

宇宙用ソーラアレイの電子ビーム照射 ESD 試験^{*1}

Electron-Beam-Induced ESD Triggering Discharge Tests of Solar Arrays for Space Use

小唄 秀明^{*2}・藤井 治久^{*3}
Hideaki Koakutsu and Haruhisa Fujii

Key Words: Solar Array, High Voltage, Satellite, ESD, Arc

Abstract: This paper deals with the electron-beam irradiation experiments concerning the arcing discharge on the solar array. It is very important to investigate this discharge phenomenon and offer a guideline to design solar arrays with high reliability. We used a pair of real GaAs solar cells on a substrate as a sample. The sample was biased to -9kV and the electron beam of the energy of 10keV was irradiated to the sample. On that condition, the voltage from DC battery was applied to the gap between the cells. The detrimental arcing did not occur even at the gap voltage of about 80V, in spite of the occurrence of ESD of a few hundreds times. Therefore, the high voltage use of solar array, for example 100V, is thought not to cause sustained arcing discharge to destroy the satellite system if arrays are designed to lower the maximum voltage between cell strings with reasonable distance.

1. はじめに

宇宙機の帯電問題は、約 30 年前から取り上げられており¹⁾、以来、宇宙機の帯電に関する技術の研究開発が幅広く行われてきた²⁻⁴⁾。その結果、帯電に対し信頼性の高い宇宙機が開発され、宇宙空間で運用されてきた。これらの研究開発においては、宇宙機の表面帯電をいかに防ぐかに主眼が置かれていた。

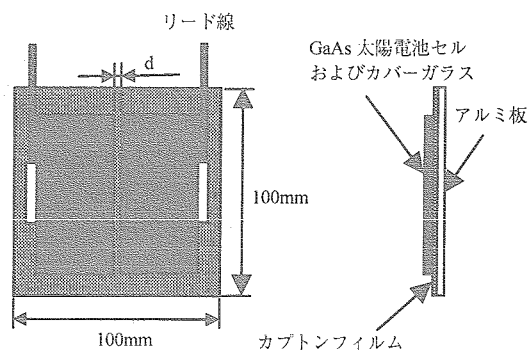
しかし、1997 年に静止軌道上の TEMPO-2 衛星において、発生電力低下の不具合が発生した⁵⁾。この衛星では、100V で電力が供給されていた。不具合調査の結果、太陽電池セル回路の高電圧部における放電による不具合の可能性が示された⁶⁾。それ以来、衛星にとって有害な不具合となりうる太陽電池アレイ上での放電現象のメカニズムを明らかにするための研究が行なわれるようになった⁷⁾。しかし、そのメカニズムや、放電が発生する条件は、依然として明らかになっていない。

そこで我々は、電子ビーム照射試験により放電現象の特徴を調査することにより、そのメカニズムを明らかにし、その成果を将来の高電圧衛星用ソーラアレイの設計に反映しようと考えた。最初のステップとして、2 枚の宇宙用 GaAs 太陽電池セルを供試体として実験を行なった。供試体を負電位にバイアスし、同時に電子ビームを照射することにより、放電が発生する条件の一つである逆電位勾配の状態を形成した。実験中、放電(ESD: Electrostatic Discharge)が発生した際には、過渡電流を測定するとともに、発光状態を観察した。

本実験の結果と考察について、以下に示す。

2. 実験方法

第 1 図に、GaAs 太陽電池セルを使用した供試体の概要図を示す。太陽電池セルのサイズは $76 \times 37 \text{mm}^2$ であり、その受光面にはカバーガラスが接着されている。太陽電池セルは、0.025mm 厚のカプトンフィルムが接着された厚さ 1mm、サイズ $100 \times 100 \text{mm}^2$ のアルミ板(サブストレート)に接着されている。2 枚の太陽電池セルの長辺同士は、距離 $d(\text{mm})$ を確保するように接着されている。太陽電池セル間ギャップを向く辺以外の 3 辺はシリコン接着剤で覆っており、放電が太陽電池セル間のみで発生するようにしている。



