

## Discharge Characteristics of Power Transmission Wires for Spacecraft

Haruhisa Fujii, Kohei Takeyama and Takashi Nakaoka\*

Institute of National Colleges of Technology, Japan  
Nara National College of Technology, Department of Electrical Engineering  
22, Yata-cho, Yamato-koriyama, Nara, 639-1080, Japan  
(\* Kyusyu Institute of Technology)

### Abstract:

In the future space systems like SSPS, high voltage power transmission on the systems will be required in order to reduce the power loss and the weight of the wires. For the operation of the power transmission with high voltage, highly reliable insulation design of the power transmission wires is required. So we evaluated the insulation performance of SPEC55 ETFE insulated wires for space use in vacuum. The breakdown voltages of the ETFE insulators were measured by DC voltage application. We obtained the results that the breakdown of ETFE insulator occurred at the electric field of about 120-140kV/mm on the conductor surface of the wires. We also tested the wires with defects of ETFE insulators. The discharge voltage between the exposed conductors was lower than the breakdown voltage of the ETFE insulator and was influenced by the pressure. Low energy electron beam was also irradiated to the wire applied with DC high voltage. Although the breakdown of the ETFE insulator did not occur, partial discharges were detected due to electrons deposited on the surface of the ETFE insulator.

# 宇宙用電力ワイヤの放電特性

藤井 治久 竹山 紘平 中岡 崇志\*

国立高等専門学校機構

奈良工業高等専門学校 電気工学科

奈良県大和郡山市矢田町 22 番地

(\* : 現、九州工業大学)

## 1. はじめに

1950 年代の後半に始まった宇宙開発は飛躍的に発展し、最近の宇宙機は大型化・大電力化・高機能化が進んでいる。また、将来の宇宙太陽発電衛星 SSPS (Space Solar Power Station) の構想実現に向けた技術開発も活発に行われている。このような大電力宇宙システムにおいては、発電電力を現状の宇宙機の発電電圧 100V 程度で送電しようとする送電電流が大きくなり Joule 熱損失が発生する。また、その損失を低減するため送電ワイヤ導体径を大きくすると、重量増大をもたらす。したがって、宇宙機の大電力化・大電力化に対しては高電圧化が不可欠である。実際、想定されている 10GW 級 SSPS においては、10kV 程度の高電圧が必要とされている<sup>(1,2)</sup>。このような大電力宇宙システムにおいて、発電電力を高電圧ワイヤ (ケーブル) で送電するためには、宇宙環境要因を十分考慮し、ワイヤの絶縁信頼性を十分確保した設計をしなければならない。このような観点から、これまで九州工業大学の研究グループは、ワイヤの絶縁信頼性を評価するため、宇宙空間を模擬した真空環境で高電圧試験を行ってきた<sup>(3)</sup>。ここで用いられたワイヤは欠陥のない SPEC55 電線であった。しかしながら、宇宙環境ではデブリの衝突や熱サイクルあるいは放射線劣化によって、ワイヤの絶縁被覆に欠陥が生じ導体が露出する可能性がある。実際、2003 年にわが国の地球観測技術衛星 ADEOS-II (みどり 2 号) において、ワイヤ結束部内部でワイヤに欠陥が発生し、結束部表皮の MLI (Multi-Layer Insulator) 蒸着層と露出したワイヤ導体間で静電気放電 ESD (Electro-static Discharge) が発生した。それがもとで導体間で持続放電が発生し導体間が短絡、ADEOS-II が機能不全に陥ったと考えられている<sup>(4)</sup>。したがって、筆者らは、欠陥のないワイヤの絶縁評価だけでなく、欠陥が生じた場合の絶縁評価も重要であると考え、ワイヤ欠陥の有無における絶縁・放電特性を取得した。なお、欠陥が生じた場合の持続放電特性に関しては、既に報告したので<sup>(5)</sup>、今回は電圧印加による絶縁・放電特性につ

いて報告する。

## 2. 実験試料と実験項目

### 2.1 供試ワイヤ

今回の宇宙用電力ワイヤの絶縁評価にあたっては、Raychem 社製 SPEC55 ETFE (Ethylene Tetra Fluoro Ethylene) 絶縁被覆ワイヤを用いた。図 1 にその形状と、表 1 にその寸法を示す。また、欠陥ワイヤの絶縁評価には、カッターナイフで絶縁被覆を幅  $L$  に切り取ったワイヤを用いた。



