

# 陽子線照射されたフッ素系絶縁材料の電荷蓄積特性

榎 海星\*, 遠藤 和樹, 三宅 弘晃, 田中 康寛 (東京都市大学)

## Charge Accumulation Characteristics on Fluorinated Polymer Irradiated by Proton

Enoki Kaisei\*, Endo Kazuki, Miyake Hiroaki, Tanaka Yasuhiro (Tokyo City University)

Spacecrafts operated the outside of geo magnetosphere are irradiated solar protons directly. Therefore, it is important to investigate the charging phenomenon of insulation materials under a proton beam irradiation. In this study, we focused on the internal charge accumulation during proton beam irradiation of insulation materials. We developed the electrode system to measure the charge distribution from the surface to the bulk of the sample. From the results, it observed that the amount of charge accumulation is larger 3.4 times than the results of using the general electrode system and the surface potential is 4.4 kV. These results suggest the possibility of discharge at the spacecraft operating environment.

キーワード：陽子線, 空間電荷分布, PEA 法, ETFE

(Proton beam, Space charge distribution, PEA method, ETFE)

### 1. はじめに

宇宙機が多層断熱材 (multi layer insulator : MLI) や太陽光反射材(optical solar reflector : OSR), ワイヤハーネスの被覆材には絶縁材料が使用されている。これら絶縁材料が電子や陽子といった荷電粒子が存在する環境下に曝されると, 材料内部に侵入・帯電し, それを起因とした静電放電による運用異常が報告されている<sup>(1)</sup>。

近年, アメリカ・日本では ARTEMIS, ロシア・EU ではロナ計画といったように, 世界で次世代の宇宙開発として月・惑星探査が注目されている。月・惑星環境は地球磁気圏外であり, 高エネルギーかつエネルギー範囲の広い太陽陽子が照射される環境である。よって陽子線が宇宙機絶縁材料に照射された場合の帯電特性を調査する必要がある<sup>(2)</sup>。

本研究では, ワイヤハーネスの被覆材として使用されている, ETFE (ethylene-tetrafluoroethylene)に注目し, パルス静電応力 (pulsed electroacoustic : PEA)法を用いて, 陽子線照射中の空間電荷分布測定を行うことで, 電荷蓄積挙動の調査を行ってきた。その結果, 陽子線照射量に対して, 蓄積量が少ないことや, 測定電極が試料に接しており, 試料状態が実環境とは異なるといった問題が生じた。そのため, 試料と電極が非接触である新たな電極構造を考案し, より実環境に近い試料状況での陽子線照射中の内部帯電計測を行ったので, 以下に報告する。

### 2. 測定原理

図1に PEA 法の原理図及び各電極構造の構成図を示す。同図(a)に試料の照射面にアルミ蒸着を設け, リング電極を用いて, 試料と電極が接触させている従来のリアルタイム

空間電荷分布測定装置(以下, 接触型電極)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リアルタイム空間電荷分布測定装置 (以下, 非接触型電極)を示す。

高電圧側電極と接地側電極の間に試料を挿入し, パルス電圧 ( $v_p=200$  V,  $t_p=5$  ns)を加えることにより, 空間電荷の蓄積した各位置で電荷密度に比例したパルス静電応力が瞬間的に発生する。試料に蓄積されている電荷が微小変位し, 圧力波が発生する。圧力波が伝搬し, 圧電素子に到達したとき電圧信号に変換される。このとき, 圧電素子に到達する圧力波は試料内の位置 (厚さ方向)によって到達時間が異なるため, 空間電荷の分布は出力信号の経時変化として測定されることになり, 空間電荷の蓄積されている位置が分かる。得られた電圧信号は, Mini-Circuits 社製広帯域増幅器 (MAR6+) で増幅し, デジタルオシロスコープ (National Instruments 社製 PXIe-5160) で計測する。また, 測定結果は電圧信号波形であるため, 電荷量に校正し空間電荷分布を得ている<sup>(3)</sup>。また, 両装置には試料に直接陽子線を照射し, 空間電荷分布測定を行うため, 照射孔が設けられている。

