

宇宙ごみ問題解決に向けた取り組み 促進のあり方

株式会社 野村総合研究所

社会システムコンサルティング部

主任コンサルタント 樹 世中

グローバル製造業コンサルティング部

副主任コンサルタント 蔵永 圭則



1 はじめに

宇宙産業の成長に伴う宇宙ごみ問題の深刻化と、問題解決に向けた取り組みの必要性が認識され、政府からも方針が示されている。

内閣府が主導する宇宙開発戦略本部は6月に発表した宇宙基本計画において、宇宙ごみ問題の解決に関する新たな民間ビジネスの拡大に伴い、必要となるルールの不整備を課題と認識し、関係府省が連携して、国際ルールづくりの主導、宇宙産業振興、政府衛星の運用終了後の廃棄措置等に取り組んでいくことが示されている。

しかし、民間ビジネスの拡大にはルール整備だけでなく、技術的な課題や仕組み構築の必要もあり、官民が連携して対策することが必要不可欠であると考えている。本稿では技術・仕組みの対応策に触れた上で、省庁による民間の取り組みを後押しする必要性・方向性について提言したい。

2 顕在化しつつある宇宙ごみ問題

1) 宇宙ごみの発生状況

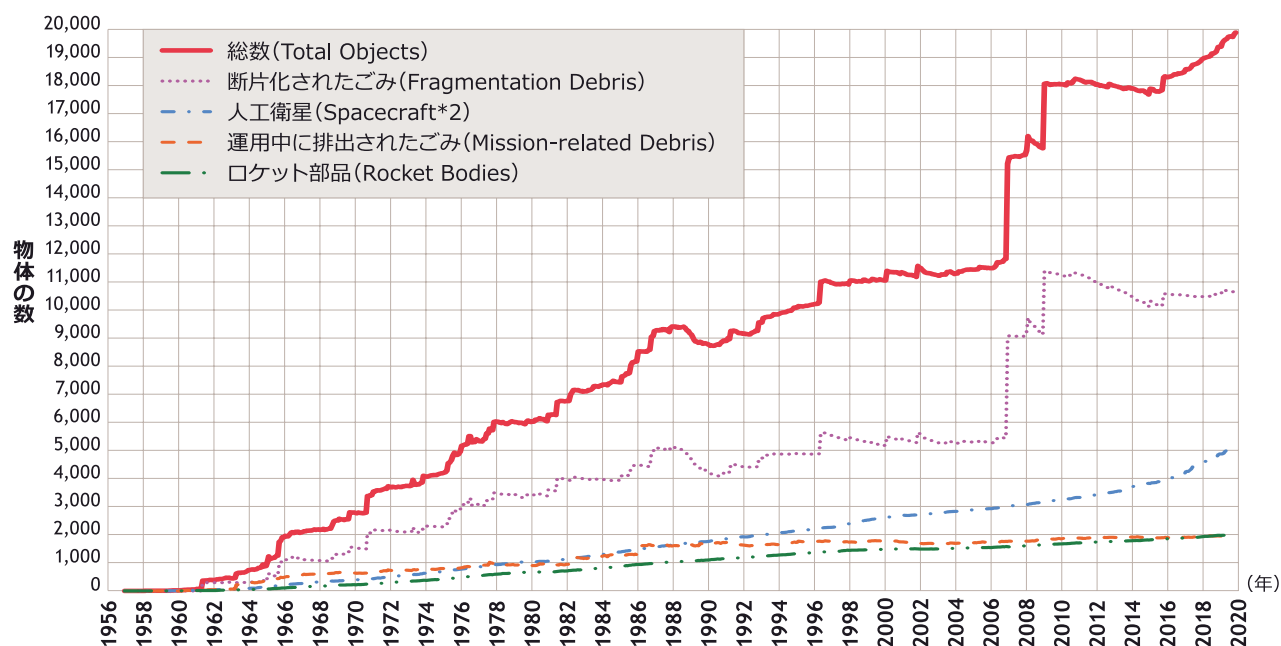
1957年のソビエト連邦によるスプートニク1号の軌道投入以来、世界では累計で5,000回を超える人工衛星の打ち上げミッションが実施されてきた。近年のミッションでは、一度の打ち上げで複数の人工衛星を投入することから、累積での投入衛星数はそれ以上となる。人工衛星の寿命は一般的には

