

スペースデブリ除去研究の状況

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第二研究ユニット 河本 聡美

1. はじめに

スペースデブリ（以下「デブリ」）とは、使用済みの人工衛星やロケット上段、ミッション遂行上宇宙機から放出された物体、爆発や衝突により発生した破片等、軌道上にある不要な人工物体、すなわち宇宙のごみのことである。平成23年10月号の本会報に、デブリの状況、除去の必要性、世界におけるデブリ除去技術研究の状況について報告した^[1]。前回の報告では、2009年に発生した初の大型デブリ同士の壊滅的衝突を受けて世界で加速されたデブリ除去実現に向けた動きについて報告したが、その後各国で議論や検討が進み、いくつか具体的な実証計画も出てきている。そこで本稿ではその後のデブリ除去検討の状況について、まず現在のデブリ環境や除去について、次に実証計画を含むデブリ除去研究の世界の状況について報告する。

2. デブリの現状

2015年現在、カタログ化物体（地上から観測・追跡されている、起源が同定されている物体。運用中の宇宙機約1,000個を含む）は17,000個以上となっており、1cm級デブリは数十万個、1mm級デブリは1億個以上存在していると考えられている。デブリは低軌道では秒速7~8kmで地球を周回しているため、宇宙機には秒速10~15kmもの超高速で衝突することになる。そのため1cm級デブリが衝突すると宇宙機に壊滅的な破壊を与えるとされ、1mm級でもハーネス他クリティカルな部位に衝突すればミッション継続に支障をきたす損傷を与える。実際、1996年の仏衛星CERISEへの

アリアンロケット上段破片の衝突や2009年の米通信衛星イリジウムへの露使用済み衛星の衝突のほか、2013年にはエクアドルの小型衛星NEE-01 Pegaso、露小型衛星BLITSなど、デブリとの衝突あるいは衝突が疑われる事例が続いている。2002年IADC（国際機関間スペースデブリ調整会議）で、2007年に国連でスペースデブリ低減ガイドラインが制定され、ミッション関連部品の放出抑制、破碎の防止、ミッション終了後の有用軌道からの離脱等の処置が行われるようになってきた（デブリ低減ガイドライン等に関する世界の取り組みについては参考文献 [2] を参照されたい）。また地上からの観測によりデブリとの衝突が予測される場合には、宇宙機が軌道変換能力を有していれば衝突回避運用も実施されている。国際宇宙ステーション（ISS）はこれまでに20回以上の衝突回避運用を実施したのに加え、宇宙飛行士が衝突に備えソユーズ宇宙船に避難したことも4回ある。無人衛星だと世界では1年間に120回以上の衝突回避運用が行われたとされている^[3]。

しかし、これから発生するデブリを低減するだけでは不十分と考えられている。すでに軌道上にあるデブリ同士が衝突すると、破片が大量に発生し、デブリの数が増加していく自己増殖（ケスラーシンドロームとも呼ばれる）が、すでに開始していると考えられている。図1はIADCにおける低軌道安定性に関するスタディの結果である^[4]。NASAやJAXAを含む6機関が同一初期条件からの将来予測を行った結果、今後デブリ低減対策が十分遵守されたとしても（今後爆発は起こらない、ミッ

