



講座 宇宙機と宇宙プラズマ相互作用による放電現象の地上実験と軌道上実験

3. 宇宙機で発生する放電の地上実験

3. Ground Experiment of Discharge Occurred on Spacecrafts

3.2 ケーブル間での放電実験

3.2 Ground Experiment of Discharge Occurred between Cables for Space Use

藤井 治久

FUJII Haruhisa

奈良工業高等専門学校 電気工学科

(原稿受付：2015年8月3日)

宇宙機の表面や内部には電力を配送するケーブル（ワイヤ）が長い距離にわたって配設される。このケーブルの導体は何らかの原因により露出し、そこに宇宙プラズマの帯電に基づく静電気放電が波及すると、その放電プラズマにより導体間で持続放電が発生する可能性がある。ここでは、この持続放電に関わる地上実験について紹介する。

Keywords:

spacecraft, power cable, electrostatic discharge, discharge plasma, arcing discharge

3.2.1 ケーブル間での放電実験

宇宙機の大型化・大電力化の動向に付随して顕在化してきた放電に関わる問題としては、前節3.1の太陽電池パネル上の持続放電現象と共に、宇宙機用電力ケーブル（ワイヤ）での持続放電現象が挙げられる。このケーブルの持続放電事象の発端は、日本の地球観測技術衛星 ADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite II) (みどり2号) が2003年10月に機能不全に陥るという不具合が発生したことである。それは、みどり2号が高度800 kmの極軌道オーロラ帯を通過中に、太陽電池パネルから衛星本体に電力を送る電力線ワイヤハーネス部のMulti-Layer Insulation (MLI) がオーロラ帯電子により帯電したためと、ワイヤの一部の絶縁被覆が損傷を受け導体が露出したため、その導体とMLIの蒸着層との間でESD (Electrostatic Discharge) が発生し、その放電プラズマにより露出導体間で持続放電が生じたためと考えられた[1]。このような持続放電発生の概念図を図1に示す。

このワイヤにおける持続放電現象に関わる実験はあまり実施されていないので、筆者らが行った実験を中心に紹介する[2-4]。図2はその実験系を示している。真空チャンバ中に設置された1対のワイヤ導体間に抵抗 R を挿入し、その回路にDC電流源 (Agilent E4351B) から電流 I を流すことにより導体間に電位差 $V_a = R \cdot I$ を発生させる。また、DC電圧源 (菊水電子 PAD1K-0.2L) (電圧 V_c) によって、5 M Ω の抵抗を通してコンデンサ C に充電した電

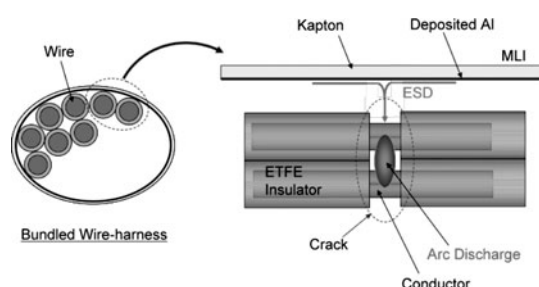


図1 ADEOS-II で発生したと考えられているワイヤハーネス部での持続放電。外部に MLI が取り付けられ、両端が結束されることでケーブル周囲の圧力が高くなっている。

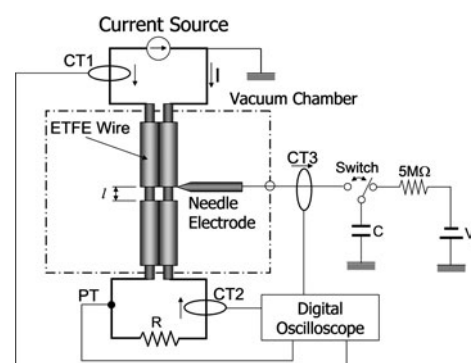


図2 低真空下持続放電実験系の概略[2]。2本のワイヤ間に抵抗 R を挿入し電流 I を流すことにより、ワイヤ導体間に電位差 $R \cdot I$ を形成する。欠陥部として、ワイヤの絶縁被覆が幅 l 剥ぎ取られている。

荷を、スイッチにより ESD パルスとして針電極（直径 1 mm）に印加した。ESD パルス注入により放電が発生したとき、回路に流れる電流と導体間の電圧をそれぞれ電流プローブ（Pearson 411）3 個と電圧プローブ PT により測定した。ESD パルス自体はパルス幅 $2\mu\text{s}$ 程度である[2]。なお、用いられたワイヤは、宇宙用 SPEC55 の ETFE（Ethylene Tetra Fluoro Ethylene）電線で、外径 1.2 mm、被覆絶縁厚 0.15 mm、導体径 0.9 mm であった。また、1 対のワイヤそれぞれにワイヤ損傷を模擬し、絶縁被覆を幅 l に剥ぎ取り、導体を露出させた。

