

プロトン照射ポリイミドフィルムの帯電特性

沼田誠也*, 三宅弘晃, 田中康寛, 高田達雄 (東京都市大学), 岩井岳夫 (東京大学)

Charging Characteristics in Proton Beam Irradiated Polyimide

Seiya Numata, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, Tatsuo Takada (Tokyo City University),
Takeo Iwai (Tokyo University)

ABSTRACT

The purpose of our research work is to measure the space charge distribution in proton beam irradiated dielectric materials for spacecrafts. Spacecrafts sometimes have a serious damage due to the electro static discharge accident. It is said that the charge accumulation in dielectric materials irradiated by high energy charged particles in space environment causes the discharge accident. Therefore, we need to measure the charge distribution in the bulk of dielectric materials. We have been developing a system for measuring internal charge distribution in dielectric materials using Pulsed Electro-Acoustic (PEA) method. Using the system, we tried to measure the charge distribution after proton beam irradiated polyimide (PI) and fluorinated ethylene propylene copolymer (FEP) films which have been used as a thermal control layers or an optical solar reflector of spacecrafts. From the result, it is found that positive charges accumulate in bulk of PI and FEP films after proton beam irradiation of the proton beams. However, the amounts of accumulated positive charge in PI increase with increase of irradiation time, while those in FEP decrease. Therefore, it is found that the charge accumulation properties strongly depend on the kinds of irradiated materials.

キーワード：宇宙機，絶縁材料，プロトン，電荷分布，PEA 法，ポリイミド

(Key words: Spacecraft, Dielectric material, Proton-beam, Charge distribution, PEA method, PI)

1. はじめに

人工衛星などの宇宙機は宇宙空間の激しい温度変動から搭載機器を守るために、高分子の多層断熱材(Multi Layer Insulator: MLI)で覆われているが、電子や陽子などの高エネルギー荷電粒子線に曝され、絶縁材料内部に荷電粒子が侵入し帯電する。絶縁材料内の電荷蓄積によって、絶縁材料と宇宙機とに電位差が生じ、絶縁材料表面に放電を引き起こす。放電は絶縁材料の劣化や、放電による電磁波ノイズの影響により宇宙機内部の電子機器の故障・誤作動を引き起こし、最悪の場合宇宙機の運用異常につながるという報告がなされている⁽¹⁾。そのため、宇宙機的设计には高分子絶縁材料の電気特性が重要なパラメータとなるが、現在検討されている宇宙機設計のガイドラインでは高エネルギー荷電粒子が照射された絶縁フィルムの電気的特性はあまり考慮されていない。

そこで本研究では、宇宙機の絶縁材料で生じる内部帯電の蓄積メカニズムを解明するために、パルス静電応力(Pulsed Electro-acoustic: PEA)法を用いた内部帯電計測装置を開発した。

現在、電子線照射下における内部帯電計測は国内外で行われているが、プロトンが照射された絶縁材料中の電荷分布計測はほとんど行われていない^(2,3)。そこで本研究では、電子線以外の荷電粒子(プロトン)照射下における内部帯電計測を目的としている。また、実際の宇宙機に内

部帯電計測装置を搭載し、実宇宙環境において絶縁フィルム中の電荷蓄積挙動を観測することを最終的な目標とし、宇宙機用絶縁材料の電気的特性評価方法を提案する予定である。

