

導電性テザーへの超高速衝突試験について

河本聡美、東出真澄（JAXA 研究開発本部）、柳田篤史、壹岐賢太郎、戸田勸（早稲田大学）
小野瀬直美、長谷川直（JAXA）

1. 概要

スペースデブリ除去のための高効率推進系として有望と考えられている導電性テザーについて、微小デブリ衝突による切断確率評価のためのパラメータ取得を目的として、二段式軽ガス銃を用いた超高速衝突試験を実施した。導電性の撚線テザーを多数並べ、サボを用いて多数の数百 μm サイズの模擬デブリを衝突させ、テザーを切断しうるデブリ最小径や切断臨界距離（デブリがテザーの中心からどのくらいの距離を通過したときに切断するか）を評価した。

2. スペースデブリ除去について

スペースデブリ（宇宙ごみ）は年々増加しており、近年そのリスクは無視できないレベルに達している。2011年3月現在16000個を超える物体がカタログ化（地上から観測されて起源、軌道が同定されていること、低軌道約10cm以上、静止軌道約1m以上）されており、その95%程度がデブリと考えられている。デブリは低軌道では秒速7km以上と非常に高速で運動しているため、微小デブリでも宇宙機に衝突すれば大きな被害を引き起こす。1cm級デブリが衝突すると宇宙機は壊滅的な被害を受けると考えられており、数百 μm のデブリでもハーネス等のクリティカルな部位に衝突するとミッションに影響を与える故障を引き起こす。カタログ化物体は衝突が予測されれば衝突回避マヌーバが可能であるが、衝突回避運用はミッションの中断等、運用への負担が大きい。また、数百 μm サイズのデブリは防御が可能である場合もあるが、衛星設計に対する負担は大きい。その中間のサイズは衝突回避も防御も不可能である。このようにデブリは宇宙開発を継続するうえで大きな問題となりつつある。

さらに、今後は衝突による破片がデブリ増加の支配的要因になると予測されている。デブリの減少要因はごく少数の回収を除けば大気抵抗による自然落下のみであり、衝突によ

る増加率と減少率が釣り合う臨界密度を超えてデブリが存在すると、それ以上物体を投入しなくてもデブリの数が増加していく。すでに高度1000km付近、1500km付近等の混雑した軌道ではこの自己増殖が発生しているとの各国の検討結果が報告されている[1][2]。実際に、カタログ化物体同士の衝突は1991年、1996年、2005年、そして2009年とすでに4回発生しており、今後も5~10年に一度衝突し、多数のデブリが発生すると考えられている。すなわち、宇宙環境を維持するためには今後デブリを発生させないような防止策だけでは不十分であり、今軌道上にあるデブリの除去が必要である。2006年よりIAA（International Academy of Astronautics）でデブリ環境改善に関するスタディが開始された他、2009年末以降、米国、ロシア、欧州、中国がデブリ除去に関する会議を開催する等、世界的にもデブリ除去に関する活動が活発になってきている。レーザーやスパーによる微小デブリの除去も提案されているが、数が非常に多く効率が悪いうえ、微小デブリをいくら除去しても、大型デブリを放置すると衝突により再び無数の微小デブリを発生させるため、大型デブリの除去が早急に必要であると考えられている。特に、太陽同期軌道や高度1000km付近等の特定の混雑軌道で衝突が多数発生すると予測されており、これらの混雑軌道から年間5個程度、あるいはトータルで100~150個レベルの大型デブリを除去することにより増加率を大きく低下できることが分かっている[2]。

JAXAでも以前より混雑軌道の大型デブリを能動的に除去するための衛星システムについて検討している[3]。デブリの除去はなるべく低コストで達成できることが重要であり、そのために1機のデブリ除去衛星で複数個のデブリを除去、あるいはピギーバック等の小型衛星でデブリを除去するため、デブリを捕獲した後の軌道変換技術がキーとなっている。

3. 導電性テザー

高度 1000km 付近等の混雑した軌道にあるデブリを除去するために従来型推進系を用いると大量の燃料が必要となるため、高効率推進系として、導電性テザー推進が注目されている。導電性テザーとは、長さ数 km 程度の導電性のテザー（紐）を伸展し電流を流すことにより、地磁気との干渉を利用して軌道降下させる推進系である（図 1）。原理的に燃料、大電力が不要であり、また微小推力であるためデブリへの取り付けが比較的容易であるというメリットがある。数 km 程度の導電性テザーにより、大型デブリを 1 年以下程度でデオービットできると考えられている [3][4]。

