

## 内部帯電センサの研究 Study of internal bulk charge sensor

プロトン照射絶縁材料の帯電計測および解析

Measurement and analysis for charge accumulation in dielectric materials irradiated by proton beam

環境計測技術グループ

*Expert group for space environment engineering,*

三宅弘晃、松本晴久、五家建夫

*H. Miyake, H. Matsumoto and T. Goka*

### Abstract

Electrical charge accumulation characteristics in dielectric materials for a spacecraft panel have studied for understanding of spacecraft charging issue in high energy radiation environment. This study especially has focused on a spacecraft charging accident caused by internal charge accumulation in dielectric materials irradiated by proton beam. The internal charge accumulation of those bulks measurement was carried out using Pulsed Electro-Acoustic (PEA) method. As the results, we obtained a positive charge accumulation in the bulk of samples after proton beam irradiation. However, it was not observed a positive charge accumulation that a quartz glass has an Al evaporated layer on the surface of proton beam irradiation side. Therefore, in this paper, we compare between the PEA's internal charge measurement results and energy band model because of we discuss the charge formation mechanism in the bulk irradiated by proton beam.

### 1. はじめに

近年、帯電が原因と思われる事故によって人工衛星の障害や機能停止が報告されている[1]。人工衛星の軌道は高エネルギー荷電粒子帯の中にあり、それにより衛星の帯電が引き起こされる。

人工衛星の表面材料の帯電と人工衛星障害との関係を調査するためには、照射された荷電粒子が材料内へ蓄積され帯電していく過程を調査する必要があると考え、本研究では高エネルギー荷電粒子が材料内に蓄積し帯電する過程を計測する測定法の開発を行い、材料内部の帯電分布の測定とその解析を行う。本研究で用いた測定法は、帯電を計測する測定法の一つである武蔵工業大学で開発されたパルス静電応力法(以下 PEA 法)である。この PEA 法に、荷電粒子照射中にも測定が行えるよう改良を施された測定装置を用いた。

本実験においては、荷電粒子のひとつであるプロトンに注目し、絶縁材料(ガラス材料・高分子材料)に高エネルギーのプロトンを照射し、照射プロトンによる材料内の帯電分布について測定を行った。その結果、材料の種類により、材料内に正の帯電が観察されるものと、帯電が観察されないものとの、2種の結果が観察された。ゆえに本報告では、プロトンを照射した絶縁材料の帯電分布について、内部帯電の測定結果とその説明をエネルギー帯モデルを用いて検討を行ったので以下に報告する。

## 2. 研究の概要

### (1) 測定装置の作成

PEA 法を用いた材料内部の帯電が計測可能な小型測定装置の開発を行った

### (2) 荷電粒子を照射した際の絶縁材料内部の帯電計測

前述の PEA 法を用いて荷電粒子(電子線・プロトン)を照射した際の材料内部帯電分布の測定を行った。

### (3) 絶縁材料内の帯電機構の検討

測定結果を元に、材料内部に帯電していく過程を組成構造とバンドモデルを元にして作成したでの説明を試みた。

## 3. 成果の概要

### 3-1 内部帯電荷測定原理

PEA 法の概略について説明する。図 1 にパルス静電応力法(以下、PEA 法)の空間電荷分布測定原理を示す。内部帯電した試料を用い、その両面を電極で挟み込む。試料内蓄積電荷密度 $\rho$ により、両電極界面には電極誘導面電荷密度 $\sigma$ が蓄積した状態でパルス電圧  $v_p(t)$ を印加した際に、試料内蓄積電荷 $\rho$ 及び電極誘導電荷 $\sigma$ からパルス状弾性圧力波が発生する。

そのときのパルス圧力波の発生式を(1)式に示す[2]。

$$p(t) = \frac{Z_{Al}}{Z_{sa} + Z_{Al}} \sigma(0)e(t) + \frac{2Z_{Al}}{Z_{sa} + Z_{Al}} \frac{1}{2} u_{sa} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\tau)e(t-\tau)d\tau + \frac{2Z_{Al}}{Z_{sa} + Z_{Al}} \frac{Z_{sa}}{Z_{sb} + Z_{sa}} \sigma(d)e\left(t - \frac{d}{u_{sa}}\right) \quad (1)$$

