

# 電子線照射フッ素系絶縁材料の蓄積電荷の照射電流密度依存性

三好 雅仁\*, 三宅 弘晃, 田中 康寛(東京都市大学)

The relationship between accumulated charge in electron beam Irradiated fluorine insulating materials  
Mshito Miyoshi\*, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

## 1. はじめに

人工衛星などの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、多層断熱材 (Multi-Layer Insulation) や太陽光反射材 OSR (Optical Solar Reflector) などに絶縁材料を用いており覆われている。しかし、宇宙機は、電子・陽子等の高エネルギー荷電粒子に曝されているため、宇宙機表面で帯電し、帯電量が大きくなると放電事故が引き起こされる。帯電・放電現象により搭載機器の誤作動や故障を引き起こし、宇宙機の長期運用不能に陥る危険性もある[1]。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。また、宇宙機の信頼性の向上のために宇宙環境に優れた材料の開発が重要となっている。

これまでの研究では、圧電素子誘起圧力波 (PIPWP) 法やパルス静電応力 (PEA) 法[2][3]を用いて電子線照射中における絶縁材料の内部帯電現象の解明を試みてきた。しかし、電子線照射密度が数十  $\text{nA}/\text{cm}^2$  と実環境より高い条件で行われてきた。

そこで本研究では、OSR やワイヤーハーネスなどで用いられるの ETFE (ethylene-tetrafluoroethylene)、FEP (fluorinated ethylene - propylene copolymer)、PTFE (polytetrafluoroethylene) に着目し、実環境に近い比較的低い照射電流密度で測定を行った。

## 2. PEA 法原理

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電圧信号として検出される。電圧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、圧電素子に到達する圧力波は試料内の位置によって到達時間が異なるため、空間電荷分布は、電

圧信号の時間変化として測定され、空間電荷の蓄積している位置がわかる。圧電素子から出力される電圧信号はアンプで増幅され、オシロスコープによって観測した信号を PC により適切な信号処理を施すことによって試料中の空間電荷分布を得ることができる。

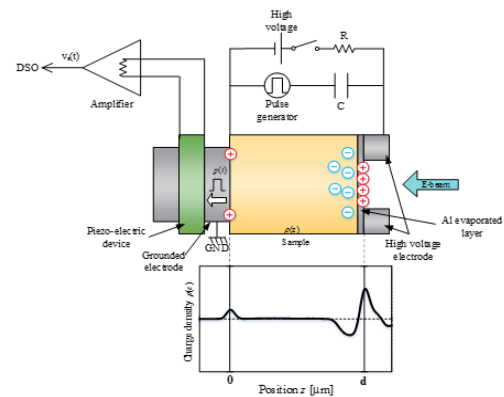


図 1 PEA 法原理図

## 3. 実験装置

### 3.1 PEA 測定装置

図 2 に PEA 装置の概略図を示す。本装置は荷電粒子を試料に照射するために照射孔を設けており、それによって照射下での空間電荷分布計測を可能としている。また、小型化を目指して市販の増幅器の基盤のみを取り出して使用することで、装置のサイズは縦 60 mm、横 40 mm、高さ 25 mm まで小型化することに成功し、比較的小さなチャンバーにも対応できるようになっている。圧力波を電気信号に変換するための圧電素子は厚  $9 \mu\text{m}$  のポリフッ化ビニリデン (Poly Vinylidene Fluoride: PVDF) を使用しており、装置の位置分解能は試料によって若干異なるがおおむね  $10 \mu\text{m}$  を得ている。つまり、 $100 \mu\text{m}$  程度の試料は位置分解能約 10% で測定が可能である。