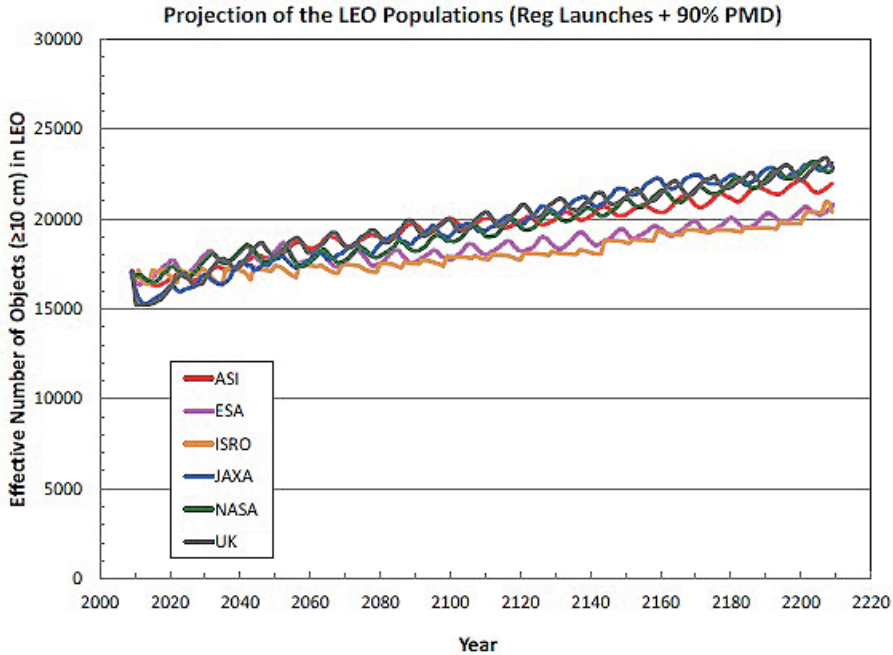


図1 2009年以降の推移予測結果（出典 [4]）

40～275回のモンテカルロシミュレーションの平均値。今後の爆発はなし、今後の打ち上げは2001年から2008年までの履歴を繰り返し、ミッション終了後デオービットの成功率90%と仮定

ション終了後デオービットが90%の割合で遵守される、等)、低軌道、特に700～1,000km付近で今後5～9年に一度壊滅的な衝突が発生し、200年間にわたりデブリの数が増加していく、という結果で一致した。実際には軌道上の爆発事故も継続している上、現時点ではミッション終了後デオービットすべき宇宙機の遵守率も30～40%程度である。さらに、近年大規模コンステレーションの計画等も発表されており、今後の打ち上げが増加すれば軌道上環境はもっと悪化する可能性もある。また、地上から観測・追跡できるデブリは衝突回避が可能であり、1mm以下程度の微小デブリは防御設計が可能であるが、その間の数mmから数cmのデブリは現状衝突回避も防御もできない。

そのため、軌道上環境を維持するためには、今後打ち上げる宇宙機のデブリ低減だけでな

く、今すでに軌道上にあるデブリの除去が必要と考えられている。推移モデルを用いた検討では、現在のカタログ化デブリ数程度に抑制するためには、年間5個～10個程度の大型デブリの除去が必要と考えられている。静止軌道や軌道周期12時間の中間軌道も混雑しており、長期的には衝突による増加が懸念されるが、その増加は数百年単位のゆっくりなものであり、喫緊の対策が必要と考えられているのは低軌道である^[5]。

現在デブリ衝突回避運用あるいはデブリ防御設計が行われ、デブリ衝突による損傷も発生はしているが、許容可能なレベルと考えられ、宇宙開発利用は継続している。しかし、これらデブリ対策に関わるコストは、デブリの増加に従い今後も年々増加していくと予想される。デブリ除去を実施するには短期的には追加の費用が必要となるが、デブリ除去を

実施することにより、将来的なデブリ対策コストをトータルとして低減できるのであれば、デブリ除去が実施される必要がある。逆に言うと、デブリ除去のコストが高いとデブリ除去は実現されず、デブリ対策コストが年々高くなっていき、宇宙開発利用が他の地上インフラ等に比べ優位性が失われる恐れがある。そのため、早急な低コストでのデブリ除去が必要である。

デブリが直接与える負担あるいはリスク、コストは現時点では破片サイズのデブリによりもたらされており、大型デブリは地上から追跡されているため衝突回避が可能である。しかし、破片サイズのデブリを直接取り除くのは容易ではない。非常に数が多く広大な宇宙空間に散らばっているため効率が悪い。また破片デブリを除去しても、大型デブリ同士の壊滅的な衝突が発生すると再び破片デブリが大量に発生する（NASAの標準破砕モデルによれば、大型デブリ同士の壊滅的衝突により10cm級デブリは2、3,000個、1cm級デブリは数十万個、1mmサイズのデブリは数百万個発生する）。そのため、微小デブリの発生源である、混雑軌道の衝突確率の高い大型デブリを除去することが必要と考えられている。

