

宇宙機内部浮遊導体の帯電・放電

Electrostatic Charging and Discharges of Electrically Floating Conductors inside Spacecraft under Electron Irradiation

藤井 治久、内野 芳郁

Haruhisa Fujii and Yoshifumi Uchino

奈良工業高等専門学校 電気工学科

Nara National College of Technology, Department of Electrical Engineering

E-mail: fujii@elec.nara-k.ac.jp

1. はじめに

宇宙機内部には外部宇宙環境に存在する高エネルギー荷電粒子が構体表皮を貫通し、低エネルギー化して侵入する。この荷電粒子、特に高エネルギー電子が宇宙機内部搭載機器の絶縁物や浮遊導体などに電荷蓄積すると、放電の発生が危惧される⁽¹⁾。通常、宇宙機の構体表皮は CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 板とアルミハニカム構造で成っており、およそ 0.3mm 厚のアルミニウム板と等価と考えられている。図 1 は、宇宙機表皮が 0.3mm 厚のアルミニウム板と等価であると見なし、宇宙機内部の電子分布を解析した結果を示している⁽²⁾。外部電子環境は NASA の Worst-Case Environment⁽¹⁾ を仮定し、高エネルギー電子に対する Bethe の阻止能公式⁽³⁾を用いて内部に侵入するエネルギー分布を解析したものである。この図から、外部環境の 230keV より大きなエネルギーを持った電子は宇宙機内部に侵入するが、侵入した電子は低エネルギー化することがわかる。低エネルギー化した電子は数 10keV 以下のものも多数存在し、これが宇宙機内部の内部帯電 (Internal Charging)⁽¹⁾ の要因になると考えられる。従って、内部帯電の評価においては低エ

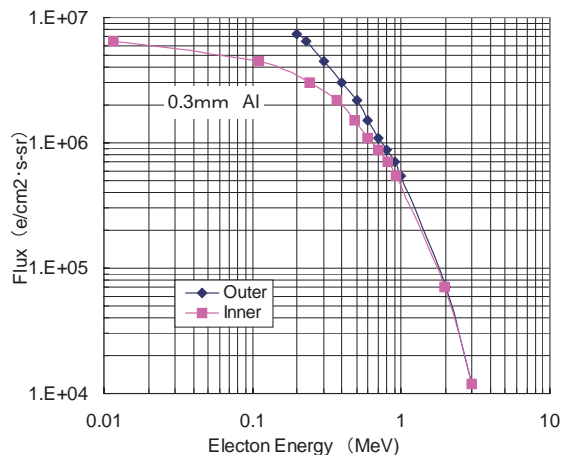


図1 NASA Worst-Case Environment⁽¹⁾時における宇宙機内部の電子エネルギー分布解析結果例⁽²⁾ (構体表皮をアルミ換算厚さ 0.3mm として解析)

ネルギー電子の照射による帯電計測が重要であると考えられる。

一方、宇宙機内部の電気・電子機器には多数のプリント基板が使用され、そのプリント基板上に形成された導体パターンが電氣的に浮遊状態になる場合が想定される。ここでは、内部帯電のひとつであるそのような浮遊導体の帯電を対象とし、低エネルギー電子の照射によるプリント基板上の浮遊導体に蓄積した電子による ESD (Electrostatic Discharge) の検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験試料

本研究においては、図 2 に示すプリント基板試料を用いた。基板は 0.1mm 厚のガラス繊維強化ポリイミド基板である。基板表面 (電子ビーム照射側) 上には銅メッキされた電極パターンが形成されている。その電極パターン寸法が図 2(a) に示されている。基板裏面は、全面 90mm² に銅メッキが施されている。図 2 中、電極 1 と電極 5 は電流測定用で、電極 2、電極 3 が浮遊状態になっている。電極 4 と裏面電極は直接接地した。

