

Electrostatic Discharges from Electrically Floating Electrodes under Electron Irradiation in Vacuum

Hokuto Fukuda and Haruhisa Fujii

Institute of National Colleges of Technology, Japan

Nara National College of Technology, Department of Electrical Engineering

22, Yata-cho, Yamato-koriyama, Nara, 639-1080, Japan

and

Teppei Okumura and Masato Takahashi

Japan Aerospace Exploration Agency, Aerospace Research and Development Directorate

Abstract:

This paper deals with internal charging phenomena in spacecraft. High energy charged particles in space environment penetrate inside the body of the spacecraft with the lowered energy through the skin. These charged particles, especially high energy electrons, deposit the charge in insulators and/or electrically floating conductors in the onboard electronics. It is possible that the charge-up causes electrostatic discharges (ESD). Therefore, this internal charging phenomenon is very important subject in order to ensure the reliability of spacecraft systems. From this viewpoint, we took note of charge deposition on electrically floating electrodes. We irradiated low energy electron beam simulating electrons penetrating inside the spacecraft to the floating electrodes patterned on a printed circuit board. During electron irradiation, the surface potentials of the floating electrodes were measured by means of a non-contacting electrostatic voltmeter. When the distance between the electrode and the grounded electrode was 0.1mm, electrostatic discharges occurred at the surface potential of about -2300V.

電子ビーム照射による真空中浮遊導体からの ESD

福田 北斗 藤井 治久
国立高等専門学校機構
奈良工業高等専門学校 電気工学科
奈良県大和郡山市矢田町 22 番地

奥村 哲平 高橋 真人
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

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。この場合、外部電子環境を 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⁽²⁾を用いて、内部に侵入する電子のエネルギー分布を解析すると、外部環境の 230keV よりも高い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し、数 10keV 以下のものも多く存在すると考えられている⁽³⁾。この低エネルギー電子が宇宙機内部の内部帯電 (Internal Charging)⁽⁴⁾の要因になると考えられる。したがって、内部帯電の評価においては低エネルギー電子照射による帯電計測が重要と考えられる。

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。筆者らは、内部帯電の一つであるこ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) の検討を行っている。その予備的検討結果について既に報告したが⁽⁴⁾、今回、新たなパターンのプリント基板を用いて特性を評価したので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験サンプル

本研究においては、図 1 に示すプリント基板試料を用いた。基板材料は 100mm²のガラス繊維強化ポ

リイミドで、厚さが 0.1mm と 1.0mm の 2 種類を用いた。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種々形成されている。一方、裏面は全面 90 mm²に銅メッキが施されている。図中、電極①と⑤は電流測定用で、電極②・④が電流測定用電極と間隔 0.1mm か 0.5mm で浮遊状態になる。また、電極③・⑥は電流測定電極と 1.0mm の距離で浮遊状態になる。

なお、基板試料は、恒温槽中 130℃で約半日乾燥してから使用した。

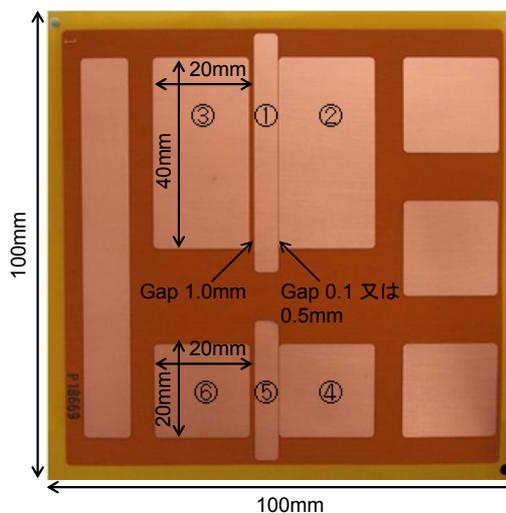


図 1 実験に供したプリント基板 (電子ビーム照射側)

2.2 実験方法

図 2 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、電流測定用電極 (①・⑤) の一つと、浮遊電極 (②③④⑥) の一つ以外の全ての電極および裏面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、真空チャンバを真空ポンプ (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 1×10^{-6} Torr 以下に保持した。その状態を保ったまま、エネルギー E (keV)、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。また、電流計測用電極からの電流はペンレコーダに記録した。放電発生時の電流波形をデジタルオシロスコープ (Tektronix TDS 640A) で取得するため、高周波 CT (Current Transformer)

(Person 411) を電流測定用電極からのリード線に取り付けた。さらに、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、宇宙機内部に侵入する低エネルギー化された電子を模擬して、20keV 以下の電子ビームを試料に照射した。

