

# 高エネルギー電子ビーム環境におけるフラッシュオーバー放電の伝搬範囲

奥村 哲平 仁田 工美 高橋 真人  
宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

原田 次郎 萩原 洋一  
Advanced Engineering Service

豊田 和弘  
九州工業大学 宇宙環境技術研究センター

## 1. 研究背景

一次放電は、太陽電池の劣化や、太陽電池アレイ回路の短絡原因となる[1, 2]。人工衛星を打ち上げる前に、太陽電池アレイの放電に対する耐性を調べるための帯電放電試験が行われることがある[3-5]。こうした帯電放電試験は、一次放電電流のエネルギーや電流ピーク値によって結果が異なる可能性が示唆されており[6]、一次放電の正しい理解に基づいた波形の模擬が求められている[7]。

一次放電の波形を正確に模擬するためには、放電プラズマの伝搬距離と伝搬速度といった放電プラズマの特性値を求める必要がある。そのため、世界各国の研究機関が、放電プラズマの特性を求めるための研究に取り組んでいる[8-11]。文献8から文献11までの研究に用いられた太陽電池アレイパネルは最大でも、 $1\text{m}^2$ である。実際の太陽電池アレイパネルは遥かに大きいので、 $1\text{m}^2$ 程度の太陽電池アレイパネルを用いて行った実験結果から、放電プラズマの伝播範囲を議論するのは難しい。また、放電プラズマの伝搬速度の時間変化も調べる必要がある。そこで、我々は  $5\text{m}^2$  の太陽電池アレイパネルを用いて放電プラズマの特性を求めるための実験をおこなった。本論文では、放電プラズマの伝搬距離に関して議論をおこなう。

## 2. 実験方法

〈2・1〉太陽電池アレイクーボン 図1に実験に用いた太陽電池アレイクーボンパネル（以下、クーボンパネル）を示す。クーボンパネルのサイズは  $2\text{m} \times 1.2\text{m}$  である。このクーボンパネルは、実際の人工衛星に用いられる太陽電池アレイと同等のデザインである。クーボンパネル上には 700 枚程度の化合物太陽電池が配置されている。一列あたりの太陽電池の枚数は 30 枚から 31 枚で、パネル一枚当たりの

並列数は 24 である。太陽電池にはカバーガラスが取り付けられており、表面には反射防止コーティングが施されている。

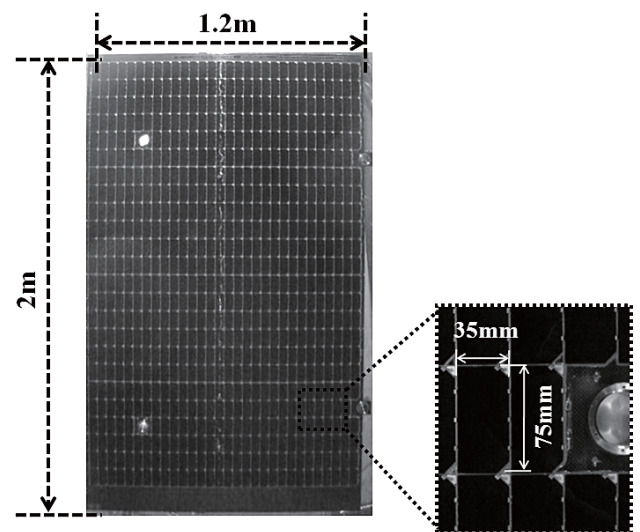


図1 太陽電池アレイクーボン

〈2・2〉実験システムと放電試験回路 放電電流の波形は直流電流プローブと 32ch オシロスコープを用いて測定する。32ch オシロスコープは、放電が発生した時にトリガを出力することができる。真空チャンバー内部の様子は近赤外カメラを用いて観察することができる。近赤外カメラのビデオ出力は、画像取り込み PC に入力されている。画像取り込み PC には、32ch オシロスコープのトリガも入力されており、放電が発生した時の真空チャンバー内の画像を取り込むことができる。

図2に放電試験回路を示す。 $V_b$  は人工衛星が周辺プラズマに対して持つ電位差を模擬する。 $C_{ext}$  は人工衛星が周辺プラズマに対して持つ静電容量を模擬する。今回の実験では、