真空チャンパ内の圧力 $P=2.6\times 10^2\text{ Pa}$ で、ワイヤと抵抗 $R=200\Omega$ に電流 $I=0.5\text{ A}$ を流した状態で（導体間電位差 $V_a=R\cdot I=100\text{ V}$ ）、コンデンサ $C=1\mu\text{F}$ に電圧 $V_c=-1000\text{ V}$ で充電した（ADEOS-II のワイヤハーネス MLI の帯電電位が -1000 V 程度と想定されている[1]）。その後、スイッチによってワイヤ欠陥部に ESD パルスを注入した。その ESD によってトリガされたワイヤ間の放電電流と電圧の波形ならびに放電光を図 3 に示す（ $l=1\text{ mm}$ ）。ESD パルスを注入した直後、導体間電圧 V_a は -100 V から 0 V になり、約 $260\mu\text{s}$ 間その状態が持続した。この間、導体間に注入された ESD による放電プラズマにより、露出した導体間でアーク放電が成長し、橋絡したことを示している。このような持続放電は、ESD を発生させるためのコンデンサ容量 C に影響を受け、図 4 に示すように、放電持続時間はコンデンサ容量 C にほぼ比例して長くなることがわかる。つまり、導体間に注入された電荷量が多いほど放電は長く持続

することを示している。

また、図 5 には、真空チャンパ内の圧力を変化させて取得した放電持続時間の圧力依存性を示す。この図において、圧力が低下すると放電持続時間は、若干低下傾向がみられるが、正極性の ESD パルスにおいては、 0.1 Torr (13 Pa) 以下では放電が生成できず放電の持続はなかった。この圧力領域は、ADEOS-II で発生したワイヤ-ハーネス部での放電を模擬したものであるが、ワイヤ-ハーネス部は MLI で覆われ結束されており、宇宙機外部と違った圧力状態になっている。このため、太陽電池パネルで発電された電力がワイヤハーネスを通して本体に供給される際に通電によりワイヤの温度が上がり、ワイヤ-ハーネス部の圧力が高くなり ESD が発生しやすい状況であったと考えられている[1]。

一方、宇宙機用ケーブル（ワイヤ）は宇宙機外表面に配設される場合も多い。この場合、デブリや熱サイクルによってワイヤに欠陥が生じ導体が露出して、宇宙機表面の熱制御フィルムなどの表面で ESD が発生すると、その放電プラズマが隣接したワイヤに持続放電をもたらす可能性が想定される。この可能性を検証するため、図 6 のような実験系で電子ビームを照射することによりなされた持続放電の実験例を紹介する[4]。図 6 の実験系に示されたように、ワイヤ回路系は図 2 と同様であるが、針電極を用いた電荷注入の代わりに、アルミ板に張り付けた $127\mu\text{m}$ 厚テフロン FEP 熱制御フィルム上にワイヤ対を取り付け、 20 keV

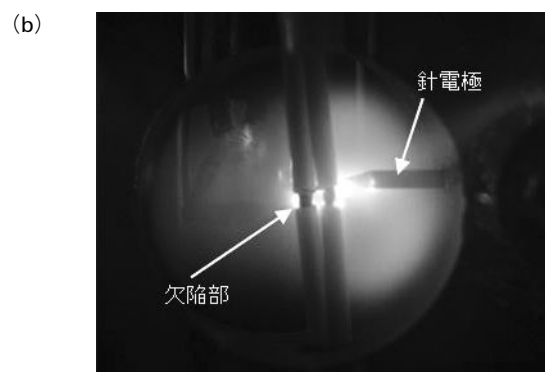
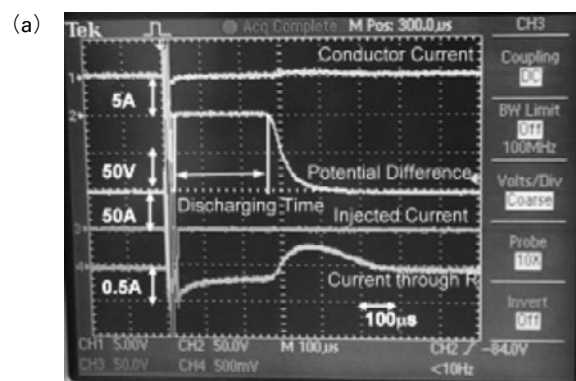


図 3 ワイヤ間で発生した放電の例[2]。(a)放電時の電流・電圧波形。ESD パルスが注入されると電位差が -100 V から 0 V になり、それが約 $260\mu\text{s}$ 間継続している。(b)放電発光

