

大型太陽電池アレイクーポンを用いた帯電・放電試験

○川崎崇, 三丸雄也, 志方吉夫, 細田聡史, 金正浩, 趙孟佑 (九州工業大学)

Electrostatic discharge experiment with a large solar array coupon

Takashi Kawasaki, Yuya Sanmaru, Yoshio Shikata, Satoshi Hosoda, Jeongho Kim, and Mengu Cho
(Kyushu Institute of Technology)

Key Words: Solar Array, GEO, Arc plasma

Abstract

At our laboratory, the space environment proof test to evaluate the performance of the solar array against arcing is being performed. Since most test facilities are not large enough to accommodate a full solar panel, laboratories usually use coupons. Usually, the capacitance of coverglass is simulated by connecting a capacitor in the external circuit. But, there are big differences among research organizations about how much capacitance is appropriate. The international standard about the ground test conditions does not exist. The purpose of this research is to investigate the influence of coverglass on arcing phenomena on GEO satellite solar array. The experiment is performed by using a large solar array coupon(400x400mm). The coupon has 50 Si cells. Extent of neutralization differ for each arc. Less charge is neutralized as the distance from arc spot increases. At the worst case, 53% charge was neutralized at 325mm. Plasma propagation velocity is of the order of 10^4 m/s but differ widely for each arc.

1. 目的および背景

近年、静止軌道衛星に搭載される太陽電池アレイは大電力化(10kW)・高電圧化(100V)が進んでいる。しかし、高電圧化に伴い放電現象によるアレイの短絡事故が起きている[1]。静止軌道において、宇宙機が周辺プラズマに対して持つ電位は、通常の日照時において、ほぼ0である。しかし、サブストーム(磁気圏嵐)環境においては、多量の高エネルギー電子が流入するために宇宙機電位は大きく負に沈む。この時、二次電子放出係数の違いにより、カバーガラス等の絶縁体と、宇宙機構体の導体との間に電位差が生じる。カバーガラスの方の電位が高くなる状態のことを逆電位勾配という。導体、絶縁体、真空の接するトリプルジャンクション(三重接合点)と呼ばれる部分で電界が集中し、放電が発生する。この単発の放電はトリガ放電と呼ばれ、太陽電池の劣化や電磁波による搭載機器の誤動作を引き起こす[2]。

我々の研究室では、宇宙用太陽電池アレイの耐宇宙環境性能評価試験を行っている。地上試験では静止軌道環境を適切に模擬することが必要であるが、試験条件をむやみに厳しくすることは必ずしも歓迎されない。なぜなら、そのような試験結果に基づいて過剰な対策をとることはコスト増につながるからである。放電が

発生すると、そのエネルギーは宇宙機構体の静電容量、カバーガラスの静電容量の2種類によって供給される。ほとんどの試験設備は、全ての太陽電池パネルに適用するのに十分大きくないので、実験室では太陽電池パネルの一部であるクーポンを用いる。太陽電池パネル全体の静電容量は外部回路にコンデンサをつないで模擬する。しかし、どれくらいの容量にするかは、各研究機関で大きな違いがあり、未だ地上試験の試験条件についての国際基準は存在しない。

本研究の目的は、太陽電池アレイでの放電現象にカバーガラスが与える影響を調べることである。これらの結果から最終的に GEO 環境における放電試験の基準となる外部回路を提唱することを目指している。

