

Discharge Characteristics on Solar Arrays irradiated with Electron Beam*

Haruhisa FUJII, Hideaki MIYAMOTO
Nara National College of Technology
22, Yata-Cho, Yamatokoriyama, Nara 639-1080

Hideaki KOAKUTSU
Mitsubishi Electric Corporation
1-1-57, Miyashimo, Sagamihara, Kanagawa 229-1195

Abstract

Electron-beam irradiation experiments concerning the arcing discharges on solar arrays for space use were carried out. It is very important to investigate this discharge phenomenon and offer a guideline to design the 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 under several conditions of the cell gap distance and the cell gap voltage below 120V, although a few hundreds of ESD (electrostatic discharge) took place.

Therefore, the high voltage use of solar arrays 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 an adequate distance.

* Presented at the 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

宇宙用太陽電池アレイの電子線照射による放電現象^{注1}

藤井 治久、宮本 英明（奈良工業高等専門学校）
639-1080 奈良県大和郡山市矢田町 22
fujii@elec.nara-k.ac.jp

小坪 秀明（三菱電機株式会社）
229-1195 神奈川県相模原市宮下 1 丁目 1-57

要旨：宇宙機の太陽電池アレイの高電圧化の阻害要因となるアレイ回路高電圧部での宇宙プラズマによる帯電に起因した放電現象を把握し、将来の太陽電池アレイの設計に資するため、電子ビーム照射法により、実太陽電池セル供試体を用いて各種条件下で放電特性を把握した。その結果、セル列間距離を大きくし列間電圧を小さくする設計が放電の抑制に有効であることを確認した。

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開発が活発に行なわれてきた。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。これらの技術開発においては、宇宙機の表面帯電を如何に防止するかということに主眼が置かれていた。一方、昨今の人工衛星や宇宙ステーションなどの宇宙機は、大型化・大電力化の傾向にあり、バス電圧の高電圧化が進められている中、1997 年に米国 100V バス電圧静止軌道衛星 TEMPO-2 で発生電力低下の不具合が発生した。この不具合調査の結果、太陽電池セル回路の高電圧部における放電が原因であるとする可能性が示された[2]。それ以来、衛星にとって有害な不具合となる太陽電池アレイ上での放電現象を明らかにするための研究が活発に行われるようになった[3]。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、筆者らは、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太陽電池アレイ設計に反映しようと考えた[4,5]。ここでは、2 枚の宇宙用 GaAs 太陽電池セルを供試体として、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。放電（ESD：Electrostatic Discharge）が発生した際の過渡電流を測定し、その放電電流に及ぼすセル列間距離、セル列間印加電圧の影響を中心に検討した。

2. 実験方法

図 1 に、受光面にカバーガラスが接着された 76x37mm²の GaAs 太陽電池セルを使用した供試体の概略図を示す。太陽電池セルは、25 μ m 厚のカプトンフィルムが接着された厚さ 1 mm、100x100mm²のアルミ基板に、2 枚のセル長辺同士が距離 d (mm) を確保するように接着されている。太陽電池セルギャップを向く辺以外の 3 辺はシリコー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。

図 2 に、実験系の概略図を示す。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 1.3×10^{-4} Pa の真空状態にした。供試体は DC 電源によって 9kV (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、0.1~0.3 nA/cm² 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ス表面は太陽電池セルおよび基板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 バッテリーを直列に接続した DC 電源 (V_a) を使用して、太陽電池アレイ上の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電流 I_c (列間電流と呼ぶ) を、もう 1 つは供試体と接地された真空容器との間に流れる電流 I_s (基板電流と呼ぶ) を計測した。

また、放電の発生は、電離真空計による真空度の変化からも確認した。チャンバの窓から、放電発生時の写真も撮影した。

さらに、宇宙機の太陽電池アレイ全体のカバーガラスに蓄積した電荷を模擬するため、コンデンサ C_a を DC 電源 (V_b) に並列に挿入した。セル列間の静電容量を模擬するため、コンデンサ C_a を列間に挿入した実験も行なった。

実験は全て室温にて実施した。

^{注1} 第 7 回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて 2004 年 9 月 16、17 日開催

3. 実験結果

前節で述べた方法により、太陽電池セル間距離 d と電位差 V_a 、外部コンデンサ容量 C_b を主に変化させ、一部列間にコンデンサ C_a を挿入した実験も実施した。