上式の第一項、二項、三項はそれぞれ、図 1 の接地電極誘導電荷、試料内蓄積電荷、高電圧電極誘導電荷に、パルス状電界が印加されたことによってそれぞれ発生した弾性圧力波(圧縮波・膨張波)を示している。そのパルス状弾性圧力波は試料及び電極を伝搬し、接地電極の試料とは反対側の面に取り付けられている圧電素子で検出されることで電荷信号を観察することができる。圧電素子に圧力波が入力された際に圧電素子の表面に誘起される電荷信号  $q(t)$ は次式(2) 式のように表せられる。

$$q(t) = \frac{2Z_p}{Z_{Al} + Z_p} \frac{u_p}{b} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)p(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

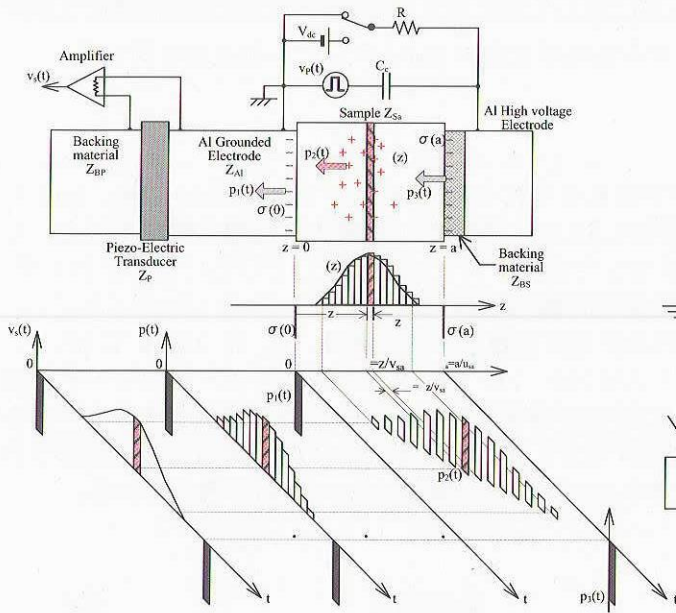


Figure 1. Principle of pulse electro-acoustic method and diagram of pulse shape acoustic wave propagation.

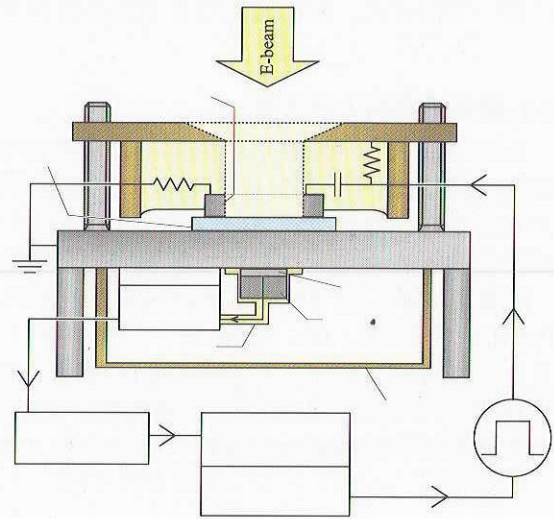


Figure 2. Schematic diagram of improved PEA internal charge measurement system.

ここで、 $h(\tau)$ は圧電素子の圧力波から電荷信号に変化する変換関数であり、電荷信号  $q(t)$ は圧電素子の変換関数と式(2)で示した圧力波の畳込み積分で表される。

この  $q(t)$ は増幅器を通し、電気信号  $v_s(t)$ としてデジタルオシロスコープによって観察される。 $v_s(t)$ の正信号は圧縮波が、負信号は膨張波が入力された際に観察される。各電荷蓄積位置から発生した弾性圧力波は発生・伝搬中、常に相対位置関係が維持されるため、試料の厚さ方向の電荷蓄積位置の分布を測定することができる。

この測定法を用いた測定システムを図2に示す。センサ部の上部電極ユニットには電子線を直接試料へ導入できるように直径10mmの穴が空けられている。これにより電子線照射中にも材料内部の帯電計測が連続的に行える。またセンサ部に接続されたデジタルオシロスコープとパルスジェネレータはPCによって制御されるため、パルス電圧の印加からデータの取得まで自動的に行うことが可能である。

