

# 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<sup>1)</sup>

Hiroaki MIYAKE

森 琢磨<sup>1)</sup>

Takuma MORI

田中 康寛<sup>1)</sup>

Yasuhiro TANAKA

<sup>1)</sup> 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、パルス静電応力法(Pulsed Electro-acoustic Method: 以下 PEA 法)を用いた小型の内部帯電(空間電荷)計測装置を新たに開発し、プロトン照射中の帯電計測を可能にすることを目的とし実施した。また、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、内部帯電計測装置により、プロトン照射試料に対し、空間電荷・伝導電流の同時測定を行い、材料内部における導電率分布の算出・評価を行った。以下、2章に開発した空間電荷測定装置について、3章にプロトン照射PIの空間電荷・伝導電流の同時測定による導電率分布の算出・評価について報告する。

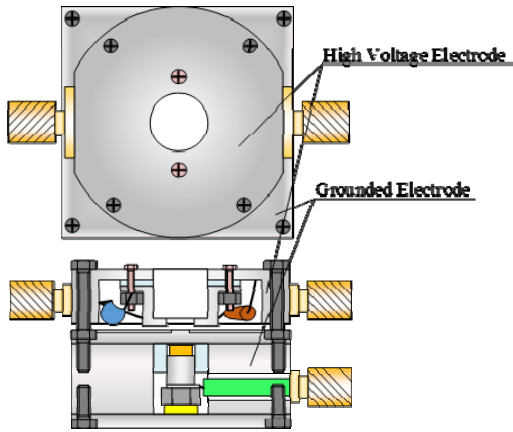


Fig. 1 New small PEA measuring device

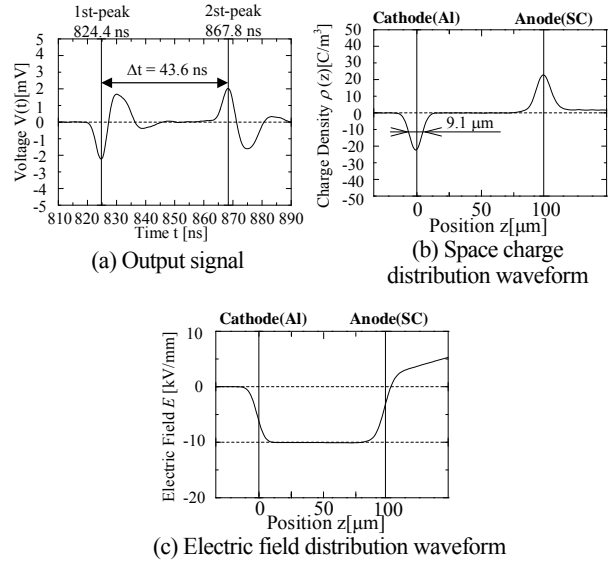


Fig. 2 Measurement result in PET under 1 kV

## 2. 小型内部体験計測装置の開発

本研究では、PEA法を用いた小型の帯電計測装置を開発した。図1にPEA装置の概略図を示す。本装置は荷電粒子を試料に照射するために照射窓(直径5mm)を設けており、それによって荷電粒子照射下での空間電荷分布計測を可能としている。また、プロトン照射実験には外部の照射施設を用いる。そのため、装置の小型化が必要となる。本装置のサイズは縦40mm、横40mm、高さ33.5mmまで小型化し、比較的小さなチャンバーにも対応できる。また、接地電極の厚みは5mmとすることで、圧力波の減衰を防いでいる。圧力波を電気信号に変換するための圧電素子は厚さ9μm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約10μmを得ている。100μm程度の試料は位置分解能約10%で測定が可能である。

開発した小型PEA装置の動作確認を行った。測定試料にPET 105μmを使用し、DC1kV印加時の電圧信号および空間電荷分布、電界分布をFig. 2-(a), (b), (c)にそれぞれ示す。同図(a)より、1st-peakと2st-peakの幅Δtは43.6nsであり、PETの音速2407m/sから、観測された出力信号の試料厚は104.9μmと算出でき、概ね一致している。また同図(b)の電界分布より、印加電界である10kV/mmが得られており、測定が正しく実施できたと言える。