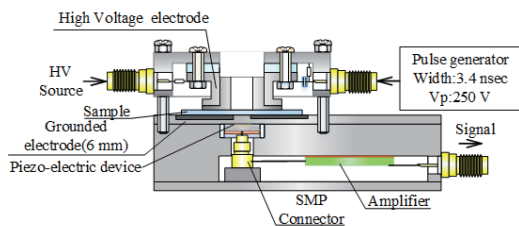
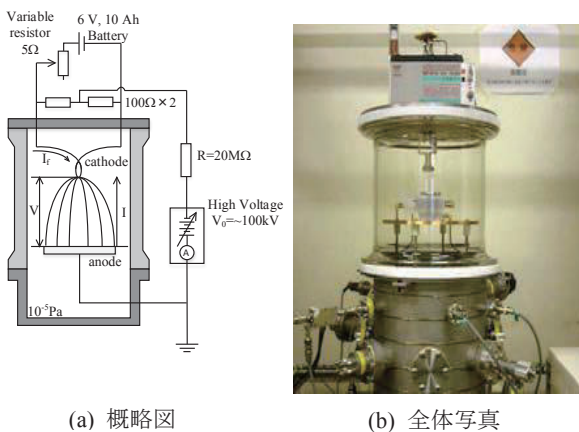


図2 PEA 装置概略図

### 3.2 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。



(a) 概略図

(b) 全体写真

図3 電子線照射用真空チャンバー

## 4. 測定試料および実験条件

測定試料は、片面アルミニウム蒸着が施された公称厚さ  $100 \mu\text{m}$  の ETFE および FEP、PTFE フィルムである。加速エネルギーは 40 keV と 60 keV、照射電流密度は 5、10、20 nA/cm<sup>2</sup> で電子線を  $1 \times 10^{-4}$  Pa 以下の真空環境下で照射し、電子線照射中

に 20 分、照射停止後 20 分間で測定を行った。PTFE に関しては、照射 20 分間では電荷蓄積挙動が明確にならなかった為、照射時間を 80 分で照射している。また、測定間隔はいずれも 30 秒間隔である。

## 5. 測定結果および考察

### 5.1 電子線照射中における各試料の内部帯電計測結果

図4、5、6-(A),(B)-(a),(b)(c)に電子線の加速エネルギーを 40 keV、60 keV で各照射電流密度を 5、10、20 nA/cm<sup>2</sup> で照射したときにおける ETFE、FEP、PTFE の空間電荷分布測定結果を示す。同図中の赤線、青線はそれぞれ電子線照射直後と照射終了直前時における波形である。さらに、照射面側から矢印で示されている破線の位置は、(1)式に示す Kazt-Penfold 式より算出した電子の最大飛程の位置である。電子の最大飛程とは任意の加速エネルギーで電子線を照射した際に、電子が厚さ方向に対して、最大でどの位置まで侵入しているか示している式で、 $T$  は加速エネルギー[MeV]、 $\rho$  は照射した試料の密度であり、 $R$  は最大飛程[ $\mu\text{m}$ ]を表している。

$$R = 0.412E^{1.26-0.00954\ln E} \quad (1)$$

図4,5,6より各試料において負電荷蓄積部が(1)式より算出した電子の最大飛程より超えて蓄積していることが分かる。各試料において算出した電子の最大飛程付近に多量の負電荷が蓄積していることが観測された。また、図4~6に示した結果より、電子線照射することで蓄積挙動は試料によって異なり、加速条件によっても異なることが分かる。ETFE、FEPにおいては20nA/cm<sup>2</sup>照射時において電子線照射開始直後に最大飛程付近に負電荷が蓄積し、その後照射中にも関わらず一度減少した後に飽和していることが分かる。しかし5 nA/cm<sup>2</sup>照射時においては照射開始直後に最大飛程付近に蓄積した後、飽和している傾向が見られた。つまり照射電流密度によって空間電荷蓄積挙動に差異が生じるものと考えられる。また、PTFEにおいては蓄積する電荷量が時間経過にともないわずかに増加する傾向が見られた。また、蓄積する負電荷の分布の特徴としては、加速エネルギー60 keVにおける空間電荷分布波形において ETFE および FEP では電子が侵入した範囲内でほぼ均一に分布している。PTFE においては2コブの小さなピークが観測された。

