

# Influence of the material on the behavior of the ejector of debris shield for hypervelocity oblique collision\*

○Hiroka Hamatani 1) , Hitoshi Kohri 1), Koji Tanaka2), Ichiro Shiota3),  
Takayoshi Yagasaki1)

1) Kogakuin University, Hachioji, Tokyo, Japan

2) ISAS/ JAXA, Sagamihara, Kanagawa, Japan

3) Professor Emeritus, Kogakuin University

A space solar power satellite (SPS) is expected as one of future sustainable energy sources. A protection shield is essential for utilizing an SPS to avoid the problem caused by debris. We propose a novel shield with which debris collides with an oblique angle. The debris only changes the flying direction after collision, and the panel needs not to absorb whole energy of the debris. Then thin panels will be sufficient.

We carried out hypervelocity oblique impact experiment using double layer targets. Ti (CP), Al (5052) and CFRP plates were used as first layer. A Cu plate was set as the second layer. The Al projectile with the diameter of 3.2 mm was used. The projectile was collided with the first layer at a speed of approximately 6 km/s. The damages of the first and second layers for the Ti, Al, and CFRP targets were observed and investigated.

# 斜め衝突を利用したデブリシールドのイジェクターの挙動に対する材質の影響†

○濱谷 尋可<sup>1)</sup>, 桑折 仁<sup>1)</sup>, 田中 孝治<sup>2)</sup>, 塩田 一路<sup>3)</sup>, 矢ヶ崎 隆義<sup>1)</sup>

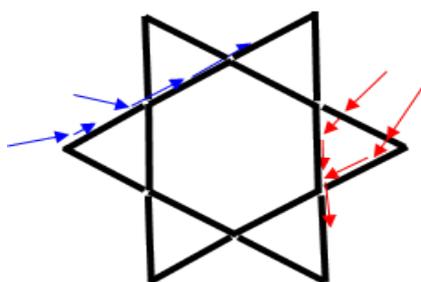
1) 工学院大学, 2) (独) 宇宙航空研究開発機構, 3) 工学院大学名誉教授

## 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 km/s の速さで飛翔しているため、デブリが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。中でも数 mm 程度の大きさのデブリは、衝突確率が高いことから衝突は避けられない。とくに、太陽発電衛星 (SPS) のような非常に大型な衛星では、その対策は必須であると考えられる。太陽発電衛星は太陽光パネル、送電システム、制御システムから構成されており、太陽光パネル、送電システムは 2.5 km×2.5 km と大面積のため、デブリの衝突は避けられない。しかし、制御システムは衛星の心臓部分であるため、デブリから防御する必要がある。したがって、微小なデブリから衛星の重要部分を防御するシールドの開発は必須である。

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、デブリの軌道を逸らしデブリの運動エネルギーを全て受け止めない新規な形式の軽量シールドを提案した<sup>2)</sup>。シールドのコンセプトを Fig.1 に示す。このような構造をとることで、薄い材料を採用することができ、軽量化につながると思われる。先行研究では垂直衝突と斜め衝突実験を行い、薄肉材料でもシールド効果が得られることから、斜め衝突が優れているという結果が得られている。よって、本実験では斜め衝突の効果が明瞭な衝突角度 30°について衝突実験を行い、シールドの材質によるイジェクターの挙動を明らかにすることで、シールド材料の選定の指針を得ることを目的とした。



- ① パネルに対して 60°以下   
パネルを貫通することなく、衝突したパネル表面に沿って進行し、外部へ排出される。
- ② パネルに対して 60°以上   
最初のパネルには 60°以上で衝突するので、そのパネルは貫通する。  
2 番目のパネルに衝突するときは必ず 60°以下で衝突するので、デブリは第 2 面のパネルに沿って進み、外部へ排出される。

Fig.1 デブリシールドのコンセプト

## 2. 実験方法

地上でデブリを模擬するために、ISAS/JAXA の二段式軽ガス銃を使用した。Fig.2 の二段式軽ガス銃は、一段目で火薬によって駆動されたピストンが水素ガスを高圧状態にまで圧縮し、二段目で高圧に圧縮されたガスが飛翔体手前のダイヤフラムを突き破り、飛翔体は加速する。加速さ

