

# スペースデブリ衝突に対する CFRP のバンパ性能評価

草野 匠 (法政大), 東出 真澄 (JAXA), 新井 和吉 (法政大), 永尾 陽典, 長谷川 直 (JAXA)

## 1. はじめに

宇宙空間にはスペースデブリ (以下デブリ) が多数存在している。低高度軌道のデブリ速度は 7 km/s で, 宇宙機に衝突する時の平均速度は 10 km/s にもなる。従って, 微小デブリの衝突が宇宙機に重大な損傷をもたらす可能性がある。デブリは年々増加を続けており, 低軌道における 10 cm 以上のデブリ総数は, 17,000 個にもなる<sup>[1]</sup>。そのため, デブリと宇宙機との衝突リスクは増加しており<sup>[2]</sup>, 重要コンポーネントにデブリバンパを搭載するケースが増えてきている。デブリバンパとして最も有名なのは Whipple Bumper と呼ばれるバンパで, アルミ合金板をシールド材として使用する。しかしデブリバンパは宇宙機の重量増加を引き起こしており, より軽量のバンパ開発が必要とされている。本研究では, 軽量で高剛性である点から CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) に着目する<sup>[3,4]</sup>。デブリ衝突後にバンパ背面から生じるデブリクラウドの運動エネルギーを算出することで, 従来のアルミバンパと CFRP バンパの性能比較を実施した。従来のアルミバンパに比べて CFRP バンパは何%の軽量化が可能かを算出し, どのような CFRP がデブリバンパとして適しているのかを調べた。CFRP は樹脂と炭素繊維から成る複合材料であるため, 繊維または樹脂を変化させた CFRP バンパを用意して, 性能比較を実施した。

## 2. バンパ性能評価方法

### 2.1 デブリバンパ

Whipple Bumper は, 薄板と厚板が間隔を置いて配置される二重壁構造になっている。バンパへの衝突で発生したデブリクラウドは膨張しながら飛翔し, 構造壁へ衝突する。つまり, デブリクラウドの持つ運動エネルギーが構造壁の損傷程度を左右する。デブリクラウドの運動エネルギーを減少させること, 即ちデブリクラウドの速度を減衰させてデブリを微細に砕くこと, がバンパには求められる。従って本研究では, デブリクラウドの運動エネルギーを算出することでバンパ性能を評価する。デブリクラウドを形成している破片個々の運動エネルギーを算出し, その和をデブリクラウドの運動エネルギーとする。運動エネルギーを求めるのに必要な破片速度と破片質量の算出法について以下に示す。

### 2.2 破片速度

高速度カメラでデブリクラウドを観察し, 破片速度を算出する。取得される画像の解像度の問題から, デブリクラウドを形成する破片一つ一つの速度を計測すること

は難しい。デブリクラウドは中空で大部分の破片は外郭に分布するので<sup>[5]</sup>, 本研究ではデブリクラウド外郭の速度を破片速度とする。また, 飛翔体がバンパに対して垂直に衝突する場合デブリクラウドは軸対称に広がることが知られており<sup>[5]</sup>, 本研究では飛散角度が同じ破片は同じ速度で運動しているものと仮定する。高速度カメラの撮影間隔は 1~2  $\mu\text{sec}$  と十分短いので, 破片は等速直線運動しているとみなして破片速度  $V_d$  を算出する。

### 2.3 破片質量

破片質量を算出するため, バンパ背後に Witness Plate を配置してクレータデータを得る。衝突する破片と Witness Plate に生じるクレータとの関係は, Cour-Palais によって以下のように導出されている<sup>[6]</sup>。

$$d_i = \left( \frac{P}{5.24 \times H_i^{-0.25} \times \rho_p^{0.5} \times \rho_t^{-0.167} \times E_t^{-0.33} \times V_d^{0.67}} \right)^{1.056} \quad (1)$$

ここで  $d_i$  は破片直径[cm],  $P$  はクレータ深さ[cm],  $H_i$  は Witness Plate のブリネル硬さ[HB],  $\rho_p$  は破片密度[g/cm<sup>3</sup>],  $\rho_t$  は Witness Plate 密度[g/cm<sup>3</sup>],  $V_d$  は破片速度[km/s]  $E_t$  は Witness Plate の縦弾性率 [GPa]である。破片速度  $V_d$ , クレータ深さ  $P$ , 破片密度  $\rho_p$  を求めれば破片の直径がわかるので, 破片の形状を球と仮定して質量を算出する。2.1 項で求めた破片速度と飛散角度の関係を使い, Witness Plate 上のクレータ位置から飛散角度を算出することで破片速度  $V_d$  を得る。クレータ深さ  $P$  は Witness Plate 上のクレータを光学顕微鏡で測定することで算出する。破片密度  $\rho_p$  は次項で示す手法を用いて求める。