図 1 実験に供したワイヤ形状

表 1 供試ワイヤの寸法

色	ワイヤ径 $D_w$ [mm]	導体径 $D$ [mm]	絶縁厚 $d$ [mm]
白	1.27	0.99	0.140
黒	0.81	0.51	0.152
黄	1.52	1.24	0.140

### 2.2 実験項目

ワイヤの絶縁評価にあたって、次の項目について実験を行った。

- (1) 欠陥無しワイヤ
  - ・真空中での絶縁被覆の絶縁破壊電圧特性
  - ・電子ビーム照射による放電特性
- (2) 欠陥ワイヤ
  - ・欠陥部導体間放電電圧の圧力依存性

## 3. 欠陥無しワイヤの真空中での絶縁破壊特性

### 3.1 実験方法

表 1 に示した供試ワイヤを図 2 に示す 3 種の形態で、ETFE 絶縁被覆の絶縁破壊電圧特性を取得した。破壊電圧は、図 3 に示す実験系で、ワイヤ導体に直流電圧  $V_m$  を印加することにより測定した。同条件で 3~5 回測定し、その平均値を破壊電圧とした。

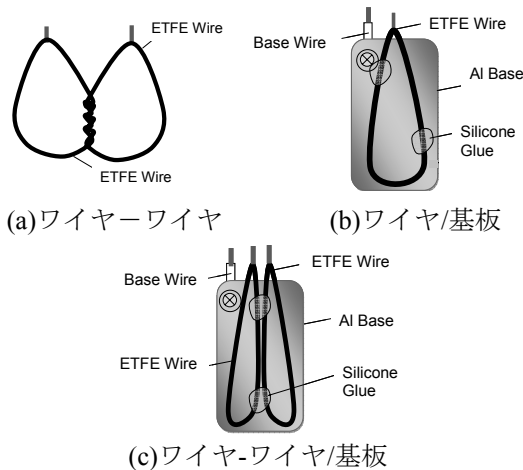


図2 欠陥無しワイヤの実験形態

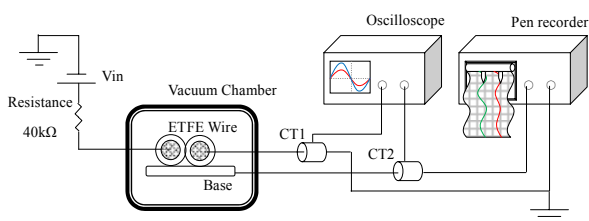


図3 実験系の概略

### 3.2 実験結果と検討

図4に各種ワイヤ構成で求めた絶縁破壊電圧の絶縁厚依存性を示す。絶縁厚の厚い方が破壊電圧は高くなる。また、ワイヤーワイヤ構成では、導体間の絶縁厚は2倍になるが、破壊電圧は2倍にはならないということがわかる。図5に、黄ワイヤのワイヤ/基板構成での絶縁破壊時の様子を示す。ワイヤー基板間でワイヤ絶縁被覆の貫通破壊が生じていることがわかる。このような絶縁被覆の破壊電界強度を評価するため、Maxwell SVにより解析を行った。図6にワイヤーワイヤ/基板構成での2次元電位分布解析結果を示す。電圧印加導体の基板側に電位の集中が起こり、ここで貫通破壊が生じることがわかる。

