

[15024]

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^{#A)}, 平岩泰幸^{A)}, 林浩一^{B)}, 東出真澄^{C)},

Masahiro Nishida ^{#A)}, Yasuyuki Hiraiwa ^{A)}, Masumi Higashide ^{B)}

^{A)} Department of Electrical and Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology

^{B)} National Institute of Technology, Toba College

^{C)} JAXA, ARD

Abstract

The effects of gamma-ray radiation on fracture behavior of plane woven CFRP due to hypervelocity impact were examined. Spherical projectiles made of aluminum alloy 2017-T4 with a diameter of 1.0 mm struck CFRP specimens at approximately 2.5 km/s. Specimens after impact were observed and the weight reduction of CFRP targets was examined.

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

1. はじめに

#nishida.masahiro@nitech.ac.jp

宇宙構造物に繊維強化複合材料 (FRP) が使われているが、宇宙環境では、放射線、原子状酸素、熱サイクルなどにより強度が低下するため、実用化に当たり、多くの研究が行われてきた^[1]。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、非常に速い速度で衝突した時の破壊メカニズムは非常に重要である^[2,3]。そこで、多くの研究グループが、そのような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^[4-6]が、研究対象はアルミニウム合金が主であった。

近年、炭素繊維強化複合材料 (CFRP) を宇宙構造物に用いることを考えるようになると、実際に非常に速い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、温度の影響などが調べられ、その破壊メカニズムが明らかになってきた^[7-12]。しかしながら、これまでは、宇宙環境が CFRP の高速衝突時の破壊メカニズムなどに与える影響について、詳しく研究した例はほとんどないが、今後、人工衛星の寿命が延びていくことを考えると、宇宙環境の影響が重要になってくる。

そこで、本研究では、2 種類の繊維強化複合材料に、放射線を照射させ、宇宙ゴミ衝突時のような非常に速い速度における破壊メカニズムに与える影響を調べた。

2. 実験方法

ターゲットには、CFRP の UD 疑似等方積層材 (東レ P13080-3, 樹脂 3900-2, 炭素繊維 M60JB, 16 ply) 厚さ 0.7 mm, [45°/45°/0°/0°/-45°/-45°/90°/90°]s および平織材 (東レ FX6142, 樹脂 3900-2, 炭素繊維 T300, 8 ply) 厚さ 1.1 mm, [45°/0°/45°/0°]s) を用いた。

[15024]

サイズは 75 mm × 100 mm とし、同サイズの 4 枚の試験片を、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 1 kGy/h で 500 時間照射した CFRP 板（照射線量 0.5

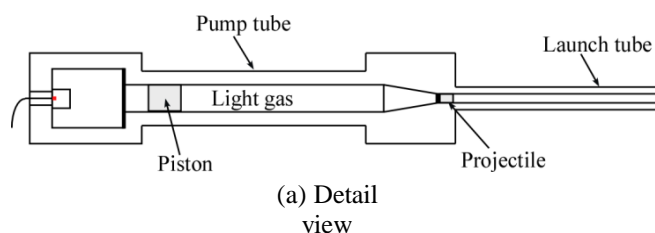
MGy）を衝突実験に用いた。なお、ガンマ線照射中は、空気の影響を避けるため、UD 疑似等方積層材

（P13080-3）を 2 枚、平織材（FX6142）を 1 枚の計

3 枚を真空のガラスサンプル中に封入して、照射を行った。UD 疑似等方積層材（P13080-3）の 1 枚は、ガラスサンプル中に封入することなく空気中で照射し、空気の影響（酸化劣化の影響）を調べたことにした。ガンマ線照射は、2015 年 12 月 15 日から

1 月 19 日に行ったため、2015 年度中には、そのうち、ガラスサンプル中に封入した UD 疑似等方積層材 1 枚を用いて衝突実験を行うことができた。

ガンマ線照射を行った CFRP 板と比較のためにガンマ線照射を行っていない CFRP 板に対し、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。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。



(b)
Photograph

Figure 1. Two stage light gas gun.

