

宇宙機用帯電計測器の開発 及び 実証試験

Development and examination of charge measurement system for spacecraft

三宅 弘晃

Hiroaki MIYAKE

東京都市大学

(概要)

パルス静電応力法 (Pulsed Electro-acoustic Method: 以下 PEA 法) を用いた内部帯電計測装置を開発し、荷電粒子照射下における絶縁材料の内部帯電計測を行っている。電子線照射下における絶縁材料内の帯電計測は本研究室をはじめとする国内外の研究施設で行われてきたが、プロトンが照射された絶縁材料の電荷分布計測は行われていない。そこで本研究では、プロトン照射下における絶縁材料の内部帯電計測、および照射材料の電気的特性の評価を行い、それらの研究結果を軌道上実測結果の比較・校正データへ応用すること、さらには軌道上で使用できる帯電計測装置の開発を目的としている。本研究課題により、プロトン照射下での帯電計測を実施し、帯電計測機の性能評価と帯電計測結果の解析を行った。

キーワード :

宇宙機、帯電、PEA 法、プロトン照射

1. 目的

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機内の温度を一定に保つために、熱制御材で覆われている。熱制御材は、Multi Layer Insulator (MLI) と呼ばれ、ポリイミドフィルム (PI) を複数積層したものが用いられている。MLI は宇宙空間において、電子や陽子などの高エネルギー荷電粒子線に直接曝されることにより、絶縁材料内部に荷電粒子が注入され、電荷が蓄積される。絶縁材料の帯電によって、絶縁材料と宇宙機の接地 (基準電位) との間に電位差が生じ、放電や材料の絶縁破壊を引き起こす。この帯放電現象は絶縁材料の劣化や、放電によって生じる電磁波ノイズにより宇宙機内部の電子機器の故障・誤作動、電力送電ライン等の基幹システムの破損を生じさせ、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、宇宙機の設計には高分子絶縁材料の電気的特性が重要な要因となり、現在の宇宙機設計標準でも設計時に帯電評価を行うことを求めている。しかしながら、現設計標準では高エネルギー荷電粒子が照射された絶縁材料の内部帯電や導電率等の電気的特性は、計測・評価手法が確立されていない等の理由から、まだ反映されていない。

そこで当研究グループでは、宇宙機の絶縁材料で生じる内部帯電の電荷蓄積現象を解明するために、パルス静電応力法 (Pulsed Electroacoustic Method: PEA 法) を用いた内部帯電計測装置を開発し、荷電粒子照射下における絶縁材料の内部帯電計測を中心に帯電挙動の解析を行っている。電子線照射下における絶縁材料内の帯電計測は本研究室をはじめとする国内外の研究施設で行われてきたが^[2,3]、プロトン (陽子) が照射された絶縁材料の電荷分布計測は行われていない。そこで本研究では、プロトン照射下における絶縁材料の帯電計測、および電流計測による照射材料の電気物性の評価を行う。また、本研究で開発した帯電計測器を応用し、衛星搭載帯電計測器の開発検討も現在行っており、本研究において得られたプロトン照射材料の電気物性の研究結果は、軌道上実測結果の比較・校正データとして用いる予定である。さらに本研究の最終的な目標として、本研究で得られた知見の宇宙機設計標準への反映を目指す。

2. 方法 — 内部帯電計測手法と実験条件 —

2.1 PEA 法の原理

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 (厚み方向) で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 (圧電素子) に到達し、電気信号に変換される。圧電素子から出力された電圧信号を信号処理することによって空間電荷分布を得る。なお、圧力波は試料内の電荷が蓄積するそれぞれの位置から発生するため、圧電素子に到達するまでに時間差が生じる。これが出力信号の時間差として検出されるので、試料内の空間電荷の位置情

