

東京大学 公共政策大学院

ワーキング・ペーパーシリーズ

GraSPP Working Paper Series

The University of Tokyo

GraSPP-P-14-003

導電性テザー

青柳拓人 松山大樹 渡辺 凛

2014年11月

GraSPP
THE UNIVERSITY OF TOKYO

GraSPP Policy Research Paper 14-003

GRADUATE SCHOOL OF PUBLIC POLICY

THE UNIVERSITY OF TOKYO

HONGO, BUNKYO-KU, JAPAN

GraSPP
THE UNIVERSITY OF TOKYO

GraSPP-P-14-003

導電性テザー

東京大学 公共政策大学院
事例研究(テクノロジー・アセスメント)2014年度

東京大学大学院公共政策学教育部公共政策学専攻(国際公共政策コース)専門職学位課程2年 青柳拓人
東京大学大学院 工学系研究科原子力国際専攻修士課程1年 松山大樹
東京大学大学院 工学系研究科原子力国際専攻修士課程1年 渡辺 凜

GraSPP ポリシーリサーチ・ペーパーシリーズの多くは
以下のサイトから無料で入手可能です。
<http://www.pp.u-tokyo.ac.jp/research/wp/index.htm>

このポリシーリサーチ・ペーパーシリーズは、内部での討論に資するための未定稿の段階にある
論文草稿である。著者の承諾なしに引用・配布することは差し控えられたい。

東京大学 公共政策大学院 代表 TEL 03-5841-1349



TECHNOLOGY ASSESSMENT:

導電性テザー

東京大学公共政策大学院 講義
「事例研究（テクノロジーアセスメント）」
最終報告書

青柳拓人（公共政策大学院公共政策学専攻 専門職学位課程）

松山大樹（工学系研究科原子力国際専攻 修士課程）

渡辺凜（工学系研究科原子力国際専攻 修士課程）

目次

1.	はじめに.....	2
1.1	背景.....	2
1.2	想定クライアント.....	3
1.3	本報告書の構成.....	3
2.	スペースデブリと対策手段.....	5
2.1	スペースデブリの概要.....	5
2.2	スペースデブリ対策における技術的選択肢と課題.....	6
2.3	スペースデブリ対策に関する取組の現状.....	7
3.	導電性テザーを用いたスペースデブリ除去システムの概要.....	8
3.1	作動原理.....	8
3.2	開発状況.....	9
3.3	コストについての考え方.....	10
4.	導電性テザーによるデブリ対策の実現が社会に与えるインパクト.....	11
4.1	日本の技術力に由来する影響力や責任の拡大.....	11
4.2	スペースデブリ対策に与える影響.....	11
4.3	経済的影響.....	12
5.	導電性テザーの導入にかかわる問題.....	14
5.1	衛星にかかわる機微情報の開示に対する各国の抵抗.....	14
5.2	軍事流用などに対する社会的抵抗.....	15
5.3	国民レベルでの議論の必要性.....	15
6.	まとめ.....	17

1. はじめに

1.1 背景

宇宙利用は近年の国民の日常生活と密接に関ってきた。しかしながら、宇宙空間の利用と表裏一体であるスペースデブリについて、これまで私たちはその現状や問題性を肌身に感じたことがない。もしかすると専門的コミュニティにおいても、スペースデブリがどのような存在であるか、また、どのような存在になり得るかを察知しようとする知的努力が不足しているのかもしれない。濃淡はあれ、国際社会全体でこのような態度を取り続けることによって、片づけようと思っても片づけられないほどにデブリが我々の周りの宇宙空間を散らかしてしまう可能性がある。そうなる前に、宇宙の利用の仕方や、必要とあらば片づけ方まで計画を立てる必要があり、そのためには今、国民生活に根差した問題として検討を始める必要があるだろうと考えられる。

宇宙空間を利用した代表的なシステムの一つに GPS 衛星が挙げられるが、これを利用したカーナビゲーションシステムは 2014 年 3 月末までに累計で 6144 万台が出荷¹されている。また、通信衛星などの分野ではすでに企業が通信衛星や放送衛星を所有・運用しており²、民間主導での市場形成が行われている。災害監視においても宇宙機は重要な位置を占めており、気象庁が所有する気象衛星『ひまわり』や宇宙航空研究開発機構(以下 JAXA)の所有する『だいち』などの観測衛星は、気象情報などをはじめとした日々の生活の向上に資する情報の他にも、台風や地震・津波等に対する監視活動に利用されている。

2013 年 1 月に宇宙開発戦略本部で決定された宇宙基本計画³は、宇宙基本法に基づき政府の宇宙開発方針をまとめたものである。この中で、政府は国民生活や産業、行政サービスの一層の向上および安全保障の確保のために宇宙開発および宇宙利用を推進すべきとしており、そのため、地球観測衛星システムや測位衛星システムなどの 8 の施策の推進をすべきとしている。一方で、次章で詳説するスペースデブリについては、宇宙空間の持続的な利用への障害となりうる課題として指摘されてはいるものの、実際にそれを解決するための策には言及がない。

スペースデブリの数はそれ同士の衝突によって自然増加する可能性があり、微小デブリも接触時には大きなリスクを有することから、今後の宇宙開発の存否を問わずスペースデブリの問題は存続するものと考えられる。このため、今後宇宙空間を利用しつつける予定のある限り、スペースデブリは適切な対処を要するといえる。さらに、これまでスペースデブリによる地上での人的被害の報告は限られているが、デブリ増加により人間の生活環境への影響が認められた場合には、宇宙機を利用せずとも検討を要する課題となる。

このような背景のもと、各国は現在、政府主導でスペースデブリ除去のためのシステムの検

¹ 国土交通省、カーナビの出荷台数累計、
http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/pdf/vics/navi_vics2014.pdf、2014 年 8 月 16 日閲覧

