

# 極軌道衛星の太陽電池パドル裏面の帯電・放電抑制に関する地上試験<sup>\*1</sup> Laboratory Experiments on Mitigation against Charging and Arcing of Solar Array Paddle Backside of Polar Orbiting Satellites

細田 聡史<sup>\*2</sup>・金正 浩<sup>\*3</sup>・趙 孟 佑<sup>\*3</sup>・岩田 隆 敬<sup>\*2</sup>・三浦 健 史<sup>\*2</sup>  
Satoshi HOSODA, Jeongho KIM, Mengu CHO, Takanori IWATA, Takeshi MIURA,  
李 野 正 明<sup>\*2</sup>・高橋 真人<sup>\*2</sup>・川北 史 朗<sup>\*2</sup>・野崎 幸 重<sup>\*4</sup>  
Masaaki MOKUNO, Masato TAKAHASHI, Shirou KAWAKITA and Yukishige NOZAKI

**Key Words:** Spacecraft Environment, Spacecraft Charging, EOS, Ground Investigation Technique, Thermal Control Film, ALOS, OICETS

**Abstract:** In case of a polar orbiting satellite, insulative surfaces located on the wake side of solar array paddle can be charged negatively by aurora electrons. We carried out laboratory experiments to evaluate risks of charging and arcing on thermal control film surfaces attached on a solar array paddle backside. We used two test coupons of different design. Both of them used the same materials of flight hardware as the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) and the Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS), which are domestic polar orbiting satellites. When the thermal control film surface was insulated and a silver layer was not connected to coupon ground, the film surface was charged to a negative value 1–2 kV lower than the electron beam energy. Many primary arcs and flashover were observed at the edge of silver layer and film surface, respectively. Some areas of silver layer were destroyed by primary arcs. On the other hand, the film with conductive coating connected to a substrate with resistance of  $10^6$ – $10^9 \Omega$  suppressed surface charging and flashover on the film under the electron flux of  $1 \times 10^{15}$ – $1.4 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , effectively. We made a new coupon which had three features to give improved performance of arcing and charging mitigation. (1) Connecting the silver layer to the substrate by conductive adhesive to suppress charging and arcing at the edge of silver layer. (2) Film surface coating by conductive material and connected with conductive adhesive to avoid charging. (3) Hiding all the edges of silver layer by conductive adhesive. This coupon suppressed any arcing and charging on the film surface up to 20 keV electron beam irradiation.

## 1. はじめに

2003年10月に極軌道衛星のADEOS-IIがオーロラ帯での太陽電池パドル電力ハーネスの帯電に起因した放電によって衛星電力の大半を失う事故<sup>1)</sup>を起こして以来、国内で宇宙機帯電の観点から衛星設計を見直す動きがある<sup>2,3)</sup>。

極軌道衛星はその軌道傾斜角からオーロラ帯と呼ばれる領域を飛行することになる。オーロラ帯とは磁気緯度が60度から75度の領域を指す<sup>4)</sup>。この領域はkeVオーダーの比較的高エネルギーの粒子が磁力線に沿って宇宙機に向かって降下してくる領域であり、この高エネルギー粒子がしばしば衛星を大きく負に帯電させる<sup>5,6)</sup>。例えば米国の軍事気象衛星Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) F13は高度約840 km、軌道傾斜角約99度の太陽同期極軌道であり、1995年にオーロラ帯における電離層プラズマのイオン密度が $10^{10} \text{ m}^{-3}$ を下回る低密度状態になった際、衛

星構体が約−450 Vになる異常帯電を観測している<sup>5)</sup>。また欧州の磁気圏観測衛星であるFrejaは高度約600 kmから約1800 km、軌道傾斜角63度の楕円軌道で、丁度オーロラ帯に接するような軌道であったが、オーロラ帯における電離層プラズマのイオン密度が $10^9 \text{ m}^{-3}$ を下回った際に−2 kVを超える帯電を記録している<sup>6)</sup>。

ADEOS-IIの後、日本では2005年8月に光衛星間通信実験衛星Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS)、2006年1月には陸域観測技術衛星Advanced Land Observing Satellite (ALOS)が相次いで打ち上げに成功した。さらに2008年には温室効果ガス観測技術衛星Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT)の打ち上げが予定されており、極軌道衛星の打ち上げが続いている。

前出のDMSPやFrejaと比較して、高度が600~700 kmのALOSやOICETSでは、平均のプラズマ密度が高いため、静止軌道で見られるような高電位の帯電は発生しづらく、衛星の電位は周辺プラズマ電位よりせいぜい発電電位程度の負に沈むにとどまり<sup>7)</sup>、衛星自体の大きな負帯電は問題になりにくい。しかしながら、後述するように衛星構

<sup>\*1</sup> © 2007 日本航空宇宙学会

平成18年12月27日原稿受理

<sup>\*2</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>\*3</sup> 九州工業大学工学部電気工学科

<sup>\*4</sup> NEC 東芝スペースシステム(株)