また、実験は全て室温 (約 20°C) で行った。

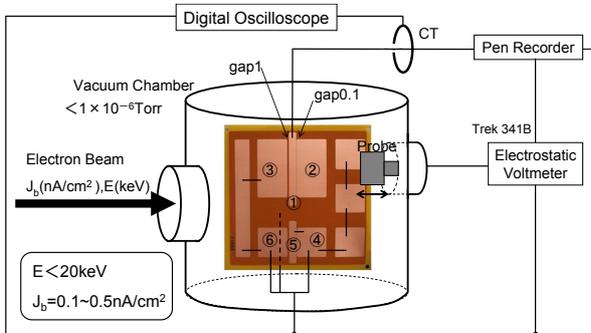


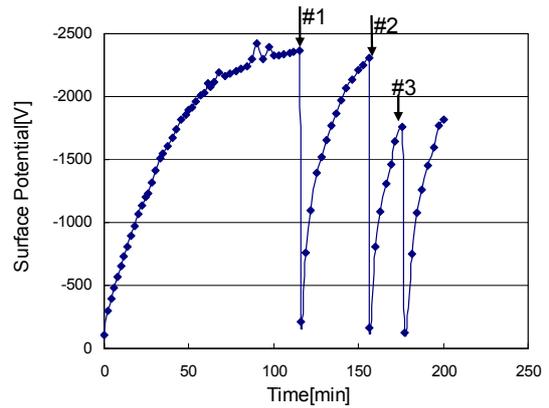
図 2 実験系の概略

3. 実験結果とその検討

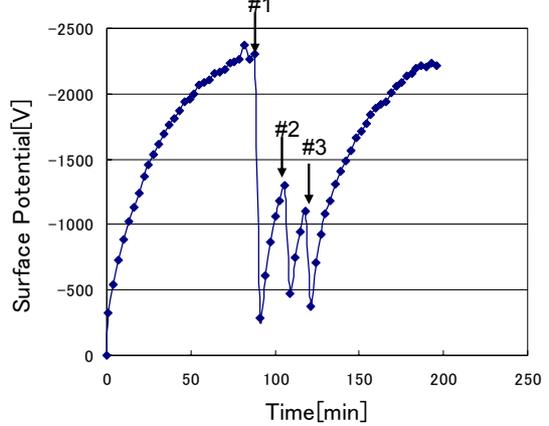
3.1 放電電位について

まず図 3 に、厚さ 0.1mm と 1.0mm の基板における、 $E=5\text{keV}$ の電子ビーム照射中の浮遊電極② (電極間隔 0.1mm) の帯電電位の時間特性を示す。何れの厚さの基板の場合も、電子ビームを照射することにより帯電電位が負に次第に高くなっていく。しかし、図中 ↓#1 で示したように、何れの基板も -2300V 程度で放電が発生した。このような放電は、図 4 に示したように、0.1mm ギャップで発生した。また、放電が発生すると、帯電電位は 0V 程度に低下した後再度負に上昇していくが、放電電位は初回に比べ低くなる傾向がある。これは、放電により電極端部が劣化し放電が起こりやすくなったためで、その劣化部分が放電により除去されると大きな帯電電位にも耐えるようになる (図 3(b))。

このような放電発生電位を、基板厚さ毎に、浮遊電極のギャップ長の関数として示すと、図 5 のようになる。この図から、放電電位はギャップ長が大きくなるにつれて高くなるが、次第に飽和する傾向を



(a) 厚さ 0.1mm 基板



(b) 厚さ 1.0mm 基板

図 3 0.1mm ギャップを持った浮遊電極②の $E=5\text{keV}$ 電子ビーム照射中の帯電電位-時間特性 (↓は放電発生を示す)

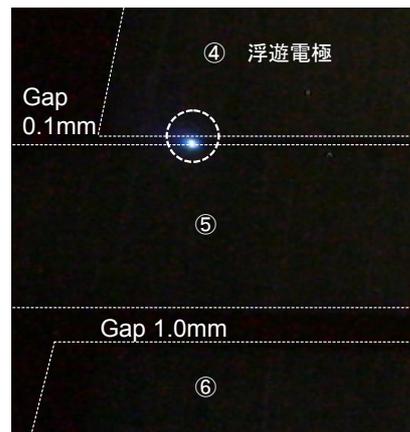


図 4 0.1mm ギャップでの放電光

示すと考えられる。しかしながら、0.1mm 厚基板の方がその傾向が大きい。この理由を検討するため、電界解析プログラム Maxwell SV により、0.1mm と 1.0mm の厚さの基板上の浮遊電極が -100V に帯電したときの 1.0mm ギャップ間の電界解析を行った。その結果を図 6 に示す。この図から、基板厚さが 0.1mm の場合、浮遊電極側に電界が集中しているこ

