

模擬静止軌道環境における大型太陽電池パネルの放電プラズマ伝搬速度

原田 次郎 萩原 洋介

株式会社エイ・イー・エス

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

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

静止軌道では、サブストーム発生に伴う高エネルギー電子によって、宇宙機の電位が周辺に対して負電位になることがある。宇宙機が数 kV の負電位となった場合、太陽電池パネル表面に到達する高エネルギー電子は、数 eV から数 100eV まで低下する。太陽電池のカバーガラスの二次電子放出係数は、数 100eV 以下のときに大きくなるため、カバーガラス表面から二次電子が発生する。カバーガラス表面は、裏面に対して正の電位を持つ。このような電位勾配のことを、逆電位勾配と呼ぶ。逆電位勾配は、太陽電池パネル上での放電に繋がることがある。この放電によって太陽電池アレイ回路が短絡すると、最悪の場合、太陽電池アレイ回路の破壊を引き起こす⁽¹⁾。そのような事態を防ぐためにも、地上における太陽電池パネルの帶電放電試験が求められており、各研究機関で様々な試験が行われている。

地上での帶電放電試験において、多くの研究機関では実機サイズよりも小さいクーポンパネルを用いて試験を行っている^(2,3,4,5)。クーポンパネルで試験を行う際は、実際の太陽電池アレイの静電容量を模擬したコンデンサを外部回路に接続する必要があるが、その容量は各研究機関によって異なる。放電の電流波形を正確に模擬した外部試験回路で試験を行い、現実的な評価を行わなければならない⁽⁶⁾。

カバーガラス表面に蓄えられた電荷は、太陽電池パネル上で放電が起きたときに発生する放電プラズマに電気的に結合し、放電電流となる。放電電流は、放電プラズマの伝搬距離から求められる。また、実際の放電電流波形を再現するためには、放電プラズマの伝搬速度も必要となる。ここでは、放電プラズマの伝搬距離と伝搬速度を合わせて、特に放電プラズマの特性と呼ぶ。本研究では、実機サイズの太陽電池パネルを用いて、模擬静止軌道環境における放電プラズマの特性を調べるための試験を行った。本論文では、2つの異なる手法から求めた放電プラズマの速度特性について議論を行う。

2. 試験方法

2.1 太陽電池パネル

図 1 に、実験に用いた太陽電池パネルを示す。太陽電池パネルの大きさは 1.2×2m で、700 枚程度の三接合太陽電池で構成されている。一列あたり 30 直列で、24 並列に接続されている。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。本試験では、この太陽電池パネルを 2 枚用いた。図 2 は、実際にチャンバ内に設置した太陽電池パネルの写真である。

