

宇宙機用ワイヤ間の持続放電特性

藤井 治久、上谷 佑介（奈良高専）

Characteristics of Sustained Arcing Discharges between Wires in Vacuum
Haruhisa Fujii and Yusuke Uetani (Nara National College of Technology)

1. はじめに

宇宙機の帯電問題は約30年前から取り上げられており⁽¹⁾、以来、宇宙機の帯電に関する技術開発が活発に行われて来た。その結果、帯電に対し信頼性の高い宇宙機が開発・運用され、我々の社会生活に多大の恩恵をもたらして来た。これらの技術開発においては、宇宙機の表面帯電を如何に防止するかということに主眼が置かれていた。一方、昨今の人工衛星や宇宙ステーションなどの宇宙機は大型化・大電力化の傾向にあり、バス電圧の高電圧化が進められている中、2003年10月、我が国の地球観測技術衛星ADEOS-IIが機能不全に陥った。その原因は、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MLI (Multi-Layer Insulation) が宇宙プラズマにより帯電したことと、ワイヤ線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蒸着層との間で静電気放電 (ESD : Electrostatic Discharge) が発生し、その放電プラズマにより導体間で持続放電が生じたためであると考えられた⁽²⁾。しかし、このような持続放電のメカニズムや発生条件は明確になっていないのが現状である。

そこで、筆者らは導体間の持続放電現象の特徴を調査することにより、そのメカニズムを明らかにし、その成果を持続放電防止技術に反映しようと考えた⁽³⁾。ここでは、実際に衛星の電力線に使用される1対のワイヤを用いて、静電気放電をワイヤ導体間に注入し、持続放電発生条件を検討したので報告する。

2. 実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。

真空チャンバ内に設置された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 を流すことによって、導体間に電位差 $V_a = R \cdot I$ を発生させた。また、DC 電源 (菊水電子、PAD1K-0.2L) (電圧 V_c) によって $5M\Omega$ の抵抗を通してコンデンサ C に充電された電荷を、スイッチにより ESD パルスとして針電極または刃型電極に注入した。ESD パルス注入により放電が発生した時、

回路に流れる電流と導体間の電圧を、それぞれ CT (Current Transformer、Peason 411) 3 個と電圧プローブ PT によりデジタルオシロスコープ (Tektronix、TDS2014) で測定した。

針電極を取り付けた試料の写真を、図2に示す。ワイヤは ETFE 絶縁被覆電線で、外径 $\phi 1.2\text{mm}$ 、絶縁被覆厚 0.15mm 、導体径 $\phi 0.9\text{mm}$ である。1 対のワイヤそれぞれにワイヤの損傷を模擬し、絶縁被覆を幅 $l = 1\text{mm}$ に剥ぎ取った。本実験では、ワイヤ同士が接触している場合を模擬したため、導体間隔は 0.3mm であった。また、刃形電極 (厚さ 0.1mm) の場合は、ワイヤ被覆にトリプルジャンクションを形成するため接触させた (図3)。

