

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第7章 スペースデブリに対処するための技術とルール —宇宙空間の持続可能な利用のために—
他言語論題 Title in other language	Chapter7, Technologies and Rules for Dealing with Space Debris: For Sustainable Use of Outer Space
著者 / 所属 Author(s)	中村 真也 (NAKAMURA Shinya) / 国立国会図書館調査及 び立法考査局文教科学技術課
書名 Title of Book	宇宙空間の利用をめぐる動向と課題 科学技術に関する調 査プロジェクト報告書 (International Trends and Issues in the Utilization of Space)
シリーズ Series	調査資料 2022-5 (Research Materials 2022-5)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2023-03-27
ページ Pages	125-144
ISBN	978-4-87582-907-2
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	近年その増加による宇宙空間の環境悪化が指摘されている スペースデブリについて、それらに対処するための技術動 向を概説し、スペースデブリの低減をめぐるルール整備の 現状と課題をまとめる。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

第7章 スペースデブリに対処するための技術とルール

—宇宙空間の持続可能な利用のために—

国立国会図書館 調査及び立法考査局
文教科学技術課 中村 真也

目 次

はじめに

I スペースデブリ問題の現状

- 1 定義
- 2 スペースデブリの数
- 3 スペースデブリが問題となる軌道
- 4 発生原因
- 5 危険性

II スペースデブリに対処するための技術

- 1 観測・監視
- 2 衝突の回避・防御
- 3 スペースデブリの発生防止
- 4 既存のスペースデブリの除去

III スペースデブリをめぐるルール整備の現状と課題

- 1 宇宙関係諸条約におけるスペースデブリ
- 2 ガイドラインによるスペースデブリの低減
- 3 スペースデブリ除去の法的課題

おわりに

【要 旨】

人工衛星等の宇宙機の残骸やそれらの破片は「スペースデブリ」と呼ばれる。スペースデブリは地球周回軌道を高速で飛び交っており、数 cm 程度の大きさのものでも、運用中の人工衛星に衝突すれば致命的な被害を及ぼす危険がある。スペースデブリは、宇宙機の破裂や意図的な破壊行為などによって増加しており、十分な対処がなされない限り、今後も増加することが予想されている。宇宙空間の持続的な利用のため、その低減が喫緊の課題となっている。

スペースデブリに対処するため、観測・監視の技術やそれらに基づく回避・防御の技術が開発されている。また、運用終了後の人工衛星がスペースデブリとならないように軌道から除去する技術や、既に軌道上に存在しているスペースデブリを除去する技術を開発する動きも見られる。一方、スペースデブリの低減に関するルールについては、国際法上具体的な規定がなく、国際社会はガイドラインなどを策定して対応している状況にある。

はじめに

人類が宇宙開発を開始して以来、宇宙空間には人工衛星やロケット機体などの人工物体が多数放出されてきた。こうした人工物体の残骸やそれらから発生した破片などは、「スペースデブリ」と呼ばれ、地球周回軌道を高速で飛び交っている。スペースデブリが持つエネルギーは非常に大きく、わずか数 cm 程度のものであっても、運用中の人工衛星に衝突した場合にはその機能を完全に停止させるほどの威力がある。

スペースデブリは、世界初の人工衛星「スプートニク 1 号」がソ連によって打ち上げられた 1957 年以降、現在に至るまで増加を続けている。特に、21 世紀に入ってから、人工衛星同士の衝突や、意図的な衛星破壊実験などによってスペースデブリが大量に拡散する事例も発生している。各国の宇宙機関による宇宙開発や民間企業による宇宙ビジネスが活発になる中、増加を続けるスペースデブリにより、宇宙空間の持続可能性が脅かされている。

本稿ではまず、スペースデブリ問題の現状を整理し、スペースデブリの危険性について確認する。その上で、スペースデブリに対処するための技術の概要及び開発動向と、スペースデブリの低減に関するルール整備の現状と課題について述べる。

I スペースデブリ問題の現状**1 定義**

スペースデブリ（宇宙デブリ、宇宙ごみとも呼ばれる。本稿では「デブリ」と呼ぶ。）について、国際法上、確立した定義は存在しない。そうした中、国際機関間スペースデブリ調整委員会（Inter-Agency Space Debris Coordination Committee: IADC）⁽¹⁾ は 2002 年に採択したガイドライン（Ⅲ 2 (1) 参照）において、デブリを「機能していないすべての人工物体（その破片および構成要素を含む。）で、宇宙空間にあるかまたは大気圏内に再突入するもの」と定義しており、この定義が重視されるようになっている⁽²⁾。この定義によれば、正常に稼働している人工衛星

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、2023（令和 5）年 1 月 25 日である。

(1) デブリ研究についての情報交換やデブリ低減策の策定を行うための国際フォーラムとして各国の宇宙機関が結成した機関。本稿Ⅲ 2 (1) 参照。

(2) 小塚荘一郎・佐藤雅彦編著『宇宙ビジネスのための宇宙法入門 第2版』有斐閣, 2018, pp.57-58.

などの宇宙機や、人工物体ではない惑星間塵（メテオロイド）はデブリに該当しない。本稿においても、この定義を採用する。

2 スペースデブリの数

(1) 概況

1957年以降、地球周回軌道に打ち上げられた人工衛星は世界全体で1万4000機を超える。軌道上の人工衛星は、わずかに存在する大気の抵抗により徐々に減速して軌道から離脱するが、現在も軌道上には約9,800機の人工衛星が存在している。これらの人工衛星のうち、稼働しているのは7,100機程度であり、それ以外の3,000機弱はデブリに該当する(2022年12月時点)⁽³⁾。

軌道上に存在するのは人工衛星の機体だけではない。人工衛星の打ち上げに使用されたロケットの残骸や、人工衛星の運用過程で排出される部品など、ミッションに付随して軌道上に放出される物体もデブリとなる。また、軌道に放置された機体は何らかの理由で破裂して発生する破片もデブリに該当する。こうしたデブリが、宇宙空間の環境悪化の要因になっている。

デブリの観測に基づく統計モデルの推計によると、軌道上に存在するデブリの数は、直径10cm以上のものが3万6500個程度、1～10cmのものが100万個程度、1mm～1cmのものが1億3000万個程度と見積もられており(2021年時点の推計)⁽⁴⁾、稼働している人工衛星よりもはるかに多くのデブリが地球を周回していると考えられている。

(2) 推移

地球を周回する一定以上の大きさの宇宙物体は、地上からの観測によって軌道や発生源が推定される。その情報は宇宙物体のカタログに登録され(「カタログ化」という)、継続的に追跡される。図1は、カタログ化された宇宙物体の数を、物体の種類(破片デブリ、宇宙機、ミッション関連デブリ、ロケット機体)ごとの経年変化で示したものである。

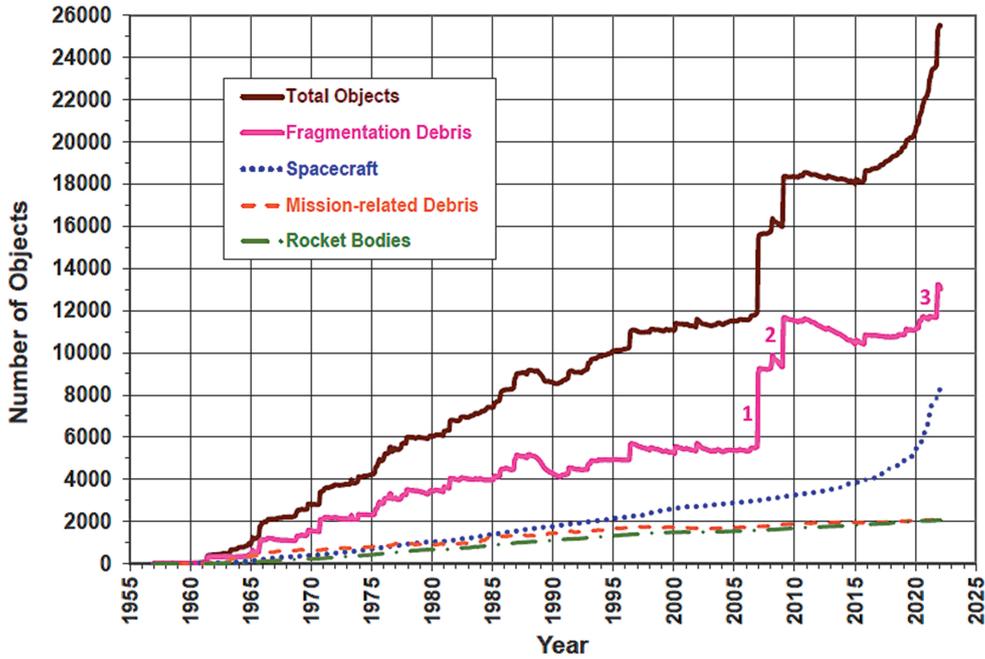
同図から、宇宙開発の開始以降、宇宙物体の数は右肩上がり増加していることが分かる。特に破片デブリの数については、2007年以降、短期間の鋭い増加が3回見られる。これは、後述するように(4(3)参照)、兵器を用いて宇宙機を破壊する対衛星(Anti-Satellite: ASAT)実験や、人工衛星同士の衝突事故によるものである。また、宇宙機の数が近年急激に増加していることも読み取れるが、これは、多数の小型人工衛星を一体的に運用して通信サービスなどを提供する「衛星コンステレーション」の構築がSpaceX社などの民間企業によって計画されており、そのための人工衛星の打ち上げが増加しているためである⁽⁵⁾。このような地球周辺の宇宙空間における物体の増加は、宇宙空間の持続可能性に対する脅威であり、デブリの低減は喫緊の課題となっている。

