功した。オール酸化物の全固体ナトリウム(Na)イオン二次電池は、小型・大型、特殊・汎用など幅広い用途を想定した全固体二次電池である。「オール酸化物」という名のとおり、安定な物質である酸化物材料で構成された固体電池である。正極・負極には結晶化ガラス、固体電解質には酸化物のセラミックスを使用している。これらの主成分は、資源量の豊富なナトリウム・

鉄・リンであり、レアメタルを含んでいないことが特徴的である。また、集電体に重くて高価な Cu 箔を使用せず、軽くて安価なアルミニウムを使用している。

また、スイスのジュネーヴ大学 (UNIGE) では、ナトリウムイオン電池について研究が行われている。その研究によると、ナトリウムイオン電池の課題として、従来の電池に比べてイオンが電解液中で容易に移動できないため、リチウムよりも効率が悪いとしている。したがって、解決策は固体電解質の開発にあるとし、2022 年 2 月に、本大学の科学チームは、炭素、ホウ素、水素で構成される物質(カルボヒドリドポレート)の結晶構造を変更することで、この課題に対応することに成功したことを発表した。研究グループは、バッテリーが効率的に動作するためにバッテリーに加える理想的な圧力も定義した。

#### (4) 光衛星通信技術

光衛星通信は、衛星との通信を電波に代えて光(無線)で行うもので、まずは静止衛星-地球観測衛星間の通信、さらに静止衛星-航空機との通信等の実現を JAXA は目指している。一方、雲があると光では通信ができないため、当面の地上-静止衛星間は電波で通信することとしている。光での衛星-地上間の通信の研究も国内外で進められている。

電波は周波数によりその使い方が定められ、また干渉を避けるため、使用にあたって様々な制約が付く。さらに、データ量の増大に対して使用可能な帯域が限られる(20GHz 帯で数 GHz)ため、通信速度の高速化が難しくなる。一方、光は電波と比べて桁違いに広い帯域(波長  $1.5\mu\text{m}$  帯で、5THz)を有するので、電波より多くの情報を送ることが出来る。また非常に絞ったビームを使用するため、干渉や傍受の恐れがない。将来の宇宙での高速大容量通信の実現には、光の活用が不可欠である。

JAXA は、宇宙インフラとしてのデータ伝送技術を高速化、小型軽量化することで、観測衛星等の低軌道衛星の意義価値を向上させるとともに、商用衛星での超高速光通信を実現し、衛星通信にかかる産業競争力を強化する方針を示している。<sup>82</sup> 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・動画を得ることで、これまで知らなかった宇宙の姿を知ることにつながる。これらを実現するために、システム研究、搭載光通信装置の研究、光地上局の研究等が必要とされている。

JAXA が開発する「光衛星間通信システム」(「LUCAS」: Laser Utilizing Communication System)は、地球観測衛星(低軌道衛星)-光データ中継衛星(静止衛星)間のデータ中継を、波長  $1.5\mu\text{m}$  の目に見えないレーザー光を用いた宇宙空間での光通信により実現するシステムである。これにより、1.8Gbps の光通信が実現されるが、地球観測衛星の取得データ量が年々増大していくことを踏まえると、大幅な高速化が必要である。また、LUCAS のユーザは大型の地球観測衛星である ALOS-3、ALOS-4 だが、将来はより小型の衛星でも光データ中継サービスを利用できるよう、光衛星通信装置の小型軽量化が必要である。

また、将来の月・惑星等の宇宙探査分野においても、電波通信と比べて伝送データ量を桁違いに増大させるために、光通信の使用が必要である。宇宙機-地上間の光直接通信では、地上の大型光学望遠鏡を備えた光地上局で宇宙機からの光を受信する。この際、国際協力により、雲が少なく大気が安定している等の条件を備え、宇宙機との光直接通信に適した、地理的に遠く離れた複数の場所に光地上局を置き、受信に最適な光地上局で受信を行うことが必要である。また、光地上局から宇宙機などへレーザー送

<sup>82</sup> JAXA. 光衛星通信技術の研究. [https://www.kenkai.jaxa.jp/research/society5/opt\\_communication.html](https://www.kenkai.jaxa.jp/research/society5/opt_communication.html) , (参照 2023-03-01)

信を行う際の、航空機等への安全確保として、レーザを航空機などに当てない仕組みを光地上局に実装する必要がある。

光での衛星－地上の通信の研究として、日本とドイツの共同実験が 2021 年に行われた。国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) は、国際共同実験としてシュトゥットガルト大学開発した Flying Laptop 衛星に搭載されたドイツ航空宇宙センター (DLR) の光通信機器 (OSIRISv1) と、NICT の光地上局に設置した新規開発の精追尾付き光学系との間で光衛星通信実験を実施した。そして、2021 年 2 月に OSIRISv1 からのダウンリンク光を NICT 光地上局で受信することに成功した。また同時に、新規開発した大気ゆらぎ測定装置を NICT 光地上局に設置し、初期試験に成功した。さらに、低コストな商用部品で構成した簡易型光地上局も設定し、実際に衛星からのレーザ光を受信することに成功した。

米国では、光衛星通信において壮大なフュージビリティースタディー (実現可能性の調査・検討) が始まっている。この実証実験は、米国防総省 (DOD) が 2019 年 3 月に設立した宇宙開発局 (SDA: Space Development Agency) が主導で進める。DOD は数百機以上の小型衛星が一体となってさまざまな機能を担う衛星コンステレーションによる「NDSA (National Defense Space Architecture: 国家防衛宇宙体系)」構想<sup>83</sup> を進めており、SDA はこうした宇宙関連プロジェクトを指揮する。NDSA は 7 つの層に分かれているが、最も実用化を早く進めるのが「Transport Layer (トランスポート・レイヤー)」と呼ばれるデータの運搬層である。広帯域・低遅延の光衛星通信の利用を前提にした、300～500 機の低軌道衛星によるコンステレーションで構成する。

その大きな目的が、ロシアによるウクライナ侵攻で実戦において初めて使われたとされる極超音速ミサイルなど、極超音速兵器の探知・追尾である。このミサイルは、放物線を描くこれまでの弾道ミサイルと異なり、低空を超高速かつ変則的な軌道で飛ぶ。弾道ミサイルの場合、発射を検知する高度 3 万 6000km の静止軌道にある早期警戒衛星で、発射地点と初速、方向を探知できれば着弾点が計算できた。しかし、新型ミサイルの場合は、距離が遠い静止軌道からでは、その軌道を正確に捉えることは難しい。そこで高度 750～1200km 付近の低軌道を周回する衛星コンステレーションで極超音速ミサイルを探知・追尾し、即座に情報を地上に送ることを目指す。その際、衛星同士の通信に必須とされているのが、現在使われている電波と比べ桁違いに高速な光衛星通信である。

SDA は 2022 年 2 月末、Transport Layer の独自標準「Tranche (トランシェ) 1」に準拠した衛星の開発について、米 Northrop Grumman (ノースロップ・グラマン) や米 Lockheed Martin (ロッキード・マーチン) など 3 社に発注した。2000 億円超の予算をつけて実証を重ね、標準仕様を調整していくという。これらの企業に対して光衛星通信の端末開発で世界をリードする企業が供給する。例えば、2021 年に米 NASDAQ 市場への上場を果たしたドイツ Mynaric (マイナリック) がノースロップ・グラマンに Tranche 1 準拠のターミナルを提供するほか、ドイツ Tesat-Spacecom (テサット・スペースコム) はロッキード・マーチンと契約している。これまで光衛星通信では、日米欧の宇宙機関によって  $1\mu\text{m}$  (マイクロン) 帯や  $1.55\mu\text{m}$  帯のレーザ波長で実験が行われてきたが、SDA は地上の光通信で一般的に使われている  $1.55\mu\text{m}$  帯を標準に据えた。地上の光通信で使われている部品を転用できる可能性があるからとしている。そして、Tranche 1 では 2.5Gbps、できれば 10Gbps の通信速度の実現を目指す。これは衛星の電波通信の 10～100 倍の速度で

<sup>83</sup> SDA, The National Defense Space Architecture (NDSA): An Explainer (<https://www.sda.mil/the-national-defense-space-architecture-nds-a-an-explainer/>), (参照 2023-03-01)

ある。

コロラド州デンバーの通信イノベーターSkyloom は、新しい宇宙通信インフラ基盤を開発、構築、運用することで地球規模のデータ伝送サービスを提供している。Skyloom の持つ宇宙光通信に関する高い技術力により、リアルタイムのデータ伝送を実現し、最新の情報を必要とする顧客のサービス拡張に貢献する。本サービスは、現在の無線周波数(RF)システムに比べ 10~100 倍の量のデータを地球に送信できる。また傍受や干渉の影響を受けやすい RF に比べ、より安全性が高いとされている。

2023 年 1 月、株式会社 Space Compass と共にアジア上空に 1 機目となる静止軌道衛星 SkyCompass-1 を 2024 年末までに打上げる共同事業契約を締結したことを発表した。両者で提供する最先端の光通信ネットワークシステムにより、急速に拡大する地球観測市場にリアルタイムかつ大容量のデータリレーを直接クラウドに提供する。

日本企業であるワープスペースは、人工衛星向け通信インフラ事業を運営し、低軌道人工衛星向け分散型通信インフラサービス「WarpHub」や、小型衛星用モジュールの開発を行う。宇宙や人工衛星に関する高い専門性に加え、JAXA をはじめとした研究機関とのパートナーシップ、つくば研究学園都市が保有する豊富な実験・試験設備等を強みに、民間として世界初の衛星間光通信ネットワーク「WarpHub InterSat」の実現を目指している。地球観測衛星事業者はこの光通信サービスにより、エンドツーエンドの 1 ギガバイトの高データスループットで 24 時間 365 日、ほぼリアルタイムで地球観測データを地上に伝送することが可能となる。

光データ中継衛星を介して低軌道衛星を地上システムに接続するシームレスな通信アーキテクチャを構築することで、地球観測産業の成長を加速させると同時に、多様なソリューションの創出に貢献できると考えている。2023 年 1 月、第一世代の 3 基の中継衛星用の光通信端末として、レーザ光通信製品プロバイダーである Mynaric が製造する「CONDOR Mk3 (コンドル・マークスリー)」を採用することに決定した。今回の契約は Mynaric にとって日本企業との初めての契約となる。

## (5) ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術

近年増大する地震、津波、台風等の自然災害や地球規模での環境問題等への対応および逼迫するエネルギー資源の効率的探査の観点から、高精度で継続的な地球観測の重要性が認識されており、地球観測センサの中でも、植生分布・汚染状況の観測精度の向上、石油等地下資源の遠隔探知能力の向上を可能とする高い波長分解能を有するハイパースペクトルセンサへのニーズが高まっている。

こうした背景から、衛星に搭載するハイパースペクトルセンサは世界各国の政府機関・民間企業で開発が行われている。

2000 年に NASA が打ち上げた EO-1 衛星は、ハイパースペクトルセンサ「Hyperion」を搭載している。Hyperion は、242 のスペクトルバンドで画像の解像度は 30m である。宇宙から初めてハイパースペクトル画像を撮影した事例である。Hyperion の画像は、アメリカ地質調査所(USGS)の Earth Explorer で無料公開されている。2001 年には ESA によって PROBA-1 が打ち上げられた。中分解能のハイパースペクトルイメージングを行う「CHRIS (Compact High-Resolution Imaging Spectrometer)」を搭載している。ハイパースペクトルモードでは、34m GSD(地上解像度)で 63 バンドを生成する。ピクセル分解能で 150 バンドに

再構成することも可能。

2019年にはイタリアで中分解能のハイパースペクトル衛星「PRISMA」が打ち上げられた。イタリアでは初となり、作物の分類や資源管理、環境モニタリングなどを支援する。PRISMA (PRecursore IperSpettrale Della Missione Applicativa)は、30m GSD で 250 バンドを生成する。2022年にはドイツで環境マッピング解析プログラム(EnMap)を打ち上げた。このハイパースペクトル衛星は、228 バンド、30m GSD で構成されている。2024年には、アメリカの衛星「HyspIRI」が打ち上がる予定である。60m GSD の VSWIR イメージングスペクトルセンサを搭載される。<sup>84</sup>

国内については、経済産業省が一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)とともに HISUI を開発した。そして JAXA との連携協定のもと、2019年12月に国際宇宙ステーション(ISS)の「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームへ設置され、2020年9月より画像の取得を行っている。「きぼう」の船外実験プラットフォームは、様々な機器や技術の宇宙実証、及び地球観測の場として活用されているが、HISUIもセンサの有用性実証を目的に「きぼう」に設置された。

HISUIは、対象物の反射光を100以上の連続した細かな波長に分けて観測する光学センサであり、資源探査を始めとする様々な分野において、連続する高い波長分解能により識別能力の向上が可能となる。HISUI プロジェクトは、この HISUI を国際宇宙ステーション(ISS)に取付けて地球観測を行い、石油資源探査や金属資源探査のさらなる効率化を図る以下の項目の実現を目指している<sup>85</sup>。

- ・ 宇宙環境における実証を行い、HISUIの有用性の評価やノウハウの獲得を行う。
- ・ エネルギー・資源分野等の利用分野での技術革新を図る。
- ・ 我が国の宇宙開発産業および宇宙利用産業の活性化を図る。

ハイパースペクトル関連の学術成果は諸外国のものが多く、日本国内でのハイパースペクトル解析技術はまだ未成熟である。導入の課題として、データを取得しても活用できる技術者が少ないことやハイパースペクトルシステム自体が高額であることが挙げられている。

経済産業省において、民間企業が衛星データを利用しやすく、かつ、AI等も活用した民間の新規アプリケーション開発等が可能となるような政府衛星データプラットフォーム「Tellus(テルルス)」を構築してきた。2022年10月には、経済産業省とJAXAとの連携により、宇宙実証用ハイパースペクトルセンサ(HISUI)で取得した衛星データをTellusに搭載し、一般公開を開始した。

また、宇宙データの利用促進を図り、新規アプリケーション開発によるビジネス創出を促進するため、衛星データ活用スキル習得機会の拡大や、本プラットフォームを活用して、新たなアプリケーションの開発を行ってきた。宇宙基本計画(令和2年6月閣議決定)においても、「Tellus」について、民間活力も最大限利用しつつ、2020年度以降も衛星データを含む多様なデータの拡充、他分野のプラットフォームとの連携、アプリケーション/解析ツールの拡充等の機能向上を進めることとされている。昨今、我が国のデジタル化が急速に進む中、この社会変化を加速し、新しい社会を創り上げていくべく、宇宙から得られる衛星データの活用を行うことで、新たなビジネス創出の促進に資する基盤データの整備が必要となる。

<sup>84</sup> GISGeography, (<https://gisgeography.com/hyperspectral-imaging/#eo1-nasa>), (参照 2023-03-01)

<sup>85</sup> 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会, 国際宇宙ステーション(ISS)に提供するISS構成要素及び搭載物の安全性確認について([https://www.mext.go.jp/content/20200219-mxt\\_uchukai01-000007360\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20200219-mxt_uchukai01-000007360_1.pdf)), (参照 2023-03-01)

北海道衛星は、諸外国に比べてハイパースペクトルカメラが学術用途に活用されていない原因の一つである「コストの高さ」を解消するため、廉価版「Cosmos Eye series HSC 1701-Lite」を開発し、2021年5月から販売を開始した。部品の一つ一つをコストと実用の観点から検証し、学術用途で使用する場合には問題のない範囲で再構成することで、従来よりも大幅に価格を抑えることに成功した。学術用途以外にも、使用する波長域次第では導入が可能である。

諸外国では、ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星によるコンステレーションを計画する動きが注目されている。アルゼンチンの民間企業である Satellogic は、38.5kg の小さな人工衛星を数多く打ち上げることで、観測頻度を高めようとしている。2021年現在 17機の衛星を運用中であり、2023年には 111機を打ち上げ、毎週全世界を撮影するコンステレーションを構築する計画である。衛星には、0.7m 解像度の高解像度カメラの他に、29バンドのハイパースペクトルセンサを搭載。政府系のハイパースペクトルセンサに比べるとバンド数は少なく、赤外領域はカバーしていないが、このセンサを利用することで、土地や水の分類、作物や土壌、エアロゾルや排水などの化学的な分析を行える。

インドのハイパースペクトルセンサの開発を進める民間企業 Pixxel は、2022年4月に初号機 TD-2 (Anand 衛星)を SpaceX のロケットで打ち上げた。2023年中頃までに 30機の衛星を打ち上げる予定である。センサは南アフリカの Dragonfly Aerospace 社が開発している。商用ハイパースペクトルセンサとしては最高の 5m の解像度のハイパースペクトルセンサを目指している。観測したデータは、農業や環境、都市計画、エネルギーや採掘などに役立てられる予定である。Pixxel が最終的に目指すのは宇宙空間での資源探査であり、そのためにまずは地球用のハイパースペクトルセンサの開発を行っている。

## 【2】コア技術の現状と将来予測(俯瞰図)

★:日本 ☆:米国 ▲:欧州 ★:その他 紺の矢印は【現状】、黄色の四角は【将来】を表しています。

- 衛星データの活用が進む中、処理速度の遅延やダウンリンク回線への負担削減の対応が必要不可欠となっている。オンボード上の学習技術の高度化や光衛星通信の活用等で“リアルタイム大容量”データ伝送の研究開発が注目される。
- 小型衛星の需要拡大に伴い、搭載機器(OBC、バッテリー、センサ、受信機等)の小型・軽化及び低コスト化が引き続き求められる。民生品を応用する研究開発・実証が進み、今後は宇宙環境下で利用可能な安全性と信頼性の確保が重要である。低コスト・短納期化が期待できる3Dプリント技術は、既に米国や欧州においてロケットや衛星部品で実用化が進んでいる。国内では宇宙空間で3Dプリンタを活用する画期的な技術も開発され、今後の成長が期待される分野である。
- バッテリーは従来のリチウムと並行してナトリウムなどの素材にも注目。持続可能かつ安定的な供給を目指す。また、センサを搭載した衛星によるコンステレーションが進み、高精度かつ広範囲な観測が進む。取得データの用途拡大にも期待。

	TRL1~2	TRL3~5	TRL6~8	TRL9
<b>■オンボード解析技術</b> オンボード学習技術の研究 解析装置の小型化(ワンチップ) オンボードデータ解析によるリアルタイムの情報発信 オンボード解析技術の海外への展開を目指す	★金沢大学 「次世代の衛星科学観測を実現するオンボード機械学習システムの開発と科学解析への応用」 ★東京工業大学 「深層学習でリアルタイム軌道上画像識別を実現」 ★京都大学 「デジタル型波動-粒子相互作用解析装置」に関する研究	★アルウェットテクノロジー 「合成開口レーダ(SAR)データを軌道上で画像化する装置」 ★QPS 研究所 「SAR衛星データ画像化の軌道上実験を予定」 <b>観測データの準リアルタイムでの提供サービスを目指す</b>	★Intel Corporation 「小型人工衛星に搭載する人工知能チップ」 ★明星電気 「キューブサット用の低消費電力・高性能なオンボードコンピュータの軌道実証を成功」 ★国立高専 10 校 「OBC 宇宙技術実証に成功」	★OroraTech 「AIによるオンボード処理可能な非冷却型熱赤外線カメラ」
<b>■3Dプリント技術</b> 宇宙航空産業をターゲットに協業 宇宙用途へ事業拡大を目指す 宇宙空間で製造する技術 地球外で3Dプリンタを活用	★ニコン 「光加工機「Lasermeister 102A」」 <b>宇宙用途へ事業拡大を目指す</b>	★ESA 「地球外への3Dプリンタ導入プロジェクト「IMPERIAL」」 ★三菱電機 「宇宙空間において3Dプリンタで人工衛星アンテナを製造する技術」 <b>地球外で3Dプリンタを活用</b>	★Fleet Space Technologies 「世界初の3Dプリントによって製造した小型衛星「Alpha」」 ★Boeing 「3Dプリント技術等を活用して超高速グローバル通信衛星を製造」 <b>製造サイクルの短縮化 低コスト化の実現</b>	★Skyrora 「エンジン部品製造用に欧州最大のハイブリッド3Dプリンタを製作」 ★EOS 「H3ロケットのエンジンを開発」 ★Relativity Space 「世界最大級の金属3Dプリンタ「Starstrate II」」 ★Space Systems Loral (SSL) 「3Dプリント技術を活用して大型衛星の質量とスケジュールを平均50%削減に成功」 ★Rocket Lab 「3Dプリント製ラザフォード・エンジンを搭載したロケットの打ち上げに成功」 ★3D Systems 「AirbusのOneSat型衛星の部品生産に採用」
<b>■バッテリー技術</b> ナトリウムイオン電池の開発 コストの削減に寄与 環境配慮型バッテリーの開発 広い温度範囲かつ省スペースでの使用が可能 より厳しい環境要件に耐えられる設計を目指す レアメタルフリーで安定供給を目指す	★ワシントン州立大学 「リチウムイオン電池と同程度のエネルギーを保持するナトリウムイオン電池を開発」 ★ジュネーブ大学 「耐久性の高いナトリウムイオン電池を開発」 ★日本電気硝子 「オール酸化物全固体ナトリウム(Na)イオン二次電池を開発」 <b>レアメタルフリーで安定供給を目指す</b>	★Morrow Batteries 「正極材料 LNMO をベースとした電池技術の商業化」 ★Pleione Energy 「グラフェンを用いた環境に優しいリチウムイオン電池」	★日立造船 「全固体リチウムイオン電池「AS-LiB」」 <b>より厳しい環境要件に耐えられる設計を目指す</b>	★GomSpace 「超小型衛星用リチウムイオンバッテリーの開発」 ★Eagle Picher 「「アルテミス1号」の打ち上げに必要なバッテリー技術を提供」 ★EnerSys 「充電式リチウムイオン電池「EnerSys® ABSL™」」 ★AAC Clyde Space 「キューブサット用リチウムイオンバッテリー「OPTIMUS シリーズ」」 ★SAFT 「次世代充電式リチウムイオンバッテリーの研究開発」
<b>■光衛星通信技術</b> 短距離光通信技術の評価・研究 衛星に搭載する光受信器の小型化 衛星間の光通信に最適化した光通信端末 衛星間光通信によるデータ中継サービス 超高速を実現する光通信端末 LEO衛星-地上局間の光通信を目指す リアルタイムかつ大容量データ伝送の実現を目指す LEO衛星-地上局間の光通信を目指す	★ロイヤルメルボルン工科大学 「機械学習(ML)手法とその近距離光通信への応用についての包括的研究」 ★ESA 低軌道衛星から地上への光通信回線のための規格の検討	★三菱電機 「宇宙光通信機能と受信方向検出機能を統合した光受信器を開発」 ★Mynaric 「光通信端末「CONDOR Mk3」」 ★Tesat-Spacecom 「光通信端末「ConLCT80」」 ★ワープスペース 「衛星間光通信ネットワーク「WarpHub InterSat」」	★日本電気 「宇宙空間で世界最高水準の通信速度 10Gbpsを実現する光通信機を開発」 ★Sony Space Communications Corporation (SSC) 「商用光地上局へのデータ通信確立に成功」 ★Skyloom 「リアルタイムのデータ伝送を実現する光通信ネットワークシステム」 <b>リアルタイムかつ大容量データ伝送の実現を目指す</b>	★JAXA 「光衛星間通信システム「LUCAS」」 ★NICT 「DLR 小型衛星搭載光通信機器からのレーザー光を NICT 光地上局で受信」
<b>■ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術</b> データ解析のアルゴリズム及び指標の研究 ハイパーデータの解析結果のマッピングに成功 衛星データを統合するフレームワークの構築を目指す ハイパースペクトルデータの用途拡大を目指す カメラによる画像分析・認識の精度向上 低価格帯のカメラの開発 ハイパースペクトルセンサ搭載衛星によるコンステレーションを計画 宇宙空間での資源探査	★名古屋大学 「ハイパースペクトル及び熱赤外データの統合処理による鉱物・岩相マッピング法開発」 ★千葉大学 「アマゾン熱帯雨林の植生指標の検出」 ★国立研究評議会(CNR) 「PRISMA ハイパースペクトルデータを活用した農耕地における非光合成植生の検出と分類」	★産総研 「AI向けクラウド ABCI で処理した衛星のレーダ画像をカラー化し公開」 ★NEO 「超小型衛星用ハイパースペクトルカメラの開発」	★パナソニックホールディングス 「世界最高感度のハイパースペクトルイメージング技術を開発」 ★北海道衛星(現 Iris) 「学術・研究用途向け廉価版ハイパースペクトルカメラの開発」 ★Satellogic 「ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星 26 機を稼働」 <b>宇宙空間での資源探査</b>	★Pixxel 「ハイパースペクトルセンサを搭載した「Anand 衛星」の打上げ成功」 ★Kuva Space 「ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星 3 基が稼働」 ★Orbital Sidekick 「ハイパースペクトルセンサを搭載した「GHOST」の打上げを計画」

※技術成熟度(TRL)は目安です。

※(再掲)技術成熟度(TRL)の定義: 【TRL1~2】アイデア提案、基本原理の発見、応用対象の明確化 【TRL3~5】重要部分の成立性評価と実験室レベル以上での試作試験、環境 【TRL6~8】実環境下においてサブシステム以上で実証するレベル 【TRL9】ミッション等で実際に使用・運用するレベル

### 【3】国内外の主な最新研究開発事例

#### (1) 概要

##### (再掲) 技術成熟度(TRL)の定義

- TRL9 : ミッション等で実際に使用・運用するレベル
- TRL6~8: 実環境下においてサブシステム以上で実証するレベル
- TRL3~5: 重要部分の成立性評価と実験室レベル以上での試作試験、環境
- TRL1~2: アイデア提案、基本原理の発見、応用対象の明確化

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
アルウェットテクノロジー	<p>合成開口レーダ(SAR)データを軌道上で画像化する装置</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2020年2月、JAXAと共同で人工衛星搭載の合成開口レーダ(SAR)データを軌道上で画像化する装置を共同で開発したことを発表した。本装置では、従来は地上のコンピュータで行っていたデータ処理を、高速処理が可能なFPGAに適したアルゴリズムに書き換えてファームウェア化することにより、世界で初めて衛星搭載用の装置として実現した。</li> </ul>	■					■		
QPS 研究所	<p>SAR衛星データ画像化の軌道上実験を予定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年12月、JAXAの「小型技術刷新衛星研究開発プログラムの新たな宇宙利用サービスの実現に向けた2024年度軌道上実証に係る共同研究提案要請」において、QPS研究所の提案が採択されたことを発表した。</li> <li>共同研究では、JAXAが研究開発を進めている「ソフトウェアプラットフォーム」を搭載したOBCをQPS研究所が製造する小型SAR衛星「QPS-SAR」に搭載して軌道上での技術実証を行うと共に、本技術を活用した新たなサービス構想を協力して実証することを目的としている。</li> </ul>	■					■		
Intel Corporation	<p>小型人工衛星に搭載する人工知能チップ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2020年9月、開発した人工知能(AI)チップが搭載した小型人工衛星「PhiSat-1」が打ち上げられた。大量のローカルデータを処理することで、研究者の貴重な時間と衛星ダウンリンク帯域幅を節約することが可能となる。</li> <li>実験用として打ち上げられ、同程度の大きさである他の45基の人工衛星とともに、約329マイル(約530km)の太陽同期軌道を時速17,000マイル(約27,500km)で周回している。</li> </ul>	■						■	

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
OroraTech	<p><b>AIによるオンボード処理可能な非冷却型熱赤外線カメラ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年1月、米国の企業SpaceX社は、OroraTech社の非冷却型熱赤外線カメラを搭載したロケット「Falcon 9」を打ち上げた。高度525km(±25km)で、靴箱ほどの大きさの衛星「CubeSat」が地球を周回し、地表の高解像度熱画像を連続的に撮影する。</li> <li>このカメラは、取得したデータを軌道上で直接AIのアルゴリズムで解析し、地球に伝送する。これにより、火災の発見と通報にかかる時間を数時間から数分にまで大幅に短縮し、危険回避と被害防止のための時間を提供する。</li> </ul>	■							■
金沢大学	<p><b>次世代の衛星科学観測を実現するオンボード機械学習システムの開発と科学解析への応用</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>太陽地球系探索衛星として世界初の「人工知能技術搭載・オンボードデータ処理装置」を開発することを目的とした研究。</li> <li>世界各国が約60年間に渡って培ってきた科学観測の手法を、最新のビッグデータ解析技術との融合によって独自の切り口で進化させ、重要な自然現象の機上識別によって飛躍的なサイエンスアウトプット向上を目指す。</li> </ul>	■				■			
京都大学	<p><b>「デジタル型波動-粒子相互作用解析装置」に関する研究</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>次世代の磁気圏探査衛星では、そこで発生している、粒子と波動のエネルギー交換過程を従来よりも、3桁以上高速にした時間スケールで観測することが重要とされている。</li> <li>それを実現するためには、従来のように、地上に観測データを転送してからデータ解析を行う、というプロセスでは間に合わず、オンボードでの高速「波動-粒子相互作用解析」が必要となっている。</li> </ul>	■				■			
東京工業大学	<p><b>「デジタル型波動-粒子相互作用解析装置」に関する研究</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2018年12月、深層学習(ディープラーニング)を応用した地球センサおよびスタートラッカー実験装置「Deep Learning Attitude Sensor(DLAS)」を開発した。</li> <li>DLASで獲得した衛星姿勢計測技術やオンボード計算機による高度な画像処理技術を継承し、世界初の超広視野紫外線サーベイ観測を目指した観測衛星の開発を行っている。</li> </ul>	■				■			

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
明星電気	<p>キューブサット用の低消費電力・高性能なオンボードコンピュータの軌道実証を成功</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021年11月、JAXAによって革新的衛星技術実証2号機を搭載したイプシロンロケット5号機が打ち上げられた。革新的衛星技術実証2号機は、「小型実証衛星2号機(RAISE-2)」と、超小型衛星4機およびキューブサット4機の計9機の衛星で構成されている。</li> <li>ベトナム国家宇宙センター(VNSC)との共同研究のもと、民生部品を活用した安価で高性能なオンボードコンピュータ(OBC)を開発し、3Uサイズのキューブサット「NanoDragon」に搭載して軌道上実証に行い、成功した。</li> </ul>	■						■	
国立高専10校	<p>OBC宇宙技術実証に成功</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021年11月、高専10校が共同開発した超小型人工衛星「KOSEN-1」がJAXAのイプシロンロケット5号機によって打ち上げられた。</li> <li>この技術実証は、超小型で低消費電力となる市販のLinuxマイコンボードを、衛星の心臓部となるOBC(Onboard Computer)に使用し、衛星で常時運用するという内容であり、OBCと連動した搭載カメラによる地球の写真撮影にも成功した。</li> </ul>	■						■	
三菱電機株	<p>宇宙空間において3Dプリンタで人工衛星アンテナを製造する技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年5月、太陽光と紫外線硬化樹脂を利用して、打ち上げ後に宇宙空間で造形物を製造中に支えるサポート材が不要な3D積層造形により、人工衛星用アンテナを製造する技術を開発した。</li> <li>これにより、ロケットのフェアリングサイズや人工衛星のサイズに関わらず、数十センチサイズの小型衛星でも開口の大きなアンテナの搭載が可能となる。また、軌道投入後の振動や衝撃等を考慮したアンテナ構造やアンテナ展開用の部品も不要となるため、人工衛星を軽量化でき、打ち上げコストの低減に貢献する。</li> </ul>		■					■	

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
ニコン	<p><b>光加工機「Lasermeister 102A」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021年4月、ニコンは半導体露光装置で培った高度な光利用技術と精密制御技術を活用し、「誰でも、手軽に、気軽に使える金属積層/加工」をコンセプトに、光加工機「Lasermeister 100A」を開発した。</li> <li>「Lasermeister 100A」は、DED/LMD方式での造形・肉盛りといった金属3Dプリンタの要素から、マーキング、接合、さらには研磨まで、レーザによるさまざまな金属加工を高精度に実現する。</li> </ul>		■			■			
Fleet Space Technologies	<p><b>世界初の3Dプリントによって製造した小型衛星「Alpha」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fleet Space Technologies (Fleet Space社)は、南オーストラリアに拠点を置く衛星開発企業である。ミッションは、「最先端の通信と宇宙技術を使用してすべてを接続し、人類文明の次の大きな飛躍を可能にすること」としている。</li> <li>2021年12月、世界初の3Dプリントによって製造した小型衛星「Alpha」を1年以内に打ち上げられる方針を発表した。</li> </ul>		■						■
Relativity Space	<p><b>世界最大級の金属3Dプリンタ「Stargate」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Relativity Space社(レラティヴィティ・スペース)は2015年に設立された米国の宇宙ベンチャーである。ロケットをまるごと3Dプリンタで製造することを特徴としている。</li> <li>世界最大級の金属3Dプリンタ「Stargate(スターゲイト)」を使うことで、部品の点数も従来ロケットの100分の1で、製造時間は約10分の1に短縮される。2017年から開発している最初のロケット「Terran 1(テラン1)」は、2023年2月現在、2023年3月に初飛行が予定されている。</li> </ul>		■						■
3D Systems	<p><b>AirbusのOneSat型衛星の部品生産に採用</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年7月、3D Systems(米国、サウスカロライナ州)の「DMP Factory 500」ソリューションが、Airbus Defence and Space(Airbus)のOneSat型衛星の部品生産に採用されたと発表した。</li> <li>エンドツーエンドの3Dプリンティングソリューションを設計し、衛星の大型アンテナアレイに必要な部品の生産に成功した。</li> </ul>		■						■

