

**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 概要版
2023年9月**

(財) 衛星システム技術推進機構

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

環境変化に伴うニーズの変化

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

- ✓ 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

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）

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はなく、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

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

- ✓ 安全性の向上
- ✓ コスト効率の向上

- ✓ 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

- ✓ 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

- ✓ 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。

- ✓ 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。

- ✓ 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

- 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

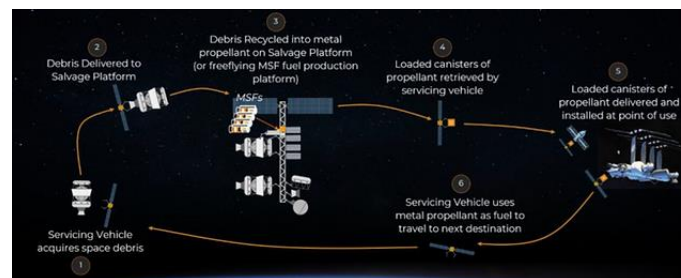


ビーム（はり部材）

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。

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）](#)

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



(財)衛星システム技術推進機構