² 参考として、株式会社スカパーJSAT ホールディングスの 2014 年度第 1 四半期決算資料によれば、同社は現在 16 基の人工衛星を保有し、自衛隊等の政府機関へのサービスの提供も行っている。株式会社スカパーJSAT ホールディングス、

<http://www.skyperfectjsat.co.jp/information/library.html>、2014 年 8 月 16 日閲覧

³ 宇宙基本計画、宇宙開発戦略本部、平成 25 年 1 月 25 日決定

討や実証試験が進められているほか、大学などの研究機関でも、様々な手段によるスペースデブリ除去技術の開発・構想が練られている。しかし、実用化・事業化に達した事業はまだなく、スペースデブリ対策技術は全体として研究段階といえる。それらの技術の中でも、導電性テザーを用いたスペースデブリ除去システムは注目を集め、研究されている手法であり、JAXAでも有力な候補の一つとされている。

スペースデブリ問題を歴史的観点からみると、人工衛星の累計打ち上げ数のうち、約52%が旧ソ連およびCIS諸国によるもので、約27%が米国によるものである⁴。このように、宇宙開発および宇宙利用はそのノウハウ、射場の適地等の資源に関して、一部の国家に独占されてきたといえる。また技術的／資金的優位性を背景に、宇宙に関する国際関係においても、米国とロシアが影響力を持ってきたものと考えられる。こうした従来通りの国際関係がデブリ対策においても重要なファクターとなるだろう。その一方で、今後日本が見せるデブリ対策へのコミットの質と程度が、宇宙利用をめぐる国際関係、ひいては国際社会全般における将来の日本の立場にフィードバックされる可能性も十分考えられる。

以上みたように、スペースデブリは宇宙空間の継続的な利用において障害となる可能性が認識されており、安全保障政策にも有意な影響をおよぼしうる重要課題である。対策が後手にまわることが致命的であることから、早期に、国際的視野をもって日本の果たし得る役割とその影響を議論しておくことが望ましい。

1.2 想定クライアント

本テクノロジーアセスメントの想定クライアントは、日本におけるスペースデブリ対策に関する議論をまとめ、方針を検討し、必要に応じて産・官・学における取組をリードできる行政機関、ないしそのような行政機関を創出するにあたっての担当当局となりうるような行政機関である。すなわち、スペースデブリ問題は、基本的な方針を問われている段階であり、まだ研究開発課題や産業課題として議論する機が熟していないと考えられる。このため、クライアントとして内閣府宇宙戦略室（宇宙審議官1名、審議官1名、参事官7名）を想定した。

内閣府宇宙戦略室は、宇宙基本法に基づき「宇宙開発利用に関する施策を総合的かつ計画的に推進する」ことが設置目的であり、「宇宙に関する政策の企画および立案ならびに総合調整」をはじめとする役割を果たしている。中でも、重要事項の調査審議などは、内閣府設置法に基づく宇宙政策委員会が調査審議を行っている。これらの役割は、そのまま本アセスメントでスペースデブリ問題において求められる役割であることから当該機関を選定した。

1.3 本報告書の構成

本報告書は、導電性テザーを用いたスペースデブリの除去技術について、その社会的な影響に関する検討結果をまとめることで、政府機関における意思決定の材料となる情報を提供しよう

⁴ CSSI(Center for Space Standards and Innovation)の調べによる、2014年8月14日現在

とするものである。第 2 章においてスペースデブリの概要およびその対策のための技術的選択肢や課題などを整理し、第 3 章の中で評価の対象とする導電性テザーを用いたスペースデブリ除去システムについて簡単に紹介する。第 4 章および第 5 章では当該技術が社会に導入された場合に想定される影響と、それらの影響を踏まえた導入にともなって生じる問題点について想定される論点を述べ、第 6 章にて簡単なまとめを行う。なお、本報告書の作成の過程で、JAXA に対しインタビュー調査を行った。

2. スペースデブリと対策手段

2.1 スペースデブリの概要

スペースデブリとは一般的に、何ら機能を持たない人工の物体であって、地球周回軌道または大気圏への再突入途上にあるものであり、破片やそれらの要素を含むものと定義⁵される。これには、機能を喪失した宇宙機の他にも、スペースデブリ同士の衝突で生じた破片、宇宙輸送機の残骸なども含まれ、大きさは数 mm から数 m の幅があり、周回軌道も静止衛星軌道などの高軌道から低軌道まで様々である（図 1）。