(3) “Space Environment Statistics.” Space Debris User Portal Website <<https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>>

(4) *ibid.*

(5) 国連宇宙部(UNOOSA)が公開している人工衛星のカタログデータにより、打ち上げ年月日、打ち上げ国、人工衛星の名称等が確認できる。“Online Index of Objects Launched into Outer Space.” United Nations Office for Outer Space Affairs Website <<https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp>> 衛星コンステレーションについては、本報告書の清水直樹「第3章 衛星コンステレーションの可能性と課題」を参照。

図1 カタログ化された宇宙物体数の推移



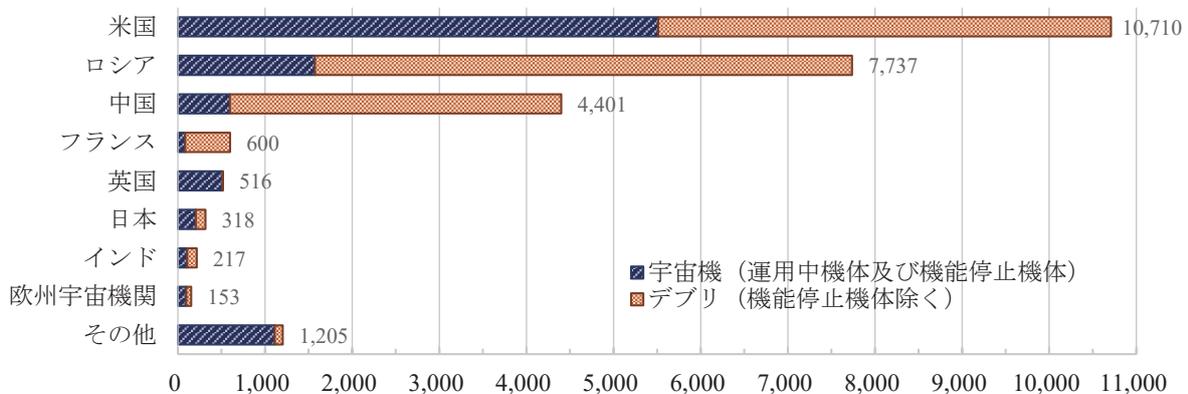
(注) Total Objects はカタログ化された全宇宙物体、Fragmentation Debris は破片デブリ、Spacecraft は運用中の又は機能停止した宇宙機、Mission-related Debris はミッション関連デブリ(人工衛星の打ち上げや運用等のミッションの過程で放出される部品等)、Rocket Bodies はロケット機体を指す。破片デブリのグラフに示されている数字(1, 2, 3)はそれぞれ、中国の対衛星(ASAT)実験の実施(2007年)、米国の通信衛星とロシアの軍用通信衛星の衝突事故の発生(2009年)、ロシアのASAT実験の実施(2021年)の時点を示している。

(出典) NASA Orbital Debris Program Office, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 26 Issue 1, March 2022, p.2. <<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i1.pdf>>

(3) 国別状況

図2は、カタログ化されている宇宙物体を対象として、主要な宇宙活動国の宇宙物体数とそれに占めるデブリの割合を示したものである(ただし、図2において、機能停止した機体は「デブリ」ではなく「宇宙機」に含まれている)。宇宙物体の総数は米国が最も多いが、宇宙物体数に占めるデブリの割合については、ロシア、中国、フランスの高さが目立っている。

図2 カタログ化された宇宙物体の国別数



(注) ロシアの宇宙物体数には、旧ソ連のものも含まれる。

(出典) NASA Orbital Debris Program Office, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 26 Issue 4, December 2022, p.14. <<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i4.pdf>> を基に筆者作成。

3 スペースデブリが問題となる軌道

デブリは利用が活発な軌道で多く発生する。特にデブリによる環境悪化が問題になり得る軌道として、低軌道、静止軌道、準同期軌道が挙げられる。各軌道の位置関係を図3に示した。

(1) 低軌道 (LEO)

高度 2,000km 以下の軌道は、低軌道 (Low Earth Orbit: LEO) と呼ばれる⁽⁶⁾。低軌道には、地球観測衛星、情報収集衛星 (偵察衛星)、国際宇宙ステーションなど、様々な用途の宇宙機が配置されている⁽⁷⁾。また、大規模な衛星コンステレーション (2(2) 参照) も、低軌道において構築が進められている⁽⁸⁾。

カタログ化されている宇宙物体の数で見ると、高度 2,500km 以下の軌道に全宇宙物体の 70% 以上が存在しており、特に高度 800 ~ 1,100km が混雑しているとされる (2015 年 9 月時点)⁽⁹⁾。IADC は、高度 2,000km 以下の領域を、宇宙環境の保全が特に求められる保護域 (Protected Region) に指定している⁽¹⁰⁾。

(2) 静止軌道 (GEO)

地球の赤道の上空約 36,000 km を地球の自転と同じ方向に周回する軌道は、静止軌道 (Geostationary Orbit: GEO) と呼ばれる。静止軌道上の物体は、地球の自転と同じ周期で周回するため、地球上からは常に同じ位置に見える。地球上の広範囲が常時視野に入る静止軌道には、通信衛星、放送衛星、気象衛星などが配置されている⁽¹¹⁾。

静止軌道は低軌道に次いで宇宙物体が集中する領域であり⁽¹²⁾、IADC は、高度 35,786km を中心に上下 200km 及び軌道傾斜角 (地球の赤道面に対して宇宙物体の軌道面がなす角度) ± 15 度の範囲を保護域に指定している⁽¹³⁾。

(3) 準同期軌道

低軌道、静止軌道に次いで利用が多い軌道の 1 つが、高度約 20,000km に位置する準同期軌道である。準同期軌道は 12 時間で地球を 1 周する軌道であり、GPS (米国) や GLONASS (ロシア)、Galileo (欧州)、北斗 (中国) など、各国の測位衛星が配置されている⁽¹⁴⁾。ただし、準同期軌道は低軌道や静止軌道ほどは混雑しておらず、現在のところ、IADC の保護域には指定されていない⁽¹⁵⁾。

(6) 高度 2,500km 以下が低軌道とされることもある。加藤明『スペースデブリ』地人書館, 2015, p.12.

(7) 西山淳一ほか「宇宙に関する基本情報」国立国会図書館調査及び立法考査局編『宇宙政策の動向—科学技術に関する調査プロジェクト報告書—』(調査資料 2016-5) 国立国会図書館, 2017, pp.8-10. <<https://doi.org/10.11501/10314926>>

(8) 「Starlink の仕組み」Starlink ウェブサイト <<https://www.starlink.com/technology>>

(9) 加藤 前掲注(6), pp.31, 34.

