

# 1C16 デブリ捕獲用把持システムの概念検討

○久保田伸幸、榎本雅幸（川崎重工業株式会社）  
河本聡美、仁田工美、中西洋喜（宇宙航空研究開発機構）

## Conceptual Study of Mechanical and Sensing System for Debris Capturing

Nobuyuki Kubota, Masayuki Enomoto (KHI),  
Satomi Kawamoto, Kumi Nitta, Hiroki Nakanishi (JAXA)

Key Words : Space Debris, Active Debris Removal

### Abstract

The amount of space debris has been increasing, and that is becoming a threat to the currently operated satellites and ISS. The provision to prevent future spacecraft from being debris is not enough to decrease the risk of debris, an active debris removal(ADR) will be needed. The upper stages of expendable launch vehicle have been remaining in the orbit as space debris, and the number of it is so large. This paper reports the results of conceptual study of mechanical and sensing system for capturing the upper stages of expendable launch vehicle.

### 1. はじめに

年々増加の一途をたどっているスペースデブリは、運用中の人工衛星や ISS（国際宇宙ステーション）に対する脅威となりつつあり、既に軌道上でスペースデブリの衝突が発生したと思われる事象も複数回確認されている<sup>1)</sup>。国際的には、今後のデブリ発生を低減すべくスペースデブリの発生防止基準が規格化されている。

一方、現時点で既に軌道上に存在するスペースデブリが衝突を繰り返し、デブリの総数が増えていくケスラーシンドロームも懸念され<sup>2)</sup>、この様なリスクを低減するためには、今後のデブリ発生を抑制するばかりでなく、現存するデブリを積極的に除去する（Active Debris Removal）ことが必須とされ<sup>3)</sup>、国連の国際宇宙空間平和利用委員会でも、デブリ除去に関する議論が始まっている。

本稿では、デブリ除去衛星のシステムを構築するにあたり、スペースデブリに接近するための航法機器としての画像センサと、スペースデブリを軌道から除去するためのデバイス（例えば導電性のテザー：EDT）を取り付けるための把持装置に関する概念検討を実施した結果を報告する。

### 2. 対象とするスペースデブリ

軌道上には人工衛星とロケット上段がデブリとなって周回している特定の混雑した軌道があり(図 1 参照)<sup>4)</sup>、特に太陽同期軌道（高度 800~1,000km）には、多数のロケット上段が存在している(図 2 参照)<sup>5)</sup>。

よってここでは、除去の対象とするスペースデブリとして、ロケット上段部をターゲットとした。中でも H-II、H-II A ロケットはコンフィギュレーションが明確な部分が多く、詳細を検討するにあたっての対象とした。

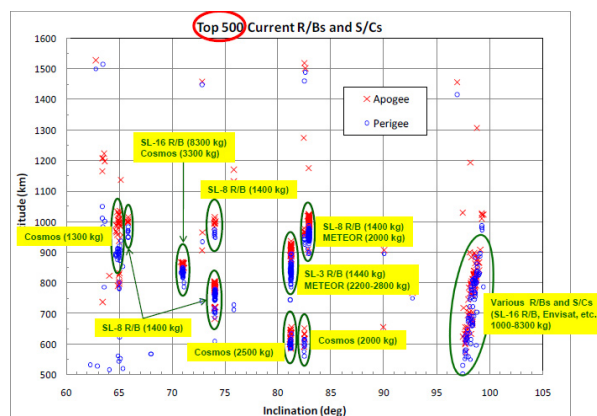


図 1 デブリが多く存在する混雑した軌道<sup>4)</sup>

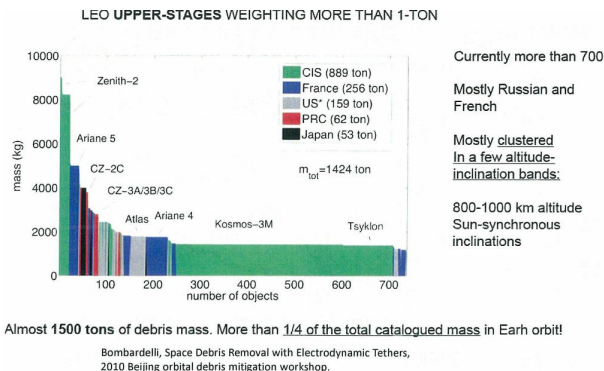


図 2 太陽同期軌道に存在するロケット上段数<sup>5)</sup>

### 3. ロケット上段部の調査

ロケットにデブリ除去デバイスを取り付けるには、以下の理由から衛星をロケットに固定する PAF (Payload Attach Fitting) などの I/F 構造が望ましい。