2. 測定方法

2-1. パルス静電応力法(PEA法)の原理

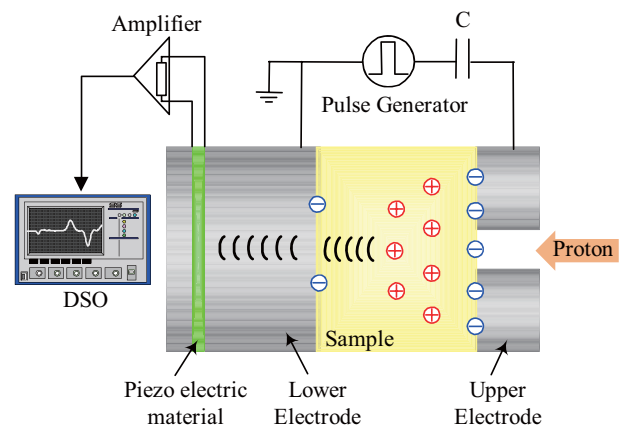


図1 PEA法測定原理

Fig. 1 Principle of PEA method

図1にパルス静電応力法(PEA法)の原理図を示す。電極で挟んだ試料にパルス電界を印加することにより、空間電荷の存在する各位置で電荷密度に比例した静電応力が瞬間

的に発生し、試料に蓄積している電荷が微小変位する。これにより、圧力波が発生する。圧力波は下部電極を伝搬してセンサー（圧電素子）に到達し、電気信号に変換される。この際、圧電素子に届く圧力波は試料内の位置（深さ方向）によって到達する時間が異なるために、空間電荷の分布は出力信号の時間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。また、発生する圧力波の振幅は電荷密度に比例するため、圧電素子から発生する電気信号は試料内の電荷密度に比例している。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り観測された信号をコンピュータに取り込み、信号処理を施すことによって空間電荷分布を得ることができる。

2-2. 計測システム

図2にPEA装置の概略図および写真を示す⁽⁴⁾。本装置は荷電粒子を試料に照射するために照射窓を設けており、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⁽⁵⁾。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68 mm、横48 mm、高さ24 mmまで小型化することに成功し、比較的小さなチャンパ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さ9 μm 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 μm を得ている。つまり、100 μm 程度の試料は位置分解能約10%で測定が可能である。

3. プロトン照射下におけるリアルタイム帯電計測

3-1. 測定試料および実験条件

測定試料として厚さ125 μm のポリイミドフィルム（宇部興産社製：Upilex[®]）（以下PI）を用いた。PIは実際の宇宙機のMLIとして用いられている。プロトン照射実験はチャンパー内の真空度を約 1×10^{-5} Paとし、測定試料に照射エネルギー1.5 MeV一定とし、電流密度を0.03-30 nA/cm^2 の範囲で変化させ、プロトン照射中における絶縁材料内の空間電荷分布をそれぞれ測定した。なお、電流密度0.03 nA/cm^2

というプロトンは内帯に存在し、太陽の活動が活発になると0.3 nA/cm^2 のプロトンも存在すると言われている。各測定における実験条件を表1に示す。また、プロトン照射実験は日本原子力研究開発機構の高崎量子応用研究所の3MVタンデム加速器、東京大学原子力専攻重照射設備のバンデグラフ、および宇宙航空研究開発機構筑波宇宙センターの宇宙環境試験設備を用いて行った。

表1 実験条件

Table.1 Measurement condition

Conditon No.	Energy [MeV]	Current Density [nA/cm^2]	Irradiation Time [min]	Irradiation facility
実験 1	1.5	30	30	高崎
実験 2		3		
実験 3		0.3		東大
実験 4		0.03	300	JAXA

3-2. 実験結果および考察

図3に実験1,2,3,4におけるプロトン照射中のPI内の最大蓄積時の電荷分布を示す。図3の電荷分布の結果より、照射面から試料内約50 μm まで正電荷の蓄積が確認され、これら正電荷の蓄積は照射電極側のみ見られ、対向電極側に正電荷を確認することはできない。これはプロトンが試料内のある位置まで侵入し、それ以上は深く侵入していないことを示している。

また、同照射条件におけるPI内のプロトン飛程を数値計算により算出したところ、37 μm であった⁽⁶⁾。図4(a)より正電荷蓄積分布のピーク値は35 μm であり、これは装置の位置分解能10 μm 程度であるため、37 μm と35 μm ではほぼ差がなく、一致していると言える。これらより、同図における正電荷分布は、プロトン照射により生じた蓄積電荷が観察されたものと考えられる⁽⁷⁾。また、同図(b), (c), (d)より、照射面からの電荷蓄積位置は、同図(a)と同様の結果が得られている。つまり、電流密度変化の差としては、最大電荷蓄積位置が最大飛程の位置から照射面近傍に変化し

