

プロトン照射絶縁材料における電荷蓄積特性

沼田誠也*, 丸田真吾, 三宅弘晃, 田中康寛, 高田達雄 (武蔵工業大学)

Charge Accumulation Characteristics in Proton Beam Irradiated Polymers

Seiya Numata, Shingo Maruta, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, Tatsuo Takada (Musashi Institute of Technology)

ABSTRACT

The purpose of our research work is to develop a compact bulk charge measurement system and to measure the charge distribution under proton-beam irradiated dielectric materials used for spacecraft. Spacecrafts sometimes have a serious damage due to the electrostatic discharge accident. It is said that the charge accumulation in dielectric materials irradiated by high energy particles in space environment causes the discharge accident. However, there remain many unknown factor about a charge accumulation in dielectric materials by irradiation of charged particle. Therefore, we need to measure the charge distribution in the bulk of dielectric materials. We have had many experiences to measure the charge distribution in dielectric materials under electron-beam irradiation. However, there are few measurement results of the proton-beam irradiated samples and we have to carry out a proton-beam irradiation in specially arranged equipment for proton beam irradiation. Therefore, we have been developing a compact bulk charge measurement apparatus for applying to several measurement environments in various irradiation chamber.

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、熱制御材である積層された絶縁材料 (MLI: Multi Layer Insulator) 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。すると、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、絶縁材料表面に静電放電を引き起こす。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事故につながるという報告がなされている⁽¹⁾。そのため、宇宙機の設計には絶縁フィルム等の電気的特性が重要な要因となるが、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、パルス静電応力法 (Pulsed Electro-acoustic Method: 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^(2,3)、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。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. パルス静電応力法 (PEA 法) の原理

図 1 にパルス静電応力法の原理図を示す。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 AD 変換された後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。

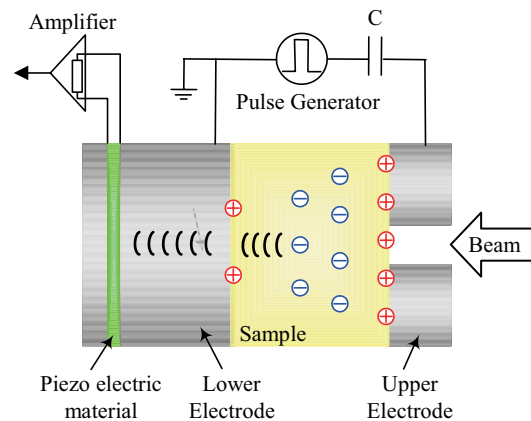


図 1 PEA 法測定原理

3. 計測システム

< 小型 PEA 装置 >

あらゆる測定環境に対応できる小型 PEA 装置製作した。図 2,3 に PEA 装置の概略図および写真をそれぞれ示す。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。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 68mm、横 48mm、高さ 24mm 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。

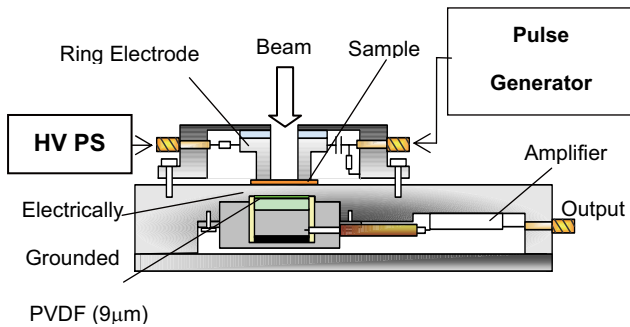


図 2 PEA 装置概略図

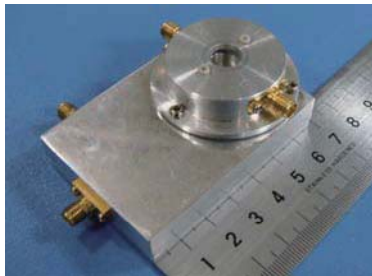


図 3 小型 PEA 装置写真

4. 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®) および PMMA (Goodfellow 社製) を用いた。ポリイミドフィルムは実際の宇宙機の MLI として用いられており、PMMA においては比較的電荷がたまりやすいことから、電荷の挙動を確認するために用いた。プロトン照射実験はチャンバー内の真空度を約 10^{-3}Pa とし、測定試料に照射エネルギー 1.5MeV、電流 27-270nA (電流密度: 3-30nA/cm²) のプロトンビームを照射し、照射中における絶縁材料内の空間電荷分布を測定した。各測定における実験条件を表 1 に示す。測定時間は照射中 30 (60) 分、照射後 10 分であり、測定は 30 秒間隔で行った。なお、プ

