

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  
Electrical failure on satellites caused by space debris impacts:  
simultaneous measurements of impact-induced discharge and plasma

平井 隆之<sup>1</sup>, 東出 真澄<sup>1</sup>, 黒崎 裕久<sup>1</sup>, 川北 史朗<sup>1</sup>,  
万戸 雄輝<sup>2</sup>, 山口 翔太<sup>3</sup>, 田中 孝治<sup>1</sup>

Takayuki Hirai<sup>1</sup>, Masumi Higashide<sup>1</sup>, Hirohisa Kurosaki<sup>1</sup>, Shirou Kawakita<sup>1</sup>,  
Yuki Mando<sup>2</sup>, Shota Yamaguchi<sup>3</sup>, Koji Tanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>徳島大学, <sup>3</sup>東海大学

## 1. はじめに

運用終了後に軌道上に残された人工衛星やロケット, およびそれらの破片物質は, スペースデブリ (以下, デブリ) と呼ばれ, 人類の宇宙活動において喫緊の問題となっている. デブリ衝突による衛星システムの損傷は, 構体を物理的に破壊する機械的損傷だけでなく, 太陽電池や電力ハーネスのような電源系コンポーネントの機能喪失を引き起こす電氣的損傷がある. 特に電力ハーネスの電氣的損傷は, 比較的衝突頻度の高い直径 1 mm 以下の微小デブリの衝突によっても発生しうる.

川北らは, 衛星電力ハーネスを模擬した電線束に, 直径 1 mm 以下のデブリ模擬粒子を約 4 km/s で衝突させ, 電力ハーネスの電氣的損傷モードと衝突条件について調べている<sup>[1]</sup>. 図 1 は衝突後のハーネスの外観で, 衝突誘起プラズマを介した持続放電により, ハーネスが溶融・炭化し地絡故障を起こしている.

川北らの実験結果は, 宇宙航空研究開発機構のスペースデブリ防護設計マニュアルに反映され, 電力ハーネス単線に関しては一律で直径 0.2 mm のデブリの衝突に耐えられる設計が推奨されている<sup>[1]</sup>. しかし, 限られた実験条件で, 持続放電の有無とハ

ーネスの損傷度合いを確認するのみの現象論的評価に留まっているため, 実設計に近いコンフィギュレーションで, かつ実環境に近い状態での試験を実施することで, より精度の高い結果を得ることが重要と考える.

軌道上で想定される微小デブリの衝突条件を, 地上実験で網羅することは非現実的である. そこで本研究では, 長岡が構築した衝突誘起プラズマの密度・拡散モデル<sup>[2]</sup>を応用し, 物理的根拠に基づいた衛星電力ハーネスの電氣的損傷に対するリスク評価方法の確立を目指す.

本稿では, 今年度構築した衝突誘起放電・プラズマ同時計測系を用いた衝突実験の結果について報告する.



図 1 微粒子の超高速衝突により溶断・炭化した模擬衛星電力ハーネス.

## 2. 実験方法

微小デブリ衝突を模擬するため、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いた。衝突実験の概略図と治具に設置した供試体を図2に示す。

供試体には、衛星電力ハーネスのデファクトスタンダードである TE connectivity の SPEC 55 線 (AWG22) を用いた。SPEC55 線を折り返し作成した幅約 4 cm のハーネスを、厚さ 3 mm の A2024 板上にカプトンテープで貼り付け治具に固定した。

衛星電源回路を模擬するため、Keysight Technologies の太陽電池シミュレータ E4362A を用い、電源電圧は低軌道衛星で一般的な 50 V とした。1 本のハーネス線に 2.5 A の電流が流れるよう、20 Ω の模擬負荷抵抗と 1 mF のコンデンサバンクを図2に示す位置に接続した。放電の有無と持続時間の