次に放射線照射中の測定の可否を判断するため、当研究室所有の電子線照射装置を用いて40keV、5nA/cm²、30分電子線照射中のFEP内の空間電荷分布測定を行った。その結果にFig. 3に示す。同図より、試料内照射面近傍に負電荷の蓄積が確認でき、照射中4分までに最大値を取り、その後照射中にも関わらず減少して行く傾向が得られ、これらは当研究グループの既報と同様の結果であると確認できた。

この結果を用いて、プロトン照射中の帯電計測に挑んだが、残念ながらパルス電圧発生器の不調により測定は行えなかったため、次年度の照射にて確認を実施する。

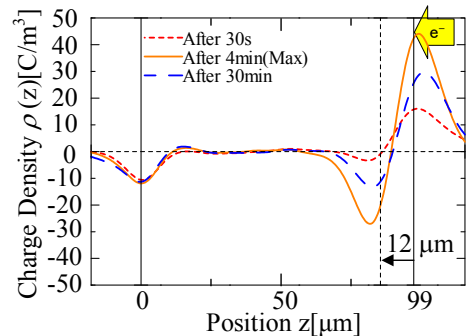


Fig. 3 Space charge distribution in PI during e-beam irradiation

## 3. 空間電荷分布・外部回路電流の同時測定による材料内導電率分布解析

### 3-1. 測定装置・測定法

Fig. 4に空間電荷分布・外部回路電流の同時測定システムの概略図を示す。試料の下部側に設置された計測用電極(Al製、φ25mm)はPTFEにより絶縁されており、試料表面からの漏れ電流の影響を抑制し、パルク内を伝導した電流のみを外部回路電流として計測可能である。計測用電極底部には石英ガラスが設置しており、圧力波はガラスを伝搬して圧電素子に到達する。電流測定を行う場合と空間電荷分布を測定する場合

を同軸スイッチによって切り替えることで両測定を同一試料で行うことが出来る。なお、測定時、高電圧電極側には半導電層を用いている。この装置を用いて、空間電荷分布・外部回路電流を計測し電界分布・導電率分布を求めることが出来る。装置詳細や導電率分布の算出方法とは既報を参照されたい。[4]

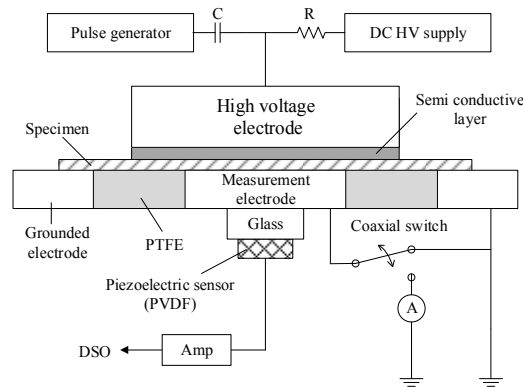


Fig. 4 PEA & external circuit current simultaneous measurement system

### 3-2. 照射・測定条件

測定試料として、公称試料厚さ  $125\ \mu\text{m}$  のポリイミドフィルムを用いた。プロトンは加速エネルギー  $2.0\ \text{MeV}$ 、照射電流密度  $30\ \text{nA}/\text{cm}^2$  で  $30$  分間照射した。[5] プロトン照射は真空度  $10^{-5}\ \text{Pa}$  オーダーの真空環境下で実施した。その後、大気圧下において約  $1$  日および  $3$  日経過後に直流電界  $100\ \text{kV}/\text{mm}$  に相当する電圧を印加した際の空間電荷・外部回路電流の同時測定を行った。課電する際、照射面を高電圧電極側に接した。測定時間は  $120$  分間、測定間隔を  $5$  秒間(空間電荷分布: $0.5$  秒、外部回路電流: $4.5$  秒)である。また、プロトン照射には日本原子力研究開発機構の高崎量子応力研究所の  $3\ \text{MV}$  タンデム加速器を用いた。