同図(a)より接触型装置には蒸着電極が設けられており, この電極を介して試料にパルス電圧を印加する。よって試料表面は接地されているため, 陽子線照射により, 試料内の導電率が上昇, 電荷注入障壁が低下することで, 電極から負電荷が注入される可能性がある。対して, 同図(b)は真空ギャップを介して, パルス電圧を印加するため, 電荷注入障壁の低下に伴う電極からの負電荷の注入は発生しない。非接触型装置の電極にはメッシュ状の電極を用いた。メッシュ電極は線径約 $\phi 280$   $\mu\text{m}$ , 開口幅約 1 mm, 開口率約 61 % のワイヤー状銅製メッシュを用いた。試料・メッシュ電極

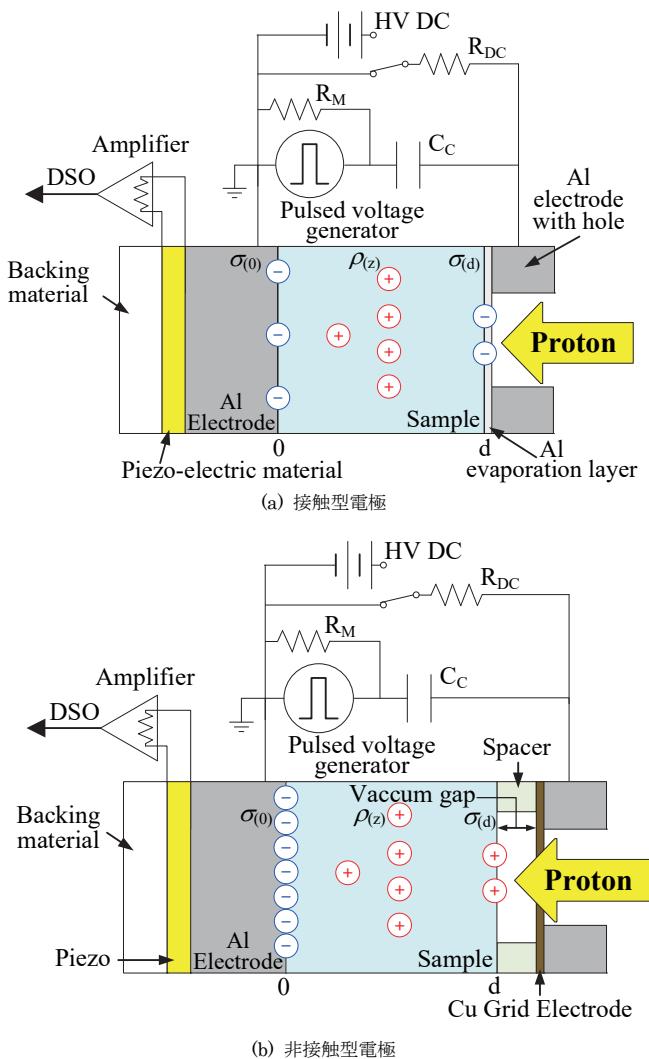


図1 PEA法の原理図及び各電極構造の構成図

Fig. 1 Schematic diagram of space charge measurement system for irradiation and configuration of each type of electrode.

間の真空ギャップを維持するために、厚さ  $125\ \mu\text{m}$  の絶縁スペーサを用いた。

### 3. 陽子線照射中のリアルタイム帯電計測

**〈3・1〉 照射試料及び測定条件** 測定試料として、公称厚さ  $100\ \mu\text{m}$  の ETFE (AGC 社製) を用いた。接触型電極での測定時は試料の照射面側にはパルス電圧を印加するため、照射面にアルミ蒸着が施されている。また、試料接地側電極面は両電極使用時において、アルミ蒸着が施されている。

陽子線の照射条件は、加速エネルギー  $2\ \text{MeV}$ 、照射電流密度  $30\ \text{nA/cm}^2$ 、照射時間は接触型電極の場合  $30\ \text{分}$ 、非接触型電極の場合  $60\ \text{分}$  とした。空間電荷分布測定は陽子線照射

