

# 電子線照射絶縁材料の導電率計測

党 巍\*、田原麻衣、田中 康寛、高田達雄、渡邊力夫  
(武蔵工業大学)

## Measurement for Conductivity in Electron-beam irradiated Insulating Materials

Wei Dang, Mai Tahara, Yasuhiro Tanaka, Tatsuo Takada and Rikio Watanabe  
(Musashi Institute of Technology)

### Abstract

Spacecrafts flying in GEO (Geo-synchronous Earth Orbit) are always exposed to plasma and radioactive-rays such as  $\alpha$ -,  $\beta$ - or  $\gamma$ -rays. Especially in GEO, dielectric materials are expected to be irradiated by high energy electron-beam. In the case of high energy electron beam irradiation, the electrons are injected into the bulk of dielectric materials and they accumulate in them. Because there are no basic data based on practical experiments, it is difficult to expect when and how an accident of ESD (erector-static discharge) caused by accumulated charge will happen on spacecraft. Therefore, we need to measure the charge distribution in the bulk of dielectric materials. We have been developing a system for measuring such a charge distribution in dielectric materials using, so-called, PIPWP (Piezo-induced pressure wave propagation) method. However, the spatial resolution was low and it was difficult that the space charge distribution measurement in the material used with actual spacecrafts. To obtain a good experiment result, we must use the PEA (Pulsed Electro-Acoustic) method. It is necessary to develop a new PEA measurement system, for a real-time, continuous measurement to secure reliability while irradiating the sample. In this report, It introduces a small, real-time Space Charge Measurement System using PEA method.

**Key words:** space charge, PEA method, electron beam.

### 1. はじめに

近年、環境観測衛星「みどり II」や火星探査機「のぞみ」の電源系や回路系などの故障が、太陽フレアによって放出された宇宙線にあったとの原因報告がなされており、宇宙線による絶縁体の帯電・放電現象の観測・評価が要求されている。そのためには、宇宙環境を模擬し、絶縁材料中に帯電した電荷の分布や帯電、放電の過程を調査することが必要である。

また、われわれの研究室では、比較的低電圧(~100kV)の電子線を試料に真空中で照射できる小型チャンバと電子線を照射しながら電荷分布を測定する圧力波 (Pressure Wave Propagation: PWP) 法による測定装置があるが、PWP法では、試料が直接信号検出用の増幅器に接続されているため、絶縁破壊や放電などをともなう電荷分布測定は困難である。一方われわれの研究室で開発された静電応力 (Pulsed Electro-Acoustic: PEA) 法では、試料と測定系が分離されており、絶縁破壊や、放電をともなう現象の観測に適している。そこで、絶縁破壊や放電をともなう電荷分布測定を行うために、電子線照射しながら電荷分布を測定できる PEA 装置の開発が必要となる。

開発する PEA 測定システムは一般的な PEA 装置と比べ、照射中に測定するために上部電極に照射用窓を開ける必要があり、また、真空チャンバに入れるために小型でなければならない。また、PEA 法は測定が容易で電氣的雑

音に強いという特徴があるが、絶縁破壊をともなう現象を観測するためにはノイズ遮断シールド技術を用いて、できるだけノイズを削減する必要がある。

本研究では以上の注意点を検討して新たな PEA 装置を設計、製作し、電子線照射中の絶縁材料内に蓄積する電荷の分布および電子線照射後の試料内部導電率変化の測定を行った。

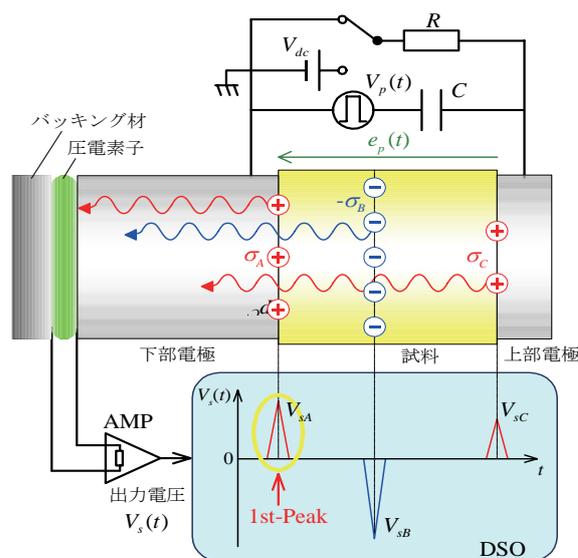


図 1. PEA 原理図

## 2. PEA 法の原理

図 1 にパルス静電応力法 (PEA 法) の原理図を示す。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氣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。

