

衛星搭載プリント基板材料の帯電特性

藤井 治久 (奈良工業高等専門学校)

Electrostatic Charging of PC Board Materials Used for Spacecrafts

Haruhisa Fujii (Nara National College of Technology)

fujii@elec.nara-k.ac.jp

1. はじめに

宇宙開発の進展により多くの宇宙機が打ち上げられ、通信・放送、気象・地球観測など、我々の社会生活に多くの恩恵をもたらしている。昨今、これらの宇宙機は大型化・大電力化の動向にあり、実用性および経済性の観点から、必然的に長寿命化、高信頼度化が要求される。宇宙空間は高真空、熱サイクル、放射線（高エネルギー荷電粒子）、プラズマ、紫外線などが存在する特異で過酷な環境である。この宇宙環境において、荷電粒子による宇宙機の帯電放電現象は、宇宙機の信頼性にとって十分留意すべき問題であるため、これまで多くの研究開発がなされてきた[1]。この宇宙機の帯電放電現象は、大別して、比較的低エネルギーのプラズマ荷電粒子による宇宙機表面材料の表面帯電現象と、高エネルギー荷電粒子が宇宙機構体表皮を貫通し宇宙機内部の搭載機器に帯電し放電する可能性のある内部帯電現象[2]の2つがある。特に、宇宙機が大型・大電力化することにより多種多様な電子機器が組み込まれ、そこでは多くのプリント基板が使用されるため、内部帯電について配慮する必要がある。

本研究では、このプリント基板材料の内部帯電現象を把握する目的で、高エネルギー電子線が宇宙機表皮を貫通し低エネルギー化した電子線を模擬して、代表的なプリント基板材料であるガラスエポキシ樹脂板に電子ビームを照射し、帯電特性を取得して評価を行った。

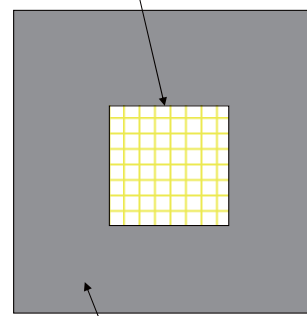
2. 実験方法

2-1 実験試料

今回用いた試料は、図1に示すように、アルミ基板(1mm¹×100mm×100mm)上にガラスエポキシ樹脂板(GFRP)(1mm¹×40mm×40mm)を貼り付けたものである。実用上プリント基板は部品搭載後保護の目的でウレタンエラストマーで被覆されるため、GFRP側試料全面をウレタンコートしたのもも試験に供した。

なお、いずれの試料も、電子ビーム照射時の試料を流れる電流の計測および試料への電圧印加のため、裏面アルミ面にリード線を取り付けた。

GFRP (t1-40×40)



Al基板 (t1-100×100)

図1 試料形状

2-2 実験方法

試料を真空チャンバ内に取り付け、そのリード線を真空チャンバの高電圧導入端子から引き出した。その後、真空ポンプ（ロータリーポンプ、ターボ分子ポンプ）により、真空チャンバ内圧力を 1×10^{-6} Torr以下にした。その状態で、電子ビームをエネルギーE、電流密度 J_b の各種条件で照射し、照射中の帯電電位と、照射停止後の帯電電位の減衰を測定した。

図2に実験系の概略を示す。帯電電位測定には、直線運動導入機により、非接触表面電位計（TREK 341HV）のプローブ（TREK 3450E）を、試料表面から3~5mmの距離を保って挿引した。なお、本実験で用いた電子銃の性能の関係で、低エネルギー電子ビーム（ $E \leq 3\text{keV}$ ）照射の場合や、高エネルギー電子ビーム（ $E > 10\text{keV}$ ）照射の場合は、電子を減速・加速するため、試料全体を直流高電圧電源によりバイアスした。