240pFとした。この値は、特定の人工衛星の静電容量を模擬したものではない。ブローオフ電流は電流プローブ  $I_b$  で測定する。また、フラッシュオーバー電流（または中和電流）は電流プローブ  $I_{st1}$  から  $I_{stx}$  で測定する。

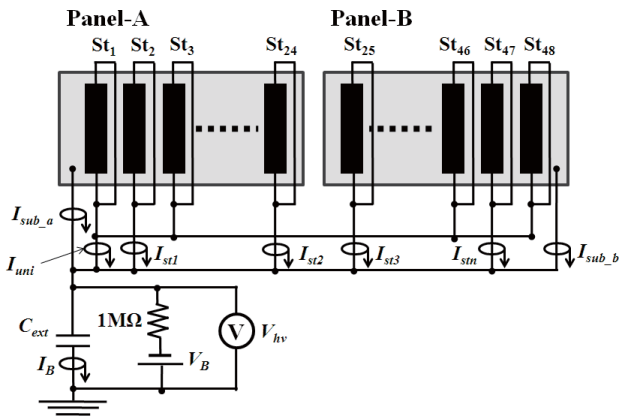


図2 放電試験回路

(2・3) 実験環境 図3に実験システムの概念図を示す。真空チャンバーのサイズは、直径が2.5mで、奥行きが5mである。クライオポンプを二基搭載しており、試験中の背圧は  $1 \times 10^{-4}$  Pa から  $5 \times 10^{-5}$  Pa 程度となる。図1に示したクーポンパネルを二枚、真空チャンバー内に投入した。クーポンパネル間の距離は、実際の衛星におけるパネル間の距離を模擬するために60mmとした。サブストームが発生した時の、高エネルギー電子を模擬するために、真空チャンバーには二基の電子銃が取り付けられている。電子銃の加速電圧は9keVとした。電子銃の正面には、電子銃を拡散させるための100nmのアルミ箔が取り付けられている。電子はアルミ箔を貫通する際に2keV程度のエネルギーを失うので、アルミ箔直後の電子のエネルギーは大きくても7keV程度である。 $V_b$ は6kVに設定したので、クーポンパネル表面には大きくても1keV程度の電子が照射される。二次電子放出係数は1keV以下のエネルギー領域に最大値を持つので、カバーガラス内部には逆電位勾配が発生する。

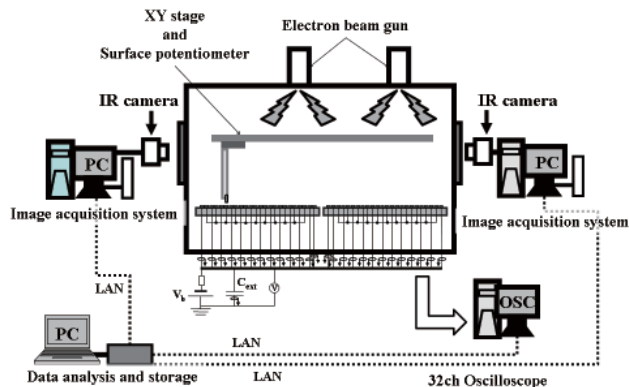


図3 試験システム

### 3. 実験結果

図4に典型的なフラッシュオーバー電流、中和電流、ブローオフ電流の波形を示す。ここでは、フラッシュオーバー電流の波形を用いて、電荷量やパルス幅の計算方法を説明する。電流波形のピーク値を  $I_{peak}$  とする。電流が  $I_{peak}$  の5%となった時の、時間をそれぞれ  $T_{i1}$  と  $T_{i2}$  とする。電流波形のパルス幅  $T_{arc}$  は式1で定義する。

