

電子線照射フッ素系絶縁材料の空間電荷蓄積特性

永瀬 崇浩*, 吉田 周吾, 三宅 弘晃, 田中 康寛(東京都市大学)

Space Charge Accumulation Characteristics in Electron Beam Irradiated Fluorine-based Insulating Material

Takahiro Nagase*, Shugo Yoshida, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

By irradiating an electron beam to the insulating materials, it is thought that electron-hole pairs are generated inside the sample. However, there is no reported cases about this problem. Therefore, by using a blocking layer to block the charge injection from the outside, an inside of an irradiated sample electron-hole pairs was investigated whether it is produced in the DC stress.

キーワード：電子線照射，電子正孔対，FEP，ETFE

Keywords：Irradiation electron, electron-hole pairs, FEP, ETFE

1. はじめに

宇宙機は温度変化の激しい宇宙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る。そこで、宇宙機表面には熱制御材である MLI(Multi-Layer Insulation)や太陽光反射材 OSR(Optical Solar Reflector)が使用されている。これらの材料は高分子材料で構成されている。宇宙機は、電子・陽子等の高エネルギー荷電粒子やプラズマで満たされた領域で運用されているため、これらの高分子材料表面では帯電・放電現象が引き起こされる。この表面帯電については約-10 kV まで到達するということが現在報告されている[1]。また、実際に宇宙機表面に用いられている絶縁体の厚さは数十~数百マイクロメートルであり、上記の電位差が生じると材料内部に高電界が発生し、これが原因で宇宙機表面の材料の劣化や絶縁破壊の危険性が高まる。放電や絶縁破壊が発生してしまうと、搭載機器の誤作動・故障に繋がり、長期運用異常に陥る可能性もある[2]。したがって、宇宙機設計において、宇宙機表面材料の電気絶縁特性を把握することは重要となる。さらに、長期運用など高信頼化を図るため、将来的には帯電・放電現象に「強い」材料への改良をしていくことも求められ、そのためにも帯電現象をミクロに把握することも非常に重要となってくる。

そこで本研究では、宇宙機に使用される様々な種類の絶縁材料の中でも、OSR やワイヤーハーネス被覆材として用いられている、フッ素系絶縁材料である ETFE(ethylene-tetrafluoroethylene) および FEP(fluorinated ethylene-propylene copolymer)に電子線を照射し、直流高電界下での空間電荷蓄積特性をパルス静電応力法(Pulsed Electroacoustic Method: PEA 法)[3][4]により評価している。

これまでの研究から電子線照射(加速エネルギー60 keV、照射電流密度 5 nA/cm²、照射時間 5 分)した ETFE と FEP に直流高電界を印加すると、図 1 に示すように、電子線照

射試料内部で正電荷の蓄積が観測されるなど、未照射試料と顕著な差が得られた。この原因については、高電圧電極からの電荷注入および電子線照射したことで試料内部に電子正孔対が生成された為であると考えている。[5] 今回、電子正孔対の生成確認を行ったので以下に報告する。

