

# 帯電計測に関する研究 Study of measurement for charging on the materials for spacecraft

環境計測技術グループ  
*Space environment measurement group,*

三宅弘晃、松本晴久、五家建夫  
*H. Miyake, H. Matsumoto and T. Goka*

電源技術グループ  
*Space power engineering group*

仁田工美  
*K. Nitta*

## Abstract

Electrical charge accumulation characteristics in dielectric materials for a spacecraft panel have studied for understanding of spacecraft charging problem 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 PEA (Pulsed Electro-Acoustic) 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.

Furthermore, we studied how to measure the secondary electron emission (SEE) of metal and insulating materials used for satellite thermal insulation or other such purposes. SEE yield measurement is very important for analyzing charge accumulation on the satellite surfaces due to the space environment because electron emission. Therefore, we tried to measure the SEE yield. In this report, we introduce the SEE yield measurement results of reference materials (Au, Ag and Quartz glass) and insulating materials. From those results, we discuss the characteristics of SEE that depend on each material.

## 1. はじめに

近年、帯電が原因と思われる事故によって「みどり2号」のように人工衛星の障害や機能停止が報告されている。<sup>[1]</sup> 人工衛星の軌道は高エネルギー荷電粒子帯であり、それにより衛星の帯電が引き起こされると考えられている。衛星軌道上に存在する高エネルギー荷電粒子による人工衛星の表面材料の帯電と人工衛星故障との関係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現象を計測する測定法の開発を行い、材料内部の帯電状況の測定・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藏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法を応用し、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、材料により、材料内に正の帯電が観察されるものと、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帯電が観察されないものと、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状況について、内部帯電の測定結果とエネルギー・バンドモデルを用いて検討を行ったので以下に報告する。

さらに、前述のみどり2号の事故により、衛星の設計段階で実際の運用時に生じる帯電量を見積もるために帯電解析プログラム「MUSCAT」の開発も進められているが、その入力パラメータとしての二次電子放出係数等の物性データは現在日本では整備されていない。そこで、筆者らは MUSCAT に入力するために用いる

材料パラメータの測定を開始しており、特に二次電子放出係数について、今回は報告する。

## 2. 研究の概要

昨年度までに以下項目について研究を行った。

### (1)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(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。

### (2)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帯電モデルを作成した。

### (3)二次電子放出係数の測定

二次電子放出係数の測定装置を KEK との共同研究で整備し、標準材料の測定を行った。さらに衛星設計基準作成 WG 1 提供による各種材料の計測を行った。

## 3. 内部帶電荷測定原理

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。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<sup>[2]</sup>。

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

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生ずる静電気力によって各蓄積電荷からそれぞれ発生した圧力波(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電気荷信号に変換されて検出されることで電荷信号を観察す

