

# 斜め衝突を利用した衛星用デブリシールドの開発

木下尋可<sup>1)</sup>, 桑折仁<sup>2)</sup>, 田中孝治<sup>3)</sup>, 塩田一路<sup>4)</sup>, 何建梅<sup>5)</sup>, 佐々木進<sup>3)</sup>, 矢ヶ崎隆義<sup>2)</sup>

1)工学院大学 工学部 環境エネルギー化学科 学生, 2)工学院大学 工学部 環境エネルギー化学科,  
3) (独)宇宙航空研究開発機構, 4)サレジオ工業高等専門学校, 5)工学院大学 工学部 機械工学科

## 1. 緒言

人類の宇宙環境利用にとって、軌道上に年々増加するスペースデブリが深刻な課題と認識されるようになってきた。スペースデブリとは、人工衛星、ロケットの破片のことであり、衛星軌道上を数  $\text{kms}^{-1}$  の速さで飛翔しているため、デブリが衛星などの宇宙機に衝突すると非常に深刻な破壊を引き起こす可能性がある。特に、太陽発電衛星(Solar Power Satellite,以下 SPS)のような超大型衛星システムでは、その対策は十分に検討する必要がある。

従来型の Whipple シールドは、薄い金属板を多層構造にすることで軽量化が図られてきた<sup>1)</sup>。しかし、正面からの衝突を前提とした設計を行っているので、十分なシールド効果を得るためには、大きな質量リソースを必要とし、輸送コストの増加に繋がる。

そこで、著者らはシールドを斜めに配置することで、衝突後のデブリの進行方向を制御し、デブリの運動エネルギーを消散する新規な形式の軽量シールドを提案した<sup>2)</sup>。しかし、シールドの設計にあたり、種々の基礎データが必要となるが、超高速衝突実験は回数が限られているため十分ではない。本研究では、Ti 合金および CFRP に対する超高速斜め衝突実験を行い、さらに衝撃解析ソフト AUTODYN を使用して同一材料に対する計算を行い、材料選定の指針および超高速衝突実験とシミュレーションとの整合性について検討した。

## 2. 実験

超高速衝突実験には ISAS/JAXA の 2 段式軽ガス銃を使用した。飛翔体には、ナイロン 66 球(直径 7 mm, 0.217 g), Al 球 (直径 3 mm, 0.047 g) を使用した。衝突速度は、5~6  $\text{kms}^{-1}$  とした。ターゲットには、厚さ 1 mm の CP-Ti, Ti-6Al-4V と厚さ 2 mm の Al, 厚さ 3 mm の CFRP を使用した。CFRP には、東レ T700S の炭素繊維を使用し、1 本のヤーンは 12000 本の単繊維からなり、それを平織にし、6 層に積層した。積層構成は(0/90,30/120,60/150)s であり、繊維含有率は 52 % とした。衝突角度は 30°, 45°, 60° とした。

各金属板に対する超高速衝突実験の実験条件を Table 1 に、CFRP に対する超高速衝突実験の実験条件を Table 2 に示す。ターゲットに飛翔体が直接衝突する板を 1 層目とし、衝突後の破片とターゲットの破砕物の大きさ、飛散方向、破壊の影響を調べるために、ターゲットの裏面に 2 層目の板材を配置した。

飛翔体が 1 層目の板に衝突した際に生じた貫通孔の長径、短径を測定し、扁平率を算出した。また、1 層目の板の貫通孔の中心と 2 層目の板の衝突痕の外縁とをむすび、破砕物の 1 層目裏面からの放出角度を測定した。ターゲットの模式図を Fig.1 に示す。

衝突現象のシミュレーションには AUTODYN を用い、解析手法としては、SPH 法(Smoothed Particle Hydrodynamics Method)を採用した。CFRP などの異方性材料は未だに解析手法が確立されていない。そこで、今回は等方性材料である金属材料について超高速衝突実験と同条件で計算し、再現性について

