放射線照射が A0 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

Effects of Irradiation on Impact Fracture Mechanism of AO Coating/Fiber Reinforced Composites

西田政弘 A)

Masahiro Nishida A)

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

Abstract

Atomic oxygen (AO) coating/carbon fiber reinforced composites (CFRP) were proposed as a better material against space environment such as electron beam, gamma ray, atomic oxygen and space debris impact. We examined the effects of electron beam irradiation on the number and size of ejecta (fragments) from AO coating/CFRP materials in hypervelocity impacts. Quasi-isotropic CFRP plates consisting of unidirectional pre-preg sheets were used. Ejecta on the front side of specimens were compared. The electron beam irradiation decreased the length of ejecta and the number of ejecta on the front side of specimens.

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

1. はじめに

宇宙環境の影響について、様々な研究が行われて いる.なかでも、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.また, 地球の低軌道では、多くの宇宙ゴミ(スペースデブ リ) があり、その平均衝突速度が 10 km/s 程度である ため、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、飛散したイジェクタは宇宙ゴ ミとなる[1]. そこで、宇宙ゴミの軌道予測、除去、発 生防止、防御などの研究が行われており、防御につ いては、非常に速い衝突速度における破壊メカニズ ムを明らかにし、被害を最小にすることが大切であ る.これまで、高速衝突時の破壊メカニズムに関す る研究があるが、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)の高速衝突時 の破壊メカニズムについての研究は少ない[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、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻 日本 原子力研究開発機構 量子科学技術研究開発機構 施 設利用総合共同研究の支援の元,照射を行うことで, これまでに,ガンマ線^[3]および電子線^[4]の影響を調べ, 高速の飛翔体衝突時の CFRP の破壊挙動が変わるこ とを明らかにしている.

本研究で用いた CFRP はポリイミド樹脂を基材と した CFRP (ポリイミド CFRP) である.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^[5]として実績がある. 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、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当研究グループは考えて いる.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あることか ら、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る.

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.その内容を以下に報告する.

2. 実験方法

JAXA 提供のプリプレグ^[6-7]から製作したポリイミ ド CFRP を用いた. 擬似等方に 8 ply 積層し, 積層 方向 [45°/0°/-45°/90°]s で厚さ 1.0 mm である. コー ティングとしては, 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(東亞合成(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^[10]を元に, コーティン グ厚さは 20~25 μ m とした. コロナ禍の間には, 耐 AO コーティングの厚さ 5~30 μ m でコーティングの 厚さの影響を調べており, そのなかで良い結果の厚 さを選択した.

電子線の照射は,高崎量子応用研究所の1号加速 器にて行った.照射線量率は2kGy/sで,照射時間は 17,450秒(照射線量 34.9 MGy)照射した.なお,電

子線において,空気の影響を避けるため,CFRPを真 空チャンバー内 (2~3 Pa) に設置して照射を行った.

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.図1に示すような 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.



Fig. 1 Experimental setup for impact test.



Fig. 2 Definition of ejecta size ^[11].

3. 実験結果

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. イジェクタの長さ a,幅 bの定義を図 $2^{[11]}$ に示す.

図 3^[11]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.まず,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がわ かる.コーティング材の衝突速度は,コーティング 無しより速いものの,イジェクタが減っていること がわかる.

コーティング材に電子線照射した場合のイジェク タ分布をみると、電子線照射しない場合に比べて、 40 mm~50 mm の長いイジェクタが少なく、1.0 mm 以上の個数は、電子線照射の有無で、同等か、電子 線照射により、わずかに減っているようにみえる. イジェクタの個数は、1.0 mm でも若干減少している が、その差は10 個程度で多くないものの、電子線に よる影響はある程度みられると考えている.追加実 験を行うことで、メカニズムを明らかにしていく必 要がある.



Fig. 3 Ejecta size distribution ^[11].

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,明確にイジェクタの個数が 減った.電子線照射しても,その特性は変化せず, むしろ,長いイジェクタがでなかった.上記の結果 を学会発表することができたが,その変化の原因を 調べるために,条件を変化させた実験を今後行う予 定である.

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 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] 横由力男 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〜,東亞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] 西田政弘,木村大地,古田尚正,岩瀬賢明,東出真澄, 石田雄一,耐AOコーティングによる CFRP からのイ ジェクタの低減,第9回「スペースデブリワークシ ョップ」講演資料集(JAXA-SP-21-001),(2021),講 演番号 C05: 309-320.
- [11] 西田政弘,木村大地,古田尚正,岩瀬賢明,東出真澄, 石田雄一,電子線が AO コーティング/繊維強化複合 材料の超高速衝撃挙動に与える影響,第13回日本複合 材料会議(JCCM-13)講演論文集,(2022),講演番号1B14.