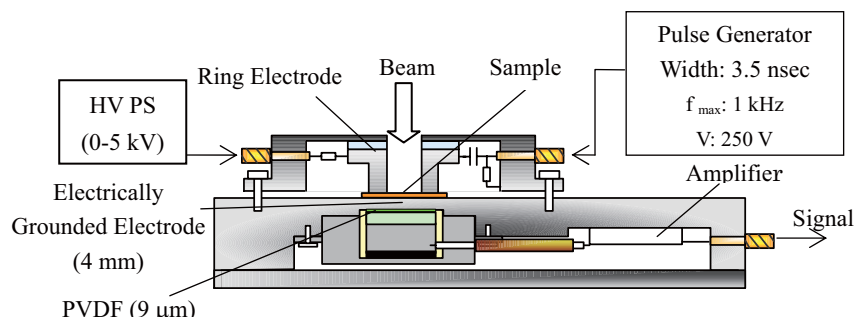
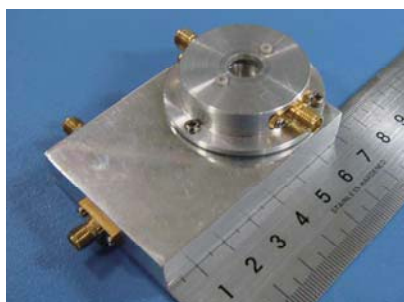


図2 PEA 装置概略図および写真

Fig. 2 Schematic diagram and Picture of the measurement apparatus

ていることがわかる。

図 4 に照射中・照射後にかけてのPI内蓄積総電荷量の経時変化を示す。蓄積総電荷量は電荷分布の測定結果より、試料内の蓄積正電荷分布を積分することにより算出した。まず、最大蓄積量に注目し同図(a), (b)を比較すると、電流密度が 10 倍程異なっても最大量がそれぞれ 0.084 mC/m²、

0.063 mC/m²となり、蓄積電荷量が比例しないのがわかる。さらに同図(c), (d)より、電流密度を 1/100, 1/1000 としても最大蓄積量がそれぞれ 0.05, 0.067 mC/m²であり、顕著な差は見られない。