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
Rocket Lab	<p><b>3D プリント製ラザフォード・エンジンを搭載したロケットの打ち上げに成功</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2020年6月、Rocket Lab(米国、カルフォルニア州)は「Don't Stop Me Now」と名付けられたミッションで、3Dプリント製ラザフォード・エンジン搭載のロケットの打ち上げを完了し、搭載する人工衛星の軌道投入に成功した。</li> <li>Rocket Lab は、3D プリンティング技術を活用することで、低コストで小型衛星を打ち上げるために合理化された商業的アプローチを提供する。</li> </ul>		■						■
Skyrora	<p><b>エンジン部品製造用に欧州最大のハイブリッド3Dプリンタを製作</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021年12月、Skyrora(イギリス、エディンバラ)は、ロケット部品の製造スピードと効率を最適化するために、ヨーロッパ最大のハイブリッドプリンタ「Skyprint 2」を開発した。印刷と機械加工を同じベッドで行えるようにすることで、他のプリンタに比べて工程の複雑さ、コスト、印刷時間を約30%大幅に削減することができる。</li> <li>また、「Skyprint 2」は、引き算や足し算の工程で製造できるため、もともと印刷されていない部品の修理や加工ができることも大きな特徴である。</li> </ul>		■						■
Boeing	<p><b>3D プリント技術等を活用して超高速グローバル通信衛星を製造</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年3月、Boeing(米国、イリノイ州)は「3D プリントを利用した部品製造により、米軍の Wideband Global Satcom (WGS) 通信衛星の製造サイクルを短縮する」と公表した。</li> <li>Boeing と米宇宙軍は、2021 年後半にシステムの重要な設計審査を完了し、プログラムの生産段階を正式に開始した。Boeing は、様々な高度な技術を活用し、コストとスケジュールのメリットを生み出すとともに、システムの性能を向上させた。</li> </ul>		■						■

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
Space Systems Loral (SSL)	<p><b>3D プリント技術を活用して大型衛星の質量とスケジュールを平均 50%削減に成功</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2017 年、革新的な衛星と宇宙船システムのリーディングプロバイダである SSL(米国、カルフォルニア州)は、静止衛星プラットフォーム「SSL 1300」に、構造部品の次世代設計・製造技術を導入することに成功した。</li> <li>3D プリンティング技術を使って設計された最初のアンテナタワーは、2016 年 12 月、スカパーJSAT(日本)のために設計・製造された JCSAT-15 衛星に搭載されて打ち上げられた。この衛星は、「JCSAT-110A」と改名され、軌道上試験を終え、計画通りに動作している。</li> </ul>		■						■
EOS	<p><b>H3 ロケットのエンジンを開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>EOS は、1989 年にドイツのミュンヘンに設立。創業当初から一貫して 3D プリンタの性能を追求し、売り上げの 15% を開発に継続投資している。EOS の金属 3D プリンタは 200W または 400W のファイバーレーザーを使用することができ、窒素、またはアルゴンで造形をすることが出来る。</li> <li>JAXA の H3 ロケットのエンジンの開発で 3D プリンタを使用しており、その取り組みは EOS と販売代理店契約を締結している NTT データ ザムテクノロジーズと共同で行われている。</li> </ul>		■						■
ESA	<p><b>地球外への 3D プリンタ導入プロジェクト「IMPERIAL」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>欧州宇宙機関(ESA)では、地球外への 3D プリンタ導入プロジェクトとして「IMPERIAL」が進められている。</li> <li>このプロジェクトは、ドイツの OHB や Azimut Space、アイルランドのアスローン工科大学、ポルトガルの BEEVERYCREATIVE が参画するコンソーシアムで 3D プリンタの開発を進める。</li> <li>開発するプリンタは、プリンタよりも大きなサイズの部品の出力が可能となっており、将来、宇宙飛行士が必要に応じて構造物や備品などを製造することが可能となる。</li> </ul>		■					■	

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 5 2	3 5	6 8
日立造船	<b>全固体リチウムイオン電池「AS-LiB®」</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年8月、JAXAと共同で国際宇宙ステーション（ISS）の「きぼう」日本実験棟に設置した全固体リチウムイオン電池の実証実験を実施し、世界で初めて宇宙で充放電できたことを確認した。</li> <li>この全固体リチウムイオン電池は-40℃～120℃という広い温度範囲で使用可能であり、かつ、安全性が高く破裂発火のリスクが極めて小さいため、温度差の激しい、真空中で放射線に晒される宇宙環境で利用する設備の小型・軽量化や低消費電力化に寄与することが可能。</li> </ul>			■				■	
ジーエス・ユアサテクノロジー（GYT）	<b>高性能宇宙用リチウムイオン電池</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>GYT製の宇宙用リチウムイオン電池が、三菱電機製の準天頂衛星初号機後継機に搭載されている。この後継機は内閣府の衛星で、2021年10月にJAXAの種子島宇宙センターから打ち上げられた。</li> <li>GYT製の宇宙用リチウムイオン電池は、2000年代初頭に軌道上での宇宙実証が行われて以降、これまでに国内外の200機以上の宇宙機に搭載されてきた。現在運用中の「みちびき」（準天頂衛星初号機）～「みちびき4号機」に続いて初号機後継機に採用された。</li> </ul>			■					■
日本電気硝子	<b>オール酸化物全固体ナトリウム（Na）イオン二次電池を開発</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021年11月、日本電気硝子は、開発を進めていた全固体Naイオン二次電池について、新たに結晶化ガラスを用いた負極材の開発を行い、結晶化ガラス正極、固体電解質と一体化したオール酸化物全固体Naイオン二次電池の駆動に世界で初めて成功した。</li> <li>今回開発した全固体Naイオン二次電池は出力電圧が3Vで、現行のリチウムイオン二次電池に匹敵する高い実用性を有する。</li> </ul>			■		■			

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
ジュネーヴ大学	<p><b>耐久性の高いナトリウムイオン電池を開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年2月、スイスのジュネーヴ大学 (UNIGE)の研究チームは、危険性が低く耐久性の高い全固体ナトリウム電池の性能を向上させる新しい材料を開発した。</li> <li>ナトリウムはリチウムよりも重いので、ナトリウムイオンは液体電解質の中で動きにくく、固体電解質を開発する必要がある。しかし、これまでに開発された電解質は、ホウ素と水素原子からなるヒドリドボレートと呼ばれる化合物で構成されており、リチウムイオン電池と同等の性能を達成できなかった。そこで本研究によって、この問題を解決することに成功した。</li> </ul>			■			■		
ワシントン州立大学	<p><b>リチウムイオン電池と同程度のエネルギーを保持するナトリウムイオン電池を開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ワシントン州立大学、パシフィックノースウェスト国立研究所などの研究チームは、豊富で安価な材料から、リチウムイオン電池と同程度のエネルギーを保持して動作するナトリウムイオン電池を開発した。</li> <li>この研究は、カソードと電解質との相互作用について根本的な知見を明らかにしたもので、実用的なナトリウムイオン電池への道を開くものだ。研究チームは、さまざまな材料を使用した電池設計の改善や、コバルトを使用しない電池の設計などに取り組んでいる。</li> </ul>			■			■		
Morrow Batteries	<p><b>正極材料 LNMO をベースとした電池技術の商業化</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Morrow Batteries AS (Morrow)は2020年に設立したノルウェーの企業である。Morrow のバッテリーは、正極材料 LNMO を採用し、コバルトの必要性をなくし、ニッケルとリチウムの使用量の削減を可能にした。</li> <li>この技術が評価され、すでに様々な企業から支援を受けている。2025年からは、LNMO をベースにした第2世代の電池の生産を開始する予定である。</li> </ul>			■			■		

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
Pleione Energy	<p><b>グラフェンを用いた環境に優しいリチウムイオン電池</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pleione Energy 社の目標は、グラフェンなどのナノ材料に焦点を当て、より持続可能なエネルギー経済のために費用対効果の高い製品を開発、設計、製造することである。</li> <li>• 従来のリチウムイオン電池に超薄型グラフェンを加えるプロジェクトでは、電池の容量とサイクル寿命が向上し、また有害な溶剤を水と植物由来のセルロースに置き換えることで、より安価で環境に優しい方法で製造できるようになった。</li> </ul>			■			■		
Eagle Piche	<p><b>「アルテミス 1 号」の打ち上げに必要なバッテリー技術を提供</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2022 年 11 月、EaglePicher(米国、ミズーリ州)が開発するバッテリーが NASA の「アルテミス 1 号」ミッションに搭載されたと発表した。</li> <li>• このバッテリーは、宇宙船打ち上げシステム(SLS)とオリオン宇宙船の乗員モジュールに電力を供給するミッションに不可欠なものである。NASA の深宇宙探査プログラムである「アルテミス 1 号」の打ち上げは、将来の有人深宇宙探査ミッションにおける最初の試みである。</li> </ul>			■					■
EnerSys	<p><b>充電式リチウムイオン電池「EnerSys® ABSL™」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• EnerSys(米国)は、産業用蓄電ソリューションを世界に提供している。EnerSys が開発した充電式リチウムイオン電池「EnerSys® ABSL™」は、2018 年 8 月に打ち上げられた NASA の宇宙探査機「パーカー・ソーラー・プローブ」に搭載された。</li> <li>• ABSL は、小さな靴箱サイズ(1.5Ah)から大きな電子レンジサイズ(448Ah)まで、様々な種類がある。ミッションを成功させるため、どのようなサイズであっても厳しい設計、構造、熱分析が行われている。</li> </ul>			■					■

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
SAFT	<b>次世代充電式リチウムイオンバッテリーの研究開発</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>フランスの産業用電池メーカーの SAFT は 2018 年 2 月に欧州における複数の企業とアライアンスを結び、高密度リチウムイオンおよび全個体電池技術に焦点を置いた次世代バッテリーの研究・開発および工業化のための新たなプログラムを開始することを発表した。</li> <li>このプログラムはエレクトロモビリティ(EV、電気バス、鉄道、海運、航空)、エネルギー貯蔵(ESS)などの分野の市場を対象としたものである。</li> </ul>			■					■
GomSpace	<b>超小型衛星用リチウムイオンバッテリーの開発</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>GomSpace(デンマーク)の超小型衛星用バッテリーは、2003年に打ち上げられた衛星「AAU-Cube Sat」以降、継続的な改良を重ねている。超小型衛星には、多くのミッションで成功した電源モデルの「Nano Power P31」が使用されている。</li> <li>3U以上の衛星には、「Nano Power P60」を推奨している。このモデルを搭載した衛星 6U サイズの「GOMX-4A」と「GOMX-4B」は 2018 年に一緒に打ち上げられた。</li> </ul>			■					■
AAC Clyde Space	<b>キューブサット用リチウムイオンバッテリー「OPTIMUS シリーズ」</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>AAC Clyde Space(スウェーデン)が開発するキューブサット用リチウムイオンバッテリー「OPTIMUS シリーズ」は、低軌道(LEO)ミッション用に最適化されている。</li> <li>バッテリーには、低温での動作を強化するために、自律的に統合されたヒーターシステムが搭載されている。このシリーズは、30Wh、40Wh、80Wh の容量があり、要望に応じてより大容量の対応も可能。</li> </ul>			■					■
JAXA	<b>光衛星間通信システム「LUCAS」</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>LUCAS は、地球観測衛星(低軌道衛星)と光データ中継衛星(静止衛星)間のデータ中継を、波長 1.5<math>\mu</math>m の目に見えないレーザー光を用いた宇宙空間での光通信により実現するシステムである。観測衛星で取得された観測データ(画像等)をいったん静止衛星が中継し、静止衛星から地上局に送る仕組みにより、地上局 1 局との直接通信であれば観測衛星の地球 1 周(約 90 分)のうち 10 分程度しか通信時間が確保できないところを、約 4 倍の軌道周回 1 周の約半分の期間通信することが可能となる。</li> </ul>				■				■

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
情報通信研究機構 (NICT)	<p>DLR 小型衛星搭載光通信機器からのレーザ光を NICT 光地上局で受信</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021 年 1 月、国際共同実験としてシュトゥットガルト大学開発した Flying Laptop 衛星に搭載されたドイツ航空宇宙センター (DLR) の小型衛星搭載光通信機器 (OSIRISv1) と、NICT の光地上局に設置した新規開発の精追尾付き光学系との間で光衛星通信実験を実施し、2021 年 2 月に OSIRISv1 からのダウンリンク光を NICT 光地上局で受信することに成功した。</li> <li>また同時に、新規開発した大気ゆらぎ測定装置を NICT 光地上局に設置し、初期試験に成功した。さらに、低コストな商用部品で構成した簡易型光地上局も設定し、実際に衛星からのレーザ光を受信することに成功した。</li> </ul>				■				■
日本電気	<p>宇宙空間で世界最高水準の通信速度 10Gbps を実現する光通信機を開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 2 月、宇宙空間で使用する光通信システムとして世界最高水準の通信速度である 10Gbps で動作する光通信機向けの技術開発を行い、その成果を反映したプロトタイプ of 製造を行った。</li> <li>開発品は 2023 年度打ち上げ予定の技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) に搭載され、宇宙環境での動作確認が行われる予定である。軌道上での動作確認の結果を参照した長期信頼性の一層の改善とともに、小型化・低コスト化を並行して進め、製品化につなげる。</li> </ul>				■			■	
三菱電機	<p>宇宙光通信機能と受信方向検出機能を統合した光受信器を開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 5 月、レーザ光線を利用した宇宙光通信機能と、レーザ光線の受信方向を検出する受信方向検出機能を統合した宇宙光通信用光受信器を、地上光ファイバー通信などで使用される汎用的な 1.5 μm 帯において、世界で初めて※開発した。</li> <li>今回、宇宙光通信機能と受信方向検出機能を統合することで、光受信器の小型化を実現するとともに、レーザ光線の位相を利用したコヒーレント光通信を可能とした。これにより宇宙光通信において、電波による通信に比べ 10 倍以上の大容量化・高速化、長距離通信を実現する。</li> </ul>				■		■		

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
ワープスペース	<p><b>衛星間光通信ネットワーク「WarpHub InterSat」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年7月、小型衛星を活用した宇宙空間での光通信サービスの実現を目指すワープスペースは、現在、開発中の地球中軌道における衛星間光通信によるデータ中継サービスにおいて、安全で弾力性、費用対効果に優れたオペレーションに向けてアマゾンウェブサービス(AWS)を活用することを発表した。</li> <li>AWSを活用することで、世界の顧客へ安全な通信インフラストラクチャを提供し、価値の向上を目指す。</li> </ul>				■		■		
Mynaric	<p><b>光通信端末「CONDOR Mk3」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mynaricはドイツ航空宇宙センター(DLR)の職員2人によって2009年に設立した。DLRからライセンスを受けた技術も保有している。Mynaricの光通信端末「CONDOR Mk3」は100Mbpsから100Gbpsの間でデータ転送レートを設定することができる。</li> <li>2021年12月、米国防高等研究計画局(DARPA)の研究プログラムの一環で、次世代光通信端末のアーキテクチャ設計に取り組むことが決定したと発表した。</li> </ul>				■		■		
Tesat-Spacecom	<p><b>光通信端末「ConLCT80」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tesat Spacecom(TESAT)は、Airbus Defence and Space社の子会社で、60年以上にわたり通信衛星用ペイロード機器の製造において専門知識を培ってきた。</li> <li>2022年現在、700以上の宇宙プロジェクトが完了している。TESATの製品は、ドイツ、ヨーロッパ、アメリカの安全保障・防衛分野の様々な衛星を使ったシステムで使用されている。</li> </ul>				■		■		
Sony Space Communications Corporation(SSC)	<p><b>宇宙光通信事業を行う新会社を設立</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年6月、ソニーグループは完全子会社の米国法人Sony Corporation of Americaが、光衛星通信事業を行う新会社「Sony Space Communications Corporation(SSC)」を設立したと発表。</li> <li>グループ会社のソニーコンピュータサイエンス研究所が研究開発を進めてきた技術をベースに、地球低軌道の超小型衛星間などを光で接続する光衛星通信機器の開発と関連サービスの提供を計画する。</li> </ul>				■				■

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
ロイヤルメルボルン工科大学	<p>機械学習 (ML) 手法とその短距離光通信への応用についての包括的研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>光通信の中でも特に注目されている技術の一つが機械学習 (ML) である。ML は、問題解決、意思決定、パターン認識の能力が高いため、多くの困難な局面において不可欠な解決策となっている。</li> <li>ロイヤルメルボルン工科大学では、様々な ML 手法とその短距離光通信への応用について、既存および潜在的な利点、限界点、今後の動向に焦点を当て、包括的に評価・研究している。</li> </ul>				■	■			
Skyloom	<p>リアルタイムのデータ伝送を実現する光通信ネットワークシステム</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Skyloom はコロラド州デンバーの通信イノベーターである。新しい宇宙通信インフラ基盤を開発、構築、運用することで地球規模のデータ伝送サービスを提供する。</li> <li>Skyloom の持つ宇宙光通信に関する高い技術力により、リアルタイムのデータ伝送を実現し、最新の情報を必要とする顧客のサービス拡張に貢献する。本サービスは、現在の無線周波数 (RF) システムに比べ 10~100 倍の量のデータを地球に送信できる。また傍受や干渉の影響を受けやすい RF に比べ、より安全性が高い。</li> </ul>				■	■			
欧州宇宙研究技術センター (ESA)	<p>低軌道衛星から地上への光通信回線のための規格の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS) によって、光通信に関する最初の推奨規格を発表されて以来、標準化グループの焦点は、主に低軌道衛星から地上への光通信回線のための規格に向けられている。</li> <li>低軌道衛星から地上への光通信回線における主な障害は乱気流とされている。この障害を緩和するためには、FEC (前方誤り訂正) コードが適切に動作する必要がある。そのため、通常物理層では長いチャネルインターリーバが使用される。ESA に所属するオランダの研究者は、このインターリーバの長さを決める研究を行っている。</li> </ul>				■	■			

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
名古屋大学	<p><b>ハイパースペクトル及び熱赤外データの統合処理による鉱物・岩相マッピング法開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本研究は、可視～短波長赤外域のリモートセンシングデータから酸化鉄鉱物、粘土鉱物、炭酸塩鉱物などの種類と相対量を、熱赤外域のデータからケイ酸塩岩のシリカ含有量とシリカの形態を識別・マッピングする指標を開発した。</li> <li>これら異なる波長域のスペクトル情報から得られる鉱物の種類を色相(H)、鉱物の相対量を彩度(S)、デジタル地形データ(DEM)から得られる地形情報を明度(V)に割り当ててHSVカラーモデルで統合することにより、地質学的に判読しやすいカラー画像を提供できる方法を新たに開発することができた。</li> </ul>				■	■			
千葉大学	<p><b>アマゾン熱帯雨林の植生指標の検出</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021年1月、千葉大学環境リモートセンシング研究センターが参画するNASA Ames研究センター等との国際共同研究チームは、独自の解析アルゴリズムを次世代静止気象衛星GOES-16の観測データに適用し、アマゾン熱帯雨林の植生指標の解析を行った。</li> <li>その結果、雲に隠れがちで従来の極軌道衛星による観測では検出できなかった、熱帯雨林における植生指標の季節変動に関する情報の検出に成功した。</li> </ul>				■	■			
産業技術総合研究所	<p><b>AI向けクラウド ABCI で処理した衛星のレーダ画像をカラー化し公開</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2022年5月、産総研と東工大の研究チームは、産総研が保有する人工知能処理向け計算機である「ABCI」を用いて衛星マイクロ波センサ「PALSAR」が取得した全てのSARデータの画像処理を行った。</li> <li>また、全世界を対象に地表面の状態に応じて色分けされたカラーレーダー画像を作成してオープン&amp;フリーポリシー(CC BY)で公開した。</li> </ul>				■	■			

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
パナソニックホールディングス	<p><b>世界最高感度のハイパースペクトルイメージング技術を開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2023年1月、世界最高感度でハイパースペクトル画像を撮影する技術を、医療や宇宙探索の分野で活用が進む圧縮センシング技術を用いて開発した。本技術により、肉眼では判別できないわずかな色の違いを、従来のカラーカメラと同様の操作性で識別できるようになり、画像分析・認識の精度向上が可能になる。</li> <li>こうしたハイパースペクトル画像撮影を実証した世界初の研究成果として、ベルギーの研究機関である imec との連名で英国科学雑誌「Nature Photonics」のオンライン版に2023年1月23日に掲載された。</li> </ul>					■			■
北海道衛星 (現 Iris)	<p><b>学術・研究用途向け廉価版ハイパースペクトルカメラの開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2021年4月、日本において、諸外国に比べてハイパースペクトルカメラが学術用途に活用されていない原因の一つである「コストの高さ」を解消するため、廉価版「Cosmos Eye series HSC 1701-Lite」を開発。同年5月から販売を開始。</li> <li>部品の一つ一つをコストと実用の観点から検証し、学術用途で使用する場合には問題のない範囲で再構成することで、従来よりも大幅に価格を抑えることに成功。学術用途以外でも、使用する波長域次第では導入が可能である。</li> </ul>					■			■
国立研究評議会 (CNR)	<p><b>PRISMA ハイパースペクトルデータを活用した農耕地における非光合成植生の検出と分類</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CNR は、イタリアの科学技術の進歩を促進するために優先的に関心のある分野で活動を行う幅広い科学的能力を備えた国立研究機関である。</li> <li>2020年11月、IREA はイタリア宇宙庁(ASI)のハイパースペクトル衛星センサである「PRISMA (PRecursoRe IperSpettrale della Missione Applicativa)」を活用して、非光合成植生(NPV)モニタリングに対する性能評価を行ったことを発表した。</li> </ul>					■	■		

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
Kuva Space	<p><b>世界最高感度のハイパースペクトルイメージング技術を開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2023年1月、世界最高感度でハイパースペクトル画像を撮影する技術を、医療や宇宙探索の分野で活用が進む圧縮センシング技術を用いて開発した。本技術により、肉眼では判別できないわずかな色の違いを、従来のカラーカメラと同様の操作性で識別できるようになり、画像分析・認識の精度向上が可能になる。</li> <li>こうしたハイパースペクトル画像撮影を実証した世界初の研究成果として、ベルギーの研究機関である imec との連名で英国科学雑誌「Nature Photonics」のオンライン版に2023年1月23日に掲載された。</li> </ul>				■				■
Satellogic	<p><b>ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星 26 機を稼働</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Satellogic(アルゼンチン)は、2010年に設立された初の垂直統合型地理空間企業で、惑星規模の観察を実施している。高頻度と高解像度の両方で地球全体を再マッピングする能力を備えた、完全自動 EO(地球観測)プラットフォームを構築し、顧客にアクセス可能で安価なソリューションを提供している。</li> <li>2021年現在 17機の衛星を運用中であり、2023年には111機を打ち上げ、毎週全世界を撮影するコンステレーションを構築する計画。</li> </ul>				■				■
ドイツ連邦地球科学天然資源研究所 (BGR)	<p><b>原材料探査のための新しいハイパースペクトル衛星</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ハイパースペクトルリモートセンシングは、地質学、土壌、探査、採掘の分野における地球科学的研究において既に重要なものとなっている。ドイツのシステム EnMAP は、2022年4月に宇宙への打ち上げに成功した。採掘関連アプリケーションのためのハイパースペクトルデータの可能性が議論されている。</li> <li>本研究のコンセプトは、リモートセンシングの専門家ではなくてもハイパースペクトルデータによる鉱物マッピングと鉱物化ターゲットングを可能にすることである。</li> </ul>				■			■	

企業・研究機関名	概要	コア技術				TRL			
		オンボード解析技術	3Dプリント技術	バッテリー技術	光衛星通信技術	ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8
NEO	<p><b>超小型衛星用ハイパースペクトルカメラの開発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>NEO(エヌ・イー・オー)は、1985年にノルウェーに電気光学の分野における研究会社として設立され、現在ではノルウェー最大の独立研究機関に成長した。</li> <li>NEOでのハイパースペクトルイメージング分野における活動(ESAのための小型衛星用ハイパースペクトルイメージャプロジェクト)は1995年に始まった。以降、NEO社は光計測領域におけるリーディングカンパニーとして、国防省およびノルウェー研究評議会による資金提供を受けており、さらにいくつかのEUプロジェクトに参加している。</li> </ul>				■		■		
Pixxel	<p><b>ハイパースペクトルセンサを搭載した「Anand 衛星」打上げ成功</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pixxelはインドのハイパースペクトルセンサの開発を進める民間企業である。2022年4月に初号機TD-2(Anand衛星)をSpaceXのロケットで打ち上げた。2023年中頃までに30機の衛星を打ち上げ予定。センサは南アフリカのDragonfly Aerospace社が開発。</li> <li>商用ハイパースペクトルセンサとしては最高の5mの解像度のハイパースペクトルセンサを目指している。観測したデータは、農業や環境、都市計画、エネルギーや採掘などに役立てられる。</li> </ul>						■		■
Orbital Sidekick	<p><b>ハイパースペクトルセンサを搭載した「GHOSt」の打上げを計画</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Orbital Sidekick(OSK)は、コスト効率の良い小型衛星でハイパースペクトルイメージング事業を展開するアメリカのベンチャー企業である。石油・ガス・エネルギーインフラ関連の事業者と連携し、パイプラインの漏れの検知・監視などを行う。</li> <li>2023年1月には、石油・ガスパイプラインの監視にハイパースペクトルイメージングを導入するため1000万ドルを調達した。それにより、「GHOSt」と称する2つの衛星が、SpaceXのTransporter-8とTransporter-9でそれぞれ打ち上げる計画である。順調に進めば、2023年の冬までに6基の「GHOSt」が軌道に乗せられる想定。</li> </ul>						■		■

## (2) オンボード解析技術

### 1) アルウェットテクノロジー株式会社

#### ■企業概要

【本社所在地】 〒181-0013 東京都三鷹市下連雀 3-2-24	【設立】 2007 年
【主な事業内容】 合成開口レーダ (SAR) をコアテクノロジーとした総合技術会社。SAR の開発、製造、技術支援を行う。	

#### ■合成開口レーダ (SAR) データを軌道上で画像化する装置<sup>86</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2020 年 2 月、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) とアルウェットテクノロジー (AT 社) は、人工衛星搭載の合成開口レーダ (SAR) データを軌道上で画像化する装置を共同で開発したことを発表した。</li> <li>本装置では、従来は地上の計算機で行っていたデータ処理を、高速処理が可能な FPGA (fieldprogrammable gate array) に適したアルゴリズムに書き換えてファームウェア化することにより、世界で初めて衛星搭載用の装置として実現した。</li> <li>これにより、SAR 観測データを軌道上の衛星内で準リアルタイム処理することで衛星からのダウンリンク量の大幅な圧縮が可能となり、現在ニーズが高まっている海域観測や船舶の動静把握への活用が期待される。</li> </ul>	 <p>衛星搭載 SAR</p>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星内のデータ解析によりダウンリンク帯域幅の節約に貢献</li> </ul>	
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9	
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>具体的には、例えば陸域に加え海域観測を行う場合、現在よりさらに多くのデータを地上に伝送することが必要となり、衛星のデータレコーダの容量とデータ送信速度の限界のため観測域を拡大することが難しい点が課題となっていた。</li> <li>本装置の活用により、SAR 衛星による海洋観測データが安定的に利用可能になれば、船舶等の人工物検出といった AI 技術と組み合わせることによる新たなミッションの実現など、小型の SAR 衛星の需要増も期待される。</li> </ul>	
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>今後 AT 社では、小型衛星向けのコンポーネントとして本装置の製品化を、JAXA では、本技術の大型衛星への実装についての検討をそれぞれ進める。</li> </ul>	

<sup>86</sup> アルウェットテクノロジー株式会社,合成開口レーダ (SAR) データを軌道上で画像化する装置の共同開発成果について (<https://altek.jp/news/press01/>), (参照 2023-03-01)

## 2) 株式会社 QPS 研究所

### ■企業概要

【本社所在地】 〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神 1-15-35 レンゴー福岡天神ビル 6F	【設立】 2005 年
【主な事業内容】 人工衛星、人工衛星搭載機器、精密機器、電子機器およびソフトウェアの研究開発、設計等	

### ■SAR 衛星データ画像化の軌道上実験を予定<sup>87</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 12 月、JAXA の「小型技術刷新衛星研究開発プログラムの新たな宇宙利用サービスの実現に向けた 2024 年度軌道上実証に係る共同研究提案要請」において、QPS 研究所の提案が採択されたことを発表した。</li> <li>今後、QPS 研究所と JAXA が締結する共同研究では、JAXA が研究開発を進めている「ソフトウェアプラットフォーム」を搭載したオンボード高性能計算機 (OBC) を QPS 研究所が製造する小型 SAR 衛星「QPS-SAR」に搭載して軌道上での技術実証を行うと共に、本技術を活用した新たなサービス構想を協力して実証することを目的としている。本共同研究で JAXA は OBC と最大 200kg の小型衛星の打上げ機会を提供し、QPS 研究所は OBC を自社衛星に搭載して軌道上で実証を行う。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>準リアルタイムでの地上観測データサービスの提供に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1～2 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL3～5 / <input type="checkbox"/> TRL6～8 / <input type="checkbox"/> TRL9
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>本共同研究では、取得した観測データを QPS-SAR に標準搭載している軌道上画像化装置 (FLIP)<sup>※1</sup>により軌道上で画像化し、本 OBC に搭載した AI 機能を使用し、検出・推論結果をいかに迅速にユーザに提供できるかを実証する。</li> <li>QPS-SAR は L バンド衛星間通信のための端末を標準搭載しているため、情報が絞られた検出・推論結果を L バンド衛星間通信を使って、地上局非可視領域であってもその出力データを地上に伝送する事ができる。さらには、処理結果として得られる検出・推論結果を活用し、次の観測に適切な観測衛星を選定してその観測衛星に観測計画を送信するまでを自立的に迅速に行うことができるかも実証する。</li> </ul>
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>QPS 研究所は現在 QPS-SAR を 2 機運用しており、2025 年以降を目標に 36 機の小型 SAR 衛星コンステレーションを構築して、地球のほぼどこでも任意の場所を平均 10 分間隔という準リアルタイムでの地上観測データサービスの提供を目指している。</li> <li>2021 年 6 月には JAXA 宇宙イノベーションパートナーシップ (J-SPARC) において、軌道上画像化装置を QPS-SAR3 号機以降に搭載することで、衛星による観測からユーザに SAR 画像を提供するまでの時間短縮に向けての実証を行う契約を締結している。</li> <li>そして、この度、QPS 研究所は本契約の実証を通して、AI 処理により観測画像から高度な情報を抽出することを実証し、高頻度に、そして顧客ニーズに迅速かつ的確に答える観測体制をより早期に実現できるように取り組む方針である。</li> </ul>

※1 軌道上画像化装置 (FLIP) : JAXA とアルウェットテクノロジー株式会社が共同開発した、人工衛星搭載の SAR データを軌道上で画像化する装置。衛星からのダウンリンク量の大幅な圧縮が可能となり、即応性の高い観測ニーズに応えられるようになることが期待される。

<sup>87</sup> QPS 研究所 (<https://i-qps.net/news/913>) , (参照 2023-03-01)