(10) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, “IADC Space Debris Mitigation Guidelines,” June 2021, pp.8-9. <https://www.iadc-home.org/documents_public/file_down/id/5249>

(11) 西山ほか 前掲注(7)

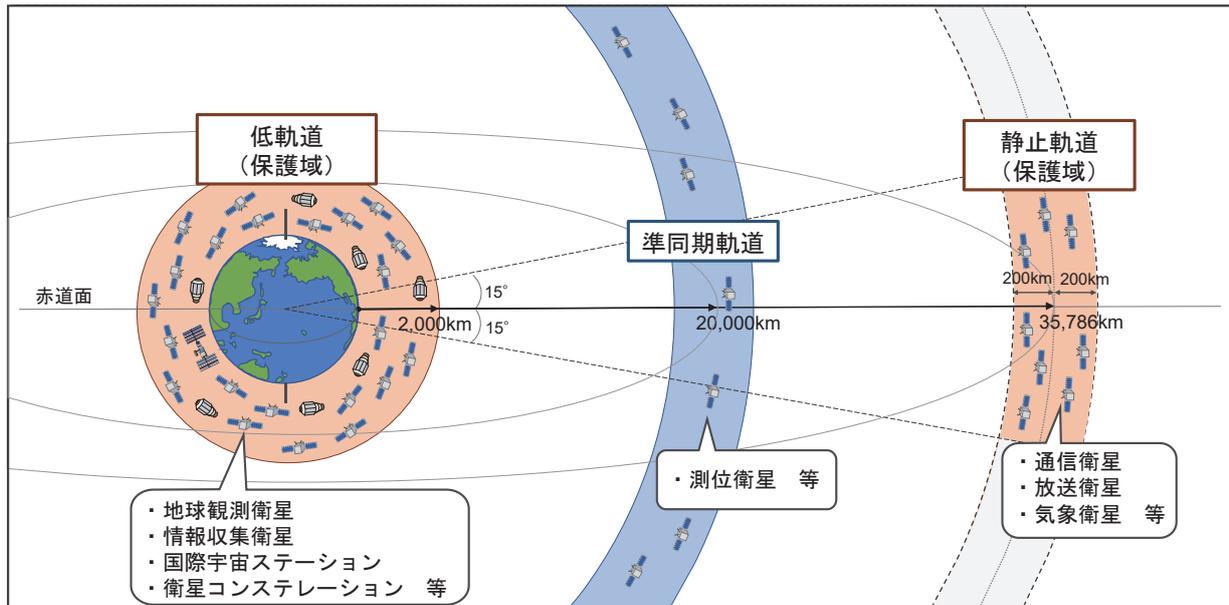
(12) 加藤 前掲注(6), p.31.

(13) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, *op.cit.*(10)

(14) 西山ほか 前掲注(7), p.10. なお、GPS の測位を補う日本の衛星測位システム「みちびき」は、測位衛星 4 機のうち 3 機が静止軌道と同程度の高度で軌道面を赤道面に対して傾けた「準天頂軌道」に、残りの 1 機が静止軌道に配置されている。「測位衛星の 3 種類の軌道」2015.10.27. みちびき (準天頂衛星システム) ウェブサイト <https://qzss.go.jp/overview/column/orbit_151027.html>

(15) 加藤 前掲注(6), p.12.

図3 スペースデブリによる環境悪化が問題となり得る軌道



(出典) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, “IADC Space Debris Mitigation Guidelines,” June 2021, pp.8-9. <https://www.iadc-home.org/documents_public/file_down/id/5249>; 西山淳一ほか「宇宙に関する基本情報」国立国会図書館調査及び立法考査局編『宇宙政策の動向—科学技術に関する調査プロジェクト報告書—』（調査資料 2016-5）2017, pp.8-10. <<https://doi.org/10.11501/10314926>> を基に筆者作成。

4 発生原因

デブリが発生する主な原因としては、ミッション終了後の宇宙機の放置、運用プロセスにおける部品等の放出、宇宙機の破裂による破片の発生が挙げられる。特に、宇宙機の破裂は、デブリの発生原因の大部分を占めている。

(1) ミッション終了後の宇宙機の放置

人工衛星は、燃料の枯渇や電力の喪失、機器の不具合などで運用を終了するとそのままデブリとなる。また、人工衛星等を打ち上げるために使用するロケットも、人工衛星を軌道に投入した後はデブリとなる⁽¹⁶⁾。

(2) 人工衛星のミッションの過程における物体の放出

人工衛星の打ち上げや運用等のミッションの過程で放出される部品等もデブリとなる。例えば、多段ロケットの段間を固定するバンドや、段間の切離しに使用される爆発ボルト、光学機器を保護するために取り付けられるカバー等が該当する。

また、固体燃料を使用するロケットの燃焼ガスに含まれる燃焼生成物（スラグ）や、劣化して剥がれ落ちた宇宙機表面の塗料片のような微小な物体も多数放出されており、これらは微小デブリ全体においてかなりの割合を占めているとされる⁽¹⁷⁾。

(16) 木部勢至朗「宇宙の厄介者—スペースデブリ—」『航空と文化』106号, 2013. 新春, p.10.

(17) 同上

(3) 宇宙物体の破裂による破片デブリの発生

軌道上の宇宙物体が何らかの理由により破裂すると、その際に発生した破片が新たなデブリとなる。このような破片デブリは、観測可能な宇宙物体の半数以上を占めているとされる⁽¹⁸⁾。宇宙物体が破裂する原因として、主に以下の3つが挙げられる。

(i) 爆発

使用済みのロケットに残留する推進剤（燃料とそれを燃焼させるための酸化剤）の爆発により機体が破裂することがある。燃料と酸化剤が共通隔壁によって仕切られた構造を持つロケットの場合、隔壁に何らかの原因で貫通孔が空くと、それらが反応して爆発する。近年は燃料のタンクと酸化剤のタンクの分離化が進められているとされるが、過去に打ち上げられたロケットでそのような構造を持たないものは爆発するおそれがある。また、液体水素や液体酸素などの極低温の推進剤を用いる機体の場合は、気化膨張によりタンクが破裂することもある。このほか、人工衛星に搭載される太陽光発電システムも、運用終了後の過充電によってバッテリーが爆発して機体が破裂する可能性がある⁽¹⁹⁾。

(ii) 衝突

稼働中の人工衛星にデブリが衝突したり、デブリ同士が衝突したりすることによって、新たな破片デブリが発生することがあり、実際に複数の衝突事例が報告されている。特に大量のデブリが発生した事例として、2009年2月に発生した米国の運用中の通信衛星「イリジウム33」とロシアの運用を終了した軍事用通信衛星「コスモス2251」の衝突が知られている。両衛星は高度約800kmで衝突し、イリジウム33からは620個、コスモス2251からは1,667個の破片が発生したとされる。これらの破片は、2014年末までに高度200～1,700kmの広い範囲に分散したとされる⁽²⁰⁾。

(iii) 意図的破壊

意図的に人工衛星を破壊するASAT実験によって大量のデブリが発生する場合もある。これまでに、米国、ロシア、中国、インドがASAT実験を実施したことがある⁽²¹⁾。

2007年1月、中国は運用を終了した自国の気象衛星「風雲1号C」を高度約900kmでミサイルによって破壊する実験を行った。これにより新たに発生したデブリは、軌道が特定されたものだけで3,400個を超える。また、地上からの観測が困難な1cm級のデブリは16万個増加したと推定されている。発生した多数のデブリは、低軌道上の広い範囲に分散し、低軌道における人工衛星の衝突リスクを高めることになった。この実験の前後で、日本の宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA）が運用する人工衛星の中には、その軌道と交差する物体の数が4割程度増加（衝突リスクが4割程度上昇）したものもあるとされる⁽²²⁾。

また、2021年11月には、ロシアが高度約500kmの軌道を周回する同国の人工衛星「コスモ

(18) 加藤 前掲注(6), p.75.

(19) 同上, pp.81-85.

(20) 同上, pp.72-74, 89-90.

(21) 鳥嶋真也「ロシアのASAT、衛星破壊に成功 急増する“デブリ”がもたらす深刻な宇宙の未来 歯止めがきかない『宇宙軍拡』競走」『軍事研究』672号, 2022.3, pp.94-100.

(22) 加藤 前掲注(6), pp.70-72.

ス 1408」を破壊する ASAT 実験を実施した。この実験によって、観測可能なものだけで 1,500 個を超えるデブリが発生したとされる⁽²³⁾。

2 (2) の図 1 で示したとおり、これらの ASAT 実験が行われたタイミングや、上述の人工衛星同士による衝突事故が発生したタイミングで、軌道上の破片デブリは急激に増加している。

5 危険性

(1) 宇宙空間におけるスペースデブリの危険性

低軌道におけるデブリの移動速度は秒速 7～8km に達する⁽²⁴⁾。また、低軌道上の他の物体と衝突する際の相対速度は平均で秒速 10km、最高で秒速 15km に達する⁽²⁵⁾。そのように高速で移動するデブリが宇宙機に衝突した場合、10cm 以上のデブリでは宇宙機は完全に破壊され、1～10cm のデブリでは宇宙機の機能に致命的な損傷が生じ、1mm～1cm のデブリでもミッション能力に部分的な喪失が発生するとされる。また、それより小さいデブリであっても、宇宙機の表面を損傷し、長期的な影響を及ぼすとされる⁽²⁶⁾。静止軌道においては、デブリの移動速度は秒速 3km 程度、衝突の際の相対速度は最大で秒速 0.8km 程度と見積もられている。低軌道ほどの衝撃はないものの、宇宙機に衝突すれば相当の影響が生じることが予想される⁽²⁷⁾。

