

# 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<sup>1)</sup>

Hiroaki MIYAKE

内山 龍<sup>1)</sup>

Ryo UCHIYAMA

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。また、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の高電界下での帯電計測、電流計測、また XPS と UB-bis 測定を実施し、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. 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。

そこで筆者では、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。今回は 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、プロトン照射中における試料の空間電荷蓄積特性の測定を行った。また、プロトン照射時の電気物性の変化が帯電計測波形に与える影響を検討し、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とるため、PEA 法、および ASTM 法(American Society for Testing and materials method)[3]を用いてプロトンが照射されたポリイミドに直流高電界を印加し、空間電荷分布測定、導電率測定を行い、さらには X 線光電子分光法(X-ray photoelectron spectroscopy: XPS)や紫外・可視分光法(Ultraviolet・Visible Absorption Spectroscopy: UV-VIS)等の材料分析も実施し、総合的にプロトン照射中の帯電計測結果の解析を実施したので以下に報告をする。

## 2. 方法

### 2.1 PEA 法の原理

Fig. 1(a)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ー(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

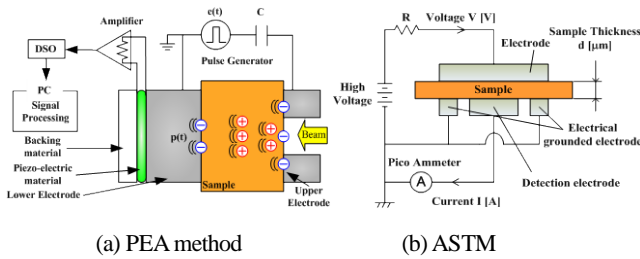


Fig. 1 Principle of the measurement

されるので、試料内の空間電荷の位置情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[2,3]。

2.2 ASTM法の原理

Fig. 1(b)にASTM法の原理図を示す。試料を電極で挟み、試料に直流電界を印加することにより、試料中を通過してきた漏れ電流 I [A]が検出電極に出力される。出力された漏れ電流をピコ・アンメーターで計測し、漏れ電流を電極面積で除することで電流密度 J [A/m<sup>2</sup>]を求め、更に印加電界 E [V/m]で除することによって(1)式に示す導電率 κ [S/m]を算出することができる[4]。

$$\kappa = \frac{J}{E} [S/m] \quad (1)$$

2.3 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. 2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<sup>2</sup>一定として真空度 1.0 × 10<sup>-4</sup> Paの真空チャンバー内で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[5]を示す。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てた厚さ 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。

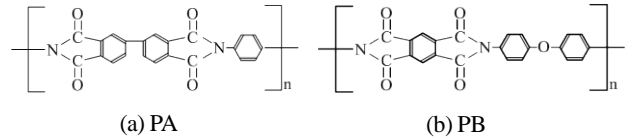


Fig. 2 Chemical structures of polyimide films

Table 1 Naming table of the irradiated samples

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

3 プロトン照射中における空間電荷分布計測結果

3.1 照射中における空間電荷測定条件

測定試料には、2種類の分子構造が異なる厚さ 125 μmのポリイミドフィルムを用いた。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分間を30秒間隔で行った。

3.2 測定結果

Fig. 3にプロトン照射時の各加速エネルギーの最大電荷蓄積時の空間電荷分布波形を示す。プロトンは図中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、蓄積した正電荷により誘導された負電荷である。また、図中縦の破線は数値計算により算出したプロトンの最大飛程を示している[5]。

(1) 空間電荷分布と最大飛程

Fig. 3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。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。

**(2) 電荷蓄積挙動と放射線誘起伝導度**

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分後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)[6]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。

