

中空円筒テザーに対するスペースデブリ衝突実験

○上 蓑義幸, 藤原路大, 富崎帆乃花, 榎原幹十郎 (東北大学)

Collision Experiments of Space Debris Against Hollow Cylindrical Tethers
Yoshiyuki Uwamino, Michihiro Fujiwara, Honoka Tomizaki and Kanjuro Makihara (Tohoku Univ.)

1. 緒言

宇宙開発の活発化に伴い、地球周回軌道上のスペースデブリが増加している。安全かつ持続可能な宇宙開発を進めていくために、能動的にデブリを除去することが求められている。デブリ除去手法として、導電性テザーシステムが提案されている [1-3]。テザーを流れる電流と地磁場との相互作用で生じるローレンツ力を用いて、デブリを減速させ軌道高度を低下させることができる。テザーは直径数 mm かつ全長数 km という非常に細長い形をしているため、微小なデブリの衝突で破断する弱点がある。デブリの衝突により破断しにくいテザーの開発と、正確な生存確率の計算が必要である。デブリ衝突を模擬できる高速衝突実験装置 [4, 5] などを用いた過去の研究から、円形断面を持つ従来の中実円柱テザーは、微小なデブリの衝突で容易に破断することがわかっている。また、テザーに冗長性を持たせた構造が種々考案されている [6-8]。宇宙空間におけるテザーの挙動に関する研究も行われている [9]。しかし、依然としてデブリに対するテザーの防御性能は低いため、新たにデブリ衝突耐性の高いテザー構造を考案し、その防御性能の高さを示すことが求められている。

本研究の目的は、新しいテザー構造を提案し、そのデブリ衝突耐性と生存確率を評価することである。図 1 右に示す中空円筒テザーを提案する。中空円筒テザーは、中実円柱テザーと同じ線密度でも直径 D_T を大きくできるため、微小なデブリが衝突したときに破断しにくいと期待できる。ここで、テザーに対しデブリが衝突したときの現象を考える。従来の中実円柱テザーにデブリが衝突したときには、1回の衝突だけが起こる。一方、中空円筒テザーに衝突したときは、2回の衝突が起こる。1回目の衝突で、中空円筒テザー内に破砕破片から成るデブリクラウドが生じる。そのデブリクラウドが中空円筒テザーの別の場所に衝突する。なおデブリクラウドは、高速度カメラによって撮影することができ、その画像から輪郭を特定することも可能である [10]。本研究では、超高速衝突実験により、デブリ衝突位置と中空円筒テザーの損傷との関係を明らかにする。さらに、円筒テザーの軌道上での生存確率を算出するための有効範囲を提案する。円柱テザーと中空円筒テザーの生存確率を比較し、中空円筒テザーの有用性を示す。

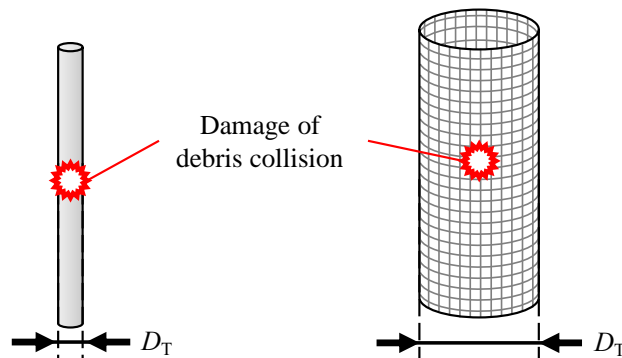


図 1 中実円柱テザー (左) と中空円筒テザー (右)

2. 超高速衝突実験

JAXA/ISASのスペースプラズマ実験施設の2段式軽ガス銃を用いて超高速衝突実験を行った。本研究では、プロジェクトイル球を 7 km/s でテザーに衝突させた。プロジェクトイルには直径 3.2 mm のアルミ球と、直径 7.14 mm のポリカーボネート球を用いた。ターゲットに用いた中空円筒テザーは直径 146 mm であり、錫メッキされた直径 0.12 mm の銅線で編まれている。円周方向の網目間隔は 1.34 mm、軸方向の網目間隔は 1 mm であり、単位長さあたりの質量は 0.14 g/mm である。中空円筒テザーとプロジェクトイルの衝突を図 2 に示す。テザーを軸方向から見たとき、テザーの中心から y だけ離れた位置にプロジェクトイルを衝突させた。無次元数である高さ比 $k \equiv y/(D_T/2)$ を定義し、衝突位置を表す。 $k=0$ でテザーの中心、 $k=1$ でテザーの端に衝突することを意味する。