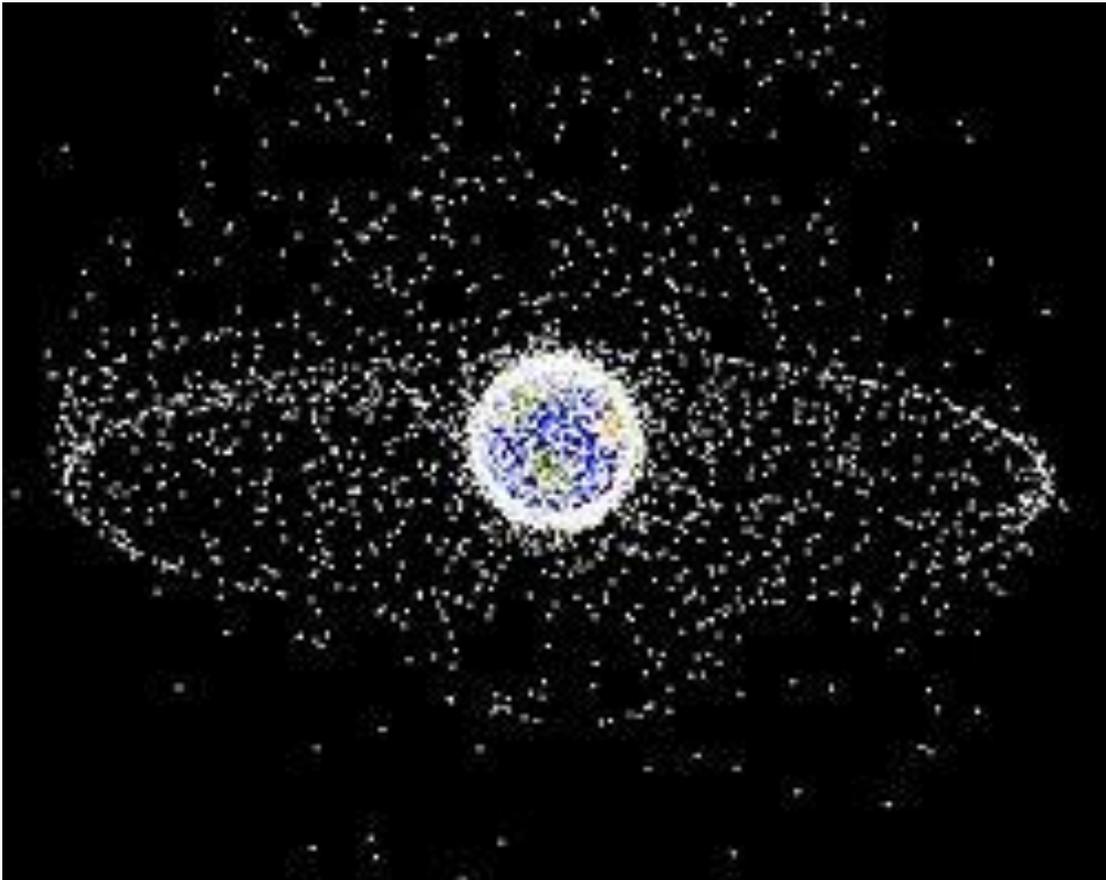


図 1 地球周辺の様々な軌道に広がるスペースデブリ⁶

最もデブリのたまっている高度は 800 キロから 1000 キロの低軌道で、目下のデブリ除去技術のターゲットはこの空間になっている。また、デブリのサイズをみると、数mmから数 cm のデブリが最も宇宙機にとって脅威になる、と考えられている。これは、そのサイズのデブリがちょうど避けるには小さく、衝突の衝撃から宇宙機を防御するには大きいためである。

大気圏上層の比較的低い軌道に存在するスペースデブリは空気抵抗を受けるため、時間を経

⁵ 国際連合宇宙平和利用委員会報告(A/62/20、2007/3/6 採択)による

⁶ 図出典：NASA ホームページ<2014 年 8 月 25 日取得>
<http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photogallery/beehives.html>

ることで徐々に減速し、最終的には地球の引力に引っ張られて大気圏に再突入し焼失すると考えられている。これがスペースデブリの個数の主要な減少機構となる。一方で、スペースデブリ同士の衝突によって新たなデブリ（破片）が生ずる、というデブリ個数の増加機構もある。

現在、米国国防省の北米航空宇宙防衛司令部が約 10cm 以上の大きさのスペースデブリに関してカタログを作成し、およそ 9000 個のスペースデブリに対して識別監視を行っている⁷。これらのスペースデブリは低軌道では秒速 7km 以上で周回しているとされ、非常に小さなデブリであっても、衝突時には宇宙機の機能を喪失させうる衝撃力をもつとされる。

低軌道を周回しているスペースデブリは、その周回速度による衝突時の影響の大きさ以外にも問題を引き起こしている。宇宙機は打ち上げ時に莫大なエネルギーを必要とするため、静止軌道などの高軌道への設置の必要がない場合には、宇宙へのロケット輸送のコストを削減するため、できるだけ低い軌道を利用することが好まれる。また、中には地球観測衛星などの非常に低い軌道でしか観測が行えない衛星も存在するため、将来にわたる周回低軌道の持続的利用は重要課題であり、低い軌道におけるスペースデブリの存在は大きな脅威となりうる。

2.2 スペースデブリ対策における技術的選択肢と課題

スペースデブリ対策の分野では、様々な技術的手段が提起され、研究が進められている。本節では、それらの技術を紹介する。

まず、スペースデブリを除去するための技術は、デブリのサイズ分画と、軌道の高低により大別できる。まず、160 キロから 2,000 キロといった低軌道では、1cm 未満・1cm から 10cm・10cm 以上、という三つのサイズ分画のデブリを対象とした除去技術が研究されている。1cm 未満のサイズでは、宇宙機を拠点とした磁界発生装置を用いてデブリの下降を早める技術や、レーザー照射によりスペースデブリを融解させ、消滅させるなどの方法が提唱されている。1cm から 10cm のサイズ領域でも、やはりレーザー照射技術が検討されているが、所要エネルギーや、デブリの光学補足の限界などの関係で、より大きいデブリについては地上や空中を拠点とした技術が考えられている。10cm 以上のデブリに対しては、導電性テザーの他、磁気エネルギーを帆に衝突させることで推進力を生み出す磁気帆(Magnetic Sail)、テザーの先の重りを振り回すことによるモーメントを活用したモメンタム・テザー(Momentum Tether)や、ロケット推進を用いた宇宙機を用いてデブリを物理的に補足し、降下させる方法などが検討されている。

他方、35,000 キロなどの高高度の軌道では、10cm 以上のサイズ分画のデブリのみが除去技術の研究対象となっている。それらの技術の中には、太陽から飛来するエネルギーをもちいて帆に推進力をもたせる太陽帆(Solar Sail)や、モーメンタム・テザー、またロケット推進機構を搭載したネットや触手構造による補足などがある。

レーザー照射により微小デブリを焼き切ろうとする技術以外は、どの技術もデブリをより早

⁷ Pardini, C., Hanada, T., & Krisko, P. H. (2009). Benefits and risks of using electrodynamic tethers to de-orbit spacecraft. *Acta Astronautica*, 64(5-6), 571-588. doi:10.1016/j.actaastro.2008.10.007

