

テザーのデブリ臨界切断直径導出試験と評価

○吉崎裕人(法政大学), 東出真澄, 河本聡美(JAXA),
壹岐賢太郎(早稲田大学), 新井和吉(法政大学), 長谷川直(JAXA)

1. 研究目的及び背景

宇宙活動の影で、使われなくなった人工物がスペースデブリ(以下デブリ)として地球軌道上を周回しており、運用中の衛星や国際宇宙ステーションへ衝突するという問題が発生している。デブリを除去するために、JAXAにて研究されているのが導電性テザーシステムである¹⁾。Fig. 1に導電性テザーシステムの概略図を示す。導電性テザーシステムは地球磁場と自身に流れる電流の相互作用によるローレンツ力を推進(減速)力に利用するシステムである。メリットは、従来多く使われてきた化学推進と違い、推進剤を用いずに軌道降下が可能だということである。デメリットは、テザーは数 km の長い構造物であるためデブリに当たりやすく、衝突して切断されれば自身がデブリになってしまう可能性がある。テザーによるデブリ除去ミッションを実施するためには、宇宙空間に打ち上げた際の寿命評価を行う必要がある。

ミッション期間内の寿命評価に関する計算手法についての研究は花田ら²⁾やPardiniら³⁾などが実施している。その算出方法では Fig. 2 で赤く表される臨界切断直径 D_{TC} を用いている。臨界切断直径 D_{TC} とは仮想のテザー直径で、この範囲内にデブリが通過・接触した際にテザーが切断すると考える。 D_{TC} を求めなければ正確なミッション期間の生存確率を推定することができず、最悪の場合自身がデブリになってしまう。従って D_{TC} はミッション遂行に必要なデータだが、そのデータを求める研究は少ない。試験方法は JAXA の研究で考案されているが、信頼性の高い試験方法は確立されていない⁴⁾。

本研究の目的は、テザー寿命を評価するために必要なパラメータ D_{TC} を求める試験方法を確立することである。その試験方法を用いて、単線テザーと撚線テザーの D_{TC} を比較し、撚線構造による耐デブリ衝突性能の向上を定量的に評価する。

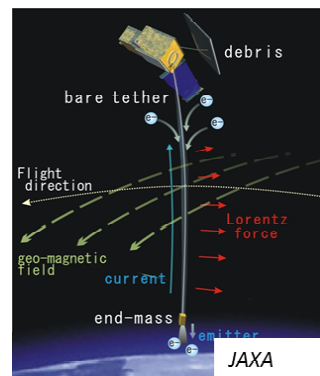


Fig. 1 Electrodynamic tether system

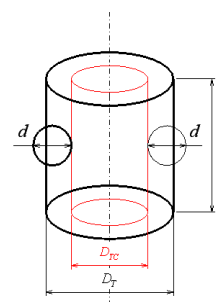


Fig. 2 Critical tether diameter

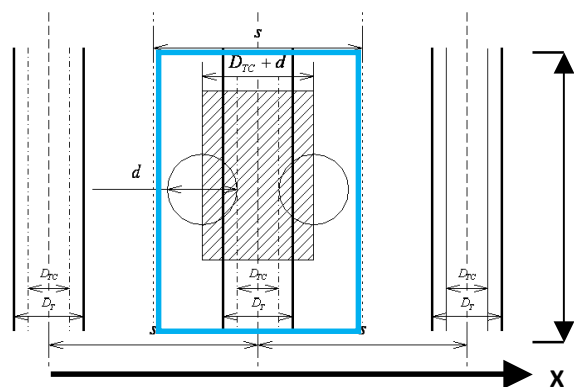


Fig. 3 Effective cross-sectional area

2. D_{TC} の算出方法

D_{TC} を求める方法を述べる。直径 D_T のテザーを間隔 s 毎に並べ、それに向けてデブリを模擬した直径 d の飛翔体を N 個衝突させる。飛翔体は一様に広がってテザーが並んだ面を通過すると仮定する。飛翔体が D_{TC} に接触するとテザーは切断されるので、 D_{TC} と飛翔体直径 d を用いて、テザーが切断される範囲を(1)式で表し、有効衝突断面積と呼ぶ。

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

Fig. 3 の斜線部が有効衝突面積で、弾道が有効衝突面積内にある場合テザーは切断されると考える。切断されたテザーの数を N_C とする。有効衝突面積が Fig. 3 の青枠の s の範囲に占める割合は、 N_C が N に占める割合に等しいので以下の関係を得ることができる。

