

## 変形した導電性テープテザーとスペースデブリ衝突による損傷評価

富崎帆乃花<sup>1</sup>, 小林稜平<sup>1</sup>, 鈴木麻由美<sup>1</sup>, 柄澤菜々美<sup>2</sup>, 森本大介<sup>2</sup>, 大塚啓介<sup>1</sup>, 槇原幹十朗<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大学大学院工学研究科, <sup>2</sup>東北大学工学部

### Collision of Deformed Electrodynamic Tethers against Space Debris

Honoka TOMIZAKI<sup>1</sup>, Ryohei KOBAYASHI<sup>1</sup>, Mayumi SUZUKI<sup>1</sup>,

Nanami KARASAWA<sup>2</sup>, Daisuke MORIMOTO<sup>2</sup>, Keisuke OTSUKA<sup>1</sup>, Kanjuro MAKIHARA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku University, <sup>2</sup>School of Engineering, Tohoku University

#### 1. 序論

1957年ソビエト社会主義共和国連邦は初めて、人工衛星スプートニク1号(Sputnik 1)の宇宙へ打ち上げを実現した。以降、宇宙開発は急速な進歩を遂げた一方、宇宙空間におけるごみ問題が深刻化している。スペースデブリ(以下、デブリ)とは、地球周回軌道上を周回する人工物のうち、有用な機能を果たしていない物体である。デブリには、制御不能な人工衛星や放棄されたロケット上段、宇宙空間でのミッションに関連したもの、衝突による粉碎破片などが含まれる。デブリは低軌道上では秒速約7 kmという超高速で運動している。そのため、センチメートルオーダーの微小デブリであっても、人工衛星に衝突すると破壊的な衝突を引き起こす。また、デブリは人工衛星との衝突やデブリ同士の衝突により、その数が年々増加しており、宇宙開発の障害になっている。デブリの増加を抑制するための対策の1つとして、大型のデブリの能動的な除去が挙げられる。

導電性テザーシステムは、能動的なデブリ除去システムの1つである。図1は導電性テザーシステムの概要図を示す。導電性テザーシステムは、ローレンツ力を利用して除去対象の大型デブリを減速、高度降下することを目的とする。導電性のテザーを除去対象物から伸展させ、テザーに電流を流すと、地球磁場との干渉により、速度方向とは逆向きにローレンツ力が発生する。これによ

り、除去対象物は減速し、高度を降下させることができる。

導電性テザーシステムは、化学燃料を必要としないため、システム全体の質量削減につながり、打ち上げコストの削減につながります。一方で、本システムは細長い円柱形状のテザー(シングルテザー)の使用を想定しているために、微小なデブリによる破断の危険性が大変高い。シングルテザーに対して、幅が広く薄い形状のテープテザーが提案された[1]。テープテザーは、宇宙空間で平板形状を保つことを前提としたとき、デブリ衝突による破断の危険性を減少できる[2, 3]。しかし、