評価した。解析には、AUTODYN に登録されている材料ライブラリの中の条件を使用した。Table 3 には解析で使用した条件を示し、さらに Table 4 にはシミュレーションで使用した物性値を示す。

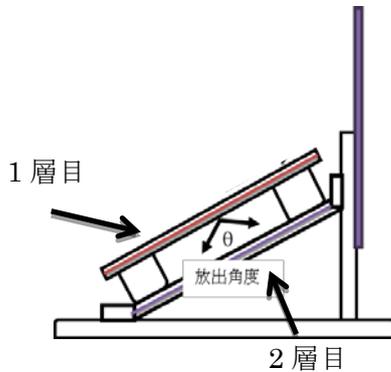


Fig.1 ターゲットの模式図

Table 1 超高速衝突実験条件(金属板)

ターゲット	飛翔体の材質	衝突速度 [km/s]	衝突角度 [°]
1層目: Ti(6-4)1mm	Al	5.88	60
2層目: Cu 2mm			
1層目: Ti(6-4)1mm	ナイロン	6.45	45
2層目: Cu 2mm			
1層目: Ti(6-4) 1mm	Al	5.92	45
2層目: Cu 2mm			
1層目: Al 2mm	Al	6.01	30
2層目: Cu 2mm			
1層目: CP-Ti 1mm	Al	5.91	30
2層目: Cu 2mm			

Table 2 超高速衝突実験条件(CFRP)

	ターゲット	板厚 [mm]	飛翔体の材質	衝突速度 [km/s]	衝突角度 [°]
Shot1	1層目: CFRP	3	ナイロン	5.79	30
	2層目: CFRP	3			
Shot2	1層目: CFRP	3	ナイロン	5.98	45
	2層目: CFRP	3			
Shot3	1層目: CFRP	3	ナイロン	6.08	60
	2層目: CFRP	3			
Shot4	1層目: CFRP	3	Al	5.79	30
	2層目: CFRP	3			
Shot5	1層目: CFRP	3	Al	5.98	45
	2層目: CFRP	3			
Shot6	1層目: CFRP	3	Al	6.08	60
	2層目: CFRP	3			

Table 3 解析に使用した条件

材質	状態方程式	構成則	破壊則	エロージョン則
ナイロン	Shock	von Mises	Plastic strain	Geometric strain
Ti-6Al-4V	Shock	von Mises	Plastic strain	Geometric strain

Table 4 シミュレーションで使用した物性値

材質	密度 [gcm <sup>-3</sup> ]	せん断弾性係数 [GPa]	降伏応力 [GPa]
ナイロン	1.1	3.7	0.05
Ti-6Al-4V	4.4	4.2	1.3

### 3. 結果および考察

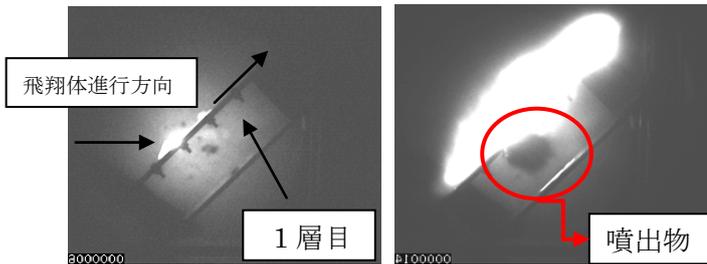
#### 3.1 各金属材料における超高速衝突実験とシミュレーション結果との比較

各金属材料における実験結果と、シミュレーション結果とを比較した。Fig.2 に Ti 合金に対して 45° の角度で超高速衝突させた結果を示す。Fig.2 の(a)では、ターゲットに飛翔体が衝突後、飛翔体は発光しながらターゲットの表面を進む様子が確認できた。Fig.2 の(b)では 1層目のターゲットの裏面から破砕物が噴出している様子が確認され、その後 2層目の板に発光が見られることから、衝突時から 10 μs の間に 2層目の板にターゲットまたは飛翔体の破砕物が衝突する結果となった。破砕物の放出角度を計測したところ、その値は 104.6°であった。

