

電子線照射絶縁材料における電子正孔対の生成量評価

遠藤 和樹*, 榎 海星, 三宅 弘晃, 田中 康寛 (東京都市大学)

Evaluating the amount of electron/hole pairs generated in electron beam irradiated insulating material

Endo Kazuki*, Enoki Kaisei, Miyake Hiroaki, Tanaka Yasuhiro (Tokyo City University)

Recently, the operating voltage of electronic devices on spacecrafts tends to be weakly, and even a little electric potential fluctuation may cause malfunctions. Therefore, it is necessary to evaluate the electrical properties of insulating materials by focusing on electronic properties. In this study, we focus on the generation of electron-hole pairs, and we measured the amount of charges when the irradiated by electron beam at each flux using a new voltage application method with a vacuum capacitor.

キーワード：パルス静電応力法, 電子線, 絶縁材料, 電子正孔対, 真空ギャップ

(Keywords: Pulsed electroacoustic method, electron beam, insulation material, electron-hole pairs, vacuum gap)

1. 緒言

人工衛星や宇宙探査機などの多くの宇宙機には多層断熱材(multi layer insulator : MLI)や太陽光反射材(optical solar reflector : OSR), ワイヤハーネスの被覆材などにポリイミド系, フッ素系絶縁材料が使用されている。しかし, 宇宙機が運用される軌道は電子, 陽子などの高エネルギー荷電粒子, プラズマなどで満たされた特殊な環境下であるため, 宇宙機表面材料の表面及び内部に荷電粒子が蓄積し, 帯電する。

近年, 宇宙機に搭載されている電子機器が小型化され, 動作電圧の弱電化傾向にある。これにより, これまで影響を及ぼさなかった微小な帯電でも電位変動を与え, 誤作動を招く可能性がある。したがって, 荷電粒子による絶縁材料の電気物性評価を行う必要があり, 本研究では電子線により絶縁材料内に生成される電子正孔対に着目した。

先行研究では, 電子線照射された各種絶縁材料中における電子正孔対の残存量を評価するためにパルス静電応力(pulsed electroacoustic) PEA法を用いて空間電荷分布測定を大気圧環境下で行ってきた。その際, 試料に接触させた電極から電荷注入により正味の生成量評価ができない問題も生じていた為, 電荷の注入が生じない未照射試料を電荷注入障壁(ブロッキングレイヤー)として照射試料の照射面と電極の間に挿入し測定を行った。その結果, 電子線照射試料内部に生成される電子正孔対が確認され, 照射からの時間経過につれ電子正孔対は再結合されるため残存量が減少することも明らかとなった⁽¹⁾⁽²⁾。しかし, 実環境では常に絶縁材料に電子線が照射されているため, 材料内に電子正孔対は常に生成され続けていると考えられる。本来, 電子線照

射中の生成量を評価すべきではあるが, 照射電子が蓄積し続ける等の影響で照射中の電荷挙動は複雑なため, 電子正孔対のみの評価は非常に困難である。したがって本研究では電子正孔対の残存量が最大であると考えられる電子線照射直後の電子正孔対の生成量に着目した。照射直後に直流課電下で空間電荷分布測定を行う際, 前述したブロッキングレイヤーを用いた測定手法では照射試料の上に未照射試料を積層するため, ブロッキングレイヤーにも電子線が照射されてしまい, 電気特性が変化することで電荷注入を抑制できない問題が生じた。そこで本研究ではブロッキングレイヤーの代わりに真空ギャップ(以下, V.G.)を試料照射面上方に設けた新たな測定方法を考案し, 真空環境下で電子線照射中及び直流電圧課電下で空間電荷分布測定より電子正孔対の生成量評価を行ったため, 以下に報告する。

2. 測定原理及び電子線照射装置

〈2-1〉 PEA法 図1にPEA法の原理図を示す。電荷が蓄積された試料にパルス電圧を印加すると, 蓄積電荷はパルス電界により微小変位することで, 圧力波が発生し, 試料及び接地電極内を伝搬する。この圧力波を圧電素子により検出することで, 空間電荷分布を計測する。発生する圧力波の大きさは, 蓄積された電荷量と印加したパルス電界に比例し, 電荷蓄積された位置から発生した圧力波が圧電素子に到達するまでの時間は圧電素子までの距離に比例するため, 蓄積されている電荷の量と試料の厚さ方向の電荷分布が計測できる⁽³⁾。

