

超高速インターネット衛星搭載用太陽電池アレイの地上放電試験*¹

ESD Ground Test of Solar Array for a Wideband InterNetworking Satellite

豊田 和 弘*²・松本 利 明*^{3,*4}・志方 吉 夫*⁵・趙 孟 佑*⁶
Kazuhiro TOYODA, Toshiaki MATSUMOTO, Yoshio SHIKATA, Mengu CHO,
佐藤 哲 夫*⁷・野崎 幸 重*⁸
Tetsuo SATO and Yukishige NOZAKI

Key Words: Solar Array, Substorm, Inverted Potential Gradient Conditions, Arc Discharge, Charging

Abstract: An ESD (Electro-Static Discharge) test was carried out on solar array for Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite (WINDS). An electron beam was used to simulate the inverted potential gradient conditions. The sustained arc was not observed for test coupons with Room Temperature Vulcanization (RTV) Si grouting at the inter-string gap and thicker RTV layer between cells and Kapton sheet. Arc pulses short-circuited the PN junction of triple-junction cells once the arcs occurred at the cell edges. Effects of exposing bus bars to space without RTV coating was also investigated. There was no detrimental effect associated with the exposed bus bars.

記 号

ϕ_{bias} : アレイ電位
 C_{ext} : 外部コンデンサ静電容量
 V_e : 電子ビーム加速電圧
 t_{exp} : 実験時間
 Δp : 放電による圧力上昇値
 I : 放電電流ピーク値
 Q_{ext} : 外部コンデンサに貯えられた電荷量
 Q : 電荷量
 添 字
 ave : 平均
 std : 標準偏差

1. は じ め に

ここ十年で、静止軌道(GEO)衛星の電力レベルは10kW近くまたはそれ以上に急激に増加した。大電力を効率良く運用するために、衛星のバス電圧は100Vまで増加し、近年では多くの衛星が100V発電の太陽電池アレイを採用している。

太陽電池アレイの発電電圧が100Vを超えるようになって

て、サブストーム時に太陽電池アレイ上で発生する放電現象が、時として太陽電池アレイの安定した電力供給を脅かす深刻な問題として認識されるようになった。GEOでは、衛星が太陽光に照らされている時、衛星の帯電現象においては光電子が支配的になる。強い電子フラックスの流入などがない静かな条件下では、衛星表面が太陽光で照らされている限り、光電子が衛星表面から放出されることによって衛星電位は周辺のプラズマ電位から数eV以内に保たれる。この時カバーガラスなどの絶縁体表面も衛星電位と同様な電位を持つ。衛星がサブストームに見舞われた時、高エネルギー電子による電流が増加し、場合によっては光電子による電流を上回ることがある。その時、衛星構体と絶縁体表面の電位は共に負になる可能性がある。また2次電子放出係数の違いによって、絶縁体の表面電位は衛星構体よりもゆっくりと負に落ちることがある。このためサブストームの間、カバーガラスの表面電位は近くにある導体、つまりインタコネクタよりも正になりうる。この状態を逆電位勾配とよぶ。カバーガラスとインタコネクタの間に電位差が生じると、放電が発生する恐れがある。

逆電位勾配は、低地球軌道(LEO)上で通常形成されており、カバーガラスとインタコネクタの乖離電圧が100~200Vに達すると、放電が発生する可能性がある¹⁾。このようにして発生する単発の放電を「トリガ放電」とよぶ。トリガ放電がアレイ自身からエネルギーを受け取り、大災害を引き起こす放電へと成長する危険性が、衛星の電力レベルの増加にともなって増加している。静止軌道衛星TEMPO-2は、1997年に厳しいサブストームに見舞われ、太陽電池アレイの出力電力の15%以上を永久に失う事故に遭った。こ

*¹ © 2004 日本航空宇宙学会
平成16年2月18日原稿受理

*² 千葉大学工学部

*³ 九州工業大学

*⁴ 現 三菱電機特機システム(株)

*⁵ 九州工業大学大学院

*⁶ 九州工業大学工学部

*⁷ 宇宙航空研究開発機構

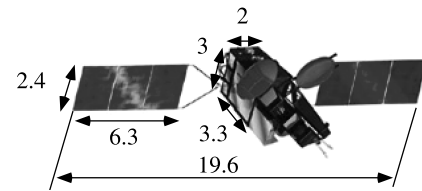
*⁸ NEC 東芝スペースシステム(株)

の故障は逆電位勾配下における太陽電池アレイ上での放電によって引き起こされた²⁾。最初に、電位差のある隣り合った太陽電池アレイの列間で放電が発生し、2つの列は短絡する。その時、太陽電池アレイ2列の出力電力が放電プラズマに供給される。放電電流は流れ続け、そのすぐ下に存在するカプトンの絶縁層は熱的に破壊され、アレイの列と基板の間で短絡する。本論文ではこのような放電を「持続放電」とよぶ。

TEMPO-2の事故以来、世界中の研究機関で持続放電の問題が調査されてきた。趙らは技術試験衛星8型(ETS8)に搭載される太陽電池アレイの放電試験を行った³⁾。彼らは実験室での試験で、カバーガラスと導体という異なる2次電子放出係数を持った部材間で、逆電位勾配が起きることを実証した。その試験結果から、トリガ放電が発生するための乖離電圧の閾値は400Vであった。太陽電池アレイの列とCFRP基板の間の持続放電は、カプトンシートに傷をつけた状態で、110Vの電位差、2.64Aの電流容量を与えることによって発生した。この試験結果から曝露しているカプトンシートの傷を最小限に食い止める予防策がとられた。太陽電池セルとカプトンシートの上に塗布されているRTVシリコンゴム(RTV)の厚さを、初期にデザインされていた50 μm から70~100 μm へと増加させた。それに加えて、インタコネクタ近くのカプトンシートの上にセルの下からRTVをはみ出させた。