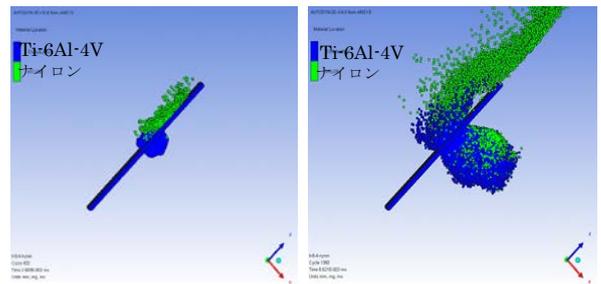
Fig. 3 に Ti 合金の衝突シミュレーション結果を示す。(a)に 2 μs 後、(b)に 10 μs の計算結果を示し、ターゲットに飛翔体が衝突してから、飛翔体自体が崩壊しながらターゲットの表面に沿って進むことを確認できた。また、飛翔体の大部分は表面延長方向に向かって進むものの、大きな反跳角度を有する飛

翔体の破砕物も確認できた。1層目の裏面からは、ターゲット破砕物のみならず飛翔体の一部も放出し、角度を計測したところ110°となった。

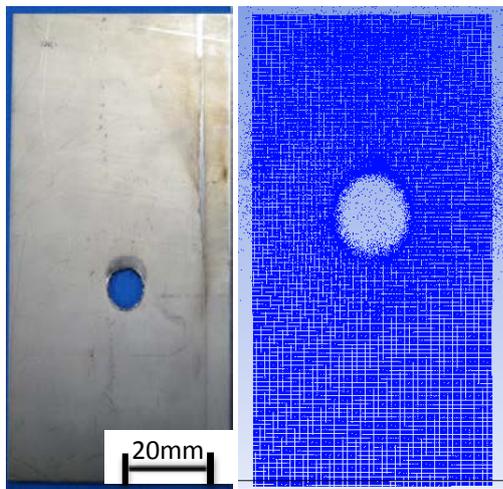
次に、1層目の板について、超高速衝突実験の結果とシミュレーション結果とを比較した。Fig.4(a)には衝突実験の結果を示し、(b)にはシミュレーションの結果を示した。超高速衝突実験とシミュレーション結果とを比較すると、どちらの結果でも貫通孔の形状は楕円形をしていることが確認された。それぞれの扁平率を比較した所、超高速衝突実験の結果では12.6%となり、シミュレーション結果では10.7%となり、ほぼ同じ値となった。各金属材料とシミュレーション結果の扁平率をFig.5に示す。衝突角度を直角に近づけると、貫通孔の扁平率は楕円形から真円に近づく結果となった。よって、貫通孔は角度依存性があることが確認された。以上の結果より、衝突実験とシミュレーション結果は類似した結果が得られた。AUTODYNは等方性材料の超高速衝突実験の再現に有用であると考えられる。



