

# 三次元自己展開トラスを用いたデブリ捕獲シナリオ

## Debris Capture Scenario using 3D Self-Deployable Truss

指導教授 奥山 圭一

M9028 松浦 颯  
Hayate Matsuura

In recent years, space debris around the Earth threatens the spacecraft, which is one of the worrisome issues in the world. It is feared that the risk of collisions between debris and spacecrafts will be increasing more and more if these space debris are left as they are. Therefore, various kinds of Active Debris Removal (ADR) methods have been proposed to repair the orbital environment. In this study, Debris Capture Device (DCD) and an ADR scenario using the device are proposed. In numerical simulation of contact motion during the capture, the influence on the proposed DCD is clarified by estimating the stress of the structural member. Furthermore, the ground experiments show that the concept model of the proposed DCD deploys appropriately at 2<sup>nd</sup> deployment. Thus, the proposed scenario is shown to be valid for the motion of DCD from the 1<sup>st</sup> deployment to the collision with target debris and for the 2<sup>nd</sup> deployment to achieve the completion of debris capture.

### 1. 序論

#### 1.1. スペースデブリ(宇宙ゴミ)

近年、地球周回軌道上にスペースデブリ (Figure. 1) と称される人工物の一部が放置される軌道環境汚染が問題視される<sup>[1]</sup>。デブリは宇宙に放置され続けると、他のデブリや人工衛星と連鎖的に衝突し、自己増殖状態に陥る (いわゆる Kessler syndrome) 可能性があり、対策の必要に迫られている<sup>[2]</sup>。



Figure. 1 Space debris modeling by ESA

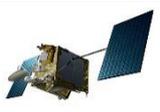
#### 1.2. 商業的軌道利用の増加

近年の宇宙開発の発展に伴い、低軌道の更なる利用が考えられている。しかし、その中の1つである衛星コンステレーション、特に、膨大な数の人工衛星によるメガコンステレーションは、インターネットサービスといった商用通信や農業、科学などの様々な商業目的で考えられており、一度の打上で大量に軌道投入することが可能な小型衛星の商業的価値が高まっている<sup>[3]</sup>。しかし、これが実現すると、軌道上デブリ数に大きな影響を及ぼすことが懸念されている<sup>[4]</sup>。

#### 1.3. 除去が必要なデブリ

このような状況から、デブリとなった人工衛星は除去し、軌道環境を常に修復し続けるべきとする意見が強まっている。実際、Table 1 に掲げたようなコンステレーション衛星は自力で軌道離脱するか、捕獲して除去する必要があると考えられる。

Table 1 Examples of target satellite will be debris

衛星外観			
軌道/高度	LEO/1000-1248km	LEO/1200km	LEO/550km
質量	168kg	130kg	227kg
予定機体数	300機	648-19880機	12000機
名称	(a) LEO Vantage 1 (Telesat)	(b) Oneweb	(c) Starlink (SpaceX)

#### 1.4. デブリ除去装置に対する要求

軌道環境を修復するため、現在、世界的に能動的デブリ除去(Active Debris Removal, ADR)が検討されているが、それぞれ

に長所・短所があり、未だ ADR 方法として確立されていない<sup>[5]</sup>。実際、既に軌道上に存在するデブリを除去する技術・装置 (Debris Capture Device, DCD) は、以下の点を満たす必要があると考えられる。

- ① 非協力物体のデブリに対応できる方式を取ること。
- ② ADR を行うもの自体がデブリ化しにくいこと。

上記の項目を構造の点から考えると、次のように言える。

- ① デブリの形状・サイズに合わせた構造や捕獲方式を取ることが出来ること。
- ② 一連の ADR シーケンス中で、ADR 機器が破損・欠損しにくい強度や方式を取ること。

#### 1.5. 網を用いたデブリ捕獲

前項に示した要求を満たすであろうと考えられているデブリ除去装置の一つに、投げ網を用いてデブリを捕獲するものがある。この方法の一般的な特徴を Table 2 に示す。

Table 2 Overview of Net Capturing

No.	Advantage	Disadvantage
1	Large capturing distance is allowable.	It is hard to control the motion of the net.
2	Requirements on precision are relatively lax.	There is a risk of critical oscillations.
3	The system is compatible with various size of debris.	It is hard to test on ground.

