

中空円筒テザーに対するスペースデブリ斜め衝突による損傷評価

○藤原路大¹，富崎帆乃花¹，柄澤菜々美¹，楨原幹十朗¹

¹東北大学大学院工学研究科

1. 緒論

地球周回軌道上には、スペースデブリ（以下、デブリ）と呼称される人工不用物体が多数存在する。これらは地球低軌道（Low Earth orbit, LEO）においては、約 7 km/s という高速で飛行しているため、ミリメートルオーダーのデブリであっても運用中の構造物に対して大きな脅威になり得る。デブリは一度 LEO に放出されると、数十年から数千年の間、軌道上を周回し続けると考えられている。さらに、デブリ同士の衝突によって破碎デブリを生じ、軌道環境の更なる悪化へと繋がる。そのため、運用が終了した人工衛星や宇宙構造物は、能動的に軌道から離脱させる必要がある。近年、軌道離脱の現実的な方法として導電性テザー（Electrodynamic tether, EDT）システムが研究されている。この方法では、EDT を流れる電流と地磁気との相互作用で発生するローレンツ力を用いて除去対象を減速し、軌道高度を低下させることができる。しかし、EDT は細長い形状のために破断しやすいという弱点を持つため、微小デブリへの耐衝突性能を向上させることが至上命題となる [4][5]。この問題解決のために、中空円筒テザーが提案された [6]。中空円筒テザーは、基準形状である中実円柱テザーと同質量の条件で、直径を遥かに大きく設計することが可能である。その結果として、微小デブリの衝突に対する破断耐性は向上することが示された。中空円筒テザーの実用化に向けて精度の高い解析を行う場合、衝突の角度の影響を考える必要がある。EDT は宇宙環境で使用する際、地球の鉛直方向に対して一定の角度を保つと報告されている [7]。さらに、デブリ軌道環境

モデル ORDEM 3.0 によれば、軌道上の物体に対するデブリの飛来方向は、物体の進行方向が大半であることが分かる [8]。これらを踏まえると、EDT に対するデブリ衝突現象は、垂直衝突よりも、一定の角度をもった斜め衝突の頻度が高いと考えられる。（図 1）中空円筒テザーは内部が空洞であるため、衝突後の破片群（デブリクラウド）がテザー内部で拡散し、損傷の大小に影響する。従って、斜め衝突の際にはデブリクラウドの拡散影響が損傷評価に大きく関わりと考えられる [9][10]。本研究では、中空円筒テザーに対する斜め衝突の損傷評価を衝突実験により調査する。また、評価を基に中空円筒テザーの運用中の生存確率を計算し、角度の影響を比較する。

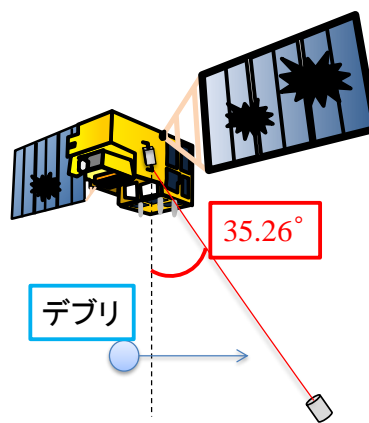


図 1 運用時の EDT 姿勢角度

2. 超高速衝突実験・結果

JAXA/ISAS のスペースプラズマ実験施設の 2 段式軽ガス銃（図 2）を用いて超高速衝突実験を行った。本研究では、プロジェタイル球を 7 km/s でテザーに衝突させた。プロジェタイルには直径 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の概略を図 3 に示す。本研究では、2 つの角度パラメータ θ_{XY} および θ_{ZX} を導入した。中空円筒テザーの横断面 (X - Y 平面) に θ_{XY} を定義し、 X 軸とテザー長手方向 (Z 軸方向) とのなす面 (Z - X 平面) に θ_{ZX} を定義した。本研究の調査対象である「斜め衝突」は、運用中の EDT の姿勢角度を再現した θ_{ZX} の変化による衝突現象を意味する。斜め衝突実験後の中空円筒テザーの様子を、図 4、図 5、および図 6 に示す。図 4、図 5、図 6 はそれぞれ、 $\theta_{ZX} = 0^\circ$ 、 $\theta_{ZX} = 30^\circ$ 、 $\theta_{ZX} = 45^\circ$ のときの実験結果である。損傷の周方向長さ L_{DC} は、 X - Y 平面に射影した損傷の端点から端点までの距離を計測した。 L_{DC} は $\theta_{ZX} = 30^\circ$ と $\theta_{ZX} = 45^\circ$ のときに大きく、垂直衝突 ($\theta_{ZX} = 0^\circ$) の損傷よりも深刻であることが分かった。全実験結果を図 7 のグラフに図示する。 θ_{XY} の増加に伴って、損傷長さ L_{DC} が増加する傾向があり、さらに、この傾向は、 θ_{ZX} がどの角度であっても共通していることが読み取れる。また、ばらつきはあるものの、全体的な傾向として θ_{ZX} が大きいときの方が、損傷長さ L_{DC} の絶対値が僅かに大きくなった。