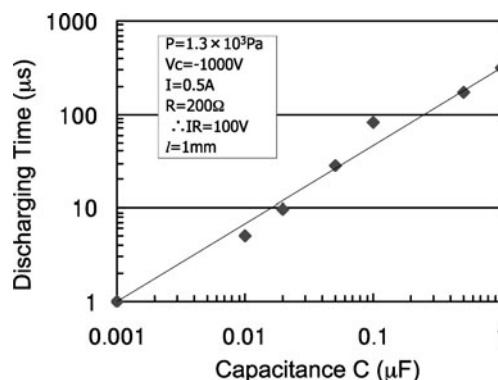


図 4 ワイヤ間の持続放電時間のキャパシタンス C 依存性[3]。放電持続時間は、注入された電荷量が多いほど長くなる。

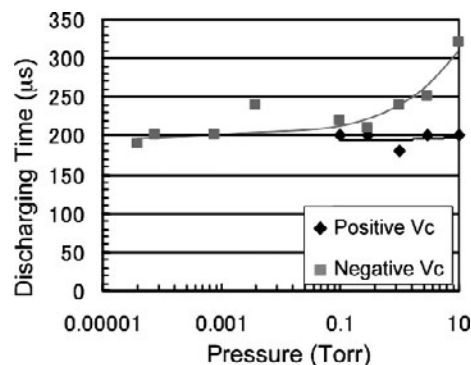


図 5 放電持続時間の圧力依存性[3]。負極性の ESD パルスが注入される場合、放電持続時間は圧力の低下とともに若干短くなる傾向である。

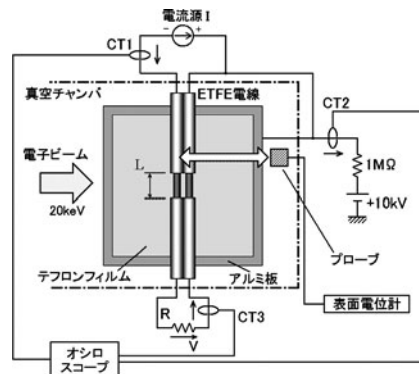


図6 電子ビーム照射による持続放電実験系の概略[4]。試料全体が+10 kV にバイアスされ、-10 kV で加速された電子が照射される。

の電子ビームを照射することによってFEPフィルム上で沿面放電を発生させる方法が採られている。この手法によって、FEPフィルムが-16 kV程度に帯電すると表面放電が発生した。その時の放電光の様子と検出された電流波形を図7に示す。図7(a)のように、ワイヤ欠陥部で強い発光が見られ、テフロンFEP表面で広い範囲にわたって沿面放電が発生しており、FEP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ていると考えられる。この流入電流は図7(b)のCH1の電流波形からパルス幅2 μ s程度で~10 Aの大きな電流が流れ込んでいる。この電流注入によって、ワイヤ間が短絡し持続放電が発生している。この場合、放電持続時間は25 μ s程度であった。このように、 1.3×10^{-4} Pa以下の高真空領域では、図5に示した低真空領域での放電持続時間に比べると短いようである。しかし、この時のFEPフィルムの面積は60 cm²程度であり、表面積の大きな熱制御フィルムで放電が発生すると欠陥部に流入する電荷量も大きくなるので、放電持続時間が長くなると考えられ、注意が必要である。

3.2.2 まとめ

ここでは、宇宙機で発生する可能性のある放電現象のうち、電力用ケーブル（ワイヤ）の持続放電に関して、筆者らの実験を中心に紹介した。宇宙機の信頼性を確保し長寿命化を達成するためには、このような放電現象を極力抑制することが必要であり、放電に至るプロセスの解明を地道に行っていく必要がある。

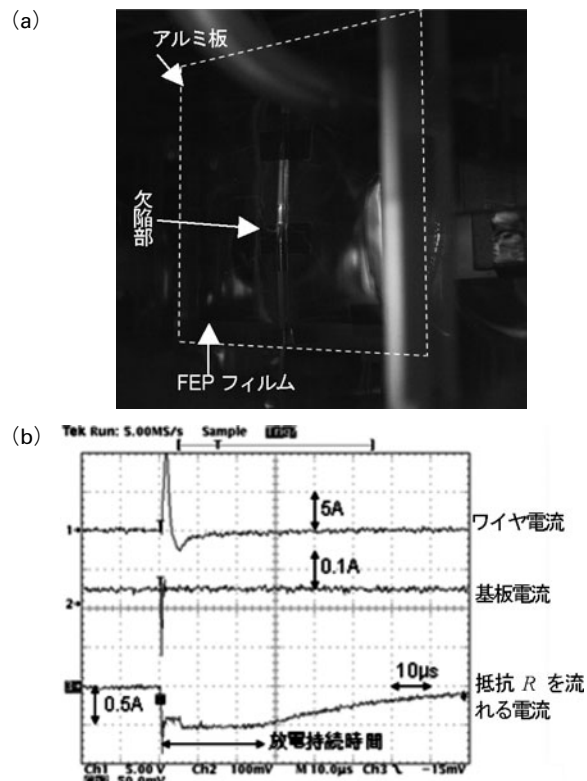


図7 電子ビーム照射ESDによって発生した放電の例[4]。(a)放電光。欠陥部に放電が流入している。(b)放電時の電流波形。ESDが発生し、ワイヤに10 A程度の電流が流入すると、抵抗Rに流れていた0.5 Aの電流が流れなくなり、この状態が25 μ s程度継続している。

参考文献

- [1] S. Kawakita *et al.*, 9th Spacecraft Charging Technology Conference, Tsukuba, JAXA-SP-05-001E (2005).
- [2] 藤井治久他：第52回宇宙科学技術連合講演会講演論文集 3G02 (2008).
- [3] H. Fujii and Y. Uetani, Proc. XXIVth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.556-559 (2010).
- [4] 高島大輔，藤井治久：第30回宇宙エネルギーシンポジウム 11 (2011).