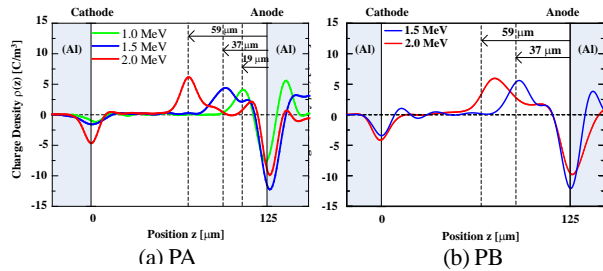


Fig. 3 Space charge distribution in each samples

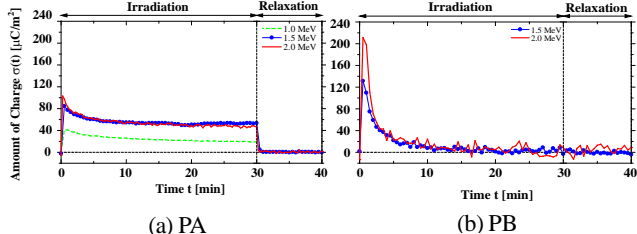


Fig. 4 Time dependence of accumulated total amount of charge in acceleration energy each samples

**4 プロトン照射された絶縁材料の直流高電界下での導電率測定および空間電荷分布測定**

**4.1 測定試料および実験条件**

測定試料には、試料厚さ 50  $\mu\text{m}$  のPA, PBを用いた。実験はASTM法、およびPEA法を用いて直流電界下における未照射・プロトン照射試料の導電率測定、空間電荷分布測定を行った。プロトン照射後、大気圧下において約1日経過後の試料に直流電界 100  $\text{kV}/\text{mm}$  を印加し、その際の電流密度の経時変化、および試料内空間電荷分布を観測した。測定時間は導電率測定ではPAの場合、印加360分、PBの場合、180分間(測定間隔2.5秒)行い、空間電荷測定では印加120分、短絡10分の計130分間(測定間隔10秒)行った。

**4.2 プロトン照射後の絶縁材料における導電率測定**

Fig. 5, 6に100  $\text{kV}/\text{mm}$  印加時のPA, PBの電流密度の経時変化、導電率算出結果をそれぞれ示す。また、Fig. 6の導電率はFig. 5における電流密度の180分値を用いて算出した。なお、Fig. 5(a)で1.5, 2.0 MeVで照射した場合では電界印加中に絶縁破壊が生じたため、導電率は絶縁破壊直前における電流密度を用いた。Fig. 5の縦軸は電流密度  $J$  [ $\text{nA}/\text{m}^2$ ]、横軸は時間  $t$  [min]を示し、Fig. 6の縦軸は導電率  $\kappa$  [ $\text{S}/\text{m}$ ]、横軸はプロトンを照射した際の加速エネルギー  $E$  [ $\text{MeV}$ ]を表しており、加速エネルギー0 MeV時のプロットは未照射試料における導電率を示している。また、加速エネルギー毎の導電率のプロットはそれぞれの測定回数を示している。

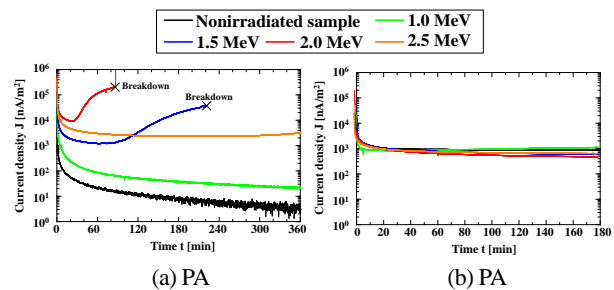


Fig. 5 Time dependence of the current density under a DC stress of 100  $\text{kV}/\text{mm}$

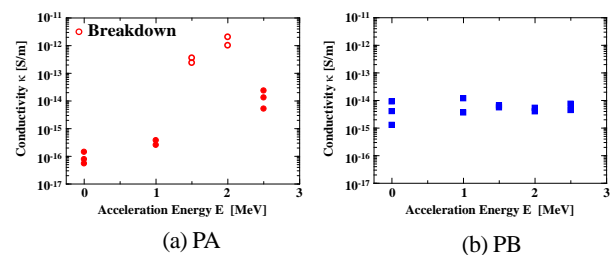


Fig. 6 The electrical conductivity in acceleration energy

Fig. 6(a)より、PA0は電界印加直後に最大値に上昇後、その後印加時間の経過に伴い電流密度は8.0  $\text{nA}/\text{m}^2$  まで減衰した。一方、プロトン照射試料では全ての照射条件において、電流密度の増加が観測された。またPA15, PA20では、電流密度はそれぞれ  $1.0 \times 10^3$ ,  $1.0 \times 10^4$   $\text{nA}/\text{m}^2$  まで減衰した後、電界印加80, 30分後に上昇を始め、 $2.0 \times 10^4$ ,  $2.0 \times 10^5$   $\text{nA}/\text{m}^2$  に達