く下降させ、大気圏に再突入させて焼失することを基本としている。ロケット推進を用いる場合は、デブリの大気圏再突入を制御すること(Controlled Re-entry)でデブリの焼失による地上での損害のリスクを押さえる技術も研究されているが、実現は一段と難しくなるとみられている。

2.3 スペースデブリ対策に関する取組の現状

日本では、スペースデブリに関する問題は SSA(Space Situational Awareness、宇宙状況監視)の一環として内閣府宇宙戦略室が取りまとめているほか、防衛省では宇宙開発利用に関する基本方針を改定し、スペースデブリ問題への対処の必要性を明確化した上で、宇宙空間の安定確保のために必要となる措置を講じていくとしている⁸。一方、日米関係においては、現状ではカタログ化されたスペースデブリに関する情報や衝突危険性などについて米国から通知を受ける旨の合意がなされているが、この連携体制を一層強化しようとする傾向にある。

国際的な面に目を向けると、現行の国際法の中で宇宙利用について包括的に定めた宇宙条約では、スペースデブリについての規定は存在しない。国連宇宙平和利用委員会においてもスペースデブリに関する議論がなされ、対策の必要性が認識され始めている段階だといえる。1993年に IADC(Inter Agency Space Debris Coordination Committee)が発足し、各国の宇宙機関相互でスペースデブリ対策が協議されるようになった。2007年にはスペースデブリ対策に関するガイドライン⁹が策定され、それを受けて2010年には国連宇宙平和利用委員会でもガイドライン¹⁰が策定された。しかしながら、これらはガイドラインであり、法的拘束力を持つものではない上、IADCに関しては各国の宇宙機関同士の合意に基づいて運営されているために、加盟国以外の国に対してガイドラインの準用を求めることは難しい。

国連宇宙平和利用委員会におけるスペースデブリ対策が停滞している背景には、委員会における議決方式が一因となっている。委員会では、議決にあたってコンセンサス方式が採用されているため、議案に反対する国が一国でもある場合には議決されることはない。そのため、スペースデブリのように過去の宇宙利用の「負の遺産」であるという側面をもつ廃棄物の処理に当たっては、宇宙利用先進国と後進国の間に溝が生じてしまう。一概に発生者責任とすることも、各国に平等な負担を求めることもコンセンサスを得ることはできないと考えられる。

⁸ 防衛省 宇宙開発利用推進委員会、宇宙開発利用に関する基本方針について(改訂版)、2014/8/28

⁹ IADC、IADC Space Debris Mitigation Guidelines、2007/9

¹⁰ 国連宇宙平和利用委員会、Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space、2010

3. 導電性テザーを用いたスペースデブリ除去システムの概要

3.1 作動原理

導電性テザーとは、開回路に見立てた金属製の網をスペースデブリから伸ばし、両端で宇宙空間との間で電子をやり取りさせることで、地球の磁場との関係で電磁力を発生させ、それを推進力としてスペースデブリの軌道を遷移させるものである。スペースデブリに取り付けた金属製テザーの両端において周囲のプラズマとテザーとの間で電子をやり取りさせることにより、テザーに電流を発生し、この電流と地磁場との干渉により発生するローレンツ力を利用してスペースデブリが減速する（図 2）。導電性テザーを用いることで、ロケット推進とは異なり、化学燃料を搭載する必要がなくなり、打ち上げ時のコストはより低く抑えられ、宇宙機に事前に搭載することもロケット推進と比較して容易であると考えられるほか、テザーの投下によって自動的に進行方向逆向きの推進力を手に入れることができるため、スペースデブリ捕獲後の姿勢制御などの必要が無く、比較的容易にスペースデブリの除去を行うことができる。

この推進力はロケット推進に比べ速度や加速度の最大出力は劣るものの、スペースデブリをおおむね 1 年以内に大気圏に再突入させる能力を持つ。また、誘導起電力に打ち勝って逆向きの電流を流すことで、テザーに加速方向の推進力を発生させることも可能である。

実際にスペースデブリ除去システムを構築するには、導電性テザー以外の要素技術が必要である。まず、デブリが非協力物体であることが技術課題を生む。すなわち、スペースデブリは高速で回転している場合があるほか、通常の衛星軌道からずれた軌道を周回しているため、ランデブーおよびドッキングのためには通常の宇宙機間に用いられる技術では不十分であると言える。また、その形状に関する情報も、元所有者から提供してもらえないか分からない上に、所有者の提供した情報通りの形状をどの程度維持しているかも不明であるため、正確に把握することが難しい。このため、スペースデブリを光学的に捕捉し、その挙動を分析する運動量推定技術、また角運動量を有するスペースデブリに対して、適切な衝撃を加えて角運動量を除去する技術、そして質量などの特性が不明確な対象を正確に捕獲するドッキング技術などが必要となる。これらの課題は現在研究が進められている。