$$T_{arc} = T_{i1} - T_{i2} \quad (1)$$

また、電荷量  $Q_{arc}$  は式2で定義する。

$$Q_{arc} = \int_{T_{i1}}^{T_{i2}} i(t) dt \quad (2)$$

ブローオフ電流や中和電流についても、同様な計算式を用いて電荷量やパルス幅を計算した。

図4の放電について、全ての中和電流の電荷量を計算した。図5にフラッシュオーバー電流が発生した列からの距離と電荷量の関係を示す。図5より、電荷量はフラッシュオーバー電流が発生した列から離れるほど小さくなっている。これは、放電発生点から遠く離れるほどフラッシュオーバープラズマによって中和される電荷量が少なくなること示唆している。ここで、図6に放電の発生個所を示す。放電は、真空チャンバーのほぼ中央部で発生している。前述の通り、クーポンパネル間には60mm程度の空隙が存在するが、空隙の存在とは関係なく放電発生点から1m以内では、中和電荷量が  $10^{-5}$  C以上ある。よって、空隙の存在によってフラッシュオーバープラズマが極端に減衰する可能性はないと考えられる。

伝搬範囲を測定する場合、放電前後の表面電位分布から求めることができる[9, 10, 12]。しかしながら、我々は試験の効率化を図るために、フラッシュオーバー電流や中和電流の電流波形から伝搬範囲を求めた。

フラッシュオーバー電流のパルス幅を見積もる上で、放電プラズマの伝搬距離は重要な指標となる。フラッシュオーバープラズマの伝搬距離が広いと、フラッシュオーバー電流のパルス幅は長くなるという予測も存在している[10]。そこで、フラッシュオーバー電流のパルス幅とフラッシュオーバープラズマの伝搬距離の関係について検討した。図7(100μs)、図8(200μs)、図9(300μs)、図10(>400μs)に、それぞれパルス幅が100μs、200μs、300μs、400μs以上の時の、フラッシュオーバー放電が発生した列からの距離と電荷量の関係を示す。例えば中和電荷量が  $10^{-5}$  C以上の範囲で考えると、パルス幅が増加することによって電荷が中和される範囲がより広範囲になっている。図7と図8より、パルス幅が100μsから200μs台に増加したことによって、フラッシュオーバープラズマが電荷を中和する範囲が広がっていることがわかる。しかしながら、図9と図10より、パルス幅が300μs以上になっても、電荷の中和範囲は広がっていないことがわかる。以上のことから、放電が発生してから300μsより短い時間では、フラッシュオーバープラズマ伝搬

範囲は放電発生点を中心として広がると考えられる。また、放電が発生してから  $300\mu\text{s}$  以上の時間が経過すると、フラッシュオーバープラズマの進展は停止すると考えられる。

パルス幅が  $300\mu\text{s}$  以上の場合について、フラッシュオーバープラズマの最大伝搬距離を検討する。図 11 に、各フラッシュオーバー放電の最大伝搬距離と個数の関係を示す。電荷の中和距離は最大で  $3.4\text{m}$  だった。今、太陽電池アレイの面積が十分に広くて、フラッシュオーバープラズマは放電発生点から同心円状に広がると仮定する。今回の実験より、フラッシュオーバープラズマは最大で半径  $3.4\text{m}$  以内の誘電体に蓄積された電荷を中和すると言することができる。

図 11 より、166 個の放電ではフラッシュオーバープラズマの伝搬範囲は  $1.5\text{m}$  から  $2\text{m}$  の範囲内におさまっている。これに対して、伝搬距離が  $3\text{m}$  を超えるような放電は 1 回しか発生していない。フラッシュオーバープラズマが、ある距離まで到達する確率を検討するために、フラッシュオーバープラズマの伝搬距離の正規分布  $N(\mu, \sigma^2)$  を考える。個体数となる放電回数は 367 回である。伝搬距離の平均値  $\mu$  は  $1.76\text{m}$ 、分散  $\sigma$  は  $0.18$  である。伝搬距離が  $1.5\text{m}$  から  $2.5\text{m}$  の範囲内となる確率は  $0.92$  で、伝搬距離が  $2.5\text{m}$  以上となる確率は  $2.0 \times 10^{-5}$  となった。よって、伝搬距離が  $2.5\text{m}$  を超えるようなフラッシュオーバー放電は極めて発生しにくいと言することができる。