した際に絶縁破壊に至った。また、Fig. 7より、未照射試料の導電率  $1.0 \times 10^{-16}$  S/m と比較すると、約 20000 倍であった。一方、Fig. 6 (b), Fig. 7より PB の場合、プロトン照射による電流密度、および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

Fig. 7, 8 に直流電界下における PA, PB の(1)空間電荷分布, (2)電界分布波形を示す。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. 7(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、電界は電界は PA0 と比較して 2.5 倍の増加が観測された。

次に Fig. 8(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。

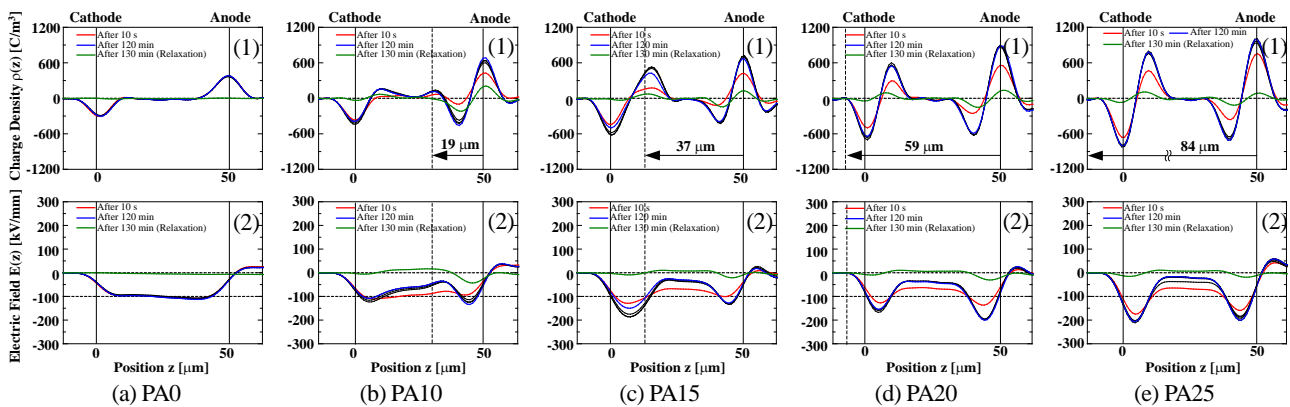


Fig.7 Space charge and electric field distributions in PA under DC average stress of 100 kV/mm  
1) Space charge distribution 2) Electric field distribution

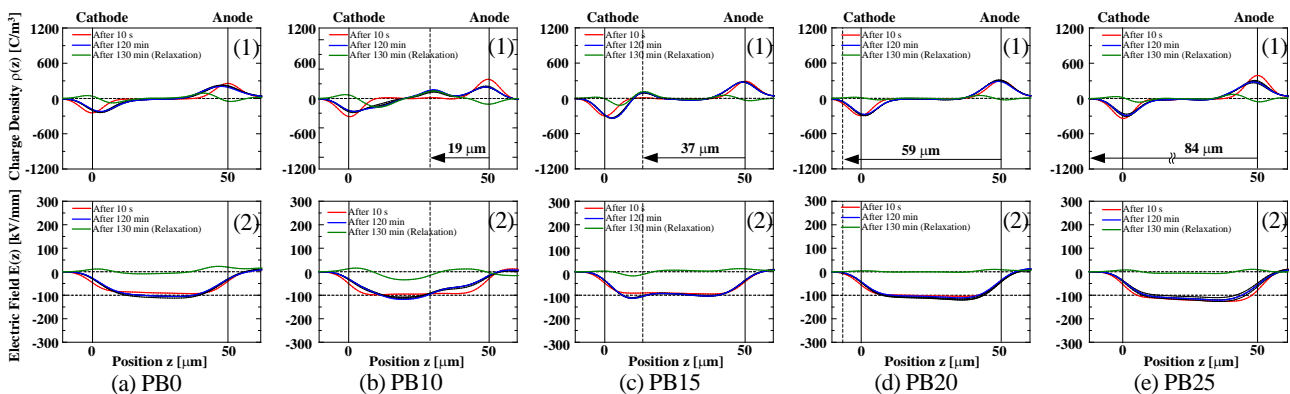


Fig.8 Space charge and electric field distributions in PB under DC average stress of 100 kV/mm  
1) Space charge distribution 2) Electric field distribution

