

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：32678
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760292
 研究課題名（和文） 超高感度半導体帯電計測センサ開発及び陽子線照射衛星材料の帯電解析
 研究課題名（英文） Development of charging sensor using semiconductor with ultra-high resolution and charging analysis of spacecraft materials irradiated by proton
 研究代表者
 三宅 弘晃（MIYAKE HIROAKI）
 東京都市大学・工学部・准教授
 研究者番号：60421864

研究成果の概要（和文）：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帯電計測装置を、パルス静電応力(PEA)法を用いて開発する事が最終目的である。本研究ではまず、放射線耐性が高い、半導体素子を用いて、センサ部の試作を実施し、出力信号を得ることに成功した。また、既存の高分子製のセンサを用いた PEA 法の小型帯電計測装置を開発し、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。得られた電荷挙動の解析を実施した。

研究成果の概要（英文）：The spacecraft is always exposed to plasma and/or radioactive-rays such as α , β and γ -rays. When the insulating materials, in which the spacecraft is wrapped to keep temperature in it stable, are irradiated by the radioactive-rays, sometimes an unexpected accident due to an electrostatic discharge occurs. However, it has not known how the irradiation affects to change of the electrical properties of the materials. Therefore, as the satellite development needs the charging information and charging phenomena of surface materials of satellite on the orbit, we have developed the charging measurement system of it on the orbit with high radioactive-rays resistivity. In this paper, we started to develop new semiconductor sensor for charging measurement sensor using Pulsed electroacoustic (PEA) method. Furthermore, we also focused on an internal charging phenomenon on irradiated polyimide for spacecraft using small PEA system for irradiation using present polymer piezo sensor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：宇宙機、宇宙環境、プロトン、帯電、PEA 法、半導体、ポリイミド

1. 研究開始当初の背景

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開発す

ることが求められている。さらに軌道上で実証の後に、帯電計測データと宇宙環境情報とを合わせて考察することで、宇宙環境情報から衛星の帯電量を把握し、設計に反映させることが求められている。

2. 研究の目的

人工衛星などの宇宙機は、温度変化の激しい宇宙環境に対して、熱制御系の役割として絶縁材料フィルムを積層した 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 は高エネルギー荷電粒子や放射線環境下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[1]。特に宇宙環境に起因する衛星障害のうち、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 などの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標準の中では低エネルギーによる表面帯電のみが考慮されており、高エネルギー荷電粒子、特にプロトン(陽子線)が照射された絶縁材料の絶縁特性はほとんど考慮されていない。

これまで本研究グループをはじめとする国内外の研究機関において、電子線照射による高分子材料の絶縁特性評価に関する研究が行われているが、プロトン照射による MLI 等の衛星材料の電気絶縁特性に関する研究はほとんど行われていない。これは従来の静止軌道環境における衛星軌道が静止軌道中心であり、電子線が支配的な領域であるためである。しかし、今後の宇宙機開発は、低中軌道の地球観測や GPS 衛星等が多く運用されていく傾向にある。これらの軌道はヴァン・アレン帯の内帯でプロトンが支配的な領域にあたり、衛星材料のプロトン照射による絶縁劣化特性も電子同様に懸念される問題となる。筆者では、宇宙で使用可能な帯電計測器を、パルス静電応力法 (Pulsed Electro-acoustic Method: PEA 法)[2] を用いて開発をしている。しかしながら、軌道上で使用できる仕様にするためには、現状の PEA 法のセンサーでは高分子製の圧電素子を使用しており、耐放射線・温度性能を十分に有しているとは言い難く、最悪圧電性の消失による計測不能状態に陥る可能性がある。

そこで研究代表者らは、軌道上で使用できる PEA 法を利用した帯電計測器の開発をめざし、半導体を使用した新しい高感度で広帯域の PEA 法の帯電計測への適応が可能な圧力波センサーの開発を開始した。また、現状の PEA 法を利用した帯電計測機システムでも地上試験は可能なので、MLI として使用されている 2 種類のポリイミド絶縁材料をとりあげ、PEA 法により、現状で測定例を世界

中でないプロトン照射中における試料の空間電荷蓄積測定及び、プロトン照射材料の電気絶縁特性の検証を行った。これらは今後実軌道上での試験が可能となった際の計測結果の解釈のための校正データに用いられるものとなる。

