

探査機の熱制御に用いるポリイミドフォームの電子線環境における帯電特性評価

河野 太郎, 宮澤 優, 金城 富宏, 羽森 仁志, 秋月 祐樹, 豊田 裕之,
 ○丸 祐介, 福田 盛介, 澤井 秀次郎, 坂井 真一郎 (宇宙航空研究開発機構)

Evaluation of Electrostatic Charging by Electron Beam of Polyimide Foam used as Thermal Control Material in Spacecrafts

Taro Kawano, Yu Miyazawa, Tomihiro Kinjo, Hitoshi Hamori, Yuki Akizuki, Hiroyuki Toyota,
 Yusuke Maru, Seisuke Fukuda, Shujiro Sawai, Shin-ichiro Sakai (Japan Aerospace Exploration Agency)

1. はじめに

小型月着陸実証機 SLIM では、着陸時の衝撃エネルギーを吸収するために、着陸脚の先端に衝撃吸収材が取り付けられる。SLIM の簡素（シンプル）および軽量という目的のために、衝撃吸収材として、三次元積層造形によるセルパターン構造の集合体を半球状に形成したものを開発した。図1に、SLIM の主脚用として試作した衝撃吸収材（ポーラス金属部）の写真を示す。SLIM の着陸衝撃吸収材は、着陸時に、緩降下のためのメインエンジンの排気プルームに曝されることが予期される。この場合でも健全な衝撃吸収が可能なように、衝撃吸収材を熱入力から守り、適切な温度に保つ熱防護、熱制御が必要になる。SLIM の衝撃吸収材では、熱制御材として、ポーラス金属部の外側にポリイミド素材の断熱材（ポリイミドフォーム）が取り付けられる。図2に、衝撃吸収機構の構成図を示す。衝撃吸収機構の周囲には、表面導電性のある MLI が取り付けられるが、宇宙航行中の電子線環境において、電子線が MLI を通過し、ポリイミドフォーム熱制御材にあたることで、ポリイミドフォームを帯電させることが考えられる。そこで本実験では、ポリイミドフォームのテストピースおよび衝撃吸収機構のエンジニアリングモデル（EM）に、電子銃によって電子線を照射し、衝撃吸収材の表面電位の変動特性やグラウンド（GND）へ流れ込む電流の計測を行った。表面電位の変動特性は、軌道上での放電可能性の判断のため、GND へ流れ込む電流の計測は、放電により発生する電流の影響の評価のために計測評価した。



図1 主脚用衝撃吸収材のポーラス金属部。

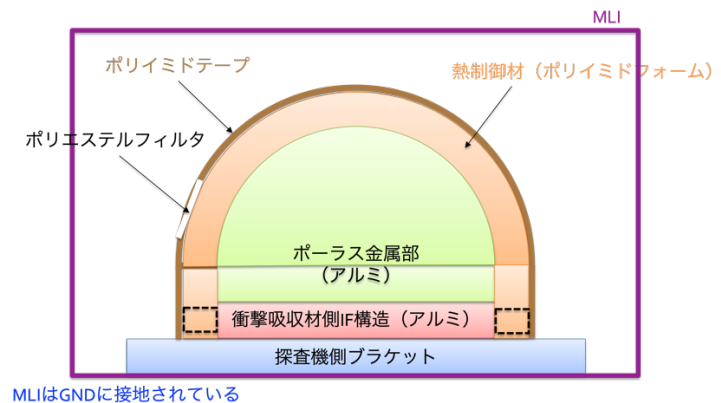


図2 SLIM 衝撃吸収材の構成図。

2. 実験方法

実験時の実験装置のコンフィグレーションを図3に示す。スペースチャンバ内に供試体を設置し、チャンバ上部に設置された電子銃により、供試体に電子線を照射した。水平方向に移動可能な表面電位プローブにて、供試体の表面電位計測を行った。表面電位計測プローブの計測レンジ下限は、-3370V である。供試体の各部（図3では、衝撃吸収材のアルミ製 IF 構造部と MLI）を GND に接続し、供試体各部から GND へ流れる電流を計測した。後述するように、供試体からは放電が見られ、その際、比較的大きな電流が観測された。一方で、電子線照射時、挙動が安定した状態の非放電時に、供試体各部から GND へ定常的に流れる電流が観測された。この非放電時に定常的に流れる電流を、本稿では、「定常電流」と呼ぶ。