3. 世界の状況

以下、前回の報告以降の各国のデブリ除去に関する最近の状況を紹介する。

3.1 欧州

ESAは2012年、ESA長官のAgenda2015でClean Space Initiativeという取組を開始し、デブリ除去を含む研究開発に積極的に取り組んでいる^[6]。この活動の目的は環境を守り、宇宙および地上に対する影響を最小化して将来の宇宙開発を保障することであり、また欧州の産業がエコデザイン、グリーンデザイン技

術で競争力を持つことを目的としている。ESAは宇宙開発利用は社会経済にとって重要だと確信しており、それを一般社会に示す必要があり、だからこそ、宇宙環境を護り、持続的な宇宙開発により、きれいな宇宙環境を次世代に引き継がなくてはいけない、としている。Clean Space Initiativeは、エコデザイン（€3-5M）、グリーンテクノロジー（€10-15M）、デブリ低減分野（€15-20M）およびデブリ除去分野（€15-20M）の4つの分野からなり、デブリ除去については、2012年にミッション終了したESAの大型地球観測衛星Envisat等を対象としたデブリ除去システムの研究や、網、鉤、テナクル（触手）、ロボットアーム等の捕獲機構等、欧州企業や大学等で試作を含んだ検討が実施されている。2021年頃の実証を目指し、2015年までにどの手法にするか決定するとしている。

欧州連合（EU）も第7次枠組み計画（Seventh Framework Program, FP7）で宇宙輸送、宇宙技術の新しいコンセプトを募集し、表1のようなデブリ除去関連研究を採択している。

CNESは2010年より隔年で欧州デブリ除去会議を開催している。CNESは独自のデブリ推移モデルで検討した結果、デブリ除去の必要性については今後の太陽活動や打ち上げなどモデルの不確実性が大きいためまだ結論できないとして、2014年6月の第三回の会議は、3rd European Workshop on Space Debris Modelling and Remediationとして、推移モデルを用いた研究もワークショップの範囲とした。推移モデルによる予測だけでなく、デブリ除去要素技術の試作試験、システム検討等に関して60件近くの発表があった。DLR（ドイツ航空宇宙センター）は軌道上サービスやデブリ除去の技術実証機DEOS（Deutsche Orbital Servicing Mission）を目指していたが、2014年Phase Bにて終了した。高コストが中断要因の一つと

表1 EU資金によるデブリ除去関係研究

プログラム名	提案者	資金規模	概要
RemoveDEBRIS	Surrey大学他	EUから€7.0M、 トータル€13M	2016年打上予定の小型衛星実証。網や 銚等で模擬デブリを捕獲、セールによる デオービット
BETs (Bare Electrodynamic Tethers)	Madrid工科大学他	EUから€1.8M、 トータル€2.3M	導電性テザーによるデオービットシス テム検討、地上試験
Deorbisail	Surrey大学他	€2.0M、 トータル€2.8M	キューブサットからセイルを展開する ことによるデオービット
CLEANSPACE	CILAS (Compagnie Industrielle des Lasers 仏)、他	EUから€2.0M、 トータル€2.7M	レーザー照射による小型デブリ除去
LEOSWEEP	SENER社 (スペイン) 他	EUから€2.0M、 トータル€2.9M	イオンビーム照射によるウクライナロ ケット上段の除去実証
Stardust	STRATHCLYDE大 (英) 他	EUから€4.1M	小惑星とデブリに関する研究、教育

考えられている。

その他、スイスEPFL (スイス連邦工科大学ローザンヌ校) はキューブサットによるキューブサット捕獲実証Clean SpaceOneを検討中であり、実証はS3 (Swiss Space Systems) の新型ロケット初号機への搭載機会および15M スイスフラン獲得済である^[7]。