れた飛翔体は、実験チャンバー室に設置したターゲットに衝突する仕組みとなっている。飛翔体の速度は、He-Ne レーザーで計測した。実験で採用したターゲットの模式図を Fig.3 に示す。Fig.3 中の①は飛翔体が直接衝突する板で、これを 1 層目とした。②にはイジェクターの挙動を解明するために、1 層目から 50 mm の間隔を離れた位置に 2 層目として 4 mm の Cu 板を設置した。さらに、飛翔体が 1 層目に衝突した後の飛翔体の挙動を精査するために、1 層目の表面延長方向には捕捉板として Cu 板 4 mm を設置した。1 層目のターゲット材料には、軽金属材料の代表である、厚さ 2 mm の Al5052、厚さ 1 mm の Ti(CP)板、厚さ 3 mm の CFRP 板を使用した。ターゲット材料は単位面積当たりの重量である面密度をそろえ、材質の違いによる破壊の差異を確認した。CFRP には、東レ T700S の炭素繊維を使用し、1 本のヤーンは 12000 本の単繊維からなる。この単繊維を平織にし、6 層に積層させた。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。飛翔体には、Al 球 (外径 3.2 mm, 0.047 g) を使用した。衝突速度は、6 km/s とした。



Fig.2 二段式軽ガス銃

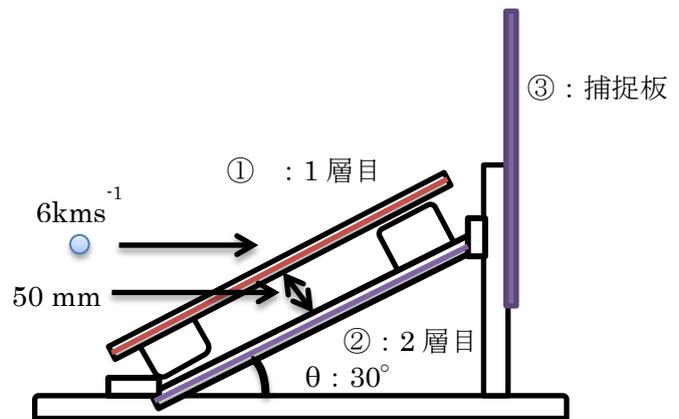


Fig.3 ターゲットの模式図

### 3. 結果および考察

#### 3.1 Ti(CP)を 1 層目とした場合の衝突結果

Fig.4 には、Ti(CP)に Al 球を衝突させた結果を示す。Fig.4 の 2 枚の写真の間にある縦の青線は左が Ti(CP)を、右が Cu 板の横から見た状態を示した。左斜め下から右上に伸びている太い矢印は、飛翔体の飛翔方向と、Ti(CP)に衝突する位置を、貫通孔の上方には、衝突後の飛翔体が Ti(CP)の表面に沿って進行する方向も示している。2 層目の板の右に設置されている写真は捕捉板である。

1 層目に Ti(CP)を用いた場合、飛翔体の衝突によって、1 層目には飛翔体の直径の約 2 倍の幅で約 3 倍の長さの穴が生じた。また、穴の周囲は捕捉板の方向へ若干の変形と、穴の縁には Ti(CP)の溶けた痕跡が認められた。すなわち、1 層目は、Ti(CP)の融点である 1600 °C 以上になったと考えられる。

Fig.5 の中央の 2 層目には直径 0.5-2 mm 程度の多数のくぼみが見られた。このことから、1 層目が融解し、液状となった Ti(CP) が分裂して飛び散ったと考えられる。2 層目の Ti (CP)の分布から、Ti(CP)は円錐形に飛び散ったことが認められ、この円錐の頂角は約 70°であった。また

円錐の中心は初期の飛翔体の進行方向から大きく偏り、1層目から2層目へ法線方向に飛び出す場合を90°とすると、1層目に対し70°の方向であった。イジェクターによる痕跡はTi(CP)由来のものだけでなく、飛翔体由来のイジェクターの一部が原因であったとも考えられる。今後、2層目のCu板の痕跡を化学分析を用いて精査する必要があると考えられる。

Fig.4の右の捕捉板は、飛翔体が広範囲に飛散することを想定し、限られたCu板を有効に利用するため左半分のみ大きな面積を設置した。この捕捉板には多くの白い斑点が認められた。この斑点の分布はTi(CP)より上方よりで確認されたことから、Ti(CP)由来のイジェクターではなく、飛翔体であるAl球が1層目のTi(CP)と衝突後、Fig.4に示すようにTi(CP)の表面に沿って進み、捕捉板に衝突したと考えられる。