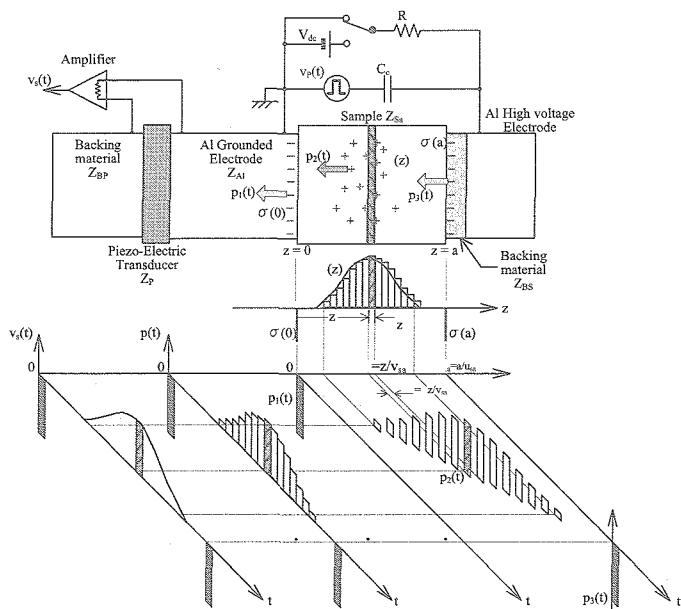


Figure 1. Principle of PEA method

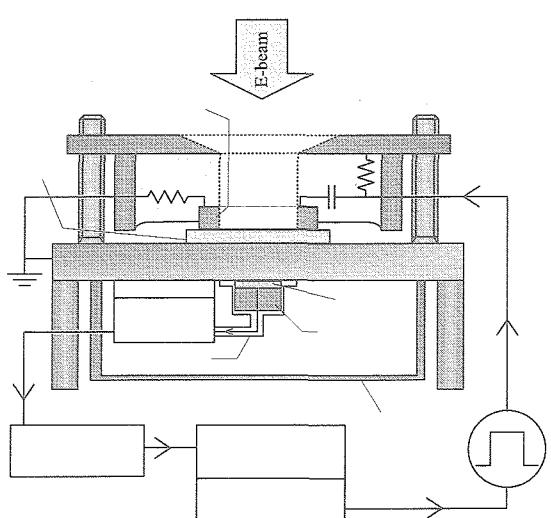


Figure 2. Internal charge measurement system applied PEA method.

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。

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

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)で示した圧力波の畠込み積分で表される。

この  $q(t)$  は増幅器を通して、 $v_s(t)$  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、負信号は膨張波が圧電素子に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で行うことが可能である。

#### 4. 内部帶電計測

##### 4-1. 測定試料、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基本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。Al 蒸着試料においてはその蒸着面を接地した状態で放射線の照射を行った。

照射する放射線源には電子とプロトンを用いた。電子線の照射は大気圧下で行い、プロトンの照射は真空中で行った。照射粒子条件は、電子線照射は加速電圧 500keV、電流密度 150nA/cm<sup>2</sup>、プロトン照射は加速電圧 6MV、電流密度 30nA/cm<sup>2</sup>であり、照射時間は電子・プロトン共に 180 秒である。ただし、プロトン照射時においては照射イオンによって試料よりアウトガスが発生したため、真空チャンバー汚損防止のため 45 秒で照射を停止した。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。照射装置に日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所 1 号加速器と 3MV タンデム加速器を用いた。

##### 4-2. 電子線照射による負電荷蓄積

電子線を照射した際の材料内部帯電分布測定結果を図 3 にそれぞれ示す。同図の電子線照射 PMMA の測定結果より、図中下段の信号波形中央に最大値 -18.0μC/cm<sup>3</sup> の負電荷が試料内の中央部に蓄積しているのが観察されていることが分かる。これは材料内にトラップされた照射電子が観察されることになる。[3]

##### 4-3. プロトン照射による正電荷蓄積

図 4 のプロトン照射 PMMA 及び石英ガラスの材料内帯電分布測定結果を図 4 に示す。同図(a)、(b)より PMMA(蒸着あり)、石英ガラス(蒸着なし)とともに試料内に正電荷の蓄積が観察された。また、同図(c)より石英ガラス(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、試料内に電荷蓄積は観察されなかった。同図(a)及び(b)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それぞれ 421μm と 234μm と判断できる。このピーク位置と IRACM(日本原子力研究開発機構開発の放射能・線量等の評価システム)を用いて算出したプロトン飛程値である 412μm(PMMA) 及び 234μm(石英ガラス)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。

