

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04072

研究課題名(和文)宇宙ゴミ衝突時のポリイミドCFRPからのイジェクタ発生に与える宇宙環境の複合効果

研究課題名(英文) Combined effect of space environment on ejecta formation from polyimide CFRP in space debris impacts

研究代表者

西田 政弘 (Nishida, Masahiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60282828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：電子線、紫外線に強く、耐熱性があるポリイミドを用いたポリイミド樹脂/炭素繊維強化複合材の表面に、耐原子状酸素コーティングを施した材料を宇宙環境に強い材料として提案し、宇宙ゴミを模擬した飛翔体を超高速衝突させ、破壊挙動およびイジェクタ(噴出物)の発生を詳しく調べた。コーティングはイジェクタについて、有用であることがわかった。宇宙環境のうち、電子線および原子状酸素を試験片に照射し、それら宇宙環境の影響、特にその複合効果およびメカニズムを明らかにした。電子線のみ照射では、表面の剥離が大きくなったが、イジェクタの総量の増加はわずかであった。原子状酸素の照射の影響はわずかであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電子線照射後の原子状酸素の照射のような宇宙環境の複合効果によりイジェクタが大量に発生する危険性に注目した。宇宙ゴミを想定した超高速衝突による研究は多いが、宇宙ゴミ衝突のイジェクタ発生と宇宙環境、特に複合効果に言及した研究は見当たらない。宇宙環境に強い耐AOコーティング/ポリイミドCFRPを提案することにより、宇宙での使用範囲を広げることを目的とする。得られるデータは、宇宙環境における余寿命予測、設計指針となる。宇宙機における炭素繊維複合材料の使用は、今後ますます拡大していくことが予想され、宇宙での長期使用のための基礎的データになる。

研究成果の概要(英文)：Based on polyimide showing heat-resistant and anti-electron beam and anti-ultraviolet rays, anti-atomic oxygen coating polyimide carbon fiber reinforced plastics (CFRP) was proposed as space environment resistance materials. Hypervelocity impact behavior and fracture behavior, in particular ejecta, were examined when projectiles struck at hypervelocity. Anti-atomic oxygen coating is useful for decreasing ejecta. The effects of electron beam and atomic oxygen irradiation among space environment were examined and the combined effects and mechanism were clarified. Electron beam irradiation affected peeling off-area of surfaces and did not affect total amount of ejecta. Anti-atomic oxygen did not affect ejecta.

研究分野：材料力学

キーワード：宇宙工学 環境 衝撃工学 材料力学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球の低軌道では、7 km/s の超高速で宇宙ゴミが地球を周回しており、年々増加していることから問題となっている。超高速で衝突すると、宇宙ゴミ（飛翔体側）は破碎・融解し、被衝撃体も流体的な振舞いをするなど、その挙動は、低速（1 km/s 以下）の衝撃挙動とは異なり、複雑である。飛翔体に比べ、薄いターゲットの場合、ターゲットには貫通穴が開き、飛翔体が進んできた方向（ターゲット後方）および逆方向（ターゲット前方）へ、イジェクタ（噴出物）が飛散する。前方へのイジェクタの多くは、宇宙空間では宇宙ゴミとなるため、前方へのイジェクタは少なくしたい。

(2) エポキシ樹脂/炭素繊維複合材料（以下、エポキシ CFRP と呼ぶ）が、現在、宇宙機に使われているが、低軌道では、原子状酸素（AO）紫外線放射線（ガンマ線、電子線）温度および熱サイクル（ $-150 \sim +200^{\circ}\text{C}$ ）などの宇宙環境が材料の強度変化の主要因となりうる。宇宙環境 ~ について、変色や静的強度の変化に関しては多くの報告があるが、~ が宇宙ゴミ衝突時のイジェクタ発生に与える影響について調べた研究は、ほとんどない中、申請者は、宇宙材料として用いられているエポキシ CFRP に電子線を照射した場合、1 mm 以下の微小イジェクタの数が増加することを示してきた。