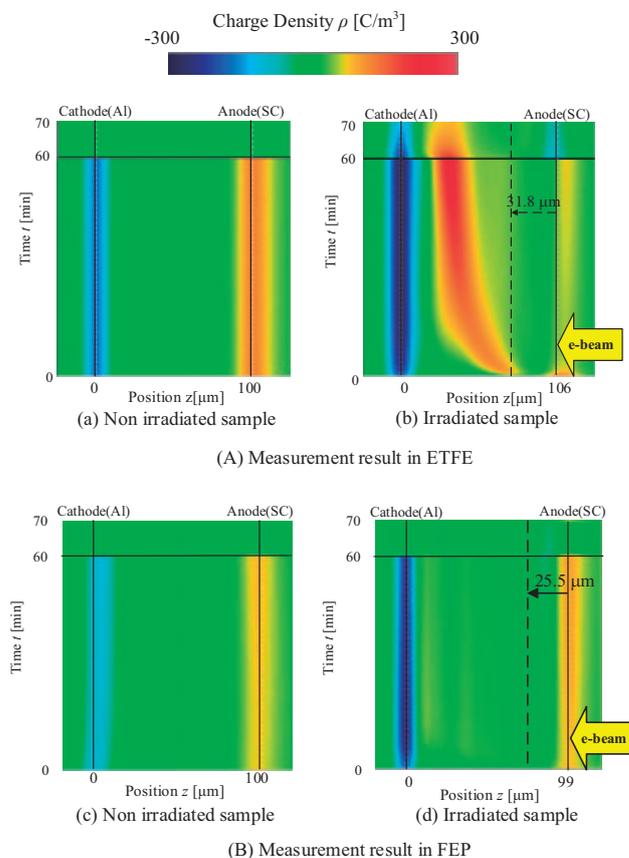


Figure1. The time dependence of charge density distribution in ETFE and FEP under 100 kV/mm

2. 実験装置

2.1. PEA 装置

図2に PEA 法の原理図を示す。内部に電荷が蓄積した試料にパルス電圧($v_p = 500$ V, $t_p = 5$ ns)を印加すると、電荷はパルス電界により微小変位して圧力波を発生する。この圧力波は電極中を伝搬して圧電素子により検出される。検出信号は電荷量と印加したパルス電界に比例した大きさを持ち、空間電荷分布を知ることができる。

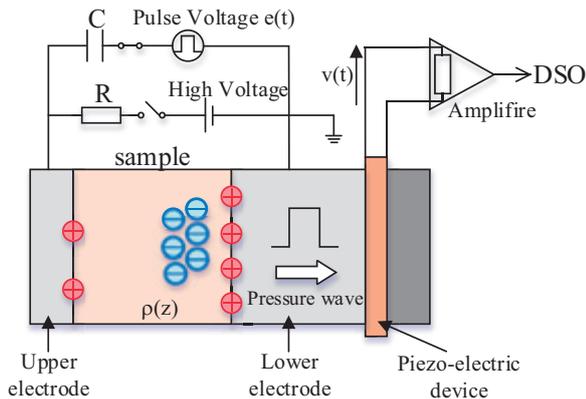
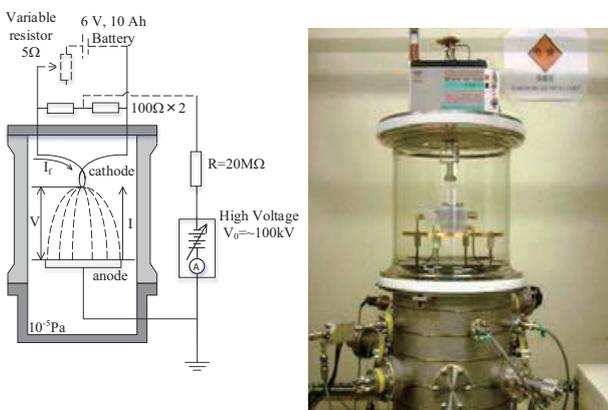


Figure2. The principle figure of the PEA method

2.2. 電子線照射装置

図3に電子線照射用真空チャンバーの概略図を示す。真空チャンバー内を真空排気する場合には、大気圧から 10^{-2} Pa まではロータリーポンプ、 10^{-2} Pa 以下ではターボ分子ポンプをしており、真空チャンバー内の真空度は約 10^{-5} Pa まで到達可能となっている。

実際に電子線を照射する際には、真空チャンバー内の陰極に陰極加熱電源を用いて電流 I_f を流すことで加熱し、同時に、電子加速用高電圧 V_0 を陰極に印加すると、陰極から接地した陽極に向かって電子が照射される。このとき、フィラメントと接地電極間の電位差が電子の加速電圧 V とな



(a) Schematic view (b) Photo image of whole

Figure3. Schematic diagram and photo of electron irradiation facility

り、電子線の電流が I となる。これらのシステムを用いることで、本装置では加速エネルギー100 keV までの電子線照射が可能となっている。

3. 測定試料および実験条件

3.1. 実験条件

公称厚100 μm のETFEおよびFEPに、加速エネルギー60 keV、電流密度5 nA/cm²の電子線を5分間照射し、照射後に大気圧下で50 kV/mmに相当する直流高電圧を高電圧電極に印加し、空間電荷分布測定を行った。測定時間は50分間（電圧印加40分、短絡10分）としている。電圧印加時に照射面-高電圧電極の間に公称試料厚さ50 μm の未照射ETFEおよびFEPを電荷注入障壁として挿入した。