3.1 列間電圧の放電特性に与える影響

まず、列間距離が $d=0.8\text{mm}$ の場合について、列間電圧 V_a を変えた場合の放電特性について述べる。図3(a)に、 $V_a=30\text{V}$ の条件で放電が発生したときの列間電流 I_c の波形の一例を示す。この図から、ESDが発生した後、電流が不安定になる期間はあるが、ほぼ $16\mu\text{s}$ 間放電電流が継続していることがわかる。また、このときの放電時の発光の様子を同図(b)に示している。セル列間の中央付近で放電が観測された。しかし、その放電が発生する前に放電箇所とは別の箇所でも弱い直線的な発光が見られた。これは、放電前にセルエッジから発生した電界放出電子がカバーガラス表面をたたきカソードルミネッセンスが生じたものと考えられる[4,5]。次に、同じく $d=0.8\text{mm}$ 、 $V_a=77\text{V}$ の場合の代表的な放電電流波形(I_c 、 I_b)と、そのときの発光状況を図4に示す。この場合、列間電流 I_c はESDが起こった後ほぼ $35\mu\text{s}$ 続いている、図3(a)と比較すると放電時間が長くなっていることがわかる。また、放電時の写真では、図3(b)と同様に、前駆発光と放電光が見られる。

次に、列間 $d=1.0\text{mm}$ の場合に関し、図5に、列間電圧 V_a を $V_a=80\text{V}$ 、 100V 、 120V と変えた場合の放電電流波形(I_c 、 I_b)を示す。 $d=0.8\text{mm}$ の場合と同様に、 V_a が大きくなるにつれて放電時間は長くなっていることがわかる。なお、 $d=1.0\text{mm}$ の場合は、 $d=0.8\text{mm}$ の場合に比較して放電の発生頻度が低く、放電時間も短かった。

3.2 列間距離の放電特性に与える影響

図6に、 $d=0.5\text{mm}$ 、 $V_a=30\text{V}$ の場合の列間電流波形を示している。これと同じ $V_a=30\text{V}$ である図3(a)の $d=0.8\text{mm}$ の場合と比較すると、 d が小さくなれば放電時間は長くなることがわかる。同様に、 $V_a=80\text{V}$ である、 $d=0.8\text{mm}$ の図4(a)と $d=1.0\text{mm}$ の図5(a)を比較すると、この場合も d が小さくなれば放電時間は長くなった。いずれのケースも、言い換えれば、同じ列間電圧 V_a では列間距離 d が大きくなると放電時間は短くなる。

3.3 外部コンデンサ (C_b) の影響

ここでは、太陽電池アレイのカバーガラスに蓄積された電荷量を模擬するために接続されたコンデンサ C_b の容量を変えた場合の放電電流波形を比較した。図7に、放電時間と放電電流(ESD発生後の放電電流値)の関係を外部コンデンサ容量 C_b をパラメータとして示している。この図から、 C_b が大きくなれば放電時間もその電流値も大きくなることがわかる。つまり、列間に供給される電荷量が大きくなることを示している。

3.4 列間コンデンサ (C_a) の影響

ここでは、太陽電池アレイ列間に発生する静電容量の影響を見るために、図2に示したように、供試体列間にコンデンサ C_a ($=1\mu\text{F}$)を接続した場合の放電電流を測定した。この場合、図2に示すように、3個のCTを使って放電電流波形を測定した。結果の一例を図8に示す。

図8(b)から明らかなように、 C_a を接続するとCT3(CH3)に流れる電流は約 $150\mu\text{s}$ 間流れ続けるが、列間に流れる放電電流 I_c (CH1)は、 C_a の無い同図(a)とほぼ同じ放電時間である。しかし、電流値は、 C_a をつないだ場合4倍程度大きくなるということがわかる。なお、CT3で観測される電流が長くなるのは、列間での放電に供給されたコンデンサ C_a の電荷を、バッテリーからコンデンサ C_a に再充電するための電流が流れたためと考えられる。

なお、この場合、供試体に照射される電子のエネルギーを 1keV として、バイアス電圧 V_b が放電電流に与える影響を見るため、 $V_b=5\text{kV}$ 、電子加速電圧を -6kV としたが、図8(a)と図5を比較しても有意差は見られなかった。

以上、種々の条件で実験を行い、各供試体で200~300回程度の放電を生じさせたが、長時間の持続放電は観測されず、また、試験後の列間の抵抗も $>10\text{M}\Omega$ と絶縁の劣化はなかった。