##### 4-4. 電子線及びプロトン照射による材料の無電荷蓄積

電子線及びプロトン照射をした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考察する。

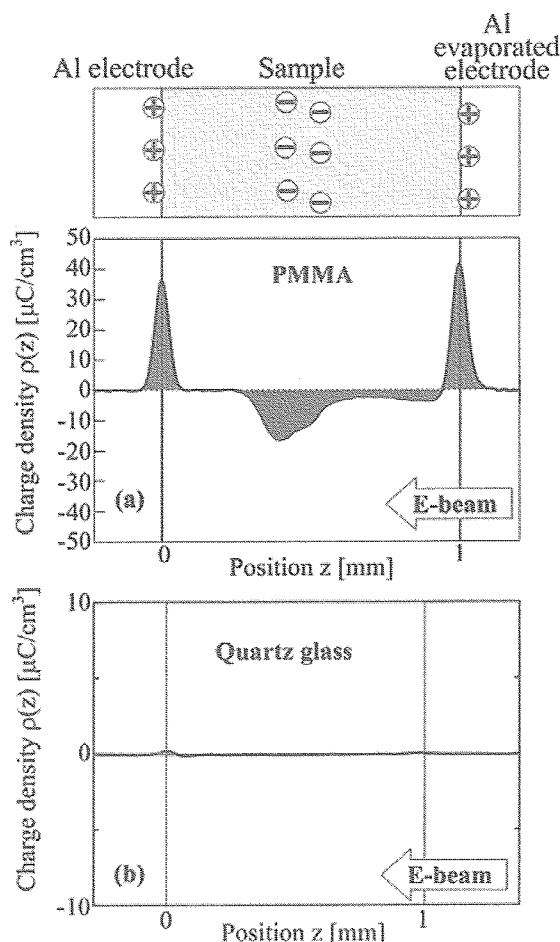


Figure 3. Internal charge measurement results in PMMA & quartz glass

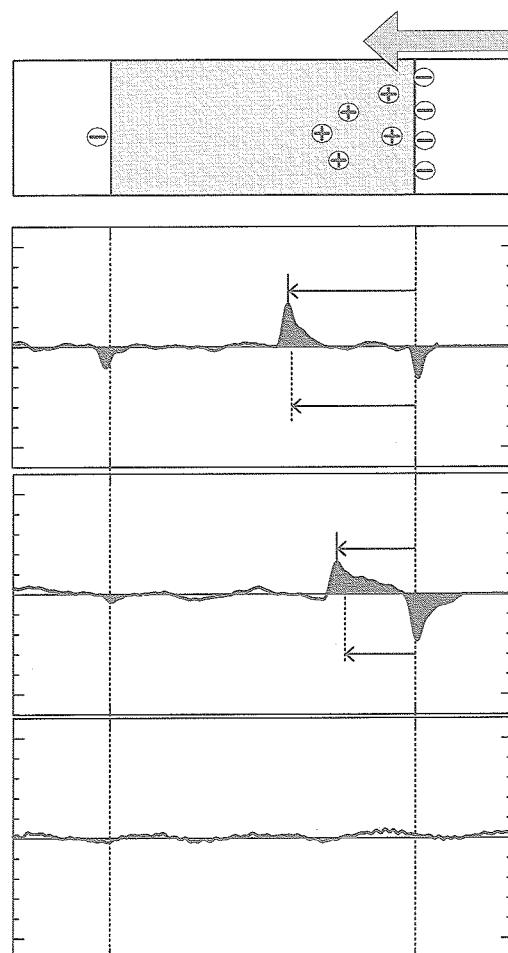


Figure 4. Internal charge measurement results in PMMA & quartz glass irradiated by Proton beam. (6MV)

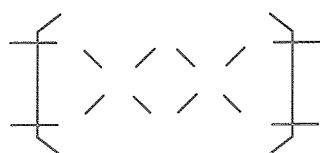


Figure 5. Schematic diagram of  $\text{SiO}_2$  structure

図 3 に示した電子線を照射した石英ガラスの無電荷蓄積についてであるが、石英ガラスは図 5 に示すように、Si と O のネットワークで構成されており、不純物やアルミナ等によって生ずる局在準位が存在しない。故に材料内に注入された電子の捕獲量が非常に少ないため観察されないと考えられる。また、図 4 に示したプロトン照射石英ガラスの無電荷蓄積については、加速されたプロトンが Al 蒸着部を通過する際に金属中の電子により瞬時に中和されると考えられる。このため、プロトンは水素として材料に注入されるために、試料中には正電荷の蓄積が観察されないと考えられる<sup>[4,5]</sup>。