[15024]

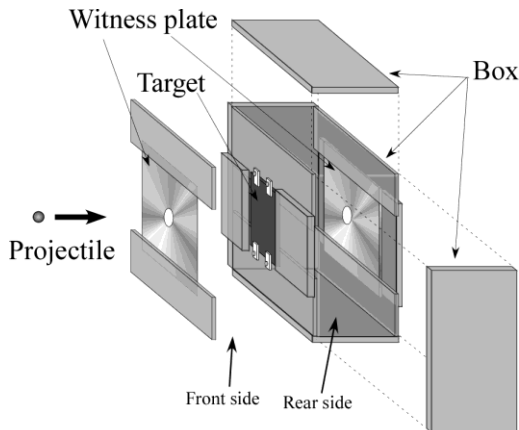
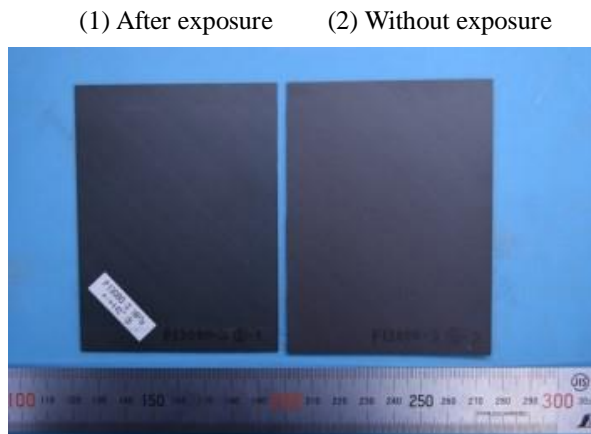
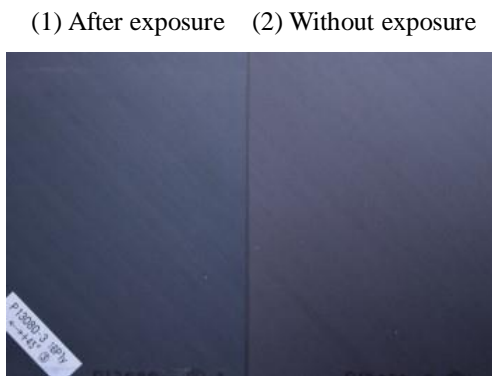


Figure 2. Experimental setup for impact test.



(a) Photographs of specimens before impact tests.



(b) Enlarged image of Fig. (a) Figure 3
Effects of radiation exposure

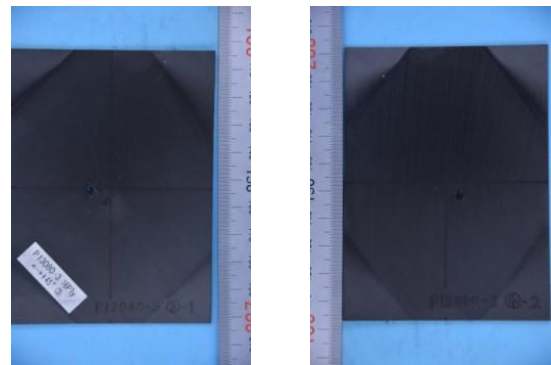
実験チャンバーの中に、図 2 に示すように、ターゲットの前方と後方 100 mm の位置に検証板 (C1100P-1/4H, サイズ 200 mm × 200 mm × 2 mm) を設置した。検証板には、飛翔体を通り抜けるための直径 25 mm の穴があいている。ターゲットの前方と後方に噴出したイジェクタを分けて回収するために

ターゲットの後方に容器を設置した。

3. 実験結果

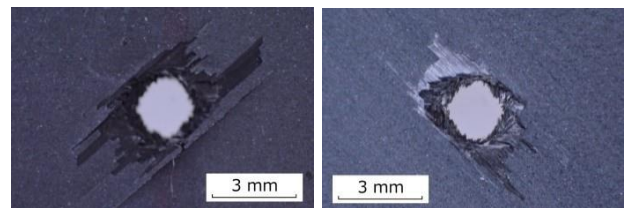
図 3 にガンマ線照射した CFRP 材と、照射を行っていない CFRP 材を並べて撮影した写真を示す。左側が照射後、右側は照射を行っていない CFRP である。ガンマ線照射による表面の変化などはなく、大きな変化は見られないが、照射していない材料と並べると、わずかに緑色に変色していることがわかる。ガンマ線による、変色はこれまでに報告されており、同じ結果が得られたと考えられる。

