

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¹⁾ 榎 海星¹⁾ 田中 康寛¹⁾
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 due to radio-active rays, such as electrons 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 ETFE (ethylene - tetrafluoroethylene copolymer) and measure the space charge distribution using newly developed non-contact type space charge measurement system which can measure space charge accumulation during proton irradiation. We were able to get the result that positive charges were accumulated at the calculated penetration depth of the irradiated electron and negative charges were drifted accumulated from the ground electrode. The amount of positive charge accumulation was larger than the contact type apparatus's results.

キーワード：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

1. 目的

宇宙機は激しい温度変化(-150 ~ 120 °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^[1,2]。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。

これまで、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てきた。しかし、電極の構造上、実際の衛星での使用環境と測定環境が異なるといった問題あったため、新たに電極構造の開発を行い、帯電計測評価を行ったため以下に報告する。

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) 法と陽子線照射中の空間電荷分布測定の実験原理を示す^[3]。同図(a)に従来の照射側にリング電極を用いたリアルタイム空間電荷分布測定装置(以下、接触型装置)を、(b)に試料と高電圧側の電極が接触していない非接触型の空間電荷分布測定装置 (以下、非接触型装置) を示す。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度 $\rho(z)$ 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ため、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、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、試料内部の電荷密度分布が得られる。Fig. 1(b)のように、新たに開発した電極は、試料片面を電極から電氣的に浮遊させた状態にし、メッシュ電極(線径: $\phi 0.28$ mm, 開口率 : 60.8 %)より、真空ギャップを介してパルス電

界を印加することで、試料照射面の界面状況を実環境と同じ環境での測定を可能とした。

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観図を示す。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。