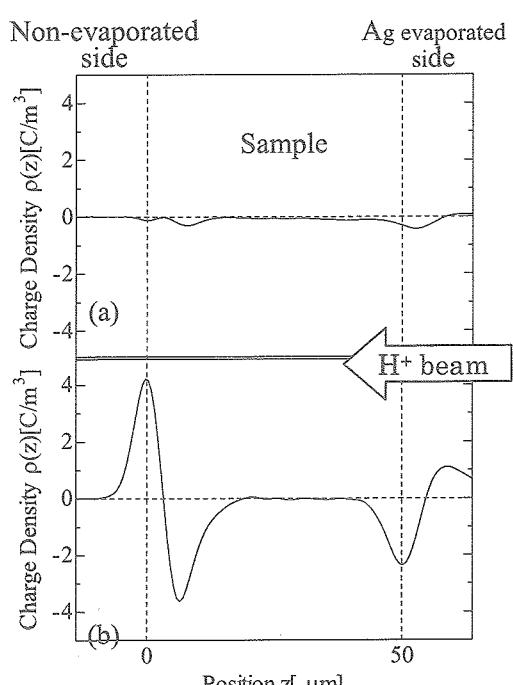


Figure 6. Internal charge measurement results in Al-FEP

#### 4-5. プロトン照射 Ag-テフロンの内部帶電計測

宇宙機に使用されている材料である厚さ 50μm の Ag-テフロンに加速電圧 2MeV、電流密度 10nA/cm<sup>2</sup> のプロトンを照射した際の内部帶電計測を行った。その測定結果を図 6 に示す。同図(a)は照射 60 分後(照射チャンバーから取り出した直後)、(b)は一日後の測定結果である。同図(a)より、照射直後に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、僅かながら負電荷が照射面とは反対側の電極近傍試料内に観察されている。さらに同図(b)より照射一日後には、負電荷蓄積がピーク値で -3.6C/m<sup>3</sup>まで増加している。プロトンを照射しているにもかかわらず負電荷が蓄積しさらに蓄積量が照射後に増加する原因については、今後再現性の確認を含めて検討していく必要がある。

### 5. 表面帶電計測 一二次電子放出係数測定

#### 5-1. 測定装置、測定試料及び二次電子放出係数δ算出方法

二次電子放出(SEE)の測定に用いた測定装置を図 7 に示す。この測定装置はファラデーカップを取り付けたビームブランкиング型走査電子顕微鏡を用いておこなった。測定は、材料表面の帶電を避けるためにパルスビーム法(パルス幅 1 ms, 電流 100 pA)を用いた(2-4)。

試料には標準試料として用いている Au、Ag、石英ガラスと実際に人工衛星の太陽電子カバーガラスに用いられている MgF<sub>2</sub>コーティングを施したガラス材料の 4 種を用いた。二次電子放出係数 δ は入射一次照射電子 I<sub>p</sub> のエネルギー E<sub>p</sub> を 600eV ~ 5keV までの照射し、その際の二次電子放出電流 I<sub>s</sub> の計測を行っている。二次電子放出係数 δ は I<sub>p</sub> と I<sub>s</sub> のピーク値の比を取ることによって得られる。算出式を式(1)に示す。