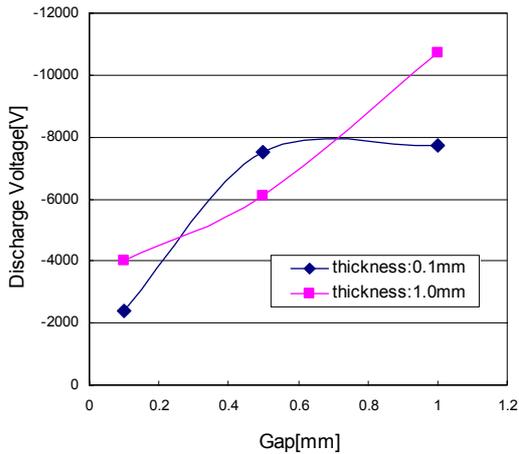


図5 浮遊電極放電電位のギャップ長依存性

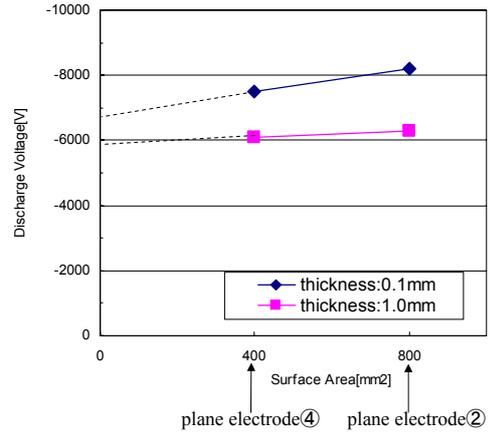


図7 放電電位の浮遊電極面積依存性

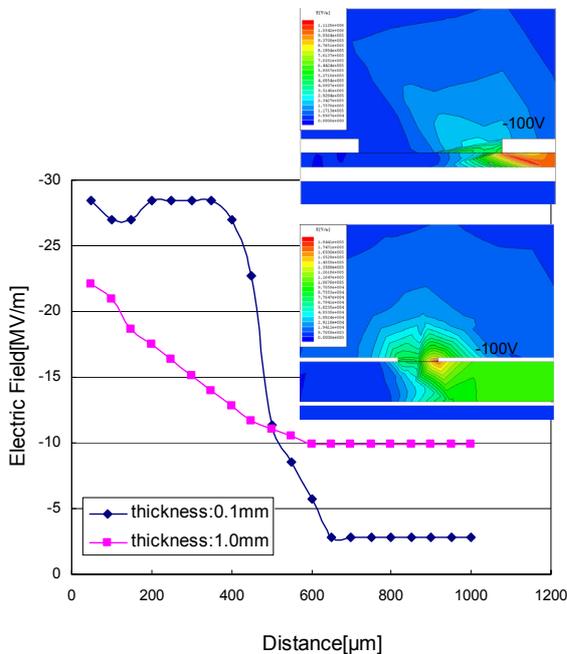


図6 1.0mm ギャップの基板の上に形成された浮遊電極が-100Vに帯電した場合のMaxwell SVプログラムによるギャップ間の電界解析結果（ギャップ間距離は、浮遊電極側からの距離である）

とがわかる。そのため、0.1mm厚基板の放電電位が1.0mm厚基板よりも低くなったと考えられる。

次に、浮遊電極の放電電位の電極面積依存性の例を図7に示す。図1からわかるように、電流測定用電極①と⑤に対向した浮遊電極の面積は2つある。図7は、この電極面積の影響を、0.5mmギャップの場合の放電電位で示したものである。この図から、電極面積の大きい方が放電電位は高くなった。また、放電電位は、基板厚さが厚い1.0mm基板の方が低い結果になった（図5の0.5mmギャップの場合も、このことを示している）。