体や太陽電池パドルの陰となる領域に絶縁体や衛星構体に接続されていない、所謂浮いた導体が存在するとき、これらが大きく負に帯電して放電事故が起こることが懸念される<sup>2)</sup>。特に ALOS は、ADEOS-II とほぼ同じ軌道を飛行する重量約 4 トンの大型極軌道衛星であり、EOL での電力は ADEOS-II を上回る 7kW である。このため ALOS は片翼でパドル 9 枚、展開時の大きさは 22m × 3m という、低地球軌道では ISS に次ぐ大きさの太陽電池パドルを有する。ALOS や OICETS の軌道と衛星の姿勢では、北極と南極付近においてパドルが進行方向と正対し、パドル後方にウェーク領域が作られる。7km/s 程度で飛行する衛星に対して、低エネルギーの電離層イオンはウェークに回り込むことができないが、オーロラ電子は数 keV 以上のエネルギーを有しているため容易にウェーク面に到達できる。一般的に、太陽電池パドル裏面には、アルベドなどによる厳しい熱的環境から衛星を守るために、OSR (Optical Solar Reflector) や銀蒸着テフロン、アルミ蒸着カプトンなどの誘電体を材料に含む熱制御材が貼り付けられている。このため北極上空でウェーク面になる熱制御材の絶縁体表面は衛星電位よりも負に帯電するいわゆる順電位勾配<sup>8)</sup>が形成される。このとき、表面近傍で絶縁体の帯電に支配的な荷電粒子は高エネルギーのオーロラ粒子である。また南極上空では熱制御材はラム領域のプラズマに曝されるため、電離層プラズマ中のイオンによりいわゆる逆電位勾配が形成される。このとき、表面近傍で絶縁体の帯電に支配的な荷電粒子は低温 (0.1 ~ 0.2 eV) の電離層イオンである<sup>7)</sup>。

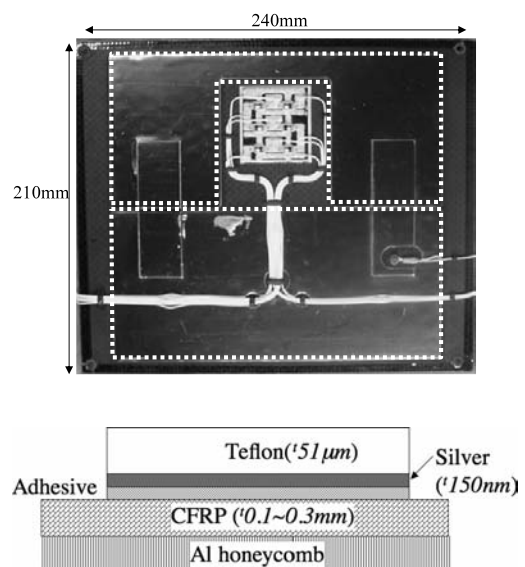
衛星の帯電は表面での放電を引き起こす。放電は真空と導体と絶縁体の三者が重なるトリプルジャンクション (三重接合点) で発生することが知られており<sup>9)</sup>、このような箇所は衛星表面の随所に存在する。太陽電池パドル裏面にもバイパスダイオードを始め電力系の部品が配置されることがあり、この付近で放電が発生した場合は「持続放電」<sup>10)</sup>と呼ばれる恒久的な短絡を引き起こす放電に発展する恐れがある。持続放電については従来太陽電池パドルのセル面やケーブル等について検討が行われてきた<sup>1, 11, 12)</sup>。しかし、一次電源系の他の箇所でも数十 V 以上の電位差を持つ箇所すべてにおいて、発生電力によっては持続放電の危険性がある。持続放電が発生すると衛星は太陽電池回路から電力を取り出せなくなり、衛星運用に重大な影響を及ぼす<sup>1, 10)</sup>。太陽電池パドル裏面にも多数のトリプルジャンクションと電力系部品が存在するので、帯電・放電を抑制する観点から設計を検討することが重要である。

この論文の目的は、ALOS と OICETS のそれぞれ設計が異なる太陽電池パドル裏面の構造を模擬したクーポンを製作して、ADEOS-II 事故時のようなオーロラ環境に遭遇した場合に太陽電池パドル裏面がどのように帯電し、またどの程度の表面電位で放電を起こすのかを実験的に確かめることである。さらに、その結果をもとに帯電放電に対する耐性を向上させる設計を提案し、その有効性を実験的に評価する。