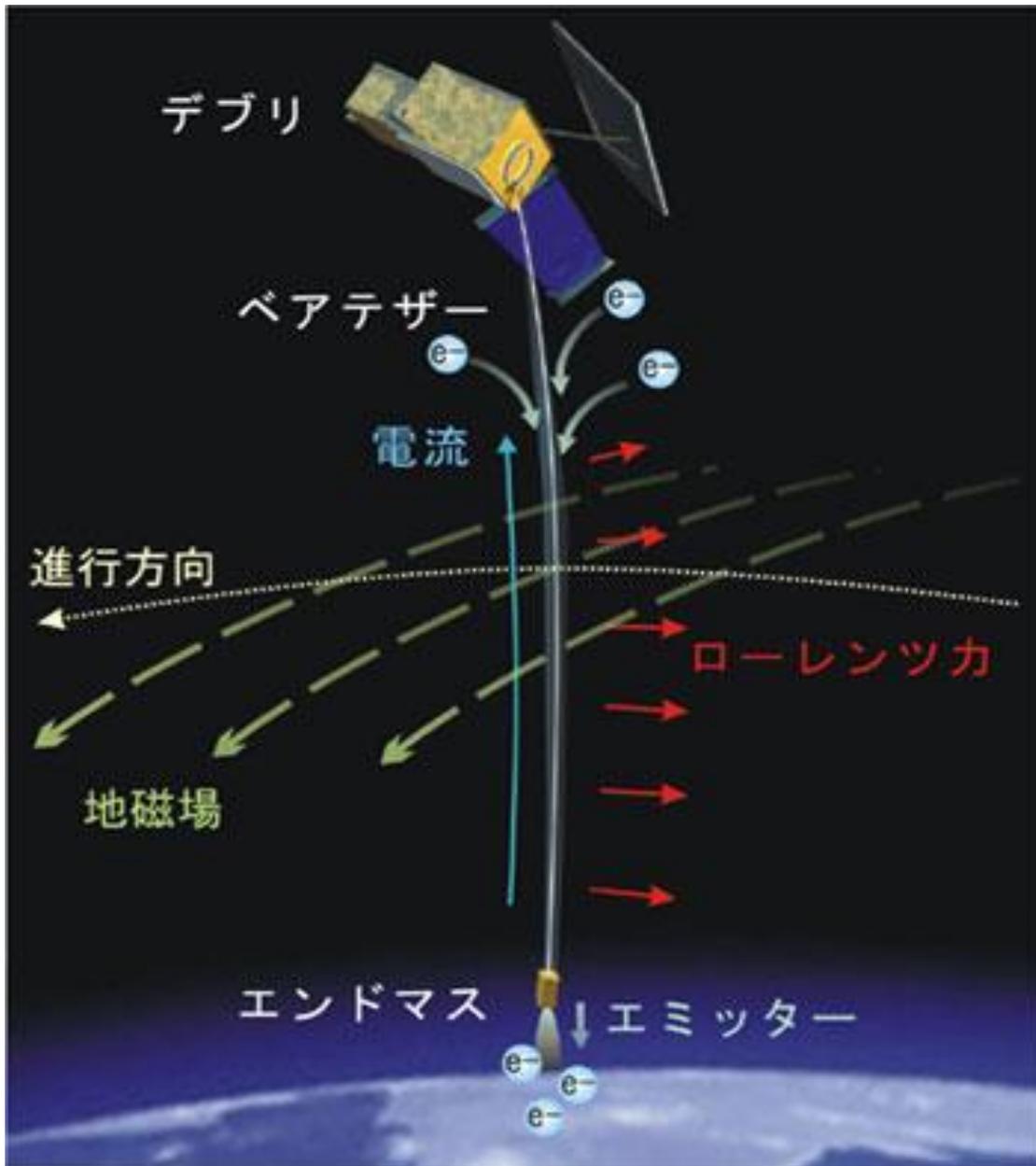


図 2 導電性テザーのデブリ除去原理¹¹

3.2 開発状況¹²

JAXA では、現在導電性テザーの試作品の開発・実証が行われており、試作品の開発が完了したほか、2020年頃の実証実験を目指している。この中でも、システム中の重要部品であるテザー部については、導電性の他、微細デブリに切断されない耐久力が求められる。このテザーについては金属を編むことでこれらの性質を確保することが検討されており、漁網メーカーとの共

¹¹ 図出典：JAXA HP <http://www.ard.jaxa.jp/research/mitou/mit-edt.html>

¹² JAXA へのインタビューによる

同開発の結果、2014年～2015年には宇宙空間での実験開始が予定されるまでに成功をおさめた。また、製作期間については、現状ではテザー1個につき2～3週間程度の期間が必要とされている。そもそもデブリ除去事業は、打ち上げに要するロケット輸送技術等の金銭的制約から、年間5～10個のデブリをターゲットとする規模を想定しているため、当面は生産環境面がボトルネックとなることはないと考えられる。

3.3 コストについての考え方

将来的には一個当たり十億円程度の費用を目指すとされているものの、現状の生産環境ではスペースデブリにかかる費用が、デブリにより破損した宇宙機を打ち上げ直したり修理したりする費用を上回っているとされる。一方で、将来スペースデブリの総数が増えた場合、宇宙機に対してどの程度の衝突頻度が見込まれ、それが結果的にどの程度の経済的損失につながりうるか、という問題に関する分析は不十分だといえる。スペースデブリの除去事業は、故障した宇宙機の修理・置換事業のように障害発生の後に行われる事業ではなく、障害が発生することを未然に防ぐための事業であることを考えれば、対策に注力するタイミングが総合的な対策の有効性に与える影響も含めて、スペースデブリ対策の包括的なストラテジーならびにその中での導電性テザー事業の役割と期待が議論されるべきではないかと考えられる。

宇宙開発や宇宙利用は単純な費用便益計算によっては妥当性が示されない場合もあるものの、国家予算を投入してスペースデブリ除去事業を運用する場合には、対策の内容、タイミングや協力体制について、最適化が図られるべきであろう。経済的な分析とともに、スペースデブリが人体や（人間）環境に与えるハザードを考え、変化する地球周りの環境にも留意しつつ、人的な被害の程度を見積もり、スペースデブリによってもたらされる社会的な損害を見極め、事業運営等を検証することが必要ではないか。これらの議論においては、宇宙利用に関する国民の考えを取り入れていく姿勢も求められると考えられる。