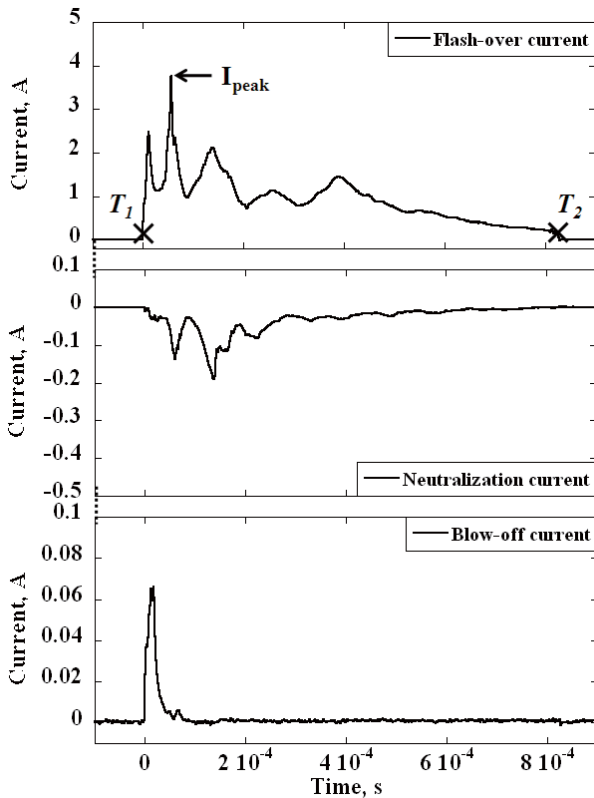


図 4 典型的なフラッシュオーバー電流，中和電流，ブローオフ電流の波形

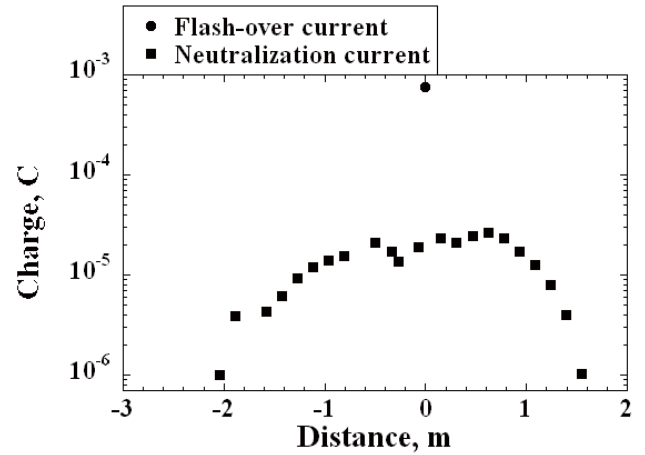


図 5 中和電流の電荷量と放電発生点からの距離

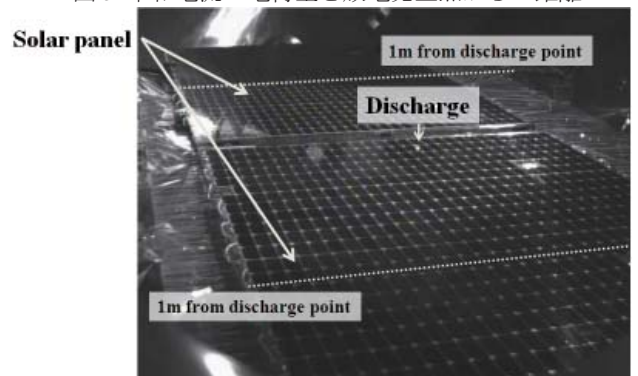


図 6 図 4 の放電の発光

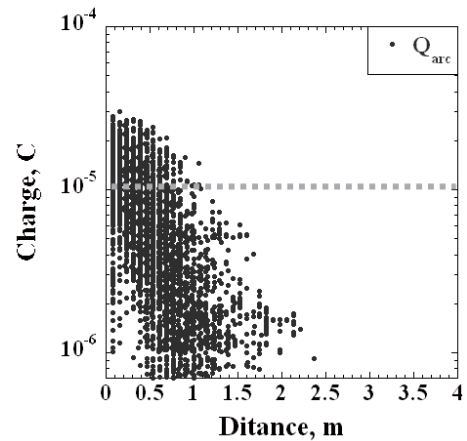


図 7 放電発生点からの距離と中和電流の電荷量 ( $100\mu\text{s} < T_{\text{arc}} < 200\mu\text{s}$ )