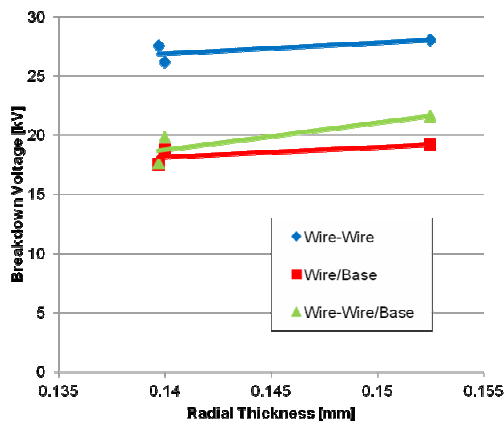


図4 ETFE ワイヤの絶縁破壊電圧の絶縁厚依存性

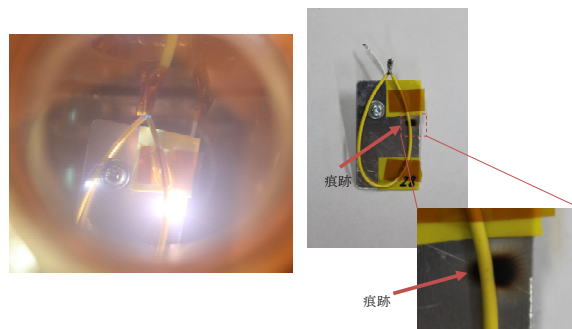


図5 ワイヤ/基板構成での絶縁破壊の様子

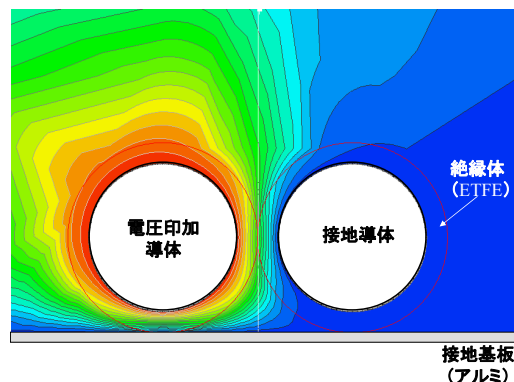


図6 ワイヤ-ワイヤ/基板構成での電位分布

このような電位分布解析から破壊時の電圧を印加したときの電界分布を求めると、図7のようになる。図7は高圧導体と基板間の電界分布で、基板からの距離の関数として表示している。この図から、ワイヤの貫通破壊時の高圧導体表面の破壊電界強度は、何れのワイヤであっても、120~140kV/mm であると考えられる。

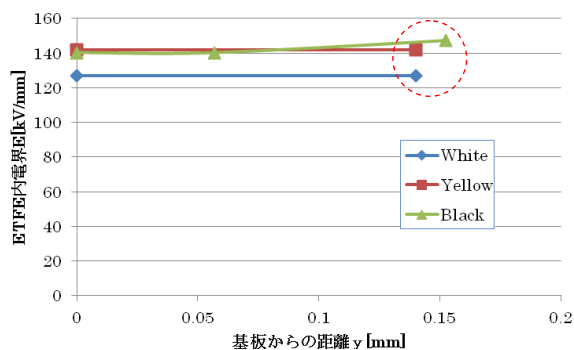


図7 高圧導体と基板間の電界分布

## 4. 欠陥無しワイヤの電子ビーム照射による放電特性

### 4.1 実験方法

表1に示した白ワイヤを厚さ1mm-100mm<sup>2</sup>のアルミ基板上に貼り付け、図8に示す実験系で真空チャンバに取り付け、 $1 \times 10^{-6}$ Torr 程度の真空条件下で電子ビームを照射した。照射中のワイヤに発生する放電電流パルス電流計並びに高周波電流モニタ

CT (Pearson, 2877) で検出した。今回、照射エネルギー  $E$  は  $E=9\text{keV}$  一定として、1本のワイヤに印加する直流電圧  $V_{in}$  を  $1\text{kV}$  ステップ  $10$  分間隔で昇圧した後  $+10\text{kV}$  で  $60$  分間印加し続けた。

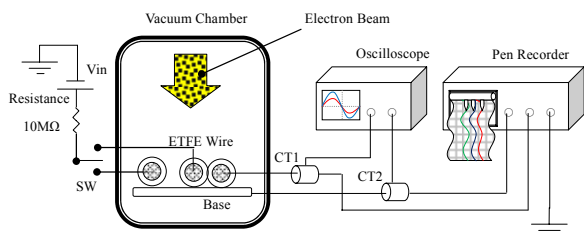


図 8 電子ビーム照射実験系の概略

#### 4.2 実験結果と検討

図 9 に、1 対のワイヤにおいて電圧  $V_{in}=+9\text{kV}\sim+10\text{kV}$  印加時のアルミ基板電流と接地側ワイヤに流れる電流のチャートを示す。接地ワイヤ電流に大き