数年から15年ほどであるが、運用を終了し廃棄された人工衛星は制御ができない状態で軌道上に残留する。宇宙ごみとは、NASAの定義によると「地球の周回軌道上に存在する、もはや有用な目的に使用することができない人工物体すべて」^{※1}である。これには、運用を終了した人工衛星等の他、それらが偶然もしくは人為的に破壊された際に発生する無数の破片が含まれる。

米国防総省戦略軍統合宇宙運用センター(JSpOC)では、地球軌道上に存在する物体のうち、衝突などが起きた場合の影響が大きいとみられる約10cm以上の物体について監視をしており、NASAが公開したデータ(図表1)によると、2020年2月時点で約2万個の物体が確認されている。そのうち約5,000個が運用中もしくは運用を終了した人工衛星(Spacecraft^{※2})であるとされている。前述した1回の打ち上げによる投入数増加の影響もあるため、直近で確認数が増えているが、同2月時点で運用中の人工衛星は約2,600基であり^{※3}、差し引いた2,400基ほどが運用を終了した人工衛星とみられる。人工衛星を除いた残りの約1万5,000個については、打ち上げ時のロケット部品(Rocket Bodies)、運用中に排出された物体(Mission-related Debris)、何らかの原因で破壊・分解された破片(Fragmentation Debris)に分類し監視している。

確認されている宇宙ごみの大部分は低軌道と呼ばれる高度2,000km以下の領域に存在し、中でも高

図表 1 地球軌道上の物体に関するオブジェクト種類別統計（月次データ）



出所) NASA「Orbital Debris Quarterly News, Volume 24, Issue 1」をNRIにて翻訳

度 700km 前後の極軌道と呼ばれる軌道の付近に集中している。この軌道では通信、観測、偵察衛星が多く運用されており、宇宙ごみが運用中の人工衛星や他の宇宙ごみと衝突することで多数の碎片となりその数を増やすことがある。実際に 2009 年には米国の民間企業が運用する衛星と、機能停止中だったロシアの軍事衛星が衝突する事故が発生し、多数の破片が宇宙ごみとなった。その様子が、図表 1 における 2009 年の破片の増加として確認できる。将来的な可能性として、特定の軌道上でこのような衝突が連鎖的に発生し、宇宙ごみが自己増殖を始めるという理論が提唱されている^{※4}。また、2007 年にも破片の急増が確認されるが、こちらは中国による衛星破壊実験の影響である。

2) 宇宙ごみ問題を深刻化させる動き

宇宙ごみが近年特に懸念される背景として、衛星コンステレーションをメインとした宇宙開発が急速に進展しつつあるという点が挙げられる。衛星コンステレーションとは、複数の衛星を協調動作させ特

定のシステムを構成することであり、衛星利用測位システム（GPS）もこれにあたる。これまで、各国政府機関を中心に人工衛星の打ち上げ・運用を進めてきたが、近年は民間ビジネスとしての衛星コンステレーション計画が主流となっている。衛星通信ネットワークのニーズへの対応を目的とした計画が多いが、衛星打ち上げコスト低減技術の開発が進んだことにより、ビジネスとして採算がとれる公算が

※ 1 https://www.nasa.gov/news/debris_faq.html

※ 2 本来は「宇宙機」であり、探査機・宇宙望遠鏡等も含めた概念だが、地球軌道上に存在するのはほぼすべてが人工衛星であるので本文内では人工衛星とする

※ 3 Union of Concerned Scientists（日本語名：憂慮する科学者同盟）より <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>

※ 4 NASA の D.Kessler らによって 1989 年に提唱。2001 年時点のシミュレーション結果において低軌道域では長期的に見てデブリ（宇宙ごみ）が増殖する環境にあるとされている