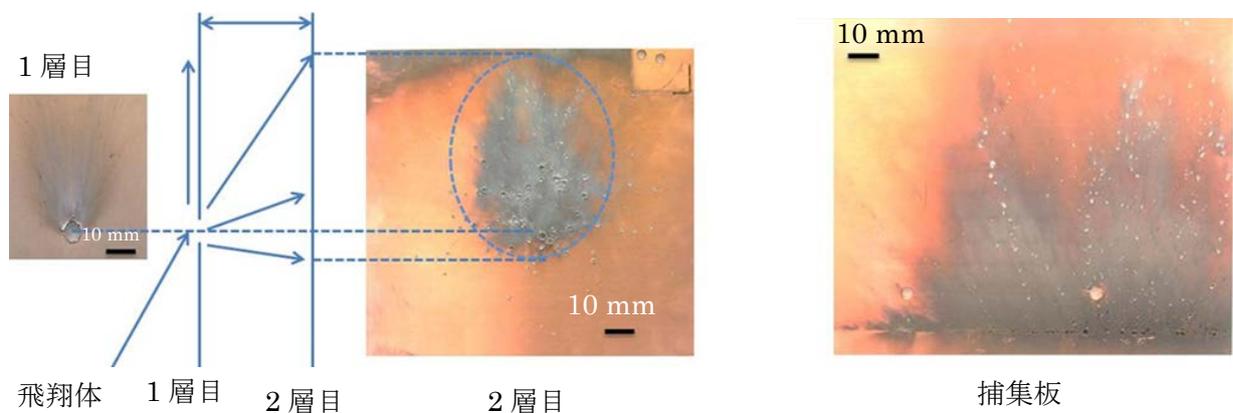


Fig.4 Ti(CP)をターゲットとした場合

### 3.2 Al5052を1層目とした場合の衝突結果

Fig.5にはAl合金にAl球を衝突させた結果を示す。1層目にAl合金を用いた場合、飛翔体の衝突によって、1層目には飛翔体の直径の約3倍程度の、ほぼ円形の穴が生じた。また、穴の周囲にはTi(CP)の場合と同様Cu板方向へのわずかに変形し、この穴の縁には、Al合金の溶けた痕跡が認められた。すなわち、1層目は、Al合金の融点である660℃以上になったと考えられる。

Fig.5の中央の2層目は直径1-3mm程度の多数のくぼみが認められた。このことから、1層目が融解し、液状となったAl合金が分裂して飛び散ったことが窺える。2層目のAl合金の分布から、Al合金は円錐形に飛び散り、その円錐の頂角は約90°であった。また円錐の中心はTi(CP)の場合より大きく偏倚し、1層目に対し90°の方向であった。Cu上のくぼみは飛翔体の一部で生じたのか、1層目の破片が原因で生じたのかは不明であり、飛翔体も1層目もAlであるので、この区別は難しいと懸念される。

捕捉板には多くの白い斑点が見られる。この斑点は飛翔体のAlが1層目のAl合金と衝突後、Fig.に示すように、Ti(CP)の表面に沿って進み、捕捉板に捉えられたと考えられる。この斑点の分布はAl合金板より上方であり、Al合金の一部が捕捉板に衝突したと考え難い。