4. 考察

実験で得られた放電電流波形から、逆電位勾配が形成された太陽電池アレイにおける放電のメカニズムを推測した[4,5]。

図9は、太陽電池セル間近傍の電位分布をMaxwell SVで計算したものである。この解析においては、2次電子放出によってカバーガラス表面が基板に対し $+800\text{V}$ に帯電し[6]、太陽電池セル間電位差は 50V で、図2に示すように負極側が基板に接地されていると仮定した。図9から、太陽電池セルの上端部2箇所は、等電位線の集中によって他に比べ電界強度が高くなっていることがわかる。また、太陽電池セル間上部の電位分布は空間に向かって広がっており、また、カバーガラス厚み方向にも電位の傾斜があることがわかる。この解析から、次のような放電メカニズムが考えられる。

まずESDのトリガーとなる電子の放出が、等電位線の集中している太陽電池セル上部のいわゆるトリブ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、供試体全体に拡散する。拡散したプラズマによって、基板に流れる電流 I_b がESD発生後から徐々に増加する。この放電電流 I_b は、外部DC

電源によって電荷が蓄えられたコンデンサ C_b から供給される。この段階では基板電流 I_s がメインの電流となり、列間電流 I_c は不安定になる。一方で、コンデンサ C_b に蓄えられた電荷の殆どが真空チャンバ壁に抜ける際、基板電流 I_s によって増大したプラズマが太陽電池セル間を流れる電流 I_c を増加させる。列間電流 I_c は、プラズマが真空チャンバに吸収されてしまうまで2次アーク電流として流れ続ける。実験結果から、今回の試験条件下では、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のに不十分であるといえる。また、同じ列間距離であれば、列間電圧が高くなるとトリプルジャンクション部の電界強度が大きくなるので放電が起こりやすく、一旦ESDがトリガーされると2次アーク電流を維持するための電圧も高いので放電時間も長くなる。

次に、コンデンサ C_b の影響について検討する。上述したように、ESDがトリガーされた後基板電流 I_s はコンデンサ C_b から供給されるが、この C_b が大きければ、基板周囲に形成されるプラズマ密度が濃密になりセル列間の導電性が増す。このため、列間電流 I_c が大きくなるとともに、放電時間も長くなると考えられる。

列間距離の影響に関して、同じ電圧が印加されれば列間距離 d の大きい方がトリプルジャンクションの電界強度が弱まることによりESDが生じ難くなるとともに、例えば放電が生じたとしても、列間の平均電界 (V_a/d) が小さいので、放電を維持しづらくなり、放電時間は短くなると考えられる。

したがって、列間電圧を小さくし、列間距離を大きくする設計が放電の抑制に有効であるといえる。

最後に C_a について検討する。ESDがトリガーされると列間の静電容量成分に蓄積された電荷が放出されるため、 C_a を接続することにより放電電荷が大きくなるが、必ずしも C_a に蓄積された電荷全てが列間放電に供給されず、一部が列間電流に寄与するのみである。(図8(b)からすると10%程度である)。さらに、放電時間は C_a に影響を受けないことから、放電時間は列間電圧が大きく影響すると考えられる。

5. まとめ

GaAs セル列間距離とそこに掛かる電圧を種々変化させ、電子ビーム照射によりカバーガラス上に逆電位勾配を形成した実験系で実験を行なった結果、

- (1) 現状の試験結果では、放電時間は短く放電の影響が小さいことを確認した。
- (2) 列間電圧を小さくし、列間距離を大きくする設計が放電の抑制に有効であることを確認した。
- (3) 放電が200~300回程度発生しても列間の絶縁性能に影響が小さいことを、全試験ケースについて確認した。

今後、更にパラメータを振り、放電が発生しても列間の絶縁性能に影響がないことを実証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] 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)
- [3]例えば、L. Levy, 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 (2001) pp.377-382
- [4] H.Fujii and H. Koakutsu: Electron-beam-induced ESD triggering discharge tests of solar arrays for space use, 8th Spacecraft Charging Technology Conference, NASA/CP-2004-213091 (2004)
- [5] 小坪・藤井: 宇宙用ソーラアレイの電子ビーム照射 ESD 試験、第6回宇宙飛行体環境研究会報告書、JAXA-SP-03-001 (2004) pp.49-52
- [6]趙: 私信