豊田らはETS8太陽電池アレイでの放電試験の結果、トリガ放電であっても太陽電池アレイの出力を低下させる危険性があることを発見した⁴⁾。過度なRTVの塗布は、トリガ放電によってシリコン蒸気が発生することで、カバーガラス表面にひどくコンタミを形成する結果となった。また、セルのPN接合が短絡し、セルが短絡することによって列の出力電力低下が見られた。文献4)で発見された結果は、単発のトリガ放電が軌道上で発生し回数を重ねていくことで、太陽電池アレイの出力電力が徐々に減少していくことを示唆している。これまで、GEOでのトリガ放電が電力低下に与える影響については放電が有限のパルス幅を持っている限り無視されてきた。もし軌道上でくり返し発生するトリガ放電が、実際に太陽電池アレイを劣化させていくとすれば、バス電圧によらずどの衛星でも逆電位勾配によってトリガ放電は発生するため、我々はトリガ放電による太陽電池アレイの劣化に気付いてははずである。

我々がそのような電力低下に気付かなかった理由として考えられる可能性は3つある。1つには太陽電池セルへの放射線量の影響が過大評価されていたということが考えられる。2つめには、放射線量の影響と区別できるような影響を与えられるまで多くのトリガ放電が、衛星寿命の期間には発生しなかったことが考えられる。3つめには、太陽電池アレイ面積に比例する衛星の電力レベルが低いいため、各々のトリガ放電のエネルギーが電力劣化を引き起こすまで大きくなかったことが考えられる。もし3つめの仮定が正しいならば、トリガ放電による電力低下は、近い将来、太陽電池アレイが大型化し、カバーガラスの総静電容量が増加す



第1図 WINDSの軌道上での概念図, 単位(m)

るに従って拡大するかもしれない。そのような場合、衛星寿命期間中の電力低下を見積もり、衛星電力システムのデザインに反映するためのモデルが必要である。

一度、トリガ放電が発生すると、そのエネルギーは衛星と宇宙空間の間の静電容量、カバーガラスの静電容量と、2種類の静電容量によって供給される。衛星静電容量は典型的に100pFのオーダーであり、トリガ放電の初期の部分を持っている。トリガ放電が発生した時、放電部からは電子が放出され、負に帯電していた衛星電位は急速に0に到達する。その時、カバーガラス表面はプラズマ電位に対して正電位になる。トリガ放電の放電プラズマは、カバーガラス表面に貯えられた電荷を中和し、その電荷は放電電流として流れる。したがって、カバーガラスの静電容量はトリガ放電の規模を拡大させるという一面を持っている。近年の大電力衛星では、カバーガラスの総静電容量は10 μF かそれ以上になる。カバーガラスと太陽電池アレイ列の間の電位差が1kVであれば、トリガ放電に供給される静電エネルギーは1J以上になる。Leungは非常に大きな太陽電池アレイクーポン(約30インチ四方の大きさに11 \times 19セル)を用いて放電試験を行った⁵⁾。彼はトリガ放電による放電プラズマがクーポンの端まで広がり、トリガ放電発生前にカバーガラスに貯えられた電荷量のほとんどを中和したことを観測した。

本論文では、2005年に宇宙航空研究開発機構によって打上げ予定の超高速インターネット衛星(Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite: WINDS)に搭載される太陽電池アレイ上での放電試験の結果について報告する。第1図はWINDSの概念図を示している。衛星に搭載される太陽電池アレイは3接合セルによって最大55Vの発電電圧で、6kWの電力を発生する。衛星バス電圧は50Vである。放電試験の目的は以下の通りである。

- ・耐持続放電性能の確認
- ・セル端に塗布したRTVの量がトリガ放電による電力低下に与える影響の調査
- ・太陽電池アレイのフライトデザインの決定

WINDSの太陽電池アレイのデザインはETS8のデザインを基本としている。WINDSはETS8で使用されたシリコンセルの代わりに、3接合セルを使用するため、カバーガラス材質の違いが逆電位勾配下で異なる振る舞いをするのが考えられる。また、WINDSはETS8とは違いイオン推進器を使用しないため、イオン推進器プルームからの逆流によって生じる高密度プラズマへの電流漏洩を避ける

ために、アレイ列終端の金属部（バスバー）に RTV を塗布する必要がない。そこで静電放電に関して、むき出されたバスバーが新たな問題を引き起こさないことを確認する必要がある。ETS8⁴⁾ では太陽電池アレイの電力低下が見られたが、衛星寿命の期間内に生じる電力低下を正確に見積もるために、電力低下についての更なる研究が必要である。本論文では最初に試験システムについて述べ、次に試験結果を議論する。最後に太陽電池アレイのフライトデザインを述べることによって結論とする。

2. 実 験

2.1 太陽電池アレイクーポン WINDS は 2 翼で 292 並列の太陽電池アレイを有しており、1 並列あたり 29 枚の国産の III-V 族化合物半導体制 3 接合セルが直列接続されている。各列の出力電圧は 55 V であり、出力電流は 0.6 A である。パドル上の列の配置により、隣り合うセル間の最大電位差は 55 V となっている。太陽電池セルの上に接着されているカバーガラスは Thales 社の CMG-100-AR であり、厚みは 100 μm である。カバーガラスの静電容量は 1 セルあたり約 0.76 nF であり、片翼で約 4200 枚のセルがあることから、片翼で 3.2 μF の静電容量がある。

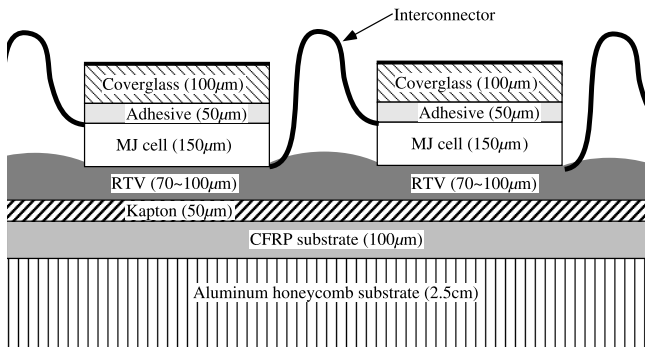
試験には 3 枚の太陽電池アレイクーポンを用いた。太陽電池アレイクーポンの断面図を第 2, 3 図に、クーポンの概要を第 1 表に示す。3 枚のクーポンは ETS-8 での研究成果を反映してセルとサブストレート間の接着剤層を 100 μm にしているが、クーポン 2, 3 は ETS-8 同様太陽電池アレイ