#### 1.6. 網型 DCD への自己展開構造の利用

前項で掲げた網型デブリ捕獲装置の欠点、特に、捕獲時の網の予期せぬ挙動を避けるためには、支持構造等を用いて網の運動を拘束することが考えられる。ただし、その支持構造は、衛星打ち上げ時の包絡域内に収納でき、かつ、軌道上でのデブリ捕獲時には大きく拡がる必要がある。このような要求を満たす支持構造として、自己展開構造を用いることが考えられる。

##### 1.6.1. 自己展開構造

一般に、ペイロード重量・容積というロケット打上時の制約から、網の支持構造は軽量かつ展開性・高収納性を有したものが好ましい。自己展開構造は、打上時に収納状態であることで、より小さい体積で輸送できるだけでなく、展開にアクチュエータが不要である展開様式の簡素さや、収納された部材が展開後にある程度の剛性を保つ構造であり<sup>[6]</sup>、支持構造に適しているといえる。

##### 1.6.2. 三次元自己展開トラス構造

三次元自己展開トラス構造 (Figure. 2) は、自己伸展部材をトラス部材とする、一度の展開で立体的に拡がる自己展開構

造である。他の自己展開構造に比べ、高い空間的収納効率をもつことが優れると考えられる<sup>[7],[8]</sup>。

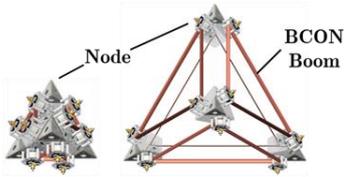


Figure 2 3D self-deployable truss

### 1.7. 三次元自己展開トラスを用いたデブリ除去装置

以上の背景から、筆者らは Figure. 3 のような、三次元自己展開トラスを支持構造とする網型 DCD を検討している。

また、Figure. 4 のように DCD を用いた ADR シナリオを考えている。まず、打ち上げ軌道から対象デブリの存在する軌道まで遷移し、対象に近付いたら対象の状態を観察し適切な条件下でランデヴーする。DCD 開口部を対象に向けつつ、適切な相対速度・加速度で対象を取り込む。対象全体の取り込み確認後、開口部を閉める。対象とチェイサー衛星の振舞いが安定したことを確認後、デオービット操作を行う。

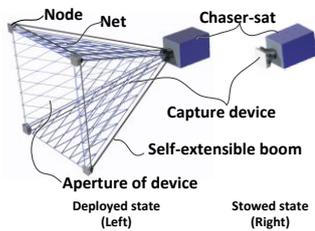


Figure 3 Debris Capture Device using 3D Self-Deployable Truss

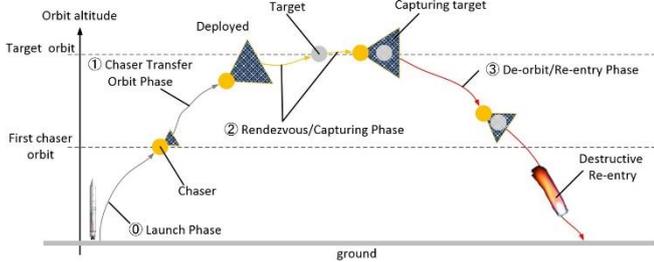


Figure 4 ADR scenario using Debris Capture Device

### 1.8. 研究目的

本研究は、前項で示した、三次元自己展開トラスを用いた網型デブリ捕獲装置による ADR シナリオの中で、特に、捕獲時のシナリオを示し、その妥当性を評価することを目的とする。本稿では、数値シミュレーションと地上実験により、デブリ捕獲装置の一次展開から対象デブリとの衝突時の運動、捕獲完了を実現する二次展開、の二点について、シナリオの妥当性を確認する。

## 2. 三次元自己展開トラスを用いたデブリ除去装置

### 2.1. 捕獲対象のデブリ

本研究では、ADR 対象として LEO Vantage 1 (Telesat) (Table 1 (a)) を検討している。これは、この衛星がコンステレーション構想に用いられるため、今後軌道上に多く存在する非協力物体に成り得ると予想できると、混雑軌道の LEO 上に存在することが挙げられる。