ロトンビーム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タンデム加速器 'TIARA' を用いて行った。

表 1 実験条件

	測定試料	電流[nA] (電流密度[nA/cm ²])
実験1	PI (Upilex®)	270 (30)
実験2		27 (3)
実験3	PMMA	270 (30)
実験4		27 (3)

5. 実験結果および考察

< PI におけるリアルタイム帯電計測 >

図 4,5 にポリイミドにおける照射中の電荷分布 (照射開始直後・終了直前および最大蓄積量)、蓄積総電荷量の経時変化を示す。なお、蓄積総電荷量は電荷分布の測定結果より、蓄積した正電荷部分の分布を積分することによって算出した。

実験 1 より、プロトンビームの照射によって試料内部のある位置まで正電荷が蓄積していることがわかる。分布の様子に関しては、照射開始直後にピークを持った波形となっているが、照射終了直前では比較的一様に分布している。また、これら正電荷の蓄積は照射電極側にのみ見られ、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。そこで、プロトンビームが試料内をどの程度侵入したかを表す '侵入深さ' について検討する。まず、荷電粒子の侵入深さを 'SRIM' と呼ばれる数値シミュレーションにより算出した⁽⁴⁾。その結果、プロトンビームの加速エネルギー 1.5MeV における PI での侵入深さは 37 μm となる。測定結果から得られる正電荷の侵入深さは、正電荷蓄積分布の先端部分で読みとると試料界面からおおよそ 48 μm であるが、分布のピーク値から読みとると 34 μm であり、シミュレーションにより得られた 37 μm と近い値となっている。次に、正電荷の蓄積挙動について注目すると、プロトンビーム照射開始直後に蓄積量は最大となるが、その後はプロトンビームを照射しているにもかかわらず、蓄積量は減少に転じている。この原因の一つとして考えられるのは、プロトンビームによって試料の温度が上昇することである。プロトンビームを照射した物質の温度は、条件によっては 100 $^{\circ}\text{C}$ を超える場合があるといわれている。つまり、プロトン照射による温度上昇のために試料の導電率が増加し、一旦蓄積した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。また、電子線を照射した場合のポリイミドフィルムの蓄積挙動においても、電子

は一旦試料内に蓄積するが、その後減少する傾向が確認されている。これより、この挙動の理由はポリイミド自体の特性ということも考えられる。これに関しては今後更に検討する。なお、照射後においては照射終了直後に素早く電荷が放出し、それ以降は電荷がほとんど存在しない。

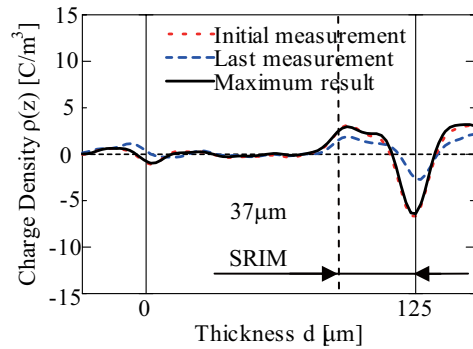
次に電流を低くした実験 2 では実験 1 と同様に照射開始直後から正電荷が蓄積するが、試料界面付近と試料内部のある位置とにピークが確認でき、2ヶ所に正電荷が蓄積している。照射開始直後では、2ヶ所のピークを持った波形となっているが、照射終了直前では試料内部側のピークが減衰していることがわかる。蓄積量において電流が高い場合と比較すると、ほぼ同量の電荷が内部に蓄積している。これより、ポリイミドフィルムにおいて低電流照射と高電流照射では電荷の蓄積量は同様になると考えられる。次に、侵入深さにおいては、試料内部側のピーク値付近から読みとると 37 μm であり、シミュレーション値と一致している。また、蓄積挙動に関しては高電流の場合と同様に照射開始直後に蓄積量が最大となり、その後は照射中にもかかわらず減少に転じ、照射終了直前では実験 1 とほぼ同じ蓄積量となる。この原因としては上述したことが考えられる。これらの原因については今後検討する予定である。