また、信号検出部が試料と電氣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や、ステップ電圧印加時や交流電圧印加時の測定にも使用できることが大きな利点である。

## 3. 測定装置の評価

パルス幅を 5ns とし、高電圧を 0.5, 1, 1.5, 2kV と変化させて測定を行った。図 2 に真空中で高電圧を 0.5kV~2kV まで変化させたときの参照信号を示す。図 3~図 6 に各高電圧をかけたときの大気中と真空中における電荷密度、電荷密度の peak 値、電界分布と電位分布と印加された電圧の関係を示す。

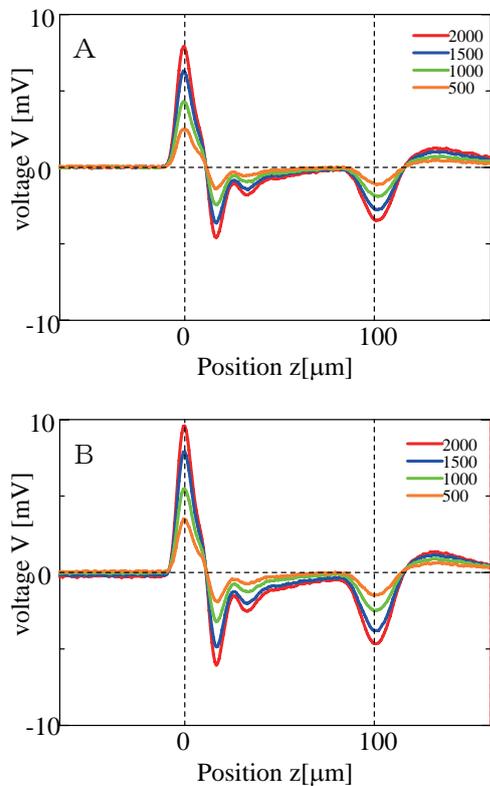


図 2 電圧信号. A : 大気中、B : 真空中

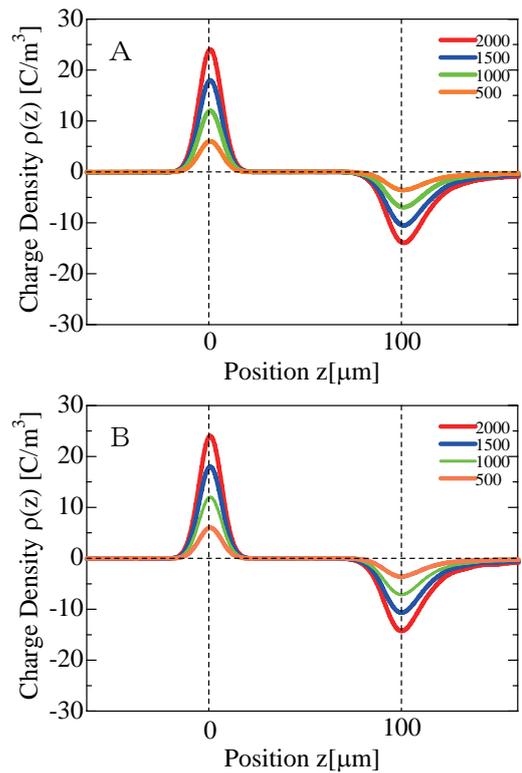


図 3 電荷密度. A : 大気中、B : 真空中

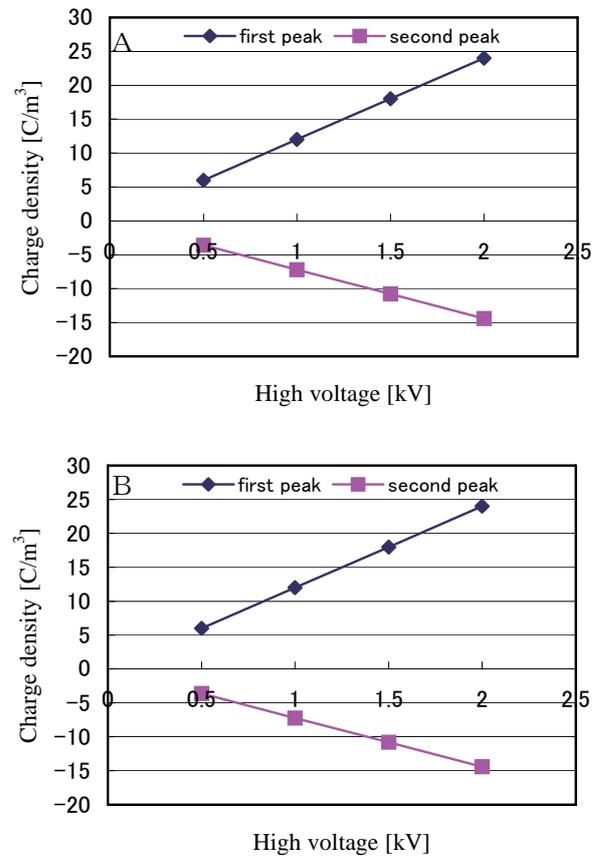


図 4 各電圧における電荷密度の peak 値  
A : 大気中、B : 真空中