$$\delta = I_s / I_p \quad (1)$$

#### 5-2. 二次電子放出係数 δ 測定結果及び考察

図 8 に各種試料における二次電子放出係数 δ の測定結果を示す。同図より δ の最大値である δ<sub>max</sub> は Au、Ag 及び石英ガラスにおいてはそれぞれ 1.75(E<sub>p</sub>=600eV)、1.67(E<sub>p</sub>=700eV) 及び 3.38(E<sub>p</sub>=700eV) であることが分かる。また、MgF<sub>2</sub>コーティング面を有したガラス材料では E<sub>p</sub>=800eV で δ=5.72 と最大値となっている。これら金、石英ガラス及び MgF<sub>2</sub>コーティングガラスの測定結果と既存の報告値を比較した結果を表 1 に示す。同表より、金及び石英ガラスに関しては本測定装置を用いることで正確に測定が行えていると言える。しかしながら、MgF<sub>2</sub>コーティングガラスの測定値に関しては既存の報告値と比較して約 50% の値になっている。一般的にアルカリ土類である Mg を含有した材料はイオン化傾向が高く二次電子放出係数も標準試料の数倍とされており、本測定結果もその傾向を示していると言えるが、報告値(川北氏による測定、2000 年に測定された結果)とは大きな差がある<sup>[4]</sup>。そこで、この差を考察するため、2000 年次の測定に使用した同材料の再測定、及び今回の測定で用意した材料に超音波洗浄を施したもの用意し、二次電子計測を行い、比較を行った。その結果を図 9 に示す<sup>[6]</sup>。同図中において、2000 年次の測定で使用されたサンプルについて今回の測定で得られた結果を青色の三角で、また今回の測定で用意したサンプルに超音波洗浄を施した後の測定結果については赤色の四角で示している。同図より、本測定における 2000 年次サンプルの SEE 最大値は δ<sub>max</sub>=6.57 であり、今回用意したサンプルの測定結果と比較し約 15% 大きいだけで、さほど大きな差は観察されなかった。このように過去に測定した結果より今回の計測結果が大幅に小さくなってしまった原因として、材料コーティング面の経年劣化等が考えられる。また、超音波洗浄を施したサンプルにおいては、δ<sub>max</sub>=2.56 とこちらは 45% もさらに小さい値を示している。これらの値は石英ガラスの測定結果に近く、超音波洗浄によって表面のコーティング面が剥離しガラス基板面の測定を行ってしまった結果であると考えられる<sup>[7]</sup>。本測定において用意をしたサンプルの値は、2000

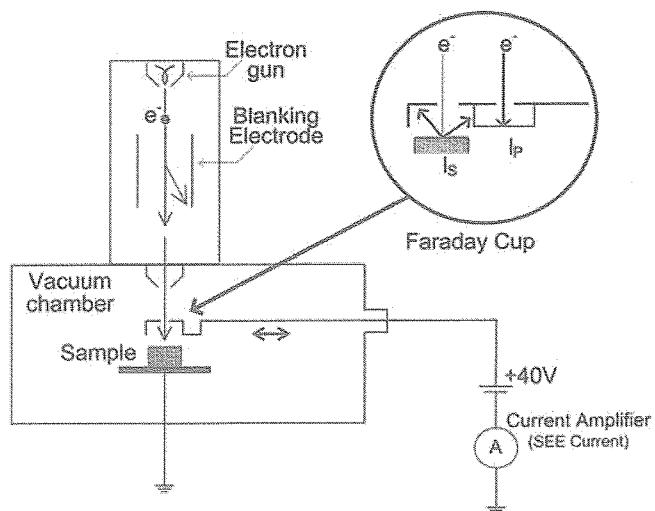


Figure 7. Schematic diagram of SEE measurement system using BBSEM. Faraday cup can be shift to each probing position of I<sub>n</sub> and I<sub>s</sub>.

年次に手配をしたサンプルを今回計測した際の結果と比較し近い値を示した結果となっている。以上より、今回計測したサンプルも 2003 年に製造された試料であり、今日までにコーティング面が劣化したものである可能性が高い。しかしながら、劣化に関して詳しく言及するには本実験だけでは十分とは言えないため、今後更なる調査が必要である。