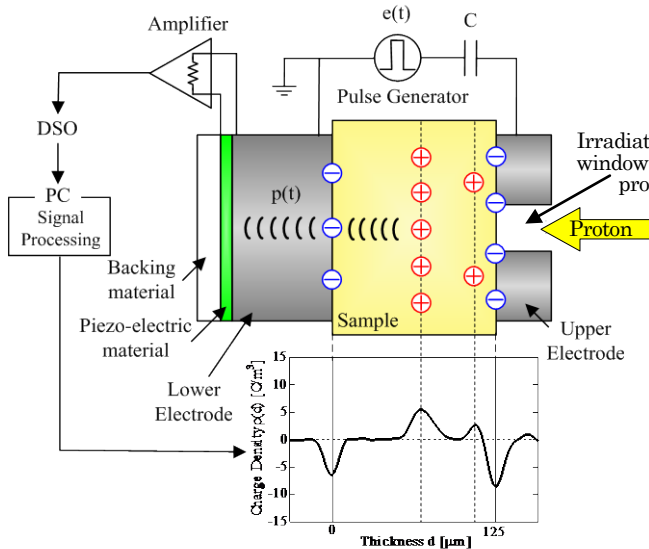


図 1 PEA 法測定原理図

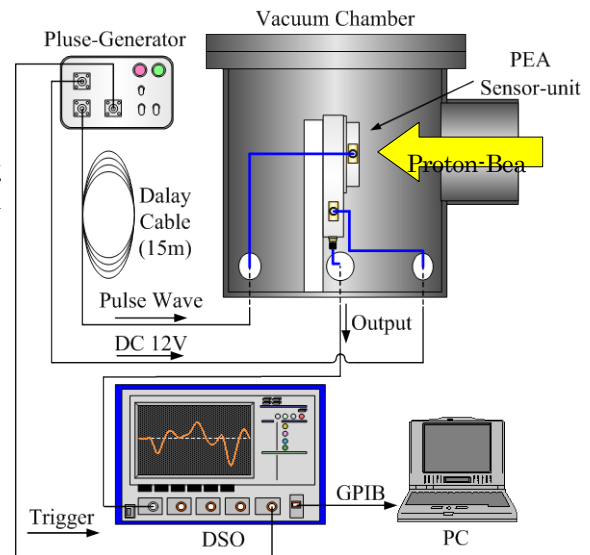


図 2 測定システム概略図

報を得ることができる。さらに、発生する圧力波の振幅は電荷密度に比例するため、電荷密度に比例した電気信号を得ることができる。

2.2 計測システム

図 2 に PEA 測定システム概略図を示す。本 PEA 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内部帯電計測を可能としている^[4]。また、装置のサイズは縦 68 mm、横 48 mm、高さ 24 mm と小型化であり、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。試料にパルス電圧（電圧 250 V、パルス幅 3.4 nsec）を印加することによって発生した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約 10 μm である。

測定システムは PEA センサ部、パルスジェネレータ、AMP 用電源（ $V_{DC}=12$ ）、デジタルストレージオシロスコープ、PC から構成され、PEA センサは真空チャンバー（ターゲットチャンバー）内に設置される。但し、ターゲットチャンバーは実験施設によって異なる。

2.3 測定試料および実験条件

測定試料として厚さ 125 μm の 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。表 1 に示す条件でプロトンを PI に照射した（照射環境の真空度は約 1×10^{-5} Pa である）。照射中および照射後の PI 内の空間電荷分布を前述の内部帯電計測器により測定した。なお、電流密度 0.3 nA/cm² のプロトンは太陽活動極大期の粒子量に相当する^[5]。プロトン照射には日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の 3MV タンデム加速器を用いて行った。

表 1 実験条件

Condition No.	Acceleration Energy [MeV]	Current Density [nA/cm ²]	Irradiation Time [min]
①	1.0	0.3	30
②		3	
③		30	
④	1.5	0.3	
⑤		3	
⑥		30	
⑦	2.0	0.3	
⑧		3	
⑨		30	

3. 研究成果及び考察

3.1 正電荷蓄積分布とプロトン飛程

図3に照射中における最大電荷蓄積時のPI内空間電荷分布波形を示す。プロトンは図3の右側から照射しており、電荷分布に見られる試料と電極界面の電荷のピークは、試料内に蓄積した正電荷により誘導された負電荷である。

