

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420012

研究課題名(和文)CFRPの劣化が超高速飛翔体衝突時のイジェクタおよび熱サイクル強度に与える影響

研究課題名(英文)Effect of CFRP degradation on ejecta due to hypervelocity impact and thermal cycle

研究代表者

西田 政弘(Masahiro, Nishida)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60282828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙環境により材料特性が変化したCFRP材に、宇宙ゴミ(スペースデブリ)が衝突した時の衝撃特性および衝突後の試験片(貫通穴を有する試験片)の熱サイクルによる強度低下について明らかにした。特に、宇宙環境での環境劣化が超高速衝突時のイジェクタ(サイズ、個数および分布)に与える影響および劣化したCFRPに超高速飛翔体衝突により、ダメージを受けた材料に対し、その強度低下を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The decrease in strength was clarified when projectiles struck degradation CFRP specimens due to gamma ray irradiation at high velocities and degradation due to thermal cycle occurred. In particular, the size, the number and their distribution of ejecta were examined in details under several experimental conditions.

研究分野：材料力学

キーワード：材料力学 衝撃強度 超高速 宇宙環境

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙機、宇宙構造物には、多くの炭素繊維複合材料 (CFRP) が使われているが、宇宙環境では、① 10^{-6} Torr 以下の高真空、②強い紫外線、高エネルギー放射線、③ -150°C ~ $+200^{\circ}\text{C}$ の温度環境および熱サイクルが強度低下の要因となりうる。高真空中では、複合材料からのアウトガスなどによって機器が汚染され機能に影響を与える可能性があり、また樹脂の劣化による強度・靱性の低下の可能性が指摘されている。宇宙環境では、強い紫外線、高エネルギー電子線・陽子線・重粒子線などがある。電子線・ γ 線は容易に内部に侵入していき、内部まで劣化する。これまで、電子線・ γ 線が繊維強化樹脂に照射された時の材料の静的強度に与える影響についてのみ、詳しく調べられている。宇宙環境では、太陽の直射光を受けるときと受けないうちがあることにより、低温、高温になり、さらにその熱サイクルを受けることになる。この熱サイクルは繊維強化樹脂に対して、繊維および樹脂の熱膨張、その差によって生じる熱応力、繊維配向の異方性による熱応力、またこれらが繰り返されることによる疲労で破壊が生ずる。

(2) 上記、①~③のうち、本研究では主に放射線に注目し、さらに宇宙ゴミの影響も考慮する。宇宙ゴミ (スペースデブリ) は 1 km/s を超える超高速で地球を周回しており、衝撃時には、飛翔体は破砕し、被衝撃体は流体的な振舞いをするため、その挙動は、 1 km/s 以下の衝撃挙動とは全く異なり、複雑で未解明の点が多い。

2. 研究の目的

宇宙環境により材料特性が変化した CFRP 材に、宇宙ゴミ (スペースデブリ) が衝突した時の衝撃特性および衝突後の試験片 (貫通穴を有する試験片) の熱サイクルによる強度低下について明らかにすることを目的とする。特に、宇宙環境での環境劣化が超高速衝突時のイジェクタ (サイズ、個数および分布) に与える影響および劣化した CFRP に超高速飛翔体衝突により、ダメージを受けた材料に対し、その強度低下を明らかにする。宇宙ゴミの観点からの宇宙構造材料 (CFRP) の設計指針 (余寿命予測、信頼性向上) についての端緒のデータを得る。

3. 研究の方法

本研究では、宇宙環境を模擬して CFRP 板へ電子線もしくは γ 線を照射し、特性を変化させた CFRP 板に飛翔体 (アルミニウム球) が 1 km/s 以上で高速衝突する際の噴出物 (イジェクタ) の挙動を詳しく調べた。

ターゲットには、数種の疑似等方積層材を用いた。配向 $[+45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ (8ply、厚さ 1.2 mm) と配向 $[+45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$ (16ply、厚さ 2.3 mm) になるように積層した 2 種類の CFRP (東邦テナックス株式会社) および配向

$[45^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}]_s$ の CFRP (東レ P13080-3; 炭素繊維 M60JB, 樹脂 #3800, 16 ply, 厚さ 0.7 mm) を主に用いた。試験片サイズは $75\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ とした。ガンマ線の照射の場合は照射線量率 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。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 の枚数は、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) を超高速で衝突させ、試験片の損傷状況を調べた。なお、超高速衝突実験には、二段式軽ガスガンを用いた。