イ回路周辺の接着剤塗布量を控えめにし、クーポン 1 は多めにした。クーポン 2, 3 は列間に列間持続放電を防ぐために RTV を塗布しているが、コンタミの発生を防ぐために RTV は絶縁を保つ必要最低限の量、つまり、セルの端を覆い隠す程度しか塗布していない。クーポン 2 はバスバー上に RTV を塗布しているが、クーポン 3 では塗布されていない。これまでの ETS-8 で開発された基本的なデザインでは、イオンエンジン排気ジェットを模擬したプラズマ環境下においてプラズマを介在して漏洩する電流を抑制するためにバスバー上に RTV を塗布していたが、RTV はコンタミの原因となり、RTV を塗布することによって太陽電池アレイの重量も増加することから、塗布する必要がないのであれば少ない方が望ましい。そのためバスバーに RTV を塗布せず、それによる不具合の可能性を調べるためにクーポン 3 を用いた。

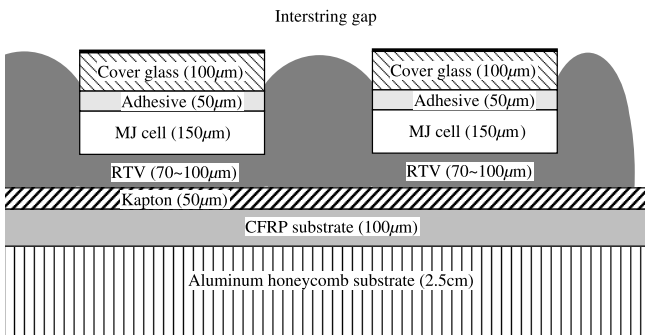
ETS-8 の試験では、インタコネクタ上の放電ではなく、セル側面で放電することによってセルが破損しているのを確認した。クーポン 1 では RTV 塗布量を多めにしたため、列間だけではなく直列セル間にも RTV がしみ出し、結果として直列セル間が RTV で埋まったような形になった（第 3 図）。これによりセルと空間との絶縁が確保され、インタ

第 1 表 クーポン概要

Coupon	Amount of RTV	Bass bar coating
1	large	yes
2	normal	yes
3	normal	no

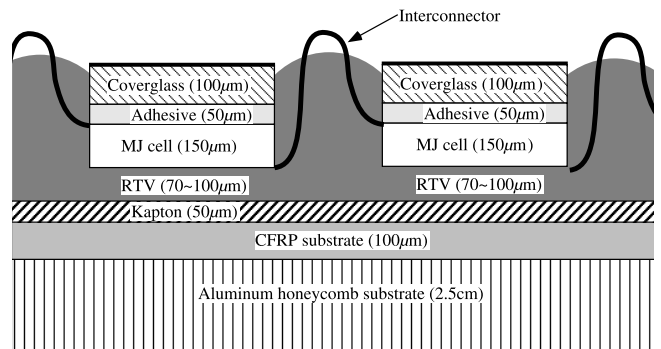


(a) 直列方向断面

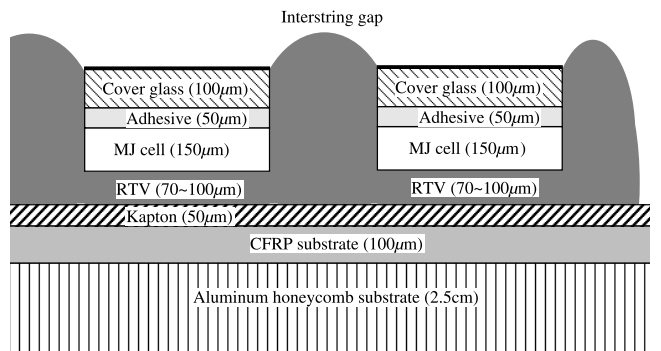


(b) 並列方向断面

第 2 図 クーポン 2, 3 断面図

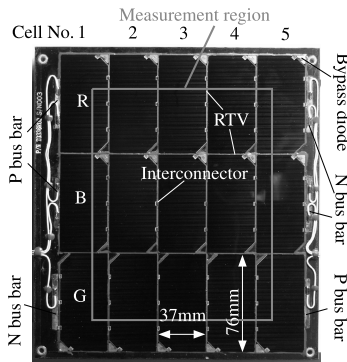


(a) 直列方向断面



(b) 並列方向断面

第 3 図 クーポン 1 断面図



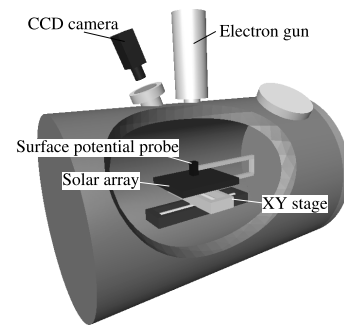
第4図 クーポン概観

コネクタのような導体以外での放電発生を抑制し、放電によるセル破損が抑制されることが期待される。このクーポンではバスバーはRTVで覆われている。

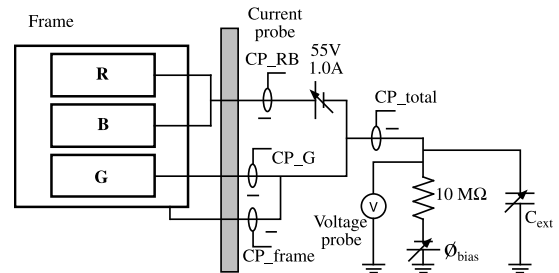
第4図に太陽電池アレイクーポンの概観図を示す。クーポンは厚さ $150\ \mu\text{m}$ の3 接合太陽電池セル ($76\ \text{mm} \times 37\ \text{mm}$) 15 枚によって構成されており、5 枚のセルが直列に接続されたものが3 列接続されている。セルの角にはバイパスダイオードが取り付けられており、通常ならセル自身がダイオードであるために発電電流が流れる向きに電流は流れないが、バイパスダイオードによってセルが発電していない場合でも電流を流すことができる。ここでは簡単のため図のように R, B, G とそれぞれの列に名前をつけた。また、セルには1~5 と名前をつけた。R 列と B 列はクーポン裏面で並列に接続されており、これらのセルは試験中必ず同一の電位を持つことになる。セルは厚さ $50\ \mu\text{m}$ のカプトンフィルムの上に接着されている。カプトンフィルムは、アルミハニカム（厚さ $25\ \text{mm}$ ）の上に貼付けられた CFRP シート（厚さ $0.1\ \text{mm}$ ）の上に貼付けられている。クーポンの側面は全てカプトンフィルムによって覆われている。太陽電池アレイの各列はバスバーを介して裏面のコネクタに接続されている。太陽電池アレイは、コネクタに接続されたケーブルによって真空タンクの高電圧電流導入端子を介して外部回路へと接続されている。