大気中、真空中における first peak・second peak の電圧・信号処理後の電荷密度は高電圧にほぼ比例していることがわかる。また、電界・電位も高電圧に比例していることが確認できた。よって、PEA 装置は正しく機能していることがわかった。

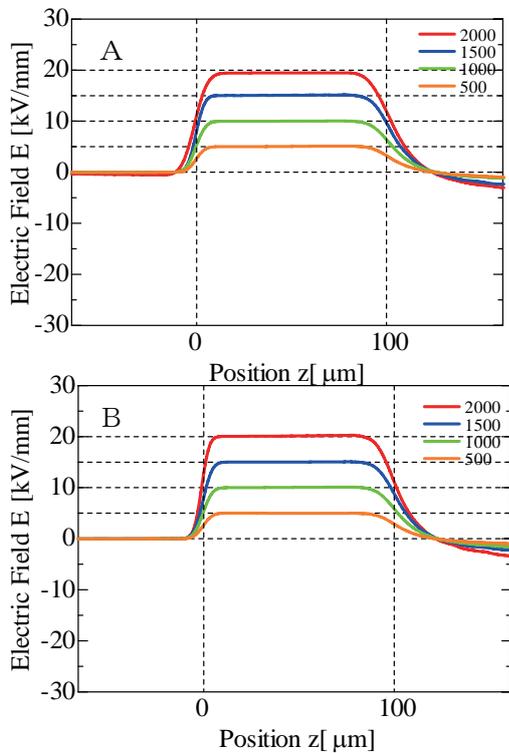


図5 電界分布 A: 大気中、B: 真空中

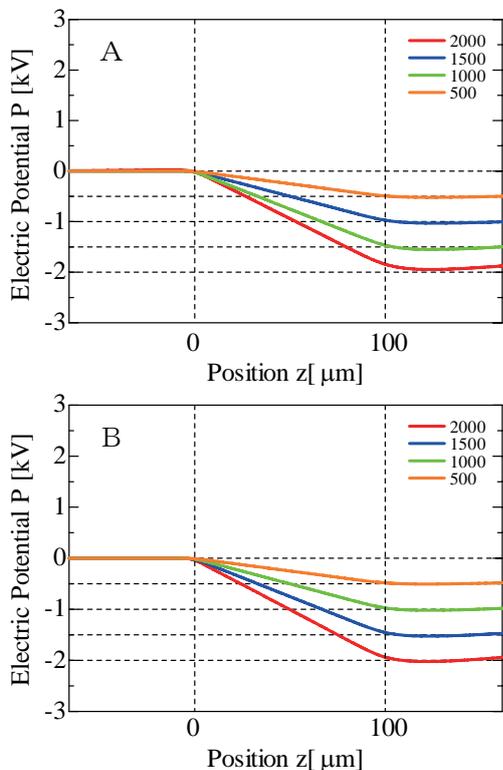


図6 電界分布 A: 大気中、B: 真空中

#### 4. 測定システム

図7に開発された測定装置を示す。この装置には、電子線照射のために上部電極に電子線照射の窓が設置してある。また、本測定装置では、空間電荷分布と放電電流測定を交互に行うために図7に示すようにSWが設置されている。電子線照射中の空間電荷分布測定ではSWにより上部電極を接地して用いる。また、電子線照射後の空間電荷分布と放電電流の交互測定では、SWで上部電極をグランドもしくは電流計に接続する。この装置を用いて、空間電荷分布と放電電流の交互測定を電子線照射後に行った。