図 2 二段式軽ガス銃 (JAXA/ISAS)

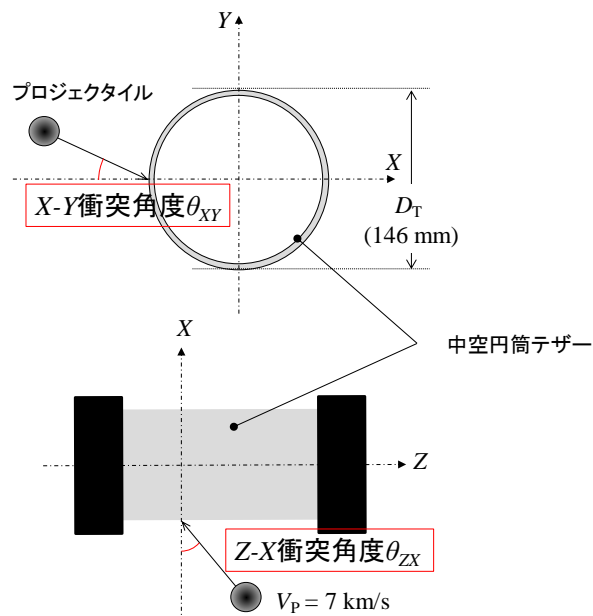


図 3 衝突条件の概略

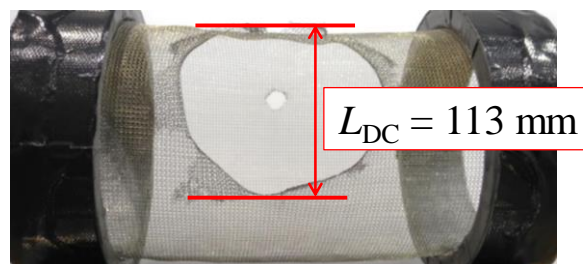


図 4 衝突後のテザー ($\theta_{ZX} = 0^\circ$)

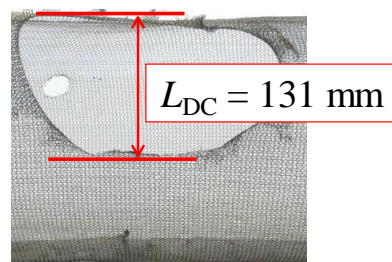


図 5 衝突後のテザー ($\theta_{ZX} = 30^\circ$)

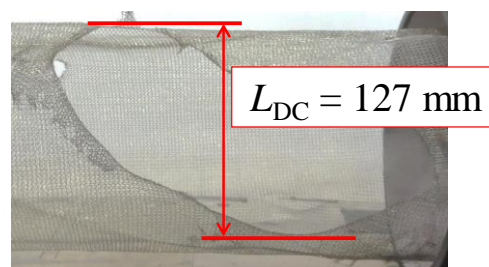


図 6 衝突後のテザー ($\theta_{ZX} = 45^\circ$)

