

電子線照射絶縁材料における絶縁破壊特性

谷貝健太*, 土屋諒平, 三宅弘晃, 田中康寛, 高田達雄 (東京都市大学)

Breakdown Characteristic in Electron Beam Irradiated Insulating Material

Kenta Yagai, Ryohei Tsuchiya, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, Tatsuo Takada (Tokyo City University)

1. はじめに

人工衛星などの宇宙機は温度変動の激しい宇宙環境を飛行するため、機内の温度を一定に保つ必要があり、ポリイミドなどの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で覆われている。しかし、宇宙環境、特にプラズマ環境・放射線環境にMLIが曝されると材料内部に電荷が蓄積し帯電する。その帯電量が大きくなると放電事故が発生し、絶縁材料の劣化や搭載されている機器の誤作動・故障を引き起こすと言われている。そのため、宇宙機の設計にはポリイミドに代表される絶縁材料の電気的特性が重要な要因となる。しかし、現在検討されている宇宙機設計のガイドラインでは、電子線などの高エネルギー粒子線が照射された絶縁材料の電気的特性はほとんど考慮されていない。

そこで、本研究グループでは宇宙機用絶縁材料で生じる帯電現象のうち、報告例が少ない内部帯電現象に着目し、その発生のメカニズムを解明するために、空間電荷分布測定法の一つである圧電素子誘起圧力波法(Piezoelectric

Induced Pressure Wave Propagation Method: PIPWP 法)を用いた内部帯電計測装置を開発し、真空環境を模擬できる真空チャンバーと電子線照射装置を用いて空間電荷分布測定を行ってきた。その結果、各種絶縁材料における分子構造の相違により蓄積電荷挙動が異なる傾向を示すことがわかってきた。しかし、実際に電子線照射が絶縁材料の絶縁破壊特性や導電率といった電気的特性に及ぼす影響に関してはこの内部帯電計測のみでは明確にすることができなかった。そこで、現在は、電子線を照射した絶縁材料において空間電荷分布測定法として定評のあるパルス静電応力法(Pulsed Electro-Acoustic Method: PEA 法)を用いた測定装置により、直流高電圧印加実験を行い、電子線未照射絶縁材料における空間電荷形成と比較することで、直流高電圧印加時の電子線照射絶縁材料の空間電荷形の変化を調査している。そして、最終的にはその空間電荷形成の変化と絶縁破壊特性の関係性に関して調査を行っていく予定である。今回はその初期段階として電子線照射PIフィルムにおける直流高電圧印加時の空間電荷形成に関して調査を行ったので以下に報告する。

2. 電子線照射リアルタイム内部帯電計測

これまでに、各種高分子絶縁材料を用いて電子線照射リアルタイム内部帯電計測を行った結果、PIフィルムに関しては電子線照射中にも関わらず、蓄積電荷量は減少するという傾向を示した。以下にその結果に関して述べる。

図1, 2にPWP測定装置の概略図および写真を示し、表1に実験条件を示している。さらに、図3-(a)(b)(c)に加速エネルギー40, 60keVの電子線照射中における空間電荷分布図および蓄積電荷量の経時変化を示す。なお、同図中、電子線は図の右側から照射している。

図3-(a)(b)(c)より、PIはフェーザの実験式から算出した電子の最大飛程の範囲内で電子の侵入がとどまっており、蓄積電荷量は飽和値に達すると電子線照射中にも関わらず減少するという傾向を示している。これは、電子が通過した領域内でRIC(Radiation Induced Conductivity: 放射線誘起伝導)が発生し、導電率が上昇したためであると考えられる。

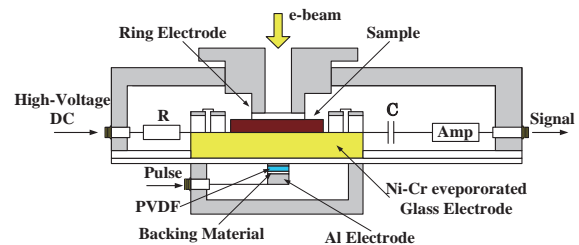


図1 PWP測定装置の概略図

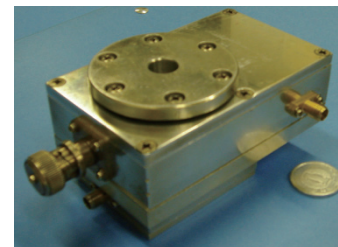


図2 測定装置写真

表1 測定条件

試料名	PI(Kapton-H)
試料厚[μm]	125
加速エネルギー[keV]	40, 60
電流密度[nA/cm ²]	70
測定時間[min]	40
測定間隔[sec]	30