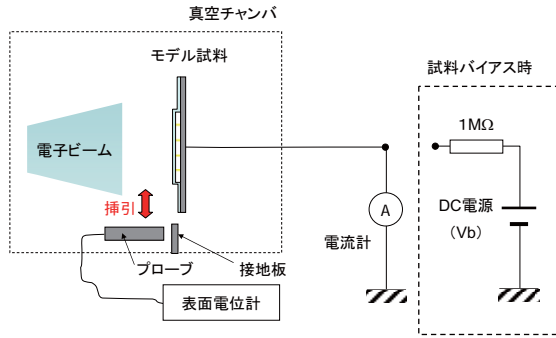


図2 実験系の概略

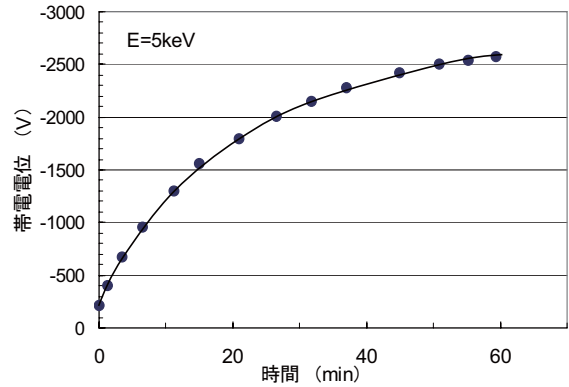
3. 実験結果と検討

3-1 帯電特性

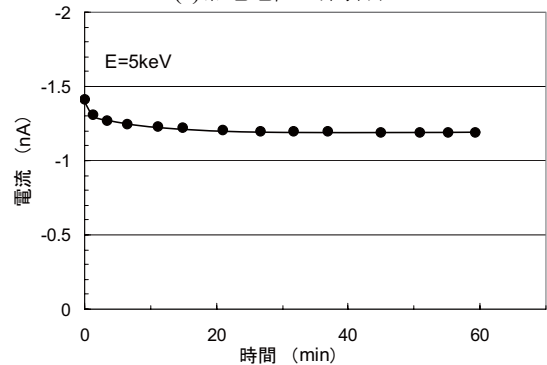
まず、 $E=5\text{keV}$ 、 $J_b=14\text{pA/cm}^2$ での電子ビーム照射時、ウレタンコーティングのない試料のGFRP中央部の帯電電位と、試料を流れる電流の時間特性を図3に示す。電位は時間と共に負に高くなっていき、次第に飽和する傾向になる。一方、図4に示すように、 $E=1\text{keV}$ で照射した場合、ビーム電流密度 J_b の大きい方が電位は早く立ち上がり高くなるが、 $E=5\text{keV}$ (図3)の場合と逆に電位は正に帯電した。これは低エネルギー電子照射による二次電子放出が大きく効いているためと考えられる。

また、図5に、 $E=5\text{keV}$ で電子ビーム照射したときのウレタンコーティングを施した試料のGFRP中央部と、アルミ板上ウレタンコート膜の帯電電位特性を示す。図3の特性と比較すると、GFRP上の電位は、コーティングをすることにより若干低くなっている。また、ウレタンコート膜自体の帯電電位は、GFRPに比べかなり低いことがわかる。

このような種々のエネルギーで60分間電子ビームを照射したときの帯電電位の60min値を電子エネルギーの関数として示すと、図6のようになる。いずれの場合も J_b はほぼ 15pA/cm^2 である。図6(a)はコートなしGFRP、図6(b)はコートGFRPとウレタンコート膜の特性である。いずれも照射電子エネルギー E が 2keV 以上では、 E が大きくなると帯電電位は負に高くなっていくが、 $E < 2\text{keV}$ の場合正に帯電することがわかる。この $E \approx 2\text{keV}$ が、GFRPおよびウレタン膜の二次電子放出係数が1になるエネルギーであると考えられる。また、GFRPならびにコートGFRPは、電子エネルギーに対してほぼ直線的に負帯電電位が大きくなるが、ウレタン膜はGFRPに比べると帯電電位はかなり低く、 $E \geq 15\text{keV}$ で飽和あるいはピークを持つ特性になっている。さらに、GFRPをウレタンコートすると若干帯電電位は低くなる傾向である。