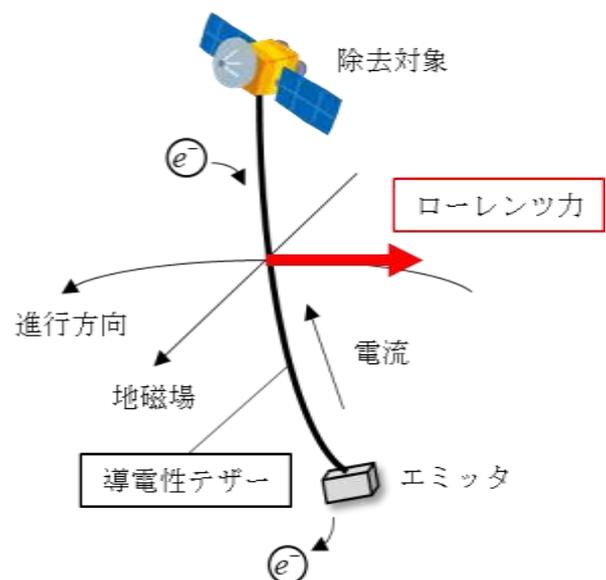


図1 導電性テザーシステムの概要

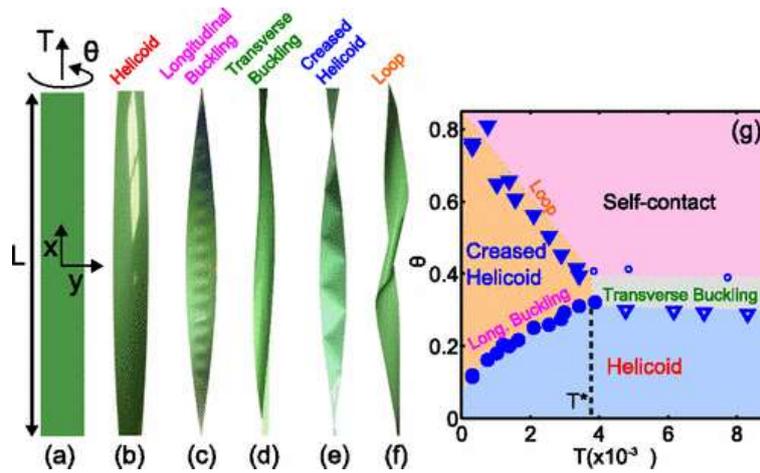


図 2 ねじれたテープの形状一覧[4]

システム運用時における除去対象物やエミッタの回転により、テープテザーにねじれが生じる可能性がある。図 2 はテープの両端に回転と引っ張りが生じた際に生じるねじれの様子である[4]。本研究では、ねじれの 1 つであるループに着目する (図 2 (f))。

本研究の目的は、テープテザーにねじれが生じ、ループ状に変形した際に、ループ部分にデブリが衝突した場合の損傷評価を行うことである。このために、デブリ衝突を模擬した衝突実験を実施し、ループ直径の違いによる損傷の変化を評価する。また、先行研究から得られる平板形状を保持したテープテザーに生じるデブリ衝突による損傷と、本実験から得られたループ部分における損傷を比較する。

## 2. 超高速衝突実験

### 2.1. 実験条件

本実験は、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA), 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS) のスペースプラズマ実験施設が保有する二段式軽ガス銃を使用する。図 3 は二段式軽ガス銃の様子である。デブリを模擬したプロジェクトイルには、直径 3.18 mm のアルミニウム球を使用し、秒速 7 km/s で射出する。図 4 は製作したターゲットの様子である。ターゲットは、厚さ 0.3 mm の

アルミニウム平板を使用する。ここで、ループ状にねじれたテープテザーを中空円筒形状だと見立て、中空円筒ターゲットへの衝突実験を行う。中空円筒ターゲットの半径、すなわち、ループの



図 3 二段式軽ガス銃 (JAXA/ISAS)

