メッシュ構造テザーのスペースデブリ衝突に関する実験研究 〇松本紀彦¹,沖義弘¹,山口将史²,後藤直人²,土屋佑斗² 槇原幹十朗¹,長谷川美貴²

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

地球の周回軌道上のスペースデブリ(以 下,デブリ)の増加が近年問題となってい る. デブリは、運用が終わった人工衛星な どの人工的な廃棄物のことを指す. デブリ は、秒速7kmという超高速度で移動してい る. デブリが宇宙ステーションなどの宇宙 構造物に衝突すると甚大なダメージを与え るため、デブリの除去は喫緊の課題である. デブリ除去システムのひとつとして図1の ような電磁誘導テザーシステムが考案され ている^[1]. このシステムは, テザーと呼ばれ る金属線を除去対象に取り付ける. テザー に電流を流し、地磁気とのローレンツ力を テザーに働かせ、 テザーの速度を低下させ る. 速度が低下したテザーは次第に高度を 下げ、最終的に大気圏に突入し、除去対象 と共に燃やし尽くすことができる.しかし, 現在考案されているテザーは非常に細長い ため、微小なデブリとの衝突によって、容 易に破断してしまう恐れがある.このため、 テザーの耐デブリ衝突性能の向上が求めら れている. テザーのデブリによる衝突の研 究については、いくつか報告がなされてい $\mathcal{Z}^{[2][3]}$

本研究では、テザーの構造様式として円 筒メッシュ構造を考案した.メッシュ構造 ゆえ、現在考案されているテザーと同じ質 量で直径を大きくできる.このため、メッ シュ構造テザーはデブリの衝突に対する防 御性能が向上すると考えられる.メッシュ 構造テザーへのデブリ衝突による損傷形態 を調べるために衝突実験を行った.メッシ ュ構造テザーへのデブリ衝突を模擬した二 次元 SPH 法を用いた数値計算の妥当性を確 認した.SPH 計算による数値計算を用いて メッシュ構造による耐デブリ衝突性能を評 価した.



Fig. 1: Electro-dynamic tether system

2. 超高速衝突実験

2.1 実験構成

2013 年 9 月に東北大学流体科学研究所 (IFS) にて, 一段式火薬銃を用いた超高速 衝突実験を行った. 2013 年 12 月に宇宙航 空研究開発機構・宇宙科学研究所 (JAXA・ ISAS) にて、二段式軽ガス銃を用いた超高 速衝突実験を行った.図2のような円筒の メッシュ構造のテザー(以下、メッシュ構 造テザー)をターゲットとして用いた.メ ッシュ構造テザーの材質はモネルと呼ばれ るニッケル銅合金である.実験の模式図を 図3,4に示す.衝突前のメッシュ構造テザ ーの二次元断面の円周をA,衝突後の円弧を B とした. IFS に於ける実験には,直径 15 mm の円柱状のポリカーボネート弾丸をプ ロジェクタイルとして用い、衝突速度は約2 km/s とした. メッシュ構造テザーと治具の 写真を図 5 に示す.メッシュ構造テザーの 上端を上方のアルミ板に固定し、下端にも う一方のアルミ板を吊るし、メッシュ構造 テザーに張力を掛けた. 一本当たりのテザ ーに掛かる荷重は3.7Nとした.また,プロ ジェクタイルが通った軌道を調査し、実験 を模擬した数値計算を行うため、ターゲッ トの前方と後方に厚さ 50 µm のポリエステ ルフィルムを設置した. 前方と後方のポリ エステルフィルムの破断位置の中心を通る 軌道をプロジェクタイルの軌道とした.



Fig. 2: Mesh tether



Fig. 4: Experimental concept (After collision)



Fig. 5: Experimental equipment

2.2 実験結果

高速度カメラで撮影した衝突前後の画像 を図 6,7に示す.図8は衝突現象を二次元 断面で見たイメージ図である.図7のa,b の正射影が図8のa,bに対応する.図7で aが示す部分よりもbで示す部分の方が長く なっていることがわかる.これは,図8の ように,プロジェクタイルがメッシュ構造 テザーに衝突し,デブリの破片群(以下, デブリクラウド)が後方に大きく広がる. 大きく広がったデブリクラウドは,後方の メッシュ構造テザーの損傷領域を大きくす る.その結果,後方のメッシュ構造テザー の損傷領域は,プロジェクタイルの通過領 域よりも大きくなるからであると考えられ る.





Fig. 6: Before collision

Fig. 7: After collision



Fig. 8: Image of collision process

衝突後のターゲットの写真を図9に示す. プロジェクタイルによって抉られた跡が軸 方向に長くなっているのが確認できる.これは、メッシュ構造テザーにプロジェクタ イルが衝突した後、アルミ板の重りにより、 図4の円弧Bに対応する部分に引張応力が 集中したためと考えられる.衝突前の円周A の長さ a [mm]と衝突後の円弧 B の長さ b [mm]の比(以下,残存率)を求めた結果を 表1に示す.円弧Bの長さb[mm]は衝突前 と衝突後のメッシュ構造テザーの断面の円 周上にある金属線の編目の数の比率から算 出した.