3. 研究の方法

3-1 半導体センサの開発及び試験法

厚さ 700 μm の Si 基盤(B の拡散濃度 10^{15} 個/ cm^3)を使用し、p+を 10^{15} 個/ cm^2 で照射し、表面近傍が 10^{20} 個/ cm^3 程度のドーパ濃度になるよう調整し PN 接合層を作成した。PN 接合素子においては接合面に空乏層が形成されると、そこに電氣的な容量 C_d が形成される。よって、この空乏層は、高分子圧電素子が形成している分極構造と等価的な構造と見なすことができる。空乏層幅 d が圧力波により偏歪することで C_d が変化する。この変位は PN 接合、MOS キャパシタとも両端の電極間を流れる変位電流 $I = (dC_d/dt)V$ を検出することによって測定することができる。

開発した素子は、開発した半導体センサに圧力波発生装置を取り付け、パルス圧力波を発生、入力した。圧力波は、高分子圧電素子であるポリフッ化ビニリデン(PVDF)にパルス電圧 $v_p = 200$ V、 $t_p = 1$ ns を入力することにより発生させた。発生圧力波は Al 電極を介して、半導体素子に入力される。その際に、上述した変位電流を検出する。

3-2 プロトン照射試験試料および照射条件

測定試料には、2 種類の分子構造が異なるポリイミドフィルムを用いた。Fig. 1 に両試料の分子構造を示す。それらの試料をそれぞれ PA、PB として表す。以下の説明では、PA 及び PB に対する照射条件ごとに Table 1 に示す名称で試料と照射条件を識別する事とする。なお、照射は全て電流密度 30 nA/ cm^2 一定として真空度 1.0×10^{-4} Pa の真空チャンバ

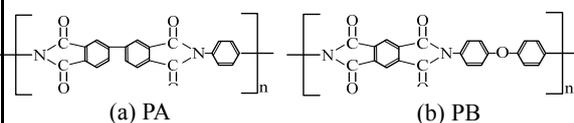


Fig. 1 Chemical structures of polyimide films

Table 1 Naming table of the irradiated samples

Acceleration energy	Sample name		Penetration depth
	PA	PB	
未照射	PA0	PB0	19 μm
1.0 MeV	PA10	PB10	
1.5 MeV	PA15	PB15	37 μm
2.0 MeV	PA20	PB20	59 μm
2.5 MeV	PA25	PB25	84 μm

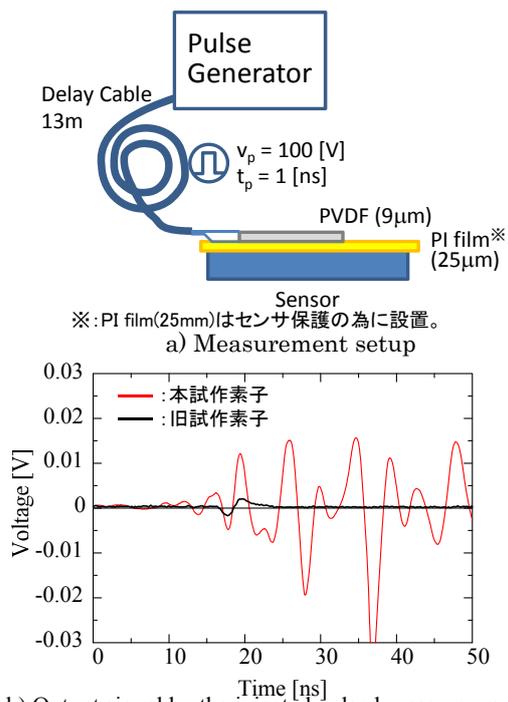


Fig. 2 Results of pulsed pressure wave injection test on developed semiconductor sensor

一内で 30 分間照射を実施した。また、Table 1 には、両試料におけるプロトンの最大飛程の数値計算結果を示す[4]。両試料共に、各加速エネルギーにおけるプロトンの最大飛程はそれぞれ 19、37、59、84 μm である。

なお、試料厚は、照射中の実験では、試料の照射面側にアルミニウム蒸着が施された厚さ 125 μm の試料、照射後の実験では、50 μm の試料を用いて測定を行った。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、東京大学原子力専攻重照射設備のタンデトロン、およびヴァン・デ・グラーフを用いて行った。

