

深宇宙探査技術実験衛星搭載を考慮した帯電計測装置の開発と ISS 軌道暴露試験のための地上検証試験

Development of charging measurement system for deep space explorer spacecraft and grand test for space environment exposure experiment on ISS

三宅 弘晃¹⁾

Hiroaki MIYAKE

堀口 皓平¹⁾

Kouhei HORIGUCHI

田中 康寛¹⁾

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電荷挙動の解析を実施した。また、これらのデータは ISS での軌道上暴露試験の解析用データとして使用される。

キーワード：宇宙機、宇宙環境、帯電計測、PEA 法、ポリイミド

1. 目的

人工衛星などの宇宙機は、温度変化の激しい宇宙環境において、機内の温度を一定に保つために、絶縁材料フィルムを積層したサーマルブランケット(MLI: Multilayer Insulator)と呼ばれる熱制御材料が使用されている。しかし、MLI は銀河宇宙線と称される星間空間を飛び交う高エネルギー荷電粒子や放射線帯、プラズマ環境下などに曝されることによって、帯電・放電現象が発生し、絶縁材料の劣化や宇宙機に搭載されている機器の誤作動・故障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。2003年には、低軌道で運用されていた地球観測衛星みどり2号が、帯放電により電力送電ラインが破損し、運用が不能になる事態も生じている。そのため、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特性など、電気絶縁特性の評価が重要な要因となってくる。しかしながら、設計標準における評価は宇宙機の表面電位が主体であり、内部帯電については評価することが求められているにも関わらず、その方法は具体的な記述がない現状である。したがって、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表面材料で生じる帯電挙動を解析することが重要である。

これまで、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、本研究グループを除き、実施されていない[2, 3]。みどり2号の事故があった低軌道はプロトンが支配的な領域にあたり、プロトン照射による表面材料の電気絶縁特性も電子同様に懸念される問題となる。そして、今後の宇宙機開発は、低軌道の地球観測やGPS衛星等が多く運用されていく傾向にある。したがって、プロトン照射における表面材料の電気絶縁特性に関する研究は、宇宙機の長寿命化、および今後の宇宙機開発に大いに役立つと考えられる。さらに今後実施される予定である国際宇宙ステーションを利用した軌道上暴露試験において、比較検証するための校正データとしても使用可能となる。

本研究では、MLIとして実際に用いられる2種類のポリイミド(PI)系高分子絶縁材料に着目し、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により、プロトン照射中における両試料の内部帯電計測結果と紫外・可視分光法(Ultraviolet・Visible Absorption Spectroscopy: UV-VIS)による材料分析手法、及び分子軌道法によるエネルギーバンド構造解析を用いて、プロトン照射PI試料の電荷蓄積特性および回復特性のメカニズム解析を行ったので以下に報告する。

2. 方法

2.1 パルス静電応力 (PEA) 法の原理

Fig. 1 に PEA 法の原理図を示す。電極で挟んだ試料にナノ秒オーダーの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。圧力波は試料、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。圧力波は試料内の電荷が蓄積するそれぞれの位置から圧電素子に到達するまでに生じた時間差として試料内の空間電荷の蓄積位置と対応し、発生圧力波の振幅は電荷量に比例するため、電荷分布と量を観測する事ができる。圧電素子から出力された電圧信号は装置固有のシステム関数を含有しており、歪んだ形で計測される為、信号処理、校正処理により電荷分布へと変換することができる。

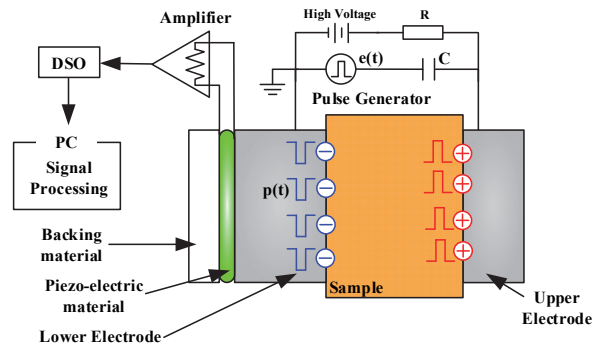


Fig. 1 Schematic diagram of the pulsed electro-acoustic (PEA) method

3. プロトン照射ポリイミドフィルムの内部帯電計測結果及び考察

3.1 試料および実験条件

Table 1 に測定に使用した試料の分子構造と試料厚さを示す。試料の照射面側にアルミニウム蒸着を施している。プロトンは加速エネルギー1.0 MeV、電流密度を 0.3 - 30 nA/cm² で、照射時のチャンバー内圧力は 1.0×10⁻⁵ Pa である。なお、電流密度は最悪条件を考慮し、ISS の軌道で想定されるフラックスに関わらず、NASA の放射線環境モデルが与える最大値の 1,000 倍程度を選択し、加速試験として実施した[4,5]。照射中・後の空間電荷分布を PEA 法にて測定した。また、測定された電荷分布波形の正電荷蓄積部を積分することにより試料内部に蓄積している電荷量を算出した。測定時間は照射中 30 分、照射後 10 分の計 40 分間行い、測定を 30 秒間隔で行った。なお、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た。

