

[2024202014]

末端基を変化させたポリイミド樹脂を母材とする CFRP の 力学的特性に与える電子線の影響

Effects of Electron Beam Irradiation on Mechanical Properties of Polyimide Fiber Reinforced Composites Using Polyimide with Modified End Groups

西田政弘

Masahiro Nishida

Department of Electrical and Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology

Abstract

The irradiation effects of electron beam on mechanical properties of polyimide CFRP and polyimide resin were examined to understand basic mechanism. The elastic modulus did not change with the electron beam irradiation of 20 MGy. The tensile strength and fracture strain clearly decreased with the electron beam irradiation.

Keyword: electron beam, space environment, space debris, polyimide CFRP

1. はじめに

民間が中心となった急速な宇宙開発が見込まれており、宇宙で長期利用可能な新素材の開発が必要である。宇宙での長期利用に際して、宇宙環境が材料の基礎的な力学的特性に与える影響を知る必要がある。固体材料の力学的特性に対して、宇宙環境のうち、放射線（電子線、ガンマ線）、原子状酸素、紫外線の照射、温度や熱サイクル、高真空、宇宙ゴミの衝突が影響を与える可能性^[1]がある。

宇宙ではアルミニウム合金が多く使われているが、炭素繊維強化複合材料（CFRP）は比強度、比剛性が高いことから利用が増加している。CFRP の樹脂は宇宙環境に影響を受けやすいと考えられ、宇宙環境が CFRP の強度や剛性に与える影響を調べる必要がある。

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、宇宙での長期利用が期待できる。電子線照射後のポリイミド CFRP の力学的特性を調べた。

これまでの一般共同研究の採択（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てきた^[2,3]。コロナ禍で研究が進まなかったため、継続申請で研究を進めたのち、2024 年度より、ポリイミド CFRP およびその樹脂の基礎的メカニズムを調べるために、3 年計画で申請した。その初年度である、2024 年度の成果を報告する。

2. 実験方法

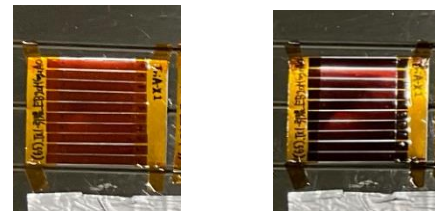
2.1 試験片

本研究では、JAXA から提供されたプリプレグ^[4-6]を用いて作製されたポリイミド CFRP 板（厚さ 1.1 mm）および、そのポリイミド樹脂（幅 3 mm、長さ 40 mm）を力学的特性の評価に用いた。用いたポリ

イミド樹脂は、非対称の芳香族複素環構造するイミドオリゴマーに、熱反応性の末端置換基を導入することにより、耐熱性・成形加工性に優れた熱硬化性樹脂である。CFRP 板の積層は、 $[45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ の疑似等方性とした。

2.2 電子線

図 1 のように、台の上に固定して、1 号加速器にて電子線に照射した。条件は、線量率 2.0 kGy/s、照射量 0.5, 1.0, 3.6, 20 MGy とした。



(a) Before irradiation (b) After irradiation

Figure 1. Photographs of polyimide resin (20 MGy).

3. 実験結果

図 1 より、20 MGy で、明確に色が変わっていることがわかる。図 2 に照射中の温度変化を示す。照射中は温度が上昇しておらず、問題なく、電子線を照射していることがわかる。

一般に、放射線によって、架橋反応、分解反応を起こし、脆化が生じる可能性がある。また、特に熱硬化性樹脂においては、未反応の末端基が残ると、その反応により、宇宙環境での使用時に力学的特性が変化することも考えられる。図 3 に弾性率、引張強さ、破断ひずみと照射量の関係を示す。図 3 より、弾性率は照射による変化がほとんど見られなかった。引張強さおよび破断ひずみは、少量照射で一度大きく減少した後、若干上昇し、そこからはほぼ一定の値を示した。特に、破断ひずみの低下量は大きく、電子線照射の影響を顕著に受けている。

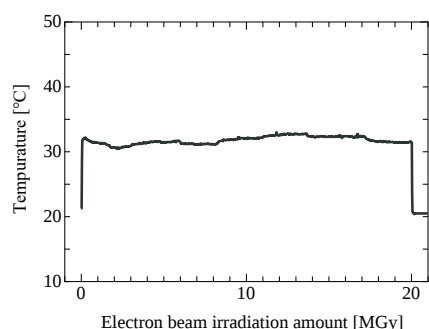
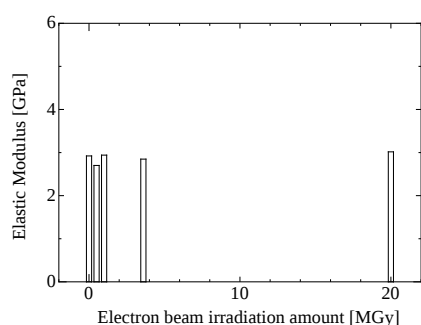
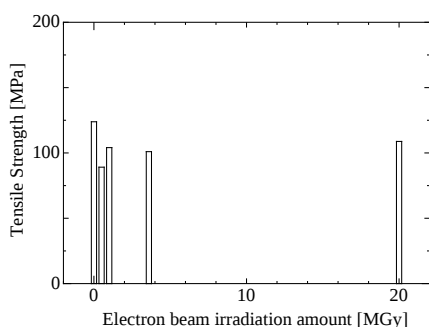


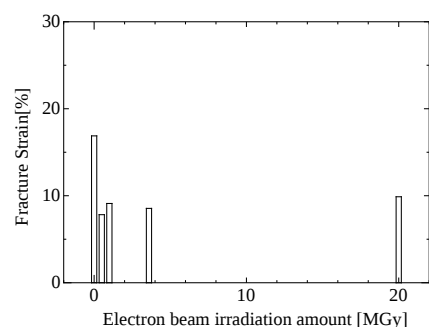
Figure 2. Temperature change during irradiation (20 MGy).



(a) Elastic modulus



(b) Tensile strength



(c) Fracture strain

Figure 3. Effects of electron beam on mechanical properties.

4. まとめ

電子線がポリイミド樹脂の力学的特性に与える影響を調べた。引張強さおよび破断ひずみは明確に変

化した。今後は、CFRP の力学的特性を調べる予定である。また、電子線だけでなく、電子線と他の宇宙環境の影響も調べて、合わせて議論していく。

参考文献

- [1] 木本雄吾, 宇宙 (機器) 材料における表面技術, 表面技術, 63(1), 2012, pp. 3-8.
- [2] 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.
- [3] Masahiro Nishida, Daichi Kimura, Kyouko Ashida, Naomasa Furuta, Yoshiaki Iwase, Yuichi Ishida, Effects of electron beam and atomic oxygen irradiation on hypervelocity - Impact tested / polyimide coated carbon fiber-reinforced plates, Composites Part B: Engineering, Vol. 288, 2025, 111877.
- [4] 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, 68(2), 2020, pp. 38-42.
- [5] Masahiko Miyauchi, Yuichi Ishida, Toshio Ogasawara, Rikio Yokota, Novel phenylethynyl-terminated PMDA-type polyimides based on KAPTON backbone structures derived from 2-phenyl-4,4'-diaminodiphenyl ether, Polymer Journal, vol. 44, 2012, pp. 959-965.
- [6] 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 Journal, vol. 45, 2013, pp. 594-600.