

機械宇宙工学コース

学籍番号：223D4009

岩田研究室 修士2年 藤井 洸行

電子線照射による炭素繊維強化複合材料の機械特性変化と深度吸収線量分布が与える影響

炭素繊維複合材料（Carbon Fiber Reinforced Plastic：以下 CFRP）は炭素繊維で樹脂を強化した複合材料である。他の構造材料に比べ軽量であり、優れた比強度や比剛性を有する。したがって、人工衛星の構造材料として有用であり、電波天文衛星 ASTRO-G の大型展開アンテナの放射リブ材として使用が検討された。宇宙空間には放射線、真空、紫外線、温度サイクルなどの環境因子が存在する。この環境因子が宇宙機の材料劣化を引き起こし、CFRP の剛性を運用開始当初から変化させる。ASTRO-G プロジェクトにおいて、宇宙環境のさまざまな環境因子で引き起こされる CFRP の劣化の中でも、放射線によって剛性の安定性に影響を与えることが課題の一つとなった。

本研究では ASTRO-G における CFRP の宇宙環境耐性の課題を例にとり、宇宙環境因子の中でも特に放射線による劣化に注目した。放射線の中で短時間に大線量の照射を行うことができる電子線を用いてサンプルを均一に劣化させ、劣化前後の機械特性を測定することで劣化原因を考察した。また、実宇宙環境を想定する際の複数の加速器を利用した実宇宙環境の深度吸収線量分布再現の必要性と分布合致度の基準を明らかにするために、CFRP サンプルの表層部に大きな吸収線量を付与する陽子線と、深層部に大きな吸収線量を付与する電子線のどちらが材料劣化において支配的となるかを議論した。まずは CFRP の剛性が吸収線量に対してどのように変化するかを電子線照射およびガンマ線照射により評価した。次いで実宇宙環境における深度吸収線量分布と吸収線量に対する CFRP の剛性変化挙動のデータを用いた。複合梁の曲げ剛性を表す数理モデルにより解析することによって、表層の高吸収線量領域と深層部の低吸収線量領域のどちらが宇宙環境劣化による CFRP の曲げ剛性変化において支配的かを明らかにした。

Abstract

Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) is a composite material in which resin is reinforced with carbon fiber. Compared to other structural materials, CFRP is lightweight and has excellent specific strength and specific rigidity. Therefore, CFRP is useful as a structural material for satellites, and was considered for use as the radiation rib material for the large deployable antenna of the radio-astronomy satellite ASTRO-G. In space, there are environmental factors such as radiation, vacuum, ultraviolet rays, and temperature cycles. In the ASTRO-G project, one of the issues among the CFRP degradation caused by various environmental factors in the space environment was the effect of radiation on the stiffness stability.

In this study, taking the issue of the space environment resistance of CFRP in ASTRO-G as an example, we focused on the degradation caused by radiation among the space environment factors. We used electron beams, which can irradiate large doses of radiation in a short time, to uniformly degrade samples, and measured the mechanical properties before and after the degradation to examine the causes of the degradation. In addition, in order to clarify the necessity of reproducing the depth absorbed dose distribution in a real space environment using multiple accelerators and the criteria for matching the distribution, we discussed whether the proton beam, which gives a large absorbed dose to the surface layer of the CFRP sample, or the electron beam, which gives a large absorbed dose to the deep layer, dominates the degradation of the material. The first is the stiffness of the CFRP sample. First, we evaluated how the stiffness of CFRP changes with absorbed dose by electron irradiation and gamma irradiation. Then, the depth-absorbed dose distribution in a real space environment and data on the stiffness change behavior of CFRP in response to absorbed dose were used. By using a mathematical model for the bending stiffness of composite beams, it was clarified whether the high absorbed dose region in the surface layer or the low absorbed dose region in the deep layer dominates the change in bending stiffness of CFRP due to degradation in the space environment.

第1章 序論

1.1 研究背景

1.2 研究動向

1.3 研究目的

第2章 基礎理論

2.1 均質材料の曲げ理論

2.2 不均質材料の曲げ理論

2.3 均質材料の引張理論

第3章 試験手法

3.1 サンプル

3.1.1 CFRP 曲げ試験サンプル (高崎量子応用研究所)

3.1.2 CFRP 引張試験サンプル (高崎量子応用研究所)

3.1.3 樹脂曲げ試験サンプル (高崎量子応用研究所)

3.2 非接触変位計

3.2.1 使用した機械

3.2.2 非接触変位計のシステム

3.2.3 画素の大きさ計算

3.2.4 非接触変位計の妥当性

3.3 三点曲げ試験

3.3.1 使用した機械

3.3.2 試験工程

3.3.3 三点曲げ試験における弾性範囲について

3.4 引張試験

3.4.1. 使用した機械

3.4.2. 試験工程

3.5 劣化前後サンプル表面評価

第4章 外部試験施設での引張試験

4.1 福岡工業技術センター 機械電子研究所

4.2 福岡工業技術センター 化学繊維研究所

4.3 山口県産業技術センター

第5章 高崎量子応用研究所 放射線照射試験

5.1 試験設備

5.2 試験条件と吸収線量

5.3 線量分布測定

5.3.1 面内分布測定

5.3.2 深度吸収線量分布

5.4 照射容器内温度

5.5 電子線照射後サンプル

5.6 曲げ弾性率変化

5.7 マイクロ스코ープを用いた試験片表面観察

第6章 CFRP に対する深度吸収線量分布の影響

7.1 実験方法

6.1.1 試験サンプル

6.1.2 曲げ試験

6.1.3 電子線照射試験

6.1.4 宇宙環境模擬試験

7.2 結果と考察

6.2.1 吸収線量に対する CFRP 弾性率の応答性評価

6.2.2 数理モデル解析結果

第7章 総括

7.1 結論

7.2 今後の課題

参考文献

謝辞

付録

- 2022 年度高崎量子応用研究所 電子線照射スケジュールと金額
- 曲げ試験を行う際の工夫点
- 繊維の引張強さ、複合材料の曲げ弾性率、および繊維強化積層板の特性に関する試験方法（日本語訳）