$$\frac{N_C}{N} = \frac{D_{TC} + d}{s} \quad (2)$$

N_C , N は実験から求められる値なので、 D_{TC} を確率的に求めることができる。

3. 高速衝突試験

高速衝突試験を2011年8月、2012年1月に宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて行った。飛翔体には ϕ 0.3 mm の Al 球を使用し、サボを用いて複数個の飛翔体を散弾方式で5~6 km/s で発射した。8月は従来のターゲット設置方法で実施し、1月は設置方法を改良して試験を行った。使用したテザーを Fig. 4 に示す。用いたテザーは、 ϕ 0.258 mm のワイヤー1本からなる単線テザーと、 ϕ 0.178 mm のワイヤーを2本撚り合わせた撚線テザーを使用した。材料は両方とも SUS304 である。単線と撚線の線密度を近い値に設定した。ターゲットは三段構えでチャンパー内に設置される。飛翔体はまず厚さ 12.5 μ m のポリミドフィルムを通過する。次に、間隔 3 mm に張られたテザーに衝突する。最後に Witness Plate に衝突し、飛翔体は止まる。各要素間の距離は L とした(従来は 200 mm)。フィルムに開いた穴を数えることにより飛翔体の数 N を、試験後のテザーを観察することにより切断本数 N_C を求め、式(2)より D_{TC} を算出する。

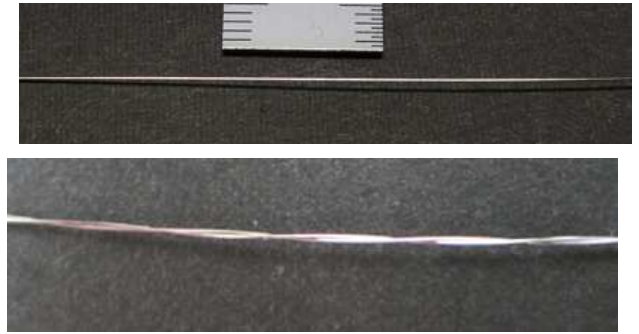


Fig. 4 Used tether (Up:Single tether, Below:Stranded tether)

4. ターゲット設置方法の改良

8月の試験の飛翔体の弾道を調べると、Fig. 5 の点線で示す垂直入射弾道より大きくずれていることが確認できた。ずれ ΔX は最大で約 7 mm、入射角は約 1° ずれていることが分かった。

本研究の試験理論は等間隔のテザーに一様に分布した飛翔体が通過することを仮定している。一様とは本試験の場合、任意の x 座標に飛翔体が2個以上重ならないことを意味する。従って、Fig. 6 に表されるように、 x 座標が重なった飛翔体群は1個の飛翔体として数える。飛翔体弾道のずれが 7 mm あるという事は、7 mm の範囲内で重なる可能性があり、その範囲内の飛翔体群を1個の飛翔体と数える (Fig. 7)。しかし、 D_{TC} 算出方法は確率の概念を用いているので、 N が少なくなるとデータの信頼性が低くなる。つまり、 ΔX を小さくすることが出来れば、有効な飛翔体数が多くなるので、試験データの信頼性は向上する。ターゲット間隔 L を 200 mm から 60 mm に短縮して入射角の影響を少なくした。

次に、ターゲットのスケールを変更した。その結果、従来は1個あたり3時間程かかっていたターゲット作成時間を1時間程に短縮することができた。また、テザーの固定方法も変更した。錘を用いてテザーにかかるテンションを 200 g と一定にすることで、テンションの影響を無視できるようにすることが目的である。改良したターゲット装置を Fig. 8 に示す。