導電性テザーシステムの問題点として、テザーは非常に長大な構造物であり、ミッション中に微小デブリとの衝突により切断される恐れがあることがあげられる。テザーは非常に細いので、断面積（テザーの長さ×太さ）は小さいが、デブリ衝突は超高速衝突であるため、デブリがテザーの断面積内を通過せずかすただけでもテザーが切断される恐れがある。そのためテザーが切断されるテザーの有効断面積はデブリの大きさも考慮する必要がある、テザーを細くしても小さくすることができず、数 km のテザーは混雑軌道では数日で切断されると考えられている [5][6]。そこで、テザーを網にすることによって微小デブリの衝突による切断に対しての冗長性を持たせることを考えているが（図 2）、ミッションの必要期間テザーを維持することができるか、テザーの寿命評価が必要である。

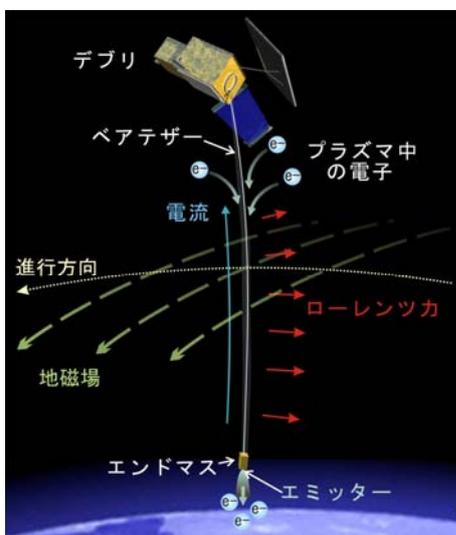


図 1 導電性テザーを用いたデブリ除去

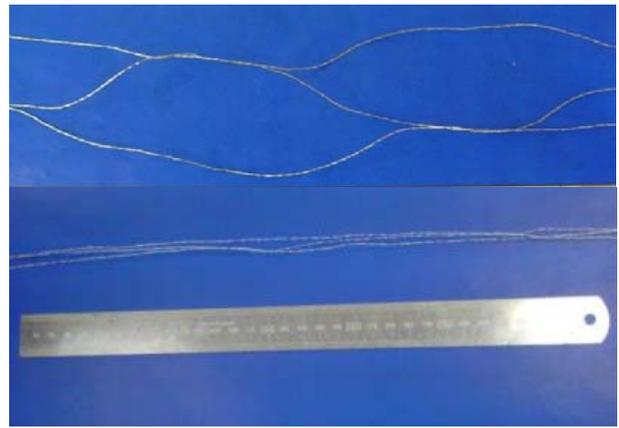


図 2 網状テザー（上は強制的に広げたもの）

4. 超高速衝突試験について

4.1. 実験の目的および対象

テザーのデブリ衝突切断寿命は、最小切断デブリ径(minimum fatal debris diameter) d_c およびテザー切断臨界距離 (critical distance) D_{TC} により評価されてきた [6]。今までに化学繊維のテザーの高速衝突試験は行われ、例えば、IADC (国際機関間デブリ調整会議) の WG3 による Protection Manual [7] においては、直径 $\phi 0.75 \text{ mm}$ の化学繊維テザーの $D_{TC} = 0.27 \sim 0.4 D_T$, $d_c = 0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ であると報告されているが、導電性の撚線状のテザーについてはこれらの値は報告されていないため、金属撚線テザーの d_c , D_{TC} を求めるため、模擬デブリによるテザーへの高速衝突試験を実施した。

実験に用いるテザーは、プラズマから直接電子を収集するための被覆のないベアテザーとし、軽量かつ導電率のよいアルミワイヤ (A6063-O) を用いている。またアルミワイヤだけでは強度が低いため、高強度繊維で補強することを考えているが、本試験では小型衛星用のステンレス繊維を用いて補強されているテザーを用いた。本テザーは図 2 のように 3 本の網糸からなる。 $\phi 0.1 \text{ mm}$ のステンレス繊維 1 本と $\phi 0.15 \text{ mm}$ のアルミワイヤ 2 本をよって子糸とし、その子糸 2 本を撚って網糸としている。衝突試験は網糸に対して実施した。

4.2. テザー切断確率計算方法

衝突試験では、細いテザーの決められた位置に微小デブリを衝突させるのも衝突位置を特定するのも困難であるため、網糸を多数並べて配置し、多数の微小デブリを発射することとした（図 3）。飛翔体のサイズ d を変えて実験を行い、

