

**令和5年度 文科省 委託調査
宇宙探査・軌道上サービスに関する技術調査
中間成果報告書
2023年9月**

(財) 衛星システム技術推進機構

1. はじめに
2. 調査報告
 - 2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析※
 - 2.1.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）
 - 2.1.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）
 - 2.1.3 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針
 - 2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析※
 - 2.2.1 デブリ除去サービス技術の調査分析（デブリ監視）
 - 2.2.2 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針
 - 2.3 推進薬補給技術の調査分析※
 - 2.3.1 推薬補給技術の調査分析
 - 2.3.2 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針
 - 2.4 軌道上製造技術の調査分析
 - 2.4.1 軌道上製造技術の調査分析
 - 2.4.2 強み・弱み分析
 - 2.5 COTSの利用に関する調査分析
 - 2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

まとめ

※：上期重点調査項目

- 令和5年度 宇宙探査・軌道上サービスに関する技術調査の中間報告書である。
- 今回は前項に示される項目について報告する。
- 最新動向のトレンドとサマリを中心に報告することで、見逃したトレンドがないか、さらに着目し調査すべき事案がないか、御確認頂く事を目的とする

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

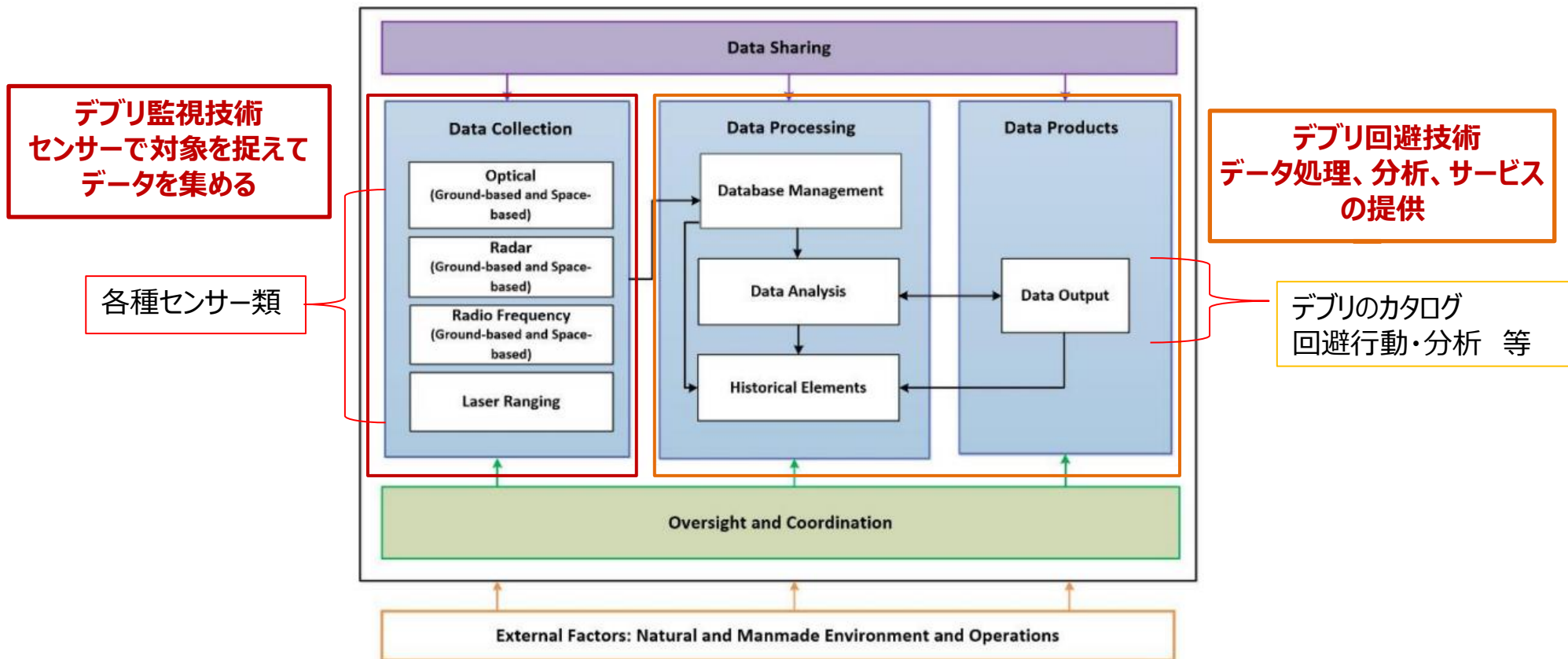
2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ監視及び回避技術について

- デブリ監視技術とは各センサーでデブリを捉えデータを収集する技術である。
- デブリ回避技術は、デブリのカタログ化、回避行動の分析など、データ取得後のデータ処理・データを解析したサービスである。



☒ Space Traffic Systemのフレーム [1]

出所)

1. IDA, [Global Trends in Space Situational Awareness \(SSA\) and Space Traffic Management \(STM\)](#)

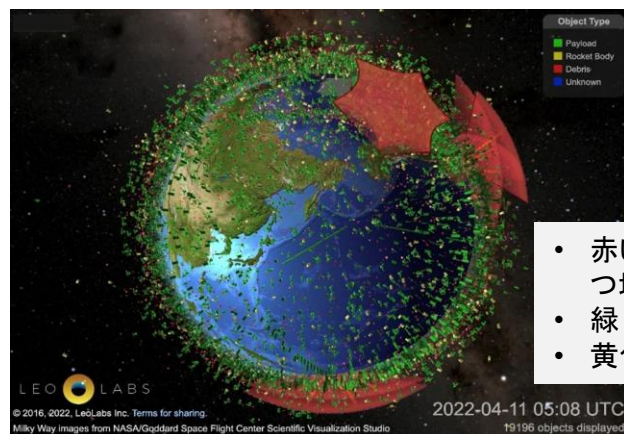
デブリ監視及び回避技術の調査分析 –センサータイプによる 長所・短所–

23-003-R-006

- デブリ監視は、地上レーダー及び光学センサが主流。各センサーの短所を他のセンサーで補うことで効果を最大化している。衛星ベースの光学センサーの利用も進む。

	センサータイプ	対象軌道	主な長所	主な短所
地上	レーダー 例：LeoLabs	LEO/MEO	● 天候状態に影響を受けない	● GEO上の物体検出可能なレーダーは限定的
	光学 例：ExoAnalytic	LEO/MEO/ GEO	● 光学に比べて導入コスト、整備コストが低い	● 悪天候や曇り、日中、物体が太陽に近すぎる場合、利用できない
衛星	光学 例：Maxar	LEO/MEO/ GEO	● 気象/大気条件が問題とならず、地上よりもセンサ感度が高くなる	● 地上ベースの光学センサーよりもコストが高い ● 軌道上での処理が必要

米LEO LABS社が提供するサービスの例



- 赤いエリア：自社で持つ地上レーダーの覆域
- 緑：運用中の衛星
- 黄色・赤：デブリ

Worldview-3衛星が撮像した運用中のLandsat 8



2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.1.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.1.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.1.3 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

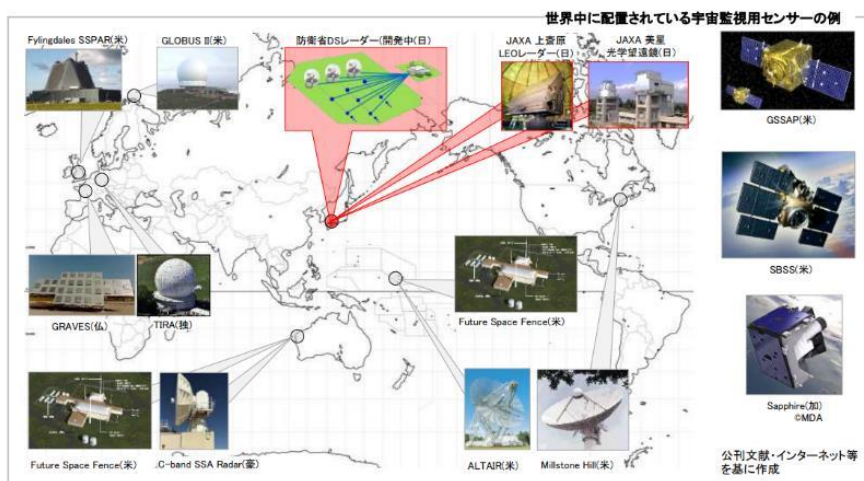
2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ監視及び回避技術の調査分析 – デブリ監視 –

23-003-R-006

- 軌道上の物体が増える中、より正確なデータを求め商用SSA事業者のセンサーデータの重要性が高まる。
- 米国では、SSNに加え商用SSAが進み、センサー（光学、レーダー、RF）の違いで差別化。更に、センサーをグローバルに展開しカバレッジ拡大している。
- 欧州は、米国との連携を維持しつつも、欧州の自律性を強化。中国やロシアは、一国ではカバレッジ確保が難しいため、国際的な連携体制を構築

各国の状況	
米国	● DoDのSpace Surveillance Networkに加え、商用SSA事業者が各種サービスを提供。ビジネスとして企業間での資金の流れが発生している。
欧州	● 米国 DoD SSNによるグローバルな監視体制を構築しつつも、欧州の自立性を強化していく動きがある。
中国	● 中国は、アジア太平洋宇宙協力機構の枠組みにおいて、中国主導で国際的な地上ベースの光学SSA体制構築を推進。
ロシア	● ロシアは、各国の天文台や研究所等（チェコ、中国、アメリカ、欧州他）と国際的な地上ベースの光学SSA体制を構築
日本	● 日本では、米国SSNと連携しつつ、地上センサー（レーダー・光学）を運用中。衛星ベースのSSA体制を構築する見込み。



米国 SSN (Space Surveillance Network)

- 地上とSSA衛星の複数センサーによるグローバルな宇宙監視体制を構築。運用は、米宇宙軍の18th Space Defense Squadron
- 軌道上物体の追跡及び監視、衝突可能性予測、デブリ識別等も実施。
- SSNの各センサーが取得したデータは、Combined Space Operations Center (CSpOC) によってデータ統合、解析等が実施され、公開Webサイトwww.space-track.orgを通じて、衛星運用者等)

