

形状保持具を付加した中空円筒テザーへの超高速衝突実験

小林稜平¹, 鈴木麻友美¹, 柄澤 菜々美¹, 森本 大介², 高橋 輝², 大塚啓介¹, 槇原幹十朗¹

¹東北大学大学院工学研究科, ²東北大学工学部

Hyper-velocity impact experiments on a hollow cylindrical tether with a shape keeper

Ryohei KOBAYASHI¹, Mayumi SUZUKI¹, Nanami KARASAWA¹, Daisuke MORIMOTO², Hikaru TAKAHASHI², Keisuke OTSUKA¹, Kanjuro MAKIHARA¹

¹Graduate School of Engineering, Tohoku University, ²School of Engineering, Tohoku University

1. 序論

地球上における人類の生活は地球観測衛星や通信衛星などの宇宙機により支えられており、近年その重要性はより活性化している。一方で宇宙空間には、現在並びに将来にわたって有用な役割を果たさない人工物体が数多く存在している。これらはまとめてスペースデブリという（本稿では以下デブリと称する）。地球周回軌道にあるデブリは平均 7 km/s という超高速で飛んでいるため、小さなデブリでも大きな運動エネルギーを持つ。そのため、有人宇宙船や人工衛星に衝突すれば重大な事故を引き起こす恐れがある[1]。

そこで、能動的にデブリを除去する方法がこれまで複数提案されている。通常は減速させるために推進器が必要になるが、思い燃料を宇宙空間に打ち上げるためのコストがかさむ。そのため、化学燃料が不要な推進装置である、導電性テザーシステムが注目されている[2,3]。導電性テザー（Electrodynamic tether EDT；以下テザーと称する）は長さ数 km の導体で作られた紐である。

テザーシステムは、テザーと、テザーの下端に取り付けられたエミッタから成る。テザーシステム運用中のイメージを Fig. 1 に示す。テザーはプラズマ空間から電子を収集し、それによりテザーに電流が発生する。その伝習が地磁場と干渉しローレンツ力がデブリの進行方向と反対側に発生し、デブリを減速・高度低下させ地球大気に再突入させることによりデブリを除去する。しかし、紐で出来ているため、デブリの衝突で破断がしやすい。

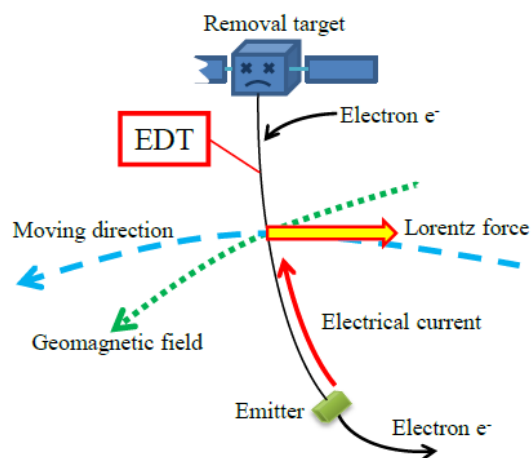


Fig.1 Schematic of the ADR mission with EDT

そこで、Fig.2 に示す従来の中実円柱テザーと比べて破断のしづらい中空円筒テザーが提案されている[4].しかし、中空円筒テザーはねじれにより変更しやすく、変形により意図した耐破断性能を発揮できないという課題がある。

本研究では、円筒形状を保つための形状保持具を提案し、その提案した形状保持具をデブリ衝突による損傷とデブリ除去に係る時間の2つの観点から評価を行う。

本研究では、3つの形状保持具を提案する。一つ目は、アルミ製の形状保持具である。導電性があるが、面密度が大きくなってしまふという特徴がある。二つ目は、非導電性発泡ウレタン製の形状保持具である。密度が小さいため打上コストの低減に効果的だが、宇宙空間での試用経験が少なく、非導電性であるのがデメリットである。三つめは、導電性発砲ウレタン製の形状保持具である。二つ目と比較して導電性であるため、テザーの電子収集を阻害しないという利点がある。