### 3) Intel Corporation

#### ■企業概要

【本社所在地】 米国、カリフォルニア州	【設立】 1968 年
【主な事業内容】 マイクロプロセッサ、チップセット、フラッシュメモリなどの設計開発・製造・販売等	

#### ■小型人工衛星に搭載する人工知能チップ<sup>88</sup>

<b>研究概要/技術概要</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2020 年 9 月、インテルが開発した人工知能 (AI) チップが搭載した小型人工衛星「PhiSat-1」(パイサット-1) が打ち上げられた。実験用として打ち上げられ、同程度の大きさである他の 45 基の人工衛星とともに、約 329 マイル(約 530km) の太陽同期軌道を時速 17,000 マイル(約 27,500km) で周回している。</li> <li>PhiSat-1 には、赤外線ハイパースペクトルカメラとオンボード AI 処理が可能な「Intel® Movidius™ Myriad™ 2 Vision Processing Unit (VPU)」(Myriad 2) が搭載されている。VPU は地球上の多くの消費者デバイスに搭載されているが、今回初となる人工衛星への搭載となり、大量のローカルデータを処理することで、研究者の貴重な時間と衛星ダウンロード*帯域幅を節約することが可能となる。</li> <li>PhiSat-1 は、極地の氷と土壌の水分のモニタリングを目的としている。将来的には衛星同士のネットワークを構築するために衛星間通信システムのテストも行う予定である。</li> </ul>	 <p>Intel® Movidius™ Myriad™ 2 Vision Processing Unit (VPU)</p>
<b>適用対象分野</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星内のデータ解析によりダウンロード帯域幅の節約に貢献</li> </ul>	
<b>技術成熟度</b>	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9	
<b>特徴・機能、基盤技術</b>	<p><b>開発経緯</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>近年、衛星に搭載したハイパースペクトルカメラによる大量のデータをどのように扱うかが課題になっていた。センサがデータを生成する能力は、毎世代 100 倍に増加している一方で、データをダウンロードする能力は毎世代 3~5 倍程度の増加にすぎないとされている。</li> <li>また、地球表面の約 3 分の 2 は常に雲に覆われている。つまり、雲を撮影して保存し、限られた帯域を使って地球に送信し、数時間から数日後に地上局のコンピュータ上で科学者(またはアルゴリズム)が確認して、一部は削除するという工程を踏む必要がある。</li> </ul> <p><b>人工知能チップ「Myriad 2」</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>そこで、Intel、欧州宇宙機関(ESA)、宇宙分野の新興企業 Ubotica、カメラメーカーの Cosine が連携し、衛星の打ち上げと試験を実施した。PhiSat-1 の目的は、ぼやけた画像の識別/破棄を人工衛星上で実行することで、帯域幅の要求をおよそ 30%削減するというものである。</li> <li>研究チームは、「Myriad 2」が放射線に耐えられることをまず確認した後、有用な画</li> </ul>	

<sup>88</sup> Intel Corporation, Intel Powers First Satellite with AI on Board (<https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/first-satellite-ai.html#gs.k1c9tl>), (参照 2023-03-01)

	<p>像と無用な画像を識別できるよう AI システム自体を訓練する必要があった。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>新型コロナウイルスのパンデミックやロケットの遅れ、気象状況などから、PhiSat-1 に関する計画には 1 年ほど遅れが生じていた。そうした中、研究チームは地球に送信されてきた画像の監視と検証を実施した。</li> </ul>
<p><b>課題と今後の展開</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ESA と Ubotica は同様に Myriad 2 を搭載する「PhiSat-2」に取り組んでおり、宇宙における AI の価値をさらに証明しようとしている。</li> <li>Intel にとって、今回の取り組みは、レガシーなデータ処理用ハードウェアを利用する既存のネットワークを小型デバイスで強化する、「Satellite-as-a-Service (サテライト・アズ・ア・サービス)」用途への道を開くかもしれないとしている。</li> </ul>

※ ダウンリンク: 人工衛星の撮影データを衛星から地上局に送信すること

#### 4) OroraTech

##### ■企業概要

<p>【本社所在地】 ドイツ ミュンヘン   【設立】 2018 年</p> <p>【主な事業内容】 衛星による森林火災監視サービスを展開。</p>
--

##### ■AI によるオンボード処理可能な非冷却型熱赤外線カメラ<sup>89</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>OroraTech は、超小型衛星を活用して森林火災の監視サービスを提供するドイツのスタートアップ企業である。2018 年にミュンヘン工科大学 (TUM) の大学スピンオフとして設立された。</li> <li>2022 年 1 月、米国の企業 SpaceX 社は、「Transporter-3 mission<sup>※</sup>」の一環で、OroraTech 社の非冷却型熱赤外線カメラを搭載したロケット「Falcon 9」を打ち上げた。高度 525km (±25km) で、靴箱ほどの大きさの衛星「CubeSat」が地球を周回し、地表の高解像度熱画像を連続的に撮影する。</li> <li>このカメラは、取得したデータを軌道上で直接 AI のアルゴリズムで解析し、地球に伝送する。これにより、火災の発見と通報にかかる時間を数時間から数分にまで大幅に短縮し、危険回避と被害防止のための時間を提供する。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星内のデータ解析によりリアルタイムの情報発信に貢献</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
特徴・機能、基盤技術	<p><b>開発経緯</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2015 年のパリ協定以来、世界の気温上昇を 1.5 度以内に抑えるという目標が、世界の気候政策を形作ってきた。私たちの地球は熱を持ち、その結果、自然災害とそれに伴う金銭的損失が発生している。例えば、毎年、森林火事は、世界の総炭素排出量の 17-20%を排出し、保険金による損害は推定 100 億ドルにのぼる。これは、生物多様性、水、健康、土地生命、気候に関する持続可能な開発目標 (SDGs) 達成の可能性に深刻な影響を及ぼす。</li> <li>しかし、重要な宇宙を利用した技術は、すでに温室効果ガスの排出を削減している。地球観測 (EO) 技術は、エネルギー生産をより効率的にしている。地上センサーからの情報と地球観測データを組み合わせることで、大気質や森林の健全性を改善し、森林所有者のための炭素クレジット検証にも役立っている。</li> <li>現在、OroraTech が市場で提供している「Wildfire Intelligence Solution」は、既存のサードパーティデータを活用して山火事の検知と監視を行っており、世界中のクライアントが利用して、毎日 10 万件以上の火災を検知し、6 大陸で 1 億 6000 万ヘクタールを超える森林を保護している<sup>90</sup>。熱赤外線データの洞察に対する市場の需要が高まっていることから、OroraTech はすでにデータ分析会社、業界のソリューションプロバイダー、機関投資家などと提携を結んでいる。</li> </ul> <p><b>OroraTech の熱赤外線カメラ</b></p>

<sup>89</sup> OroraTech, Planet Earth gets a thermometer: OroraTech launches first dedicated satellite with SpaceX (<https://ororatech.com/wp-content/uploads/2022/01/OroraTech-Press-Release-First-Satellite-Launch.pdf>), (参照 2023-03-01)

<sup>90</sup> OroraTech, ORORATECH RAISES €15M TO EXPAND ITS GROUNDBREAKING SPACE-BASED THERMAL-INFRARED CLIMATE SOLUTIONS PORTFOLIO (<https://ororatech.com/ororatech-raises-15-million-euro-to-launch-second-thermal-infrared-camera/>), (参照 2023-03-01)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>OroraTech の熱赤外線カメラは、長波長赤外線(LWIR)と中波長赤外線(MWIR)という 2 つの光学帯域でデータを提供することにより、見えない世界を映し出す。LWIR は市販の熱赤外線カメラとして使用されており、対象物の周囲温度(約-30～+80℃)をとらえる。しかし、火災のような事象は、灼熱の状態である。そこで OroraTech では、MWIR バンドも使用し、低温に対して高温の物体を例外的に判断できるようにした。</li> <li>独自の設計により、カメラは冷却を必要としないため、コストを大幅に削減でき、地上の IoT センサや空中のドローンを凌駕する性能を持っている。また、AI によるオンボード処理機能と衛星間通信を搭載し、宇宙空間でデータを解析し、リアルタイムにインサイトを提供する。</li> </ul>
<b>課題と今後の展開</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2023 年末までには、8 機の CubeSat で構成される MVC (minimum viable constellation) が運用され、現在の衛星ミッションではほとんどカバーされていない、森林火災のピーク時間である午後遅くの熱画像の捕捉に焦点を当てる予定である。OroraTech は 2022 年 1 月現在、この利用可能なデータのギャップを埋め、同時にデータコスト比を大幅に改善している。</li> <li>将来的には、OroraTech の衛星は自然現象だけでなく、気候変動の原因となる他のプロセスも監視することができるようになる予定である。そのひとつが、石油生産の副産物を燃やすガスフレアリングである。特に海洋施設のような遠隔地では、石油生産の副産物を燃やすガスフレアもその一つである。</li> <li>世界銀行によると、現在すべてのガスフレアリングを停止した場合、年間 4 億トンの CO2 排出を削減できるといわれている。OroraTech の技術は、土壌中の水分蒸発量の測定にも利用できる。これは農業にとって特に興味深いことで、干ばつが増えると予測されている現在、極めて重要な意味を持つ。水上に流出した油も、軌道上からより正確にモニターすることができる。</li> </ul>
<b>関連動向</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 11 月、シリーズ A ラウンドで 1500 万ユーロ(約 21 億円)を調達したことを発表した。今回の資金調達により、OroraTech は 2 台目の熱赤外線カメラを発売し、気候ソリューションのポートフォリオを拡大する予定である。</li> <li>OroraTech の最初の製品である「Wildfire Intelligence Solution」は、すでに毎日 10 万件以上の火災を検知し、6 大陸に広がる 1 億 6000 万ヘクタール以上の森林を保護している。</li> <li>OroraTech は、ルクセンブルグの小型衛星メーカー Spire 社と長期パートナーシップを締結し、宇宙への衛星打ち上げコストを削減した。その結果、技術開発に対してより多くのリソースを集中させることができるようになった。その後、ロケットベンチャー企業である Isar Aerospace とも契約を締結した。</li> </ul>

※Transporter-3 mission:SpaceX 社独自の衛星ライドシェアプログラム「SmallSat Rideshare Program(SRP)」における 3 回目の打ち上げを指す。

## 5) 金沢大学

### ■次世代の衛星科学観測を実現するオンボード機械学習システムの開発と科学解析への応用<sup>91</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽地球系探索衛星として世界初の「人工知能技術搭載・オンボードデータ処理装置」を開発することを目的とした研究。</li> <li>世界各国が約 60 年間に渡って培ってきた科学観測の手法を、最新のビッグデータ解析技術との融合によって独自の切り口で進化させ、重要な自然現象の機上識別によって飛躍的なサイエンスアウトプット向上を目指す。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>人工知能技術搭載、オンボード処理装置</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">■TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年度に研究がスタートし、2026 年度まで継続される。</li> </ul>

## 6) 京都大学

### ■「デジタル型波動-粒子相互作用解析装置」に関する研究<sup>92</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>次世代の磁気圏探査衛星では、そこで発生している、粒子と波動のエネルギー交換過程を従来よりも、3 桁以上高速にした時間スケールで観測することが重要とされている。</li> <li>それを実現するためには、従来のように、地上に観測データを転送してからデータ解析を行う、というプロセスでは間に合わず、オンボードでの高速「波動 - 粒子相互作用解析」が必要となっている。</li> <li>そこで、オンボードかつワンチップで解析を行うことのできる「デジタル型波動-粒子相互作用解析装置(WPIA: Wave Particle Interaction Analyzer)」の開発及びプロトタイプの実験を行っている。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>高速データ解析</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">■TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>
関連動向	-

<sup>91</sup> 科研費，次世代の衛星科学観測を実現するオンボード機械学習システムの開発と科学解析への応用 (<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-22H01282/>)，(参照 2023-03-01)

<sup>92</sup> 京都大学 (<https://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/spaceradio>)，(参照 2023-03-01)

## 7) 東京工業大学

### ■深層学習でリアルタイム軌道上画像識別を実現<sup>93</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2018年12月、深層学習(ディープラーニング)を応用した地球センサおよびスタートラッカー実験装置「Deep Learning Attitude Sensor (DLAS)」を開発した。</li> <li>DLASで獲得した衛星姿勢計測技術やオンボード計算機による高度な画像処理技術を継承し、世界初の超広視野紫外線サーベイ観測を目指した観測衛星の開発を行っている。</li> <li>発展目覚ましい超小型人工衛星を使った新たな宇宙産業分野において、日本発の技術をアピールし、衛星搭載部品の市場拡大を目指す。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>深層学習を用いたリアルタイム軌道上衛星画像認識</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">■TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星通信速度の制限により、すべての画像データを瞬時に地上へ転送することは困難で、地上望遠鏡と連携した密な観測を実現するためには、衛星内で画像解析し、ターゲット天体の正確な位置や明るさなど解析結果のみを送信するなどの工夫が必要となる。</li> </ul>

## 8) 明星電気株式会社

### ■キューブサット用の低消費電力・高性能なオンボードコンピュータの軌道実証を成功<sup>94 95</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021年11月、JAXAによって革新的衛星技術実証2号機を搭載したイプシロンロケット5号機が打ち上げられた。革新的衛星技術実証2号機は、「小型実証衛星2号機(RAISE-2)」と、超小型衛星4機およびキューブサット4機の計9機の衛星で構成されている。</li> <li>明星電気はベトナム国家宇宙センター(VNSC)との共同研究のもと、民生部品を活用した安価で高性能なオンボードコンピュータ(OBC)を開発し、3Uサイズのキューブサット「NanoDragon」に搭載して軌道上実証に行い、成功した。</li> <li>OBCに関しては国内のベンチャー企業、これから宇宙産業に進出する大手メーカーの宇宙機用として需要が高まっているが、海外でも使ってもらうためには、まず宇宙での実証実績が問われる。それに応えるため、明星電気は宇宙実証する機会を得た。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>OBCの低価格化と信頼性の確保に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">□TRL1~2 / □TRL3~5 / ■TRL6~8 / □TRL9</p>
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>イプシロンロケットには、明星電気が開発を担当した電力シーケンス分配器(PSDB)およびホットガスバルブ(HGV)モータコントローラが搭載されている。</li> </ul>

<sup>93</sup> 東京工業大学 (<https://www.titech.ac.jp/news/2018/043225>), (参照 2023-03-01)

<sup>94</sup> 明星電気株式会社 (<https://www.meisei.co.jp/news/p3038>), (参照 2023-03-01)

<sup>95</sup> JAXA,研究開発部 ([https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/02/interview02\\_15.html](https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/02/interview02_15.html)), (参照 2023-03-01)

## 9) 国立高専 10 校

### ■OBC 宇宙技術実証に成功<sup>96</sup>

<b>研究概要/技術概要</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021 年 11 月、高専 10 校が共同開発した超小型人工衛星「KOSEN-1」が JAXA のイプシロンロケット 5 号機によって打ち上げられた。</li> <li>この技術実証は、超小型で低消費電力となる市販の Linux マイコンボードを、衛星の心臓部となる OBC (Onboard Computer) に使用し、衛星で常時運用するという内容であり、OBC と連動した搭載カメラによる地球の写真撮影にも成功した。</li> <li>KOSEN-1 衛星の地上局は全国に 7 局ある。衛星から受信したデータは衛星運用やミッションデータの解析に活用している。</li> </ul>
<b>適用対象分野</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>OBC の低価格化と信頼性の確保に寄与</li> </ul>
<b>技術成熟度</b>	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
<b>関連動向</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>国立高専 10 校: 高知高専、群馬高専、徳山高専、岐阜高専、香川高専、米子高専、新居浜高専、明石高専、鹿児島高専、苫小牧高専。</li> <li>2018 年 12 月に JAXA 革新的衛星技術実証 2 号機に搭載される実証テーマに選定された。</li> </ul>

<sup>96</sup> 新居浜工業高等専門学校 (<https://www.niihama-nct.ac.jp/2022/03/25/entry-topics-25501/>), (参照 2023-03-01)

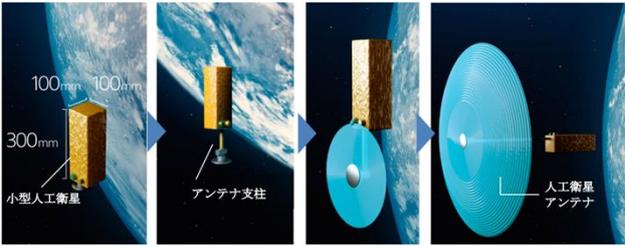
### (3) 3D プリント技術

#### 1) 三菱電機株式会社

##### ■企業概要

【本社所在地】 〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-7-3 【設立】 1921 年
【主な事業内容】 重電システム、産業メカトロニクス、情報通信システム、電子デバイス、家庭電器 等

##### ■宇宙空間において 3D プリンタで人工衛星アンテナを製造する技術<sup>97</sup>

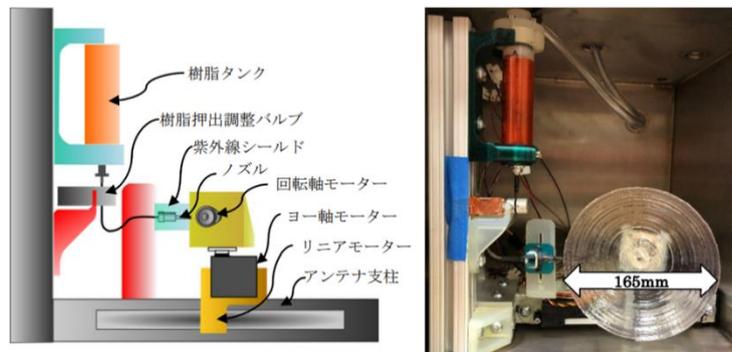
<b>研究概要/技術概要</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 5 月、太陽光と紫外線硬化樹脂を利用して、打ち上げ後に宇宙空間で造形物を製造中に支えるサポート材が不要な 3D 積層造形により、人工衛星用アンテナを製造する技術を開発した。</li> </ul>  <p>3D プリンタによる小型人工衛星でのアンテナ製造工程イメージ(アンテナ製造開始から運用状態まで)</p>
<b>適用対象分野</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>人工衛星の軽量化と打ち上げコストの低減に貢献</li> </ul>
<b>技術成熟度</b>	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
<b>特徴・機能、基盤技術</b>	<b>開発経緯</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>近年、民間事業者による人工衛星をはじめとする宇宙機器打ち上げビジネスが立ち上がりつつある中、従来の政府機関等が主導する大型の人工衛星だけでなく、研究機関や民間企業が主導する数十センチサイズの小型の人工衛星が登場している。</li> <li>人工衛星のアンテナは、高利得かつ広帯域幅であることが求められ、開口を大きくする必要がある。これまでのアンテナは、打ち上げロケットのフェアリング(流線形の覆い)サイズや人工衛星のサイズの制約を受けて、あらかじめ格納可能な大きさを整形しておくか、折り畳んで格納して人工衛星軌道上で展開していた。また、打ち上げ時や軌道投入時の振動や衝撃に耐えられるようにする構造も必要だった。</li> <li>今回、3D プリンタと、真空中で適切な粘度を持ち紫外線による硬化安定性を持つように配合した紫外線硬化樹脂を開発することで、サポート材が不要なフリーフォーム 3D 積層造形が真空中で可能になった。この技術は、真空中でも安定性を持った新開発の樹脂を 3D プリンタで押出成形し、太陽光の紫外線で硬化させることで、宇宙空間において構造物を低消費電力で製造するものである。</li> <li>これにより、ロケットのフェアリングサイズや人工衛星のサイズに関わらず、数十センチサイズの小型衛星でも開口の大きなアンテナの搭載が可能となる。また、軌道投入後の振動や衝撃等を考慮したアンテナ構造やアンテナ展開用の部品も不要とな</li> </ul>

<sup>97</sup> 三菱電機株式会社,宇宙空間において 3D プリンタで人工衛星アンテナを製造する技術を開発 (<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2022/pdf/0517.pdf>), (参照 2023-03-01)

るため、人工衛星を軽量化でき、打ち上げコストの低減に貢献する。

### 真空中でアンテナの製造を実現するフリーフォーム 3D プリンタを開発

- ・ アンテナの部材である支柱やアンテナの角度調整用モーターと共用化した、小型衛星にも搭載可能なフリーフォーム 3D プリンタを開発。
- ・ 打ち上げロケットのフェアリングサイズや人工衛星のサイズの制約を受けなくなり、小型衛星でも大開口のアンテナを搭載可能。従来のアンテナ反射鏡に必要なだった打ち上げ時の振動や衝撃に耐える構造が不要となり、アンテナ反射鏡の軽量化と薄型化を実現可能。人工衛星の軽量化および打ち上げコスト削減に貢献。
- ・ 小型衛星の分野で広く使われている 3U CubeSat (100×100×300 mm) 仕様の小型人工衛星での利用を想定した、人工衛星サイズを上回る 165mm 径のアンテナ反射鏡を大気中で試作、Ku 帯(13.5GHz)で 23.5dB の利得を確認。



開発したアンテナ反射鏡製造 3D プリンタ

### 世界初※、真空中での押出と硬化に適した安定性を持つ紫外線硬化樹脂を開発

- ・ 真空中での押出に適した粘度となるように、基礎材料である高分子量オリゴマーに真空オイルを可塑剤として加え、硬化阻害剤と光硬化開始剤を適切に配合した紫外線硬化樹脂を開発。
- ・ 真空中で通常の紫外線硬化樹脂を使った場合に起きる、低圧が引き起こす樹脂の蒸発や、硬化阻害の役割としての酸素がないことによる急速な硬化を防止し、真空中での押出と硬化に適した安定性を実現。
- ・ 真空中(0.2kPa 以下)で試作したアンテナが、宇宙空間での使用に十分な 400℃の耐熱性を持つことを確認。
- ・ 樹脂硬化のための紫外線光源として太陽光を利用することで、低消費電力でアンテナ反射鏡の製造が可能。



紫外線光源を用いた真空中での試作  
(ノズル、回転軸モーター周囲を拡大)

### 課題と今後の展開

- ・ 開発した技術を発展させ、人工衛星打ち上げコストを削減することで、通信や自然観測、センシングといった多様な用途の人工衛星をこれまで以上に利用できることが期待される。これにより、個人や地域レベルのニーズに応じた衛星画像や観測データをタイムリーに提供できるようになることも見込める。三菱電機は、技術開発を通じて、地球規模の課題解決に貢献していく。

※2022年5月17日現在。三菱電機調べ。

## 2) 株式会社ニコン

### ■企業概要

【本社所在地】 〒108-6290 東京都港区港南 2-15-3 品川インターシティC 棟 【設立】 1917 年  
 【主な事業内容】 光学機械器具の製造、ならびに販売

### ■光加工機「Lasermeister 102A」<sup>98 99</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021 年 4 月、ニコンは半導体露光装置で培った高度な光利用技術と精密制御技術を活用し、「誰でも、手軽に、気軽に使える金属積層/加工」をコンセプトに、光加工機「Lasermeister 100A」を開発した。</li> <li>「Lasermeister 100A」は、DED/LMD 方式<sup>*</sup>での造形・肉盛りといった金属 3D プリンタの要素から、マーキング、接合、さらには研磨まで、レーザによるさまざまな金属加工を高精度に実現する(最大加工寸法:W297mm×D210mm×H200mm)。</li> <li>高さ 1.7 メートル・床面積約 0.64 平方メートルのコンパクトな製品サイズで、顧客の多種多様な金属加工ニーズに応える。</li> </ul>	 <p>「Lasermeister 102A」 (ホワイト、ブラック)</p>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>人工衛星の設計の柔軟性に寄与</li> </ul>	
<p>技術成熟度</p>	<p>■TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>	
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<p>開発の背景</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ニコン独自の金属加工機である光加工機は、2019 年に「Lasermeister 100A」を発売。2020 年 5 月には上位機種「Lasermeister 101A」を発売。今回、さらなるニーズに応え、粉種にチタン合金の造形用粉体を加え、生産性と品質を向上させた「Lasermeister 102A」を開発した。</li> </ul> <p>1. チタン合金による金属造形が可能</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>「Lasermeister 102A」は、チタン合金による造形が可能。チタン合金は、鉄よりも軽く、ステンレスやアルミニウムよりも耐食性に優れ、高温でも強度を保つ。そのため、ジェットエンジン、タービンブレード、車両のマフラー、人工骨といった、航空宇宙から自動車、医療にいたるまで、様々な分野で活用されている。</li> <li>従来の SUS、ハイス鋼、Ni 基合金に加え、チタン合金による造形・肉盛りも可能な「Lasermeister 102A」は、様々な部品の成型から補修まで、幅広い用途に対応。</li> </ul> <p>2. 品質と生産性を大幅に向上</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>金属の熔融状態を高速で観測、造形動作を制御する「メルトプールフィードバック機能」を新たに追加し、品質を向上させた。従来製品「Lasermeister 101A」と比較し、約 2 倍の造形速度を実現。さらに、寸法精度と表面粗さを向上させたほか、均一な凝固状態を保つことで造形時の欠陥が減った。</li> </ul>	

<sup>98</sup> ニコン,ニュース ([https://www.jp.nikon.com/company/news/2021/0426\\_lasermeister\\_01.html](https://www.jp.nikon.com/company/news/2021/0426_lasermeister_01.html)), (参照 2023-03-01)

<sup>99</sup> ニコン,インダストリー (<https://www.nikon.com/vision2030magazinej/industry/03/>), (参照 2023-03-01)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 「Lasermeister 102A」は、金属造形の品質が高まったことで、その後の工程の簡素化を図ることができるため、製造工程全体の生産性を大幅に向上させる。</li> </ul> <p><b>3. 再利用粉体の使用が可能</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 造形品質を実質的に損なうことなく、再利用粉体の使用も可能となった。また、粉体供給時に、粉体を高速で観察して粉体供給動作を制御する「パウダーサプライフィードバック」機能を搭載し、造形品質を向上させました。生産コストの削減とともに、環境保全にも寄与する。</li> </ul>
<p><b>課題と今後の展開</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ニコンは中期経営計画で、注力する成長領域の一つとして、材料加工事業を掲げている。この事業が一定の規模になるように目指す。</li> <li>・ そして、中期経営計画で掲げている、2025年の売上高7000億円という目標を実現と2030年の「人と機械が共創する社会の中心企業」を目指す。</li> </ul>
<p><b>関連動向</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2021年4月にボーイング(米国)などへの販路を持つモーブ3D(米国)を100億円弱で買収し、中小型衛星向けの部品製造に参入した。2021年5月には材料加工のシミュレーション技術に強いオーストリア企業と共同開発の契約を結び、物体の表面にサメ肌のような溝を作る「リブレット加工」の受託サービスを始めた。</li> <li>・ 2022年9月、ドイツの3Dプリンタ大手 SLM ソリューションズ・グループを買収すると発表した。買収額は6億2200万ユーロ(約840億円)。</li> </ul>

### 3) Fleet Space Technologies

#### ■企業概要

【本社所在地】 オーストラリア 【設立】 2015 年

【主な事業内容】 衛星通信ネットワークを形成するための衛星技術を開発する。

#### ■世界初の 3D プリントによって製造した小型衛星「Alpha」<sup>100</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fleet Space Technologies (Fleet Space 社)は、南オーストラリアに拠点を置く衛星開発企業である。ミッションは、「最先端の通信と宇宙技術を使用してすべてを接続し、人類文明の次の大きな飛躍を可能にすること」としている。</li> <li>• 2018 年 11 月にオーストラリアで最初の商業用超小型衛星 4 基「Proxima 1 &amp; 2」と「Centauri 1 &amp; 2」を地球低軌道(LEO)に打ち上げた。2021 年には、新たに 2 つの衛星を打ち上げた。</li> <li>• 2021 年 12 月、世界初の 3D プリントによって製造した小型衛星「Alpha」を 1 年以内に打ち上げられる方針を発表した。</li> <li>• 「Alpha」は、Fleet Space 社の先進的なビームフォーミング技術と特許取得済みのアンテナを統合し、より速く、より多くの場所で、より優れた接続性を実現する。<sup>101</sup></li> </ul> <div data-bbox="1050 792 1391 1016" style="text-align: right;">  </div> <p style="text-align: right;">3D プリンタで作製された小型衛星「Alpha」</p>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 人工衛星の設計の柔軟性に寄与</li> </ul>
<p>技術成熟度</p>	<p style="text-align: center;">□TRL1~2 / □TRL3~5 / ■TRL6~8 / □TRL9</p>
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2022 年 9 月、コニカミノルタが提供する最新の 3D プリンタについて発表した。この 3D プリンタは、既に Fleet Space 社の衛星コンステレーションで使用している S バンドアンテナ RF パッチの製造に用いられている。</li> <li>• レーザで金属粉末を薄く溶着させるダイレクトメタルプリンティング(DMP)技術により、複雑な金属部品を製造するものである。DMP は、設計の自由度が限りなく高く、従来の製造技術で課せられた形状や表面保持の制限を克服することができる。</li> </ul>
<p>課題と今後の展開</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D プリンタで製造したアンテナは、地球低軌道上の衛星と地上のポータルやモデムとの間で信号を受信・送信するものである。</li> <li>• 将来的には、重量の最適化と垂直統合を図るために、次世代型 Alpha 衛星の構造部品の製造に用いる予定である。</li> </ul>
<p>関連動向</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D プリンタは、南オーストラリア州アデレードに新しく拡張された製造施設の主力機器となっている。現在 80 人以上の従業員が勤務している。</li> </ul>

<sup>100</sup> Fleet Space Technologies, Fleet Space reveals bold new product strategy (<https://fleetspace.com/news/fleet-space-reveals-bold-new-product-strategy>), (参照 2023-03-01)

<sup>101</sup> Fleet Space Technologies, New Manufacturing Facility, Hires and 3D Printing Manufacturing Drives Growth for Fleet Space Technologies (<https://fleetspace.com/news/new-manufacturing-facility-hires-and-3d-printing-manufacturing-drives-growth-for-fleet-space-technologies>), (参照 2023-03-01)

#### 4) Relativity Space

##### ■企業概要

【本社所在地】 米国、カリフォルニア州 【設立】 2015 年  
 【主な事業内容】 3D プリンタを活用したロケットの開発

##### ■世界最大級の金属 3D プリンタ「Stargate」<sup>102</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relativity Space 社(レラティヴィティ・スペース)は 2015 年に設立された米国の宇宙ベンチャーである。ロケットをまるごと 3D プリンタで製造することを特徴としている。</li> <li>世界最大級の金属 3D プリンタ「Stargate(スターゲイト)」を使うことで、部品の点数も従来ロケットの 100 分の 1 で、製造時間は約 10 分の 1 に短縮される。</li> <li>2017 年から開発している最初のロケット「Terran 1(テラン 1)」は、2023 年 2 月現在、同年 3 月に初飛行が予定している。そして 2021 年 6 月には、新型ロケット「Terran R(テラン R)」の開発計画を発表した。</li> </ul>  <p>Relativity Space 社が 3D プリンタで作成するロケット</p>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>生産性向上、時間とコストの削減、および設計の柔軟性に寄与</li> </ul>
<p>技術成熟度</p>	<p>□TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / ■TRL9</p>
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<p>開発経緯</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>航空宇宙産業は約 60 年間にわたり、大規模工場、固定工具、複雑なサプライチェーン、膨大な手作業に依存して、10 万以上の部品で構成される高価なロケットを 2 年以上かけて製造してきた。そこで Relativity Space 社は、業界のイノベーションを加速するために、ロケット製造を自動化する初の航空宇宙プラットフォームである「Factory of the Future」を構築し、インテリジェント ロボティクス、ソフトウェア、データ駆動型 3D プリント技術を垂直統合した。</li> <li>AI による制御を備えた世界最大級の金属 3D プリンタ「Stargate」を組み込んだ次世代型の工場は、生産を継続的に最適化し、時間とコストの大幅な改善、および以前は不可能だった製品設計を実現する。Relativity Space 社は、「Factory of the Future」を航空宇宙分野全体に拡大していく予定です。</li> </ul> <p>ロケット「Terran 1」</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Terran 1 は、1,479kg のペイロードを地球低軌道に投入できる単式 2 段式の軽クラスロケットである。Terran 1 の第 1 段には、Relativity Space 社が独自に設計した Aeon 1 メタン-酸素エンジンが 9 基、第 2 段には真空に最適化された AeonVac エンジンが 1 基搭載されている。</li> <li>第 1 段と第 2 段の構造は、3D プリンタ「Stargate」で非公開のアルミニウム合金から印刷されている。Terran 1 の質量の 9 割が印刷されており、ロケット本体には、Printed in the USA のロゴが入っている。</li> </ul>

<sup>102</sup> Relativity Space, WORLD'S LARGEST 3D METAL PRINTERS (<https://www.relativityspace.com/stargate>), (参照 2023-03-01)

<b>課題と今後の展開</b>	<b>ロケット「Terran R」</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現在、Terran 1 に比べてより強力な「Aeon R engines (イオン R エンジン)」(開発中)を搭載した中型ロケット「Terran R」を開発している。</li> <li>・ このロケットは、地球低軌道に 2 万 kg のペイロードを打ち上げることができ、完全に再利用可能なロケットになる。次世代の OneWeb 衛星を宇宙へ打ち上げるのは、この種のロケットになると予想される。2024 年に打ち上げ予定。</li> </ul>
<b>関連動向</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2021 年 6 月、シリーズ E ラウンドの資金調達を実施し、総額 6 億 5000 万ドル(約 713 億円)を獲得した。今回のラウンドは、Fidelity Management &amp; Research Company LLC がリードインベスターを務めた他、8 社のベンチャーキャピタル、個人投資家数名が参加した。</li> <li>・ 2022 年 6 月、通信衛星コンステレーションの開発に取り組んでいる OneWeb 社が Relativity Space 社と複数回の打ち上げ契約を締結したと発表した。</li> <li>・ 2022 年 10 月、NASA との合意のもとミシシッピ州南部にあるステニス宇宙センターのインフラを拡張し、施設を運用していく計画を発表。</li> </ul>