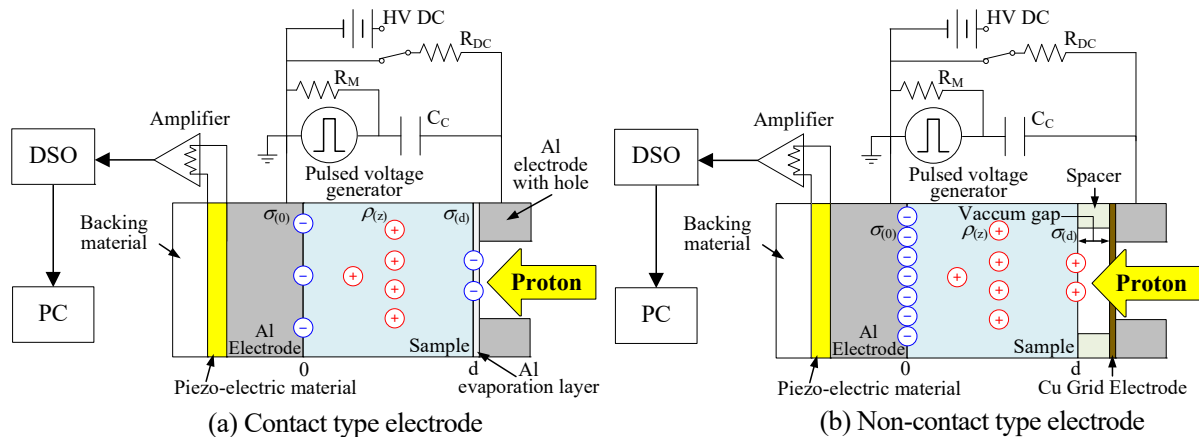


Fig. 1 Principle of space charge measurement system applied by PEA method

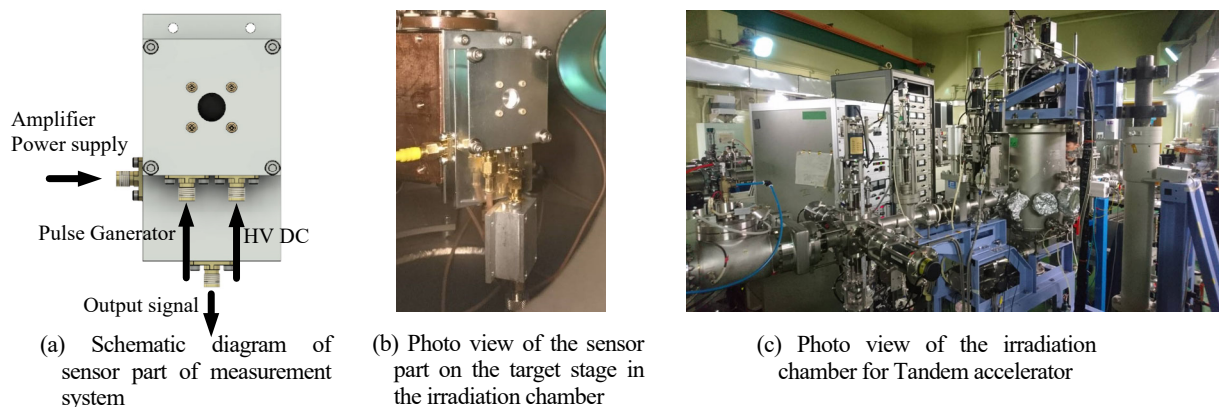


Fig. 2 Schematic diagram and photo measurement system and irradiation facilities

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

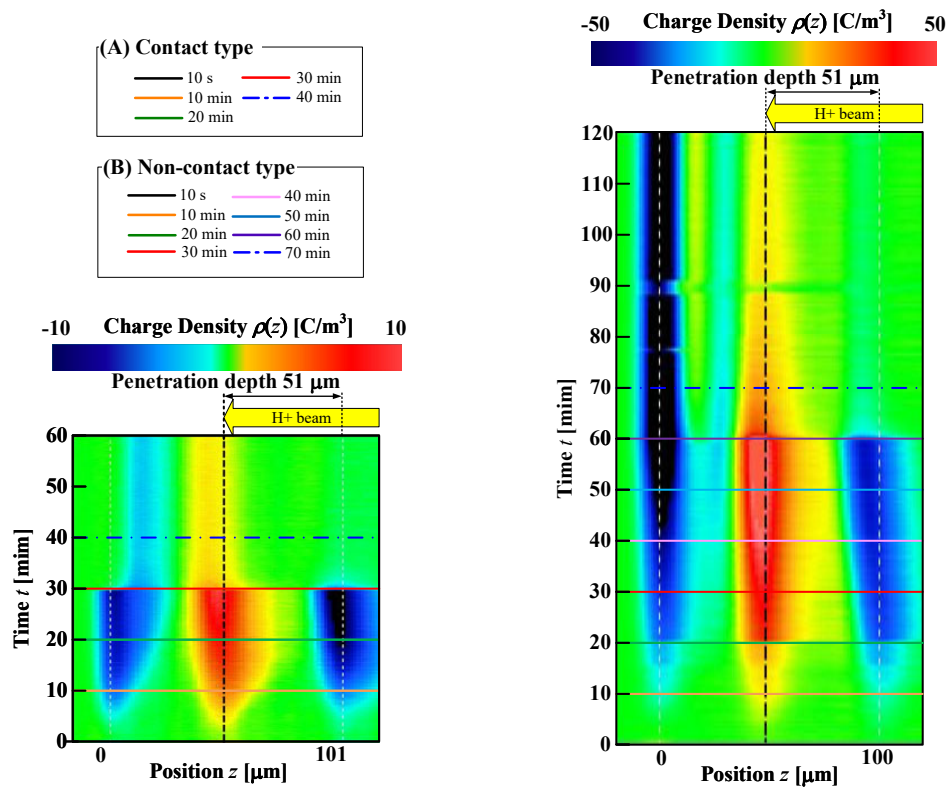
測定試料として公称厚さ 100 μm の ETFE を用いた。測定は接触型装置及び非接触型装置を用いて行った。接触型装置の試料の照射面側にはパルス電圧を印加するためにアルミ蒸着が施されている。

陽子線照射は加速エネルギーを 2 MeV、照射電流密度を 30 nA/cm²、照射時間を接触型装置の場合 30 分、非接触型装置の場合 60 分とした。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。

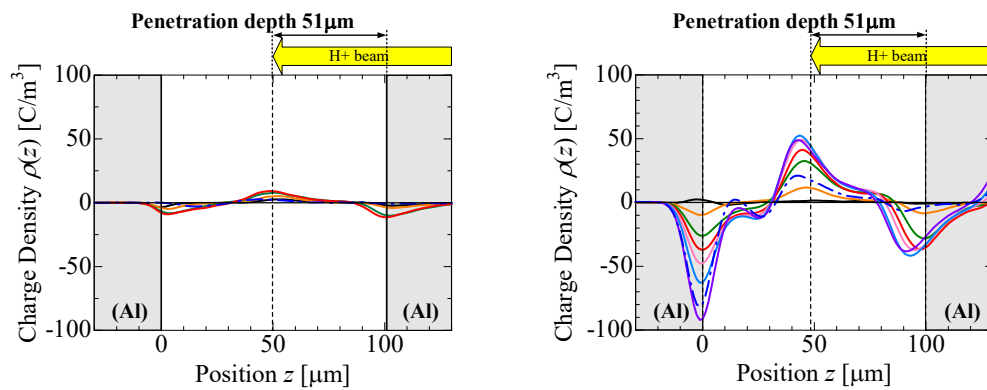
3.2 実験結果及び考察

Fig. 3(A)に 接触型装置、(B)に非接触型装置での測定結果を示す。同図(a)に陽子線照射時の ETFE 内の空間電荷分布の経時変化を示すカラーチャートと、同図(b) に試料内空間電荷分布波形を示す。同図(a)に関しては、電荷の蓄積挙動の把握のため、カラーレンジはそれぞれ ± 10 , $\pm 50 \text{ C/m}^3$ としている。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(51 μm)である^[4]。Fig. 4 に各電極での ETFE 内部の試料内蓄積正電荷総量の経時変化を示す。

