

## 3F11 デブリ除去衛星システムサイジング検討<その 2>

○廣田 賢治, 渡辺 順一郎(TECS), 桑尾 文博,  
大塚 聡子(NEC), 池内 正之(NTS), 河本聡美(JAXA)

The Space Debris Removal Satellite System Sizing Design#2.  
Kenji Hirota, Junichiro Watanabe(TECS), Fumihiro Kuwao,  
Akiko Otsuka(NEC), Masayuki Ikeuchi(NTS), Satomi Kawamoto(JAXA)

Key Words: Space Debris, EDT, Satellite System, Sizing Design

### Abstract

Space debris becomes a threat in the space. One of the measures against space debris is to capture and remove them by a satellite. In the system design, there are several issues, and we examined the countermeasure. We report the survey results about the demonstration system which is reflected to the satellite system.

### 1. デブリ除去衛星概要 および 開発ロードマップ

スペースデブリ(以降、デブリ)は軌道上の宇宙機、宇宙飛行士に対して危険をもたらすものである。宇宙にて活動を行う上で増え続けるデブリの影響はますます大きくなっている。このデブリを能動的に軌道上から取り除く除去衛星システムの検討を進めている。

デブリ除去衛星の開発ロードマップ(図 1)では、軌道上実証を行った後に、実用衛星を目指している。軌道上実証では要求事項を絞って定義し、シンプルかつミニマムな設計とし要素技術の確認も行う。実用衛星では、基本となる実証衛星で確認される技術にプラスして、求められる要求が広がる。そのため、常に実用衛星の要求を意識しながら、実証衛星の検討を行う必要がある。

ここでは、実証衛星に対してある程度道筋が見えてきたため、実証衛星のシステム設計結果を報告するとともに、実用衛星との比較を行い実用化に向けた課題を検討する。

### 2. デブリ除去 『実用』衛星 要求項目

デブリを除去するという目的に対して、継続してミッションを実施することができ、対象となるデブリの曖昧さ(様々な形状, 大きさ, 破損状態や軌道/高度の違い, 運動エネルギーの有無)に柔軟に対応できること。

#### 2.1. デブリ除去 衛星システム 要求

- (1)様々な種類のデブリを除去できること。
- (2)複数のデブリを除去できること。

衛星一機にて複数のデブリを除去、もしくは一度の打ち上げにて複数の衛星を打ち上げ、それぞれの衛星がデブリを一つ落とすなど、方法はいくつか考えられる。

- (3)自身がデブリとならないこと。

#### 2.2. デブリへの接近 要求

非協力であるデブリを捕捉し、接近できること。デブリの軌道にはロケットを用いて投入されるが、その後、軌道/高度を変えることにより、目的とするデブリへ接近できること。

#### 2.3. デブリへのアクセス, 近傍作業要求

デブリ除去手法によっては運動エネルギーを取り除くことができ、デブリ除去機器の設置ができること。

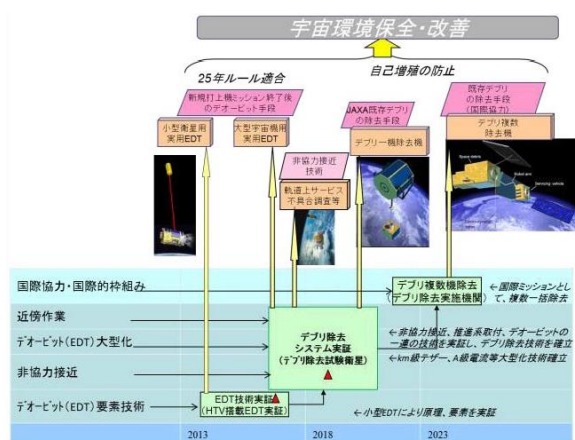


図 1 デブリ除去ロードマップ<sup>1)</sup>

## 2.4. デブリの除去 要求

デブリに対して何らかの軌道変更に必要な力を加えて、目的の場所まで移動させられること。

## 3. デブリ除去 『実証』衛星 要求項目

2項に示すデブリ除去実証衛星への要求を、同時にすべて満たすことは難しい。また要素技術の確認も必要であるため、まずは実証衛星を用いてデブリ除去の検証を行うことが検討されている。