(3) ポリイミド樹脂は耐熱性があり、電子線、紫外線にも強い種類が開発されている。ポリイミド樹脂を母材とした、ポリイミド樹脂/炭素繊維強化複合材（以下、ポリイミド CFRP と呼ぶ）は航空宇宙用として、JAXA 石田雄一氏により開発中であるが、エポキシ樹脂と同様に、原子状酸素の照射により表面が削り取られる。このような荒れた表面に宇宙ゴミが衝突すると、微小イジェクタが多く発生する。原子状酸素から守るため、種々のコーティング材が開発されており、宇宙ステーション補給機（こうのとり）などに実績のある耐原子状酸素コーティング材を、ポリイミド CFRP の表面に塗布すれば、その材料（以下、耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP と呼ぶ）は宇宙環境に強いと考えられる。しかし、耐原子状酸素コーティング材は電子線照射による強度変化が不明であることから、電子線照射後の原子状酸素の照射（複合効果）に対する材料強度は不明で、宇宙ゴミ衝突時などの実用上の問題が残る。

2. 研究の目的

(1) 宇宙ゴミが衝突した時の耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP からのイジェクタ発生に与える宇宙環境の影響の複合効果を詳しく調べ、メカニズムを明らかにすることを本研究の目的とする。宇宙環境に強い耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP を提案することにより、宇宙での使用範囲を広げることを最終の目的とする。

(2) 目的 宇宙ゴミを模擬した飛翔体の超高速衝突時の耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP からのイジェクタ発生を明らかにする。目的 電子線および原子状酸素を照射した耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP からのイジェクタ発生を調べ、宇宙環境の複合効果を明らかにする。目的 ポリイミド CFRP の特性および耐 AO コーティングの特性や膜厚を変化させた試験片を用いて、超高速衝突時にイジェクタ発生が少なくなるような特性、膜厚の組み合わせおよび条件を明らかにする。

3. 研究の方法

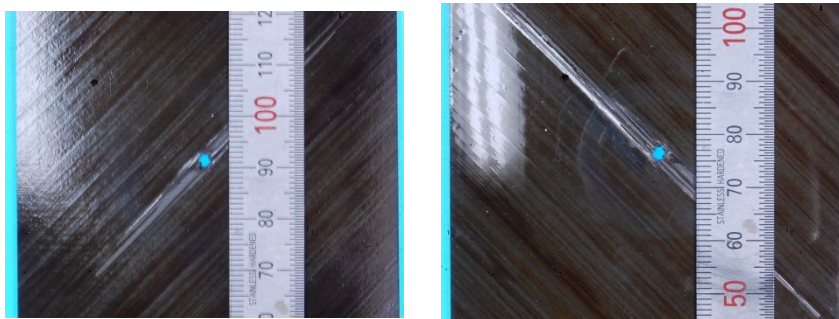
(1) ポリイミド CFRP には、擬似等方性積層板（8 ply, 1mm）を用い、耐 AO コーティングとして、JAXA と東亜合成で開発された「シルセスキオキサン誘導体」(SQ シリーズ)の標準グレード、厚さ 5 ~ 30 μm を用いた。原子状酸素の照射は神戸大学 田川研で、電子線の照射は高崎量子応用研究所で行った。衝突実験は、名工大および JAXA 宇宙研で行った。前方へのイジェクタ発生の解析には、ISO 11227 に基づいた方法（間接法）と、実験チェンバーから回収したイジェクタのサイズを測定する方法（直接法）の 2 種類でおこなった。後方へのイジェクタは後方に設置した与圧壁模擬板を用いた。

(2) 目的 に対して、1) 耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP（厚さ 1 mm）に対して、宇宙ゴミを模擬したアルミ球（直径 1.6 mm, A2017-T4）を用いて、衝突速度 3 ~ 7 km/s で衝突実験を行い、試験片前方へのイジェクタ発生を定量的に評価した。目的 に対して、2) 試験片に、電子線（照射線量 20, 35 MGy）および原子状酸素（ $1.40\text{E}+20, 7.74\text{E}+20$ atms/cm²）を照射し、宇宙環境の複合効果がイジェクタ発生に与える影響を定量的に調べた。目的 に対して、3) 耐 AO コーティングの膜厚（5 ~ 30 μm ）を変化させた試験片に対して、イジェクタ発生が少なくなるような膜厚の条件を詳細に調べた。