米国における地上ベースのセンサー比較

23-003-R-006

- GEOの物体監視は、米国SSNにおいて定常的・網羅的にカバーされている。
- LEOの物体監視は、近年商業SSA事業者（LeoLabs）による独自センサー構築の加速に伴い、cm級の定常的な監視が可能となっている。

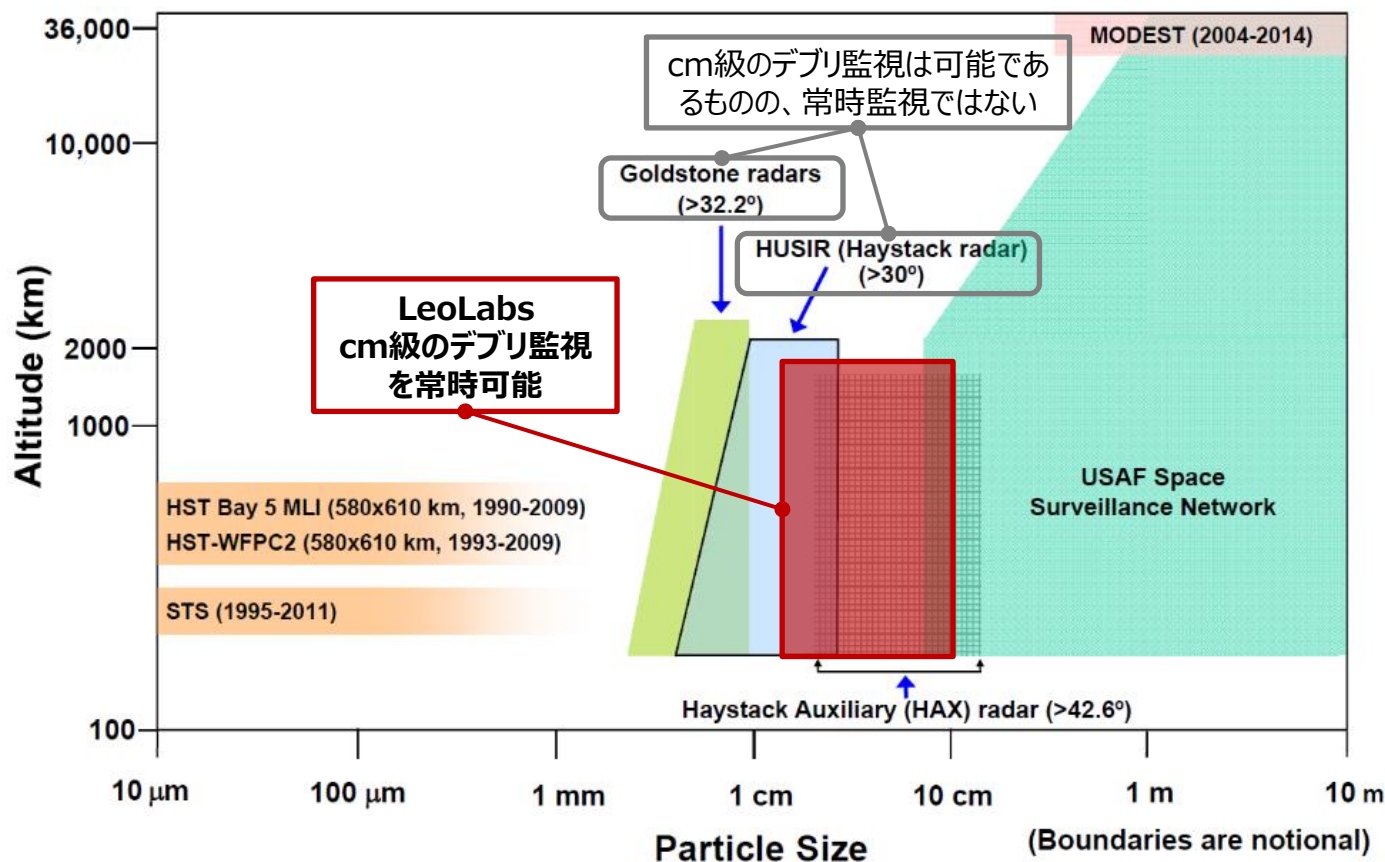


図 軌道上デブリ個数に関する測定データ (NASA Orbital Debris Program Office) [1]

出所)

1. NASA, [Debris Measurements](#)

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.1.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.1.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.1.3 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針

2.1.4 デブリ監視及び回避技術の事例調査

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

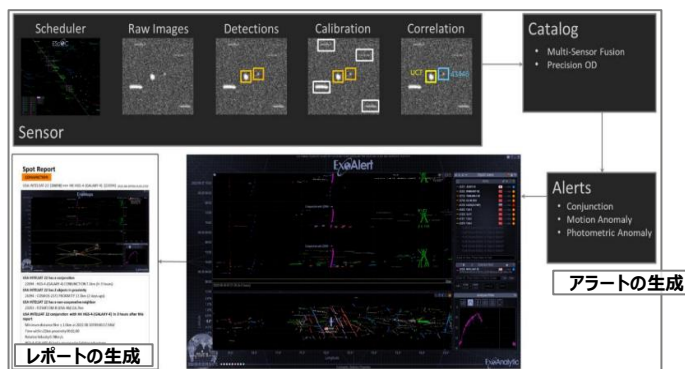
デブリ監視及び回避技術の調査分析 – デブリ回避 –

23-003-R-006

- 米国では、様々なセンサーデータをクラウド上で統合し、回避技術の精度向上、回避判断支援システムの構築、自動化を進めている。
- ESAでは官民連携の下で、米国と同様な回避行動の意思決定支援技術の研究開発を進める

各国の状況	
米国	<ul style="list-style-type: none"> ● NOAAは、STMデータ共有の取り組みをサポートするためのクラウドシステム(Traffic Coordination System for Space)を構築中。データベースへのアクセス、タイムリーな衝突回避スクリーニング、衝突確率計算等を実施する。 ● ExoAnalyticはデブリ衝突等に関するアラート及びレポートが自動生成され、プロセスで発生する可能性のある人為的エラーを最小化する。
欧州	<ul style="list-style-type: none"> ● ESAでは官民連携でデブリ回避システムを自動化するためロードマップを設け、研究開発を進めている。宇宙空間での衝突のリスクを自動的に評価することで、意思決定プロセスを改善し、危険にさらされている衛星へのコマンド送信を支援する等の衝突回避システムの開発を検討中。
中国	<ul style="list-style-type: none"> ● APOSOS*1にて将来の衝突回避に関する早期警報サービス基盤確立に関する計画を有している。
ロシア	<ul style="list-style-type: none"> ● ROSCOSMOS主体の回避サービスを提供。
日本	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国から提供された情報や国内観測データ等を基に、JAXAにて回避解析を支援

*1 Asia-Pacific ground-base Optical Satellite Observation System (APOSOS)、中国が主導するアジア太平洋宇宙協力機構 (APSCO)の監視ネットワーク



米ExoAnalytic社 社の検知・追跡・
監視・衝突回避システム

アラートの生成

レポートの生成

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.1.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.1.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.1.3 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

戦略・研究開発計画立案に向けた論点

23-003-R-006

戦略・研究開発計画立案にあたっては、センシングデータ～運用までの各論点に対するスタンスを定め（＝戦略立案）、それらに応じた研究開発パッケージを検討（＝研究開発計画立案）していくのが良いのでは

データ集積

データ処理・解析（リスク分析）

意思決定（衛星運用）

日本の現状

- ✓ 国内SSAセンサ網と米国CSpOCのデータを利用
- ✓ 先進的プレイヤーも存在するが、統合的研究開発方針が不在

- ✓ 国内データと米国データを組み合わせたデブリリスク解析ツールRABBITを保有し、要素技術を有している

- ✓ RABBIT高度化や運用自動化を試みる民間企業も存在
- ✓ 安全保障では米国事業者を利用している

論点①

他国との連携/すみ分けをどう考えるか？

- 方針①：欧米のようにGEO/MEO/LEOのフルカバレッジでのSSA自立性確立をめざす
- 方針②：特定領域に注力した国際貢献を通じて、相互依存性を向上→米国依存のリスクを低減
- 方針③：データの米国依存を前提として、産業振興としてニッチトッププレイヤー輩出をめざす

論点

論点②

どのような
センサ・データシステムを
構築すべきか？

論点③

統合的自律化・自動化と意思決定サポートの
どちらの方針を目指すか？（どちらも目指すのか？）

戦略・研究開発計画立案に向けて（有識者検討会を踏まえて）

23-003-R-006

宇宙状況監視・把握と共通する技術で産業基盤として最低の自立性を確保すべき。グローバルな流通性を高めていくが、我が国の実力を伴った影響力を確保する。官民の役割を明確にして開発を進めると同時に、研究者の育成を通し、将来の有望な技術の創出も進める。

有識者検討会で頂いたご示唆要旨

有識者	ご示唆
A様	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙状況監視・把握と共通する技術。世界はCSPoCに依存しているが、産業基盤として最低限の自立性は確保すべき。日本が進んでいる軌道上サービスを進める為にも必要。 そのうえでグローバルな流通性を高めることが日本にとって得策。相互運用性、相互依存性を維持する上で一定の実力は必要。 絞りすぎず、すべきところは集中する、バランスが大事。国と民間の役割を公示したうえで民間の自発的な投資を促す。
B様	<ul style="list-style-type: none"> 欧州では研究者コミュニティから育った研究者が、カッティングエッジ技術を持って民間市場を広げている。裾野の広い研究のベースがないと、注力すべき特定技術を生むことができない。 この分野の研究者が欧米に比べて少なく基礎体力が足りない。中長期的に育てる必要がある。
C様	<ul style="list-style-type: none"> エキスパートが少ないため、ニッチと自立性(大きな投資が必要)の議論が終わらない。 観測においてはデータ処理技術、データサイエンスが重要。宇宙の中でも機械、電気工学の人材は増えているが、SSAの分野は増えていない。