## 5) 3D Systems

### ■ Airbus の OneSat 型衛星の部品生産に採用<sup>103</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年7月、3D Systems(米国、サウスカロライナ州)の「DMP Factory 500」ソリューションが、Airbus Defence and Space(Airbus)の OneSat 型衛星の部品生産に採用されたと発表した。エンドツーエンドの 3D プリンティングソリューションを設計し、衛星の大型アンテナアレイに必要な部品の生産に成功した。</li> <li>Airbus の OneSat 型衛星は、宇宙空間でも自由に通信地域や伝送容量を変更できる。各 OneSat 型衛星には、送信用と受信用の大型アンテナアレイが1つずつ必要となる。今回、アルミ合金の「LaserForm AlSi10Mg」と独自に開発した特定のパラメーターを用いて、アンテナ部品を連続生産し、必要となる 30μm の層厚を達成するため、3D Systems の DMP Factory 500 ソリューションを採用。OneSat 型衛星全体のアンテナ開発を目指し、複数年契約を締結した。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>生産性向上、時間とコストの削減、および設計の柔軟性に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D Systems は、DMP Factory 500 をはじめ、材料、ソフトウェア、アプリケーションの専門知識からなるエンドツーエンドの AM ソリューションを設計することで、大型アンテナアレイに最適化されたプロセスと部品を提供する。これにより、軌道上で仕様を変更できる、新たな OneSat 型衛星用の大型アンテナアレイの開発が可能になる。</li> </ul>

## 6) Rocket Lab

### ■ 3D プリント製ラザフォード・エンジンを搭載したロケットの打ち上げに成功<sup>104</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2020年6月、Rocket Lab(米国、カルフォルニア州)は「Don't Stop Me Now」と名付けられたミッションで、3D プリント製ラザフォード・エンジン搭載のロケットの打ち上げを完了し、搭載する人工衛星の軌道投入に成功した。</li> <li>Rocket Lab は、3D プリンティング技術を活用することで、低コストで小型衛星を打ち上げるために合理化された商業的アプローチを提供する。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造プロセスの迅速化、コスト削減、負荷の軽減に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>「Don't Stop Me Now」では、NASA が展開する大学、高校、非営利組織によって構築された衛星プロジェクト「CubeSat Launch Initiative (CSLI)」の一環として、ボストン大学の電気・機械工学部によって造られた「ANDESITE」と、米国国防総省の諜報機「アメリカ国家偵察局(NRO)」が設計・製作・運用した3つの衛星や、ニューサウスウェールズ大学(UNSW)キャンベラ宇宙センターとオーストラリア政府が共同で開発した人工衛星「M2 Pathfinder」など、いくつかの小型衛星を打ち上げた。</li> </ul>

<sup>103</sup> 3D Systems (<https://ja.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-airbus-defence-and-space-create-novel-passive-rf-components-first-fully>), (参照 2023-03-01)

<sup>104</sup> Rocket Lab (<https://www.rocketlabusa.com/missions/completed-missions/dont-stop-me-now/>), (参照 2023-03-01)

## 7) Skyrora

### ■エンジン部品製造用に欧州最大のハイブリッド 3D プリンタを製作<sup>105</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021年12月、Skyrora(イギリス、エディンバラ)は、ロケット部品の製造スピードと効率を最適化するために、ヨーロッパ最大のハイブリッドプリンタ「Skyprint 2」を開発した。印刷と機械加工を同じベッドで行えるようにすることで、他のプリンタに比べて工程の複雑さ、コスト、印刷時間を約30%大幅に削減することができる。</li> <li>また、「Skyprint 2」は、引き算や足し算の工程で製造できるため、もともと印刷されていない部品の修理や加工ができることも大きな特徴である。</li> <li>「Skyprint 2」は、小型衛星打ち上げの需要の増加に対応するため、コスト効率の高いバイメタルのハイブリッド製造サービスを提供し、Skyrora が製造工程を完全にコントロールできるようにする。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造プロセスの迅速化、コスト削減、負荷の軽減に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021年10月、Skyrora は 2030年までに年間16回の打ち上げを予定しているSaxaVordとの契約を発表した。</li> </ul>

## 8) Boeing

### ■3D プリント技術等を活用して超高速グローバル通信衛星を製造<sup>106</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年3月、Boeing(米国、イリノイ州)は「3D プリントを利用した部品製造により、米軍の Wideband Global Satcom (WGS) 通信衛星の製造サイクルを短縮する」と公表した。</li> <li>Boeing と米宇宙軍は、2021年後半にシステムの重要な設計審査を完了し、プログラムの生産段階を正式に開始した。Boeing は、様々な高度な技術を活用し、コストとスケジュールのメリットを生み出すとともに、システムの性能を向上させた。</li> <li>超高速グローバル衛星通信「WGS-11+」が10機のWGS衛星群に加わることで、米国政府およびその同盟国にとって不可欠な通信サービスのスループット容量が大幅に向上する。WGS-11+は、2024年に納入される予定。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造プロセスの迅速化、コスト削減、負荷の軽減に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>Boeing は、世界有数の航空宇宙企業として、150カ国以上の顧客向けに民間航空機、防衛製品、宇宙システムの開発、製造、サービスを提供しています。</li> </ul>

<sup>105</sup> Skyrora (<https://www.skyrora.com/3d-printed-rockets-utilising-3d-printers-to-develop-and-manufacture-rocket-components/>), (参照 2023-03-01)

<sup>106</sup> Boeing (<https://boeing.mediaroom.com/2022-03-01-Boeing-is-Building-Wideband-Global-SATCOM-WGS-11-Satellite-Using-Advanced-Techniques-to-Deliver-Unrivaled-Capability-at-Record-Breaking-Speed>), (参照 2023-03-01)

## 9) Space Systems Loral (SSL)

### ■3D プリント技術を活用して大型衛星の質量とスケジュールを平均 50%削減に成功

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017 年、革新的な衛星と宇宙船システムのリーディングプロバイダである SSL(米国、カルフォルニア州)は、静止衛星プラットフォーム「SSL 1300」に、構造部品の次世代設計・製造技術を導入することに成功した。</li> <li>Additive Manufacturing(積層造形)技術、通称 3D プリンティング技術を使って設計された最初のアンテナタワーは、2016 年 12 月、スカパーJSAT(日本)のために設計・製造された JCSAT-15 衛星に搭載されて打ち上げられた。この衛星は、「JCSAT-110A」と改名され、軌道上試験を終え、計画通りに動作している。</li> <li>SSL の先進的なアンテナタワー構造により、3D プリントのようなツールなしでは不可能な高性能衛星を構築することができる。「JCSAT-110A」で使用された高度に最適化されたストラットトラスアンテナタワーは、37 個のプリントチタンノードと 80 個以上のグラファイトストラットで構成されている。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造プロセスの迅速化、コスト削減、負荷の軽減に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>「JCSAT-110A」の打ち上げ以来、SSL は他のいくつかのストラットトラス構造の組み立てとテストを完了し、アディティブマニュファクチャリングやその他の次世代設計・製造技術の利用を拡大し続けている。</li> </ul>

## 10) EOS

### ■H3 ロケットのエンジンを開発<sup>107 108</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS は、1989 年にドイツのミュンヘンに設立。創業当初から一貫して 3D プリンタの性能を追求し、売り上げの 15%を開発に継続投資している。</li> <li>EOS の金属 3D プリンタは 200W または 400W のファイバーレーザーを使用することができ、窒素、またはアルゴンで造形をすることが出来る。EOS はパラメータエディッターも利用可能であり、独自の金属の開発もすることができる。ラインナップは M080、M100、M100 Dental、M290、M300-4、M400、M400-4 の 7 種類。</li> <li>JAXA の H3 ロケットのエンジンの開発で 3D プリンタを使用しており、その取り組みは EOS と販売代理店契約を締結している NTT データ ザムテクノロジーズと共同で行われている。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造プロセスの迅速化、コスト削減、負荷の軽減に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>NTT データ ザムテクノロジーズは、1993 年に EOS と販売代理店契約を結び、20 年以上に渡り装置販売から技術サポートまで行ってきた。現在までに日本国内で 160 台以上の装置導入実績を持っている。</li> </ul>

<sup>107</sup> 株式会社NTTデータ ザムテクノロジーズ (<https://j3d.co.jp/glossary/parameter1.html>), (参照 2023-03-01)

<sup>108</sup> JAXA (<https://www.nttdata-xam.com/movie/h3rocket/>), (参照 2023-03-01)

11) ESA

■地球外への3Dプリンタ導入プロジェクト「IMPERIAL」<sup>109</sup> <sup>110</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 欧州宇宙機関(ESA)では、地球外への3Dプリンタ導入プロジェクトとして「IMPERIAL」が進められている。このプロジェクトは、ドイツのOHBやAzimut Space、アイルランドのアスローン工科大学、ポルトガルのBEEVERYCREATIVEが参画するコンソーシアムで3Dプリンタの開発を進める。</li> <li>・ 開発するプリンタは、プリンタよりも大きなサイズの部品の出力が可能となっており、将来、宇宙飛行士が必要に応じて構造物や備品などを製造することが可能となる。このプリンタは、無重力で動作するように設計されており、地球上で逆さまになっても動作することができる。地上でのプロトタイプが完成したことで、次のステップとして国際宇宙ステーションの軌道上でテストすることになる。</li> </ul>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 製造プロセスの迅速化、コスト削減、負荷の軽減に寄与</li> </ul>
<p>技術成熟度</p>	<p><input type="checkbox"/>TRL1~2 / <input checked="" type="checkbox"/>TRL3~5 / <input type="checkbox"/>TRL6~8 / <input type="checkbox"/>TRL9</p>
<p>関連動向</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 「IMPERIAL」はポリマー材料を用いた3Dプリンタであったが、金属3Dプリントに関するプロジェクト「Metal3D」も進めている。このプロジェクトも、ESAやAirbus Defense and Space、AddUp、大学などの産学官の連携で進められている。</li> </ul>

<sup>109</sup> ESA ([https://www.esa.int/esatv/Videos/2022/03/IMPERIAL\\_3D\\_printing\\_s\\_new\\_dimension](https://www.esa.int/esatv/Videos/2022/03/IMPERIAL_3D_printing_s_new_dimension)), (参照 2023-03-01)

<sup>110</sup> AddUp ([https://addupsolutions.com/2022/03/01/5625/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=ja&\\_x\\_tr\\_hl=ja&\\_x\\_tr\\_pto=wapp](https://addupsolutions.com/2022/03/01/5625/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ja&_x_tr_hl=ja&_x_tr_pto=wapp)), (参照 2023-03-01)

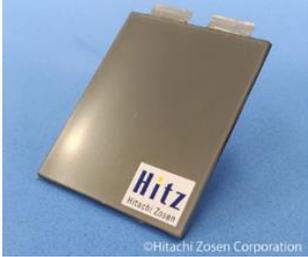
#### (4) バッテリー技術

##### 1) 日立造船株式会社

###### ■企業概要

<p>【本社所在地】 〒559-8559 大阪市住之江区南港北 1-7-89 【設立】 1934 年</p> <p>【主な事業内容】 ごみ焼却発電施設、海水淡水化プラント、上下水・汚泥再生処理プラント、船用エンジン、プレス、プロセス機器、精密機械、橋梁、水門、防災関連機器等の設計・製作など</p>
---

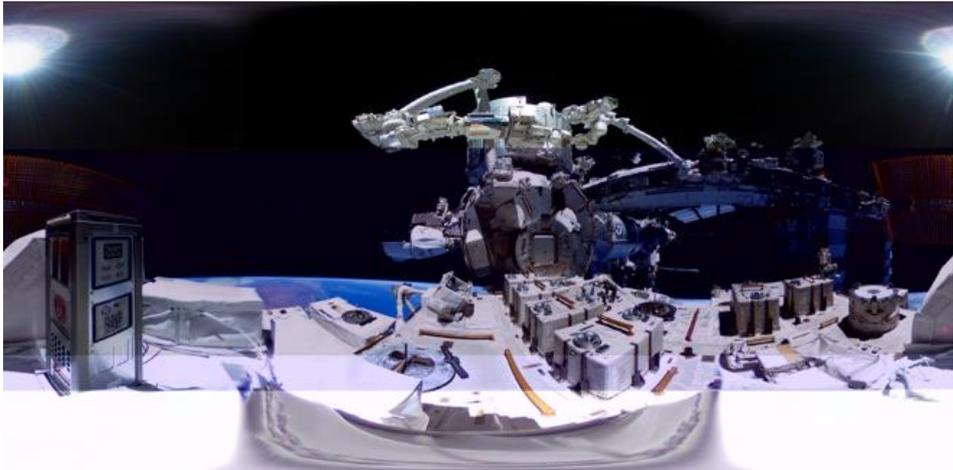
###### ■全固体リチウムイオン電池「AS-LiB®」<sup>111 112 113</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年8月、日立造船とJAXAは、国際宇宙ステーション(ISS)の「きぼう」日本実験棟に設置した全固体リチウムイオン電池の実証実験を実施し、世界で初めて宇宙で充放電できたことを確認した。日立造船とJAXAは、宇宙探査イノベーションハブの研究提案公募の枠組みの下、2016年から全固体リチウムイオン電池の共同開発を行ってきた<sup>※1</sup>。</li> <li>この全固体リチウムイオン電池は-40℃~120℃という広い温度範囲で使用可能であり、かつ、安全性が高く破裂発火のリスクが極めて小さいため、温度差の激しい、真空中で放射線に晒される宇宙環境で利用する設備の小型・軽量化や低消費電力化に寄与することが可能である。そのため、従来宇宙で使用している有機電解液のリチウムイオン電池では難しかった省スペース化が求められる小型機器への適用や、船外実験装置などでの使用が可能になる。</li> </ul>	
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設備の小型・軽量化や低消費電力化に寄与</li> </ul>	
<p>技術成熟度</p>	<p>□TRL1~2 / □TRL3~5 / ■TRL6~8 / □TRL9</p>	
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来、宇宙で使用されているリチウムイオン電池は、液体を使用している点や使用温度領域が狭い点から、真空かつ温度の高低差が激しい過酷な宇宙環境下では使用が困難なため、衛星等の設備内部に設置され、温度を管理しながら使用されている。そのため、真空状態や厳しい高温・低温環境においても使用可能となる全固体リチウムイオン電池の実現を目指して、これまで共同で検討および試作の開発を行ってきた。</li> <li>今回の実験は、2022年2月にISSに向けて打ち上げた全固体リチウムイオン電池軌道上実証装置(Space As-Lib)を、「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに設置された「船外小型ペイロード支援装置(SPySE)」<sup>※2</sup>に取り付け、宇宙環境で全固体リチウムイオン電池の充放電の実証を行うものであり、3月に世界で初めて充放電が可能であることを確認した。次の写真はその際に得た電力でSpace As-Libに搭載したモニタカメラが撮影したものである。</li> </ul>	

<sup>111</sup> 日立造船、全固体リチウムイオン電池 (<https://www.hitachizosen.co.jp/business/field/functional/as-lib.html>)、(参照 2023-03-01)

<sup>112</sup> JAXA、JAXAと日立造船との共同研究 世界初、宇宙での全固体リチウムイオン電池の充放電機能を確認 ([https://www.jaxa.jp/press/2022/08/20220805-1\\_j.html](https://www.jaxa.jp/press/2022/08/20220805-1_j.html))、(参照 2023-03-01)

<sup>113</sup> JAXA、宇宙での全固体リチウムイオン電池の実用化に向けた実証実験の実施を決定 ([https://www.jaxa.jp/press/2021/02/20210202-1\\_j.html](https://www.jaxa.jp/press/2021/02/20210202-1_j.html))、(参照 2023-03-01)

	 <p style="text-align: center;">全固体リチウムイオン電池軌道上実証装置 (Space As-Lib) のモニタカメラ撮影画像</p>
<p><b>課題と今後の展開</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>今後の実証実験では、宇宙環境下における同電池の特性などを評価する次のステップとして、基本的充放電特性データと宇宙環境曝露部特有の条件(真空、放射線、微小重力等)による容量劣化推移の評価に必要なデータを取得する予定である。</li> <li>将来的な、全固体リチウムイオン電池の用途としては、月面に設置する観測機器や、小型のローバ、更に大容量化を実現した後は、本格的な大型のローバなどの宇宙機での使用が期待される。地上での用途では、従来の電池では適用が難しかった高温、低温や真空環境下にある産業装置、高温滅菌を要する医療機器やその他各種機器への展開を検討している。</li> </ul>

※1 JAXA が国立研究開発法人科学技術振興機構から受託した「イノベーションハブ構築支援事業」(太陽系フロンティア開拓による人類の生存圏・活動領域拡大に向けたオープンイノベーションハブ)において、「全固体リチウムイオン二次電池の開発」を共同で行う契約締結し、2016年から2018年まで実施。その後も継続して研究を続けており、2021年2月にJAXAと日立造船の間で、全固体リチウムイオン電池の実用化に向けた宇宙での実証実験に関する共同研究契約を締結。2022年2月には、全固体リチウムイオン電池軌道上実証装置(Space As-Lib)をISSに打上げ、「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに設置した。現在も軌道上実証実験を継続して実施中。

〈参考〉2021年2月2日プレスリリース

「宇宙での全固体リチウムイオン電池の実用化に向けた実証実験の実施を決定」

([https://www.jaxa.jp/press/2021/02/20210202-1\\_j.html](https://www.jaxa.jp/press/2021/02/20210202-1_j.html))

※2 ISSの「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに設置されている中型曝露実験アダプタ(i-SEEP)の利用の多様化・拡大を目指し、JAXAが開発を進めてきた実験インフラ。i-SEEPの装置搭載エリアの片方に取り付けて、最大8個の小型装置(面積10cm四方、高さ最大30cm)を相乗り可能とするインターフェイスを提供する。JAXAは、全固体リチウムイオン電池の搭載を通じてSPySEの機能検証も行う。

**【本実証実験で使用する全固体リチウムイオン電池の概要】**

日立造船が2016年に開発したものを元に、JAXAおよび日立造船が共同開発した全固体リチウムイオン電池。

サイズ : 65mm×52mm×2.7mm

質量 : 25g

容量 : 140mAh(15セル並列接続により約2.1Ahの電源として使用)

特長 :

- ① 固体電解質を用いるため、低温で物質の状態変化がなく、また高温でも固体電解質が分解しないため、-40℃～120℃という環境下でも安定動作が可能
- ② 液体材料を使用していないため、液漏れがなく、固体電解質が難燃性のため、発火、発煙、破裂等の危険性が極めて低い
- ③ 揮発成分を極小化した電池構成を実現し、真空下でも大きく膨張することがない

## 2) 株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー

### ■企業概要

【本社所在地】 〒620-0853 京都府福知山市長田野町 1-37 【設立】 2004 年

【主な事業内容】 電池、整流器その他の電気機器の製造、販売、技術サービス及び研究開発業務の請負他

### ■高性能宇宙用リチウムイオン電池<sup>114</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GS ユアサグループのジーエス・ユアサテクノロジー (GYT) 製の宇宙用リチウムイオン電池が、三菱電機製の準天頂衛星初号機後継機に搭載されている。この後継機は内閣府の衛星で、2021 年 10 月に JAXA の種子島宇宙センターから打ち上げられた。</li> <li>準天頂衛星システム(みちびき)は米国の GPS 衛星と一体利用することで、山間地や都市部のビル街でも高精度で安定した衛星測位サービスを実現し、自動走行分野をはじめ船舶海洋分野や物流分野など多くの分野で活用されている。2010 年に打ち上げられた準天頂衛星の初号機は、2017 年に打ち上げられた 2 号機～4 号機とともに 4 機体制で衛星測位サービスを提供している。初号機後継機はこれらの役割を引き継ぐとともに、配信する測位信号の精度向上が期待されている。</li> <li>GYT 製の宇宙用リチウムイオン電池は、2000 年代初頭に軌道上での宇宙実証が行われて以降、これまでに国内外の 200 機以上の宇宙機に搭載されてきた。その実績と、高真空の宇宙空間で長期間の運用に耐える性能が評価され、現在運用中の「みちびき」(準天頂衛星初号機)～「みちびき 4 号機」に続いて初号機後継機に採用された。</li> </ul>	 <p>宇宙用リチウムイオン電池(セル)</p>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高エネルギーかつ長寿命化に寄与</li> </ul>	
<p>技術成熟度</p>	<p>□TRL1～2 / □TRL3～5 / □TRL6～8 / ■TRL9</p>	
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GYT 標準セル(宇宙用大型リチウムイオン 50Ah/100Ah)に比べ約 2 割向上し、世界トップクラスのエネルギー密度 168Wh/kgを実現。</li> <li>衛星の周回軌道 25%DOD で 7 年、静止軌道 80%DOD で 20 年の要求に対して、十分なマージンを確保。<sup>115</sup></li> </ul>	
<p>課題と今後の展開</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GYT は 1970 年代の日本の宇宙開発草創期より宇宙用電池を開発・供給しており、以降、現在まで日本の固体燃料ロケット・液体燃料ロケット、国内外の人工衛星に搭載されるなど、宇宙開発事業に寄与してきた。今後も最高水準の性能・品質を持つ製品を、社会インフラ構築に重要な役割を果たす人工衛星に搭載することにより、社会の発展に貢献していく。</li> </ul>	
<p>関連動向</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021 年 5 月、JAXA より「宇宙航空分野における安全・ミッション保証功労賞」を受賞。</li> </ul>	

<sup>114</sup> 株式会社 ジーエス・ユアサ テクノロジー, GSユアサの宇宙用リチウムイオン電池が準天頂衛星初号機後継機に搭載 ([https://www.gs-yuasa.com/jp/newsrelease/article.php?uocode=gs211019190622\\_1071](https://www.gs-yuasa.com/jp/newsrelease/article.php?uocode=gs211019190622_1071)), (参照 2023-03-01)

<sup>115</sup> 株式会社 ジーエス・ユアサ テクノロジー, 高性能宇宙用リチウムイオン電池 (<https://www.gs-yuasa.com/gyt/jp/products/space/>), (参照 2023-03-01)

### 3) 日本電気硝子株式会社

#### ■企業概要

<b>【本社所在地】</b> 〒520-8639 滋賀県大津市晴嵐 2-7-1 <b>【設立】</b> 1944 年 <b>【主な事業内容】</b> 特殊ガラス製品の製造・販売およびガラス製造機械の製作・販売
---

#### ■オール酸化物全固体ナトリウム(Na)イオン二次電池を開発<sup>116 117</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021 年 11 月、日本電気硝子は、開発を進めていた全固体 Na イオン二次電池について、新たに結晶化ガラスを用いた負極材の開発を行い、結晶化ガラス正極、固体電解質と一体化したオール酸化物全固体 Na イオン二次電池の駆動に世界で初めて成功した。</li> <li>今回開発した全固体 Na イオン二次電池は出力電圧が 3V で、現行のリチウムイオン二次電池に匹敵する高い実用性を有する。</li> <li>日本電気硝子の全固体 Na イオン二次電池の技術は、資源量の豊富なナトリウムや鉄を材料に用いており、従来の電池技術で資源確保が問題とされているリチウムやコバルト、ニッケル等の希少金属元素を全く必要としない。また、安定な物質である酸化物材料で構成されているため、釘やナイフが刺さっても発火や有害ガスの発生がない。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>新しいバッテリー材料の開発に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input checked="" type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>オール酸化物の全固体ナトリウム(Na)イオン二次電池は、小型・大型、特殊・汎用など幅広い用途を想定した全固体二次電池である。「オール酸化物」という名のとおり、安定な物質である酸化物材料で構成された固体電池である。正極・負極には結晶化ガラス、固体電解質には酸化物のセラミックスを使用。これらの主成分は、資源量の豊富なナトリウム・鉄・リンであり、レアメタルを含んでいない。集電体に重くて高価な Cu 箔を使用せず、軽くて安価なアルミニウムを使用している。</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>高い安全性</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>電池材料が全て無機酸化物で構成され、使用時および製造時に発火や有毒物質発生の懸念がない。</li> </ul> </li> <li><b>優れた電池性能</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ガラスの軟化流動性を活用して正極および負極と固体電解質との一体化を図り、イオン伝導性を高めたことにより、低温での駆動が可能（低温（-60℃）から高温（120℃）まで安定して作動する）。固体電解質はイオン移動による劣化が小さくサイクル特性がよい。シンプルな構造で、高電位系活物質の開発により、エネルギー密度の高い電池の作製が可能。</li> </ul> </li> <li><b>豊富な資源</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>資源量の豊富なナトリウムを用いており、リチウムやコバルトと比較して供給の不安がない。</li> </ul> </li> </ol>

<sup>116</sup> 日本電気硝子,ニュース ([https://www.neg.co.jp/uploads/news\\_20211118\\_jp.pdf](https://www.neg.co.jp/uploads/news_20211118_jp.pdf)), (参照 2023-03-01)

<sup>117</sup> 日本電気硝子,開発品の紹介 (<https://www.neg.co.jp/rd/topics/product-naion-battery/>), (参照 2023-03-01)

<b>課題と今後の展開</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日本電気硝子は、実用性能を有し、安価な資源を活用でき、かつ高い安全性を持つオール酸化物全固体 Na イオン二次電池を、脱炭素社会のキーパーツとして一日でも早く広く世の中に提供できるよう、製品化に向けた取り組みを加速する。</li> </ul>
<b>関連動向</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 小型・大型、特殊・汎用など幅広い用途を想定して開発している。</li> <li>・ 自動車・輸送用機器 (EV・鉄道・船舶・航空機、等)</li> <li>・ 農業用機械、建設系機械、産業用機械</li> <li>・ 発電所内の蓄電システム、定置型蓄電池システム、家庭用蓄電池、等</li> <li>・ 情報通信機器・家電 (スマートフォン、タブレット端末、PC、ウェアラブルデバイス、等)</li> </ul>

#### 4) ジュネーヴ大学

##### ■研究機関概要

【研究機関名】 理学部 結晶学研究室
【所在地】 スイス、ジュネーヴ

##### ■耐久性の高いナトリウムイオン電池を開発<sup>118</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年2月、スイスのジュネーヴ大学 (UNIGE)の研究チームは、危険性が低く耐久性の高い全固体ナトリウム電池の性能を向上させる新しい材料を開発した。</li> <li>スマートフォンや電気自動車などの充電電池として広く使われているリチウムイオン電池は、材料のリチウムがレアメタルであるため、将来にわたり安定した材料供給がなされる保証がない。そこでリチウムに替わる材料として、注目されているのがナトリウムである。ナトリウムは地球上に豊富にあるため、リチウムに比べて安価に安定して材料供給できるという大きな利点がある。しかし、ナトリウムイオン電池の性能はまだリチウムイオン電池に比べて低く、世界中の研究機関やメーカー、スタートアップが性能の向上と実用化を競っている。</li> <li>ナトリウムはリチウムよりも重い場合、ナトリウムイオンは液体電解質の中で動きにくく、固体電解質を開発する必要がある。しかし、これまでに開発された電解質は、ホウ素と水素原子からなるヒドリドボレートと呼ばれる化合物で構成されており、リチウムイオン電池と同等の性能を達成できなかった。そこで本研究によって、この問題を解決することに成功した。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>新しいバッテリー材料の開発に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">■TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / TRL9</p>
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>1つ目の研究は、導電効率の高い電解質材料であるカルボヒドリドホウ酸ナトリウム (NaCB11H12)の開発である。「もともと、核医学で使用されるこの材料は導電性ではないが、結晶構造を変え、的確な原子配置にすることで、導電性を持たせることに成功した」とCerny教授は説明。</li> <li>2つ目の研究は、開発した電解質材料を電池として構成することだった。電池が機能するためには、液体であれ固体であれ、電解質が電池のプラスとマイナスの電極に密接に接触していなければならない。「そのためには、ネジやバネなどで圧力をかけなければならない。私たちは、固体電解質にかける理想の力の大きさを探した」と、研究チームのMatteo Brighi氏が説明。「水深4000mの水圧に相当する400気圧程度が理想であると分かり、数回、ネジを回すだけで簡単に実現できる」</li> </ul>
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>本研究成果は、特に自動車産業において、ナトリウムイオン電池の製造を容易にする道を開くものである。ナトリウムイオン電池は、やや重い場合、主に自動車の動力源として使われる可能性があるという。研究チームは、「製造の費用対効果もまだ評価していないが、私たちが発見した材料が実に興味深いものであることを産業界に認識してもらうことが今は重要」と結論づけている。</li> </ul>

<sup>118</sup> UNIGE, A new electrolyte for greener and safer batteries (<https://www.unige.ch/communication/communiqués/en/2022/un-nouvel-electrolyte-pour-des-piles-plus-vertes-et-plus-sures>), (参照 2023-03-01)

## 5) ワシントン州立大学

### ■研究機関概要

【研究機関名】 工学部
【所在地】 アメリカ、ワシントン州

### ■リチウムイオン電池と同程度のエネルギーを保持するナトリウムイオン電池を開発 <sup>119</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>ワシントン州立大学、パシフィックノースウェスト国立研究所などの研究チームは、豊富で安価な材料から、リチウムイオン電池と同程度のエネルギーを保持して動作するナトリウムイオン電池を開発した。</li> <li>研究成果が2020年4月、『ACS Energy Letters』に掲載された。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>新しいバッテリー材料の開発に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">■TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / TRL9</p>
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>コバルトやリチウムなど希少で高価な材料から作られるリチウムイオン電池に対し、ナトリウムイオン電池は、豊富で安価な材料であるナトリウムから作られる。そのため大規模エネルギー貯蔵の候補となるが、リチウム電池ほど多くのエネルギーを保持できず、再充電にも問題がある。不活性なナトリウム結晶の層がカソード表面に蓄積すると、ナトリウムイオンの流れが阻害され、その結果、電池として機能しなくなるからである。</li> <li>この問題を解決するため、研究チームは層状の金属酸化物のカソードと、ナトリウムイオンを余剰に含む液体電解質を作製した。このカソード設計と電解質システムによって不活性な表面結晶の蓄積を防ぎ、ナトリウムイオンの継続的な移動を可能とした。</li> <li>この結果、ナトリウムイオン電池はリチウムイオン電池同様の容量を示し、さらに1000サイクルの充放電後でも80%以上の充電容量を維持していた。層状カソードを備えたナトリウムイオン電池が、リチウムイオン電池に匹敵するものになる可能性を示す、優れた結果が得られたとしている。</li> </ul>
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>この研究は、カソードと電解質との相互作用について根本的な知見を明らかにしたもので、実用的なナトリウムイオン電池への道を開くものだ。研究チームは、さまざまな材料を使用した電池設計の改善や、コバルトを使用しない電池の設計などに取り組んでいる。</li> </ul>

<sup>119</sup> ワシントン州立大学 (<https://news.wsu.edu/press-release/2020/06/01/researchers-develop-viable-sodium-battery/>), (参照 2023-03-01)

## 6) Morrow Batteries

### ■企業概要

【本社所在地】 ノルウェー、アーレンダール	【設立】 2020 年
【主な事業内容】	

### ■正極材料 LNMO をベースとした電池技術の商業化<sup>120</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>Morrow Batteries AS (Morrow) は 2020 年に設立したノルウェーの企業である。Morrow のバッテリーは、正極材料 LNMO (LiNi0.5Mn1.5O4) を採用し、コバルトの必要性をなくし、ニッケルとリチウムの使用量の削減を可能にした。この技術が評価され、すでに様々な企業から支援を受けている。2025 年からは、LNMO をベースにした第 2 世代の電池の生産を開始する予定である。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>コストと二酸化炭素排出量の削減に寄与</li> </ul>
技術成熟度	□TRL1~2 / ■TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9
特徴・機能、基盤技術	<p><b>開発の背景</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>電化に伴い、電池の需要は大きく伸びている。さらに、欧州のバッテリー供給体制の構築は、EU の戦略的優先事項となっている。</li> </ul> <p><b>LNMO 技術</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Morrow の LNMO 技術は、安価なマンガンを足場にして、その中のリチウムとニッケルをより有効に活用する持続可能なソリューションである。この第 2 世代の技術は、世界で最も実用的な単電池電圧 (4.5V 以上) を提供する製品と、列車やフェリーなどのモビリティ用途の製品に使用される。LNMO はコストと二酸化炭素排出量の大幅な削減を実現する。さらに、正極と負極間で移動する正イオンを輸送する電解質の最適化により、この新世代電池の性能と競争力を大幅に向上させることができる。</li> </ul>
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021 年 6 月、シーメンスは協力してバッテリー製造のサステナブルなデジタル化と自動化を目指すことを発表した。Morrow は、様々な分野のパートナーと共同で、ノルウェー南部に 42GWh バッテリーセル工場を建設する予定である。2023 年末にアーレンダールで第 1 期電池工場の操業を開始する予定。</li> <li>この工場は、ノルウェーで最初の商業用電池生産施設と。初日から再生可能エネルギーを燃料とし、世界で最も持続可能な電池を製造する予定である。工場の第一段階では、年間 1GWh 以上のバッテリーセルを製造する能力を持つ予定。2028 年にすべての開発段階が完了すると、工場は年間 43GWh のバッテリーセル生産能力を持つことになる。</li> </ul>
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 11 月、Polypore International, LP の子会社である Celgard, LLC (Celgard) は、Morrow と複数年の共同開発契約を締結したと発表した。Celgard は Morrow と共同で、電気自動車 (EV) およびエネルギー貯蔵システム (ESS) 用途の LNMO 技術を活用した次世代乾式バッテリーセパレーターを開発、試験、商品化する予定である。</li> </ul>