<PMMA におけるリアルタイム帯電計測>

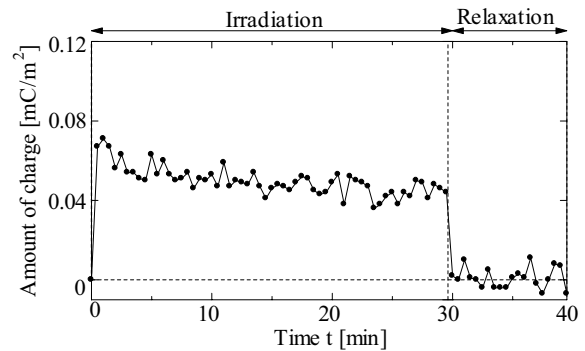
図 6,7 に PMMA における照射中の電荷分布（照射開始直後・終了直前および最大蓄積量）、蓄積総電荷量の経時変化を示す。

実験 3 より、プロトン照射直後から PMMA 内に正電荷が蓄積し、実験 4,5 に示すポリイミド内の蓄積量よりも大きいことがわかる。また、SRIM から得られるシミュレーション値において、加速エネルギー 1.5MeV における PMMA での侵入深さは 43 μm となり、蓄積のピーク位置付近がシミュレーション値と一致している。なお、対向電極側には正電荷の蓄積はみられない。次に、正電荷の蓄積挙動について注目すると、蓄積は照射時間にもなっている時間まで増加するが、およそ 2 分で飽和に達し飽和状態は継続する。しかし、その後蓄積量は大きく減少し、その挙動は照射終了まで持続した。この実験が終了した際、プロトンを照射した試料を確認すると、照射された範囲のみアルミニウム蒸着がとけていた。このことがプロトンを照射しているのにも関わらず、蓄積が減衰する原因であると考えられる。なお、蒸着がとけたことによって蓄積量が減少した理由は以下の 2 点が挙げられる。まず一つはパルス電圧が均一に印加していないことが考えられる。もう一つはプロトン照射によって試料が絶縁破壊したことが考えられる。これについては今後更に検討する。

実験 4 では低電流のプロトンを PMMA に照射した。これより、実験 3 と同様に照射開始直後から正電荷が蓄積する

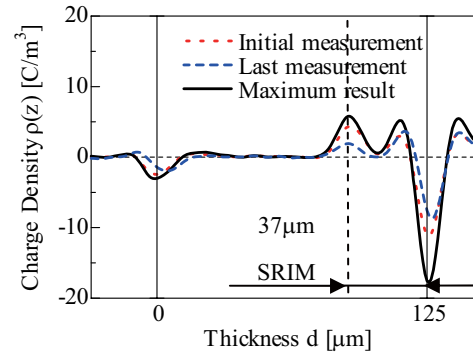


(a) 空間電荷分布

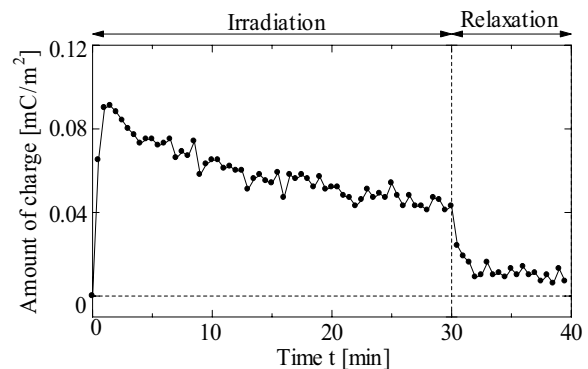


(b) 蓄積総電荷量の経時変化

図 4 実験結果 (実験 1)



(a) 空間電荷分布



(b) 蓄積総電荷量の経時変化

図 5 実験結果 (実験 2)