照射する電子線のエネルギーは、同様の先行実験例を参照し、10keV と 30keV の2ケースとした。電子線の

分布については、事前にアルミプレートを設置して計測し、過大な偏りがないことを確認している（結果については割愛する）。

供試体は、(1)ポリイミドフォームおよびポリイミドテープのテストピース、(2)衝撃吸収材のエンジニアリングモデル（EM）、(3)衝撃吸収材のEMにMLIをとりつけたもの、の3種類である。

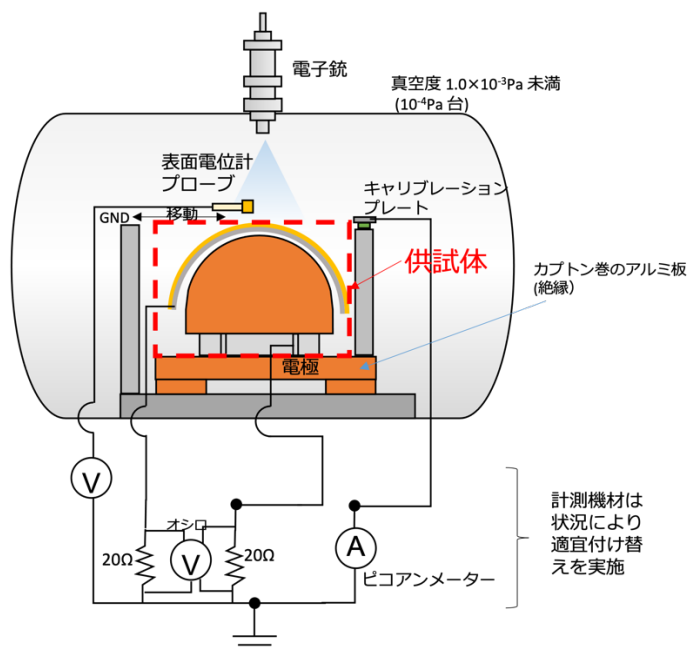


図3 実験コンフィグレーション。

3. ポリイミドフォームの帯電特性評価

図2に示したように、衝撃吸収材の熱制御材は、ポリイミドフォームとその表面を覆うポリイミドテープから構成される。そこで、ポリイミドフォームとポリイミドテープの電子線照射時の特性を評価した。

供試テストピースとして、ポリイミドフォームのみ、ポリイミドテープのみ、ポリイミドフォームの表面をポリイミドテープで覆ったもの、の3種類を用意し、それぞれ、TP1、TP2、TP3と呼ぶ。これら3種類のテストピースに電子線を照射した。図4に、実験時の様子を示す。

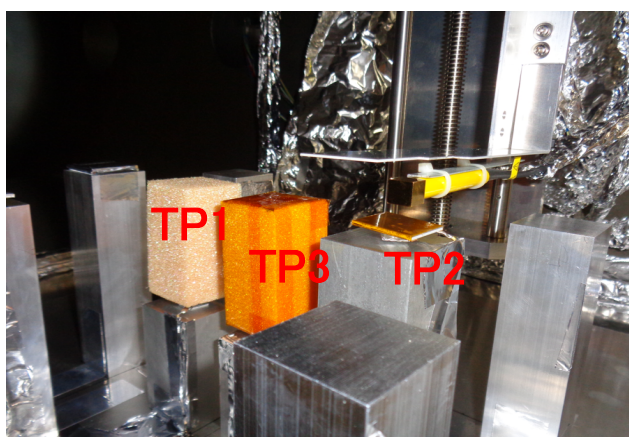


図4 ポリイミドフォームおよびテープのテストピースを供試体とする実験の様子。

図5に、約40分間の電子線照射後の、表面電位の変化を示す。なお、上述したように、電位計測器の計測レンジ下限が3370Vであり、照射直後の電位は、計測レンジに対して飽和してしまっている。実際には、負方向にさらに大きな電位となっていたと考えられる。図5から、ポリイミドフォーム、テープともに、電子線の

照射を受けて、-3370V より大きな帯電が生じることがわかる。また、TP1 の電位の減衰が、TP2 および TP3 よりも遅いことがわかる。表 1 に、この実験で観測された定常電流の値を示す。これらのことより、ポリイミドテープの存在により、電荷がより逃げやすくなり（電流が大きくなり）、電位の減衰を早める効果があるといえる。