Fig. 9: Mesh tether after collision

Table 1: Residual rate of experiment resu	ılt
---	-----

	a [mm]	b [mm]	b/a
Experiment	37.7	8.1	0.21

3. 数値計算

3.1 SPH 法の概念

SPH (Smoothed Particle Hydro dynamics)法は粒子法の一種であり,計算格子を 必要としないメッシュレスな解析手法であ ることから,超高速衝突現象などの相変態 や大変形を伴う破壊現象の解析などによく 使用される. SPH 法は,物体を有限個の粒 子と呼ばれる物体素片に分割し、その任意 の点の集合を用いて近似を行う. 位置ベク トルxにおける任意の物理量を $\phi(x)$ とする とき、この物理量そのものではなく、積分 核 Wにより空間にわたって補間された量 $\langle \phi(x) \rangle$ を用いる.

$$\left|\phi(\mathbf{x})\right\rangle \cong \int_{D} (\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}'$$
 (1)

ここで、D は積分核 Wが影響を及ぼす領 域、x'はxの周囲の位置、dx'は体積を表し ている.また、hは積分核の空間的な広がり を表す影響半径と呼ばれる変数である.

式(1)を離散化すると次のようになる.

$$\left\langle \phi(\mathbf{x}) \right\rangle \cong \sum_{j=1}^{N} \phi_j W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \frac{m_j}{\rho_j}$$
 (2)

式(2)により,任意の位置の物理量はN個の粒子それぞれの物理量に積分核と粒子の重みをかけたものの重ね合わせとして表現されることがわかる.

3.2 実験を模擬した数値計算

実験後のポリエステルフィルムの破断位 置からプロジェクタイルの軌道を特定し, 実験を模擬した SPH 計算を行った.プロジ ェクタイルおよびメッシュ構造テザーの衝 突後 4 µs の結果を図 10,衝突後 17 µs の結 果を図 11 に示す.プロジェクタイルはメッ シュ構造テザーに衝突後,デブリクラウド になり,後方に大きく広がっている.大き く広がったデブリクラウドにより,後方の メッシュ構造テザーの損傷領域は,プロジ ェクタイルの通過領域より大きくなってい る.メッシュ構造テザーの衝突前の円周の 長さと衝突後の円弧の長さから求めた残存 率を表 2 に示す.

Table 2: Residua	l rate of c	calculation	result

	a [mm]	b [mm]	b/a
Calculation	37.7	7.2	0.19



3.3 微小デブリの衝突を模擬した SPH 計算 SPH 計算により、メッシュ構造テザーと メッシュ構造でないテザーの損傷を比較し た. 衝突ターゲットとプロジェクタイルの 詳細を表 3 に示し,SPH 計算により得られ た残存率を図 12 に示す. メッシュ構造テザ ーとメッシュ構造でないテザーは質量を同 じにするために、円環の肉厚を変えてある. プロジェクタイルが衝突する位置を衝突タ ーゲットの中心軸から K だけずらした. こ こで、Kは、プロジェクタイルの衝突位置か ら衝突ターゲットの中心軸までの距離と衝 突ターゲットの外径の比である.Kだけずれ た位置にプロジェクタイルが衝突したとき の固体として残る衝突ターゲットの割合を Rとした. KとRの関係を図 12 に示す. メ ッシュ構造テザーとプロジェクタイルの衝 突の SPH 計算により得られた結果を図 13, 14 に示す. メッシュ構造でないテザーとプ ロジェクタイルの衝突の SPH 計算により得 られた結果を図 15, 16 に示す. 図 12 より, メッシュ構造テザーとメッシュ構造でない テザーはどちらも K の増加とともに R がお おむね増加する傾向がある. 図 13, 14, 15, 16 からわかるように, K が大きくなると, プロジェクタイルがメッシュ構造テザーに 衝突した後、円環内に入るデブリクラウド の破片の分布に偏りができることがわかる. これより, Kの増加によって, デブリクラウ ドの破片の分布に偏りが生じる. メッシュ 構造テザーがデブリクラウドによって破壊 される領域が小さくなり、Rが増加すると考 えられる.メッシュ構造の方がメッシュで ない構造より, 残存率が低いのはメッシュ 構造ゆえデブリの衝突により発生するデブ リクラウド内の破片が細かく、数が多くな るからだと考えられる.

|--|

Target			
Material	Mesh Tether	Tether	
Density [g/cm ³]	1.87	8.44	
External Radius [mm]	6.0	6.0	
Internal Radius [mm]	4.9	5.8	
Projectile			
Material	Polyethylene		
Velocity [km/s]	6.0		
Width [mm]	1.0		
Length [mm]	1.0		



4. 結言と今後の展望

衝突実験から、メッシュ構造テザーの損 傷評価に於いて、デブリクラウドの飛散も 考慮に入れる必要があることが分かった.

実験から求めた表 1 の残存率と数値計算 から求めた表 2 の残存率の誤差は 2%程度で あった.これより数値計算の妥当性を確認 できた.

メッシュ構造とメッシュ構造でないテザ ーに対して微小なデブリの衝突を想定し, 数値計算によりメッシュ構造による耐デブ リ衝突性能の違いを調査した.質量が同じ で,肉厚が異なるメッシュ構造とメッシュ 構造でないテザーでは耐デブリ衝突性能に 大きな違いがないことが分かった.

今後は,直径の大きなメッシュ構造テザ ーを用いて衝突実験を行い,微小なデブリ 衝突によるメッシュ構造テザーの損傷形態 を調査する.

SPH 計算を用いて, 質量が同じで直径の

異なるメッシュ構造テザーとメッシュ構造 でないテザーの耐デブリ衝突性能の違いを 評価する.

5. 参考文献

- [1] Cosmo, M. L. and Lorenzini, E. C., "Tethers in Space Handbook", Third Edition, Smithsonian Astrophysical Observatory, NASA Marshall Space Flight Center, 1997.
- [2] Pardini, C., Hanada, T. and Krisko, P. H., "Benefits and Risks of Using Electrodynamic Tethers to De-Orbit Space Craft", *Acta Astronautica*, Vol. 64, 2009, pp. 571-588.
- [3] 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, 2010, pp. 1292-1300.