

プリント基板上の持続放電現象

Sustaining Discharge Phenomena on Printed Circuit Boards for Space Use in Vacuum

藤井 治久、兵頭 樹、東 勇希

Haruhisa Fujii, Itsuki Hyodoh, Yuhki Higashi

奈良工業高等専門学校 電気工学科

National Institute of Technology, Nara College, Department of Electrical Engineering

fujii@elec.nara-k.ac.jp

1. はじめに

宇宙機の大型化・大電力化に伴い、宇宙機電源システムの高電圧化が進んでいる。宇宙機本体内部に搭載される電気電子機器も例外でなく、高電圧化した機器内で放電が発生した場合、機器内のプリント基板上の露出した導体間が放電プラズマに曝され、導体間で持続放電が発生する可能性がある。実際、我が国の地球観測技術衛星みどり2号(ADEOS-II)において2003年に発生した不具合は、電力用ワイヤの欠陥部で発生したESD(Electrostatic Discharge)に起因する持続放電が原因であると考えられている⁽¹⁾。筆者らは、その原因を解明するため、ワイヤ間の持続放電現象に関する研究を行って来た⁽²⁾。今回、そのような持続放電がプリント基板上の導体パターン間で発生する可能性を検討し⁽³⁾、将来のプリント基板の絶縁設計に反映させることを目的として実験を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験方法

本研究に用いた実験系の概略を図1に示す。

プリント基板試料を真空チャンバに取り付け配線をした後、真空チャンバを真空引きし所定の圧力 P に維持した。そのプリント基板試料の1対の導体パターン1、2に定電流源(Agilent E4351B)から定電流 I を流し、その導体パターン1、2間に真空チャンバ外部で抵抗 R を接続することにより、導体パターン間に電位差 $V_d (=I \cdot R)$ を形成した。また、それらの導体パターン近傍に配設された放電源パターン電極上のワイヤでトリガー放電を発生させた。トリガー放電を発生させるために、直流安定化電源(菊水電子、PAD1K-0.2L)からワイヤに、制限抵抗 R_L (22 Ω)を介して直流電圧 V_d を印加した。放電を発生させるワイヤはETFE被覆ワイヤ(外径1.2mm、導体径0.96mm)で、放電源パターン電極(接地)の中央部付近で放電を発生させるために、ワイヤのETFE被覆を幅1mm程度剥ぎ取り、導体を露出させた。

次に、電圧 V_d をワイヤに印加し、トリガー放電が発生したときの放電電流を高周波電流モニタCT1(Pearson 2877)で計測し、また電流源に流れる電流の変化をCT2(Pearson 2877)で計測するとともに、導体パターン間の電位差 V_d をPTにより計測した。これらの波形は、オシロスコープ(Tektronix TDS-2014)で取得した。また、放電の様子は、真空チャンバの覗き窓から1眼レフカメラで撮影した。

