課題番号	2018A-C19
利用区分	成果公開(学術)

# 社会基盤の高信頼化に資する

# 革新的衛星帯電設計標準構築のための衛星搭載用帯電計測装置の開発

Development of spacecraft on-board charge measurement system for establishing innovative satellite ESD design standard contributing for high reliability of social infrastructure

 三宅 弘晃<sup>1)</sup>
 榎 海星<sup>1)</sup>
 田中 康寛<sup>1)</sup>

 Hiroaki MAIYKE
 Kaisei ENOKI
 Yasuhiro TANAKA

# 1)東京都市大学

#### (概要)

Surface materials of spacecraft operated in low and medium earth orbits, such as a GPS observation satellite and earth observation satellite, are charged and discharged duet to radio-active rays, such as electron and protons. Such electro-static discharge is the one of origin of satellite operation anomaly. Therefore, in this study, we focus the proton irradiated on FEP (fluorinated-ethylene-propylene copolymer) and measure the space charge distribution using newly developed on-site space charge measurement system which can measure space charge accumulation during proton irradiation. As the result, positive charges were accumulated and saturated during the irradiation. after saturation of positive charge accumulation, those positive charge accumulation were decreased during irradiation.

<u>キーワード</u>:フッ素系絶縁材料、宇宙機、陽子線、空間電荷分布、パルス静電応力法

#### <u>1. 目的</u>

宇宙機は激しい温度変化(-120~150°C)のある過酷な環境下で運用されているため、機内の温度を 一定に保つ必要があり、宇宙機表面は多層断熱材(Multi layer insulator : MLI)や太陽光反射材 (Optical solar reflector : OSR)といった絶縁材料で覆われている。宇宙機は電子や陽子などの荷電粒子 が多量に捕獲された放射線帯で運用されるため、宇宙機の表面材料はそれら荷電粒子により帯電す る。さらに過度に帯電すると放電を生じる。この帯電・放電(electro static discharge: ESD)現象は、絶 縁材料の劣化や宇宙機の運用異常につながる<sup>[1,2]</sup>。よって、宇宙機の長期にわたる安定運用を担保す るためには、宇宙機材料における宇宙放射線環境による帯電物性を理解し、設計に反映させる事が 求められている。また近年では、高エネルギー陽子が多く存在する低中軌道での衛星運用が増加傾 向にあるため、陽子線照射された宇宙機絶縁材料の電気絶縁特性を把握することも重要となる。

そこで本研究では、ワイヤーハーネスや OSR に用いられているフッ素系絶縁材料を対象に、陽 子線照射環境下において空間電荷蓄をリアルタイムで計測可能な帯電測定器を開発し、帯電計測評 価を行ったので以下に報告する。

#### 2. 実施方法

Fig. 1 に本帯電計測器の開発に用いた、パルス静電応 力(pulsed electroacoustic : PEA) 法と照射中の空間電荷 分布測定の原理を示す<sup>[3]</sup>。PEA 法により、試料内の厚さ 方向の蓄積電荷の分布と量を観測することが可能であ る。試料を電極で挟み、ナノ秒のパルス電界を印加す ることにより、各電荷蓄積位置において蓄積電荷密*p*(*z*) に比例したパルス状の静電応力が発生し、試料が微小 変位する。この変位はナノ秒間の電界印加中に発生す るものである為、結果的に電界印加時間に応じたナノ 秒のパルス圧力波が発生する。この圧力波は試料内部、 接地側電極を伝搬して圧電素子に到達し、電気信号へ 変換されるアンプで増幅し、デジタルオシロスコープ (DSO)で観測される。この検出信号の時間差は電荷蓄積 位置に比例しているため、試料内部の電荷蓄積分布が



Fig. 1 Principle of space charge measurement system applied by PEA method

課題番号	2018A-C19
利用区分	成果公開(学術)



(a) Schematic diagram of sensor part of measurement system



(b) Photo view of the sensor part on the target stage in the irradiation chamber



(c) Photo view of the irradiation chamber for Tandem accelerator

Fig. 2 Schematic diagram and photo measurement system and irradiation facilities

得られる。Fig. 2 に作製した PEA 法を用いた陽子線照射中の空間電荷分布測定の外形図を示す。本装置は 荷電粒子を試料に直接照射するため、照射側の電極には照射口を設けている。同図(b)は同図(c)に示したタ ーゲットチャンバー内の測定装置の設置状況を示している。照射口に対して垂直に陽子線が入射するように 設置している。