全てのクーポンは出荷前に工場では、フライト用の太陽電池パネルに対して実施するものと同じ条件でベーキングが施されている。工場から研究室へのお荷にあたり、アレイ表面には特別な処理は施されていない。全てのクーポンには大気中から真空タンク内に設置され真空排気後に必ず $70 \pm 1^\circ\text{C}$ で2 時間ベーキングが行われており、真空タンクから取り出された後、顕微鏡撮影後に電気性能試験のため工場へ送られる。試験中は $40 \pm 1^\circ\text{C}$ に保たれている。

2.2 測定系 第5図に測定系の概念図を示す。太陽電池アレイは直径 $0.6\ \text{m}$ 、長さ $0.9\ \text{m}$ の真空タンク内に、セル面を上にしてアクリル板の上に配置されている。クーポンは真空タンクとは電氣的に絶縁されている。真空タンクはターボポンプによって真空排気されており、試験前は $10^{-5}\ \text{Pa}$ まで排気することが可能である。また、試験中は約 $1 \times 10^{-3}\ \text{Pa}$ 前後であり、中性粒子密度は約 $2 \times 10^{17}\ \text{m}^{-3}$ 程度である。



第5図 測定系概念図



第6図 実験回路

クーポンの真上には電子ビーム銃（ULVAC RHEED）が取り付けられており、照射される電子ビームの中心とクーポンの中心は一致している。最大 $30\ \text{keV}$ の電子を照射することが可能で、実験で主に使用された $3\ \text{kV}$ のビームエネルギーでは、電子ビームはクーポン上で電流密度のピーク値が約 $10\ \text{mA}/\text{m}^2$ で直径約 $150\ \text{mm}$ のガウス分布をしている。

XY ステージには表面電位プローブ（Trek probe, Model-341）が取り付けられており、クーポン表面の電位分布の2次元計測が可能である。この表面電位計は $\pm 20\ \text{kV}$ まで測定可能である。プローブはクーポンから $5\ \text{mm}$ の距離を保って移動する。第4図に示した $180 \times 140\ \text{mm}$ の領域を $10\ \text{mm}$ 間隔で計測した。計測は、ステージの制御およびデータ取得をPCで自動制御することによって行われ、1 回の計測に約7分を要する。

放電は放電位置特定システムによって測定された。このシステムでは、CCD カメラにより撮影されるアナログ信号はADコンバータによってデジタル動画ファイルとしてPCに接続されたハードディスク内にリアルタイムに保存され、実験後にコンピュータプログラムによって放電位置が特定される⁶⁾。

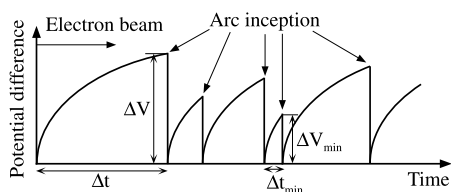
2.3 実験回路 第6図に実験回路を示す。太陽電池アレイから外部回路へは真空タンクに取り付けられた高電圧電流導入端子を介して接続されている。太陽電池アレイは高電圧電源（Glassman EW $60\ \text{kV}$ ）によって負にバイアスされており、放電電流が直接電源に流入するのを避けるため、太陽電池アレイと電源の間には $10\ \text{M}\Omega$ の制限抵抗が接続されている。この制限抵抗の直後には高電圧プローブ（Tektronix P-5100）が接続され、アレイ電位 ϕ_{bias} を測定することが

できる。R, B 列と G 列, 基板の間には, 発電時の列間電位差を模擬するために直流電源 (Takasago GP110-5R) が接続されており, 通常は 55 V の電位差を持った定電圧電源として動作し, B 列と G 列が短絡した場合には 1.0 A の定電流電源として動作する。

放電電流はそれぞれの位置で測定され, 図中の CP_RB と CP_total は直流成分から 10 MHz までを測定可能な電流プローブ (HIOKI 3274) を用い, CP_G, CP_frame には 8.5 kHz から 100 MHz まで測定可能な電流プローブ (Tektronix P6022) を用いた。電流プローブと高電圧プローブは 2 台の 4 チャンネルオシロスコープ (Tektronix TDS224, 100 MHz) に接続されており, 高電圧プローブによって測定されるアレイ電位の放電による上昇をトリガとして放電波形が測定される。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, 順次 PC に取り込まれる。

回路には放電プラズマによって取り込まれるカバーガラスの帯電電荷量を模擬するために, 外部コンデンサが接続されている。この外部コンデンサの容量は, 放電発生時にカバーガラスに貯えられている静電エネルギーと同程度に設定するため, 放電発生に必要な乖離電圧の閾値を測定する必要がある。そのため, 乖離電圧の放電閾値測定後にコンデンサ容量を決定した。放電閾値測定については 2.4 で詳しく述べる。

2.4 放電閾値決定方法 外部コンデンサの容量を決定するために, 乖離電圧の放電閾値を測定した。第 7 図に電子ビームによる帯電放電の模式図を示した。プラズマを生成することによってカバーガラス表面の電荷を除電した太陽電池アレイにエネルギーが一定の電子ビームを照射すると, 図のようにあるカーブを持ってカバーガラスの電位は上昇していく。このカーブは電子ビームのエネルギーと電流密度を一定にした場合には等しくなる。電子ビームを照射してから時間 Δt 後, カバーガラスの乖離電圧 ΔV がある値になると放電が発生し, カバーガラスの帯電電荷の大部分が放電プラズマに取り込まれ乖離電圧はほぼ 0 に戻る。放電が起きている最中にも電子ビームは照射され続けているため, カバーガラスは再び帯電し, 乖離電圧が上昇する。放電が発生してから次の放電が発生するまでの時間が最小になる時に放電に必要な乖離電圧も最小となるため, 放電閾値は ΔV_{\min} となり, 放電後カバーガラスの電位が 0 になった状態から電子ビームを照射することによって乖離電圧 ΔV_{\min} を生み出すのに必要な時間は Δt_{\min} となる。放電閾値測定ではまず, 太陽電池アレイを -3 kV にバイアスし, 3 keV の電子ビームを 1 時間照射することによって