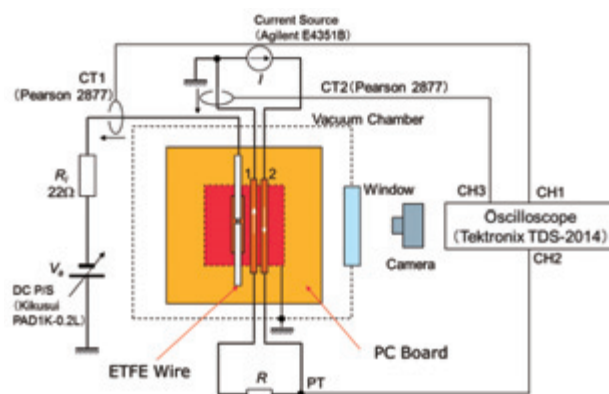


図1 実験系の概略

2.2 実験試料基板

本実験では、図2に示す、厚さ0.5mm、80mm×80mmのガラス繊維強化ポリイミド基板を使用した。前述したように、放電を発生させるための放電源パターン電

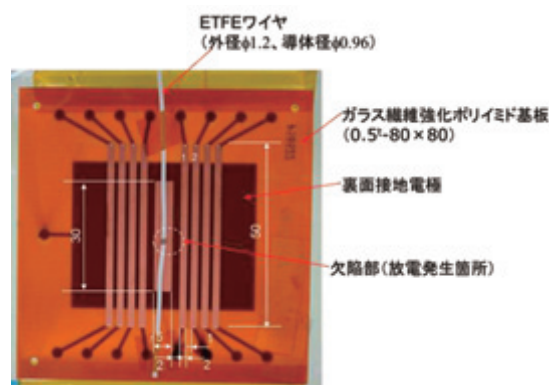


図2 供試プリント基板

極が基板中央に配設され、その上に欠陥部を持った ETFE ワイヤが置かれている。その放電源パターン電極に隣接した2本の導体パターン1、2を、今回、持続放電の検証に使った。導体パターン間距離 d は $d=1\text{mm}$ である。なお、放電源パターン電極と裏面接地電極は接続し接地されている。また、放電源パターン電極に近い導体パターン1は、図1に示したように、電流源で接地されている。

3. 実験結果と検討

3.1 トリガー放電電圧の検討

まず、トリガー放電を安定的に発生させるために、放電源パターン電極上のワイヤ欠陥部でのトリガー放電発生電圧を測定した。表1に、圧力 $P=0.06\sim 0.1\text{Torr}$ での放電発生電圧を、印加電圧 V_a の極性を変えて測定した結果を示す。この場合、 $I=0.97\text{A}$ 、 $R=56\Omega$ 、 $V_f=50\text{V}$ で行った。この結果から、正の V_a では $+800\text{V}$ 、負の V_a では -1000V がトリガー放電の閾値であると考えられる。

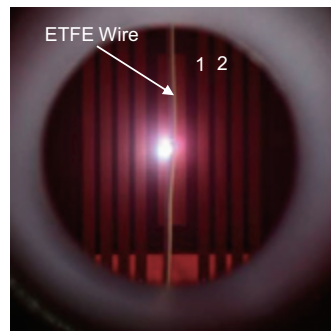
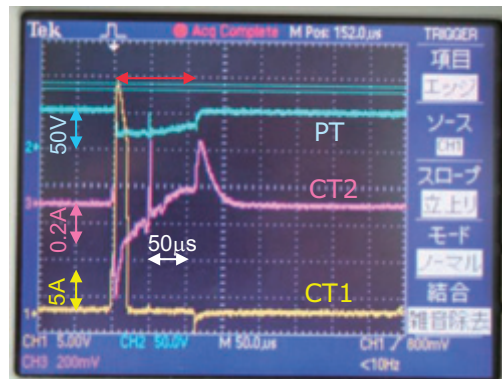
表1 トリガー放電の発生状況

印加電圧 V_a (V)	正極性	負極性
300	×	
400	×	
500	×	
600	×	
700	×	×
800	○ ×	×
900	○ ○	×
1000	○ ○	○

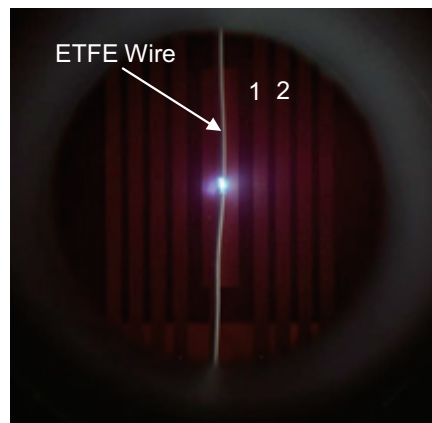
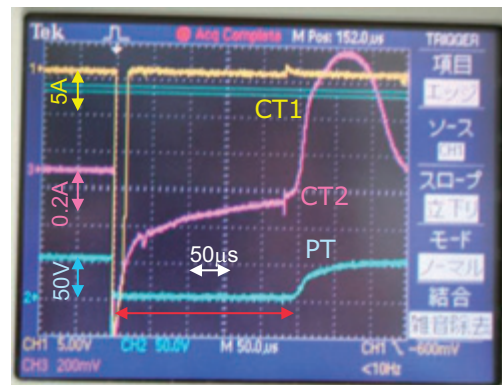
○ : Discharge, × : No discharge