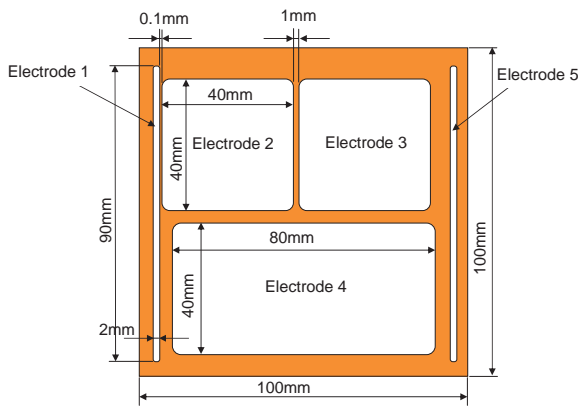
なお、基板試料は、恒温槽中 130°C で約半日乾燥して使用した。

2.2 実験方法

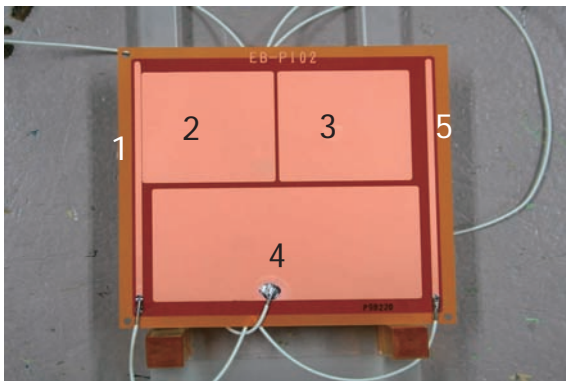
図 3 に実験系の概略を示す。

基板試料を真空チャンバにセットし、電極 2、電極 3 以外の電極からのリード線を真空チャンバの電流導入端子に接続した。その後、真空チャンバをロータリーポンプとターボ分子ポンプにより真空引きし、真空チャンバ内圧力を 10⁻⁶Torr 以下に保持した。その状態を保ち、エネルギー E (keV)、ビーム電流密度 J_b (nA/cm²) の電子ビームを試料に照射した。

電子ビーム照射中および照射後の浮遊電極 2、3 の表面電位を、非接触表面電位計 (TREK 341B) のプローブ (TREK 3450E) を試料表面から 3-5mm の距離を保って計測した。浮遊電極電位はペンレコーダに記録した。また、電極 1、5 からの電流もペンレコーダに記録した。2 つの高周波 CT (Current Transformer) (Pearson 411、2877) が、放電発生時



(a) 寸法図



(b) 試料の写真
図2 実験試料

の電流波形をデジタルオシロスコープ (Tektronix TDS 640A) で計測するため、電極1、5からのリード線に取り付けられた。また、放電発生時の発光を観測するため、デジタルカメラ (Canon DS1260719) を真空チャンバの覗き窓に設置した。

今回、内部に侵入する低エネルギー化された電子を模擬して3-10keVの電子ビームを照射した。

また、実験は全て室温 (約 20°C) で行った。

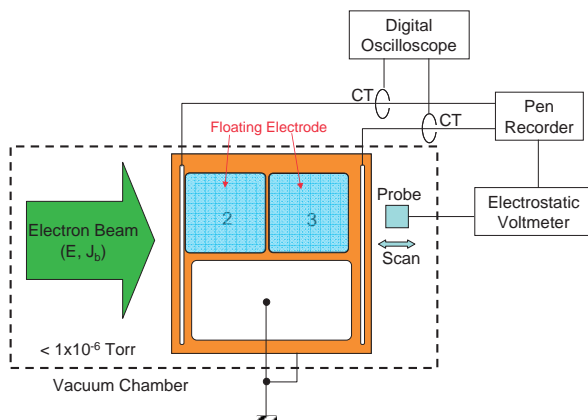


図3 実験系の概略

3. 実験結果と検討

3.1 浮遊電極の帯電電位特性

ここでは、照射エネルギーEごとに帯電・放電特性について述べていく。

(a) E=3keVの場合

図4に、基板試料#2に200分間電子ビーム照射を行った場合の帯電特性を示す。浮遊電極2、3の帯電電位は時間と共に負に高くなっていくが次第に飽和の傾向を示し-1100V程度まで帯電したが、放電の発生はなかった。試料#2以外にもE=3keVでの照射実験を行ったが、放電の発生は認められなかった。