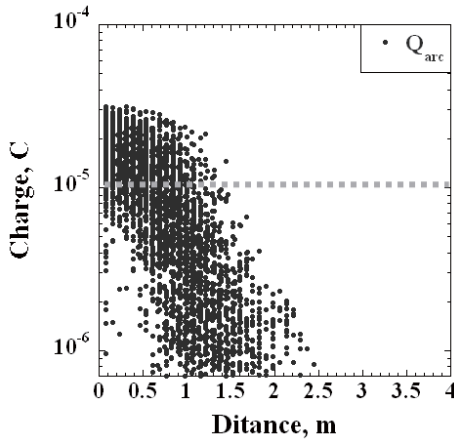


図8 放電発生点からの距離と中和電流の電荷量 ( $200\mu\text{s} < T_{\text{arc}} < 300\mu\text{s}$ )

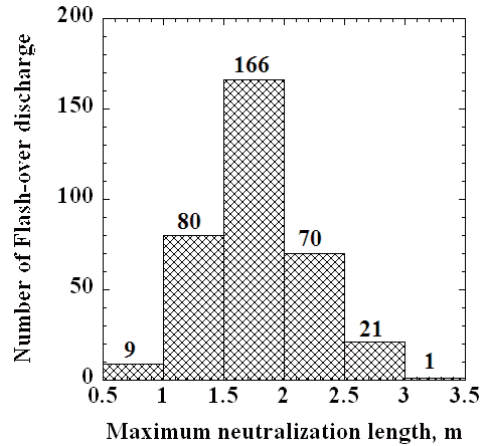


図11 パルス幅が  $300\mu\text{s}$  以上の時の電荷の最大中和距離と個数の関係

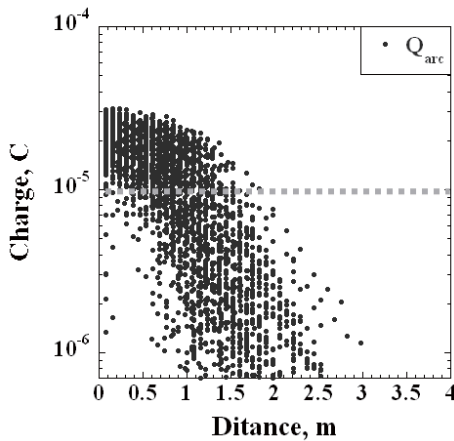


図9 放電発生点からの距離と中和電流の電荷量 ( $300\mu\text{s} < T_{\text{arc}} < 400\mu\text{s}$ )

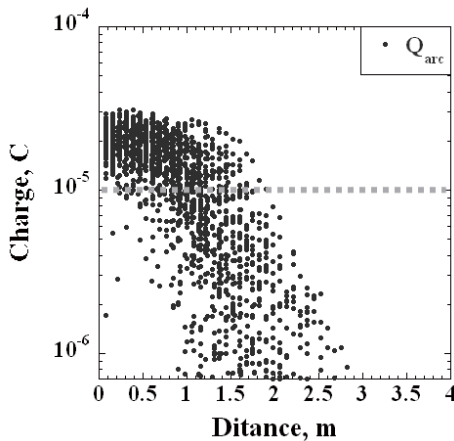


図10 放電発生点からの距離と中和電流の電荷量 ( $T_{\text{arc}} < 400\mu\text{s}$ )

#### 4. まとめと今後の課題

静止軌道のプラズマ環境における太陽電池アレイ上のフラッシュオーバー放電の伝搬距離を調べるために、模擬静止軌道プラズマ環境下で放電試験をおこなった。放電試験に用いた太陽電池アレイクーポンパネルの総面積は約  $5\text{m}^2$  で、放電試験に用いられた太陽電池アレイクーポンパネルの面積としては世界最大である。太陽電池アレイクーポンパネル上の太陽電池列を流れる中和電流やフラッシュオーバー電流の波形から、フラッシュオーバープラズマの伝搬範囲を調べた。