実証衛星では対象となるデブリをロケット上段として、要求を絞って明確かつシンプルに定義する。

以下項目に実証衛星の要求を示す。

### 3.1. デブリ除去 衛星システム 要求

(1)実証衛星のミッション機器構成を以下に示す。

これら 3 つの構成機器を用いて、デブリの除去を実現する。

①非協力接近実証機器	3.2.項/4.2 項
②推進系取り付け実証機器	3.3.項/4.3 項
③導電性テザー実証機器	3.4.項/4.4 項

(2)対象デブリ：非協力対象のロケット上段とする。

これにより、デブリが破損しておらず、形状が事前に明確となる。

(3)ロケット上段は重力傾斜安定していること。

(4)ロケット上段に対して相対停止可能なこと。

(5)デブリ実証衛星一機にてデブリ単体をデオービットできること。

### 3.2. デブリへの接近 要求／非協力接近実証機器

カメラ画像を用いて、デブリを視認し接近できること。

(1)ロケット上段の運動推定が可能なこと。

(2)画像処理可能なこと。

### 3.3. デブリへのアクセス、近傍作業 要求／推進系取り付け実証機器

ロケット上段へデブリ除去機器を取り付けられること。

### 3.4. デブリの除去 要求／導電性テザー実証機器<sup>2)</sup>

デブリ除去に用いる機器は、導電性テザー(以後、EDT: Electro Dynamic Tether と呼ぶ)を考えている。この導電性テザーを用いて、デブリをデオービットできること。

(1)長さ：5km

(2)電流：1A

(3)EDT 伸展方向/電流の向き：天頂 → 地球

## 4. デブリ除去 『実証』衛星 システム設計結果

### 4.1. 実証衛星 システム設計結果<sup>3)4)</sup>

3項に示す要求を満たす、表1に実証衛星の構成品および質量を示す。図2,3に外観図および寸法を示す。

表1 実証衛星 構成品および質量

デブリ除去衛星 システム機器構成	略号	デブリ除去衛星 質量[kg]
		合計
バスシステム		280.89
衛星マネージメント系	SMS	15.43
通信系	TTC	4.87
太陽電池パドル系	SPS	35.00
電源系	EPS	40.38
姿勢軌道制御系	AOCS	54.21
推進系	RCS	25.30
熱制御系	TCS	9.50
構体系	STR	51.30
計装系	INT	24.90
マージン		20.00
ミッション		115.2
EDT-M	EDT-E	11.50
EDT-E	EDT-M	15.50
ミッションコントロール系・画像処理系		41.80
推進系取付機器		8.00
マージン		38.40
衛星合計(ドライ質量)		396.1
推進		45.0
衛星合計		441.1

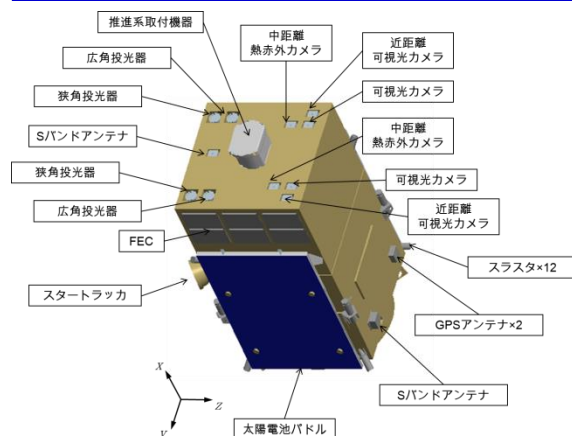


図2 デブリ除去実証衛星 外観図(打ち上げ状態)