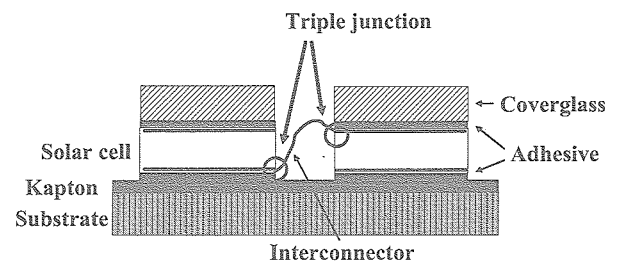


図1 太陽電池の断面

2. 実験方法

2.1 大型太陽電池アレイクーポン

実験に用いた大型太陽電池アレイクーポンを図2に示す。クーポンの大きさは400x400mmで、70x35mmのシリコン製太陽電池セルが10枚直列で5並列、合計50枚で構成されている。セルの列には、色の種類 Red, Blue, Green, Yellow, Purple の頭文字で R,B,G,Y,P と名前をつけており、実験中は両端を短絡している。

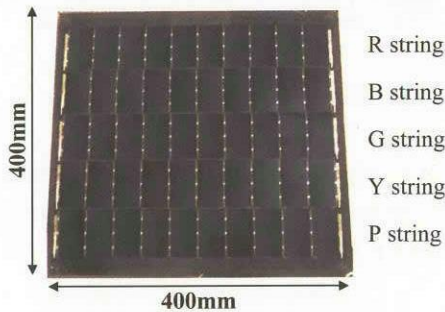


図2 大型太陽電池アレイクーポン

2.2 実験装置の配置

図3に実験システムの概略図を示す。クーポンは直径0.6m、長さ0.9mの真空チャンバー内に、セル面を上にして設置した。真空チャンバーはターボ分子ポンプにより排気され、実験中の真空度は $1.3\sim 4.5 \times 10^{-4}$ Paである。逆電位勾配を形成するために、高電圧電源(Glassman; EW60kV)によりクーポンに-6kVを印加し、チャンバー上部に取り付けてある電子ビーム銃(ULVAC; RHEED)により電子をクーポン表面に照射した。チャンバー内には、シャッター(COPAL; DC-392)が設置されており、電子ビーム照射を瞬時に遮断することが可能である。大型太陽電池アレイクーポンを用いるため、電子ビームの照射面積を広げることが必要である。そこで、厚さ $0.7\mu\text{m}$ のアルミ箔に電子ビームを照射し、金属中で電子が散乱することを利用して照射面積を広げている。電子銃の加速電圧が8kVでバイアス電圧が-6kVの時に、最も良い逆電位勾配となることを既に確認している[3]。放電電流が直接電源に流入するのを避けるため、クーポンと電源の間には $10\text{M}\Omega$ の制限抵抗が接続されている。XYステージ(SIGMAKOKI; SGSP26-150_200)には、非接触の表面電位計(Trek probe; Model-341)が取り付けられており、クーポン表面の2次元電位分布計測が可能である。放電はIRカメラ(SONY; XC-EI50)で撮影され、放電発生位置特定システムにより放電位置が特定される[4]。

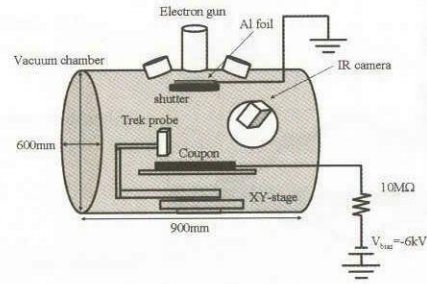


図3 実験システム

2.3 実験回路

図4に実験回路を示す。太陽電池アレイクーポンから外部回路へは真空チャンバーに取り付けられた11本の高圧電流導入端子を介して接続されている。それぞれの列に流れる放電電流を電流プローブによって計測した。CP1,CP2,CP3はAC電流プローブ(Tektronix; P6022)で、CP4,CP6はDC電流プローブ(HIOKI; 9274)。ブローオフ電流はDC電流プローブCP6(HIOKI; 3274)。また、クーポンの電位を高電圧プローブVP(Tektronix; P-5100)で計測し、放電が発生した時、放電部からは電子が放出されクーポン電位は急速に0に到達するので、これをトリガソースとしている。高電圧プローブをトリガ発生用オシロスコープ(LeCroy; wave surfer 424)につなぎ、トリガ発生用オシロスコープからトリガを、オシロスコープ1(Tektronix; TDS2014)、オシロスコープ2(Tektronix; TDS224)、シャッターに送る。オシロスコープの放電波形データはGPIBケーブルを介してPCに保存される。典型的な放電波形を図5に示す。ブローオフ電流(Blow-off current)とは、高電圧電源と外部容量のみから供給される電流である。アーク電流(Arc current)とは、カバーガラスから供給される電流とブローオフ電流の和である。カバーガラスに蓄えられた電荷が中和される時に流れる電流を中和電流(Neutralization current)と呼ぶ。