今回、導体電流 I 、抵抗 R 、真空チャンバの真空度 P 、充電電圧 V_c などをパラメータとして実験を行った。なお、実験は全て室温で行った。

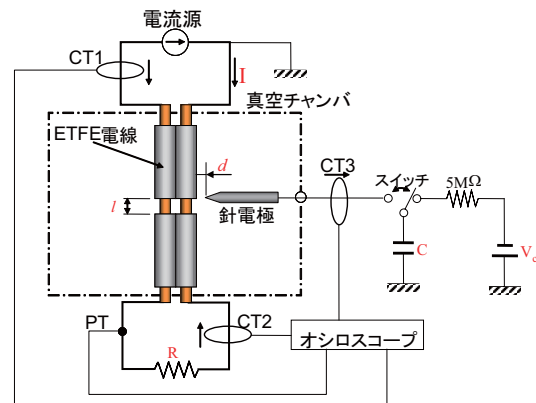


図1 実験装置の概略

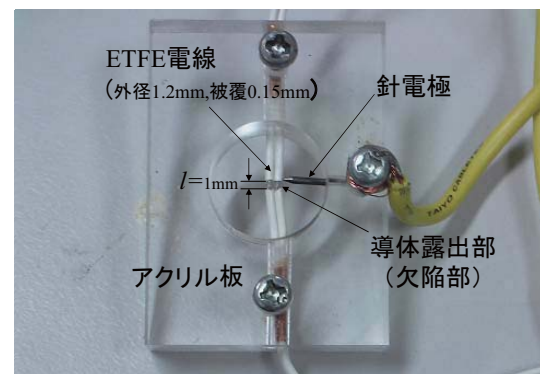


図2 針電極試料の写真

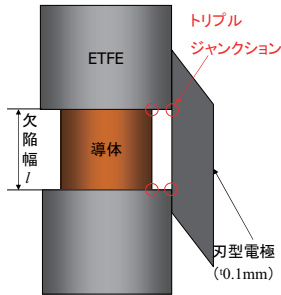
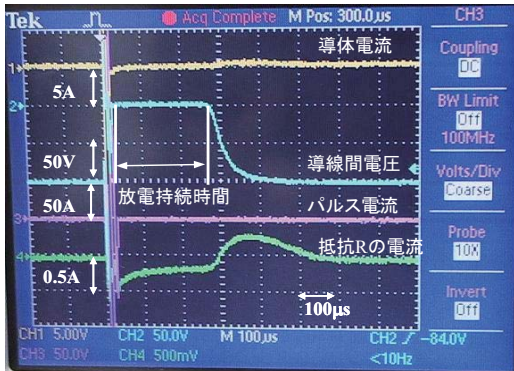


図3 刃型電極

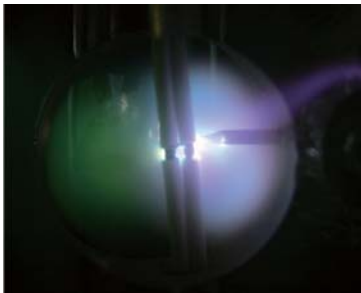
3. 実験結果

3.1 針電極を使用した場合

図4(a)に、真空チャンバ内圧力 $P=2\text{Torr}$ でワイヤと抵抗 $R=200\Omega$ に電流 $I=0.5\text{A}$ を流し（導体間電圧 $V_a=100\text{V}$ ）、キャパシタ $C=1\mu\text{F}$ に電圧 $V_c=-1000\text{V}$ で充電した電荷パルスによるESDによってトリガーされた放電電流と電圧波形を示す ($l=1\text{mm}$, $d=0\text{mm}$)。ESDパルスを注入した直後導体間電圧 V_a は 0V になり、約 $260\mu\text{s}$ 間その状態が継続した（以後、この継続時間を放電持続時間と呼ぶ）。この間、導体間に注入されたESD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。このときの放電の様子を図4(b)に示しているが、導体近傍で強烈な発光が見られ、アーク放電が発生していることを示している。



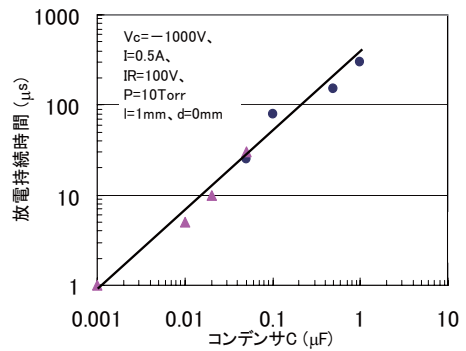
(a)放電時の電流・電圧波形



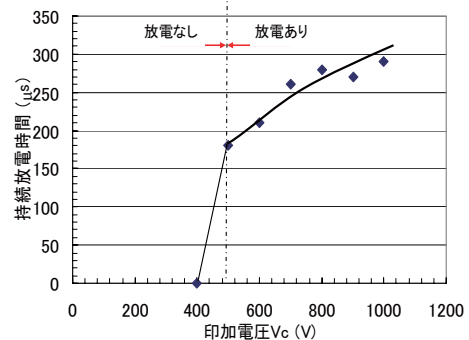
(b)放電光

図4 $P=2\text{Torr}$, $I=0.5\text{A}$, $V_a=100\text{V}$, $V_c=-1000\text{V}$, $C=1\mu\text{F}$ で発生した放電

図4に示したような放電持続時間がESDを発生させるためのコンデンサ容量 C や充電電圧 V_c にどのように依存するかを調査した。図5に、 $P=10\text{Torr}$, $I=0.5\text{A}$, $V_a=100\text{V}$ ($R=200\Omega$), $l=1\text{mm}$, $d=0\text{mm}$ の条件で、 C および V_c を変化させたときの放電持続特性を示す。図5(a)は、 $V_c=-1000\text{V}$ 一定条件下で C を変えた場合で、放電持続時間はコンデンサ容量 C とともに長くなることとわかる。また、同図(b)は、容量 $C=1\mu\text{F}$ 一定条件下で V_c を変えた場合で、 V_c が大きくなると放電持続時間は長くなるが、閾値が存在すると思われる。これらから、充電電荷量 (CV_c) が大きくなると放電持続時間は長くなるが、放電発生は充電電圧 V_c で制約されると考えられる。