3.2. 電荷注入障壁

図1-(A)-(b)より、電子線照射試料内部には照射面側から注入したと思われる正電荷が多量に蓄積している。これは電子線照射により試料内部で生成された電子正孔対により試料-電極界面で局所的な電界強調が発生することで電極から正電荷が注入しているものと考えている。照射面と高電圧電極界面の間に未照射試料を挿入することで、外部からの電荷注入を抑制し試料内部のみの電荷挙動の観測を目指す。

4. 測定結果および考察

図4.5に電荷注入障壁を挿入した状態での電子線照射ETFEおよび電子線照射FEPの空間電荷分布測定結果を示す。図4中の0-97 μm (図5中では0-100 μm)の領域が電子線を照射した試料内部の測定結果となっており、97-146 μm (図5中では100-152 μm)の領域は電荷注入障壁の結果となっている。

本実験では、電子線照射された材料内部に電子正孔対が生成されているか確認する。図4.5-(c),(d)に示しているように、実験から取得できるデータとして、照射電子の蓄積量 $Q_{i.e.}$ 、電圧印加時の正電荷の蓄積量 $Q_{n.h.}$ 、負電荷の蓄積量 Q_e を求めることが出来る。照射電子の蓄積は、両図(d)中の正電荷の蓄積位置と重なっていると考え、今回以下に示す(1)式を基に電子線照射試料内部に生成された電子正孔対の正孔 Q_h を算出した。

$$Q_{n.h.} - Q_{i.e.} \approx Q_h \approx Q_e \quad (1)$$

(1)式より算出した電子正孔対の正孔 Q_h の蓄積量と試料内部で観測された負電荷の蓄積量 Q_e を示した結果を図6,7に示す。なお、蓄積量を簡単に比較するため、負電荷蓄積量は絶対値で示している。

4.1. ETFEにおける電子正孔対生成確認

図4より、電子線照射ETFE内部には正電荷の蓄積が観測されており、照射試料と電荷注入障壁の積層界面では負電荷の蓄積が観測されている。図1-(A)の電子線照射試料の結

果では観測されなかった負電荷が電荷注入障壁を挿入することで観測することが可能となった。図6に示したETFE内部の電荷蓄積量の結果を見ると、電圧印加5分までは正・負電荷の蓄積量は一致していた。しかしながら、電圧印加10分以降では負電荷蓄積量が増加していく傾向となった。

4.2. FEPにおける電子正孔対生成確認

図5より、電子線照射FEP内部には正電荷の蓄積が観測されており、照射試料と電荷注入障壁の積層界面では負電荷の蓄積が観測されている。図1-(B)の電子線照射試料の結果では観測されなかった負電荷が電荷注入障壁を挿入することで観測することが可能となった。図7に示したFEP内部の電荷蓄積量の結果を見ると、測定終了時まで正・負電荷の蓄積量は概ね一致した結果となった。しかしながら、FEPの場合でもわずかではあるが、負電荷の蓄積量が増加した。

4.3. ETFE および FEP の比較および考察

図6,7の正・負電荷蓄積量が一致していた電圧印加5分後の時点で両試料の結果を比較すると、ETFEの方がFEPよりも約3倍程度電子正孔対の生成量が多くなっている。

電子正孔対の生成量が多い場合、電圧印加にともなう分極や電界強調が生じ易くなると考えられる。そのため、図1に示した電子線照射試料内部の正電荷の蓄積量を比較した時、ETFE内部の方が多量の正電荷の蓄積が観測されたものと考えられる。