$P=0.06\sim 0.1\text{Torr}$
 $I=0.97\text{V}$ 、 $R=56\Omega$ 、 $V_f=50\text{V}$

図3に、正負の $V_a=1000\text{V}$ によるトリガー放電時の電流・電圧波形と放電光の写真を示す。図3(a)の $V_a=+1000\text{V}$ での放電時の波形から、PTの電圧がトリガー放電の発生する前は 50V であったが、トリガー放電によって 30A (CT1波形から)の放電電流が流れ、この放電プラズマにより、PT電圧が 20V 程度になり、この状態が約 $110\mu\text{s}$ 間続いた。これが導体パターン間の持続放電である。一方、図3(b)の $V_a=-1000\text{V}$ の場合は、PTの電圧波形から、トリガー放電の発生後、 0V の状態が約 $250\mu\text{s}$ 間継続し、導体パターン間が完全に短絡状態の持続放電となっていることがわかる。しかし、このようなトリガー放電による持続放電は、同じ条件でも全く同じ放電波形が得られるのではなく、ト

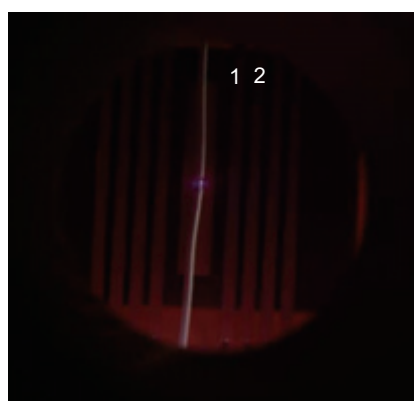
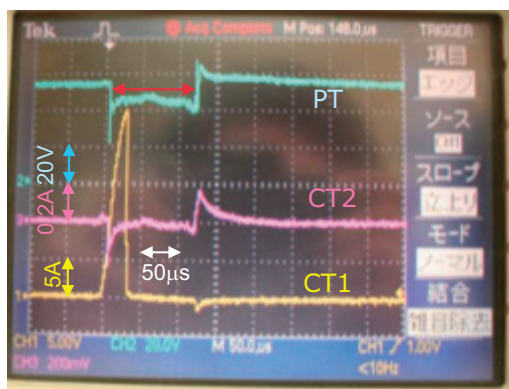


(a) $V_a=+1000\text{V}$

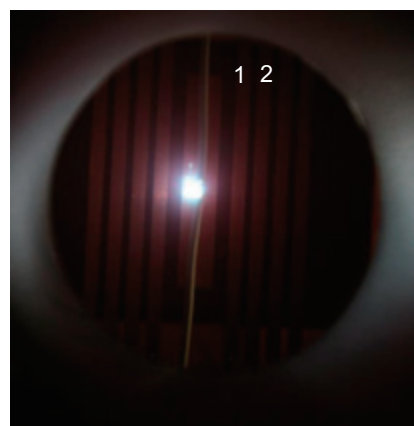
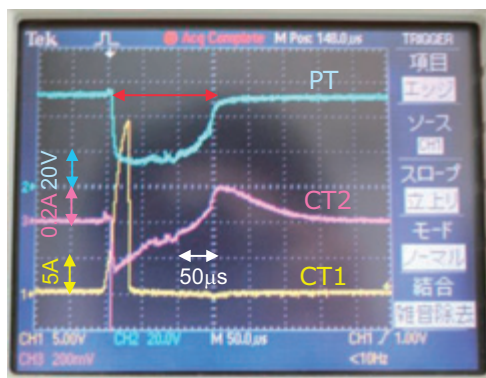