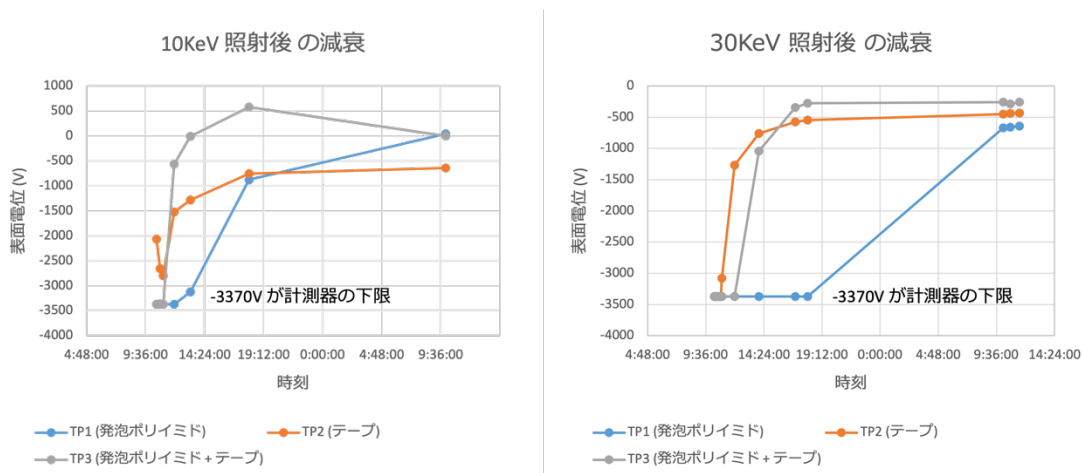


図 5 電子線照射後の表面電位の変化。

表 1 テストピースからの定常電流。

	10 keV 照射	30 keV 照射
TP1 (发泡ポリイミドフォーム HT340)	-0.17 nA	-0.11 nA
TP2 (カプトンテープ P224)	-1.77 nA	-8.17 nA
TP3 (フォーム+テープ)	-1.35 nA	-8.49 nA

4. 衝撃吸収材エンジニアリングモデル (EM) の特性評価

表 2 に、供試体および実験条件のケースを示す。ここで使用した MLI は、層間の導通をとる施工がなされていないものであった。各層間は、アルミ蒸着面が、ポリエステルメッシュを挟んで向かい合わせになっており、各層のアルミ蒸着面は、浮遊導体となっていた。この MLI の状況は、フライトモデルとは異なる点に注意が必要であるが、本実験は、この状況を把握した上で進められた。

表 3 に、EM を供試体とした実験で観測された定常電流の値を示す。この結果から確定的なことを述べることは困難であるが、MLI がある場合は、比較的多くの電子線が MLI 側に作用していると考えられる。

図 6 に、各ケースの電子線照射後の表面電位の変化を示す。電子線の照射は、表面電位や定常電流が安定するまで行った（結果的に照射時間は 1 時間程度であった）。減衰に要する時間は、実験ケースにより、ばらつきが大きく、同ケースで 2 回実施している Case4 の実験でもお互いに差がある。最も短いケースでも、表面電位の減衰にはおよそ 1 日のオーダーの時間が必要であることがわかる。また、MLI 有りの形態で、表面電位の変化に変曲点が見られる。これは、MLI のシワも含め、表面形状が一樣ではない（不規則な凸凹が無数にある）ことの影響による可能性を考えているが、確定的なことは不明である。

図 7 に、Case3 および Case4 における、放電時の電流計測結果の一例を示す。示した例では、Case 3 で 0.35A、Case4 で 2.5A 程度の最大電流値が、MLI からの電流で観測されている。この電流により移動する電荷の量は、電流値を時間について積分することで求められる。ここでは、概算として、図 7 中、黒四角で囲った面積で評価すると、Case 3 でおおよそ 105nC、Case 4 でおおよそ 1 μ C の電荷量となる。衝撃吸収材 IF 構造 (EM Base) からの電流も生じているが、おおよそ電流のゼロを中心に同程度の変動となっており、時間に対して積分すると移動電荷量は正味ほぼゼロとなる。EM Base からの電流は、ポリイミドフォームと衝撃吸収材間の放電によるものではなく、MLI から流れる電流等の影響で誘導されたものではないかと考えている。

表2 衝撃吸収材 EM を供試体とする実験ケース.

	照射電子線エネルギー	MLI 有無
Case 1	10 keV	無
Case 2	30 keV	無
Case 3	10 keV	有
Case 4	30 keV	有

表3 衝撃吸収材 EM を供試体とする実験ケースにおける定常電流.