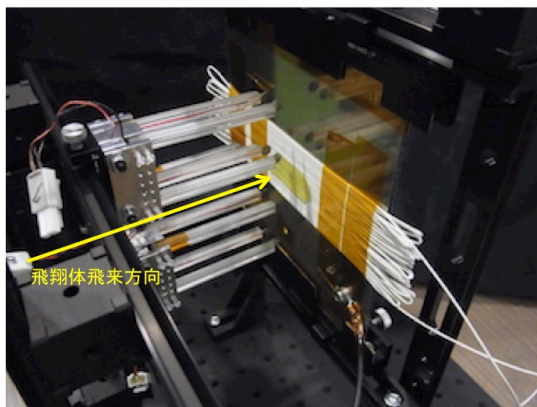
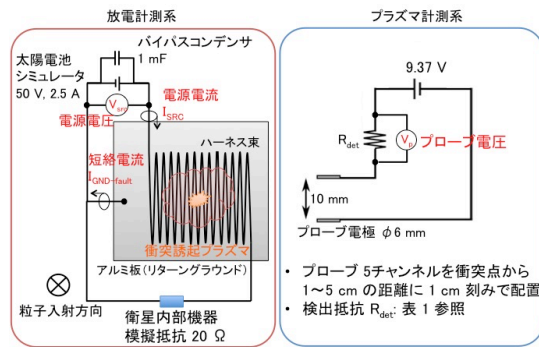


図2 (上) 実験の概略図。ハーネス面に模擬デブリ粒子を衝突させた際の放電とプラズマを同時に計測する。(下) 治具に固定された供試体。飛翔体はプローブの間を縫ってハーネス面に衝突する。

計測には、電流プローブ 2 つと電圧プローブ 1 つを使用した。電流プローブは電源のホットラインと、A2024 板-ハーネス間の 2 箇所に挿入した。電圧プローブは電源電圧を計測し、電流プローブとともに短絡の有無を確認する。

プラズマ電流の計測には 5 つのダブルプローブを使用し、衝突点から 1~5 cm の距離に 1 cm おきに配置した。ハーネス面とプローブ電極端の間は約 1 cm 空けている。各プローブには 9.4 V の電圧を印可し、表 1 に示す検出抵抗を接続した。プローブ電極の詳細については長岡の文献<sup>[2]</sup>を参照されたい。

飛翔体は直径 0.5 mm のステンレス球を単発撃ちで射出し、通電したハーネス面に約 6 km/s で衝突させた。

なお、プラズマの挙動を撮像するため、高速度カメラを使用したが、本稿では割愛する。

## 3. 実験結果と考察

図3に衝突後のハーネスの外観を示す。3本のハーネスが損傷し、内1本は断線している。しかし、川北らの実験で見られたようなハーネスの炭化は見られず、地絡故障にも至っていないことがわかった。

図4に電流プローブで計測した電流波形を示す。衝突直後に電源電流と短絡電流の値が鋭く立ち上がり飽和していることから、衝突誘起プラズマを介し放電が発生したことがわかる。また、波形図は割愛するが、電圧プローブによる電源電圧計測でも、短絡に起因する電圧低下を確認した。

表1 ダブルプローブの検出抵抗

プローブ番号 (衝突点からの 距離 [cm])	検出抵抗 [Ω]
1	24.0
2	103.7
3	103.7
4	24.3
5	$9.76 \times 10^3$



図3 衝突後のハーネス面.

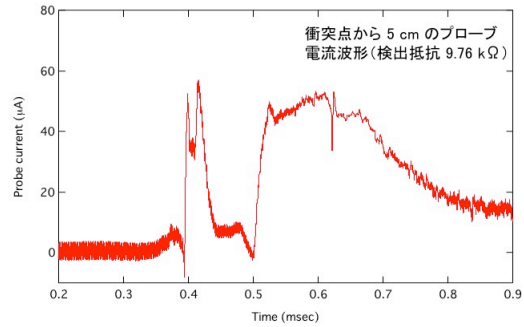


図5 ダブルプローブで計測したプラズマ電流波形.