次に蓄積挙動をみると同図(a)の結果よりプロトン照射開始直後に蓄積量は最大となり、その後は照射中にもかかわ

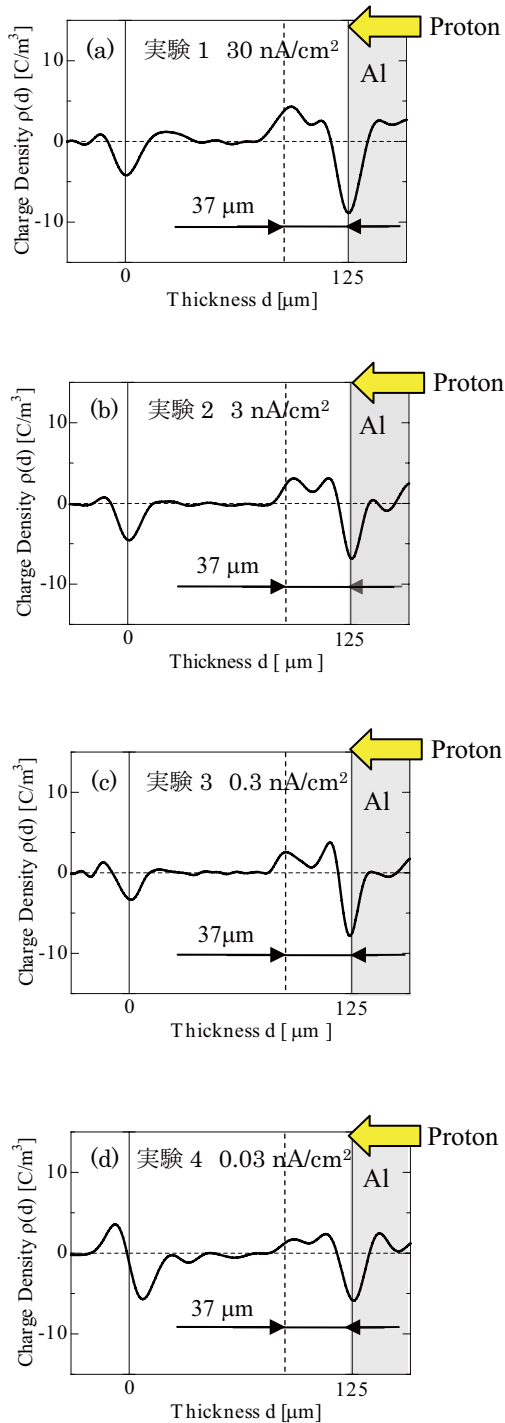


図 3 プロトン照射下における電荷分布

Fig.3 Charge distribution under proton beam irradiation

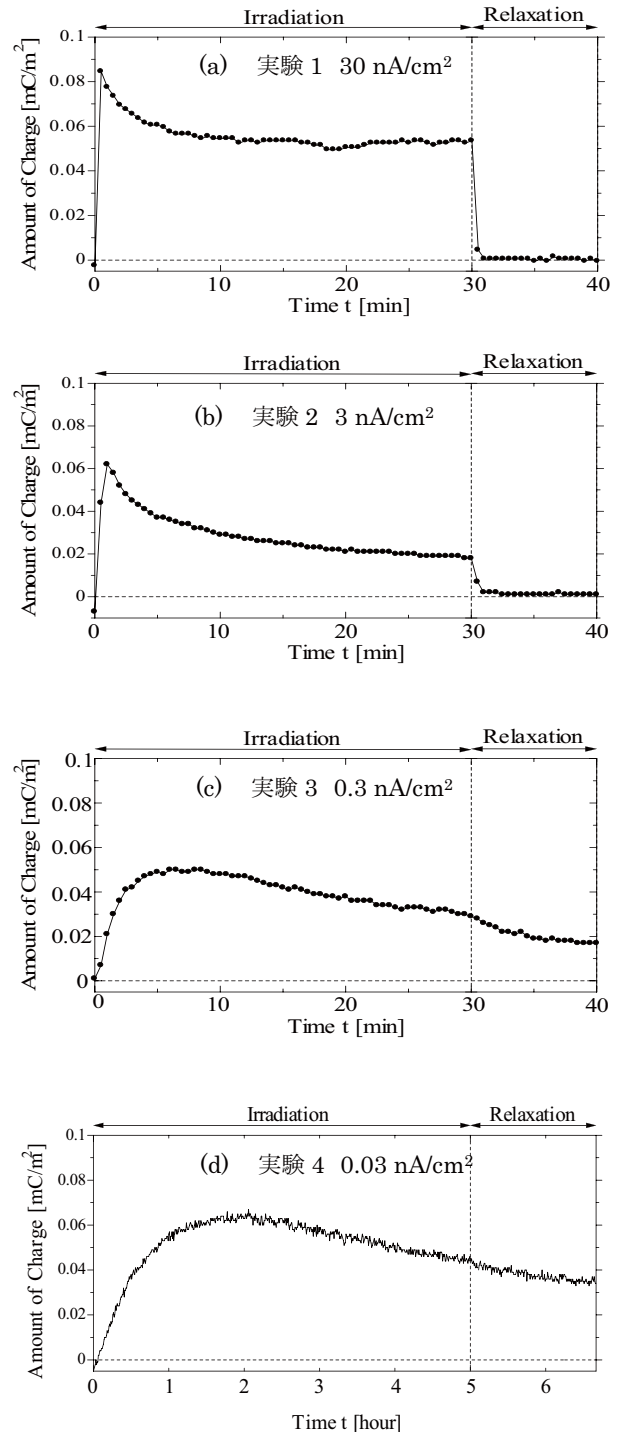


図 4 蓄積総電荷量の経時変化

Fig.4 Time dependence on accumulated amount of charge

らず蓄積量は減少し、照射開始 10 分後には 0.055 mC/m^2 の一定値を取り、電荷量の変化は観察されなくなった。同図(b)においては照射開始 1 分後に最大となり、その後減少に転じている。さらに電流密度を $1/10$ とした同図(c)においては、5 分後に最大値に達し、さらに $1/10$ の同図(d)においては約 2 時間後に最大値に達している。