### 2.4 クレータの判別

式(1)を用いて破片質量を算出するためには, 衝突した破片の密度  $\rho_p$  が必要である。そこで, クレータの由来を検証する予備試験を実施した。配置を Fig. 1 に示す。飛翔体に鋼球, バンパに CFRP, Witness Plate に銅板を使用した。飛翔体加速器には九州工業大学所有の二段式軽ガス銃を用いた。衝突速度は 4 km/s である。実験後, 光学顕微鏡を用いて Witness Plate に生じたクレータを観察した。その結果, 底面に線状の凹凸があるクレータと底面が滑らかなクレータの 2 種類に分類されることがわかった。そこで, 底面形状の異なる 2 種類のクレータにそれぞれ成分分析を実施した。

成分分析結果を Figs. 2, 3 に示す。①は SEM 画像, ②は鉄の成分量, ③は炭素の成分量を表している。画像は色が明るいほど特定の元素量が多いことを示しており,

元素が存在しなければ黒く表示される。Fig. 2 の底面が滑らかなクレータからは鉄が検出された。従って底面が滑らかなクレータは飛翔体破片の衝突によって生じたと考えられる。Fig. 3 に示す底面に線状の凹凸があるクレータには鉄の元素が存在せずクレータ全体に炭素の存在が確認されたので、底面に線状の凹凸があるクレータはCFRPバンパの破片から生じたものと考えられる。クレータの底面を観察すればCFRP破片か金属破片のどちらが衝突して生じたクレータなのか判断できることが分かったので、式(2)の破片密度 $\rho_p$ を求めることができる。

### 3. バンパ性能の比較

#### 3.1 アルミバンパとCFRPバンパの比較

飛翔体加速器にJAXA/ISAS 所有の二段式軽ガス銃を用い、CFRPバンパと従来のアルミバンパに超高速衝突試験を実施した<sup>[7]</sup>。ターゲットの配置をFig. 4 に示す。ターゲットには厚さの異なるCFRP積層板(IMS60/133, 擬似等方積層)及びアルミ合金板(A6061-T6)を用いた。CFRPの厚さは0.6, 1.2, 1.8, 2.3 mm (4, 8, 12, 16 ply), アルミ合金板の厚さは0.5, 1.0, 1.5 mm とした。飛翔体にはデブリを模した直径1 mmのA2017球を使用した。衝突速度は6.3~6.7 km/sとし、飛翔体衝突によってバンパ背面から発生したデブリクラウドを高速度カメラで撮影した。バンパの後方75 mmの位置にWitness Plate (A2024-T3, 厚さ5 mm)を設置した。試験結果をFigs. 5~6 に示す。



Fig. 1 Test configuration for fragment mass calculation.

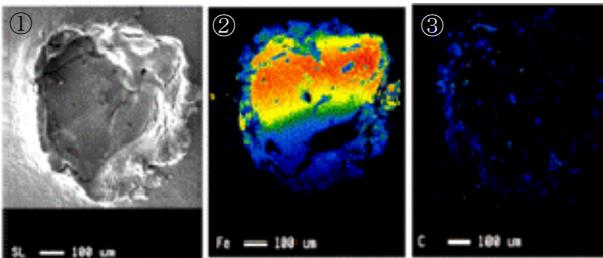


Fig. 2 Crater produced by a steel fragment.

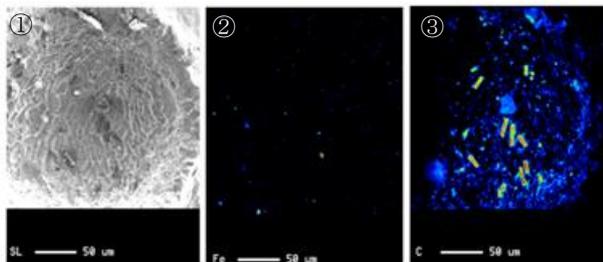


Fig. 3 Crater produced by a CFRP fragment.

CFRPバンパの衝突面にはFig. 5のように最外層の剥離が観察された。Witness Plateの表面をFig. 6に示す。円状に分布している白い点がクレータである。大きなクレータは中心付近に集中しており、その周囲に小さなクレータが分布した。

前述の方法を用いて、従来バンパとCFRPバンパから生じたデブリクラウドの総運動エネルギー $E_d$ を算出した。算出結果をFig. 7に示す。赤のプロットがCFRPバンパ、青のプロットが従来バンパの結果である。ここで $E_p$ は衝突前の飛翔体の運動エネルギーであり、縦軸の $E_d/E_p$ は衝突前後

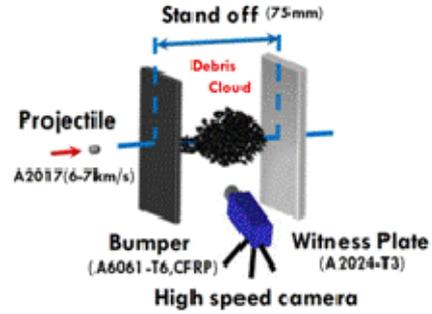


Fig. 4 Test configuration.

