

宇宙デブリ発生防止技術の研究

Research and Development of Active Removal System for Space Debris

宇宙先進技術研究グループ (Advanced Space Technology Research Group)

スペースデブリ サブグループ (Space Debris Sub-group)

西田信一郎、河本聡美、大川恭志

Shin-ichiro Nishida, Satomi Kawamoto and Yasushi Ohkawa

Abstract

Since the number of satellites in Earth orbit is steadily increasing, space debris could eventually pose a serious problem to near-Earth space activities, and therefore effective measures to mitigate it are important⁽¹⁾. End-of-life de-orbiting and orbital lifetime reduction capability of each satellite could be an effective means for reducing the number of debris by lowering the probability of the collisions between objects. This research and development is for an active removal system of space debris and the retrieval of failed satellites as to be other measures.

1. はじめに

地球周回軌道上のスペースデブリの増加が問題となっている。地上から観測・カタログ化されている10cm以上のサイズの大きなものだけでも9000個以上有り、中型衛星で500年に1回は1cm以上のデブリが衝突する衝突確率となっている。衛星残滓の爆発やデブリ衝突により多数の小デブリが発生し、スペースデブリの数は、今後加速度的に増加する。IADC、ISOなどでスペースデブリの発生防止義務の法制化が検討・議論されている。技術実証において欧米が先行する状況のため、我が国も宇宙環境保全への積極的な対応および必要な技術開発・蓄積によりリーダーシップをとることが求められている。本研究では、スペースデブリの発生および増加を防止するため、有用な軌道からの衛星残滓のアクティブな回収・除去システムやロケット上段の終末処理システムの開発および必要な技術の研究・開発を行っている。

2. 回収・除去システム検討

寿命の尽きた衛星や衛星を打ち上げたロケットの上段が有効な軌道からの適切な除去処理が行われるケースは、一部であり、大半は軌道上に放置され、残留している。衛星残滓やロケット上段の爆発やデブリ衝突により多数の小デブリが発生し、スペースデブリの数は今後加速度的に増加する見積もられている。従って、スペースデブリの有効な低減策として、次の対策が挙げられる。

- a. 確実な衛星の終末処理、ロケット上段の廃棄処理方法の確立
- b. 大型の衛星残滓の有用軌道からの除去

そこで、大型の衛星残滓を有用な軌道上から回収・除去するシステムの研究・開発を進めている。

また、ロケット上段の廃棄処理方法としては、打上時の自己廃棄処理（軌道上再着火での残推薬消費による減速処理）を実施することが有望である。

2.1 衛星残滓の処理方法

衛星残滓の有効軌道からの除去処理方式は、衛星軌道ごとに以下の方式が有望である。

- a. 低軌道ロケット上段： 軌道高度を650km以下まで下げる、

- b. 低軌道衛星残滓： 軌道高度を 650km 以下まで下げる
- c. 静止軌道衛星残滓： 軌道高度を 300km 以上上昇させる

なお、GTO に残留するロケット上段については、ペリジ近辺のエアドラッグのため十数年で自然落下するのが一般的であり、IADC ガイドラインの 25 年以内大気圏再突入の条件に整合するため、対策の優先度は低い。

2.2 回収・除去対象

軌道ごとに最適なデブリ回収・除去方法を検討した。低軌道では、地球磁場の影響が大きいため、導電性テザーの活用が有効である。デブリ衝突確率を考慮すると、低軌道の有効な軌道(特に太陽同期軌道)が最も逼迫した軌道であり、衛星残滓やロケット上段残滓の低減対策が必要である。そこで、低軌道衛星残滓の回収・除去に重点を置いたシステム検討を実施する。

2.3 戦略

早期のシステム実現を目標に、以下の戦略で回収・除去システムの検討を行う。

- a. ロケット上段、衛星残滓の除去に共通に使用できる使い捨て型の導電性テザーを用いる。(原理：図 1)
- b. コスト、効率に考慮し、一機で多数の衛星残滓を除去できるデブリ回収機を用いる。

地球観測用太陽同期軌道に多数の衛星残滓が残留しており、僅かな軌道間移動により複数のデブリを回収・除去することが可能と考えられる。

2.4 デブリ回収システムの概念およびミッションシナリオ 低軌道

デブリ回収システムのミッションシナリオとして、次の各ステップ項目の作業を想定する。(図 2)