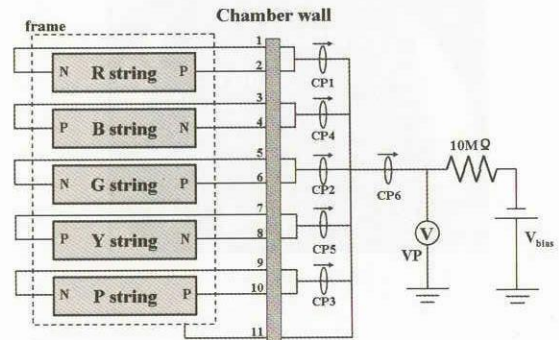


図4 実験回路

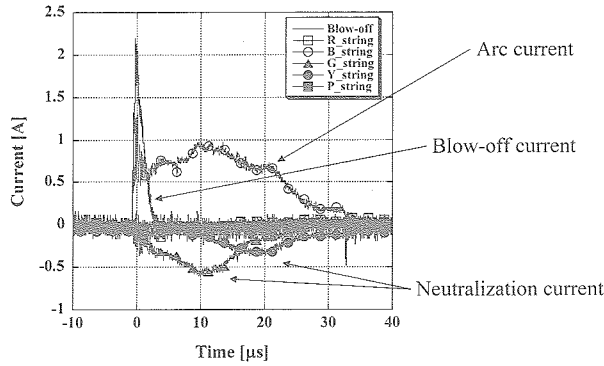


図5 典型的な放電電流波形

3. 実験結果および考察

国際基準となる外部回路を提唱する際に必要な情報としては、①放電が太陽電池パドル全体のカバーガラスに蓄えられた電荷をどのくらい取り込むのか？②放電プラズマはどれくらいの距離まで伝搬するのか？③放電プラズマの伝搬速度の3つが挙げられる。これらの測定結果を以下に示す。

3.1 特定の場所での表面電位測定

まず、放電プラズマの伝搬距離を調べる方法について述べる。ある特定の測定点で表面電位を一定間隔で測定し、放電前後の電位変化を調べる。電子ビームを30秒間照射し、シャッターにより電子ビームを遮断し表面電位を測定する。放電が発生した場合は、瞬時にシャッターを閉じて表面電位を測定した。表面電位の測定は図6に示す point1 と point2 の2点で行った。表面電位の変化を図7に示す。最初にカバーガラス表面の電位はバイアス電圧($V_{bias} = -6kV$)の電位を持っているが、電子ビームの照射により、正に帯電していている。乖離電圧が上昇すると放電し、放出された電子によりカバーガラス表面が中和され電位が下がる様子が見られる。ここで、放電直前の電位を ϕ_{before} とし、放電前後の電位変化を ΔV と定義する。