同図より、全ての照射条件において試料内に正電荷の蓄積が確認される。これら蓄積正電荷のピーク位置は、加速エネルギーの増加(1.0, 1.5, 2.0 MeV)に応じて、それぞれ照射面から19, 37, 58 μm と変化していることがわかる。蓄積量は照射電流密度、0.3, 3, 30 nA/cm^2 の増加による顕著な増加は観測されなかった。

次にこの蓄積位置を同照射条件におけるPI内のプロトン飛程の数値計算と比較する^[6]。1.0, 1.5, 2.0 MeVの計算結果はそれぞれ19, 37, 59 μm であり、図3の電荷分布計測結果中の破線で示す。装置の位置分解能は10 μm 程度であるため、計算飛程は実測ピーク値と一致しているといえる。以上より、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。さらに、1.5, 2.0 MeVの分布においては二つのピークが存在する。これら正電荷の蓄積はプロトンの飛程領域にのみ見られ、最大飛程以上深くは正電荷の蓄積を確認することはできなかった。この結果は全ての電流条件で観測されており、正電荷蓄積位置は加速エネルギーにより一義的に決定されるものと言える。

以上のことから、PI内の電荷蓄積位置は照射プロトンの飛程に依存すると考えられる。

3.2 蓄積電荷の飽和時間と照射電流密度

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。蓄積総電荷量は図3に示される各電荷分布の測定結果より、試料内部の正電荷量を積分することにより算出した。

同図(a)より1.0 MeV照射時における総電荷量の変化を見ると、同図30 nA/cm^2 照射時では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らず蓄積量は減少し、照射開始10分後から終了まで約34 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ の一定値を示した。さらに同図より3, 0.3 nA/cm^2 照射では、最大蓄積に達する時間がそれぞれ1分、6分と遅くなっていることがわかる。また、最大蓄積量に到達後は30 nA/cm^2 照射時と同様に、照射中にもかかわらず減少していく傾向が観測された。

