

[16014]

## 放射線照射が繊維強化複合材料の破壊メカニズムに与える影響 Effect of Irradiation on Fracture Mechanism of Fiber Reinforced Composites

西田政弘<sup>#A)</sup>, 平岩泰幸<sup>A)</sup>, 東出真澄<sup>B)</sup>,

Masahiro Nishida<sup>#A)</sup>, Yasuyuki Hiraiwa<sup>A)</sup>, Masumi Higashide<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Electrical and Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology

<sup>B)</sup> JAXA, ARD

### Abstract

The effects of gamma-ray radiation on fracture behavior of quasi-isotropic CFRP plates consisting of unidirectional pre-preg sheets were examined at hypervelocities. Spherical projectiles made of aluminum alloy 2017-T4 with a diameter of 1.0 mm struck CFRP specimens at approximately 2.4 km/s. Specimens after impact were observed and the penetration hole areas and ejecta size were examined.

**Keyword:** Space debris, Hypervelocity impact, CFRP, Gamma ray

### 1. はじめに

宇宙構造物には繊維強化複合材料が使われているが、宇宙環境では、放射線、原子状酸素、熱サイクル、高真空などにより剛性や強度が変化する可能性があるため、実用に当たり、多くの研究が行われてきた<sup>[1]</sup>。一方で、宇宙空間には、多くの宇宙ゴミがあり、問題となっている。特に低周回軌道上では、その周回速度は 7 km/s 以上という非常に速い速度であることから、衝突時には、破損や破砕、その破片の飛散が起きる。そこで、宇宙ゴミの軌道予測、増加予測、発生防止、防御などの研究が JAXA を中心として行われており、非常に速い衝突速度における破壊メカニズムを解明することは大切である<sup>[2,3]</sup>。そのため、多くの研究グループが、非常に速い衝突速度における破壊メカニズムを調べている<sup>[4-6]</sup>が、これまでの研究対象はアルミニウム合金が多かった。

炭素繊維強化複合材料 (CFRP) を宇宙構造物に用いるために、非常に速い衝突速度における衝突実験が行われ、貫通限界速度、破壊メカニズム、温度の影響などが明らかになったが<sup>[7-12]</sup>、不明な点も多い。しかし、宇宙環境が CFRP の高速衝突時の破壊メカニズムに与える影響について、詳しく研究した例は多くないが、今後、人工衛星の寿命が延びていくことを考えると、宇宙環境の影響がますます重要になってくる。

そこで、本研究では、放射線を繊維強化複合材料に照射させた試験片を準備し、宇宙ゴミの衝突を模擬した非常に速い衝突速度における破壊メカニズムを調べ、放射線の影響を考察した。

### 2. 実験方法

ターゲットには、疑似等方積層材 (東レ P13080-3; 炭素繊維 M60JB, 樹脂#3800, 16 ply) 厚さ 0.7 mm, 配向 $[45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/-45^\circ/90^\circ/90^\circ]$ s の CFRP を用いた。試験片サイズは 75 mm × 100 mm で、高崎量子応用研究所のコバルト 60 ガンマ線照射施設にて

ガンマ線照射を行い、照射線量率 10 kGy/h で 1000 時間照射した CFRP 板 (照射線量 10 MGy) および照射線量率 1 kGy/h で 500 時間照射した CFRP 板 (照射線量 0.5 MGy) を準備した。実験結果は、平成 27 年度の照射線量 0.5 MGy (照射線量率 1 kGy/h で 500 時間照射) の結果とも比較した。

ガンマ線照射の際は、空気の影響を避けるため、CFRP を真空のガラスアンプル中に封入して、照射を行った。照射の際、CFRP の数枚は、ガラスアンプル中に封入することなく空気中で照射し、周りの大気の影響 (空気の影響) も調べた。ガンマ線照射を行った CFRP と比較のためにガンマ線照射を行っていない CFRP に対しても、直径 1 mm の飛翔体 (アルミニウム合金 A2017-T4) を約 2.5 km/s で衝突させ、試験片の損傷状況を調べた。なお、超高速衝突実験には、図 1 に示すような本研究室所有の二段式軽ガスガンを用いた。



Figure 1. Photograph of two stage light gas gun.