図表 2 衛星コンステレーションの主な既存サービスと計画

	運用企業・組織 (計画・サービス名等)	計画衛星数 (進捗[しんちよく]状況)	軌道高度	サービス内容
既存サービス	Planet Labs (Flock, RapidEye, SkySat)	149基(運用中)	低軌道	解像度の異なる三つの地球観測サービスに利用
	Iridium Communications (Iridium)	66基(運用中)	低軌道	衛星インターネット接続サービスに利用
	米国 (GPS)	32基(運用中)	中軌道	位置情報提供サービスに利用
計画中・構築中のサービス	SpaceX (Starlink)	3万2,000基以上 (422基打ち上げ済み)	低軌道	衛星インターネット接続サービスに利用
	Amazon (Kuiper)	3,236基(計画のみ)	低軌道	衛星インターネット接続サービスに利用
	OneWeb (OneWeb)	648基(74基打ち上げ済み)	低軌道	衛星インターネット接続サービスに利用
	AXELSPACE (AxelGlobe)	50基(1基打ち上げ済み)	低軌道	地球観測サービスに利用
	SES ^{※6} (O3b)	27基(20基打ち上げ済み)	低軌道	衛星インターネット接続サービスに利用
	Viasat (Viasat-1~3)	24基(計画のみ)	中軌道	衛星インターネット接続サービスに利用

出所) 各種公開情報より NRI 作成

大きくなったことが理由として挙げられる。

代表的な計画としては、SpaceX 社、Amazon 社、OneWeb 社^{※5}等の衛星通信網の構築が挙げられる。それぞれ数百から数万基の人工衛星投入が計画され、一部ではすでに打ち上げが開始されている。2018年に軌道へ投入された人工衛星は365基であり、各社が計画通りに事業を進めると、2025年には年間約1,100基の投入が予想されている。発表されている計画だけでも累計4万基弱の人工衛星が、宇宙ごみの大部分が分布している低軌道に投入されることになる。これは現在の全軌道上にある人工衛星の約8倍であり、従来と比較して宇宙ごみ等との衝突危険性は高まっていくため、宇宙ごみ問題は民間コンステレーション事業者においても大きな課題となっている。

3 国内外で取り組まれる宇宙ごみ対策

1) 民間のビジネス参入と宇宙ごみ対策

宇宙ごみへの対策が、官民間問わず課題となっている。

中、運用終了後の人工衛星に対する適正な処理・処分を提供するサービスが生まれている。また、民間事業者による大規模な宇宙事業の展開が進んでいることを受け、宇宙関連産業は従来の機器製造・システム構築の段階から、人工衛星を利用したサービス、さらに人工衛星の維持・管理、廃棄・処分と地上と同様の事業プロセスの構築に進んでいくと考えられる。このため、今後は宇宙ごみ対策として、適正処分に加えて発生抑制・排出削減の観点からも取り組みの進展が予想される。

(1) 人工衛星の適正処分

運用を終了した衛星は、そのまま放置すると宇宙ごみとして軌道上に一定期間とどまり、2章で紹介したような衝突事故を引き起こし、宇宙ごみを増殖させる原因となる。人工衛星を軌道から強制的に離脱させるサービス(De-Orbiting)は宇宙ごみそのものの除去や衝突による増殖の危険性を排除するという点で宇宙ごみ問題に対する直接的な対策となる。

図表 3 民間企業による軌道上サービスの参入状況

	事業化した企業	提供サービス			
		De-Orbiting	Life Extension	Relocation / Salvage	Robotics
大手	Airbus(欧州)	●	●	●	●
	川崎重工業(日)	●	—	—	—
	Space Logistics LLC(米) ^{※7}	●	●	●	●
スタートアップ	Infinite Orbits(英)	●	●	—	●
	D-Orbit(伊)	●	—	—	—
	Astroscale(日) ^{※8}	●	●	●	●
	Altius Space Machines(米)	●	●	—	●
	Atomos Nuclear and Space(米)	●	—	●	—
	Momentum Space(米)	●	—	—	—
	Tethers Unlimited(米)	●	●	—	●