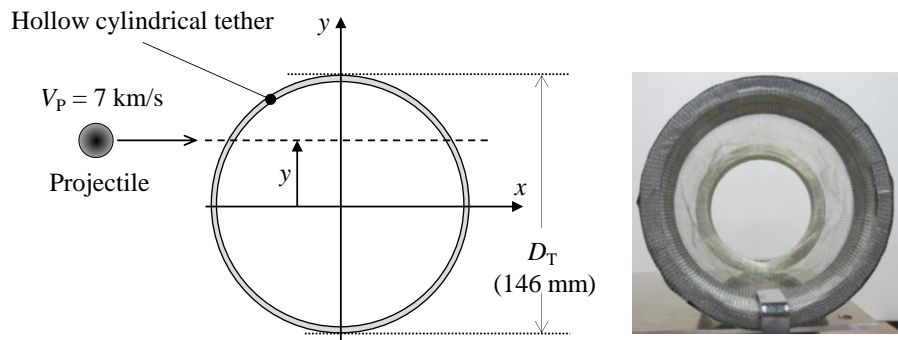


図2 衝突実験の衝突位置 (左) と中空円筒テザー (右)

プロジェクトイルが中空円筒テザーに衝突した様子を、高速度カメラ (HPV-X) を用いて撮影した。撮影した画像を図3左に示す。このとき、中空円筒テザー内にデブリクラウドが発生したことが確認できた。デブリクラウドの前縁部を赤曲線で示した。実験後の中空円筒テザーでは、図3右のように小さな損傷領域と大きな損傷領域が確認できた。大きな損傷領域はテザー内に発生したデブリクラウドに由来する。この結果から、中空円筒テザーの損傷にはデブリクラウドが大きく影響を及ぼすと言える。

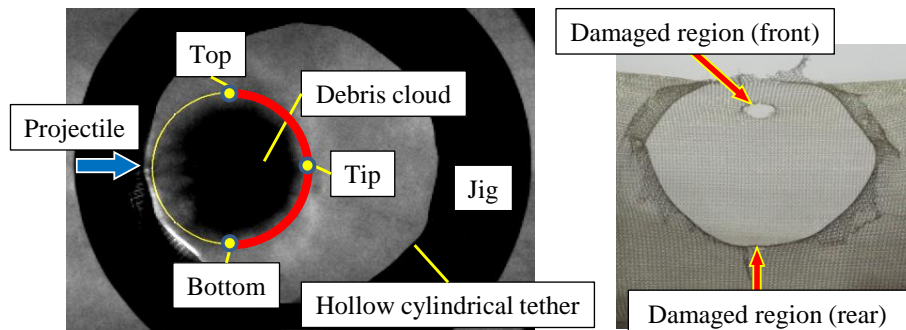


図3 デブリクラウド (左) と損傷した中空円筒テザー (右)

3. 衝突位置によるテザー損傷の変化

中空円筒テザーの損傷にはデブリクラウドが大きく影響を及ぼすことから、デブリクラウドの拡散とテザー損傷の関係に注目する。デブリクラウドの拡散を調べるため、 $2\mu\text{s}$ ごとの高速度カメラの画像において、図3のようにデブリクラウドの先端、上端、下端の座標を求めた。図4に、プロジェクトイルが、異なる高さ比 k ($k = 0.06, 0.71$) で衝突したときのデブリクラウドの拡散と、損傷領域の比較を示す。図4の弧状両端矢印は、デブリクラウドによってテザーが損傷した領域を表す。このとき、 $k = 0.06$ のときよりも $k = 0.71$ のときの方が、損傷領域は大きくなった。これは図4の X 軸両端矢印に示されるように、デブリクラウドが中空円筒テザーに衝突するまでの距離が関係していると考えられる。 $k = 0.06$ では衝突位置と中空円筒テザー後方までの距離が長いため、デブリクラウドは拡散した後に中空円筒テザーに衝突する。一方、 $k = 0.71$ では衝突位置と中空円筒テザー後方までの距離が短いため、デブリクラウドは十分に拡散しない密な状態で、中空円筒テザーに衝突する。よって、 k が大きい衝突の方が損傷領域は大きくなると考えられる。