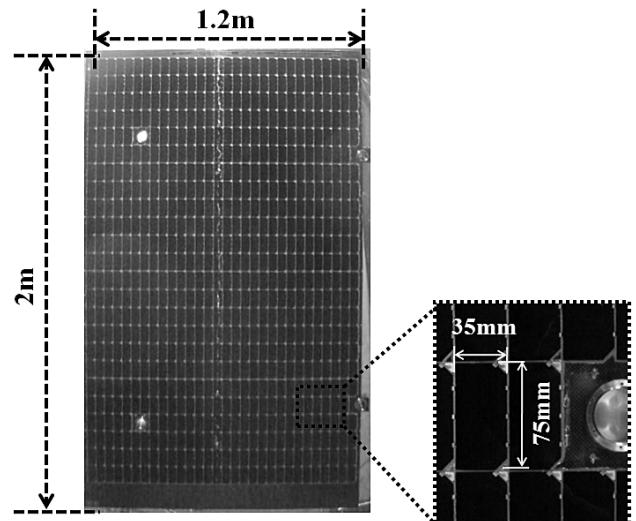


図 1 太陽電池パネル

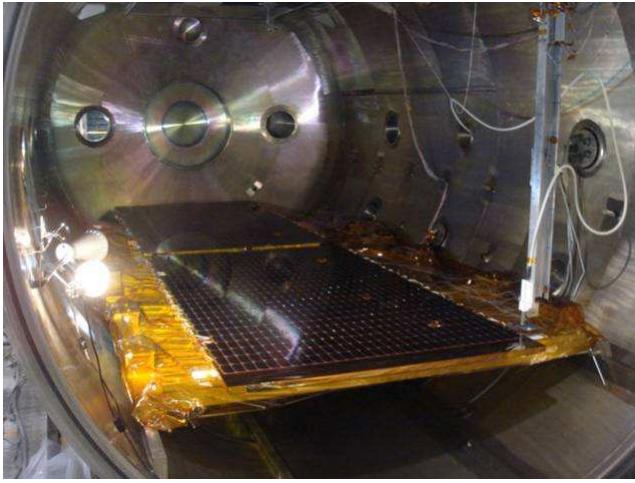


図 2 チャンバ内に設置した太陽電池パネル

2.2 試験システム

図 3 に試験システムの概略図を示す。直径 2.5m, 奥行き 5m のチャンバの上部には、電子ビーム銃が 2 基取り付けられており、チャンバ内に設置した 2 枚の太陽電池パネルに電子ビームを照射することができる。電子ビームの加速電圧は -9kV とした。電子ビーム照射口付近には、厚さ 100nm のアルミ箔を取り付けて、電子ビームを拡散させている。太陽電池パネルのバイアス電圧は -6kV、試験時の背圧は 1×10^{-4} Pa から 5×10^{-5} Pa である。放電時の電流波形は、直流電流プローブと 32ch オシロスコープで測定する。IR カメラが接続されている画像取得システム PC2 台には、32ch オシロスコープからのトリガが入力されており、放電時にチャンバ両側の観察用窓から撮影した放電画像を取り込むことができる。また IR カメラ 2 台のうちの 1 台には、イメージインテンシファイアが取り付けられている。これにより、放電時に太陽電池パネル表面を伝搬する放電プラズマの様子を撮影することができる。

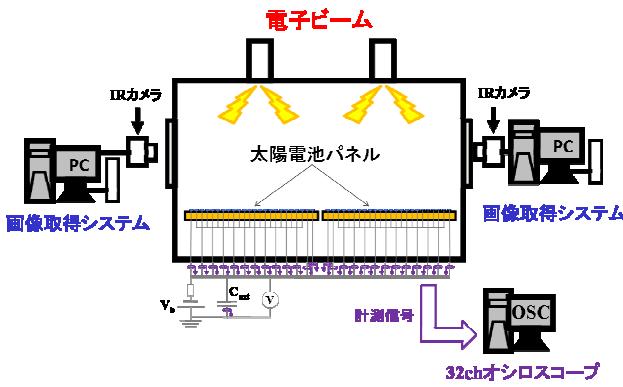


図 3 試験システム

2.3 試験回路

図 4 に試験回路を示す。放電時に、放電が発生した太陽電池列に流れる電流をフラッシュオーバー電流 (Flash-over current), 外部容量から供給される電流をブローオフ電流 (Blow-off current), カバーガラスに帶電した電荷が中和され

るときに流れる電流を中和電流 (Neutralization current) と呼ぶ。太陽電池パネルの各列に流れる放電電流は、電流プローブ I_{st1} から I_{st48} で測定する。ブローオフ電流は I_B で測定する。 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。今回の試験では、240pF とした。

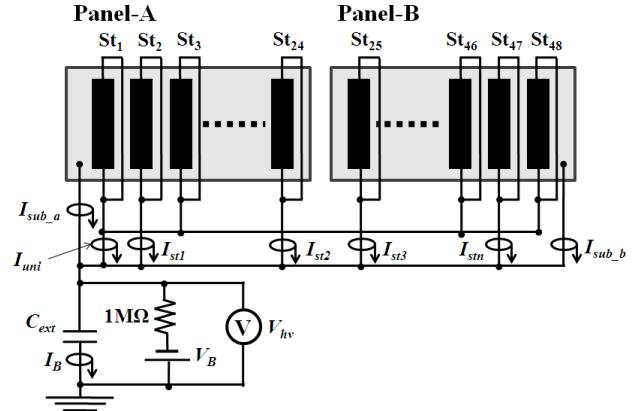


図 4 試験回路

3. 試験結果

3.1 放電電流波形による放電プラズマの速度特性

放電時に、放電発生列からどの範囲まで中和電流が流れているかを調べることで、放電プラズマの伝搬距離がわかる。そして、その伝搬距離と中和電流が流れ始めた時間から、放電プラズマの伝搬速度を求めることができる。

