

テープテザーの生存確率評価のためのデブリ衝突損傷モデルの構築

○近藤周¹, 沖義弘¹, 長谷川美貴², 石井あゆみ², 土屋佑斗², 近藤一希², 榎原幹十朗¹

1: 東北大学 航空宇宙工学専攻

2: 青山学院大学 化学・生命科学科

1. 緒言

近年の宇宙開発に伴い、地球軌道上にスペースデブリ（以下、デブリ）と呼ばれる人工の不要な物体が増え続けている^[1]。これらは平均速度 7 km/s と高速であるため、微小なデブリの衝突でも宇宙構造物が破壊される恐れがある。このままデブリが増え続けると、デブリの自己増殖（ケスラーシンドローム）が発生する可能性もあり、将来の宇宙活動に支障をきたしてしまう。そのため、能動的なデブリ除去を行う必要がある。

デブリ除去手法の一つとして、テザーシステムによる除去が提案されている^[2]。導電性テザーによるデブリ除去の概略図を第 1 図に示す。テザーに電流を流すことで地磁場との干渉でローレンツ力が発生し、除去対象を減速させ高度を落とすことが可能となる。過去の研究において、花田らはシングルテザーとダブルテザーの生存確率の計算方法を示した^[3]。河本らは、撚り線テザーに対してデブリ衝突実験を行い、テザーの破断限界を示した^[4]。吉崎らは異なる実験装置を用いて、撚り線テザーに対するデブリ衝突実験を行った^[5]。榎原らはデブリ衝突によるテザーの破壊について論じている^[6]。現状の課題として、テザーは構造的に弱く、微小なデブリの衝突で破断してしまうこと挙げられる。デブリによってテザーが破断すると、テザー自身がデブリとなってしまう、宇宙のデブリ環境を悪化させてしまう。そのため、デブリ除去ミッションを確実に成功させられるようなテザー構造を考える必要がある。

新たなテザー構造として、テープ状のテザー（テープテザー）が考案されている。藤井らはテープテザーの展開システムに関するシミュレーション、実験を行った^[7]。松崎らは、テープテザー展開実験を行い、その展開挙動を明らかにした^[8]。テープテザーの利点として、紐状テザーに比べ除去スピードが早いこと、収納スペースを小さくできることなどがある。しかし、デブリの衝突がテープテザーの損傷に与える影響は、未だ完全に解明されていない。Francesconi らはアルミテープテザーとデブリの衝突実験を行い、衝突角度とテープテザー損傷の関係性を示した^[9]。しかし彼らは 1 種類のアルミテープのみを用い、テープ厚さが損傷に与える影響を示していない。Khan らは、直径・衝突角度・衝突箇所の 3 点からテープテザーが破断するかどうかを判断する、テープテザーの損傷モデルを提案した^[10]。しかし彼らの損傷モデルは実験に基づくものではなく、実際のテザー損傷と異なることがわかっている。

本研究では 3 つの目的を定めた。1 つ目は、高速衝突実験を行い、デブリ衝突においてテープ厚

さがテザー損傷に及ぼす影響を示すことである。2 つ目は、実験結果をもとにテープテザーの損傷モデルを構築することである。どんな大きさのデブリが、どの程度の衝突角度で、テープテザーのどこに衝突した際に破断するかを定量的に示す。3 つ目の目的は、Khan の損傷モデルと比較し、損傷モデルの違いがテープテザーの生存確率にどう影響するかを示す。

また、光化学物質を塗布したバンパを用いて、超高速実験を行い、発光の実験も行った。光化学物質と接着物質を混合し、宇宙ステーションの Whipple bumper を模擬した二枚組アルミ板の二枚目内側に塗る。2 段式軽ガス銃を用いて、スペースデブリ衝突を模擬した超高速衝突実験を行い、衝突部位周りが発光するか検証した。本稿では、この発光実験についても報告を行う。