3.2 アメリカ

2010年6月の米国新宇宙政策では、デブリ除去の研究や技術開発を進めることを言及した^[8]他、2009年9月には米DARPA(米国国防高等研究計画局) がデブリ除去に関するRequest for Informationを発行し、12月にはDARPA/NASAが世界初となる第一回の国際デブリ除去会議を開催するなど、イリジウム衝突事故を受けいち早くデブリ除去に関する活動を開始した。その後欧州デブリ除去会議等で研究者レベルの発表は継続しているが、特に実証計画は発表されていない。デブリ除去は技術的には可能であるもののコスト的に成り立たないという立場を継続しているものと思われる。しかし、かつてXSS-11 (Experimental

Satellite System、2005年空軍研究所) 等で非協力接近実証を実施した実績があり、またDARPAによる軌道上サービスPhoenixの研究や、海軍研究所によるキューブサットにおける導電性テザー実験 (2015年打上予定) は継続されており、高いレベルの関連技術を有している。

3.3 カナダ

2011年8月のデブリ除去に関するRequest for Proposalでは得意とする宇宙ロボティクスを利用し、将来の市場やビジネス機会を見出すように求める内容となっており、2011年10月デブリ除去のシステム検討に2社を選定し検討を行った (各\$250K) が、その後特に具体的な計画は発表されていない。

3.4 ロシア

2012年9月、露宇宙機関の副長官はベルリンエアショーにてデブリ除去システム開発の計画を発表し国際協力を呼びかけた。また2014年の報道によれば、2025年までの静止軌道デブリ除去機の打上げを想定し、2016～25

年までのロシア連邦宇宙計画で108億ルーブル（約310億円）の計画を発表した。

3.5 中国

中国でも宇宙デブリ除去技術の研究に取り組んでおり、ロボットアームや視覚によるナビゲーション・システムを利用したシミュレーション実験の検証作業を実施していると報告している。

3.6 JAXAにおける取組

JAXAでは低コストデブリ除去技術の研究を進めてきた。低コスト化のための一つの方策として、導電性テザー推進によるデブリのデオービットを検討してきた^[9]。導電性テザーとは、数kmの導電性のテザー（紐）をデブリに取り付けて電流を流すことにより、地磁気との干渉でデブリの高度を下げる高効率推進系である。混雑軌道の大型デブリをデオービットする場合、従来型推進系では大量の燃料が必要となり、また重心を考慮した取り付けや、その後の推力方向制御が必要であるため、デブリ除去衛星が大型化しがちである。導電性テザーは微小推力のため再突入まで数ヵ月かかるが、燃料不要のため小型衛星でもデブリデオービットが実現でき、また取付位置を問わず、強固な取り付けやその後の方向制御も必要としないため、取り付け作業が比較的容易と考えられるからである。デブリ除去は将来的には多数多様な対象を除去する必要があり、デオービット推進系やその取り付け手法等も対象によって様々な手法がありうるが、低コストで実現するための一つの手法として導電性テザー技術の実証を計画している。導電性テザーの伸展特性や電流駆動特性の取得し、将来のデブリ除去システム設計に資するための、HTV6号機を利用した導電性テザーの実証実験（写真1）では、あら



写真1 HTV6号機による導電性テザー実証実験（KITEミッション）

かじめ導電性テザーシステムを搭載しておき、HTVがISSから離脱した後の1週間程度を利用して、700m級の導電性テザーを伸展・特性取得実験を行う予定である^[10]。

平行して、デブリに接近するための誘導制御の研究^[11]、推進系取付手法の研究^[12]等を実施している。

3.7 その他

近年、国の宇宙機関だけでなく、民間企業でもデブリ除去研究を実施するなど、裾野の広がりが見られる。シンガポールに拠点を置くアストロスケール社は、2013年デブリ除去を事業目的として設立され、2017年のデブリ除去技術実証に向けて日本の大学や企業等と検討を進めている^[13]。また、理化学研究所は高強度レーザーによる小型デブリ除去技術について報告している^[14]。

