

# 光化学物質のデブリ衝撃に対する接着検討と斜めデブリシールド

○根元翔<sup>1</sup>, 榎原幹十朗<sup>1</sup>, 長谷川美貴<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>3</sup>  
高橋諒<sup>1</sup>, 櫻井翔也<sup>2</sup>, 佐藤沙紀<sup>2</sup>, 土屋垣内絢子<sup>2</sup>

1: 東北大学, 2: 青山学院大学, 3: JAXA・宇宙科学研究所

## 1. 緒言

1957年に人類初の人工衛星スプートニク1号が打ち上げられて以来、積極的な宇宙開発が行われてきた。しかし、それに伴って排出される人工廃棄物による宇宙環境の悪化が現在問題とされている。これらはスペースデブリ(以下、デブリ)と呼ばれ、低軌道では約7.0km/sの速度で軌道上を周回し、軌道上の人工衛星や国際宇宙ステーション等の宇宙構造物に衝突した場合には、甚大なダメージを与える。直径が約10cm以上のデブリは地上からの観測が可能で、人工衛星の方でそれを避けることができる。一方10cm以下のデブリは現在の技術では捕捉できず、避けることもできない。従って、宇宙構造物に用いられるデブリシールドの防護性能向上、および宇宙ステーション等の有人宇宙施設にデブリが衝突し貫通穴が生じた際の応急措置は、今後の宇宙開発を進めるにあたって喫緊の課題である。

本研究では、光化学物質を用いたデブリ貫通穴の発光表示、斜めデブリシールドによる防護性能向上という2点を目標とし、超高速衝突実験による評価・検討を行った。

## 2. 光化学物質のデブリ衝撃に対する接着検討

### 2.1 背景

デブリが有人宇宙施設などに衝突すれば与圧壁を貫通して空気漏れを生じる危険がある。その場合、スペースクルーたちは貫通穴を発見し応急措置をとる必要があるが、衝撃によって電気系統がダウンしてしまえば、既在のPCを使った位置同定手法は使えない可能性がある。そこで、急激な温度・圧力上昇をトリガーとして発光する光化学物質を与圧壁内側に塗布し、電源喪失の暗闇の中で衝突貫通穴周辺を蓄光効果により長時間発光させ続けるシステムを著者らは提案している。本実験では、与圧壁内側に塗布した光化学物質のデブリ衝突による剥落状況を調べることを目的とした。

### 2.2 超高速衝突実験

2012年12月に、宇宙科学研究所にて二段式軽ガス銃を用いた超高速衝突実験を行った。Fig. 1のようなWhipple Shieldを模擬した2枚組のアルミ板(AL6061)をターゲットとして用い、与圧壁裏側、すなわち2枚目アルミ板の裏側に光化学物質をFig. 2のように塗布した。用いた光化学物質はFe錯体とEu錯体であり、アルミ板上に接着剤を塗布し、その上から粉末状の2種類の錯体をふりかけた。

プロジェクトには直径7.14mmのナイロン球を用い、約7km/sの衝突速度で2回の試験を行った。

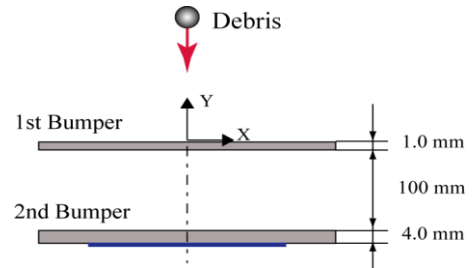


Fig. 1 Experimental Concept

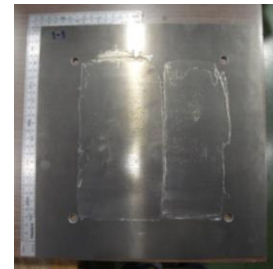


Fig. 2 Back side of 2nd Aluminum Plate (Left: Fe Complex, Right: Eu Complex)

### 2.3 実験結果

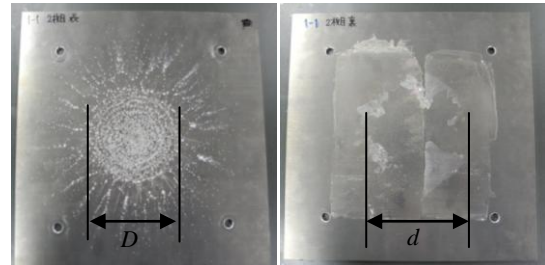


Fig. 3 2nd Aluminum Plate after Impact Test (Left: Front side, Right: Back side)

