

微小デブリ衝突に対する PBO 繊維織布の貫通限界評価

○東出 真澄, 黒崎 裕久, 長谷川 直, 松本 晴久 (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¹⁾。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 MASTER²⁾や ORDEM³⁾等のデブリ環境モデルから推定することができる。これらのエンジニアリングモデルを使い、ミッション期間中にデブリが衝突する確率が高い部分を識別する。衝突確率が許容できない場合、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曝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。材料を変更できない場合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等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。このような複雑形状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、高強度繊維織布の貫通限

界について調べてきた⁴⁾⁶⁾。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⁷⁾。超高速衝突に対しても有用である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⁸⁾。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ほとんど公表されていない。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。セラミック繊維織布 (Nextel, 3M 社) と PBO 繊維織布 (Zylon, 東洋紡社) 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 Nextel 織布と Zylon 織布について表 1 に示す。Nextel 織布の一部は縐子織で、その他は平織である。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ほど、目の細かい織布であることを示している。Nextel は標準タイプの繊維 (312) と高弾性率タイプの繊維 (440) の 2 種類を比較した。繊維単体の引張強度は 312 が約 1,700 MPa, 440 が約

表 1 試験した織布

| Fabric ID | Fiber | Weave | Fabric density (yarns/inch) | Areal density (kg/m ²) | Thickness (mm) |
|-----------------------------|------------|-------|-----------------------------|------------------------------------|----------------|
| Nextel, normal | Nextel 312 | Plain | 30 × 25 | 0.305 | 0.41 |
| Nextel, normal, satin | Nextel 312 | Satin | 20 × 17 | 0.447 | 0.53 |
| Nextel, high-modulus, satin | Nextel 440 | Satin | 30 × 26 | 0.500 | 0.51 |
| Zylon, thick | Zylon AS | Plain | 24 × 24 | 0.314 | 0.42 |
| Zylon, thin | Zylon AS | Plain | 20 × 20 | 0.171 | 0.26 |

2,000 MPa で、弾性率は 312 が 150 GPa, 440 が 190 GPa である。Nextel のガラス転移温度は約 1,800°C であり、非常に耐熱性の高い繊維である。Zylon は通常タイプの繊維 (AS) を使用した。AS の引張強度は 5,800 MPa, 弾性率は 150 GPa であり、非常に高い引張強度を持つことが特徴である。密度は、Nextel 312 が 2.70 g/cm³, Nextel 440 が 3.05 g/cm³, Zylon が 1.54 g/cm³ であり、Zylon はアラミド繊維とほとんど変わらないが、Nextel の方は 2 倍近く高い値を持つ。表 1 に示す 5 種類の織布を 20 層程度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、試験チャンバ内に設置した。

超高速衝突試験は ISAS/JAXA の二段式軽ガス銃を用いて実施した。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^{2,3)}。しかしながら、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を模擬した。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 と変化させた。サボに飛翔体を複数個装填する散弾方式を利用し、数十点のデータを一度の射出試験で取得した。

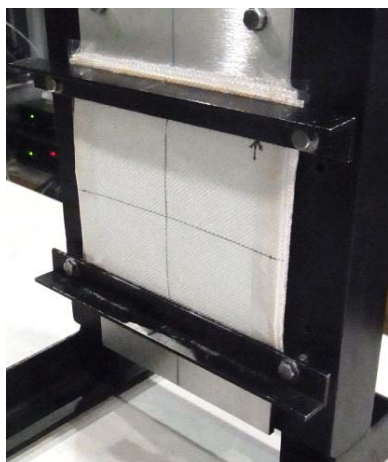


図 1 織布の支持方法

3. 試験結果

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 の飛翔体を用いた試験では 44.6 個、直径 0.3 mm の場合は 22.2 個、直径 0.5 mm の場合は 6.1 個であった。飛翔体が一か所に集中して衝突した場合を除くと、20 層全てを飛翔体が貫通したケースはなかった。衝突速度はショット毎に 5.75~6.44 km/s の範囲で変化し、平均速度は 6.08 km/s であった。