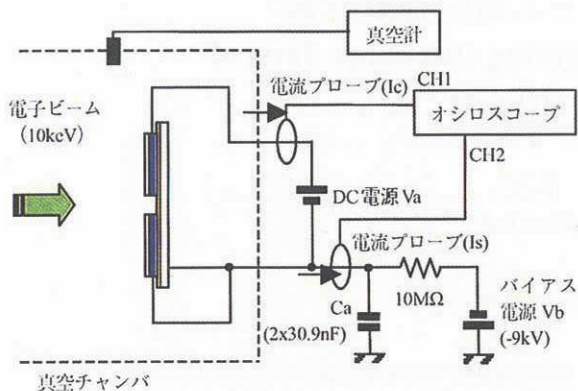
第 1 図 供試体の概要

第 2 図に、実験系の概要を示す。供試体を真空チャンバに入れた後、ロータリーポンプおよびターボ分子ポンプにより約 $1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ の真空状態にした。供試体は DC 電源によって $-9 \text{kV}(V_b)$ にバイアスし、 10keV の電子ビームを供試体に照射した。電子ビームの電流密度 J_b は、 $0.1 \sim 0.3 \text{nA/cm}^2$ である。これにより、カバーガラス表面では 1keV の電子ビームが入射し、その 2 次電子放出特性によりカバーガラ

^{*1}平成 15 年 11 月 28 日、第 6 回宇宙飛翔体環境研究会にて講演

^{*2}三菱電機株式会社 鎌倉製作所

^{*3}奈良工業高等専門学校 電気工学科



第2図 実験系の概要

ス表面は太陽電池セルおよびサブストレートに対して正に帯電し、逆電位勾配が形成される。また、容量成分の小さい9V乾電池を直列に接続したDC電源(V_a)を使用して、ソーラレイ上の太陽電池セル間電位差を模擬した。放電発生時の過渡電流は、2つの電流プローブ(Pearson 411 および 4100)によって計測した。1つは太陽電池セル間を含む電流パスを流れる I_c (セル電流と呼ぶ)を、もう1つは供試体と接地されたグラウンドの間を流れる電流 I_s (サブストレート電流と呼ぶ)を計測した。また、放電の発生は、電離真空計によってモニタしている真空度の急激な変化によっても確認した。チャンバの窓から、放電発生時の写真も撮影した。また、宇宙機のソーラレイ全体のカバーガラスの静電容量を模擬するために、コンデンサ C_a ($2 \times 30.9\text{nF}$)をDC電源(V_0)に並列に挿入した。実験はすべて室温にて実施した。

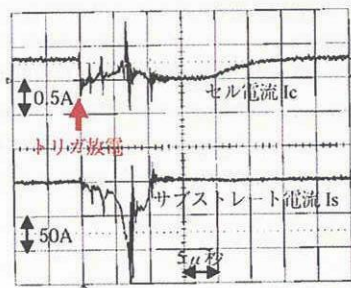
3. 実験結果

第2章で述べた実験方法に基づき、太陽電池セル間電位差 V_a と距離 d をパラメータとして実験を行なった。実験では、太陽電池セル間のカプトンに故意に傷をつけた供試体も使用した。

まず、太陽電池セル間距離が $d=0.8\text{mm}$ の場合について、太陽電池セル間電位差 V_a の影響を調べた。第3図(a)に、 $V_a=77\text{V}$ の条件で放電が発生した時の I_c および I_s の過渡電流波形の例を示す。また第3図(b)に、放電が発生した瞬間を含み2分間露光させて撮影した、供試体の写真を示す。第3図(a)において、 I_c はESDによってトリガーされた後 $25\mu\text{s}$ 間流れ続けている。一方 I_s は、ESD発生後に増え始め、 $7\mu\text{s}$ 後にピークに達している。その後 I_s は急激に減少するが、 I_c は流れ続けている(これは2次アークと呼ばれている⁷⁾)。この放電は、第3図(b)に示すように、太陽電池セル間の中央付近で発生したものである。同じく第3図(b)に示すように、直線的な弱い発光が、放電発生前まで続くのが観察された。同様の放電を約100回発生させたが、 $30\mu\text{s}$ 以上続く放電は発生しなかったため、太陽電池

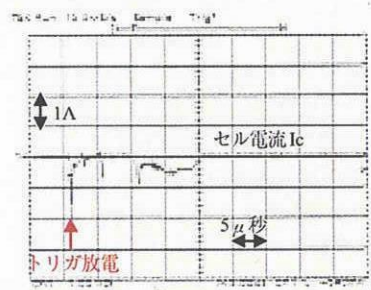
セル間に有害なダメージは発生しなかった。

次に、太陽電池セル間 $d=0.8\text{mm}$ 、太陽電池セル間電位差 $V_a=30\text{V}$ の実験で得られた、放電時の I_c の波形の例とそのときの供試体の写真を第4図に示す。第4図(a)において、 I_c は約 $18\mu\text{s}$ 間流れ続けている。また、第4図(b)に示すように、太陽電池セル間において、放電発生箇所から離れた位置で弱い発光が観察された。 I_c の継続時間は各放電によって異なるものの、全体的には V_a が大きいほど I_c の継続時間が長くなる傾向があった。また、第5図は放電回数と放電間隔の関係を示したものである。これによると、放電回数が多くなるほど次の放電が発生するまでに要す