4. 研究成果

(1) まず、耐 AO コーティング/ポリイミド CFRP の基礎データを得るために、コーティング厚さが異なる試験片を用いて、その破壊挙動およびイジェクタの挙動などについて詳しく調べた。結果の一例として、衝撃後の試験片の写真を図 1 に示す。表面側からの写真を示す。一般に、球状飛翔体の場合、アルミニウム合金薄板ターゲットの貫通孔は、ほぼ円形の形状で、衝突面および衝突裏面にリップが形成される。それとは異なり、繊維方向に大きく剥がれた部分が観察できる。大きく剥がれた破片は、アルミニウム合金薄板ターゲットに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危険性があり、前方に飛散すれば、スペースデブリになる危険性がある。図には示していないが、試験片の端部近くまで、はがれている。この様子は裏面も同様であった。貫通孔の面積を画像処理ソフト ImageJ により算出した。コーティングにより貫通孔が明確に大きくなった。貫通孔が小さいとイジェクタは低減する可能性が高い。

実験チェンバーからイジェクタを回収して、サイズを測定する方法(直接法)の結果を図 2 に示す。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、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。長さの累積個数分布で示した図 2 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がわかる。間接法結果では、大きな違いがみられず、後方へのイジェクタでも、後方に設置した与圧壁模擬板には大きな違いはみられなかった。



(a) コーティングなし (b) コーティングあり(平均厚さ 20 μm)

図 1 実験後の試験片の衝突面の観察結果¹⁾

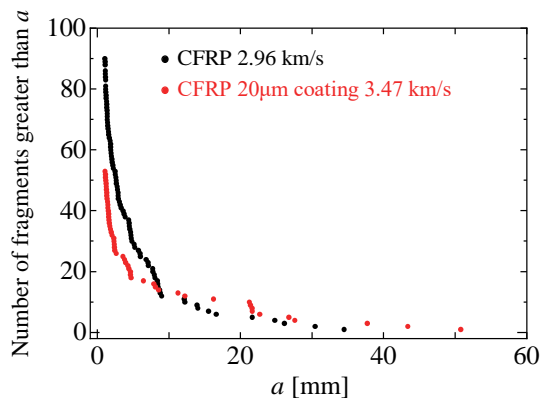


図 2 イジェクタの累積個数分布¹⁾

(2) 次に、電子線、原子状酸素の影響を示す。結果の一例として、照射線量率は 2 kGy/s で、照射線量 34.9 MGy、照射した結果を示す。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。図 3 に試験片の写真を示す。図 1 と比較しても、大きな変化がなく、剥離の様子、貫通孔の様子は同じであった。貫通孔の大きさは、電子線を照射していないコーティング材とほぼ同じで、コーティングにより、貫通孔が明確に大きくなり、電子線照射の影響はみられなかった。

実験チェンバーからイジェクタを回収して、サイズを測定する方法(直接法)の結果を図 4 に示す。電子線を照射した結果は、電子線を照射しない結果に比べて、長いイジェクタが減少し、個数も同等か、わずかに減っている。貫通孔の面積およびイジェクタの累積個数分布の結果から、電子線照射により CFRP の強度もしくは伸びが低下し、長いイジェクタが少なくなったと推測している。また、イジェクタの個数は、1.0mm でも若干減少しているが、その差は 10 個程度で

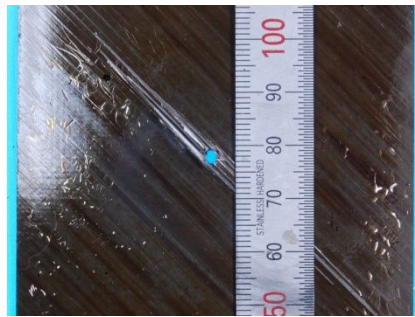


図3 実験後の試験片の衝突面の観察結果（照射の影響）¹⁾

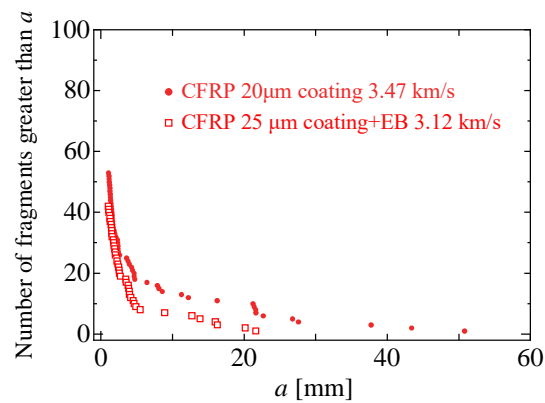


図4 イジェクタの累積個数分布（照射の影響）¹⁾

多くないものの、電子線による影響は明確にみられた。メカニズムについては、電子線による分子の架橋、分解、グラフト重合が考えられるが、今後、追加分析により明らかにしていく。間接法結果では、大きな違いがみられず、後方へのイジェクタでも、後方に設置した与圧壁模擬板には大きな違いはみられなかった。