衝突試験後の供試体を図 2, 3 に示す。飛翔体が衝突した部分に繊維破断が観察された。Zylon の中間層では、衝突点近傍で布が凹んだように変形する様子が観察されたが、Nextel の場合は布の変形は見られなかった。Nextel は繊維自体の密度が高いため、1 層目に衝突した際に飛翔体が微細化され、中間層に変形を起こすような比較的大きな破片が生じなかったことが原因と考えられる。

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。飛翔体破片が織布を通過した積層数を調べ、それに 1 層当たりの厚さと面密度を乗じて、それぞれ貫通限界厚さと貫通限界重量を算出した。アルミ板と防御効果を比較するた

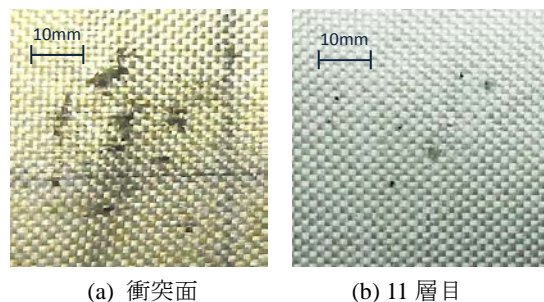


図 2 試験後の Nextel 織布 (供試体: Nextel, normal, 飛翔体直径: 0.3 mm, 衝突速度: 5.79 km/s)

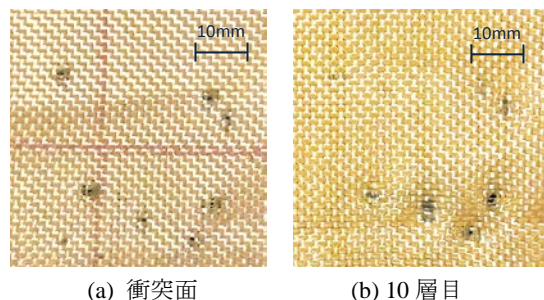


図 3 試験後の Zylon 織布 (供試体: Zylon, thin, 飛翔体直径: 0.3 mm, 衝突速度: 6.08 km/s)