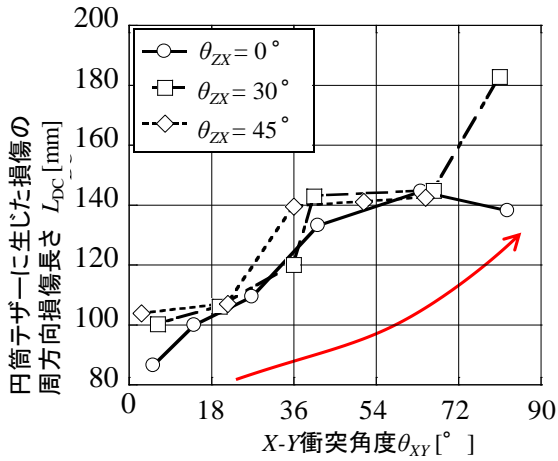


図 7 衝突角度と周方向損傷長さの関係

3. 有効衝突範囲

テザーの生存確率を計算するために、有効衝突範囲 D_{eff} を定義する。デブリの中心が D_{eff} 内を通過したときに、テザーの損傷は自重を支えきれない程度まで拡大し、破断に至ると仮定する。衝突実験の結果から、 θ_{XY} が増加すると損傷は大きくなることが観察された。そこで、 X - Y 平面の臨界衝突角度 θ_{XYc} を設けると、 Z - X 平面衝突角 θ_{ZX} およびデブリ直径 d が固定値のとき、デブリが θ_{XYc} 以上の角度でテザーに衝突したときに破断する。図 8 に示すように、 $\theta_{XY} = \theta_{XYc}$ のときのテザーの範囲を D_{eff} と定義する。 D_{eff} は、 Z - X 平面衝突角 θ_{ZX} およびデブリ直径 d に依存する値である。以上より、1 組の θ_{ZX} と d に対して、有効衝突範囲 D_{eff} は式(1)のように表される[11]。

$$D_{\text{eff}} = \begin{cases} 0 & \text{for } 90^\circ < \theta_{XYc} \\ D_T \{1 - \sin(\theta_{XYc})\} & \text{for } 0^\circ \leq \theta_{XYc} \leq 90^\circ \\ D_T & \theta_{XYc} \text{ has no solution} \end{cases} \quad (1)$$

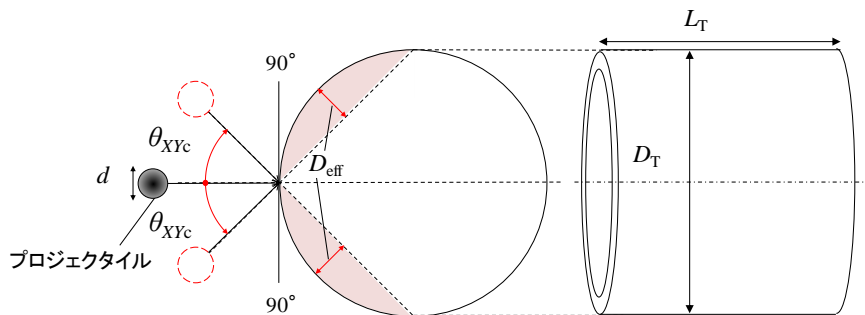


図 8 臨界衝突角度と有効衝突範囲の関係

4. 生存確率計算

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。生存確率 I_f は有効衝突範囲、軌道滞在時間、および、デブリ流量の 3 要素で決定され、式(2)のように記述できる。

$$I_f = - \int_{d_m}^{d_\infty} L_T D_{\text{eff}}(d) \frac{dF(d)}{dd} dd \quad (2)$$

ここで、 L_T はテザー長さ ($L_T = 10$ km)、 $F(d)$ は ORDEM 2000[12] によってカタログ化された累積デブリ流量である。累積デブリ流量は、高度 800 km、軌道傾斜角 98° のものを採用した。また、 d_m はテザーを破断させるデブリの最小直径、 d_∞ は ORDEM 2000 でカタログ化されたデブリ最大直径である。軌道上に Δt だけ滞在するときのテザーの生存確率は、以下の式(3)で決定した[13]。

$$P_0 = \exp(-I_f \Delta t) \quad (3)$$

生存確率の計算結果を図 9 に示す。生存確率は Z - X 平面衝突角 θ_{ZX} の増加に伴って減少しているのが確認できる。減少の原因は、 θ_{ZX} の増加に伴う臨界衝突角度 θ_{XYc} の減少にあると考えられる。 θ_{XYc} が減少することで、有効衝突範囲 D_{eff} は増加する。その結果、破断に至らしめる範囲を広く曝すことになる。また、 θ_{ZX} の増加に伴うデブリ最小直径 d_m の減少も原因となる。これらの効果により生存確率に差が生じ、その差は除去対象の軌道滞在時間が長い程大きくなる。従って、中空円筒テザーを厳密に評価するためには、 Z - X 平面衝突角 θ_{ZX} の影響を鑑み、より危険側を考慮したテザー設計が必要である。