デブリのサイズ別に、宇宙機に衝突した際に生じることが予測される影響の例を表に示した。

表 デブリが宇宙機に衝突した際に生じることが予測される影響の例

デブリのサイズ	宇宙機に生じる影響
～ 1μm	・機体表面の劣化による熱的・光学的・電気的特性の変化
1μm～	・外部に露出する撮像素子の損傷 ・センサーや望遠鏡のミラーの劣化 ・機体表面の損傷による耐環境性（プラズマ、原子状酸素）の阻害 ・衝突による微小デブリの発生
10μm～	・ガラス等の脆い表面における視認できる衝突痕の発生 ・衝撃による宇宙機の姿勢変化 ・プラズマの発生による電磁波障害
100μm～	・センサーや機体表面の顕著な損傷 ・ヒートパイプ、冷却管、ラジエーター（放熱器）の貫通による熱交換機能の阻害 ・ソーラーセル（太陽電池素子）の貫通による短絡
1mm～	・直径 2mm～1cm 程度の大きさの衝突痕や貫通孔の発生 ・機体外壁の貫通と背後の機器の損傷 ・外部に露出する機器（タンク、ケーブル等）の構造的な破壊
1cm～	・搭載機器の構造的な破壊 ・有人宇宙機の防御シールドを含むあらゆる衝突防御シールドの貫通 ・衝突による多量の破片デブリの発生
10cm～	・機体の完全な破壊

(出典) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, “SENSOR SYSTEMS TO DETECT IMPACTS ON SPACECRAFT,” April 2013, pp.3-4. <https://www.iadc-home.org/documents_public/file_down/id/4131>; 加藤明『スペースデブリ』地人書館, 2015, p.93 を基に筆者作成。

(23) NASA Orbital Debris Program Office, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 26 Issue 1, March 2022, p.1. <<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i1.pdf>>

(24) 空気中の音速(秒速約 340m)の 20 倍以上に相当する。

(25) 岩崎信夫・的川泰宣, 宇宙航空研究開発機構監修『図説宇宙工学』日経印刷, 2010, p.104; 木部 前掲注(16), p.10.

(26) 岩崎・的川 同上, p.105.

(27) 同上, p.104.

デブリは長期間にわたって軌道に留まり続けることも問題になる。軌道に留まる期間は、宇宙物体の大きさ（断面積）や質量によって異なるが、高度 600km 以下では数十年間、高度 800 km 以上では数百年間、高度 900km 以上では数千年間との見積りがある。また、静止軌道においては、物体は大気の抵抗を受けないため、永久に軌道上に留まり続けるとされる⁽²⁸⁾。

さらに、軌道上のデブリ同士の衝突によってデブリの発生が連鎖する危険もある。デブリ同士の衝突による軌道上での新たなデブリの発生ペースが、デブリが軌道を離脱して消滅していくペースを上回れば、新たな宇宙機の打ち上げが行われないと仮定してもデブリは増加していくことになる。このように自己増殖的にデブリが増加していく現象は「ケスラーシンドローム」(Kessler Syndrome) と呼ばれ、低軌道の一部では既に発生しているとの指摘がある⁽²⁹⁾。

(2) 地上に落下するスペースデブリの危険性

宇宙機の大きさや材質によっては、大気圏に突入しても完全には消滅せず、機体の一部が地上に落下する場合がある。そのような落下物による地上の被害を防止するため、宇宙機を制御しながら大気圏に突入させ、人間活動に影響が生じない領域⁽³⁰⁾に落下させる「コントロールドリエントリー」が行われることがある。しかし、運用終了後に放置された人工衛星や、故障により制御不能となった人工衛星のように、特段制御されることなく自然に落下する宇宙機も存在しており、これらが地上に被害を及ぼす可能性がある。これまでに報告されている落下物の事例として、1978年に旧ソ連の原子炉搭載衛星がカナダに落下した例、1979年に米国の宇宙ステーション「スカイラブ」の破片がオーストラリアに落下した例、1997年に米国のデルタ2ロケットの燃料タンクが米国内の民家近くに落下した例などが知られている⁽³¹⁾。

II スペースデブリに対処するための技術

本節では、デブリに対処する技術として、観測・監視技術、回避・防御技術、デブリの発生防止技術、既存のデブリの除去技術について取り上げる。特に、デブリの発生防止技術と既存のデブリの除去技術について、各企業が様々な方式の実用化に向けて取り組んでいる日本の状況を中心に、開発及び技術実証の動向を述べる。

1 観測・監視

軌道上のデブリの分布状況を把握したり、デブリが他の宇宙機に衝突する危険性を分析したりする際、デブリの観測技術は重要な役割を担う。デブリを直接観測する手段としては、光学望遠鏡やレーダーがある。また、軌道上に設置した実験用機体の表面に生じた衝突痕を基に、統計的な分析を行って軌道上のデブリ分布を推測する手法もある。これらの観測技術によってデブリを含む宇宙物体の軌道情報を解析することは、宇宙状況監視 (Space Situational

(28) 加藤 前掲注(6), p.17.

(29) 河本聡美「スペースデブリ除去研究の状況」『航空と宇宙』741号, 2015.9, pp.5-6.

(30) 「ポイント・ネモ」(Point Nemo) と呼ばれる、陸地から最も遠距離にあるとされる南太平洋上の地点が落下目標とされることが多い。Tory Shepherd, “Thousands of kilometres from anywhere lies Point Nemo, a watery grave where space stations go to die,” *Guardian*, 3 Sep 2021. <<https://www.theguardian.com/science/2021/sep/04/thousands-of-kilometres-from-anywhere-lies-point-nemo-a-watery-grave-where-space-stations-go-to-die>>

(31) 岩崎・的川 前掲注(25), pp.108-109.

Awareness: SSA) と呼ばれる。宇宙活動に取り組む各国は、観測手段を整備して SSA 活動を行うとともに、観測によって得られた情報を国際的に共有する取組も進めている。

(1) 直接的な観測・監視

低軌道のデブリの観測には、主に地上のレーダーが用いられる。レーダーは、物体に対して電磁波を照射し、その反射波を受信することで物体の観測を行う。観測の精度は、対象物体との距離、対象物体の反射面の向きや表面の電磁波吸収特性、照射する電磁波の波長等に依存するが、低軌道ではおおむね 10cm 以上の物体が観測可能とされる。光学望遠鏡を用いる観測でも、低軌道ではおおむね 10cm 以上の物体が観測可能とされるが、光学望遠鏡は時間帯や天候の条件（晴天かつ朝方・夕方）がそろわなければ観測できないという難点がある⁽³²⁾。

静止軌道のデブリの観測には、主に光学望遠鏡が用いられる。これは、観測距離に対して検知能力が大きく減衰するレーダーでは、静止軌道のような遠距離の観測は困難なためである。光学望遠鏡によって、静止軌道ではおおむね 1m 以上の物体が観測可能とされる⁽³³⁾。

地上からの観測のほかに、軌道上の人工衛星から低軌道や静止軌道の観測を行う試みもあり、米国やカナダが観測用の人工衛星を打ち上げて運用している。軌道上からの観測は、天候や日照時間の影響を受けないという利点がある⁽³⁴⁾。

現在、最も大規模な SSA システムを有しているのは米国である。宇宙領域における軍事行動を担う宇宙コマンド (United States Space Command: USSPACECOM)⁽³⁵⁾ の連合軍宇宙構成部隊 (Combined Force Space Component Command: CFSCC) に属する連合宇宙運用センター (Combined Space Operations Center: CSpOC)⁽³⁶⁾ が、世界各地に配置された監視装置 (光学望遠鏡及びレーダー) によって宇宙物体の検出・追跡・識別を行い、宇宙物体のカタログを維持している。そのようにして得られた宇宙物体のデータは、機密扱いで公開できないものを除いてインターネットで公開されている⁽³⁷⁾。

CSpOC は、協定を締結した国との間で、宇宙物体の軌道に関する情報を共有している。日本は、2013 年に米国との間で「日米宇宙状況監視 (SSA) 協力取極」を締結し、米国側から日本の人工衛星に接近する宇宙物体の軌道に関する情報の提供を受けることとなった⁽³⁸⁾。また、2014 年には、日本側からも米国側に宇宙物体に関する情報を提供することとなった⁽³⁹⁾。

日本におけるデブリの観測は JAXA が担っており、光学望遠鏡を有する美星スペースガードセンター (岡山県) と、レーダーを有する上齋原スペースガードセンター (岡山県) の 2 か所で行われている。これらの施設で観測されたデータは、筑波宇宙センター (茨城県) で解析

(32) 加藤 前掲注(6), pp.45, 47-51.

(33) 同上

(34) 同上, p.51.

