

# フッ素系絶縁材料の陽子線照射中における電荷蓄積特性

榎海星\*, 松本悠希, 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\*, MATSUMOTO Yuki, MIYAKE Hiroaki, TANAKA Yasuhiro (Tokyo City University)

It has been reported that the MLI and OSR of spacecraft and the insulation layer of the wire harness are charged by high-energy charged particles such as electrons and protons, resulting in operational abnormalities due to electrostatic discharge. In this study, we measured space charge distribution during proton beam irradiation in order to understand the charge accumulation characteristics of space insulating materials by proton beam irradiation. As a result, positive charge accumulation was observed in the sample, and different charge accumulation tendencies were obtained in the proton passage region and the unreachable region. This elephant is thought to be caused by radiation-induced conduction with different origin in each region and the increase in conductivity, and was examined from the accumulated charge amount and distribution.

キーワード：陽子線, 空間電荷分布, PEA法, 外部回路電流, ETFE, RIC  
(Proton, Space charge distribution, PEA method, External circuit current, ETFE, RIC)

### 1. はじめに

宇宙機の多層断熱材 (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。宇宙機は電子, 陽子といった高エネルギー荷電粒子, プラズマなどが存在する環境で運用されている。この環境下に前述の絶縁材料が曝されると荷電粒子が材料内部に侵入・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, 低中軌道で運用される地球観測衛星や測衛星が増加傾向にある。これらの衛星は高エネルギー陽子が多く存在する環境下で運用される。そのため, 宇宙線による絶縁材料への帯電特性を調査する必要がある<sup>(2)</sup>。

また, 宇宙環境では太陽風プラズマ, 電子, 陽子といった様々な荷電粒子が存在する。そのため, 実環境下での絶縁材料への帯電計測が必須となる。

本研究は, 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った。また速報の結果だが, 陽子線照射後経過時間における高電圧印加時の試料の外部回路電流の測定を行った。結果より, 電荷蓄積傾向には試料内の導電率の変化が大きく関係していると考えられたので, 以下に報告する。また, 実環境下での空間電荷分布の測定に向け, 現状の測定装置の問題点を挙げ, 解決策の検証を行ったので合わせて報告する。

### 2. 測定原理

〈2・1〉 PEA法の原理 図1に PEA法の原理図を示す。電圧, 接地電極の間に試料を挿入し, パルス電圧( $v_p = 200\text{ V}$ ,  $t_p = 5\text{ ns}$ )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。試料に蓄積し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(深さ方向)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, 空間電荷の蓄積し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

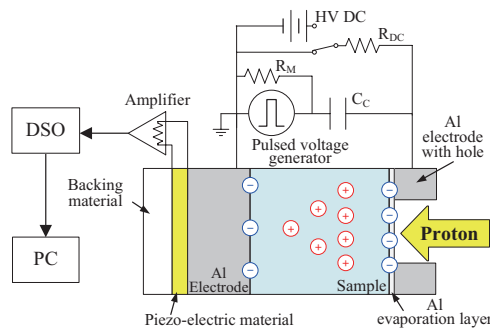


図1 PEA法の原理図

Fig.1 Schematic diagram of space charge measurement system for irradiation.

ZKL-1R5+で増幅し、デジタルオシロスコープ(National Instruments 社製 PXle-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>。陽子線照射中用の空間電荷分布測定装置には試料に直接陽子線を照射するため、照射孔が設けられている。

〈2・2〉 外部回路電流測定原理 図2に外部回路電流測定装置図を示す。高電圧電極、接地電極の間に試料を挿入し、高電圧を印加した際に試料の外部回路電流を微小電流計(ADCMT 社製 8252 DIGITAL ELECTROMETER)を用いて測定を行った。また、測定電極はリング状のガード電極を有した構造となっている為、試料沿面を流れた電流はガード電極で吸収されるため、試料内を通過してきた正味の電流量が計測可能である。

