

# スペースデブリ除去の必要性と世界の状況

宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 未踏技術研究センター 河本 聡美

## 1. はじめに

2011年9月現在、地上から観測、追跡されている低軌道約10cm以上、静止軌道約1m以上のスペースデブリ（宇宙ごみ、以下「デブリ」）だけで20,000個以上、1cm以上のデブリは50～70万個程度、1mm以上だと1億個以上とされている。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以上のデブリが衝突すると宇宙機に壊滅的な被害を与えるとされ、数百 $\mu$ mのデブリでも、ハーネス等衝突場所によってはミッション終了につながる被害を与える可能性がある。これまで4回（1991年、1995年、

2001年、2009年）カタログ化物体同士の衝突が発生し、衝撃を受けて軌道が変化する、デブリを発生する等、微小物体の衝突が疑われる事例、宇宙機の故障はさらに多数発生している。デブリの増加が宇宙開発における大きな問題と認識されて以来、日本他各国のスペースデブリ発生防止標準、国連やIADC（国際機関間スペースデブリ調整会議）のスペースデブリ低減ガイドラインの制定により、2000年頃よりデブリの増加は抑えられていたかに見えていたが、2007年の中国の衛星破壊実験、2008年のロシアロケットの爆発事故、2009年のイリジウム・コスモス衝突事故等が相次ぎ、その数は再び急増している（図1）。

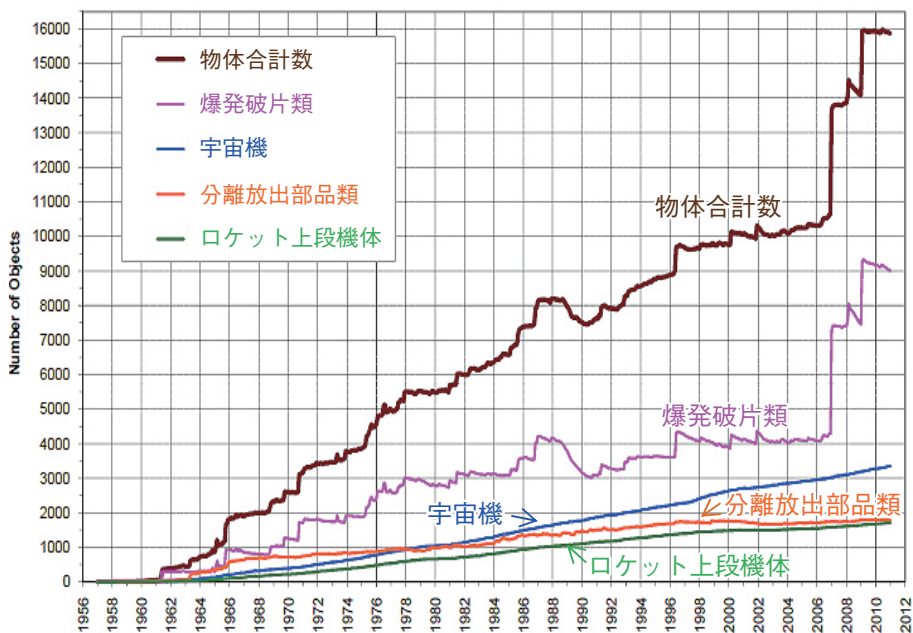


図1 軌道上のカタログ化物体<sup>\*注</sup>の変化（出典 [1]）

\*注：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。この他に起源不明物体約6,000個が追跡されている）

デブリの減少要因はごく少数の回収を除けば空気抵抗による自然落下のみであり、衝突による増加率と減少率が釣り合う臨界密度を超えてデブリが存在すると、それ以上物体を投入しなくても、軌道上にあるデブリ同士の衝突によりデブリの数が増加していく。この自己増殖（ケスラーシンドローム [2]）が低軌道、特に700～1,000km付近、1,500km付近の混雑軌道ではすでに開始していると考えられている。実際2009年に高度約790kmで発生したイリジウム・コスモスの衝突事故は初の宇宙機同士の壊滅的衝突であり、2,000個以上のカタログ化デブリを発生させたが、今後も5年から10年に一度、このような壊滅的衝突が発生すると予測されている。自己増殖が開始している場合、今後打上げる宇宙機のデブリ発生低減（mitigation）だけではデブリの増加を食い止めるには不十分で、唯一の解決方法は環境改善（remediation）、すなわちデブリ除去（active debris removal, ADR）である。