出所) 宙畑「実現間近!? 激化する軌道上サービスの開発競争、その分類と参入企業まとめ 2020.2.25」より NRI 作成
<https://sorabatake.jp/10481/>

■ De-Orbiting

利用不可あるいは利用価値がなくなった人工衛星を強制的に軌道から離脱させ、比較的空いている軌道への遷移、大気圏への再突入による処分を行うサービス。地球軌道利用のガイドライン等で定められた、運用終了後の人工衛星に対する適正処分の一環としての利用や、運用中もしくは新たに投入する人工衛星の衝突リスク排除を目的として利用されることが想定されている。

(2) 人工衛星の維持・管理

民間の衛星コンステレーション事業者が増加したことにより、商業ベースでの人工衛星に対する維持管理の需要が増加している。燃料補充やアクシデント・修理対応による人工衛星の長寿命化は、事業者にとっては新たな人工衛星を製作し、打ち上げを実施するコストの削減になるとともに、宇宙ごみの排出抑制として大きな効果があると考えられる。

具体的には、Life Extension、Relocation / Salvage、Robotics といったサービスが想定される。

■ Life Extension

ハードウェア上の異常がなく、燃料切れに起因し

て寿命を迎えた人工衛星に燃料を充填(じゅうてん)することで寿命を延長するサービス。補給対象となる人工衛星に対する接近・捕獲の技術が求められ、複数企業で実証が進められている。

■ Relocation / Salvage

予定された軌道から離れている人工衛星を本来の軌道に戻すサービスで、アクシデントにより人工衛星が予定と異なる軌道に投入されてしまった場合や、推進系の故障によって自力での軌道維持が難しい場合、軌道維持のために搭載されている燃料を節約したい場合等で活用が期待される。必要な技術としては、Life Extension で必要とする接近・捕獲技術に類似するものであり、取り組み企業は Life Extension とほぼ同様である。

※5 2020年3月に経営破綻も、英国政府主導のコンソーシアムにより買収され事業継続

※6 計画を実施していた O3b ネットワーク社が 2016 年に SES 社の完全子会社化

※7 Northrop Grumman の子会社

※8 2020年6月に Effective Space 社(イスラエル)を買収

■ Robotics

対象となる衛星の外観検査、ロボットアームによる修理、新しいハードウェアを交換することでアップグレードする等の、ハードウェアメンテナンスを実施するサービス。Life Extension や Relocation / Salvage と比べ、検査・修理・部品交換などを行うためのロボットアーム技術が必要であり、難易度は高いものの、人工衛星のリユースやアップグレードが可能になることから、人工衛星を用いたサービスの維持という観点からは大きなインパクトを持つ。複数企業で基礎研究が進められている。

2) 具体的な参入企業

前節で紹介した各サービスは、軌道上で提供されることから「軌道上サービス」と呼ばれている。世界では約 20 社がこの軌道上サービスへの参入に取り組んでいるが、事業化しているのは半数の 10 社とみられる。その内訳を見ると、Airbus、川崎重工業、Space Logistics LLC など、豊富な資金を持つ大手航空関連企業（その子会社含む）と、技術に強みを持つスタートアップ企業に分かれている。特にスタートアップ企業では、技術の実用化・事業化に向けて宇宙機関（NASA、JAXA など）との共同技術開発や資金獲得などにおいて激しい競争が行われている。

4 宇宙ごみ問題解決に向けて期待される Robotics

軌道上サービスの提供を予定している各企業は、現時点では事業として各サービスに関する技術開発・実証を進めており、各サービスの商用化を目指している。特に Robotics については、他のサービスより商用化に時間がかかる一方、技術構築の重要性や高度化に伴うサービス拡大の余地があり、早期実現に向けた取り組みが望まれる。