- ・ 衛星との I/F をとるため形状が公開されている。
- ・ 打ち上げ時の荷重パスとなる部分であり、強度・剛性が確保されている。
- ・ PAF の形状は一般に円錐形をしており、画像認識の対象として好適である。
- ・ また把持する対象としても、形状の特性を生かした把持方法を考案しやすい。

日本の H-II、H-II A を初め、Arian、Atlas、Delta 等各国のロケットの PAF 分離面形状を確認したが、直径の大きさにより概ね 3 タイプに分類されるが、中空の円錐台形状であることに変わらない。

この PAF にデブリ除去デバイスを取り付ける場合、円形状のフレーム部を対象とすれば、画像認識が容易であるが、以下の難点が判明した (図3参照)。

- (1) PAF のフレーム部周囲には、解放されたマルマンクランプバンド、バンドキャッチャー、分離機構、アンビリカル機構の台座などが密に配置されており、デバイスを取付可能なエリアは狭い範囲に限定され、またデバイス取付のためのアプローチ方向にも制限が多い。
- (2) 解放後のマルマンクランプバンド位置は一定でなく事前に PAF との相対位置が予測困難。
- (3) 分離時に衛星に相対速度を与えるためのプッシュロッドがフレーム面より突出することが多く、デバイスを取り付けることができるエリアに制限があり、またデバイスを接近時にプッシュロッドに干渉する恐れがある。

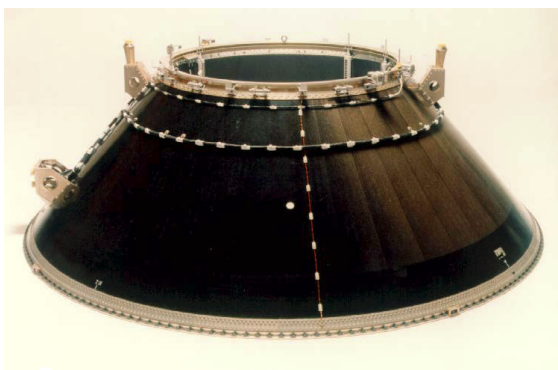


図3 アリアンロケット PAF1194V5 形状<sup>5)</sup>

### 4. 把持方式の検討

3章で調査したとおり、PAF のフレーム部付近をロボットハンド等で把持可能なエリアは限定され、特

にロケット上段が回転運動をしている場合には更に特定の把持可能エリアをオンボードで識別して追従・把持するのは難易度が高い。

そこで代替手段として、PAF のフレーム部の把持ではなく、PAF 内部の空間に取付機構を差し込んで固定する方法について検討を行った。

この方法のメリットとしては、以下が挙げられる。

- (1) PAF の開口部 (例えば 1m φ 程度) の中に取付機構を差し込むため、PAF 部の相対運動推定精度は、PAF 端面を固定する場合に比較して緩いもので済む可能性が高い。
- (2) 開口の内部には障害物が無く、PAF のフレーム把持の場合に必要な、図面データに基づくパターンマッチングによる把持位置抽出は不要。
- (3) 開口中心を狙えばよいため、プッシュロッド等の端面からの突出物が障害になりにくい。

PAF の内部で固定する方法について、トレードオフを実施したが、伸展バネを用いる方式は、機構が簡単で駆動デバイスも最小限で済み、また信頼性を確保できる見通しがあるため、この方式での検討を進めた。伸展バネを用いる把持装置の概要を、図4に示す。またデブリ除去デバイスと把持装置の搭載位置関係、及び PAF 部を固定した状態を図5に示す。