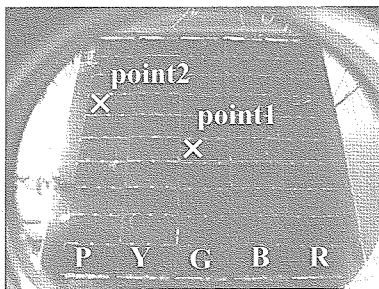


図6 測定点

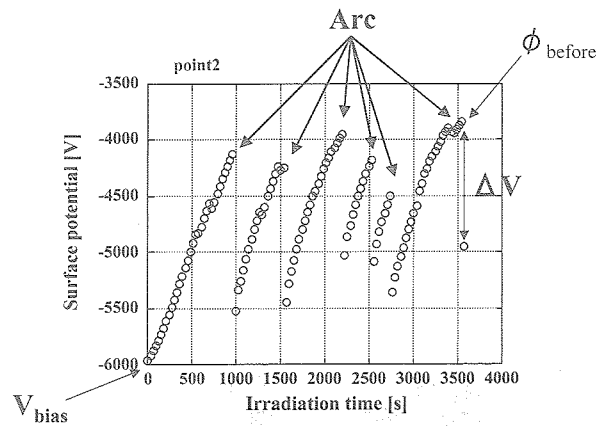


図7 表面電位の変化

電位変化 ΔV と測定列の中和電流電荷量の関係を図8に示す。測定点が point1 の時は G 列の中和電流、point2 の時は P 列である。

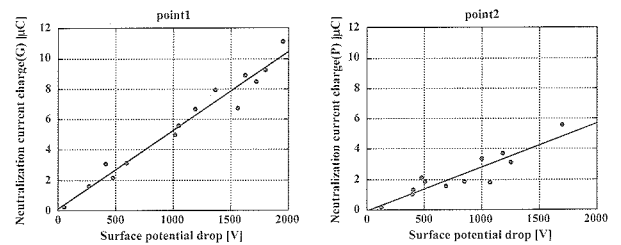


図8 電位変化と中和電流電荷量の関係

グラフから分かるように強い相関が見られる。このことは、中和電流はカバーガラス容量によって供給される電流であることの強い証拠となる。

次に、前述の③について述べる。放電発生点からの距離と、中和される割合を図9に示す。

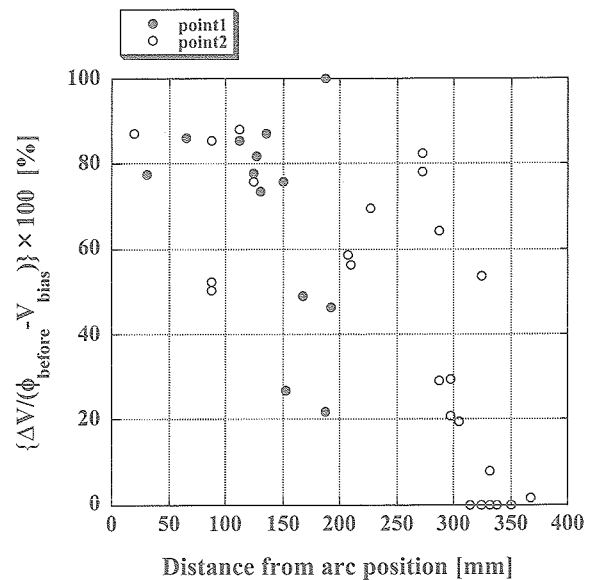


図9 放電発生点からの距離と中和割合の関係

横軸は放電発生点と測定点の距離、縦軸は電位変化を電位差(放電前の電位- バイアス電圧)で割ったもので、放電により表面電位が-6kVまで下がれば100%となる。図より、放電発生点が近い場合は、ほとんどの電荷は中和されている。また、徐々に遠くなるにつれ中和される割合が減少する傾向にあり、300~350mmでは全く中和されないケースもあった。300mm付近では中和される割合が異なる放電が複数ある。これは、それぞれの放電によって規模が異なることを意味する。今回の実験で最も放電の規模が大きかったのは、放電発生点から325mm離れた場所の電荷を53%中和したケースであった。

3.2 放電プラズマ伝搬速度

放電プラズマ伝搬速度が分かれば、実際の衛星での放電波形のパルス幅を推測することができる。文献[5]によると、放電プラズマ伝搬速度は 9.0×10^3 [m/s]とされている。今回は、それぞれの列に流れる中和電流の遅れ時間からプラズマ伝搬速度を求めた。