(a)コンデンサ容量 C 依存性



(b)充電電圧 V_c 依存性

図5 $P=10\text{Torr}$, $I=0.5\text{A}$, $V_a=100\text{V}$, $l=1\text{mm}$, $d=0\text{mm}$ での放電持続特性

次に、持続放電が導体を流れる電流の向きによってどのように変化するかを調査した。その結果を図6に圧力依存性として示す。対向する導体に流れる電流が同方向の場合、放電持続時間が長くなることを示している。導体電流 I が流れることにより導体の周りに磁界が発生するが、同方向の場合、導体間の磁界はお互い弱めあう。一方、逆方向の場合は導体間の磁界が強めあうように形成される。このため、同方向電流の場合は導体間に形成されたプラズマに作用する Lorentz 力が弱くなるため、荷電粒子が対向導体電極に到達しやすくなり、放電持続時間が長くな

ると考えられる。なお、本研究では通常、図 1 に示したように、電流はお互い逆方向になっている。

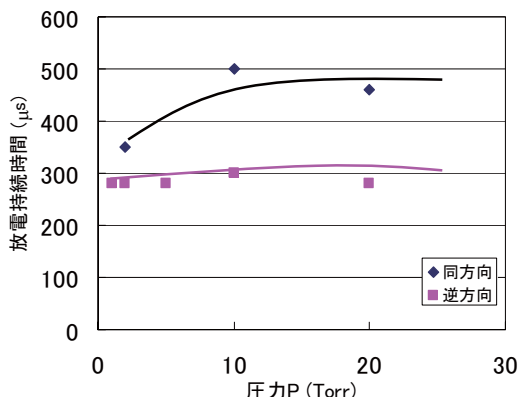


図 6 放電持続時間の圧力依存性及び電流の向きの影響 ($V_c = -1000V$, $C = 1\mu F$, $I = 0.5A$, $V_a = 100V$, $l = 1mm$, $d = 0mm$)

次に、欠陥幅 l の放電持続時間に及ぼす影響についての結果を述べる。 $l = 1mm$ と $0.5mm$ の場合を図 7 に示す。欠陥幅 l の短い方が放電持続時間は長いことがわかる。これは、針電極から欠陥部に注入された荷電粒子が欠陥幅の狭い領域に閉じ込められるので、その荷電粒子の密度が高くなり導電性を増すため、放電持続時間が長くなるものと考えられる。

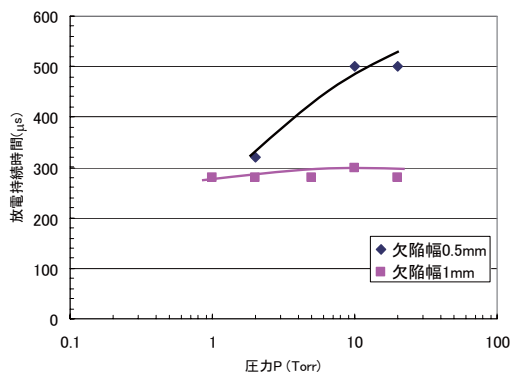


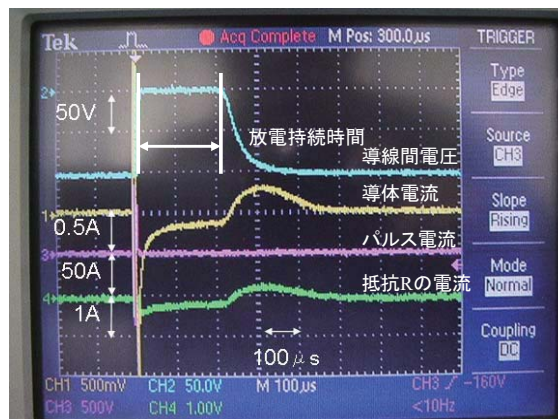
図 7 放電持続時間の圧力依存性及び欠陥幅 l の影響 ($V_c = -1000V$, $C = 1\mu F$, $I = 0.5A$, $V_a = 100V$, $d = 0mm$)

3.2 刃型電極を使用した場合

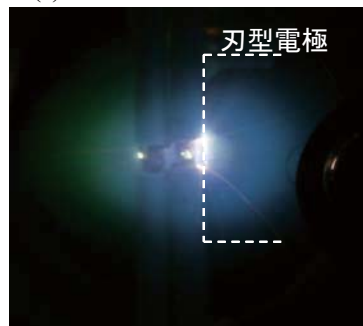
針電極により電荷を注入する場合、圧力が $10^{-1}Torr$ 台以下では持続放電の発生は困難であったので、低圧力での持続放電を検討するため、トリプルジャンクションが形成できる刃型電極を用いて実験を行った。