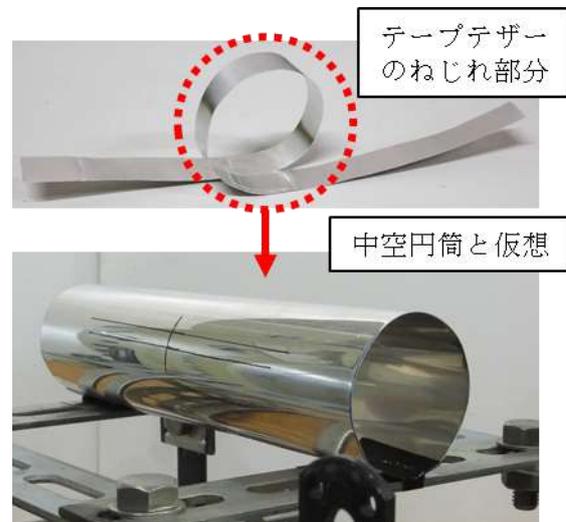


図 4 ねじれテープテザーを仮想した中空円筒ターゲット

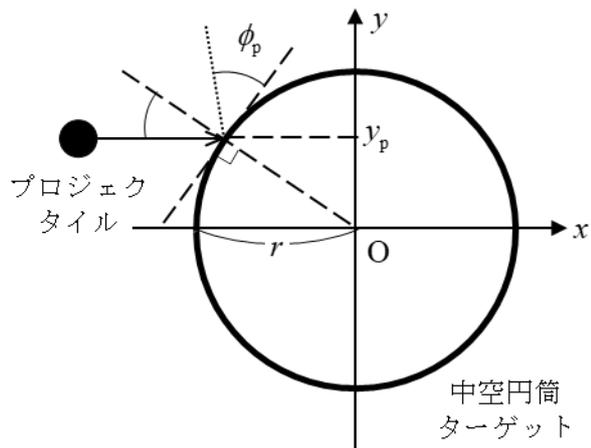


図5 プロジェクタイトルとターゲットの概要図

大きさを5通り（15, 25, 30, 50, 100 mm）に変化させ、損傷の違いを評価する。

全5種のターゲットのプロジェクタイトル衝突位置を統一する。図5は衝突直前のプロジェクタイトルと中空円筒ターゲットの概要図である。ここで、 $r$  は中空円筒ターゲットの半径、 $y_p$  は衝突位置の $y$ 座標である。本研究では、2つの変数の比( $y_p/r$ )を高さ比と呼び、高さ比0.5を衝突位置とする。

## 2.2. 実験結果と考察

図6は衝突後の中空円筒ターゲットを展開した様子である。衝突後のターゲットには、2つの損傷穴が確認できる。1つは、プロジェクタイトルにより生じた損傷穴である。これをHole 1とし、横方向の損傷長さを $a_1$ 、周方向の損傷長さを $b_1$ とする。一方の損傷穴は、プロジェクタイトルがターゲットに衝突した直後に発生したデブリクラウドによる最大の損傷穴である。これをHole 2とし、横方向の損傷長さを $a_2$ 、周方向の損傷長さを $b_2$ とする。ここで、損傷長さは損傷穴から伸展したき裂も含む。

図7に、本実験結果をまとめる。横軸は中空円筒ターゲットの半径 $r$ 、縦軸は損傷長さを示す。始めに、Hole 1の損傷長さについて考察する。全てのターゲットにおいて、損傷長さ $a_1$ 、 $b_1$ の値に大きな変化はなかった。ここで、衝突点近傍に

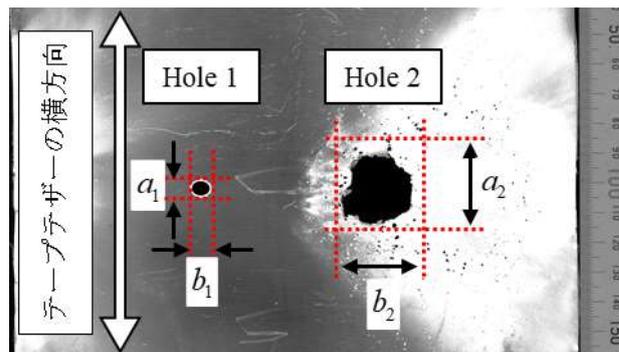


図6 衝突後の中空円筒ターゲットを展開した様子

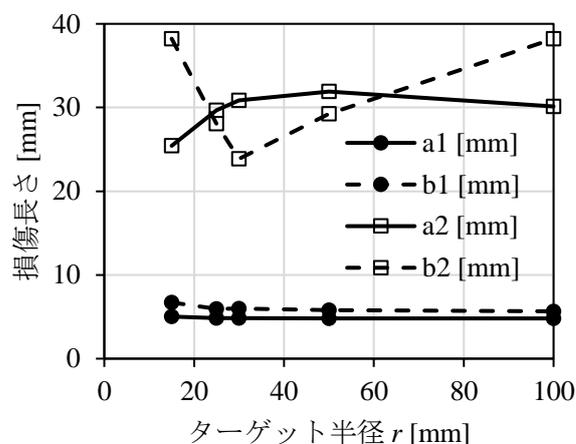


図7 衝突実験結果

において、プロジェクタイトルは斜め板への衝突とみなすことができる。全5回の実験において、高さ比0.5で統一した。従って、5回の実験は全て同じ条件下であると言え、損傷長さ $a_1$ 、 $b_1$ に変化がなかったと考えられる。