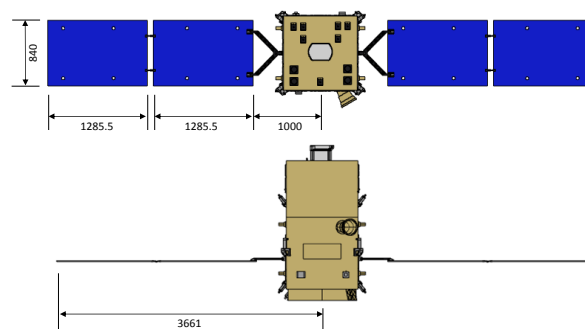
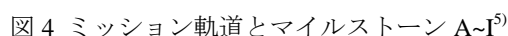


図3 デブリ除去実証衛星 寸法  
(太陽電池パドル展開状態)

(1)光学航法を用いたデブリへの接近手法の検討結果  
実証衛星を実現させるためには、デブリに対して接近を行うミッション軌道を求め、接近からデオービットまでのシナリオを成立させなければならない。デブリは非協力な対象であるため、衛星側に用意されたカメラを用いて光学航法を行う。ミッション軌道は△V プロファイルの検討を行い、衛星の軌道を求めたものである。図 4 にミッション軌道とマイルストーンを示す。



デブリの30m後方(30m手前まではV-bar接近を想定)に到着後の、以下に示す近傍作業についての検討結果を示す。また、(1)のミッション軌道为目标として、ハヤブサの姿勢制御(6自由度制御)をコンセプトにしたシミュレーションを実施し、必要な精度\*で誘導制御が行える事を確認した。

図5に近傍作業概要を示す

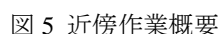
[illegible]

図 6 誘導制御目標

図7にデブリ中心RTN座標形での除去衛星位置履歴を示す。

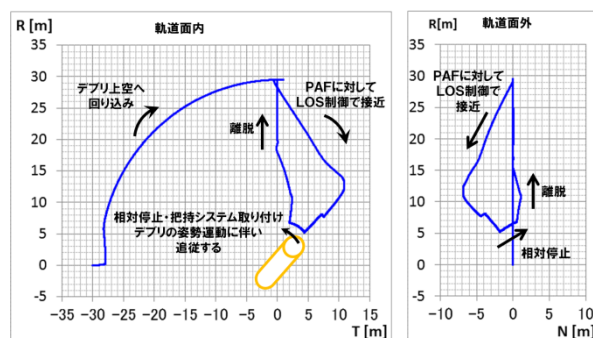


図7 デブリ中心 RTN 座標形での除去衛星位置履歴

図8に目標値と現在値の差分を示す。PAFに対して相対停止している期間は、10cm以内の相対位置精度を維持出来ている事が分かる。

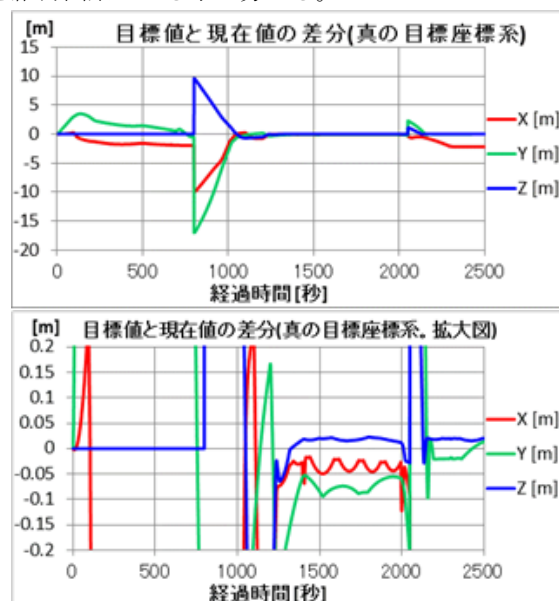


図 8 相対位置の目標値と現在値の差分  
(下図は拡大図)