### 2.2. デブリ除去装置の特徴

DCD の部材の 1 つである網の利点は、軽量かつ収納のしやすい点、対象デブリの動きに対して柔軟に変形できる点、膜とは違ってせん断が加わり裂かれても、網の結び目の間で取りやすい点が利点であると考えられる。現在、網の材料として

Technora® を検討している。

Figure. 2 の DCD の特徴としては、前述の構造としての利点の他に、近接距離での捕獲を行うため、対象デブリの状態を捕獲直前まで判断できること、それにより無理な捕獲を行うことを避けることが出来る点、すなわち、対象の運動状態が DCD にとって好ましい状態（回転運動が穏やかな場合、鋭利な部分が無いなど）を確認して捕獲できる点、軽量性・収納効率の良さにより、一回の打ち上げでのロケット搭載可能な数が多い点、などが考えられる。

## 3. 捕獲シナリオの検討

### 3.1. 捕獲シナリオの特徴

ADR シナリオ (Figure. 4) において、捕獲時の衝突・接触運動はランデヴー・捕獲フェーズに当たる。本研究では、このフェーズを捕獲シナリオと呼ぶ。この捕獲シナリオでは、対象とのランデヴーから DCD への取り込み、対象を捕獲までの一連を以下のように分けて考える。

- ① 一次展開フェーズ
- ② 対象デブリ取り込みフェーズ
- ③ 二次展開フェーズ
- ④ 捕獲完了判断フェーズ

これを図示すると Figure. 5 のようになる。本稿では①～③までの実現可能性が高いことを検証する。

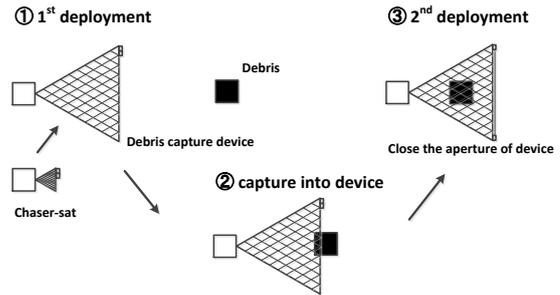


Figure 5 Debris capture scenario by DCD

### 3.2. 捕獲可能なデブリへの制約

DCD がもつ対象デブリへの制約条件は Table 3 のように考えられる。

Table 3 Constraints on target debris by DCD

サイズ	捕獲装置サイズの限界はロケットペイロードの要求に依存する。
パドルの有無	網を破断しやすいため、パドルが無い宇宙機が好ましい。
運動状態	デブリの回転運動は穏やかなものが好ましい。
個数	開口部の展開をすると、それ以上は捕獲に使用できない。

## 4. 捕獲シミュレーション

捕獲シナリオ(3.1 節)より、衝突・接触運動を理解することで捕獲装置の設計に寄与するため、捕獲装置の対象デブリにランデヴー後、接触運動に関する数値解析を行った。

### 4.1. 理論

#### 4.1.1. キャプチャ衛星(質点)とデブリ(剛体)に関する接触モデル

簡単のため、対象デブリ(LEO Vantage 1 (Telesat))の形状を剛体の直方体とする。なお、接触については網の節点でのみ考えるが、網自体はケーブル要素で考える。解析では Table 4 のように定義する。

Table 4 Nomenclature

$\mathbf{x}_1$	デブリ(剛体)の位置ベクトル $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_d$
$\mathbf{x}_3$	キャプチャー(質点)の位置ベクトル $\mathbf{x}_3 = \mathbf{x}$
$\mathbf{R}$	絶対座標系での姿勢マトリクス
$\mathbf{R}_d$	物体座標系での姿勢マトリクス
$a$	デブリ(剛体)の一辺の長さの半値
$\mathbf{S}$	デブリ(剛体)の回転増分マトリクス
$k$	質点がデブリ(剛体)に衝突した時のばね定数
$\mathbf{F}$	接触力
$\square$	離散化された値
$\square_1$	物体座標系における $x$ 軸に関して
$\square_2$	物体座標系における $y$ 軸に関して
$\square_3$	物体座標系における $z$ 軸に関して
$\square_d$	対象デブリに関して
$\square_i$	範囲 $1 \leq i \leq 3$ における定数
$\square_0$	初期状態に関して
$\square_m$	節点 $m$ に関して