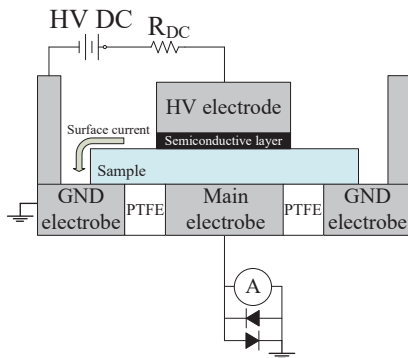


図2 外部回路電流測定システム

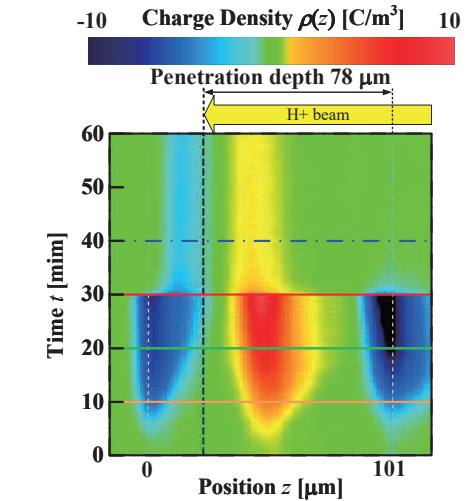
Fig.2 External circuit current measurement system

### 3. 陽子線照射中リアルタイム帯電計測

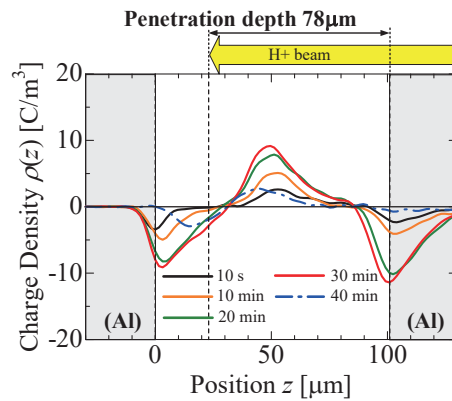
〈3・1〉 照射試料及び測定条件 測定試料として、公称厚さ  $100\ \mu\text{m}$  の ETFE を用いた。試料の照射面側にはパルス電圧を印加するため、アルミ蒸着が施されている。

陽子線照射は量研機構高崎量子応用研究所の  $3\ \text{MV}$  タンデム加速器を使用した。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  $30\ \text{nA/cm}^2$  とし照射時間は  $30\ \text{分}$  とした。この照射フルエンスは MEO で約  $7$  年分に相当する量である。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、陽子線の ETFE 内計算飛程は  $78\ \mu\text{m}$  となる<sup>(4)</sup>。

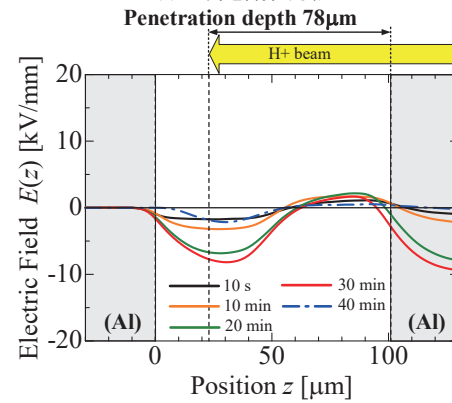
〈3・2〉 測定結果及び考察 図3に陽子線照射中、後の ETFE 内の空間電荷分布測定結果を示す。同図(a)に空間電荷分布の経時変化を示すカラーチャートを示す。図中右側から照射をし、図中縦の点線は、照射陽子の計算飛程を示している。ここで、計算飛程より右側を陽子通過領域、左側を陽子未到達領域とする。(b)に陽子線照射中の空間電荷分布波形を照射開始直後から照射終了  $10$  分後まで、 $10$  分ごとに示す。図中の実線、一点鎖線の波形はそれぞれ、照射中及び照射後の結果を示す。(c)に陽子線照射中の電界分布を照射開始直後から照射終了  $10$  分後まで、 $10$  分ごと