図9に相対姿勢角を示す。PAFに対して相対停止する期間は、PAFに対しておおよそ2~3°以内での姿勢制御が行えている。

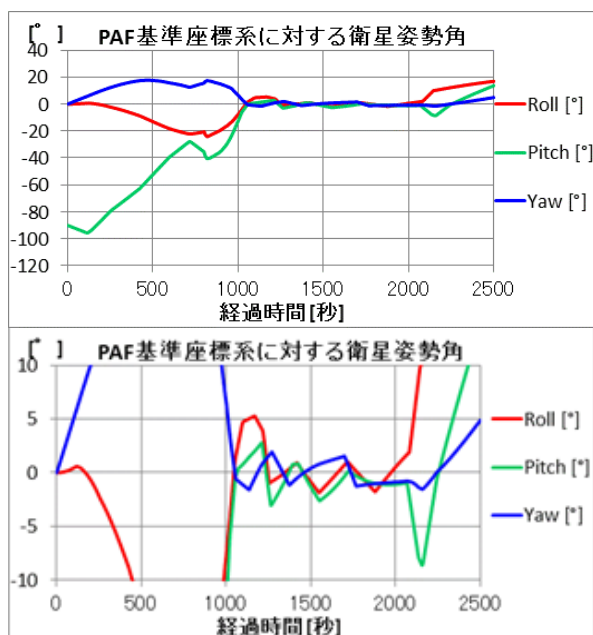


図9 PAF基準座標系に対する相対姿勢角  
(下図は拡大図)

#### 4.3. 推進系取り付け実証機器 検討結果

##### (1)推進系取り付け実証機器 トレードオフ

以下に示す3つの推進系取り付け実証機器について、トレードオフを行った。

##### ①鉋方式

5m~20m先にあるロケット上段に対して鉋を打ち込み、EDTを取り付ける方式。

##### ②伸展ブーム方式

1.5m先にあるロケット上段 PAF 部を、伸展ブームにより把持して EDT を取り付ける方式。

##### ③多関節アーム方式(リトライ可能な方式)

1.5m先にあるロケット上段 PAF 部を、アームにより把持して衛星を固定する方式。

結果、表2に示すトレードオフ結果理由により、

##### ②伸展ブーム方式に優位性が見られた。

表2 推進系取り付け実証機器 トレードオフ結果

トレードオフ 代表項目	①鉋	②伸展ブーム	③多関節アーム
把持動作に伴うリスク ・デブリ、衛星本体の破壊リスク ・新規デブリの発生リスク	鉋がデブリへ刺さった際に、デブリが破壊する恐れがある。	PAF部への接触のみであり、リスクは小さい。	PAF部への接触のみであり、リスクは小さい。
形状、取付1/Fの明確さ	鉋射出時の反動が大きく、今後取り付け方法に軽減策が必要となる。	明確である。	明確である。
把持 開始/完了時 成否判定の容易さ	把持開始判定条件が厳しく、完了後の成否判定が難しい。	把持開始/完了の成否判定が明確である。	把持開始判定条件が明確でない。把持完了後の成否判定は明確である。
既存技術で開発可能かつ開発リスクの少なさ	地上では試験が実施できない。	既存技術で対応可能。	既存技術で対応可能。