また、剛体と質点の位置関係を Figure. 6 に示す。

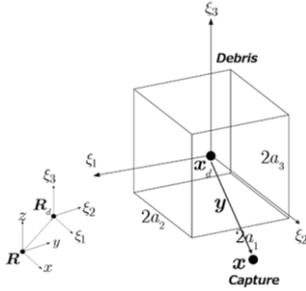


Figure. 6 Simple model for contact section

このとき、物体座標系(Debris)から見た質点(Capture)の位置ベクトル  $\mathbf{y}$  は、

$$\mathbf{y} = \mathbf{R}^T (\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1) = \mathbf{R}_0^T \mathbf{S} (\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。次に、質点が剛体の面に接触し、剛体内部の領域に入り込もうとするとき、接触面への質点の侵入距離に対して、ペナルティ・ポテンシャル  $V$  を設定する。

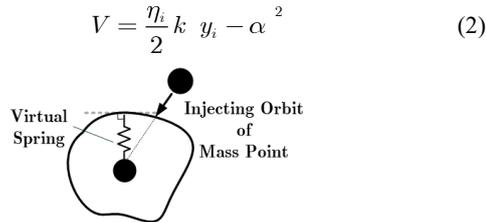


Figure. 7 The virtual spring that works when the mass point touches the rigid body

ただし、 $\alpha$  は次式で表される。

$$\alpha = \begin{cases} -a_i & \text{if rear surface: } -i \\ +a_i & \text{otherwise surface: } +i \end{cases} \quad (3)$$

ただし、式(3)での  $i$  は、接触面の表裏の判定フラグとする。

運動解析には、EMM(Energy Momentum Method)を用いる。

#### 4.1.2. キャプチャ衛星(ケーブル&トラス&剛体)とデブリ(剛体)に関する接触モデル

対象デブリは剛体として、DCD を用いたチェイサー衛星(Chaser-sat)は Figure. 8 のように自己展開ブームをトラス要素、ノード部分を質点要素として数値モデル化した。