同図(A-a, b)より、接触型装置の場合、陽子線照射により計算飛程付近に正電荷が蓄積され、照射中時間経過とともに、接地電極側から負電荷の注入が観測された。蓄積された正負電荷は照射終了時に急激に減少するが、時間経過でその減衰速度は低下するといった結果が得られた。また、同図(B-a, b)より、非接触型装置での測定においても計算飛程付近への正電荷の蓄積、接地電極からの負電荷の注入が観測された。両結果において、接地電極からの負電荷の注入は試料の放射化により発生する γ 線により接地電極-試料間の電荷



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



(b) Charge distribution under proton beam irradiation and relaxation

(A) Contact type

(B) Non-contact type

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

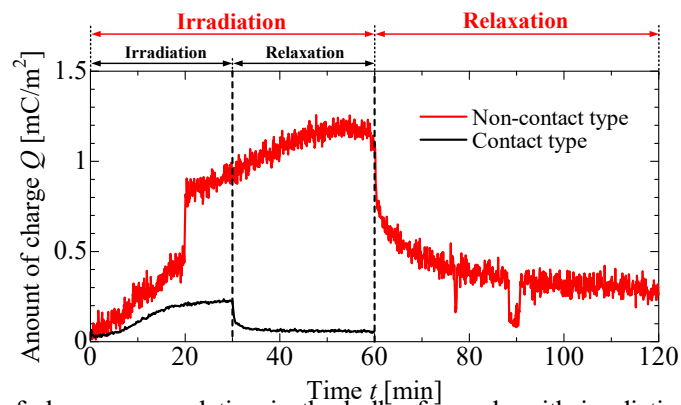


Fig. 4 Total amount of charge accumulation in the bulk of sample with irradiation and relaxation time progress with each type electrode

注入障壁が低下したためであると考えられる。さらに、非接触型装置において試料表面に負電荷の蓄積が観測された。これは、Cu メッシュ、装置照射孔等に陽子線が照射されたことによる、二次電子放出が発生し、発生した電子が試料に正帯電されている試料に引き寄せられたためであると考えられる^[2]。

Fig. 4 より、両条件において試料内正電荷蓄積量は照射開始により増加し、照射中に増加量に変化が発生するといった傾向が見られた。また蓄積量において照射開始 30 分後の蓄積量で比較を行うと、接触型装置の場合 0.22 mC/m^2 、非接触型装置の場合 0.93 mC/m^2 と約 4.2 倍の差が観測された。これは、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したためであると考えられる^[2,5]。接触型装置の場合、試料の導電率の上昇、電荷注入障壁の低下が発生することで、電極から負電荷が注入し、蓄積正電荷と相殺されるため、蓄積電荷量が減少する。非接触型装置の場合、電極と試料が接触していないため、このような電極からの注入は発生せず、この蓄積電荷量の差が発生したと考えられる。同図より、照射開始 20 分及び照射終了後に正電荷蓄積量の急激な増減が観測されたが、原因は明らかとなっていない。そのため今後の照射実験によって明らかとしていく予定である。

Fig. 5 にメッシュ電極を介して照射した、試料の外観図を示す。赤い点線中の黄色く変色している $\phi 10$ の範囲が照射範囲である。同図より問題点としてメッシュ電極を用いたことで、試料に照射領域と未照射領域が発生し、グリッド上に分割されてしまった。今後の実験において、メッシュの線径を小さくするなど対策を行う。

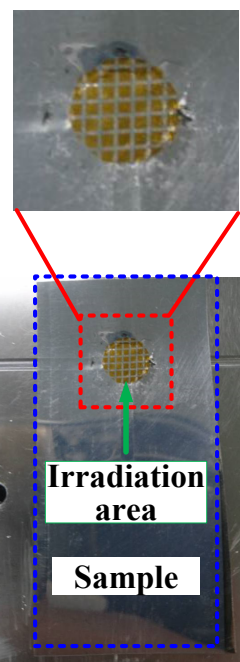


Fig. 5 Surface erosion of ETFE due to high-current (30 nA/cm^2) proton irradiation.

4. 引用(参照)文献等

- [1] H. C. Koons, *et al.*, "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, pp.2482-2490 (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)