

斜め衝突を利用した CFRP 製耐デブリシールドの開発

濱谷 尋可(工学院大)、桑折 仁(工学院大)、田中 孝治(JAXA)、塩田 一路(工学院大)、

矢ヶ崎 隆義(工学院大)

1. 緒言

地球温暖化などの環境問題対策の一つとして、太陽光発電衛星 (Solar Power Satellite:SPS) の研究開発が進められている。SPS の実用化に当たっては軌道上のスペースデブリとの衝突が問題となる。数 kms^{-1} で飛翔するデブリは、非常に大きな運動エネルギーを有するため、致命的な損傷を与える。中でも数 mm 程度の大きさのデブリは、衝突確率が高く、防御の必要がある。宇宙機には軽量のデブリシールドの開発が必要であり、従来型デブリシールドとしては、Whipple シールドなどの開発が行われてきた¹⁾。我々は、斜め衝突現象を利用することで、デブリを反跳させ、破壊を抑制する軽量防御システムを検討している。^{2),3)}

先行研究では、斜め衝突現象を用いることで薄肉材料の使用が可能であることを確認した。さらに、2層平行構造を用いることで貫通限界角度を向上させることが可能であることを実験的に確認した。これらの結果をもとに2層星型回転体構造の提案を行った。しかし、飛翔体衝突後のイジェクター及び飛翔体の破砕物が2層目に与える影響はいまだ明らかとなっていない。また2層星型回転体構造についての実験的検証を行っていない。さらにCFRPをシールド材に用いた場合、耐宇宙環境性の評価がされていない。よって、本研究では軽金属、CFRPをターゲットに超高速衝突実験を行い、飛翔体およびイジェクターの挙動を明らかとし、さらに材料劣化のメカニズムを解明することで超軽量のデブリシールド開発のための指針を得ることを目的とした。

2. 実験

2.1 超高速衝突実験

2.1.1 軽金属とCFRPを使用した場合

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、Al球(直径3mm、

0.047g)を使用し、衝突速度は 6kms^{-1} とした。ターゲットをFig.1に示す。飛翔体が直接衝突する板を1層目とし、50mmの間隔をあけ1層目が壊された際に発生するイジェクターを捕集するための板を2層目とした。衝突後の飛翔体の様子を確認するために、1層目の表面延長方向には捕集板を設置した。斜め衝突に適したシールド材料を選定するために1層目には、厚さ3mmのCFRPと、厚さ1mmのTi(CP)、厚さ2mmのAl板を使用した。イジェクターの様子を観察するためにCu板を使用した。ターゲットの角度は 30° とした。

2.1.2 異なる材質を使用した飛翔体の超高速衝突実験

超高速衝突によるシールド材料の破壊因子を解明するために、飛翔体の運動エネルギーに注目しAl, Nylon, SUS, 3種類の飛翔体を用いて実験を行った。飛翔体の形状をそれぞれ3.2m, Nylonのみ3.2mmと7mm, 速度を 6kms^{-1} とすることで質量依存性の解明を行った。ターゲットにはFig.1と同じ構成のものを使用し、1層目の板に厚さ3mmのCFRP, 2層目にはCu板を使用した。

2.2 宇宙環境性評価

宇宙空間では、複合された過酷な環境要因が存在する。その中でも、放射線はCFRPに使用される樹脂を劣化させる可能性がある。そこで、本研究では主な宇宙環境要因である紫外線劣化を中心に実験を行った。

宇宙空間の太陽光を模擬するために山下電装のソーラーシミュレータを使用した。照射条件をTable 1に示す。試験片には衝突実験で使用しているCFRPを10mm角に切り出し使用した。照射終了後、光学顕微鏡を用いて表面の観察を行った。観察終了後、0.01mm, 0.03mm, 0, 1mmの深さへCFRPを削り取り粉末を作製し、作製した粉

末と KBr をまぜ乳鉢で混合した。マイクロ錠剤器を用いて混合した粉末で錠剤を作製後、赤外分光計 (FT-IR) を用いて深さ方向への化学分析を行った。

FT-IR の整合性をとるために、XPS による表面観察を行った。表面のコンタミを飛ばすために 0.5 kV で 60 秒間スパッタを行った。

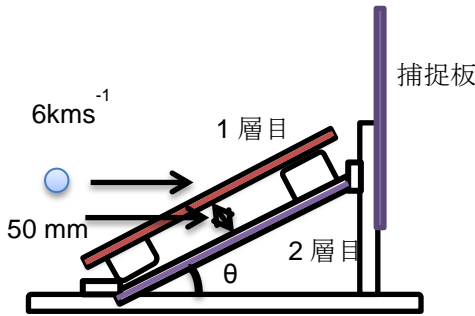


Fig.1 ターゲット図

Table 1 照射条件

	2weeks	4weeks	3months
照射強度 [kWm ⁻²]	1.4	2.8	7.0
雰囲気	大気下	大気下	真空 1.0Pa
照射期間	2weeks	2weeks	18days
温度 [°C]	45-60	65-85	100

3. 結果および考察

3.1.1 シールド材に軽金属と CFRP を使用した場合

軽金属材料である Al, Ti(CP) をターゲット材とした場合、飛翔体によって、1 層目には 3 倍程度のほぼ円形の貫通孔が生じたが、貫通孔の周囲は飛翔体表面延長方向に変形することが確認された。また、貫通孔の周囲に軽金属が融解したような痕跡が確認されたことから、飛翔体が衝突したことで軽金属の融点以上に達したと考えられる。