図 8(a)に、真空チャンバ内圧力 $P = 3.75 \times 10^{-5}Torr$ で、ワイヤと抵抗 $R = 200\Omega$ に電流 $I = 0.5A$ を流し(導体間電圧 $V_a = 100V$)、キャパシタ $C = 1\mu F$ に電圧 V_c

$= -1000V$ で充電した電荷パルスによる ESD によってトリガーされた放電電流と電圧波形を示す。ESD パルスを注入した直後導体間電圧 V_a は $0V$ になり、約 $200\mu s$ 間その状態が継続した。この放電の様子を図 8 (b)に示しているが、導体近傍で強烈な発光が見られ、蒸発金属の飛散を伴ったアーク放電が発生していることがわかる。



(a)放電時の電流・電圧波形



(b)放電光

図 8 $P = 3.75 \times 10^{-5}Torr$, $I = 0.5A$, $V_a = 100V$, $V_c = -1000V$, $C = 1\mu F$ で発生した放電

図 8 に示したような放電持続時間が圧力に対してどのように変化するかを調査した。図 9 に、 $V_c = \pm 1000V$, $C = 1\mu F$, $I = 0.5A$, $V_a = 100V$ ($R = 200\Omega$) の条件で、圧力を変化させたときの放電持続時間特性を示す。刃形電極を用いると低圧力下でも放電させることができ、負極性パルス ($V_c = -1000V$) を注入すると、 $2 \times 10^{-5}Torr$ 程度でも持続放電を発生させることができた(但し、この圧力が、使用した真空チャンバの到達圧力である)。

負極性パルス注入の場合、 $10^{-3}Torr$ 台で若干放電持続時間が長くなるようであるが、 $10^{-5} \sim 10^{-4}Torr$ の広い圧力範囲で、ほぼ $200 \sim 250\mu s$ の持続時間であることがわかる。一方、正極性パルス注入の場合 ($V_c = +1000V$)、 $10^{-4}Torr$ 台以下では放電が持続しないことを示している。また、放電が持続する場合、負極性パルス注入時に比べて持続時間が短いこともわかる。

これは、負極性パルス注入の場合、刃型電極とワイヤ絶縁物・真空が接触するトリプルジャンクションが電子の電界放出点となるが、正極性パルス注入時には导体側のトリプルジャンクションが電子の電界放出点となり、その電界は刃型電極側に比べて低くなるため、トリガー放電のための電子放出が起こりにくいからであると考えられる。

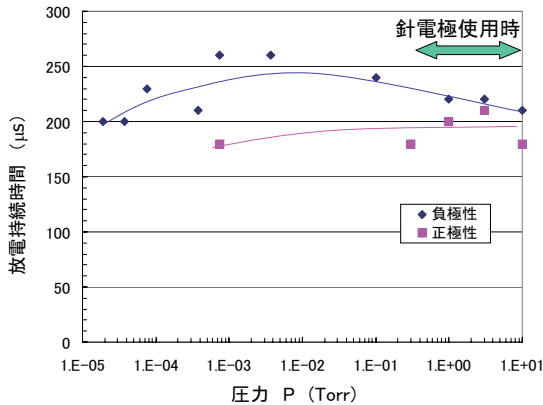


図9 $V_c = \pm 1000V$, $I = 0.5A$, $V_a = 100V$, $C = 1\mu F$ での放電持続時間の圧力依存性

次に、図10は、 $C = 1\mu F$, $I = 0.5A$, $V_a = -1000V$ の条件下で、 V_c を変えた場合の放電持続時間特性を二つの圧力で測定した結果である。 V_c が大きくなると放電持続時間は長くなるが、閾値が存在すると思われる。この閾値は、圧力の高い $P = 10Torr$ の方が低い。

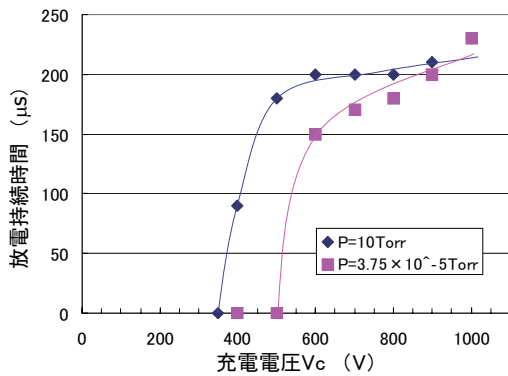


図10 放電持続時間の充電電圧 V_c 依存性 ($C = 1\mu F$, $I = 0.5A$, $V_a = 100V$)