- a. デブリへのランデブ、デブリの運動計測
- b. デブリ回転の角運動量低減
- c. フライアラウンド、最終接近
- d. ロボットアームによる捕獲
- e. 導電性テザー伸展
- f. デブリリリース

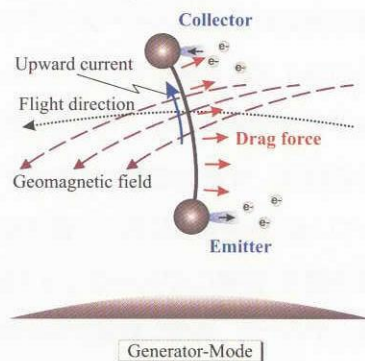


図 1 導電性テザーの原理

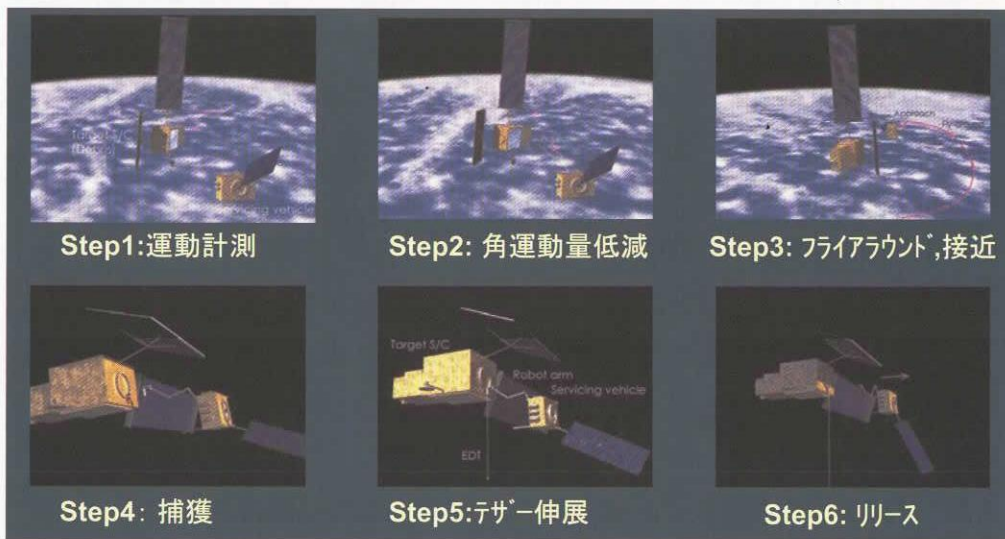


図 2 低軌道デブリ回収システムのミッションシナリオ

2.5 要素技術課題

前節に示したデブリ回収・除去システムに必要な要素技術として、以下の技術が挙げられる。

- a. 回収・除去システム検討 : 回収作業機 b. 高効率軌道変換技術 : 導電性テザー (Electrodynamic Tether: EDT) c. 画像による運動推定技術 : ステレオ画像計測 d. ロボット捕獲/制動技術 : ロボット制御 e. 角運動量消散技術 : インパクトスラスト法

角運動量低減の必要がない低速回転デブリ除去に特化して機器開発/研究を進め、以下の技術は将来的な発展段階の技術として位置づけて研究・開発を進める。

- ・高速回転デブリの角運動量消散技術
- ・再使用型導電性テザー装置

2.6 回収作業機の構成

以上の技術を適用する低軌道衛星残滓の回収作業機として図3に示す構成と以下に示す特徴を想定する。なお、図4に示すように捕獲機構と導電性テザーの一体化により、捕獲と同時にテザー取付が完了する。この様な装置を複数搭載して各デブリに取り付け・伸展・リリースする。

- 観測衛星等とのデュアルランチ可能な形態
- 質量: 1ton、電力1.5kW級衛星
- 高応答力覚制御ロボットアーム搭載
- 使い捨てテザーユニット取付によるデブリ除去
- 1機で複数(目標: 10)のデブリを除去
- イオンエンジン等による軌道間移動

3. 技術実証システムの検討

本デブリ回収・除去システムの重要技術である導電性テザーの軌道上実証システムの検討を進めている。実証機会が多いと考えられるシステムとして、H型ロケット上段部を用いた実証システムとピギーバック衛星を用いた実証システムを各種検討した。ロケット上段を用いた実証システムの構成例を図5に示す。