イリジウム・コスモスの衝突事故を受けて、世界ではデブリ除去の必要性、緊急性の認識が急速に高まり、近年さまざまな動きがみられる。本稿ではデブリ除去の必要性および世界の状況について報告する。

## 2. デブリ除去の必要性

近年、米国[3]だけでなく、九州大学／宇宙航空研究開発機構（JAXA）[4]（図2）、英国[5]等各国のそれぞれ異なる推移予測モデルにより、デブリの自己増殖の開始が報告されデブリ除去の必要性が指摘されている。IADCでは現在世界12機関がデブリに関する情報交換、議論を行っているが、2011年、6機関（ASI（イタリア宇宙機関）、UKSA（英国宇宙局）、ESA（欧州宇宙機関）、ISRO（インド宇宙研究機関）、NASA（米航空宇宙局）、JAXA）による同一初期条件からの将来予測において、

今後デブリ低減対策が取られたとしても、デブリの衝突によりデブリ数が増加していくことで結果が一致した。またロシアも別途、デブリが自己増加していくこと、特に、大型デブリより地上から観測できない微小デブリが多く増加することを報告した。これらを受け、IADCでは新たな議題としてデブリ環境改善の検討がスタートした。

自己増殖が開始していると言ってもその増加はなだらかで、多少増加しても問題はない、あるいはまだしばらくはデブリ除去を開始しなくてもよいという意見もある。約10cm以上のデブリは地上から観測・追跡され、接近が予測されると米国は各国の宇宙機の運用者に連絡をしているため衝突回避マヌーバ（軌道制御運用）が可能だからである。また数百 $\mu\text{m}$ 以上のサイズのデブリは、ハーネス等のクリティカルな部位に衝突するとミッション中断につながる故障を引き起こす可能性があるが、近年クリティカルな機器はデブリが衝突しにくい場所に配置する、防御材でカバーするなどの防御設計が行われるようになってきている。しかし、デブリはすでに、宇宙利用において無視できない負担あるいはリスクを与えている。まず第一に、デブリ衝突回避は燃料が必要になる他、観測の中断など運用負担が大きい。デブリ密度の低い高度400km付近にある国際宇宙ステーションでもこれまでに12回、近年は約半年に一度のペースで衝突回避を実施している。また欧米の各国は2010年にはそれぞれ10回程度の衝突回避を実施したと報告している。カタログ化デブリの数はデブリの増加およびデブリ観測性能の向上で2030年には現在の3倍になるとの予測もあり、その負担はさらに増加していくと懸念されている。次に、クリティカル機器の防御設計も、観測機器のようにミッション上防御不可能なものもある上、防御材による防御が可能で

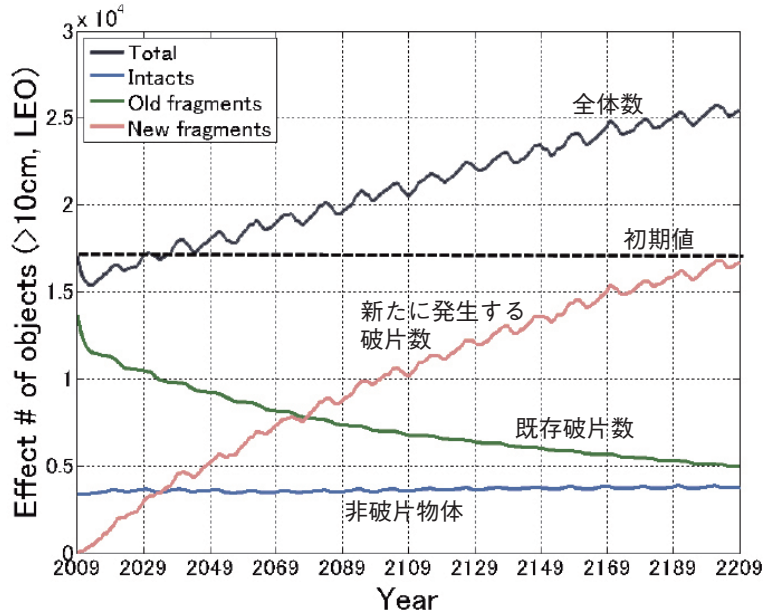


図2 2009年以降の推移予測結果（出典 [4]）。60回のモンテカルロシミュレーションの平均値。今後の爆発はなし、今後の打上げは2001年から2008年までの履歴を繰り返し、ミッション終了後デオービットの成功率90%と仮定