次に、放電持続時間が导体間電圧 V_a や导体を流れる電流 I によってどのように変化するかを二つの圧力 $P = 10Torr$ と $P = 3.75 \times 10^{-5}Torr$ で調査した。図11は、 $V_c = -1000V$, $C = 1\mu F$, $I = 0.5A$ の条件で、导体間電圧 $V_a = IR$ 、つまり抵抗 R を変えることにより、放電持続時間を測定した結果である。図からわかる

ように、导体間電圧 V_a が高くなっても放電持続時間はあまり変化しないようである。これは、一旦导体間の放電が始まると导体間が短絡し電位差が小さくなるので、電位差の影響をあまり受けないためと考えられる。一方、放電持続時間に及ぼす导体電流 I の影響は、図12に示すように、電流値 I の大きい方が持続時間は短くなった（但し、导体間電圧 $V_a = 100V$ ）。これは、図1に示したように、対向する导体電流は逆方向に流れているので、导体間の磁界が強め合っており、Lorentz力により荷電粒子が导体に到達するのを阻止するようになり、電流の大きい方がその影響が大きくなり持続時間が短くなったと考えられる。なお、これら导体間電圧・导体電流依存性では、圧力の影響はほとんどないと考えられる。

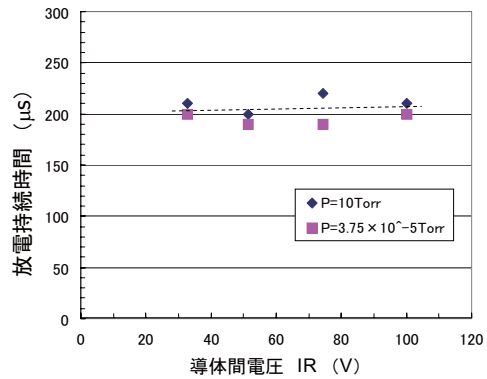


図11 放電持続時間の导体間電圧依存性 ($V_c = -1000V$, $C = 1\mu F$, $I = 0.5A$)

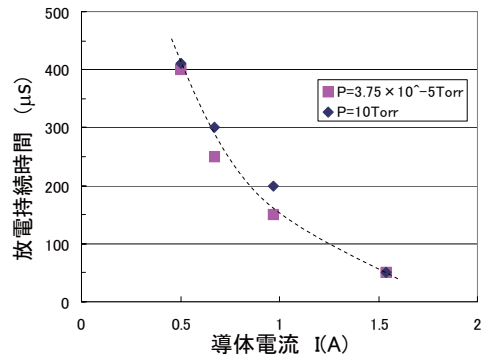


図12 放電持続時間の导体電流依存性 ($V_c = -1000V$, $C = 1\mu F$, $V_a = 100V$)

3.3 放電実験後の試料の様子

図13に、実験後の刃型電極を付けた状態の試料の写真を示す。露出导体表面がアーク放電によって損傷し、欠陥部近傍のETFEが炭化していることが認められる。また、刃形電極表面も放電痕跡が認められる。

4. まとめ

宇宙機で生じる可能性のある、宇宙プラズマによる静電気放電によってトリガーされた導体間の持続放電現象を把握するため、真空中に設置された導体



図 13 実験後の刃型電極試料の状況

間に、キャパシタに充電された電荷を ESD として注入することにより、導体間放電の持続時間がどのように変化するかを調べた。その結果、次の結論が得られた。

- (1) 放電持続時間は、キャパシタ容量に大きく依存する。
- (2) 放電持続時間は、電流によって発生する磁界の影響を受ける。
- (3) 放電持続時間は、導体間電圧にあまり依存しないが、導体電流の大きい方が短くなる。
- (4) 放電持続時間は、負極性パルス注入の方が長くなる。
- (5) 電荷注入用に刃型電極を用いることにより、針電極よりも低い圧力 (3.75×10^{-5} Torr 程度) でも持続放電現象が起きる。

参 考 文 献

- (1) H. B. Garrett, Rev. Geophys. Space Phys., Vol.19, pp.577-616 (1981)
- (2) S. Kawakita, et al., 9th Spacecraft Charging Technology Conf., JAXA-SP-05-001E (2005)
- (3) 藤井・柴田、電気学会パルスパワー／放電合同研究会資料、ED-08-48 (2008)