2. 超高速衝突実験

形状保持具付き中空円筒テザーの強度を評価するために、超高速衝突実験を行う。実験は Fig.3 に示す JAXA/ISAS が保有する二

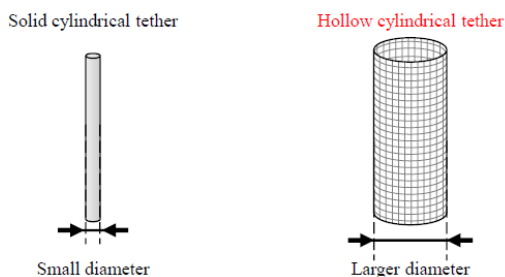


Fig.2 Schematic of hollow cylindrical tether(right) compared with solid cylindrical tether(left)

段式軽ガス銃を用いる。

ターゲットは直径 150 mm で、プロジェクタイトイルは直径 7.14 mm のプラスチックを用いる。このプロジェクタイトイルの衝突位置を変え、その位置による損傷の違いを観察する。衝突位置は(1)式で表される。

$$k = \frac{y}{D_T/2} \quad (1)$$

Fig.5 に損傷の定義を示す。テザーに衝突したプロジェクタイトイルは一次破壊 A と、一次破壊により生じたデブリクラウドによる最も大きな貫通穴の弧長である二次破壊 B が生じた。また、二次破壊 B に小さな損傷範囲を足した B' を二次破壊で損傷した範囲と定義する。この時、最大穴の弧長を A+B と定義する。次に、損傷領域の弧長を A+B' と定義する。

最大穴の弧長はアルミ製形状保持具も発泡ウレタン製形状保持具もほとんど同じ性



Fig.3 Two-stage light gas gun

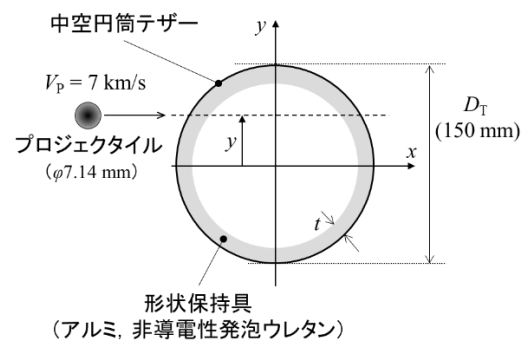


Fig.4 Schematic view of experiment target

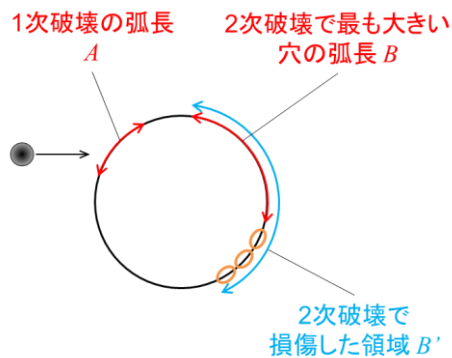


Fig.5 Definition of damage

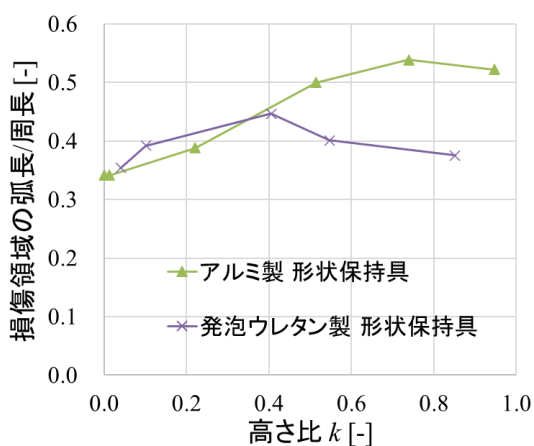
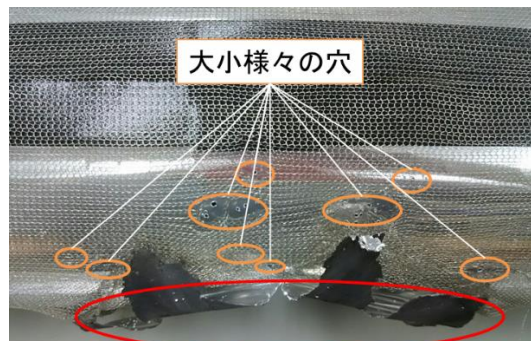