あっても設計変更や重量等のリソース増加は開発者の大きな負担となっている。その間の数mmから数cmのデブリは、地上から追跡できていないがその衝突エネルギーは膨大なため、防御設計も衝突回避も不可能であり、宇宙機の運用上対処できないリスクとして残る。現在混雑軌道の衛星には、その5年程度の寿命の間に、1cm級のデブリが衝突するリスクが1%以上あるとされている。

これらのデブリは壊滅的な衝突が発生すると大量に発生する。NASAの標準破碎モデルによれば、中国の破碎実験やイリジウム・コスモスのような壊滅的衝突により、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したと考えられている。しかし、これらのサイズのデブリを直接取り除くのは容易ではない。すなわち、非常に数が多く広大な宇宙空間に散らばっているため、例えば地上からレーザーで

アブレーションを起こして一つ一つ軌道を変えたり、大面積の低密度材料等でパッシブに微小デブリを衝突させて取り除くのは効率が悪く、現状の技術では効果的な低減は不可能だとされている。一方、これらのデブリの発生源は大型デブリである。大型デブリが衝突あるいは爆発を起こすと、多数の微小デブリが発生する。そのため、宇宙空間が危険で使用できなくなる前に、衝突を起こす確率の高い大型デブリを除去することが、一番実現可能性が高いと考えられている。

### 3. 世界の状況

上記に述べたIADCの他、IAA（国際宇宙航行アカデミー）では2006年よりスペースデブリ環境改善（Space Debris Environment Remediation）のスタディが開始され、2010年に報告書ドラフトがまとめられた。この中では様々なデブリ除去手法のリストアップおよ

び比較が行われている。また、国連宇宙空間平和利用委員会（UNCOPUOS）では、2010年より宇宙活動の長期的持続性の議題の下、デブリ除去を含む議論がなされている。下記に各国のデブリ除去に関する最近の状況を紹介する。

### 3.1 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[6]他、2010年米国国防省がまとめた報告書U.S. Space Posture Reviewの中間報告はデブリの連鎖衝突が発生する恐れがあること、デブリによる衛星利用サービスの損失額は250Bドル規模になると警告するなど、デブリ問題について深刻にとらえている。また、2011年NRC(米国学術研究会議)のレポートでデブリの数はデブリ自己増殖の転換点に到達しているため、除去および国際協力の必要性についてNASAに勧告している[7]。また、これらに先立ち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した。その後2011年3月にはDARPAのレポートCatcher's Mitt Final Reportが報告され、会議でも発表のあった様々な除去手法について検討した上で、低軌道大型デブリの除去の必要性について述べている[8]。2011年3月にはNASAは技術実証ミッションを公募したが、その4つのテーマのうちの一つとしてデブリ除去が含まれていた。選定の結果、ソーラーセール他の3件が選定されデブリ除去に直接つながる実証ミッションは選定されなかったが、ソーラーセールはデブリ除去にも役立つと説明されている。米国は元々、XSS-10(Experimental Satellite System、2003年空軍研究所)、XSS-11(2005年同)、DART

(Demonstration of Autonomous Rendezvous Technology、2005年NASA)、OrbitalExpress(2007年DARPA/NASA)等の無人ランデブードッキング実験を実施しており、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主張していたが、デブリ除去の実現に向け動き始めていることがうかがえる。

### 3.2 カナダ

CSA(カナダ宇宙機関)は2011年よりIADCに参加し、2011年6月には第一回デブリワークショップを開催した。7月にはデブリ除去のシステム検討に関するRequest for Proposalを発出している。その内容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求める内容となっている。カナダMDA社は2011年3月インテルサット衛星の保守を契約しているが、デブリ除去は軌道上サービスと多くの共通技術を必要とするため、ロボティクス技術を利用したデブリ除去は軌道上サービスの延長として自然な流れだとしている。