## 5.まとめ

電子線及びプロトン照射をした絶縁材料の内部帶電計測を、PEA法を用いて行った。その結果、石英ガラスにおいては、その組成構造と試料照射面の蒸着等の状態により、材料内部の帶電が観察されないという結果が得られた。また、Ag-テフロンフィルムにプロトンを照射した場合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、負電荷の蓄積が観察されるという理解し難い結果が得られた。以上の結果を解析するために、今後照射線量や線量率等、及び組成構造等をもちいて総合的に帶電状況を検討していく必要がある。また、二次電子放出係数測定に関しては、基本的な測定が行える実験装置の手当ては完了した。 $MgF_2$ コーティングガラスの測定結果については今後更なる調査が必要であるが、その他材料に関しても鋭意測定を行っていき、MUSCATに入力する物性データの整備を行っていく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は東大原子力研究総合センター原研施設総合共同研究の助成により行われた。また本報告の執筆にあたり、測定や検討におきまして多大なご協力を頂きました武藏工業大学の高田達雄名誉教授、田中康寛教授、ならびに高エネルギー加速器研究機構の齊藤芳男教授、道園進一郎助手に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder and P. C. Anderson, "The impact of the space environment on space systems", Proceedings of the 6<sup>th</sup> Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, AFRL-VS-TR-20001578, pp.7-11 (1998)
- [2] 宇宙開発委員会調査部会, “環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどりII」の運用異常に係る原因究明及び今後の対策について”, 宇宙開発委員会報告書, (2004)
- [3] T. Takada, "Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distributions in Dielectrics", IEEE Trans. DEI, Vol.6, No.5, pp. 519-547 (1999)
- [4] 三宅弘晃, “人工衛星太陽電池用ガラス材料の電荷蓄積特性に関する研究” 武藏工業大学博士論文, pp.77-117 (2005)
- [5] 三宅、田中、高田, “プロトン照射絶縁材料の正電荷蓄積”, 平成 17 年電気学会全国大会, Vol.2, 2-010 (2005)
- [6] S. Kawakita, M. Imaizumi, M. Takahashi, M. Matsuda, S. Michizono and Y. Saito, "Influence of high energy electrons and protons on secondary electron emission of cover glasses for space solar cells", 2002 Proceedings of 20th ISDEIV, pp.21-24, 2002.
- [7] H. Miyake, K. Nitta, S. Michizono and Y. Saito, "Secondary Electron Emission Measurement of Insulating Materials for Spacecraft", Proceedings of ISDEIV2006, pp.21-24, 2006.

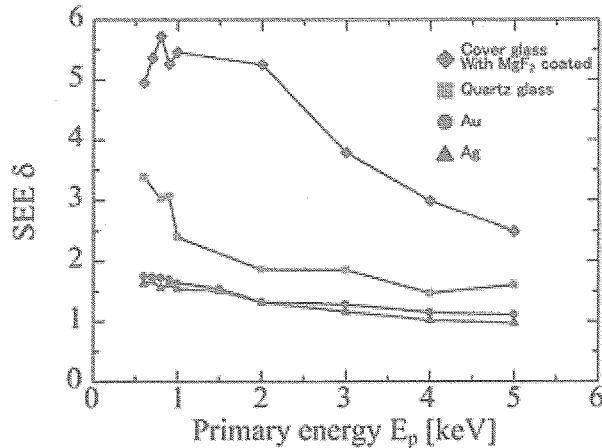


Figure 8. Relationship between SEE yield  $\delta$  and primary irradiated electron energy

Table 1. Comparison  $\delta$  between measurement and reported value

	報告値※	測定値
金	1.4-1.6	1.75
石英ガラス	3.5	3.38
$MgF_2$	11	5.75

※電気学会技術報告による

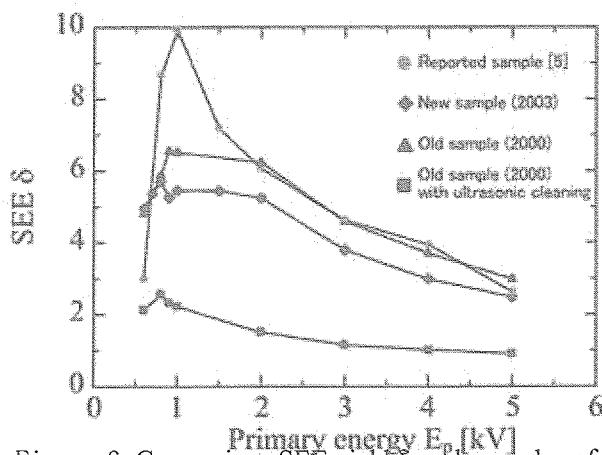


Figure 9. Comparison SEE yield  $\delta$  each samples of cover glass with  $MgF_2$  coating. We measured 3 samples. Treated and non-treated old samples which were made in 2000 and the new sample which was made in 2003.