中、後と連続的に  $5\ \text{秒}$  間隔で行い、接触型電極の場合、照射中  $30\ \text{分}$ 、照射後  $30\ \text{分}$  の計  $60\ \text{分}$  間、非接触型電極の場合、照射中  $60\ \text{分}$ 、照射後  $60\ \text{分}$  の計  $120\ \text{分}$  間行った。尚、陽子線の試料内計算飛程は  $52\ \mu\text{m}$  である<sup>(4)</sup>。

**〈3・2〉 接触型電極による測定結果及び考察** 図2に接触型電極を用いて測定を行った陽子線照射中の空間電荷分布測定結果を示す。各図(a)に空間電荷密度分布の経時変化を示すカラーチャート、(b)に空間電荷密度分布波形、(c)に電界分布波形、(d)に試料内正電荷蓄積量の経時変化を示す。図中右側から照射をし、図中縦の破線は、照射陽子の計算飛程を示している。ここで、計算飛程より右側を陽子通過領域、左側を陽子未到達領域とする。

同図(a)、(b)より陽子線照射により、陽子計算飛程付近に正電荷の蓄積が観測された。また、時間経過に伴い、接地側電極から負電荷の注入が観測された。同図(d)より、試料内正電荷蓄積量は照射開始約  $17\ \text{分}$  後に蓄積増加量の傾向変化が観測された。また、当実験条件での照射量は  $1\ \text{秒}$  間で  $0.3\ \text{mC/m}^2$  に相当する量であり、照射量に対して蓄積量が小さいことがわかる。この原因として、陽子線照射により、陽子通過領域の導電率の上昇及び電荷注入障壁の低下が発生し、試料内へ負電荷が注入され、試料内負電荷が内部電界により試料内部へドリフトし、蓄積正電荷と打ち消し合い蓄積量が減少したことが挙げられる。この現象の発生原因の一つに試料と電極が接している装置の電極構造が挙げられた。試料照射面には測定部にパルス電界を印加するため、蒸着電極が設けられている。しかしながら、運用環境下では絶縁体表面には電極は存在しない。これらの問題を解決するため、試料と電極が非接触である、非接触型電極の開発、陽子線照射中の空間電荷分布測定を行った。

**〈3・3〉 非接触型電極による測定結果及び考察** 図3に非接触型電極を用いて測定を行った陽子線照射中の空間電荷分布測定結果を示す。各図(a)に空間電荷密度分布の経時変化を示すカラーチャート、(b)に空間電荷密度分布波形、(c)に電界分布波形、(d)に試料内正電荷蓄積量の経時変化を示す。図4に試料表面電位の経時変化を示す。

同図(a)、(b)より、陽子線照射により陽子計算飛程付近に正電荷の蓄積が観測された。また、時間経過に伴い、接地側電極から負電荷の注入も観測された。さらに試料表面に負電荷の蓄積が観測されたが、これはチャンパー内で正帯電されているのは試料のみとなり、チャンパー内で発生した  $2\ \text{次}$  電子が試料表面に引き寄せられたためであると考えた<sup>(2)</sup>。また、陽子未到達領域への電荷の蓄積が観測された。多量の電荷蓄積により、試料内電界は約  $62\ \text{kV/mm}$  まで強調されているが、陽子線未照射領域に  $100\ \text{kV/mm}$  に相当する直流電圧を印加し、空間電荷分布測定を行った際に電荷の注入は観測されない<sup>(6)</sup>。そのため、陽子線照射による試料が放射化したことによる  $\gamma$  線の放出、放射線誘起伝導等が考えられる。一般的に陽子線照射の場合加速エネルギー  $2\ \text{MeV}$  が放射化発生の閾値とされている。