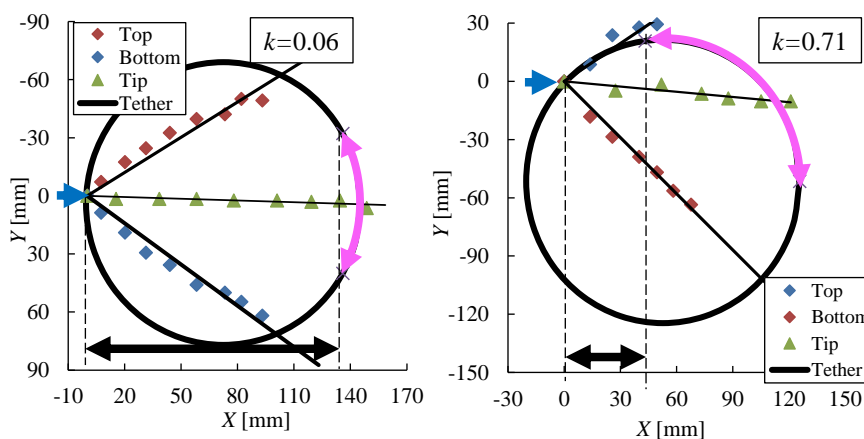


図4 デブリクラウドの拡散とテザー損傷の関係

プロジェクトイルを衝突させる前の中空円筒テザーの円周長から、衝突後の損傷部位を差し引いた長さを、残存円周長 C とする。残存円周長 C と元の円周長の割合を残存率 $R \equiv C/(\pi D_T)$ と定義する。図5に、高さ比 k が変化した際の、テザーの損傷を示す。アルミ球、ポリカーボネート球の両方で、 k の増加に伴い残存率が減少する傾向が見られる。 k が小さいとき、プロジェクトイル衝突後に発生したデブリクラウドは十分に拡散した後に再びテザーに衝突するため、損傷は小さい。 k が大きいとき、プロジェクトイルの衝突位置は円筒の中心から離れるため、デブリクラウドは十分に拡散しない密の状態でも再びテザーに衝突する。よって、 k が大きいとき、テザーの損傷は大きくなる。

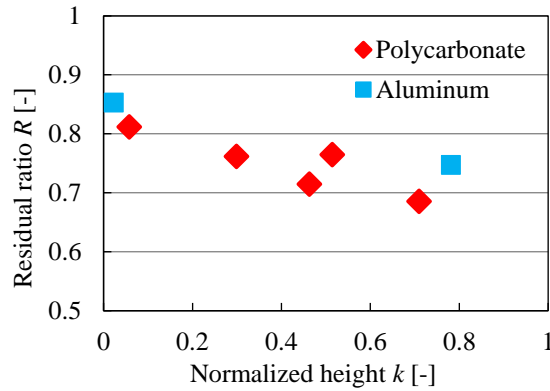


図5 デブリ衝突位置によるテザー残存率の変化

4. テザー生存確率の計算

テザーが軌道上にある期間滞在したとき、破断せずに生存している確率を生存確率とする。テザーの生存確率を計算するために、有効範囲 D_{eff} を定義する。デブリの中心点がこの範囲内を通過した際、テザーは破断すると仮定する。図6左において、直径 d のデブリが直径 D_T の中実円柱テザーに衝突するとき、中実円柱テザーの有効範囲 D_{eff} は次式である[6]。

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{TC}} + d \quad (1)$$

D_{TC} は臨界破断直径であり、この範囲内を損傷した際にテザーが破断すると仮定している。

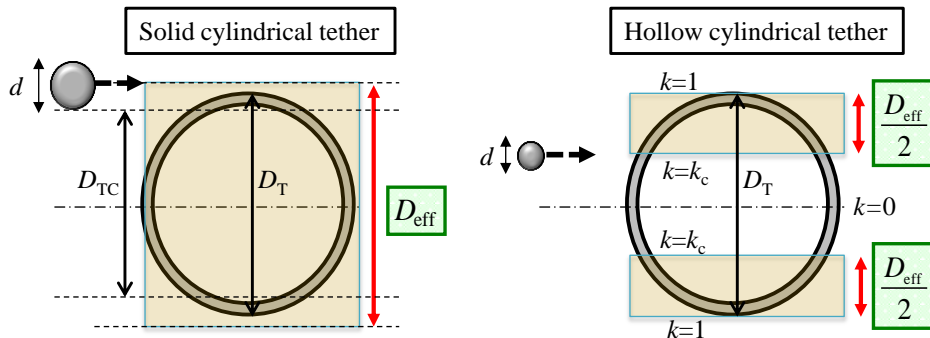


図6 中実円柱テザーと中空円筒テザーの有効衝突範囲

中空円筒テザーの有効範囲を提案する。残存率 R が臨界残存率 R_c よりも小さいとき、破断すると仮定する。 $R = R_c$ となるとき k を k_c とする。実験とシミュレーションより、 k_c を求めることができる。 R_c と k_c の方程式の実数解の存在問題に帰着させることによって、図6右において、 k_c を用いて中空円筒テザーの有効範囲 D_{eff} を次式で表す [11] 。

$$D_{\text{eff}} = \begin{cases} D_T & \text{nosolution} \\ D_T(1-k_c) & \text{for } 0 \leq k_c \leq 1 \\ 0 & \text{for } k_c > 1. \end{cases} \quad (2)$$

長さ L_T のテザーの破断率 R_T [5] は次式となる。

$$R_T = -L_T \int_{d_m}^{d_\infty} D_{\text{eff}}(d) \frac{F(d)}{dd} dd \quad (3)$$

