

## 微小粒子衝突による衛星電力ハーネスの恒久的持続放電リスク

### Risk assessment of permanent sustained arc on satellite power harnesses caused by micrometeorite and orbital debris impacts

平井 隆之<sup>1</sup>, 川北 史朗<sup>2</sup>, 万戸 雄輝<sup>3</sup>, 東出 真澄<sup>2</sup>,  
黒崎 裕久<sup>2</sup>, 仁田 工美<sup>2</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>, 田中 孝治<sup>2</sup>  
Takayuki Hirai<sup>1</sup>, Shirou Kawakita<sup>2</sup>, Yuki Mando<sup>3</sup>, Masumi Higashide<sup>2</sup>,  
Hirohisa Kurosaki<sup>2</sup>, Kumi Nitta<sup>2</sup>, Sunao Hasegawa<sup>2</sup>, Koji Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup>総合研究大学院大学

<sup>1</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency,

<sup>3</sup>SOKENDAI [The Graduate University for Advanced Studies]

#### 1. はじめに

宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）では、比較的衝突頻度の高い直径 1 mm 以下の微隕石及び微小スペースデブリ（以降、合わせて微小粒子と呼ぶ）の衝突による、衛星電力ハーネス束の恒久的持続放電（Permanent Sustained Arcs, PSA）及びそれに起因する衛星電源系の故障リスクの再評価に取り組んできた<sup>[1-3]</sup>。本稿は、平成 27 年度より三ヶ年計画で取り組んできた本リスク再評価の最終年度報告に位置付けられ、JAXA の宇宙機設計標準「JERG-2-144-HB001A スペースデブリ防護設計マニュアル」<sup>[1]</sup>の改訂に向けたものである。昨年度までの研究から、PSA が発生する電源設計および衝突強度について大まかな閾値を推定した。今年度は、1) より現実的な電源設計における PSA 発生条件の探索、2) 放電におけるプラズマ密度の影響評価、3) 設計標準改訂に向けたベンチマークデータの取得、の 3 点を目的とし超高速衝突実験を行なった。実験の概要について報告する。

#### 2. 実験方法

本リスク再評価では、軌道上での微小粒子の超高速衝突を再現するため、JAXA 宇宙科学研究所が所有する二段式軽ガス銃を用いた。図 1 にターゲットチェンバー内に設置した試験供試体を示す。ハーネス束には、日本の地球周回衛星で汎用される TEconnectivity 社の SPEC55 ワイヤ（単芯 AWG22 番線）を用いた。二台の太陽電池シミュレータから電源を供給し、衝突上流側から HOT1 層、RTN 層、HOT2 層の三層構造を A2024 板材上に形成し、ハーネス束供試体とした。また、従来の試験方法と比較してより現実的な電源構成を再現するため、衛星内部機器を模擬するための可変抵抗器を導入した。衝突誘起プラズマを介した放電が発生した際、この可変抵抗器にも放電電流が分配されるため、恒久的持続放電が発生しにくくなると予想される。電源電圧及び電流は、低軌道衛星を模擬した 50V/2.5 A または 5.5 A、静止軌道衛星を模擬した 100V/3.0A の三系統とした。電圧プローブと電流プローブにより衝突前後の電圧値・電流値をモニターすることで、放電の継続時間を測定した。さらに、衝突誘起プラズマの密度が持続放電の発生有無にどのように影響するのかを調べるため、図 1 に示すよ

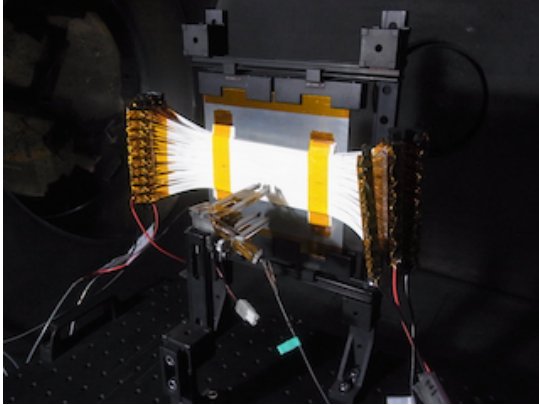


図1 ターゲットチェンバー内に設置したハーネス束供試体。飛翔体は写真手前側から奥に向かって射出され、供試体ハーネス面の中央付近に衝突する。

うにハーネス前面にダブルプローブを設置し、衝突誘起プラズマの位置及び時間変動を測定した。本研究で用いたダブルプローブ法によるプラズマ密度計測の詳細については、参考文献[4]を参照されたい。微小粒子を模擬する飛翔体には、0.3~1.0 mm のステンレス球及び酸化アルミニウム球を用い、ハーネス供試体に4~7 km/s の速度で、単発で撃ち出し、垂直衝突させた。