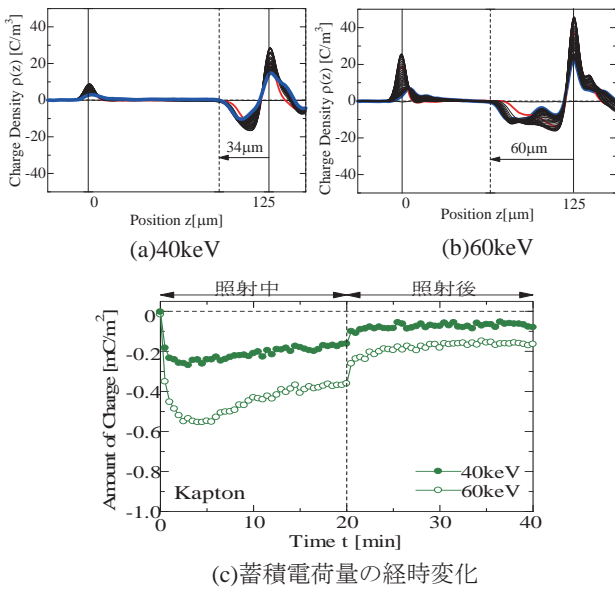


図3 PIフィルムにおける電子線照射実験結果

3. 測定原理

図4にPEA法の測定原理図を示す。内部に電荷が蓄積した試料にパルス電圧を印加すると、電荷はパルス電界により微小変位して圧力波を発生する。この圧力波は試料・電極中を伝搬し、圧電素子の圧電効果により電圧信号として検出される。検出信号は電荷に比例した大きさを持ち、空間電荷の位置から検出部までの圧力波の到達時間差によって試料の深さ方向の電荷分布を知ることができる。測定の位置分解能は試料に印加するパルス幅と検出部である圧電素子の厚さによって決まる。この手法の利点としては信号検出部が電気的にシールドされているため電氣的雑音に強いこと、試料をシールド内部に設置する必要がないため測定時の操作性に優れていること、また、信号検出部が試料と電気的に分離されているので、試料に絶縁破壊が起きても測定器を破壊することがないことである。

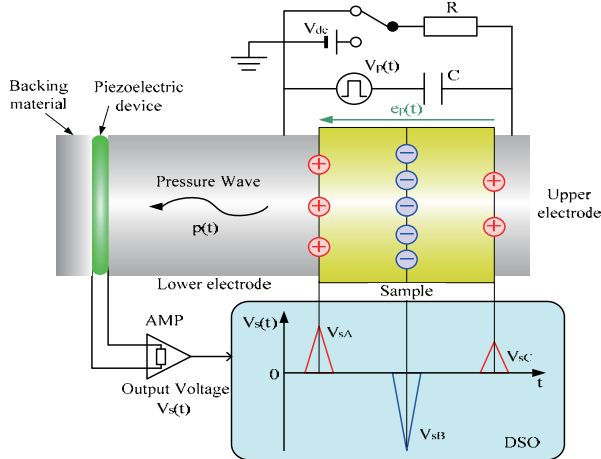


図4 PEA法原理図

4. 測定装置

4-1. PEA測定装置

図5に本測定に用いたPEA測定装置の概略図を示す。測定試料は直流高電圧電源とパルス発生器に接続された上部電極と下部電極で挟むことで、前述に示したパルス静電応力(PEA)法により空間電荷分布測定を行っている。

この測定装置では圧電素子に厚さ17μmのニオブ酸リチウム(LiNbO₃)を用いており、パルス発生器は幅5nsec、電圧値500Vである。したがって、本測定装置の位置分解能は約10μmとなり、厚さ100μm程度以上の試料が測定可能となっている。また、印加可能電圧は最大で19kVである。