次に、Hole 2のテープテザーの横方向の損傷長さ $a_2$ について考察する。図7より、ターゲット半径 $r$ が15 mmから50 mmに増加するに伴い、損傷長さ $a_2$ は緩やかに増加した。これは、ターゲット半径 $r$ の増加により、発生したデブリクラウドがターゲット後方に到達するまでに、広範囲に拡散したためである。また、ターゲット半径 $r$ が50 mmから100 mmに増加するに伴い、損傷長さ $a_2$ は緩やかに減少した。これは、ターゲット半径 $r$ の更なる増加により、デブリクラウド

全体の密度が低下し、貫通し辛くなったためだと考えられる。

最後に、Hole 2 のテープテザーの周方向の損傷長さ  $b_2$  について考察する。中空円筒ターゲットの半径  $r$  が 15 mm から 25 mm へ増加するとき、損傷長さ  $b_2$  は減少した。これは、ターゲット半径  $r$  が小さいとき、高密度のデブリクラウドがターゲット後方に衝突し、ターゲットの背面がめくれるように破壊されるためである。また、ターゲット半径  $r$  が 25 mm から 100 mm へ増加するとき、損傷長さ  $b_2$  は増加した。これは、ターゲット半径  $r$  の増加により、ターゲット内部に発生したデブリクラウドが、中空円筒ターゲットの周方向に広く衝突したためだと考えられる。

以上より、中空円筒ターゲットの半径  $r$  の違い、つまり、変形したテープテザーのループの大きさの違いにより、テープテザーの損傷が変化することがわかった。

### 3. 変形による影響

前章の結果を基に、平板形を保持した場合とループ状に変形した場合のテープテザーの損傷を比較する。はじめに、平板形を保持した場合の損傷長さを求める。Khan ら[1]は、平板形を保持したテープテザーにデブリが衝突する場合に生じる損傷長さを定式化した。本実験条件であるデブリ直径 3.18 mm、衝突速度 7 km/s である場合、最大損傷長さは 15.9 mm である。一方で、テープテザーのループ部分へデブリが衝突した場合、本実験結果より、横方向への損傷長さ  $a_2$  の最小値は 25.4 mm であった。従って、テープテザーにループが生じることにより、テープテザーは大きな損傷を被ることがわかった。

### 4. 結論

本研究の目的は、ループ状に変形したテープテザーへのデブリ衝突による損傷評価を行うことであった。本研究では、変形したテープテザーへ

のデブリ衝突を模擬した衝突実験を実施し、変形の大きさの違いにより損傷が変化することがわかった。また、変形の有無によるテープテザーの損傷長さを比較し、変形により大きな損傷を被ることがわかった。

### 5. 謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 スペースチェンバー実験施設を使ってなされました。ここに謝辞を申し上げます。

### 6. 参考文献

- [1] Khan, S. B. et al., “Survivability to Orbital Debris of Tape Tethers for End-of-Life Spacecraft De-orbiting,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 52, 2016, pp. 167-172.  
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.02.033>.
- [2] Makihara, K., and Kondo, S., “Structural Evaluation for Electrodynamic Tape Tethers against Hypervelocity Space Debris Impacts,” *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 55, No. 2, 2018, pp. 462-472.  
<https://doi.org/10.2514/1.A34023>.
- [3] Fujiwara, M. et al., “Damage Assessment for Electrodynamic Tape Tether against Space Debris Impact,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 19, No. 1, 2021, pp. 34-41.  
<https://doi.org/10.2322/tastj.19.34>.
- [4] Chopin, J. et al., “Helicoids, Wrinkles, and Loops in Twisted Ribbons,” *Physical Review Letters*, Vol. 111, No. 17, 2013, pp. 1-5.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.174302>.