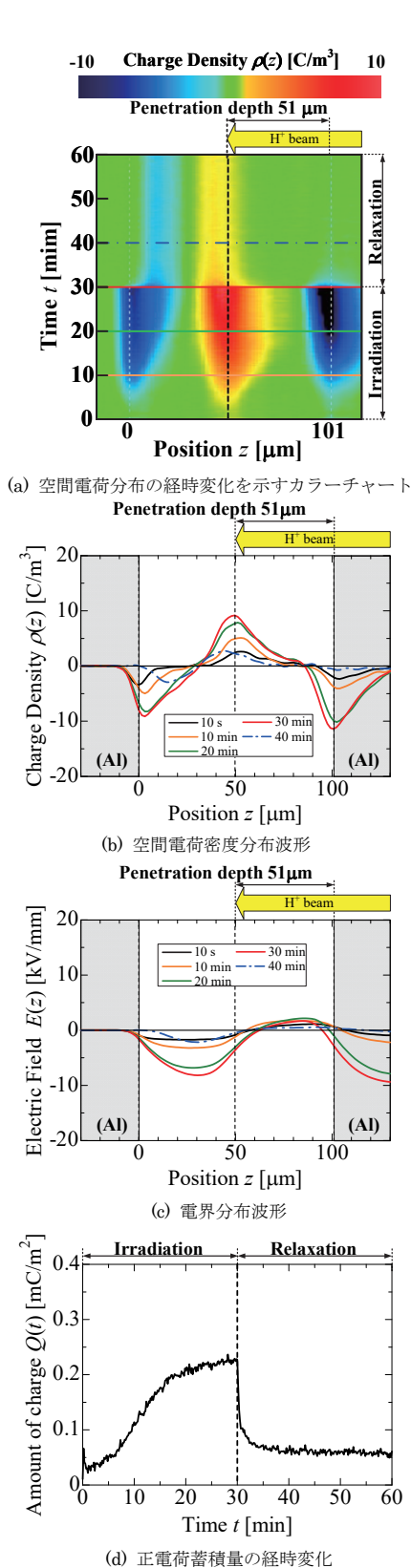


図 2 接触型電極を用いた陽子線照射中の空間電荷分布測定結果  
 Fig.2 Charge distribution under proton beam irradiation and relaxation using the contact type electrode

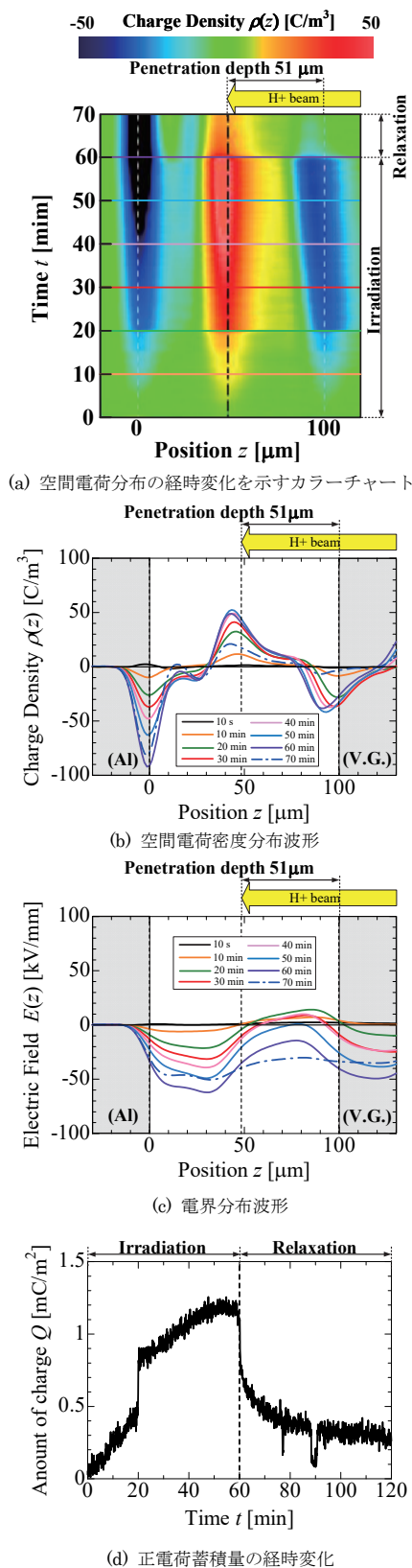


図 3 非接触型電極を用いた陽子線照射中の空間電荷分布測定結果  
 Fig.3 Charge distribution under proton beam irradiation and relaxation using the non-contact type electrode

