課題番号　2013A　―　C09

宇宙機搭載用帯電計測器の開発

Development of charging measurement system for spacecraft

三宅　弘晃 [1)]　　堀口　晧平 [1)]　　田中　康寛 [1)]

Hiroaki MIYAKE　　Kouhei HORIGUCHI　　Yasuhiro TANAKA

[1)] 東京都市大学

（概要）
宇宙機の運用異常は帯電に起因したものが半数以上を占めている。軌道上で衛星の帯電計測を行うべく軌道上で使用できる宇宙機表面材料の小型の帯電計測装置を、パルス静電応力法を用いて開発した。開発した装置を用いてポリイミドを試料としてプロトン照射中における帯電計測を実施した。得られた測定結果の解釈の為，校正用データとしてプロトン照射後のポリイミドについて伝導電流計測し、得られた電荷挙動の解析を実施した。

キーワード：
宇宙機、宇宙環境、帯電計測、PEA 法、ポリイミド

（1 行あける）

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、ポリイミド（Polyimide : PI）フィルムを複数積層した Multi Layer Insulator（MLI）と呼ばれる熱制御材が使用されている。しかし、MLI は宇宙空間において、電子や陽子（プロトン）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、帯電・放電現象が発生し、絶縁材料の劣化や宇宙機内部の電子機器の故障・誤作動を引き起こすといわれている(1)。特に宇宙環境に起因する静止衛星の事故のうち、過半数以上が帯電・放電現象が原因であるという報告もなされていることから、宇宙機を設計する際には、MLI などに使用される絶縁材料等の帯電状況に影響を及ぼす。そのため、絶縁特性の評価が重要となってくる。しかし、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絶縁特性があまり考慮されていない。そのため、宇宙環境に起因する事故を防ぐためにも、高エネルギー荷電粒子が照射された高分子絶縁材料で生じる帯電挙動を解析することが重要となっている。

電子線照射によって生じる内部帯電計測に関する研究は、多くの実施報告がされているが、プロトン照射下における電荷蓄積に関する研究は、当研究グループを除き、実施されていない(2)(3)。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を実施している。本研究グループでは荷電粒子照射下における内部帯電計測を可能にするため、パルス静電応力（Pulsed Electro-acoustic : PEA）を用いた放射線照射環境で直接帯電計測が可能な小型 PEA 装置を開発し、宇宙機への搭載を目指している。今回は、プロトン照射環境下における PI 内部の電荷蓄積特性をプロトン照射環境中にリアルタイムで計測を実施し、PI 材料の帯電評価を実施した。その結果、PI における正電荷蓄積が飽和値に達すると、照射中にも関わらず蓄積電荷量が減少するといった傾向が得られたので報告を行う。

２．方法

2･1　パルス静電応力法(PEA 法)の原理

図 1 に 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、空間電荷が蓄積している位置で電荷密度に比例した静電応力が瞬間的に作用し、電荷が蓄積している箇所が微小変位する。これにより発生した圧力波が試料内、下部電極を伝搬し、センサー（圧電素子）に到達して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、電荷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、電荷が蓄積している位置が計測できる。また、発生圧力波の強度は、蓄積している電荷の密度に比例するため、圧電素子から出力される電気信号の大きさ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気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。

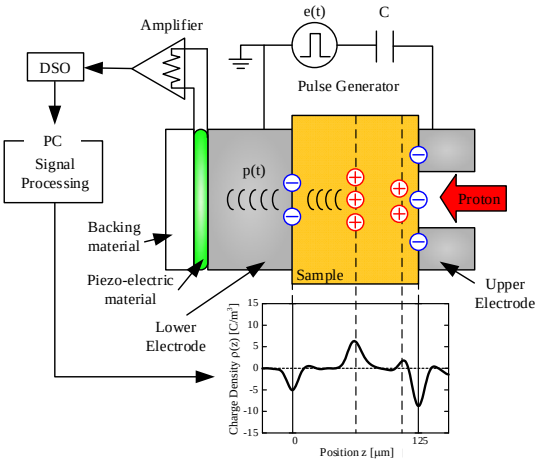


Fig.1 Principle of PEA method

2･2　PEA 測定システム

図 2 にプロトン照射下における PEA 測定システムの概略図を示す。本装置は荷電粒子を試料に照射するために、照射窓を設けており、放射線照射下での空間電荷分布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 と比較的小型であり、小さなサイズのチャンバーにも対応できるようになっている。測定では、試料にパルス電圧(電圧 250 V、パルス幅 3.4 ns)を印加し、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。測定システムは装置本体、パルスジェネレータ、AMP 用電源(V_{DC}= 12 V)、デジタルストレージオシロスコープ、PC から構成され、PEA 装置本体は真空チャンバー(ターゲットチャンバー)内に設置される。