#### 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. 8 (2-d), (2-e)より、プロトン照射によるキャリアの生成がない、あるいは極めて少ない、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。

### 5 XPS・UV-VIS によるプロトン照射材料の分子構造分析

#### 5.1 XPS による分子構造分析

測定試料には、試料厚さ 25  $\mu\text{m}$  の PA20, PB20 を用いた。プロトン照射後、大気圧下において約 1 日経過後の試料を用いた。なお、XPS の深さ方向における測定分解能は、試料表面より約 10 nm である。加速エネルギー 2.0 MeV の最大飛程は 59  $\mu\text{m}$  であるため、プロトン照射の際に、試料の上層に厚さ 50  $\mu\text{m}$ 、下層に 25  $\mu\text{m}$  と試料を重ねることで、25  $\mu\text{m}$  の試料の照射面側から約 9  $\mu\text{m}$  の位置にプロトンの飛程がくる様に調整した。

Fig. 9, 10 に PA, PB の (a)未照射・(b)プロトン照射試料の XPS スペクトルの測定結果を示す。縦軸はスペクトルの強度[arb. unit]、横軸は分子の結合エネルギー[eV]を表している。なお、測定結果のピークは原子核の内殻軌道における 1s 軌道の電子を X 線によって励起させた光電子の数がピークとして観測されたものである。また、Fig. 9, 10 (1-a), (2-a)の結合エネルギー 285.1, 400.2 eV のピークはそれぞれ PA, PB の分子構造の C 元素、および N 元素の 1s 軌道からの電子のピークを示している。また、それぞれのピークは C-C, C-N, C=O 等の分子構造の結合毎にピークを持ち、それらの積分値として表示されているため、分子の結合毎でピークの分割を行った。同図より、黒線は測定結果、青線は結合毎のスペクトル、赤線は青線を合成したスペクトルの結果を示す。

Fig. 9 より PA では、プロトン照射によって、分子構造のベンゼン環における C-C(285.1 eV)の増加、イミド環における C-N(400.5 eV)、イミド環のカルボニル基における C=O(288.5 eV)の減少が観測された。次に Fig. 10 より PB では、プロトン照射によって、分子構造のベンゼン環における C-C(284.7 eV)の増加、エーテル結合の C-O(286.0 eV)、イミド環における C-N(400.5 eV)、イミド環のカルボニル基における C=O(288.5 eV)の減少が観測された。また、