4. 導電性テザーによるデブリ対策の実現が社会に与えるインパクト

本章では、導電性テザーによるデブリ対策が実現した場合に生じうる社会的な影響について、3章までに紹介した調査を踏まえて本アセスメントにかかわる論点を紹介する。本章で扱う議論は、導電性テザーによる直接的な影響のみならず、導電性テザーを用いデブリ除去が行われている場合の総合的なデブリ対策がもたらしうる影響についても言及している。これは、導電性テザー以外にも様々な技術的・政治的要素によって機能するデブリ対策システムの全体像をみることで初めてみえる社会的影響にも想像を広げようとする狙いと、そのことによって社会的に有意なアセスメントとする狙いがある。すなわち、このアセスメントは、「どのデブリ対策技術を採用するのが良いだろうか」という、いわば技術の絞り込みの段階を想定していない。むしろ、「デブリ対策を本格的に行うべきなのだろうか」「そのときに導電性テザーを使うべきなのだろうか」と問い、導電性テザーの代替オプションとの比較に限らない検討を行う方が、これまでの日本におけるデブリ対策をめぐる議論の発達を鑑みて有意義だと考えた。

4.1 日本の技術力に由来する影響力や責任の拡大

日本の導電性テザーによるデブリ除去技術は世界的にみても進んでいることから、この技術がデブリ対策戦略の中で重要な位置を占めるということは、日本の潜在的な影響力が拡大すると考えられる。例えば、導電性テザー技術の世界での共有ないし協力的な利用の仕組みを検討するといった場合、技術供与の形態やその要件について日本の発言権が大きいことが考えられる。そもそも、輸送や衛星利用などの分野では国内事情により技術先進国同士による技術的な協力が難しく、技術開発途上国に対しても技術をブラックボックス化したサービスの提供が行われている現状を踏まえると、デブリ対策に関して技術レベルで国際的に歩調を揃えた対策をとること自体、合意が困難であるとみられる。そこで日本がキー技術を提供し、国際的な発言権を高めながら新しい国際協力の仕組みを築くことができるとすると、宇宙への進出競争や技術開発競争そのものに一石を投じる状況も想像される。裏返しとして、仮に日本が技術力にもとづく発言権を積極的に行使せず、硬直化した技術システムを用いてデブリ対策を行うことになった場合、またそもそもデブリ対策が国際的な協力合意のもとで進められなかった場合などは、その後の問題状況に対して日本が一定の責任を負うと考えることもできる。

4.2 スペースデブリ対策に与える影響

導電性テザーを用いたデブリ対策が実用化される場合、総合的なデブリ対策に様々な影響を与えたと考えられる。一つの例として、「何においても早め早めの検討と対策が有効」という考え方が一般的になるかもしれない。導電性テザーは打ち上げのコストが大きいため、予め衛星にテザーを搭載して打ち上げを行うことによって、衛星利用後に高度を上げたり、回収したりすることよりもコストが格段に安く済む、という状況が生じうると考えられる。さらに、導電性テザーの除去対象である比較的大型のデブリ対策の在り方によって、それ以下のサイズのデブリの量や性質や分布が変わり、結果的に中小デブリ対策や総合的なデブリ対策の最適解が変わる。

あるいは、導電性テザーの場合、テザーとデブリの複合体同士は衝突確率がテザーなしの場合よりも大きいことが試算されている¹³。また、仮にテザーが断裂し、テザーの破片が生じた場合に、両端がどのような挙動を示すのか、そのような二次的デブリの対策の要件は何か、等の検討が必要だろう。

導電性テザーのもう一つの特徴として、利用する宇宙点でのプラズマ密度や地磁場の大きさによって性能が変わることが挙げられる。こうした適正高度の違いのある技術を用いる場合、適正外の状況に対応するための補完的技術の開発・実用化も必要になる。例えば、導電性テザーと同様に比較的大型のデブリを対象とした **Momentum Exchange Tethers**、太陽帆、レーザー帆、捕獲衛星との高度による棲み分け／性能の最適化と、技術的多様性のコストを天秤にかけ、長期的な視点で総合的デブリ対策の資金を配分することが必要だろう。

ただし、以上に述べたような影響力の大きさをもって、導電性テザーの実現が総合的なデブリ対策に一方向的に影響を与えて良い、ということではない。まず、ある程度見通しの立った目標（デブリの完全除去、年限を区切った経済的な支障を段階的に抑えること、等）を定め、それに基づいて総合的な対策が練られ、その中で導電性テザーの実現がもつ影響力の大きさが適切に評価されながら柔軟にデブリ対策が進められることが望ましい。

4.3 経済的影響

導電性テザーによるデブリ除去を推進する場合、様々なビジネス形態を生み出すことが期待できる。まず、デブリ除去事業自体がビジネスをもたらす。デブリ除去事業自体に民間企業が参入すれば、莫大な資金を要する除去事業の早期着手、早期最適化を期待する事が出来るため、除去事業の安定化のために積極的に民営化が促進されるものと思われる。この場合、デブリ除去による地球全体の利益を事業主に還元する国際的な仕組みを確立することが必要であり、各国の利害関係や排出者責任の枠組み等を精査しなければならない。一方、民間企業による事業が安定すれば国同士の対立や国民的議論をある程度抑え、同時に日本の新たな成長産業、輸出産業として期待する事ができる。

また、導電性テザーは前章で述べたように電源を用意する事で進行方向への推進力を発生させる事もできるため、テザーによる除去事業が確立し、低コスト長寿命のテザーを開発することができるようになればこれを用いた新たなビジネスモデルも想定できる。超低軌道を利用する軌道サービスがこの一例に挙げられる。低軌道における衛星打ち上げは、打ち上げコストは低く抑えられるものの空気抵抗が大きいため減速が著しく、長期間の軌道の保持が困難であった。導電性テザーによる推進はエネルギー効率に優れ搭載する燃料の重量を低く抑えられるため、テザー