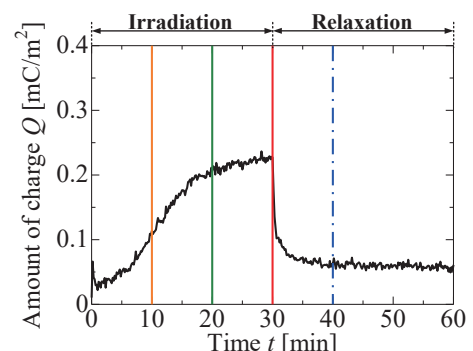
(a) 空間電荷分布の経時変化を示すカラーチャート



(b) 空間電荷分布測定



(c) 電界分布波形



(d) 蓄積正電荷量の経時変化

図3 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

に示す。また、(d)に試料内の蓄積正電荷量を試料厚み方向に積分し算出した、試料内蓄積正電荷量の経時変化を示す。同図(a), (b)より、照射開始直後、照射面から約  $52 \mu\text{m}$  の位置に正電荷の蓄積が観測された。また照射開始約 10 分後において、接地側電極から陽子未到達領域に負電荷の注入が観測された。照射終了後に関しては、計算飛程右側に正電荷の蓄積、左側に負電荷の蓄積が観測された。

図 2(d)より、試料内の蓄積正電荷量は照射開始約 17 分後にその蓄積速度に変化が観測された。また、照射電流密度は  $30 \text{ nA/cm}^2$  で照射を行っているため、照射された陽子が試料にすべて蓄積されたと考えると、その蓄積量は 1 秒間で  $0.3 \text{ mC/m}^2$  となる。ここで照射開始直後の正電荷蓄積量は約  $0.04 \text{ mC/m}^2$  となり、照射量の約 10 %と蓄積量が少ないことがわかる。

蓄積正電荷量の蓄積速度の変化、陽子未到達領域への電極からの負電荷注入に関しては、陽子線照射による放射線誘起伝導 (radiation induced conductivity : RIC) が発生したためであると考えられる。RIC の発生原因に分子鎖の切断と試料の放射化が挙げられる。ETFE はエチレン(PE)とテトラフルオロエチレン(PTFE)の共重合体である。そこで、PE と PTFE にそれぞれ陽子線照射後に、FT-IR, XPS, NMR 等の物理化学分析により構造解析を行った結果、PE では架橋反応、PTFE は分子鎖の切断が発生する事が確認された。同様に ETFE においてはその両方の反応が確認されている。よって、照射陽子により分子鎖の切断し、フリーラジカルが生成される為、照射陽子との結合、酸化、架橋反応が発生しているが、今回の照射においては、分子鎖切断による導電率上昇が RIC の発生要因となっていると考えられる。また試料の放射化に関しては、照射終了時サーベイメータを用いた表面観測の結果、 $\gamma$ 線の発生を確認しているため、こちらも半減期に依存した RIC の発生要因となっていると考えられる。

次に各領域における電荷蓄積傾向について時間経過で考察を行った。照射開始 10 秒後では前述した通り、1 秒当たりの照射量は  $0.3 \text{ mC/m}^2$  であり、実験結果との乖離が見られる。照射直後は試料内にトラップサイトが少なく、且つ照射陽子による RIC の為、高い導電率領域が形成され照射開始後に電極からの電子注入等で蓄積正電荷が相殺されていると考える。照射時間の経過と共に、分子構造の変化により深いトラップが形成され、蓄積正電荷量の増加が観測されたと考えられる。

照射 10 分後では、陽子未到達領域への負電荷の注入が観測された。これは陽子通過領域の放射化により発生した $\gamma$ 線が陽子未到達領域へ照射され、電荷注入障壁が低下したためであると現時点では推測している。