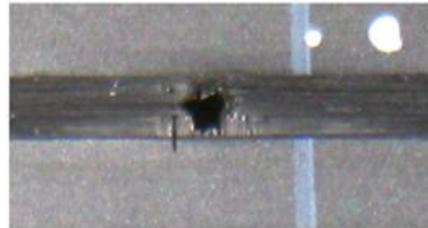


Fig. 5 Perforated hole in a CFRP bumper.



Fig. 6 Craters on a witness plate.

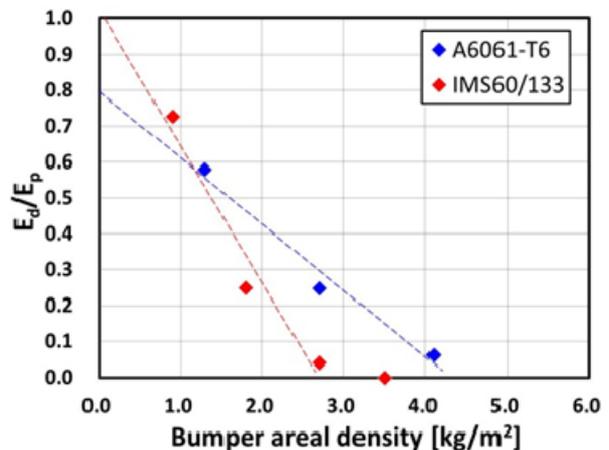


Fig. 7 Comparison of debris cloud energy of aluminum and CFRP bumpers.

Table 1 Tested CFRP bumpers

Target ID	Fiber		Matrix	Prepreg
	Strength [MPa]	Modulus [GPa]		
①Strength A, Modulus C, EP	5800	290	epoxy	IMS60/133
②Strength A, Modulus C, PC	5800	290	polycarbonate	T800SC/PC
③Strength B, Modulus C, EP	4900	230	epoxy	T700S/2592
④Strength B, Modulus B, EP	4400	377	epoxy	M40JB/2592
⑤Strength C, Modulus A, EP	2600	640	epoxy	K63712/EP

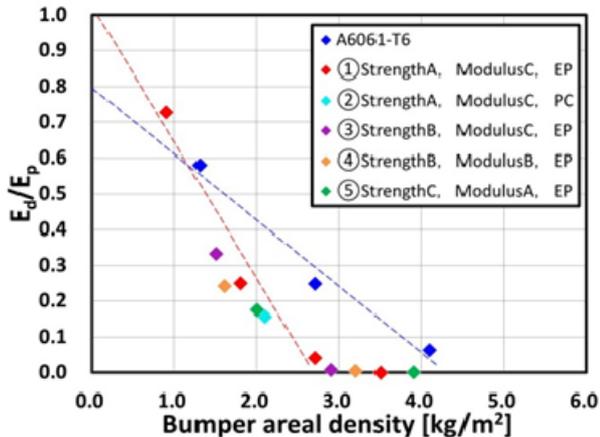


Fig. 8 Comparison of debris cloud energy of CFRP bumpers.

の運動エネルギーの比を表している。また、横軸はバンパの面密度である。バンパの面密度が約1.2 kg/m<sup>2</sup>以上の時、CFRPバンパの方がアルミバンパよりデブリクラウドの総運動エネルギーを小さくできることが分かった。E<sub>d</sub>/E<sub>p</sub>が約0.05になる条件同士を比較すると、CFRPバンパを宇宙機に搭載した場合は約40%の軽量化が可能である。

### 3. 2 繊維、樹脂を変化させたCFRPの性能比較

どのようなCFRPがデブリバンパに適しているか調べるため、様々なCFRPバンパへ超高速衝突実験を実施した。用いたCFRPバンパをTable 1に示す。本研究では、繊維強度と弾性率の大きさに合わせて値の大きい方からA~Cに分類した。CFRPのマトリックスとしてはエポキシ樹脂がよく用いられるが、過去の研究からポリカーボネート樹脂が衝突速度V<sub>p</sub>=300 m/sにおいて耐衝撃性に優れているという結果が出ているので<sup>[8]</sup>、ポリカーボネートをマトリックスとしたCFRPにも衝突試験を実施した。前項で面密度1.2 kg/m<sup>2</sup>以上のCFRPバンパが有用であると分かったため、1.6~4.1 kg/m<sup>2</sup>の面密度を持つCFRPバンパ（厚さ1.0~2.3 mm）の性能評価を実施した。