〈2-2〉 電子線照射装置 図2に電子線照射用真空チャンバーの概略図を示す。真空チャンバー内を真空排気する場合には, 大気圧から 10^{-2} Pa まではロータリーポンプ,

10⁻² Pa 以下ではターボ分子ポンプをしており、真空チャンパー内の真空度は約 10⁻⁵ Pa まで到達可能となっている。実際に電子線を照射する際には、真空チャンパー内の陰極に直流電源を用いて電流 I_f を流すことで加熱し、同時に、電子加速用高電圧 V_0 を陰極に印加すると、陰極から接地された陽極に向かって電子が照射される。このとき、フィラメントと接地電極間の電位差が電子の加速電圧 V となり、電子線の電流が I となる。これらのシステムを用いることで、本装置では加速エネルギー100 keV までの電子線照射が可能となっている。また、照射する電子線の電流 I は、可変抵抗の抵抗値を変えることにより、加熱電流 I_f を調整し、制御可能である。

3. 測定手法及び電子正孔対生成量算出方法

〈3・1〉 真空ギャップを介した電界印加方法 図3に本実験の測定システムの概要図を示す。本実験で用いた内部帯電計測装置は測定試料照射面側の電極に照射孔が設けら

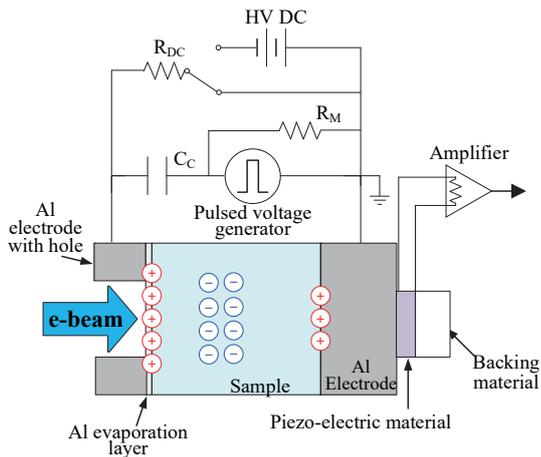
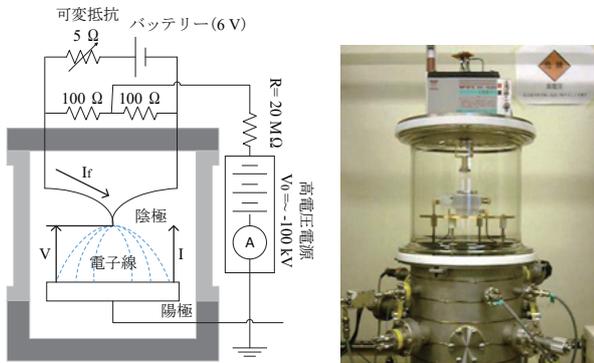


図 1 PEA 法原理図

Fig.1 Schematic diagram of space charge measurement system for this irradiation experiment



(a) Schematic diagram (b) photo

図 2 電子線照射装置

Fig.2 Schematic diagram and photo of electron irradiation facility

れており、電子線を試料に直接照射できる構造になっている。さらに本実験では測定試料照射面側上方50 μmに金箔(厚さ1 μm)を設置し、この金箔からV.G.を介して直流高電圧及びパルス電圧を印加する事で、電極から測定試料への電荷注入を抑制しつつ、照射直後から試料内の電子正孔対を評価する事が可能となった。図4にV.G.を介して電界印加した際の空間電荷のモデル図を示す。試料に電圧印加すると電極界面に電荷が誘導されるが、本研究では測定試料照射面側にAl蒸着を施さず、金箔を用いてV.G.を介して電界印加するため、試料照射面側には電極が存在しない。したがって、試料/V.G.界面には誘導電荷は発生せず、試料/V.G.界面には直流電圧によって誘電分極された分極電荷が観測されると考えられる。したがって、未照射試料にV.G.を介して電圧を印加した場合、図4に示すように空間電荷分布波形の設置電極/試料界面及び試料/V.G.界面には同じ極性の信号が検出される。