(参考) デブリ監視における業界トレンドのまとめ

23-003-R-006

デブリ監視はLEOを中心とした軌道上混雑悪化によるニーズの高まりに伴い、より正確なデブリ監視を行う必要性が生じており、それに対応するためにセンサの多様化・地理的配置拡大と衛星活用が進んでいる

環境変化

ニーズの変化

- ✓ LEOコンステの急速な増加に伴う軌道上混雑の悪化
- ✓ 上記に伴う回避行動の増加

環境変化に伴うニーズの変化

- ✓ LEOコンステにおいては、回避行動実施によるサービス一時停止などの機会損失と燃料消費による衛星寿命短縮がクリティカル化し、回避行動の合理化ニーズが増大
 →LEOにおいて、リスクとなりうる軌道上物体を網羅的に特定し、精度高く軌道を予測することが、運用合理化の前提となる

ニーズへの対応

求められる要件

LEOデブリ・物体の観測

- ✓ 今まであまり撮像されていなかったLEOにおける軌道状態を監視できること

デブリ軌道の正確な測定

- ✓ デブリの軌道精度を改善し、必要な回避行動を削減・合理化すること

軌道上デブリの網羅的特定

- ✓ より小さな物体や様々な物性の物体を漏れなく特定すること

技術的トレンド

① センサ種別の多様化

- ✓ 光学に加えて、レーダーやレーザーといったセンサも活用することで、撮像可能物体を拡張

② 地上センサの地理的配置拡大

- ✓ LEO観測では、既存のGEOとは異なる地理的なカバレッジが必要
- ✓ 複数点観測は軌道精度改善にも有効

③ 衛星センサの活用

- ✓ 様々なセンサを活用しても、地上センサだけでは撮像できない物体への対応が必要

(参考) デブリ監視における日本の強み・弱み

23-003-R-006

日本では米国との強固な連携体制を強みとして、安全保障中心に計画が進められているが、地上/衛星システムを統合した全体としての計画が不在であり、米国とのすみ分けなども考慮した開発戦略が必要か

① センサ種別の多様化

② 地上センサの地理的配置拡大

③ 衛星センサの活用

世界の
動向

- ✓ 二波長や走査性向上に関するR&Dプログラム運用中（欧米）
- ✓ センサーを高出力化し、従来のSSAに加えて特にGEO物体対象のSDA能力を強化（米国DoD）

- ✓ カバレッジが不足しているLEOの小型デブリ（～10cm）を捕捉するために、LEO監視に特化したレーダーセンサーをグローバルに配備（米国/LeoLabs）

- ✓ 地上センサー補完のためにSSA衛星やホステッドペイロードを配備（米国DoD、中国、ロシア）
- ✓ 光学系小型化、低コストの監視手法の確立による軌道上SSA監視能力の向上（DoD）

日本の
現状

強み

- ✓ 防衛省SSAレーザー測距を用いることで、LEOでの精度高い監視精度が期待
- ✓ 同省のSSAレーザーによりGEOでの物体監視も可能に

- ✓ 地上国内に光学・レーダーを有しており、自前でのGEO・LEOの物体監視が可能
- ✓ 米国との強固な連携によるデータ共有

- ✓ 今後、安全保障用途のSDA衛星配備により、軌道上での物体監視が可能となる
- ✓ 民間事業者でも先進的取り組みを行う事業者が存在

弱み

- ✓ 各分野での明確な開発計画が不在で、二波長/高走査性レーダーや、測距以外のレーザーなどの研究開発が進んでいない

- ✓ 小型LEOデブリに関しては自前技術がなく、空自はLEOのデブリ状況について米国商用SSA事業者（LeoLabs）から調達

- ✓ 米国が実施している小型SSA衛星（LEOからGEOを監視）のような構想は明確にない

(参考) デブリ回避における業界トレンドのまとめ

23-003-R-006

デブリ回避においては、マルチソースでのデータ蓄積に加えて、人間の介在を減少させる自律化と、人間の一定の介在を前提としたユーザビリティ向上の方向性での技術開発が進められている

ニーズの変化

- ✓ LEOコンステにおいては、回避行動実施によるサービス一時停止などの機会損失と燃料消費による衛星寿命短縮がクリティカル化し、回避行動の合理化ニーズが増大（※ニーズは監視・回避で共通）
- ➔ 最適運用のためにデブリ回避における各フェイズでの課題に対応する必要がある

ニーズへの対応

データ集積

データ処理・解析（リスク分析）

意思決定（衛星運用）

ユーザの課題

- ✓ 運用計画立案のために必要な、デブリ接近情報などが不十分
- ✓ データ量自体は膨大でハンドリングが難しい

- ✓ 実際の運用においては不要なデータが混入しており、解析の妨げになっている

- ✓ 経済性とリスクに鑑みた最適運用の特定が困難

技術的トレンド

- ① マルチソースでのデータ集積**
- ✓ 軍事用途のセンサから取得したデータに加えて、天文台や商用プレイヤなどのデータを統合
 - ✓ 自国だけでなく、国際連携でデータを蓄積

- ② 一気通貫の自動・自律化**
- ✓ クラウド上でデータを一元的に管理・分析し、衛星へのコマンド送信まで自律的に実施
 - ✓ リスクの大きいデブリに自動でレーザを照射し、衛星の回避行動を低減

- ③ 意思決定サポート**
- ✓ リスクに無関係な不要データを自動でカット
 - ✓ 視覚的な状況表示やマヌーバ計画オプションを提示して意思決定を支援

（実運用は衛星オペレータ自身で対応）

(参考) デブリ回避における日本の強み・弱み

23-003-R-006

日本では米国との強固な連携体制を強みとして、安全保障、JAXA、民間それぞれで検討が進められている。一方、全体を統合した開発戦略は不在に見受けられる

		① マルチソースでのデータ集積	② 一気通貫の自動・自律化	③ 意思決定サポート
世界の動向		<ul style="list-style-type: none"> ✓ <u>様々なセグメントのデータソース</u> (DoD、民間、学術など) の取り込み・統合 (米国) ✓ 自国のSSAシステムの外、<u>国際的に連携したデータソースを組み合わせて</u>利用 (中露) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ データ処理・解析～<u>コマンド送信まで自動化</u>を指向 (欧州) ✓ インputデータを<u>クラウド上で統合・管理</u>することで、高度な解析・運用計画まで自動化 (米国) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星事業者による衝突回避判断を迅速・正確に実施できるように、<u>視覚情報や推奨アクション</u>を提供 (LeoLab等の商用SSA事業者)
日本の現状	強み	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 国内SSAセンサ網に加えて、<u>米国CSpOCのデータ</u>も利用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 富士通は、JAXA衛星運用者のデブリ回避対応に資するSSA解析システムを構築し、<u>観測計画の策定等を一部自動化</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道力学専門家なしでもデブリ回避策を<u>視覚的に短時間で立案可能</u>となる<u>リスク回避支援ツールRABBIT</u>をJAXAが開発・無償配布
	弱み	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 米国のように、様々なセグメントのデータソース (安全保障、民間、学術等) を<u>一元的に取り込む動きは出てきていない</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ クラウドの活用等による<u>統合的プラットフォームに関する構想</u>は今のところない 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 具体的な<u>マヌーバ計画を能動的に提案する機能</u>はまだ実現できていない

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.2.1 デブリ除去サービス技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ除去サービス技術の調査分析 - 宇宙デブリについて -

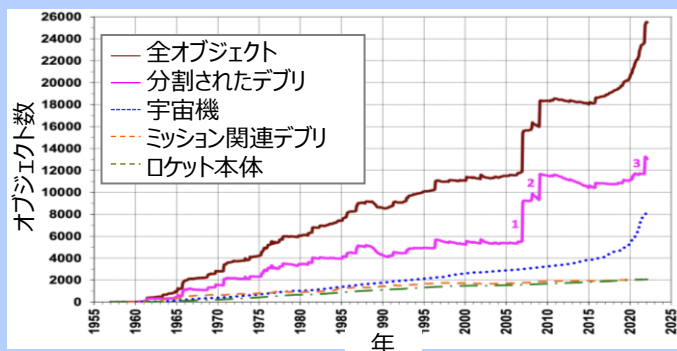
23-003-R-006

- 宇宙利用の拡大によるデブリや人工衛星の増加に伴い、軌道上における物体の衝突リスクが高まっており、政策的なルール整備と技術開発による対応が進められている。

軌道上の衝突リスクの増加

スペースデブリ・人工衛星の増加

- 運用終了や故障により役目を終えた人工衛星やロケット上段、それらの爆発や衝突で生じた破片などがデブリとなっている⁽¹⁾。
- デブリの数
 - NASAの把握オブジェクト数：25,000個超⁽²⁾
 - センチメートル級を含めた数：100万個近く⁽³⁾
- 多数の小型衛星を一体的に運用するコンステレーションや、民間企業や宇宙参加国の増加などで、宇宙環境は加速的に悪化



地球周回軌道上の物体数の推移

デブリをめぐる各国の主な動向

米国政府：デブリ除去を含む軌道上サービス

- ISAM国家戦略として、技術開発から産業化、インフラ構築も含んだ戦略を策定。

*In-Space Service, Assembly and Manufacturing

- 軌道デブリ実施計画として①デブリ低減、②現状のデブリの評価・トラッキング、③デブリ除去の3本柱からなる行動計画を策定

米連邦通信委員会(FCC):25年ルール見直し

- FCCデブリ低減ガイドラインに関し、従来、運用終了後25年以内の軌道離脱を民間衛星事業者に求めていたルールを、軌道上の機数増加に伴い、5年以内に短縮する命令を发出。

ESA: "Net Zero Pollution"推進

- ESA長官が、2030年までにNet Zero Pollutionとして、打上数とデブリ除去数をバランスさせる政策を実施することを表明。

英国：宇宙サステナビリティの包括的推進

- 宇宙戦略のNational Space Strategyでデブリ除去を記載したのに加え、担当大臣が宇宙サステナビリティ計画策定を表明し、デブリ除去実証COSMICプログラムを推進する等、戦略～実行まで取り組んでいる。