第 7 図 電子ビーム照射による帯電放電の模式図

複数回の放電を発生させ, 放電間の最小時間 Δt_{\min} を測定した。その後ビーム照射を行って, 放電が発生してから Δt_{\min} 後に電子ビーム照射を止め, カバーガラスの表面電位分布を測定することにより放電閾値を求めた。

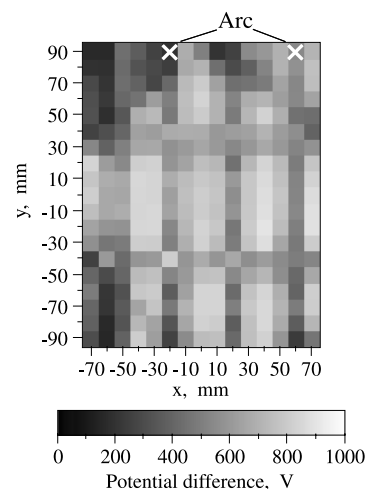
放電閾値測定にはカバーガラスが WINDS に使用されるものと等しいクーポンを使用した。クーポンを -3 kV にバイアスし, 100 nF の外部コンデンサを接続した。 3 keV の電子ビームを 1 時間照射し, 複数の放電を発生させたところ, 放電間の時間間隔の最小値 Δt_{\min} は 4 秒であった。次に電子ビームを照射し, 放電が発生してから 4 秒後に電子ビーム照射を止め, カバーガラスの表面電位分布を測定した。その結果を第 8 図に示す。図に示した \times 印は Δt が 4 秒であった 2 回の放電位置を示しており, いずれの放電もインターコネクタ上で発生した。インターコネクタの電位はバイアス電圧と等しいため, 放電発生箇所の乖離電圧は低くなっている。実際に放電を発生させる要因となった放電発生点周辺のカバーガラス上の乖離電圧の最大値は約 800 V であった。これにより乖離電圧の閾値 ΔV_{\min} を 800 V に定めた。

放電直前にカバーガラスに貯えられている電荷の静電エネルギー U_{cg} は, 式 (1) のように表される。

$$U_{cg} = \frac{1}{2} C_{cg} \Delta V_{\min}^2 \quad (1)$$

ここで C_{cg} は全てのカバーガラスの総静電容量である。WINDS では片翼で約 $4 \mu\text{F}$ の静電容量があり, 実験により求められた 800 V の ΔV_{\min} を用いると, 式 (1) より静電エネルギーは 1.28 J となる。この結果から放電試験では放電へ供給される静電エネルギーが 1.28 J に近くなるように, 外部コンデンサの静電容量を決定した。

試験では $-3, -4, -6 \text{ kV}$ のバイアス電圧を用いた。試験によってバイアス電圧が異なるため, 静電エネルギーを同程度にするために静電容量も変える必要がある。そこで, それぞれ $400, 200, 100 \text{ nF}$ とした。これによって静電エネルギーはそれぞれ $1.8, 1.6, 1.8 \text{ J}$ となる。



第 8 図 放電後 4 秒後のカバーガラスの乖離電圧測定結果

第2表 実験条件

Case	Coupon	ϕ , -kV	C_{ext} , nF	V_e , kV	t_{exp} , hour
1	1	3	400	2.8~4.0	6
2	1	4	200	3.0~4.0	4
3	1	6	100	3.0~6.0	10
4	2	3	400	2.8~4.0	6
5	2	4	200	3.0~4.0	4
6	2	6	100	3.0~6.0	10
7	3	3	400	2.8~4.0	6
8	3	4	400	3.0~4.0	4
9	3	6	100	3.0~6.0	10
10	3	3	400	2.8~4.0	6
11	3	4	200	3.0~4.0	4
12	3	3	400	3.0~4.0	35

第3表 放電発生回数

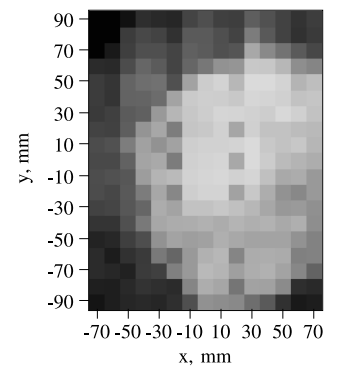
Case	Coupon	N_{arc}	t_{exp} , h	p , 10^{-3} Pa
1	1	88	6	1.12
2	1	78	4	1.25
3	1	132	10	0.98
4	2	58	6	1.10
5	2	1	4	0.65
6	2	333	10	2.46
7	3	60	6	0.86
8	3	41	4	0.62
9	3	165	10	0.83
10	3	150	6	2.51
11	3	120	4	1.73
12	3	84	35	0.56

2.5 実験条件 放電閾値測定結果に基づき、宇宙機帯電解析ソフト NASCAP/GEO を用いて衛星表面電位が逆電位勾配になる時間を計算した結果、予定運用期間5年間で約60時間であった⁷⁾。そこで放電によるセルの電力低下を評価するため、クーポン3の試験時間を65時間に設定した。第2表に試験条件を示す。実験にはCase1から12の名前をつけた。クーポン1および2ではそれぞれ合計20時間の試験を行い、クーポン3では合計65時間試験を行った。Case1からCase9およびCase12では電子ビームの中心がクーポンの中心にくるように設定されているが、Case10, 11ではB列No.1セルの中心に設定されている。これは、バスバーとインタコネクタの放電発生頻度の違いを見るための実験では、インタコネクタと同程度にバスバー付近のカバーガラスを帯電させる必要があったため、電子ビームの中心をバスバーよりはずらし、バスバー付近での電子ビーム電流密度を増加させる必要があったためである。電子ビームの加速電圧 V_e は放電を起きやすくするために試験中徐々に減少させていった。バイアス電圧は一定時間ごとに変化させ、 ϕ_{bias} が放電に与える影響を調べた。Case8では200 nFの外部コンデンサが使用される予定であったが、誤って400 nFのものを使用した。