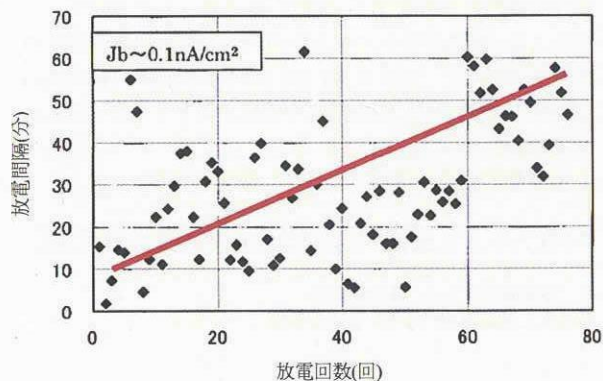


第3図 放電発生時の代表的な過渡電流波形と供試体写真 ($d=0.8\text{mm}$, $V_a=77\text{V}$)

る時間は長くなっている。

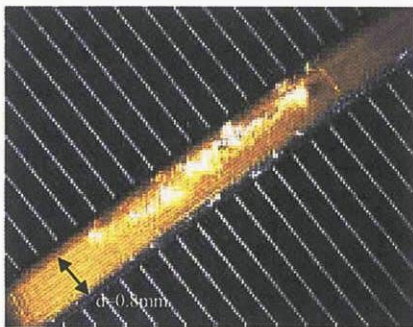


第4図 放電発生時の代表的な過渡電流波形と供試体写真 ($d=0.8\text{mm}$, $V_a=30\text{V}$)

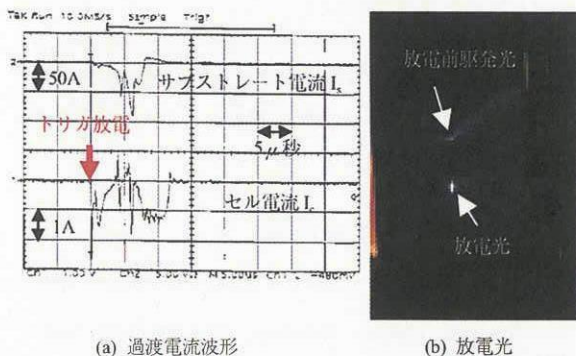


第5図 放電回数と放電間隔の関係 ($d=0.8\text{mm}$, $V_a=30\text{V}$)

次に、太陽電池セル間に露出しているサブストレートのカプトンに傷があると放電が持続する可能性があるため、カプトンの傷の影響を調べた。第6図に、傷を付けた箇所の写真を示す。この供試体を使って、太陽電池セル間距離 $d=0.8\text{mm}$ 、太陽電池セル間電位差 $V_a=30\text{V}$ の条件で実験した。この実験では、190回の放電を発生させた。第7図に、 I_c と I_s の代表的な波形と、放電が発生する瞬間を含めた供試体発光時の写真を示す。ほとんどの放電は、カプトンに傷のある箇所で発生した。放電時の過渡電流波形は、第3図(a)や第4図(a)に示した、カプトンに傷のないサンプルの場合の波形に似ている。すなわち I_c の波形は、ESDによってトリガーされる最初の電流と、2次アーク電流の、2つの部分からなっている。2次アーク電流のピークは、カプトンに傷のないサンプルに比べ大きいと言える。



第6図 太陽電池セル間のカプトンの傷

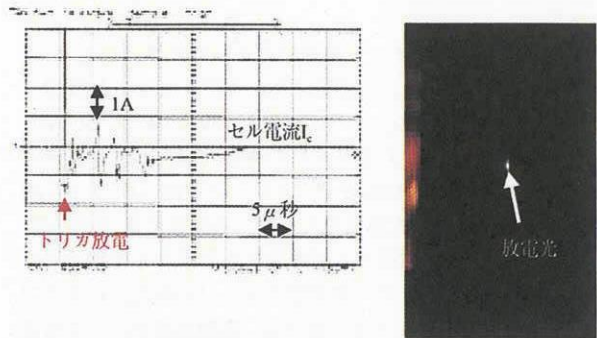


(a) 過渡電流波形 (b) 放電光

第7図 放電発生時の代表的な過渡電流波形と供試体写真 ($d=0.8\text{mm}$, $V_a=30\text{V}$, カプトンに傷あり)