Source: NASA, 英国政府

(1) 地球周回軌道に存在するか大気圏再突入中の機能していない人工物体やそれらの破片や構成要素（国際機関間スペースデブリ調整委員会（IADC）による定義）。

(2) NASA Orbital Debris Quarterly News Vol.26 Issue 1

(3) ESA Space debris by the numbers (2022年1月時点)

デブリ除去サービス技術の調査分析 - 定義 -

23-003-R-006

- 本調査では、デブリ発生防止の観点でのPMD（自律的な軌道離脱技術）及びADR（能動的なデブリ除去）を対象とした調査を行う。なお、サービスを介したミッション終了時の廃棄処理はADRに含める。

自律的な軌道離脱		サービスを介したデブリ除去	
受動的	能動的	受動的	能動的
PMD Post-mission Disposal		PDR Passive Debris Removal	
<ul style="list-style-type: none"> 衛星に搭載された受動的・自律的な軌道離脱装置を用いた軌道離脱を行う。 		<ul style="list-style-type: none"> 展開機構等を有するデブリ除去衛星を用いて、展開部へ受動的にデブリを衝突させることで微小デブリ等を除去する。 	
			
図 軌道離脱システム (膜・レーザーの例) [1][2]		図 PDRの例 (円筒形展開機構等) [5][6]	
調査対象		調査対象	
<ul style="list-style-type: none"> 衛星に搭載された推進系を用いて能動的・自律的な軌道離脱を行う。 		<ul style="list-style-type: none"> デブリ除去衛星を用いて、既存デブリを能動的に捕獲（或いは再配置）・除去する。 サービスを介したミッション運用後の廃棄処理含む。 	
			
図 軌道離脱システム (推進系の例) [9]		図 ADRの例（ロボットアーム、レーザー等） [7][8]	

出所)

1. NASA, [13.0 Deorbit Systems](#)
2. PR TIMES, [EDT（導電性テザー）を用いたデブリ対策装置](#)

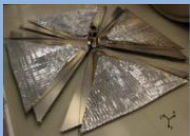

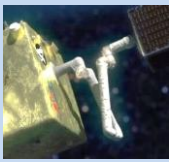

3. Astroscale, [ELSA-d](#)
4. Astroscale, [ドッキングプレート](#)
5. 九州大学, IHI, JAXA, [Passive Orbital Debris Removal](#)

6. IHI, 九州大学, [低密度物質を用いたスペースデブリの除去方法の研究](#)
7. Astroscale, [COSMIC](#)、8. ESA, [OlaMOT](#)
9. JAXA, [HTV](#)

デブリ除去サービス技術の調査分析 – 除去技術の長所・短所分析 –

23-003-R-006

- PMDについて、自律的な軌道離脱を可能とするためサービスーの開発が不要だが質量増加やLEO向けに限られる
- ADRでは、準協力物体ではドッキングプレート方式が利用されるものの、新規衛星に限定される。
- 非協力物体に対して、今後ロボットアームを用いたデブリ除去が多数予定されている。

デブリ除去サービス（方式）		長所	短所
PMD	軌道離脱装置 	<ul style="list-style-type: none"> ● 軌道離脱装置を衛星に搭載することで、<u>自律的な軌道離脱が可能</u>（サービスーの利用が不要） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 軌道離脱装置による衛星質量の増加。 ● LEO上でのデブリが対象
ADR	ドッキングプレート 	<ul style="list-style-type: none"> ● 準協力物体へのドッキングのため、非協力物体よりもRPOが安全に実施可能 ● 軌道離脱装置よりも比較的軽量 	<ul style="list-style-type: none"> ● クライアント衛星へのドッキングプレートの装備が必要となるため、<u>新規衛星のみが対象</u>
	例：シンプルなロボットアーム・エンドエフェクター 	<ul style="list-style-type: none"> ● 複雑なロボットアーム・ハンド駆動をシンプル化することで、<u>安全性や汎用性を高める</u> ● ロボティクス機構の軽量化・コスト低減 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>正確な位置・姿勢制御が必要</u>
	例：複数のアーム挟み込み 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>形状・姿勢を問わない</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 複雑なアーム・ハンド機構の開発が必要 ● <u>駆動部品が多く、制御が複雑化</u>

デブリ除去サービス技術の調査分析

23-003-R-006

- PMDでは、諸外国ともに膜面方式を中心としたPMD技術の成熟が見られる。
- ADRは、ドッキングプレートを紹介する準協力物体へのRPO技術・捕獲技術実証等を通じ、実用化・商業化への具体性が示されている。既存デブリ（非協力物体）に対してはロボットアーム方式で複数の計画が予定されている。その他、ネット・鋸方式での部分的な実証やレーザー方式の基礎的研究が実施されている。

		基礎研究	応用研究・開発	軌道上実証	実用化・商業化		
1	PMD 自律的 軌道離脱	膜面	アクセルスペース（日）		NASA、米国企業他 ESA、欧州企業他 JAXA		
		テザー、他	ALE/BULL（日）	Tethers Unlimited（日）	技術制成熟した状態		
2	ADR サービスを紹介した能動的 デブリ除去	準協力物体 (新規衛星)	ドッキング プレート	Altius（米）詳細不明	Astroscale（日）	RPO・捕獲技術等実証	
		非協力物体 (デブリ等)	ロボットアーム	簡易	川崎重工業（日）	邀電（中）詳細不詳	
			複雑	Astroscale（日） Clearspace（欧） Kall Morris（米）			
			ネット・鋸	ロボティクス技術の獲得が必須 ロボットアーム方式にバリエーション	RemoveDEBRIS（欧）		
レーザー	スカーパーJSAT（日） ESA（欧） コロラド大学（米）						

基礎研究が中心

デブリ除去サービス技術の調査分析 – 各国動向 (1/2) –

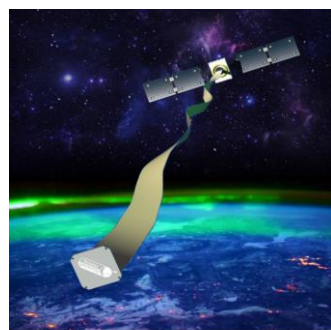
23-003-R-006

受動的

能動的

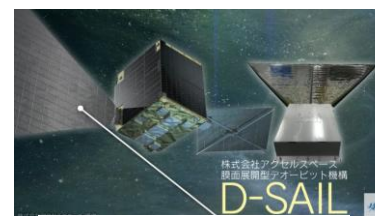
- PMDにおける受動的な軌道離脱装置は、米欧を中心に技術成熟（TRL7～9）がなされている。FCCの新ルール導入を受け、LEO衛星事業者が受動的離脱装置或いは軌道上サービス衛星による外部サービスを採用するかについて、今後の動きに注視が必要となる。

#		装置名※1	製造主体	方式※2	搭載衛星 (衛星質量kg)	装置質量 (kg)	打上 年	展開 年	TR L 推 定	サービス導入課題 (特徴を中心に例 示)
1	PMD	D-SAIL	アクセルスペース (日)	膜面	革新的衛星技術実 証3号機 (110kg)	1.9	未定	未定	3-6	● 高い技術成熟度の 割に、PMD実施率 が低い背景として、 衛星質量の増加が 推測される。
2	PMD	Terminator Tape	Tethers Unlimited (米)	テザー	Prox-1 (71kg)	0.808	2019	2019	7-9	
3	PMD	EDT	BULL (日)	テザー	不詳	不詳	未定	未定	3-6	



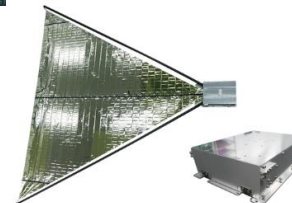
- 大気抵抗の力と地球磁場によるローレンツカを利用
- 2ポンドに満たないノートほどの大きさのTerminator Tape Moduleから230 feetの通電性のテープを展開

出典
<https://www.tethers.com/taking-out-the-space-trash-tethers-unlimited-announces-successful-operation-of-space-debris-removal-device/>
<https://sorabatake.jp/10082/>



- 約2㎡のポリイミドフィルムの膜面を展開し、大気抵抗を利用
- 薄い大気がドラッグ（抵抗）として働き、衛星の軌道運動にブレーキをかける。

出典
<https://www.axelspace.com/ja/sustainability/>
https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/03/interview03_08.html
<https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/kakushin03.html#dsail>



提供：株式会社アクセルスペース

Tethers Unlimited Inc.