4. 研究成果

4-1 試作半導体センサにおける圧力波検出

Fig. 2 に測定システムと測定結果を示す。同図より以前の試作と比較し、本試作素子からの出力は 5 倍程度の向上が確認された。また以前の試作ではパルス状の信号が確認されていたが、今回は多重反射波の検出となった。この原因は、Al 製音波プローブと素子の接触による物理的な損傷を考慮し、素子を保護する事を優先し保護フィルム(PI)を挿入したことによると考えられる。センサと音波プローブ間に挿入された PI により、入力圧力波が PI と試作センサ間の音響インピーダンスのミスマッチにより入力圧力波の反射が起こり、複雑化されたものと考えられる。

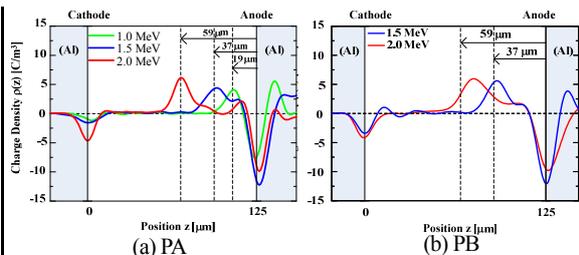


Fig. 3 Space charge distribution in each sample

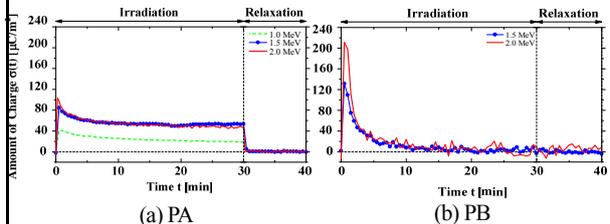


Fig. 4 Time dependence of accumulated total amount of charge in acceleration energy each samples

4-2 プロトン照射 PI の帯電計測

Fig. 3 にプロトン照射時の PI 内の空間電荷分布を示す。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。これら蓄積した正電荷分布は、加速エネルギーに応じて試料内の正電荷蓄積位置に変化が観測された。各加速エネルギーにおける正電荷の分布に着目すると、加速エネルギーが大きいほど電荷蓄積位置も深くなるのがわかる。また同図より、PA の場合、PA10 では照射面から約 19 μm 、PA15 では約 38 μm 、PA20 は約 57 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飛程位置に観測された。さらに、PA15、PA20 の分布においては二つの正電荷蓄積のピークが確認された。一方、PB の場合、PB15 では照射面から約 36 μm 、PB20 は約 50 μm に正電荷蓄積のピークが確認され、PB20 では、数値計算により算出した飛程よりもわずかに短い位置に観測されたものの飛程の範囲内で観測された。故に今回観測されている試料内の正電荷は照射プロトンによって生じたものと考えられる。

Fig. 4 に Fig. 3 の試料内正電荷から算出した総蓄積電荷量の経時変化を示す。同図より、両試料のプロトン照射中における電荷蓄積挙動をみると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た。同図(a)より PA の場合、照射開始 10 分後に PA15、PA20 では約 60 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、PA10 では約 20 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ の一定値を取り、蓄積量の変化は観察されなくなった。また、照射後の蓄積挙動に着目すると、各加速エネルギーにおいて 1 分以降には電荷の蓄積が観測されなかった。一方、同図(b)より PB の場合、PB15、PB20

共に照射中にも関わらず、照射開始 10 分後には正電荷の蓄積は観測されなくなった。これらの現象の原因の一つとして考えられるのは、電荷が蓄積する過程と減少する過程で、試料の物性が変化していると考えられる。具体的には放射線誘起伝導度 (Radiation Induced Conductivity: RIC)[5] が生じたために、プロトン通過領域の導電率が上昇し、高エネルギープロトンが分子間結合を切断したことによって発生した電子や親イオン等のキャリアや、あるいは電極から注入された負電荷が、正電荷蓄積までドリフトし、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観測されたものと考えられる。これらのことを検証するためプロトン照射試料に対し、直流高電界を印加した際の電流計測による導電率、および空間電荷分布測定を行い、電気絶縁特性の評価を行った。