Table. 1 Result of Impact Test

	V [km/s]	D [mm]	d [mm]	d/D
Shot I	7.23	112	125	1.12
Shot II	7.46	114	126	1.11

Fig. 3に衝突試験後の2枚目アルミ板を示す。左図が表面、右図が裏面である。表面をみると、放射状に衝突痕が生じており、1枚目との衝突によって生じたデブリクラウドの広がりを確認できる。また、貫通穴は生じなかったが、裏面を見ると衝突部付近の接着剤が剥がれているのが分かる。これは、平板内部の応力波の干渉によって、裏面に引張応力が発生し、それが接着剤の強度・接着力を上回り、剥落してしまったと考えられる。

Fig. 3のように、表面に生じた衝突痕中心部の大きさを  $D$ 、接着剤の剥がれた部分の大きさを  $d$  として、両者を比較すると、Table. 1のような結果となる。2回の実験とも、両者の値がほぼ一致しているか、接着剤の剥がれの面積の方が僅かに大きいことが分かる。この結果から、衝突痕、すなわちデブリクラウドの空間的な広がり、裏面の接着剤の剥がれる面積には相関関係があると考えられる。

### 2.4 今後の課題

今回の実験段階では、実際に光化学物質を光るレベルまで完成させていなかったため、デブリ衝撃によって発光するような光化学物質の設計を行う必要がある。また、デブリ衝撃によって接着剤が剥落することは免れないとして、剥がれを許容したうえで、貫通穴の周りを発光させる接着剤の塗り方を検討する必要がある。

## 3. 斜めデブリシールドの衝突実験

### 3.1 背景

現在、国際宇宙ステーションに用いられている Whipple Shield に対するデブリ衝突に関しては、多くの報告がなされている<sup>[1][2]</sup>。デブリがシールドに垂直に衝突する場合、全運動エネルギーはシールドの破壊または熔融蒸発で消費されなければならない。したがって、宇宙建造物の防護のためには厚くて重い防護板が必要となる。

以上に対し、本研究では宇宙建造物のデブリシールドに対して斜めにデブリを衝突させる構造を提案する。斜め衝突の場合、デブリの速度ベクトルが分解されるので、垂直衝突の場合よりもダメージが小さくなることが知られている<sup>[3]</sup>。したがって、一度の衝突において必ず斜め衝突を含むようなバンパの構造が望まれる。

本研究では、Whipple Shield のような従来のバンパと与圧壁が平行な構成のバンパではなく、Fig. 4のように与圧壁に対してバンパが角度を持つような構成を想定し、この新しいデブリシールドによってデブリ衝突による与圧壁へのダメージを軽減することを目的とした。そこで今回は、一枚目のバンパの設置角度が二枚目の与圧壁に与えるダメージに関して、二段式軽ガス銃を用いた超高速衝突実験及び二次元 SPH 法を用いた数値解析によって調べた。

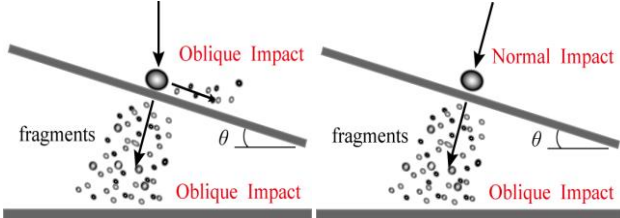


Fig. 4 Assumed Oblique Shield

### 3.1 超高速衝突実験

2012年12月に、宇宙科学研究所にて二段式軽ガス銃を用いた超高速衝突実験を行った。概略図を Fig. 5 に示す。実験には直径 7.14mm のナイロン製プロジェクタイトルを用いた。バンパには AL6061 (300×300mm) を用いた。また、Table 2 に示すように、一枚目の設置角度  $\theta$  [deg] を変化させて3回の実験を行った。

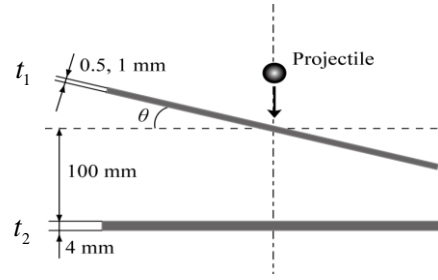


Fig. 5 Experimental Concept

Table 2 Parameter for Experiments

	$V$ [km/s]	$t_1$ [mm]	$\theta$ [deg]
Case I	7.07	0.50	0
Case II	7.53	0.50	30
Case III	7.46	0.50	60