図 5 に、中和電流波形の解析方法を示す。電流の最大値を I_{peak} とし、その 5% に値する時間をそれぞれ T_{i1} 、 T_{i2} とした。電荷量 Q_{arc} は、式(1)のように定義した。

$$Q_{arc} = \int_{T_{i1}}^{T_{i2}} I(t) dt \quad (1)$$

Q_{arc} が 7×10^{-7} C 以上のものを中和電流とみなし、 Q_{arc} の 10% に値する放電開始からの時間を、放電プラズマが到達した時間 (T_{delay}) とした。

図 6 に、中和電流波形の一例を示す。Ch.15 が最も放電発生列に近く、放電発生列から離れるにつれて中和電流は小さくなり、電流が流れ始める時間も遅くなっていることがわかる。図 7 に、この放電の放電プラズマの伝搬距離と到達時間の関係を示す。このグラフから、放電発生列からおよそ 1.2m 離れた太陽電池列には、放電発生からおよそ 130μs 後に放電プラズマが到達していることがわかる。図 8 に、これ以外の放電データの解析結果も含めた、放電プラズマの伝搬距離と到達時間の関係を示す。

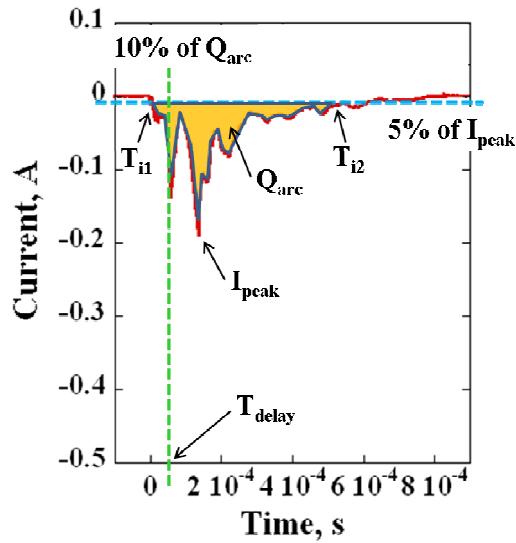


図 5 中和電流波形の解析方法

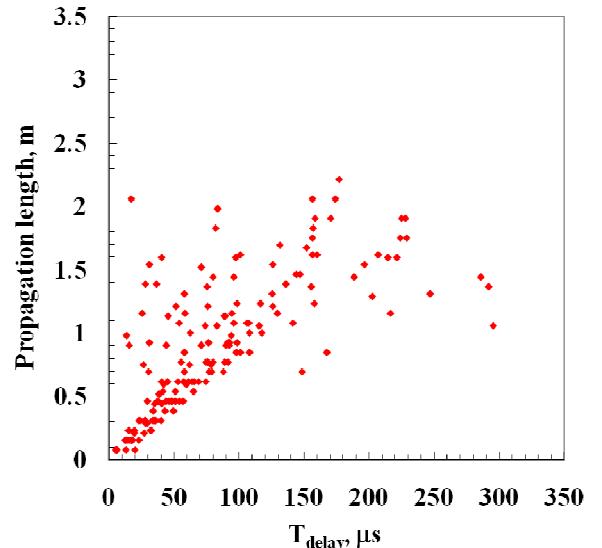


図 8 中和電流波形から求めた放電プラズマの伝搬距離と到達時間の関係

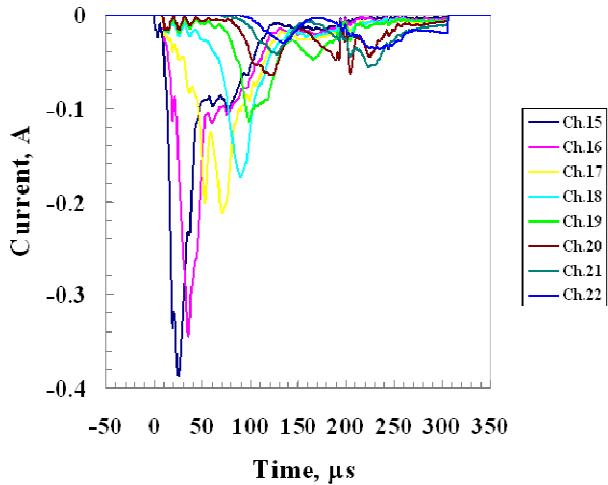