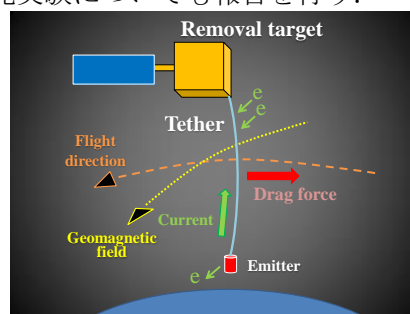


Fig. 1 導電性テザーによるデブリ除去

2. スペースデブリ高速衝突実験

第 2 図に示す、JAXA/ISAS のスペースプラズマ実験施設の二段式軽ガス銃を用いて、スペースデブリ高速衝突実験を行った。実験装置を第 3 図に示す。テープテザーをしきつめ、角度 θ で固定した。実験概要を第 4 図(a)に示す。アルミのプロジェクタイル球を約 7 km/s でテープテザーに衝突させた。ターゲットには幅 $w = 12$ mm, 厚さ $h = 0.3$ mm のアルミテープを用いた。衝突角度 θ で直径 d のプロジェクタイルが衝突した際、生じた損傷穴の x 軸方向長さを、損傷長さ A と定義する。実験を考察するに当たり、損傷長さ A とプロジェクタイル直径 d の比を、損傷比 A/d と定義する。また、プロジェクタイル直径 d とテープ厚さ h の比を、厚さ比 α と定義する。

$$\alpha \equiv d/h \quad (1)$$

第 4 図(b)に、 $\alpha = 2.7$, $\theta = 70$ deg で衝突させた後のテープテザーを示す。このとき楕円形上の貫通穴が生じた。第 5 図に、衝突角度と損傷比の関係性をグラフで示す。グラフから 2 つの特徴が見られた。①に示すように、 α が小さいほど $\theta = 0$ deg において A/d の値は大きくなっている。また②に

示すように、 α が小さいほど $\theta = 60 \text{ deg}$ 以降の勾配が小さくなることわかる。テープテザーの損傷は α が大きいときはKhanの手法に近く、 α が小さいほどKhanの手法とは異なることがわかった。

損傷モデルを構築するに当たり、デブリ衝突によってテープテザーに生じる損傷比及び損傷長さを予測する必要がある。最小二乗近似を用いて、損傷長さ A は以下のような d, α, θ の関数で表せる。

$$A(d, \alpha, \theta) = d \cdot f(\alpha) \left(\frac{1}{\cos \theta} \right)^{g(\alpha)} \quad (2)$$

これより、テープテザーの厚さ h が損傷に与える影響を示すことができた。



Fig. 2 二段式軽ガス銃

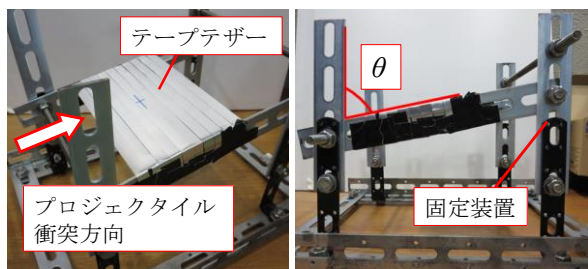


Fig. 3 テープテザー固定装置

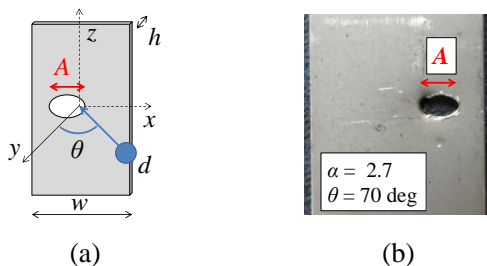


Fig. 4 実験概要(a)と実験後のテープテザー(b)