Table 1 Samples

Sampl	Molecular	Thickness [μm]
PI1		125,
PI2		125,

3.2 プロトン照射中の大部帯電計測結果

Fig. 2, 3 に PI1, PI2 のプロトン照射中における試料内空間電荷分布波形を示す。同図(a)-(c)には 30, 3, 0.3 nA/cm² 照射時の結果を示す。なお、試料の照射面側にアルミニウム蒸着を施している。プロトンは、Fig. 2 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。また、図中縦軸の破線はプロトン飛程の計算値を示している。 [5]

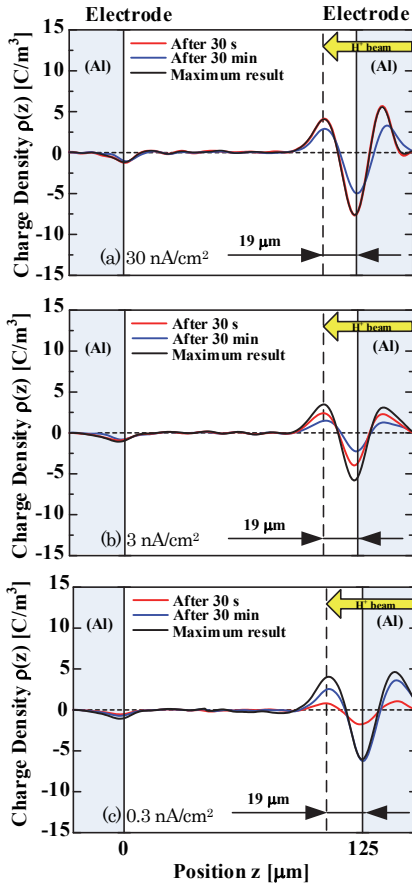


Fig. 2 Space Charge distribution in PI1 irradiated by a proton with the energy of 1.0 MeV

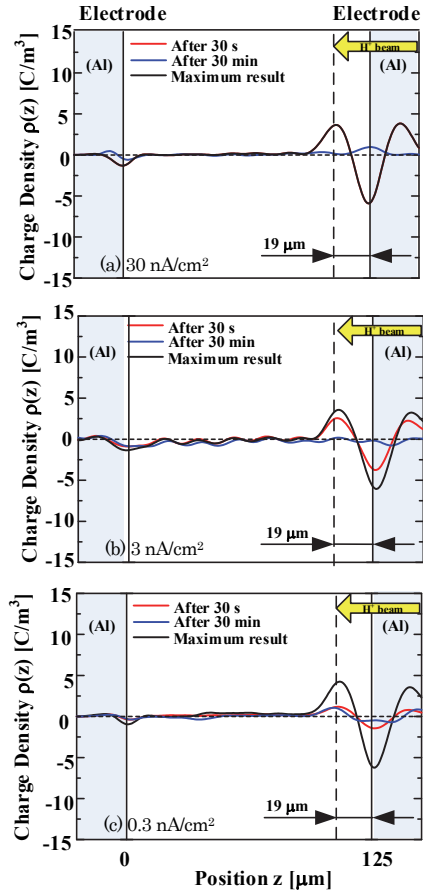


Fig. 3 Space Charge distribution in PI2 irradiated by a proton with the energy of 1.0 MeV

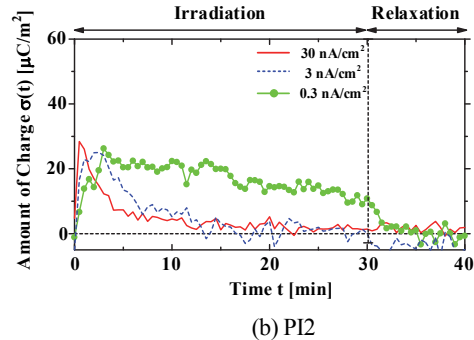
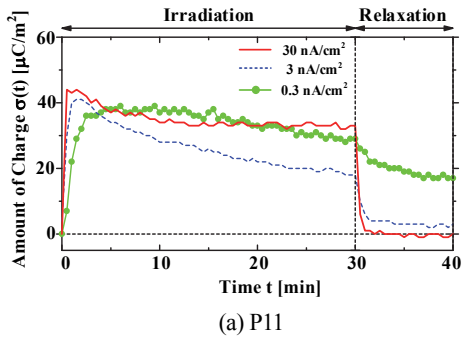