4. 非技術的検討

デブリ除去の技術的検討だけでなく、法的課題、国際的枠組み等の非技術的課題についても検討が進められている。デブリにも所有権があるため、他者が合意なくデブリを除去することはできない。また打ち上げたときに除去する義務はなかったため、現時点では所有者に強制的に除去させることもできない。今後デブリ除去技術が実現すればデブリを放置することの非を問えるか、デブリ除去にはどのような法的課題があるか、等、宇宙法の研究が実施されている。

またデブリ除去の国際的枠組みについても検討されている。デブリ問題は世界的な課題であり、宇宙環境問題として解決に向けた国際的な枠組みが不可欠である。そこで温室効果ガスや海難救助条約等をリファレンスモデルとして、宇宙開発先進国も途上国も参加の意義を見出せる枠組みやその実現に向けたロードマップが検討されている^[15]。

5. おわりに

本稿ではデブリ除去に関する近年の世界の状況について述べた。世界でもデブリ除去研究が進み、具体的な実証実験計画が進んでいる。日本はこれまでデブリをあまり発生させていないクリーンな国であり、またロボット技術やランデブー技術、自律航法、画像処理など、世界最先端レベルの関連技術を有する。日本はこれまでもIADC、ISO等でスペースデブリ低減ガイドラインの制定等に貢献してきた。日本が世界に先駆けてデブリ除去技術を実証し、国際的枠組み等の議論をリードしていくことにより、宇宙環境分野におけるリーダーシップを示すこと、そして将来の産業化において優位に立つことを目指すべきであると考える。

参考文献

- [1] 河本、スペースデブリ除去の必要性和世界の状況、日本航空宇宙工業会会報「航空と宇宙」平成23年10月 第694号
- [2] 加藤、スペースデブリ問題の現状と世界の取組について、日本航空宇宙工業会会報「航空と宇宙」平成26年11月 第731号
- [3] Johnson, N.: Space Debris: A 50-year Retrospective and a Look Forward, IAC-11,A6,6,1, 2011.
- [4] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) Working Group 2,: Stability of the Future LEO Environment, <http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-2012-08,%20Rev%201,%20Stability%20of%20Future%20LEO%20Environment.pdf>
- [5] Liou, J. C.: An active debris removal parametric study for LEO environment remediation, *Advances in Space Research* Volume 47, Issue 11, 1 June 2011, pp.1865-1876.
- [6] http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering/Clean_Space
- [7] <http://actu.epfl.ch/news/orbital-cleanup-satellite-to-be-launched-in-partne/>
- [8] http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/national_space_policy_6-28-10.pdf
- [9] Kawamoto, S., Ohkawa, Y., et al.: Strategy for Active Debris Removal Using Electrodynamic Tether, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, Vol. 7, No. ists26, pp. Pr_2_7-12, 2009.
- [10] Ohkawa, Y., Kawamoto, S., et al.: Preparation for On-Orbit Demonstration of Electrodynamic Tether on HTV, 2015-b/IEPC-301, 34th IEPC, 2015.
- [11] Yamamoto, T., Murakami, N., et al.: "Navigation and Trajectory Design for Japanese Active Debris Removal Mission", 24th International Symposium on Space Flight

- Dynamics (ISSFD), Laurel, Maryland, 2014
- [12] Aoyama, J., Kawamoto, S., et al.: Mounting Technology of the Propulsion System for De-orbiting Debris, Proceedings of the 6th Space Debris Workshop, JAXA <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/546814/1/AA1530025014.pdf>, 2014.
- [13] Okada, M.: A private company's solution to implement space debris removal service, Proceedings of the 6th Space Debris Workshop, JAXA
- [14] Ebisuzaki, T., Quinn, M., et al.: Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station, Acta Astronautica 112 (2015) 102–113.
- [15] Otsuka, A., Tsujita, D., et al.: Designing the International Framework for Active Debris Removal Operation, 2015-t-05, 30th ISTS, 2015.