また図4より、試料表面電位は4.4 kVまで上昇し、運用環境下での放電の可能性が示唆された。

図2(d), 図3(d)より、各電極構造での照射30分後の正電荷蓄積量は非接触型電極の場合約0.93 mC/m<sup>2</sup>, 接触型電極の場合0.23 mC/m<sup>2</sup>となり、約3.4倍の電荷蓄積を観測した。これは、電極からの注入電荷がないためであると考えられる。

図5に本研究で用いたメッシュを介して陽子線照射を行った試料の外観図を示す。同図中央の黄色に変色している部分が照射痕となっており、メッシュ状に未照射領域が発生していることがわかる。これより、メッシュの開口率の増大及び、線径を小さくするといった対策を検討する必要がある。

#### 4. 結論

運用環境を模擬した、非接触型空間電荷分布測定装置の開発を行い、陽子線照射中の空間電荷分布測定を行った。その結果、試料内蓄積量は接触型電極に比べ、3.4倍となった。これは、電極からの注入電荷が減少したためであると

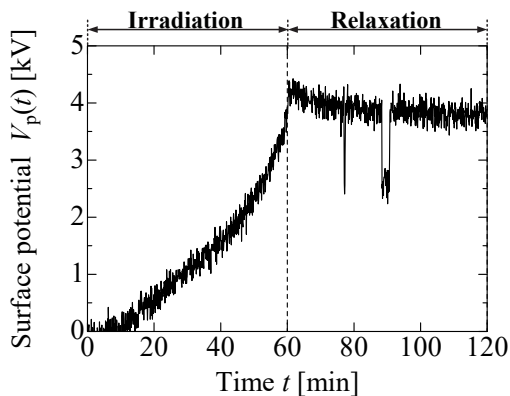


図4 陽子線照射中・照射後の試料表面電位の経時変化  
Fig.4 Time dependence of surface potential behavior under and after proton beam irradiation

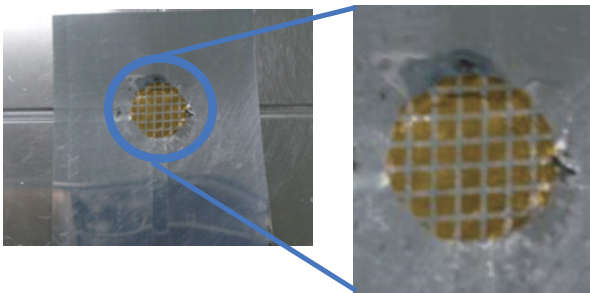


図5 陽子線照射後の試料外観

Fig. 5 The picture of sample surface after proton beam irradiated

考えられる。さらに表面電位は4.4 kVと運用環境下での放電の発生も示唆された。また、陽子未到達領域への電荷注入は陽子線照射による試料の放射化、放射線誘起伝導が原因だと考えられる。しかしながら、当メッシュで陽子線照射実験を行った結果、試料にメッシュ状の未照射領域が発生してしまい、運用環境を模擬した正確な測定であるとは言えない。そのため、電極構造の再検討の必要があり、今後の課題である。

#### 謝辞

本研究の一部は科研費、原子力機構、量研施設利用共同研究、量研機構・施設共用制度、及び東京大学の助成により実施された。

#### 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 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) H. Miyake and Y. Tanaka, "Space Charge Distribution in Polymethyl Methacrylate and Quartz Glass Irradiated by Protons", Sensor and Materials, Vol. 29, (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) 森 琢磨, 千葉 潮, 三宅 弘晃, 田中 康寛, "陽子線照射フッ素系絶縁材料の直流課電下における空間電荷特性", 第47回 電気電子絶縁材料システムシンポジウム, 2016年