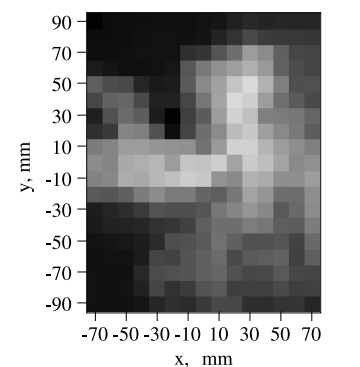
クーポンはCase2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12の終了後に真空タンクから取り出され、クーポン表面の顕微鏡撮影の後、工場へ輸送され電気性能を取得された。クーポンは一度真空タンク内に配置されると、3日程度真空中に置かれていることになる。大気中からクーポンを真空タンクへ入れ、真空排気をした後には必ず70°Cの温度で2時間ベーキングを行った。実験中、クーポンは40°Cに保たれ、真空タンク内の圧力は $0.5 \sim 5 \times 10^{-3}$ Paであった。

3. 結果および考察

3.1 放電回数, 位置 第3表に放電発生回数を示す。各クーポンの20時間試験後の合計回数はクーポン1が298回、クーポン2が392回、クーポン3が266回となっている。クーポン1とクーポン3は300回程度と同程度であるが、クーポン2は他のクーポンより放電が多く発生している。クーポン3のCase10, 11でも10時間で270回と多くなっており、どちらの場合も実験中の真空タンク内の圧力が他の場合に比べて高くなっている。このことから、



(a) Case 2



(b) Case 3

第9図 乖離電圧

Case4, 6とCase10, 11で放電が多く発生したのは真空タンク内の圧力が高かったためと思われる。クーポン3では65時間の試験で合計610回の放電が発生した。これだけ多くの放電が発生したが、列間および列基板間の持続放電が発生することはなく、これらのデザインの高い耐持続放電性能が確かめられた。

第9図に実験後に測定したクーポン上の乖離電圧分布

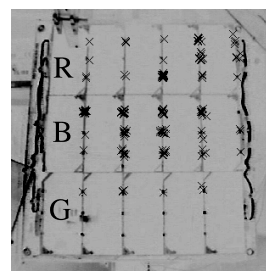
測定結果の例を示す．Case 2 の乖離電圧分布は， ϕ_{bias} が -4 kV ， V_e が 3 kV であり，Case 3 では ϕ_{bias} は -6 kV ， V_e は 3.4 kV である．どちらの場合も 1 kV 以上の乖離電圧になっているが，分布が異なっている．Case 2 では 1 kV 以上の部分が，クーポンの中心に設定されている電子ビーム照射の中心付近が最も良く帯電しており， 1 kV 以上帯電している部分が多く，円状に分布している．この場合，クーポンは -4 kV にバイアスされ 1 kV 以上帯電しているため，カバーガラスの表面電位は -3 kV 以上になっている．そのため， 3 kV で加速された電子ビームはカバーガラスからの電界によって減速されるが，カバーガラスに到達することはできるため，この場合は 2 次電子による正帯電といえる．また，この場合電子ビームの電流密度は数 mA/m^2 である．しかし，Case 3 ではクーポンが -6 kV にバイアスされているため，カバーガラスの表面電位は 1.5 kV 帯電したとしても -4.5 kV となり， 3.4 kV で加速された電子ビームはカバーガラスに到達することができない．そのため，この場合は 2 次電子による帯電ではなく，電子ビームによって中性粒子が電離した正イオンによって帯電していると思われる．

第 10 図に放電発生位置分布を示す．放電の大部分がインタコネクタ上で発生しており，導体が空間にむき出しになった部分で放電が発生しやすいことがわかる．Case 2 と Case 3 を見ると，第 9 図の帯電分布と放電発生位置がよく一致している．Case 4～6 では他のケースでは放電が見られなかったセルの端の部分で放電が発生している．また，Case 10～12 でもインタコネクタ以外のセルの端でも放電が発生している．

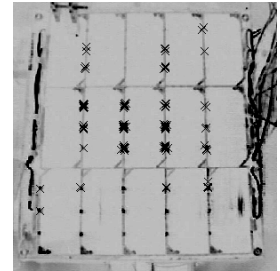
第 11 図に放電電流波形の例を示す．これは Case 1 の実験中に B 列のインタコネクタ上で起きた放電電流 CP_{total} の波形である．パルス幅は $30\ \mu\text{s}$ 程度である．このような電流波形から放電電流のピーク値と放電電荷量を計算する．また放電発生時には放電痕近くの表面材が蒸発し，これによって上昇する真空タンク内の圧力を電離真空計により測定している．

第 4 表に電流ピーク値，放電電流電荷量 ($Q = C_{ext}\phi_{bias}$) および放電による圧力上昇の試験結果を示した．表にはそれぞれの平均値，標準偏差が示してある．クーポン 2 を用いた試験では直流成分に近い電流波形を測定できるプローブを用いておらず，正しく電流値を測定することができなかったため，Case 4～6 の結果は示されていない．放電電流の平均値は外部コンデンサに貯えられた電荷量が大きくなるにつれて，増加する傾向にある．クーポン 1 とクーポン 3 を比較すると Q が等しい場合には，標準偏差を考慮するとどの値も同程度であり，クーポンによる放電の違いは見られない．

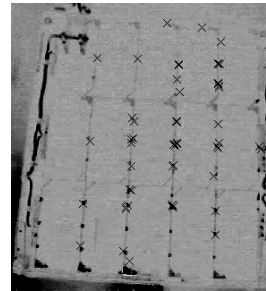
3.2 発電電力低下 試験後，全てのクーポンで発電電力の低下が見られた．第 12 図に最大発電電力の初期状態からの劣化量を示した．図の横軸は放電回数を示している．R 列と B 列はクーポンの裏面で並列に接続されているため，電気性能測定の際に分離はしていない．最も劣化の激