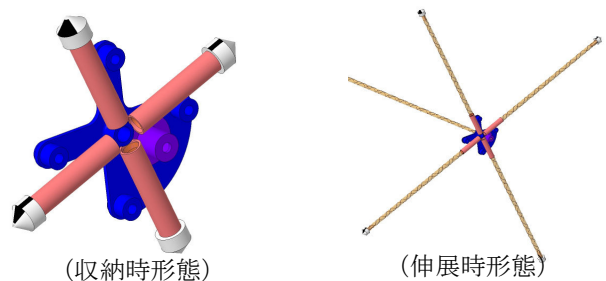


図4 伸展バネを用いる把持装置

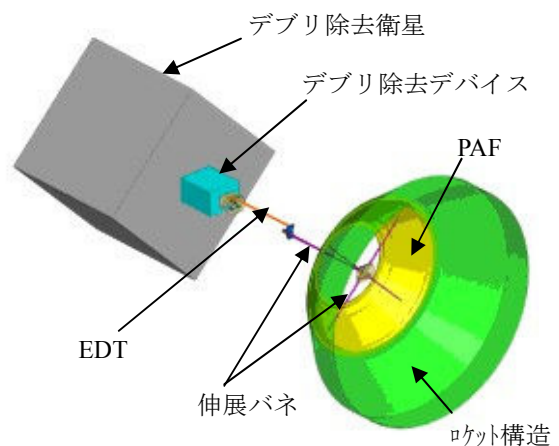


図5 デブリ把持装置の作動状態

ここで検討した把持システムは、1つのデブリ除去デバイスあたり1個搭載されることになるため、デブリ除去デバイスと一体化して衛星に搭載することが望ましい。

## 5. 伸展バネの試作

想定した伸展バネについて、想定する伸展量・バネ剛性を確保できるか確認するため、複数のバネを試作し特性確認を行った結果、所定の特性を得ることが可能な見通しを得た。また併せて伸展バネを収納状態で保持し、簡単な動作で伸展させ得ることを確認する目的で、伸展装置デバイスとしての試作も実施した。試作した伸展装置デバイスの例を図6に示す。良好な特性が得られている。



図6 伸展装置デバイス試作品

## 6. ダイナミクス解析

伸展バネを利用してPAF部にデブリ除去デバイスを固定する場合に、デブリ（ロケット2段側）とデブリ除去衛星間に発生する相対運動や、伸展バネ部に作用する荷重を評価する目的で機構解析ソフトウェア(DADS)によるダイナミクス解析を実施した。解析例を図7に示す。衛星に生じる加速度やデバイスへの負荷を抑えることができる見通しを得た。

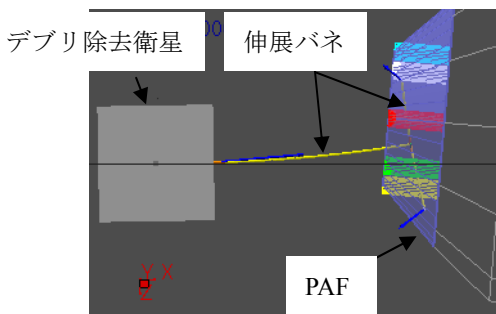


図7 ダイナミクス解析例

## 7. 画像センサの認識対象検討

デブリをカメラ等により光学捕捉するためには、想定される環境下において安定に検出できる特徴を有する部位を選定する必要がある。また把持システム

ムに対し、必要な精度で対象の位置・姿勢を出力することが重要となる。

捕獲対象となるデブリの候補であるロケット2段部においては、把持部位としてPAFが機構上妥当であることを4章で示した。このPAFは画像認識のための対象部位としても以下の点で適切である。

- ① 形状が円形とシンプルであり、高精度でロバストな認識が可能
- ② 直径が相当程度あるため、距離を隔てても安定した視認性が期待できる
- ③ 材質が安定しており、変形・変質の可能性が低く、反射特性も想定可能である
- ④ PAF内部が空間であり、明確なコントラストが得やすく、特徴抽出に適する

よって把持装置と同様にPAFを画像処理対象部位とするのが望ましい。図8に軌道上のH-IIA第2段の画像を示す。赤破線で示したPAFの内側部分を画像処理により抽出することを基本戦略とする。

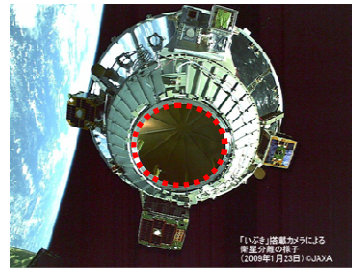


図8 ロケット2段部の軌道上画像

## 8. PAFへの接近シーケンス

ロケット2段部は軌道上で回転している可能性もあるため、PAFを対象にランデブするためには、デブリ除去衛星側がロケットの回転運動に合わせて回りこみ、相対位置を計測しながら接近することが必要である。接近シーケンスとイメージを図9に示す。

- (1) 遠距離域(200~300m)でターゲット同定
- (2) 中距離域(30m付近)へ移動
- (3) 近距離域(8m)へ移動
- (4) 把持域(1.5m)へ移動
- (5) 把持動作