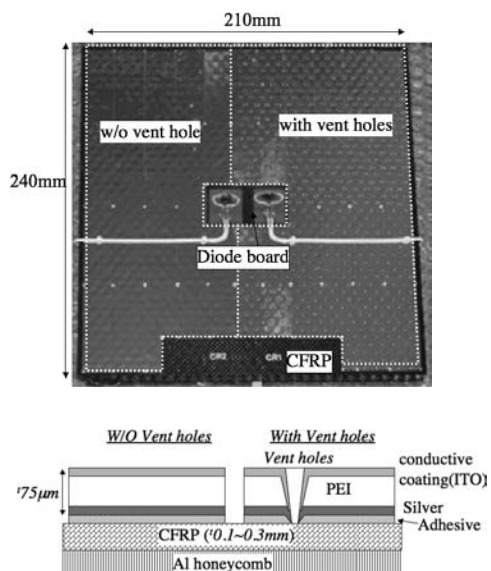
## 2. 試験サンプルおよび試験装置

2.1 試験クーポン 第 1 図にクーポン A の写真および断面の概略図を示す。クーポン A は ALOS の詳細設計段階における太陽電池パドルの裏面を模した構造となっている。クーポンの大きさは 240 mm × 210 mm で、厚みはダイオードの高さを除くと約 26 mm である。基板 (サブストレート) はアルミニウム上に CFRP を貼り付けた構造になっており、その上に熱制御フィルムとダイオードボードが貼り付けてある。使用した熱制御フィルムは銀蒸着テフロン (Silver-Teflon, 以下 Ag-Tf) と呼ばれるもので、銀層を基板側に向けて導電性を有しないシリコン系接着剤で貼り付けられている。また、宇宙空間に面したテフロン層には導電性コーティングが施されておらず非導電性である。このクーポンでは上側下側に 2 枚の Ag-Tf が貼り付けられている。Ag-Tf, 銀層および CFRP の厚みはそれぞれ 51 μm, 150 nm および 0.1 ~ 0.3 mm である。クーポン中央にはフライトハードに実装されているものと同じバイパスダイオードを 6 個実装しているダイオードボードを実装してある。ダイオードボード全体は白い絶縁性接着剤でモールドングしてあるが、ダイオードのリード端子の一部は熱によるストレスの対策として接着剤でモールドングされず、外部に曝露している。

第 2 図にクーポン B の写真および断面の概略図を示す。クーポン B は OICETS の太陽電池パドル裏面を模した構造になっており、ダイオードボード周辺の放電に対する影響が懸念される要素 (基板, ダイオード, 熱制御材およびケーブル) を含んで製作した。クーポンの寸法は 210 mm × 240 mm, 厚さ 6 mm であり、基板は実際の衛星同様に CFRP 表皮アルミニウムである。ダイオード周辺には熱制御材を模擬した短冊状のパッチが 14 枚貼られている。パッチは 234 mm × 20 mm のものが 8 枚、



第 1 図 クーポン A の構造図および断面の概略図

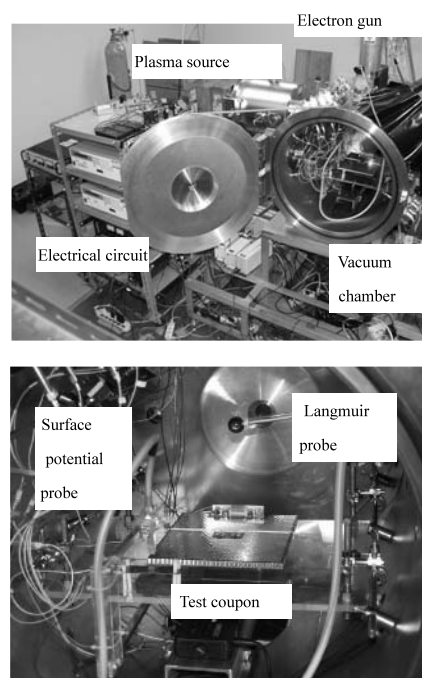


第 2 図 クーポン B の構造図および断面の概略図

103 mm × 17 mm と 78 mm × 17 mm のものが各 3 枚あり、これを CFRP 表面上に敷き詰めた状態で接着してある。パッチの材質は実際の衛星の熱制御材と同様の銀蒸着ポリエーテルイミド (Silver-Polyetherimide, 以下 Ag-PEI) を使用しており、Ag-PEI の表面には酸化防止のため ITO (Indium-Tin Oxide) のコーティングが施されている。この ITO は導電性である。ITO コーティング、Ag-PEI および銀層を含めたパッチの厚みは 75 μm である。

パッチはクーポン A と同様にシリコン系電気絶縁性接着剤で基板に接着されている。14 枚のパッチの内、第 2 図の写真の右側 8 枚のパッチには実機の構造を模擬して空気抜き用の小さい穴があけてある。以降このパッチを「穴あきパッチ」と呼ぶ。穴あきパッチは針状の工具でパッチを貫通するような穴が開けられており、第 2 図のような断面になっていることが予想される。残りのパッチは「穴なしパッチ」と呼ぶ。クーポン中央にはダイオードボードを模擬した絶縁体上にダイオードが 2 個配置されている。このダイオードはブロッキングダイオードとバイパスダイオードを模擬している。ダイオードの端子はハーネスとダイオードボード上に設置された端子台を介して接続される。ダイオードのリード端子には絶縁チューブを被せ、端子台の導体部分は導電性を有しない接着剤でコートしているため、外部から露出した導体部分が見えない構造となっている。

2.2 試験装置 第 3 図に試験に使用した真空チャンバの写真を示す。真空チャンバの寸法は長さ 900 mm、直径 600 mm である。チャンバは排気速度 400 l/s のターボ分子ポンプによって真空引きされ、試験中のチャンバ背圧は  $1 \times 10^{-4}$  Pa から  $1 \times 10^{-3}$  Pa に保たれる。真空チャンバ上部には降り込むオーロラ電子を模擬するための電子銃 (UL-VAC 社: RHEED) が装備されており、3 keV から 30 keV まで電子ビームを加速可能である。電子ビームのエネルギー広がり半値全幅で 100 eV 以下であり、加速電圧に対して