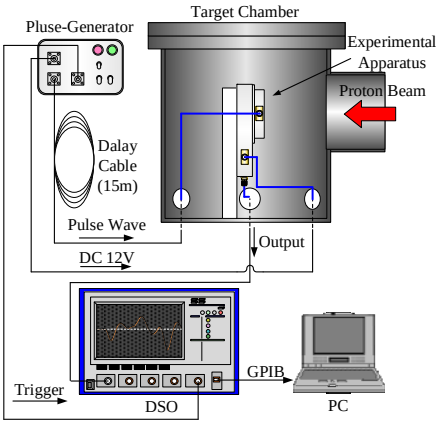


Fig.2 Schematic diagram of PEA measurement system

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 2 種類のポリイミドフィルム PI1、PI2 を用い、それぞれ PI1、PI2 とする。また、試料にはパルス電圧を印加するために、試料のプロトン照射面にはアルミニウム蒸着を施している。プロトン照射実験ではチャンバー内の真空度を約 1×10^{-5} Pa とし、室温下で、加速エネルギー1.0, 2.0 MeV、電流密度 0.3, 3, および 30 nA/cm^2 のプロトンを測定試料に照射

Table.1 Measurement condition

Sample	Energy [MeV]	Current Density [nA/cm^2]	Irradiation Time [min]
PI1 PI2	1	30	30
		3	
		0.3	
	2	30	
		3	
		0.3	

し、その際の照射中、および照射後の試料内の空間電荷分布をそれぞれ測定した。なお、電流密度 0.3 nA/cm^2 のプロトンは太陽活動極大期の粒子数に相当する。各測定における実験条件を表 1 に示す。また、プロトン照射実験には日本原子力研究開発機構の高崎量子応用研究所の 3MV タンデム加速器を用いて行った。

３．結果及び考察

3･1　PI1 におけるリアルタイム帯電計測

図 3, 4 に、PI1 の加速エネルギー1.0, 2.0 MeV の照射電流密度がそれぞれ(a)30, (b)3, (c)0.3 nA/cm^2 におけるプロトン照射中の試料内の空間電荷分布を示す。なお、図中赤線は照射開始 30 秒後を、青線は 30 分後を、また測定中に電荷の蓄積が最大となった場合を黒線でそれぞれ示している。また、プロトンは同図電荷分布図の右側から照射している。図 3, 4 の電荷分布の結果より、照射面から試料内約 19, 59 μm まで、正電荷の蓄積が確認された。また、照射電極上および対向電極上には、正電荷の蓄積により誘導された負電荷が観測された。

また、同照射条件における試料内のプロトン飛程(図中縦の破線)を数値計算により算出したところ、19, 59 μm であった[(5)]。同図より装置の位置分解能が 10 μm 程度であることを考慮すると、算出した飛程と実測値ではほぼ一致していると考えられる。すなわち、同図における正電荷蓄積は、プロトン照射により試料内に生じた電荷が観察されたものと考えられる。

次に、図 5 に照射中・照射後における試料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を積分することにより算出した。同図(a), (b)より、全ての結果において、蓄積電荷量は飽和し、その後減少していく傾向にあることが分かる。飽和に達した最大値について注目すると、1.0 MeV の各電流密度 30, 3, 0.3 nA/cm^2 照射時における最大値がそれぞれ 47 μC/m^2、41 μC/m^2、39 μC/m^2、2.0 MeV の各電流密度 30, 3, 0.3 nA/cm^2 照射時における最大値がそれぞれ 101 μC/m^2、85.1 μC/m^2、104 μC/m^2 であり、1MeV 照射時には約 40 μC/m^2、2MeV 照射時には 100 μC/m^2 と電流条件によらず一定値に達するという結果が得られた。また、同図より電荷蓄積量が最大値に達するまでに要した時間は照射電流密度の上昇により、早くなることもわかる。

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、蓄積電荷量は飽和した後に減少していく傾向が得られている。この現象はプロトンが通過した領域での材料の導電率の上昇が考えられる。放射線を照射した材料では導電率が上昇する放射線誘起伝導(RIC)が発生する。試料に接触している電極から電子が試料内部に注入され、注入された電子は RIC により試料正電荷蓄積位置までドリフトしていく事により、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。この RIC は発生の原因としては、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によって生じるものであると考えられる。