(a)2 μs 後 (b)10 μs 後  
Fig. 2 衝突後の様子



(a)2 μs 後 (b)10 μs 後  
Fig. 3 衝突シミュレーションの結果



(a)衝突後の様子 (b)シミュレーション結果

Fig.4 1層目のターゲットの様子とシミュレーション結果

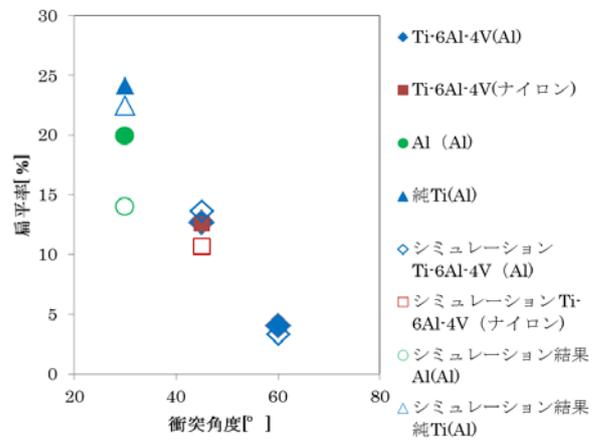


Fig.5 衝突角度と扁平率の関係

### 3.2 CFRP に関する実験結果

CFRP に対して衝突角度 45°で衝突させた結果、飛翔体はターゲットに衝突後、Ti合金をターゲットとした場合と同様、発光しながら、1層目の表面延長方向に向かって進行する様子が確認できた。その後、2層目の板に発光が確認できたことから、2層目の板にはターゲット、または飛翔体の破砕物が衝突する結果となった。また、1層目の板の裏面の破砕物放出角度は84.5°となり、Ti合金の場合よりも小さいことが確認された。

次に、1層目の板を Fig.6 に示す。CFRP の貫通孔には、繊維の剥離が確認され、Ti 合金との破壊の形態に違いが見られた。また、飛翔体がナイロンのときには、貫通孔の形状に角度依存性が見られたものの、飛翔体が Al のときでは角度依存性が確認できなかった。CFRP の扁平率の測定結果を Fig.7 に示す。ナイロンと Al でこのような差が出たのは飛翔体の質量が原因と考えられる。Al はターゲットに衝突後、運動エネルギーが熱エネルギーに変化し、ほとんどが蒸発してしまう。ナイロンの場合は Al よりも質量が大きく、衝突した際に表面に沿って進行する飛翔体の質量が多いことから、貫通孔を進行方向に広げながら進み、楕円形の貫通孔が生じたと考えられる。以上のことから、CFRP の破壊の様子は Ti 合金と比べてみても異なる結果となり、現在のシミュレーションでは解析は困難であると考えられる。



Fig.6 衝突角度 45°の貫通孔の様子

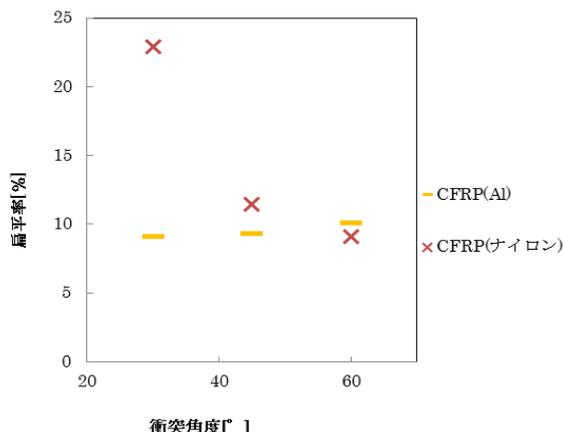


Fig.7 衝突角度と扁平率の関係

#### 4. 結言

各金属材料における実験結果と、シミュレーション結果との比較を行い、CFRP と金属材料の破壊の比較を行った。金属材料では、衝突角度を変化させることによる扁平率の違いから、貫通孔には角度依存性があることを確認した。超高速衝突実験の結果とシミュレーションの結果を比較した所、非常に近い値が得られた。さらに、1層目の裏面から噴出する破砕物の放出角度を調べたところ、シミュレーションで再現できたことから、等方的な金属材料に関してシミュレーションは有効であることが確認された。

CFRP と各金属材料では貫通孔の形態に差があることから、現在のシミュレーションでは再現することは困難だということが確認された。現在、CFRP のシミュレーション手法は確立されていないことから、今後、金属材料のシミュレーションを改良発展させ、CFRP 材料への適用を高め、防御構造の設計手法の確立を目指す。

#### 謝辞

Ti-6Al-4V 板をご提供いただきました、昭和メタル株式会社に深く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) F. L Whipple, "Meteorites and space travel", *Astronomical Journal*, 52(1161), 131 (1947)
- 2) 塩田 一路ら, デブリ防護における斜め突の優位性, 平成 23 年度スペースプラズマ研究会