### 3-2 測定試料及び照射・測定条件

測定試料に石英ガラス(旭硝子製)および高分子材料であるPMMA(アクリル樹脂)を用いた。これらの材料は衛星に直接使用はされていないが、PEA法において測定経験が豊富な材料であるため、本研究を進めていく上での基礎データを取得するために用いた。試料の厚さは全て1mmである。また各試料とも、照射面にAl蒸着を施しているものと施していない物の2種を用いた。プロトン照射は真空下で行い、照射条件は石英ガラスでは加速電圧をそれぞれ6、3、1MV、電流密度  $3.3\text{nA/cm}^2$ 、照射時間は30分である。Al蒸着試料においてはその蒸着面を設置した状態でプロトン照射を行った。照射2時間(冷却時間)後に照射チャンバーから取り出しPEA法により材料内部



の帯電分布測定を行った。また、Al 蒸着石英に関してはプロトン照射中の内部帯電計測を 1MeV において行った。照射装置は日本原子力研究所高崎研究所の 3MV タンデム加速器を用いた。

### 3-3 測定結果および考察

石英ガラスと PMMA の内部帯電分布測定結果をそれぞれ図 4 に示す。同図(a)、(b)、(c)より PMMA(蒸着あり・無し)、石英ガラス(蒸着無し)ともに試料内に正電荷の蓄積が観察された。しかしながら、石英ガラス(蒸着なし)では正イオンであるプロトンを照射しているにもかかわらず、すべてのエネルギーにおいて試料内に正電荷蓄積は観察されなかった。

同図中に示した PMMA 及び石英ガラス内の正電荷蓄積ピーク位置は、6、3、1MeV において、PMMA では 421、94、22 $\mu\text{m}$  と、石英ガラスでは 234、72、20 $\mu\text{m}$  と判断できる。このピーク位置とさらに各図中に示した IRACM (日本原子力研究所開発の放射能・線量等の評価シミュレーション)を用いて算出したプロトン飛程値とを比較すると、その差が約 8%以内である。故に観察された正電荷信号は照射され試料内にトラップされたプロトンが観察されたものと考えられる。