照射 20 分後では、10 分後と比較し、陽子未到達領域への負電荷の注入量、侵入深さが増加していることがわかる。

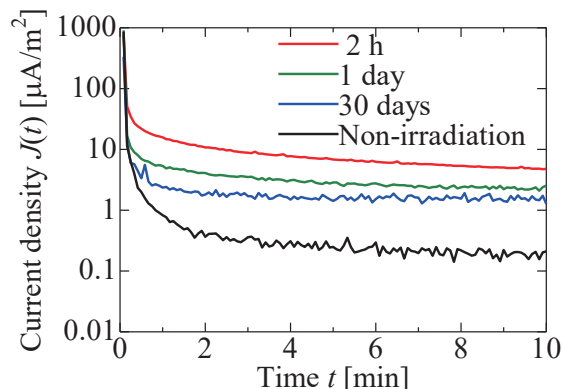


図 4 照射からの経過時間における外部回路電流比較  
Fig.4 External circuit current comparison in elapsed time from irradiation

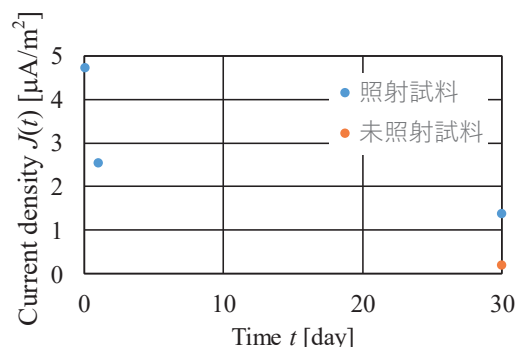


図 5 外部回路電流の 10 分値の比較  
Fig.5 External circuit current density at 10 min under each applied electric field

また、照射開始 17 分後の蓄積正電荷量の増加傾向の変化については、計算飛程付近まで負電荷が注入されているため、飛程付近の蓄積正電荷と打ち消しあったため発生したと考えられる。この結果を基に試料の導電率、電界等から蓄積電荷量解析を行い、導電率の変化を同定していく。

#### 4. 陽子線照射試料の外部回路電流測定

〈4・1〉 照射試料及び測定条件 測定試料として、公称厚さ  $25 \mu\text{m}$  の ETFE を用いた。陽子線照射は照射エネルギー  $2 \text{ MeV}$ 、照射電流密度  $30 \text{ nA/cm}^2$ 、照射時間 30 分とした(照射 2 時間後測定のみ照射時間 20 分)。また測定条件は印加電界  $100 \text{ kV/mm}$  に相当する直流電圧を 10 分間印加した。

〈4・2〉 測定結果及び考察 図 4 に照射終了 2 時間後、1 日後、30 日後、未照射試料の高電圧印加時の外部回路電流測定結果を示す。また図 5 に電流密度の 10 分値の比較を示す。同図より、時間経過により電流密度が減少しているが、未照射試料と比較を行うと、その値は 1 桁差があることがわかる。このことから、導電率の変化には分子鎖の切断による長期的な変化と陽子通過領域で発生した $\gamma$ 線による短期的な変化があると考えられる。

## 5. 実環境における空間電荷分布測定

〈5・1〉 現時点での問題点 宇宙環境下で測定を行う場合、DSOの周波数帯域の低域化、使用電圧の低電圧化が必須となる。現在使用しているDSOは帯域500 MHz、波形の取得はサンプリング周波数1.25 GS/sで行っている。通常、宇宙空間で使用する場合の周波数帯域は200 MHz以下であり、低帯域での取得が必要となる。しかし、PEA法では試料厚さの10%以下の分解能が必要となる。厚さ125  $\mu\text{m}$ のポリイミドを測定対象とした場合、約5 nsの半値時間幅が必要となる為、ある程度十分波形を再現するには1 GS/s以上である必要となる。

〈5・2〉 低サンプリング測定 前述したように、サンプリング周波数は1 GS/s以上であることが必要である。そこで、低サンプリング周波数でトリガの取得位置を変化させ数回に分け、1つのデータにまとめることで、高サンプリングの実現を考えた。測定は公称厚さ100  $\mu\text{m}$ のETFEを用いた。印加直流電圧を2 kV、印加パルス電圧を200 Vとし、DSOの測定周波数は500 MHzとした。図6にサンプリング周波数を0.3125 GS/sで4回測定を行った結果を示す。また、図7に各サンプリングでの出力と周波数の比較を示す。同図(a)に1.25 GS/sで取得した波形と0.3125 GS/sで取得し、1つのデータとしてまとめた出力波形を示す。(b)に各サンプリング周波数で取得した波形をFFTした際の周波数成分を示す。