### 3. 実験結果

図 2 に、衝突後のターゲットの写真を示す。損傷の様子を観察すると、図 2 の写真からでは少し判別しにくいですが、貫通孔付近の破損を比較すると、最表面層の損傷は、最表面層の炭素繊維方向である  $45^\circ$  方向に大きく広がっており、貫通孔より大きな範囲

[16014]

で、表層がはがれている様子が観察できる。これは、昨年度の報告書<sup>[13]</sup>でも述べたように、CFRP は強度に異方性があるためである。試験片の写真から、画像解析することにより、貫通孔の面積を算出した。その結果を表 1 に示す。0.5 MGy 照射の試験片では、照射なしの試験片に比べ、貫通孔が大きくなった。しかし、さらに照射量が増えた 10 MGy 照射の試験片では、他の試験片に比べ、貫通孔が小さくなった。

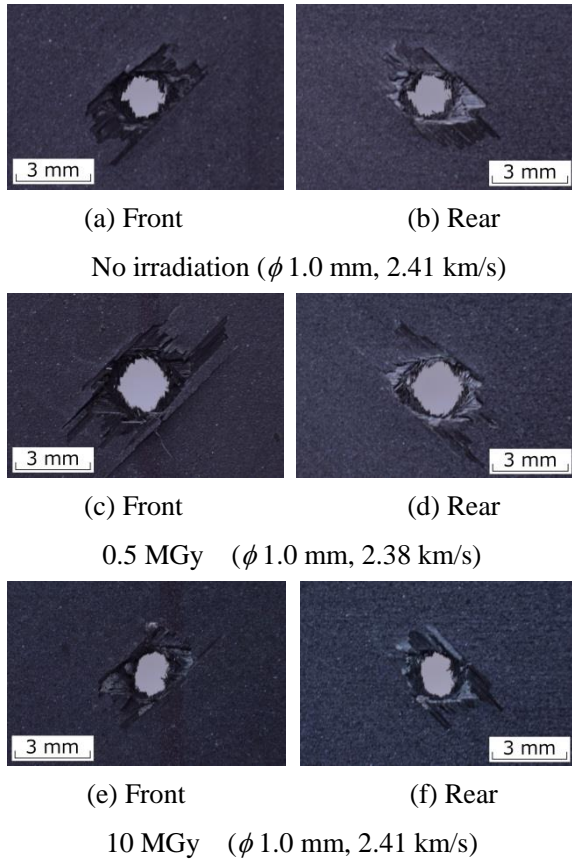


Figure 2 Photographs of specimens near perforation holes<sup>[14]</sup>.

Table 1 Areas of perforation holes (参：Euro Space Debris)

No irradiation	2.0 mm <sup>2</sup>
0.5 MGy	3.1 mm <sup>2</sup>
10 MGy	1.8 mm <sup>2</sup>

衝撃実験後に、実験チェンバーからイジェクタ(破片)を回収し、観察した。図 3 にその写真を示す。照射の有無および照射量による違いはみられなかった。大きなイジェクタの 10 個程度の写真を示しているが、前方に噴出したイジェクタと比較した場合、ガンマ線照射後の方が、炭素繊維と思われる細長い

イジェクタが多く、それに対し、ガンマ線照射なしの場合、前方に噴出したイジェクタは大きなものが多く、繊維に樹脂が付着したままのものが多い。後方に噴出したイジェクタと比較した場合それほど大きな差は見られなかった。今後は、より詳しく調べる必要がある。

その長さ  $a$  を測定した。なお、イジェクタの長さ  $a$ 、幅  $b$ 、厚さ  $c$ 、投影面積  $A_e$  は図 4 のように定義する。個々のイジェクタを撮影し、その写真を画像解析ソフト (ImageJ) で解析することにより、それぞれのサイズ分布を求めた。イジェクタ長さ  $a$  のサイズ分布を図 5 に示す。

図 5(a) に示したターゲット前方から回収されたイジェクタの長さ分布では、残念ながら、照射による大きな違いは認められなかった。しかし、照射なしの試験片の場合、2 mm 以上のイジェクタは、13 個回収されたのに対し、10 MGy 照射試験片では、5 個回収されたのみであり、明確な差がみられた。図 3(b) の後方から回収されたイジェクタの長さ分布では、照射による違いがみられ、イジェクタ長さ 1 mm ~ 1.5 mm の範囲で、10 MGy 照射の試験片からのイジェクタはとても少なかった。図 5 の結果から、照射により回収された大きなイジェクタが少なくなっており、大きな破片が生成されにくくなった可能性がある。今後も詳細に確認する必要がある。