Tether Terminator Tape

1. NASA, <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/deorbit-systems>

デブリ除去サービス技術の調査分析 – 各国動向 (2/2) –

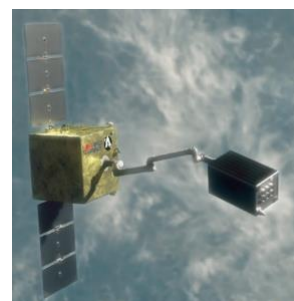
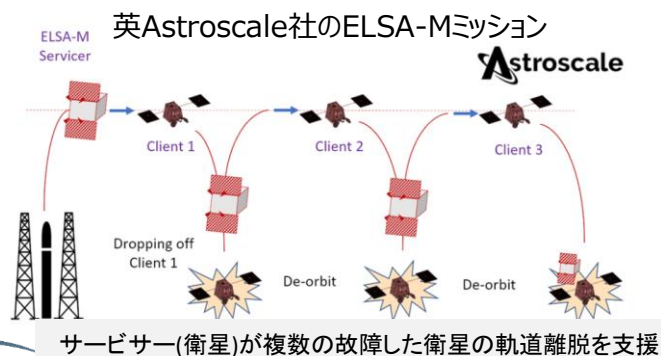
23-003-R-006

受動的

能動的

- **Astroscale**を中心にRPO技術獲得が進み、複数の衛星に対するEOLサービスが予定されている。
- ADRでは、**ロボットアーム方式**が主流となっている。

#	ミッション名	事業主体 (オーナー)	事業主体 (メーカー)	捕獲機	除去方式	TRL 推定	打上	サービス導入課題 (特徴を中心に例示)	
1	ADR	ELSA-d	Astroscale	Astroscale	ELSA-d	ドッキングプレート	7-8	2021	・ <u>模擬デブリの自律的な捕獲技術</u>
2	ADR	Sunrise	ESA/ OneWeb	Astroscale	ELSA-M	ドッキングプレート	3-6	2024	・ <u>複数の連続したデブリ除去技術</u>
3	ADR	CRD2	JAXA	Astroscale	ADRAS-J (フェーズ1)	接触式 (詳細 方式不詳)	3-6	2023	・ <u>非協力物体への接近、近傍制御・映像取得技術、デブリ捕獲技術</u>
4	ADR	COSMIC	UKSA	Astroscale	不詳	ロボットアーム	3-6	2026	・ <u>ロボットアームを用いた能動的なデブリ捕獲技術</u>
5	ADR	ADRIOS	ESA	ClearSpace	ClearSpace-1	ロボットアーム	3-6	2026	・ <u>4つのアームを用いた能動的デブリ捕獲技術、燃料補給機能 (詳細不詳)</u>
6	ADR	Orbital Prime	米国宇宙軍	Kall Morris	MK1 Laelaps	ロボットアーム	3-6	2025 - 2026	・ <u>関節式エンドエフェクター実証、対象物体が回転した状態での捕獲技術実証</u> ・ <u>燃料補給機能 (詳細不詳)</u>



COSMIC ミッションイメージ



ADRIOS デブリ捕獲のイメージ

標準化動向 – デブリ除去サービス技術（調査結果） –

23-003-R-006

- デブリ除去サービスの技術標準化動向では、民間主導で技術開発及び軌道上実証が進められている一方で、技術的標準化には至っていない。

デブリ除去サービス技術にかかる標準化動向

	現状	分析
物理的なインタフェース等の技術的な標準化	<ul style="list-style-type: none"> • AstroscaleがELSA-dにてドッキングプレート（ADR）の軌道上実証を成功させ、<u>日本が技術的リードを取っている</u>。 	<ul style="list-style-type: none"> • デブリ除去サービス技術は民間主導で開発が進んでいる。 • Astroscaleを筆頭にしてデファクトスタンダードの潮流が見えている一方で、<u>技術的な標準化には至っていない</u>。
運用・安全管理の標準化	<ul style="list-style-type: none"> • NASA、ESA、JAXAなどの機関がGEO・LEO各軌道での衛星運用基準について文書を発表している。 • 各文書では<u>運用終了後の廃棄（PMD）までの年数</u>や、IADCデブリ低減ガイドラインで記載された<u>廃棄成功率（90%以上）に準拠</u>している。 	<ul style="list-style-type: none"> • 運用・安全管理のルールについて各機関が発表している。各ルールはCONFERS（米）が主導で作成したISO-24113を参考にしている傾向があるため、<u>米国による標準化が進んでいる</u>と考える。
国際規格化に向けた状況（ISO）	<ul style="list-style-type: none"> • ISO-24113：Space debris mitigation requirementsは、CONFERS（米）が主導してデブリ低減を目的とした<u>宇宙機全般の設計及び運用要件を定義</u>している。2023年の改訂ではデブリ低減に関する言葉の定義が明確にされた。 	



2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.2.1 デブリ除去サービス技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ除去サービス技術の戦略・研究開発計画立案に向けた論点

23-003-R-006

目指すべきPMD率とその実現のために必要な技術、PMD率を踏まえたADRサービスのあるべき姿とその実現の為の技術を検討する

PMD技術

ADR技術

日本の現状

- ✓ 日本独自のPMD率(目標値)の設定、順守する事へのインセンティブが不在
- ✓ 一方、テザー、膜面展開式等多様なPMD機器の要素技術開発は実証が進む

- ✓ 世界に先駆けた技術実証の実績あり
- ✓ 欧米が既存の衛星デブリを対象とした計画が進められる中、我が国はロケット上段の除去を目指す

論点

論点①

我が国の衛星に求めるPMD率は？

- 方針1：世界に先駆け、高いPMD率を確立
⇒ 自国衛星だけでなく海外へも輸出を目指す
(国際標準の主導も目指す)
- 方針2：国際潮流(PMD率)を追従する
⇒ 自国衛星のための自立性確保を目指す
(国際標準の遵守を目指す)
- 方針3：最低限(できる範囲)のPMD率を維持

サブ論点：手法、IF標準、要素のmake/buy

論点②

我が国が対応すべきADRの対象範囲は？

- 方針1：包括的な軌道上物体
⇒ 自立性だけでなく海外へも輸出を目指す
- 方針2：我が国の宇宙活動に起因した軌道上物体
⇒ 自立性の確保を目指す
- 方針3：我が国の先行性を活かせる軌道上物体
⇒ 国際連携の下、“勝ち筋”の確立を目指す

サブ論点：手法、IF標準、要素のmake/buy

戦略・研究開発計画立案に向けて（有識者検討会を踏まえて）

23-003-R-006

- ルール作りの議論に必要なデータの収集と専門家の育成が重要。技術、政策のトレンドを注視し、将来の国際的な展開を見据えながら、戦略的に一つ一つ実績を積み重ねる必要があるのではないか。

有識者検討会で頂いたご示唆要旨

有識者	ご示唆
A様	<ul style="list-style-type: none"> • 技術だけでなく、ポリシーデモンストレーションも論点になる。ルール作り軸と業界の軸があり、海外のトレンドをモニターし、遅れないようにすることが重要。FCCは5年ルールを適用はじめるが、更にStarlinkやKuiperにはアディショナルなルールを加えている。 • 量が質を凌駕する。やることで認知が進み普及につながり、その中で議論を深める。まずは自国由来のデブリ除去を繰り返すことが普及につながるのではないか。
B様	<ul style="list-style-type: none"> • 目指すPMD成功率により発生する影響の定量的な分析をしたうえで、PMD成功率はこうという議論をすべきだができていない。専門家、判断の材料も少ないのが問題。 • CRD2では比較的除去しやすい低軌道のロケット上段から始める、できるところから始め戦略的に対象を広げていく。
C様	<ul style="list-style-type: none"> • グローバルでは宇宙環境の議論は多いが、日本では経営の議論になる。ここだけ示しても産業界がついてこないのではないか。グローバルなルールに乗り遅れないようにしつつ、ルールと産業が両立する仕組みを検討する必要がある。 • 途上国等、国内を固めながら国際的な展開も目指すべきではないか。

(参考)デブリ除去サービス技術における調査サマリ

23-003-R-006

軌道環境の悪化が進み、持続的な宇宙利用の実現の為、デブリ化の低減、デブリの除去技術の開発が求められる

ニーズの 顕在化

- ✓ 衛星保有国、参画企業の増加、LEOコンステレーションの拡大で低軌道を中心に軌道環境が悪化
- ✓ 厳格化するレギュレーションへの対応だけでなく、投資を集める上でも企業にスペースサステナビリティへの対応が求められる
⇒ 宇宙利用の継続性、事業の継続性に対するリスクが増加し、デブリ低減・除去へのニーズが顕在化

ニーズへの対応

ユーザの 期待

- ✓ 運用終了後の自立的な軌道離脱
 - 推進系による軌道離脱が主だが、推進系を持たない、もしくは衛星バスが故障した場合にも軌道離脱したい

- ✓ 既存デブリ、もしくは衛星の軌道離脱
 - 現状の軌道環境を改善したい
 - より短期間で軌道離脱したい

- ✓ 他の衛星への衝突回避

技術的 トレンド

PMD技術 (自律的な軌道離脱)

- ✓ 従来は、自然に軌道高度の低下を待つ、もしくは推進系による軌道離脱が主流であったが、導電性テザーや膜面展開式の軌道離脱装置の実証が進み実用レベルのとなりつつある
- ✓ 現行手段より、安価で成功率が高いPMD技術が求められる

ADR技術 (サービサーを介したデブリ化防止と除去)

- ✓ サービサーによるデブリ除去の実証が進んでおり、除去を容易にするドッキングプレートによるEOLの実証が行われた。
- ✓ 確実なミッション達成やコスト低減の視点から正確性や汎用性を持つロボットアームによる除去の開発が主流になりつつある。

衝突回避技術
2.2項参照

(参考)デブリ除去サービス技術における日本の強み・弱み

23-003-R-006

政府・宇宙機関主導でPMD、ADR技術の開発と実証の競争が進む。我が国はJAXAやELSA-d実証でのRPO技術の知見とCRD2プロジェクトの先行性を活かし、事業化を目指す

PMD技術

ADR技術

世界の動向

- ✓ IADCがPMD率90%の指針を出している
- ✓ 米国FCCのルールが25年から5年に変更されPMD機器の利用が進むと考えられる
- ✓ LEOの中でも低い軌道においては自然の軌道離脱だけでなく、導電性テザーや膜面展開式PMD機器の開発が進む。

- ✓ 欧州では政府・宇宙機関が進める既存デブリの除去ミッションが計画されている。
- ✓ デブリ除去について米国においても政府・米軍の下デブリ除去の計画が始まる。

日本の現状

強み

- ✓ JAXAの協力のもと、アクセルスペースやBULL社が導電性テザーや膜面展開式のPMD機器の開発と実証を進めている

- ✓ CRD2プロジェクトなど世界に先駆けての実証・事業化の動きが進められている。
- ✓ ロボットアーム方式を使用したデブリ除去の研究開発もすすむ

弱み

- ✓ 軌道上での実績がない
- ✓ 日本独自のPMDに対する明確なガイドラインがない
- ✓ 衛星事業者側に明確なインセンティブを提供できていない

- ✓ 協力物体、準協力物体へのRPO技術、ドッキング技術等を蓄積してきているものの、非協力物体についてはCRD2以降の計画が不透明

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.3.1 推薬補給技術の調査分析

2.3.2 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

推進薬補給技術の調査分析 – 技術の概要と課題 –

23-003-R-006

- 軌道上サービスに共通なRPO技術、微細な制御で配管を取り付けるロボットアーム、インターフェイスを含む推進薬移送システムの開発が必要。**インターフェイスの標準化も固有の課題**