(b) $V_a=-1000\text{V}$

図3 $P=0.08\text{Torr}$ 、 $I=0.97\text{A}$ 、 $V_f=50\text{V}$ での放電時の波形と放電光



(a) 1回目



(b) 2回目

図4 $P=0.08\text{Torr}$ 、 $I=0.5\text{A}$ 、 $R=100\Omega$ 、 $V_d=50\text{V}$ 、 $V_a=+1000\text{V}$ での放電時の波形と放電光

リガー放電の発生の有無、持続時間等にバラつきが生じた。例として、図4に、 $V_a=+1000\text{V}$ 、 $P=0.08\text{Torr}$ 、 $I=0.5\text{A}$ 、 $R=100\Omega$ 、 $V_d=50\text{V}$ での2回の結果を示す。このようなバラつきは、 $V_a=+1000\text{V}$ の方が大きかったため、今回は $V_a=+1000\text{V}$ で安定的にトリガー放電を発生させることができると考え、 $V_a=+1000\text{V}$ で各種パラメータを変え持続放電の検討を行った。

3.2 電極間電圧 V_d の影響

まず、電極間電圧 V_d が放電持続時間にどのように影響するかを検討した。条件は、 $P=0.08\text{Torr}$ 、 $I=0.5\text{A}$ 、 $V_a=+1000\text{V}$ 一定とし、 R を変えることにより、 $V_d=50\text{V}$ ($R=100\Omega$)、 $V_d=75\text{V}$ ($R=150\Omega$)、 $V_d=110\text{V}$ ($R=220\Omega$) とした。その結果を図5に示す。なお、 $V_d=50\text{V}$ の場合は、図4 (b) に示している。これらを比較すると、いずれも導体パターン間が短絡するような持続放電でなく、また放電持続時間は約 $150\mu\text{s}$ と大きな差異はないが、 $V_d=110\text{V}$ の高い方が導体パターン間電圧の低下率は大きいようである。つまり、導体パターン2の正電位が高いことにより、放電源で発生した放電プラズマ中の電子が導体パターン2に引き付けられやすく、導体パターン間の抵抗が小さくなったためではないかと考えられる。また、 V_d が高くなると、導体パターン間電圧が回復し始める時間が長くなる傾向もうかがえる。

3.3 導体を流れる電流の向きの影響

以上の結果は図1に示したように、対向する2つの導体パターン1,2を流れる電流の向きは逆方向になっていた。実際のプリント基板においては、対向する導体パターンを流れる電流の向きが同じ場合も存在する。そのため、導体パターン2に流れる電流を導体パターン1と同じ方向になるように、電流源からの電流接続を変更して、トリガー放電を発生させた。条件は、図4 (b) と同じ $P=0.08\text{Torr}$ 、 $I=0.5\text{A}$ 、 $R=100\Omega$ 、 $V_d=50\text{V}$ 、 $V_a=+1000\text{V}$ で行った。その結果を図6に示す。図4 (b) と同様のトリガー放電が起こっているにも拘らず、導体パターン間の放電持続時間は約 $120\mu\text{s}$ と若干短くなった。ワイヤ間の持続放電では電流の向きが同じ場合、放電持続時間が長くなり、それは Lorentz 力の影響であると考えたが⁽²⁾、今回は逆の結果となった。今後の課題である。

3.4 圧力の影響

今回は $P=0.1\text{Torr}$ 付近の圧力下で主に実験を行ったが、圧力の影響を検討するために、 $P=1\text{Torr}$ でも実験を行った。その結果を図7に示す。圧力 P 以外の条件は、図4 (b) と同じ $I=0.5\text{A}$ 、 $R=100\Omega$ 、 $V_d=50\text{V}$ 、 $V_a=+1000\text{V}$ である。この図と、図4 (b) を比較すると、 $P=1\text{Torr}$