次に、衝突後のターゲットの損傷の様子を比較する。衝突実験後のターゲットの写真を図 4 に、その拡大写真を図 5 に示す。

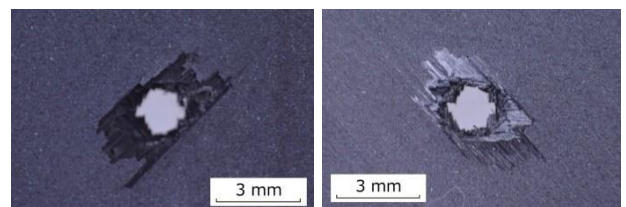


(a) After exposure (φ1.0 mm, 2.38 km/s)
(b) Without exposure (φ1.0 mm, 2.41 km/s)

Figure 4 Photographs of specimens after impact tests.



(a) Front surface After exposure (φ1.0 mm, 2.38 km/s)
(b) Rear surface



(c) Front surface Without exposure (φ1.0 mm, 2.41 km/s)
(d) Rear surface

Figure 5 Photographs of specimens near perforation holes.

[15024]

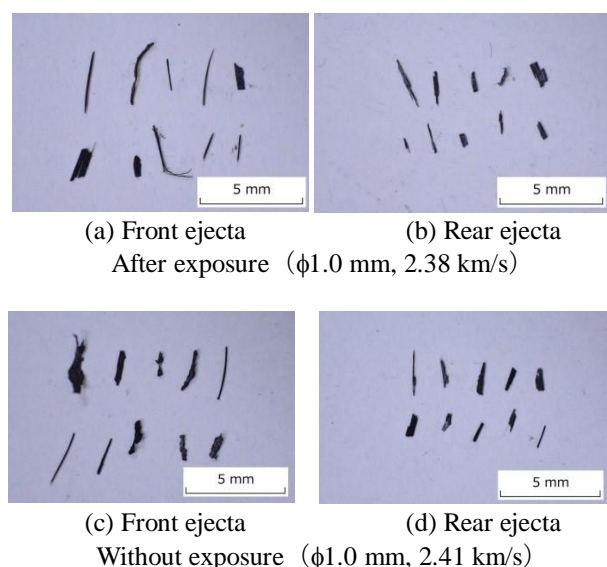


Figure 6 Photographs of ejecta collected from test chamber.

CFRP は異方性があるため、方向によって強度が異なるので、貫通孔付近の破損を観察すると、最表面層の損傷は、最表面層の炭素繊維方向である 45° 方向に大きく広がっており、貫通孔より大きな範囲で、表層がはがれている様子も観察できる。

飛翔体の直径は 1 mm であったが、ガンマ線照射後の CFRP 材には、直径 2 mm 程度の大きな貫通孔が形成されている。図 5 の裏面の損傷を比較すると、最表面層における貫通孔からの破損範囲はほぼ同じように見えるものの、貫通孔の大きさはガンマ線照射後の方が大きいため、破損の範囲は、ガンマ線照射後の方が大きくなっており、ガンマ線照射による材料劣化が原因であると考えられる。

衝突実験後に、実験チェンバーから回収した破片（イジェクタ）の写真を図 6 に示す。大きな方の 10 個程度を示すが、前方に噴出したイジェクタで比較した場合、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い。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で比較した場合それほど大きな差は見られなかった。

大きなイジェクタで比較した際、その長さは貫通孔の大きさを超えるような 2 mm 以上のものが多いことから、最表面層から剥離したものであることが考えられ、損傷状態がほぼ同じことから、大きな差

が得られなかったと考える。

4. まとめ

ガンマ線照射を行った CFRP 板と比較のために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、試験片は変色しており、貫通孔の直径は大きくなった。また、ガンマ線照射により、破損範囲が大きくなっているように思われる。今後は、X 線 CT や超音波探傷装置で試験片の内部を詳しく観察する必要がある。

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
- [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

[15024]

[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砕モデルの構築”, 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/

[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>