3.2 放電電流について

前節で述べたような放電が発生すると大きな放電電流が流れる。その例を図8に示す。図8(a)は、厚さ1.0mm基板に $E=10\text{keV}$ で照射中に発生した放電電流波形で、同図(b)は、厚さ0.1mm基板に $E=12\text{keV}$ で照射中に発生した放電電流波形である。この波形から、基板厚さの薄い方が静電容量は大きくなるので、放電電流第1波の時間幅が大きくなっていることがわかる。ただ、波形はかなり振動しており、これはリード線のL成分が効いているためであると考えられる。そのため、第1波だけを時間積分すれば、放電により電流測定用電極に流入する電荷量を得ることができる。これらの電流波形から時間積分した平均電荷量は、厚さ0.1mm基板では $3.9 \times 10^{-7}\text{C}$ 、一方、厚さ1.0mm基板では $2.9 \times 10^{-8}\text{C}$ となった。また、このような放電が起こると、図3に示したように電位が変化する。このような放電時の電位変化を ΔV とすると、放電によって浮遊電極から流出する電荷量 Q は、

$$Q = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \cdot \Delta V \dots (1)$$

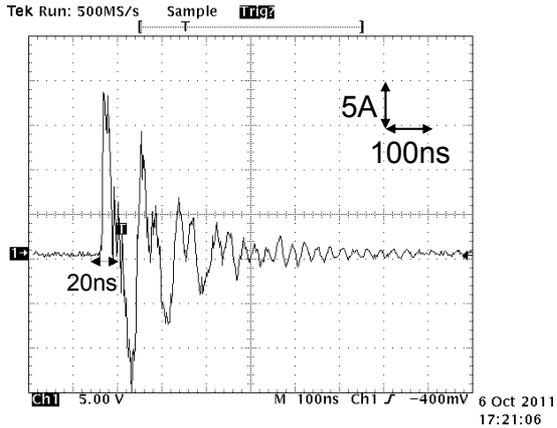
で表される。ここで、 ϵ_0 ：真空中の誘電率（ $=8.9 \times 10^{-12}\text{F/m}$ ）、 ϵ_r ：比誘電率、 d ：基板厚さ、 S ：浮遊電極面積、である。0.5mmギャップを持った浮遊電極においては、

$$\text{厚さ } 0.1\text{mm 基板} : Q=1.1 \times 10^{-6}\text{C}$$

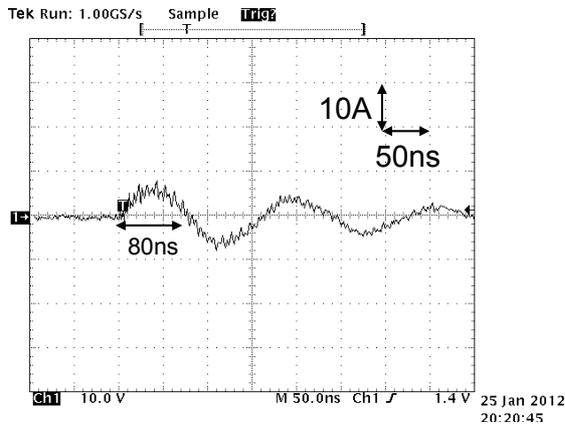
$$\text{厚さ } 1.0\text{mm 基板} : Q=1.6 \times 10^{-7}\text{C}$$

となった。このことから、放電電流波形から求めた流出電荷量は、放電による浮遊電極の電位変化から求めた流出電荷量の1/3から1/5程度になることがわかる。つまり、放電によって流出した電荷は、電流測定用電極に流入するよりも、真空チャンバ内へ、

- (1) "Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects", NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-4002 (1999)
- (2) 伊藤憲昭、「放射線物性I」(森北出版)、第7章、(1981)
- (3) 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)
- (4) 藤井・内野、「宇宙機内部浮遊導体の帯電放電」、第7回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集、JAXA-SP-10-013、pp.191-195 (2011)



(a) 1.0mm 厚基板、 $E=10\text{keV}$



(b) 0.1mm 厚基板、 $E=12\text{keV}$

図8 各厚さの基板で発生した放電電流波形の例

つまり空間に放出されるものが多いと考えられる。

4. まとめ

宇宙機内部のプリント基板上に形成された電氣的に浮遊した電極が存在する場合の内部帯電による放電特性を、 20keV 以下の電子ビームを照射することにより検討した。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 電極間隔と放電電位の関係は、電極間隔が大きくなると放電電位は高くなる。しかし、基板厚さの影響を受け、基板の薄い方が浮遊電極端部に電界が集中するため、放電電位は低くなる。
- (2) 一度目の放電以降放電電位が低下するのは、放電により電極が劣化するためである。
- (3) 電極に製造上の欠陥がない場合、浮遊電極の放電電位は電極面積の小さい方が低く、大きい方が高くなる。
- (4) 浮遊電極の帯電に伴う放電により流出する電荷量のうち $1/5$ から $1/3$ のみが接地電極に流入する。