第 3 図 実験装置図

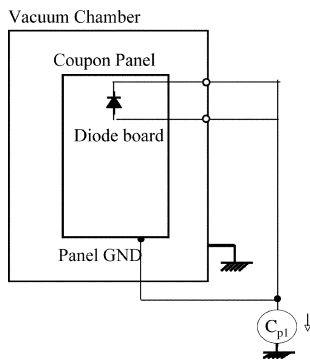
(上) 実験システム概略図, (下) 真空チャンバ内のセッティング。

十分に小さい。電子銃の出口には機械シャッターが取り付けられ、シャッターの開閉によってビームを 1 秒程度で瞬時に遮断できる。チャンバ内部には XY ステージに取り付けられた表面電位計 (TREK 社: model341A) が装備されており、180 mm × 150 mm の領域の表面電位分布を数分間でスキャン可能である。試験に使用するクーポンパネルはチャンバの中に設置され、フィードスルーを介して外部の電気回路に接続される。試験時の放電の発生位置については、CCD カメラを介して得られた画像に画像処理を施すことによって特定するシステムにより<sup>13)</sup>、試験後に速やかに放電の発生した箇所を特定可能である。また試験前後に倍率 60 倍の光学顕微鏡を用いて全面をくまなく撮影しており、試験による外観の変化を確認できる。

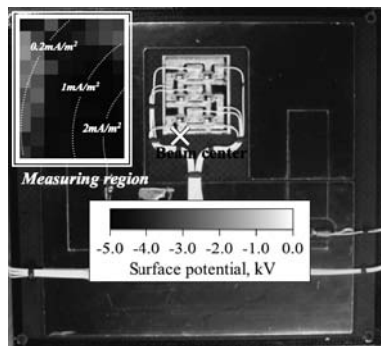
### 3. 帯電・放電試験結果および考察

3.1 帯電電位測定 それぞれのクーポンにオーロラ電子を模擬した電子ビームを照射し、ビームのエネルギーに対してどの程度まで帯電するのかを調べた。試験回路図を第 4 図に示す。試験時は基板およびダイオードをすべて接地した状態で行った。放電の発生は回路中の AC 電流プローブ Cp1 (Tektronix 社: P6022, 測定帯域 935 Hz ~ 120 MHz) によって検出した。

ビームの照射条件はビームエネルギーが 6 keV、照射電流が 100 μA とした。このときの電流密度および電子フラックスはビームの中心で約 20 mA/m<sup>2</sup> ( $1.4 \times 10^{17}$  m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), 中心から約 20 mm の位置で約 6 mA/m<sup>2</sup> ( $3.8 \times 10^{16}$  m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), 約 50 mm の位置で約 2 mA/m<sup>2</sup> ( $1.2 \times 10^{16}$  m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), 約 70 mm の位置で約 1 mA/m<sup>2</sup>



第4図 帯電・放電試験時の放電検出回路

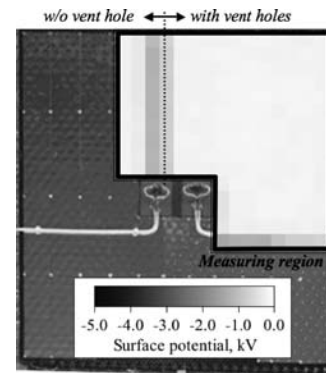


第5図 クーポン A の表面電位分布および電子ビーム電流分布（電子ビームエネルギー：6 keV）

( $6.2 \times 10^{15} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )であった。このような  $\text{mA/m}^2$  オーダーの電子電流密度にオーロラ帯において1秒以上遭遇する確率は、前出の DMSP の観測データの解析から  $10^{-4} \sim 10^{-3}\%$ 程度と極めて低いことが判明しており<sup>7)</sup>、最悪レベルの電流密度状態を模擬している。

まずクーポン A の結果を示す。ビームの中心はクーポンの中心からダイオードボード側 40 mm 程度に位置した。帯電電位の測定はクーポンの角から  $70 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  の領域で行った。この領域はほとんどが Ag-Tf 面である。ビームの中心から測定領域までは約 40 mm 離れており、測定領域における電流密度は平均  $1 \text{ mA/m}^2$  程度である。第5図に帯電分布を示す。図中のバツ印はビームの中心位置を表している。図より Ag-Tf 表面は 6 keV のビームに対して  $-5 \text{ kV}$  程度まで帯電することが確認された。すなわちテフロン表面がビームのエネルギーより  $1 \sim 2 \text{ kV}$  小さい程度の負電位まで容易に帯電してしまうことが確かめられた。テフロンの表面電位とビームエネルギーの差は、テフロン表面からの二次電子放出によるものと推測される。テフロンの二次電子放出係数は 1.7 keV のエネルギーの電子ビームまで1を超えている<sup>7)</sup>。すなわち、6 keV のエネルギーの電子ビームに対して、テフロンの表面電位が  $-4.3 \text{ kV}$  よりも負になったとき、二次電子放出によってそれ以上負に帯電するのを妨げようとするためである。

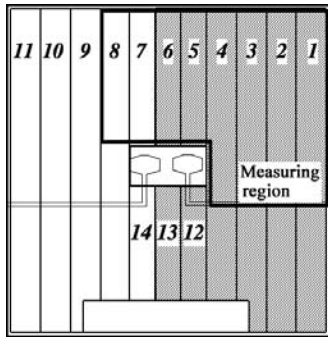
また表面の導電率が非常に低いため、面内の電位分布は電子ビームのビームパターンと同様の不均一な分布となっている。