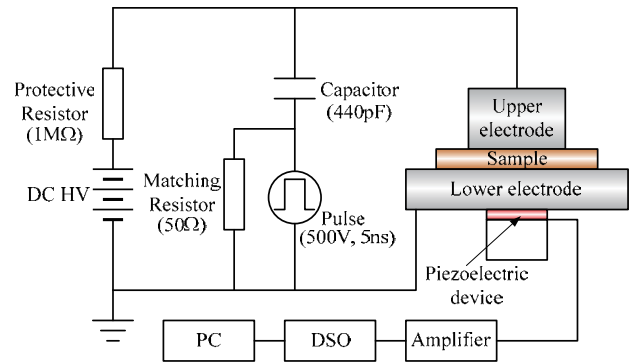


図5 PEA測定装置概略図

4-2. 電子線照射用真空チャンバー

図6に電子線照射用真空チャンバーの概略図を示す。電子線の照射には電子顕微鏡用のタングステンフィラメントを用い、加速エネルギー100keVまでの電子線照射が可能であり、チャンバー内の真空度は約10⁻⁵Paまで到達可能である。

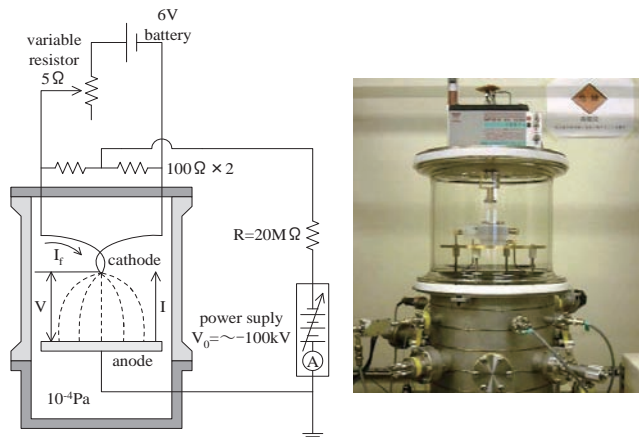


図6 電子線照射用真空チャンバー

5. 測定方法

測定に使用した試料は、厚さ約 125 μm の東レ・デュポン社製 Kapton[®]-H および宇部興産社製 Upilex[®]-S といった 2 種類の PI フィルムである。今回の実験は、真空度を $5.0 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 以下、加速エネルギーを 40, 60, 80keV、電流密度を $30\text{nA}/\text{cm}^2$ 一定として試料に電子線を照射し、その後、負電荷蓄積がほぼゼロになるまで真空中に約 24 時間放置した。その後、PEA 測定装置により、常温で印加電界 100kV/mm、測定時間 60 分間、測定間隔 5 秒間で空間電荷分布測定を行った。

6. 測定結果

図 7, 8-(a)(b)(c)(d)に電子線未照射および加速エネルギー 40, 60, 80keV、電流密度 $30\text{nA}/\text{cm}^2$ 一定の電子線を照射した Kapton[®]-H、Upilex[®]-S を用いて電界 100kV/mm を印加した際の空間電荷分布測定結果を示す。なお、図中の赤線は測定開始 5 秒後、青線は測定開始 60 分後の波形を表している。また、同図中の縦の破線は(1)式のフェーザの実験式から算出した電子の最大飛程を表している。

$$R=4070 \times E^{1.38} \quad (1)$$

この実験式はアルミニウムを実験対象として導かれた式であり、今回の試料に適応させるためには、Kapton-H[®]、Upilex[®]-S の密度($\rho=1.42\text{g}/\text{cm}^3$)で除す必要がある。

図 7-(a)より、電子線未照射の Kapton[®]-H に電界 100kV/mm を印加すると、印加開始直後に Anode, Cathode 側にヘテロ電荷の蓄積が見られ、時間が経過するに伴い、その蓄積量は減少していることがわかる。しかし、同図(b)(c)(d)より、加速エネルギー 40, 60, 80keV の電子線を照射した場合には同図(a)で観測されたヘテロ電荷の蓄積位置とほぼ同じ位置で同様な蓄積が見られるが、電子線照射試料の方がその蓄積量は大きく、時間経過に伴いその蓄積量は増加していることがわかる。