照射後に着目すると電流密度が比較的高い場合には照射終了直後に素早く電荷が減少し、1 分後以降は電荷が観察されない。電流密度が低い場合においては、日単位の減少傾向である。これらより、電流密度を変化させると最大蓄積量に達する時間、および照射後における電荷の減少時間が変化し、電流密度を高くすると飽和時間が早くなり、照射後の電荷の減衰が早くなる。一方、電流密度を低くするとその逆の現象が得られた。

次に、照射中の蓄積電荷現象について考察する。照射しているのにも関わらず電荷の蓄積が減少していく傾向について、以下のことが挙げられる。

- ① プロトンが侵入した範囲の導電率の上昇
- ② プロトン照射による温度上昇

まず、①の原因においては、プロトン通過領域の導電率が上昇し、上部電極部に存在する自由電子が試料内部に侵入することで、マクロ的に中和状態を取るために電荷量が減少しているようにみえると考えられる。導電率が上昇する原因としては、分子間の結合が高エネルギープロトンにより切断されることや、プロトンを照射したことにより生じる放射線誘起電導(RIC)が考えられるが、まだ推定の段階であるため詳細な検討を行うことが今後の課題である。

また、図 4 (a)における照射後 10 分以降にみられる一定値の状態は、プロトンの注入量と電極からの電子注入量がつりあっている状態であると考えられる。

次に②についてであるが、IR カメラによる温度測定予備実験により、プロトンビームを照射した際の PI の温度は、 100°C を超えることが確認された。つまり、プロトン照射による温度上昇により、蓄積電荷の移動度が上昇し電荷が試料外へ放出されているのではないかと考えられる。

以上のことは、現在解析途中の段階にあり、今後さらなる検証が必要である。

以上のようなプロトン照射 PI 中の電荷蓄積現象は、電子線を照射した場合においても同様な電荷蓄積現象が確認されているため、今後比較検討を行っていく予定である。

4. まとめ

プロトンを照射下することによって試料内に正電荷の蓄積が確認できた。侵入深さにおいては数値計算によって求めた値と蓄積ピーク位置がほぼ一致し、プロトンを照射しているにもかかわらず蓄積電荷は減少するということが共通して言えることがわかった。電荷の蓄積挙動に関しては、高電流照射の場合は照射開始直後から電荷が素早く蓄積し、

照射後は素早く減少する。一方、低電流照射の場合には緩やかに蓄積し、減少することがわかった。よって、プロトンの照射によって試料にダメージが与えられ、電流値が大きいほど与えるダメージも大きいと考えられる。また、プロトンを照射することで絶縁材料の電気的特性が変化すると考えられる。これらについては、今後さらに検討する。

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) V. Griseri, C. Perrin, K. Fukunaga, T. Maeno, D. Payan, L. Levy and C. Laurent, "Analysis of Electron Behavior in Polymeric Films During Electronic Irradiation", 2005 Annual Report CEIDP, pp 645-648, 2005
- (3) Tatsuo TAKADA, Hiroaki MIYAKE, and Yasuhiro TANAKA, "Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric Materials for Spacecraft", IEEE NPSC Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, pp.2176-2184, 2006
- (4) M. Honjoh, S. Maruta, Y. Tanaka, T. Takada and R. Watanabe, "Measurement of Charge Accumulation in Electron Beam irradiation Dielectric Materials for Spacecraft," Proceedings of the 10th Space Craft Charging Technology Conference, Biarritz-France, pp.18-21, 2007.
- (5) T. Takada, "Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distributions in Dielectrics", IEEE Trans. DEI, Vol.6, No.5, pp.519-547, 1999
- (6) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1985.
- (7) T. Takada, H. Miyake and Y. Tanaka, "Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric materials for Spacecraft", IEEE Trans. PS, Vol. 34, No. 5, pp.2176-2184 (2006)