[17005]

# 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),本江晶絵 A),東出真澄 B),

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 and electron beam radiation on fracture behavior of quasi-isotropic carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plates were examined. Spherical projectiles made of aluminum alloy 2017-T4 with a diameter of 1.0 mm stuck CFRP plates at approximately 2 to 5 km/s. Specimens after impact were observed. Areas of the penetration holes were calculated and ejecta from the surface were observed.

Keyword: Space debris, Hypervelocity impacts, CFRP, Gamma ray, Electron beam

### 1. はじめに

宇宙環境では,放射線,原子状酸素,熱サイクル, 高真空などが材料の剛性や強度に影響を与える可能 性があり,宇宙構造物に多く使われている炭素繊維 強化複合材料(CFRP)の実用化に当たり,多くの研 究が行われてきた[1].宇宙環境の中でも,宇宙ゴミ の増加が問題となっている.特に低周回軌道上では, その平均衝突速度は10 km/s程度と推測されており, 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[2,3].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[4-5]が, これまでの研究で対象とする材料はアルミニウム合 金が多い.

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て いるが,未だ不明な点も多い.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少なく,今後,人工衛星の寿命 が延びていくことが予想される中,宇宙環境の影響 が CFRP の剛性や強度に与える影響は,ますます重 要になってくる.

本研究では、繊維強化複合材料に放射線を照射させた試験片を準備し、宇宙ゴミの衝突を模擬したアルミニウム球をその試験片に衝突させ、破壊メカニズムを調べた.

## 2. 実験方法

ターゲット材料として,疑似等方に積層した CFRP (東レ P13080-3, 炭素繊維 M60JB/樹脂#3800-2, 16 ply,厚さ 0.7 mm),配向[45°/45°/0°/0°/-45°/-45°/90 °/90°]sを用いた.試験片サイズは 75 mm ×100 mm とした.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) および照射線量率 10 kGy/h で 300, 650, そし て 1000 時間照射した CFRP 板(照射線量 10 MGy) を準備した.また,照射線量 0.5 MGy の CFRP 板に おいて,照射線量率を 0.5 kGy/h で 1000 時間照射し, 照射線量率の違いと超高速衝突による損傷状況の関係性について調べた.さらに,1号加速器において 電子線の照射を行った.照射線量率は 2 kGy/s で,照 射時間は 250 秒, から 15000 秒(照射線量 0.5 MGy か ら 30 MGy) まで照射した.実験結果は,平成 27 年 度および 28 年度の結果とも比較した.得られた結果 のうちの幾つかを報告する.

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.電子線の照射 においても、空気の影響を避けるため、CFRP を真 空チャンバー内に設置し、チャンバー内を 2~3 Pa の 真空にして照射を行った.放射線照射を行った CFRP と比較のために放射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 示すような二段式軽ガスガンを用いた.



Figure 1. Photograph of two stage light gas gun.

[17005]

図2に衝突速度2.4 km/s での,各照射量における ターゲットの貫通孔面積を示す.なお、図3は、図 2に示した記号の説明である.貫通孔面積は、衝突 後のターゲットの写真を画像解析し、投影面積とし て算出したものである. 平成 28 年度の報告書では, 照射線量 0.5 MGy において貫通孔の面積が増加し た一方で、照射線量が増加した 10 MGy では、貫通 孔の面積が減少していた.しかし、今年度.新たに 照射した 3.5 MGy および 6.5 MGy の結果からは, 放 射線量による貫通孔面積の違いがほとんど見られな い結果となった.



Figure 2. Areas of perforation holes (2.4 km/s).



Figure 3. Explanation of symbol in Figure 2

さらに、各照射量における貫通孔の面積と衝突速 度の関係性を図4に示す. 照射していないターゲッ トと照射量 0.5 MGy, 10 MGy の貫通孔面積を比較 すると、どの場合においても速度の増加に伴って貫 通孔の面積も増加していることが分かる. さらに, 10 MGy 照射では、衝突速度が 2.4 km/s, 5.0 km/s の いずれにおいても、未照射のターゲットに比べて、 貫通孔の面積の大きさが下回っていることが分かる. 昨年度の報告書で述べたイジェクタの評価結果では, 10 MGy 照射において, 飛翔体がほぼは破砕せずに検 証板に衝突していたことから、ガンマ線の照射によ ってターゲットが脆くなったことが推測された. 今 回の貫通面積の結果からも、10 MGy 照射によって CFRP の力学的特性が低下したことが考えられる.



Figure 4. Relationship of areas of perforation holes and velocity.

3

4

Velocity, km/s

5

6

2

今後も曲げ試験などの静的試験によって詳細に調べ る必要がある.

最後に,照射線量率の違いが超高速衝突による損 傷状況に与える影響について調べた.表1に2種の 照射線量率での貫通孔投影面積の結果を示す.表1 から, 照射線量率 0.5 kGy/h では, 1 kGy/h の場合に 比べて貫通孔面積の大きさが減少しているが、これ は衝突速度が 2.1 km/s と低速であったことが理由と 考える.よって,照射線量率の違いが貫通孔の面積 に及ぼす影響は小さいと考えられる.

Table 1. Areas of perforation holes.

Total dose	Velocity	Areas of perforation
	[km/s]	holes [mm <sup>2</sup> ]
0.5 MGy	2.1	2.0
(Dose rate 0.5 kGy)		
0.5 MGy	2.4	3.1
(Dose rate 1 kGy)		
10 MGy	2.4	1.8

図 5 (a), (b) に, 照射線量率 0.5 kGy/h, 照射線量 0.5 MGy における衝突後のターゲットの様子を,図 5(c), (d) に照射線量率1kGy/h, 照射線量 0.5 MGy における衝突後のターゲットの様子を示す.貫通孔 付近の様子について比較すると、どちらのターゲッ トにおいても最表面層が繊維方向に剥離しているこ とが観察できる. また, 最表面の剥離量に注目する と,照射線量率 0.5 kGy/h では 1 kGy/h に比べて貫通 孔付近の剥離量が僅かに減少していることが確認で きる.これらのことから,同じ照射線量であっても, 照射線量率の違いが、貫通孔付近の剥離の様子に影 響を及ぼしている可能性がある. 今後は, 非破壊検 査による内部観察を行い、より詳細に調べていく必 要がある.

## [17005]



(a) Front (a) Rear 0.5 MGy (0.5 kGy/h, 2.05 km/s)





(c) Front (d) Rear 0.5 MGy (1 kGy/h, 2.38 km/s)

Figure 5. Phogrotaphs of specimens near perforation holes

### 4. まとめ

各照射量でガンマ線照射を行った CFRP 板と未照 射の 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.実験結果より,3.5 MGy および 6.5 MGy のガンマ線照射では,貫通孔の面積 に大きな差は見られなかった.しかし,ガンマ線照 射による貫通孔面積と衝突速度の関係性を調べた結 果,10 MGy 照射において,衝突速度 2.4 km/s,5.0 km/s のいずれにおいても未照射の貫通孔面積を下回った. また,照射線量率の違いを比較した結果,貫通孔面 積に大きな差は見られなかったものの,貫通孔付近 の剥離の様子に若干の違いが見られた.今後は,さ らに,線種の影響を詳しく調べ,超高速衝衝突実験 を用いた損傷状態の解析だけでなく,静的試験や FT-IR, ESR のような化学分析も行い,破壊メカニズ ムに与える影響を調べるつもりである.

## 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.ht ml
- [4] Eric L. Christiansen, Ed Cykowski, Javier Ortega, "Highy 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/S0734743X05 000928