### 3. 結果及び考察、今後の展開等

## 3.1 測定試料及び照射条件

測定試料として公称厚さ 125 μm の FEP を用いた。試料の照射面側にはパルス電圧を印加するためにアル ミ蒸着が施されている。

陽子線照射は加速エネルギーを 2 MeV、電流密度を 15、30 nA/cm<sup>2</sup>、照射時間を 15 nA/cm<sup>2</sup> 照射時に 60 分、 30 nA/cm<sup>2</sup> 照射時に 30 分と、同一フルエンス  $(3.4 \times 10^{18} \text{ 個/m}^2)$  として行った。空間電荷分布の測定は 陽 子線照射前から照射中・後と連続的に 10 秒間隔で行った。尚、照射後の測定時間は照射時間と同時間確保 した。

### 3.2 実験結果及び考察

Fig. 3(A)に 30 nA/cm<sup>2</sup>、(B)に 15 nA/cm<sup>2</sup>照射時の測定結果を示す。同図(a)に陽子線照射時の FEP 内の空間 電荷分布の経時変化を示すカラーチャートを、同図(b) に試料内空間電荷分布波形を、同図(c)に FEP 内部の 試料内蓄積正電荷総量の経時変化を示す。同図(a)、(b)中、陽子線は図中右側から照射し、縦破線は照射陽 子の計算飛程(66 μm)である<sup>[4]</sup>。

同図(a), (b)より、両条件において正電荷蓄積量は照射中に最大となり、その後照射時間の経過とともに減少している。同図(c)からも、蓄積正電荷量は30、15 nA/cm<sup>2</sup> 照射時においてそれぞれ照射開始後14、28 分で飽和し、その後減少していく事が分かる。また正電荷蓄積ピーク位置は照射面側に移動し、正電荷の蓄積 位置は計算飛程を超えて対向電極側近傍までドリフトし蓄積量が増加する挙動も確認された。

照射後(図中青色の破線)、30 nA/cm<sup>2</sup>照射時では計算飛程を境に陽子未到達領域内において電荷が残留し、 陽子通過領域では蓄積電荷の大半が消失している。15 nA/cm<sup>2</sup>照射時では試料全域において明確な電荷蓄積 は観測されなかったことから、30 nA/cm<sup>2</sup>照射時の結果との差も観察された。

照射中の試料内蓄積正電荷は照射陽子に起因したものである。蓄積量が減少する原因は、陽子線照射により発生する放射線誘起伝導(radiation induced conductivity: RIC)による陽子通過領域の導電率の上昇及び、分子構造の変化による電極 - 試料界面における注入障壁の低下が考えられる<sup>[2,5]</sup>。陽子線照射時間の経過とともに試料の導電率の上昇及び注入障壁の低下が発生し、電極からの注入電子により蓄積電荷が中和されピーク位置の変化や蓄積正電荷量の減少が生じたと考えられる。RIC の発生の一因として高エネルギー陽子による分子鎖の切断や試料の放射化等があげられる。一般的に 2.0 MeV 以上のエネルギーのイオン照射を行うと分子構造によっては試料が放射化する場合があり、照射直後には本試料もγ線を放出している事が確認されている。分子鎖切断においては、先行研究により恒久的な変化であることが確認されている<sup>[5]</sup>。以上より、RIC や分子鎖切断が空間電荷蓄積挙動に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

また、15 nA/cm<sup>2</sup> 照射時においては照射後の電荷残留が確認されなかった点については、照射済み試料作 製のため、試料のみへの照射試験を実施した際に、照射状況を監視するモニタ上にて試料表面で放電の発生 が確認された。このため放電をトリガとした蓄積電荷の放出が生じた可能性があると考えられるが、空間電 荷蓄積挙動の再現性取得や放電計測の定量評価なども含めて、詳細は今後の照射試験によって明らかにして いく予定である。

課題番号	2018A-C19
利用区分	成果公開(学術)



(a) Time dependence of charge density charge distribution under proton beam irradiation and relaxation





Fig. 3 Charge distribution and Total amount of charge accumulation under each irradiation condition

### <u>4. 引用(参照)文献等</u>

- H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder and P. C. Anderson, "Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference", Air Force Research Laboratory, pp.7-11 (1998)
- [2] Nelson Wesley Green and J.R. Dennison," Deep Dielectric Charging of Spacecraft Polymers by Energetic Protons", IEEE Tran. Plasma Sci., vol. 36, no.5, pp2482-2490 (2008).
- [3] Hiroaki Miyake and Yasuhiro Tanaka, Space Charge Distribution in Polymethyl Methacrylate and Quartz Glass Irradiated by Protons, Sens. Mater., Vol. 29, No. 8, pp. 1213-1222 (2017)
- [4] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York (1985).
- [5] Hiroaki Miyake, Virginie Griseri, Takuma Mori, Yasuhiro Tanaka, Gilbert Teyssedre and Christian Laurent, Physicochemical Analysis for fluorinated Polymer Films Irradiated by Proton, 2017 CEIDP, pp.106-109 (2017)