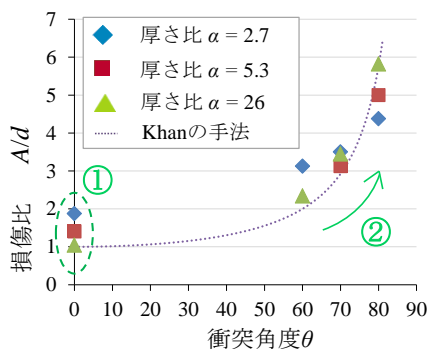


Fig. 5 衝突角度 θ と損傷比 A/d の関係性

3. テープテザーのデブリ衝突損傷モデル

テープテザーのデブリ衝突損傷モデルとは、どんな大きさのデブリが、どの程度の衝突角度で、テープテザーのどこに衝突した際に破断するかを定量的に示したものである。テープテザーの破断を考えるに当たり、限界損傷長さ A_c を定義する。損傷長さ A が A_c を超えたとき、テープテザーは破断すると仮定する。第6図に、式(2)をグラフにしたものを示す。(i)は A の最大値が A_c と等しくなるときを表す。ここでは $\theta = 80 \text{ deg}$ のときを最大としている。(ii)は(i)よりも d が大きくなった場合である。(iii)はさらに d が大きくなり、 $\theta \geq 0$ で A が A_c を上回る場合である。以下ではデブリ直径、デブリ衝突角度、デブリ衝突位置の3つから損傷モデルを示す。

3.1 最小デブリ直径 d_c

テープテザーを破断し得る最小のデブリ直径を、最小デブリ直径 d_c と定義する。 $d < d_c$ のデブリ衝突では衝突角、位置によらずテープテザーは破断しない。第6図の(i)のように、 A の最大値が A_c と等しくなるときのデブリ直径が、最小デブリ直径 d_c となる。

3.2 臨界衝突角 $\theta_c(d)$

$d \geq d_c$ のデブリ衝突によってテープテザーが破断するときの最小の衝突角度を臨界衝突角 $\theta_c(d)$ と定義する。 $\theta < \theta_c(d)$ ではデブリ直径、衝突位置によらずテープテザーは破断しない。第6図の(ii)において、損傷長さ A の近似曲線と $A = A_c$ の直線が交わるときの衝突角度が臨界衝突角 $\theta_c(d)$ となり、 d の関数で表せる。

3.3 有効衝突範囲 W_{eff}

第7図にテープテザーとデブリの衝突を、デブリ進行方向から見た図を示す。デブリの中心が有効衝突範囲 W_{eff} 内を通過した際、テープテザーは破断すると定義する。第7図(a)に、 $A(d, \alpha, \theta = 0) < A_c$ の場合(第6図の(i), (ii))を示す。 $d \geq d_c$ かつ $\theta \geq \theta_c(d)$ のとき、デブリの中心が W_{eff} 内を通過すると $A \geq A_c$ となる。一方 W_{eff} 外を通過したときは、テザー端は有限であるために損傷が途中で切れ、 $A < A_c$ となる。第7図(b)に、 $A(d, \alpha, \theta = 0) \geq A_c$ の場合(第6図の(iii))を示す。同様に、デブリの中心が W_{eff} 内を通過するとテザーは破断すると定義する。 W_{eff} は以下の式のように表すことができる。

・ $A(d, \alpha, \theta = 0) < A_c$ の場合(第6図の(i), (ii)):

$$W_{\text{eff}} \equiv (w - A_c) \cos \theta + h \sin \theta \quad (3)$$

・ $A(d, \alpha, \theta = 0) \geq A_c$ の場合(第6図の(iii)):

$$W_{\text{eff}} \equiv (w - 2A_c + A(d, \alpha, \theta)) \cos \theta + h \sin \theta \quad (4)$$

以上よりテープテザーの損傷モデルを示した。テープテザーは、直径 d_c 以上のデブリが角度 θ_c 以上で、 W_{eff} の範囲内に衝突した際に破断すると定義できる。