Fig.6 Arc of the damaged region divided by tether circumference

能であった。一方で、損傷領域の弧長で見た時は、Fig.6 に示すようにアルミ製形状保持具と発泡ウレタン製形状保持具で大きな差がでた。この原因は、Fig.7 に示すようにアルミ製形状保持具の場合は2次損傷に無数の穴が生じたからである。アルミニウムは重いため、細かく粉碎されずに複数の塊のままデブリクラウドとして2次被害を起こしたからだと考えられる。一方でウレタンは軽いいため、2次損傷への影響は小さかったと言える。つまり、破断の観点からはアルミニウム製よりも発泡ウレタン製の形状保持具の方が適していることが分かった。



下流側で最も大きい穴

Fig.7 Second damage in case of aluminum

3. 除去時間

デブリ除去に係る時間にて形状保持具を評価するために、定量的な比較を行う。デブリ除去時間の導出における設定として、テザーは線密度を固定し、質量を 10 kg で固定とした。想定するデブリ除去ミッションは除去対象デブリとテザーの合計質量を 4000 kg としている。初期高度は 800 km で最終高度は 300 km とする。

まず初めにテザーの前兆に対する形状保持具の割合での比較を行う。テザー全長の 1% を付加した場合にはあまり大きな影響は無く、全長の 10% 付加した場合に影響が見えてくる。ただし、とても小さいと言える。

次に形状保持具を全長 10% に付加した中空円筒テザーと中実円柱テザーを比較する。Fig.8 に示す通り、中実円柱テザーと形状保持具を付加した中空円筒テザーでは大きな違いが分かる。テザー全長が短い場合は、テザー全長が短くても除去時間が短くなっていることが分かる。また、テザーは全長が短いほうがデブリとの衝突リスクも小さく、展開も容易であるため好ましい。したがって、従来の中実円柱テザーよりも形状保持

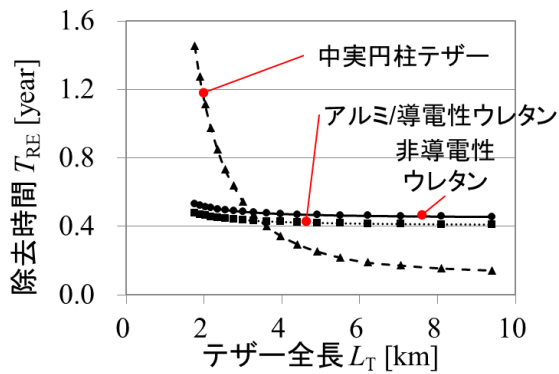


Fig.8 Relationship between total tether length and removal time

具付きの中空円筒テザーが優れていることを証明できた。

4. 結論

本研究では、中空円筒テザーが変形により意図した耐破断性能を発揮できない可能性を排除するために円筒形状を保持するための形状保持具を提案した。形状保持具はアルミ製、非導電性発泡ウレタン製、導電性発泡ウレタン製の3種類を提案した。そして、それらをデブリ衝突による損傷とデブリ除去にかかる時間の2つの観点で評価を行った。その結果、導電性発泡ウレタンが最も損傷を押さえ、短い除去時間を達成することが出来、最も適した形状保持具だということが分かった。

参考文献

- [1] 八坂哲雄, “宇宙のゴミ問題,” 裳華房, 1997.
- [2] Liou, J. C., Johnson, N. L., and Hill, N. M., “Controlling the Growth of Future LEO Debris Populations with Active Debris Removal,” *Acta Astronautica*, Vol. 66, No. 5-6, 2010, pp. 648-653.

[3] Sanmartín, J. R., Martínez-Sánchez, M., and Ahedo, E., “Bare wire anodes for electrodynamic tethers,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 3, 1993, pp. 353-360.

[4] Makihara, K., and Matsumoto, N., “Survival Probability of Hollow Cylindrical Mesh Tether Under Space-Debris Impact,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 53, No. 3, 2016, pp. 520-527.