	供試体ベースからの電流	MLI からの電流
Case 1	-27 nA	N.A.
Case 2	-5~-9 nA	N.A.
Case 3	-3.39 nA	-91 nA
Case 4	-1.56 ~ -2.0nA	-274 nA

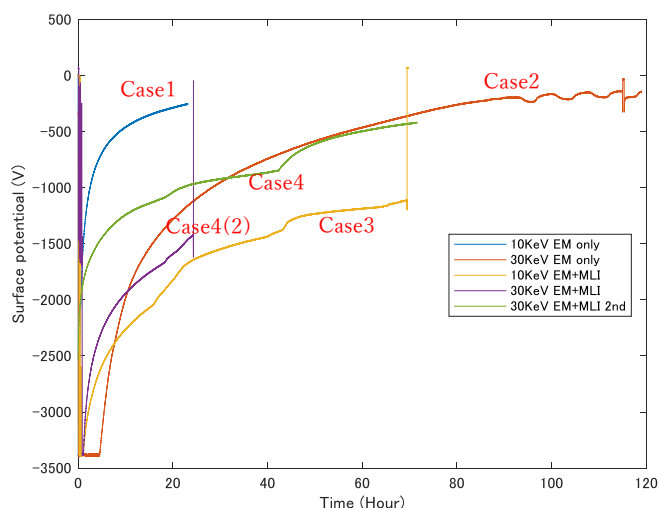


図6 電子線照射後の表面電位の変化.

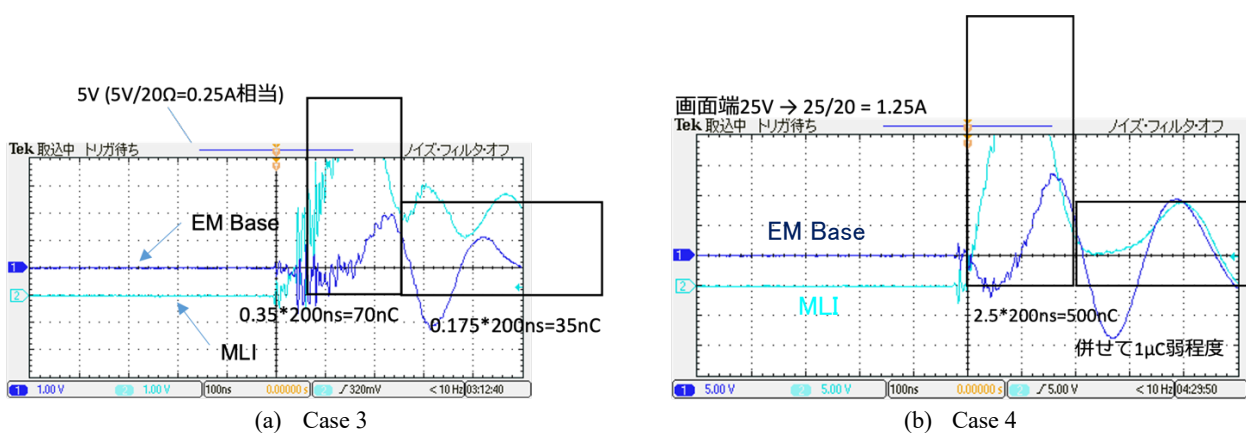


図7 放電時の電流計測結果の例.

5. まとめ

ポリイミドフォームを熱制御材として用いている SLIM の衝撃吸収材の宇宙航行時の帯電特性を評価するために、ポリイミドフォームのテストピースや衝撃吸収材のエンジニアリングモデルを供試体とし、スペースチャンバー内で、供試体に対し電子銃により電子線照射を行い、供試体の表面電位および供試体各部から流れる電流の計測を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ポリイミドフォームとポリイミドテープでは、後者の方が、電子が流れやすい形態である可能性がある。(第3節)
- 電子線の照射により、衝撃吸収材の表面電位は速やかに電位差 4000V 程度以上の高電位に帯電する。また、高電位となった表面電位が減衰するのには1日オーダーの時間が必要である。(第4節)
- 今回の実験で観測された範囲では、高電位に帯電した MLI つき衝撃吸収材 EM は、MLI で放電が生じていた。その電荷量は、30keV の電子線照射時で約 $1\mu\text{C}$ であった。また、電流の変動は、衝撃吸収材の IF (ベース) 構造と GND 間でも観測されたが、電荷の移動量としては差し引きゼロであった。(第4節)

今回の実験では、実際のフライトモデルとは異なり、MLI の層間の導通がとれていなかった。今後層間導通がとれた MLI を供試体として用いて、今回一通り実施した手順に従い、表面電位および供試体各部から GND への電流計測を行い、SLIM 衝撃吸収材の宇宙航行時の帯電特性とその影響評価を行う。

参考文献

- 1) 高橋優, 豊田裕之, 浅村和史, ERG 太陽電池パネルの帯電評価, 平成 25 年度スペースプラズマ研究会・講演集, https://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2014/image/0227_plasma_proc/7.pdf