1. はじめに

1.1 注意点

令和3年度報告書の提出締切は令和4年5月31日 (火)です。

終了課題・継続課題にかかわらず、毎年度、報告

終了課題・継続課題にかかわらず、毎年度、報告 書の作成をお願いしております。併せて、発表論文 リストの作成もよろしくお願い致します。次年度審 査(継続審査を含む)においては、これらの年度成 果報告も参考にされます。

報告書は、ホームページで公開されますので、著 作権については留意して頂きたく存じます。

1.2 報告書フォーマット

成果報告書のフォーマットは次にように定めます。

- タイトルおよび著者名は日本語と英語を併記。
- 図表とその説明文は英語で記述。
- PDF に変換する際は、必ず全てのフォントを 埋め込むこと。

2. 原稿の書式と書き方

2.1 用紙の設定

用紙の大きさはA4、本文は2段組(2カラム)と します。

2.2 スタイルと使用フォント

フォントは、図を含めて、できる限り MS 明朝、 MS ゴシック、Times New Roman またはTimes、Symbol に限定してお使い下さい。

2.3 論文題名・著者・要旨

論文題名および著者名は、日本語英語併記となり ます。ただし、著者所属および要旨は、英文のみで す。書式は以下の通りです。

- 日本語論文題名はゴシック 14pt、すぐ次の行に 英語論文題名を太字 12pt。
- 日本語著者名、英語著者名、英語所属機関名の 順に、それぞれを改行で区切り、頭文字のみ大 文字。フォントサイズは 10pt。
- 所属機関の所在地は不要。
- 所属機関が複数の場合は、A,Bのように参照記 号を振り、スタイル「著者上付記号」を設定。
- 代表者の電子メールアドレスを脚注に記載する 場合は、例のように上付参照記号*,#,†等を付けて、フッター内にアドレスを記入。
- 要旨は英語で記述し、イタリックで Abstract と 見出しをつける。
- Keyword とイタリックで見出しを付け、コロンの後にキーワードとなる単語を英語で記入する。

2.4 本文

本文は2段組で記述します。フォントは、10ptの

MS 明朝を使用してください。必要に応じて、MS ゴ シックを適宜使用してください。ただし英数字は Times または Times New Roman を使用してください。

2.5 章・節の見出し

各章の見出し、節の見出しには必ず番号を付けて ください。見出しのフォントは MS ゴシック 12pt を、 小見出しは MS 明朝 10pt をお使いください。

2.6 図表の挿入

図表の説明文(キャプション)は英語で記述して 下さい。図及び表の中身についても、できる限り英 語で記述して下さい。

- 表のタイトルは前置詞を除く各単語の最初は大 文字、文末のピリオドは不要。
- 図の説明文の文末にはピリオドが必要。
- 図や表のタイトルの配置は、それが1行に収まる場合はセンタリング(スタイルは「図/表タイトル1行」)、2行以上は両端揃え(スタイルは「図/表タイトル複数行」)。



Figure 1. The number of monthly users.

2.8 文献参照と文献リスト

参照する文献には通し番号を振り、上付きのカギ 括弧で囲んでください^[1]。

参考文献は、9ptのMS明朝、英文の場合はTimes で記載してください。

電子出版されている文献については、URL を記し てください^[2]。ただし、URL にハイパーリンクは設 定しないでください。

3. 原稿の仕上げと投稿

- 3.1 チェック項目
- 代表者メールアドレスが正しく脚注にあるか。
- ページ番号やヘッダー、フッターを入れない。
- 章や図表を参照する番号は正しいか。
- 参考文献番号は正しいか。
- シンボルがアルファベットに化けていないか。
- 原稿のデータサイズが大き過ぎないか。(目安 として 10MB 以下)

3.2 PDF へ変換

PDF 変換の際は、必ず全てのフォントを含んで変換してください。PDF ファイルにフォントが埋め込まれているかどうかは、Adobe Reader などで文書のプロパティを見れば確認できます。

3.3 投稿

原稿の.docx ファイル及び PDF ファイルを、定められた期日までに共同利用管理本部に提出して下さい。

3.4 著作権

報告書はホームページに公開されますので、著作 権については留意して下さい。

参考文献

- [1] H.Kobayashi, et al., "リニアック技術研究会論文投稿要 領", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [2] http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/kyodo/kaihoken/ index.html