

[19003]

超高速衝突時の耐 AO コーティング／繊維強化複合材料の衝撃破壊 Impact Fracture of AO Coating / Fiber Reinforced Composites in Hypervelocity Impacts

西田政弘^{#A)}, 高原秀征^{A)}, 古田尚正^{B)}, 岩瀬賢明^{B)}, 東出真澄^{C)}, 石田雄一^{C)}
Masahiro Nishida^{#A)}, Hideyuki Takahara^{A)}, Naomasa Furuta^{B)}, Yoshiaki Iwase^{B)}, Masumi Higashide^{C)}, Yuichi Ishida^{C)}
^{A)} Department of Electrical and Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology
^{B)} Toagosei Co., Ltd
^{C)} JAXA, Chofu Aerospace Center

Abstract

Atomic oxygen (AO) coating/fiber reinforced composites were proposed as strong materials against space environment such as electron beam, gamma ray, atomic oxygen and space debris impact. At first, the effects of AO coating on impact fracture behavior were examined before examining the effects of electron beam and gamma ray irradiation. AO coating decreased perforation hole area and decreased the number of ejecta. When the impact side was coated, electron beam was irradiated without coming off.

Keyword: Space debris, Hypervelocity impact, Polyimide CFRP, Gamma ray, Electron beam

1. はじめに

宇宙では、放射線（電子線，ガンマ線），原子状酸素，紫外線，温度，熱サイクル，高真空，宇宙ゴミなどのような環境因子が材料強度や剛性に影響を与える可能性があるため，その影響について，多くの研究が行われている．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）においても，多くの研究が行われてきた（例えば，[1]など）．宇宙環境の中でも，低軌道上の宇宙ゴミ（スペースデブリ）は，その平均衝突速度が 10 km/s 程度のように非常に高速であると考えられており，衝突時には，貫入や貫通により多くの破片が飛散する．そこで，宇宙ゴミの軌道予測，増加予測，除去，発生防止，防御など，いろいろな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も重要である^[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（例えば，[4-5]など）が，これまでの研究ではアルミニウム合金を用いた研究が非常に多い．

CFRP を宇宙構造物で用いるために，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．特に，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，宇宙環境が CFRP の強度や剛性に与える影響は，ますます重要になってくる．当研究グループは，これまで，超高速での飛翔体衝突で，ガンマ線^[6]および電子線^[7]により，CFRP の貫通孔径が変化することを明らかにしている．

ポリイミド樹脂は放射線に強い種類が開発されており，IKAROS のソーラーセイル材料として実績がある．ポリイミド樹脂を基材とした CFRP（ポリイミド CFRP）が開発されている^[8,9]．しかし，ポリイミド樹脂も，原子状酸素（AO）の衝突で表面が劣化し

てしまう可能性があるため，宇宙ステーション補給機 HTV に実績のある耐 AO コーティング材を，ポリイミド CFRP の表面に塗布した複合材（耐 AO コーティング／ポリイミド CFRP）は，宇宙環境に強い材料と考えられる．しかし，ガンマ線，電子線が耐 AO コーティング材に与える影響は太陽光吸収率について調べられているのみで，強度については不明で，実用上の面から，ガンマ線，電子線が衝撃破壊現象に与える影響を詳しく調べる必要がある．

そこで，本研究では，一般共同研究で，2019 年からの 3 年計画で，耐 AO コーティング／ポリイミド CFRP のガンマ線，電子線，さらには，耐原子状酸素の照射の影響，宇宙ゴミの衝突による複合効果を調べる予定である．本稿では，初年度の 2019 年度の結果を報告する．

2. 実験方法

ポリイミド CFRP は，JAXA 提供のプリプレグから製作した．擬似等方に 8 ply（厚さ 1.0 mm）積層した（積層方向 [45°/0°/-45°/90°]_s の擬似等方積層板）．これまでの研究結果^[10]から，ポリイミド CFRP の片面のみ（衝突面側）に，有機-無機ハイブリッド材料であり，耐原子状酸素性が認められているシルセスキオキサン誘導体 SQ シリーズ（東亜合成（株）製）^[11-12]をコーティングした．コーティング厚さは 20 μm の試験片を作成し，その影響を調べた．飛翔体は，アルミニウム合金球 A2017-T4，直径 1.6 mm を用いた．超高速衝突実験には，JAXA/ISAS の二段式軽ガスガンを用いた．CFRP 試験片の前方と後方に噴出したイジェクタを分けて回収できるような実験装置を用いて，衝突実験を行った．

3. 実験結果

図 1(a)^[13]に貫通孔まわりの写真を示す．擬似等方性積層板のため，貫通孔の形状はほぼ円形で，アル

nishida.masahiro@nitech.ac.jp

[19003]