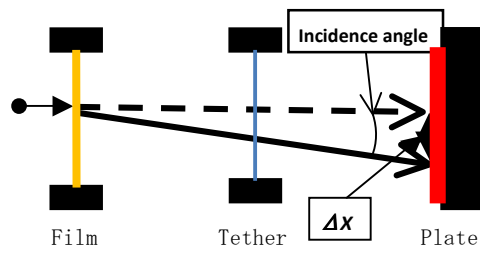


Fig. 5 Projectile ballistic gap

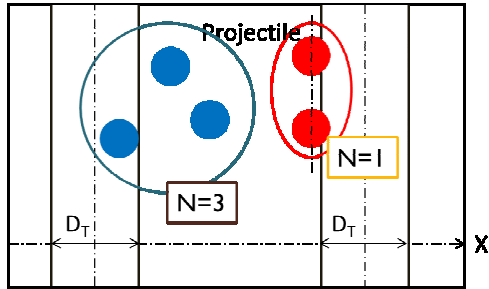


Fig. 6 Projectiles in consideration of uniform distribution

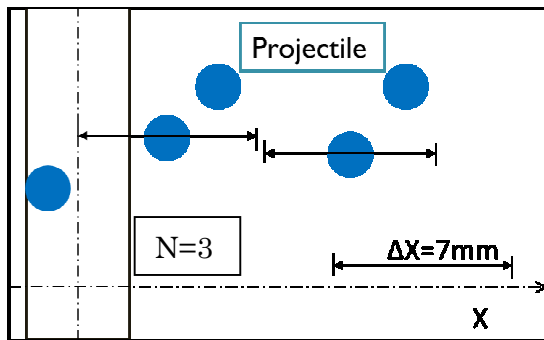


Fig. 7 Effect of projectile ballistic gap

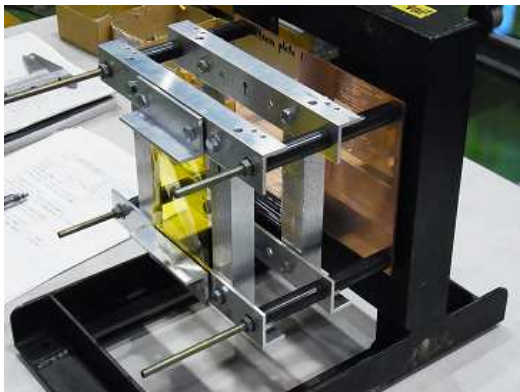


Fig. 8 Developed target equipment

5. 試験結果

改良した設置方法で 1 月に高速衝突試験を行った。単線 4 個，撚線 4 個のデータを得ることができた。Table 1 に一回の試験で得られる平均飛翔体数 N_0 ， ΔX を考慮して算出した平均飛翔体数 $N_{\Delta X}$ ，そして飛翔体数の減少率を示す。 $\Delta X=2.1$ mm は入射角 1° と仮定したときの予測値で， $\Delta X=1.0$ mm は今回の試験結果で得られた ΔX の平均値である。Table 1 から， ΔX を小さくしたことで飛翔体数の減少を抑えることができたので，改良後の設置方法でより信頼性の高いデータを多く得られることが分かった。

Fig. 9 に改良前と改良後の単線における D_{TC}/D_T の最大値と最小値の差を示す。改良前の試験ではばらつきが大きかったが，今回は 32.7 %ばらつきを減少させることができた。これはテザーのテンションを一定にしたことによるものと考えられる。

Table 2 より単線と撚線の D_{TC}/D_T を比べると，撚線の値は単線の値より $\Delta X=2.1$ mm と考えると 30%， $\Delta X=1.0$ mm と考えると 11%小さいことが分かった。今回の結果で ΔX が 2.1 mm のずれは発生せず，約 1 mm のずれが確認できた。しかし，本研究では，試験数が 4 回と少ないので，精度よく D_{TC} を導出するためには今後同条件で，より多くの試験を重ねることが必要である。

Table 1 Average number of countable projectiles

	Original ($\Delta X=7$ mm)	Developed ($\Delta X=2.1$ mm)	Developed ($\Delta X=1$ mm)
N_0	30.7	17.0	17.0
$N_{\Delta X}$	15.3	12.3	14.0
$(N_0 - N_{\Delta X}) / N_0$	0.50	0.28	0.18

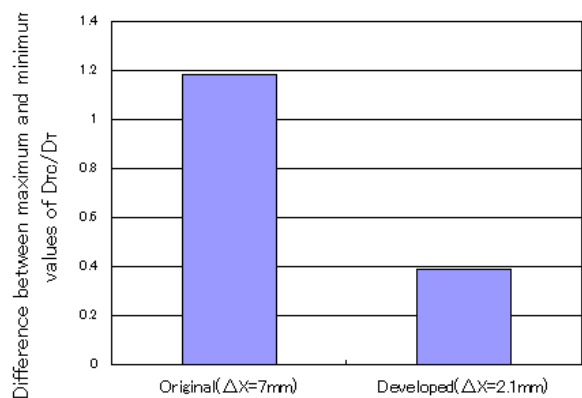


Fig. 9 Variation of D_{TC}/D_T

Table 2 D_{TC}/D_T of single and stranded wires

	ΔX	Single	Stranded	Stranded/Single
D_{TC}/D_T	2.1 mm	0.90	0.28	0.30
	1.0 mm	0.65	0.07	0.11

5. 結論

フィルムとテザーの距離を短くすることで飛翔体のばらつきを抑えることができ、従来の設置方法よりも多くの試験データを得ることができた。テザーのテンションを一定にすることで D_{rc} のばらつきを抑えることができた。したがって、従来の試験方法よりも信頼性の高い試験方法を確立することができた。また、単線テザーと比べて撚線テザーはデブリ衝突による切れにくさが70%向上することがわかった。

参考文献

- 1) 大川恭志, 河本聡美, 松本康司, 塩見裕, 東出真澄, 上村平八郎, 仁田工美, 北村正治, 木部勢至朗, 軌道上実証を目指した導電性テザー推進の要素技術研究, 第55回宇宙科学技術連合講演会, 1K05, 2011年
- 2) 花田俊也, 平山寛, 大石篤, 田中陽介, 八坂哲雄, 宇宙用テザーの残存率評価について, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 54, No. 630, pp. 295-304, 2006.
- 3) C. Pardini, L. Anselmo, T. Hanada, H. Hirayama, Assessing the Vulnerability to Debris Impacts of Electrodynamic Tethers during Typical De-Orbiting Missions, Proc. 4th European Conference on Space Debris (ESA SP-587), pp. 353-360, 2005.
- 4) 柳田篤史, 河本聡美, 東出真澄, 小野瀬直美, 長谷川直, 壺岐賢太郎, 戸田勲, 導電性テザー寿命評価の為の高速衝突試験に関する研究, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 3I07, 2010年.