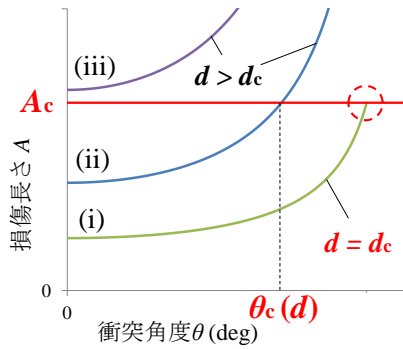


Fig. 6 損傷長さ A の近似式曲線

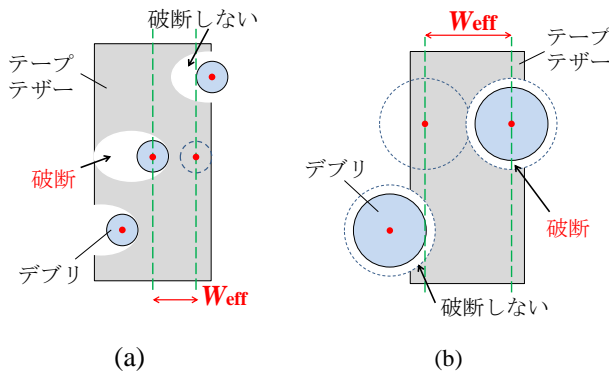


Fig. 7 有効衝突範囲 W_{eff} の概略図

4. 生存確率計算

前章で示した損傷モデルより、テープテザーの軌道上生存確率を計算し、Khan らの損傷モデルを用いて計算した結果と比較する^[10]。幅 $w = 12 \text{ mm}$ 、厚さ $h = 0.3 \text{ mm}$ 、長さ $L = 10 \text{ km}$ のテープテザーが高度 800 km 、傾斜角 28.5 deg の軌道上に 1 年間滞在した後の生存確率を計算する。

生存確率 $P(t)$ は、破断確率 N_c を用いて表せる。 N_c は単位長さ、単位時間あたりのテザーの破断確率 ($1/\text{km}/\text{year}$) を表す。最小デブリ直径 d_c 、臨界衝突角 θ_c 、有効衝突範囲 W_{eff} を用いて、 $P(t)$ および N_c は以下のように表せる。

$$P(t) = P(0) \exp(-N_c t) \quad (5)$$

$$N_c = -\frac{2L}{\pi} \int_{\theta_c}^{\pi} d\theta \int_{d_c}^{d_\infty} W_{\text{eff}} \frac{dF(d)}{dd} dd \quad (6)$$

なお、 $P(0) = 100\%$ である。 d_∞ は通常 1 m とされる^[10]。 $F(d)$ は累積デブリ流束であり、直径 d 以上のデブリの総数を表す。生存確率を計算するに当たり、 $F(d)$ には NASA の ORDEM2000 を用いた^[11]。これを第 8 図に示す。

Khan の損傷モデルと本研究の損傷モデルを用いて計算した生存確率を第 9 図に示す。このとき、
 ・Khan らの損傷モデルを用いた結果： $P(1) = 52\%$
 ・本研究の損傷モデルを用いた結果： $P(1) = 64\%$ となった。本研究の損傷モデルを用いて計算した生存確率の方が大きくなった。生存確率に違いが出た主な要因として、最小デブリ直径 d_c の違いが挙げられる。Khan はエネルギー的観点から理論計算を行い、 $d_c = 0.71 \text{ mm}$ と求めた。しかし本研究では、 $d_c = 0.94 \text{ mm}$ となった。Khan はテープテザー

の破断について、過剰に危険側に見積もっていたことがわかる。本研究の手法を用いることで、実際の衝突現象に即した正確なテープテザー生存確率を計算することができ、コストダウンの余地があることがわかった。