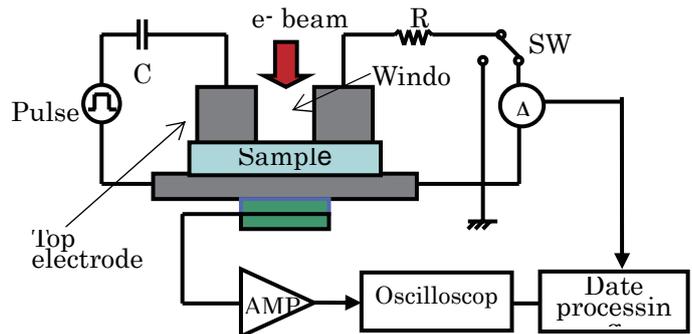


図7. 測定システム

#### 5. 導電率算出

絶縁体の断面積  $S$ 、厚さ  $d$ 、抵抗  $R$ 、抵抗率  $\rho$  とすると

$$R = \rho \frac{d}{S} \quad (1)$$

と表され、この  $\rho$  の逆数が導電率  $\kappa$  [ $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ] である。また、電流密度  $J$  と電界  $E$  を用いて導電率  $\kappa$  は以下のように表される。

$$\kappa = \frac{J}{E} \quad (2)$$

図8にPEA装置の電流の流れを示す。ここで式(2)の電流密度  $J$  は試料内部を電荷が移動することにより発生する電流密度であるから、伝導電流を算出する必要がある。電極に挟まれた試料内部に電荷が蓄積しているとすると、空間電荷が  $\Delta t$  秒後、右に移動すると伝導電流が発生する。また、試料内部は電界が時間的変化するため、変位電流が発生する。電流連続式より以下の関係がなりたつ。

$$J(t) = J_c(x,t) + \varepsilon \frac{\partial E(x,t)}{\partial t}$$

①                      ③                      ②

(外部回路電流=伝導電流+変位電流)

外部回路電流①は電流計を用いて測定できる。(図8)変位電流②は電界の時間微分より求め、電界分布は電荷分布の積分により求めることができるので、PEA法による電荷分布の経時変化測定より変位電流が求まる。式(3)より、伝導電流③を算出できる。また、式(2)より、導電率の式は電流密度  $J$  と電界  $E$  を用いて導電率  $\kappa$  は表される。

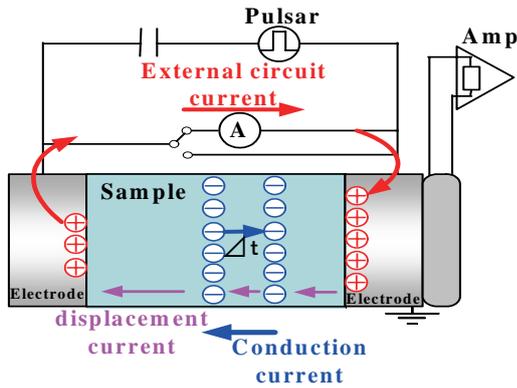


図8 外部回路電流と変移電流と伝導電流の関係

## 6. 測定装置

図9に本研究で使用するPEA装置の概略図を示す。真空状態で、電子線を直接試料に照射することを可能にするため、上部電極に直径8mmの照射孔があいており、電子線照射中の空間電荷分布を測定することが出来る。また、この装置を用いて放電電流を測定するため、外部に抵抗を設置できる構造になっている。