### 3-3. PI の測定結果

Fig. 5 に PI に印加電界  $100\ \text{kV}/\text{mm}$  に相当する電圧を印加した際の測定結果を示す。左から(A)未照射試料、(B)プロトン照射後約  $1$  日経過した試料、(C)約  $3$  日経過した試料の(a)外部回路電流密度、(b)電荷密度、(c)電界分布、(d)導電率分布の経時変化を示す。同図(A)-(a)より、未照射試料において、伝導電流は電圧印加直後に最大値に上昇しその後印加時間の経過にともない約  $14\ \text{nA}/\text{m}^2$  まで減衰することが観測された。同図(A)-(b)より、電圧印加中による顕著な空間電荷蓄積は観測されなかった。また同様に同図(c)より、バルク内の電界分布も顕著な変化は観測されなかった。同図(d)より、PI 2 の未照射試料でも試料内部の導電率に大きな変化は観測されなかった。

同図(B)に示したプロトン照射試料の測定結果より、同図(B)-(a)の外部回路電流密度は電圧印加後、電流密度が  $2.3 \times 10^4\ \text{nA}/\text{m}^2$  まで減衰後、印加時間の経過にともなって電流密度が  $1.0 \times 10^5\ \text{nA}/\text{m}^2$  まで上昇し、絶縁破壊に至った。この時の外部回路電流密度は未照射試料に比べて  $10^3$  倍程度増加している。同図(B)-(b)より、電圧印加直後からプロトンの最大飛程近傍に正電荷、陽極近傍に負電荷の蓄積が観測されている。同図(B)-(c)より、前述の空間電荷蓄積にともなって、試料内部の電界も強調されており、最大で約  $150\ \text{kV}/\text{mm}$  まで達している事が分かる。また時間経過により、試料内部の空間電荷挙動に大きな変化は観測されないが、電圧印加約  $54$  分後に絶縁破壊が生じた。同図(B)-(d)より、プロトン照射試料では飛程近傍の試料内部(照射面から約  $40\ \mu\text{m}$  の位置)で印加時間の経過と共に導電率の上昇が確認でき、 $10 \times 10^{-12}\ \text{S}/\text{m}$  へと局所的に増加していることが確認でき、他の領域の約  $10$  倍導電率が上昇していることが観測された。

同図(C)の照射  $3$  日後の結果より、伝導電流は同図(C)-(a)より未照射試料と同等の値まで減衰し手いるのを確認することが出来る。しかし、同図(C)-(b)より(B)照射  $1$  日後での測定結果と同様にプロトンの最大飛程近傍に正電荷、陽極近傍に負電荷の蓄積を観測した。またこの電荷蓄積にともなって同図(C)-(c)に示すように電界分布約  $150\ \text{kV}/\text{mm}$  と強調されていることが観測されたが、導電率分布は照射前と同程度になっていることが確認できる。