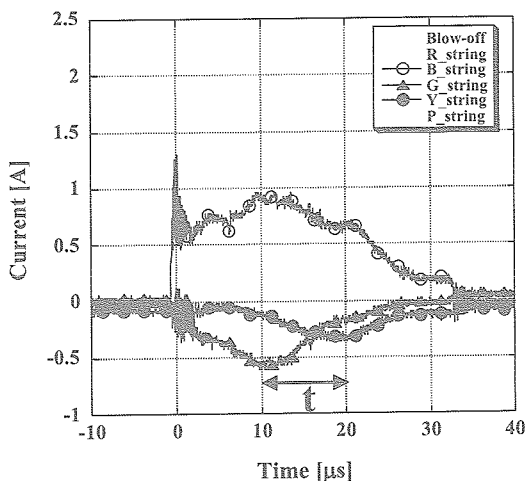


図10 放電電流波形

図10に示す放電電流波形はB列で放電が発生した時のものであり、G列とY列の中和電流ピークに $10 \mu\text{s}$ の遅れがある。図ではブローオフ電流、R列、P列に流れる電流は、波形が見やすいように除外している。セル1枚の長さが70mmであるので、これから放電プラズマ伝搬速度を求めた。

$$V_p = \frac{0.07[m]}{t} = \frac{0.07[m]}{10[\mu\text{s}]} = 0.7 \times 10^4 [m/s]$$

これは最も速度が遅かったケースであり、最速のケースは 14×10^4 [m/s]であった。測定した放電プラズマ伝搬

速度は、およそ 10^4 m/sのオーダーであり、その速度は放電によって異なることが分かった。

4. まとめ

地上試験の試験条件についての国際基準を定めるための予備的な実験を行った。

- ・ 中和電流はカバーガラスに蓄えられた電荷により供給され、それぞれの放電により中和される面積は異なる。
- ・ 放電発生点から離れるにつれ中和される電荷は減少する傾向にある。今回の実験で最も放電の規模が大きかったケースで、放電発生点から325mm離れた場所の電荷を53%中和した。
- ・ 放電プラズマ伝搬速度は 10^4 m/sのオーダーであり、その速度は放電によって異なる。

今後、より多くの測定を行い50枚のカバーガラスに蓄えられた電荷を全て取り込む放電があるかを調べるのが課題である。また、今回の結果は外部回路の外部容量が0の場合であり、外部容量が与える影響を調べる必要がある。逆電位勾配のケースだけでなく順電位勾配のケース等も調べ、国際基準となる外部回路を提唱したいと考えている。

謝辞

大型太陽電池アレイクーポンを提供してくださったシャープ株式会社とALCATEL Spaceに感謝いたします。

参考文献

- [1] Katz, I., Davis, V.A; and Snyder, D.B, "Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO", AIAA 98-1002, 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, January, (1998)
- [2] Cho, M., and Fujii, H., "Review on Charging and Discharging Phenomena in Space Environment: Arcing on High Voltage Solar Array and Future Issues", Aeronautical and Space Sciences Japan, Vol.51, pp.139-145, (2003)
- [3] Kawasaki, T., Shikata, Y., Hosoda, S., Kim, J., and Cho, M., "Influence of Coverglass on Arcing Phenomena on GEO Satellite Solar Array", 24th ISTS, Miyazaki, Japan, 2004
- [4] 豊田和弘, 趙孟佑, 匹田政幸: 動画処理による真空環境下での太陽電池アレイ放電発生位置特定システムの開発, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.51, No.589, 2月号(2003), pp.82-84

[5] Leung, P., "Plasma Phenomena Associated with Solar Array Discharges and Their Role in Scaling Coupon Test Results to a Full Panel", AIAA 2002-0628, 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, January, (2002)