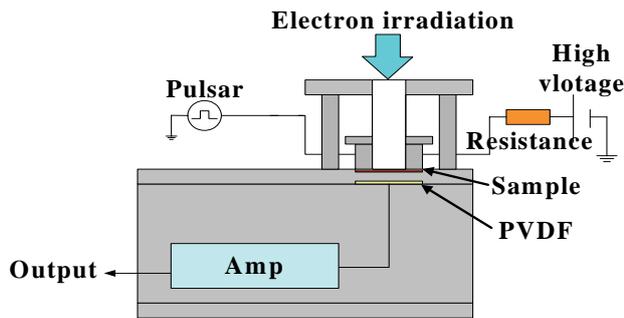


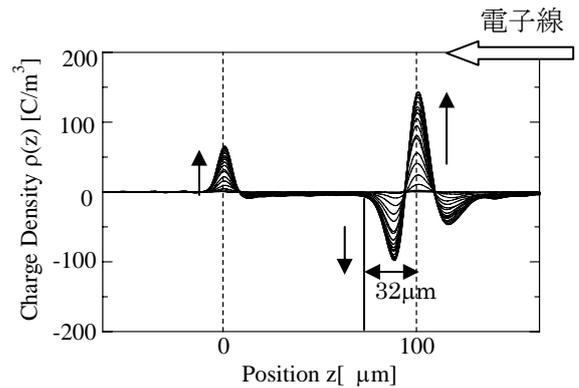
図9 PEA装置のイメージ図

## 7. 実験結果

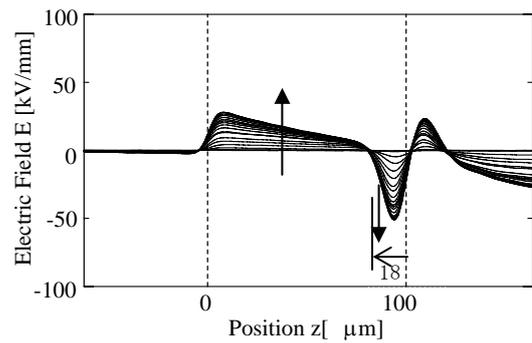
PEA装置を用いて、真空中における電子線照射実験を行い、空間電荷分布測定を行った。また照射後、空間電荷分布測定と同時に放電電流測定を行った。試料にはTeflon® 100 $\mu\text{m}$ を用い、電子線の加速電圧を40keVとして測定を行った。ここでは、電子線照射中20分間、照射後20分間の合計40分間、1分間隔で測定を行った。表1に電子線照射実験の測定条件を示す。また、図10(a)に照射中の電荷分布、図10(b)に照射中の電界分布、図11(a)に照射後の電荷分布、図11(b)に照射後の電界分布、図12に総電荷量、図13に放電電流測定を示す。図10(a)より電子線照射時間が経過するとともに負電荷が照射電極近傍に蓄積し、徐々に増加する様子が観測された。また、蓄積する負電荷の量が増加するとともに電極面上に誘導される電荷の量も増加していることが分かる。

表1 電子線照射実験の測定条件

加速電圧	40[keV]	
電流密度	300nA/cm <sup>2</sup>	
測定時間	照射中	20[min]
	照射後	20[min]
測定間隔	1[min]	