最後に、太陽電池セル間距離 d の影響を調べるために、太陽電池セル間距離 $d=0.5\text{mm}$ 、太陽電池セル間電位差 $V_a=30\text{V}$ の条件で実験した。本実験では、太陽電池セル間において、約 300回の放電を発生させた。第8図に、 I_c の代表的な波形と、放電光の写真を示す。2次アーク電流の値は、他の実験と同程度であった。しかし、第8図(b)に示すように、放電発生前に他の実験では観察されていた弱い発光が本実験では観察されなかった。

なお、各実験において、実験後に太陽電池セル間の電気抵抗を測定し、いずれの供試体も当該部の電気抵抗が $10\text{M}\Omega$ 以上であることを確認した。



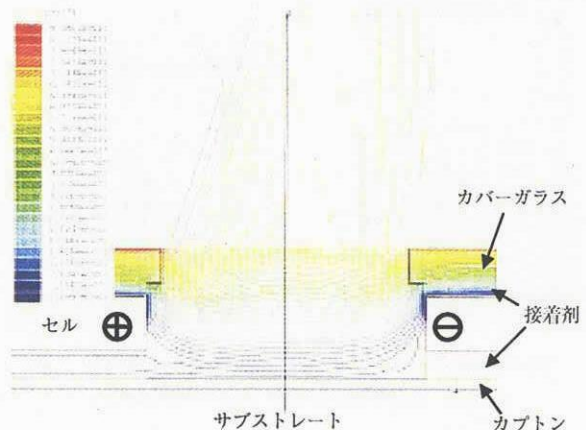
(a) 過渡電流波形 (b) 放電光

第8図 放電発生時の代表的な過渡電流波形と供試体写真 ($d=0.5\text{mm}$, $V_a=30\text{V}$)

4. 考察

実験で得られた I_c および I_s の過渡電流波形から、逆電位勾配が形成されたソーラアレイにおける放電のメカニズムを推測した。

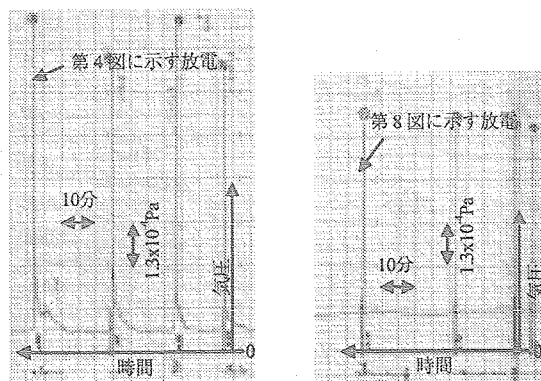
第9図は、太陽電池セル間近傍の電位分布を計算した結果を示したものである。この計算においては、2次電子放出によってカバーガラス表面がサブストレートに対し正に $+800\text{V}$ に帯電し⁸⁾、太陽電池セル間電位差は 50V で第2図のように負極側がサブストレートに接地されているという仮定をおいた。第9図から、太陽電池セルの上端部2ヶ所は、等電位線の集中によって他に比べ高い電界を持つことが分かる。また、太陽電池セル間上部のポテンシャル分布は空間に向かって広がっており、またカバーガラスの厚み方向にも電位の傾斜があることも分かる。したがって、次のような放電メカニズムが考えられる。まず、ESDの引き金となる電子の放出が、等電位線が集中している太陽電池セル上端部のいわゆる3重点(トリプルジャンクション)から始まる。ESDは太陽電池セル間近傍に局所的な濃いプラズマを生成し、太陽電池セル間において電流を誘起する。同時に、プラズマは太陽電池セル供試体全体に拡散する。拡散したプラズマによって、サブストレートに流れる電流 I_s がESD発生後から徐々に増加する。この過渡電



第9図 太陽電池セル間のポテンシャル分布

流は、DC 電源によって電荷が蓄えられたコンデンサ C_0 から供給される。この段階では、サブストレート電流 I_s がメインの電流となり、セル電流 I_c が不安定になる。一方で、コンデンサ C_0 に蓄えられた電荷のほとんどが真空チャンバの壁に抜ける際、サブストレート電流 I_s によって増大したプラズマが太陽電池セル間にも拡散する。拡散したプラズマは、太陽電池セル間を流れる電流 I_c を増加させる。セル電流 I_c は、プラズマが真空チャンバに吸収されるまで、2次アーク電流として流れ続ける。実験結果から、太陽電池セル間電位差 V_a が80V 以下の場合、太陽電池セル間において発生するプラズマの密度は、2次アークを持続させるには不十分であるといえる。