第6図 クーポン B の表面電位分布（電子ビームエネルギー：6 keV）

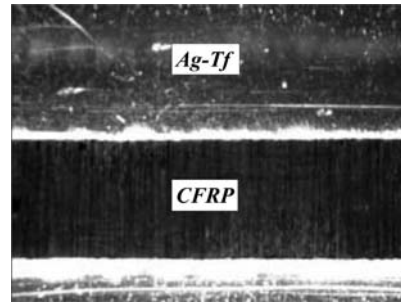
次にクーポン B の結果を示す。ビームの中心はクーポンのほぼ中心に設定した。測定領域はダイオードボードの  $70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  を除く  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  で、測定領域内に穴あきパッチ 6 枚分と穴なしパッチ 2 枚分を含む。第6図に帯電分布を示す。図中の点線で囲まれた領域は穴あき、穴なしパッチの表面電位測定領域をそれぞれ示している。ビームエネルギー 6 keV のビームを照射した場合、穴なしのパッチは最大で  $-1.3 \text{ kV}$  程度まで帯電したのに対して、穴あきのパッチは  $-200 \sim -300 \text{ V}$  程度しか帯電しなかった。いずれのパッチもクーポン A と比較して帯電しにくい傾向を示した。特に穴あきパッチに関してはビームエネルギーの  $1/10$  以下の電位となり、明示的に基板に接地されていないにもかかわらず表面の電荷を効果的に基板に逃がしていると考えられる。また各パッチの表面は ITO により電氣的に接続されているため、クーポン A に見られたパッチ上の不均一な表面電位分布は見られなかった。第6図の穴あきパッチ下方に見られる不均一な帯電分布はダイオードボードからのびるハーネスの ETFE（エチレン-四フッ化エチレン共重合体）被覆の電位を反映しており、ITO の帯電分布ではない。

測定された電位分布との相関を調べるため、最大  $2 \text{ G}\Omega$  まで測定可能の高抵抗テスタ（HIOKI3453）を用いて各パッチの ITO 表面と基板間の抵抗値を測定した。測定ではテスターに直径 3 mm の球状の電極を取り付け、これを ITO 表面に弱い力で押し付けた状態で ITO 表面に 250 V の電圧を印加して測定した。この結果、穴なしのパッチでは数百  $\text{M}\Omega$  から  $2 \text{ G}\Omega$ 、穴あきのパッチでは主に数  $\text{M}\Omega$  から数百  $\text{M}\Omega$  となっており、完全に絶縁されずある程度の抵抗を持っていることがわかった（第7図）。この結果から、仮に  $100 \text{ M}\Omega$  の抵抗を持っているパッチに数  $\mu\text{A}$  の電子ビーム電流が流れ込んだ場合、オームの法則から表面電位は数百 V 程度に抑えられることになる。実際に第6図の帯電分布において約  $0.001 \text{ m}^2$  の面積のパッチに  $1 \text{ mA/m}^2$  の電子ビーム電流が照射されたとき、平均  $1 \mu\text{A}$  弱の照射電流となる。  $2 \text{ G}\Omega$  以上の抵抗値を持った7番の穴なしパッチは  $-1.3 \text{ kV}$  まで帯電し、その両脇の  $300 \text{ M}\Omega$  と  $25 \text{ M}\Omega$  のパッチは数百 V 程度の負に留まっており、第7図の抵抗値の測定結果と良い整合を見た。穴あきパッチの4番、5番

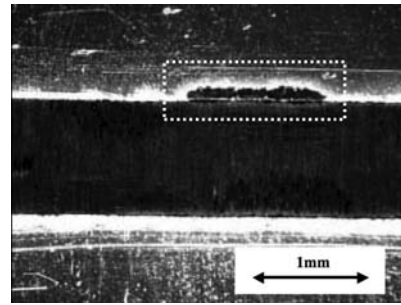


Patch number	1	2	3	4	5	6	7
Vent hole	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Resistance, MΩ	317	210	30	>2000	>2000	300	>2000
Patch number	8	9	10	11	12	13	14
Vent hole	No	No	No	No	No	No	No
Resistance, MΩ	25	>2000	>2000	>2000	10	100	45

第 7 図 クーボン B の ITO コーティングと CFRP 基板間の電気抵抗  
 図中の斜線は穴あきパッチ，太線で囲まれた領域は表面電位測定範囲をそれぞれ示す。



(a)



(b)

第 9 図 クーボン A の放電発生点の Ag-Tf 端の顕微鏡写真  
 (a) 放電前，(b) 放電後．銀層の消失が確認された．



第 8 図 クーボン A の電子ビーム照射時における放電発生位置

については 2 GΩ 以上の抵抗値と測定されたが，第 6 図の帯電分布から実際には GΩ 以下の抵抗を有していると推測される．これは抵抗値の測定時に絶縁破壊を起こさないように印加電圧を 250 V に抑えたため，GΩ 程度の測定には精度不足であったためである．8 番と 14 番の接地抵抗値が 100 MΩ 以下と穴あきパッチには大きい，何らかの理由で ITO 層と基板間に導通路が形成されていたためと思われる．

3.2 放電発生位置 次に放電が発生するビームエネルギーおよび放電の発生箇所を調べた．まずクーポン A の結果について考察を行う．第 8 図に放電発生位置をプロットしたものを示す．このクーポンでは最小でビームエネルギー 3 keV の電子ビーム照射で輝点状の放電が確認された．この放電のピーク電流値は 5 mA，電流パルスの持続時間は数百 ns であった．放電直前のこの付近の Ag-Tf の表面電位は約 -1.5 kV であったが，電子銃の制約から 3 keV 以下の条件では試験ができないことから，実際の放電が発生す