推進薬補給技術

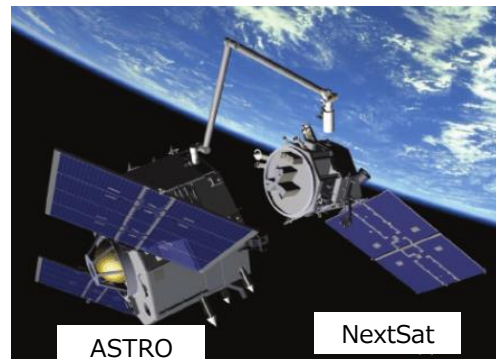
RPO技術

- ✓ 安全にクライアントへ近づく
- ✓ 複数のクライアントとランデブー



推進薬補給ロボットアーム

- ✓ ロボットアームを微細に制御し配管を接続



Orbital Express の概要図

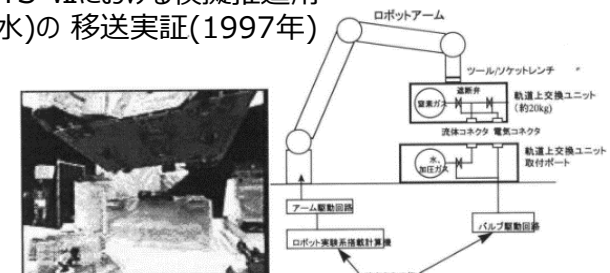
推進薬移送システム

- ✓ 確実に配管を着脱するインターフェイス
- ✓ 無重力空間で推進薬を送り出す推進薬移送システム

Orbit Fab社が開発し標準化を目指す給油バルブRAFTI
(Rapid Attachable Fluid Transfer Interface)



ETS-VIIにおける模擬推進剤
(水)の移送実証(1997年)



軌道上交換ユニットを使用した推進薬補給模擬実験

推進薬補給技術の調査分析 – 各国の動向 –

23-003-R-006

- よりダイナミックな衛星運用のアーキテクチャが進み推進薬補給へのニーズが高まる
- 米国では政府から民間への投資により研究開発を支援している。欧州ではHorizon Europeの活用やGatewayに向けた実証など次世代を見据えた研究開発を実施
- 日本ではAstroscaleがOrbit Fabとの連携を行いながらも、新しい燃料補給に向けた検討を実施

#	プログラム名	実施主体		概要	TRL
		オーナー	メーカー		
1	Orbital Express	DARPA	Boeing, Ball Aerospace, Northrop Grumman	<ul style="list-style-type: none"> 2007年にLOEでのロボットによる衛星の保守・修理・ヒドラジンの移送を実証 	7~8
2	Modularity for Space System	DIU	Motiv Space System, Maxar Technologies, Tethers Unlimited	<ul style="list-style-type: none"> DIUが選定した3社が、ロボットアームを2024年までに開発し軌道上燃料補給実証を行う(GEO、以遠のミッションを想定) 	3~6
3	Tetra-5	米国宇宙軍	Orion Space Solutions	<ul style="list-style-type: none"> Orbit FabのRAFTIを積載した衛星を開発しGEO衛星のヒドラジン燃料補給や検査の実証を行う 	3~6
4	OSAM-1	NASA	Maxar Technologies	<ul style="list-style-type: none"> 2025年までにLandsat-7へ燃料補給を行う 	3~6
5	-	-	Orbit Fab	<ul style="list-style-type: none"> 燃料移送インターフェース「RAFTI」を開発。燃料デポと燃料補給機を用い2025年にGEO衛星への燃料補給軌道上実証を行う 	3~7
6	ESPRIT	ESA	Thales Alenia Space	<ul style="list-style-type: none"> 2029年にAltemis IVと共に打ち上げられ、Gatewayへのキセノンとヒドラジンの直接補給が予定されている 	3~6

標準化動向 — 推進薬補給技術 —

23-003-R-006

- 推進薬補給技術標準化は民間企業によって盛んに技術開発が行われており、Orbit Fab社による事実上の標準化が進められている。
- 具体的な運用・安全管理の標準化及び規格化に関しては軌道上サービス全般の枠組みに留まっている。

推進薬補給技術にかかる標準化動向

	現状	分析
物理的なインターフェース等の技術的な標準化	<ul style="list-style-type: none"> ● 民間企業はバルブや燃料移送パイプを開発し軌道上実証が進められている。特に、Orbit Fab社はRAFTIをオープンライセンスにして技術的標準化をリードしている。 ● NASA、ESAでは給油・排油バルブを備えたインターフェースの開発を進めている一方、軌道上実証には至っていない。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 100以上の新規打ち上げ商業衛星に搭載予定なことから、Orbit Fab社のRAFTIが事実上の標準化インターフェイスとなっている。また、燃料補給だけでなくデータ通信など複数機能を備えたインターフェースの開発を実施している民間企業も現れ始めている。
運用・安全管理の標準化	<ul style="list-style-type: none"> ● 推進薬補給に関して目立った運用・安全管理の標準化は進んでおらず、軌道上サービスの一環として記載されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 民間企業による技術開発及び実証が先行しているため、推進薬補給に特化した運用・安全管理の標準化及び国際規格化の動きは進んでおらず、軌道上サービスの括りとして定められている。
国際規格化に向けた状況（ISO）	<ul style="list-style-type: none"> ● ISO-24330：RPO/OOS principles and practices では、軌道上サービス全般の運用要件が定義されている一方で、推進薬補給技術に関しては軌道上サービスの一部としての扱いに留まっている。 	

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.3.1 推進薬補給技術の調査分析

2.3.2 有識者検討会を踏まえた今後の調査方針

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

推進薬補給技術の戦略・研究開発計画立案に向けた論点

23-003-R-006

各国が技術開発を進める中で、各要素技術の基礎を保有している我が国が目指すべき立ち位置と、必要な技術を検討する。

日本の現状

- ✓ 宇宙基本計画、宇宙安全保障構想にて推進薬補給技術が重要と識別されている。
- ✓ 米国が民間企業を支援する形で事業化・実用化が見受けられる中、我が国も保有している各要素技術を使用した実証を進めている。
- ✓ ただし、インターフェイスの開発と標準化を進める企業が不在であり、海外企業と既に連携している我が国の民間企業も存在。

論点

論点

我が国の“推進薬補給”の在り方は？

- 方針①：自立性確保＋サービス/IFの海外輸出
⇒ 自国技術によるサービスの実現
 - 方針②：国際連携含めたサービス自立性確保
⇒ インターフェイス等一部の技術と燃料等を海外に依存するが、自国サービスとして実現
 - RPOを活かしGas Stationからの配給油を実施する等
 - 方針③：推進薬補給技術の特定領域に“強み”を確立
⇒ 微細制御のロボティクス技術等
- サブ論点：推進薬移送技術、ドッキング手法、IF標準、国際連携

戦略・研究開発計画立案に向けて

23-003-R-006

よりダイナミックな衛星運用が始まり、注目を集める技術。RPOやロボティクスは軌道上サービスの共通技術であり、技術要素を発展させる一方、推進薬補給については技術的な分解能を高めて戦略的に開発を進める必要がある。

有識者検討会で頂いたご示唆要旨

有識者様	ご示唆
A様	<ul style="list-style-type: none"> ・ サービサー・クライアント両側の技術的な分解能を高めて、獲得する技術の順番、スケジュールの戦略を立てることが大事
B様	<ul style="list-style-type: none"> ・ 世界の注目度が高まっていることは感じる。衛星の運用ではよりダイナミックなアーキテクチャが米国で立ち上がっている。2030年には燃料補給を前提とする衛星運用となる。 ・ 受ける側、補給する側の組合せは有限であり、解像度をあげて検討することが可能と考えている。
C様	<ul style="list-style-type: none"> ・ RPOやロボティクスは共通技術。推進薬補給のアーキテクチャが一般になった際の日本の勝ち筋は見えていない。軌道上サービスに必要な技術要素を発展させていき、勝ち筋をはる際にもう少し広い視野でみてもよいのではないかと。 ・ 世界では開発が進んでいることを考慮すると担い手がいるのであれば、方向性を出すことも必要なフェーズとは考えている。

(参考) 推進薬補給技術における調査サマリ

23-003-R-006

運用期間の保証と延長、更なる機動力への要求、変化するマーケット状況での衛星運用の柔軟性等、今まで以上に推進薬補給へのニーズは高まる。

ニーズの 顕在化

静止通信衛星の技術進展を見定めるなど、置き換えのタイミング/フリートマネージメントの柔軟性に対するニーズが増加
宇宙状況把握等、広範囲に動く機動性に対するニーズが増加
デブリ回避などの予期せぬ燃料消費への対応ニーズの増加

ニーズへの対応

		推進薬補給技術		
		RPO技術	推進薬補給ロボットアーム	推進薬移送システム
ユーザの 課題		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 安全性の向上 ✓ コスト効率の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ロボットアームの微細な制御の高精度化 ✓ ロボットアームの低コスト化 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 無重力空間での推進薬移送 ✓ サービス提供元の選択肢
技術的 トレンド		<ul style="list-style-type: none"> ✓ デブリ除去等で得られたRPO技術を応用し、推進薬補給を含めた軌道上作業へ応用 ✓ コスト低減を目指した汎用的なRPOシステムの開発の動きもみられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 専用のロボットアームの開発に加え、汎用的なロボットアームと専用のエンドエフェクター部の組合せを目指した開発もすすむ。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道上でのヒドラジンの移送実績と、水を使用した実証の蓄積は進んでいる ✓ 汎用的なサービスを実現する標準化を目指した受給油口バルブの開発が進む