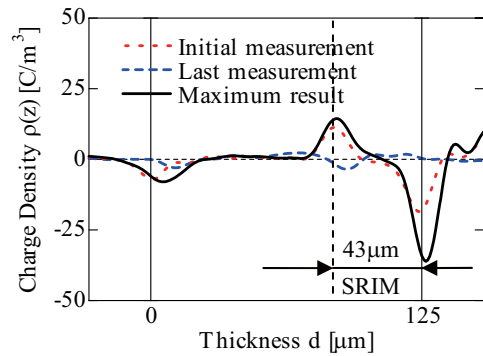
ことがわかる。また、蓄積位置に関してはピーク付近がシミュレーション値と一致する。しかし、電流が高い場合と比較すると、明らかに多くの電荷が内部に蓄積している。また、蓄積挙動は高電流とは異なりある程度徐々に蓄積し、その後高電流の場合と同様にそれ以上は増加せず、いったん減少するがある一定値で飽和する。この実験終了時においては実験3のように試料の蒸着がとけるとい現象は起きなかった。しかし、蓄積電荷が減少するという現象が起きているため、ポリイミドフィルムの場合と同様に、目では確認できないダメージがプロトンの照射によって与えられていると考えられる。

6. まとめ

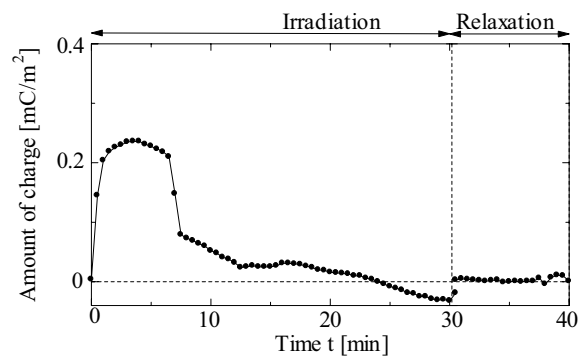
2種類の絶縁フィルムを用いてプロトン照射実験を行い、各試料に電流値の異なるプロトンを照射した際の電荷分布および蓄積挙動について検討を行った。その結果、ポリイミドにおいては低電流照射では高電流の場合にはみられなかった2ヶ所の蓄積が確認できた。また、蓄積挙動に関しては両測定条件において、照射中でも正電荷の蓄積量は減少傾向となることがわかった。PMMAにおいては高電流の場合では照射された範囲のみアルミニウム蒸着がとけてしまったが、試料内のある位置に正電荷が蓄積されることがわかった。また、蓄積挙動に関しては低電流照射下では比較的緩やかに蓄積し、いったん減少するがある一定値で飽和することがわかった。これらより、今回測定に使用した2種類の試料において、侵入深さはSRIMから得られるシミュレーション値とほぼ一致し、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。また、低電流照射では高電流照射の場合と比べて、蓄積量が大きくなることを確認できた。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。

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) 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) 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.
- (4) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1985.

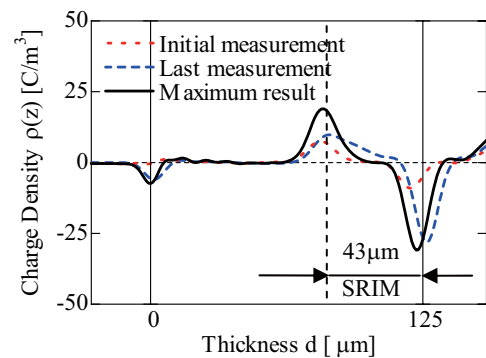


(a) 空間電荷分布

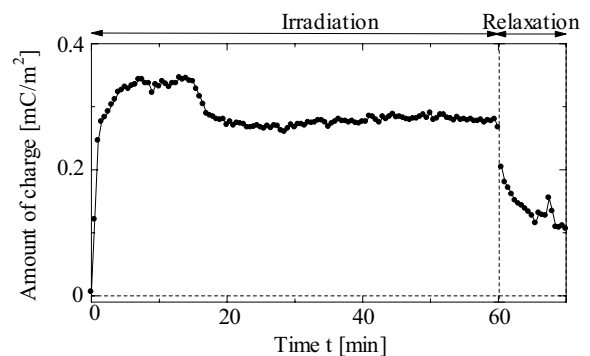


(b) 蓄積総電荷量の経時変化

図6 実験結果 (実験3)



(a) 空間電荷分布



(b) 蓄積総電荷量の経時変化

図7 実験結果 (実験4)