電圧印加にともなう試料内部の負電荷蓄積量が増加した理由として、以下に示す2つ要因が考えられる。

- ① 陰極側から負電荷が注入し、試料内部で生成された正電荷と再結合した
- ② 試料内部で生成された正電荷が陰極へ抜けることで相対的に負電荷の蓄積量が増加した

このような問題を解決する為、今後陰極側にも電荷注入障壁を挿入し測定を行うことで、より正確に測定を行うことが可能になると考えられる。また、今回の実験では電圧印加中に取得したデータを基に正・負電荷蓄積量の計算を行ってきたが、電圧印加中に短絡を挟み測定を行うことで、負電荷の注入や正電荷の抽出等を抑制しながら測定を行う必要があると考えられる。

5. 今後の予定

本実験から電子線照射ETFEOおよびFEP内部には電子正孔対が生成されていることが確認できた。この電子正孔対は電子線照射によって生成したラジカルもしくは励起によるものだと考えられ。もし励起によって生じた電子正孔対であるならば、電子線照射後、緩和時間を設けることでこれらは再結合し、試料内部に残留する電子正孔対は減少すると考えられる。電子正孔対が減少すれば電圧印加後に分極していた正負電荷の蓄積量が減少し、材料-電極界面で生じる局所的な電界強調を減少することで、電荷注入が発生

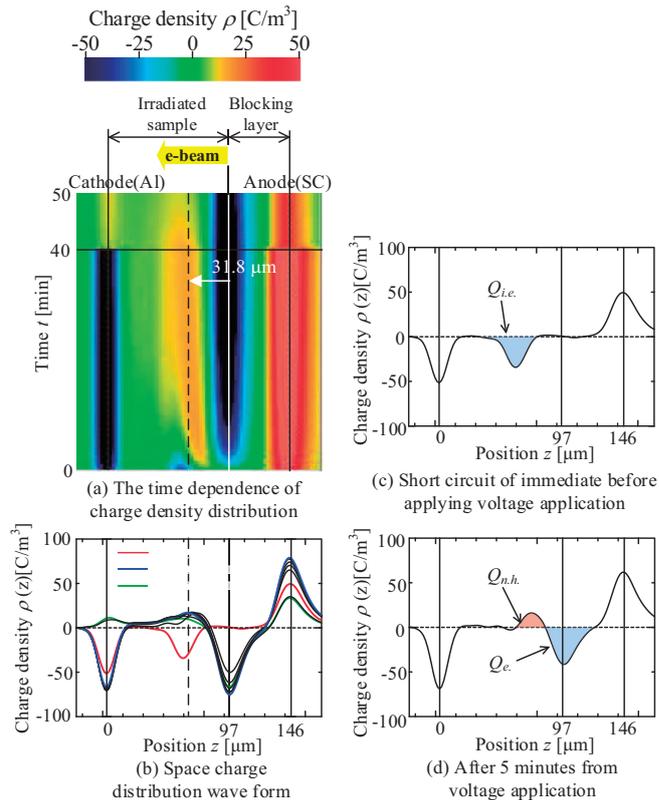


Figure4. Space charge distribution in electron beam irradiated ETFE with a blocking layer