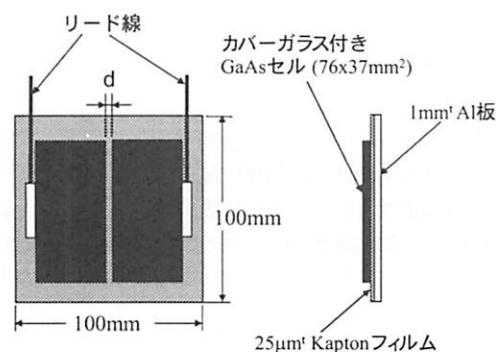


図1 供試体

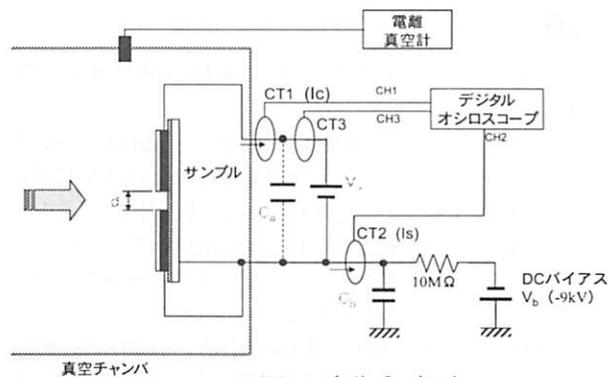
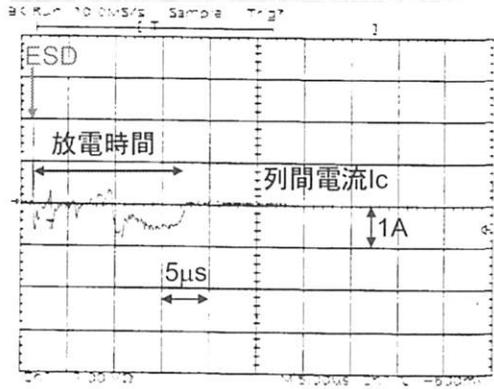
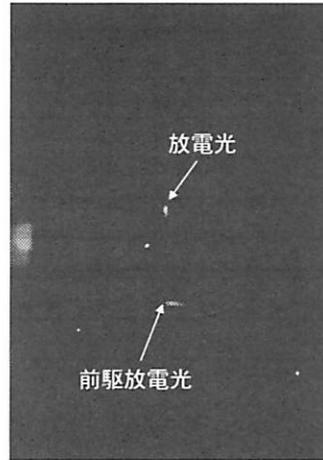


図2 実験系の概略

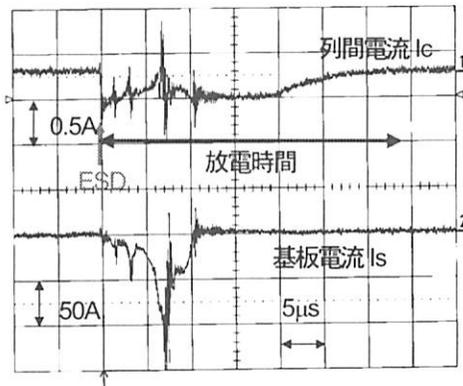


(a)放電電流波形

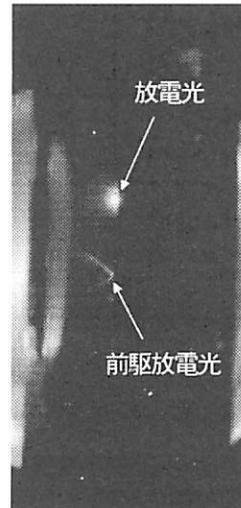


(b)放電時の発光の様子

図3 $d=0.8\text{mm}$ 、 $V_a=30\text{V}$ における放電時の電流波形と発光 ($C_b=62\text{nF}$)

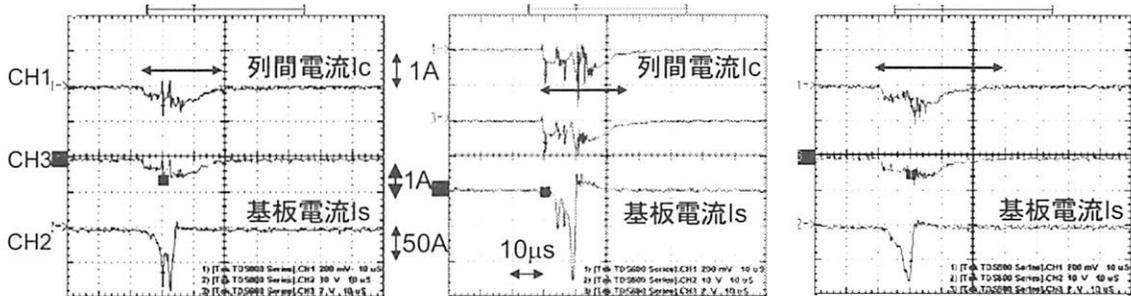


(a)放電電流波形



(b)放電時の発光の様子

図4 $d=0.8\text{mm}$ 、 $V_a=77\text{V}$ における放電時の電流波形と発光の様子 ($C_b=62\text{nF}$)