ミニウム合金薄板ターゲットの貫通孔と同様であるが、アルミニウム合金薄板ターゲットでは、衝突面および衝突裏面にリップが形成されるのに対して、CFRPではリップは、ほとんど観察できない。衝突面も衝突裏面も、繊維方向に大きく剥がれた部分が観察できる。剥がれた破片は、アルミニウム合金薄板ターゲットからの破片と比較して、サイズが大きく、後方へ飛散すれば、防護性能を低下させる可能性があり、前方に飛散すれば、宇宙ゴミになる可能性があり、危険である。

上記の様子は、図 1(b) [13]に示すコーティングなし (CFRPのみ) の結果と比べても、大きな差はみられず、この程度の厚さのコーティングでは、その有無が衝撃破壊の様子に与える影響はとても小さかった。

図 1 [13]に示す貫通孔の写真を用いて、画像処理ソフト ImageJにより、その面積を算出した。その結果を、表 1 [12]に示す。貫通孔が少し小さくなっており、コーティングが貫通孔に与える影響を明確にするために、今後も、さらにデータを増やしていくつもりである。

図 2 [12]に、CFRP 試験片から前方へ噴出したイジェクタ (噴出物) の長さに関する累積個数分布を示す。衝撃実験後に、実験チェンバーから回収したイジェクタを一個一個、カメラで撮影し、その写真を画像解析ソフト (ImageJ) で解析することにより、サイズ分布を求めた。イジェクタの長さ a および幅 b の定義を図 3 に示す。イジェクタの長さ a に関する累積個数分布である図 2 より、コーティングにより、明確に前方への噴出物の個数が減っていることがわかる。

Table 1 Areas of Perforation Holes [13]

Without coating	Coating 20 μm
3.94 mm ²	3.90 mm ²



(a-1) Impact side (coating of 20 μm , 3.11 km/s)



(a-2) Rear side (coating of 20 μm , 3.11 km/s)



(b-1) Impact side (without coating, 3.24 km/s)



(b-2) Rear side (without coating, 3.24 km/s)

Figure 1. Photographs of perforation holes [13].

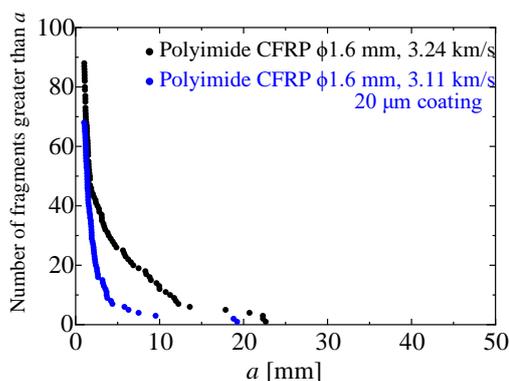


Figure 2. Ejecta length distribution [13].

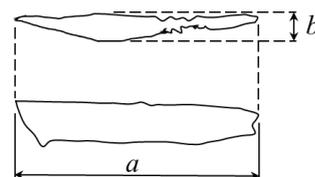


Figure 3. Definition of ejecta collected from test chamber.

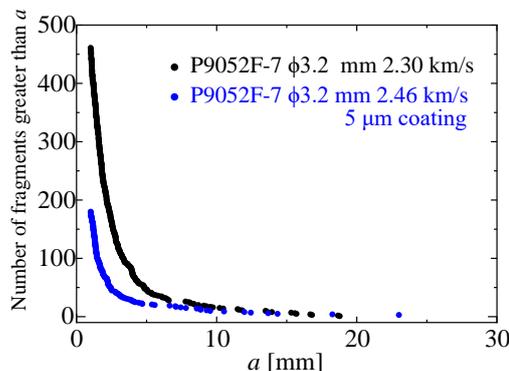


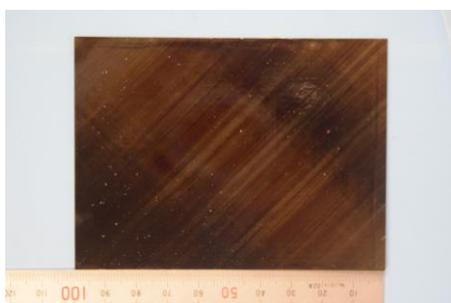
Figure 4. Ejecta length distribution (Epoxy CFRP) [14].