照射後に注目すると、0.3 nA/cm^2 照射時には蓄積電荷は減少するものの残留する。しかし、その他の電流密度では、

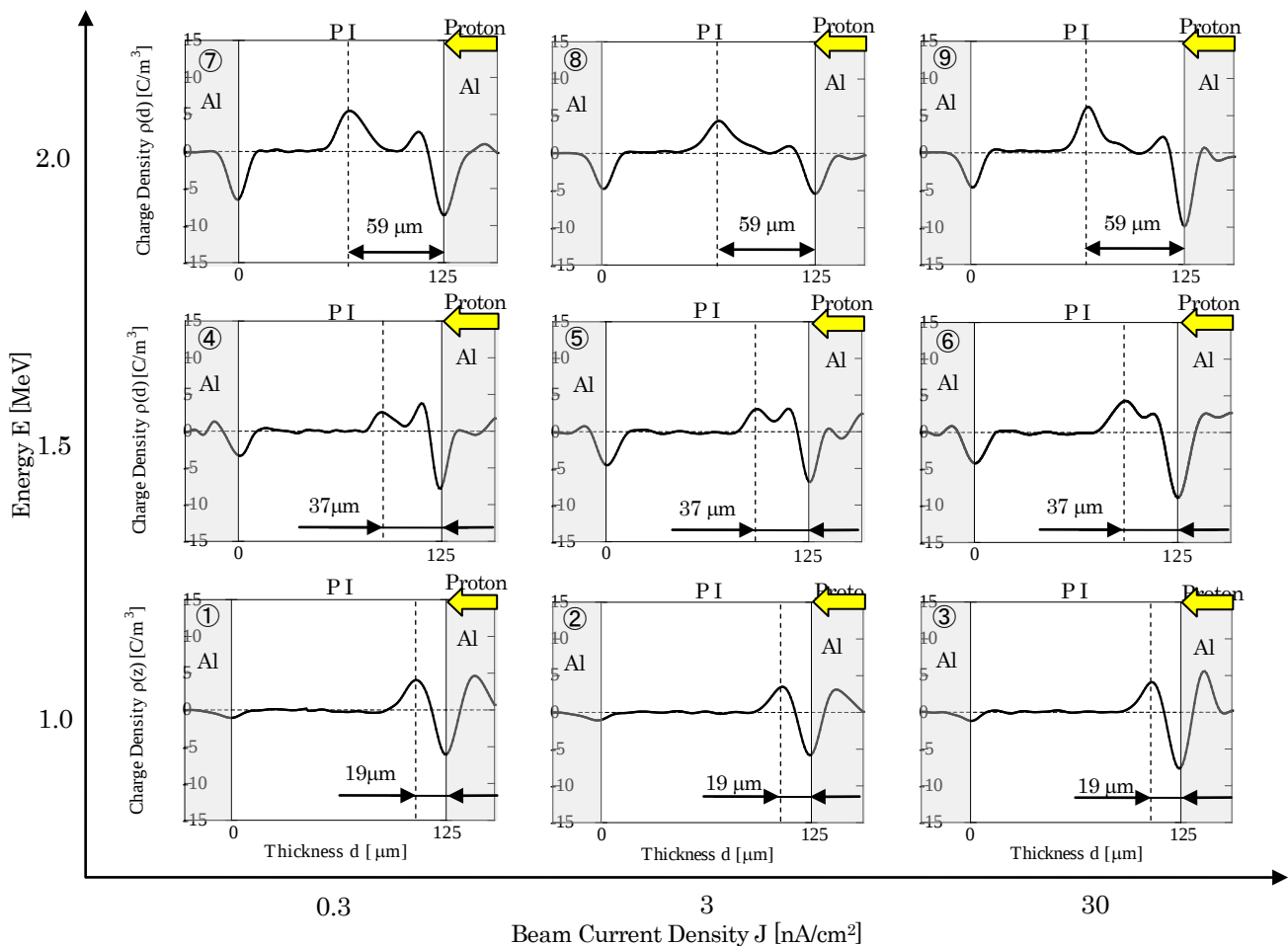


図3 プロトン照射下におけるPI内の空間電荷分布

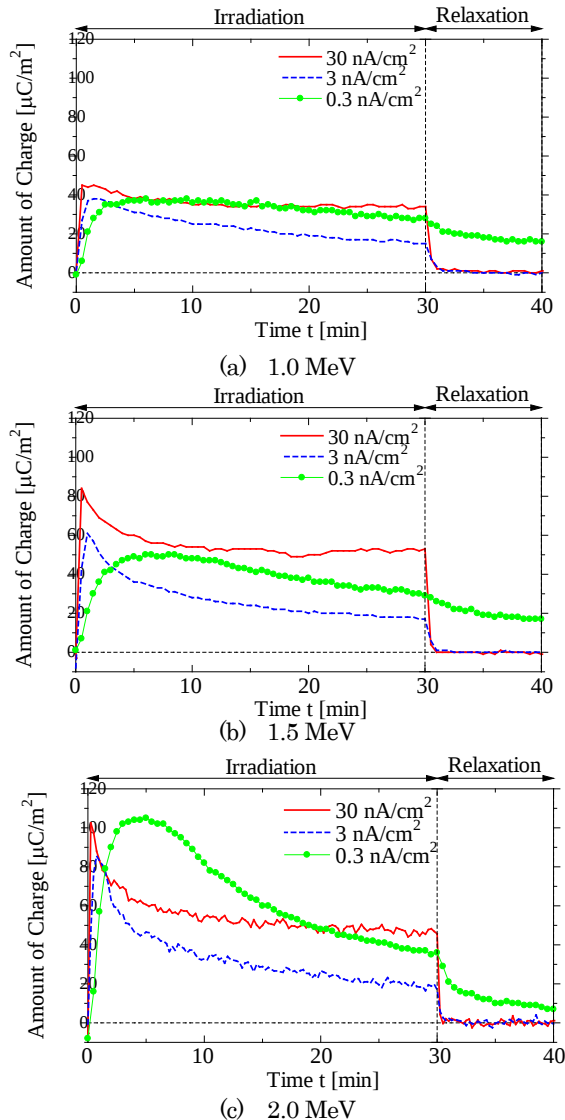


図4 蓄積総電荷量の経時変化

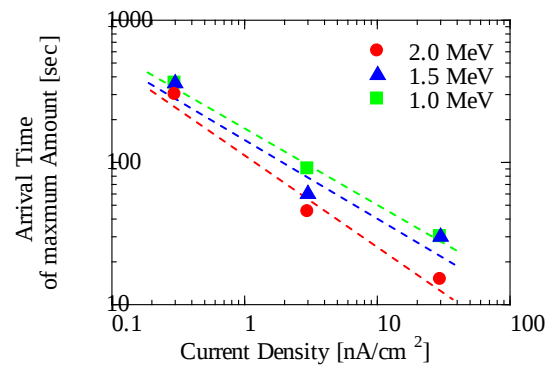


図5 飽和時間と電流密度の関係

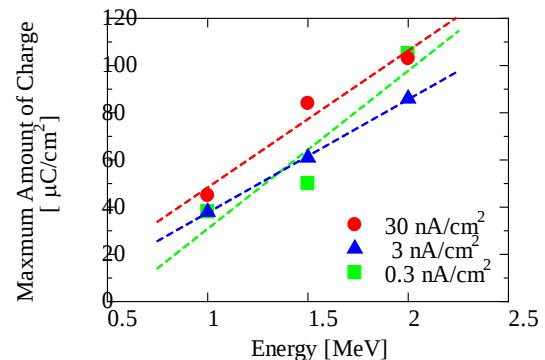


図6 最大蓄積量と加速エネルギーの関係

照射後1分以内にその全てが消滅し観測されなくなる。同図(b), (c)より、この1 MeV 照射時と同様の現象が、1.5, 2.0 MeV 照射時にも観測されることがわかる。また、0.3 nA/cm² 照射後の残留電荷量については加速エネルギーの増加と共に減少している。

以上より、蓄積電荷量の飽和時間と照射電流密度の関係を整理し、その結果を図5に示す。同図より全ての加速エネルギーにおいて蓄積電荷の飽和に達する時間は電流密度で一致することがわかる。

3.3 最大蓄積電荷量と加速エネルギー

それぞれの加速エネルギーにおける最大蓄積量に注目する。図6に最大蓄積量と加速エネルギーの関係を示す。同図より、蓄積量は加速エネルギーの増加とともに線形的な増加をしていることがわかる。これらより、正電荷蓄積量の最大値はプロトンのエネルギーに比例して増加することが確認された。

4. 結論