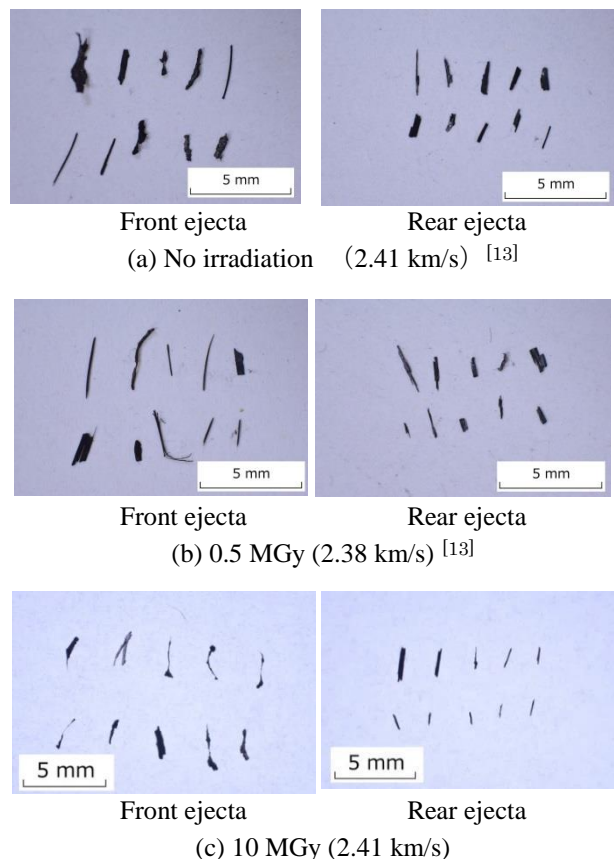


Figure 3 Photographs of ejecta collected from test

[16014]

chamber.

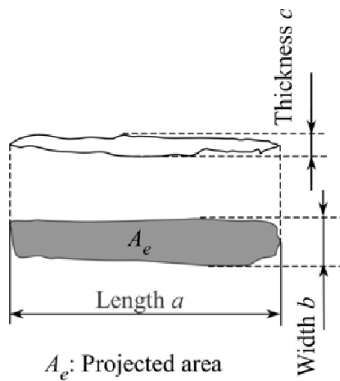
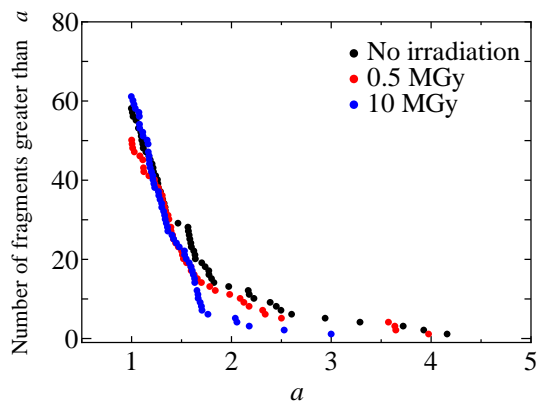
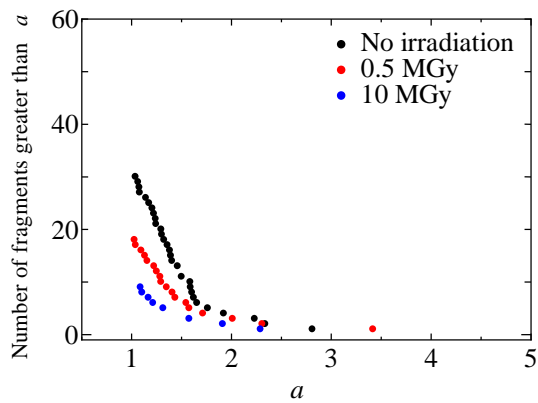


Figure 4 Definition of ejecta collected from test chamber.



