

# Kevlar と Beta Cloth の 微小デブリ衝突における貫通限界

○東出 真澄, 小野瀬 直美, 松本 晴久, 長谷川 直 (JAXA)

higaside@chofu.jaxa.jp

## 1. はじめに

スペースデブリの増加で宇宙機へのデブリ衝突のリスクは高まっている。特に低高度軌道はデブリ同士の衝突事故が発生するほど深刻な状況で、無人宇宙機にもデブリ防護設計が必要になっている。JAXA では人工衛星のデブリ防護設計の考え方やその実行手順について、基準書やマニュアルを整備しているところである<sup>1)</sup>。衛星の投入軌道が決定すれば、その軌道を通るデブリフラックスを MASTER<sup>2)</sup>や ORDEM<sup>3)</sup>等のデブリ環境モデルから推定することができる。モデルから衛星に対して衝突頻度の高いデブリの質量, 直径, 衝突速度, 衝突角度等を算出した後, 設計者はデブリ衝突に耐え得る宇宙機構造材料を選定する必要がある。しかし進展部や計測器の構体外に暴露して配置されるハーネス等, 材料の防御性能は極めて低いが損傷がミッションに致命的な影響を与える要素が存在する。これらにはデブリ防御シールドを設置する必要があるが, 進展部に従来のアルミバンパを搭載することは難しい。計測機器の配置によってはハーネスにも金属バンパを設置するスペースが確保できない場合がある。このような部位へのデブリ対策として, 形状に柔軟性の高いデブリバンパが求められている。布状のバンパは複雑形状でも設置が容易であり進展部への応用も期待できることから, 本研究では高強度繊維織布に着目した。

高強度繊維織布は防弾チョッキ等に利用されており, 衝突速度 100 m/sec 以下の低速衝突試験データが今までに蓄積されてきている<sup>4)</sup>。デブリ衝突に対しても高強度繊維織布は有用性が高いことが知られており, 国際宇宙ステーションに搭載されている Staffed Whipple Bumper Shield には Kevlar や Nextel が利用されている<sup>5)</sup>。二重壁バンパのスタンドオフ部分に繊維織布を配置するとデブリ雲のエネルギーを減少させる効果があることが実験で証明されている。しかし高強度繊維織布単体の超高速衝突データは不十分で, 特に微小デブリ衝突に対

する貫通限界データは公表されていない。従って本研究では, 高強度繊維織布の微小デブリ衝突に対する貫通限界を知ることを目的とする。アラミド繊維織布である Beta Cloth (Sheldahl 社) の貫通限界について調べた結果について報告する。

## 2. 試験方法

試験した Kevlar と Beta Cloth について表 1 に示す。全ての織布は平織りである。1 inch 当たりの縦糸と横糸の本数が表 1 の織物密度で表わされている。織物密度の数字が大きいくほど, 目の細かい織布であることを示している。Kevlar は標準タイプの繊維 (K29) と高弾性率タイプの繊維 (K49) の 2 種類を比較した。両者とも繊維単体の引張強度は約 3,000 MPa だが, 弾性率は K29 が 71 GPa, K49 が 112 GPa である。Beta Cloth は宇宙機の多層断熱材として用いられる材料で, ガラス繊維織布にアルミを蒸着させたものである。ガラス繊維層の厚みは 0.06 mm である。表 1 に示す 4 種類の織布を厚さ 5~10 mm 程度に積層して供試体を製作し, 飛翔体を衝突させて貫入限界厚さを算出する。積層した織布は, 図 1 に示すようにアルミ合金板に密着させた状態で上下を固定して試験チャンバに設置した。

表 1 試験した織布

ID	T710	T120	T328	Beta Cloth
fiber	Kevlar (K29)	Kevlar (K49)	Kevlar (K49)	Glass
thickness [mm]	0.43	0.08	0.33	0.20
areal density [g/m <sup>2</sup> ]	319	58	217	274
fabric density [1/inch]	24x24	34x34	17x17	60x46