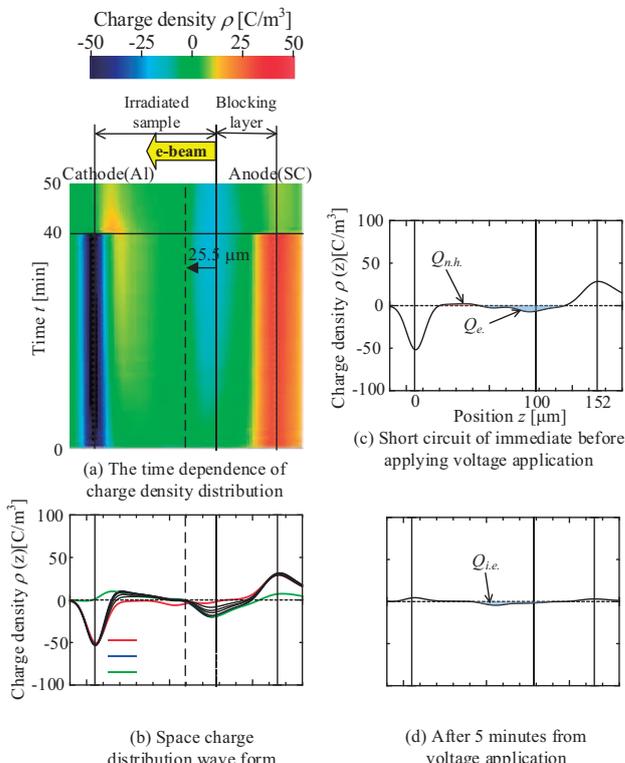


Figure5. Space charge distribution in electron beam irradiated FEP with a blocking layer

せず、最終的には未照射試料の状態に近づくと考えられる。したがって今後は、電子線照射後、緩和時間時間を設けた際のフッ素系絶縁材料における空間電荷蓄積特性を明らかにする。

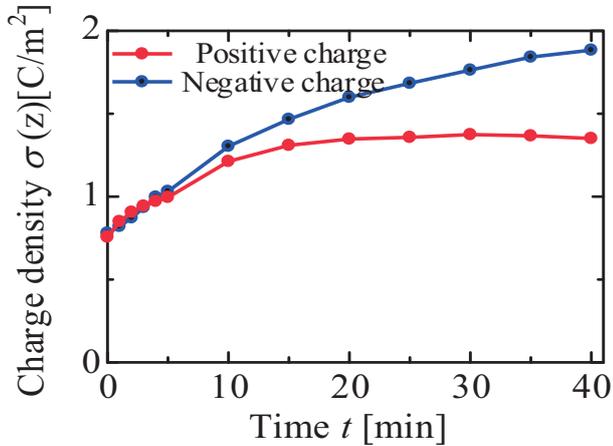


Figure6. The time dependence of charge accumulation amount in ETFE

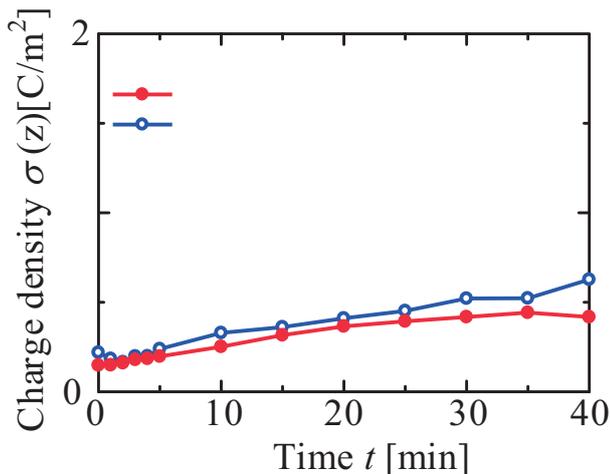


Figure7. The time dependence of charge accumulation amount in FEP

6. 参考文献

- [1] Sanju Hiro, Haruhisa Fujii, Toshio Abe and Hironobu Nishimoto: "Charging of Insulating Materials on Satellite in Geostationary Orbit Environment", T.IEE Japan, Vol.118-A, No.7-8 p.759-766 (1998)
 廣三壽, 藤井治久, 阿部俊雄, 西本博信: 「静止軌道宇宙環境における熱制御用絶縁性材料の帯電観測」, 電学論A, Vol.118, No.7-8 p.759-766 (1998)
- [2] 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

- [3] Y. Li, et. al : "Pulsed Electroacoustic Method for Measurement of Charge Accumulation in Solid Dielectrics", IEEE Trans. DEI, Vol.1, No.2, pp.188-195, 1994
- [4] T. Takada, "Acoustic and optical methods for measuring electric charge distributions in dielectrics", IEEE Trans Plasma Science., Vol. 34, pp. 2176-2184, 2006
- [5] T. Nagase, Y. Kikuchi, H. Miyake, Y. Tanaka : "Space Charge Accumulation Characteristics of Electron Beam Irradiated Insulating Materials under DC High-Electric Stress ", Proceedings of the 13th Spacecraft Charging Technology Conference, Pasadena, CA, 23-27 June 2014,