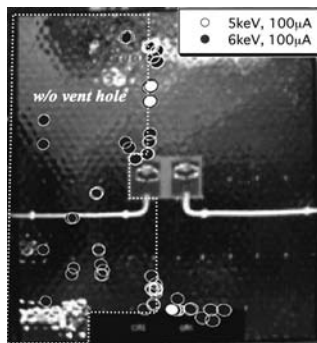
る表面電位はさらに低いことが推測される．放電が発生した箇所は Ag-Tf の切れ目であった．第 1 図からわかるように，Ag-Tf 端はその構造上，導体である銀と絶縁体であるテフロンがトリプルジャンクションを形成している．Ag-Tf の銀層は接着剤によって基板から絶縁されているため，銀層はテフロン表面と基板の中間電極ようになる．そのため，テフロン表面が負の電位を持つと，銀層はテフロン表面の半分程度の負電位を持つ．Ag-Tf 端は，ところによっては基板と接着するための接着剤により覆い隠れているが，多くの部分では銀層が側面に露出している．露出した銀層と CFRP 基板の間はわずか数百 μm 程度の距離しかなく，ここに 1 kV 程度の高電圧がかかることにより強い電界が生じ放電が発生する．この放電により，放電に寄与した銀層の一部が蒸発している様子が多く確認された．第 9 図の顕微鏡写真がその一例である．テフロンの端面に沿って数 mm の範囲の銀層が消失している様子が見られた．この結果から，熱制御材としての性能を損なわないためにも，銀層の端からの放電発生を抑制することが重要である．

ビームエネルギーを増加させると Ag-Tf 端での放電はさらに顕著となった．ビームエネルギーが 6 keV を超えるとむき出しの CFRP 表面で放電が発生するようになる（第 8 図のビームエネルギー 8 keV の場合を参照）．CFRP はマイクロオーダーの大きさの炭素繊維とそれを固めるプラスチックからなり，CFRP 全面が微小なトリプルジャンクションを多数形成する．ここで放電が発生したと考えられる．

ビームエネルギーが 9 keV を超えると，放電はクーポン表面全体を覆うような沿面放電となる．第 10 図はビームエネルギー 15 keV のときの沿面放電の様子である．輝点



第10図 クーポン A で観測された沿面放電の様子（ビームエネルギー：15 keV）

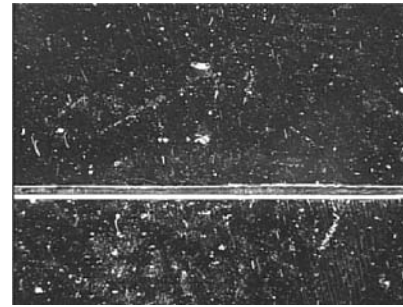


第11図 クーポン B の電子ビーム照射時の放電発生位置

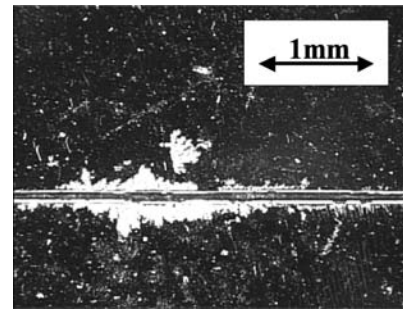
的な放電とは異なり、33 ms のカメラの露光時間に対してテフロン表面に同時多発的な樹枝状の放電パターンが見られた。沿面放電は輝点的な放電に比べて電流ピーク値、パルス幅ともに1桁以上増える。DMSP データの解析から、本実験で沿面放電が起きたビームエネルギー 10 keV 以上、電流密度  $\text{mA}/\text{m}^2$  オーダーのオーロラ電子に遭遇する確率は  $10^{-3}\%$  以下であり<sup>14)</sup>、極めて低い確率である。しかしながら、沿面放電が発生すると、絶縁体表面に溜まった電荷が放電点に取り込まれ<sup>15)</sup>、放電点に大きなダメージを与えることが懸念される。また、露出した電極間を短絡して持続放電の引き金となることも想像されることから、沿面放電の発生を抑制することが望ましい。

次にクーポン B の結果について述べる。第11図にクーポン B の放電発生箇所を示す。放電が発生した最小のビームエネルギーは 5 keV であった。放電の発生箇所は穴なしパッチの端面で発生した。このパッチの放電直前の表面電位は約  $-1.6\text{ kV}$  であった。放電後の顕微鏡写真を第12図に示す。クーポン B ではクーポン A と異なり、ITO 表面に微量の黄色い変色が見られたが、銀層の消失は見られなかった。

ビームエネルギーを 6 keV まで増加させると、クーポン A と同様に CFRP 上でも放電が発生した。しかし、さらにビームエネルギーを 10 keV まで増加させても、ITO 表面上での沿面放電は確認されなかった。この点がクーポン A と大きく異なる。この原因としては、ITO が導電性で、かつ CFRP にある程度の抵抗で導通しているために面内の電



(a)



(b)

第12図 クーポン B の放電発生点の Ag-PEI 端の顕微鏡写真 (a) 放電前、(b) 放電後。ITO の変色が見られた。

位分布は均一になるとともに表面上で沿面放電を起こすほどの大きな電界が ITO 表面上に発生しないことが挙げられる。したがって、絶縁体表面の導電性コーティングは高エネルギー電子による沿面放電発生の抑制に効果的である。