図 8-(a)より、電子線未照射の Upilex[®]-S に電界 100kV/mm を印加すると Anode, Cathode 側に微量なヘテロ電荷の蓄積がみられることがわかる。また、同図(b)の加速エネルギー 40keV の電子線を照射した場合には電子線未照射試料で見られたヘテロ電荷の蓄積が見られず、試料内部に顕著な電荷蓄積は見られないことがわかる。しかし、同図(c)(d)より、加速エネルギー 60, 80keV の電子線を照射した場合には、電子の最大飛程の範囲内で 60keV においては約 $100\text{C}/\text{m}^3$ の正電荷の蓄積、80keV においては約 $130\text{C}/\text{m}^3$ の正電荷および約 $100\text{C}/\text{m}^3$ の負電荷の蓄積が見られることがわかる。

図 7, 8 より、電子線を照射したことにより、Kapton[®]-H、Upilex[®]-S とともに電子線未照射試料とは空間電荷形成が顕著に異なっており、電気的特性が変化したことがわかる。これは、電子が通過した領域で RIC(放射線誘起伝導)が生じ

ためキャリアが発生し、電界を印加したことでその電荷蓄積が分極したと考えられる。これに関しては伝導電流においても変化が現れると考えられ、今後、導電率測定を行うことで明確にしていく必要がある。また、Kapton[®]-H と Upilex[®]-S の測定結果を比較すると、Kapton[®]-H では電子の最大飛程を超えた位置でも電荷の蓄積が見られるのに対し、Upilex[®]-S では電子の最大飛程の範囲内で電荷の蓄積が見られた。これは、Kapton[®]-H では電子線を照射したことにより発生したキャリアが移動しやすく、電子が通過していない領域においても電荷が蓄積したと考えられる。それに対し、Upilex[®]-S ではそのキャリアが移動しにくく、電子が通過した領域内で電荷が蓄積したと考えられる。しかし、これは推察であるため今後、詳細に検討していく予定である。