(a) $V_a=80\text{V}$

(b) $V_a=100\text{V}$

(c) $V_a=120\text{V}$

図5 $d=1.0\text{mm}$ の場合の V_a による放電電流波形の変化 ($C_b=62\text{nF}$)

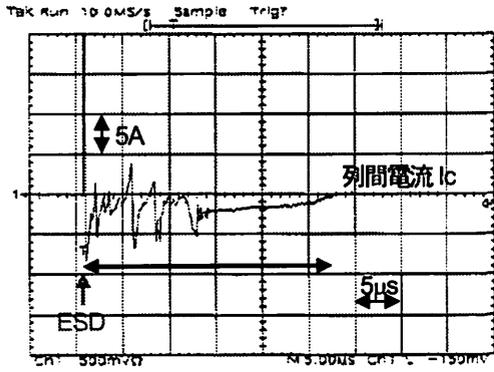


図6 $d=0.5\text{mm}$, $V_a=30\text{V}$ の場合の放電電流波形 ($C_b=62\text{nF}$)

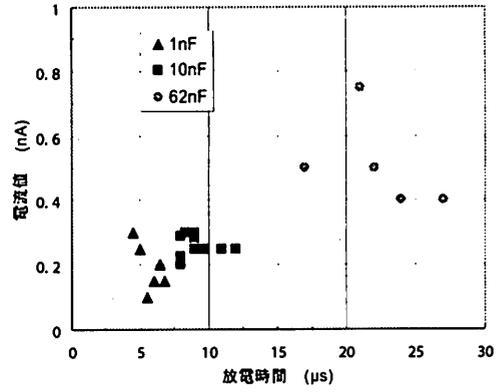
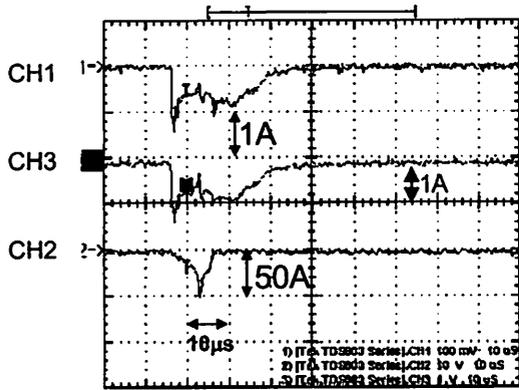
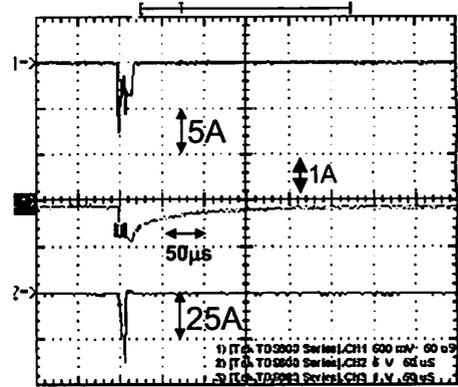


図7 外部コンデンサ C_b を変えた場合の放電時間と放電電流の関係 ($d=1.0\text{mm}$, $V_a=80\text{V}$)



(a) C_a なし



(b) $C_a=1\mu\text{F}$

図8 列間コンデンサ C_a の放電電流に及ぼす影響 ($d=1.0\text{mm}$, $V_a=90\text{V}$, $C_b=62\text{nF}$)

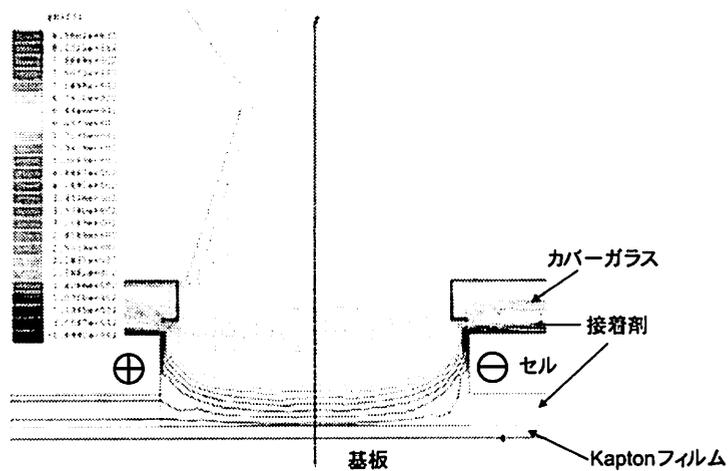


図9 列間の電位分布