1) 早期実現が求められる Robotics

(1) 各軌道上サービスの実現時期

早期に商用化されるサービスとしては、Life Extension が有力と考えられる。2020 年 2 月には、Space Logistics LLC が静止軌道で人工衛星同士をドッキングさせ、燃料を補給する実証に成功したと発表し、商用サービス化が近いことがうかがえる。また、軌道から離れている人工衛星を軌道に戻す Relocation / Salvage は Life Extension で必要とする接近・捕獲に関する技術を組み合わせたものであり、同様に早期商用サービス化が見込まれる。De-Orbiting についても、サービス提供を予定する各社が 2025 ～ 2026 年にかけて商用サービス開始を目指すと発表している。

一方で、Robotics に関しては、ロボット技術等の構築・検証が必要であることから、最も早期の計画でも 2025 年ごろにはロボットアームを搭載した機器を打ち上げ部品検査・修理に関する実証の開始を目指しており、商用サービス化には他のサービスよりも時間がかかると考えられる。

(2) コンステレーション事業の拡大と軌道上

サービスに対するニーズの高まり

コンステレーション衛星は特定サービスを目的としており、これまで各国の政府機関や一部民間企業が打ち上げていた多目的な人工衛星と比べ、大きく二つの特徴を有している。「小型で積載される燃料が少ないこと」と「汎用（はんよう）的な部品が多く使われる傾向にあること」である。そのため、一品物といわれるこれまでの人工衛星の寿命が 15 ～ 25 年であるのに対して、コンステレーション衛星の寿命は 5 ～ 10 年程度と短く、Life Extension や Relocation / Salvage など燃料の補給・節約による延命だけでなく、Robotics による部品点検・交

換も含めた保守の重要性が増している。

コンステレーション衛星の打ち上げ計画を時系列に見ると、すでに挙げた通り、2018 年から 2025 年にかけて毎年数百基から 1 千基程度の人工衛星が打ち上げられ、2030 年ごろには累計約 4,000 ～ 5,000 基が、燃料切れや故障発生などに伴って延命・保守サービスの対象となり得る時期に差し掛かる。このため、同時期に商用化が見込まれる Life Extension や Relocation / Salvage の事業拡大に加え、Robotics の早期実現が期待されている。

(3) Robotics の高度化

Robotics では、故障部品（あるいは故障すると予測される部品）を打ち上げ、部品交換・修理することが当面の目標となっているが、将来は運用が終了した人工衛星から部品を回収し、リユースすることも想定したサービスの拡大を目指している。

ドイツ航空宇宙センター（DLR）が資金を提供し、航空宇宙工学とロボット技術などの専門家が共同で研究を進める「iBOSS プロジェクト」では、人工衛星を構成する機能をモジュール化し、ブロックのようにモジュールを組み合わせることを目指している。このようなモジュール型人工衛星が大量に打ち上げられた場合、故障した人工衛星からモジュールを回収し、リユースがしやすいものとなる。

また、Tethers Unlimited 社では、宇宙ごみから資源を回収し、部品の再利用や素材（3D プリント技術との組み合わせ）として利用することも検討しており、NASA が開発を進める「FabLab システム^{※9}」において、宇宙での金属リサイクル技術も含めたバリューチェーンの構築に取り組んでおり、持続的な宇宙プラットフォームの形成を目指している。

こうした動きは Robotics をベースとしたものであり、Robotics の高度化による宇宙ビジネスのさ

らなる拡大が期待される。

2) Robotics の普及に向けた課題と対応

(1) 自動化技術の実用化

先行している動きとして、米国防高等研究計画局（DARPA）の Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites（RSGS）プログラムがある。同プログラムでは、Robotic Servicing Vehicle（RSV）と呼ばれるデバイスツール（機械）とその移動手段となる宇宙船を開発し、一度の打ち上げで数十回にわたる軌道上での検査・修理・部品交換等を繰り返す実証実験を今後 5 年以内（2025 年ごろ）に開始することを目指している。