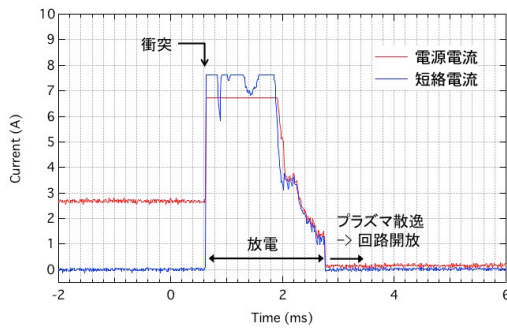


図4 電流プローブで計測した電流波形.

放電開始から約 2 msec 後、ハーネスが断線し、プラズマが散逸したことで回路が開放されたことがわかる。持続放電では数十 msec 以上放電が継続するため、衝突後のハーネスの観察結果から見ても、今回の実験では持続放電には至らなかったといえる。なお、放電電流が電源から供給される 2.5 A よりもはるかに高い値を示しているのは、コンデンサバンクを誤って負荷抵抗ではなく電源に並列に接続したことで、放電時にコンデンサからの電流も上乘せされたためと考えられる。

図5にダブルプローブで計測したプラズマ電流波形を示す。衝突点から 5 cm に設置したプローブでのみ信号を計測できた。最大プラズマ電流値は約 60  $\mu\text{A}$  であった。残る 4 つのプローブで信号を検出できなかった原因としては、発生したプラズマ密度に対し検出抵抗が小さすぎたためと考えられる。

ここで、川北らの実験結果と比較することで、本実験で持続放電に至らなかった原因について考察する。川北らの実験には、本実験と同一条件でのデータはないため、直接比較することはできないが、発生したプラズマ電荷量の比を、衝突速度比と粒子質量比から推定し、持続放電の有無を簡易的に検証することは可能である。プラズマ電荷量  $Q$  は衝突速度  $v$ 、粒子質量  $m$  により、 $Q \propto mv^{2.5-4.5}$  と表される<sup>[2]</sup>。川北らの実験結果で、電源条件が近く持続放電が発生した No.6 と比較する。本実験と川北らの実験 No.6 の質量比 0.2~0.4 (川北らの実験結果では粒子を散弾射出しているため、衝突した総質量に幅がある)、速度比 1.5 から、電荷量比は 0.6~2.6 と見積もられる。見積もった電荷量比にはかなりの幅があるものの、本実験で発生した電荷量は、川北らの実験の半分程度であった可能性もあるため、本実験で持続放電が発生しなかったことは説明可能といえる。ただし、ここでは上述したコンデンサバンクの放電電流の影響は考慮していない。

最後に、測定したプラズマ電流値からプラズマ密度を見積もり、長岡モデルと比較することで、本研究のプラズマ計測手法の妥当性を検証する。電子温度を 5000~10000 K、プラズマイオンの組成をハーネス芯材の銅と仮定すると、プローブ番号 5 の位置における最大プラズマ密度は  $2.0\sim 2.7 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  と見積もられる<sup>[3]</sup>。一方、長岡のモデル<sup>[2]</sup>を用い、本実験と同一条件で想定される最大プラズマ密度を見積もると、 $5.4 \times$

$10^{16} \text{ m}^{-3}$ となり、概ね近い値となった。これにより、本研究のプラズマ計測手法の妥当性を確認できたといえる。

#### 4. まとめ

本研究では、衝突誘起プラズマの密度・拡散モデルに基づいた衛星電力ハーネスの電氣的損傷リスクの評価方法を確立することを目的として、放電時間とプラズマ電流を同時に計測可能な実験系を構築し、衝突実験を行った。その結果、衛星電源模擬回路におけるコンデンサバンクの接続箇所と、プラズマプローブの検出抵抗値については改善が必要だが、放電とプラズマを同時に計測可能であることを実証した。

今後は、上述の改善を施した上で、持続放電が十分発生しうる粒子質量、衝突速度での衝突実験を実施し、持続放電の有無をプラズマ密度・拡散モデルから考察していく。

#### 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ュアル, 2014.
- [2] 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.
- [3] 堤井信力, プラズマ基礎工学増補版, 3.2 節, pp.128-145, 1995.