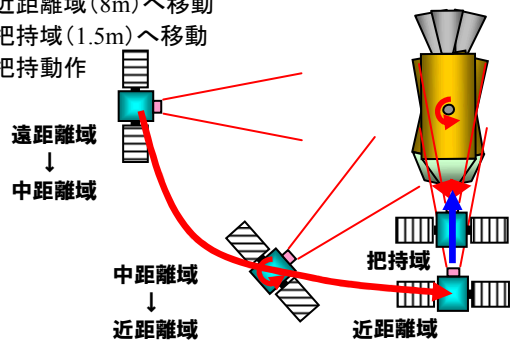


図9 ロケット2段部への接近シーケンス

## 9. センサシステム構成案

8章で示したシーケンスシナリオを実現するために必要な機器構成を検討した。

図10には、光学機器のレイアウト図を示す。近距離用の広角カメラと、遠距離・中距離用の望遠カメラの2系統から構成される。軌道上でデブリを捕獲するタイミングでは、必ずしも光学条件が望ましい状態にある場合とは限らないため、それぞれのレンジに対応した広がり角を持つLED照明を装備するのが望ましい。

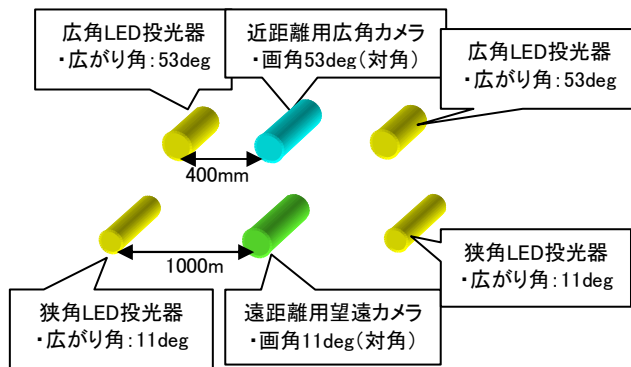


図10 光学機器のレイアウト (案)

## 10. 画像認識アルゴリズムの試作

中距離域で撮像される画像について、想定した照明装置やカメラFOVに基づいて、撮像されるロケット2段部の画像をCGで生成した(図11)。事前に教示した特長情報を用いてこの画像とのパターンマッチングを行えば、相対位置を検出することが可能となる。

また近距離域ではPAFを認識することになるため、作成したCGを用いてPAF部の特徴点抽出が想定どおり行えるかどうか、画像処理アルゴリズムを試作して確認したところ、十分に認識できることを確認できた(図12)。



図11 中距離域における撮像画像のCGイメージ

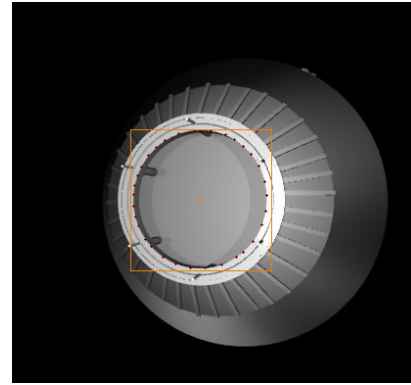


図12 近距離域でのPAF部認識結果

## 11. おわりに

今回は以下の検討結果について報告した。

### (1) 対象となるデブリの調査

ロケットの2段側をターゲットとし、PAF部を把持、画像処理の対象として選定した。

### (2) 把持装置の検討

PAFにデブリ除去デバイスを取り付けるための方法を検討し、簡易で確実な手法として伸展バネを用いる方式を提案した。またダイナミクス解析を行い、把持方式の成立性について見通しを得た。

### (3) 画像センサの検討

距離域に応じて撮像対象を選定し、画像処理を行うためのカメラ構成と照明を設定した。またCGを用いた画像処理アルゴリズムの確認を行い、十分に画像処理できることを確認した。

今後は今回提案した把持装置と画像センサの課題の抽出と解決策の検討を行うと共に、PAFを有しないロケット2段部や、人工衛星等の他のデブリの除去にも応用できるよう、更に検討を進めてゆきたい。

## 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.
- 4) 河本、木部、花田、デブリ除去衛星の必要性について、第55回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2011-4317.
- 4) J.-C. Liou, An active debris removal parametric study for LEO environment remediation, Advances in Space Research Volume 47, Issue 11, 1 June 2011, pp.1865-1876.
- 5) Ariane-5 User's Manual Issue 4 Revision 0