(a)帯電電位-時間特性



(b)電流-時間特性

図3 $E=5\text{keV}$ 電子ビーム照射時のコートなしGFRPの帯電特性

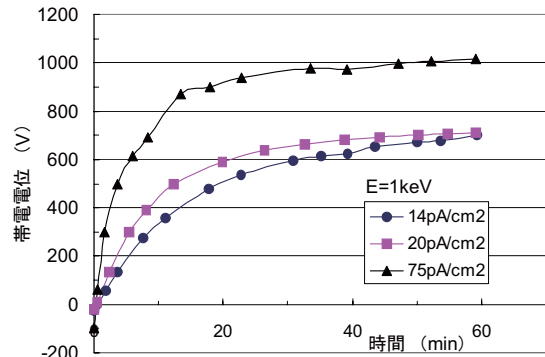


図4 $E=1\text{keV}$ 電子ビーム照射時のコートなしGFRPの帯電電位の時間特性

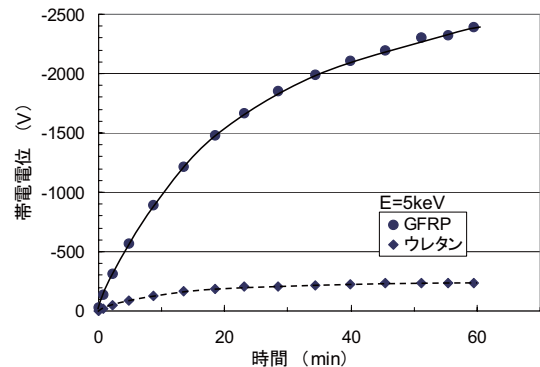
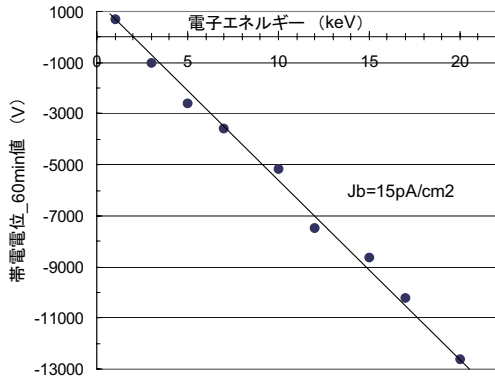
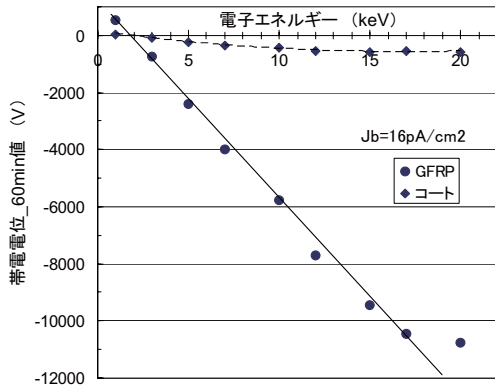


図5 $E=5\text{keV}$ 電子ビーム照射時のコートGFRPの帯電電位の時間特性



(a)コートなし GFRP



(b)コート GFRP とウレタンコート

図6 帯電電位の電子エネルギー依存性

3-2 電位減衰特性

前節で述べた各種条件で照射中の帯電計測を行った後、全ての場合について、ビーム照射停止後の帯電電位の減衰特性を長時間にわたって取得した。その一例として、E=5keVで照射後の電位の減衰特性を図7に示す。同図(a)は、コートなし試料 GFRP 中央部の電位減衰特性である。また同図(b)はコート GFRP とウレタン膜単体の電位減衰特性を示している。ウレタンコートを施すと GFRP は若干早く電位減衰すること、また、ウレタン膜自体の帯電電位は極めて早く減衰することがわかる。

一般に、電位 V_s の減衰は、

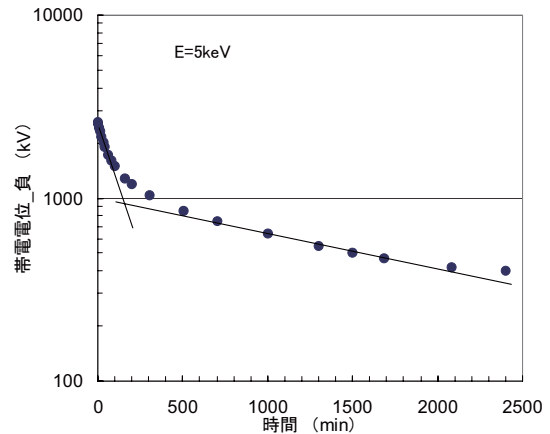
$$V_s = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \dots(1)$$

で表される。ここで、 V_{s0} : 電位初期値、 t : 時間、 τ : 時定数、である。図7中に示したように、ウレタン膜は1本の直線で近似できるが、GFRP は短時間領域 (<100min) と長時間領域 (>500min) の2つの傾きを持った直線で τ が示されると考えられる。時定数 τ は、誘電率 ϵ 、体積抵抗率 ρ の積として、