図 6 典型的な中和電流波形

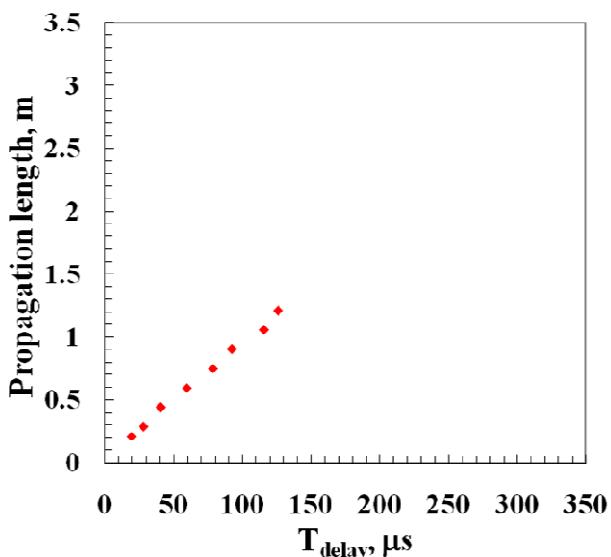


図 7 図 6 に示した放電の放電プラズマの伝搬距離と到達時間の関係

3.2 放電発光画像による放電プラズマの速度特性⁽⁷⁾

図 9 に、イメージインテンシファイアで撮影した太陽電池パネルの放電発光画像を示す。この画像は、放電発生から $20\mu\text{s}$ 後に撮影したものである。放電発生点の周辺には、放電プラズマによる発光を見ることができる。画像の解析には、遠近補正を用いた。図 10 に遠近補正後の画像と発光強度グラフを示す。プロットした中和電流を見てみると、放電発生点から離れるにつれて、小さくなっていることがわかる。また、発光強度も放電発生点から離れるにつれて小さくなっていることから、中和電流は発光強度と相関があると言える。発光強度の最大値の 40%に値する、放電発生点から最も離れた点を、放電プラズマの伝搬距離とする。そして、放電発生から画像を撮影するまでの時間を、放電プラズマの到達時間 (T_{delay}) として、放電プラズマの速度特性を求める。画像の撮影は、放電開始から $20\mu\text{s}$, $40\mu\text{s}$, $60\mu\text{s}$, $80\mu\text{s}$, $100\mu\text{s}$, $200\mu\text{s}$, $300\mu\text{s}$ の 7 条件に設定して行った。図 11 に、放電プラズマの伝搬距離と到達時間の関係を示す。図 8 の分布とよく一致していることがわかる。