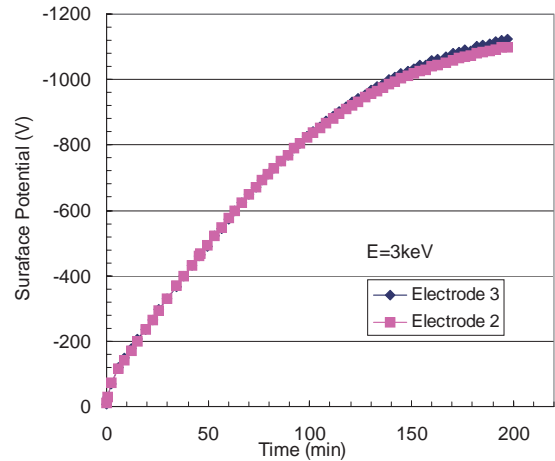
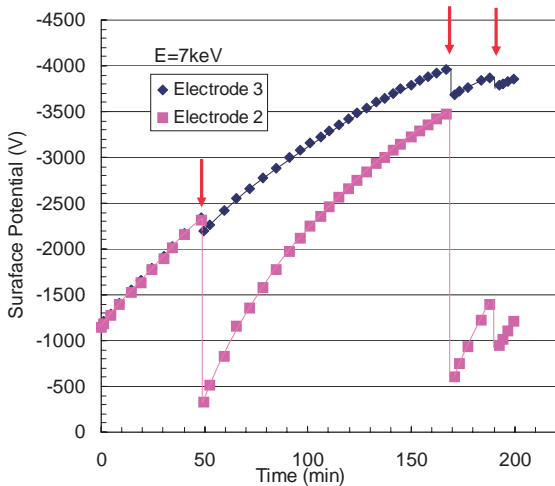


図4 E=3keVで照射された試料#2の浮遊電極の帯電電位-時間特性

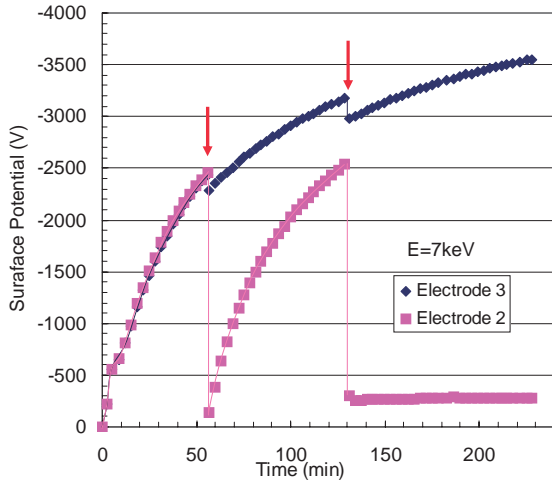
(b) E=7keVの場合

次に、E=7keVでの帯電電位特性の例を図5に示す。図5(a)は、試料#2で、E=3keVでの照射後ある時間においてE=7keVの電子を照射したときの電位特性である。また同図(b)は、試料#3の電位特性である。両図とも、電極2の電位がほぼ0になるような放電が、図中↓で示した時間で発生したことを示している。試料#2(図5(a))では、照射開始後約50分で-2300V程度になり、放電が発生した。この時電極3の電位は少し低下するが、これは電極2が放電したことにより、静電誘導によって生じたと考えられる。いったん放電が発生すると、再度電子ビームによる電荷蓄積が起こり、電極2の電位は負に上昇していく。同様に電極3も負に帯電していく。次に、電極2が約-3500Vになったときに2回目の放電が発生した。この後185分程度でも放電が発生したが、この時の電位は-1400V程度であった。ただ、電極3での放電は認められなかった。また、図5(b)に示す試料#3では、照射開始後50分程度で電位が-2500Vに達し放電が発生した。また、照射開始後130分程度のところでも放電が発生したが、この後電子ビームを照射し続けたが電位は-300V程度から高くならなかった。しかしながら、電極3の電位は上昇し続けた。これは、放電が電極1と2間の0.1mmギャップで発生することによって、電極間が

劣化し低抵抗になり電位が上がらなくなったものと考えられる。



(a) 試料#2



(b) 試料#3

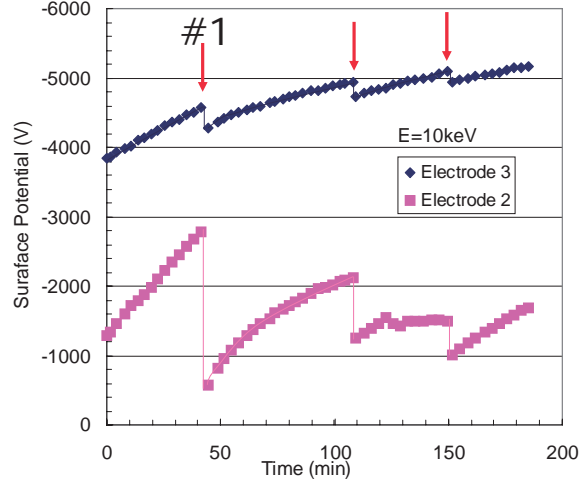
図5 E=7keVで照射された浮遊電極の帯電電位-時間特性 (↓は放電発生を示す)