4. 研究成果

(1) まず、CFRP 試験片の基礎データを得るために、厚さの異なる試験片を用いて、その破壊挙動およびイジェクタの挙動について詳しく調べた。一例として、衝撃後の試験片の写真を図 1 に示す。表面側、裏面側ともに、最表面の繊維方向に沿って長く剥がれていることがわかる。試験片が薄い方が、その領域が小さく、厚くなるととても長くなり、試験片の端部まで達していることがわかる。

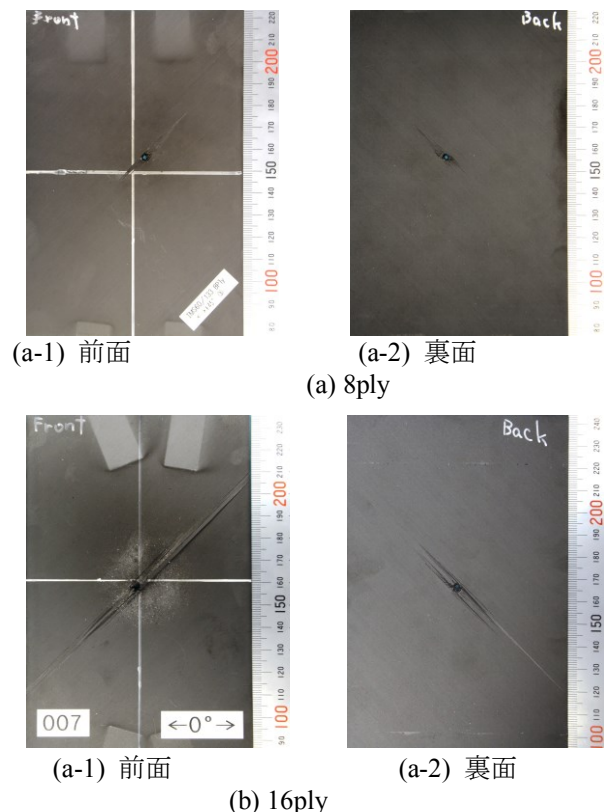
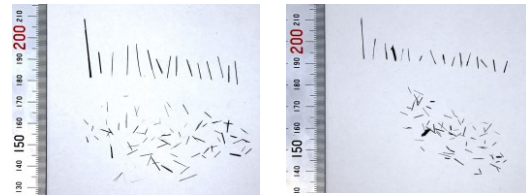


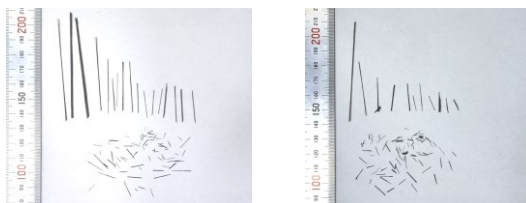
図 1 破壊挙動の写真

次に、実験チェンバーから回収されたイジェクタ (破片) の写真を図 2 に示す。図 1 か

ら分かるように、最表面層に沿って、長く剥がれている破片に由来して、細長いイジェクタが回収されていることがわかる。これらは、CFRP の特徴的な破片であり、金属材料、特に、宇宙で多く使われるアルミニウム合金とは全く異なるイジェクタであることがわかった。図1の破壊挙動に対応して、長い破片が回収されていることがわかる。回収したイジェクタはターゲット前方、後方ともに板厚に関係なく細長い形状になることがわかった。