Fig. 4 Time dependence of accumulated total amount of charge each sample

3.2.1 プロトン飛程と正電荷蓄積

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た。各試料における正電荷の分布に着目すると、同図より、PI1の場合、照射面から約19 μmに正電荷蓄積のピークが確認され、数値計算により算出した計算飛程と同様の位置に観測された。また、PI2の場合もPI1同様に、照射面から約19 μmに正電荷蓄積のピークが確認され、数値計算により算出した計算飛程と同様の位置に観測された。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。

3.2.2 蓄積正電荷の経時変化

Fig. 4(a)(b)にPI1, PI2のプロトン照射中における各電流密度の蓄積正電荷量の経時変化を示す。同図より、各電流密度での蓄積挙動をみると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

ならず蓄積量は減少が観測された。ここで PI1 の場合、照射開始 20 分後には電流密度 30, 3, 0.3 nA/cm² ではそれぞれ約 30, 20, 30 μC/m² の一定値を取り、蓄積量の変化は観測されなくなった。また、照射後の蓄積挙動に着目すると、0.3 nA/cm² を除いた条件において 1 分後以降には電荷の蓄積が観測されなかった。一方、PI2 の場合、0.3 nA/cm² では約 10 μC/m² の一定値を取り、蓄積量の変化は観測されなくなった。3, 30 nA/cm² では照射開始 20 分後には正電荷の蓄積は観測されなくなった。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, 3 nA/cm² 照射時では蓄積量が観測されないレベルまで減少した。

この現象の原因の一つとして考えられるのは、放射線誘起伝導度 (RIC : Radiation Induced Conductivity) 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、特に 30 nA/cm² 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が試料外へ放出される、もしくは電極から注入された電子の移動度が高く中和されてしまったことによるものと考えられる。

3.3 UV-VIS と分子軌道法によるエネルギーギャップの比較

プロトン照射された PI1, PI2 の電荷蓄積挙動に異なる結果が観測された。その違いは分子構造の差で生じるプロトン照射により生成された電子・正孔対の量の差に起因していると考えられる。また、照射後は両試料とも着色し、時間経過とともに退色しているが、退色速度に PI1 及び PI2 で差が確認できる。一般的に着色はカラーセンターと呼ばれ、分子構造が変化し、光の吸収が起こる新たな準位が形成される事でエネルギーバンドギャップが変歪し生じるといわれている。そこで、本章では、UV-VIS による各試料における光吸収スペクトルを計測結果からエネルギーバンドギャップを算出し、その実験値と分子軌道法によるエネルギーバンドギャップの数値計算の算出値とを比較し、その差異を確認した。そして、分子軌道法によるエネルギーバンド構造解析を行うことで、未照射試料の回復特性の違いを検討した。

3.3.1 UV-VIS によるプロトン照射材料のエネルギーギャップの算出

測定試料には、試料厚 50 μm の PI1, PI2 のプロトン照射試料を用いて吸収スペクトルの測定を行った。プロトン照射後、大気圧下にて 1 日経過した試料の吸収スペクトルを観測した。Fig. 5 に PI1, PI2 の未照射、およびプロトン照射試料の吸収スペクトルの測定結果を示す。同図中の丸印、十字印は未照射、照射試料の測定結果を示す。なお、同図中の直線は各測定結果におけるガウス分布によるフィッティング曲線、点線はフィッティング曲線の傾きが急峻になる点を通る接線を引いた。本測定結果より、基礎吸収端の波長から各試料のエネルギーバンドギャップを算出可能であり、その結果を Table 2 に示す。

Fig. 5(a)より PI1 では、プロトン照射によって吸収スペクトルのシフトが観測されていることがわかる。また Table 2 より、プロトン照射から 1 日経過後の試料のエネルギーギャップは未照射試料と比較すると、プロトン照射によってエネルギーバンドギャップが 2.58 eV から 2.47 eV に小さくなっている。一方、同図 (b)より PI2 では、プロトン照射による吸収スペクトルの顕著なシフトは観測されなかった。そのため Table 2 に示す未照射・照射試料のエネルギーバンドギャップもそれぞれ 2.44, 2.41 と明確な差として確認することは出来ない。

以上より、PI1 に関してはプロトン照射によってエネルギーバンドギャップの減少が観測された。一方、PI2 では、プロトン照射によるエネルギーバンドギャップの変化は観測されず、照射 1 日後の他の測定同様に顕著な変化が観測されなくなっていることから、PI1 と比較して、電気絶縁特性の回復が早いと考えられる。

