

## 論文の内容の要旨

論文題目 スペースデブリ除去のための統合的システムの提案とそのフィージビリティに関する研究

氏名 河本 聡美

近年スペースデブリの増加が宇宙開発における問題となっており、これから打ち上げる宇宙機のデブリ低減策に加えて、既に軌道上にあるデブリの除去が必要と考えられている。世界でもデブリ除去技術について様々な研究開発が実施されてきたが、デブリ除去の実例はない。その理由として考えられるのは、①除去すべき対象やその方策に関する統合的な研究が不十分であるために除去システムが大型化・複雑化する傾向にあり、コスト的に成立しないこと、②低コスト化するための方策として導電性テザー (EDT) システムが提案されてきたが、実現性が不明であること、の二点である。そこで本研究では、デブリ除去実現のための統合的システムを提案し、EDT を核として実現する際のフィージビリティを検討している。具体的には、上記の2点の課題に対し、①軌道上環境改善のために必要な低コストデブリ除去システムの要求仕様をまとめ、開発方針を提案し、②小型軽量の相乗り衛星で実現するための EDT システムに関する課題解決策を示している。

まず第一の課題について、デブリ問題の現状やデブリ除去に必要な条件を整理し、継続的な大型デブリ除去の必要性や、除去の要求、開発ステップ等の方針について述べている。デブリの数は近年急増しており、実際にすでに軌道上衝突も発生している。デブリ対策として国内外にデブリ低減ガイドラインが策定されており、衝突回避、防御設計等も実施されているが、そのようなデブリ対策は運用者にとって負担になっている。さらに、すでに低軌道の混雑軌道では、これから打ち上げる宇宙機が十分デブリ低減策をとったとしても、既に軌道上にある物体同士の衝突により数が増加するケスラーシンδροームが発生していると考えられており、デブリ対策の負担やリスクがさらに増加していくと懸念されている。そのため継続的な宇宙開発のためには、既存デブリの積極的除去が必要と考えられ様々な検討が実施されてきたが、現状の状況分析、除去すべき対象やその方策に関する統合的な研究が不十分であるために、議論がまとまらず、なかなかデブリ除去技術の実証に至っていない。また、低コストの必要性が認識されないまま、様々な要求・目的が課された結果、宇宙機システムが大型化・複雑化し、高コストが原因で技術実証計画が頓挫する例が相次いでいる。そこでデブリ対策として、デブリサイズ毎に考える対策とその有効性、費用対効果について評価し、衝突回避や防御設計等の効率化と共に、衝突回避も防御もできないクリティカルサイズのデブリの発生防止のために、大型デブリの除去が効果的であることを述べている。そしてデブリ除去統合的システムを検討する上での必要条件として、デブリ除去のコスト成立性について考察している。軌道上環境保全のためには継続的に多数のデブリ除去が必要なことから、単にデブリ除去の技術を開発すればよいだけでなく、低コストであ

る必要がある。また、所有権や除去費用等の非技術的課題についても、技術的検討に考慮すべき点についてまとめ、そしてそれらの要求、方針を考慮した上で、デブリ除去システムの開発ステップとして、最初から汎用のシステムを目指すのではなく、比較的難易度の低い対象から低コストでの除去技術を確立して除去対象を徐々に拡大していく方針について提案している。すなわち、まずは低軌道混雑軌道にある姿勢が比較的安定したロケット上段デブリを、デブリ除去衛星で接近・捕獲・軌道変換するという、低コストのデブリ除去技術を確立する方針である。

次に、提案するデブリ除去技術確立に向け、デブリ除去システムのシーケンスを示し、必要となる各要素技術、およびシステム技術の課題を整理している。必要となる要素技術として、非協力接近技術、捕獲技術、デオービット技術についてそれぞれの課題をまとめ、デオービット用の推進系が衛星システムや捕獲機構に大きな影響を与えること、EDT が課題解決に有望であることを述べている。また、1機のデブリ除去衛星で何個のデブリを除去するか等のデブリ除去の方式については、軌道やデブリサイズによるコスト評価によれば、まずは EDT を用いた小型のデブリ除去衛星で 1 個のデブリを除去する手法が低コスト化に有効である。これらの考察から、まずは開口部のある PAF (Payload Attach Fitting) を有するロケット上段を除去の対象とし、GPS による位置計測、次いで軌道上観測情報を用いてデブリに接近、テザーの一端を剛でなくして構わないので外れないように PAF の開口部に引っ掛け、その後テザーを伸展し、EDT 推力によってデブリの高度を下げる、という低コスト小型衛星のコンセプトを提案している。