##### (2)デブリへの推進系取付および衛星への設置方法

図10に伸展ブームによる推進系取付方法を示す。

伸展ブーム先端をロケット上段 PAF 部に侵入させたのちに、先端の展開装置を駆動させて伸展ブームを取り付ける。

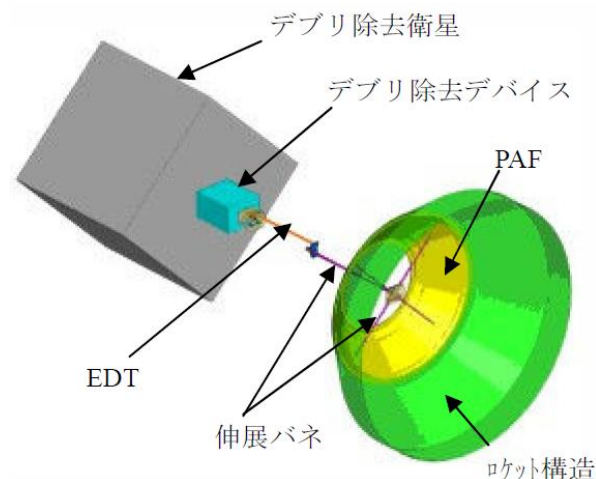


図10 伸展ブーム PAF 部取り付け方法 概略図<sup>6)</sup>

図11に伸展ブームの衛星への搭載方法およびテザーの伸展方法を示す。図10に示すように伸展ブームを PAF 部に取り付けた後、衛星が後退しテザーを伸展させる。

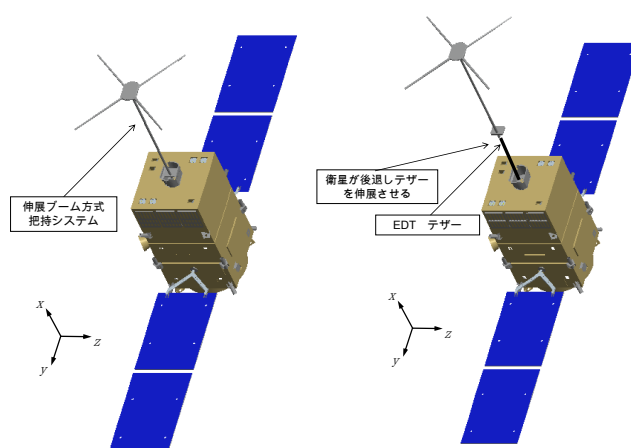


図11 伸展ブーム方式の衛星への設置方法

#### 4.4. 導電性テザー(EDT)実証機器 検討結果<sup>2)</sup>

実証衛星では、EDTをデブリに取り付けた後に、衛星が後退することによりテザーを伸展させる。そのため、衛星やデブリに対して、余分な回転や振動を与えないために、テザーは衛星重心を通る位置に設置することとした。また、カメラ画像により伸展状態を確認できるように、非協力接近に使用する



カメラを搭載している、衛星+X面に配置することとした。

EDTシステムは電界放出型電子源(以後、FECと呼ぶ)から電子を放出し、テザーから電子を取り入れることにより電流がテザーに流れて機能する。このFECは広い面にあることが望ましいが、FECから放出した電子をテザーで取り込んでしまわないように、衛星の進行方向とはならない、±Y面に配置することとした。

#### 4.5. 実証衛星 システムの課題と対策

実証衛星の要求から衛星システムおよびミッション軌道まで設計したことにより、課題が見えてきた。そのうち代表的な課題について以下に示す。

##### (1)課題：デブリによるSバンド視野妨害

実証衛星はSバンドアンテナ(SANT)を通して、地上局との通信を行う。従って、衛星の+X及び+Z面が地球を指向しているミッション軌道のマイルストーンにおいて、SANTの視野が確保されなければならない。

図12は、マイルストーン(F~I)において、衛星に対して地上局が位置する方向を示す。マイルストーンG点以前は、衛星+Z面が地球方向を向いており、+Z軸を基準に半頂角65°程度の範囲内に地上局が位置する。一方でFly Around(G点)以後は、+X面が地球方向となり、+X軸から半頂角65°程度の範囲内に地上局が位置する。このとき近接するデブリによって衛星の視野が妨害される可能性がある。