当面は地上オペレーターによる遠隔操作を想定しているが、安全性・信頼性・効率性の向上には自動化技術が課題になるものと考えられている。

この課題に対し、日本は産業用ロボット分野の世界シェアが高く、高度な技術力を有し、さらには人工知能と産業用ロボットを組み合わせ、使用済み製品の自動解体に向けた技術開発も進められるなど、自動化技術確立に強みを有するものである。また、米国に本社を置くベンチャー企業が宇宙船内で活用するロボット技術の開発拠点を日本に置いていることから、Robotics の早期実現および日本の新しい産業としてわが国の技術が注目されていることが分かる。

(2) 情報連携の仕組み構築

コンステレーション事業者が打ち上げた多数かつ同型の人工衛星が故障した場合、あらかじめ用意した交換用部品を使って修理できる場合もあるが、一

※9 宇宙でのエンドツーエンド製造を可能とする Multi-material fabrication laboratory（複合材料製造ラボ）

部は運用終了となり使用済みの人工衛星として宇宙ごみの対象となるものも増えると思われる。また、使用済みの人工衛星から使用可能な部品を回収し、回収した部品を修理用部品としてリユースするなど、Robotics による人工衛星の部品再利用を実現するには、自動化技術だけではなく、人工衛星打ち上げ後の運用履歴、人工衛星の故障情報、使用済みの人工衛星の管理（トレーサビリティ情報）、部品の機能や素材に関する情報など、人工衛星に関する設計データやライフサイクルにわたるさまざまな情報をコンステレーション事業者から軌道上サービス提供企業に連携する仕組みの整備が必要となっている。

コンステレーション事業者にとって自社のサービス提供における品質と継続性が重要であり、コンステレーションビジネスの拡大に伴い、人工衛星の運用継続に関わる保守などは複数事業者間で効率化を求めていくものとみられる。Robotics についても、特定のコンステレーション事業者を対象とした事業ではなく、複数コンステレーション事業者に対して部品交換、融通可能な部品を相互に再利用する可能性や、Robotics に関する技術の高度化に伴う部品再利用・リサイクルも含めたバリューチェーン構築に向け、情報連携の仕組みも高度化していく必要があるだろう。

部品再利用の対象となる人工衛星とその部品を特定し、修理・交換のニーズとマッチングするといった情報連携にあたっては、近年の国内の資源循環分野で検討が進む情報連携の仕組み構築の動きが参考になると考えられる。資源循環分野では、製品ライフサイクルに関わる素材事業者や製造事業者、使用者・排出事業者、修理・リユース事業者、廃棄物処理・リサイクル事業者など動脈・静脈にわたって、セキュリティに配慮した情報プラットフォームの構築に向けた検討が進められている。

それと同様に、人工衛星の設計・組み立てに関する図面や、部品の詳細（設計図・ソフトウェアなど）といった設計情報、人工衛星の運用履歴（運用期間、軌道修正、衝突有無など）や故障履歴、その他関連する情報を軌道上サービス提供企業が必要に応じて活用でき、コンステレーション事業者間の情報セキュリティを両立させる仕組みが構築されることは、コンステレーション事業者にとってさらなる効率化につながるとともに、軌道上サービス提供企業にとってビジネスチャンスにつながるものと考えられる。