ところで、第3図(b)、第4図(b)、第7図(b)の放電光の写真に見られるように、放電が発生する前に直線的で弱い発光がカバーガラス上で数分間続いたのが観察された。この弱い発光は、太陽電池セル間から放出された電子がカバーガラス表面に衝突したことによるカソードルミネッセンスだと思われる。この弱い発光は、必ずしも実験の初期段階から観察されたわけではなく、何度も放電が発生した後に観察されるようになった。第10図は、実験中の真空チャンバ内の圧力の記録例である。第10図(a)は、第4図に示した放電が発生した時間帯の圧力の変化を示している。第10図(a)では、放電が発生する前に徐々に圧力が高くなっていることが分かる。これは、電子の衝突によってガスが放出されていることを示している。したがって、カソードルミネッセンスの発光は、放電が頻発することによって形成されたエミッションサイトから放出された電子がカバーガラス表面に衝突することによるものと考えられる。比較的早い段階での放電では、第8図(b)のように放電前の発光が見られないため、第10図(b)のように圧力の緩やかな上昇は起こらない。放出された低エネルギー電子は、第9図に示したような太陽電池セル間近傍の電位分布によって生成される電気力によって移動する。



(a) $d=0.8\text{mm}$, $V_a=30\text{V}$

(b) $d=0.5\text{mm}$, $V_a=30\text{V}$

第10図 放電発生時の真空チャンバ内気圧変化

最後に、太陽電池セル間のカプトンの傷の影響について考察する。実験では、第6図に示したような傷をカプトンにつけた。放電の多くは、カプトンに傷をつけた箇所の太陽電池セル間で発生した。しかし、カプトンに傷をつけない場合の実験と同様に、放電は持続しなかった。したがって、2次アーク電流はほとんどが太陽電池セル間に流れていたと考えられる。第7図(a)に示すように、カプトンに傷をつけた場合の2次アーク電流値は、傷をつけない場合に比べ約2倍大きかった。これは、カプトンに傷をつけた箇所から放出された電子によってセル電流 I_c が増加したことを示している。

本実験によって、有害な損傷を与える持続放電の可能性を完全に否定できたわけではないが、太陽電池セル間距離と電位差をコントロールすれば、その可能性は非常に小さくなると考えられる。

5. 結論

逆電位勾配が形成されたソーラレイに有害な損傷を与える放電の発生の可能性を検証するために、宇宙用 GaAs 太陽電池セルを使って電子ビーム照射による基礎実験を行ない、次の結果を得た。

- (1) 太陽電池セル間距離が0.5mm および0.8mm の場合は、太陽電池セル間電位差が80V 以下であれば、ESD によって誘起される2次アークが太陽電池セル間において数回発生するものの、放電が持続することはない。
- (2) 太陽電池セル間のカプトンに傷が付いていたとしても、放電が持続することはない。

今回の実験では実験パラメータが少なかつたが、今後は例えばコンデンサ C_0 の容量や太陽電池セル間距離等のパラメータを数多く振って、実験を継続していく予定である。

参考文献

- 1) H. B. Garrett: The Charging of Spacecraft Surfaces, Rev. Geophys. Space Phys., 19(1981), pp.577-616.
- 2) Proc. Spacecraft Charging Technology, AFGL-TR-77-0051/NASA TMX-73537 (1977)
- 3) Spacecraft Charging Technology -1978, NASA CP-2071/AFGL-TR-79-0082 (1979)
- 4) Spacecraft Charging Technology -1980, NASA CP-2182/AFGL-TR-81-0270 (1981)
- 5) I. Katz, V. A. Davis, E. A. Robertson and D. B. Snyder: ESD Initiated Failures on High Voltage Satellite, Space Environments and Effects, Flight Experiments Workshop, (1998)
- 6) I. Katz, V. A. Davis and D. B. Snyder: Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO, 36th Aerospace Sci. Meeting, AIAA-98-1002 (1998)
- 7) For example, L. Leby, D. Sarrail, V. Viel, E. Amorim, G. Serrot and K. Bogus: Secondary Arcs on Solar Arrays: Occurrence, Thresholds, Characteristics and Induced Damage, Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conf., ESA SP-476, pp.377-382 (2001)
- 8) M. Cho, Private Communication