4. EDTシステムの適用可能性検討

EDTシステムでは地磁場との干渉により発生するローレンツ力を推力とするため、非常に高効率であるが、低推力であること、および推力の方向は地磁場とテザーの向きに依存するという問題がある。そのため、(1)現実的な時間内に軌道変換できるか、(2)軌道面内方向成分の小さくなる高軌道傾斜角で軌道降下が可能か、についてまず確認した。例としてADEOS(高度800km、軌道傾斜角98.6度)、Globalstar(高度1400km、軌道傾斜角52度)を、長さ10kmのEDTに3Aの電流を流したときに投棄軌道(高度630km)に到達するまでの時

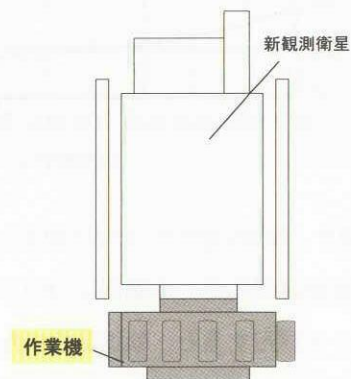


図3 デブリ回収作業機の打上形態

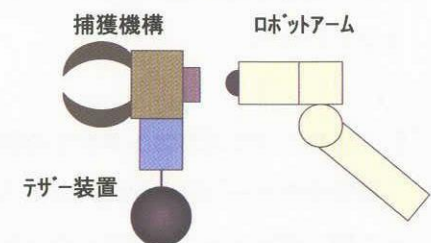


図4 捕獲機構とテザーの一体化

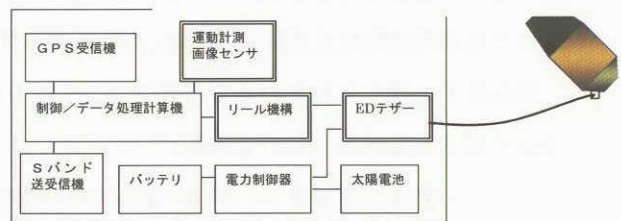


図5 ロケット上段活用のEDT実証システム構成例

間はそれぞれ 43.3 日、18.6 日であり、デブリ投棄に十分効果的であることが分かった。また軌道上昇に必要な時間は、誘導起電力に打ち勝つための電力に依存するが、図のように数十日から 100 日レベルで可能である。

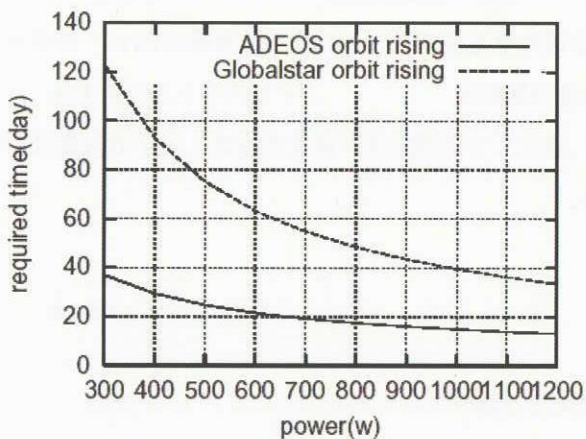


図6 再使用型テザーによる軌道上昇と所要電力

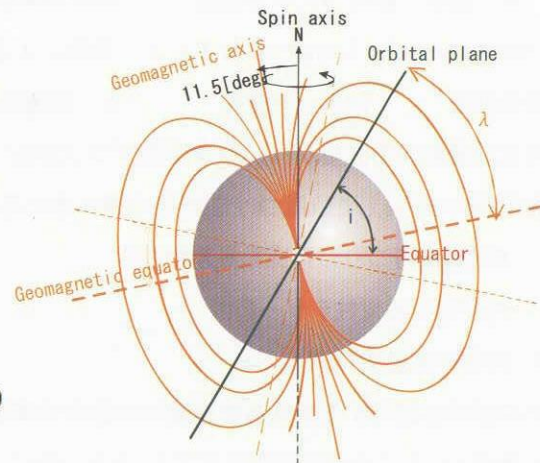


図7 地球周回軌道と地球磁場の関係

また高軌道傾斜角での適用については、地磁場が地球の自転軸と傾いた状態で地球の自転と共に回転していることを利用すると、軌道変換のために十分な推力を発生することができることが分かった。この他、地磁気の方に推力が依存しても軌道半径のみ、軌道傾斜角のみなど軌道要素を任意に変えるための電流の流し方や、電流を流したときのテザーの安定性、デブリを切り離れた時の挙動などについて、数値シミュレーションを行った。