超高速衝突試験は ISAS/JAXA の二段式軽ガス銃で実施した。デブリ環境モデルから計算すると、低高度軌道に存在する微小デブリの材質はアルミナが多く、宇宙機とデブリとの平均衝突速度は約 10 km/sec になる<sup>2-3)</sup>。しかし固体粒子を 10 km/sec で安定射出できる装置は存在しない。従って本研究では、アルミナより密度の高い鉄を飛翔体材料に選んだ。鋼球を 6 km/sec で衝突させるとアルミナ球を同速度で衝突させた場合よりも衝撃圧力が上昇するので、これを利用して低高度軌道でのデブリ損傷に近付ける。微小デブリ衝突による損傷を調べるため、飛翔体直径を 0.15, 0.3, 0.5 mm と変化させて試験を実施した。サボに飛翔体を複数個装填し散弾方式で同時に射出して、数 10 点のデータを一度の射出試験で取得する。

### 3. 試験結果

衝突試験後の供試体を図 2 に示す。飛翔体が衝突した部分には繊維破断が観察された。一度の射出試験で得られる平均データ数 (1 回の射出試験における平均飛翔体衝突数) は、直径 0.15 mm の飛翔体を用いた場合は 48 個、直径 0.3 mm の場合は 11 個、直径 0.5 mm の場合は 5 個であった。

本研究では、織布の貫通限界を飛翔体が貫通し

ない厚さと定義する。従って、飛翔体破片が通過した積層数を調べることで貫通限界を導出した。貫通限界厚さの算出結果を図 3 に示す。試験した供試体の中では Beta Cloth の貫通限界厚さが最も小さく、最も薄いバンパ材になることがわかった。Kevlar 織布同士を比較すると、高弾性率タイプの原因で作られた織布の方が標準タイプよりも貫通限界厚さが小さくなる傾向が見られた。原糸が同じ織布の結果から、薄いシートを多く積層した方が貫通限界厚さを小さくできることがわかった。

次に、貫入した積層数を重量に換算した結果を図 4 に示す。今回試験した供試体の中では高弾性原因で作られた Kevlar 織布の貫通限界重量が最も小さく、最も軽いバンパ材であることがわかった。貫通限界厚さが最も小さかった Beta Cloth は、重量に換算すると最も重くなってしまった。Beta Cloth は織布にアルミが蒸着しているため、密度が最も高い。密度の大きさが貫通限界厚さの減少に寄与したと考えられる。また、重量で評価した場合も高弾性タイプの Kevlar 原因で作られた織布の方が通常タイプよりもバンパとしての有用性を示しており、高弾性タイプの Kevlar はデブリバンパに適した材料であることが分かった。弾性率が貫通限界に与える影響について今後調べる必要がある。

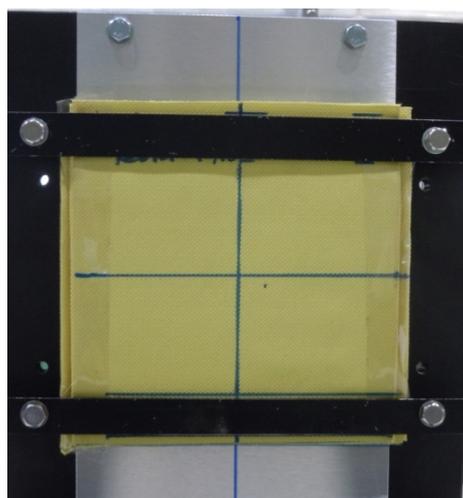


図 1 織布の支持方法

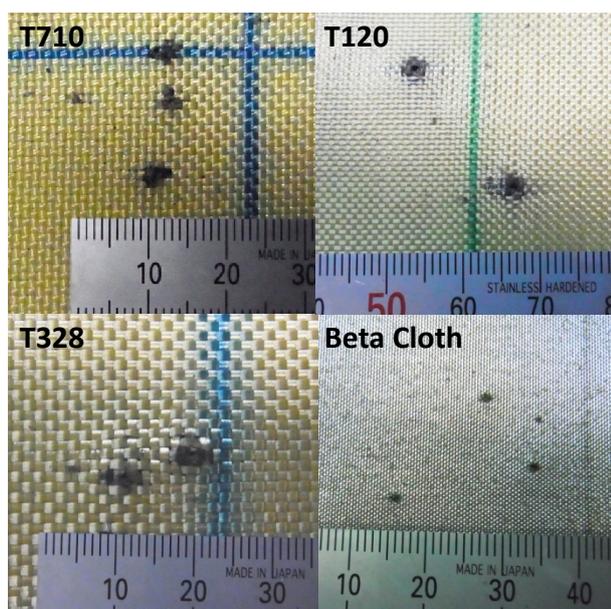


図 2 試験後の供試体表面 (飛翔体直径 0.5mm)

