

[22007]

放射線照射が AO コーティング／繊維強化複合材料の衝撃破壊メカニズム に与える影響（Ⅱ）メカニズムの解明

Effects of Irradiation on Impact Fracture Mechanism of Anti-AO Coating/Fiber Reinforced Composites（Ⅱ） Mechanism clarification

西田政弘^{A)}

Masahiro Nishida^{A)}

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

Abstract

The irradiation effects of electron beam on impact fracture mechanism of anti-atomic oxygen (AO) coating/polyimide CFRP materials were examined in hypervelocity impacts. Forward ejecta from specimens were compared. The electron beam irradiation did not affect size distribution of forward ejecta. To examine fracture mechanism, polyimide films were prepared. The effects of electron beam irradiation on the tensile properties were examined and the fracture mechanism was discussed.

Keyword: Space debris mitigation, Electron beam irradiation, Polyimide CFRP, Hypervelocity impacts

1. はじめに

宇宙開発が急速に進んでおり、宇宙環境の影響を知ることが重要になっている。そのうち、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、高真空などの因子は材料特性に影響を与える可能性があると考えられている。また、地球の低軌道では、スペースデブリが年々増えており、その衝突速度が平均 10 km/s であることから、衝突時には、貫入や貫通により多くの破片（イジェクタ）が飛散し、イジェクタは宇宙ゴミになってしまう（二次デブリ）^[1]。これまでの超高速衝突時の破壊メカニズムは、アルミニウム合金を用いた研究が多く、炭素繊維強化複合材料（CFRP）の超高速衝突時の破壊メカニズムについての研究は幾つか報告がある程度である^[2]。今後、人工衛星の寿命が延びていくことが予想され、宇宙環境が CFRP の強度や剛性に与える影響を詳しく調べることは大切である。

当研究グループは、CFRP への宇宙環境の影響に注目し、施設利用共同研究（一般共同研究）のご支援のもと、これまでに、ガンマ線^[3]および電子線^[4]の照射の影響を調べ、高速の飛翔体衝突時の CFRP の破壊挙動を明らかにしてきた。

本研究では、ポリイミド樹脂を基材とした CFRP（以下、ポリイミド CFRP）を用いた。ポリイミド樹脂は放射線に強い種類（グレード）が開発されており、IKAROS のソーラーセイル材料^[5]として実績がある種類（グレード）もある。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、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（以下、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ている。しかし、電子線が耐 AO コーティング材に与える影響は、主に太陽光吸収率について調べられていることから、強度については不明である。そこで、ガンマ線、電子線の照射が衝撃破壊現象に与える影響を詳しく調べてきた。

一般共同研究として、本研究は、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った。2020 年度は、コロナ禍で一度も照射できなかったが、2021 年度は 1 度だけ電子線を照射でき、その試験片を用いた結果を用いて学会発表できた。2022 年度は継続で申請し、3 回の照射ができたので、その内容を報告する。

2. 実験方法

JAXA 提供のプリプレグ^[6-7]を用いて製作したポリイミド CFRP を実験に使用した。擬似等方に 8 ply 積層したポリイミド CFRP（ $[45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 、厚さ 1.1 mm）を準備した。コーティングとしては、有機-無機ハイブリッド材料で、耐原子状酸素性が確認できるシルセスキオキサン誘導体 SQ シリーズ（東亜合成（株）製）^[8-9]を、ポリイミド CFRP の衝突面のみ、コーティングした。これまでの研究結果を元に、コーティング厚さは 25~30 μm とした。

高崎量子応用研究所、1 号加速器で、電子線の照射を行った。照射線量率 2 kGy/s で、照射線量 34.9 MGy 照射した。なお、電子線において、温度上昇の影響を避けるため、照射中は、実験チャンバー内にアルゴンガスを流した。

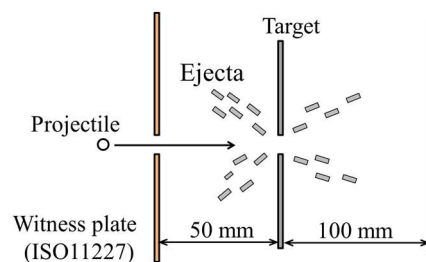


Fig. 1 Experimental setup for impact test^[11].

[22007]

飛翔体には、アルミニウム合金球（A2017-T4 材、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^[10]を用いた。図 1 に示すような実験装置を用いて、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にして、衝突実験を行った。

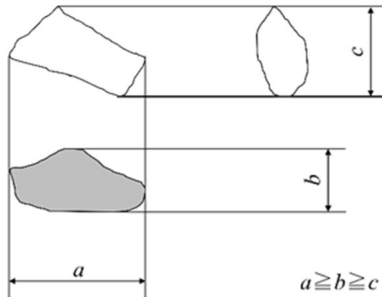


Fig. 2 Definition of ejecta size ^[12].