2 層目の Cu 板では Dimple が確認された。Ti 合金の場合、直径 0.5~2 mm 程度の多数の Dimple が確認され、Al 合金では直径の 1~3 mm の Dimple が確認された。これは第 1 層が融解し、液滴状になった軽金属が分裂して飛び散ることが原因だと考えられる。

さらに Al 合金では衝突点から 90° の角度で円錐型にイジェクターが飛び散った。円錐の中心は純 Ti よりも、1 層目に対して法線方向に偏るとい

う特徴が確認された。

CFRP を 1 層目とした場合、飛翔体直径の 3 倍程度のほぼ円形の貫通孔とその周囲には CFRP の内部に生じたクラックと考えられる白色部分が炭素繊維に沿って生じた。貫通孔の中心に向かって繊維の端部も確認された。2 層目の板では、貫通孔の法線方向にすすけた部分の確認された。この部分は CFRP の貫通孔の体積より少ない。これは炭素繊維が高耐熱性の脆性材料であるため 2 次デブリとして飛散した際に、凝集せずに細かく飛散したと考えられる。飛散方向は 1 層目の板厚が影響した可能性がある。特に板が厚くなることで、1 層目の板は衝撃波で破壊され、飛翔体が裏面に抜ける前に表面に沿って進行すると考えられる。以上の結果より、今回の実験の範囲では CFRP の方がシールド材として有利であると考えられる。

3.1.2 異なる材質を使用した飛翔体の超高速衝突実験

衝突破壊解明のために質量依存性について実験を行った結果、運動エネルギーが二番目に高い SUS3.2 mm では 1 層および 2 層目に貫通孔が生じた。この結果に反して運動エネルギーが一番高く、衝突破壊が深刻であると予測していた Nylon7 mm では 1 層目は貫通するものの、2 層目の Cu 板の貫通は認められなかった。これは、飛翔体の融点が原因であると考えられる。融点が低いと CFRP に衝突した際に運動エネルギーが熱エネルギーに代わり軟化あるいはガス化する。その後、飛翔体が軟化あるいは溶解しながら 2 層目へ向かって進行し、融点が高いと粘性が高くイジェクターが飛散しづらいため一ヶ所にイジェクターが集中する。また、イジェクターの運動エネルギーが大きいと 2 層目を貫通する可能性があると考えられる。

以上のことから、2 層目の破壊は飛翔体の質量に依存しないことが明らかとなった。

3.2 宇宙環境性評価

大気下で 2 週間、4 週間、真空下で 3 ヶ月相当紫外線劣化させた結果を Fig.2 に示す。2 週間照射させた CFRP の表面は黄色に変色し、4 週間照射では表面の樹脂は確認されず、繊維がむき出しとなった。しかし、真空下で 3 ヶ月照射させた場合、

表面の光沢が無くなるものの炭素繊維は確認されなかった。以上の結果から紫外線照射は雰囲気依存することが確認された。

続いて、CFRPの化学分析結果をFig.3に示す。ピーク高さ比は、エーテル結合、ベンゼン環、キノイド構造のピーク強度とベースピークであるC-H結合のピーク強度との比で算出した。

分析の結果、エーテル結合高さ比の増加し、ベンゼン環の高さ比は減少した。キノイド構造の高さ比は増加する結果となった。光学顕微鏡とFT-IRの結果からエポキシ樹脂のベンゼン環は、紫外線を吸収することにより開環し、空気中の酸素と結合することで、キノイドとなり表面が変色したと考えられる。

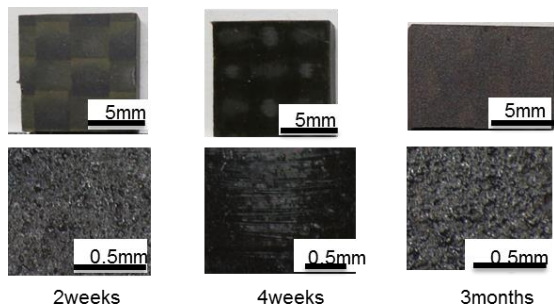


Fig.2 光学顕微鏡の観察結果

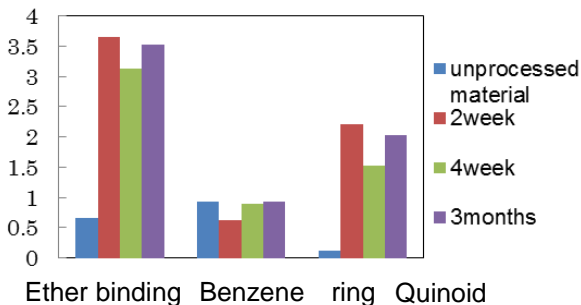


Fig.3 FT-IR の分析結果

4. 結論

超高速衝突実験の結果、今回の実験の範囲では軽金属材料よりもCFRPの方が有利であると考えられる。

衝突破壊解明のために飛翔体の質量依存性について実験を行ったところ、衝突破壊は飛翔体の質量によって決まらないことが解明された。

大気環境下と真空下で紫外線照射実験を行った結果、紫外線照射による劣化は雰囲気依存することが確認された。

参考文献

- 1) F. L Whipple, "Meteorites and space travel", *Astronomical Journal*, 52(1161), 131 (1947).
- 2) I.Shiota, H.Kohri, M.Kato, A.Yumoto, K.Tanaka, S.Sasaki, "CFRP Panel for Protection from Space Debris by Oblique Collision", *Materials Science and Technology*, 2011, vol.48, No.3, pp122-128.
- 3) I.Shiota, H.Kohri, M.Kato, A.Yumoto, K.Tanaka, S.Sasaki, "Advantage of Oblique Collision for Debris Protector", *Nanomaterials and Energy*, Volume 1, Issue MNE2, March 2012, pp87-95.