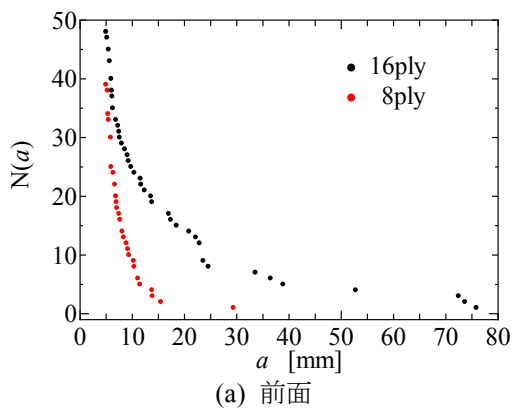


(a-1) 前面 (a-2) 後面
(a) 8 ply

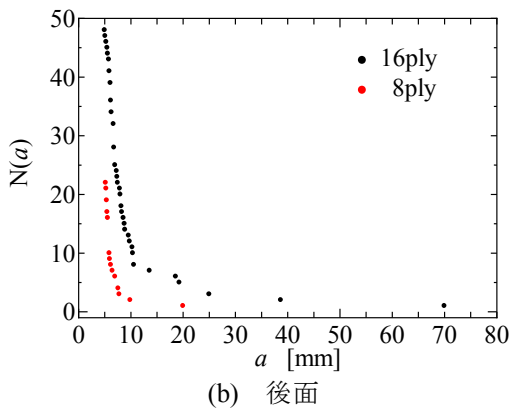


(b-1) 前面 (b-2) 後面
(b) 16 ply

図2 回収された破片の写真



(a) 前面



(b) 後面

図3 破片の累積個数分布

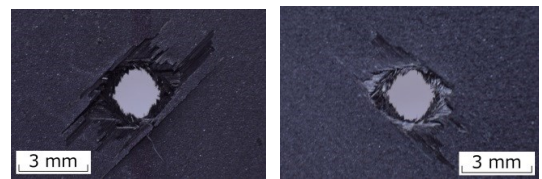
回収したイジェクタを撮影した写真を用いて、画像解析することで、イジェクタのサイズを測定し、累積個数分布を求めた。最大

長さの結果を図3に示す。前方、後方ともにイジェクタの個数は板厚が小さい方が少ないことがわかった。その差は倍以上で、厚さに正比例しないこともわかった。また、イジェクタの大きさも前方、後方ともに板厚が小さい方が小さくなった。

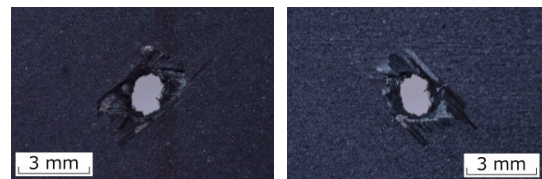
(2) ガンマ線照射した試験片の衝突後のターゲットの写真として、一例を図4に示す。損傷の様子は少し判別しにくいですが、貫通孔付近の破損を比較すると、ガンマ線照射の場合も、最表面層の損傷は、最表面層の炭素繊維方向である 45°方向に大きく広がっており、貫通孔より大きな範囲で、表層ははがれている様子が観察できる。試験片の写真から、画像解析することにより、貫通孔の面積を算出した。その結果を表1に示す。0.5 MGy 照射の試験片では、照射なしの試験片に比べ、貫通孔が大きくなった。しかし、さらに照射量が増えた 10 MGy 照射の試験片では、他の試験片に比べ、貫通孔が小さくなった。



(a) 前面 (b) 後面
照射無し (直径 1.0 mm, 2.41 km/s)



(a) 前面 (b) 後面
0.5 MGy 照射 (直径 1.0 mm, 2.38 km/s)



(a) 前面 (b) 後面
10 MGy 照射 (直径 1.0 mm, 2.41 km/s)

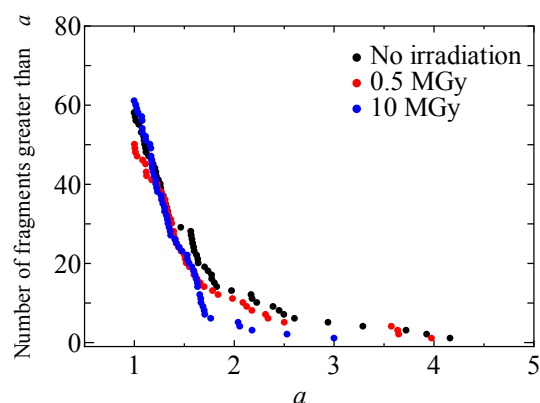
図4 ガンマ線を照射した試験片の衝撃後の写真

表1 貫通孔の面積

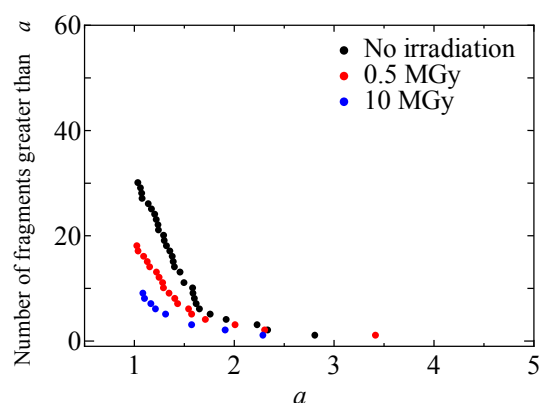
No irradiation	2.0 mm ²
0.5 MGy	3.1 mm ²
10 MGy	1.8 mm ²