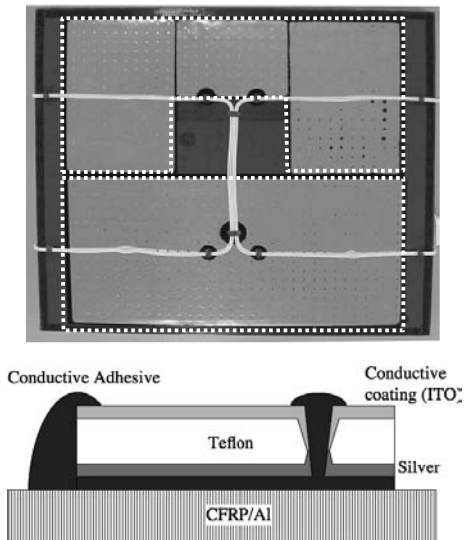
#### 4. 理想的な設計の提案と検証試験

前章の結果を鑑みると、ウェーク側でのオーロラ電子に対しては、まず銀層を明示的に基板に接地することで銀層からの放電発生を抑制し、銀の消失を防止することが必須である。また高エネルギーの電子ビームによる沿面放電の発生の抑制のために、熱制御材の表面は ITO 等の導電性コーティングを施すことが望ましい。さらに ITO 表面を基板に明示的に接続することで表面の帯電を防ぐことができる。

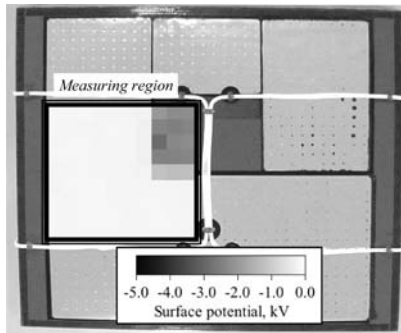
これを検証するために、上記を設計に反映したクーポン C を作成した。第13図にクーポン C の写真と断面の概略図を示す。クーポン C はクーポン A と同様の材質、形状の基板を使用している。熱制御材としては Ag-Tf を使用しているが、テフロン表面は全面に ITO コーティングが施されている。このサンプルは上述の理想的状態を実現するために以下の三つの特徴を有する。

一つ目は熱制御材と CFRP 面を接着する接着剤にクーポンを含有した導電性のものを採用したことである。この導電性接着剤による接地は  $100\text{ k}\Omega$  程度の抵抗値を持つが、第3章のクーポン B の試験より数  $\text{M}\Omega$  の抵抗でも十分に接地の効果が得られた結果から、 $100\text{ k}\Omega$  程度の抵抗値でも明示的な接地と言って差し支えない。

二つ目の工夫として、クーポン B のように熱制御材表面



第 13 図 クーポン C の構造図および断面の概略図

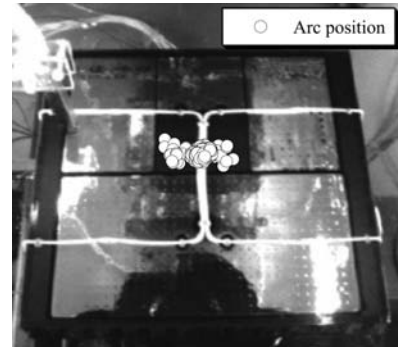


第 14 図 クーポン C の表面電位分布 (ビームエネルギー: 6 keV)

の多数の穴のところで ITO と銀層が電気的に接続されるタイプの Ag-Tf を採用した。また穴のところで導電性接着剤が ITO 表面にあふれるため、ITO の接地効果はクーポン B よりも増している。

三つ目の工夫としては、放電の主な発生箇所である熱制御フィルム端面をすべて導電性接着剤で隠したことである。これにより、熱制御材の端面のトリプルジャンクションは空間から隠され、クーポン表面に曝露しているトリプルジャンクションは CFRP のみとなった。

クーポン C に電子ビームを照射した結果について述べる。試験に使用した回路は第 4 図の回路を用いた。第 14 図はクーポン A, B 同様に 6 keV, 100  $\mu$ A の電子ビームを照射した際の電位を示す。図では中央付近の CFRP 表面が  $-2$  kV 程度まで帯電したことを確認したが、導電性接着剤で接地された ITO 表面はほぼ 0 V を維持しており、期待通り全く帯電しないことを確認した。次に放電が発生するかを調べるために、ビームエネルギーを 3 keV から最大 20 keV まで増加させて照射を行った。このときの全放電発生位置を第 15 図に示す。このクーポンで唯一のトリプルジャンクションを持つ CFRP は他のクーポン同様に 6 keV のビームで放電することを確認したが、ITO 表面では 20 keV ま

第 15 図 クーポン C の電子ビーム照射時における放電発生位置  
ビームエネルギー 6 keV において CFRP から放電が発生。  
熱制御材の上の放電は起こらなかった。

でエネルギーを増加させても沿面放電も輝点状の放電も発生せず、このクーポンの特徴である、穴および端面からの導電性接着剤による導電性表面コーティングと銀層とのいずれかの接地の効果が、完璧な放電抑制性能を有していることを確認した。

## 5. ま と め

極軌道衛星の太陽電池パドル裏面に配置された熱制御材が、オーロラ電子とウェークの組み合わせにより大きく負に帯電する危険性があるため、パドル裏面の構造を模擬したクーポンを製作して帯電・放電の特性を評価した。

