

次世代先端宇宙服最外層の耐MMOD性評価

○増田勇野， 山口孝夫， 青木伊知郎， 佐藤俊則， 和田理男（JAXA）

1. 研究背景と目的

JAXA有人宇宙技術部では、将来の有人探査に向けた基礎研究の位置付けとして、次世代先端宇宙服(以降宇宙服)の研究を行っている。

本宇宙服の特徴はスーツ内圧が高いことである。これは脱窒素にかける時間¹⁾を極力最小限にし、時間的リソースの節約や船外活動への即時対応等、運用性の向上を目的としている。

また船外活動においては宇宙環境から宇宙飛行士を守る必要があり、MMOD(Micro meteorid and orbital debris)によるダメージ軽減が求められる機能の一つである。

よって、特に耐MMOD性を有した防護層(最外層)においては検討する必要がある、国産技術を生かした最新の生地素材を使用し、1)生地積層案の検討及び、2)生地選出のための基礎データ取得を目的とし、本試験を実施した。

2. 実施試験の概要

宇宙科学研究所(以降ISAS)所有の二段式軽ガス銃を用いて、宇宙服最外層となる断熱防護層(生地)に対する衝突実験を行った。図-1に二段式軽ガス銃及び、図-2に二段式軽ガス銃の下流側にあるチャンバー内に設置された供試体の状態を示す。チャンバー内には供試体設置治具(JAXA未踏技術研究センター所有)に積層した生地(詳細は3項参照)とアルミ板(AL2024-T3、5mm)を固定させ試験を実施する。なお、衝突の様子を観測するため高速度カメラ(Hyper Vision HPV-1)による撮影も行った。

衝突条件は全ての供試体に対し0.5mm径のアルミ球(AL2024)を垂直衝突・シ

ングルショット・目標衝突速度7 km/sの条件にて実施した。



図-1 二段式軽ガス銃 (ISAS設備)

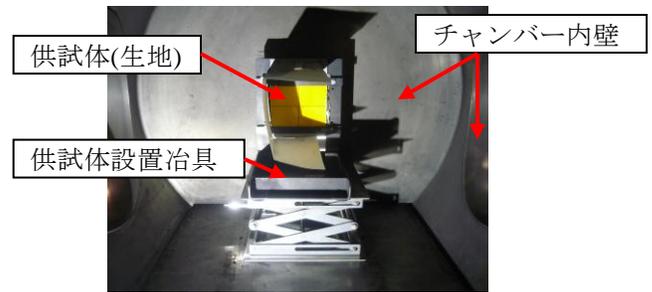


図-2 チャンバー内の設置状態

3. 供試体の概要

1) 生地積層案の検討

隙間の有無により生地へのダメージがどのように異なるのか、またFY23に検討した生地構成案が候補として成立するかを確認することを目的とし、供試体を製作した。供試体の積層案(抜粋)を表-1に示す。

2) 生地選出のための基礎データの取得

数ある生地の種類の中で、引張強度・耐熱性等の性能が良いと言われているものを4種類選択し、これらがMMODに対して有効か横並びで比較出来るよう、同一素材15枚程度を積層し供試体として使用した。素材は、ケブラー®・ノーマックス®・ベクトラン®・ダイニーマ®等である。

表-1 供試体の積層(抜粋)

Layer No.	試験No. 1	試験No. 2	
断熱 防護層	1	ケブラー 〔特殊コーティングあり〕	ケブラー 〔特殊コーティングあり〕
	2	タンクステンシート	タンクステンシート
	3	AL蒸着フィルム	AL蒸着フィルム
	4	AL蒸着フィルム	AL蒸着フィルム
	5	AL蒸着フィルム	AL蒸着フィルム
	6	AL蒸着フィルム	AL蒸着フィルム
	7	AL蒸着フィルム	AL蒸着フィルム
	8	ナイロン	ナイロン
隙間 (3mm)	-	【有り】	【無し】
気密 拘束層	9	ケブラー (コーティング無し)	ケブラー (コーティングなし)
	10	ナイロン	ナイロン

4. 結果

試験の結果を以下に示す。

1) 生地積層案の検討

試験No. 1及び試験No. 2はいずれも、表-1に示した1層目(ケブラー)から8層目(ナイロン)まで貫通した。異なったのは9層目のケブラーである。試験No. 1と試験No. 2のケブラーの写真を図-3と図-4に示す。いずれも最内層である10層目のナイロン生地に穴は開いていないものの、9層目のケブラーに関しては試験No. 1(隙間がある積層)は貫通していないが、試験No. 2(隙間が無い積層)は約3600 μ mの貫通孔が開いた。

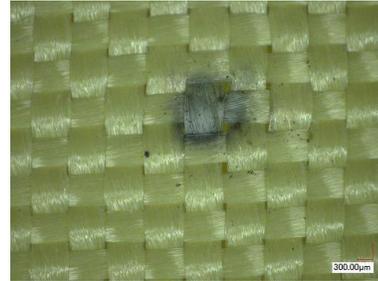


図-3 9層目の写真(試験No. 1:ケブラー)