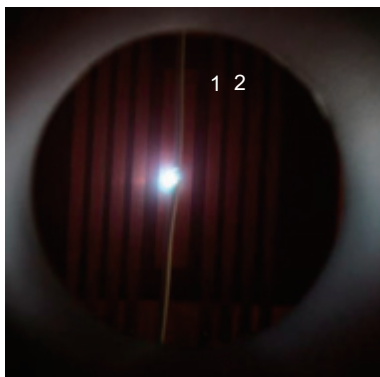
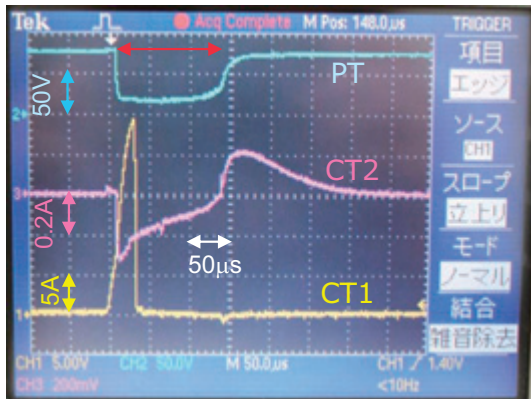
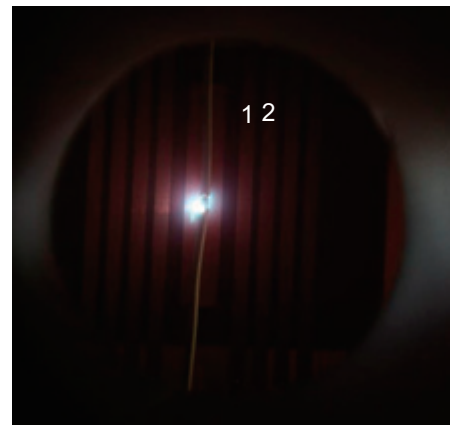
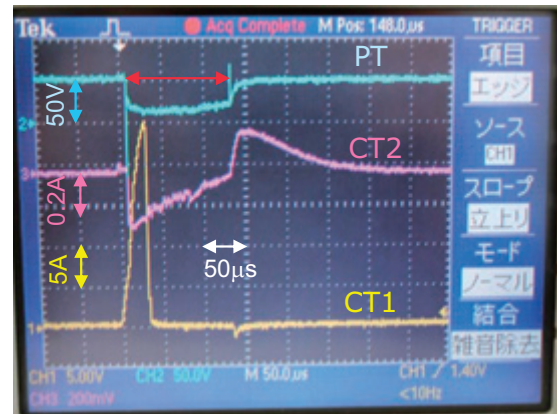
(a) $V_d=75V$ 

図6 $P=0.08\text{Torr}$, $I=0.5A$, $R=100\Omega$, $V_d=50V$,
 $V_a=+1000V$ で、導体パターン間の電流の向きが同じ場
 合の、放電時の波形と放電光

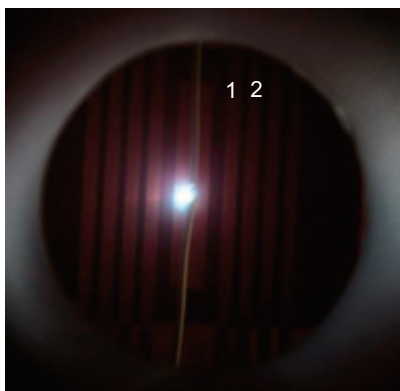
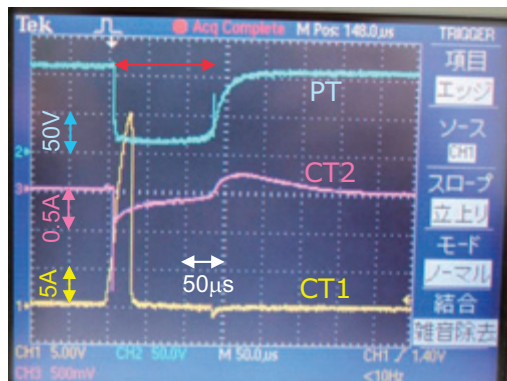
(b) $V_d=110V$