¹³ デブリ除去技術としての導電性テザーの有効性を検討した論文によれば、デブリ単体での宇宙機との衝突確率が (1%/yr・km) であるのに対し、デブリーテザー複合体同士は (10%/yr) との試算結果がある。ただし、他の宇宙機との衝突は高度 1000 キロで対象が 10m 特性の場合。複合体同士は同軌道内で複数の複合体があると仮定。Pardini, C., Hanada, T., & Krisko, P. H. (2009). Benefits and risks of using electrodynamic tethers to de-orbit spacecraft. *Acta Astronautica*, 64(5-6), 571-588. doi:10.1016/j.actaastro.2008.10.007

による推進技術の研究が進めば長期間の超低軌道サービスの継続的な利用が可能となる。低軌道の衛星は打ち上げコストに優れる以外にも、リモートセンシングにおける分解能の向上に結び付くため、資源探査や災害時の活用などが期待される。また、超低軌道利用においては地上との通信でのタイムラグや送受信の電力を抑えられる。

低い軌道での長期の軌道保持ができれば、既に込み合っている低軌道において、利用中の衛星のメンテナンスやアップデートも可能となり、より経済的な衛星利用を進める事もできるかもしれない。

その他に考えられるものとしては、デブリを除去する事で初めて実現性の上がる宇宙空間中の大型構造物がある。将来的にエネルギー問題を解決する上で期待されている発電方式である宇宙太陽光発電システム(SSPS)もその一つである。SSPSは、宇宙空間上に巨大なソーラーパネルを設置し、発生させた電力をマイクロ波やレーザーに変換する事で地上に送信する発電方式であるが、太陽光の強度が宇宙空間上の方が強い点、昼夜問わず一定の太陽光を得る事が出来、気候変動も無視できる点などに優れる。一方、デブリ衝突による損傷を回避する事が難しく、寿命が著しく制限される。同様に、宇宙空間と地上の効率的な物資の往復を可能にする軌道エレベータも、ある程度の大きさのデブリの回避は技術上可能なものの小さなサイズのデブリは捕捉が難しく避けられない為、持続的な運用にはデブリの除去が必要になる。デブリ除去が成功した場合にはこれらのビジネスチャンスも生まれるため、うまく社会のニーズと合えば、デブリ除去のコストを投資と捉える可能性もある。

以上のように、デブリ除去の推進は副次的に様々な経済影響を与え、それによる利害は国によって異なる。近年の宇宙開発状況は小型・低コスト化が最も重要な課題とされているため、将来的な課題であるデブリの除去を積極的に押し出すことは難しい状況にある。継続的な宇宙利用においてデブリの除去の是非を検討する場合、派生技術を含めた広範な経済影響を考慮し全体の利益を比較する必要がある。

5. 導電性デザーの導入にかかわる問題

本章では、4章で紹介した導電性デザーによるデブリ除去の社会影響を踏まえ、それらの技術の実用化プロセスに伴い、想定される問題を紹介する。ここでいう問題とは、導電性デザー導入の障壁という意味に止まらず、宇宙利用において社会的に望ましい選択肢に向かうことを目指すときに生じうる問題、として検討している。ここで前章に引き続き強調したいのは、導電性デザーの導入を目指す可能性がわずかでもあるならば、検討開始を早くすることが重要であるという点である。導入の是非を検討する土台として、ここに示す社会的課題に早期に取り組めるような政治的イニシアチブ・制度づくりが求められる、と考えられる。

5.1 衛星にかかわる機微情報の開示に対する各国の抵抗

スペースデブリ除去を持続的に行うためには、軌道上のデブリの位置情報を正確に把握することが必要となるが、これらの情報は全てが国際的に開示されているという状況にはない。例えば、運用中の衛星情報についての情報は伏せられている場合があり、宇宙空間上で発見した衛星の残骸がどの国に帰属するものかわからず、また不要となって放棄されたのか所有権を残しているのか不明なものも存在するため、限られたデブリのみしか除去できなくなる可能性がある。しかし、デブリの位置情報の取得はテロ対策等国防上必要とされるものであり、また人工衛星の利用も軍事的側面を持ったものであることから、デブリ除去を名目とした軌道上の衛星利用情報、デブリ情報の開示には抵抗があることが想定される。また、機微情報の開示による技術監視や、使用済み衛星の解析による技術盗用の可能性もあるため、安易に他国に情報開示を迫ることで自国の情報開示を求められた場合に国際的に不利になる可能性もある。宇宙開発における重大なモチベーションとして自衛的な安全保障を確保する事があることは否定できない為、国際的に協力して取り組む分野と自主的に取り組む分野の明確な区分けと、その国同士のすり合わせが必要となる。

デブリ除去のための情報開示を考えた時、最も単純な解答としては情報開示を極力行わず、代わりに自国が排出したデブリを全て自国が回収するという方式が考えられるが、デブリ同士の衝突により所在不明となったものが存在すること、そもそも主デブリ排出国がデブリ回収に積極的に関わるとは限らないことが問題となる。デブリ回収には莫大な費用がかかり、これまで主にデブリを排出してきた国だけでは賄いきれなくなっている現状、全ての責任を主排出国に転嫁しても問題は解決しない。一つの対応策としては、今まで主にデブリを排出してきた国は同時に宇宙の利用状況についても大部分を占めていることから、デブリ除去の費用というよりむしろデブリ情報の開示の義務を持たせ、現在および未来の広範なデブリマッピングに寄与するということが考えられる。主に宇宙開発を行ってきた国の国民の視点から見れば、自国の費用で開発した技術によって世界全体の発展に寄与したのだから、デブリ除去費用のみ自国が負担することを素直に受け入れることは難しいだろう。しかし、今後の宇宙開発のためのデータ開示であれば、排出者責任を考えればある程度受け入れられるのではないか。この場合、現在までに宇宙利用を進めてきておらず今後進めるであろう国家にとっては余計な費用負担を迫られる可能性があり不利となるが、現在まで利用してきた軌道サービスによる恩恵と先進国が新たに課されるデブリマッピ