<引用文献>

1) 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A0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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Masahiro Nishida, Akie Hongo, Hideyuki Takahara, Masumi Higashide | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 Effects of electron beam irradiation on hypervelocity impact behavior of carbon fiber reinforced plastic plates | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Composite Materials | 6. 最初と最後の頁 4295-4304 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/00219983211037049 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 西田 政弘, 木村 大地, 古田 尚正, 岩瀬 賢明, 東出 真澄, 石田 雄一 |
| 2. 発表標題 電子線がA0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 |
| 3. 学会等名 第13回日本複合材料会議（JCCM-13） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西田政弘, 高原秀征, 古田尚正, 岩瀬賢明, 東出真澄, 石田雄一 |
| 2. 発表標題 耐A0コーティングによるCFRPからのイジェクタの低減 |
| 3. 学会等名 第9回デブリワークショップ |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高原秀征, 西田政弘, 古田尚正, 岩瀬賢明, 東出真澄, 石田雄一 |
| 2. 発表標題 耐原子状酸素コーティングされたポリイミドCFRPの超高速破壊挙動 |
| 3. 学会等名 第13回 材料の衝撃問題シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高原秀征, 西田政弘, 古田尚正, 岩瀬賢明, 東出真澄, 石田雄一 |
| 2. 発表標題 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 |
| 3. 学会等名 日本材料学会 第69期学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西田政弘, 高原秀征, 古田尚正, 岩瀬賢明, 東出真澄, 石田雄一 |
| 2. 発表標題 耐AOコーティングがCFRPからのイジェクタに与える影響 |
| 3. 学会等名 令和2年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 本江晶絵, 高原秀征, 西田政弘, 東出真澄 |
| 2. 発表標題 放射線照射が繊維強化複合材料の超高速破壊挙動に与える影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会東海支部 第68期総会・講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 西田政弘, 高原秀征, 古田尚正, 藤田武士 |
| 2. 発表標題 コーティングがCFRPからのイジェクタに与える影響 |
| 3. 学会等名 令和元年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高原秀征、西田政弘 |
| 2. 発表標題 CFRP薄板への超高速衝突時に生じるイジェクタサイズ分布 |
| 3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2019 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Nishida, Daichi Kimura, Ziyi Su, Naomasa Furuta, Yoshiaki Iwase |
| 2. 発表標題 Effects of Electron Beam on Hypervelocity Impact Behavior of Anti-atomic Oxygen Coating/Polyimide CFRP |
| 3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 木村 大地, 西田 政弘, Su Ziyi, 古田 尚正, 岩瀬 賢明, 東出 真澄, 石田 雄一 |
| 2. 発表標題 耐原子状酸素コーティングによるポリイミド CFRPからのイジェクタ低減 (原子状酸素照射および電子線照射の影響) |
| 3. 学会等名 令和4年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 西田政弘, 木村大地, 古田尚正, 岩瀬賢明, 東出真澄, 石田雄一 |
| 2. 発表標題 耐AO 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・原子状酸素の影響 |
| 3. 学会等名 第10回スペースデブリワークショップ |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hideyuki Takahara, Masahiro Nishida |
| 2. 発表標題 Similarity of Ejecta Size Distribution from Aluminum Alloy and CFRP |
| 3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 西田政弘 | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 技術情報協会 | 5. 総ページ数 7 |
| 3. 書名 ポリイミドの高機能設計と応用技術 (第7章第4節) | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>研究者データベース http://researcher.nitech.ac.jp/html/108_ja.html 研究者データベース http://researcher.nitech.ac.jp/html/108_ja.html</p> |
|---|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 田川 雅人 (Masato Tagawa) (10216806) | 神戸大学・工学研究科・准教授 (14501) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 石田 雄一 (Ishida Yuichi) | 宇宙航空研究開発機構 | |
| 研究協力者 | 東出 真澄 (Higashide Masumi) | 宇宙航空研究開発機構 | |
| 研究協力者 | 仁田 工美 (Nitta Kumi) | 宇宙航空研究開発機構 | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|---------------------------------|--|--|--|
| インド | Manipal Institute of Technology | | | |