### 3.3 ロシア

ISTC(国際科学技術センター)はROSCOSMOS(ロシア連邦宇宙局)と2010年4月に米国に次いでデブリ低減ワークショップを開催した。2009年11月にエネルギー社社長がデブリ除去は2020年には3Bドル市場になると予測、ビジネスを狙うとの報道や、2010年11月には、2Bドルを投資して原子力を利用したデブリ除去宇宙機の開発を行うとの報道もあった。2011年にはISTCにおいて、NASA、CNES(フランス国立宇宙研究センター)、JAXA関係者らと協力して国際デブリ除去実証ミッションの提案をする検討をしている。

### 3.4 ヨーロッパ

2010年6月CNESおよびESAは第一回欧州デブリ除去会議を開催し、欧州を中心に約100人の参加者があった。CNESはATV（欧州補給機）技術を利用したミッションとしてデブリ除去を検討しているとのことであった。スウェーデン宇宙公社は2010年フォーメーションフライト技術実験衛星PRISMAを打上げ、非協力対象の自律的光学捕捉などを実証している他、DLR（ドイツ航空宇宙センター）は現在フェーズBスタディのDEOS（Deutsche Orbital Servicing Mission）により軌道上サービスやデブリ除去の技術実証を目指している。またESAは静止軌道の軌道上サービスであるROGER（RObotic GEostationary orbit Restorer）やConeXpress等を検討してきたこともあり、デブリ除去に関連するさまざまな活動を行っている。

### 3.5 中国

北京航空航天大学は2010年10月、米国のSecure World Foundationおよび国際宇宙大学（ISU）とデブリ低減ワークショップを開催し、特にデブリ除去の技術的実現性や法的問題について議論した。2011年10月にも同様の共催で宇宙持続性会議の開催を予定している。

## 4. おわりに

本稿ではスペースデブリ除去の必要性およびデブリ除去に係わる世界の状況について述べた。デブリの増加による影響は、現在あるいは数年後までは顕著ではないが10～20年後には顕著になると考えられており、デブリ除去を開始できるようになるまでのデブリ除去衛星の開発期間、除去を開始してから効果が出るまでの期間を考えるとやはり時間はない。宇宙機はデブリとなった後も所有権が残っているため、デブリ除去は技術的だけ

でなく法的にも解決しなくてはいけない問題は多い。しかしデブリ問題は他の環境問題と同様、世界的な問題である。今後も宇宙利用を継続する以上デブリ除去は必要であり、将来は国際的枠組みで公共事業的にデブリ除去が実施されていくと予測されている。上げた時に除去する義務はなかったため、上げた国に除去させるのは困難と考えられているためである。もし国際的枠組みでデブリ除去が実施される場合、デブリ除去の技術を有する国がデブリ除去を実施し、その他の国は環境的に資金を出させられるだけとなりかねない。

デブリは今後も増加を続け、デブリ低減要求が厳しくなり、デブリ除去の必要性が上がるのは避けられない傾向である。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。また日本は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上、これまでのデブリ除去のシステム検討でリードしており、今は諸外国から協力や共同提案について声がかかる状態にある。現在の宇宙環境を維持するためには毎年5機から10機程度のデブリ除去が必要とされており、コンスタントな需要のある市場とも考えられる。世界に先を越される前に、いち早く日本がデブリ除去技術を実証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える。

### 参考文献

- [1] NASA The Orbital Debris Quarterly News 15-1 (2011, Jan)
- [2] Kessler, D. J.: Collisional Cascading: The Limits of Population Growth in Low Earth

- Orbit, Adv. Space Res. Vol. 11, No. 12 (1991), pp. 63-66.
- [3] Liou, J.-C and Johnson, N.: Risks in Space from Orbiting Debris Science, 311 (2006), pp.340-341.
- [4] 眞庭、花田、河本、環境推移モデルによるスペースデブリの長期環境推移について、第4回スペースデブリワークショップ 宇宙航空研究開発機構特別資料JAXA-SP-10-011、pp.135-144.
- [5] Hugh, L., Newland, R., et. Al., A NEW ANALYSIS OF DEBRIS MITIGATION AND REMOVAL USING NETWORKS, IAC-08-A6.4.9, 2008.
- [6] [http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/national\\_space\\_policy\\_6-28-10.pdf](http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/national_space_policy_6-28-10.pdf)
- [7] Limiting Future Collision Risk to Spacecraft: An Assessment of NASA's Meteoroid and Orbital Debris Programs, Committee for the Assessment of NASA's Orbital Debris Programs; National Research Council, 2011.
- [8] Wade Pulliam, Catcher's Mitt Final Report, DARPA report, 2011.