### 3.3 実験結果

衝突実験後の二枚目バンパ表面の写真を Fig. 6 に示す。写真を見ると、中心部付近に大きな衝突痕が生じており、さらにその周囲に細かな痕が広がっていることが分かる。これは、プロジェクタイトルが一枚目に衝突した際に生じたデブリクラウドが原因である。また、全てのケースにおいて貫通孔は生じなかったが、Case II と III においては衝突中心部の裏面が剥がれるスポーリングが生じていた。Case I の衝突痕が綺麗な放射線状であるのに対し、Case II は偏りが生じており、広がり方の面積も小さい。これは、一枚目に角度を付けたことで、生じるデブリクラウドの広がり方にも偏りが生じていることを示している。更に角度を増加させた Case III では、より衝突痕の面積が小さくなっている。すなわち、デブリクラウドがより高密度で二枚目に衝突したことを表している。つまり、二枚目に対するダメージは大きくなったといえる。

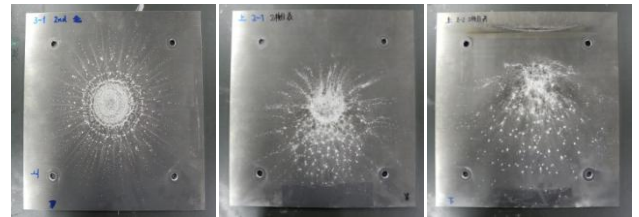


Fig. 6 Front side of 2nd Bumper (Case I, Case II, Case III)

### 3.4 二次元 SPH 解析

#### 3.4.1 SPH 法の概念

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法は粒子法の一つであり、計算格子を必要としないメッシュレスな解析手法であることから、超高速衝突現象などの相変態や大変形を伴う破壊現象の解析などによく使用される。SPH 法は、物体を有限個の粒子と呼ばれる物体素片に分割し、その任意の点の集合を用いて近似を行う。位置ベクトル  $\mathbf{x}$  における任意の物理量を  $\phi(\mathbf{x})$  とするとき、この物理量そのものではなく、積分核  $W$  により空間にわたって補間された量  $\langle \phi(\mathbf{x}) \rangle$  を用いる。

$$\langle \phi(\mathbf{x}) \rangle = \int_D \phi(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (1)$$

ここで、 $D$  は積分核  $W$  が影響を及ぼす領域、 $\mathbf{x}'$  は  $\mathbf{x}$  の周囲の位置、 $d\mathbf{x}'$  は体積を表している。また、 $h$  は積分核の空間的な広がりを表す影響半径と呼ばれる変数である。

式(1)を離散化すると次のようになる。

$$\langle \phi(\mathbf{x}) \rangle \cong \sum_{j=1}^N \phi_j W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (2)$$

式(2)により、任意の位置の物理量は  $N$  個の粒子それぞれの物理量に積分核と粒子の重みをかけたものの重ね合わせとして表現されることがわかる。

### 3.4.2 解析概要

二次元 SPH 解析を用いて、斜めデブリシールドの一枚目バンパの設置角度の違いによって、生じるデブリクラウドの運動エネルギー・形状の変化を調べる。

Table 3 Thickness of 1st Bumper

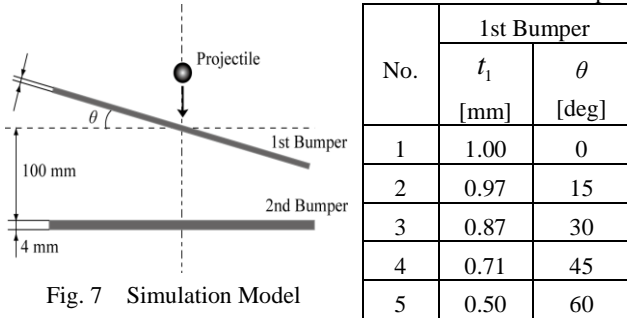


Fig. 7 Simulation Model

Fig. 7 に解析モデル、Table 3 に一枚目バンパの厚さの変化を示す。解析には、プロジェクトイルとして直径 7.0mm のポリエチレン球を用い、バンパには AL6061 を用いた。また、衝突速度は全て 7.3km/s とした。今回の解析では、角度の変化によってバンパの質量が増加することを防ぐため、角度増加に従い厚さを減少させている。