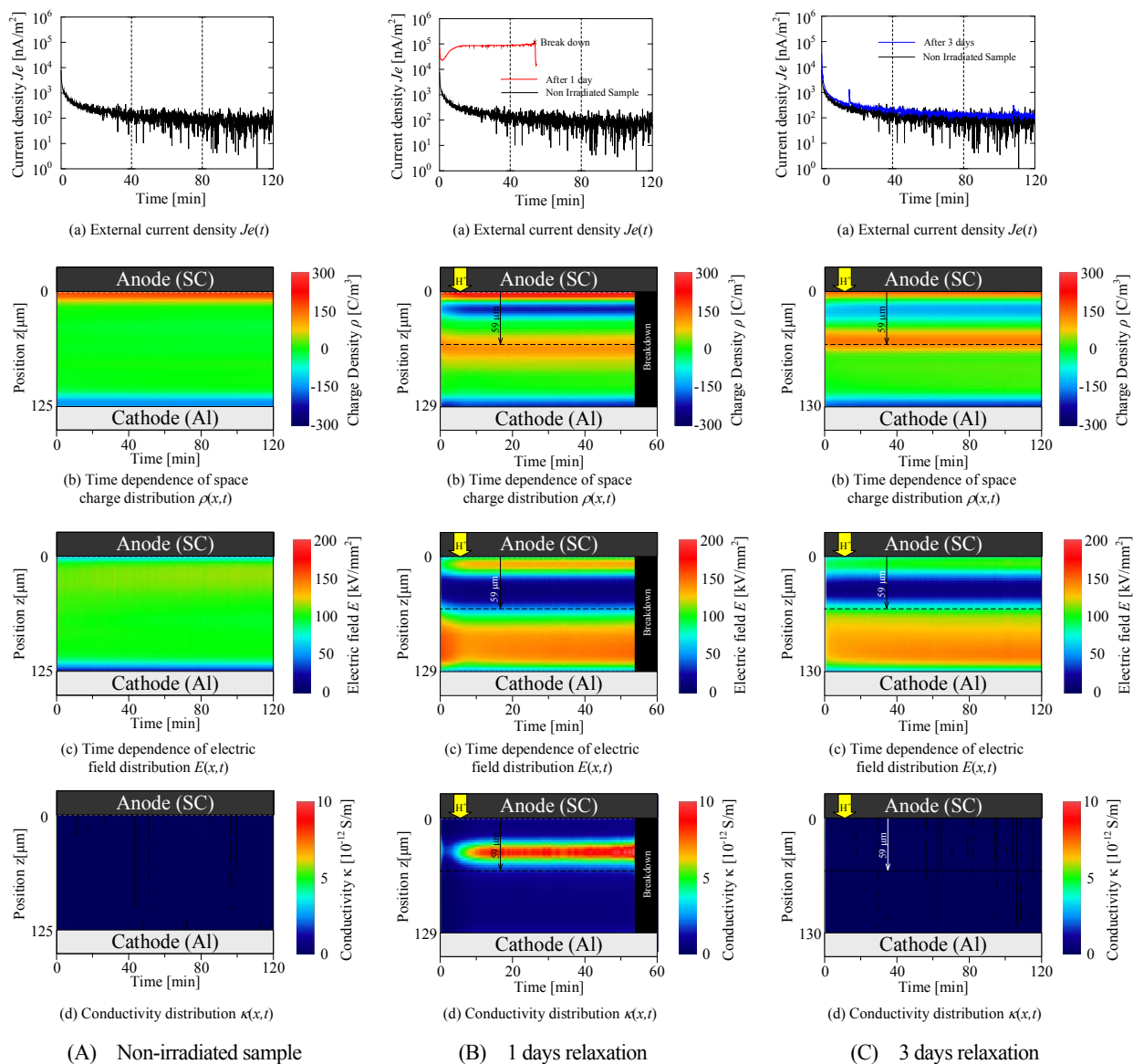


Fig. 5 Measurement results of non-irradiated and irradiated PI 2 under DC stress

### 3-4. 考察

前節までに示した結果については、プロトン照射により放射線有機伝導(Radiation Induced Conductivity : RIC)が生じたため、プロトン通過領域の導電率が上昇したと考えられる。RICが生じる主要因として、試料の放射化、分子鎖の切断による空孔やPI材料内の電離の発生、照射粒子の線エネルギー付与が挙げられる。今回の測定結果では、各図(b)から電圧印加によって照射試料内部に正・負電荷の蓄積が観測された。これは高エネルギーのプロトンが分子鎖を切断することで、正・負の電子正孔対(キャリア)が発生し、高電圧印加によって分極されたためだと考えられる。電子正孔対そのものは形成されるが再結合が素早く行われたためと考えられるため、プロトン照射試料の分子構造解析を行うことや分子軌道法によるエネルギー準位の算出を行うことにより、材料分析や数値計算の観点からも解析をしていく必要があると考えられる。

また照射後の経時変化による空間電荷・電流密度変化を考える。Fig. 5(B)(C)の測定結果から、経過時間の増加にともなって電流密度および空間電荷蓄積量の減衰が観測された。この現象は遅延放射線誘起伝導度(Delayed Radiation Induced Conductivity : DRIC)によって引き起こされたと考えられ、PIではRICの二次的効果であるDRICの作用により、照射1日後では導電率が顕著に上昇し、その後DRICも減少したため、Fig. 5(C)に示すような減衰傾向が示されたものと考えられる。(6)しかし、この効果は照射後の経過時間によって減少することが報告されている。(7) DRICの減少も、試料内部に発生した電子正孔対が経過時間にもなって再結合し、分極電荷が発生しにくくなった為であると考えられる。