〈3・2〉 電子正孔対算出方法 図 5 に電子正孔対の生成量を算出する際の計算方法のモデル図を示す。同図(a)に電圧印加中の空間電荷分布のモデル図、(b)に電子線照射直後の空間電荷分布のモデル図、(c)に未照射試料に直流電圧を印加した際に観測される空間電荷分布のモデル図を示す。電子正孔対は電子線照射により試料内部に生成されるが、電子と正孔が同位置に存在するため、観測することができない。そこで、電子線照射後に直流電圧を印加することによって分極させ、観測可能となる。しかし、試料内部には電子正孔対と照射電子、分極電荷が混在しているため、正味の電子正孔対の生成量を算出することができない。そこで電子線照射直後の負電荷分布(図 5-b)と未照射に観測され

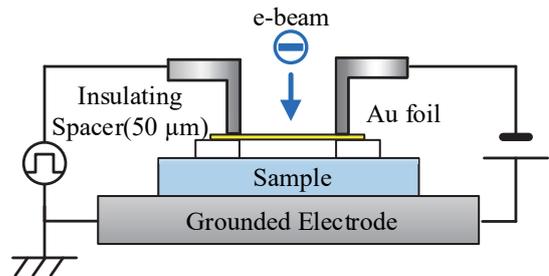


図 3 測定システム概要図

Fig.3 Schematic diagram of measurement system

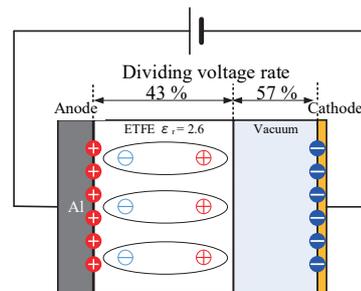


図 4 電圧印加時空間電荷モデル図

Fig.4 Model of the space charge distribution under DC voltage application

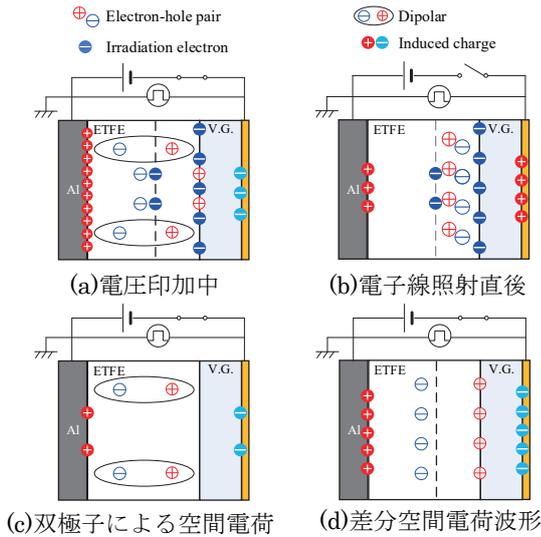


図5 電子正孔対算出方法

Fig.5 Calculation method of electron-hole pairs

る空間電荷分布波形(図 5-c)を直流電圧印加中の空間電荷分布(図 5-a)から差分することで照射電子の影響を差分し、図 5(d)に示すような電子正孔対を算出できる空間電荷分布波形を得ている。同図の空間電荷分布波形を試料厚さ方向に積分することで電子正孔対の生成量を算出する。

4. 真空環境下における電子線照射直後の空間電荷分布測定

〈4・1〉 測定試料及び測定条件 本実験は図3に示した測定システムで実験を行った。測定試料はAGC社製の公称厚さ100 μmのETFE(ethylene-tetrafluoroethylene)を用いた。さらに真空ギャップを設けるため、50 μmのPEN(polyethylene naphtholate)をリング状に成形し、スペーサとした。電子線は加速エネルギー70 keV、照射電流密度5, 10, 40 nA/cm²、照射時間5分とし、照射電子のフラックス毎による電子正孔対の生成量を比較した。しかし、電子が金箔を透過することで約11 keVのエネルギーが減衰されるため、試料には約59 keVの電子線が照射されている。これはKatz, Penfoldの式を用いて算出した⁽⁴⁾。電子線照射5秒後に真空環境下で使用装置の印加可能最大電圧である-2 kVを30分印加し、空間電荷分布測定を行った。尚、パルス電圧は200 Vとした。試料とV.G.はコンデンサと見なせるため、静電容量による電圧分担で試料に電圧印加することができ、試料とV.G.の静電容量を考慮すると電源電圧の43%の電圧が測定試料に印加されることになる。したがって試料への印加電界は8.54 kV/mmとなる。