Fig. 5、に 100 kV/mm 印加時の PA、PB の

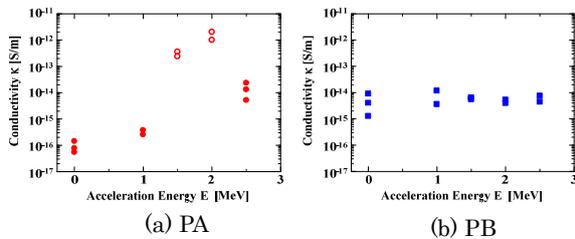


Fig. 5 The electrical conductivity in acceleration

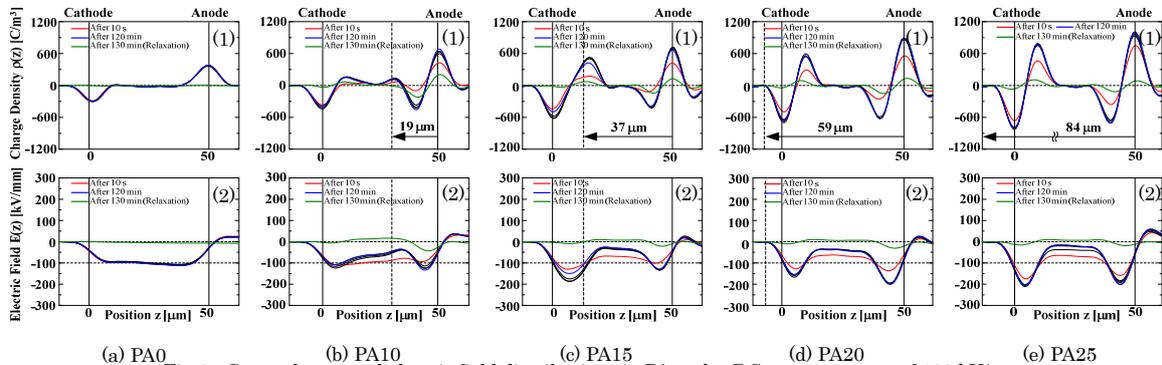


Fig.6 Space charge and electric field distributions in PA under DC average stress of 100 kV/mm

1) Space charge distribution 2) Electric field distribution

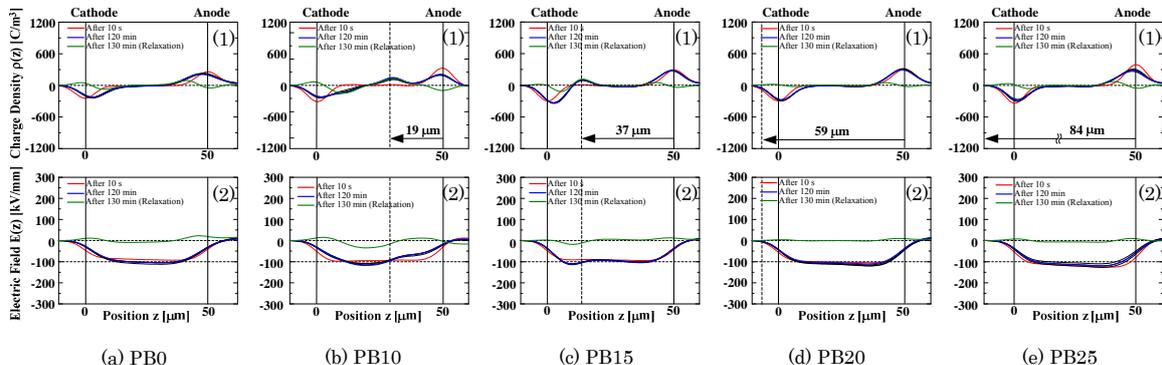


Fig.7 Space charge and electric field distributions in PB under DC average stress of 100 kV/mm

1) Space charge distribution 2) Electric field distribution

伝導電流計測結果から算出した導電率を示す。この導電率は 180 分値を用いて算出した。同図より、未照射試料の導電率 1.0×10^{-16} S/m と比較すると、約 20000 倍であった。一方、PB の場合、プロトン照射による導電率の顕著な変化は観測されなかった。

4-3 プロトン照射後の絶縁材料における直流電界下での空間電荷分布測定

直流電界下における PA、PB の空間電荷分布、電界分布波形を Fig. 6, 7 に示す。同図中 (a)には未照射試料を、(b) - (e)にはそれぞれ加速エネルギー 1.0 - 2.5 MeV のプロトン照射試料の測定結果である。図中赤線、青線は印加開始 10 秒後、120 分後、緑線は短絡 10 分後をそれぞれ表している。また、同図(b) - (e)中の縦の破線は数値計算によって算出したプロトンの最大飛程を示している[4]。