デブリクラウド運動エネルギーの比較結果をFig. 8に示す。CFRPバンパの面密度が2.7 kg/m<sup>2</sup>以上のとき運動エネルギーが極めてゼロに近いが、Witness Plateには非常に浅いクレータが生じており飛行体はバンパを貫通した。面密度2.7 kg/m<sup>2</sup>以下のCFRPバンパの結果に有意な差は見られなかった。CFRPの繊維と樹脂の違いがデブリクラウドの運動エネルギーに及ぼす影響は小さいことが分かった。

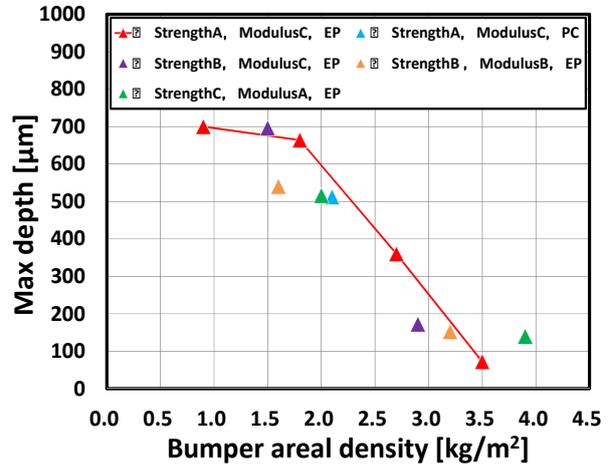


Fig. 9 Maximum depth of Craters

CFRPバンパ背後に生じたクレータの最大深さをFig. 9に示す。樹脂の異なるバンパ①と②の結果を比較するとクレータの最大深さに有意な差は見られなかったため、樹脂を変化させてもバンパ背後への影響はほとんど変わらないと考えられる。面密度1.5 kg/m<sup>2</sup>のバンパ③と面密度が1.6 kg/m<sup>2</sup>のバンパ④を比較したとき、④の方がクレータの最大深さが156 μm小さくなった。バンパ③と④は繊維強度がほぼ等しいので、繊維弾性率の違いがクレータ深さに影響したと考えられる。

### 4. まとめ

バンパ背後に発生するデブリクラウドの運動エネルギーを算出することで従来バンパとCFRPバンパの性能比較を実施した。その結果、従来バンパと同程度の性能を有したCFRPバンパを搭載する場合、最大で約40%の軽量化が図れることが分かった。同様の方法で繊維または樹脂を変化させた5種類のCFRPバンパを性能比較した。宇宙運動エネルギーで性能比較を実施するとCFRPの違いによる有意な差は観察されなかったが、クレータ深さに注目すると弾性率の高い繊維で作られたCFRPがデブリバンパとして適している可能性が示唆された。

### 謝辞

本研究は九州工業大学の研究設備および宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同研究設備を利用して実施されました。

## 参考文献

- 1) NASA Orbital Debris Program Office: Orbital Debris Quarterly News, **16**(1), 2012.
- 2) 戸田 勸, 八坂 哲雄, 小野田 淳次郎, 鈴木 良昭: スペースデブリ問題とその現状, 日本航空宇宙学会誌, 第14巻, 第478号, pp. 603-614, 1993年.
- 3) 草野 匠, 東出 真澄, 武田 真一, 永尾 陽典, 新井 和吉, 赤星 保浩: CFRP への超高速衝突におけるデブリクラウドに関する研究, 第20回衝撃波シンポジウム講演要旨集, 2009年.
- 4) 草野 匠: スペースデブリ衝突に対する CFRP のパンパ性能評価, 平成23年度法政大学修士論文, 2011年.
- 5) Piekutowski, A.J: Structural Damage Prediction and Analysis for Hypervelocity Impact Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact, *NASA CR 201000*, 1995.
- 6) Cour-Palais, B.G: Hypervelocity Impact Investigations and Meteoroid Shielding Experience Related to Apollo and Skylab, *NASA CP 2360*, pp. 247-275, 1985.
- 7) Kawai, N., Tsurui. K., Hasegawa, S., Sato, E: Single Microparticle Launching Method Using Two-Stage Light-Gas Gun for Simulating Hypervelocity Impacts of Micrometeoroids and Space Debris, *Rev. Scientific Instruments*, **81**, 115105, 2010.
- 8) 常石健悟, 武田真一, 新井和吉: 炭素繊維強化ポリカーボネートの耐衝撃性評価, 第10回材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集, 2011年.