〈4・2〉 実験結果及び考察 図6に各照射電流密度で空間電荷分布測定を行った結果を示す。同図(A)に照射電流密度5 nA/cm²、(B)に10 nA/cm²、(C)に40 nA/cm²の結果を示す。また図(a)に電子線照射中の空間電荷分布波形、(b)に直流電圧印加中の空間電荷分布波形、(c)に印加時の空間電荷分布波形から照射終了直後の空間電荷分布波形と電圧印加

時に現れる分極電荷を差分した差分波形を示す。図(d)には図(c)の斜線された領域を試料厚さ方向に積分して得た、試料内の蓄積正負電荷量の経時変化を示す。同図では正負電荷量を比較するために蓄積負電荷量を絶対値表記をしている。また試料厚さ方向に積分する際、試料/V.G.界面では圧力波が全反射するため、試料/V.G.界面の電荷量は実際の2倍検出されている。したがって、蓄積量を算出する際は蓄積されている電荷量の半分を算出する必要があり、本報告では便宜上、試料/V.G.界面の信号の最大の位置までを積分範囲とし、同界面の電荷量の半分とした。さらに図6(a), (b), (c)の縦破線は照射電子の計算飛程(31 μm)の位置を示している⁽⁴⁾。

図6(a)より照射電子の一部は計算飛程近傍に蓄積し、多くは測定試料照射面側への蓄積が観測された。これは金箔によって電子が散乱し、エネルギーが減衰したためであると考えられる。また全ての照射条件において照射電子の最大蓄積量は約0.3 mC/m²となり、電流密度を変化させても蓄積電荷量に顕著な差異は観測されなかった。この原因として、試料表面に多くの照射電子が蓄積されることにより、V.G.の電界が強調され、電界電子放出により電子がV.G.方向に放出されたことが考えられる。

図6(c)より照射電子及び分極電荷を差分したことで、試料/V.G.界面には正電荷、試料内の照射電子計算飛程近傍には負電荷が観測された。さらに図6(d)より蓄積正負電荷量は全ての電流密度において概ね等量となった。本測定システムではV.G.により電極からの注入電荷を抑制しているため、試料内に観測された正負電荷量は電子線照射によって生成された電子正孔対であると考えられる。しかし、全ての電流密度において直流電圧印加終了時の正孔及び電子の蓄積量はそれぞれ0.18・0.21 mC/m²、0.18・0.20 mC/m²と電流密度の違いによる電子正孔対の生成量に顕著な差異は観測されなかった。この原因として、前述した電子線照射中の空間電荷分布に顕著な差異が無い事や本実験で印加している電界では試料内に生成されている全ての電子正孔対が分極されず、一部の電荷が観測されていることが考えられる。

5. 結言

本研究では電子正孔対の残存量が最大であると考えられる電子線照射直後に着目し、金箔を用いてV.G.を介して電界印加し空間電荷分布測定を行うことで電子正孔対の生成量の評価を試みた。本システムを用いた測定結果より、電圧印加直後から試料内に正負電荷蓄積が確認され、内部帯電計測及び電子正孔対の評価が可能である事が判明した。しかし、照射電流密度を変化させても電子正孔対の生成量に顕著な差異が観測されなかったことから本実験の印加電界では全ての電子正孔対が観測されていないと考えられるため、高電界を印加できる装置の開発を予定している。さらに電子線の加速エネルギーと電子正孔対の生成量の関係を調査していくとともに、他種材料でも同様の実験を行い、材料による電子正孔対の生成量の比較を行っていく。