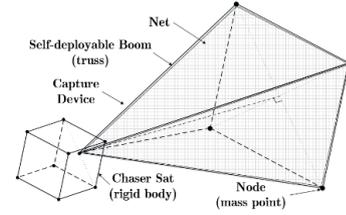


Figure. 8 DCD-3DSDT contact analysis model

なお、網の形状のモデル化において、節点の総数  $N_{num}$  は、

$$N_{num} = \sum_{\lambda=0}^S V_n \lambda + 1 \quad (4)$$

ただし、 $V$  は、DCD における正四角錐の頂点の数を表す。

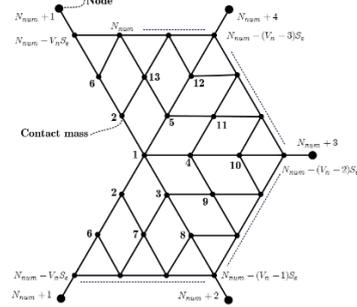


Figure. 9 Node & point mass of net model

このとき、網の段数を  $S_e$ 、網の長さを  $\ell_1, \ell_2$  とする。

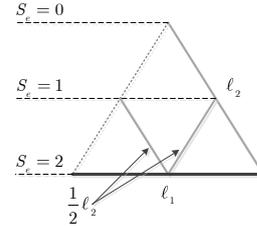


Figure. 10 The stage  $S_e$  and the length  $\ell_1, \ell_2$  of net

#### 4.2. 接触運動の数値モデル化に関する条件

数値モデル化にて設定した条件を Table 5, Table 6 に示す。

Table 5 Properties of DCD

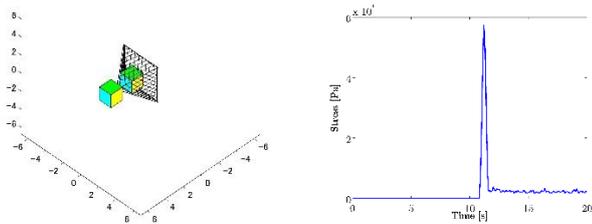
ブーム	全体質量	3.9817 kg
	密度	$7.98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	ヤング率	208GPa
	長さ	3.85m
網	全体質量	$6.71 \times 10^{-1} \text{ kg}$
	密度	$1.39 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	線径 $\phi$	1.00 mm
	引張強度	3.2~3.5GPa
	ヤング率	65-85GPa
	長さ $\ell_1, \ell_2$	3.6575m, 3.6575m
	質点の質量	0.1g/point mass
解析	衝突時のバネ定数	$10^6$
	相対速度	0.2 m/s
	初期時間刻み幅 $\Delta t$	$10^{-3}$

Table 6 Properties of debris & chaser-sat

	Telsat(Target debris)	Chaser-sat
Mass [ kg ]	168	168
Size ( $2a_1 \times 2a_2 \times 2a_3$ ) [ m ]	$0.65 \times 0.65 \times 0.72$	$0.65 \times 0.65 \times 0.72$

#### 4.3. 数値解析結果及び考察

4.2 節の条件での接触運動の様子の一例と網に働く応力の時間変化を Figure. 11 に示す。



A) Ex. of contact at 10sec. B) cable radius  $\phi=1\text{mm}$   
Figure. 11 Ex. of contact motion & time variation of stress [Pa]

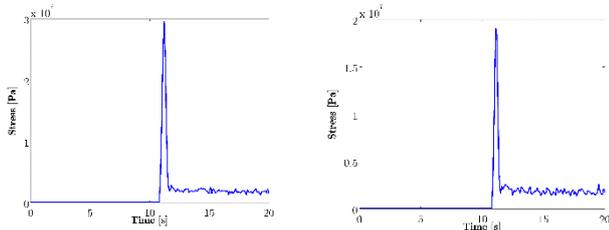
ここで、網のヤング率と引張強度の安全側(Table 5)をそれぞれ用いて、接触運動における網の安全余裕を求める。降伏安全係数は1.1、終極安全係数は1.5とする<sup>[9]</sup>。また、DCDの網とデブリの衝突を考慮して、衝撃荷重の安全率を2とすると、求める安全余裕は、

$$\begin{aligned} & \text{降伏に対する安全余裕} \\ &= \frac{\text{材料の降伏応力}}{\text{降伏荷重作用時の応力}} - 1 = 491 > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{破壊に対する安全余裕} \\ &= \frac{\text{材料の破壊応力}}{\text{終極荷重時の応力}} - 1 = 16.8 > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

となる。よって、一連の接触運動において、部材である網は安全余裕・許容応力を満たしている事が分かり、網が切れなかったことが確認できた。

また、網の線径は、網の強度や網の収納効率、ペイロード重量に寄与するパラメータと考えるため、次に網の線径を変化させた場合を考える。



A) cable radius  $\phi=2\text{mm}$  B) cable radius  $\phi=3\text{mm}$   
Figure. 12 Time variation of stress [Pa]

Figure. 11, Figure. 12 より、線径 1.0, 2.0, 3.0[mm]での網に生じる最大応力はおおよそ 60, 30, 20[MPa]である。ここで、各線径を長さ 1[m]の紐とした場合の単位質量当たりの網に生じる最大応力は、55, 6.87, 2.04[GPa/kg]となった。よって、同じ条件下では、線径が太いほど網に生じる応力の大きさは小さく、単位質量当たりでは線径の大きさが生じる応力に大きく影響することが分かった。よって、許容応力を超えないように、出来る限り太い線径が好ましいと考えられる。しかし、線径が細いほど網の総体積及び総重量も軽くなるため、ペイロード要求においては線径が細い方が好ましいと考えられる。DCDとして小型のデブリを狙って捕獲する場合、一つの打上で軌道に捕獲装置をなるべく多く打ち上げるほどデブリ低減に繋がるため、DCDの強度が保証されるならば、なるべく線径の小さい網を選ぶべきだと考える。