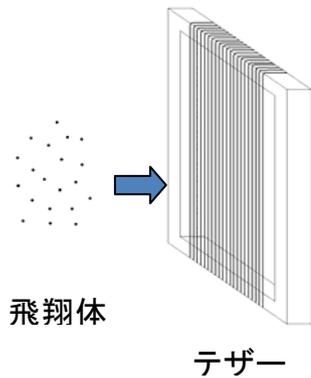


図 3 導電性テザーへの超高速衝突試験方法

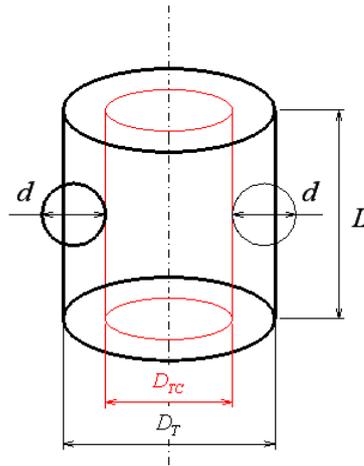


図 4 D_{rc} の範囲の概念図。デブリが赤い線の内部を通過したときテザーを切断すると考える

テザー径 D_T を切断する最小のデブリ径 d を、最小切断デブリ径 d_c とする。図 4 のように、テザーの軸と中心を同じくする直径 D_{rc} の円柱空間内をデブリ径 d_c 以上のデブリが通過したときテザーが切断されるとし、 D_{rc} をテザー切断臨界距離と呼ぶ。図 5 のように、テザーとテザーの間隔を s とすると、 N 個の金属球が発射されたときのテザー切断箇所期待値 N_c は、

$$\frac{N_c}{N} = \frac{D_{rc} + d}{s} \quad (1)$$

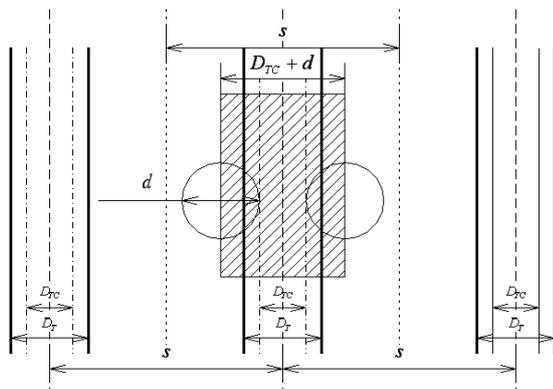


図 5 衝突有効断面積

N_c : 飛翔体がテザーを切断した箇所の数

N : 飛翔体の数

となる。よって、 N_c 、 N は実験から求められる既知の値なので、 D_{rc} は次式より求めることができる。

$$D_{rc} = \frac{N_c}{N} s - d \quad (2)$$



図 6 衝突試験ターゲットの構成

4.3. 試験方法

JAXA/ISAS の相模原キャンパスの二段式軽ガス銃を用いて速度 $5 \sim 6 \text{ km/s}$ で多数の微小飛翔体を散弾状に射出し、並べて設置されたテザーに衝突させた。模擬微小デブリとなる飛翔体は 150 、 200 、 $300 \mu\text{m}$ のステンレス球および 100 、 200 、 $300 \mu\text{m}$ アルミニウム球を用いた。ターゲットは図 6 の様な治具を用い、飛翔体数を確認するための $12.5 \mu\text{m}$ ポリイミドフィルム、テザー、ウィットネスプレートに順に並べて設置した (図 6)。テザー網糸 (直径約 0.4 mm) は $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ の領域に 3 mm の間隔で並べた。高速度カメラで撮影した衝突の映像、ポリイミドフィルム、テザーを観察し、式 (2) を用いて切断臨界距離を評価した。

4.4. 試験結果

衝突試験の結果の例を表 1、図 7、図 8 に示す [8]。ステンレス球の $\phi 300 \mu\text{m}$ 、 $\phi 200 \mu\text{m}$ 、アルミニウム球の $\phi 300 \mu\text{m}$ が衝突したときには切断されたがアルミニウム球 $\phi 200 \mu\text{m}$ 、 $\phi 100 \mu\text{m}$ が衝突したときには切断されなかった。図 8 のようにフィルムとウィットネスプレートを重ね合わせ、それをテザーと比較する事により、飛翔体がどのような進路をとり、テザーやウィットネスプレートと衝突したかを推測することが出来る。テザーに衝突しなかった飛