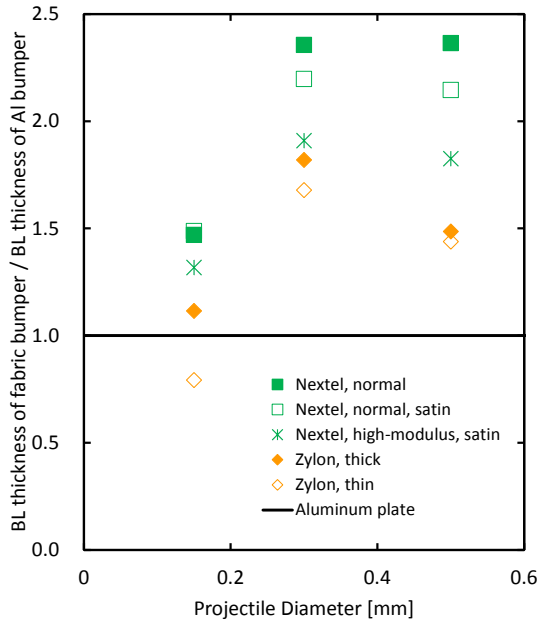


図4 貫通限界厚さ

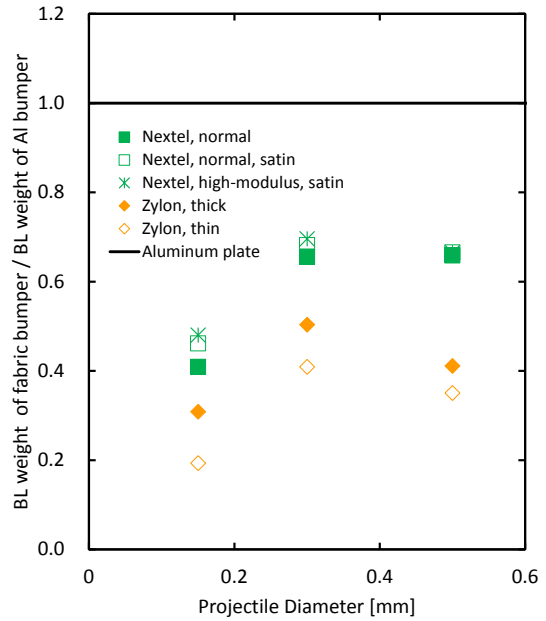


図5 貫通限界重量

め、Christiansen による 1 枚板の貫通限界式⁸⁾で、飛翔体が 6 km/s でアルミ板に衝突した場合の貫通限界を算出した。

$$\text{when } \frac{\rho_p}{\rho_t} \geq 1.5$$

$$t_w = 1.8 \times 5.24d^{19/18}H^{-0.25} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{2/3} \left(\frac{V_n}{C}\right)^{2/3} \quad (1)$$

ここで ρ_p は飛翔体密度 (g/cm^3), ρ_t はターゲット密度 (g/cm^3), t_w は貫通限界厚さ (cm), d は飛翔体直径 (cm), H はターゲットのブリネル硬さ, V_n は衝突速度のターゲット法線方向成分 (km/s), C はターゲットの音速 (km/s) である。この式で求めたアルミ板の貫通限界と本研究で得られた織布の貫通限界との比較を図 4, 5 に示す。縦軸は、織布の貫通限界をアルミ板の貫通限界で除した値を表している。図 4 から、Nextel よりも Zylon の方が薄いバンパ材であることがわかった。しかしアルミ板と比較すると、どちらも 1.5~2.5 倍程度の厚みが必要である。Zylon の結果から、原糸が同じ場合、薄い織布の方が防御性能は高くなることがわかった。朱子織の Nextel の結果を比較すると、高弾性の原糸で作られた織布の方が貫通限界厚さは小さくなる傾向が見られた。図 5 から、アルミと比較すると、Nextel は 4~6 割、Zylon は 2~5 割まで重量を削減できるので、織布バンパは軽量な防

護材と言える。また、Nextel よりも Zylon の方が軽いバンパ材でもあったことがわかった。Zylon の方が織布自体の変形が観察されたので、中間層で飛翔体が減速された時に織布の伸びによるエネルギー吸収が、貫通限界性能に寄与していると考えられる。Zylon の結果から、重量に着目した場合でも薄い織布の方が防御性能を向上させられることがわかった。朱子織の Nextel の貫通限界重量は、原糸が高弾性でも低減しなかった。高弾性の Nextel 440 の方が 330 よりも密度が少し高いため、重量が増加してしまったことが原因であると考えられる。

4. まとめ

Nextel 繊維織布と Zylon 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。

- Zylon 織布の方が Nextel 織布よりもデブリ防御性能が高い。
- アルミ板と比較すると織布バンパは厚くなってしまうが、重量を大きく低減させることができる。
- 同じ原糸で作られた織布の場合、薄い織布を使用した方が防御効果は向上する。

謝辞

本研究で使用した Zylon 織布は JAXA 有人宇宙技術センターよりご提供いただきました。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) 東出真澄, 小野瀬直美, 松本晴久, 長谷川直, Kevlar と Beta Cloth の微小デブリ衝突における貫通限界, 平成 23 年度スペースプラズマ研究会, 2012.
- 5) M.Higashide, N.Onose, S.Hasegawa, Ballistic Limit Thickness and Weight of High Strength Fiber Fabrics for Sub-millimeter Steel Impact at 6 km/s, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, **12** (ists29), pp. Pr_1-Pr_5, 2014.
- 6) 東出真澄, 小野瀬直美, 仁田工美, 松本晴久, 長谷川直, 松澤遼, 竹場敦史, 片山雅英, 微小デブリ衝突に対するアラミド繊維織布の貫通限界, 平成 24 年度スペースプラズマ研究会, 2013.
- 7) 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.
- 8) E.L.Christiansen, Meteoroid/Debris Shielding, *NASA TP*, 210788, 2003.