3. 実験結果

イジェクタの評価については、衝撃実験後、実験チェンバーからイジェクタを回収し、写真撮影して、その写真を画像解析ソフト (ImageJ) で解析することによって、サイズ分布を求めた。イジェクタサイズの定義を図 2 ^[12] に示す。

図 3 ^[12] に、前方へ噴出したイジェクタの長さ a に関する累積個数分布を示す。これまでの研究により、コーティングにより、明確に前方への噴出物が減っていることを報告しているが、その耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP について、電子線を照射した場合でも、イジェクタの長さ a に関する累積個数分布はほぼ変化がないことがわかる。長いイジェクタが回収されなかった。

メカニズムの解明のために、ポリイミド CFRP の樹脂であるポリイミドについて、同じグレードのフィルムを照射線量率 2 kGy/s で、照射線量 20 MGy 照射した結果を一例として示す。図 4 はストローク-力線図であるが、電子線照射により、弾性率はあまり変化がないものの、破断強度、破断伸びは大きく低下していることがわかる。今後の投稿論文のため、他のデータを示していないが、おおむね、同様の傾向がみられている。樹脂の破断強度、破断伸びはイジェクタに大きな影響は与えなかった。今後は、CFRP の樹脂以外に、繊維など、他の箇所に与える影響を調べていき、メカニズムを明らかにする予定である。

4. まとめ

イジェクタの長さに関する累積個数分布において、コーティング材の場合、前方へのイジェクタの個数が明確に減少することをこれまでで示してきたが、電子線照射しても、その特性は変化せず、むしろ、長いイジェクタが回収されなかった。メカニズムの解明のために、今年度から、フィルムのみへ照射を行

い、引張試験を行ったところ、フィルムの破断強度、破断伸びが大きく低下していることがわかった。今後は、メカニズムの解明のために、さらに条件を変化させた実験を今後行う予定である。

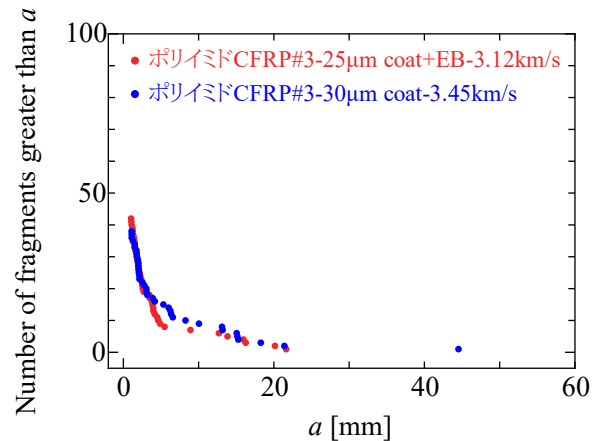


Fig. 3 Ejecta size distribution ^[12].

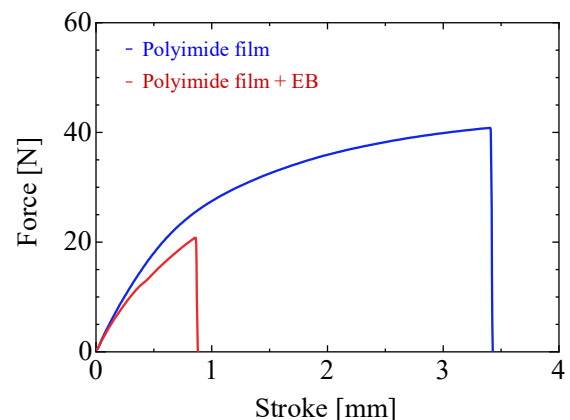


Fig. 4 Tensile test results of polyimide film.

謝辞

衝突実験の遂行にあたり、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所超高速衝突実験施設を利用しました。また、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] 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), 9-14.
- [2] 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, (2009), 15-26. <https://doi.org/10.6089/jscm.35.15>
- [3] Masahiro Nishida, Akie Hongo, Yasuyuki Hiraiwa, Masumi Higashide, Effects of gamma ray irradiation on penetration hole in and fragment size from carbon fiber reinforced

[22007]

- composite plates in hypervelocity impacts, *Composites Part B: Engineering*, 169, 2019, 229-238.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.007>
- [4] Masahiro Nishida, Akie Hongo, Hideyuki Takahara, Masumi Higashide, Effects of electron beam irradiation on hypervelocity impact behavior of carbon fiber reinforced plastic plates, *Journal of Composite Materials*, 55(29), (2021), 4295-4304.
<https://doi.org/10.1177/00219983211037049>
- [5] 横田力男 田中孝治 相馬央令子, 特集: IKAROS からソーラー電力セイル探査機へ「セイル」, *ISAS ニュース* 2016年3月号別冊 (No.420)
- [6] 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.
https://doi.org/10.14822/kjsass.68.2_38
- [7] 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.
<https://doi.org/10.1038/pj.2012.160>
- [8] 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*, 16, 10 (2013).
- [9] 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(6), 207 (2017).
<https://doi.org/10.4011/shikizai.90.207>
- [10] Kawai, N., Tsurui, K., Hasegawa, D., Sato, E., Single microparticle launching method using two-stage light-gas gun for simulating hypervelocity impacts of micrometeoroids and space debris, *Rev Sci Instrum*, 81 (2010) 115105.
- [11] Masahiro NISHIDA, Daichi KIMURA, Ziyi SU, Naomasa FURUTA, Yoshiaki IWASE, Yuichi ISHIDA, Masumi HIGASHIDE, Effects of Electron Beam on Hypervelocity Impact Behavior of Anti-atomic Oxygen Coating/Polyimide CFRP, *Proc. 34th International Symposium on Space Technology and Science* (2023), No.2023-r-06
- [12] 木村 大地, 西田 政弘, 古田 尚正, 岩瀬 賢明, 東出 真澄, 石田 雄一, 耐原子状酸素コーティング/ポリイミド CFRP からのイジェクタに与える電子線の影響, (2022) 日本機械学会 M&M2022 材料力学カンファレンス 講演論文集, OS1709