<sup>120</sup> Morrow Batteries (<https://www.morrowbatteries.com/products>), (参照 2023-03-01)

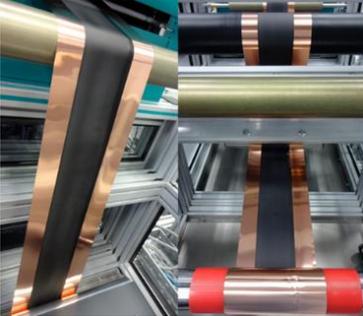
## 7) Pleione Energy

### ■企業概要

【本社所在地】ギリシャ、アテネ 【設立】2015年

【主な事業内容】エネルギー変換、分配、貯蔵のための革新的で費用対効果の高いアプリケーションとシステムの開発

### ■グラフェンを用いた環境に優しいリチウムイオン電池<sup>121</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pleione Energy S.A(Pleione Energy)は、ギリシャ企業とドイツ企業による合弁企業である。Pleione Energyの目標は、グラフェンなどのナノ材料に焦点を当て、より持続可能なエネルギー経済のために費用対効果の高い製品を開発、設計、製造することである。</li> <li>ダイヤモンドよりも硬く、銅よりも電気伝導性が高いグラフェンは、21世紀の材料科学における大発見とされ、ESAは研究を続けている。従来のリチウムイオン電池に超薄型グラフェンを加えるプロジェクトでは、電池の容量とサイクル寿命が向上し、また有害な溶剤を水と植物由来のセルローズに置き換えることで、より安価で環境に優しい方法で製造できるようになった。</li> <li>Pleione EnergyとESAは共同でグラフェンを主活性物質とするリチウムイオン電池の電極を工業化し、一度に数十メートル単位で生産するプロジェクトを実施した。この電極は、リチウムイオン電池のセルに使用され、欧州宇宙標準化機構(ECSS)の規格に従って製造・試験が行われ、宇宙で使用できる品質であることを表している。</li> </ul>	 <p>グラフェンパウダー</p>  <p>Roll-to-roll process</p>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高い充電・放電速度向上に寄与</li> </ul>	
<p>技術成熟度</p>	<p>□TRL1~2 / ■TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>	
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ESAの材料スペシャリストであるUgo Lafont氏は、「グラフェンをナノサイズにすることで、システムの中核となるリチウムイオンの移動度を高め、同じ量の材料で容量を向上させ、システムを劣化させずに高い充電・放電速度を実現することが可能になった。特に小型衛星やCubeSatsに適した、安価で信頼性の高い新しい電池ができる可能性がある」と述べている。</li> </ul>	
<p>課題と今後の展開</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>グラフェンエネルギー貯蔵プロジェクト「COORAGE」は、Pleione EnergyとドイツのFraunhofer Institute for Silicate Researchが電極製造のエンドツーエンドの工業プロセスを考案するために着手した。そして、ドイツのOmnidea-RTGが「ブレッドボード バッテリー セル」を設計した。次のステップは、円筒形の標準化セルに調整し、テストを通じて技術レベルを高め、最終的には宇宙飛行のための資格を得ることとしている。</li> </ul>	

<sup>121</sup> ESA, Just add graphene for greener Li-ion batteries

([https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Just\\_add\\_graphene\\_for\\_greener\\_Li-ion\\_batteries](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Just_add_graphene_for_greener_Li-ion_batteries)), (参照 2023-03-01)

## 8) Eagle Picher

### ■「アルテミス 1 号」の打ち上げに必要なバッテリー技術を提供<sup>122</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 11 月、EaglePicher (米国、ミズーリ州) が開発するバッテリーが NASA の「アルテミス 1 号」ミッションに搭載されたと発表した。このバッテリーは、宇宙船打ち上げシステム (SLS) とオリオン宇宙船の乗員モジュールに電力を供給するミッションに不可欠なものである。NASA の深宇宙探査プログラムである「アルテミス 1 号」の打ち上げは、将来の有人深宇宙探査ミッションにおける最初の試みである。</li> <li>EaglePicher は、SLS の飛行終了システム (FTS) 用の 32 ボルト、10Ah の銀-亜鉛電池を 2 個設計、製造した。FTS は飛行の安全性に問題がある場合、ロケットにあるすべての推進要素を停止させるシステムである。EaglePicher は、将来のフライトで自律飛行安全システムをサポートするための銀-亜鉛電池を開発している。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>厳しい環境要件に耐えられるようなバッテリーを設計</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまで EaglePicher は、米国初の衛星「エクスプローラー1 号」や「アポロ 13 号」などの数々の衛星のバッテリーを提供している。</li> </ul>

## 9) EnerSys

### ■充電式リチウムイオン電池「EnerSys® ABSL™」<sup>123</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>EnerSys (米国) は、産業用蓄電ソリューションを世界に提供している。EnerSys が開発した充電式リチウムイオン電池「EnerSys® ABSL™」は、2018 年 8 月に打ち上げられた NASA の宇宙探査機「パーカー・ソーラー・プローブ」に搭載された。</li> <li>この探査機は、世界最速の天体で、2025 年の最終軌道では最高時速約 43 万マイル (時速 69 万キロメートル) に達する予定である。コロナに突入して太陽に触れる最初のミッションとなるため、熱シールドは最高で華氏 2,500 度の高温に耐える必要がある。このような極限状態の中、探査機の飛行および科学機器に電力を供給する EnerSys のリチウムイオン電池は、ミッションの期間中に信頼できるエネルギーを提供できるよう、厳しい機械試験と熱試験を受けた。</li> <li>ABSL は、小さな靴箱サイズ (1.5Ah) から大きな電子レンジサイズ (448Ah) まで、様々な種類がある。ミッションを成功させるため、どのようなサイズであっても厳しい設計、構造、熱分析が行われている。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>厳しい環境要件に耐えられるようなバッテリーを設計</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021 年 6 月には、EnerSys のリチウムイオン電池を搭載された Spire (スパイア) の超小型衛星が打ち上げられた。パワーシステムの放電試験を行って電池セルの運用性能データを収集した。</li> </ul>

<sup>122</sup> Eagle Picher (<https://www.eaglepicher.com/resources/news-and-events/eaglepicher-provides-essential-battery-technology-nasa%E2%80%99s-artemis-i-launch/>), (参照 2023-03-01)

<sup>123</sup> EnerSys (<https://www.enersys.com/en/resources/industry-insight/space-enersys-helps-power-parker-solar-probe/>), (参照 2023-03-01)

## 10) SAFT

### ■次世代充電式リチウムイオンバッテリーの研究開発<sup>124</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>フランスの産業用電池メーカーの SAFT は 2018 年 2 月に欧州における複数の企業とアライアンスを結び、高密度リチウムイオンおよび全個体電池技術に焦点を置いた次世代バッテリーの研究・開発および工業化のための新たなプログラムを開始することを発表した。このプログラムはエレクトロモビリティ(EV、電気バス、鉄道、海運、航空)、エネルギー貯蔵(ESS)などの分野の市場を対象としたものである。</li> <li>これらの次世代バッテリーは、現行のリチウムイオン製品に比べて性能、コスト、安全性の面で優れたものを目指している。また現在運用されている様々なシステム環境との統合を意識し、デジタル化した制御機能とインターフェイスを備えたバッテリーを、大手の材料サプライヤーとともに設計することも計画している。これらのバッテリーは、継続的な開発活動のために、その時の最も厳しい基準を常に意識し、対応していく予定である。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>性能、コスト、安全性の向上に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>また、パートナー企業とともに新たな製造工程、そして電池およびシステムの実用化について協力することも目指している。このステップを経ることで、1GWh の標準的な製造単位でも容易に実現できるようになることを見込んでいる。</li> </ul>

## 11) GomSpace

### ■超小型衛星用リチウムイオンバッテリーの開発<sup>125</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>GomSpace(デンマーク)の超小型衛星用バッテリーは、2003年に打ち上げられた衛星「AAU-Cube Sat」以降、継続的な改良を重ねている。超小型衛星には、多くのミッションで成功した電源モデルの「Nano Power P31」が使用されている。</li> <li>3U以上の衛星には、「Nano Power P60」を推奨している。このモデルを搭載した衛星 6U サイズの「GOMX-4A」と「GOMX-4B」は 2018 年に一緒に打ち上げられた。</li> <li>「GOMX-4A」による実証は、デンマーク国防省による北極圏の監視の強化及び分析の一環として行われた。この衛星は、グリーンランド語の「星」を意味する「Ulloriaq」と命名されている。ESA の衛星「GOMX-4B」は、将来の超小型衛星群の主要な実現技術である衛星間リンクとステーションキーピングの能力を実証することを目的としている。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>厳しい環境要件に耐えられるようなバッテリーを設計</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>GomSpace は、超小型衛星用のコンポーネントやプラットフォーム、システムなども手掛けている。</li> </ul>

<sup>124</sup> SAFT(<https://www.saftbatteries.com/>), (参照 2023-03-01)

<sup>125</sup> GomSpace(<https://gomspace.com/shop/subsystems/power/default.aspx>), (参照 2023-03-01)

## 12) AAC Clyde Space

### ■キューブサット用リチウムイオンバッテリー「OPTIMUS シリーズ」<sup>126</sup>

<b>研究概要/技術概要</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AAC Clyde Space (スウェーデン) が開発するキューブサット用リチウムイオンバッテリー「OPTIMUS シリーズ」は、低軌道 (LEO) ミッション用に最適化されている。</li> <li>• バッテリーには、低温での動作を強化するために、自律的に統合されたヒーターシステムが搭載されている。このシリーズは、30Wh、40Wh、80Wh の容量があり、要望に応じてより大容量の対応も可能。</li> <li>• 低電圧保護や過電圧保護、ストリング過電流保護などの内蔵機能は、10 年以上の設計実績に基づいており、電力効率と一貫性を保証している。NASA 規格 EP-Wi-032 に適合している。必要な安全条件を満たすために、有人飛行のための追加資格試験などを行うことができる。国際宇宙ステーションにも対応。</li> </ul>
<b>適用対象分野</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 厳しい環境要件に耐えられるようなバッテリーを設計</li> </ul>
<b>技術成熟度</b>	<input type="checkbox"/> TRL1～2 / <input type="checkbox"/> TRL3～5 / <input type="checkbox"/> TRL6～8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
<b>関連動向</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AAC Clyde Space はスウェーデンで衛星機器や地上試験機器を扱う AAC Microtec とスコットランドの衛星メーカー Clyde Space が 2018 年に合併して作られた。2020 年 10 月には、姿勢制御機器をはじめとする超小型衛星関連技術を有するオランダの会社 Hyperion Technologies を買収したことを発表した。</li> </ul>

<sup>126</sup> AAC Clyde Space (<https://www.aac-clyde.space/what-we-do/space-products-components/cubesat-batteries>), (参照 2023-03-01)

## (5) 光衛星通信技術

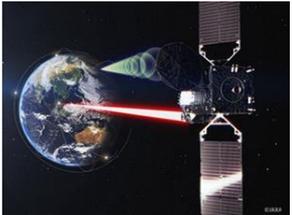
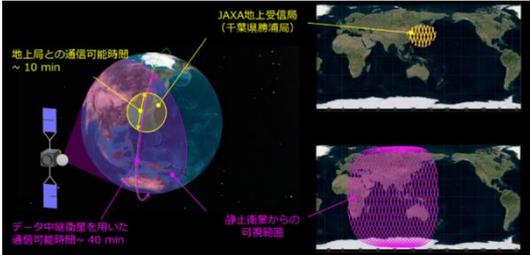
### 1) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

#### ■研究機関概要

【本社所在地】 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

【設立年】 2003 年

#### ■光衛星間通信システム「LUCAS」<sup>127128</sup>

<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JAXA が開発する「光衛星間通信システム」(「LUCAS」: Laser Utilizing Communication System)は、地球観測衛星(低軌道衛星)と光データ中継衛星(静止衛星)間のデータ中継を、波長 1.5<math>\mu\text{m}</math> の目に見えないレーザー光を用いた宇宙空間での光通信により実現するシステムである。</li> <li>観測衛星で取得された観測データ(画像等)をいったん静止衛星が中継し、静止衛星から地上局に送る仕組みにより、地上局 1 局との直接通信であれば観測衛星の地球 1 周(約 90 分)のうち 10 分程度しか通信時間が確保できないところを、約 4 倍の軌道周回 1 周の約半分の期間通信することが可能となる。</li> <li>JAXA では過去、電波を用いたデータ中継技術衛星「こだま」(DRTS)を開発し、ALOS-2 等の地球観測衛星で観測された大容量データの中継伝送に寄与した実績があるが、「こだま」(DRTS)の実現した通信速度は 240Mbps で、通信に用いられたアンテナは径が 3.6m だった。一方、今回の光技術を用いた「LUCAS」における通信容量は 1.8Gbps となり DRTS の 7 倍以上高速化され、さらにアンテナ径は 14cm となり、約 1/30 と大幅に小型化される。</li> </ul>	 <p>光衛星間通信システム「LUCAS」</p>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通信の高速化とアンテナの小型化に寄与</li> </ul>	
<p>技術成熟度</p>	<p style="text-align: center;"><input type="checkbox"/>TRL1~2 / <input type="checkbox"/>TRL3~5 / <input type="checkbox"/>TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/>TRL9</p>	
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<p>データ中継システムの利点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>低軌道衛星(地球観測のための衛星:1000km 程度)は軌道上の約半分の期間、静止衛星(地上から 36,000km)と通信ができるため、このシステムを利用することにより通信視野範囲が 4 倍以上に拡大し、データ伝送量の増大、即時性の向上が実現される。</li> </ul>  <p style="text-align: center;">データ中継による通信視野範囲の拡大イメージ</p>	

<sup>127</sup> JAXA, 光衛星間通信システム「LUCAS」(<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/lucas/index.html>), (参照 2023-03-01)

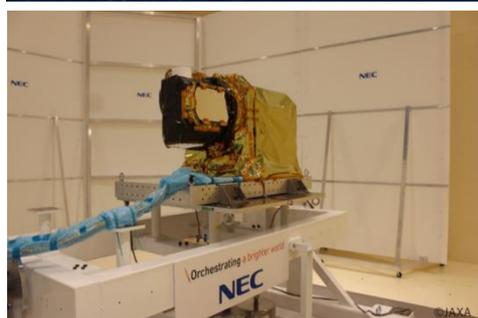
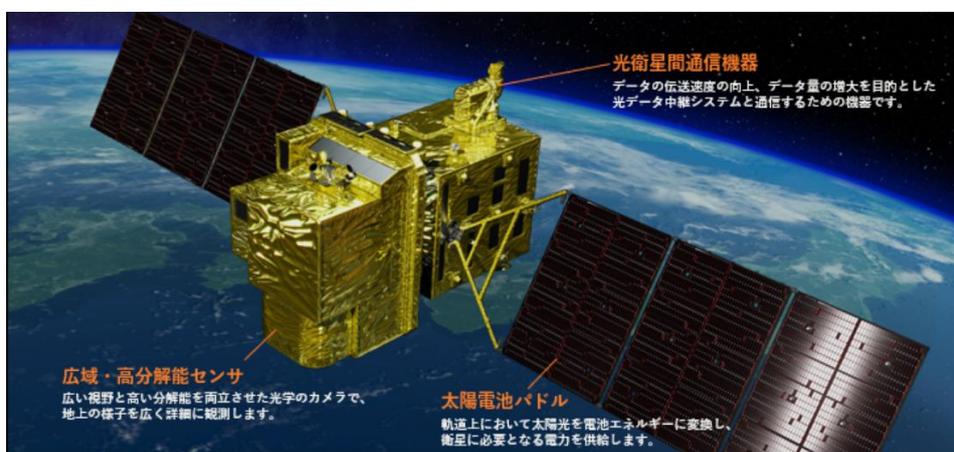
<sup>128</sup> NEC, news room([https://jpn.nec.com/press/202012/20201210\\_02.html](https://jpn.nec.com/press/202012/20201210_02.html)), (参照 2023-03-01)

### レーザ技術を用いた光通信

- ・ 静止衛星を用いたデータ中継に、レーザ技術を用いた光通信を採用することにより、前世代のデータ中継衛星である「こだま」(DRTS)に対しターミナルの小型化、伝送速度の高速化が実現される。光通信技術は「きらり」(OICETS)で軌道上実証され、本実績をベースに開発が行われている。

### 静止軌道と低軌道衛星にそれぞれ送受信機(光ターミナル: OGLCT、OLLCT)を搭載

- ・ 光衛星間通信には、静止衛星、低軌道衛星の両方に送受信機を搭載する必要があり、そのどちらも JAXA にて開発している。静止衛星側の光ターミナル(OGLCT)は光データ中継衛星に搭載され、低軌道衛星側の光ターミナル(OLLCT)は先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3)、先進レーダ衛星「だいち4号」(ALOS-4)に搭載される計画である。これらターミナルを用いて軌道上での運用実証を行うとともに、実際にALOS-3/ALOS-4で取得した観測データのダウンリンクへの実利用が行われる予定である。(2023年3月1日時点)



静止衛星用光ターミナル(OGLCT)フライトモデル



低軌道衛星用光ターミナル(OLLCT)フライトモデル

### 課題と今後の展開

- ・ 光通信技術については、JAXA は過去に光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS)での軌道実験を成功させた実績がある。「LUCAS」ではこれを足掛かりに、実用システム化に向けた高信頼化・小型化・通信容量の大幅向上を果たすべく開発が行われた。
- ・ このような特徴をもつ「LUCAS」は、ALOS-3、ALOS-4 のみならず、これからの地球観測衛星のデータ伝送の大容量化、即時性要求に対するソリューションとして多大な期待が寄せられている。

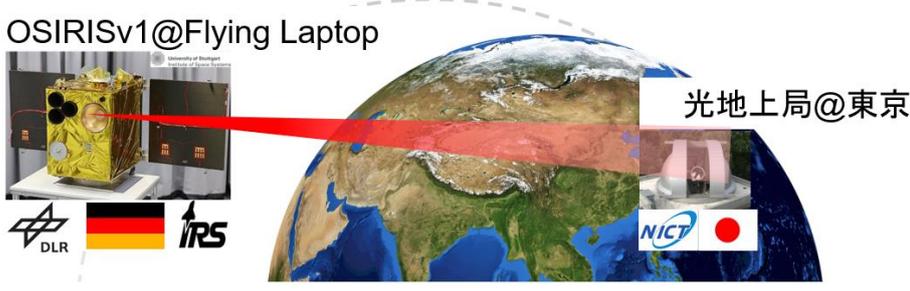
<p>関連動向</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2020年12月、NECはJAXAからの契約のもと光衛星間通信システム「LUCAS」向けに、レーザー光を用いて宇宙空間で大容量データ伝送を実現する衛星用の光通信装置を開発した。</li> <li>・ 静止衛星と地球観測衛星の間で40,000kmにも及ぶ超長距離の光通信を実用化するために、海底ケーブルやLANなどで広く用いられ部品入手性に優れるが低出力の半導体レーザー光(波長1.5μm帯)を真空環境のもとで高出力に安定的に増幅する技術をはじめ、高い精度でデータ伝送先の衛星を捕捉し追尾する技術、さらに相対的に移動する通信相手からの微弱な受信光から広帯域の信号を復調する技術などを開発した。</li> <li>・ 特に精密な光学系部品等で構成される光通信機器が打ち上げ時の激しい振動や衝撃、軌道上で受ける宇宙放射線にも耐えうる設計を行い、またレーザー発振に伴う発熱に対し光通信機器において十分な排熱環境を創る工夫も行っている。</li> </ul>
-------------	---

## 2) 情報通信研究機構(NICT)

### ■研究機関概要

【研究機関名】ワイヤレスネットワーク総合研究センター宇宙通信研究室  
 【本部所在地】〒184-0015 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

### ■DLR 小型衛星搭載光通信機器からのレーザ光を NICT 光地上局で受信<sup>129</sup>

<p><b>研究概要/技術概要</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021年1月、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)は、国際共同実験としてシュトゥットガルト大学開発した Flying Laptop 衛星に搭載されたドイツ航空宇宙センター(DLR)の小型衛星搭載光通信機器(OSIRISv1)と、NICTの光地上局に設置した新規開発の精追尾付き光学系との間で光衛星通信実験を実施し、2021年2月にOSIRISv1からのダウンリンク光をNICT光地上局で受信することに成功した。</li> <li>また同時に、新規開発した大気ゆらぎ測定装置をNICT光地上局に設置し、初期試験に成功した。さらに、低コストな商用部品で構成した簡易型光地上局も設定し、実際に衛星からのレーザ光を受信することに成功した。</li> <li>シュトゥットガルト大学開発の Flying Laptop 衛星に搭載された OSIRISv1 はボディインテグレーションで指向追尾する構成になっており、この構成での光通信実験が成功したのは日本では初めてである。今回の貴重な実験データの取得により、将来の光衛星通信技術の研究開発に貢献することが期待される。</li> </ul> <p>OSIRISv1@Flying Laptop</p>  <p>光地上局@東京</p> <p>イメージ図</p>
<p><b>適用対象分野</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通信の高速化とアンテナの小型化に寄与</li> </ul>
<p><b>技術成熟度</b></p>	<p>□TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / ■TRL9</p>
<p><b>特徴・機能、基盤技術</b></p>	<p><b>背景</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>NICTでは、将来の衛星通信の高度化のため、宇宙における光通信の研究開発を実施している。2014年から2016年に軌道上実証実験を実施した小型光通信トランスポンダ(SOTA)では、日本国内の光地上局のみならず、欧州(ドイツ航空宇宙センター(DLR)、フランス国立宇宙研究センター(CNES)、欧州宇宙機関(ESA))やカナダ(カナダ宇宙庁(CSA))の光地上局と光通信実験を実施し、貴重な実験データを取得している。</li> <li>これまでNICTは、研究協力協定を締結したDLRと共に、小型衛星搭載用の光赤外高速通信回線システム(OSIRIS)計画で開発したOSIRISv1を用いた国際共同実験を進めてきた。</li> </ul> <p><b>成果</b></p>

<sup>129</sup> NICT,プレスリリース(<https://www.nict.go.jp/press/2021/03/25-1.html>), (参照 2023-03-01)

- ・今回、NICT と DLR は、DLR の OSIRISv1 からのダウンリンク光を、1m 望遠鏡を備えた NICT の光地上局(図 1)で受信する実験を 2021 年 1 月末から実施し、2021 年 2 月にダウンリンク光の受信に成功した。
- ・本実証実験では、超高速先進光通信機器 HICALI を用いた実験に使用するために新規に開発した精追尾光学系(図 2)を NICT 光地上局に設置しており、先行的に精追尾制御の機能を確認した。OSIRISv1 はボディポインティング方式で指向追尾する構成になっており、この構成での光通信実験が成功したのは日本では初めてである。
- ・また今回の実験では、大気ゆらぎ等が光衛星通信の通信品質に与える影響をモデル化して、軽減するために NICT が新規開発した、大気ゆらぎ測定装置の初期試験にも成功した(図 3)。さらに、将来の光衛星通信技術の普及に向けて小型で低コストな光地上局の開発が必要であることから、市販の開口径 20cm 望遠鏡で構成した簡易型光地上局を開発し(図 4)、この簡易型地上局で OSIRISv1 からのレーザー光の受信(ファーストライト)にも成功した。これらの実験により貴重な実験データを取得することができ、大気ゆらぎや追尾誤差のモデル化といった、将来の光衛星通信技術の研究開発に貢献できると考えられる。

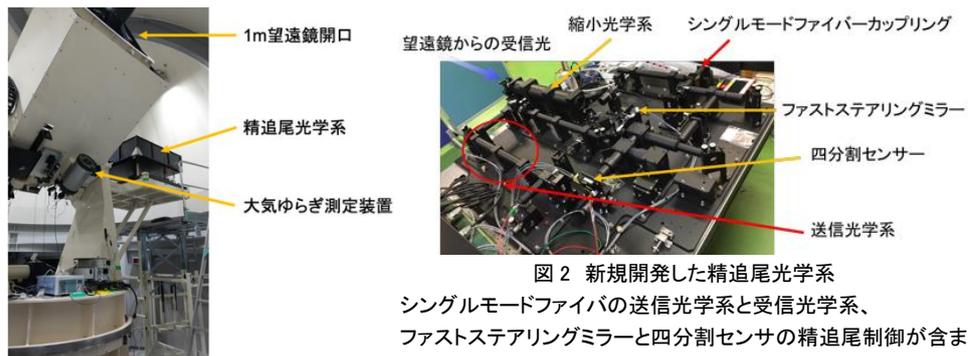


図 1 1m 望遠鏡の光地上局

図 2 新規開発した精追尾光学系  
シングルモードファイバの送信光学系と受信光学系、  
ファストステアリングミラーと四分画センサの精追尾制御が含まれている。

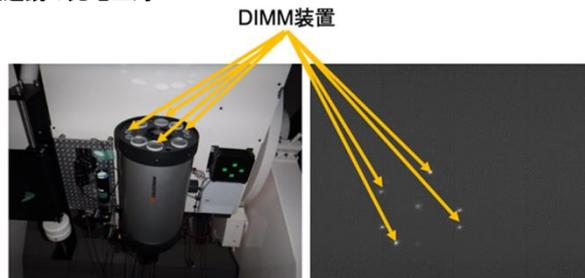
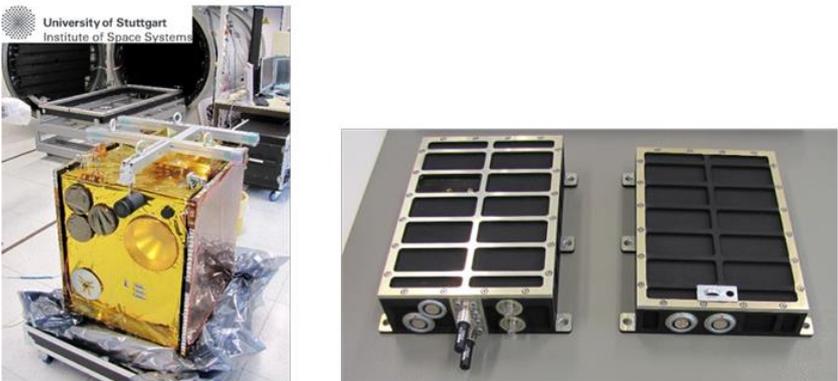


図 3 新規開発した大気ゆらぎ測定装置(左)と赤外線カメラ画像で OSIRISv1 から受信した光(右)



図 4 OSIRISv1 からダウンリンク光を受信した 1m 望遠鏡と 20cm 望遠鏡(簡易型光地上局)

	 <p data-bbox="655 636 1158 663">図 5 Flying laptop 衛星(左)と OSIRISv1 ペイロード(右)</p>
<p data-bbox="199 689 359 757">課題と今後の展開</p>	<ul data-bbox="419 696 1390 1037" style="list-style-type: none"> <li>• 今回の実験データの解析を進め、受信側での光ファイバへのカップリング技術、波面補償システム、低雑音光増幅技術、高感度受信技術等の受信系の研究開発を行い、使いやすいシステムの研究開発を進展させていく計画である。</li> <li>• これらにより、将来の光衛星通信システムの開発・普及に貢献することが期待される。また、今回の Flying Laptop 衛星に搭載された OSIRISv1 (図 5) による国際共同実験の成功で、光衛星通信の国際的な相互運用を実証したことで、現在、光衛星通信の標準化が活発に行われている宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS) へも貢献できると考えている。</li> </ul>
<p data-bbox="199 1061 311 1128">各機関の役割分担</p>	<ul data-bbox="419 1068 1222 1211" style="list-style-type: none"> <li>• 情報通信研究機構: 光地上局と光受信実験用の測定器開発と準備</li> <li>• ドイツ航空宇宙センター (DLR): OSIRISv1 の開発</li> <li>• シュトゥットガルト大学: Flying Laptop 小型衛星の開発、統合、運用</li> </ul>

### 3) 日本電気株式会社

#### ■企業概要

【本社所在地】 〒108-0014 東京都港区芝 5-7-1 【創立】 1899 年

【主な事業内容】 社会公共、社会基盤、エンタープライズ、ネットワークサービス、グローバル 等

#### ■宇宙空間で世界最高水準の通信速度 10Gbps を実現する光通信機を開発 <sup>130</sup>

<p><b>研究概要/技術概要</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 2 月、日本電気(NEC)は、宇宙空間で使用される光通信システムとして世界最高水準の通信速度である 10Gbps で動作する光通信機向けの技術開発を行い、その成果を反映したプロトタイプの製造を行った。</li> <li>開発品は 2023 年度打ち上げ予定の技術試験衛星 9 号機(ETS-9)に搭載され、宇宙環境での動作確認が行われる。軌道上での動作確認の結果を参照した長期信頼性の一層の改善とともに、小型化・低コスト化を並行して進め、製品化につなげる。</li> <li>本研究開発は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の高度通信・放送研究開発委託研究「衛星搭載光通信用デバイスの国産化及び信頼性確保に関する研究開発(採択番号 18601)」において実施された。</li> </ul>	 <p>開発した 10Gbps 光通信機</p>
<p><b>適用対象分野</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通信の高速化に寄与</li> </ul>	
<p><b>技術成熟度</b></p>	<p>□TRL1~2 / □TRL3~5 / ■TRL6~8 / □TRL9</p>	
<p><b>特徴・機能、基盤技術</b></p>	<p><b>開発の背景</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>近年、観測衛星のセンサの高解像度化に伴い、軌道上で取得できるデータ量が増加している。このような状況の中、宇宙と地球との間のリアルタイム通信の速度向上手段として宇宙光通信技術に期待が集まっている。宇宙光通信の実用化はこれまで欧州が先行し、2017 年に欧州データ中継システム(EDRS)の中で 1.06 μm 帯の信号光波長を用いた通信速度 2Gbps の静止衛星-低軌道衛星間通信の利用が始まった。</li> <li>日本においては 2020 年に宇宙航空研究開発機構(JAXA)が光衛星間通信システム「LUCAS」<sup>*1</sup> を打ち上げている。将来の高速化を視野に、地上用の高速な光通信システムで普及している 1.55 μm 帯を使用し、静止軌道衛星-低軌道衛星間の 2Gbps 光通信を実現する。</li> <li>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度化(HTS (High Throughput Satellite)化)や、低周回軌道衛星ベースの衛星コンステレーション<sup>*2</sup>におけるネットワーク構築手段として注目を集めている。</li> <li>今回の技術開発は、HTS における衛星-地上間フィーダーリンクへの適用を念頭に置いたものであり、高速化に加えマルチユーザー RF リンクとの親和性を念頭に置いて進められている。</li> </ul>	

<sup>130</sup> 日本電気株式会社, news room ([https://jpn.nec.com/press/202209/20220905\\_02.html](https://jpn.nec.com/press/202209/20220905_02.html)), (参照 2023-03-01)

	<p><b>1. 長距離システム適用のための高速・高性能</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>今回開発した 10Gbps 光通信機では「LUCAS」向け同様に 1.55 <math>\mu</math>m 帯を使用した。静止軌道衛星-地上間、静止軌道衛星-低軌道衛星間に相当する約 40,000km の長距離システムへの適用に向け、最適な誤り訂正符号化技術を採用するなど、受信感度改善のための各種施策を適用し、回線成立条件の緩和に繋げた。</li> </ul> <p><b>2. 地上システム向け部品での信頼性確保</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>長期間運用が前提の静止軌道衛星は、搭載する各種装置に高い信頼性を必要とする。10Gbps という超高速動作領域では開発段階において宇宙環境での動作保証がされた部品が少ないため、地上システム向け光部品及び高周波部品の宇宙システムでの適用を目的とした新たな選別手法、実装手法を開発した。</li> </ul> <p><b>3. 衛星ネットワーク展開、地上通信システム接続への対応</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>HTS におけるマルチユーザー RF リンクとの親和性およびその先のネットワーク化、また地上通信システムとのシームレスな接続に向け、地上システムで標準的に使用されるイーサネットをインターフェイスとして採用した。</li> </ul>
<p><b>課題と今後の展開</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEC は今後も宇宙における光通信システムの普及に貢献していく方針である。</li> </ul>