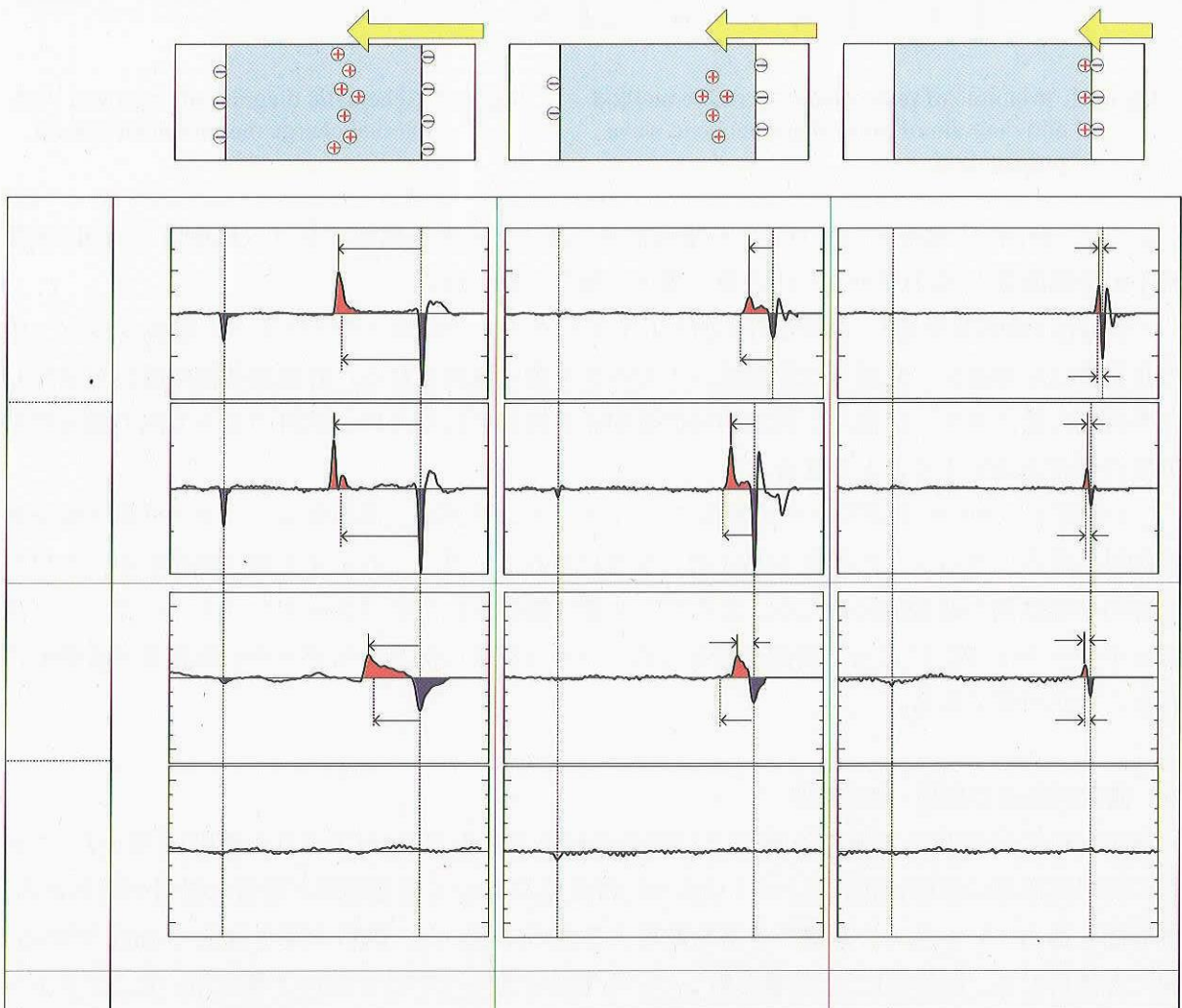


Figure 4. Internal charge measurement results in bulk of PMMA & quartz glass irradiated by proton beam.



蒸着石英ガラスにおいて電荷蓄積が観察されなかった原因を検討するため、プロトン照射中の内部帯電計測を行った。照射条件は、エネルギーのみ 1MeV でその他の条件は図3に示した測定と同様の条件である。その測定結果を図5に示す。図の縦軸に測定時間の経過を示し、横軸には試料厚を、図中右に示したカラーバーは帯電量を示し、正帯電を暖色系、負帯電を寒色系、無帯電を緑色で示している。またプロトンの照射は、図中赤線(測定開始 480 秒後)から開始し、白線(測定開始 2280 秒後)で照射を終了している。図5より、プロトン照射中にも図4に示した照射後の結果と同様に正帯電は観察されない。

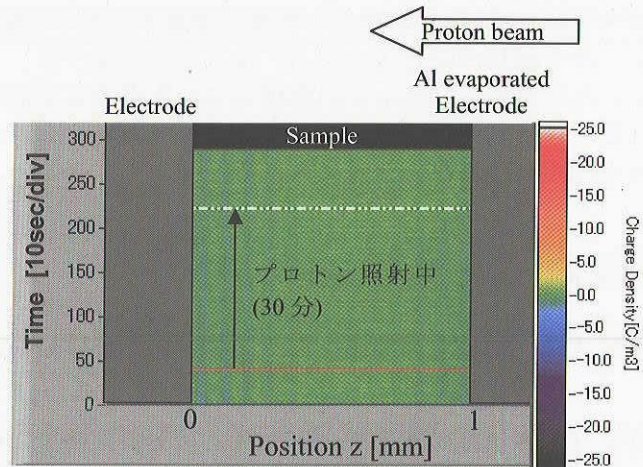


Figure 5. Internal charge measurement result in quartz glass under proton beam irradiation in time progress using improved PEA system. (Quartz glass has an Al evaporated layer on the surface of proton beam irradiation side)

以上の結果から、Al 蒸着石英ガラスにおいては正の荷電粒子であるプロトンを照射しても材料内に帯電は観察されないことが分かる。この現象をエネルギー帯図と測定結果を用いて考察する。図6に測定結果とエネルギー帯図を示す。