フラッシュオーバープラズマの伝搬範囲は、フラッシュオーバー電流のパルス幅が  $300\mu\text{s}$  以下では、フラッシュオーバー電流のパルス幅の増加とともに広がる傾向にある。しかしながら、パルス幅が  $300\mu\text{s}$  以上になるとフラッシュオーバープラズマの伝搬範囲は  $3\text{m}$  を上限として広がることはなかった。フラッシュプラズマは放電発生点から同心円状に伝搬すると仮定すると、静止軌道のプラズマ環境において、今回の試験から最大でも半径  $3.4\text{m}$  程度しか伝搬しないことがわかった。

#### 5. 謝辞

本論文で報告した実験を実施するにあたり協力していただいた AES 山本氏, JAXA 須藤氏, 九州工業大学 鈴木氏に感謝します。

#### 文 献

- (1) Okumura, T., Masui, H., Toyoda, K., Imaizumi, M., Cho, M., "Degradation of electric performance due to electrostatic discharge on silicon solar cell for space," *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Science.*, Vol.55, No.647, 2007, pp.590-596.
- (2) Inguibert, V., Sarrail, D., Mateo-Velez, J-C., Reulet, R., Levy, L., Boulay, F., Payan, D.: Electrostatic Discharge and Secondary Arcing on Solar Array – Flashover Effect on Arc Occurrence, 2008, IEEE Transaction on

- Plasma Science, Vol.36, No.5, pp.2404-2412.
- (3) Toyoda, K., Masui, K., Muranaka, T., Cho, M., Urabe, T., Miura, T., Kawakita, S., Gonohe, Y., Kikuchi, T.: ESD Ground Test of Solar Array Coupons for a Greenhouse Gases Observing Satellite in PEO, 2008, IEEE Transaction on Plasma Science, Vol.36, No.5, pp.2413-2424.
  - (4) Toyoda, K., Matsumoto, T., Shikata, Y., Cho, M., Tetsuo, Sato., Nozaki, Y.: ESD Ground Test of Solar Array Coupons for a Wideband Internetworking Satellite, 2004, Journal of the Japan Society of Aeronautical and Space Science, Vol.52, No.606, pp.328-336.
  - (5) Toyoda, K., Matsumoto, T., Cho, M., Nozaki, Y., Takahashi, M.: Power Reduction of Solar Arrays due to Arcing Under Simulated GEO Environment, 2004, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.41, No.5, pp.854-861.
  - (6) Okumura, T., Masui, K., Toyoda, K., Cho, M., Nitta, K., Imaizumi, M.: Environmental Effects on Solar Array Electrostatic Discharge Current Waveforms and Test Results, 2009, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.46, No.3, pp.697-705.
  - (7) Cho, M.: Status of ISO standardization efforts of solar panel ESD test methods, *10th Spacecraft Charging Technology Conference*, June, 2007, Biarritz, France.
  - (8) Leung, P., Bodeau, M.: Plasma Phenomena Associated with Solar Array Discharges and Their Role in Scaling Coupon Test Results to a Full Panel, *8th Spacecraft Charging Technology Conference*, Huntsville USA, October 2003.
  - (9) Masui, H., Toyoda, K., Cho, M.: Electrostatic Discharge Plasma Propagation Velocity on Solar Panel in Simulated Geosynchronous Environment, 2008, IEEE Transaction on Plasma Science, Vol.36, No.5, pp.2387-2394.
  - (10) Amorim, M., Payan, D.: Electrostatic Discharges on a 1M2 Solar Array Coupon – Influence of the Energy Stored on Coverglass on Flashover Current, *9th Spacecraft Charging Technology Conference*, Tsukuba Japan, April 2005.
  - (11) Vayner, B., Ferguson, D., Galofaro, J.: The Effect of Solar Array Size on Sustained Arc Inception, 47th AIAA Aerospace Science Meeting, AIAA 2009-115, Orlando, Florida, USA, January 2009.
  - (12) Kawasaki, T., Hosoda, S., Kim, J., Toyoda, K., Cho, M.: Charge Neutralization via Arcing on Large Solar Array in the GEO Plasma Environment, 2006, IEEE Transaction on Plasma Science, Vol.34, No.5, pp.1979-1985.