図6、図7より、0.3125 GS/sで波形取得を行った場合、エイリアシングが発生していることがわかる。しかし、各波形を合成した波形は、1.25 GS/sで波形取得した結果と大きな変化は観測されなかった。また出力波形の周波数成分に関しても、大きな変化は観測されなかったため、低サンプリングでの測定は可能であるといえる。

## 5. 結論

陽子線照射中のETFEの空間電荷分布測定を行った。その結果、試料内の導電率の上昇により、蓄積正電荷量の蓄積速度の変化や陽子未到達領域への負電荷の注入が観測された。また導電率の上昇は、起源の異なる2つのRCIが発生したと考えられ、導電率の同定は今後の課題である。

宇宙環境下での測定に向けて、測定系のサンプリングについて検討を行った。その結果低サンプリングでの波形取得は可能であるといえる。

### 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。

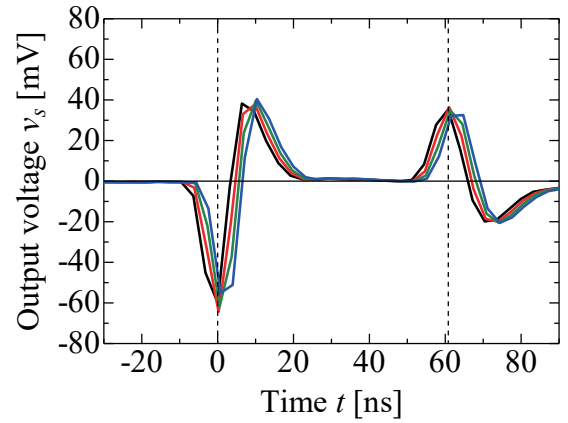
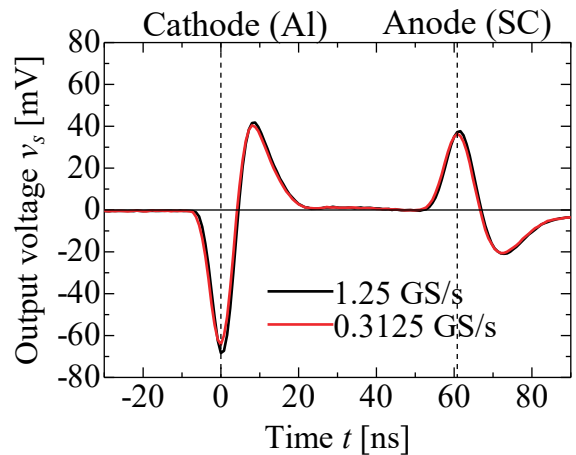
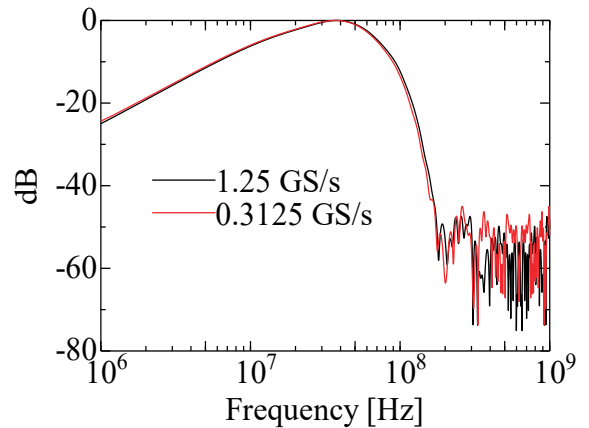


図6 トリガー位置をずらして取得した0.3125 GS/sにおける出力波形

Fig.6 Output waveform at each sampling



(a) 出力生波形の比較



(b) 周波数領域比較

図7 各サンプリングにおける出力波形

Fig.7 Output waveform at each sampling

## 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, (Oct 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 in press, <http://myukk.org/SM2017/>
- (4) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, (1985).