同図上段に示した Al 蒸着無しの場合の測定結果では正電荷の蓄積が材料内で観察されていることから、プロトンが材料内に注入されていることが判断できる。

同図上部に示した非蒸着の材料では蓄積したプロトンにより、新たに照射されるプロトンに対しての材料内への注入を制限する方向に電界が材料外の空間へ作用している。その様な電界が作用している状況でも材料内には正電荷の蓄積が観察されているため、照射面の Al 蒸着を接地した状態では非蒸着試料よりも、プロトンが材料内へ注入されやすい状態であると考えられる。よって Al 蒸着試料でも非蒸着試料と同様にプロトンが材料内に注入されていると考えられる。

しかしながら、同図下部に示すように正電荷蓄積は観察されていない。そこで、同図中段に示したエネルギー帯図からプロトンが通過する経路上の物質の励起状況から正帯電が観察されない理由を考察する。

MeV 単位のエネルギーで加速された

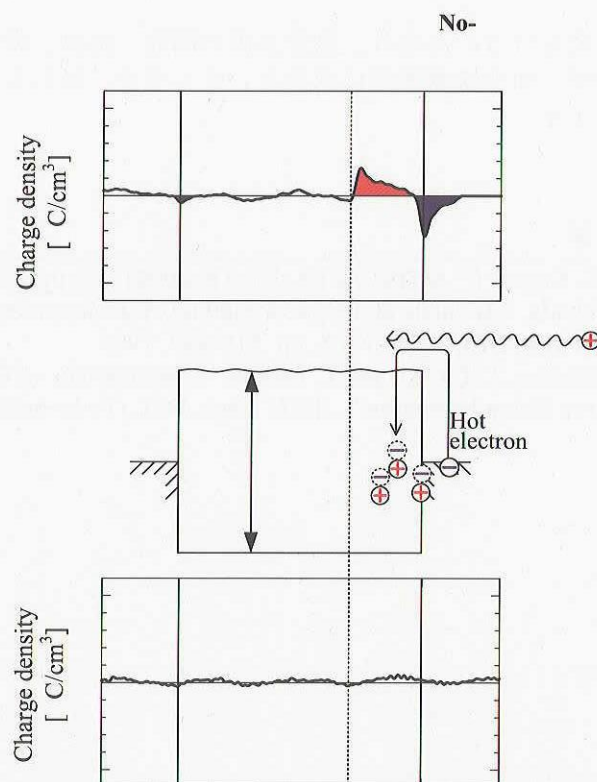


Figure 6. Comparison between measurement results in quartz glass and energy band model of quartz glass under proton beam irradiation.

プロトンはAl蒸着部を通過する際に金属中の電子を励起する。励起された電子はホットエレクトロンとなり材料内に注入される。注入された電子は、石英ガラス内では構造体による局在準位が存在しないため、プロトンが蓄積している場所まで捕獲されることなく移動できる[3]。故に注入された電子は瞬時にプロトンと中和されると考えられる。このため、プロトンは帯電量としては試料中で観察されないと考えられる。

#### 4. まとめ

本年度は、初めて高エネルギープロトンを絶縁材料に照射し、その材料内部の帯電計測を行った。

今後は、本年度の基礎データを基に、実際に衛星に使用されている太陽電池のカバーガラスや熱制御材であるカプトンフィルムなどを対象に、プロトン・電子線を照射時における材料内部の帯電計測を行い、帯電メカニズムの解析を行うとともに、本研究で用いた測定装置が複合放射線環境において帯電センサとして使用できるか、その可能性の検討を行っていく。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、測定装置の開発・提供に関してご指導いただいた武蔵工業大学の高田達雄教授、田中康寛教授に感謝をいたします。試料をご提供いただいた旭硝子株式会社にも感謝いたします。

#### 参考文献

- 
- [1] H. C. Koons: 6<sup>th</sup> SCTC, AFRL-VS-TR-20001578, pp.7-10(2000)
  - [2] T. Takada, "Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distributions in Dielectrics", IEEE Trans. DEI, Vol.6, No.5, pp. 519-547, 1999.
  - [3] H. Miyake, T. Tanaka and T. Takada, "Characteristic of Charge Accumulation in Glass Materials under Electron Beam Irradiation", IEEE Trans. DEI, (To be published)