(参考) 推進薬補給技術における日本の強み・弱み

23-003-R-006

米国に比べて推進薬補給プレイヤーが限られるが、各基礎的な技術は保有しており、他国企業との連携や、開発競争への参入も始まっている

		推進薬補給技術		
		RPO技術	推進薬補給ロボットアーム	推進薬移送システム
世界の動向		✓ 米国では政府から民間への投資により研究開発を支援。欧州ではGatewayに向けた研究開発を実施		
		✓ Space Logistics社がドッキングによる寿命延長を開始	✓ DIU主導で燃料補給に向けてロボットアームの開発がすすむ	✓ DARPA主導 Orbital Expressにてヒドラジンの移送に成功(2007年)
日本の現状	強み	✓ ETS-7、HTV、ELSA-d、CRD2 Phase 1等にて開発と実証が進む	✓ ETS-7やISSにおけるロボットアームの実証経験は保有 ✓ 地上ロボティックスの技術における優位性	✓ ETS-7やISSにおける移送システムの実証経験は保有 ✓ Astroscale社の寿命延長衛星がOF社給油を受ける契約を締結
	弱み	✓ 複数機へのRPOとサービスの提供についての実証が求められる	✓ 軌道上サービスに特化したロボットアームの軌道上での実証がない	✓ 実際の推進薬の実証の実績がない ✓ 海外で開発が進んでいる標準化を目指した給油インターフェイスの開発が見られない

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.4.1 軌道上製造技術の調査分析

2.4.2 強み・弱み分析

2.5 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

軌道上製造技術の調査分析 - 技術の概要 -

23-003-R-006

- 軌道上製造でのAM技術は、米国を中心に様々な材料を用いたAM技術実証に向けた動きが進んでいる。また、萌芽的な観点の研究開発として、切断技術の実証、溶接や鋳造等の技術開発を実施中。
- 軌道上組立では、製造ミッションと連動しつつ、米欧が官主導の下で通信アンテナ組立実証等を予定。SSPSや商業ステーション等での組立技術活用も構想中。

	軌道上製造						軌道上組立		
	AM技術				AM技術以外			衛星及び構成品	大型構造物建築
	ポリマー	複合材	金属	レゴリス等	溶接	切断	鋳造		
米国	<ul style="list-style-type: none"> NASA, Redwire  <p>軌道上実証予定</p>	<ul style="list-style-type: none"> NASA, Tether Unlimited Orbital  <p>軌道上実証予定</p>	<ul style="list-style-type: none"> ISS船内実証予定 	<ul style="list-style-type: none"> ISS船内実証予定 	<ul style="list-style-type: none"> Think Orbital  <p>構想</p>	<ul style="list-style-type: none"> Nanoracks  <p>軌道上実証済み</p>	<ul style="list-style-type: none"> CisLunar Industries 	<ul style="list-style-type: none"> NASA, Maxar  <p>軌道上実証予定</p>	<ul style="list-style-type: none"> Orbital Composites, Think Orbital  <p>構想</p>
欧州	ISS船内実証予定	ISS船内実証予定	<ul style="list-style-type: none"> ESA, Airbus  <p>軌道上実証予定</p>	<ul style="list-style-type: none"> ESA, Incus  <p>地上実証済み</p>	明確な計画は現時点で確認できない			<ul style="list-style-type: none"> EU, Airbus  <p>軌道上実証予定</p>	明確な計画は現時点で確認できない
日本	<ul style="list-style-type: none"> 三菱電機  <p>構想</p>	<p>明確な計画は現時点で確認できない →方向性：多様な素材製造技術の獲得</p>			<ul style="list-style-type: none"> Space  <p>構想</p>	<p>明確な計画は現時点で確認できない →方向性：萌芽的観点の研究開発の推進</p>		<p>明確な計画は現時点で確認できない →方向性：SSPSや商業ステーション等の建設への活用</p>	

表中の画像は各社出所に基づく

軌道上製造技術の調査分析 – 技術の課題 –

23-003-R-006

- 軌道上製造の技術的課題として、**従来地上でのAM技術が抱える課題（高精度化、高速化等）に加え、宇宙特有の課題（＝製造後の宇宙空間における製造部品の安全性・信頼性担保、デブリ発生防止等）がある。**
- 組立については、軌道上サービスの共通的な課題の一つである、**RPO技術やアーム機構技術の獲得が挙げられる。**

製造		組立
AM技術	AM技術以外（溶接、切断、鋳造）	
AM技術を用いた衛星部品等の製造 	衛星構成品の溶接やデブリ等の切断・鋳造 	アーム等を用いた大型構造物体等の組立 
<ul style="list-style-type: none"> ・ 打上積載重量軽量化によるコスト・リスク低減。 ・ 衛星部品の設計に柔軟性が出る。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ パーツを分割して打上、軌道上で溶接することで、大型構造物の構築が可能となる。 ・ 搭載物の小型化による、一度に打上げられる搭載量の向上。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 分割して打上げたパーツをロボットアームを用いて組立てることで、大型構造物の構築が可能となる。 ・ 打上積載量軽量化によるコスト・リスク低減が可能。
<ul style="list-style-type: none"> ・ 積層造形の高精度化・高速化、強度・剛性、安全性、信頼性を担保 ・ 自律的制御や製造作業と同時に検査を行うインプロセス技術の確立。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 溶接時の強度や安全性、信頼性の担保。（溶接後のパーツなどは、宇宙空間での確認が必要となる）。 ・ 切断時のデブリ発生防止技術。 ・ 自律的制御や製造作業と同時に検査を行うインプロセス技術の確立。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ RPO技術、アーム機構に係る技術の獲得。（軌道上サービス共通的な課題）

メリット

技術的課題

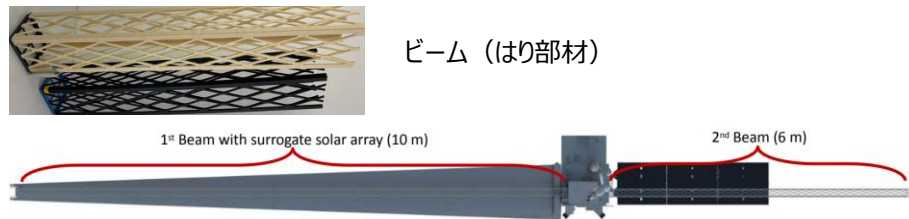
表中の画像は各社出所に基づく

軌道上製造技術の調査分析

23-003-R-006

- NASA、EU等は官民連携での軌道上3Dプリンティングや通信アンテナ組立等の実証を推進中。
- 複数のベンチャーで深宇宙も見据えた軌道上リサイクルや建設等（溶接や切断、金属再処理等）の構想が出ている。なお、ベンチャー間で宇宙太陽光発電ミッションや民間宇宙ステーション事業者らとの連携強化の動きも見られる。

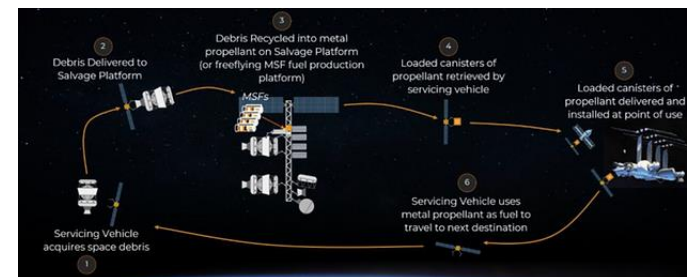
#	実施主体	各社の技術動向	将来展望
1	NASA主導OSAM（米）	<ul style="list-style-type: none"> ● ロボットアームを用いた通信アンテナの組立 ● 2つのビーム（10m, 6m）の軌道上AM実証 	<ul style="list-style-type: none"> ● 大型通信アンテナや望遠鏡の組立技術獲得 ● ロケット搭載体積軽減、GEO以遠での軌道上製造等
2	EU主導PERIOD（欧）	<ul style="list-style-type: none"> ● ISS船外・バルトロメオプラットフォームを活用した、通信アンテナや衛星部品の組立 	<ul style="list-style-type: none"> ● 2025年までにISS船外・バルトロメオプラットフォームにて、実証を予定
3	CisLunar Industries（米）	<ul style="list-style-type: none"> ● デブリを回収し、金属材料に再処理（鋳造）する技術の開発。地上実証に成功。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 加工された金属材料は推進剤としての活用や有人拠点の金属廃棄物処理等が想定されている。
4	Space quarters（日）	<ul style="list-style-type: none"> ● 加工済みの建材を打上げ、軌道上で溶接・組立を実施するための技術開発を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ● 2025年に地上での技術確立を目指し、2028年に軌道上溶接及び組立技術の実証を行う予定
5	三菱電機（日）	<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽光による紫外線硬化技術を利用した、軌道上でのアンテナ製造技術を開発中 	<ul style="list-style-type: none"> ● 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、低消費電力で通信アンテナ製造が可能



3Dプリンティングで作られる2つのビーム

NASA OSAM-2

宇宙機太陽電池パドルのビーム（梁）構造部分の3Dプリンティングを軌道上で実証する。



The Envisioned Propulsion Ecosystem

回収したデブリ等を金属原料に再処理することで、金属推進剤や軌道上での整備・組立・製造（ISAM）への活用を計画している。

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.4.1 軌道上製造技術の調査分析

2.4.2 強み・弱み分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

軌道上製造技術の調査分析 – 強み・弱み分析–

23-003-R-006

- 日本では、衛星アンテナの軌道上AM技術実証に向けた動きや溶接技術の開発が民間主体で進んでいる。
- 他方で、米欧とは異なり、官主導でのプログラムが明確化されておらず、官の研究開発予算活用や複数の民間企業が有する技術知見を巻き込んだ取組には至っていない状況にある。