(35) 宇宙コマンドについては、本報告書の辻見士「第 6 章 宇宙空間と安全保障に係る組織機構の動向」を参照。

(36) “Combined Space Operations Center / Space Delta 5 Fact Sheet.” <https://www.vandenberg.spaceforce.mil/Portals/18/documents/CFSCC/CSpOC_DEL5_Factsheet_Apr22.pdf?ver=Os7LedXcHSQavOxOrlZ60g%3d%3d> 2018 年 7 月に統合宇宙運用センター (Joint Space Operations Center: JSPOC) から移行した。“Combined Space Operations Center established at Vandenberg AFB,” July 19, 2018. Air Force Space Command (Archived) Website <<https://www.afspc.af.mil/News/Article-Display/Article/1579285/combined-space-operations-center-established-at-vandenberg-afb/>>

(37) Space-Track.org Website <<https://www.space-track.org/>> なお、情報の閲覧には利用者登録が必要である。

(38) 「宇宙の状況の監視に関する日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の書簡の交換 (日米宇宙状況監視 (SSA) 協力取極の締結)」 2013.5.28. 外務省ウェブサイト <https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press6_000278.html>

(39) 「宇宙状況監視に関する日米協力」 2014.5.7. 同上 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press22_000049.html>

される⁽⁴⁰⁾。

(2) 統計的手法による分析

地上からは、10cmより小さいデブリの観測は困難であるが、そのようなデブリの危険性も無視することはできない。それらが軌道上にどの程度存在しているかを把握するために、実験用の人工衛星を軌道に一定期間配置し、その間に機体の表面に生じた衝突痕の状況を基にデブリの分布を統計的に推定する実験が行われてきた。

代表的な例として、1984年に米国航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration: NASA）が打ち上げた長期暴露実験機（Long Duration Exposure Facility: LDEF）が知られている。同機は高度約400kmの軌道に打ち上げられ、6年弱にわたって低軌道に晒されたのちに回収され、表面の分析が行われた⁽⁴¹⁾。また、1995年には、日本でも同様の実験を行う宇宙実験・観測フリーフライヤ（Space Flyer Unit: SFU）が打ち上げられている（軌道への配置期間は10か月）⁽⁴²⁾。こうした実験の分析を基に、一定期間に宇宙空間上の一定面積の領域を通過する物体数を推計する分布モデルが構築され、軌道上での宇宙機等との衝突頻度が計算されている。例えば、欧州宇宙機関（European Space Agency: ESA）のモデル（2009年版）によると、高度800kmにおいて1m²の領域に1年間に衝突する宇宙物体の数は、0.1mm以上のものが数十個程度、1mm以上のものが1/1000個程度、1cm以上のものが1/100000個程度と見積もられる⁽⁴³⁾。

なお、LDEFやSFUのような実験では、実験機の回収手段としてスペースシャトルが用いられていたが、スペースシャトルの運用は2011年に終了しており、現在は同様の実験を実施する手段がない。国際宇宙ステーションに暴露実験用の機器を設置して検証を行うことも考えられるが、検証できる高度は国際宇宙ステーションが周回する高度約400kmより低い軌道に限られる⁽⁴⁴⁾。

2 衝突の回避・防御

(1) 国際宇宙ステーションの場合

高度約400kmの低軌道を周回する国際宇宙ステーションでは、デブリによる致命的な損傷を回避するため、デブリの大きさに応じて次のような対策がとられている⁽⁴⁵⁾。

(i) 10cm以上のデブリ

10cm以上のデブリは、観測により軌道を予測することができる。その結果から、国際宇宙ステーションへ衝突する危険があると評価された場合は、エンジン噴射により軌道を変更し、衝突を回避する。

(40) 宇宙航空研究開発機構「宇宙状況把握（SSA）システム」<<https://www.jaxa.jp/projects/pr/brochure/pdf/05/engineering06.pdf>>

(41) “Long Duration Exposure Facility (LDEF).” NASA Astromaterials Acquisition & Curation Office Website <<https://curator.jsc.nasa.gov/mic/ldef/>>

(42) 「宇宙実験・観測フリーフライヤ SFU」宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所ウェブサイト <<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/sfu.html>>

(43) 加藤 前掲注(6), pp.39-41.

(44) 同上, p.21.

(45) 白木邦明「最先端宇宙デブリ防御技術（特集 精密工学が描く夢—精密工学会100周年に向けて—）」『精密工学会誌』901号, 2010.1, pp.8-9; 金井典子「人工衛星のスペースデブリ対策（スペースデブリと安全性）」『信頼性』199号, 2012.3, p.184.

(ii) 1cm 以下のデブリ

1cm 以下のデブリは、地上からは観測できず、衝突回避の操作が困難なため、特に有人モジュールについては周囲に「ホイップルバンパー」(Whipple Bumper) と呼ばれる防御シールドを取り付けて防御する。ホイップルバンパーは2枚の金属板から成る防御材で、高速で衝突したデブリは1枚目の板で破碎されて気化し、拡散しながら2枚目の板に到達する。その間にエネルギー密度が減少するため、衝撃が緩和される仕組みである。

(iii) 1～10cm のデブリ

1～10cm のデブリは、1cm 以下のデブリよりも数が少なく衝突する確率は小さいが、観測に基づく衝突回避やホイップルバンパーによる防御はいずれも困難である。こうしたデブリに対しては、仮に有人モジュールにそのようなデブリが衝突し、貫通しても、搭乗員やISSの機能に致命的な損傷が生じないような設計とし、運用上でも可能な限り軌道変更を行って回避する方針がとられている。

(2) 人工衛星の場合

一般の人工衛星の場合も、低軌道で10cm以上、静止軌道で1m以上の追跡可能なデブリに対しては、観測に基づいて予測される軌道情報を基に衝突回避の操作を行う。しかし、それらより小さく追跡が困難なデブリに対しては、ロケットの搭載質量や収納空間の制約からホイップルバンパーの装備は難しく、金属板1枚で防御する場合が多いとされる。機体の設計においては、燃料タンクや電源系などの重要な部品を進行面から離して取り付けるなど、デブリとの衝突が起きても致命的な影響が生じないような機器配置とすることも対策の1つとされる⁽⁴⁶⁾。

3 スペースデブリの発生防止

(1) 概要

運用終了後の宇宙機が軌道上に放置されると、他の宇宙物体と衝突して新たなデブリが発生する危険がある。そこで、国連のガイドライン(Ⅲ2(2)参照)などにおいては、運用が終了した宇宙機は、利用頻度の高い軌道から利用頻度の低い軌道に移動させる操作(リオービット)や、大気圏に落下させる操作(デオービット)を行って軌道から離脱させることが求められている。宇宙機の推進力を利用して軌道から離脱する方法や、宇宙機にあらかじめ離脱用の装置を取り付けておき、運用終了後にその機能を用いて軌道から離脱させる方法はPMD(Post Mission Disposal)と呼ばれており、後者については、次に述べるように、様々な方式が開発されている。

(2) 開発動向

近年、民間企業によるPMDの技術開発が活発化している。特に、日本を拠点とする企業では、アストロスケール社やALE(エール)社、アクセルスペース社などの企業がそれぞれ独自の方式の開発を進めている。

アストロスケールは、運用が終了した人工衛星をデブリ除去衛星で捕獲して除去する方式を

(46) 金井 同上, pp.181-184.

採用している。同社の方式では、ドッキングプレートと呼ぶ金属製の板をあらかじめ人工衛星に取り付けておき、運用が終了した後にデブリ除去衛星がドッキングプレートを目印に接近して磁力で捕獲し、軌道から除去する。同社は、2021年3月に、この方式では民間企業として世界発となる技術実証のための人工衛星「ELSA-d」を打ち上げ、同年8月に模擬デブリを対象とした捕獲技術の実証に成功している⁽⁴⁷⁾。2024年末には、複数のデブリを捕獲・除去できる捕獲衛星「ELSA-M」によるデブリ除去サービスの実証を行うとしている⁽⁴⁸⁾。

ALEは導電性テザーと呼ばれる紐状の装置を利用して、運用が終了した人工衛星を軌道から除去する方式を採用している。この方式では、あらかじめ人工衛星に取り付けておいた導電性テザーを運用終了後に伸展させて電流を流す。その際に地球の磁場との関係で進行方向に対して逆向きの力（ローレンツ力）が生じることを利用して、人工衛星を減速させる。これにより、自然に落下する場合と比較して、落下に要する時間の大幅な短縮が可能になる。同社は、この方式によるデブリ発生防止装置の事業化に向けた実証をJAXAと共同で進めている⁽⁴⁹⁾。なお、導電性テザーを利用する方式は、国外においても米国のテザーズ・アンリミテッド社や、スペインのセネルグループ社など複数の企業が開発に取り組んでおり、競争が激しくなっているとされる⁽⁵⁰⁾。