5. EDTプラズマコンタクタの部分試作・試験

導電性テザー（Electrodynamic Tether: EDT）に電流を流して推力を得るためには、テザーと周辺プラズマとの間で電流ループを形成しなければならない。このためテザー（導電部）の両端には、周辺プラズマとの間で電子の授受を行うプラズマコンタクタが必要となる。テザー両端での電子放出／収集特性は、EDT動作の基本である電流特性を支配するため、高効率プラズマコンタクタの開発はEDTシステムにとって必須である。

現在有力と考えられているプラズマコンタクタの候補としては、電子エミッタと電子コレクタそれぞれについて以下を挙げることができる。

- ・電子エミッタ： ホローカソード、電界放出型カソード
- ・電子コレクタ： ホローカソード、ベアワイヤ（被覆無し導線）

これらのプラズマコンタクタは、以下のような特徴を有する。

- a. ホローカソード：少量の作動ガスを連続的に供給することで、自身の内部及び近傍に比較的高密度なプラズマを生成し、それを介することによって周辺プラズマとの効率的な電子授受を行う。
- b. 電界放出型カソード：微細加工等により形成された微小ギャップの間に高電圧を印加することで、導体表面から電子を電界放出させる。作動ガスが不要。
- c. ベアワイヤ：導電性テザーの延長部分である被覆無し導線により、周辺プラズマから流入する熱電子電流を収集する。作動ガスが不要。

これらのコンタクタのうち、先に提示された使い捨て型 EDT システムに最も適当と思われるのは、電子エミッタとしての電界放出型カソードと電子コレクタとしてのベアワイヤの組み合わせである。この場合、作動ガスが一切不要であるため、タンクやバルブ等の無い簡素で信頼性の高いシステムを構築できるものと期待できる。一方、再使用型 EDT システムについては、両端ともホローカソードとするのが有利と考えられ、エミッタ/コレクタ動作を切り替えることで、テザーの回収・伸展の動作を伴わずに軌道の上昇と降下の繰り返しが可能となる。

本年度、使い捨て型 EDT システムの検討の一つとして、電界放出型カソードに関する研究を開始した。電界放出型カソードには、スピント型やトリプルジャンクション型などいくつかのタイプがあるが、本研究では、カーボンナノチューブ (CNT) を利用したタイプを採用している。CNT は近年様々な分野で利用され始めており、電界放出型カソードとしてもその注目度は大きい。また、CNT の低真空領域での耐久性は、他のスピント型等に比較して高いことが報告されており、低軌道上での動作に適しているものと期待できる。

今回試験に用いた数種の CNT サンプルのうちの 1 種の電子顕微鏡写真を図 8 に示す。同図は、Multi-walled nano-tubes (MWNTs) と呼ばれるタイプの CNT を Chemical Vapor Deposition によって金属基板上に生成したものを示している。図 9 は、初期実験により得られた CNT エミッタの電子放出特性の 1 例であり、約 1 kV/mm 以上の電界を与えることによって電子放出量が急激に増加する様子を確認できる。今後は、CNT エミッタの電子放出特性についてさらに詳細に調べるとともに、EDT システムでの利用を目指し、搭載に適した機器構成や耐久性に関して検討を進める予定である。

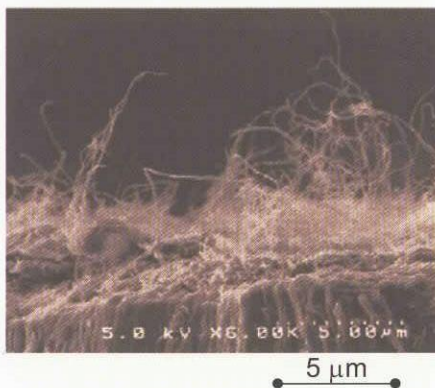


図 8 SEM image of carbon nano-tube sample.

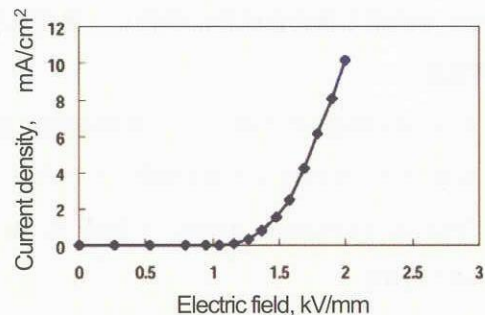


図 9 Typical emission characteristic of carbon nano-tube emitter.