ここで、 $F(d)$ はデブリ累積流束であり、直径 d 以上のデブリが、 1 m^2 を単位時間当たりにも通過する個数を表す。 $F(d)$ は年、軌道高度、軌道傾斜角ごとに求められる値である。本研究では、デブリ累積流束のデータベースとして、NASAの

ORDEM2000を活用した。 d_m はテザーを破断し得る最小のデブリ直径である。 d_∞ は計算上定められる最大のデブリ直径である。軌道に Δt だけ滞在するときのテザーの生存確率は次式のように表せる [12]。

$$P_0 = \exp[-R_T \Delta t] \quad (4)$$

図8に、中空円筒テザーと中実円柱テザーがそれぞれ軌道高度800 kmに滞在したときの生存確率の比較を示す。図8から、中空円筒テザーの方が、中実円柱テザーより生存確率が高いことが分かる。

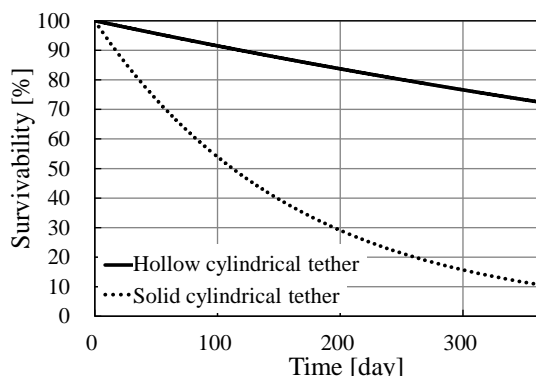


図7 中実円柱テザーと中空円筒テザーの生存確率

5. 結言

本研究では、導電性テザーとして中空円筒テザーを提案した。超高速衝突実験を行い、デブリ衝突位置とテザー損傷の関係を明らかにした。デブリの衝突位置がテザーの中心から離れるほど、テザーの損傷は大きくなり、残存率が低下することが分かった。中空円筒テザーの軌道上での生存確率を評価するために、有効範囲の考え方を提案した。中空円筒テザーは中実円柱テザーに比べて生存確率が高く、有用であることが示された。

文 献

- [1] Van der Heide, E. J., and Kruijff, M., "Tethers and Debris Mitigation," *Acta Astronautica*, Vol. 48, No. 5–12, 2001, pp. 503–516.
- [2] Kawamoto, S., Okawa, Y., Kitamura, S., and Nishida, S., "Strategy for Active Debris Removal Using Electrodynamic Tether," *Proceedings of the International Symposium of Space Technology and Science*, Hamamatsu, Japan, No. 2008-r-2-36, 2008.
- [3] Pardini, C., Hanada, T., and Krisko, P. H., "Benefits and Risks of Using Electrodynamic Tethers to De-Orbit," *Acta Astronautica*, Vol. 64, Nos. 5–6, 2009, pp. 571–588.
- [4] Ohtani, K., Numata, D., Kikuchi, T., Sun, M., Takayama, K., and Togami, K., "A Study of Hypervelocity Impact on Cryogenic Materials," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33, Nos. 1–12, 2006, pp. 555–565.
- [5] Kawai, N., Tsurui, K., Hasegawa, S., and Sato, E., "Single Microparticle Launching Method Using Two-Stage Light-Gas Gun for Simulating Hypervelocity Impacts of Micrometeoroids and Space Debris," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 81, No. 11, 2010, Article No. 115105.
- [6] Kim, I., Hirayama, H., and Hanada, T., "Practical Guidelines for Electro-Dynamic Tethers to Survive from Orbital Debris Impacts," *Advances in Space Research*, Vol. 45, No. 10, 2010, pp. 1292–1300.
- [7] Kawamoto, S., Makida, T., Sasaki, F., Okawa, Y., and Nishida, S., "Precise Numerical Simulations of Electrodynamic Tethers for an Active Debris Removal System," *Acta Astronautica*, Vol. 59, No. 1–5, 2006, pp. 139–148.
- [8] 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.
- [9] Yamagiwa, Y., Hiragi, E., and Kishimoto, T., "Dynamic Behavior of Electrodynamic Tether Deorbit System on Elliptical Orbit and Its Control by Lorentz Force," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 366–373.
- [10] Makihara, K., and Oki, Y., "Bayesian Cloud Extraction for Assessment of Space-Debris Impact Using Conditional Entropy," *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 54, No. 6, 2017, pp. 1235–1245.
- [11] Makihara, K., and Matsumoto, N., "Survival Probability of Hollow Cylindrical Mesh Tether under Space Debris Impact," *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 53, No. 3, 2016, pp. 520–527.
- [12] Makihara, K., and Takahashi, R., "Survivability Evaluation of Electrodynamic Tethers Considering Dynamic Fracture in Space-Debris Impact," *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 53, No. 1, 2016, pp. 209–216.