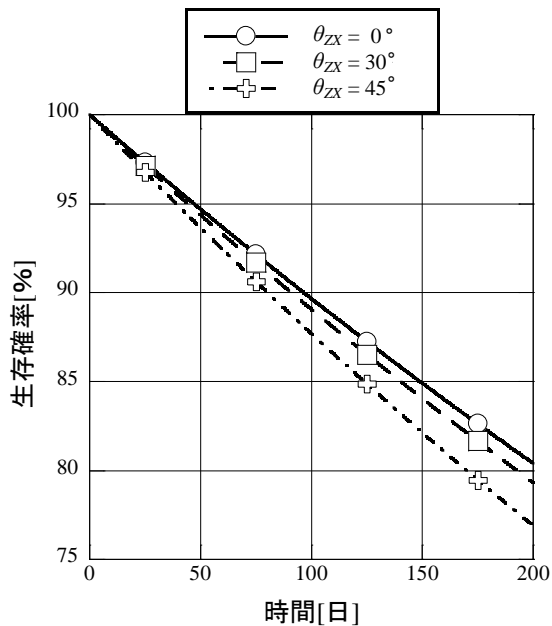


図 9 軌道滞在時間に対するテザー生存確率

5. 結論

本研究では、耐破断性能に優れ実用性の高い導電性テザーとして期待される中空円筒テザーに対して、斜め衝突による損傷評価を行った。超高速衝突実験を行い、デブリ衝突角度とテザー損傷長さとの関係を明らかにした。デブリの衝突角度が増加すると周方向損傷長さが大きくなり、残存率が低下することが分かった。また、斜め衝突を考慮した中空円筒テザーの軌道上での生存確率を評価した。実験の結果から、中空円筒テザーの有効衝突範囲の臨界衝突角度が変化し、垂直衝突で計算された生存確率に比べて、斜め衝突の生存確率は低くなった。これまで行われてきた垂直衝突のみの評価は安全側の設計基準であったことを明らかにし、中空円筒テザーの実用化に向けた厳しい評価を行えるようになった。

参考文献

- [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] Makihara, K. and Kondo, S., "Structural Evaluation for Electrodynamic Tape Tethers Against Hypervelocity Space Debris Impacts," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 55, 2018, pp. 462–472.
- [5] Uwamino, Y., Fujiwara, M., Tomizaki, H., Ohtani, K., and Makihara, K., "Damage of Twisted Tape Tethers on Debris Collision," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 137, 2019, Article No. 103440.
- [6] 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.
- [7] Robert, L. Forward, and Robert, P. Hoyt, "Application of the Terminator Tether Electrodynamic Drag Technology to the Deorbit of Constellation Spacecraft," Tethers Unlimited Inc., 1998.
- [8] Krisko, P. H., Anz-Meador, P. D., Horstman, M. F., Opiela, J. N. and Hillary, E.: NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM 3.0, NASA TP-2014-217370, 2014.
- [9] Makihara, K., Oki, Y., and Hasegawa, S., "Energy Investigation into Damage Evaluation of Pressure Wall at Oblique Impacts," *Transaction of JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol. 14, 2016, pp. Pr_1–Pr_8.
- [10] Makihara, K. and Oki, Y., "Bayesian Cloud Extraction for Assessment of Space-Debris Impact Using Conditional Entropy," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 54, 2017, pp. 1235–1245.
- [11] Sasahara, K., Uwamino, Y., Hasegawa, S., and Makihara, K., "Fracture Investigation of Hollow Cylindrical Tether during Space Debris Impact," *Transaction of JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol. 17, No. 3, 2019, pp.383–391.
- [12] Liou, J. C., Matney, M. J., Anz-Meador, P. D., Kessler, D., Jansen, M., and Theall, J. R.: The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM-2000, NASA/TP-2002-210780, 2002.
- [13] 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.