[19003]

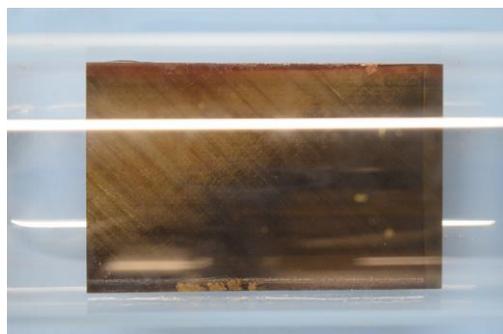
上記のコーティングの影響に関する結果は、第一著者らのグループのエポキシCFRP(東レP9052F-7)を用いた場合の結果^[4]でも同様に得られており、コーティングの影響は、CFRPの種類などには関係なく確認できた。エポキシCFRPの場合、耐AOコーティングの厚さは5 μm であるが、飛翔体(アルミニウム合金A2017-T4, 直径3.2mm)の衝突(衝突速度2.3km/s)に対し、貫通孔の面積は、16.8 mm^2 から11.0 mm^2 に減少し、図4^[4]に示すように、イジェクタの長さ分布をみてもわかるように、個数は大きく減少した。

4. AOコーティング/ポリイミドCFRP材へのガンマ線および電子線の照射

超高速衝突時のコーティングの有用性を確かめたので、次は、本来の目的であるガンマ線、電子線、耐原子状酸素、宇宙ゴミの衝突の影響を調べるために、AOコーティング/ポリイミドCFRPに、ガンマ線および電子線の照射を行った。一例として、図5に電子線の照射前後における試験片の写真を示す。図6に、図7の位置(試験片の中央付近)における電子線の照射中の温度履歴を示す。大きな剥がれもなく、温度も想定内で、問題なく照射できていることがわかる。超高速衝突実験を行い、環境の影響を調べるつもりである。



(a) Before irradiation



(b) After irradiation

Figure 5. Photograph of coating specimens after irradiation (glass ampoule).

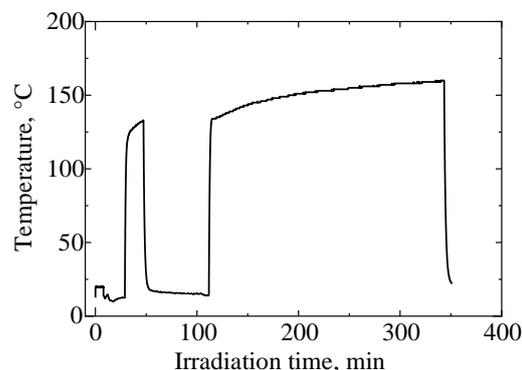


Figure 6. Temperature during irradiation of electron beam.



Figure 7. Temperature during irradiation of electron beam.

5. まとめ

コーティングにより、イジェクタの個数は明確に減少し、貫通孔径も小さくなった。今後はさらに条件を変化させて実験していき、この傾向を確認するとともに、放射線および原子状酸素による影響、特に複合効果を調べていく。

6. 謝辞

本実験にあたり、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ました。本研究は、JSPS 科研費 19K04072 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

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_04/201304.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

[19003]

targets”, International Journal of Impact Engineering, 32(12), 2006, 1981–1999.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X05000928>

- [6] Masahiro Nishida, Akie Hongo, Yasuyuki Hiraiwa, Masumi Higashide, Effects of gamma ray irradiation on penetration hole in and fragment size from carbon fiber reinforced composite plates in hypervelocity impacts, Composites Part B: Engineering, 169, 2019, 229-238.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818335224>
- [7] 本江晶絵, 西田政弘, 東出真澄, 超高速衝突による CFRP の破壊挙動と放射線の関係性, 第 43 回複合材料シンポジウム講演論文集 (2018)
- [8] 石田雄一, 耐熱高分子基複合材 (耐熱 CFRP) の適用技術研究, 日本航空宇宙学会誌, 38, 2020.
- [9] Miyauchi, M., Ishida, Y., Ogasawara, T. and Yokota, R., Highly soluble phenylethynyl-terminated imide oligomers based on KAPTON-type backbone structures for carbon fiber-reinforced composites with high heat resistance, Polymer J., 45, 2013, 594-600.
- [10] 西田政弘, 本江晶絵, 高原秀征, 放射線照射がポリイミド樹脂/繊維強化複合材料の衝撃破壊メカニズムに与える影響, 平成 30 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
- [11] 古田尚正, 北村昭憲, 鈴木 浩, 石澤淳一郎, 木本雄吾, 田村高志, シルセスキオキサン誘導体「光硬化型 SQ シリーズ」の宇宙用材料への応用~耐原子状酸素コーティングの開発~, 東亜合成グループ研究年報, 第 16 号, 10 (2013).
- [12] 古田尚正, 藤田武士, 北村昭憲, シルセスキオキサン誘導体の耐熱用途への展開と宇宙機用保護コーティング剤の開発, 色材協会誌, 90 巻 6 号, 207 (2017).
- [13] 高原秀征, 西田政弘, 古田尚正, 岩瀬賢明, 東出真澄, 石田雄一, 超高速衝突時のポリイミド CFRP からのイジェクタに与えるコーティングの影響, 日本材料学会第 69 期学術講演会 講演論文集 (2020) .
- [14] 西田政弘, 高原秀征, 古田尚正, 藤田武士, コーティングが CFRP からのイジェクタに与える影響, 令和元年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム 後刷集.