※1 NEC、JAXA 光衛星間通信システム「LUCAS」向け衛星用光通信装置を開発([https://jpn.nec.com/press/202012/20201210\\_02.html](https://jpn.nec.com/press/202012/20201210_02.html))

※2 衛星コンステレーションとは、複数の衛星を連携・協調させて一体的に機能させる仕組み

#### 4) 三菱電機株式会社

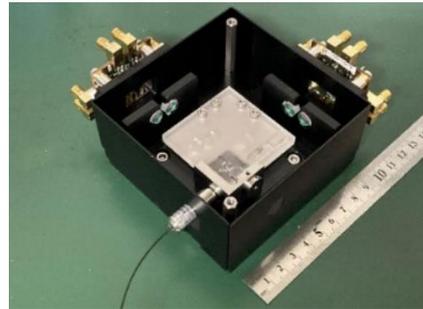
##### ■企業概要

【本社所在地】 〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-7-3 【設立】 1921 年

【主な事業内容】 重電システム、産業メカトロニクス、情報通信システム、電子デバイス、家庭電器 等

##### ■宇宙光通信機能と受信方向検出機能を統合した光受信器を開発<sup>131</sup>

<p><b>研究概要/技術概要</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 5 月、レーザ光線を利用した宇宙光通信機能と、レーザ光線の受信方向を検出する受信方向検出機能を統合した宇宙光通信用光受信器を、地上光ファイバー通信などで使用される汎用的な 1.5 μm 帯において、世界で初めて*開発した。</li> <li>今回、宇宙光通信機能と受信方向検出機能を統合することで、光受信器の小型化を実現するとともに、レーザ光線の位相を利用したコヒーレント光通信を可能とした。これにより宇宙光通信において、電波による通信に比べ 10 倍以上の大容量化・高速化、長距離通信を実現する。</li> <li>また、レーザ光線は電波に比べて波長が短く、アンテナサイズも小型化できる。そのため、ビル間などの光ファイバーを敷設しにくい場所や、災害時など通常のインフラが機能していない状況、基地局の設置が難しい発展途上国や砂漠などで、移動体への搭載や既存の施設内への設置も容易になり、さまざまな状況での利用拡大に貢献する。</li> </ul>
<p><b>適用対象分野</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大容量化・高速化、長距離通信を実現</li> </ul>
<p><b>技術成熟度</b></p>	<p>□TRL1~2 / ■TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>
<p><b>特徴・機能、基盤技術</b></p>	<p><b>開発の背景</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>近年、土砂災害等における現場状況の把握などで人工衛星による撮影画像が多く利用されているが、これまでの電波を利用した衛星通信では、高精細な画像データをリアルタイムに送受信するには、データ容量やアンテナサイズなどに制約があった。今後、防災・減災に向けて、より早く高精度に現場状況を把握するために、光ファイバーが不要で大容量・高速な宇宙光通信が求められている。</li> <li>一方、宇宙光通信は、電波に比べて約 1000 分の 1 の広がり角で非常に狭いレーザ光線を使用するため、高速で移動する人工衛星との間で互いにレーザ光線の進行方向を高精度に合わせる専用のセンサが必要で、受信器のサイズが大きくなる課題があった。</li> </ul> <p><b>世界初、光電変換素子にレーザ受信方向検出機能を統合した光受信器を開発</b></p>



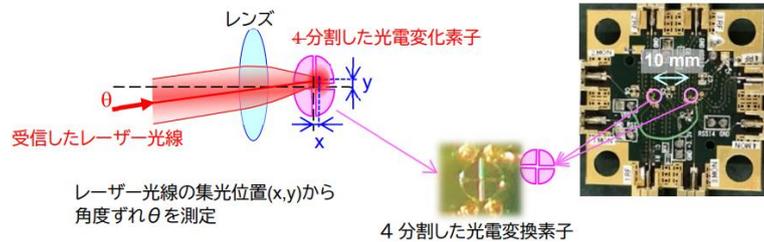
開発した宇宙光通信用光受信器の試作器



地上のさまざまな場と繋がる光通信のネットワークイメージ

<sup>131</sup> 三菱電機株式会社, 世界初、宇宙光通信機能と受信方向検出機能を統合した光受信器を開発 (<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2022/pdf/0531-b.pdf>), (参照 2023-03-01)

- レーザ光線を受信し電気信号に変換・出力する光電変換素子を4分割することで、受信したレーザ光線の角度ずれを、分割後の各素子の出力信号の強度の比較で高精度に検出。これまで必要だった受信方向を検出する専用センサが不要。これにより、世界で初めて、光電変換素子に宇宙光通信機能とレーザ受信方向検出機能を統合した小型の光受信器を開発。

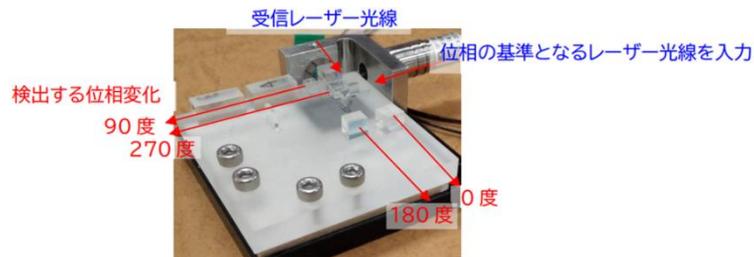


分割した光電変換素子によるレーザ光線の角度ずれ測定

開発した光電変換素子の外観写真

### 世界初、光電変換素子にレーザ受信方向検出機能を統合した光受信器を開発

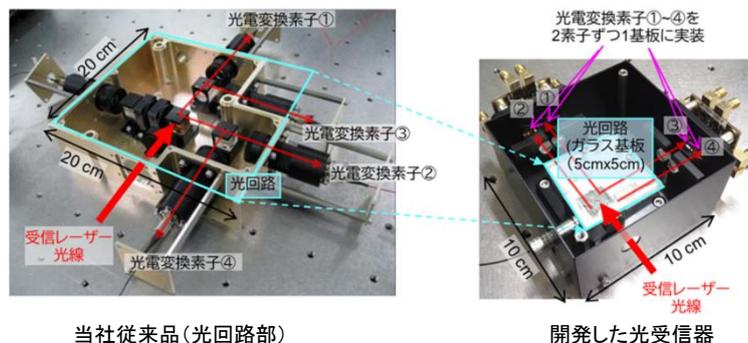
- レーザ光線を受信し電気信号に変換・出力する光電変換素子を4分割することで、受信したレーザ光線の角度ずれを、分割後の各素子の出力信号の強度の比較で高精度に検出。これまで必要だった受信方向を検出する専用センサが不要。これにより、世界で初めて、光電変換素子に宇宙光通信機能とレーザ受信方向検出機能を統合した小型の光受信器を開発。



開発した光回路

### 光電変換素子と光回路を1モジュールに実装し、10 cm<sup>2</sup>の小型・軽量の光受信器を実現

- 受光方向検出機能を備えた光電変換素子により専用のセンサが不要。さらに5cm×5cmの小型のガラス基板上に光回路を形成し、光電変換素子2個を1枚の基板に実装して、これらを1モジュール内に構成する技術を開発。これにより当社従来開発品と比較して4分の1以下の体積10cm<sup>3</sup>の小型かつ軽量の宇宙光通信用光受信器を実現。



当社従来品(光回路部)

開発した光受信器

### 課題と今後の展開

- 衛星への搭載に向けて開発を進めるとともに、主に官需開発プログラムへの提案を進める。

## 5) 株式会社ワープスペース

### ■企業概要

【本社所在地】 〒305-0031 茨城県つくば市吾妻 1-10-1 つくばセンタービル 1F	【設立】 2016 年
【主な事業内容】 小型人工衛星向け通信サービス、小型人工衛星向けモジュール開発	

### ■衛星間光通信ネットワーク「WarpHub InterSat」<sup>132</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>ワープスペースは、人工衛星向け通信インフラ事業を運営し、低軌道人工衛星向け分散型通信インフラサービス「WarpHub」や、小型衛星用モジュールの開発を行う。前身の大学衛星プロジェクトを含め、これまで 3 機の通信衛星を打ち上げている。</li> <li>宇宙や人工衛星に関する高い専門性に加え、JAXA をはじめとした研究機関とのパートナーシップ、つくば研究学園都市が保有する豊富な実験・試験設備等を強みに、民間として世界初の衛星間光通信ネットワーク「WarpHub InterSat」の実現を目指している。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測データのリアルタイム伝送に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1～2 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL3～5 / <input type="checkbox"/> TRL6～8 / <input type="checkbox"/> TRL9
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球観測衛星事業者はこの光通信サービスにより、エンドツーエンドの 1 ギガバイトの高データスループットで 24 時間 365 日、ほぼリアルタイムで地球観測データを地上に伝送することが可能となる。</li> <li>ワープスペースは、「WarpHub InterSat」の運用に不可欠なワークロード開発のサポートのために、Amazon Elastic Kubernetes Service (Amazon EKS) や Amazon Aurora などの AWS のマネージドサービスを活用する。このようなワークロードにはミッションコントロール、軌道調整のほか、顧客の地球観測衛星からリモートセンシングデータを低遅延、低コストで地上システムに送信することなどが含まれる。</li> <li>2022 年 7 月、小型衛星を活用した宇宙空間での光通信サービスの実現を目指すワープスペースは、現在、開発中の地球中軌道における衛星間光通信によるデータ中継サービスにおいて、安全で弾力性、費用対効果に優れたオペレーションに向けてアマゾンウェブサービス(AWS)を活用することを発表した。AWS を活用することで、世界の顧客へ安全な通信インフラストラクチャを提供し、価値の向上を目指す。</li> </ul>
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>光データ中継衛星を介して低軌道衛星を地上システムに接続するシームレスな通信アーキテクチャを構築することで、地球観測産業の成長を加速させると同時に、多様なソリューションの創出に貢献できると考えている。</li> </ul>
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2023 年 1 月、第一世代の 3 基の中継衛星用の光通信端末として、レーザ光通信製品プロバイダーである Mynaric が製造する「CONDOR Mk3 (コンドル・マークスリー)」を採用することに決定した。今回の契約は Mynaric にとって日本企業との初めての契約となる。</li> </ul>

<sup>132</sup> ワープスペース、小型衛星を活用した宇宙空間での光通信サービスの信頼性向上を目指し、AWS を採用 (<https://warpspace.jp/news/?id=1777>)、(参照 2023-03-01)

## 6) Mynaric

### ■企業概要

【本社所在地】 ドイツ、バイエルン州 【設立】 2009 年

【主な事業内容】 航空宇宙アプリケーション向けのワイヤレス レーザー通信システムの開発・商品化

### ■光通信端末「CONDOR Mk3」<sup>133</sup>

<b>研究概要/技術概要</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mynaric はドイツ航空宇宙センター(DLR)の職員 2 人によって 2009 年に設立した。DRL からライセンスを受けた技術も保有している。Mynaric の光通信端末「CONDOR Mk3」は 100Mbps から 100Gbps の間でデータ転送レートを設定することができる。</li> <li>• 2021 年 12 月、米国防高等研究計画局(DARPA)の研究プログラム「Space-Based Adaptive Communications Node (Space-BACN)」の一環で、次世代光通信端末のアーキテクチャ設計に取り組むことが決定したと発表した。</li> <li>• DARPA の Space-BACN は、低軌道衛星と地上を接続する、高速で低コストな光通信技術の開発を目指しているプログラムである。</li> </ul>  <p style="text-align: center;">CONDOR Mk3</p>
<b>適用対象分野</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 設置面積、質量、消費電力の削減に寄与</li> </ul>
<b>技術成熟度</b>	<p style="text-align: center;">□TRL1~2 / ■TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>
<b>特徴・機能、基盤技術</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 光通信端末「CONDOR Mk3」は、次世代衛星通信のための高性能、高帯域幅、安全性、信頼性への高まるニーズに対応するために開発された。この汎用性の高い端末は、様々な軌道における衛星間の接続と、宇宙-宇宙、宇宙-航空、宇宙-地上での通信を可能にする。通信距離は 1 万 km 以上、通信速度は 2.5Gbps、波長は 1.55 μm 帯、光アンテナの口径は 80mm、送信出力は 3W。</li> <li>• 「CONDOR Mk3」は、実績のある「CONDOR Mk1」および「SDA Tranche 0」の規格に準拠している。設置面積、質量、消費電力が大幅に小さくなるように設計されている。また、安全性が高く、LEO 衛星のコンステレーションに最適化されている。LEO で 7 年以上の寿命を実現する。</li> </ul>
<b>課題と今後の展開</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Space-BACN のフェーズ 0 の期間は 15 週間で、ターミナルのアーキテクチャ設計の開発に重点を置いた。続くフェーズ 1 では光通信端末のベンチトップモデルの開発、フェーズ 2 ではプロトタイプの開発が予定されている。(2023 年 3 月 1 日時点)</li> </ul>
<b>関連動向</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2013 年、Airbus/Cassidian と協力して世界初の光 1Gbps 空対地リンクで 2 つの世界記録を達成。2017 年には Facebook と協力して 10Gbps 空対地リンクを達成した。</li> <li>• 2021 年 11 月に NASDAQ 市場に上場。2022 年 5 月、ISS にレーザー通信端末を設置する契約を獲得。2022 年 7 月には、米国の大手通信機器メーカー L3Harris Technologies が Mynaric への出資と将来的な協業に関する合意書に調印したと発表した。</li> </ul>

<sup>133</sup> CONDOR Mk3 (<https://mynaric.com/products/space/condor-mk3/>), (参照 2023-03-01)

## 7) Tesat-Spacecom

### ■企業概要

<p>【本社所在地】 ドイツ、バックナング 【設立】 1949 年</p> <p>【主な事業内容】 衛星メーカー向けの通信ペイロードの開発、製造、試験</p>
---

### ■光通信端末「ConLCT80」<sup>134</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tesat-Spacecom(TE SAT)は、Airbus Defence and Space 社の子会社で、60 年以上にわたり通信衛星用ペイロード機器の製造において専門知識を培ってきた。ドイツ・バックナングにある 60,000m<sup>2</sup>の敷地で、約1,000 人の従業員が衛星通信用のシステムおよび機器の開発、組立、統合、テストを行っている。</li> <li>• 2022 年現在、700 以上の宇宙プロジェクトが完了している。TESAT の製品は、ドイツ、ヨーロッパ、アメリカの安全保障・防衛分野の様々な衛星を使ったシステムで使用されている。</li> </ul>	 <p>ConLCT80</p>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 大量生産による低コスト化と信頼性の向上に寄与</li> </ul>	
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9	
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2022 年 9 月、TESAT は宇宙開発局(SDA)の Tranche 1 の一部である衛星用光通信端末(OCT)の予備設計審査(PDR)を完了したことを発表した。この審査には、Tranche 0 および Tranche 1 衛星の主契約者であるロッキード・マーチン社と SDA が立ち会った。</li> <li>• この審査により、TESAT の OCT の設計と仕様が SDA の OCT 標準 Ver.3.0 の要求事項に適合していることを確認した。OCT は相互接続された衛星間のデータトラフィックをルーティングするために光技術を利用しており、低地球軌道(LEO)における低遅延をサポートする役割を担う。<sup>135</sup></li> </ul>	
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 今後、SDA の「Tranche 0」のトランスポートレイヤーコンステレーションに搭載され、宇宙で運用される端末間の宇宙光通信の実証試験が予定されている。</li> <li>• 2023 年から米国で光通信端末の製造を開始する予定である。</li> </ul>	
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2021 年 8 月、TESAT の光通信端末「Constellation Laser Communication Terminal (ConLCT80)」は、米国の宇宙開発局(SDA)の接続試験に成功し、異なるメーカーの全ての光ペイロードの相互運用性を保証した。</li> </ul>	

<sup>134</sup> Tesat-Spacecom, (<https://www.tesat.de/news/press/921-tesat-s-conlct-modem-successfully-demonstrates-sda-laser-communication-standard>), (参照 2023-03-01)

<sup>135</sup> Tesat-Spacecom, (<https://www.tesat.de/news/press/928-tesat-completes-optical-communication-terminal-preliminary-design-review-for-sda-transport-layer>), (参照 2023-03-01)

## 8) Sony Space Communications Corporation(SSC)

### ■宇宙光通信事業を行う新会社を設立<sup>136</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年6月、ソニーグループは完全子会社の米国法人 Sony Corporation of America が、光衛星通信事業を行う新会社「Sony Space Communications Corporation(SSC)」を設立したと発表。グループ会社のソニーコンピュータサイエンス研究所が研究開発を進めてきた技術をベースに、地球低軌道の超小型衛星間などを光で接続する光衛星通信機器の開発と関連サービスの提供を計画する。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>大容量化・高速化、長距離通信に寄与</li> </ul>
技術成熟度	□TRL1～2 / □TRL3～5 / ■TRL6～8 / □TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2020年には JAXA と共同で ISS の「きぼう」日本実験棟に設置した小型光通信実験装置「SOLISS」と NICT の宇宙光通信地上局との間で双方向光通信リンクを確立し、Ethernet 経由での高精細度(HD)画像データ伝送に成功。</li> <li>2021年には同実験装置が宇宙からギリシャに設置されたコングスベルグ・サテライト・サービス社の商用光地上局へのデータ通信確立に成功。2022年には JAXA と共同で成層圏や宇宙でのインターネットサービスの技術基盤となるエラー発生環境下での完全なデータファイル転送の実証にも成功。</li> </ul>

## 9) ロイヤルメルボルン工科大学

### ■機械学習(ML)手法とその短距離光通信への応用についての包括的研究<sup>137</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>光通信システムの急速な発展に伴い、より高速な接続が求められる 100km 以下の近距離通信システムにも、従来、長距離伝送で用いられてきた高度な技術が徐々に導入されつつある。光通信の中でも特に注目されている技術の一つが機械学習(ML)である。ML は、問題解決、意思決定、パターン認識の能力が高いため、多くの困難な局面において不可欠な解決策となっている。</li> <li>特に、短距離光通信では、高精度、適応性、実装効率の良さを活かした光性能モニタリング(OPM)、変調方式識別(MFI)、信号処理、建物内・屋内光無線通信などで広く研究されている。そこで、ロイヤルメルボルン工科大学では、様々な ML 手法とその短距離光通信への応用について、既存および潜在的な利点、限界点、今後の動向に焦点を当て、包括的に評価・研究している。</li> </ul>
適用対象分野	-
技術成熟度	■TRL1～2 / □TRL3～5 / □TRL6～8 / □TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来の ML を用いたアプリケーションは、複雑な解析の処理に制限があり、手作業が必要とされていたが、近年は生データから自動的に特徴を学習する手法が提案されている。しかしこの方法では、学習用のデータが大量に必要であり、また、精度を上げるために生データを前処理する必要も考えられる。そのため今後は、リアルタイムで効率的に再学習させる方法が重要な研究課題として挙げている。</li> </ul>

<sup>136</sup> ソニーグループ株式会社 (<https://www.sony.com/ja/SonyInfo/News/Press/202206/22-023/>), (参照 2023-03-01)

<sup>137</sup> MDPI, Machine Learning Applications for Short Reach Optical Communication (2022年1月4日公開)

## 10) Skyloom

### ■リアルタイムのデータ伝送を実現する光通信ネットワークシステム<sup>138</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>Skyloom はコロラド州デンバーの通信イノベーターである。新しい宇宙通信インフラ基盤を開発、構築、運用することで地球規模のデータ伝送サービスを提供する。</li> <li>Skyloom の持つ宇宙光通信に関する高い技術力により、リアルタイムのデータ伝送を実現し、最新の情報を必要とする顧客のサービス拡張に貢献する。本サービスは、現在の無線周波数(RF)システムに比べ 10~100 倍の量のデータを地球に送信できる。また傍受や干渉の影響を受けやすい RF に比べ、より安全性が高い。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>リアルタイムのデータ伝送</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2023 年 1 月、株式会社 Space Compass と共にアジア上空に 1 機目となる静止軌道衛星 SkyCompass-1 を 2024 年末までに打上げる共同事業契約を締結したことを発表した。両者で提供する最先端の光通信ネットワークシステムにより、急速に拡大する地球観測市場にリアルタイムかつ大容量のデータリレーを直接クラウドに提供する。</li> </ul>

## 11) ESA

### ■低軌道衛星から地上への光通信回線のための規格の検討<sup>139</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS)によって、光通信に関する最初の推奨規格を発表されて以来、標準化グループの焦点は、主に低軌道衛星から地上への光通信回線のための規格に向けられている。このシナリオは、「O3K(optical on-off keying)」と称されている。</li> <li>低軌道衛星から地上への光通信回線における主な障害は乱気流とされている。この障害を緩和するためには、FEC(前方誤り訂正)コードが適切に動作する必要がある。そのため、通常物理層では長いチャンネルインターリーバが使用される。ESA に所属するオランダの研究者は、このインターリーバの長さを決める研究を行っている。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>光通信回線における規格標準化に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<input checked="" type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>本研究は CCSDS O3K 標準化活動を支援することを目的としている。</li> </ul>

<sup>138</sup> Skyloom (<https://www.skyloom.co/technology/>), (参照 2023-03-01)

<sup>139</sup> IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9268852>, (参照 2023-03-01)

## (6) ハイパースペクトルデータ解析・センサ技術

### 1) 名古屋大学

#### ■研究機関概要

【研究機関名】 大学院 環境学研究科	【所在地】 〒464-0813 愛知県名古屋市千種区不老町
【主な研究テーマ】 リモートセンシング、地質学、地球惑星物理学、気象・気候学、生態系生態学、森林学など	

#### ■ハイパースペクトル及び熱赤外データの統合処理による鉱物・岩相マッピング法開発<sup>140</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>本研究は、可視～短波長赤外域のリモートセンシングデータから酸化鉄鉱物、粘土鉱物、炭酸塩鉱物などの種類と相対量を、熱赤外域のデータからケイ酸塩岩のシリカ含有量とシリカの形態を識別・マッピングする指標を開発した。</li> <li>これら異なる波長域のスペクトル情報から得られる鉱物の種類を色相(H)、鉱物の相対量を彩度(S)、デジタル地形データ(DEM)から得られる地形情報を明度(V)に割り当てて HSV カラーモデルで統合することにより、地質学的に判読しやすいカラー画像を提供できる方法を新たに開発することができた。</li> </ul>
研究期間	<ul style="list-style-type: none"> <li>2015～2018年</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測データの応用範囲拡大に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">■TRL1～2 / □TRL3～5 / □TRL6～8 / □TRL9</p>
特徴・機能、基盤技術	<p><b>研究開始当初の背景</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>リモートセンシングは、その広域観測能力と、人工衛星の場合には世界中のあらゆる地域のデータ取得が可能という利点があるため、遠隔地での地質マッピングや地下資源探査の初期段階で幅広く利用されている。波長方向での観測バンド数が20程度まではマルチスペクトルセンサと呼ばれ、例えば Terra 衛星搭載の ASTER などが代表的である。バンド数が100程度を越える場合にはハイパースペクトルセンサと呼ばれる。</li> <li>ハイパースペクトルセンサは、米国 NASA が開発した AVIRIS のように航空機搭載のものがほとんどで、現時点では極めて限られた地域のデータしか存在しないが、今後わが国を含めた各国が衛星搭載のハイパースペクトルセンサの打ち上げを計画している。ハイパースペクトルセンサからは、可視～短波長赤外域の連続的な分光スペクトルが得られるが、マルチスペクトル用の解析方法はそのまま適用できないため、鉱物の正確な同定や含有量見積り等を行うための解析手法の確立が求められていた。一方、熱赤外域では、シリカ含有量に応じてケイ酸塩岩の分光放射率パターンが系統的に変化することが知られている。</li> <li>わが国が開発し、米国 NASA の地球観測衛星 Terra に搭載しているマルチスペクトルセンサ ASTER は熱赤外域に5つのバンドを持ち、そのデータ処理法がいつか提案されているが、単純な比演算がほとんどであり、処理結果のノイズの多さ等の問題点が指摘されている。また、昼夜の表面温度から求めた見掛け熱慣性が、岩相識別に役立つとされてきたが、熱慣性の計算に必要なデータセットが入手ににくいこと</li> </ul>

<sup>140</sup> 科学研究費助成事業 研究成果報告書 (<https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-15H04225/15H04225seika.pdf>), (参照 2023-03-01)

等から、検討が進んでいない。このため、熱赤外データを活用した岩相マッピングの手法開発が求められていた。さらに可視～短波長赤外域と熱赤外域のデータ解析手法は、それぞれ別々に発展してきたこと、各波長域のデータの空間分解能が異なること等から、2つの異なる波長域のデータを統合して処理し、効率的な地質マッピングを行える手法の開発が求められていた。

#### 研究目的

- ・ 航空機や衛星搭載センサで取得した可視～短波長赤外域のハイパー及びマルチスペクトルデータは、熱水変質鉱物や炭酸塩鉱物などの識別・同定に有効である。また熱赤外域のマルチスペクトルデータは、ケイ酸塩岩や熱慣性が異なる岩石の識別に有効である。まず、これらの波長域でのデータ解析方法を検討し、岩相識別に有効な方法を開発する。さらにこれら2つの波長域のデータ処理法は、従来別々に発展してきたため、これらの異なる波長域のリモートセンシングデータの解析結果を統合する方法を新たに開発し、広域的な地質調査や鉱床探査等に有効な鉱物・岩石マッピング法として確立する。

#### 研究の方法

- ・ 岩相マッピング及び鉱物識別・同定を目的として、可視～短波長赤外域のハイパー及びマルチスペクトルデータと、熱赤外域のマルチスペクトルデータの解析手法を検討し、従来の数学的・統計学的な考えのみに基づく方法の欠点を補い、解析結果の地質学的・鉱物学的な解釈が容易な方法を検討した。
- ・ 可視～短波長赤外域については、アンミキシングとクラスター分析を組み合わせる方法、粒度と地形効果を軽減して岩石中の酸化鉄量を推定する方法を検討した。熱赤外域については、分光放射率に基づいてケイ酸塩岩中のシリカの含有量と形態(石英結晶か非晶質シリカか)を識別する方法、昼夜の表面温度からの見掛け熱慣性により岩相識別を行う方法を検討した。最後にこれらの2つの異なる波長域のデータ解析結果を統合する方法を検討した。
- ・ 解析には航空機搭載ハイパースペクトルセンサである HyMap、AVIRIS 及び AVIRIS-NG のデータ、衛星搭載マルチスペクトルセンサである ASTER のデータを使用した。研究対象地域は、熱水変質帯や炭酸塩岩が分布し、植生被覆が少なく、リモートセンシングによる解析に適した 米国ネバダ州 Cuprite 地域及びカリフォルニア州 Mountain Pass 地域、並びにモンゴル国南ゴビの Ih-Ulziit 地域とし、画像解析結果の検証のため現地調査を実施した。

#### 研究成果(1)アンミキシングとクラスター分析を組み合わせた解析法の開発

- ・ ハイパースペクトルデータからの物質同定において、複数の物質が混在している場合にはアンミキシング解析が用いられる。まず画像から特徴的な吸収スペクトルを持つエンドメンバーを抽出し、各画素毎にエンドメンバーの存在度を算出する方法である。しかし、ほとんどの地質マッピングにおいては、対象地域の中に吸収特徴が弱い／吸収特徴がない鉱物だけからなる岩石も存在しているため、アンミキシング解析のみでは正確な地質マッピングが行えない場合が多い。
- ・ このため、観測対象のスペクトル特徴に応じてデータを分別し、各々に対して適した異なる手法を用いて解析を行う手法を開発した(Ishidoshiro et al., 2016)。まず波長 2.0～2.5  $\mu\text{m}$  での反射率の平均値を求め、閾値以下なら吸収特徴を持つ熱水変質

鉱物からなる岩石(変質岩と呼ぶ)、閾値以上なら吸収特徴を持たない非変質岩として画素を分別した。次に、変質岩として分別された画素に対しては、線形アンミキシング解析を適用した。

- ・ 線形アンミキシング解析はエンドメンバー抽出と存在度算出の二段階で構成されている。エンドメンバー抽出には新たに開発した Improved Causal Random Pixel Purity Index (ICRPPI) 法を適用した。一方、非変質岩として分別された画素に対しては、教師無し分類の代表的な既存手法である k-means クラスタリング法を適用した。k-means 法は、各画素間のユークリッド距離を基準にしているため、反射スペクトルの形状だけでなく、反射率の値そのものによって分類され、吸収特徴のないスペクトルを持つ画素の分類も可能である。
- ・ この方法を航空機ハイパースペクトルセンサ HyMap で取得された米国ネバダ州 Cuprite 地域のデータに適用した結果、明バン石、カオリナイト、モンモリロナイト、ブディングトナイトの存在度が高い地域を特定することができた。また、非変質岩のクラスタリング解析結果では、得られたクラス分布と地質図の地層分布が概ね合致していた。これらの変質岩と非変質岩のマッピング結果を統合することにより、対象地域の鉱物/岩石の正確な分布図を得られた。

#### 研究成果(2) ハイパースペクトルデータからの酸化鉄量の推定法の開発

- ・ ハイパースペクトルデータから、粒度と地形の影響を除去して酸化鉄量を見積る方法を開発した。鉄酸化鉱物の反射スペクトルは、波長 900 nm 付近の三価鉄イオンによる吸収で特徴付けられ、吸収の深さ(900D)は酸化鉄量に依存しているが、900D は鉱物・岩石の粒度や地形傾斜などの影響も受ける。地形の影響については、可視～近赤外域での放射輝度が地形傾斜に応じて一定の割合で変化することが分かっており、複数の波長での放射輝度の比をとることで補正できる。
- ・ 粒度の違いによる反射スペクトルの変化を調べるため、鉄酸化鉱物を含む米国ネバダ州の熱水変質した火山岩およびユタ州の砂岩の合計 15 試料を粉碎し、ふるいで 250~500  $\mu$  m、180~250  $\mu$  m、125~180  $\mu$  m、<125  $\mu$  m に分け、粒度毎の反射スペクトルを測定した。その結果、粒度が細くなるにつれて、反射率の上昇は見られたものの、吸収の深さ(900D)と波長位置に変化は見られなかった。
- ・ また 550 nm での反射率は、粒度に拘わらず一定で、波長 760 nm と 550 nm での反射率の差が、粒度と線形関係にあることが分かった。このため、波長 760 nm と 550 nm での反射率の差を元の反射率から引くことにより、粒度による反射率変化を補正することができる。この粒度補正を施した後、Continuum-removal 法を反射スペクトルに適用することにより、地形の影響の抑制を行うことができる。こうして処理した反射スペクトルでの波長 900 nm 付近での吸収深さを MCR-900D と呼ぶ。
- ・ 次に岩石試料の酸化鉄量実測値と MCD-900D との関係式をヘマタイト、ジャロサイト、ゲーサイトの 3 つの鉄酸化鉱物について求めた。提案手法を航空機搭載ハイパースペクトルセンサ AVIRIS で取得した米国ネバダ州 Cuprite 地域データに適用した。まず吸収波長から鉱物種を決め、3つの関係式から一つを選び、MCD-900D から酸化鉄量を求めた。こうして作成した酸化鉄量図では、対象地域の熱水変質帯のゾーニングが示され、既存の変質帯分布図とも整合的であった。また地形効果が抑制されていることが、画像上で確認できた。

### 研究成果(3) 見掛け熱慣性の解析法の開発

- 熱慣性とは、物質の熱伝導率や比熱などで決まる物理量で、物質の温度変化のし難さを示しているが、リモートセンシングによって直接計測することは困難である。過去の研究では、リモートセンシングで得られる昼夜の温度差( $\Delta T$ )とアルベドから見かけ熱慣性(Apparent Thermal Inertia :ATI)を求める手法が考案されているが、表面状態の変化による熱慣性への影響を防ぐために時間間隔の短い(大凡 3 日以内)昼夜データセットが必要とされてきた。
- しかし、地球観測衛星では軌道の制約から短期間での昼夜データセットの取得が難しく、適用できる機会が少なかった。こうした問題を解決するため、本研究では、地質マッピングに役立ち、かつ地球観測衛星データに適用可能な新しい ATI 手法を提案した(浅野ほか、2015)。ATI に対して最も大きな影響を示す  $\Delta T$  に着目し、様々な時期の組み合わせの  $\Delta T$  を調べた。
- その結果、夏の昼間データから得られる地表面温度の最高値と、冬の夜間データから得られる最低値から計算した  $\Delta T$  が、従来の ATI で求められる時間間隔の短いデータセットから得られる  $\Delta T$  と相関が高いことが判明した。すなわち、これまでに蓄積された膨大な ASTER データのアーカイブの中から、夏の昼間と冬の夜間のデータを選び出して用いることで、短期間取得データでなくとも ATI を求められることになる。
- 衛星データから得られた  $\Delta T$  と表層の状態との関係を検証するため、米国ネバダ州 Cuprite 地域の複数地点で温度測定および表層の観察を行った。温度ロガーにより 3 ヶ所で昼夜の連続的な地中温度を測定した。また接触式温度計により深さ約 15cm までの地中温度プロファイルを測定した。
- その結果、衛星データで地表面の  $\Delta T$  が大きい地点では、現地実測での地中温度の  $\Delta T$  も相対的に大きいことが確認された。また、衛星データでの  $\Delta T$  が大きい地点では、表層直下(深さ 2cm~10cm)での温度勾配が大きかった。これは、表層から深さ約 2 cm まで開放的な空隙率の高い礫が占めており、層内を大気が循環し、温度が大気温度と近くなりやすいのに対して、 $\Delta T$  が小さい地点では表層の基質が緻密で密度が高く、大気循環が相対的に起こりにくいと思われる。
- つまり地表面温度データに地下の状態が反映されているため、ATI は地表面下の情報を提供できることが分かった。具体的には ATI によって形成時代の異なる沖積層を識別することができた。