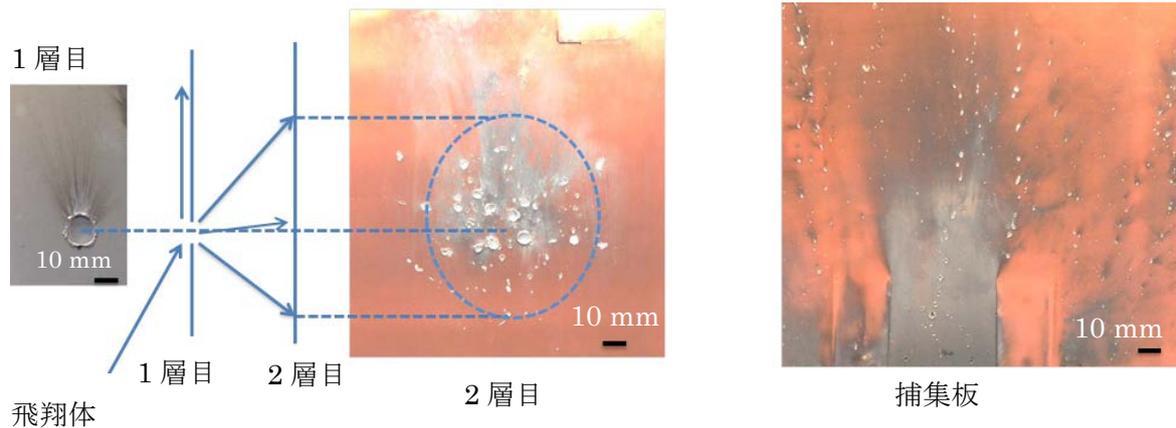


Fig.5 Al合金をターゲットとした場合

### 3.3 CFRPを1層目とした場合の衝突結果

Fig.6にはCFRPにAl球を衝突させた結果を示す。1層目にCFRPを用いた場合、飛翔体の衝突によって、1層目には飛翔体の直径の約2倍程度のほぼ円形の穴が生じた。また、穴の周囲にはCFRPの内部に生じたクラックと考えられる白色部分がヤーンに沿って認められた。穴の中心に向かって、CFRPを構成する繊維の端部が認められる。1層目は、Ti(CP)、Al合金と同様、相当な高温になっていたと考えられるが、母材エポキシ樹脂の炭化は認められなかった。これは、炭化部分が僅かであり、穴の形成と同時に飛散したと考えられる。

Fig.6の中央の2層目には1層目の穴の直下にすすけた部分が観察されるのみで、くぼみなどの損傷は認められない。2層目のすすけた部分の形状から、CFRPから生じたイジェクターは円錐形に飛び散り、その円錐の頂角は約60°であった。また円錐の中心はAl合金と同様、1層目に対し法線方向であった。すすけた部分の体積は、CFRPの穴の体積より相当少ないと考えられる。よって、炭素繊維は高耐熱性の脆性材料であるため2次デブリとして細かく飛散したことから、2層目への影響は少ないと考えられる。

Fig.6の右の捕捉板には多くの白い斑点が見られる。この斑点は飛翔体のAlが1層目のCFRPと衝突後、CFRPの表面に沿って進み、捕捉板に捉えられたと考えられる。この斑点はAl合金板より上方のみに分布しており、また、2層目にもAlが認められなかったことより、飛翔体全部が捕捉板に捉えられたと考えられる。

## 4. 結言

1層目に、Ti(CP)、Al合金、CFRPを用い、Al飛翔体を衝突させた。その結果、現在までの実験の範囲で、以下のことが明らかとなった。

1層目にTi(CP)、Al合金の場合、飛翔体の衝突によりターゲット材料由来のイジェクターが生じる。

それらのイジェクターは相当のエネルギーを持っており、2層目のCu板に損傷を与えた。これに対し、1層目にCFRPを用いた場合は、面密度が最も小さいにもかかわらず、衝突後に飛翔体

全部が CFRP 面に沿って進み、2 層目にはほとんど影響を与えなかった。

したがって、斜め衝突を利用したシールドの材質は、金属よりも CFRP の方が有利であることが明らかとなった。

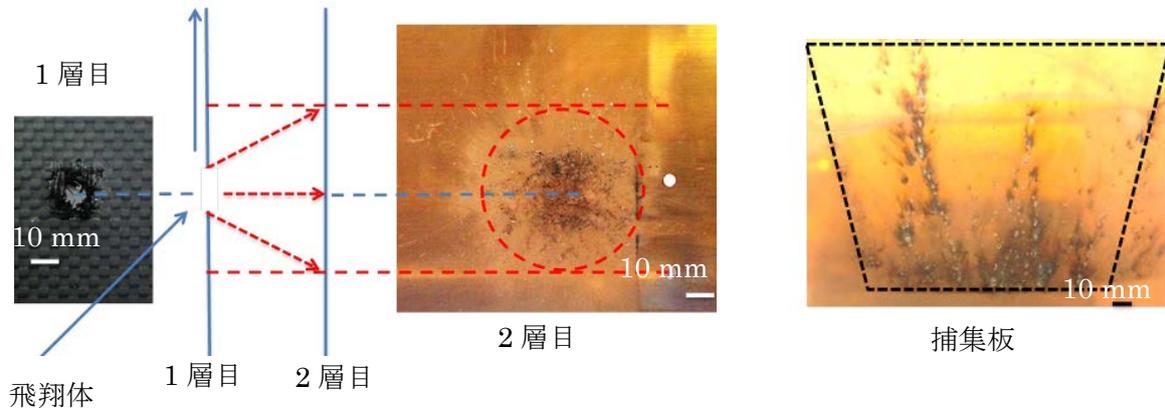


Fig.6 CFRP をターゲットとした場合

#### 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