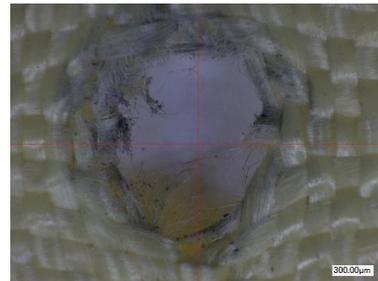


図-4 9層目の写真(試験No. 2:ケブラー)

2) 生地選出のための基礎データ取得

各生地に実施した試験の実際の衝突速度及び貫通枚数は以下の通りである。

生地名称	衝突速度 [km/s]	貫通枚数	面密度 [g/m ²]
ケブラー	7.1	5	278
ノーマックス	6.8	7	193
ベクトラン	6.9	8	179
ダイニーマ	6.9	9	174

5. 考察

1) 積層案の検討

生地の積層間に隙間があると、気体化した弾丸による衝撃エネルギーは生地(平面)方向に逃げる事が可能である。隙間が無い場合は貫通孔へしか逃げる事ができず、膨張した気体が積層内の生地へダメージを与えているものと考えられる。そこで、貫通メカニズム(想定)を下記a)~c)の3ステップ(図-5~7)に分けて考察を行った。

a) 衝突直前

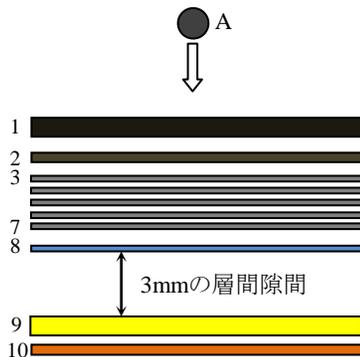


図-5 衝突直前

弾丸（固体、図中A）は高速度で射出されているため、そのエネルギーは殆どが運動エネルギーと見なすことができる。

b) 衝突初期

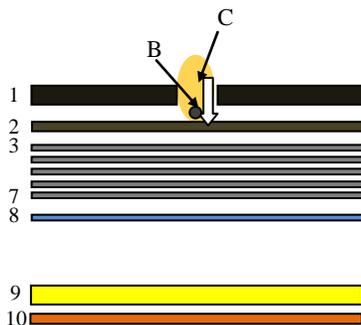


図-6 衝突初期

弾丸（アルミ球）の一部は蒸発し、残留固体（図中B）及び気体（図中C）に分かれる。よって弾丸のエネルギーは主に、固体部分の運動エネルギー・気体部分の運動及び熱エネルギー・生地を貫通するために消費されたエネルギーの3つに分けられたと考えられる。

c) 衝突終盤

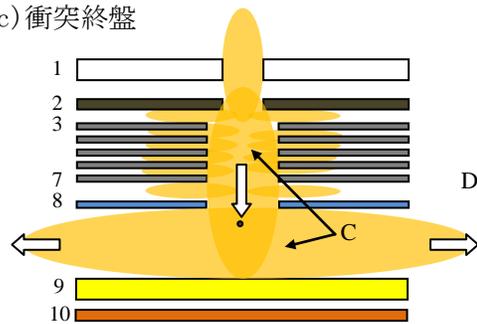


図-7 衝突現象終盤

8層目を貫通した気体の大半は、8、9層目間に設けた隙間から面内方向に逃がされ、その結果、9層目の損傷が大幅に低減されたものと考えられる。理由は次の通りである。

まず前提条件として、第8層含む全層において貫通孔は1箇所であるため、弾丸は1つの固体状態である可能性が高い。しかし、第8層目の貫通孔の大きさは、弾丸径の5分の2程度であった。従って、第8層を貫通した弾丸の固体部分の質量は10分の1以下であると考えられる。即ち、第8層を貫通した弾丸の殆どは気体状態であったと推定できる。

2) 生地選出のための基礎データ取得

a) 繊維強度の影響

面密度・実際の衝突速度が異なるため、現状一律に貫通枚数による単純な評価は難しいが、ほぼ、面密度に比例し貫通枚数が少なくなる傾向がみとめられた。一方、糸や生地の物性データとして、引張強度・引裂強力・織り密度等があるがこれらは、貫通枚数との相関があるとはいえないことが本試験から分かった。

今回の試験条件では引張り強度等ではなく、耐MMOD性においては面密度が支配的であると考えられる。

6. まとめ及び課題

今回の試験を通し、国産の最新生地による耐MMOD性の傾向は把握出来たものの、今後は生地レベルではなく糸の構成・面密度の調整・生地の編み方・生地 of 昇華潜熱等、パラメータを設計段階にまで落とした材料の検討が必要であると考えます。

また、今回貫通しなかった積層案に対してはデータの絶対量が足りず、貫通限界曲線を作成出来ていない。性能把握のための試験を追って実施し、耐MMOD性の向上(新たな積層案含む)に必要なデータの蓄積が必要だと考える。

7. 謝辞

本研究実施にあたり、長谷川直氏、小野瀬直美氏、東出真澄氏、黒崎裕久氏(JAXA)には、装置の運用・試験実施手法等多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を示します。

8. 参考文献

- 1) NASA-STD-3000 Volume I, Section 14
- 2) HVIS 07-138 Extravehicular Mobility Unit Penetration Probability from Micrometeoroids and Orbital Debris: Revised eAnalytical Model and Potential Space Suit Improvements