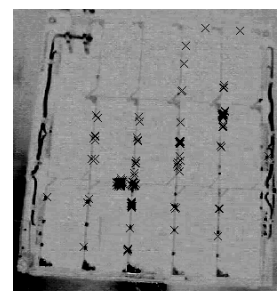
(a) Case 1 and 2



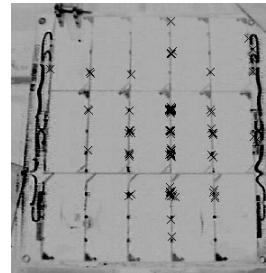
(b) Case 3



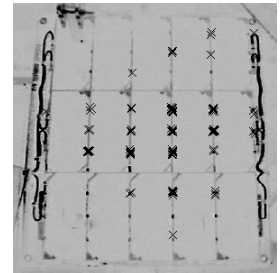
(c) Case 4 and 5



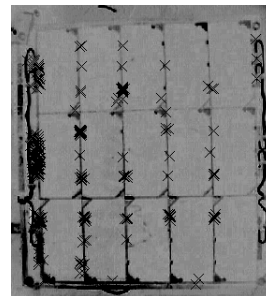
(d) Case 6



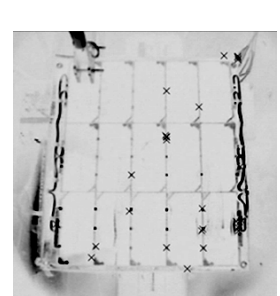
(e) Case 7 and 8



(f) Case 9

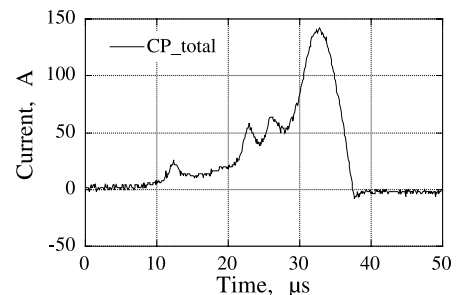


(g) Case 10 and 11



(h) Case 12

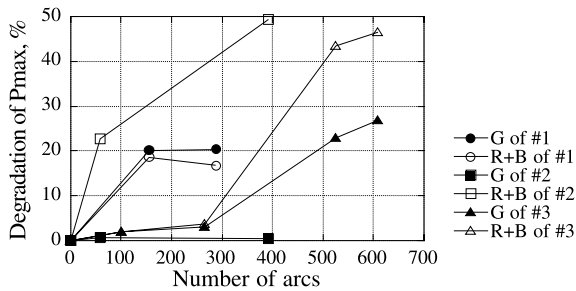
第 10 図 放電発生位置



第 11 図 放電電流波形

第4表 電流ピーク値、放電電流電荷量および放電による圧力上昇の試験結果

Case	Q, mC	I_{ave} , A	I_{std} , A	Q_{ave} , mC	Q_{std} , mC	Δp_{ave} , mPa	Δp_{std} , mPa
1	1.2	123.5	50.8	1.12	0.23	1.32	0.14
2	0.8	105.5	49.0	0.80	0.06	1.15	0.08
3	0.6	81.6	33.1	0.64	0.04	0.966	0.08
7	1.2	151.5	108.7	1.22	0.22	1.38	0.14
8	1.6	159.4	65.1	1.56	0.16	2.06	0.11
9	0.6	71.2	27.0	0.63	0.02	0.94	0.09
10	1.2	144	66.5	1.27	0.13	1.53	0.15
11	0.8	111	69.5	0.80	0.01	1.12	0.10
12	1.2	155	59.9	1.27	0.13	1.60	0.19

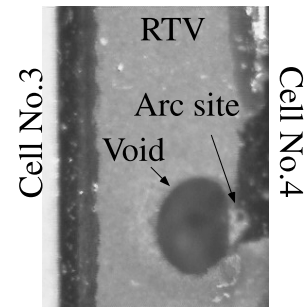


第12図 放電による電力低下

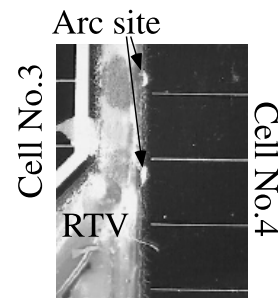
しかったものがクーポン2のR、B列であり、59回の放電で23%、392回の放電で49%の電力低下が見られた。クーポン1では156回の放電で19%の劣化が見られた後、288回の放電発生後に更に劣化することはなかった。また、クーポン3では266回の放電ではほとんど劣化は見られないが、その後610回の放電で47%と著しく劣化していた。これらのことから、電力低下は単調に放電回数によって増加していくという訳ではなく、セル破損を引き起こす放電が存在し、その放電が発生した時に電力が低下するものと考えられる。

クーポン2において破損しているセルの特定を行った。その結果、B列のセル2、4とR列のセル3が短絡状態になっており、電力を供給できない状態になっていた。この結果から400回の放電により3枚のセルが破壊される可能性があることがわかる。NASCAP/GEOを用いた解析結果によると予定運用期間5年間で14950回の放電が発生すると予想される⁷⁾。これらの結果から5年間で約112枚のセルが破壊されると見積もることができる。

次にB列のセル4に、赤外レーザー照射によって変化する抵抗値を測定することにより電流漏洩箇所を特定するIR-OBIRCH法⁴⁾を用い電流漏洩箇所を特定した。その結果、セルの端でPN接合が短絡していることがわかった。短絡箇所の顕微鏡写真を第13図に示す。短絡が起きたセル4には銀色の放電痕が付着していた。また、放電はRTVに穴が開いている部分で発生しており、ここではセルの端が空間にむき出しになっている。このような穴で放電が発生するとセルの短絡が発生しやすくなると思われる。穴はクーポンの製作工程上発生を抑えることは困難であり、穴が開いている部分にRTVを上塗りすることで穴を塞ぐことが可能であるが、実際の太陽電池アレイでは8000枚以上の



第13図 B列電流漏洩箇所の顕微鏡写真



第14図 クーポン3のR列でセル短絡を引き起こしたと思われる放電痕

セルが貼付けられることから、完全に穴をなくすことは難しい。また、クーポン2ではこのような穴が最も多く存在していた。

第14図にクーポン3のCase10においてR列のセルの端で放電が発生した部分の顕微鏡写真を示す。図ではセル4の端に2箇所放電痕があるのがわかる。この放電痕のつき方は第13図のリークと似ており、この放電痕がセルを短絡させたと思われる。しかし、第14図ではセルの端に第13図で見られたようなRTVにあいた穴は見られなかった。この他にもG列のセル端で放電が発生し、同様の放電痕がセルの端についているのが確認でき、この場合にもRTVの穴はなかった。これらの結果からRTVの穴がある場合にはセル端での短絡は発生しやすいが、RTVの穴がないセルの端で放電が発生した時にもセルでの短絡は起きることがわかった。このため、RTVの有無によらず、セル端での放電によるセルの破損を完全に防ぐことは困難であると思われる。