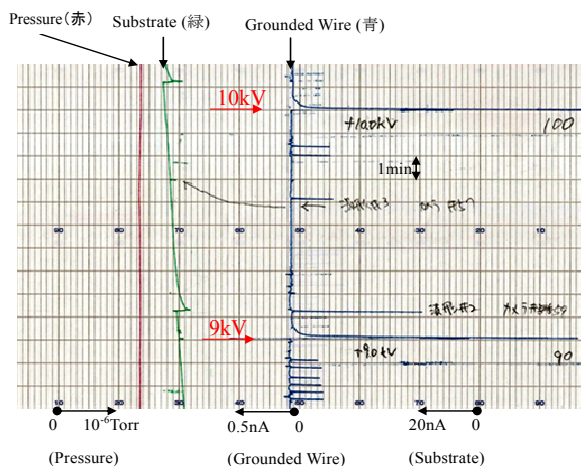


図 9 電子ビーム照射中の電流チャート ( $+9\text{kV}\sim+10\text{kV}$  印加時)

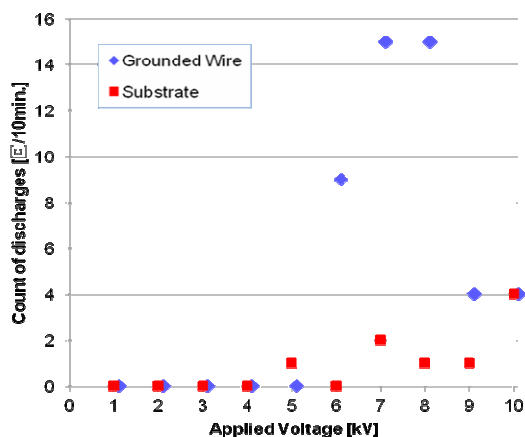


図 10  $9\text{keV}$  電子ビーム照射中の ETFE ワイヤにおける放電電流パルス発生頻度

な変位電流が電圧を上昇したときに見られるが、それ以外に小さな電流パルスが重畳しているのがわかる。これは、電子ビームが照射されたことによりワイヤ絶縁被覆に蓄積した電子が基板に局所的に放電した電流パルスと考えられる。このような放電電流パルスの発生頻度を印加電圧の関数として、図 10 に示す。放電電流パルスは印加電圧  $+5\text{kV}$  から発生したことがわかる。しかしながら、 $E=9\text{keV}$  の電子ビーム照射では、 $+10\text{kV}$  までの印加電圧でワイヤの貫通破壊は生じなかった。

### 5. 欠陥ワイヤの放電特性

#### 5.1 実験方法

2 節で述べたように、ワイヤに欠陥部 (幅  $L$ ) を設け、ワイヤ-ワイヤ構成、ワイヤ-ワイヤ/基板構成で、真空チャンバ内の圧力を変化させて導体間あるいは導体-基板間の放電電圧を測定した。図 11 に、黄ワイヤに幅  $L=1\text{mm}$  の欠陥を設けた試料の写真を示す。

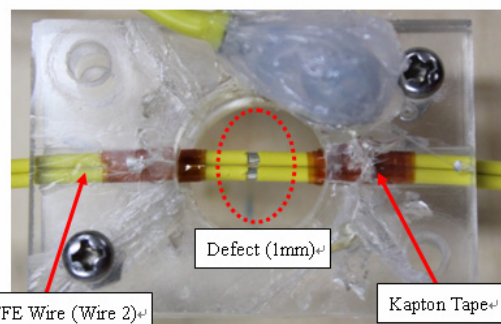


図 11 欠陥幅  $L=1\text{mm}$  の ETFE ワイヤの写真

#### 5.2 実験結果と検討

図 12 にワイヤ-ワイヤ構成における  $L=2, 1, 0.2\text{mm}$  の場合の導体間放電電圧の圧力依存性を示す。放電電圧は欠陥幅  $L$  にはほとんど影響を受けないが、圧力に大きく影響される。圧力  $10\text{Torr}$  付近ではいわゆる Paschen ミニマム条件での放電、グロー放電が発生してしていると考えられる。一方、 $2\times 10^{-4}\text{Torr}$  では、放電電圧が  $9\text{kV}$  程度と高くなったが、ETFE 被覆の絶縁破壊電圧よりは低い。これは、何れもワイヤ同士が接しておりワイヤ絶縁厚は  $d=0.14\text{mm}$  であるので、欠陥部の導体間は  $0.28\text{mm}$  であり、その導体間の真空放電か、あるいは、欠陥部の導体と絶縁被覆端部の負極側トリプルジャンクション (三重点) からの電界放出電子に起因した沿面放電が発生したと考えられる。図 13 に、 $L=1\text{mm}$  での圧力  $6\text{Torr}$  ((a)) と  $2.3\times 10^{-4}\text{Torr}$  ((b)) での放電の様子を示す。(a)ではグロー放電が導体間で発生しており、(b)で