アクセルスペースは、宇宙展開構造物の研究開発を手掛けるサカセ・アドテック社と共同で、「D-SAIL」と呼ぶ膜面展開型の軌道離脱装置を開発している。この装置は、手の平に収まるほどの大きさに折りたたまれた膜で、展開すると2m²程度の大きさになる。これを100kg前後の超小型衛星に装着して運用終了後に展開すると、大気抵抗によって減速されるため、軌道から離脱するまでの時間が大幅に短縮される⁽⁵¹⁾。研究機関や民間企業に対して宇宙実証の機会を提供するJAXAの「革新的衛星技術実証プログラム」においてこの装置の実証を行うことが計画され、2022年10月にイプシロンロケット6号機で打ち上げられたが、ロケットのトラブルにより軌道への投入には失敗した⁽⁵²⁾。

4 既存のスペースデブリの除去

(1) 概要

日米欧などの宇宙機関が行った低軌道のデブリ環境シミュレーションによると、仮にミッションが終了した宇宙機の90%でPMDによるデオービットの措置がとられ、さらに、低軌道上での爆発が発生しないと仮定しても、今後5年から9年に1度の頻度で大規模な衝突事故が発

(47) 「アストロスケールが民間世界初デブリ除去衛星 ELSA-d の打上げ・軌道投入に成功」2021.3.23. アストロスケールウェブサイト <<https://astroscale.com/ja/astro-scale-celebrates-successful-launch-of-elsa-d/>>; 「アストロスケール、デブリ除去技術実証衛星「ELSA-d」で模擬デブリの再捕獲に成功」2021.8.25. 同 <<https://astroscale.com/ja/astro-scales-elsa-d-successfully-demonstrates-repeated-magnetic-capture/>>

(48) 「ELSA-M」同上 <<https://astroscale.com/ja/elsa-m/>>

(49) 「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」2020.3.25. ALEウェブサイト <<https://star-ale.com/news/2020/03/25/2026088.html>>

(50) 「役目終えた人工衛星の衝突防げ 宇宙のSDGs、デブリ対策 日米欧の技術が離陸目前」『日経ビジネス』2106号、2021.9.6, p.48.

(51) 「革新的衛星技術実証3号機 実証テーマ 宇宙空間で膜を展開し、大気抵抗を用いたデオービット機構を実証する」JAXA 研究開発部門ウェブサイト <https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/03/interview03_08.html>

(52) 宇宙航空研究開発機構「イプシロンロケット6号機の打上げ失敗に伴う対策本部の設置について」2022.10.12. <https://www.jaxa.jp/press/2022/10/20221012-2_j.html>

生し、デブリは増加し続けると予測されている⁽⁵³⁾。なお、実際のPMDによるデオービットの実施率は30～40%程度であることに加え、大規模な衛星コンステレーションの計画も進んでいることから、低軌道の環境はシミュレーションの結果よりも悪化する可能性がある⁽⁵⁴⁾。

したがって、軌道環境を維持又は改善するためには、PMDによる措置だけでなく、過去のミッションで発生した既存のデブリの除去も行う必要がある⁽⁵⁵⁾。既存のデブリを人工衛星を用いて軌道から除去する方法は、ADR (Active Debris Removal) と呼ばれ、民間企業による開発が活発化している。ADRによるデブリ除去技術を実現するには、高速で移動するデブリに対する接近技術や捕獲技術など、高度な技術開発が必要になるとされる⁽⁵⁶⁾。

(2) 開発動向

アストロスケールは、上で挙げたPMDによるデブリ除去衛星とは別に、ADRの技術によって既存のデブリの除去を行う人工衛星「ADRAS-J」の開発も進めている。ADRAS-Jは、JAXAのプロジェクト「商業デブリ除去実証」(Commercial Removal of Debris Demonstration: CRD2)⁽⁵⁷⁾で使用される実証衛星に選定されている。技術実証では、ターゲットのデブリ(2009年に打ち上げられたH2Aロケットの上段)に対する接近動作、近傍での機体制御、デブリの撮影、実証衛星自体の軌道離脱を行うこととしている⁽⁵⁸⁾。2023年中に、米国Rocket Lab社のロケット「エレクトロン」(Electron)で打ち上げられる予定である⁽⁵⁹⁾。

スカパーJSATは、理化学研究所、JAXA、名古屋大学、九州大学と共同で、世界初となるレーザー光によってデブリ除去を行う人工衛星の開発を進めており、2026年のサービス開始を目指している。デブリにレーザー光を照射するとプラズマ化した物質が表面から放出される現象(レーザーアブレーション)を利用し、その際に発生する推力でデブリを軌道から除去する。この方式は、デブリと直接接触しないため安全性が高いことが利点とされる⁽⁶⁰⁾。

川崎重工業は、ロボットアームを備えた小型衛星によるデブリ除去技術を開発している。ロボットアームでデブリを捕獲し、デブリとともに大気圏に落下する。JAXAの「革新的衛星技術実証プログラム」の実証テーマに選定され、2021年11月に、イプシロンロケット5号機で技術実証のための小型衛星「DRUMS」が打ち上げられた。同社は2025年までの技術の確立

(53) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, “Stability of the Future LEO Environment,” January 2013, pp.2, 9, 13-14. <https://www.iadc-home.org/documents_public/file_down/id/4134>

(54) 河本 前掲注(29), pp.5-6.

(55) 同上

(56) 加藤 前掲注(6), pp.152-154.

(57) デブリ除去の事業化を目指す民間事業者等との連携による市場の創出と、我が国の国際競争力確保への貢献を目的とするプロジェクト。ロケットの上段のような大型のデブリを対象とする世界初の低コストデブリ除去サービスの技術実証を目指す。「プロジェクト 商業デブリ除去実証 (CRD2)」JAXA 研究開発部門ウェブサイト <<https://www.kenkai.jaxa.jp/crd2/project/>>

(58) 同上 なお、実際のデブリを対象とした除去技術の実証は、2025年度以降に打ち上げが予定されているプロジェクトのフェーズ2において計画されている。

(59) “Astroscale Selects Rocket Lab to Launch Phase I of JAXA’s Debris Removal Demonstration Project,” September 21st, 2021. Astroscale Website <<https://astroscale.com/astroscale-selects-rocket-lab-to-launch-phase-i-of-jaxas-debris-removal-demonstration-project/>>

(60) スカパーJSAT ホールディングス「世界初、宇宙ごみをレーザーで除去する衛星を設計・開発—宇宙のSDGs—持続可能な宇宙環境の維持をめざして」2020.6.11. <https://www.skyperfectjsat.space/news/files/pdf/0ae62a003cc6b73e745f81c1d4e0c739_4.pdf>

を目指している⁽⁶¹⁾。

国外では、ADRの技術開発に取り組んでいる企業として、英国のSSTL (Surrey Satellite Technology Ltd) 社やスイスのクリアスペース (ClearSpace) 社が知られている。SSTLは、捕獲用のネットや鉤 (もり) 状の装置を用いてデブリを捕獲する技術実証衛星を2018年に国際宇宙ステーションから軌道に放出し、世界で初めてADRによるデブリ除去技術の実証を成功させた⁽⁶²⁾。クリアスペースは、ESAによる支援を受けて、ロボットアームでデブリを包み込んで回収する方式の人工衛星を開発している⁽⁶³⁾。

Ⅲ スペースデブリをめぐるルール整備の現状と課題

デブリ問題への対処をめぐるのは、ルール整備の面での議論もある。本節では、国連で制定された宇宙関係諸条約におけるデブリ低減措置の位置付けを確認した上で、デブリの低減を目的とする国連ガイドラインなどのルール整備の現状を紹介する。最後に、デブリ除去を事業として行う際の制度面の課題について述べる。

1 宇宙関係諸条約におけるスペースデブリ

宇宙空間における活動は、国連宇宙空間平和利用委員会 (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: COPUOS) において作成され、国連総会で採択された「宇宙条約」(国連総会採択年 (以下同) 1966年)、「宇宙救助返還協定」(1967年)、「宇宙損害責任条約」(1971年)、「宇宙物体登録条約」(1974年)、「月協定」(1979年)のいわゆる国連宇宙5条約によって規律される⁽⁶⁴⁾。特に宇宙条約は、宇宙活動の自由、宇宙空間の領有禁止、宇宙の平和利用、国家への責任集中といった宇宙空間の探査や利用における基本的な原則を定めたもので、「宇宙の憲法」と称される⁽⁶⁵⁾。

しかし、国連宇宙5条約が策定された冷戦期には、デブリ問題はほとんど認識されていなかったため、これらの条約にはデブリの低減を直接の目的とした規定が存在しない。デブリの低減に関係し得るとされる規定も存在するが、その内容は抽象的なものにとどまっている⁽⁶⁶⁾。

例えば、宇宙条約第9条は、宇宙活動における他国の利益への妥当な考慮、研究・探査における有害な汚染の回避と適当な措置の採用、他国に有害な干渉を及ぼすおそれがある場合の事前協議を締約国に求めている。ここでいう「有害な汚染」に、宇宙空間でデブリを発生させる

(61) 「自社開発のデブリ捕獲システム超小型実証衛星「DRUMS」が軌道投入され通信確立に成功」2021.11.11. 川崎重工業ウェブサイト <https://www.khi.co.jp/news/detail/20211111_1.html>; 「宇宙ごみ除去 実験開始へ 川重小型衛星 来春にも」『読売新聞』(大阪本社版) 2021.12.30.