3.3.2 分子軌道法によるエネルギーバンドギャップの算出

分子軌道法によるエネルギーバンドギャップの算出には Gaussian03 を使い、ハミルトニアンには DFT の一種である B3LYP を、基底関数には 6-31g を用いて計算を実施した。Table 3 に、算出した PI1 と PI2 のエネルギーバンドギャップおよび電子・正孔対の発生確率、電子・正孔対のトラップ深さとホッピング確率を示す。PI1 と PI2 のエネルギーギャップの実験値と数値計算による算出値を比較すると、PI1 の数値計算による算出値の方が大きいですが、両結果ともに PI2 の方が PI1 より小さいことがわかった。

Table 3 より PI1, PI2 の電子・正孔対の発生確率はそれぞれ 1.80×10^{-28} 、 1.35×10^{-21} となり、PI2 の方が 7 桁大きい値となった。照射下の PI2 ではこの電子・正孔対発生確率が PI1 よりも高いために電子・正孔対が多く生成され、その結果、RIC による導電率増加が PI1 よりも高くなると考えられる。また、同表より PI1, PI2 の電子・正孔のトラップ深さおよびホッピング確率について着目する。電子と正孔のトラップ深さは隣り合う分子間をそれらが移動するために乗り越える必要のある障壁である。両試料で正孔のホッピング確

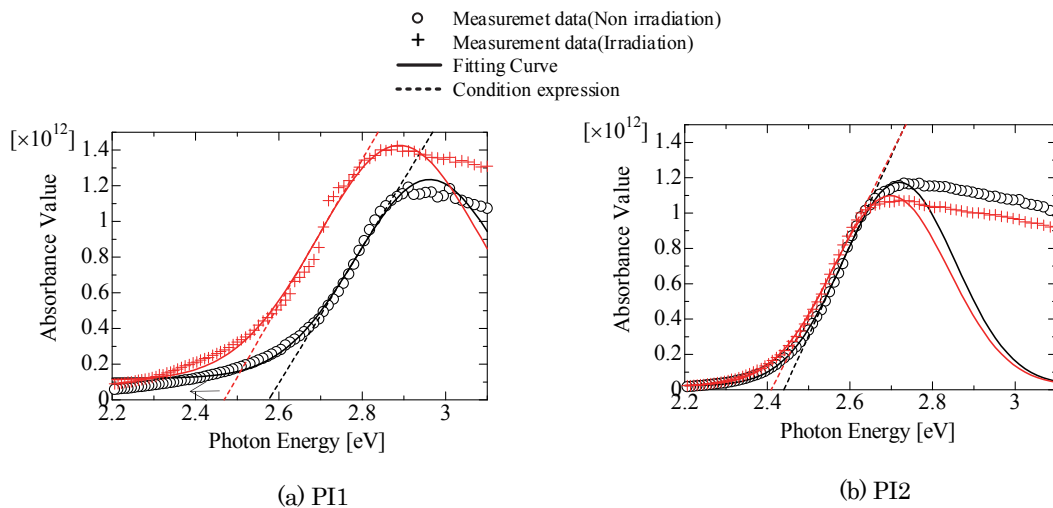


Fig.5 Results of the ultraviolet-visible

Table 2 Results of the ultraviolet-visible absorption

Sample	Band gap of non-irradiated sample [eV]	Band gap of irradiated sample (after 1 day irradiation) [eV]
PI1	2.58	2.47
PI2	2.44	2.41

Table 3 Band gap and trap depth and hopping probability of hole and electron

	Energy gap ϕ_g [eV]	Carrier Generation Probability	Trap depth[eV]		Hopping Probability
			hole	electron	
PI1	3.31	1.80×10^{-28}	hole	0.74	3.93×10^{-13}
			electron	1.09	5.34×10^{-19}
PI2	2.49	1.35×10^{-21}	hole	0.73	5.79×10^{-13}
			electron	1.47	2.28×10^{-25}

率は同程度あるが、電子のホッピング確率はPI2の方がPI1よりも小さい。電子・正孔が移動しやすい場合は再結合しにくい、どちらか一方が動きやすくもう一方が動きにくい場合は再結合しやすいと考えられる。そのためPI2の方がPI1よりも電子・正孔対が再結合しやすいと考えられる。

4. 引用(参照)文献等

[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] T. Takada, H. Miyake, and Y. 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] A. C. Tribble, : "The Space Environment", Princeton University Press, pp.145-152, Chapter 5 (1995)

[5] 宇宙環境計測情報システムSEES, <http://sees.tksc.jaxa.jp>

[6] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1985