(c) E=10keVの場合

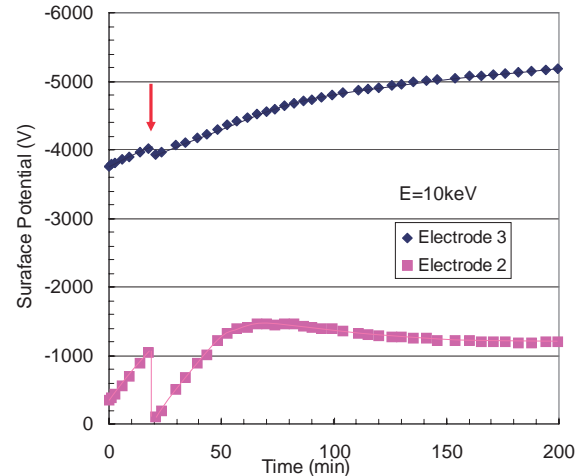
次に、E=10keVで照射した試料#2と#4の電位の時間特性を図6に示す。何れの試料も、前の照射時の電位が残留しているため、電位0からの照射開始になっていない。試料#2(同図(a))では、放電が3回生じた。放電電圧は、-2800V、-2100V、-1500V程度であった。2回目の放電の後電位が上がらない状況が続いたが、これは電極2から電子のエミッションが生じたためであると考えられる。また、図6(b)の試料#4においては、20分程度で帯電電位が-1100V程度になり1回放電が発生し、その後電極2の電位は上昇傾向になったが、-1500V程度に達した後電位の上昇がなくなり若干低下する傾向を示した。これは、放電によって、電極間沿面が劣化し抵抗が小さくなったか、あるいは電極上に微小突起が形成

されそこから電子のエミッションを起こしたためでないかと考えられる。

なお、この場合も電極3からの放電は認められなかった。



(a) 試料#2



(b) 試料#4

図6 E=10keVで照射された浮遊電極の帯電電位-時間特性 (↓は放電発生を示す)

(d) 照射停止後の帯電電位の減衰

図5(b)の場合や、図6に示したように、放電が発生すると、電位が上昇しにくくなる現象が見られた。これは、電極1と電極2の間0.1mmの沿面が放電により劣化したか、放電により電極端部に微小突起が形成されたためではないかと考えられる。そのため、電子ビーム照射後の浮遊電極2、電極3の電位の減衰特性を調べた。図7に、その1例を試料#4について示す。試料#4は、E=3keVで照射した後電極2、電極3共にほとんど電位減衰していないことがわかる。しかし、E=10keVで照射すると、図6に示したように放電が発生したが、照射を継続し200分で照射を止めて、両浮遊電極の電位を計測すると、

図7に示したような減衰特性を示した。電極3の電位は大きな減衰がなかったが、電極2の電位は大きな減衰を示した。このことは、電極2と電極1の間の沿面の絶縁性が劣化し、低抵抗化したためであると考えられる。

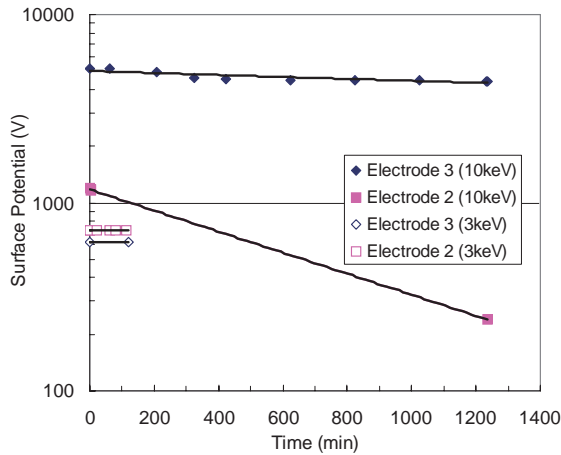


図7 電子ビーム照射後の浮遊電極電位の減衰特性の例

3.2 放電特性

次に、電子ビーム照射によって浮遊電極で生じた放電について説明する。

図8に、図6(a)の試料#2で発生した放電#1発生時の放電光(a)と、CTによる放電電流波形(b)を示す。放電光は、電極1と電極2の間で発生していることがわかる。今回の実験では、何れの放電光も放電発生箇所は0.1mmギャップ間で生じていた。