3･2　PI2 におけるリアルタイム帯電計測

図 6, 7 に、PI2 の加速エネルギー1.0, 2.0 MeV の照射電流密度がそれぞれ(a)30, (b)3, (c)0.3 nA/cm^2 におけるプロトン照射中の試料内の空間電荷分布を示す。なお、図中赤線は照射開始 30 秒後を、青線は 30 分後を、また測定中に電荷の蓄積が最大となった時の結果を黒線でそれぞれを示している。PI1 の結果と同様に、図中右側からプロトンを照射している。同図より、照射面から試料内約 19, 59 μm に正電荷の蓄積のピークが確認され、照射側電極上および対向電極上には、正電荷の蓄積により誘導され

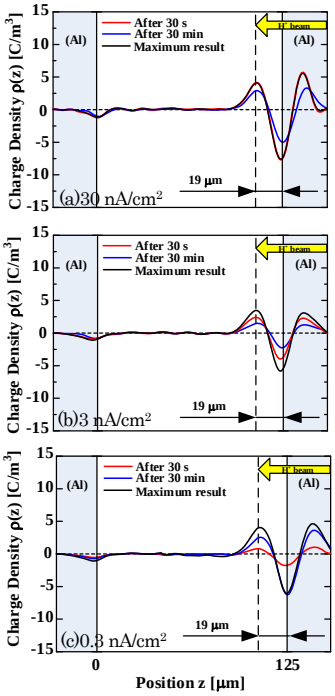


Fig.3 Charge distribution under proton beam irradiation in PI1, 1.0 MeV

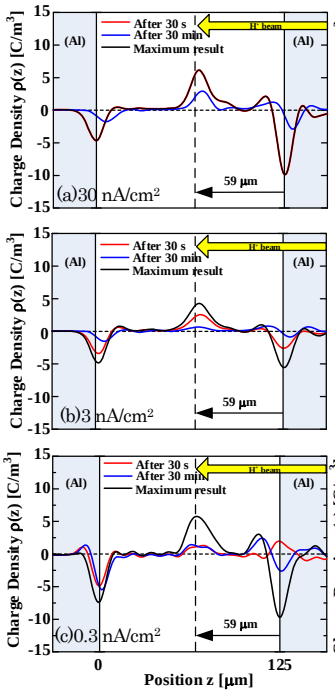


Fig.4 Charge distribution under proton beam irradiation in PI1, 2.0 MeV

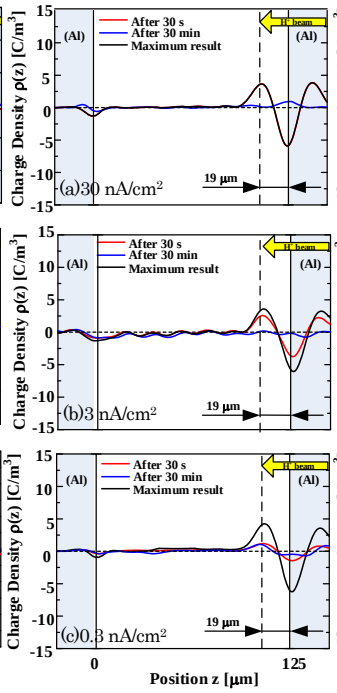


Fig.6 Charge distribution under proton beam irradiation in PI2, 1.0 MeV

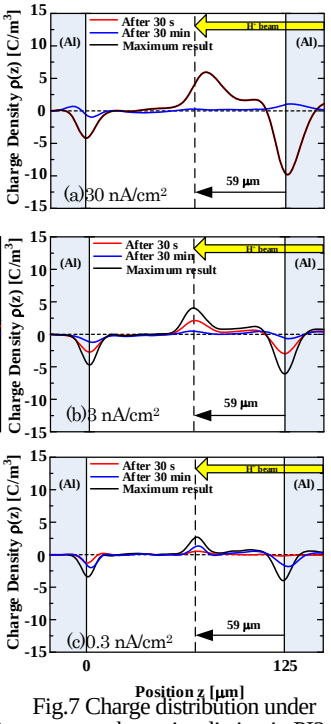
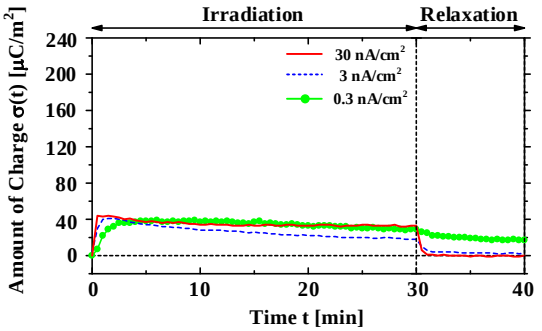
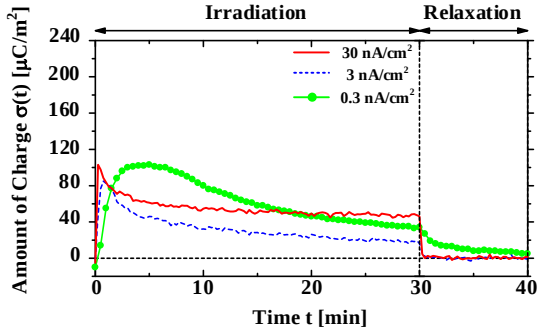