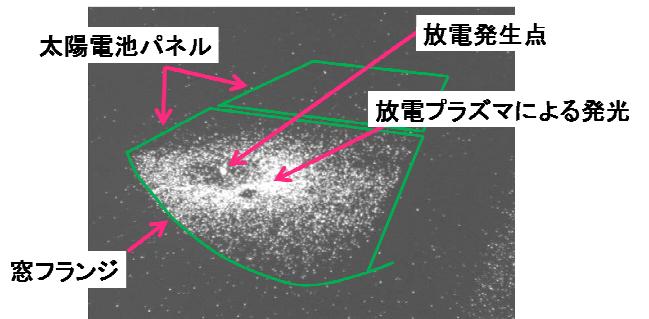


図 9 放電発生から $20\mu\text{s}$ 後の放電発光画像

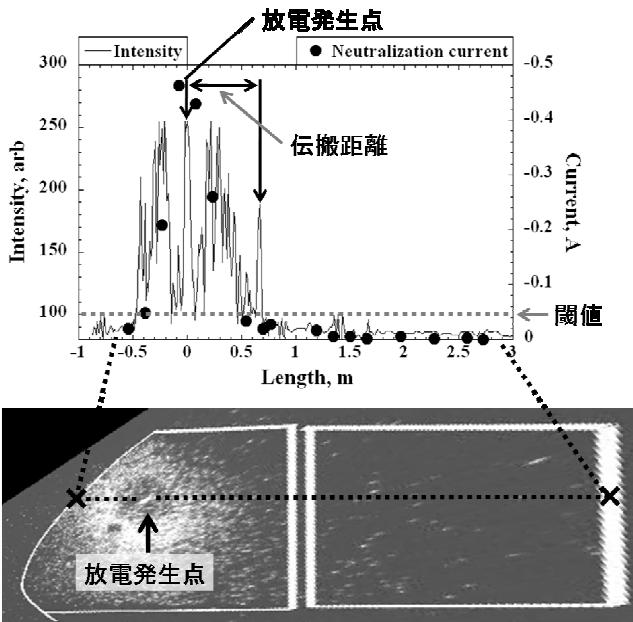


図 10 遠近補正後の画像（下）と発光強度グラフ（上）

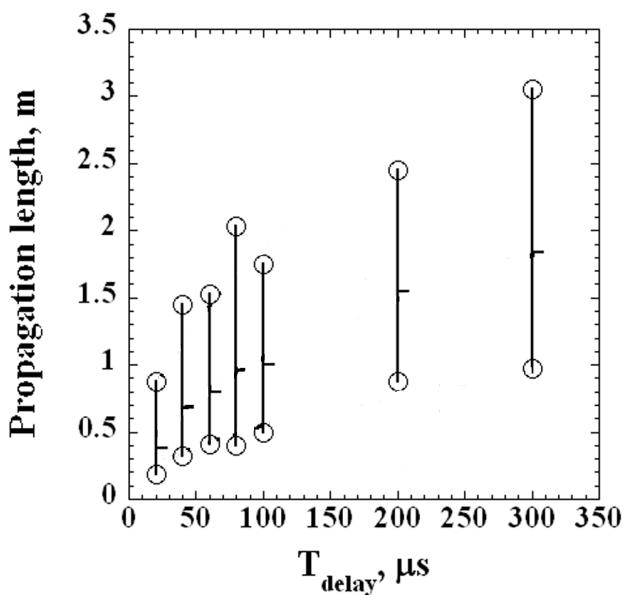


図 11 放電発光画像から求めた放電プラズマの伝搬距離と到達時間の関係

4. まとめ

太陽電池パネル 2 枚を用いて、模擬静止軌道環境での放電プラズマの速度特性を調べるための試験を行った。速度特性を調べる方法として、中和電流波形を用いる方法を今回新たに検討し、放電時に撮影した放電発光画像を用いる方法と比較を行った。その結果、両者でそれぞれ求めた放電プラズマの速度特性は、よく一致することが分かった。

今後は、両手法を用いて静止軌道環境、及び低軌道環境における放電プラズマの速度特性の見積りを行う予定である。また、速度特性の衛星構体容量への依存性についても確認を行っていく。

参考文献

- (1) 趙 孟佑・藤井 治久:「宇宙環境での帶電・放電現象についての研究動向と将来課題:高電圧太陽電池アレイの放電現象と将来課題」, 日本航空宇宙学会誌, Vol.51, No.592, pp.139-145(2003)
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Cho, M.: Status of ISO standardization efforts of solar panel ESD test methods, *10th Spacecraft Charging Technology Conference*, June, 2007, Biarritz, France.
- (7) Okumura, T., Imaizumi, M., Nitta, K., Takahashi, M., Suzuki, T., Toyoda, K.: Flashover discharge on solar arrays: Analysis of discharge current and image, 2011, to be published on *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol.48, No.1.