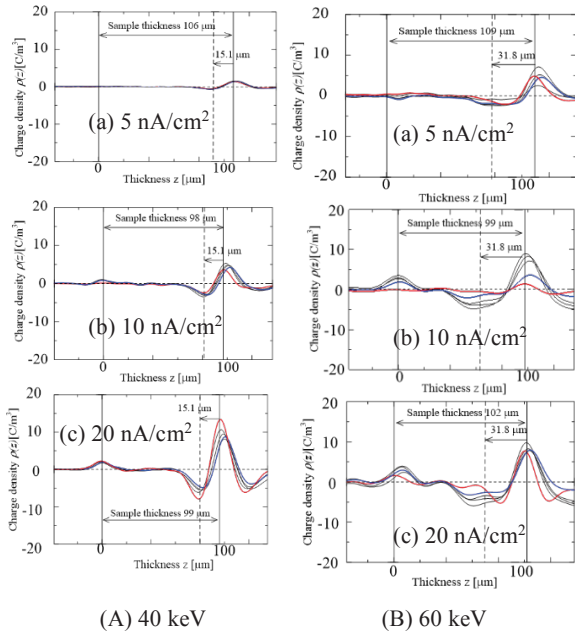


図 4 ETFE の空間電荷分布測定結果

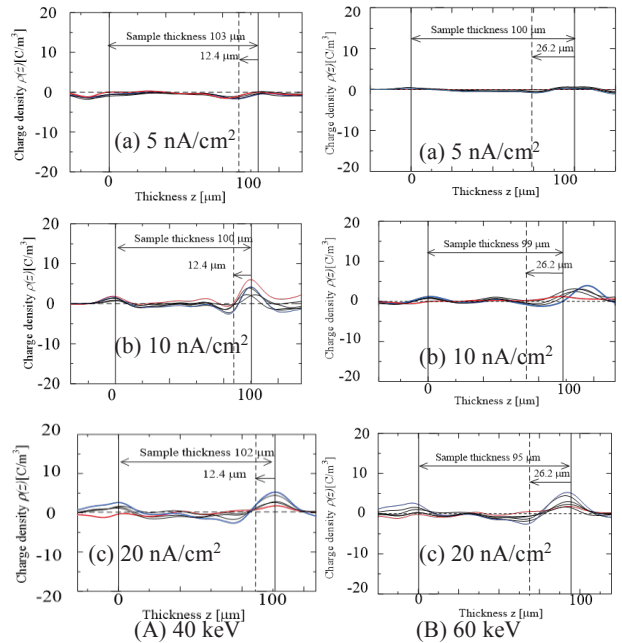


図 6 PTFE の空間電荷分布測定結果

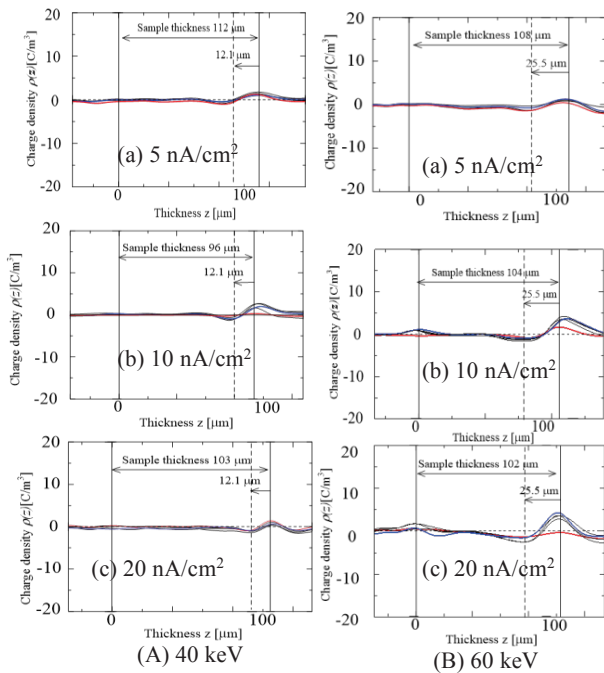


図 5 FEP の空間電荷分布測定結果

## 5.2 各試料における蓄積総電荷量の経時変化

前節において図 5、6 より ETFE、FEP においては、電子線照射することによって内部に負電荷蓄積した後、飽和する傾向であることが観測された。また、PTFE においては照射時間にもない負電荷が増加する傾向が観測された。この関係性を明確にするために、図 7~9 の(A)、(B)に図 4-6 中の各試料の試料内部の負電荷蓄積部の積分電荷量の経時変化を示す。これらは、図 4~6 に示す空間電荷分布波形から負電荷蓄積部を積分することによって求めた量である。この結果、ETFE、FEP において照射電流密度が低い 5 nA/cm<sup>2</sup> の場合は、照射開始 30 秒~2 分で負電荷蓄積したあと減少し、飽和傾向が観測された。より負電荷が蓄積される条件 (60 keV、20 nA/cm<sup>2</sup>) の場合では、負電荷蓄積した後、照射中にもかかわらず減少していることが分かる。また照射電流密度が高い程、負電荷蓄積量が増加していることが分かる。照射終了時において蓄積した負電荷が時間経過にもない減少することが確認された。この場合において照射電流密度が高い程蓄積された負電荷の減少する速度が速いことが観測された。上記の電子線照射中に負電荷の蓄積が飽和し、一定値に保った原因として、電子線照射によって照射領域内で放射線誘起伝導(Radiation Induced Conductivity: RIC)が発生し、照射領域内の導電率の上昇により、電子の移動が容易になる。それにもない、高電圧電極近傍試料内に発生した電界により電子が電極方向にドリフトしたと考え

られる。この現象により、電子線による電荷の供給と導電率の上昇による電荷の試料外への放出とが拮抗状態になった為、試料内の蓄積電荷量が飽和したと考えられる。つまり、 $20 \text{ nA/cm}^2$  照射時では照射直後に急激に減少するが、 $5 \text{ nA/cm}^2$  時には5分で蓄積電荷が消滅した。