### 3. 実験結果と考察

1章で述べた3つの目的に沿って、実験結果と考察の概要を述べる。

#### 1) より現実的な電源回路構成における PSA 発生条件の探索

抵抗回路が接続されたより現実的な電源回路構成においては、今回の電源電圧・電流条件、飛翔体条件では、いずれの場合も数百 ms 以内に収束する過渡的持続放電にとどまり、地絡や短絡故障を引き起こしうる PSA には至らないことがわかった。これは、放電時に抵抗回路にも電流が分配されることで、損傷箇所(放電経路)に流れる電流が PSA の発生に必要な値に達しないためと考えられる。

一方、従来の試験方法<sup>[1]</sup>と同様の抵抗回路を含まない回路構成では、電源電流が一定以上において PSA が発生する傾向が見られた。これは前年度の試験結果<sup>[3]</sup>や従来の

研究<sup>[5,6]</sup>と調和的であり、電流密度が高くなることで陰極の熱電子放出が活発になり、アーク放電に至るためと考えられる<sup>[7]</sup>。また、前回と似た結果として、比較的衝突強度が大きい飛翔体条件では、PSA が発生しないことが確認された。これは衝突強度がある程度以上大きくなると放電電極間の距離が大きくなることで、放電が持続しにくくなるためと推測される。

また、同じ飛翔体衝突条件であっても、ハーネス線の中央に衝突するか、隣接するハーネス線の隙間に衝突するかでハーネスの損傷が一本芯線露出か二本以上芯線露出か変わり、それが放電の有無にも影響することがわかった。

#### 2) 放電におけるプラズマ密度の影響評価

ダブルプローブ法を用いたプラズマ計測により、飛翔体の質量・衝突速度が大きいほどプラズマ密度が高く、いずれの飛翔体条件でもプラズマは放電の継続時間よりも十分短い時間に拡散することが確認された。ある電源条件において、プラズマ密度(≈飛翔体の衝突強度)と PSA の発生有無の間には明らかな相関は見られず、本研究の飛翔体条件ではプラズマ密度よりも電源条件の方が PSA の発生要因として支配的と考えられる。

#### 3) 設計標準改訂に向けたベンチマークデータの取得

本研究期間の3年間で、従来の再現実験とより現実的な電源構成での実験を合わせて、30 ショットを超える有効データを取得した。その結果、1) で述べたように現実的な電源構成では、地絡・短絡といった致命的な故障につながりうる PSA は、従来考えられていたよりも発生しにくいことがわかった。これにより現行のスペースデブリ防護設計マニュアルの改訂に向けた準備が整ったといえる。

### 4. まとめ

本研究では、微小粒子の超高速衝突による衛星電力ハーネスの恒久的持続放電及びそれに起因する衛星電源系の故障について、

より現実的な電源回路構成を用いた超高速衝突実験を実施し、リスク再評価に取り組んだ。その結果、実際の衛星では従来考えられていたよりも微小粒子衝突で電力ハーネスがPSAに至る可能性は低いことがわかった。これによりスペースデブリ防護設計マニュアルで定める防護基準が緩和され、衛星設計者の負担軽減及びコスト低減が期待される。

## 謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所超高速衝突実験共同利用施設の採択課題として実施しました。実験を手伝っていただいた浜田 ちぐさ氏、北川 康弘氏、菊原 哲氏に感謝申し上げます。本研究では、宇宙航空研究開発機構研究開発部門第一研究ユニットの太陽電池シミュレータと可変抵抗回路を使わせていただきました。

## 参考文献

[1] 宇宙航空研究開発機構, JERG-2-144-HB001A スペースデブリ防護設計マニユア

ル, 2014.

[2] 平井隆之ら, 微小デブリ衝突による電氣的損傷の研究: 放電計測とダブルプローブ法によるプラズマ計測, 平成 27 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 2016.

[3] 平井隆之ら, 微小デブリ衝突による衛星電力ハーネスの電氣的損傷リスク, 平成 28 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 2017.

[4] 長岡洋一, 宇宙機の薄型パネル構造への超高速衝突における電氣的現象の研究, 総合研究大学院大学博士論文, 2012.

[5] Siguier, J. M., et al., Study on Secondary Arcing Occurrence on Solar Panel Backside Wires With Cracks, IEEE Trans. on Plasma Science PP 2980–2984, 2015.

[6] Siguier, J. M., et al., Secondary arcing triggered by hypervelocity impacts on solar panel rear-side cables with defects – Comparison with laser impacts, IEEE Trans. on Plasma Science PP 1–7, 2017.

[7] Smirnov, B. M., et al., Theory of gas discharge plasma, Springer International Pub., Switzerland, 2015.