熱制御材の表面がむき出しの絶縁体であり、かつ銀層が基板と絶縁体表面のいずれにも接続されていない条件では、ビームエネルギーから最大で 1~2 kV 差程度の負に帯電した。そして、表面電位が  $-1.5$  kV 程度の負になれば放電が発生することがわかった。放電は主に空間に曝された熱制御材の端面で発生し、電気的に浮いた銀層から放電することで銀層が劣化することを確認した。またビームエネルギーを増加させると 9 keV 程度からクーポン全面で沿面放電が発生し、大きな放電となることを確認した。

これに対して表面に導電性コーティングを施した熱制御材では、10 keV の電子ビームに対しても沿面放電が発生しなかった。また導電性コーティング面と基板との間の抵抗値が明示的には基板と接していないものの、表面の空気抜き穴などを介して数 M $\Omega$  から数 G $\Omega$  のオーダーの抵抗値で繋がっていれば、5~6 keV の電子ビームに対しても数十~数百 V 程度の負にとどまった。これは一見大きな抵抗値に思えるが、0.001 m<sup>2</sup> の面積を持ち、100 M $\Omega$  で接地された ITO 表面が数 kV の負になるためには 10 mA/m<sup>2</sup> という電子電流密度が必要となる。そのようなオーロラ電流の発生確率は数十万分の 1 より小さいので殆ど帯電せず、単純でかつ効果的な帯電抑制方法である。

この結果を反映して、絶縁体表面を導電性コーティングし、かつ銀層と導電性コーティング面とを数百 k $\Omega$  程度の抵抗値を持つ導電性接着剤で基板に接着したクーポンを作成した。さらに熱制御材端面での放電を抑制するため、すべての端面を導電性接着剤で埋めた。この結果、最大で 20 keV

のエネルギーの電子ビームに対しても、輝点的な放電も沿面的な放電も一切発生しなかった。また導電性接着剤と導電性コーティングで接地した表面は帯電を完全に抑制した。

極軌道という特異なプラズマ環境では、帯電放電対策を怠ると思いがけない帯電状態を引き起こし、最終的に重大な事故に発展することが検証されている。熱設計との兼ね合いを考慮しなければならないが、本論文で示されたように、裏面の熱制御材の電氣的に浮いた面を積極的に衛星構体に接続することが、帯電・放電事故回避に大きく貢献できる。

#### 参 考 文 献

- 1) 細田聡史, 金 正浩, 趙 孟佑, 豊田和弘, 川北史朗, 舛分宏昌, 高橋真人, 前島弘則: ADEOS-II におけるケーブル間持続放電現象の地上検証, 日本航空宇宙学会論文集, **54** (2006), pp. 427-433.
- 2) Cho, M., Kim, J., Hosoda, S., Nozaki, Y., Miura, T. and Iwata, T.: Electrostatic Discharge Ground Test of a Polar Orbit Satellite Solar Panel, IEEE Trans. Plasma Sci., **34** (2006), pp. 2011-2030.
- 3) Iwata, T., Miura, T., Nozaki, Y., Hosoda, S. and Cho, M.: Solar Array Paddle for the Advanced Land Observing Satellite (ALOS): Charging Mitigation and Verification, Proceedings of 9th Spacecraft Charging Technology Conference, Tsukuba, JAXA-SP-05-001E, 2005, pp. 840-856.
- 4) 恩田忠典, 丸橋克英: ウェーブサミット講座, 宇宙環境科学, オーム社, 東京, 2000.
- 5) Anderson, P. C.: A Survey of Surface Charging Events on the DMSP Spacecraft in LEO, Proceedings of 7th Spacecraft Charging Technology Conference, ESA, SP476, 2001, pp. 331-336.
- 6) Wahlund, J. E., Wedin, L., Carrozi, T., Eriksson, A. I., Holback, B., Anderson, L. and Laakso, H.: Analysis of Freja Charging Events: Statistical Occurrence of Charging Events, ESA Technical Note, SPEE-WP130-TN, 1999.
- 7) Hastings, D. E. and Garret, H.: Spacecraft-Environment Interactions, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- 8) 趙 孟佑, 藤井治久: 宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題, 第1回 宇宙環境と宇宙機の帯電電位, 日本航空宇宙学会誌, **51** (2003), pp. 109-117.
- 9) Hastings, D. E., Cho, M. and Kuninaka, H.: The Arcing Rate for a High Voltage Solar Array: Theory, Experiment and Predictions, J. Spacecraft Rockets, **29** (1992), pp. 538-554.
- 10) Katz, I., Davis, V. A. and Snyder, D. B.: Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO, AIAA Paper 98-1002, 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, 1998.
- 11) Cho, M., Ramasamy, R., Matsumoto, T., Toyoda, K., Nozaki, Y. and Takahashi, M.: Laboratory Tests on 110 V Solar Arrays in a Simulated Geosynchronous Orbit Environment, J. Spacecraft Rocket, **40** (2003), pp. 211-220.
- 12) 麻生誠司, 北村倫基, 細田聡史, 金 正浩, 趙 孟佑, 香河英史: 低地球軌道プラズマ環境下での二次アーク発生条件, 日本航空宇宙学会論文集, **53** (2005), pp. 516-523.
- 13) 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, **51** (2003), pp. 82-84.
- 14) Hamanaga, T., Hatta, S. and Cho, M.: Analysis of the Plasma Environment in Polar Earth Orbit Using Data of Defense Meteorological Satellite Program, ISTS Paper 2006-s-12, 25th International Symposium on Space Technology and Science, Kanazawa, Japan, 2006.
- 15) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブック, 上巻, オーム社, 東京, 1998.