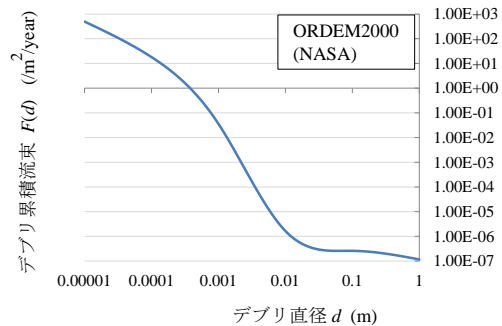


Fig. 8 ORDEM2000 によるデブリ流束モデル

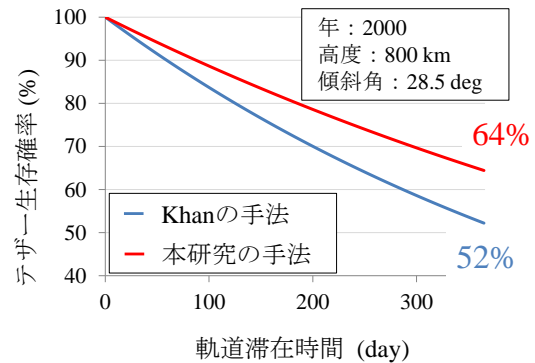


Fig. 9 生存確率計算結果

5. 超高速衝突による発光実験について

5.1 背景

増加するデブリの衝突によって、宇宙構造物は大きく損傷する危険性がある。特に国際宇宙ステーションなどの有人宇宙施設にデブリが衝突し与圧壁が貫通すれば、中の空気が漏れてしまう重大な事故につながりかねない。デブリの衝突から与圧壁を防護することが重要であるが、状況によっては完全には防護できない場合が考えられる。そのため対策として、貫通箇所を早急に発見し穴をふさぐことが挙げられる。しかしながら、デブリ衝突の衝撃で電気系統が故障し、従来の損傷位置同定手法が使えない可能性がある。そこで、暗闇の中でも貫通穴の位置を同定できる手法が求められる。

本研究では、急激な温度・圧力上昇をトリガーにして長時間発光・蓄光する光化学物質を与圧壁内側に塗布することで、暗闇でも衝突貫通穴の周りを長時間発光させ続けるシステムを構築することを研究目的としている。

5.2 実験方法・結果

今回の実験では、残光が 1500 分以上持続するユウロピウムを含む無機物 (G-300M) の原料 (試料 G) を用いた。アルミ金属基板 (与圧壁) 上に、接着剤を混合した試料を塗布した。実際に用いたものを第 10 図に示す。また実験に用いたアルミ板

の構成を第 11 図に示す. アルミバンパと与圧壁の間隔を 100 mm とし, 与圧壁と反対方向からプロジェクトイルを約 6 km/s の速さで衝突させた. プロジェクトイルには, 質量 0.228 g のナイロン球を用いた. バンパ厚さは 0.5 mm, 与圧壁の厚さは 2.0 mm である. 衝突後暗所にて, UV ランプで試料を励起し, 発光を確認した.

実験後に UV ランプを当てた結果, 試料の中に赤色発光している点为数か所見られた. 衝突時の影響で, 試料は発光体へと化学変化を起こしたことが確認できた. 発光している点の発光スペクトルを第 12 図に示す. 発光の有無に関する要因に関しては, 現在調査中である. 今後は, 発光点を大きく, 多くすること, また光度を大きくすることなどが課題として挙げられる.