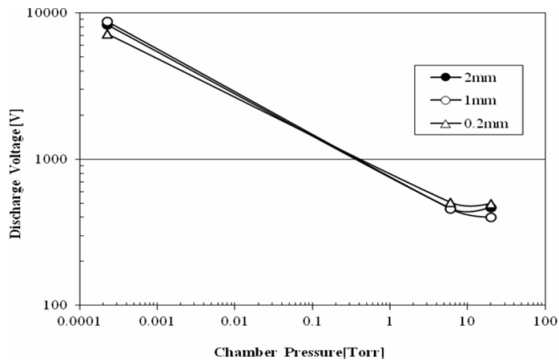
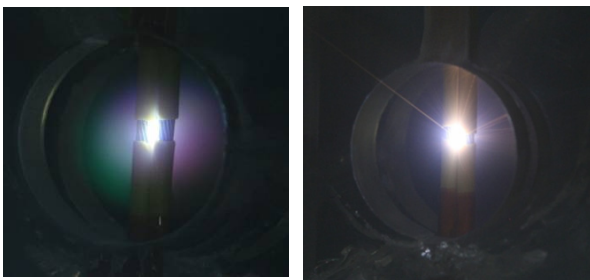


図 12 欠陥を持ったワイヤーワイヤ構成での  
導体間放電電圧の圧力依存性

はスパークが発生し蒸発銅粒子の飛散も見られる。

一方、図 14 にはワイヤ-ワイヤ/基板構成での  $2.3 \times 10^{-4}$ Torr における 6000V で発生した放電の様子を示している。高圧導体と銅基板との間で放電が発生しているが、導体間では放電光は見られない。これは導体-銅基板間の距離が 0.14mm と短いためである。

なお、今回  $2 \times 10^{-4}$ Torr 以下の圧力下では測定を行っていないが、一般的に真空中の放電電圧は  $10^{-3}$ Torr 以下の圧力で殆ど一定であると考えられている<sup>(6)</sup>。



(a) 6Torr (b)  $2.3 \times 10^{-4}$ Torr

図 13 欠陥幅  $L=1$ mm での導体間の放電の様子



図 14 ワイヤーワイヤ/基板構成での  $2.3 \times 10^{-4}$ Torr での放電の様子

## 6. まとめ

宇宙用ワイヤとして使用されている SPEC55 ETFE 絶縁被覆ワイヤの真空中での放電特性を、ワイヤ欠陥の有無で評価した。その結果、次のことが

わかった。

- (1)ワイヤに欠陥が無い場合、
  - ・ 導体先端の電界強度 120-140kV/mm 程度で ETFE 絶縁被覆が絶縁破壊する。
  - ・ 電子ビーム照射下では、ETFE 表面の帯電により微小な放電電流パルスが発生する。
- (2)ワイヤに欠陥が存在する場合、
  - ・ 欠陥部導体間の放電電圧は圧力に大きく影響されるが、欠陥幅にはあまり影響を受けない。

## 参考文献

- (1)篠原真毅：私信
- (2)趙・細田・香川、「SSPS 実現に向けた高電圧バス技術に関する課題」、第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集、pp.243-248 (2005)
- (3)山之内・豊田・趙、「宇宙環境における高電圧ケーブルの放電現象」、第 31 回宇宙エネルギーシンポジウム(2012)
- (4) S. Kawakita, *et al.*, “Investigation of an operational anomaly of the ADEOS-II satellite”, 9<sup>th</sup> Spacecraft Charging Technology Conference, JAXA-SP-05-001E (2005)
- (5) H.Fujii and Y. Uetani, “ESD-triggered sustaining discharge between wires for space use in vacuum”, Proc. XXIV<sup>th</sup> International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.556-559 (2010)
- (6) R. V. Latham, High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis, (ACADEMIC PRESS), p.31 (1981)