ングの責任をもって、対等にすり合わせていく必要がある。

5.2 軍事流用などに対する社会的抵抗

人工衛星が軍事的側面を持つのと同時に、軌道上の人工物除去技術も軍事的側面を避けられない。利用中の衛星の悪意を持った除去や、前述のような使用済み衛星の除去を名目とした回収、解析など、デブリ除去事業が軍事的に悪用される可能性があり、現在既に宇宙開発を進めている国の視点で見れば、これらのリスクを踏まえてデブリ除去の是非を考慮する必要がある。更に、テザーの打ち上げを名目としたロケットの打ち上げ実験を行うなど、現状と比べデブリ除去が活発化されるにつれロケット打ち上げがより身近になり、世界全体の軍事的脅威が高まる可能性もある。現在における宇宙利用では GPS や気象観測などが専ら国民にとって身近な存在であり、その軍事的役割を意識する事は少ない。しかし、デブリ除去問題を取り上げ国際的な責任の所在を議論する、または実際にデブリ除去のために各国がロケットを打ち上げることが多くなった状態を想定すると、軍事的な危機感を覚える人々が増える可能性がある。

そのため、悪用されないための技術的対応だけでなく、各国のデブリ回収の終始を相互に監視する国際的な取り組みが必要となる。これは、事業主による自主的な情報開示のみならず、それを裏取りする衛星による監視も必要となるが、衛星の利用数を考慮すると監視能力をもつ国が主に悪意ある事業利用の被害者となるため、国際的な相互監視の取り組みは難しくはないはずである。相互監視のみをもって国民の安全を担保し、戦争への危機感を覚えた人々から恐怖を取り除くのは難しいが、デブリ除去事業を管理できる国際的な機関を設け、事業の透明化や信頼性の向上に努めるなど、世界全体に向けて宇宙の平和利用を訴える必要がある。

5.3 国民レベルでの議論の必要性

デブリ問題を取り組むために、その前段として国民レベルで議論すべき課題が現状山積しており、これらの議論が不十分なままでは、有効なデブリ対策が抑制される、または問題の悪化が進む恐れがある。本アセスメントでは、デブリ対策に関して宙に浮いている課題のうち、特に重要と思われる以下の3つを提示する。これらの点について、実りある議論をするための制度づくりをなるべく早期に行うことが求められるのではないか、という認識を強調したい。

(i) 宇宙への継続的な展開、宇宙の利用拡大

第一の段階として、今後も宇宙開発を継続していくか、また利用拡大していくのかという点を確認する必要がある。現在我々は衛星利用により様々な恩恵を受けて生活しているが、宇宙利用を続けていく限りデブリの増殖の問題は避けられず、放置すれば現状の宇宙利用も困難になる可能性もある。一方、スペースデブリは既に大型なものから小型のものまで膨大な数が存在する事が確認されており、それらの除去には大変な費用がかかる。そのため、宇宙利用を継続していくことの是非を国民レベルで共有し、継続していく場合にかかるであろう費用を認識する必要がある。これは、持続的に成長を続けていくためには投入する税金について国民が用途を理解し同意

する必要があるためである。

(ii)宇宙予算

宇宙関連分野の予算の問題として、実質的に国防に関わる部門の予算が宇宙予算として通ってしまう点が挙げられる。導電性レーザーによるデブリ除去技術も、前述のように悪用する事で他国の衛星の墜落に用いる可能性もあることから、宇宙開発技術の平和利用と軍事は切り離すのが難しいという特徴がある。国民が普段宇宙開発技術と軍事を直接的に結び付けて考えることは多くないと思われるが、一方他国から見れば不透明さを抱えた技術開発は警戒の対象であり、国際協調が必須である今後の宇宙開発において障壁になりかねない。また、国内における宇宙開発が軍事的側面を切り離せない事がひとたび話題として取り上げられれば、持続的な宇宙開発を妨げる要因になり得る。デブリ対策を機に、宇宙予算がどうあるべきかを議論する必要があるのではないか。

(iii)デブリ除去によるリスク

最後に、デブリ除去がもたらすリスクについて、より詳細な検討が必要である。現状デブリの除去は地上に落下させ大気圏に衝突させることで焼失させることを中心に考えられているが、落下地点を正確に制御する事は難しく、燃え残ったデブリが地上に影響を与えるリスクについては詳細には検討されていない。現状でもデブリは地球上に降り注いでおり、それによる負傷者は報告されていないことから、デブリ落下によるリスクは小さいものと考えられるが、未知の不安に対し定量的評価なしに国民を納得させることは難しい場合がある。デブリを落下させることによる直接的な国民へのリスクや健康影響、環境影響について定量的な評価を、信頼できる第三者機関が発表する事が望ましい。

6. まとめ

本報告書では導電性テザーに関して、その要素技術の開発およびスペースデブリ除去への適用に際して想像される社会的影響をまとめた。

導電性テザーは、宇宙開発において今後大きな影響を及ぼしかねないスペースデブリに対する有効な解決策となりうる。さらには、その開発を進めることで、宇宙空間における推進機構などの他の目的への応用も期待され、今後の展開によっては日本が宇宙分野における発言力を強化する契機となる。

一方で、軍事的な流用の可能性や各国の人工衛星に関する技術的機微情報の開示への抵抗などの障害も考えられるほか、国民レベルではコストの面や今後の宇宙開発ビジョンそのものに対する疑問に対して十分な説明がなされないままに開発が進んでしまう可能性も否定できない。

以上にみた導電性テザーの果たし得る機能、もたらしうる影響や利用の前に検討を要する事項について、日本の今後の宇宙利用の在り方を基軸に検討していくことが国家規模の課題であり、そのための産・官・学を巻き込んだ制度づくりが必要なのではないか。