Fig. 6(1-a)より、未照射試料である PA0 では電界印加による顕著な空間電荷の蓄積は確認できない。また、電界分布も 100 kV/mm 一定である。同図(1-b)より PA10 の場合、電界印加 10 秒後に微量の正・負電荷の蓄積が見られ、印加 120 分後には最大飛程、および陰極付近に正電荷、陽極に負電荷の蓄積がそれぞれ観測された。また、同図(2-b)より、電界は PA0 と比較して 1.3 倍の増加が観測された。同図(1-c)より PA15 の場合、印加開始直

後に最大飛程、および陽極近傍の試料内に正・負の分極された電荷の蓄積が観測された。また、同図(1-c)より、電界は1.5倍の増加が観測された。同図(1-d)、(1-e)よりPA20、PA25では、印加開始直後に陰極付近、および陽極近傍の試料内に正・負の分極された電荷の蓄積が観測された。また、同図(2-d)、(2-e)より、電界はPA0と比較して2.5倍の増加が観測された。次にFig. 7(1-a)より、PB0では短絡10分後の測定結果より、陰極、および陽極付近に微量の正・負電荷の蓄積が観測された。これは、電界印加による電極からの注入電荷であると考えられる。同図(1-b)、(1-c)より、PB10、PB15の場合、最大飛程に正電荷の蓄積が観測された。また、陰極近傍の試料内には負電荷の蓄積がプロトンの未到達領域に観測されていた。この負電荷の蓄積は電極からの注入電荷であると考えられる。また、同図(2-b)、(2-c)より、電界はPB0と比較し、それぞれ1.2、1.1倍の増加が観測された。一方、同図(1-d)、(1-e)より、PB20、PB25では、未照射試料同様、陰極、および陽極近傍の試料内に正・負電荷の蓄積が見られた。

4-4 導電率・空間電荷へのプロトン照射による効果

前節の結果より、PAにおいては照射試料では未照射試料と異なり、電界印加により、顕著な正・負の空間電荷分極が生じ、更に導電率は最大 10^4 倍の上昇、および絶縁破壊が観測された。一方、PBにおいてはプロトンを試料内に蓄積させた場合では、正電荷の蓄積のみが試料内に観測され、貫通させた場合では、未照射試料同様に顕著な空間電荷の蓄積は観測されなかった。また、導電率も空間電荷蓄積同様、顕著な変化は確認できなかった。このことから、同じポリイミドフィルムでも分子構造が異なることで、プロトン照射の効果が異なると考えられる。PAにおいては照射前後で試料内部の電気的特性が顕著に変化したと考えられる。高エネルギーのプロトンが分子鎖を切断することで、電子や親イオンによる正・負のキャリアが多量に発生したまま材料内部に残留し、それが直流高電界下で分離し、空間電荷分極が発生したと考えられる。また、この分極電荷は電界印加直後から発生しており、試料内の導電率も高くなっていると予想でき、導電率測定の結果からも、それが裏付けられていることがわかる。したがって、PAに関しては、プロトン照射により、絶縁特性が劣化していると言える。一方、PBに関しては、Fig. 7(2-d)、(2-e)より、プロトン照射によるキャリアの生成が極めて少な

い、もしくは生成されてもPAと比較して、数時間で再結合等により減少していると考えられることから、空間電荷蓄積、導電率に変化が観測されなかったと考えられる。

4-5 UV-VISによる分子構造分析

測定試料には、試料厚 $50\mu\text{m}$ のPA20、PB20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、大気圧下において1-13日経過した試料の吸収スペクトルを観測した。また、同時にプロトン照射後における照射痕の変化を観測した。Fig. 8にPA、PB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。また、本測定結果より、基礎吸収端の波長から絶縁材料のエネルギーギャップを算出することができるので、Table 2に未照射、およびプロトン照射試料のエネルギーギャップの実験算出値を示す。また、Table 3には、照射痕の経時変化を示す。

Fig. 8(a)よりPA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、その変化は照射後の経過に伴い、図中の矢印で示す様に未照射時のスペクトル近傍まで回復していることが確認できる。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ギャップが 2.79 eV から 2.59 eV に小さくなっている。また、Table. 3