### 研究成果(4) HSV カラーモデルを用いた統合手法の開発

- リモートセンシングデータから地質学的に知りたい情報は、可視~近赤外域(鉄酸化鉱物)、短波長赤外域(粘土鉱物、炭酸塩鉱物)、熱赤外域(ケイ酸塩鉱物)のように異なる波長域に分散しており、観測データからそれぞれの鉱物・岩相指標として抽出する手法が別個に研究されてきた。
- しかし、既存の指標を単純に RGB に割り当ててカラー合成する等の方法では、処理結果の地質学的な解釈がかえって難しくなるという問題がある。そこで異なる波長域の岩相指標と地形データを統合し、地質学的に解釈しやすい画像を作成する手法を新たに開発した(倉田・山口、2018;Kurata and Yamaguchi, 2019)。

- ・ 熱水変質帯の中心から周囲に向かって明バン石、カオリナイト、モンモリロナイトなどが累帯構造を形成することがあるが、これらの鉱物の可視～短波長赤外域での反射スペクトルパターンの違いを直交変換によって指標化した。炭酸塩岩については、短波長赤外域の波長  $2.35 \mu\text{m}$  付近での吸収特徴に基づいて識別した。
- ・ 熱赤外域では、ケイ酸塩岩のシリカ含有率と形態(石英結晶か非晶質シリカか)の違いが、放射率パターンに反映されることが知られている。まずシリカ含有率やシリカ形態が異なる(石英結晶と非晶質シリカ)ケイ酸塩岩の分布地点を何点か選び、それぞれの地点の放射率スペクトルを ASTER TIR 放射率プロダクトから確認し、直交変換を用いてそれらのパターンを指標化する方法を考案した。
- ・ 一方、地形情報も岩相マッピングや調査地点位置を知るために重要である。このため、DEM データから地形をグレースケールで表現する手法として、斜面の傾斜を表す「反転スロープ」と、尾根・谷の強調に優れる「開度」の2つの地形特徴量を重みを付けて組み合わせる新たな指標を開発した。この指標は、照射方向(光源)依存性がないという利点がある。これらのスペクトル情報と地形情報を統合し、一枚のカラー画像として表現するための手段として、HSV カラー表色系を採用した。
- ・ すなわち HSV 表色系で色を表す3成分について、H(色相)に鉱物や岩石の種類を示す指標、S(彩度)に対象とする鉱物などの相対量を示す指標、V(明度)に地形情報を割り当てて統合・表示した。この統合法により、空間分解能  $30 \text{ m} \sim 90 \text{ m}$  の指標が割り当てられた H と S が、空間分解能  $10 \text{ m}$  の地形情報が割り当てられる V によって見かけ上、高分解能化(パンシャープン)された。この方法で作成したカラー画像は、地質学的な情報を視覚的にとらえやすいことが確認できた(図 1)。

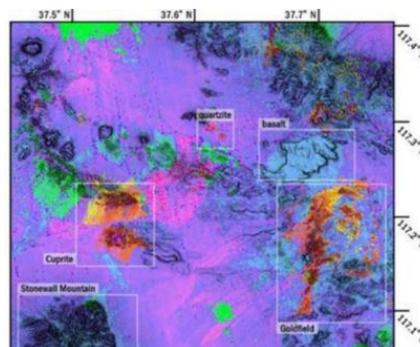


図 1 HSV カラーモデルによる岩相指標と地形の統合表示(Kurata and Yamaguchi, 2019)。米国ネバダ州 Cuprite 地域(右が北方向)。赤～黄色は熱水変質帯、緑色は石灰岩、水色は玄武岩、赤紫色はケイ化帯またはケイ岩。画像の明るさが地形を表現している。

### 課題と今後の展開

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

- ・ これまで可視～短波長赤外域のスペクトルデータと熱赤外域のスペクトルデータの処理は別個に行われることが多かったが、本研究で開発した鉱物・岩相マッピング法によって統合して処理・表示を行うことが可能となり、地質学的に解釈し易い1枚のカラー画像として提供することができる。
- ・ これにより、金属資源探査の重要なターゲットである熱水変質帯や炭酸塩岩などの分布を、衛星や航空機搭載センサのデータから効率的にマッピングすることができるため、乾燥地域等の過酷な環境下での地下資源探査や地質マッピングを効率化することが期待される。

## 2) 千葉大学

◆ 樋口 篤志 准教授

### ■ 研究機関概要

【研究機関名】 環境リモートセンシング研究センター
【所在地】 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
【主な研究テーマ】 衛星気候学、大気陸面相互作用、リモートセンシング

### ■ アマゾン熱帯雨林の植生指標の検出<sup>141</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021年1月、千葉大学環境リモートセンシング研究センターが参画する NASA Ames 研究センター等との国際共同研究チームは、独自の解析アルゴリズムを次世代静止気象衛星<sup>※1</sup>GOES-16 の観測データに適用し、アマゾン熱帯雨林の植生指標<sup>※2</sup>の解析を行った。その結果、雲に隠れがちで従来の極軌道衛星<sup>※3</sup>による観測では検出できなかった、熱帯雨林における植生指標の季節変動に関する情報の検出に成功した。</li> <li>本研究成果は、アマゾン熱帯雨林の環境変化が地球にもたらす影響の更なる理解につながる成果として期待される。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測データの応用範囲拡大に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<p style="text-align: center;">■TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / □TRL9</p>
特徴・機能、基盤技術	<p><b>研究背景</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>世界最大の熱帯雨林であるアマゾン熱帯雨林は、一般的には「常緑林」と理解されているが、NASAの極軌道衛星に搭載されたMODIS<sup>※4</sup>による解析結果によると、一年のある時期に新緑の芽吹きがあると考えられていた。</li> <li>しかし、そのタイミングを正確に捉えるためには数日~数週間といった短い期間で地表面に関する情報を得る必要があるが、極軌道衛星では1日1回しか観測できず、雲に覆われると地表面の計測は不可能なこと(図1)から、十分な情報を得られずにいた。</li> <li>千葉大学環境リモートセンシング研究センターでは、2015年から世界に先駆けて運用されている次世代静止気象衛星、ひまわり8号のデータ解析に関する研究を重ねてきた。その成果の一つである、同センターの竹中栄晶特任助教が開発した精密幾何補正<sup>※5</sup>アルゴリズムでは、これまでより精緻な位置情報に基づく解析が可能となった。</li> <li>2017年に運用開始した次世代静止気象衛星 GOES-16 には、ひまわり8号とほぼ同等の機能を持つABI<sup>※6</sup>が搭載されている。ABIは、MODISと類似した観測バンドを持ち、かつ観測頻度は1日1回から10分~30分に1回と飛躍的に向上したことから、アマゾン熱帯雨林の雲に覆われていないABIの観測データ数は、2018年の</li> </ul>

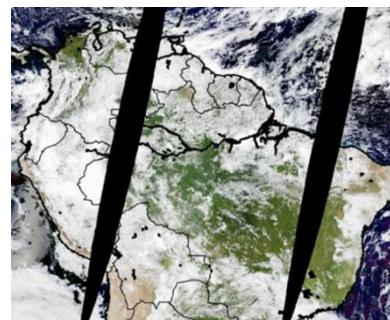


図1 極軌道衛星 Terra に搭載された MODIS による 2021 年 1 月 1 日の観測例。1 日 1 回しか観測できず、雲に覆われると地表面の計測は不可能。

<sup>141</sup> 千葉大学 (<https://www.chiba-u.ac.jp/general/publicity/press/files/2020/20210201goes16.pdf>), (参照 2023-03-01)

解析では MODIS の約 24 倍にも達した。そこで研究チームは、得られた GOES-16 の観測データに、千葉大学の精密幾何補正解析アルゴリズムを適用することで、アマゾン熱帯雨林の季節変化に関する情報を得ることを試みた。

### 研究成果

- 2018 年のデータを解析した結果、植生の活性度を示す植生指標(NDVI)の最大値と最小値の差(図 2)はアマゾン熱帯雨林の面積で約 85%、数値にして従来の MODIS 解析で得られた差の約 3 倍、明確な差として存在したことが今回の解析により明らかになった。
- さらに地域的な違いに着目すると、高い植生活性度は月降水量の少ない乾季に多く見られるものの、地域性がかなり強いことも分かった(図 3)。
- 本研究結果は、この地域の熱帯林は水よりも太陽光(雲で覆われる頻度)がその生態を決める主要な条件であり、雨季より雲被覆が減る乾季に、より多くの太陽光が降り注ぐことが新緑の芽吹きに拍車をかけることが推察された。この結果はアマゾン熱帯雨林の気候変動に対する植生応答に関するこれまでの科学的知見と整合的だった。

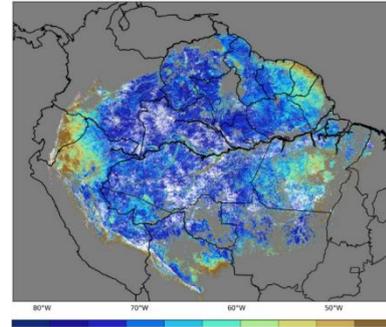


図 2 次世代静止気象衛星 GOES-16 による、2018 年の雲に覆われていない観測データから得られた植生指標 NDVI の最大値と最小値の差のマップ。白い地域は統計的に明瞭な差が得られなかった地域を示す。

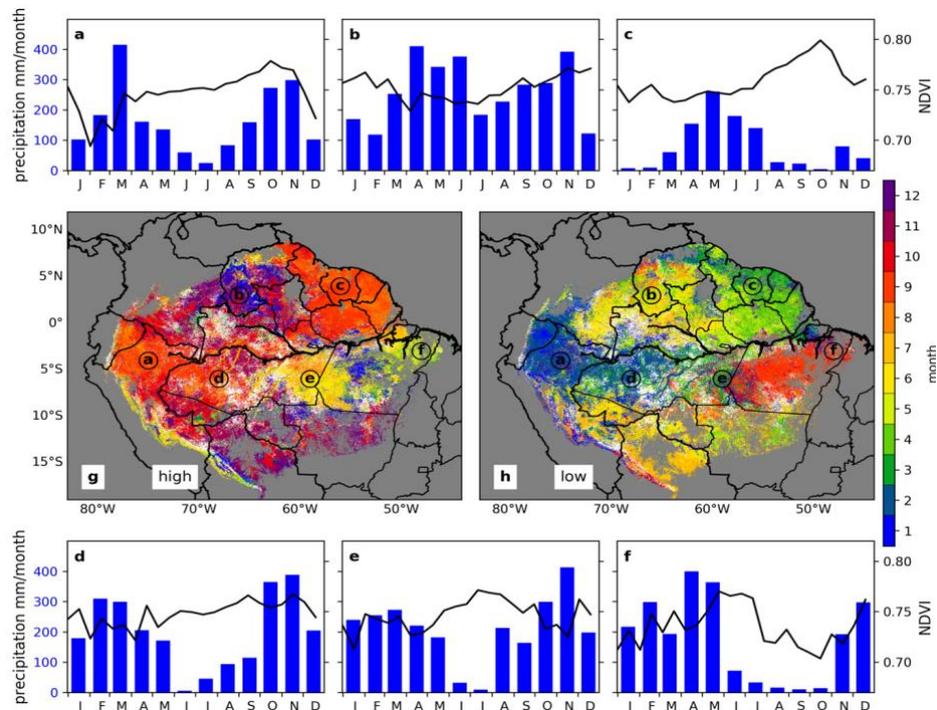


図 3 アマゾン常緑林における植生指標 NDVI の季節変化をまとめたもの。a~f のグラフは図 g, h 中で中丸文字で示した地域における月降水量(棒グラフ)および植生指標(実線)の季節変化を示す。図 g は植生指標が最大値を取る月、図 h は最小値を取る月をマップで色別に表示した。両マップ上で白い地域は統計的に優位な差が見られなかった地域を示す。

### 課題と今後の展開

- 本研究成果は惑星モニタリングの新たな可能性を示すものであり、大気・陸域・海洋における日周期を伴い変化する現象解明につながると共に、農業、(洪水・渇水等

	<p>の)水文過程、ならびに災害監視に関する意思決定にも役立つ。</p>
<p><b>関連動向</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2021年1月、本研究成果は、国際学術誌 Nature Communications に掲載された。</li> <li>• 本研究は日本側の経費として、地球気候系の診断に関わるバーチャルラボラトリーの形成(VL)、および JST CREST/EMS 「協調分散型 EMS における地球科学情報の可視化向上とエネルギー需要モデルの開発」(代表 東海大学教授 中島孝)の支援を受け遂行された。</li> </ul>

### 3) 産業技術総合研究所

#### ■研究機関概要

【研究機関名】 人工知能研究センター

【所在地】 〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-7 産業技術総合研究所 臨海副都心センター 別館

#### ■AI 向けクラウド ABCI で処理した衛星のレーダー画像をカラー化し公開<sup>142</sup>

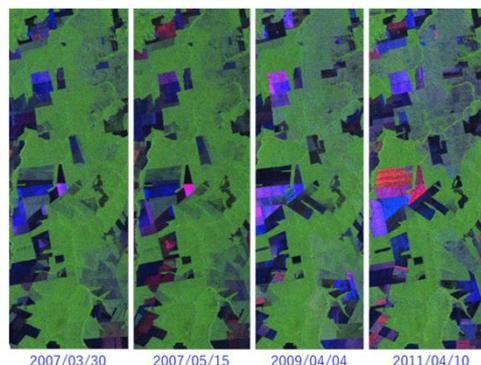
<p>研究概要/技術概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022 年 5 月、産総研と東工大の研究チームは、産総研が保有する人工知能処理向け計算機である「ABCI」を用いて衛星マイクロ波センサ「PALSAR」が取得した全ての SAR データの画像処理を行った。また、全世界を対象に地表面の状態に応じて色分けされたカラーレーダー画像を作成してオープン&amp;フリーポリシー（CC BY）で公開した。</li> </ul> <div data-bbox="531 728 1257 1070" data-label="Diagram"> </div> <p style="text-align: center;">図 1 ABCI 上でのレーダー画像のカラー化</p>
<p>適用対象分野</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種衛星データを統合的に捉えるためのフレームワークの構築に寄与</li> </ul>
<p>技術成熟度</p>	<p style="text-align: center;">□TRL1～2 / ■TRL3～5 / □TRL6～8 / □TRL9</p>
<p>特徴・機能、基盤技術</p>	<p><b>開発の社会的背景</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>衛星データは観測領域が広いいため取得するデータ量が多く、従来は衛星の観測能力と取得したデータを処理する計算機能力にギャップがあり、取得した全データをタイムリーに全数処理することが困難なため選択的なデータ処理が行われてきた。また、近年では衛星能力の向上に伴い観測の広域化、高解像度化が進み取得されるデータ量が一層増加している。</li> <li>近年、社会活動や企業活動の一部として世界的に衛星データ利用が拡大しており、衛星が取得したデータのタイムリーな全数処理が、衛星データの提供者と利用者の双方から求められている。2017 年に運用開始した次世代静止気象衛星 GOES-16 には、ひまわり 8 号とほぼ同等の機能を持つ ABI が搭載されている。</li> <li>ABI は、MODIS と類似した観測バンドを持ち、かつ観測頻度は 1 日 1 回から 10 分～30 分に 1 回と飛躍的に向上したことから、アマゾン熱帯雨林の雲に覆われていない ABI の観測データ数は、2018 年の解析では MODIS の約 24 倍にも達した。そこで研究チームは、得られた GOES-16 の観測データに、千葉大学の精密幾何補正解析アルゴリズムを適用することで、アマゾン熱帯雨林の季節変化に関する情報を得ることを試みた。</li> </ul> <p><b>研究の経緯</b></p>

<sup>142</sup> 産総研 ([https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2020/pr20200522/pr20200522.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20200522/pr20200522.html)), (参照 2023-03-01)

- ・ 産総研では資源探査を中心に JERS-1 (OPS、SAR)、ASTER、PALSAR、HISUI といった衛星搭載センサの開発や利用法の研究、新規センサ開発に関する研究を行ってきた。
- ・ 2018 年には ABCI 稼働に合わせ、ビッグデータの一つである衛星データに AI 技術を適用し、大量のデータから効率的に地表面にあるモノや地表面の変化を識別し、その要因や発生している事象を認識するための研究を進めるとともに、高温検知システム Hotarea や、ゴルフ場、メガソーラー(太陽光発電所)などの教師データのセットを公開してきた。
- ・ 最近では衛星データの中でも、画像の判読は難しいが天候や昼夜の影響を受けない SAR データに注目し、地表面上のモノや変化を容易に識別・認識するための研究を進めている。今回は、ABCI 上での衛星データ処理の実用性を確認するため経済産業省と宇宙開発事業団(現 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構)が開発した PALSAR のデータを用いて評価・検証を行った。

#### 研究の内容

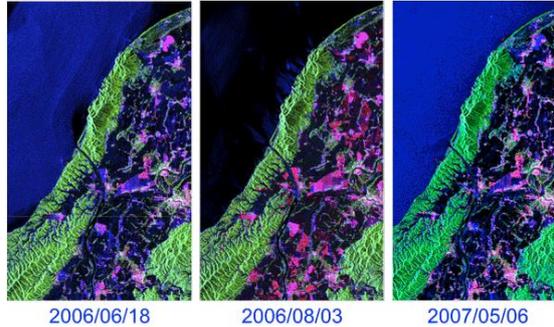
- ・ 今回、ABCI 上での衛星データ処理の実用性を確認するため産総研が保有する PALSAR データを用い、①処理環境の構築、②一部のデータを用いた処理動作と精度の確認、③全数データ処理の順序で評価・検証を行った。
- ・ 処理環境の構築では、ビッグデータ処理での利用が拡大しているコンテナプラットフォームや商用の SAR データ解析ソフトウェアを利活用し、ABCI 上に SAR 画像処理環境を構築した。その後、PALSAR データの一部を用いて画像処理が正常に行われること、また作成した PALSAR 画像の精度は国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構が提供する PALSAR 画像と同等であることを確認した。
- ・ 以上の準備の後、5 年 3 ヶ月の PALSAR 運用期間に取得された約 200 万シーン(1 日平均約 1,000 シーン)のデータに対し、ABCI を用いた並列処理(300)により、約 3 ヶ月(1 日平均約 20,000 シーン)という短期間で全データの画像処理を完了した。
- ・ 続いて、衛星データの全地球全数処理の有用性を示すため、4 偏波モードで取得した PALSAR データを用いて散乱電力分解を行い、地表面の状態(散乱モデル)に応じて色分けしたカラーレーダー画像として地図化した。散乱モデルには主として 4 種があり、カラーレーダー画像では表面散乱を青色に、二回反射散乱を赤色に、体積散乱を緑色に色分けした。なお、ヘリックス散乱は赤色と緑色に均等に割り当てた。



©AIST、原初データ提供者JAXA/METI

図 2 南米における森林伐採の様子

- ・ 図 2 は、南米の熱帯雨林の時系列変化の一例である。体積散乱が多くみられる森林部分は緑色、表面散乱が多くみられる伐採地は青色で示され、時系列変化を見ると森林(緑色)が伐採(青色)されていく様子が見て取れる。また、赤色は二回反射散乱が多くみられることを表し伐採後に新たに草木が成長してきたと推測できる。このことから、熱帯雨林域の定期的な観測により伐採過程が把握でき、計画外の違法伐採などの検知が期待できる。



©AIST、原初データ提供者JAXA/METI

図 3 越後平野における稲作の時系列変化

- ・ また、図 3 は越後平野での稲作の時系列変化の一例であり、6 月(左図)と 8 月(中央図)を比べると、苗や稲がそれほど成長していない 6 月では表面散乱(青色)が多くみられ、稲が成長してくる 8 月では二回反射散乱(赤色)が多くみられる。翌年 5 月(右図)を見ると 6 月とほぼ同様の様相であり、稲作での季節性を確認できる。このことから広域での稲作の発育状況や分布を把握でき、生産量管理などへの利用が期待できる。
- ・ SAR 衛星は夜間や降雨時にも観測でき、世界中の地表面情報を定期的に取得できる。そのため、地表面上のモノや変化の識別・認識が容易となるカラーレーダー画像を作成し公開することで、大規模違法伐採監視や広域での米の生産量管理の他、グローバルな水産管理、インフラ保全といった地球規模の社会課題解決への貢献が期待できる。
- ・ また、成果をオープン&フリーポリシーで公開することで新たな衛星データ利用の創出を期待するとともに、政府系衛星データの一層のオープン&フリー化の推進に寄与していきたい。

#### 課題と今後の展開

- ・ 今後増え続ける衛星データに対し、ABCI 上での衛星ビッグデータ処理を種々の衛星データへ拡大するためのケーススタディーを進めるとともに、他の衛星データプラットフォームと容易に連携するための研究を進め、衛星能力をフル活用できる仕組みを構築する。
- ・ また、SAR データの利便性向上のため、カラーレーダー画像と AI を組み合わせて全球の土地利用土地被覆分類の研究を進め、利用者が理解しやすい SAR 分析画像の開発を進める。
- ・ さらに、今後爆発的な増大が予測される種々の衛星データ(光学センサ、SAR センサ、ハイパースペクトルセンサなど)に対し、それらを統合的に分析し全球の変化を効率的に捉えるためのフレームワーク構築を目指す。

#### 4) パナソニックホールディングス株式会社

##### ■企業概要

【本社所在地】 〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-7-3	【設立】 1921 年
【主な事業内容】 重電システム、産業メカトロニクス、情報通信システム、電子デバイス、家庭電器 等	

##### ■世界最高感度のハイパースペクトルイメージング技術を開発<sup>143</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>2023 年 1 月、世界最高感度<sup>*1</sup>でハイパースペクトル画像<sup>*2</sup>を撮影する技術を、医療や宇宙探索の分野で活用が進む圧縮センシング技術<sup>*3</sup>を用いて開発した。本技術により、肉眼では判別できないわずかな色の違いを、従来のカラーカメラ<sup>*4</sup>と同様の操作性で識別できるようになり、画像分析・認識の精度向上が可能になる。</li> <li>こうしたハイパースペクトル画像撮影を実証した世界初の研究成果として、ベルギーの研究機関である imec との連名で英国科学雑誌「Nature Photonics」のオンライン版に 2023 年 1 月 23 日に掲載された。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>画像分析・認識の精度向上に貢献</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1～2 / <input type="checkbox"/> TRL3～5 / <input type="checkbox"/> TRL6～8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
特徴・機能、基盤技術	<p><b>開発経緯</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>画像認識技術の進化に伴い、画像データを産業的に利用し効率化・省人化・省エネルギー化を可能にする、マシンビジョンの応用が広がっている。マシンビジョンでは画像をコンピュータで認識するため、人間が知覚できない情報、例えば連続的な色変化(スペクトル情報)を用いた解析が可能になる。スペクトル情報をもつ画像はハイパースペクトル画像と呼ばれ、マシンビジョンの応用範囲を拡大する役割が期待されている。</li> <li>従来のハイパースペクトル画像撮影では、プリズムなどの光学素子や、特定の色(波長)の光を選択的に通すフィルタが用いられていました。しかし、これらの方法は光を波長ごとに分けて検出するため、波長の数に反比例して光の利用効率、つまり感度が低下するという物理的な制約がありました。そのため、撮影時には晴れた日の屋外に匹敵する明るさの照明(照度 10,000 ルクス以上)が必要となり、操作性・汎用性に難があった。</li> <li>今回開発したハイパースペクトル画像撮影技術では、観測データを“間引く”ことで効率的に取得し、演算処理で“間引かれる前”のデータを復元する、圧縮センシング技術を応用した。これは、医療現場での MRI 検査やブラックホール観測でも使われている手法である。複数波長の光を通し画像データを適切に“間引く”特殊フィルタをイメージセンサ上に搭載し(図 1)、独自のデジタル画像処理アルゴリズムによりデータを復元した。</li> <li>ソフトウェアが色を分ける機能の一部を担うことで、従来技術の課題であった波長数と感度の制約を突破した。これにより、世界最高感度のハイパースペクトル画像撮影(図 2)、さらには室内照明(550 ルクス)下での動画撮影(図 3)を実現した。</li> </ul>

<sup>143</sup> パナソニック ホールディングス株式会社 (<https://news.panasonic.com/jp/press/jn230126-1>), (参照 2023-03-01)

## 1. 複数波長の光をランダムに通す特殊フィルタの開発

- 従来のハイパースペクトル画像撮影では、プリズムなどの光学素子や、特定の波長の光を選択的に通すフィルタを用いて、イメージセンサの画素ごとに割り当てられた波長の光を検出していました。しかしこれらの方法は、画素ごとに見ると「割り当てられた波長」以外の波長の光が検出されず、波長の数に反比例して感度が低下する、という物理的な制約がありました。
- そこで当社は、分散ブラッグ反射器<sup>※5</sup>(Distributed Bragg Reflector; DBR)と呼ばれる、光の持つ波の性質を利用した構造を用いて特殊フィルタを開発し、イメージセンサに搭載した(図 1a,b)。この特殊フィルタは、観察対象から放たれた光を、画素ごと・波長ごとに強度をランダムに変えて通すように設計されている(図 1c)。
- 画素ごと・波長ごとに強度を変化させることがデータの“間引き”に相当する。適切に“間引かれた”状態で検出することで、“間引かれる前”の状態がソフトウェア上で復元可能になる。本技術では、ソフトウェア上の復元で色分離が行われるため、ソフトウェアが色を分ける機能の一部を担うことになり、従来のハイパースペクトル画像撮影技術が抱えていた、感度における物理的な制約を突破した。

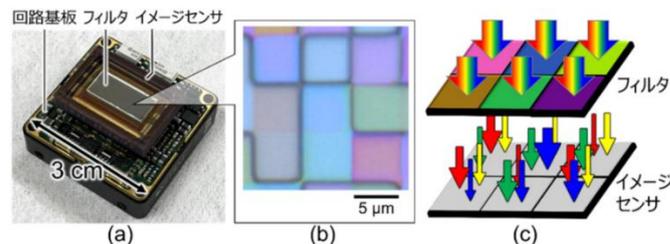


図 1 開発したハイパースペクトル画像撮影技術の概要

- (a): 特殊フィルタを搭載したイメージセンサの外観写真
- (b): 特殊フィルタの光学顕微鏡写真
- (c): 観察対象の光を特殊フィルタで“間引いて”検出するイメージ図

## 2. 世界最高感度(従来比約 10 倍)のハイパースペクトル画像撮影

- 上述の特殊フィルタを用いると、複数波長の光が通るためイメージセンサが検出する光が増え、感度が向上します。具体的には、開発した特殊フィルタは入射した光のうち約 45%を通す。これは、従来技術における光利用効率率(5%以下)に比べ約 10 倍高く、世界最高の感度となる。
- 一般的なオフィス照明程度の明るさ(550 ルクス)で撮影した例では、開発技術では明瞭に撮影できています(図 2a)が、従来技術ではうっすらと見えるのみ(図 2b)となっている。このように、開発したハイパースペクトル撮影技術では、従来のハイパースペクトルカメラが必要とした極端に明るい特殊照明(10,000 ルクス以上)を用いることなく、鮮明な撮影を可能にした。
- 開発した特殊フィルタとソフトウェア上での色復元を用いて、可視光線(波長 450–650nm)の領域を 20 波長に分けたハイパースペクトル画像の撮影に成功した。特殊フィルタによるデータの“間引き”が適切に行われているため、ソフトウェア上で正確に色を分離することができ、色見本撮影例(図 2c)のように正しいスペクトル情報が得られている。20 波長と非常に多くの色情報を検出することができるため、赤・緑・青の 3 色のみを見分けられる肉眼やカラーカメラに比べ、画像分析・認識の精度が

向上する(活用例は後述)。

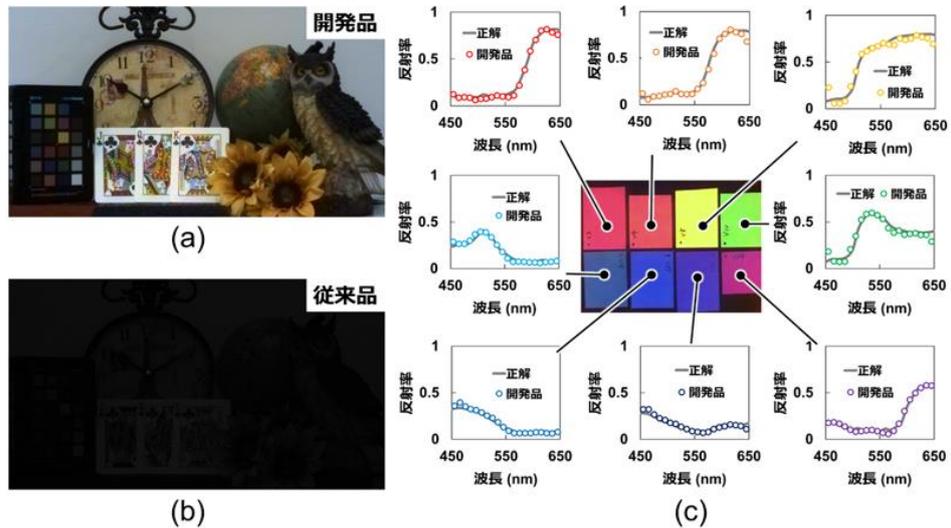


図2 開発品と従来品の感度比較と、開発品のハイパースペクトル画像撮影結果

(a) :550ルクスの照明下において開発品で撮影した画像

(b) :550ルクスの照明下において従来品で撮影した画像

(c) :色見本を並べ、開発品で20波長分のハイパースペクトル画像を撮影した結果

### 3. 高フレームレートによる高い操作性の実現

- 従来品のハイパースペクトル画像撮影技術における課題に、低い感度に起因した低いフレームレート、及びそれによる操作性の悪さがある。フレームレートが低いと映像がコマ送りのように表示され、撮影時にピント合わせや位置合わせが難しくなり、操作性が著しく悪化してしまう。
- これに対して、本技術でハイパースペクトル画像を撮影する場合、感度が高いため短いシャッター時間で撮影が可能となる。さらにソフトウェア上での色分離を独自のアルゴリズムで高速化することで、フレームレートが30fpsを超えた高速なハイパースペクトル画像取得に成功した(図3)。30fpsを超えるフレームレートは人間には滑らかな動画として認識されるため、ピント合わせ・位置合わせなどの操作を容易に行うことができる。

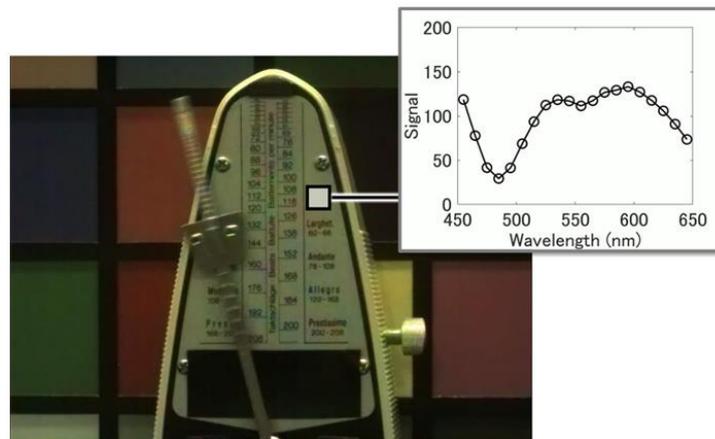
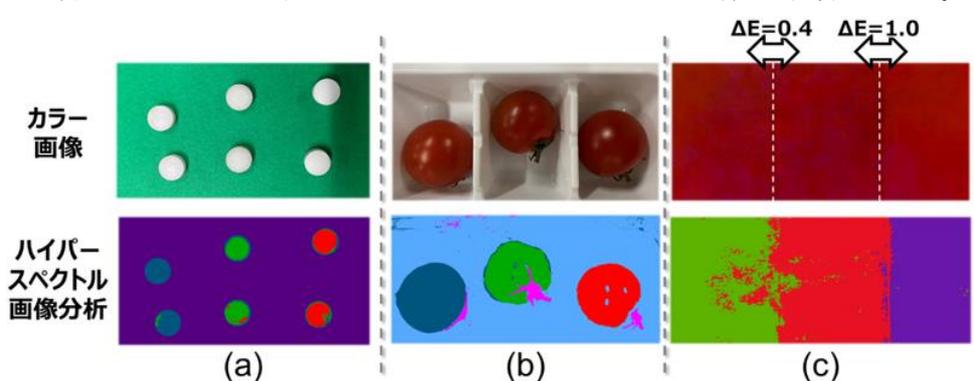