(62) “SSTL ships RemoveDEBRIS mission for ISS launch,” 18 Dec 2017. SSTL Website <<https://www.sstl.co.uk/media-hub/latest-news/2017/sstl-ships-removedebris-mission-for-iss-launch>>; “RemoveDEBRIS: Launched 2018.” *ibid.* <<https://www.sstl.co.uk/space-portfolio/launched-missions/2010-2019/removedebris-launched-2018>>

(63) 『日経ビジネス』前掲注(50), p.49; ClearSpace Website <<https://clearspace.today/>>

(64) 小塚・佐藤編著 前掲注(2), pp.28-29; Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, Legal Subcommittee, “Status of International Agreements relating to activities in outer space as at 1 January 2022,” A/AC.105/C.2/2022/CRP.10, 28 March 2022, pp.1-2. <https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2022/aac_105c_22022crp/aac_105c_22022crp_10_0.html/AAC105_C2_2022_CRP10E.pdf> 国連宇宙5条約については、本報告書の清水直樹「第3章 衛星コンステレーションの可能性と課題」を参照。

(65) 小塚・佐藤編著 同上, pp.35-38, 40-45.

(66) 堀口健夫「スペースデブリで問われる宇宙の環境法(特集 宇宙と法学)」『法学教室』497号, 2022.2, p.51.

ことが該当するか、また、仮に該当するとして、「適当な措置」にデブリの低減措置が含まれるかという点が明確でないことが指摘されている⁽⁶⁷⁾。

2 ガイドラインによるスペースデブリの低減

現在の宇宙関係条約を根拠としたデブリ問題への対処が困難である以上、新たな条約を作成し対処するという選択肢も考え得る。しかし、COPUOSにおける条約の採択は加盟国によるコンセンサス（全会一致）方式で行われるため、加盟国が増加した1980年代以降は新たな条約の作成が困難になっている⁽⁶⁸⁾。そこで、国際社会は法的拘束力のないガイドラインによるデブリ低減の取組を進めてきた。国際宇宙法の発達においては、このような法的拘束力のない国際文書（いわゆる「ソフトロー」⁽⁶⁹⁾）が重要な役割を担うようになっている⁽⁷⁰⁾。

(1) IADC スペースデブリ低減ガイドライン

現在のデブリ問題への対処において重要な基準となっているのは、「国際機関間スペースデブリ調整委員会」（Inter-Agency Space Debris Coordination Committee: IADC）で採択されたガイドラインやその関連文書である⁽⁷¹⁾。

1993年、各国の宇宙機関は、米国の主導により、デブリ研究についての情報交換やデブリ低減策の策定を行うための国際フォーラムとしてIADCを結成した⁽⁷²⁾。米国、日本、フランス等の宇宙機関は、1990年代後半にはデブリ低減のための安全基準を独自に策定していたが、IADCはこれらの安全基準や科学者団体の研究成果を取り入れた「IADC スペースデブリ低減ガイドライン」⁽⁷³⁾を2002年に採択した⁽⁷⁴⁾。

同ガイドラインは、加盟機関に対し、宇宙機の設計、運用、運用終了後の各段階で求められるデブリ低減措置を勧告している。特に、運用終了後の破碎事故を防止するための措置として、残留推薬（燃料）の排出、バッテリー充電システムの切断、高圧容器の内容物の排出といった具体的な措置を挙げている⁽⁷⁵⁾。また、低軌道では、運用終了後の宇宙機を軌道から離脱させて大気圏に再突入させるか、軌道寿命が短い軌道に移動させて25年以内に大気圏に再突入させることを求めている。静止軌道では、他の静止軌道の宇宙機と干渉しないよう十分遠方に移

(67) 同上 国際環境法の一般原則とされる環境損害防止義務に基づいて国によるデブリ低減措置が規律され得るとの議論もある。詳細は次を参照。堀口健夫「宇宙空間におけるスペースデブリによる損害の未然防止と国際環境法」岩沢雄司ほか編著『国際法のダイナミズム—小寺彰先生追悼論文集—』有斐閣, 2019, pp.457-483.

(68) COPUOSの設立当初（1958年）の加盟国は18か国であった。また、COPUOSで最後に作成された条約（「月協定」）の採択時点（1979年）の加盟国は47か国であった。その後、加盟国は100か国まで増加している（2021年）。“Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: Membership Evolution.” United Nations, Office for Outer Space Affairs Website <<https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/members/evolution.html>>

(69) 「ソフトロー」に対して、条約などの法的拘束力を持つ文書は「ハードロー」と呼ばれる。

(70) 小塚・佐藤編著 前掲注(2), pp.28-29, 32-33.

(71) 同上, pp.66-67.

(72) 2022年11月現在、イタリア、フランス、中国、カナダ、ドイツ、インド、日本、韓国、米国、ロシア、ウクライナ、英国の12か国の宇宙機関と欧州宇宙機関（ESA）の計13機関が加盟している。“Member Agencies List.” IADC Website <https://www.iadc-home.org/member_agencies_list> 自国のロケットによる人工衛星の打ち上げ実績のある国（ロシア、米国、フランス、日本、中国、英国、インド、イスラエル、イラン、北朝鮮、韓国（西山ほか前掲注(7), p.12））の多くが含まれる。

(73) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, *op.cit.*(10)

(74) 青木節子『日本の宇宙戦略』慶應義塾大学出版会, 2006, pp.222-223.

(75) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, *op.cit.*(10), pp.11-12.

動させることを求めている⁽⁷⁶⁾。

このIADCのガイドラインは、2002年の採択以降、デブリ低減技術の開発の進展に合わせて改訂されている⁽⁷⁷⁾。ガイドラインは、加盟機関の合意さえ醸成できれば時代の要請に合わせて迅速なアップデートが可能であり、その使い勝手の良さが利点と言える⁽⁷⁸⁾。

(2) 国連のCOPUOSにおける議論

COPUOSにおいても、1994年以降、デブリ問題が議題とされている。デブリの観測技術、リスク評価、低減策などの技術面の検討が行われた後、デブリの低減に関するガイドラインの作成が進められた⁽⁷⁹⁾。

COPUOSの科学技術小委員会は、2001年にデブリの低減に関するガイドラインの検討を開始し、同年、IADCにガイドラインの起草を依頼した。2004年にIADCから草案が提出され、ロシアやインドからの修正要求を受けて修正が行われた後、2007年6月、COPUOSの本委員会で「国連スペースデブリ低減ガイドライン」が採択された。このガイドラインは、COPUOSの加盟国に対し、次の7つの項目について、推奨されるデブリ低減措置を示している⁽⁸⁰⁾。

- ① 正常な運用中に放出されるデブリの制限
- ② 運用段階での破碎の可能性の最小化
- ③ 偶発的軌道上衝突確率の制限
- ④ 意図的破壊及びその他の有害な活動の回避
- ⑤ 残留エネルギーによるミッション終了後の破碎の可能性の最小化
- ⑥ 宇宙機やロケットの上段がミッション終了後に低軌道に長期的に留まることの制限
- ⑦ 宇宙機やロケットの上段がミッション終了後に静止軌道に長期的に留まることの制限

このガイドラインの内容はIADCのガイドラインに類似しているが、記述は簡潔で抽象的であり、具体的な推奨値や実施方法などは示されていない。ガイドラインの末尾にはIADCのガイドラインを参照するよう注意書きがなされている⁽⁸¹⁾。

さらに、COPUOSでは2010年以降、「宇宙活動の長期持続可能性」(Long-Term Sustainability : LTS)が議題とされ、持続可能な宇宙活動のために各国が自主的に遵守すべきガイドラインの制定に向けた検討が行われた。そして、2019年6月のCOPUOS本委員会において、日本、米国、フランス、カナダの主導により「宇宙活動に関する長期持続可能性(LTS)ガイドライン」が採択された⁽⁸²⁾。

このガイドラインでは、デブリの低減に関して次のような措置が推奨されている（括弧内は

(76) *ibid.*, pp.13-14.