図5 $P=0.08\text{Torr}$, $I=0.5A$, $V_a=+1000V$ での放電時の
 波形と放電光

の場合、トリガー放電はグロー放電であり発光領域が大きくなっているが、持続時間が $100\mu\text{s}$ と短くなった。また、導体パターン間電圧の低下割合も、 $P=0.08\text{Torr}$ の場合に比べ小さいと考えられる。今後、広範囲の圧力で特性を取得して行く予定である。

なお、この $P=1\text{Torr}$ の場合に顕著であるが、トリガー放電の開始時間に比べ、導体パターン間の持続放電が始まる時間に $40\mu\text{s}$ 程度の時間遅れが生じた。これが放電プラズマの伝搬速度に関わっていることも考えられるので、今後このプラズマ伝搬速度についても検討していく予定である。なお、この時間差は、 $P=0.08\text{Torr}$ の場合は、何れの場合も $10\mu\text{s}$ 程度あるようである。

4. まとめ

宇宙用プリント基板上導体パターン間の持続放電を、プリント基板上に配設したワイヤの欠陥部でのトリガー放電により検討した。その結果、次の結果が得られた。

(1) プリント基板上パターン電極間においても放電の持続が確認できた。

続放電特性」、平成 27 年電気学会 A 部門大会、
17-E-a1-5

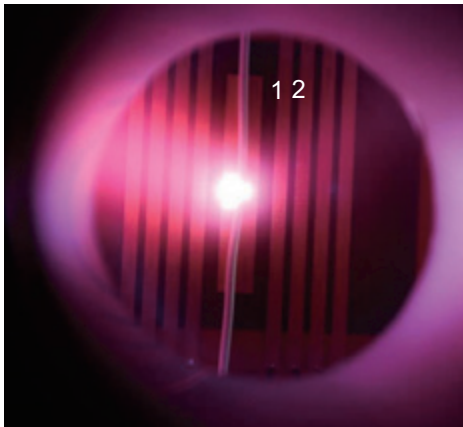
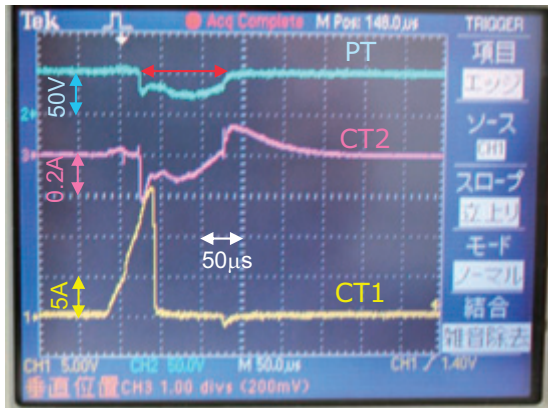


図7 $P=1\text{Torr}$, $I=0.5\text{A}$, $R=100\Omega$, $V_d=50\text{V}$, $V_a=+1000\text{V}$
での放電時の波形と放電光

(2) 正電圧によるトリガー放電は発生しやすいが、放電源からの距離の影響で、電極間が完全に短絡することにはなかった。

(3) 一方、負電圧によるトリガー放電は電極間の短絡を引き起こしやすい。

(4) 放電持続時間は、導体パターン間電圧や、圧力によっても影響を受けることがわかった。

今後、次のような各種パラメータを変更し、種々特性を把握する予定である。

圧力、電極間距離、プリント基板厚さ、電極間電位差、トリガー放電電圧、導体電流、トリガー放電位置、プラズマ伝搬速度

文 献

- (1) S. Kawakita *et al.*: "Investigation of an operational anomaly of the ADEOS-II satellite", 9th Spacecraft Charging Technology Conf. (2005)
- (2) H. Fujii and Y. Uetani: "ESD triggered sustaining discharge between wires for space use in vacuum", Proc. XXIVth ISDEIV, pp.556-559 (2010)
- (3) 藤井・東: 「宇宙機用プリント基板上導体間の持