Fig.7 Charge distribution under proton beam irradiation in PI2, 2.0 MeV

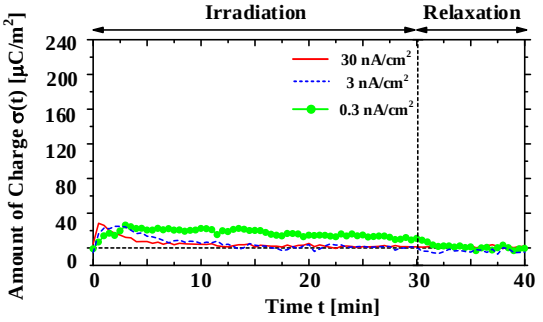


(a) 1.0 MeV

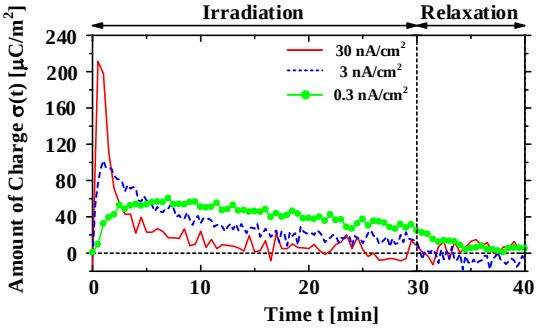


(b) 2.0 MeV

Fig.5 Time dependence on accumulated amount of charge on PI1



(a) 1.0 MeV



(b) 2.0 MeV

Fig.8 Time dependence on accumulated amount of charge on PI2

た負電荷が観測されている。同図(a)(b)(c)における正電荷蓄積は、PI1 同様にプロトン照射により試料内に蓄積した電荷が観察されたものと考えられる。次に図 8 に照射中・照射後における蓄積総電荷量の経時変化を示した。まず、最大蓄積量に注目し同図(a), (b)を比較すると、1.0 MeV の各電流密度 30, 3, 0.3 nA/cm^2 の最大量がそれぞれ 28.4 μC/m^2、25.0 μC/m^2、26.2 μC/m^2 となり、PI1 での結果と同様の傾向

が得られた。2.0 MeV の各電流密度 30, 3, 0.3 nA/cm^2 の最大量はそれぞれ 211 μC/m^2、102 μC/m^2、47.1 μC/m^2 となり、30 nA/cm^2 照射時では PI1 の結果と比較し約 2 倍の蓄積量となった。また、照射中の電荷蓄積量の挙動であるが、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は PI1 の結果と同様に見られるが、蓄積量の減少は顕著であり、特に 30 nA/cm^2 照射時では蓄積量が観察されないレベルまで減少した。

3･3　PA1 と PA2 における空間電荷蓄積総量の比較

図 5, 8(a)(b)の蓄積総電荷量より、最大蓄積量に着目すると、2.0 MeV の 30 nA/cm^2 において、最大蓄積量は PI1 より PI2 の方が 2 倍大きく、顕著な変化が観測された。また、照射 30 分後に着目すると、蓄積量において、PI1 はすべての条件で 10 μC/m^2 以上であったのに対して、PI2 では 30 nA/cm^2 においてほとんど観測されなくなるなど、PI1 と異なる結果が観測された。これらの原因として、RIC の強度が PI1 と PI2 では異なり、PI2 の方が RIC による導電率増加が大きく、30 nA/cm^2 照射中には電荷が捕獲されるエネルギー準位が浅くなり蓄積電荷、もしくは電極から注入されたと考えられる電子の移動度が高くなったことにより、本測定装置では計測できないくらいに導電率が上昇したものと考えられる。

3･4　まとめ

プロトンを照射することによって、PI1、PI2 において異なる電荷蓄積挙動が観測された。また、照射中において、PI1 では蓄積しやすく、PI2 では一時的に蓄積量は増大するが、蓄積しにくいことが観測された。これらの原因は、RIC による材料内部の導電率の上昇によるものだと考えられ、RIC の効果が PI1 より PI2 の方が強く現われていると考えられる。これらについては、今後さらに検討する。

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