図3 開発した特殊フィルタと独自アルゴリズムで撮影した動画の1フレームと抽出されたスペクトル情報 (LED照明の特徴的なスペクトルが見えている)

発表論文中([Supplementary Video](#))で元の動画が視聴できます

	<p><b>ハイパースペクトル画像の活用例</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 白色系錠剤の判別 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 同じ白色系の錠剤でも、含まれる成分によりわずかに色が異なり、ハイパースペクトル画像から判別できる場合がある。図 4a では 3 種類の白色系錠剤を判別している。</li> </ul> </li> <li>2. 生鮮食品の検査 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生鮮食品の成分、例えばトマトの糖度はスペクトル情報と相関があり、ハイパースペクトル画像を用いて検査することができる(図 4b)。感度が高く、明るい照明が必要な開発技術は、温度上昇を嫌う生鮮食品や医薬品の検査と好相性である。</li> </ul> </li> <li>3. 塗装ムラの検査 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人間では違いが判らないほどわずかな色の違いでも、ハイパースペクトル画像を用いると見分けることができる。図 4c では色差<sup>※6</sup>(<math>\Delta E</math>)が 0.4 や 1.0 という、肉眼では判別できないほどわずかな色の違いをハイパースペクトル画像から見分けている。</li> </ul> </li> </ol>  <p>図 4 ハイパースペクトル画像を用いた分析・検査例  (a):白色系錠剤の分析  (b):トマトの糖度推定  (c):塗装板の品質検査</p>
<p><b>課題と今後の展開</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 今後は本技術の活用により、色情報に基づいて高精度に画像分析・認識を行う新たなセンシングソリューションや、高感度なハイパースペクトル画像撮影技術によるマシンビジョン用途の拡大を、パートナー様との共創も検討しながら目指す。</li> </ul>

※1 2023 年 1 月 26 日時点。

※2 光の波長ごとに取得された画像の中で、波長数が 4 以上のものをマルチスペクトル画像、さらに波長数が概ね 10 以上のものをハイパースペクトル画像と呼ぶ。

※3 少ない観測データからより多くの信号を復元する手法。観測対象データがある表現空間(例えば周波数空間)では偏った分布になるという性質(スパース性)を利用する。MRI の高速化技術に応用されているが、近年ブラックホールの観測にも使われた。

※4 赤、緑、青の三種類のフィルタをイメージセンサ上に搭載し、三色の比率で色を表現するカメラ。デジタルカメラやスマートフォン搭載のカメラはほぼこれにあたる。

※5 光の波長を  $\lambda$  とした時、その光を通す媒質(厚み  $d$ 、屈折率  $n$ )を  $d = \lambda / 4n$  となるように周期的に配置した構造。波長  $\lambda$  における光の反射率を制御することができる。

※6 2 つの色の違いを定量的に表す指標。一般に  $\Delta E = 1.0$  を下回ると、2 つの色を横に並べて見比べてとしても肉眼では違いが判別できなくなる。

## 5) 北海道衛星株式会社(現 Iris 株式会社)

### ■企業概要

<p>【本社所在地】 〒106-0032 東京都港区六本木 4-8-1 【設立】 2020 年</p> <p>【主な事業内容】 ハイパースペクトルカメラの研究開発・販売・製造・カスタマイズ、ハイパースペクトルデータ計測サービス、マルチスペクトルカメラの研究開発・販売・製造・カスタマイズ 等</p>
---

### ■学術・研究用途向け廉価版ハイパースペクトルカメラの開発<sup>144</sup>

<p><b>研究概要/技術概要</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>北海道衛星株式会社は、2005年に北海道から人工衛星を打ち上げる「北海道衛星構想」をもとに設立。人工衛星搭載用の高性能光学センサとして、ハイパースペクトルカメラを開発した。2006年9月に人工衛星「HIT-SAT」を打ち上げ、その後も業界のパイオニアとしてハイパースペクトルカメラの製造・販売の会社としてこれまで様々な企業と連携してきた。</li> <li>2021年4月、日本において、諸外国に比べてハイパースペクトルカメラが学術用途に活用されていない原因の一つである「コストの高さ」を解消するため、廉価版「Cosmos Eye series HSC 1701-Lite」を開発。同年5月から販売を開始。</li> <li>部品の一つ一つをコストと実用の観点から検証し、学術用途で使用する場合には問題のない範囲で再構成することで、従来よりも大幅に価格を抑えることに成功。学術用途以外でも、使用する波長域次第では導入が可能である。</li> </ul>
<p><b>適用対象分野</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>カメラの低価格化に寄与</li> </ul>
<p><b>技術成熟度</b></p>	<p style="text-align: center;">□TRL1~2 / □TRL3~5 / □TRL6~8 / ■TRL9</p>
<p><b>特徴・機能、基盤技術</b></p>	<p><b>開発経緯</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>従来のハイパースペクトルカメラは1台500万円以上と高価なため研究では扱わず、少ない年間の科研費の枠では購入できないものが多くなっている。</li> <li>そのため北海道衛星では短期間のレンタルやリースなどの利用を積極的に進めているが、用途によっては長期間の撮影が必要になる場合もあり、予算のために利用を諦めるケースもあった。</li> <li>ハイパースペクトル領域の研究の振興のために、今回の廉価版の開発に踏み切った。北海道衛星代表の佐鳥氏は大学での教授歴が長く、そうした研究者の事情を考慮して、ハイパースペクトル領域の研究の振興のために、今回の廉価版の開発に踏み切った。</li> </ul> <p><b>特徴</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>波長分解能をそのままに、波長域を主要な研究で使用する可視広域 450nm～900nm に絞ることで価格を抑えることに成功した。</li> <li>主な使用用途は、成分分析、異物検知、植生の調査、傷や汚れの可視化 など</li> </ul>
<p><b>課題と今後の展開</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「Cosmos Eye Series HSC1701-Lite」の販売に関して、Milk. 株式会社マーケティング支援・代理店契約を結んでいる。</li> </ul>

<sup>144</sup> 北海道衛星株式会社(現 Iris 株式会社) (<https://hokkaido-sat.co.jp/news/1701-lite/>), (参照 2023-03-01)

6) 国立研究評議会(CNR)

◆ Monica Pepe 他

■ 研究機関概要

【研究機関名】 環境電磁波センシング研究所(IREA)
【所在地】 イタリア、ナポリ

■ PRISMA ハイパースペクトルデータを活用した農耕地における非光合成植生の検出と分類<sup>145</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>CNR は、イタリアの科学技術の進歩を促進するために優先的に関心のある分野で活動を行う幅広い科学的能力を備えた国立研究機関である。1989 年以来、大学科学技術研究省の監督下に置かれている。CNR の研究活動は、全国にある 107 の研究機関を通じて推進および実施されている。</li> <li>環境電磁波センシング研究所(IREA)は、人工衛星、航空機、現場などで稼働する電磁波センサによって得られる画像やデータの取得、処理、融合、解釈のための方法論と技術を開発し、環境と領域のモニタリング、非侵襲診断、電磁波リスク評価を行い、抽出した情報を普及させることを目的としている。</li> <li>2020 年 11 月、IREA はイタリア宇宙庁(ASI)のハイパースペクトル衛星センサである「PRISMA(PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa)」を活用して、非光合成植生(NPV)モニタリングに対する性能評価を行ったことを発表した。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測データの応用範囲拡大に寄与</li> </ul>
技術成熟度	<p>■ TRL1~2 / □ TRL3~5 / □ TRL6~8 / □ TRL9</p>
特徴・機能、基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>非光合成植生(NPV)とは、光合成機能を持たない植生を指し、立ち枯れた植生、作物残渣などが含まれる。土地に存在する NPV は、自然環境と人間環境の両方において、炭素、栄養素、水の循環に重要な役割を果たしている。持続可能な農業の枠組みの中で、土壌保全に貢献している。</li> <li>リモートセンシングは、航空・衛星データの解析を通じて、広域の NPV の存在を評価するための貴重な技術を提供することができる。IREA は、「PRISMA」から取得したデータが NPV の検出と分類に適していることを実証した。NPV のセルロースの吸収帯をモデル化することにより、スペクトルの特徴を表す多くのパラメータを取得した。これにより、セルロースの含有量を推定するための定量的なデータとして使用できる可能性を見出した。</li> </ul>
課題と今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>今後、セルロースの存在量を定量化し、種間の違いを評価し、土壌水分や土壌背景のような要因の影響を分離することができる検索方法を開発するために、さらなる研究が必要である。大規模な野外実験とそれに伴う土壌やバイオマスのサンプリングにより、推論や機械学習の枠組みの中で、特定の生物物理学的・生化学的変数とスペクトルの特徴との間に強固な関連性を構築することが可能になる。</li> </ul>
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>本研究は、イタリア宇宙庁(ASI)の PRISCAV プロジェクト(助成金番号:2019-5-HH.0)の枠組みで支援された。</li> </ul>

<sup>145</sup> Detection and Classification of Non-Photosynthetic Vegetation from PRISMA Hyperspectral Data in Croplands (<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/23/3903>), (参照 2023-03-01)

## 7) Kuva Space

### ■ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星 3 基が稼働<sup>146</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kuva Space(フィンランド)は、ハイパースペクトルセンサを搭載した地球観測衛星を開発している。ハイパースペクトル技術と高精度な AI 技術を組み合わせることで、気候や農業などの影響を把握し地球上の生活を改善するのが Kuva Space のビジョンである。</li> <li>2021 年 11 月、Kuva Space はシードステージの資金調達を発表した。今回の資金調達では、Voima Ventures・Nordic FoodTech VC・ESA InCubed programme・VTT Technical Research Centre から 420 万ユーロ(約 5.5 億円)を調達した。</li> <li>今回獲得した資金を活用して Kuva Space は、400~1,100nm 帯の波長の画像を収集する 6U キューブサットのコンステレーションを構築する予定である。将来的には、400~2,500nm 帯の波長の画像まで観測可能になる計画である。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星コンステレーションを計画</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kuva Space は既に 3 機の衛星が活躍している。世界最高性能の小型 NIR ハイパースペクトルカメラは 2018 年から軌道に乗り、ESA とのコラボレーションを通じて、さまざまなグローバルパートナーに商業衛星を提供している。</li> </ul>

## 8) Satellogic

### ■ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星 26 機を稼働<sup>147</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>Satellogic(アルゼンチン)は、2010 年に設立された初の垂直統合型地理空間企業で、惑星規模の観測を実施している。高頻度と高解像度の両方で地球全体を再マッピングする能力を備えた、完全自動 EO(地球観測)プラットフォームを構築し、顧客にアクセス可能で安価なソリューションを提供している。このプラットフォームを通じて、気候変動、エネルギー供給、食糧安全保障などの問題解決に貢献することを目指す。Satellogic は 38.5kg の小さな人工衛星を数多く打ち上げることで、観測頻度を高めようとしている。</li> <li>2021 年現在 17 機の衛星を運用中であり、2023 年には 111 機を打ち上げ、毎週全世界を撮影するコンステレーションを構築する計画。衛星には、0.7m 解像度の高解像度カメラの他に、29 バンドのハイパースペクトルセンサを搭載。政府系のハイパースペクトルセンサに比べるとバンド数は少なく、赤外領域はカバーしていないが、このセンサを利用することで、土地や水の分類、作物や土壌、エアロゾルや排水などの化学的な分析を行える。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星コンステレーションを計画</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2023 年 1 月、Satellogic は宇宙で 26 機の衛星を稼働させた。</li> </ul>

<sup>146</sup> Kuva Space(<https://kuvaspace.com/>), (参照 2023-03-01)

<sup>147</sup> Satellogic(<https://satellogic.com/>), (参照 2023-03-01)

## 9) ドイツ連邦地球科学天然資源研究所(BGR)

### ■原材料探査のための新しいハイパースペクトル衛星<sup>148</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイパースペクトルリモートセンシングは、地質学、土壌、探査、採掘の分野における地球科学的研究において既に重要なものとなっている。ドイツのシステム EnMAP は、2022 年 4 月に宇宙への打ち上げに成功した。採掘関連アプリケーションのためのハイパースペクトルデータの可能性が議論されている。</li> <li>本研究のコンセプトは、リモートセンシングの専門家ではなくてもハイパースペクトルデータによる鉱物マッピングと鉱物化ターゲットングを可能にすることである。</li> <li>研究では、南アフリカのアグネイス地域で取得されたハイパースペクトルデータ (EnMAP 仕様でシミュレーション) を活用して、鉛・亜鉛鉱床の表面変質のターゲットマッピングのコンセプトについて議論している。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉱物探査の効率化</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>一部のアプリケーションについては、BGR でデータを公開している。</li> </ul>

## 10) NEO

### ■超小型衛星用ハイパースペクトルカメラの開発<sup>149</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEO (エヌ・イー・オー) 社は、1985 年にノルウェーに電気光学の分野における研究会社として設立され、現在ではノルウェー最大の独立研究機関に成長した。</li> <li>NEO でのハイパースペクトルイメージング分野における活動 (ESA のための小型衛星用ハイパースペクトルイメージャプロジェクト) は 1995 年に始まった。以降、NEO 社は光計測領域におけるリーディングカンパニーとして、国防省およびノルウェー研究評議会による資金提供を受けており、さらにいくつかの EU プロジェクトに参加している。</li> <li>「ハイパースペクトルカメラ HySpex」は航空機から実験室、野外およびイメージング分光法の工業用途に至るまでの幅広い用途に対応する、堅牢で高性能なハイパースペクトルカメラである。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>超小型衛星用ハイパースペクトルカメラの開発</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>2020 年と 2021 年に Norwegian Space Agency の共同資金で、小型衛星に適した SWIR HySpex ハイパースペクトルカメラの予備設計を行った。NEO は現在、装置の認定に必要な資金の調達に取り組んでいる。</li> </ul>

<sup>148</sup>SpringerLink, Implications of new hyperspectral satellites for raw materials exploration (<https://link.springer.com/article/10.1007/s13563-022-00327-1>), (参照 2023-03-01)

<sup>149</sup>NEO (<https://www.hyspex.com/about/news/hyspex-for-microsatellites/>), (参照 2023-03-01)

## 11) Pixxel

### ■ハイパースペクトルセンサを搭載した「Anand 衛星」打上げ成功<sup>150</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pixxel はインドのハイパースペクトルセンサの開発を進める民間企業である。2022年4月に初号機 TD-2 (Anand 衛星) を SpaceX のロケットで打ち上げた。2022年11月には、インド宇宙研究機関 (ISRO) のミッションで、Anand 衛星の打ち上げにも成功した。2021年に打ち上げたデモ衛星と合わせると3基目となる。2023年中頃までに30機の衛星を打ち上げ予定。</li> <li>• センサは南アフリカの Dragonfly Aerospace 社が開発。商用ハイパースペクトルセンサとしては最高の5mの解像度のハイパースペクトルセンサを目指している。観測したデータは、農業や環境、都市計画、エネルギーや採掘などに役立てられる。</li> <li>• 商用衛星データプロバイダ大手の Maxar 社や NASA ジェット推進研究所 (JPL) からアドバイスを得ながら、扱いが難しいハイパースペクトルセンサの技術的なパートナーシップを結んでいる。Pixxel が最終的に目指すのは宇宙空間での資源探査であり、そのためにまずは地球用のハイパースペクトルセンサの開発を行っている。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星コンステレーションを計画</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pixxel は、2018年に創業したスタートアップ企業で、2020年8月に500万ドル(約5億3,000万円)を調達。</li> </ul>

## 12) Orbital Sidekick

### ■ハイパースペクトルセンサを搭載した「GHOS<sub>t</sub>」の打上げを計画<sup>151</sup>

研究概要/技術概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orbital Sidekick (OSK) は、コスト効率の良い小型衛星でハイパースペクトルイメージング事業を展開するアメリカのベンチャー企業である。石油・ガス・エネルギーインフラ関連の事業者と連携し、パイプラインの漏れの検知・監視などを行う。</li> <li>• 2023年1月には、石油・ガスパイプラインの監視にハイパースペクトルイメージングを導入するため100万ドルを調達した。それにより、「GHOS<sub>t</sub>」と称する2つの衛星が、SpaceX の Transporter-8 と Transporter-9 でそれぞれ打ち上げる計画である。順調に進めば、2023年の冬までに6基の「GHOS<sub>t</sub>」が軌道に乗せられる想定。</li> <li>• また、将来的には少なくとも14基の衛星コンステレーションに拡大することを見込んでいる。それにより、1ピクセルあたり8mの高い解像度の実現が見込まれる。</li> </ul>
適用対象分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星コンステレーションを計画</li> </ul>
技術成熟度	<input type="checkbox"/> TRL1~2 / <input type="checkbox"/> TRL3~5 / <input type="checkbox"/> TRL6~8 / <input checked="" type="checkbox"/> TRL9
関連動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OSK が自社開発した分析・情報プラットフォーム「SIGMA (Spectral Intelligence Global Monitoring Application)」も開発している。</li> </ul>

<sup>150</sup>Pixxel (<https://www.pixxel.space/>), (参照 2023-03-01)

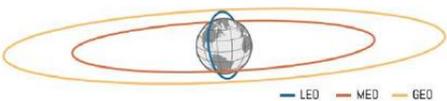
<sup>151</sup>Orbital Sidekick (<https://techcrunch.com/2023/01/31/orbital-sidekick-raises-10m-to-bring-hyperspectral-imaging-to-oil-and-gas-pipeline-monitoring/>), (参照 2023-03-01)

# 第4章 適時調査・事実確認

## 【1】軌道の利用状況

### 事実確認

#### 【1】軌道の利用状況 1/5



— LEO — MEO — GEO

1

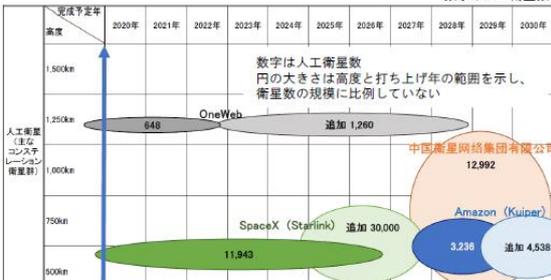
#### ■各軌道と人工衛星数

軌道	高度	利用	2022年4/30現在の稼働人工衛星数 5,465基*
低軌道 (LEO)	高度2,000kmまでの地球周回軌道。90~120分で地球を一周する。地球表面の一部しか見ることができない反面、高い空間解像度で観測することができる。	★通信・放送衛星 (コンステレーション衛星群) ★地球観測衛星 ☆国際宇宙ステーション	4,700
中軌道 (MEO)	地上2,000kmから36,000kmまでの地球周回軌道。LEOの衛星よりも広く地球を見ることができる。	★全地球測位衛星 (GPSなど)	140
太陽同期準回軌 (SSO)	太陽同期軌道と(準)回帰軌道を組み合わせた極軌道。同一地域を通過する時間(太陽方位角)が同じになることから、太陽光の当たる位置が常に一定になるため、画像解析に利用しやすい。また、(準)回帰軌道であるため、定期的同じ場所に帰って来るため、ある一定期間に同じ位置から観測することができる。	★地球観測衛星 (「だいち」「Landsat」など)	60
静止軌道 (GEO)	高度36,000kmの位置にある軌道。地球の赤道上に存在。人工衛星は地球の自転と同じ方向に、同じ速度で周回するため、地球から衛星を見た場合、衛星が常に同じ場所に静止しているように見える。	★通信・放送衛星 ★気象衛星 (「ひまわり」など) ★日本の準天頂衛星「みちびき」	565

(Satellite Database/Union of concerned Scientists)

#### ■コンステレーション (2020~2030年)

数字は人工衛星数



#### ■宇宙ステーション (2020~2030年)



### 事実確認

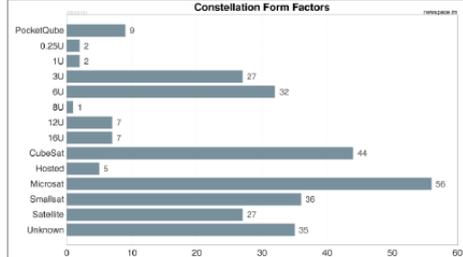
#### 【1】軌道の利用状況 2/5

#### ■世界のコンステレーション計画 (低軌道)

企業名	国	打上げ数	打上げ予定数	最初の打ち上げ年	目的	型
E-Space	フランス	3	350,000	2022	インターネット、テプリ除去	Microsat
SpaceX	米国	3,208	41,493	2018	インターネット	Smallsat
Astra	米国	0	13,620	2022	インターネット	Microsat
Guo Wang	中国	0	12,992	?	インターネット	?
Amazon	米国	0	7,774	?	インターネット	Microsat
Orbit20	米国	0	3,000	?	データストレージ	?
Hanwha Systems	韓国	0	2,000	2023	インターネット、6G	?
OneWeb	米国	428	1,908	2019	インターネット	Smallsat
Hughes	米国	0	1,440	?	インターネット	?
SatRevolution	ポーランド	1	1,024	2019	地球観測	2U 6U
GalaxySpace	中国	7	1,000	2020	インターネット、5G	Smallsat
Mangata Networks	米国	0	791	2023	インターネット、5G	Satellite
Efir/Sfera	ロシア	0	640	?	インターネット、地球観測	Smallsat
KY and Space	英国、イスラエル、オーストラリア	3	400	2023	IoT/M2M	8U, 6U, 3U
Hongya (CASC)	中国	1	320	2018	インターネット	Satellite
KLEO	ドイツ	2	300	2019	IoT/M2M	Smallsat, Microsat
Xona Space Systems	米国	1	300	2022	GMSS/PNT※1	Microsat
AST SpaceMobile	米国	1	243	2019	インターネット、携帯電話向けブロードバンドネットワーク	Microsat

※ 打上げ予定数の多い順、2022年9月1日現在

注)  
 • Cubesat: 各辺10cmの立方体(1U)を並べた形の衛星  
 • 3U: 10cm×10cm×30cmの直方体の衛星  
 • Smallsat: FAA(米国連邦航空局)の定義では重量600kg以下の衛星  
 • Microsat: 10~100kgの衛星



※1 Positioning, Navigation, Timing (測位・航法・タイミング)

Now Space Indexを基にシード・プランニング作成



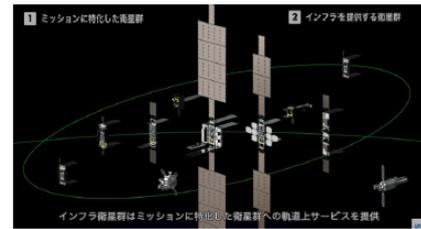
【事実確認】  
20~30年度に軌道上(低軌道・静止軌道)はどのように使われているか、予測図をPPT1枚で作成。

事実確認

【1】軌道の利用状況 3/5

■軌道上サービス（静止軌道プラットフォーム）の将来像

- JAXAでは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。



サービス衛星の役割	サービス衛星※	概要
1. ミッションに特化	①地球観測衛星 ②気象観測衛星 ③商用小型衛星	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ ミッション機器は軌道間輸送機により静止軌道まで運搬され、ロボットサービス機によりミッションに特化した衛星に取り付けられる。</li> <li>① 地球観測衛星では、ロボットサービス機により観測ミッション機器を取り付け、所定の軌道位置まで移動し地球観測を行う。</li> <li>② 気象観測衛星では、ロボットサービス機により観測機器を交換し、気象観測を継続する。</li> <li>③ 静止軌道での商用小型の通信・観測衛星では、主要な衛星バス機能をインフラ衛星群がサポートする。</li> </ul>
2. インフラを提供	①全体管理・電力伝送衛星 ②データ収録・処理衛星 ③地上との通信衛星 ④光通信データ中継衛星 ⑤ロボットサービス機 ⑥衛星監視サービス	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ インフラ衛星群は、ミッションに特化した衛星群に様々なサービスを提供する。</li> <li>① 衛星群全体管理とエネルギー伝送等を担うインフラ衛星は、機動的に動くミッション衛星へのエネルギー伝送サービスを行う。</li> <li>② ミッション衛星をサポートするため、データ収録とデータ処理を担うインフラ衛星は、大量の観測データを取得する観測ミッション衛星へのデータ処理サービスを行う。</li> <li>③ 地上との通信衛星は、ミッション衛星とのデータ送受信や地上局との通信サービスを行う。</li> <li>④ 光通信によるデータ中継を担うインフラ衛星は、低軌道衛星や月周回衛星、月面システムとの光による高速データ中継サービスを行う。</li> <li>⑤ ロボットサービス機は、インフラ衛星群とミッション衛星群のメンテ修理等を担うロボットサービスを行う。</li> <li>⑥ 衛星監視サービスでは、二つの衛星群を見守る監視サービスを行う。</li> <li>□ 将来は墓場軌道にある衛星を再生し、静止軌道プラットフォームへの部品・材料の提供も目指す。</li> </ul>

JAXA【J-SPARC】「軌道上サービスの将来像」Youtube動画を基にシード・プランニング作成

※ サービス衛星：軌道上に既に存在している動作中の衛星へ補給、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を提供する衛星。宇宙ステーションへの補給船も含む。

JAXA「軌道上サービスミッションに係る安全基準」



【事実確認】

20〜30年度に軌道上（低軌道・静止軌道）はどのように使われているか、予測図をPPT 1枚で作成。

事実確認

【1】軌道の利用状況 4/5

4

■主な軌道上サービス参入企業

- 衛星の寿命延長、廃棄、軌道の移動・配置、機能のアップグレード、衛星の輸送、デブリ除去、軌道上の組立・製造、燃料補給、宇宙ロボットなど、様々な軌道上サービスが2030年までに事業化される。

企業名、団体名	国	衛星名/サービス名	サービス、事業化状況
Airbus	欧州	0.CUBED Services	<ul style="list-style-type: none"> <li>静止軌道の通信衛星を対象とした、寿命の延長、新しい軌道への移動、機能のアップグレード、廃棄サービス</li> <li>低軌道に打ち上げられた衛星を静止軌道に輸送するサービス、コンステレーション衛星が搭載されたデイスペンサーを輸送し、所定の位置に配置するためのサービス</li> <li>軌道上のデブリを除去するサービス</li> </ul>
SpaceLogistics LLC (Northrop Grumman 子会社)	米国	MEP: Mission Extension Pod MEV: Mission Extension Vehicle MRV: Mission Robotic Vehicle	<ul style="list-style-type: none"> <li>【MEV】2020年2月、MEV-1が通信衛星インテルサット901にドッキングし、2025年まで寿命を延長。2021年4月、MEV-2がインテルサット通信衛星にドッキングし、2026年まで寿命を延長。</li> <li>【MRV】ロボティクスに関する幅広いサービス。MEVの働きをするポッド（MEP）をクライアント衛星に取り付け、寿命の延長（検査・修理）や新しい軌道への移動サービスを提供する。</li> </ul>
Thales Alenia Spaceを中心としたコンソーシアム	欧州	EROSS+	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証時期は不明。衛星寿命の延長、新しい軌道への移動、廃棄サービスを提供予定。</li> </ul>
Space Systems Loral (Maxar Technologies 子会社)	米国	OSAM-1 (Restore-L) : On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>NASAのミッションによる軌道上組立、製造、燃料補給など様々なサービスの実証衛星を2025以降に打上げ予定。</li> </ul>
Tethers Unlimited	米国	LEO Knight	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボットアームKRAKENと整備ツール、燃料補給コンポーネントを統合したマイクロサットクラスの宇宙ロボットLEO Knightを開発中。スペースデブリを捕獲してリサイクルハブに輸送し、小型衛星に燃料を補給して修理する能力を提供する。2022〜2023年に実証予定。</li> <li>長期の有人ミッションや、太陽系の探査と定住に必要なインフラの構築をサポートし、持続可能な宇宙空間での製造を可能にするため、宇宙で材料を入手する方法から、それらの材料を価値のあるものに交換する方法、そして宇宙で製造された部品を使用して宇宙と地上の顧客に新しいサービスを提供する宇宙製造まで、「宇宙サプライチェーン」の全範囲に対応することを目指す。</li> </ul>
Infinite Orbits	フランス等	Orbit Guard	<ul style="list-style-type: none"> <li>2025年から衛星の寿命延長サービスを開始予定。</li> <li>2022年と2023年に打ち上げ予定の2つのOrbit Guardは、衛星のランデブーやドッキングのために、遠距離と近距離の両方のナビゲーションが可能な自律型航法システム。SSA（宇宙状況把握）や点検ミッションにも対応可能。</li> </ul>

各社IP等を基にシード・プランニング作成



【事実確認】

20〜30年度に軌道上（低軌道・静止軌道）はどのように使われているか、予測図をPPT 1枚で作成。

事実確認

【1】軌道の利用状況 5/5

5

■主な軌道上サービス参入企業

企業名、団体名	国	衛星名/サービス名	サービス、事業化状況
Weintraus	米国	<a href="https://www.f6s.com/weintrausinc/">https://www.f6s.com/weintrausinc/</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球低軌道、地球中軌道、地球同期軌道の衛星オペレータに、打上げ仲介、軌道配置サービス、捕獲・再配置サービス、軌道上修理・軌道上燃料補給サービスなどを提供予定。</li> </ul>
Monmentus Space	米国	VIGORIDE	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型衛星向けの推進機器VIGORIDEを開発し、ロケットから放出された後に小型衛星を特定の軌道まで輸送する2022年6月に打ち上げ予定のSpaceX社のトランスポーター5号機で初飛行する。</li> <li>衛星を特定の軌道に移動させた後は、ミッション期間中、継続的に電力供給、軌道維持、姿勢制御、通信を行うために、接続されたままであることを想定している。</li> </ul>
D-Orbit	イタリア	<a href="#">InOrbit NOW</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型衛星の打上げアレンジや軌道投入を行うサービス「InOrbit NOW」を提供。複数の小型衛星を収容してロケットで打ち上げる小型衛星放出システム「ION Satellite Carrier」を利用して宇宙空間に到達後、ロケットから放出される。その後、自らの推進機能により軌道投入位置付近まで自律航行し、小型衛星を軌道へ投入する。小型衛星以外に、宇宙空間で試験や観測を行うための各種計測機材も収容可能。</li> <li>2021年2月に、丸紅と業務提携し、D-Orbitが提供するサービスの日本向け独占販売代理店契約を締結。</li> </ul>
Orbit Fab	米国	<a href="#">燃料補給ポートRAFTI™推進剤補給基地Tanker-001 Tenzing</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>宇宙ガソリンスタンド。2021年7月、1号機となるタンクを地球周回低軌道に打ち上げ、LEO、GEO、cis-lunarの宇宙空間で宇宙船の推進剤をユビキタスに供給する。燃料補給サービスは、さまざまな軌道にある燃料補給基地と、そこからクライアントの宇宙船に燃料を届けるシャトルで構成されている。</li> <li>アストロスケールのLEXI™のようなクライアントの宇宙船には、Orbit Fab社のRAFTIサービスバルブが装備されている。</li> </ul>
アストロスケール	日本	<a href="#">ELSA-d</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年4月、デブリ除去技術実証衛星「ELSA-d（エルサディー、End-of-Life Services by Astroscale - demonstration of the略）」による、模擬デブリ（クライアント）への誘導接近の実証に成功。2030年までに捕獲衛星の打ち上げを予定。</li> <li>衛星運用終了時のデブリが防止（EOL）サービス、既存デブリの除去（ADR）、寿命延長（LEX）、故障機や物体の診断、状態の観測・点検等のサービスを提供予定。</li> </ul>
川崎重工業	日本	<a href="#">DRUMS</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型模擬デブリへのランデブ等を行う衛星DRUMSを開発、2021年11月に打ち上げ運用中。</li> </ul>
GITAI JAPAN	日本	<a href="#">GI, SI, HI</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>宇宙での作業ロボット、ロボットアームを開発。2023年7月、ISS船外用自立ロボットによる技術実証実験を行う。</li> </ul>

各社IP等を基にシード・プランニング作成



【事実確認】

20~30年度に軌道上（低軌道・静止軌道）はどのように使われているか、予測図をPPT1枚で作成。