(77) 小塚・佐藤編著 前掲注(2), pp.67-68.

(78) 青木 前掲注(74), p.223.

(79) 同上, p.225.

(80) United Nations, *Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, A/62/20*, 2007, pp.47-50. <https://www.unoosa.org/pdf/gadocs/A_62_20E.pdf>; 小塚・佐藤編著 前掲注(2), pp.68-69.

(81) United Nations, *ibid.*, p.50; 小塚・佐藤編著 同上, pp.69-70.

(82) 「国連宇宙空間平和利用委員会(COPUOS)本委員会 宇宙活動の長期持続可能性ガイドラインの採択」2019.6.22. 外務省ウェブサイト <https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press6_000600.html>

該当するガイドライン番号)。従来のデブリ低減のガイドラインでは具体的に言及されていなかった宇宙状況監視に関する取組が含まれている⁽⁸³⁾。

- 国内の規制枠組みによって「国連スペースデブリ低減ガイドライン」等に基づくデブリ低減措置を実行すること (A. 2)
- 宇宙物体の軌道情報の精度を向上させること (B. 2)
- デブリの監視情報の収集、共有、普及を促進すること (B. 3)
- 宇宙機の製造者及び運用者に対して、運用終了後の宇宙機が保護域に長期間留まらないよう、国際及び国内のガイドライン等に合致した設計を行うことを奨励すること (B. 8)
- デブリの数を長期的に管理するための新たな手法の調査及び検討を行うこと (D. 2)

(3) ガイドラインの国内履行

IADCのガイドラインやCOPUOSのガイドライン自体は法的拘束力を持たないが、同様の基準が国内法令で規定されることで、デブリ低減策に法的根拠が与えられることになる。国際法レベルでの新たな法的規制が困難な現在において、民間事業者を含む全ての宇宙空間利用者によるデブリ低減策を徹底するには、デブリ低減策を事業許可の条件とするなど、国内法レベルでの規制を行うことが重要とされる⁽⁸⁴⁾。

実際に、各国内の法令でデブリ低減策が規定されている例もある。例えば、米国では、2004年以降、衛星通信の免許付与を担う連邦通信委員会 (Federal Communications Commission: FCC) の規則により、宇宙機は運用終了後25年以内に軌道から離脱させる義務があるとされていた。さらに、2022年9月には、その離脱までの期間を25年以内から5年以内に短縮する新たな規則が発表された⁽⁸⁵⁾。

また、日本では、「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律」(平成28年法律第76号。「宇宙活動法」)により、国内に所在する「人工衛星管理設備を用いて人工衛星の管理を行おうとする者」は、内閣総理大臣の許可を受けなければならないとされている(第20条)。同法及び同法施行規則が定めるその許可の要件には、上で挙げた「国連スペースデブリ低減ガイドライン」の①～⑦のうち、④の意図的破壊に関するものを除いておおむね類似した内容の措置が挙げられている⁽⁸⁶⁾。

3 スペースデブリ除去の法的課題

II 4で述べたとおり、デブリに接近して除去する技術の開発が進んでいるが、こうした技術

(83) United Nations, *Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space*, A/74/20, 2019, pp.50-69. <https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2019/a/a7420_0_html/V1906077.pdf>

(84) 小塚・佐藤編著 前掲注(2), p.17.

(85) Federal Communications Commission, “FCC Adopts New ‘5-Year Rule’ for Deorbiting Satellites to Address Growing Risk of Orbital Debris,” *FC NEWS*, September 29, 2022. <<https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-387720A1.pdf>>; 大久保涼ほか「<宇宙法アップデート> 米国における最新のスペースデブリ規制の動向—FCC 規則での5年ルールの採用及び日本への影響—」『NO&T Technology Law Update テクノロジー法ニュースレター』No.29, 2022.10. 長島・大野・常松法律事務所ウェブサイト <https://www.noandt.com/wp-content/uploads/2022/10/technology_no29.pdf>

(86) 松田芳和「宇宙活動法における国連スペースデブリ低減ガイドラインの実施の意義—宇宙条約の規律形成とその課題—」『環境と公害』51(1), 2021.Sum, pp.65-67.

を用いたデブリ除去サービスの事業化には、制度面の整備が必要とされる。以下、デブリ除去がビジネスとして成立するために検討が必要となる主な論点について述べる。

(1) デブリ除去の許可

宇宙物体の管轄権は、宇宙物体登録条約に基づく「登録国」⁽⁸⁷⁾が有するとされ、この管轄権は、宇宙物体が機能を失ったり、破裂したりするなどしてデブリとなってもそれらの物体に及ぶとされる。デブリの除去を行うには、そのデブリに対して管轄権を有する国の許可を得る必要があるとされる⁽⁸⁸⁾。

しかし、宇宙物体の登録がされていないために管轄権の所在が不明な宇宙物体も少なくないとされ⁽⁸⁹⁾、宇宙物体の未登録を防止することや、登録物体がデブリ化した際に登録国に報告させることなどが課題とされる⁽⁹⁰⁾。

(2) デブリ除去の費用負担

デブリの除去には、除去用の人工衛星の製造や打ち上げの費用を含め、作業全体で相当高額な費用が発生するが、この費用を誰が負担するかが問題となる。環境法では汚染者が費用を負担することが一般的とされるが（PPP原則）、宇宙条約第9条（Ⅲ1参照）を根拠に汚染者（デブリを発生させた国）に責任を負わせられるかについては、コンセンサスに至っていないとされる。別のアプローチとして、国際的な基金を設立して、各宇宙活動主体からデブリ除去の費用を調達するという構想も提案されている⁽⁹¹⁾。

(3) デブリ除去サービスの透明性

デブリ除去は、軌道上の宇宙物体への接近や接触のプロセスを伴う技術であり、意図的な衛星破壊などの軍事目的での利用も想定される機微技術である。そのため、デブリ除去を国際的なサービスとして実施する上では、デブリ除去衛星の透明性を高め、相手国との信頼醸成を図ることが求められる⁽⁹²⁾。

この点について、日本では、2021（令和3）年に、デブリ除去を含む「軌道上サービス」を提供する人工衛星に関するガイドラインが策定された⁽⁹³⁾。このガイドラインは、安全確保や情報開示など、軌道上サービスの実施において求められる措置を示している。事業者の衛星が軍事目的でなく、他国の権利を侵害しないものであることを明確にすることによって、安心できるビジネス環境を日本に整備することがこのガイドライン策定の狙いであるとされる⁽⁹⁴⁾。

(87) 一般には宇宙物体の打ち上げ国。打ち上げ国が複数ある場合は協議によりそのうちの1国を登録国とする。

(88) 小塚荘一郎「スペースデブリ（宇宙ごみ）から生ずるリスクへの制度的対応（創立80周年記念号（1）」『損害保険研究』292号、2013.11、pp.279-280。

(89) 小塚・佐藤編著 前掲注(2)、p.49。登録されない衛星が3割程度を占めることもあるとされる。

(90) 堀口 前掲注(66)、p.53。

(91) 小塚・佐藤編著 前掲注(2)、p.17；小塚 前掲注(88)、pp.284-289。

(92) 石井由梨佳「宇宙デブリ除去の国際法上の評価」『空法』62号、2022、pp.6900-6901。

(93) 内閣府宇宙開発戦略推進事務局「軌道上サービスを実施する人工衛星の管理に係る許可に関するガイドライン」2021.11.10。<https://www8.cao.go.jp/space/application/space_activity/documents/guideline_oosgl.pdf>

(94) 「宇宙ごみ回収業に指針」『読売新聞』2021.12.9、夕刊。

おわりに

本稿では、運用中の宇宙機にとって極めて危険な存在であるスペースデブリについて、その数が増加傾向にあり、自然な減少は期待できず、放置すれば自己増殖的に増加していく可能性があることを確認した。他方、こうしたデブリの発生を防止する技術や、既存のデブリを除去する技術の開発が進められていることを紹介した。ただし、これらの技術は現時点では技術実証の段階にあり、サービスの開始までには年単位の時間を要することが見込まれる。制度面については、国際法上はデブリの低減措置についての具体的な規定はなく、法的拘束力のないガイドラインによる対処が行われている状況にあること、また、デブリの除去技術について、それらをサービスとして実現するためのルール整備が今後必要になるとされていることを述べた。

従来、宇宙空間利用は国家レベルの活動が中心であったが、近年は民間による商業利用が拡大し、その動きは今後も加速すると予想される。それに伴って地球周辺の宇宙空間は更なる混雑が見込まれる。将来にわたって安全な宇宙空間を実現するためには、デブリ問題への対処が喫緊の課題であり、技術開発、制度整備の両面での速やかな進展が望まれる。

(なかむら しんや)