## 5. 地上実験による捕獲シナリオの検証

### 5.1. 実験概要

DCD設計において、捕獲シナリオの妥当性を評価するため、重力環境下において実験的に確認することを目的としている。

3.1節①～③の捕獲シナリオは次のような流れになる。

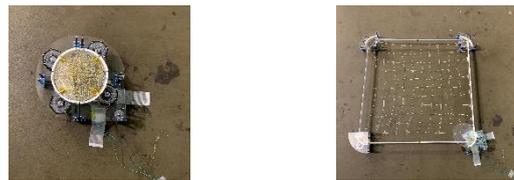
- ① DCDの側面部の展開機構を展開。

- ② 対象デブリを捕捉し、その距離から捕獲判断。
- ③ DCDの開口部の展開機構を展開(開口部の閉鎖)。

本稿では、③の機能を検証する、すなわち、二次展開フェーズの展開機能を確認する。よって、対象デブリの捕獲完了を実現する二次展開フェーズでの展開機能をDCDが有することを示し、捕獲シナリオの妥当性を評価する。

## 5.2. 実験結果及び考察

実験結果をFigure. 13に示す。Figure. 13より、DCDの二次展開フェーズが、重力環境下において展開したことが確認できた。無重力環境下においては、地上実験のような重力による底面との摩擦の影響はないので展開機能が保証できると言える。よって、DCDが二次展開フェーズでの展開という機能が有することが確認されたと言える。



A) 二次展開前 B) 二次展開後  
Figure. 13 二次展開フェーズ確認実験の結果

## 6. 結論

三次元自己展開トラスを用いた網型デブリ捕獲装置によるADRシナリオの中で、特に、捕獲時のシナリオを示し、数値シミュレーションと地上実験により、その評価を行った。本稿では、数値解析によって網に生じる応力等から接触運動における捕獲装置への影響を示した。さらに、地上実験によって捕獲装置が二次展開フェーズにおいて、展開可能であることを示した。数値解析から、捕獲装置の一次展開後から対象デブリとの衝突時の運動、地上実験から、対象デブリの捕獲完了を実現する二次展開、以上の二点について、シナリオの妥当性を確認した。今後の展望として、他の捕獲フェーズに関する評価を行う必要があると言える。

## 謝辞

本研究は、文科省・科研費 18H03817、および、文科省宇宙航空科学技術推進委託費の補助を受けました。

## 参考文献

- [1] Liou, J. C.: Active Debris Removal and the Challenges for Environment Remediation, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2012, pp.1-6.
- [2] Kessler, D. J. and Burton G., Cour-Palais: Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris belt. Journal of Geophysical Research, 1978, pp.2637-2646.
- [3] 趙孟佑: 超小型人工衛星の現状と将来. At [https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/research/2015/summer\\_seminar/files/31\\_speciallec\\_cho.pdf](https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/research/2015/summer_seminar/files/31_speciallec_cho.pdf), 九州工業大学 超小型衛星試験センター, 2015.
- [4] Shiki Kitajima, Shuji Abe, Toshiya Hanada, Satomi Kawamoto: Influences of MEGA Constellations on the Orbital Environment, The 7th JAXA Space Debris Work Shop, 2016.
- [5] Minghe Shan, Jian Guo, Eberhard Gill: Review and comparison of active space debris capturing and removal methods, Progress in Aerospace Sciences, 80, 2016, pp.18-32.
- [6] M. Fukunaga, et. al.: Design Method of Self-deployable Truss to Prevent Jamming of Stored Booms. AIAA Scitech 2019 Forum, AIAA 2019-1525, 2019.
- [7] Daiishi Kawarabayashi, Yasuyuki Miyazaki: The Concept of 3D Self-Deployable Truss and Development Characteristics under Microgravity, 60th Space Sciences and Technology Conference, JSASS-2016-4286, 2016.
- [8] Daiishi Kawarabayashi: Concept of Debris Capturing Device using Self-Extensible Boom and Net for Active Debris Removal (ADR), The 32nd International Symposium on Space Technology and Science, 2019, pp.1-7.
- [9] JAXA: 構造設計標準. At [https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-3204\\_N1.pdf](https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-3204_N1.pdf), 2011, pp32.