日本の強み弱み分析	
強み	弱み
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 国内事業者が主体的に構想・計画を推進している。 ✓ 三菱電機において、<u>衛星アンテナの軌道上AM技術</u>にて、<u>米欧とは異なる方式（紫外線硬化）</u>を利用したアプローチを検討中。アンテナの樹脂硬化の紫外線光源として太陽光を利用することで、低消費電力で通信アンテナの製造が可能となる。 ✓ Space Quarterでは、<u>宇宙での大型構造体建築に向けた溶接技術やロボティクス技術</u>等を開発中。2028年に軌道上溶接及び組立技術の実証を目指す。また、同社は、<u>CNESからの受託研究やNEDO SBIR事業</u>を通じて宇宙空間での<u>電子ビーム溶接技術開発を推進</u>している。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 米欧ではISS船内搭載装置でのAM技術確立を行った上で、<u>衛星搭載AM技術</u>等の実証を進めているが、その中で<u>日本では主だった動きは限定的</u>である。 ✓ <u>軌道上製造・組立</u>において、米欧では官主導のプログラムが推進されている中で、<u>日本では、明確な官主導プログラムが出ていない</u>。 ✓ 軌道上AM、溶接技術について実証段階にはない。 ✓ 通信アンテナ組立やGEO以遠の軌道上製造、軌道上リサイクルといった<u>萌芽的な研究開発の方向性が打ち出せていない</u>。

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

NASA/ESAでは、COTS選定について、COTS導入要件や、検証プロセス及び技術的評価基準に関する基準の統一を図っている。JAXAでは、欧州の標準を参照したCOTS導入に関わる試験条件を設定している。

衛星開発におけるCOTSの宇宙適用に係る取り組み状況	
NASA	<ul style="list-style-type: none"> • <u>NASAではCOTS部品に関わる推奨事項</u>（選定、調達、適用、検証等）を提供する文書^[1]を<u>2020年に公開</u>。 • 当該文書とは別に、NASAでは、<u>標準部品及びCOTS部品に対して、リスクを最小化するための検証ガイドライン</u>（MEAL要件）^[2]を制定している。
ESA	<ul style="list-style-type: none"> • <u>欧州では、COTSの宇宙転用に係る標準文書</u>（ECSS-Q-ST-60-13）を制定^[3]。 • ECSS文書だけでは、ミッション等の分類が明確でないことから、<u>短期間・低コスト（R&D領域等）のミッションへのCOTS適用</u>について、<u>分類を最適化したガイドライン</u>（ESA COTS Guidelines）^[4]^[5]を<u>2021年に作成</u>。
JAXA	<ul style="list-style-type: none"> • JAXAでは、日本では、平成28年に「宇宙転用可能部品の宇宙適用ハンドブック」^[6]を策定している。 • ハンドブックでは、宇宙産業界以外で利用されている宇宙転用可能な部品を選定、評価、調達に関わる共通的な手順、推奨又は注意事項等が記述されている。

出所)

1. NASA, [Recommendations on the Use of COTS EEE Parts for NASA Missions](#)
2. NASA, [MEAL](#)
3. ECSS, [ECSS-Q-ST-60-13](#)

4. ESA, [Utilization of COTS in ESA Missions](#)
5. ESA, [EEE COTS Components – ESA Approach](#)
6. JAXA, [宇宙転用可能部品の宇宙適用ハンドブック（共通編）](#)

JAXA

NASA

ESA

ESAではミッションを3つにクラス分けをし、COTS部品として適用可能な商用部品の種類や、各部品の満たすべき技術パラメータを定義。

ESAによるCOTS導入の取り組み

- ミッションは戦略の重要性や予算等の観点で3つのクラスに分類される。
- COTS部品として適用可能な商用部品の種類や、各部品の満たすべき技術パラメータがクラス毎に定義されている。その他の電気、電子及び電気機構（EEE）部品は状況次第で導入が検討される。
- 検証テストの区分や検証内容、新たに設けたCOTS部品調達基準は、欧州宇宙標準協会による規格と米軍MIL規格などを組み合わせて定義

【ミッションクラス分類】^[1]

クラス	I	II	III
ミッション基準			
戦略の重要性	最高	高	中
目的と目標	最高優先度	高優先度	中優先度
予算	>700M€	200-700M€	50-200M€
ミッション期間	>10年	5-10年	2-5年
複雑性 (設計や開発)	高	中～高	低

【テスト区分】^[1]

- 評価
- スクリーニング
- LAT※¹テスト

【テスト例】^[1]

- 構造解析
- 温度特性評価
- 寿命試験
- DPA※²
- 総合評価

【適用部品例】^[1]

- ディスクリット部品
- 磁気部品
- マイクロ回路
- 抵抗チップ

【技術パラメータ例】^[1]

- 機能性能
- 動作周波数
- データ/信号処理効
- 率
- 相互接続の複雑さ

出所)

1. ESA, ECSS-Q-ST-60-13C Rev.1 –Commercial EEE Components
2. ESA, Utilization of COTS in ESA Missions

※1 LAT: Lot Acceptance Test ※2 DPA: Destructive Physical Analysis (破壊的物理解析)

2. 調査進捗の御報告

2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3 推進薬補給技術の調査分析

2.4 軌道上製造技術の調査分析

2.5 COTSの利用に関する調査分析

2.6 官民連携による研究開発に関する調査分析

官民連携による研究開発に関する調査分析

資金・技術開発の支援、官民・国内外のパートナーシップ、地上・宇宙技術の移転を目指した取り組みが各国で展開されている。

	取り組み	内容
NASA	• Space Act Agreement	• 契約、リース、協力協定を通して商業技術の発展を目指す。民間企業の自律性を促すために、開発におけるマイルストーンや費用負担、責任の所在、知的財産権の配分について、自由に契約条件を作成することができる。これにより伝統的な契約形態では実現できないような形で民間企業との協力関係を築くことができ、如いては産業界の新たな努力を促す事ができる。
	• NEXT STEP-2	• 深宇宙探査の商業開発を追求するための官民パートナーシップモデル。NASAと産業界が提携することでNASAによる有人宇宙探査での必要技術を開発すると同時に、産業界による商業化計画を支援する。
	• NASA STMD Commercial Partnerships : SBIR/STTR	• NASAは中小企業や非営利の研究機関による技術開発の支援策としてSmall Business Innovation (SBIR) 及びSmall Business Technology Transfer (STTR) を通じた取組を進めている。
ESA/EU	• ARTES (Advanced Research in Telecommunications Systems)	• 衛星通信に関わる技術開発を主としたプログラムとして、調査・分析から軌道上実証に至るまで様々なフェーズが対象範囲となっている
	• ESA Ambassador Platform	• ESAはARTESプログラムの一環として、企業などへの資金支援、技術的な専門知識の提供、ビジネス指導などを実施している。ESA、加盟国、企業を繋ぐ窓口的な役割として、「ESA Business Applications Ambassadors」が欧州各国に置かれている（2022年11月現在、9か国・16名）
	• ESA Commercialisation Gateway	• 宇宙の商業化関連施策をまとめたポータルサイト。ESAが提供するサービスと、事業機会・ネットワーキングに関する施策や取り組みをパッケージ化して、事業創成や資金調達、スケール化までを“Journey”として提供。
	• EU Technology Brokers	• ESA Commercialisation Gatewayのネットワーキング施策のひとつ。地上先端技術の宇宙への取り込みと宇宙技術の地上への展開を目的に、ESA認定のBrokerが、テクノロジースカウティングから、市場分析や技術支援、顧客紹介、資金調達支援などを提供する。
	• EU Global Action on Space	• 欧州委員会の防衛産業・宇宙総局（DG DEFIS）が新たに始めた取組 • EU宇宙計画とその構成要素であるCopernicus、Galileo、EGNOSを世界に広めることで、EUとEU外における宇宙・非宇宙分野での協力促進を目指している

ARTES (Advanced Research in Telecommunications Systems) 3-003-R-006

ESAは、衛星通信領域に関する産業支援プログラム「ARTES」を運用。2019年からは社会・経済課題等のニーズに改めて対応すべく戦略的なプログラムライン（5G・6G、安全・セキュリティ、光・量子通信）を追加。

概要

主体

ESA

範囲

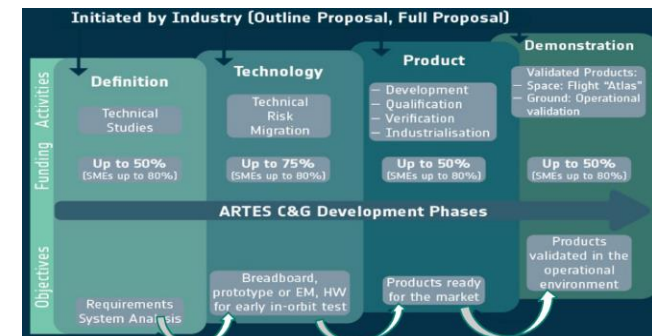
衛星通信に関わる技術開発を主としたプログラムとして、調査・分析から軌道上実証に至るまで様々なフェーズが対象範囲となっている

Strategic Program Line

- 5G・6G、安全・セキュリティ、光・量子通信

Generic Program Line

- 市場分析、技術・システムの実現可能性検討等
- 通信システムに関する衛星プラットフォーム、ペイロード等の開発
- 官民連携による大規模製品・システム開発（EDRS等）
- 宇宙アセットを利用したサービス、アプリケーション等の開発



技術開発フェーズにおける政府負担の割合

- 対象となるフェーズに応じてリスクも様々なため、政府負担割合※1（50-75%）を変えることで官民リスク負担を最適化している

期間・時期

- 特段の対象期間やターゲットとなる目標時期は設定されず
 - ARTESのプログラムラインに紐づいているプロジェクト単位で技術ロードマップが設定されている

更新仕組

- 特段の対象期間やターゲットとなる目標時期は設定されていないものの、ESA閣僚級理事会（3年に一度）において、ARTESプログラム予算の調整・策定が実施されている

出所)

1. ESA, [ARTES What We Do](#)
2. ESA, [ESA Historical Timeline](#)
3. ESA, [ARTES How Apply](#)
4. ESA, [ARTES Core Competitive Objective](#)

※1) 高い商業的・技術的リスクが認識されている技術開発の初期段階にあるプロジェクトには全額（100%）資金を提供することとなっている



(財)衛星システム技術推進機構