3.3 パスパー上のRTV塗布の有無による影響 クーポン3を用いた最初の20時間の試験では、電子ビーム照射

第5表 放電発生位置による放電諸量の違い

Case	Position	I_{ave} , A	I_{std} , A	C_{ave} , mC	C_{std} , mC
10	Bus bar	122	36	1.23	0.08
10	IC	128	34	1.24	0.09
11	Bus bar	91	37	0.79	0.05
11	IC	88	24	0.75	0.04

の中心がクーポンの中心に設定されているためにバスバー近傍は中心に比べてあまり帯電せず、バスバー上での放電はあまり発生していない。そこで電子ビーム照射の中心をバスバーよりにずらすことによって、バスバー近傍をインタコネクタと同程度に帯電させ、バスバーがインタコネクタと比べて放電が発生しやすいかどうかを調べた。もし、RTVを塗布せず空間に対して曝露したバスバーでの放電発生頻度が他の場所に対して高ければ、バスバーを放電に対する避雷針代わりに利用し、セル劣化が発生しやすいセル端での放電発生頻度を抑えることができる。また、バスバーにRTVを塗布しないことによって持続放電などが起きなければ、バスバーに塗布するRTVの重量を衛星全体で数kg程度削減することができ、WINDSの重量設計に対する余裕ができるという利点もある。

電子ビーム照射の位置をずらして10時間、それ以前の20時間を合わせて30時間で、むき出しになったバスバーで発生した放電によって持続放電が発生することはなく、バスバーにRTVを塗布する必要はないことがわかった。Case 10, 11の10時間の試験でバスバー上では121回、それ以外では137回の放電が発生した。この結果から曝露されたバスバーは他の部分に比べて特別放電が発生しやすいということはないということがわかった。しかし、バスバーで放電が発生することによりカバーガラス上の帯電電荷が取り込まれ、乖離電圧が0付近に減少するため、他の部分で放電する確率は減少し、セル破損が発生しやすいセル端での放電の発生確率も減少する。そのため、バスバーを曝露することは、セル劣化を防ぐには間接的ではあるが有効な手段であると思われる。

第5表にバスバーおよびインタコネクタ上で発生した放電の放電電流ピーク値、電流電荷量を示した。電流値も電荷量もバスバーとインタコネクタによる違いは見られなかった。

これらのことからバスバーにRTVを塗布する必要はないと判断した。

4. ま と め

WINDSに搭載する太陽電池アレイの地上試験を行った。試験に際しては3種類の異なるデザインのクーポンを用いた。その結果、全てのクーポンが列間および列基板間での持続放電に耐えることができた。しかし、全てのクーポンでセル劣化が見られた。セル劣化はセル端で発生した放電によって引き起こされ、セル端が空間に露出されている場合は劣化しやすいことがわかった。しかし、セル端がRTVで覆われている場合にもセル劣化を引き起こす放電は発生しており、RTVによって完全にセル端で放電を抑制することは困難である。

バスバーにRTVを塗布しないことによって、放電によって不具合が起きることはなかった。そのため、セル劣化を引き起こすセル端での放電を間接的に防ぐ、また、RTV重量を低減するためにもバスバーにRTVを塗布しないほうがよい。

これらの結果からWINDSに搭載する太陽電池アレイの最終的なデザインを決定した。このデザインを次に示しまとめとする。

- ・列間持続放電を抑制するため、並列列間にはRTVを塗布する。
- ・列基板間持続放電を抑制するため、インタコネクタのある直列列間のカプトンシート上もRTVで覆い、さらに絶縁性を増すためにセル基板間のRTVの厚さを100 μ m程度とする。
- ・セル端での放電を防ぐため、RTVに開いた穴はRTVを上塗りすることによって極力減らす。
- ・バスバーにはRTVを塗布しない。

今回の試験では、文献4)で見られたシリコンセルの放電による電力低下と同様に、化合物半導体3接合セルにおいても放電によってセルが破壊されることが確かめられた。また、セル端で発生した放電がセル劣化を引き起こすことがわかった。しかし、セルを破壊するのに最低必要な放電の規模を知るまでには至っていない。今回の試験では、太陽電池パドル全体に蓄えられた静電エネルギーが放電発生時に放電に供給されると仮定しており、ワーストケースを想定した試験である。今後はセル破壊を引き起こす放電エネルギーの閾値を調べる必要があり、そのようなエネルギーが現実的に放電に供給されうるかを検討しなければならない。

九州工業大学の匹田政幸教授、宇宙航空研究開発機構の高橋真人様、川北史朗様、中村雅夫様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Hastings, D. E. and Garrett, H.: Spacecraft-Environment Interactions, Cambridge Univ. Press, New York, 1996.
- 2) Katz, I., Davis, V. A. and Snyder, D. B.: Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO, AIAA Paper 98-1002, 1998.
- 3) Cho, M., Matsumoto, T., Ramasamy, R., Toyoda, K., Nozaki, Y. and Takahashi, M.: Laboratory Tests on 110 V Solar Arrays in a Simulated Geosynchronous Orbit Environment, J. Spacecraft Rockets, **40** (2003), pp. 211-220.
- 4) Toyoda, K., Matsumoto, T., Cho, M., Nozaki, Y. and Takahashi, M.: Power Reduction of Solar Arrays Due to Arcing under Simulated GEO Environment, AIAA Paper 2003-0682, 2003.
- 5) Leung, P.: Plasma Phenomena Associated with Solar Array Discharges and Their Role in Scaling Coupon Test Results to a Full Panel, AIAA Paper 2002-0628, 2002.
- 6) Toyoda, K., Cho, M. and Hikita, M.: Development of Position Identification System of Arc Discharge on a Solar Array in Vacuum by Digital Processing of Video Images, J. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., **51** (2003), pp. 82-84.
- 7) Sato, T., Takahashi, M., Nakamura, M., Kawakita, S., Cho, M., Toyoda, K. and Nozaki, Y.: Development of Solar Array for a Wideband Internetworking Engineering Test and Demonstration Satellite, 8th Spacecraft Charging Technology Conference, Huntsville, USA, 2003.