6. スペースデブリ捕獲の検討

スペースデブリは、姿勢制御が機能していないため、回転運動している場合が多い。高速回転の場合は、フライア라운드やロボットアーム動作での追従が困難なため、事前に何らかの角運動量低減策が必要であるが、低速回転の場合には、ロボットアームによる追従により捕獲が可能となる。スペースデブリは、捕獲用の取っ手や視覚マーカを持たない非協力ターゲットであり、質量特性も正確には判らない。また、計測した相対運動やランデブ制御には誤差が含まれる。このような状況での捕獲においては、捕獲時の予測困難な運動による衝撃の緩衝や捕獲後の制動動作がロボットアームに要求される重要な機能となる。

6.2 制御方式

スペースデブリの捕獲・制動用のロボットアームの制御方式として、高い応答性で良好な制御特性が得られる関節仮想デプス制御(図10)を新規に開発した。

6.3 動力学シミュレーション

関節仮想デプス制御によるデブリ捕獲時の制動につき、詳細なモデルによる動力学シミュレーションを実施し(図11)、制御の有効性を確認した。また、小型ロボットアームを用いた地上実験により有効性を確認した。

7. まとめ

加速度的に増加する低軌道スペースデブリの状況から、回収・除去技術の開発が急務である。本研究では、システム検討と並行して、キー要素技術である導電性テザーの開発および軌道上実証、デブリ捕獲技術などに重点を置いて研究を進めており、着実な成果を挙げている。今後は、テザーワイヤーや機構も含めた試作に移行し、具体的な実証計画の立案を進める。

参考文献

[1] 木部:”地球軌道を取り巻くデブリ環境の現状”, SICE 計測と制御 Vol.41-8, 2002
 [2] 西田, 照井, 河本:”デブリ除去技術へのアプローチ”, SICE 計測と制御 Vol.41-8, 2002
 [3] T.Makida, S.Kawamoto, S.Kibe, “A Study on the behavior of electro-dynamic tether for space debris removal system” ISTS 2004-d-31, 2004
 [4] S.Kibe, S.Kawamoto, Y.Okawa, F.Terui, S.Nishida, G.Gilardi, ”R&D of The Active Removal System for Post-mission Space System”, IAC-03- IAA.5.4.07, 2003
 [5] Y. Ishige, S. Kawamoto and S. Kibe, ”Study on Electrodynamic Tether System For Space Debris Removal”, IAF-02-A.7.04, 2002
 [6] S.Kitamura, Y.Okawa et.al, ”Preliminary Study on Field Emitter Array Cathodes for Electro-dynamic Tether Propulsion”, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2004, 2004
 [7] 西田, 吉川, 菅野:”力覚制御アームによる衛星捕獲”, SICE 誘導制御シンポジウム, 2002
 [8] S.Nishida, T.Yoshikawa, “Space debris Capture by Joint Compliance Controlled Robot”, AIM2003, 2003

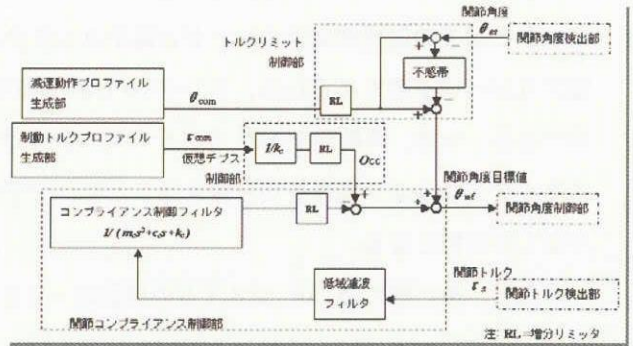


図10 関節仮想デプス制御のブロック図

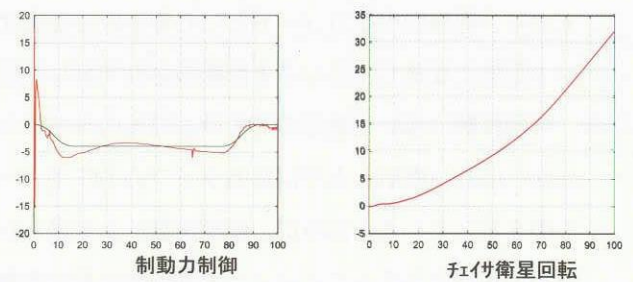


図11 デブリ回転制動の動力学シミュレーション結果