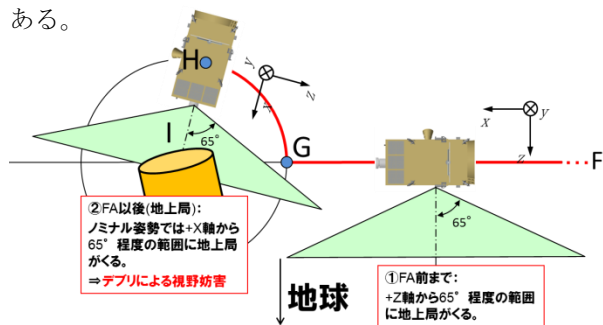


図12 ミッション軌道のマイルストーン(F~I)における地上局方向の変化

##### (2)対策案：SANTの配置および運用の見直し

デブリによるSANTの視野妨害に対して、以下に示す①～③の対策を検討している。

①SANTを2基搭載し、中継衛星を使わない。

Fly Aroundにより衛星姿勢が変化することを

考慮して、実証衛星+X、+Zの2面にSANTを1基ずつ配置する。デブリ極近傍領域では視野妨害を許容して、自律運用を行うこととする。

②SANTを2基搭載し、一部期間に中継衛星を使う。

①案と衛星コンフィギュレーションは同じだが、デブリ極近傍領域にて中継衛星を使用するために、衛星姿勢を変更する。中継衛星を介して運用状況をモニタし、必要に応じてマニュアル運用を行う。図13に姿勢変更による中継衛星の捕捉方法を示す。

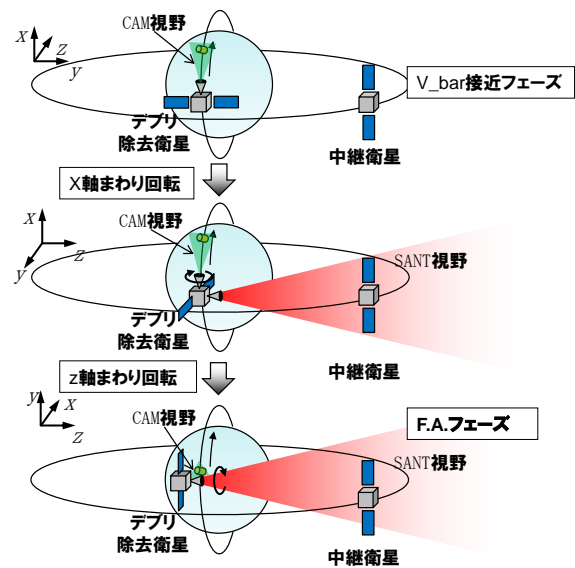


図13 姿勢変更(ロール回転)による中継衛星の捕捉

③SANTを4基搭載し、常時中継衛星を使う。

SANTを4基配置し、常に中継衛星と通信がとれるようにする。①②に比べ、安定した可視が期待できる。ターゲット極近傍領域における運用はオンボードによる自律運用を基本とするが、運用状態を地上でモニタし必要に応じてマニュアル運用を行う。

##### (3)対策案の評価

対策案①～③の評価結果を表3に示す。

コストを低く抑えることができること、非可視中の自律運用は不可能でないこと(はやぶさの実績を想定)を考慮して、案①を第一案とする。

表 3 SANT 視野妨害に対する対策案 評価結果

番号	衛星コンフィ ギュレーション SANT配置 位置	中 継 衛 星 の 利 用 重 量	可視性	運用	コスト	実証・運用
①	+X面と +Z面 (2つ)	-	・可視機会は限 定される。 ・デブリ極近傍ま で接近した際、デ ブリによって遮蔽 される可能性有 り。	・オンボードによ る自律運用が基 本。	-	・実用向け ・低コストで実現 可。
②	+X面と +Z面 (2つ)	-	・地上局から非 可視のとき、一時 的に姿勢変更を 行い、中継衛星 を利用して通信 を行う。	・オンボードによ る自律運用が基 本。 ・運用状態を地 上でモニタし、必 要に応じてマニ ュアル運用を行う。	・中継衛星の利 用によるコスト増	・実証向け ・確実性を重視
③	各面に3～ 4つ配置。 ほぼ全方 向のSANT 視野を確 保	+5 kg あり	・地上局から非 可視のとき、中継 衛星を利用して、 継続的な通信を 行う。	・アンテナ・トラポ ン・スイッチ等の 追加によるコスト 増 ・中継衛星の利 用によるコスト増		