(a) Front side

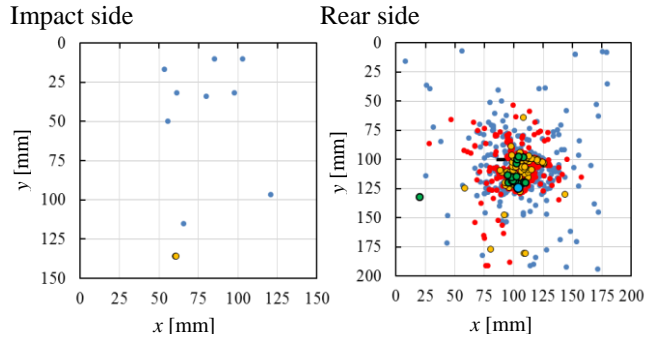


(b) Rear side

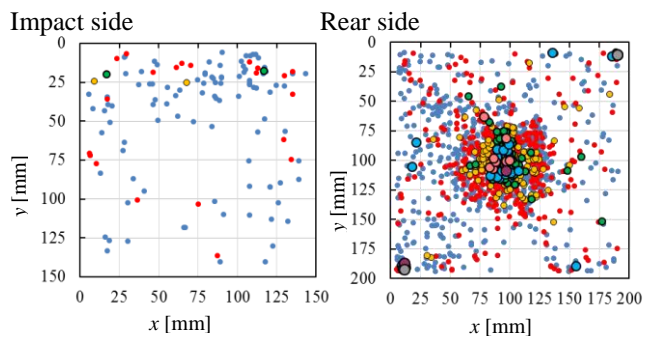
Figure 5. Size distribution of ejecta length, 2.4 km/s<sup>[15]</sup>.

また、実験では、ターゲットの前方 100 mm 離れた位置に検証板 (銅板 C1100-1/4H, 150×150 mm, 厚さ 2 mm, 穴径 30 mm) を設置した。ターゲットの後ろには 50 mm 離して検証板 (200×200 mm, 厚さ 2 mm, 穴径なし) を置いた。イジェクタの評価は、検証板についた圧痕を顕微鏡で撮影し、画像解析ソフト (ImageJ) を用いて圧痕のサイズおよび位置を測定した。この方法は国際規格 ISO11227 に基づく方法

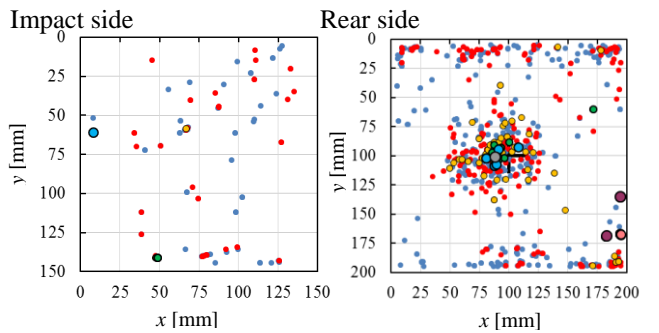
である。



(a) No irradiation (2.41 km/s)



(b) 0.5 MGy (2.38 km/s)



(c) 10 MGy (2.41 km/s)

Figure 6. Photographs of witness plates after impact experiments

図 6 に、検証板の解析結果を示す。図 7 は、図 6 に示した記号の説明である。0.5MGy (図 6(b)) では、衝突表面および裏面ともに 1mm 以下のイジェクタの検出量が増加していることが分かる。表 1 より、0.5MGy (2.38km/s) では、照射なしと 10MGy に比べ、貫通孔投影面積が増加していることと、図 5 の (a), (b) より、1mm 以上のイジェクタが照射なしに比べて減少していることから、0.5Gy において、1mm 以下の微細なイジェクタが増加したことが考えられる。また、10MGy (図 6(c)) では、イジェクタの検出量は照射なしとほぼ変わらないものの、衝突裏面において、中心部に 0.75~0.1mm のサイズのイジェクタ痕があることが分かる。この圧痕は飛翔体がほぼ破碎せずに衝突した跡であり、ガンマ線の照射によ



[16014]

てターゲットが脆くなったことで、衝突による飛翔体の破碎が抑えられ、飛翔体がほぼ原形をとどめたままターゲットを貫通したことが原因と考えられる。

- 0.025~0.05 mm
- 0.05~0.075 mm
- 0.075~0.1 mm
- 0.1~0.15 mm
- 0.15~0.2 mm
- 0.2~0.3 mm
- 0.3~0.4 mm
- 0.4~0.5 mm
- 0.5~0.75 mm
- 0.75~1.0 mm

Figure 7 Explanation of symbol in Figure 6

#### 4. まとめ

2 種のガンマ線照射を行った CFRP 板とガンマ線照射を行っていない CFRP 板に対し、飛翔体を超高速衝突させ、試験片の損傷状況を調べた。ガンマ線照射により、貫通孔の直径は大きくなった後、小さくなった。また、ガンマ線照射により、破片（イジェクタ）のサイズ、個数は変化した。今後は、さらに、線量の影響を詳しく調べ、線量率、線種の影響についても調べていきたい。