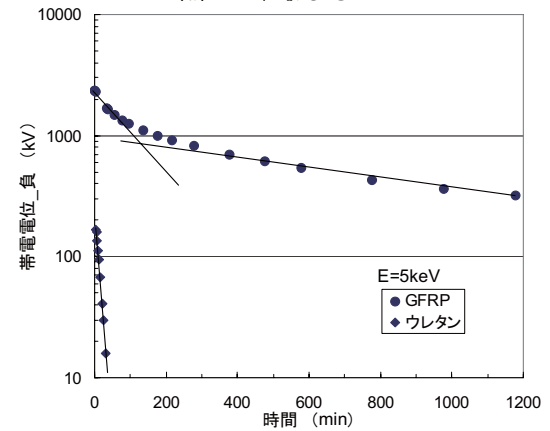
$$\tau = \epsilon\rho \quad \dots(2)$$

で表される。図7に示したような電位減衰特性から求めた体積抵抗率 ρ を電子エネルギー依存性として

示すと、図8のようになる。なお、GFRP およびウレタンの比誘電率 ϵ_r は、それぞれ4.5、6とした。ウレタン膜の体積抵抗率は照射エネルギーに拘らずほぼ $2 \times 10^{13} \Omega m$ であることがわかる。また、GFRPの体積抵抗率は照射エネルギーが高くなると若干高くなる傾向であるが、短時間領域から求めた体積抵抗率はコート有り無しに拘らずほぼ $2 \times 10^{14} \Omega m$ と考えられる。一方、長時間領域から求めた体積抵抗率は、コートなし GFRP の場合は $4 \times 10^{15} \Omega m$ 、コート GFRP の場合は $3 \times 10^{15} \Omega m$ となり、コーティングすると若干体積抵抗率の低下が認められる。



(a)コートなし GFRP

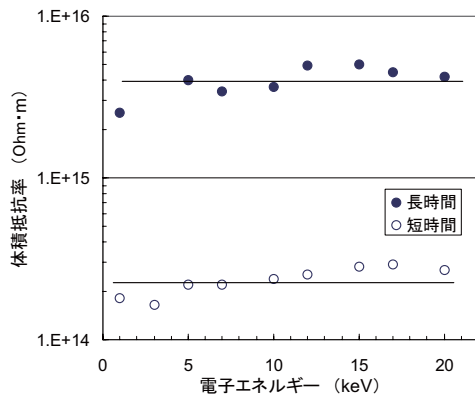


(b)コート GFRP とウレタンコート

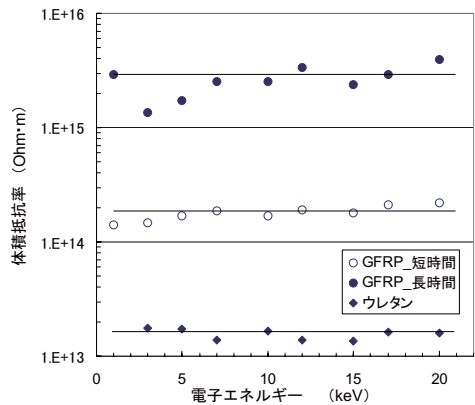
図7 E=5keV 電子照射後の電位減衰特性

3-3 コーティングの効果について

実用上基板の保護の目的でウレタンコーティングがなされるが、今回そのコーティングの有無に関して帯電計測を行った。その結果、コーティングの有無により帯電電位に大きな変化は無かったが、コーティングを施すことにより帯電電位は若干低下した。これは、コーティング膜の体積抵抗率が GFRP に比べかなり小さいため、表面に蓄積した電荷が膜沿面方向にリークするためと考えられる。



(a)コートなし GFRP



(b)コート GFRP とウレタンコート

図 8 体積抵抗率の電子エネルギー依存性

- (3) ウレタンコーティング膜の体積抵抗率は、GFRP の体積抵抗率に比べて 1 桁以上小さく、 $2 \times 10^{13} \Omega m$ 程度である。

参考文献

- [1] 趙・藤井：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、第 51 巻、第 591 号、pp.109-117、2003。
 [2] "Avoiding Problems Caused by Spacecraft On-orbit Internal Charging Effects", NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-4002, 1999。
 [3] 藤井・長谷川・大須賀・松井：衛星用電源基板の絶縁性評価、第 51 回宇宙科学技術連合講演会、2H07、2007。

3-4 放電について

今回、内部帯電現象を把握するため 20keV 以下の各種の電子ビーム条件で帯電電位特性を計測した。これらの条件では最大 -18kV にまで帯電したが、放電の発生は認められなかった。これは、表面が一様で電界の集中部分が無いためと考えられる。しかし、これまで筆者等が行ってきたように、電子ビーム照射下で基板の電極パターン間に高電圧が印加されると沿面放電が起こりやすいので注意が必要である [3]。

4. おわりに

今回宇宙機内部の電子機器に組み込まれるプリント基板材料の内部帯電特性を把握する目的で、代表的な基板材料であるガラスエポキシ樹脂 (GFRP) 板に種々の条件で電子ビームを照射して帯電電位を測定した。その結果、次のような結果が得られた。

- (1) GFRP はウレタンコーティングの有りに拘らず、電子ビームのエネルギー E が $E < 2keV$ では正に帯電し、 $E \geq 2keV$ では負に帯電する。
 (2) GFRP にウレタンコーティングを施すと若干帯電電位が低くなる。