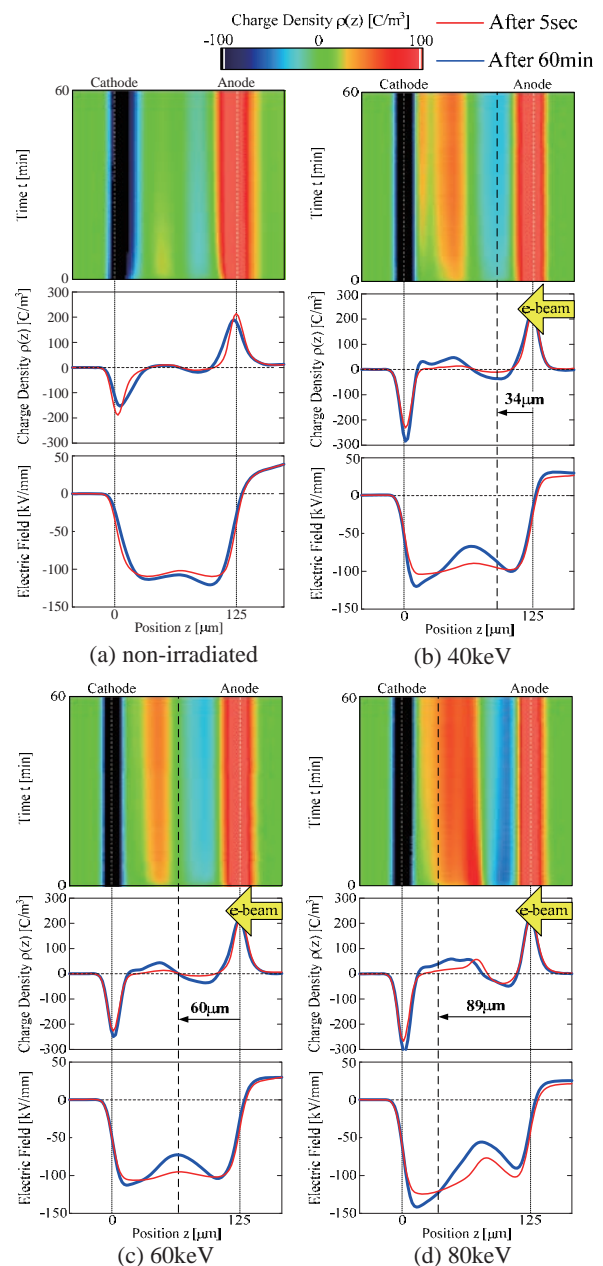


図 7 Kapton[®]-H における空間電荷分布測定結果

- (1) 五家 建夫:「宇宙環境リスク事典」 丸善 pp.131-134 (2006)
- (2) 田中 宏樹、田中 康寛、富田 信之、高田 達雄:
電学論 A, Vol.121, No.2 pp.143-148 (2001)
- (3) 電気学会技術報告書 第 834 号 (2001)
- (4) 放射線取扱技術、日本原子力産業会議、p.138 (1998)

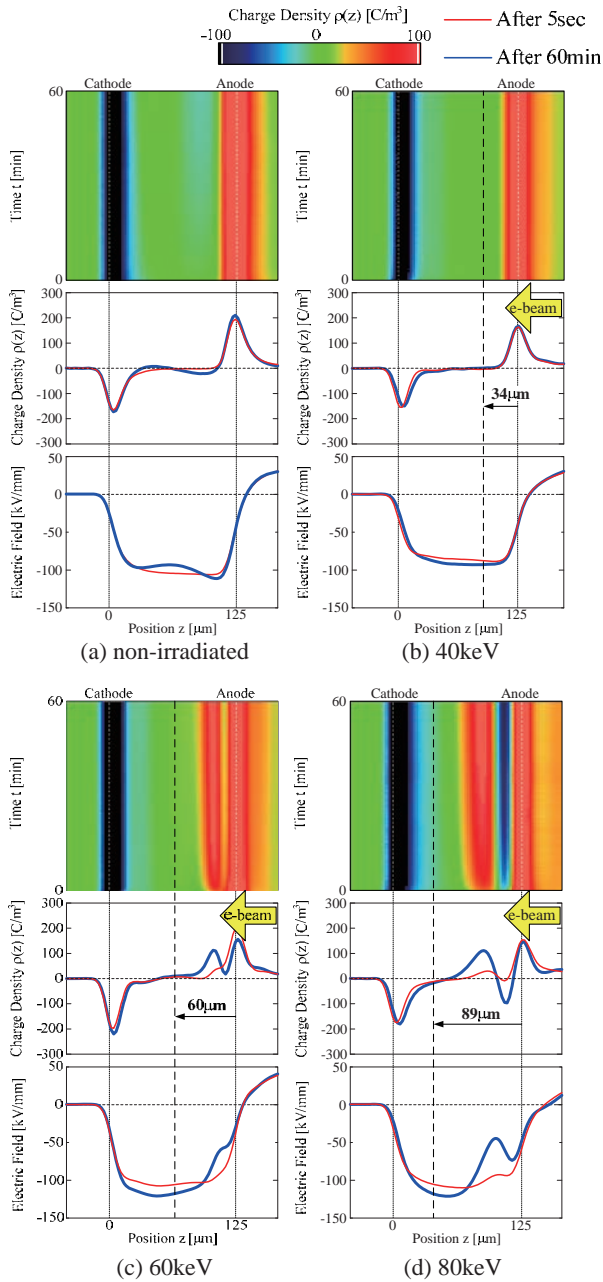


図 8 Upilex®-S における空間電荷分布測定結果

7. 結論

電子線照射絶縁材料における絶縁破壊特性を評価するにあたり、初期段階として電子線を照射した PI フィルムの直流高電圧印加時における空間電荷分布を観測した。その結果、Kapton®-H, Upilex®-S とともに電子線未照射の場合と顕著に異なった空間電荷形成が見られた。したがって、今後、この空間電荷形成の相違が材料の絶縁破壊特性や導電性にどのような影響を及ぼすのか調査していく予定である。