次にプロトン照射試料の導電率上昇に関して、プロトンと材料の相互作用によって生じる線エネルギー付与について検討を行った。Fig. 6に照射1日後のPIの(a)導電率分布波形と(b)電離による線エネルギー付与を示す。同図(a)の縦軸は導電率[S/m]、同図(b)はエネルギー損失E[keV/μm]を示し、横軸は試料厚z[μm]である。なお、線エネルギー付与はTRIMを用いて解析を行った。図(a)より、照射面からプロトンの最大飛程の直前に導電率の最大値を取り、時間経過ともなって試料全体の導電率上昇が得られた。同図(b)より、加速エネルギー2.0 MeVでプロトンを照射した際、陽子の最大飛程は59 μmであり、試料内部にとどまっていることが分かる。また電離によるエネルギー損失はプロトン照射領域で発生していることが分かり、プロトンの最大飛程直前で最大値となっていることが分かる。このことから、照射プロトンが多くエネルギーを損失している位置でキャリアを発生し易く、部分的な導電率上昇の起因になっていると考えられる。そのため、今後照射プロトンの加速エネルギーを変化させた際の空間電荷・外部回路電流の同時測定を行うことにより、線エネルギー付与と導電率の関係を評価する必要があると考えられる。

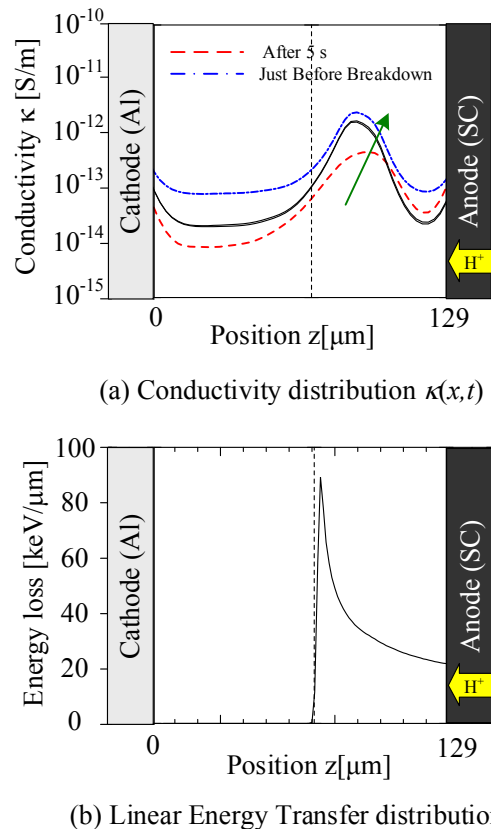


Fig. 6 Linear Energy Transfer distribution generated in the PI

#### 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) 宇宙開発委員会調査部会 : “環境観測技術衛星(ADEOS - II)「みどり II」の運用異常に係る原因究明及び今後の対策について”, 宇宙開発委員会報告書, 2004
- (3) Yang, GM : “Radiation-induced conductivity in electron-beam irradiated insulating polymer films”, Electrical Insulation, IEEE Transactions, Vol. 27, Issue 4, pp.843-848, 1992.
- (4) T. Mori, H. Miyake and Y. Tanaka: “Simultaneous Measurement of Space Charge Distribution and External Current in Low Density Polyethylene”, IEEJ Trans. FM, Vol. 133, No. 3, pp. 105-110 (2013)
- (5) 三宅, 堀口, 田中, “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”, 平成 26 年度施設供用報告書, 2014A-C06 (2015)
- (6) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark: “The Stopping and Range of Ions in Matter”, Pergamon Press, New York, 1985
- (7) Nelson Wesley Green and J. R. Dennison: “Deep Dielectric Charging of Spacecraft Polymers by Energetic Protons”, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 36, no. 5, pp. 2482-2490, Oct 2008