プロトン照射下において様々な照射エネルギー、照射電流でのPI内の電荷分布計測を行い、本研究によって開発された測定器がプロトン照射環境下でも帯電分布を計測可能であることを示した。さらに、PI内の帯電挙動に関しては、電荷蓄積挙動のエネルギーおよび電流依存性を明らかにした。その上で、他の試験結果と総合して検証すると、プロトン照射によってプロトン侵入領域の導電率が3桁程度上昇する結果と比較考察すると、プロトンの照射エネルギーによってPI内のプロトン侵入領域における分子間結合の切断やはじき出し損傷等による格子欠陥(空孔)生成度合いが異なり、高エネルギー・フラックスほどその割合は大きくなることが考えられる。

今後は実宇宙環境と同様に電子/プロトンの同時照射試験を実施し、荷電粒子による絶縁材料の帯電物性に関して検討していく予定である。

5. 引用(参照)文献等

- [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, "Space-Charge Detection and Behavior Analysis in Electron Irradiated Polymers", IEEE Trans. PS, Vol. 34, No. 5, pp.2185-2190, 2006
- [3] 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)
- [4] T. Takada, "Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distributions in Dielectrics", IEEE Trans. DEI, Vol. 6, No. 5, pp.519-547, 1999
- [5] Holmes-siedle, A., L. Adams, Handbook of Radiation Effects, Oxford University Press, pp.20, (1993)