イジェクタのサイズを測定し、累積個数分布を調べた。一例として、長さ a のサイズ分布を図5に示す。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、多く回収されたのに対し、10 MGy 照射試験片では、数個回収されたのみであり、明確な差がみられた。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。



(a) 前面の分布



(b) 後面の分布

図 5 破片の累積個数分布

以上のように、ガンマ線照射により、破壊形態が大きく変化することがわかった。設計指針（余寿命予測、信頼性向上）の観点から重要なデータを得ることができた。また、本研究のようなガンマ線照射と宇宙ゴミの超高速衝突のような複数の影響の相乗効果が大切であることもわかった。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

① Masahiro Nishida, Yasuyuki Hiraiwa,

Koichi Hayashi, Sunao Hasegawa, Ejecta cone angle and ejecta size following a non-penetrating hypervelocity impact, *Procedia Engineering*, 103 (2015) pp. 444-449.

DOI:doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.058

② 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*, ESA/ESOC, Darmstadt/Germany, 18-21 April 2017 (2017).

〔学会発表〕（計 14 件）

① 戸谷一貴, 西田政弘, 林浩一, 東出真澄, CFRP への飛翔体衝突時に生じるイジェクタのサイズ分布に及ぼす飛翔体直径の影響, 日本航空宇宙学会・関西中部支部合同講演会, 2014 年 11 月 21 日, 名城大.

② 西田政弘, 戸谷一貴, 林浩一, 東出真澄, 超高速衝突による CFRP からのイジェクタサイズ分布, 複合材料合同会議, 2015 年 3 月 4 ~ 6 日, 東京理科大.

③ 西田政弘, 戸谷一貴, 林浩一, 東出真澄, 放射線照射が超高速衝突時に CFRP から生ずるイジェクタサイズに与える影響, 日本材料学会・年次講演会, 2015 年 5 月 23~24 日, 山形大.

④ 西田政弘, 戸谷一貴, 林浩一, 東出真澄, 超高速衝突時の CFRP からのイジェクタサイズに与える飛翔体直径の影響, 第 57 回構造強度に関する講演会, 岡山理科大, 2015 年 8 月.

⑤ 西田政弘, 平岩泰幸, 林浩一, 東出真澄, ガンマ線照射が及ぼす超高速衝突時の CFRP の破壊挙動への影響, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015 年 10 月.

⑥ 西田政弘, 宇宙利用材料からの高速衝突時のイジェクタ, 日本材料学会 第 141 回衝突部門委員会, JAXA 筑波宇宙センター, 2015 年 11 月.

⑦ 平岩泰幸, 西田政弘, 林浩一, 長谷川直, 超高速衝突により発生するイジェクタサイズ分布の相似性, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶應大, 2015 年 11 月.

⑧ 西田政弘, 超高速衝突時にアルミニウム合金から噴出するイジェクタの相似性, 衝突研究会 2015 北海道大, 2015 年 11 月.

⑨ 西田政弘, 超高速飛翔体衝突時に発生する破片サイズ分布, サイズ分布ビッグピクチャー研究会, 千葉工大, 2016 年 2 月.

⑩ 西田政弘, 平岩泰幸, 林浩一, 東出真澄, 超高速衝突により CFRP から生ずるイジェクタサイズへのガンマ線照射の影響, 日本材料学会第 65 期通常総会・学術講演会, 富山大, 2016 年 5 月.

⑪ 西田政弘, 平岩泰幸, 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, 第 11 回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会および原子力機構施設利用一般共同研究、原子力専攻施設共同利用(弥生研究会)成果報告会, 東大, 2016年8月.

⑫ 西田政弘, 平岩泰幸, 東出真澄, ガンマ線照射が繊維強化複合材料の破壊挙動に与える影響, 第 1 回 QST 高崎研シンポジウム, 高崎, 2017年1月.

⑬ 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), 東大, 2017年3月.

⑭ 西田政弘, 平岩泰幸, 東出真澄, ガンマ線照射による繊維強化複合材料の超高速貫通破壊挙動への影響, 日本材料学会・年次講演会, 2017年5月27~28日, 名城大.

[図書]

なし

[産業財産権]

○出願状況 なし

○取得状況 なし

[その他]

ホームページ

http://researcher.nitech.ac.jp/html/108_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 政弘 (NISHIDA, Masahiro)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60282828

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし