

宇宙機表面の ESD に伴うワイヤ間持続放電現象

ESD Initiated Sustaining Discharges between Wires on Satellite Surfaces

藤井 治久、高島 大輔*

Haruhisa Fujii and Daisuke Takashima

奈良工業高等専門学校 電気工学科 (*現、豊橋技術科学大学)

Nara National College of Technology, Department of Electrical Engineering

E-mail: fujii@elec.nara-k.ac.jp

1. はじめに

近年、宇宙機の大電力化に伴い、従来 28-50V の直流電圧が主流であった宇宙機の送電電圧は、わが国の技術試験衛星Ⅷ型 (ETS-Ⅷ) で 100V、国際宇宙ステーションで 120V と、宇宙機の高電圧化が進んでいる¹⁾。

一方、宇宙空間に存在する様々な宇宙環境要因が、宇宙機と相互作用を引き起こし、宇宙機の安定運用に大きな影響を与える。特に、宇宙機表面においては、飛来したプラズマにより表面材料が帯電し、静電気放電 (ESD : Electrostatic Discharge) が発生する可能性がある¹⁾。また、宇宙機表面に配設された電力用ワイヤにデブリ衝突や熱サイクルにより欠陥が生じ、導体が露出する可能性もある。そのような導体露出部近傍で ESD が発生した場合、導体間が ESD で生じた放電プラズマによって短絡し、持続放電へ発展することも考えられる。持続放電が発生すると、導体間に大電流が長時間流れ負荷に電力を送電できなくなり、また大電流が流れることで機器の故障や発生した熱により回路の開放が生ずるなど、宇宙機にとって深刻な問題となる。実際に、このような持続放電によって故障したと考えられる宇宙機も報告されており、2002 年に打ち上げられたみどり 2 号 (ADEOS-II) もその一つである²⁾。

そこで本研究では、静止軌道環境を模擬した真空チャンバ内において、宇宙機表面に配設されたワイヤに欠陥が生じ導体が露出した送電用ワイヤを模擬したサンプルに電子ビームを照射し、ESD を発生させることで持続放電を観測した。そして、実験の結果から持続放電の特性を明らかにしようとした。

2. 実験方法

2.1 実験系

本研究では、静止衛星表面に配設されたワイヤに生じた欠陥部における持続放電を観測するため、図 1 に示す実験系にて実験を行った。実験サンプルを真空チャンバ内に入れ、圧力を 1×10^{-6} Torr 以下に保持した状態で、電子銃からエネルギー $E=20\text{keV}$ の電子ビームをサンプルに照射した。図中の電流源 I には Solar Array Simulator (Agilent, E4351B) を用いた。

サンプル表面の帯電電位は、非接触表面電位計 (TREK 341B、 $0 \sim \pm 20\text{kV}$) で測定し、放電電流波形を 3 個の CT (CT1、CT2 : Pearson 2877、CT3 : Pearson 411) で測定した。また、放電光はデジタル一眼レフカメラ (Canon DS126071) で撮影した。

実験におけるパラメータは、ワイヤ電流 I 、負荷抵抗 R 、ワイヤ間電位差 $V (=I \cdot R)$ 、ワイヤ電流方向 (逆方向・同方向) の 4 つとした。なお、図 1 はワイヤ電流が逆方向の場合の実験系である。

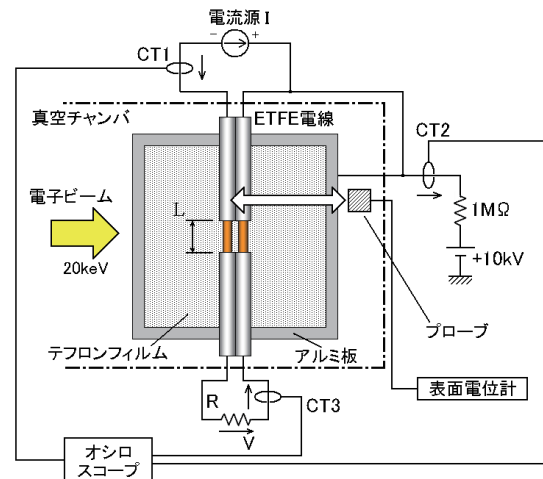


図 1 実験系の概略

2.2 実験サンプル

今回、図 2 に示す実験サンプルを用いて実験を行った。アルミ板 ($1\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$) の上に代表的な熱制御材料である厚さ $125\mu\text{m}$ のテフロン FEP (Fluorinated Ethylene Propylene copolymer) フィルムを張り付け、その上に幅 L の長さだけ被覆材料をはがした ETFE (Ethylene Tetra-Fluoro Ethylene) 電線を取り付けている。

欠陥部幅を L 、ワイヤ間隔を d_1 、ワイヤとテフロンフィルムとの距離を d_2 とし、今回は $d_1=0$ のサンプルについて実験を行った。図 3 に、サンプルの例として、 $L=1.5\text{mm}$ 場合の写真を示す。なお、FEP フィルム、ETFE 電線はカプトンテープで固定したが、FEP フィルムとアルミ板の間に空気がたまらないようにするため、カプトンテープで固定しない場所を

設けている。

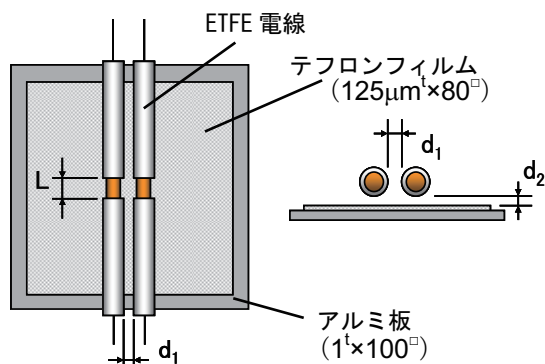


図2 実験サンプル

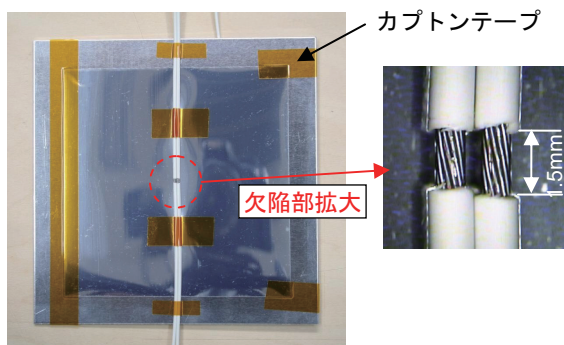


図3 実験サンプル (L=1.5mm) の写真

3. 実験結果

図4に、テフロン表面帯電電位の時間特性の代表例を示す。実験条件は、 $V=121V$ 、 $I=0.5A$ (逆方向) である。テフロン表面電位は時間の経過と共に増加し、ある程度の電位で放電が発生することがわかる。また、テフロン表面帯電電位は $-17kV$ 程度で飽和する。

図4の実験における持続放電の電流波形として放電4の場合を、図5に示す。CT3の負荷側において、 $0.5A$ 流れていたワイヤ電流が約 $26\mu s$ 間 0 になっているのがわかる。この、負荷側における電流が 0 になる時間を放電持続時間と定義する。また、CT1の電源側には、 $10A$ 程度の大きな電流が流れ込んでいることが確認できる。なお、図6に、図4の放電4における放電光を示す。ワイヤ欠陥部において、強い発光が見られ、テフロンフィルム表面で発生した沿面放電により電荷が欠陥部に流入した様子が確認できる。

次に、図4の放電6の場合の放電電流波形を図7に示す。CT3の電流は若干低下するが 0 になることはなく、持続放電は発生していないと考えられる。これは、放電がテフロンフィルム端部で生じたため、表面に蓄積した電荷がアルミ基板に流れ込むことで、ワイヤ欠陥部に放電プラズマが殆ど流入することがなかったためと考えられる。

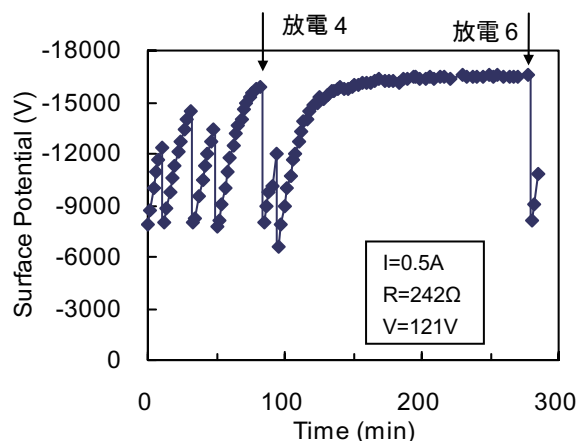


図4 テフロン表面帯電電位の時間特性 ($E=20keV$)

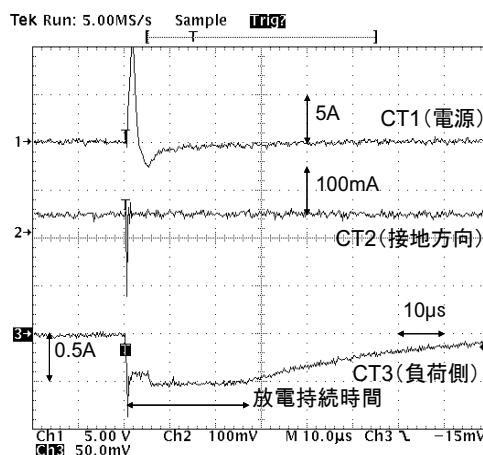


図5 図4中放電4で観測された放電電流波形

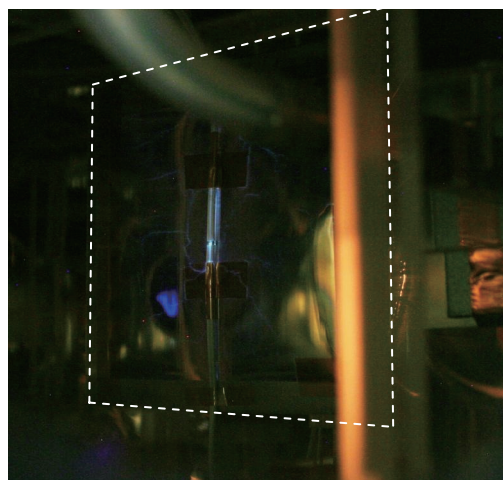


図6 持続放電発生時の放電光 (図4中放電4)

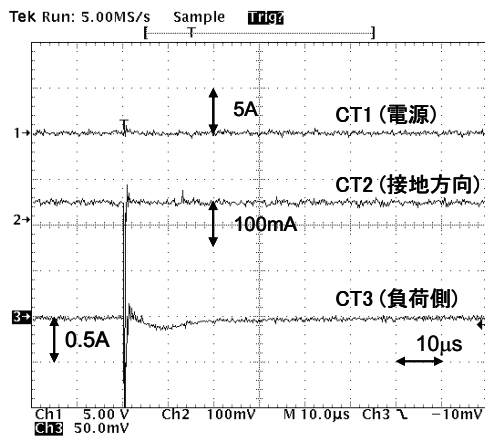


図7 図4中放電6で観測された放電電流波形

4. 実験結果の検討

実験により得られた、各パラメータ・欠陥条件による放電持続時間の特性について述べる。

4.1 放電時表面電位と放電持続時間

図8に、各実験条件毎の放電時表面電位に対する放電持続時間の特性を示す。実験条件により値にばらつきがあるが、どの実験条件においても、放電時表面電位が高いほど放電持続時間は長くなる傾向があることがわかる。これは、放電時の表面電位が高いほど、ESDの放電電荷量が多くなり、放電により発生するプラズマの量も増えるためであると考えられる。

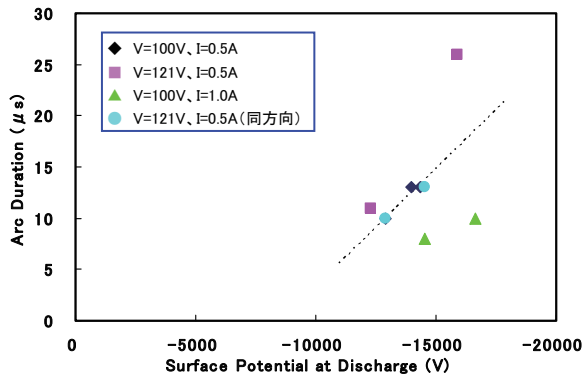


図8 放電時表面電位と放電持続時間

4.2 ワイヤ電流 I と放電持続時間

図9に、ワイヤ電流 I に対する放電持続時間のグラフを示す。ワイヤ電流が大きくなるほど放電持続時間は短くなり、また、ワイヤ電流が 1.5A では持続放電が発生しないことから、持続放電が発生するにはワイヤ電流がある程度以下である必要があることがわかる。これは、ワイヤ電流が大きいほどワイヤ欠陥部の内側において電流による磁界が大きくなり、ESD によって生じ導体間を移動する電荷がより大きな Lorentz 力を受けるためであると考えられる³⁾。

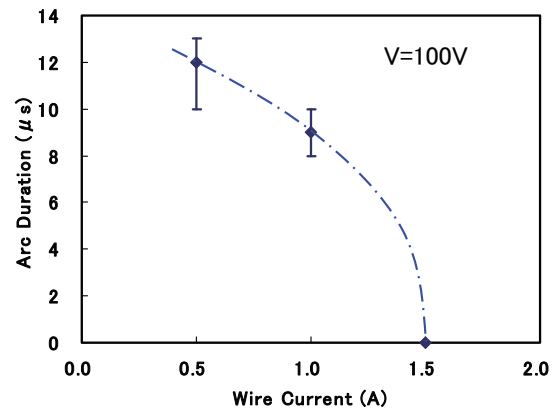


図9 ワイヤ電流と放電持続時間

4.3 ワイヤ間電位差 V と放電持続時間

図10に、各電流方向におけるワイヤ間電位差 V に対する放電持続時間のグラフを示す。ワイヤ電流方向が同方向・逆方向共に、ワイヤ間電位差が大きいほど放電持続時間は長くなる傾向がある。また、電流方向が逆方向の時には 70V 以下、同方向の時は 100V 以下で持続放電が発生しないことから、持続放電の発生には閾値以上のワイヤ間電位差が必要であることがわかる。これは、ワイヤ間電位差が大きいほどワイヤ欠陥部での電界強度が大きくなるため、ワイヤ間を電荷が移動しやすくなり放電持続時間が長くなったと考えられる。この結果から、宇宙機の高電圧化により持続放電の危険性が高まると考えられる。

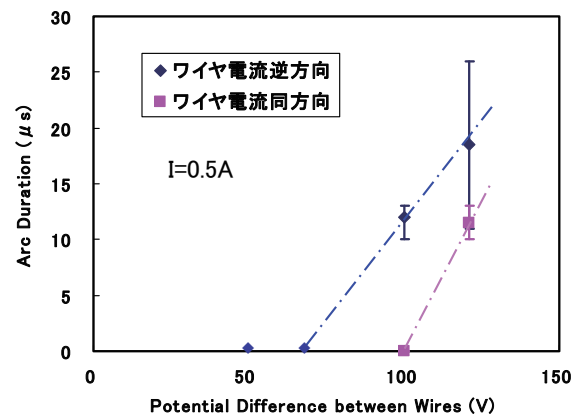


図10 ワイヤ間電位差と放電持続時間

4.4 ワイヤ電流方向と放電持続時間

また、図10より、ワイヤ電流が同方向の場合は、逆方向の場合と比較すると、放電持続時間が短くなっており、持続放電発生閾値も高くなっている。これは、ワイヤ電流が同方向の場合、ワイヤ欠陥部の外側において電流による磁界が大きくなるため、ESD によりワイヤ欠陥部に流入する電荷がより大きな Lorentz 力を受け、ワイヤ欠陥部に流入できる

電荷が減少したことによると考えられる。

4.5 ワイヤ欠陥幅 L と放電持続時間

図 11 に、ワイヤ欠陥幅 L に対する放電持続時間のグラフを示す。ワイヤ欠陥幅 L が小さいほど放電持続時間が長くなる傾向にあることがわかる。これは、ワイヤ欠陥幅 L が小さいほど ESD による電荷がワイヤ欠陥部に集中しプラズマ密度が高くなるためであると考えられる。

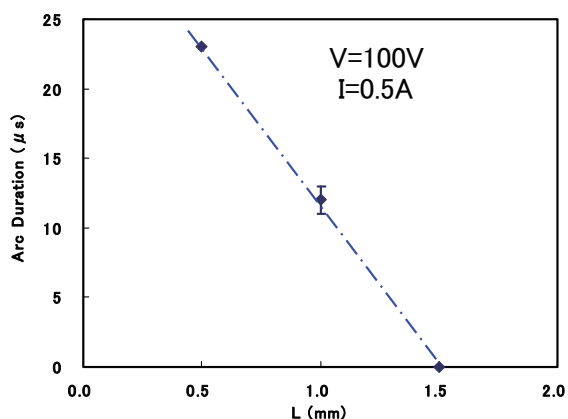


図 11 ワイヤ欠陥幅 L と放電持続時間

4.6 ワイヤ-テフロン間距離 d_2 と放電持続時間

図 12 に、ワイヤ-テフロン間距離 d_2 に対する放電持続時間のグラフを示す。このグラフから、 d_2 が大きくなると放電持続時間は短くなると考えられる。

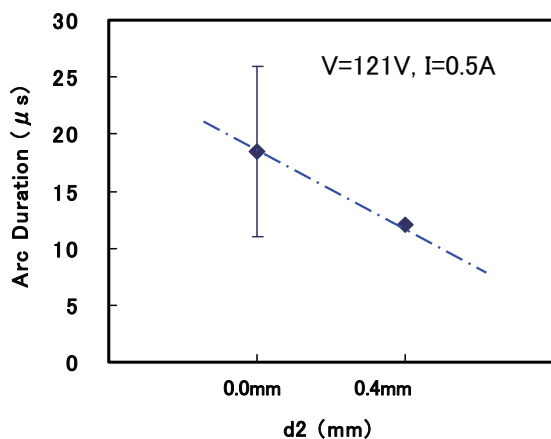


図 12 ワイヤ-テフロン間距離 d_2 と放電持続時間

5. まとめ

宇宙機表面に配設されたワイヤ間の持続放電の危険性を下げるために有効な手段としては、以下の 2 項目があげられる。

- (1) 隣り合ったワイヤに流れる電流の方向を同方向とする。
- (2) 宇宙機表面材料の帯電を抑制し、ESD の発生を

防止する。このためには、材料の改善や正イオンの吹き付けによる電位緩和、また、宇宙機表面材料上に予め放電の起こりやすい弱点を形成しておき、その部分で比較的弱い放電を意図的に発生させることが考えられる。

また、ワイヤの欠陥条件による持続放電特性の変化としては、以下の 2 項目が明らかになった。

- (3) ワイヤ欠陥幅が小さいほど放電持続時間が長い。宇宙機表面のワイヤにできる欠陥として、熱サイクルによるワイヤ被覆材料のひび割れが発生した場合、ワイヤ欠陥幅は非常に小さくなるので、持続放電の危険性が高くなる。
- (4) ワイヤと宇宙機表面材料の間にある程度の距離があると、放電持続時間は短くなる傾向である。

参考文献

- 1) 趙・藤井：「宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題 第 1 回 宇宙環境と宇宙機の帯電電位」、日本航空宇宙学会誌、vol.51、no.591、pp.109-117 (2003)
- 2) S. Kawakita, *et al.* : "Investigation of an operational Anomaly of the ADEOS-II Satellite", 9th Spacecraft Charging Technology Conference, JAXA-SP-05-001E (2005)
- 3) H. Fujii and Y. Uetani : "ESD-triggered sustaining discharge between wires for space use in vacuum", Proc. XXIVth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.556-559 (2010)