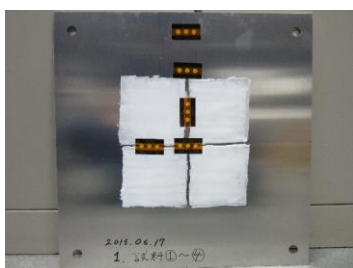


Fig. 10 試料 G を塗布したアルミ板

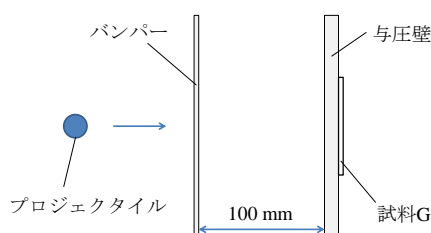


Fig. 11 発光実験装置概要

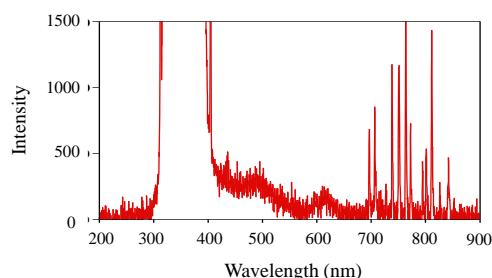


Fig. 12 赤色発光点における発光スペクトル

6. 結言

本研究ではテープテザーのデブリ衝突損傷モデルの構築を目的とし, デブリ衝突を模擬した高速衝突実験を行った. 結果より損傷長さ A の近似式を, デブリ直径 d , 厚さ比 α , 衝突角度 θ の関数で表した. 最小デブリ直径 d_c , 臨界衝突角 θ_c , 有効衝突範囲 W_{eff} を定義し, テープテザーのデブリ衝突損傷モデルを示した. Khan の損傷モデルと本研究の損傷モデルを用いて計算したテープテザーの生存確率を比較した. その結果, 本研究の損傷モデルを用いた方が生存確率は高くなった. Khan の損傷モデルでは生存確率を過剰に危険側に見積

もっており, テープテザーにはさらにコストダウンの可能性があったことがわかった. 本研究によって, 実際の衝突現象を考慮した信頼性のあるテープテザーの損傷モデルを示すことができた.

また, G-300M の原料 (試料 G) を用いて, 高速衝突による発光実験を行った. アルミ金属基板上に試料を塗布し, 衝突による衝撃を与え UV ランプで励起した結果, 発光している部位が見られた. これより, 試料は発光体へと化学変化したことがわかった. 今後はこの要因を明らかにし, 発光部位や光度の増大を図る.

参考文献

- [1] 木部勢至朗, 「スペースデブリ問題の概要」, *Reliability Engineering Association of Japan*, **34** (2012), pp. 166-171.
- [2] C. Pardini, T. Hanada, P. H. Krisko, L. Anselmo and H. Hirayama, “Are De-Orbiting Missions Possible Using Electrodynamic Tethers? Task Review from the Space Debris Perspective”, *Acta Astronautica*, **60** (2007), pp. 916-929.
- [3] 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」, **54** (2006), pp. 295-304.
- [4] 河本聡美, 東出真澄, 柳田篤史, 壹岐賢太郎, 戸田勲, 小野瀬直美, 長谷川直, 「導電性テザーへの超高速衝突試験について」, スペースプラズマ研究会, (2011).
- [5] 吉崎裕人, 東出真澄, 河本聡美, 壹岐賢太郎, 新井和吉, 長谷川直, 「テザーのデブリ臨界切断直径導出試験と評価」, スペースプラズマ研究会, (2012).
- [6] K. Makihara and R. Takahashi, “Survivability Evaluation of Electrodynamic Tethers Considering Dynamic Fracture in Space-Debris Impact”, *Journal of Spacecraft and Rockets*, **53** (2016), pp. 209-216.
- [7] 藤井裕矩, 渡部武夫, 草谷大郎, 中伏信介, 間澤朋哉, 「観測ロケット実験におけるテープテザー展開システムに関する研究」, 日本機械学会第 10 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, (2007).
- [8] 松崎秀太, 杉本洋平, 藤井裕矩, 「ジグザグに折りたたまれた導電性テープテザーの展開力学特性解析」, 第 6 回スペースデブリワークショップ講演資料集, (2014).
- [9] A. Francesconi, C. Giacomuzzo, F. Branz and E. C. Lorenzini, “Survivability to Hypervelocity Impacts of Electrodynamic Tape Tethers for Deorbiting Spacecraft in LEO”, *6th European Conference on Space Debris*, (2013), pp. 22-25.
- [10] S. B. Khan and J. R. Sanmartin, “Survival Probability of Round and Tape Tethers against Debris Impact”, *Journal of Spacecraft and Rockets*, **50** (2013), pp. 603-608.
- [11] J. C. Liou, M. J. Matney, P. D. Anz-Meador, D. Kessler, M. Jansen and J. R. Theall, “The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM2000”, *NASA Technical Paper-2002-210780*, (2002).