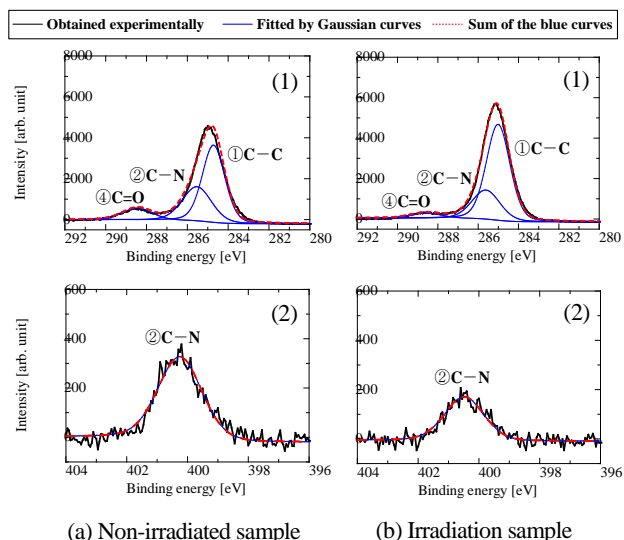


Fig. 9 XPS spectra of PA before and after proton irradiation

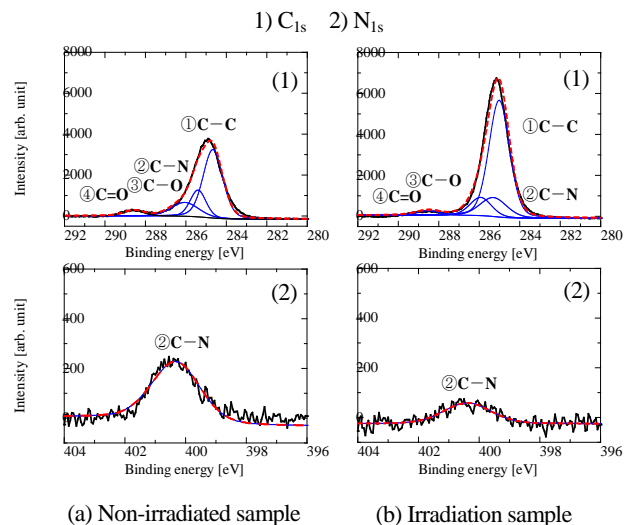


Fig. 10 XPS spectra of PB before and after proton irradiation

両試料の結合ピークの変化量を比較すると、Fig. 9(1), 10(1)より、C—C の結合において増加量に大きな差が観測された。同図より PA では結合の増加はほとんど変化は見られなかった。一方、PB の場合、結合は約 2 倍増加していることが観測された。測定結果より、両試料共にプロトン照射によって、C—C の増加が観測されており、ベンゼン環の炭素原子間で新たな結合が生じていた。この現象として考えられるのは、分子間の架橋が考えられる。そのため、PB の場合、架橋の度合いが PA と比較して多いことから、前節で述べた導電率、空間電荷蓄積に顕著な差が観測されたと考えられる。

**5.2 UV-VIS による分子構造分析**

測定試料には、試料厚 50 μm 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. 11 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. 11(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 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。しかし、その照射痕は 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のが 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。

**6. 結論および今後の課題**

2 種類の異なる分子構造を持つポリイミドフィルムを用いてプロトン照射を行った結果、プロトン照射中のバルク中の帯電計測を実施した。また照射中に得られた電荷蓄積・放出の挙動について、電荷挙動の解析を照射後の材料に対し高電界印加時における空間電荷分布測定、導電率測定による電気伝導特性の評価、および XPS, UV-VIS による材料分析を実施することで、検討を行った。その結果、ポリイミドの構造によって空間電荷蓄積および RIC の効果が異なることがわかった。さらに、PA の場合、高エネルギープロトン照射によって分子鎖切断で生成されたキャリアの発生、およびエネルギーギャップの低下によって導電率の上昇が生じていることがわかった。一方、PB では、プロトン照射による分子間での架橋によって、導電率、空間電荷蓄積に変化が生じなかったことがわかった。

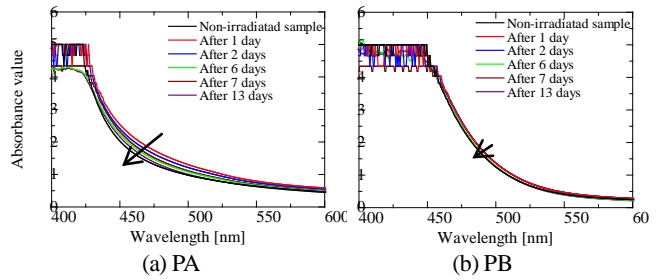


Fig.11 Results of the ultraviolet-visible absorption

Table.2 Results of the ultraviolet-visible absorption spectrum

| Sample | Non-irradiated sample | Irradiation sample (After 1 days) |
|--------|-----------------------|-----------------------------------|
| PA     | 2.79 eV               | 2.59 eV                           |
| PB     | 2.61 eV               | 2.64 eV                           |

Table. 3 Time dependence of irradiation marks in each

| Sample | Immediate after irradiation | 1 day | 13 days |
|--------|-----------------------------|-------|---------|
| PA     |                             |       |         |
| PB     |                             |       |         |

Table. 3 Time dependence of irradiation marks in each

**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] 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] IEC/TS 62758:2012, “Calibration of space charge measuring equipment based on the pulsed electroacoustic (PEA) measurement principle”, 2012
- [4] Metrology of volume resistivity and solid electric insulating material-surface resistivity: JIS C 2139 and 2008
- [5] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1985
- [6] 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.