また、図8(b)の放電電流波形から、電極1から検出された電流は、電極5から検出された電流に比べて大きく、しかも高周波成分を含んでいる。電極1の電流は浮遊電極2から電子が流れ込んだESDであると考えられ、電極5の電流は浮遊電極3の電位変動に伴う変位電流と考えられる。

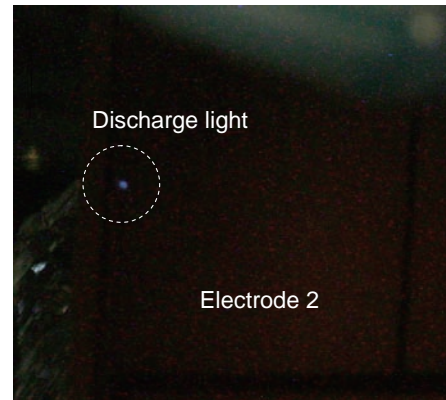
3.3 DC電圧印加による電極間の放電電圧

次に、電子ビーム照射時に発生した放電電圧を真空中の沿面放電電圧と比較するため、0.1mmと1mmの電極間にDC電圧を印加することによって、フラッシュオーバー電圧を測定した。なお、電子ビーム照射時と同程度の真空度であるが、電子ビーム照射は行っていない。

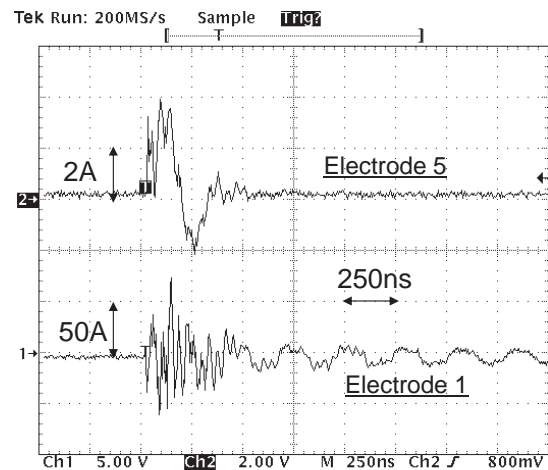
図9にその結果を示す。電極間隔0.1mmの場合は、電極2に負のDC電圧をステップ状に印加して求めたもので、放電電圧は-2.5kVであった。また、電極間隔1mmの場合は、電極2を接地し電極3にDC電圧を印加した。放電電圧は-8.0kVであった。

ここで求められた0.1mmギャップの放電電圧値は、電子ビーム照射時のESD発生電圧と同程度であると考えられる。ただ、1mmギャップでは電子ビー

ム照射によるESDは発生しなかったが、それは電極間隔1mmではフラッシュオーバー電圧が高いためであると考えられる。



(a)放電光



(b)放電発生時の電流波形

図8 E=10keV照射時に試料#2で発生した放電#1(図6(a))

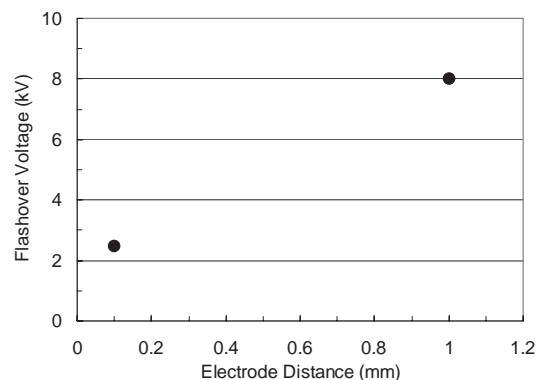


図9 DC電圧印加による電極間の放電電圧(真空中電子ビーム照射なし)(試料#1)

4. おわりに

宇宙機内部に侵入する減速高エネルギー電子を模擬した電子ビームを照射することにより、プリント基板上の浮遊電極パターンで発生する可能性のある

帯電放電現象を予備的に検討した、その結果、次のような結果が得られた。

- (1) 浮遊電極と接地電極の間隔が 0.1mm の場合、電子ビーム照射による浮遊電極電位がおよそ -2kV になると ESD が発生することがわかった。
- (2) ESD が発生すると、電極間の沿面絶縁性能が劣化する可能性がある。

参考文献

- 1) “Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects”, NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-4002 (1999)
- 2) 藤井・宮本、「宇宙機内部帯電に及ぼす荷電粒子環境の解析」、第 53 回宇宙科学技術連合講演会講演集、1A02、pp.5-8 (2009)
- 3) 伊藤憲昭、「放射線物性 I」(森北出版)、第 7 章、(1981)