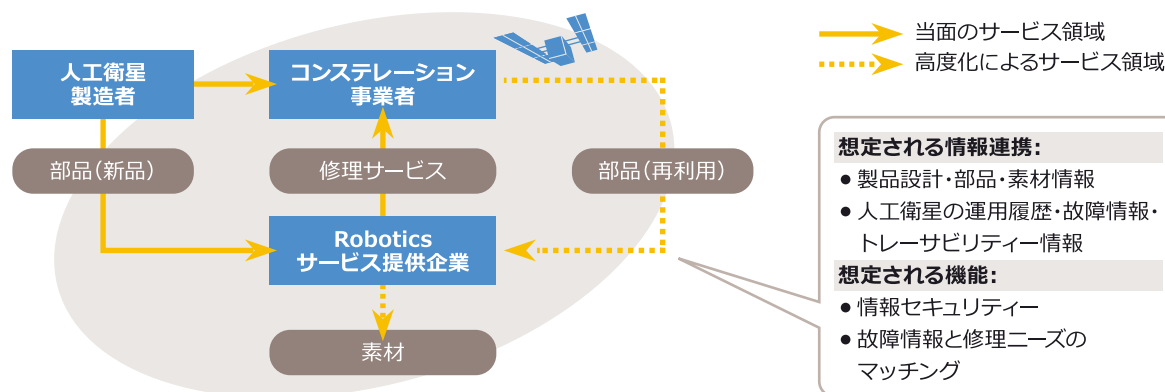
(3) 国際ルールづくり

宇宙ごみ対策について政府レベルで検討されているものは、人工衛星を中心とした宇宙機のライフサイクルにわたる各フェーズ（システム要求・概念設計フェーズ、設計フェーズ、運用フェーズ、廃棄フェーズ）の管理、軌道上破砕防止（運用終了後の破砕、運用中の破砕、意図的破壊行為）、運用終了後の廃棄（軌道域との干渉を最小限に抑えるよう、運用終了後の軌道変更など）、再突入リスク管理（再突入あるいは自然落下に際して、地上の安全を考慮）に関するものである。

技術開発が進められている軌道上サービスについては、同サービス参入企業を中心とした民間主体のコンソーシアム CONFERS（Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations）において、軌道の安全性確保を目的とした技術・運用の標準化を検討している。しかし、強制力のないコンセンサス確立が当面の目標であり、具体的なルール形成に関する取り組みは進んでいないといえる。

今後、Robotics の高度化による部品再利用・リサイクルが可能になると、運用終了した人工衛星を宇宙ごみとして扱うかどうか（いつかは修理するの

図表 4 Robotics が必要となる情報連携



出所) NRI 作成

か)、Robotics サービス提供企業が機密性をどのように担保するのか、修理不可となった人工衛星を資源として利用する場合の所有権をどうするか（場合によっては売買も含め）など、技術開発と情報連携の仕組み構築と並行して、再利用に関する国際ルール・仕組みの検討・構築が必要となるものと考えられる。

5 おわりに

日本が持つ優れた自動化技術や検討が進む情報連携の仕組みを軌道上サービスで応用するには、多くの開発要素があり、国際ルールの検討・構築も必要であることから、民間企業だけでは対応しきれないものとなる。

現在展開されている人工衛星の打ち上げや衛星コンステレーションのビジネスでは、米国、ロシア、中国が一歩進んでおり、日本としては衛星や各種部品等の製造および提供といったハード面での関わりにとどまっている。日本が自動化技術や情報連携の仕組み、ルールなどを早期に開発・適用していくことで、Robotics を通じて、より高付加価値なコンステレーションビジネスや軌道上サービス、あるいはその先にある宇宙でのビジネスの広がり（宇宙産業）を先導できる機会につながると考えられる。

2030 年度までのロードマップである宇宙基本計画工程表で示された「20. スペースデブリ対策」に関して、2020 年代後半～2030 年をめどに、Robotics の実現につながる技術開発および情報連携の仕組み構築、国際ルールづくりを産官学連携により取り組んでいくための具体的な計画づくりが必要である。また、内閣府が旗振り役となり、経済産業省による技術開発の支援、環境省を加えた省庁間連携による将来的な宇宙における循環を含むバリューチェーン構築の検討など、取り組みの強化を期待する。

●…… 筆者

樹 世中 (いつき せいちゅう)

株式会社 野村総合研究所

社会システムコンサルティング部

主任コンサルタント

専門は、サーキュラーエコノミー、資源・廃棄物政策など

E-mail: s-itsuki@nri.co.jp

●…… 筆者

蔵永 圭則 (くらなが よしのり)

株式会社 野村総合研究所

グローバル製造業コンサルティング部

副主任コンサルタント

専門は、サーキュラーエコノミー、製造業周りの新規事業立案など

E-mail: y-kuranaga@nri.co.jp