さらに提案するコンセプトについて、それぞれの技術のフィージビリティについて検討し、非協力接近や捕獲等の要素技術のフィージビリティが検討されていること、EDT が実現すれば低コストの衛星システムが成り立つことについて示している。非協力接近技術については、数値解析や、対象の見え方を模擬した実験を利用して検討がなされている。PAF に EDT の一端を引っ掛ける手法としては、たけのこばねを利用した伸展ブームを用いることで、相対位置・姿勢精度が悪くても、実現可能であることが、数値シミュレーションや地上実験で検討されている。また衛星システムとして、これらのミッション機器を搭載しても、200kg 級衛星で実現でき、かさ上げ PAF 内に搭載した相乗り打上や、クラスタ打上等が可能と考えられている。

次に、第二の課題として、EDT システムの課題およびその解決方針を提案している。まず EDT の構成、過去の実績、課題について述べている。EDT は高効率推進系としてデブリのデオービットに有望と考えられてきたが、実績のない新規技術であり、高軌道傾斜角で推力が小さいこと、切断可能性が大きいこと、衝突回避や制御落下が困難であること等の技術的課題があり、デブリ除去への適合性が不明であった。そこで、テザーの試験により取得したパラメータや、磁場・プラズマ密度等のモデルを使用した詳細数値シミュレーションにより評価する。また微小デブリの切断や、故障時における運用衛星に対する負担の解決方法としては、網状テザーおよび集束テザーという新規アイデアや、衝突回避や制御落下のためにデブリ除去衛星のスラスタを用いることを提案している。

EDT の詳細数値シミュレーションでは、テザーを離散質点をばねとダッシュポッドで接続し

たものとモデル化し、地球周回軌道上での運動方程式を用いて計算している。そして電子収集のモデル(二次元 OML 理論)や、電子源からの電子放出モデル、磁場モデルやプラズマモデル等の詳細環境モデルを用いた結果、EDT の推力は、磁場やプラズマ等により複雑に変動し、また重心がテザー中心になく、テザーにローレンツ力等が分布力として働くことで、テザー振動が発生することを示している。衝突回避運用のために、テザー端に接続されたデブリ除去衛星のスラスタを使うとテザー振動に影響を与えるが、タイミングを図って推力を与えれば、テザーを不安定にすることなく推力を付加できる。また、制御落下のためには、デブリ除去衛星の推力によりテザーを回転させ、テザーが水平方向にきたタイミングで大きな推力を与えることができる。テザーを水平方向に牽引すると、重力傾斜力による安定化ができないため、テザーの縦振動や予期せぬ運動を発生させる恐れがあるが、落下軌道に入った後であればテザーが不安定化しても問題ないため、EDT の推力で十分高度を低下させてから大きな推力を与えることで、制御落下を実現する可能性を示している。軌道やテザースペックによる推力への影響については、軌道は高度が高いほど、軌道傾斜角が高いほど推力が低下するが、太陽同期軌道等の極軌道でも推力はゼロではないため、大型デブリ除去が可能である。例として、高度 800km の 3400kg 級デブリは 1 年以下程度で軌道降下でき、高度 1000km 付近、軌道傾斜角 83 度付近の 1400kg 級デブリ、あるいは高度 850km、軌道傾斜角 71 度付近の 8000kg 級デブリ等の、除去すべき対象と考えられているデブリも、同様に 1 年強程度で除去することができる。さらに、テザーの長さや直径等のパラメータによる推力の影響、太陽活動の時期による影響等についても示し、これらの結果から、システム要求仕様の決定方法について述べている。除去対象の軌道や重量により、適切な期間でデオービットできるようにテザースペックを変更し、必要重量や電力を求めることができる。

このように、EDT で除去すべき大型デブリを現実的な時間で除去可能なことや、網状テザーや集束テザー等の実現方策、衝突回避や制御落下の運用方法の解決策を示している。これらにより、混雑軌道（高度 800km～1000km 付近等）の数トン級大型デブリを、200kg 級の相乗り可能な小型衛星で除去するという、欧米に比べ重量やコストが 1/10 以下の低コストデブリ除去システムを提案にいたっている。