表 1 衝突試験結果

	飛翔体	テザー	切断の有無	D_{TC}/D_T
Test I	SUS, $\phi 300\mu\text{m}$	SUS-AI	有り	-0.0898
Test II	SUS, $\phi 200\mu\text{m}$	SUS-AI	有り	-0.2999
Test III	Al, $\phi 300\mu\text{m}$	SUS-AI	有り	-0.0262
Test IV	Al, $\phi 200\mu\text{m}$	SUS-AI	無し	—
Test V	Al, $\phi 100\mu\text{m}$	SUS-AI	無し	—

翔体はそのままウィットネスプレートに衝突していることがわかる。テザーに衝突した場合は軌道がそれて、本来の衝突痕があるべき場所から 20mm 近くずれた場所に衝突痕が出来たケースもあった。飛翔体が破損し二つ以上に分裂しているケースも観察された。飛翔体が破損、分裂した場合、ウィットネスプレートに出来るクレーターテザーに衝突せずに生じたクレーターよりも小さくなった。テザーの D_{TC} はどれも負の値をとっている。これは、飛翔体が $|D_{TC}|$ の範囲全てを横切らないとテザーは切断されない事を意味している。この値は撚線化学繊維の試験において得られた $D_{TC} = 0.27 \sim 0.4 D_T$ よりも小さく、金属撚線テザーの耐デブリ衝突性能は良いと言える。ただし、試験毎に得られる D_{TC} のばらつきは大きく、同条件での試験を複数回実験する必要があることが分かった。

5. まとめ

導電性テザーの微小デブリ衝突切断による切断確率の評価に必要なパラメータを求めため、テザーへのデブリ衝突試験を実施した。二段式軽ガス銃を用いて、多数並べたテザー対し 5~6km/s で多数の模擬デブリを射出し、テザーを切断する最小デブリ径 d_c の範囲をもとめた。また、切断の確率期待値と実際の切断数を比較することによって、テザー切断臨界距離 D_{TC} を求めた。金属撚線テザーの耐デブリ衝突性能は化学繊維に比べ良好であることが分かったが、試験結果はばらつきが大きく、複数回試験が必要であることが分かった。

参考文献

[1] Liou, J.-C and Johnson, N.: Risks in Space from Orbiting Debris Science, 311(2006), pp.340-341.
 [2] Maniwa, K., Hanada, T. and Kawamoto, S.: Benefits of Active Debris Removal on the

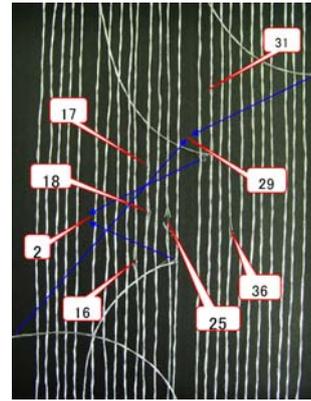


図 7 衝突後のテザーの様子

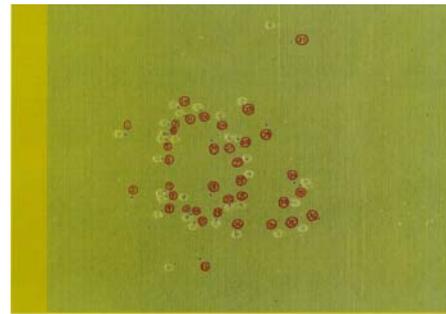


図 8 衝突後のポリイミドフィルムとウィットネスプレートを重ねたところ

LEO Debris Population, 27th ISTS-r-2-04, 2009.
 [3] Kawamoto, S. Ohkawa, Y., et al.: Strategy for Active Debris Removal Using an Electrodynamic Tether, ISTS-r-2-36, 2008. (Trans. JSASS Space Tech. Japan, 7, ists26 (2009), pp. Pr_2_7-Pr_2_12.)
 [4] Ohkawa, Y., Kawamoto, S., et al.: Research and Development of Electrodynamic Tethers for Space Debris Mitigation, Trans. JSASS Space Tech. Japan, 7, ists26 (2009), pp. Tr_2_5-Tr_2_10.
 [5] McBride, N. and Taylor, E. : The risk to satellite tethers from meteoroid and debris impacts, pp. 643-648, ESA-SP-393, 1997.
 [6] Carmen Pardini, Toshiya Hanada, Paula H. Krisko, Benefits and risks of using electrodynamic tethers to de-orbit spacecraft, Acta Astronautica 64, p571-588, 2009.
 [7] The IADC WG3 members, PROTECTION MANUAL IADC-04-03 Version 3.3 Revision April 04, pp. 3-65-3-69, 2004
 [8] 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、柳田篤史他、第 54 回宇宙科学技術連合講演会、3I07、2010 年