#### 参考文献

- [1] 平出哲也, “宇宙航空用繊維強化樹脂の放射線劣化機構およびその評価法に関する研究”, 博士論文, 1991  
<http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3085572>
- [2] 八坂哲雄, 宇宙のゴミ問題—スペース・デブリ, 裳華房, 1997.
- [3] 木部勢至朗, ”宇宙の厄介者: スペースデブリ”, 航空と文化, 106, 2013.  
[http://www.aero.or.jp/web-koku-to-bunka/2013\\_04/2013\\_04.html](http://www.aero.or.jp/web-koku-to-bunka/2013_04/2013_04.html)
- [4] Eric L. Christiansen, Ed Cykowski, Javier Ortega, “High oblique impacts into thick and thin targets”, *International Journal of Impact Engineering*, 14(1-4), 1993, 157-168.
- [5] V.S. Hernandez, L.E. Murr, I.A. Anchondo, “Experimental observations and computer simulations for metallic projectile fragmentation and impact crater development in thick metal targets”, *International Journal of Impact Engineering*, 32(12), 2006, 1981–1999.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X05000928>
- [6] Masahiro Nishida, Kayoko Kuzuya, Koichi Hayashi, Sunao Hasegawa, “Effects of alloy type and heat treatment on ejecta and crater sizes in aluminum alloys subjected to hypervelocity impacts”, *International Journal of Impact Engineering*, 54, 2013, pp. 161–176.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X12002278>
- [7] 永尾陽典, 木部勢至朗, 醍醐加奈子, 原彩水, ”炭素繊維複合材料への超高速衝突による損傷領域と残存強度について”, *日本複合材料学会誌*, 35(1), 2009, 15-26.  
<http://doi.org/10.6089/jscm.35.15>
- [8] D. Numata, K. Ohtani, M. Anyoji, K. Takayama, K. Togami, M. Sun, “HVI tests on CFRP laminates at low temperature”, *International Journal of Impact Engineering*, 35(12), 2008, 1695–1701.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X08001991>
- [9] 高橋秀明, 柴田邦也, 新井和吉, 長谷川直, ”液体を用いたスペースデブリシールドの CFRP 構成の検討”, 平成 22 年度スペースプラズマ研究会(2011)  
[http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2011/0303\\_plasma\\_proc.shtml](http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2011/0303_plasma_proc.shtml)
- [10] Higashide, M., Kusano, T., Takayanagi, Y., Arai, K., Hasegawa, S., Comparison of Aluminum Alloy and CFRP Bumpers for Space Debris Protection, *Procedia Engineering*, 103, 189-96, 2015  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815007006>
- [11] 森永幸, 鶴田佳宏, 平山寛, 花田俊也, ”低速および高速衝突実験に基づく新しい衛星破碎モデルの構築”, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol. 57, No.661, 2009, 56-64.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsass/57/661/57\\_661\\_56/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsass/57/661/57_661_56/_article/-char/ja/)
- [12] M. Nishida, H. Kato, K. Hayashi, M. Higashide, Ejecta Size Distribution Resulting from Hypervelocity Impact of Spherical Projectiles on CFRP Laminates, *Procedia Engineering*, 58, 2013, 533–542  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813009673>
- [13] 西田政弘, 平岩泰幸, 林浩一, 東出真澄, 放射線照射が繊維強化複合材料の破壊メカニズムに与える影響, 平成 27 年度原子力機構施設利用共同研究・一般共同研究 成果報告書, 2016, No. 15024  
[http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/kyodo/kaihoken/Houoku\\_Seika/HoukoPDF/2015ZanteiPDF/15024\\_nisida.pdf](http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/kyodo/kaihoken/Houoku_Seika/HoukoPDF/2015ZanteiPDF/15024_nisida.pdf)
- [14] 西田政弘, 平岩泰幸, 東出真澄, CFRP 板の超高速貫通挙動へのガンマ線照射の影響, 第 8 回日本複合材料会議 (JCCM-8) 前刷原稿集, 2017, No. 1D-05.
- [15] Masahiro Nishida, Yasuyuki Hiraiwa, Koichi Hayashi, Masumi Higashide, Effects of Gamma Ray Irradiation on Ejecta Size from CFRP Plates, *Proceedings of 7th European Conference on Space Debris*, 2017.