この結果から  $5 \text{ nA/cm}^2$  照射時では、RIC の発生による導電率の上昇が  $20 \text{ nA/cm}^2$  より低いため、照射中に電荷が徐々に蓄積し、緩和中も電荷が残留したものと考えられる。図9より PTFE においては、電子照射開始20分間では負電荷の蓄積は観測されないものの、負電荷が蓄積し始めると、電子線照射時間が経過するとともに、蓄積電荷量は増加し続けていることがわかる。

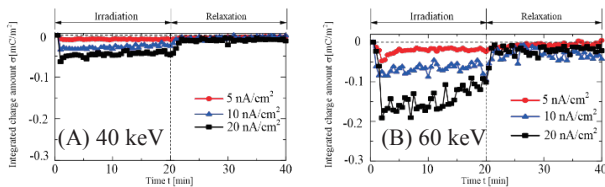


図7 ETFE の蓄積電荷量の経時変化

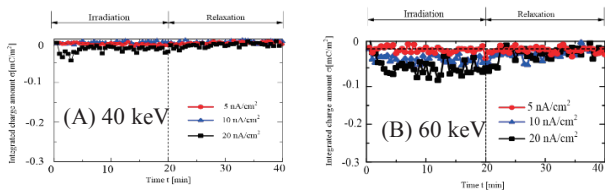


図8 FEP の蓄積電荷量の経時変化

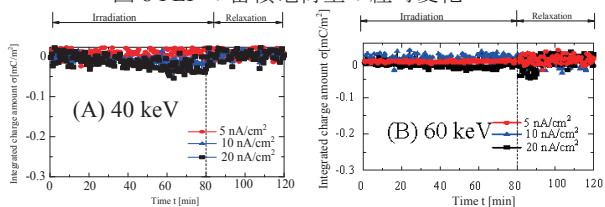


図9 PTFE の蓄積電荷量の経時変化

## 6. 結論

電子線照射中における空間電荷分布測定結果から、ETFE, FEP において蓄積電荷量が電子線照射中にも関わらず減少する傾向が得られた。これは、電子が侵入した領域部で RIC が発生したと考えられる。また、照射領域部の導電率の上昇度が照射電流密度によって変化し、蓄積電荷挙動が変化することを調査するために照射電流密度を  $5 \text{ nA/cm}^2$ 、 $10 \text{ nA/cm}^2$ 、 $20 \text{ nA/cm}^2$  と変化させた結果、低照射電流密度の時の方が照射中において急激な負電荷蓄積せず飽和し、照射後において緩やかに減少し、高照射電流密度で照射した場合、照射中において急激に

蓄積し、飽和傾向が見られ、照射終了時において急激な負電荷の減少が見られたことから、照射電流密度によって電荷蓄積挙動が影響すると思われる。

## 7. 参考文献

- [1] 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] 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
- [3] T. Takada, "Acoustic and optical methods for measuring electric charge distributions in dielectrics", IEEE Trans Plasma Science., Vol. 34, pp. 2176-2184, 2006