### 3.4.3 解析結果

Fig. 8 に一枚目設置角度が 30deg の場合と、60deg の場合の結果を示す。どちらも衝突後 12 $\mu$ sec の瞬間である。赤い粒子がプロジェクトイルを表し、青い粒子がバンパを表している。図を見ると、一枚目に衝突して跳飛するプロジェクトイル粒子や、バンパ角度によるデブリクラウドの形状の違いなどが詳細に表現されていることが分かる。

一枚目を貫通した後のプロジェクトイルの与圧壁に垂直な成分の運動エネルギー減衰率(Decay Rate)、および生じたデブリクラウドの空間的な広がり(Extensivity)を Fig. 9 に示した。まず、運動エネルギーの減衰率に関しては、一枚目の設置角度が大きくなるほど、減衰率もゆるやかに大きくなる傾向を表している。すなわち、衝突の角度が大きいくほど、デブリの運動エネルギーを減衰させることができる。つまり、一枚目に対する衝突角度を大きくすれば、二枚目に与える損傷を軽減させることができるということを示している。

次に、デブリクラウドの空間的な広がりに関しては、一枚目バンパの設置角度が大きくなるほど、広がり方が小さくなる傾向を表している。つまり、デブリクラウドがより高密度の状態ですべて二枚目に衝突するので、二枚目に与えるダメージが大きくなることを示している。

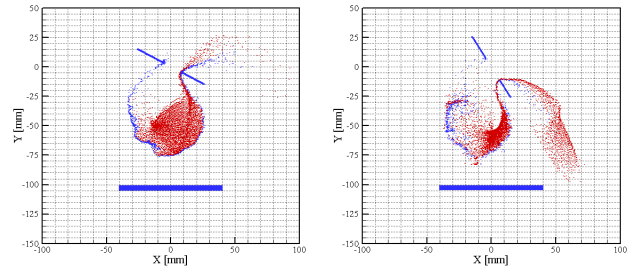


Fig. 8 12 $\mu$ sec after impact (left: 30deg, right: 60deg)

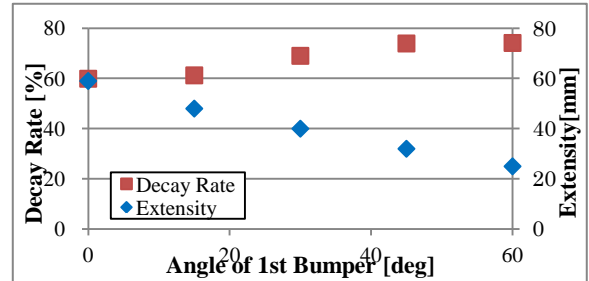


Fig. 9 Result of Simulation

### 3.4.4 結言および今後の課題

本研究では、デブリ衝突による与圧壁へのダメージを軽減できると想定し、斜めデブリシールドに対する衝突実験および数値解析を行った。その結果、ガス銃を用いた超高速衝突実験より、一枚目の設置角度を大きくするほど二枚目表面に生じる衝突痕の広がり、すなわちデブリクラウドの広がりが狭くなり、二枚目に与えるダメージが大きくなることが分かった。また、二次元 SPH 法による数値解析より、一枚目の設置角度を大きくするほど、プロジェクトイルの運動エネルギー減衰率は大きくなることが分かった。これは、二枚目のダメージを軽減する影響要因である。同時に、一枚目の設置角度増加によって、デブリクラウドの空間的な広がりが小さくなることが分かった。これは、二枚目のダメージを増加させる影響要因となる。これら相反する2つの影響要因の関係性を、衝突実験の結果と併せて考えると、運動エネルギーの減衰による影響より、デブリクラウドの広がりの方が大きく、より支配的な要因となると考えられる。

今後、生じるデブリクラウドのエネルギー密度を定量的に評価し、衝突角度による比較を行う必要がある。

## 4. 参考文献

- [1] R. J. Rabb, E. P. Fahrenthold, Numerical Simulation of Oblique Impact on Orbital Debris Shielding, *International Journal of Impact Engineering*, 23, (1999), 735-744
- [2] Q. Zhang, Y. Chen, F. Huang, R. Long, Experimental study on expansion characteristics of debris clouds produced oblique hypervelocity impact of LY12 aluminum projectiles with thin LY12 aluminum plates, *International Journal of Impact Engineering*, 35, (2008), 1884-1981
- [3] I. Shirota, H. Kohri, A. Yumoto, M. Kato, K. Tanaka, S. Sasaki, Advantage of oblique collision for debris protector, *Nanomaterials and Energy*, 1, (2012), 87-95