①～③は同等の  
自律性を持つと  
する。

①を基準

具体的な運用方法を設計して、深く検討を進めることにより、今回 SANT 視野妨害といった新たな課題を見つけることができた。今後さらに検討を進めて、実証衛星の運用シナリオの成立性を高めなければならない。

## 5. デブリ除去 『実用』衛星 に向けた課題

実証衛星に向けた検討では、要求を絞って明確かつシンプルにし、実現性の確立を目指して検討を行ってきた。今後は新たに見つかった課題に対する処置方法の検討を進めつつ、運用の幅、応用性を広げることにより、実用化に耐えうるデブリ除去衛星を目指していくことが重要である。

よって、2 項に挙げた実用衛星に求められる要求と、3 項の実証衛星の要求を比較し、実証衛星のコンセプトの延長線だけでは難しいと考える、実用衛星に向けた課題をここで整理する。

### 5.1. デブリ除去 衛星システム 要求

今後、実用衛星を目指す際に、検討が必要だと考えられる要求項目を以下に示す。

- (1)実証衛星は低・中軌道を対象としているため、実用衛星では中・高軌道(静止軌道含む)からのデブリの除去も可能であること。
- (2)軌道傾斜角を限定せず、 $i < 90^\circ$  ,  $i > 90^\circ$  どちらの軌道からも、デブリの除去が可能であること。
- (3)対象となるデブリの形状を問わない、除去が可能であること。
- (4)運動エネルギーを持ったデブリの除去が可能であること。
- (5)複数デブリの除去が可能であること。

(6)通信遮断時間や遅れを考慮した、自律化、自動化が可能であること。(オフノミナル判断および対処も含む)

## 6. おわりに

実証衛星に向けた検討を進めてきたことにより、具体的な課題が挙がり、シナリオの実現性も見えてきた。しかし、現状のデブリ除去手法のみでは、様々な環境条件にあるデブリすべてに対応することが難しいことが分かっている。

これら多数のデブリに対応する実用化を考えると、一つの衛星システムですべてに対応する手法、ある程度カテゴライズされたデブリの置かれている環境毎に対応する、バリエーションを持った衛星を用意する手法、といった様々な方法が考えられる。このように基本的な方針だけでも、検討の余地は多分に残っている。

最初の実証衛星にむけた検討を推し進めるが、常に実用化に向けた目をもって、デブリ除去衛星のシステム検討を進めて行く必要がある。

## 参考文献

- 1) 平子敬一, 松本晴久, 柳沢俊史, 河本聡美, 他 : JAXA 研究開発本部のデブリに関わる研究, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 10I13, 2013.
- 2) 壹岐賢太郎, 河本聡美, 他 : 導電性テザーシステムのサイジングおよび数値シミュレーションによるデブリ除去衛星設計要求の検討, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2C01, 2012.
- 3) 桑尾文博, 大塚聡子, 河本聡美, 廣田賢治, 他 : デブリ除去システム, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 1C17, 2012.
- 4) 廣田賢治, 桑尾文博, 大塚聡子, 河本聡美, 他 : デブリ除去衛星システムサイジング検討, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2E05, 2013.
- 5) 山元透, 村上尚美, 中島悠, 山中浩二 : 軌道上デブリへの接近ストラテジ, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2E07, 2013.
- 6) 久保田伸幸, 榎本雅幸, 河本聡美, 仁田工美, 中西洋喜 : デブリ捕獲用把持システムの概念検討, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 1C16, 2012.