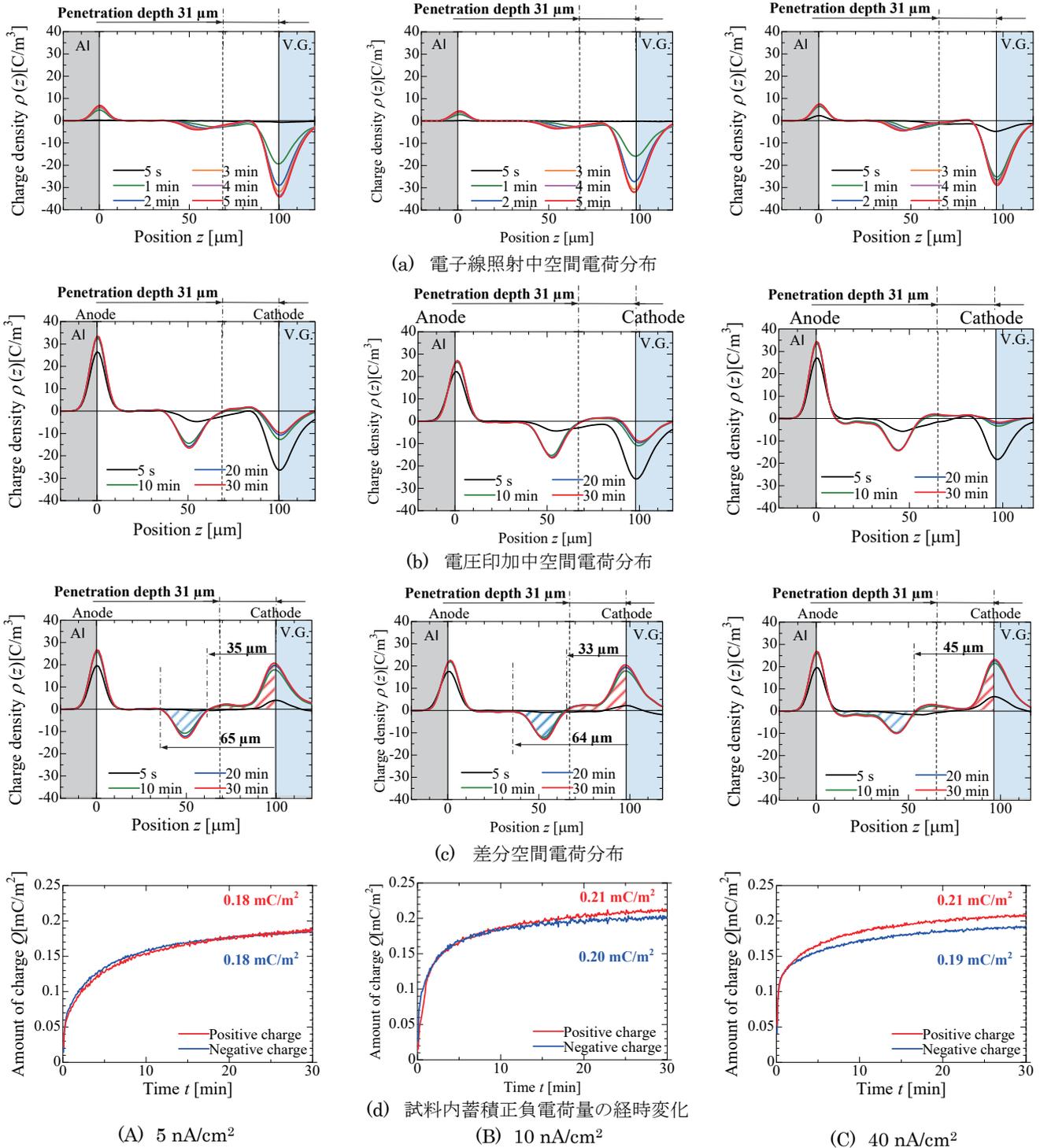


図 6 各電流密度における空間電荷分布測定結果
Fig.6 Space charge measurement results at each flux

文 献

(1) 永瀬崇浩:「電子線照射したフッ素系絶縁材料の直流課電下における空間電荷蓄積特性」, 電学論 A, Vol.138, No.4 pp. 163-170 (2017)

(2) 吉田周吾:「電子線照射フッ素系絶縁材料中の電子正孔対生成量の解析」, 電学論 A, Vol.137, No.11 pp. 632-638 (2017)

(3) H. Miyake and Y. Tanaka, "Space Charge Distribution in Polymethyl Methacrylate and Quartz Glass Irradiated by Protons", Sensor and Materials, Vol. 29, (2017)

(4) L. Katz and A. S. Penfold: "Range-energy relations for electrons and the determination of beta-ray end-point energies by absorption," Reviews of Modern Physics, vol. 24, No. 1, pp. 28 LP - 44, 1952.