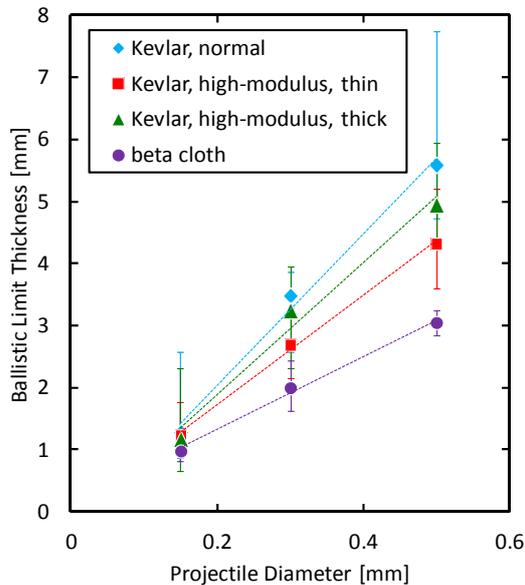


図 3 貫通限界厚さ

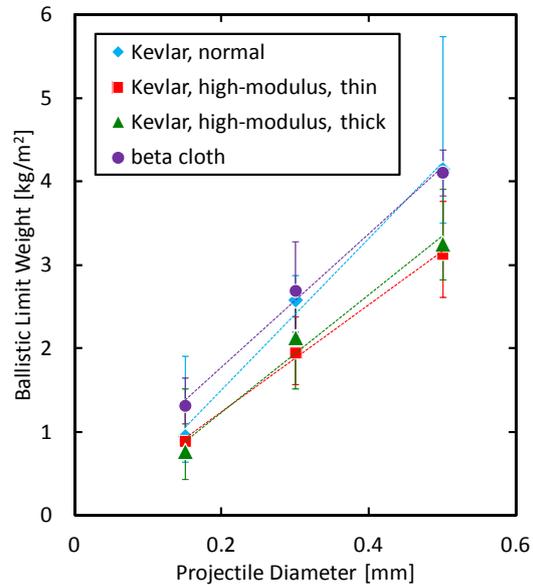


図 4 貫通限界重量

次に、貫入した積層数を重量に換算した結果を図 4 に示す。今回試験した供試体の中では高弾性原糸で作られた Kevlar 織布の貫通限界重量が最も小さく、最も軽いバンパ材であることがわかった。貫通限界厚さが最も小さかった Beta Cloth は、重量に換算すると最も重くなってしまった。Beta Cloth は織布にアルミが蒸着しているため、密度が最も高い。密度の大きさが貫通限界厚さの減少に寄与したと考えられる。また、重量で評価した場合も高弾性タイプの Kevlar 原糸で作られた織布の方が通常タイプよりもバンパ材としての有用性を示しており、高弾性タイプの Kevlar はデブリバンパに適した材料であることが分かった。弾性率が貫通限界に与える影響について今後調べる必要がある。

#### 4. まとめ

Beta Cloth と 3 種類の Kevlar 織布に微小デブリ衝突試験を実施して貫通限界を求めた結果、以下の事がわかった。

- Beta Cloth が最も貫通限界厚さが小さい材料だったので、密度が高い材料が薄いバンパ材である。
- 同じ原糸で作られた織布の場合、薄い織布を数多く積層させると防御効果が高くなる。

- 貫通限界厚さと貫通限界重量で評価すると、原糸の弾性率が高い織布の方がバンパ材として有用である。

バンパ性能と織布原糸の弾性率との関係を調べるため、今後は原糸を変えた織布に対して試験を実施する予定である。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり JAXA デブリ防護設計標準 WG 委員の皆様にご助言いただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) JAXA デブリ防護標準 WG, 微小デブリ衝突耐性評価標準, JAXA 宇宙機設計標準, JERG-2-144, 2012.
- 2) ESA MASTER: <http://www.master-model.de>
- 3) NASA Orbital Debris Program Office: <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov>
- 4) V.B.C.Tan, C.T.Lim, C.H.Cheong, Perforation of High-Strength Fabric by Projectiles of Different Geometry, *Int. J. Impact Eng.*, **28**, pp. 207-222, 2003.
- 5) E.L.Christiansen, Meteoroid/Debris Shielding, *NASA TP*, 210788, 2003.