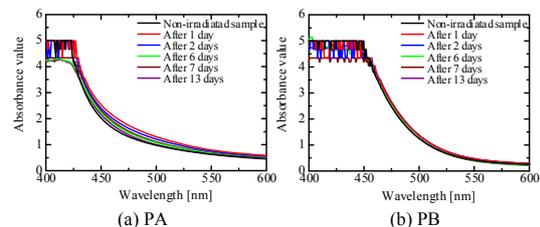


Fig. 8 Results of the ultraviolet-visible absorption spectrum

Table.2 Results of the ultraviolet-visible absorption spectrum

Sample	Non-irradiated sample	Irradiated sample (After 1day)
PA	2.79 eV	2.59 eV
PB	2.61 eV	2.64 eV

Table. 3 Time dependence of irradiation marks in each sample

Sample	Immediate after irradiation	1 day	3 days
PA			
PB			

より、プロトン照射により、照射範囲において照射痕が観測された。また、その照射痕は、13日経過後においても観測された。

一方、Fig. 11(b)よりPB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。また、そのためTable 2より、エネルギーギャップの変化も確認されなかった。また、Table 3より、照射直後においては、照射痕が観測されたが1日経過後においてほとんど観測されなかった。

以上より、PAに関してはプロトン照射によってエネルギーギャップが小さくなっており、価電子帯からの電子の励起確率が大きくなっていることが観測された。また、その変化は、照射後の時間経過に依存して減衰していた。また、時間経過に伴い照射痕も薄くなっていることが観測された。一方、PBでは、プロトン照射によるエネルギーギャップの変化は観測されず、照射痕も1日経過後には観測されなかった。しかし、照射直後において照射範囲には照射痕が観測されており、上記の照射痕が観測された際にエネルギーギャップが小さくなることからPAで確認されていることからPBでは、照射直後において絶縁特性の劣化は生じているが、吸収スペクトル、照射痕の結果より、照射より1日経過後において観測されなくなっていることから、PAと比較して、絶縁特性の回復が早いことが今回の結果から考えられる。

尚、これら得られた成果の一部はIEEE-Trans. on Plasma Scienceに投稿中である。

参考文献

- [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] 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
- [3] Metrology of volume resistivity and solid electric insulating material-surface resistivity: JIS C 2139 and 2008
- [4] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1985
- [5] L. Levy, T. Paulmier, B. Dirassen, C. Inguibert, and M. V. Eesbeek, "Aging and Prompt Effects on Space Material Properties", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 36, No.5, pp.2228-2237, 2008.

5. 発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- (1) Kohei Horiguchi, Shin Ou, Ryo Uchiyama, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, "Study on Dielectric Degradation Properties of Proton Beam Irradiated Dielectric Materials for Spacecraft", The 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2013年6月2日~2013年6月9日, 名古屋国際会議場
- (2) 堀口 皓平, 王 振, 内山 龍, 三宅 弘晃, 田中 康寛, 「ポリイミドフィルムのプロトン照射による絶縁劣化特性の研究」, 平成25年電気学会全国大会, 2013年3月20日~3月22日, 名古屋大学
- (3) R. Uchiyama, T. Hara, T. Homme, H. Miyake, Y. Tanaka, "Degradation Phenomena of Electric Property on Polymeric Materials Films Irradiated by Proton", 2012 IEEE CEIDP CONFERENCE PROGRAM, Oct.14th - Oct.17th, 2012, MONTREAL, CANADA
- (4) 三宅 弘晃, 内山 龍, 堀口 皓平, 田中 康寛, 「プロトン照射PI材料の電気絶縁特性」, 第43回電気電子絶縁材料システムシンポジウム(招待講演), 2012年9月10日~9月12日, 三島市民文化会館
- (5) Ryo Uchiyama, Takuya Homme, Seiya Numata, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, "Degradation Phenomena of Electric Property on Polyimide Films Irradiated by Proton", Proceedings of the 12th Spacecraft Charging Technology Conference, 2012年5月14日~5月18日, 北九州国際会議場
- (6) 内山 龍, 本目 拓也, 三宅 弘晃, 田中 康寛, 「プロトン照射ポリイミドの電気絶縁特性の評価」, 平成24年電気学会全国大会, 2012年3月21日~3月23日, 広島工業大学
- (7) Ryo Uchiyama, Seiya Numata, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka and Tatsuo Takada, "Charging and Discharging Characteristics on PI Films Irradiated by Proton", Proceedings of ICPMSE-10J, 2011年6月12日~17日, 沖縄・万国津梁館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三宅 弘晃 (MIYAKE HIROAKI)
東京都市大学・工学部・准教授
研究者番号: 60421864