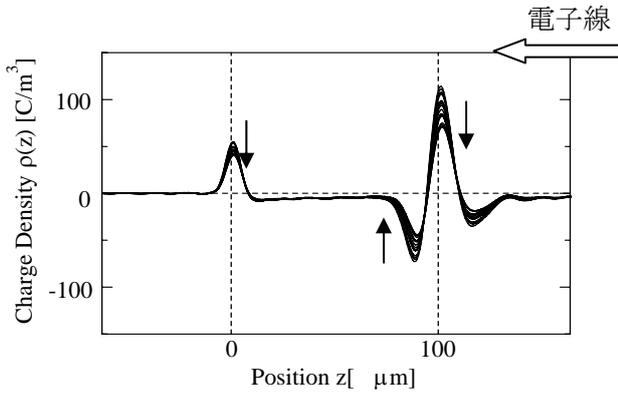
(a) 照射中の電荷分布



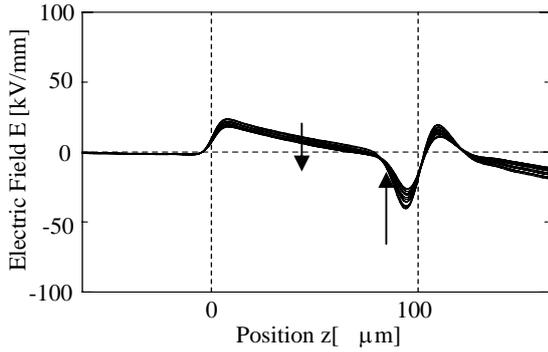
(b) 照射中の電界分布

図10 照射中電荷と電界分布

図10(a)より、負電荷が分布している先端は、照射電極面上から深さ約32 $\mu\text{m}$ であった。また、電荷が蓄積するとともに、試料内部の電界は増加し、照射面側の電界は、電子線照射終了時点では50kV/mmに達していることがわかる。一方、電子線終了後では、図11より明らかのように、負電荷が時間とともに減少し、それにとまない電界が変化していることがわかる。この負電荷の照射時間ともなる増減を確認するために負電荷のピークの部分を深さ方向で積分することにより得た電荷密度総量をプロットしたものが図12(充電時)および図13(放電時)である。図12より、総電荷量の最大値は照射17分後で-1.01mC/m<sup>2</sup>となった。また、図13は、電子線照射終了後の外部電流の時間変化を示している。



(a) 照射後の電荷分布



(b) 照射後の電界分布

図 11 照射後電荷と電界分布

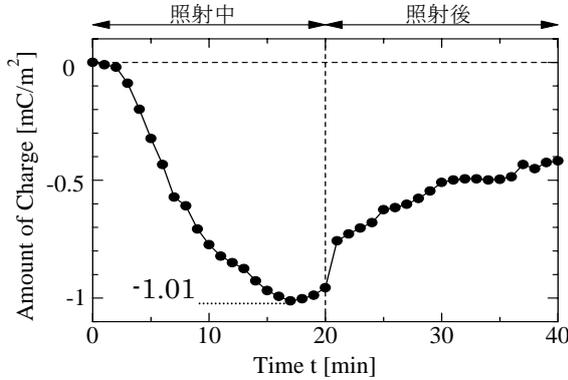


図 12 総電荷量

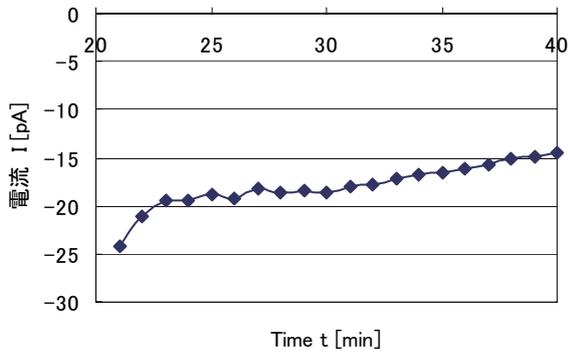


図 13 放電電流

この図より、時間経過とともに電流が徐々に減少していく様子が観測された。なお、電流は正電荷が照射面から流れ出る方向を正としており、今回測定された電流は負の値を示しているため、負電荷が流れ出すことにより電流が生じていると推測される。ただし、観測された電流は外部回路を流れる電流であるため、試料内部の電荷の移動（伝導電流）と、それにとまう両電極上の誘導電荷の変化（変位電流）の和として表される。そこで得られた電荷分布、電界分布、放電電流の結果より、伝導電流の分布を算出し、さらに導電率を算出することを試みた。

試料 Teflon® 100 μm を用いた空間電荷分布測定の結果と放電電流測定の結果より、伝導電流を算出し、さらに導電率を算出した。図 14 に照射後の (a) 電荷分布 (b) 電界分布 (c) 伝導電流 (d) 導電率の結果を示す。

図 14(c) に示した伝導電流より試料内部の伝導電流は同図 (b) の電界分布における電界零面付近を堺に、照射電極側が負、対向電極側が正の伝導電流となっていることが分かる。伝導電流のキャリアは負電荷であると考えられるので、この場合の負の電流は負電荷が照射電極側に、正の電流は負電荷が対向電極側にそれぞれ移動したことを示している。試料内部の伝導電流算出結果から考慮すると、照射面側に流れる電流が対向電極側に流れる電流よりも大きいことが分かる。つまり、照射により蓄積した電荷の多くは照射終了後、照射面側に戻っていることが分かる。

次にこの伝導電流を電界で割ることによって得られた導電率の分布を図 14(d) に示した。ただし、電荷により割り算を行うので電荷が 0 の付近では算出結果が発散してしまうため、電界が  $2E-14$  以上あるいは  $2E-15$  以下の部分は表示せず空白として表した。さらに、伝導電流の値が小さい場合、誤差が大きくなると考えられるので、ここでは、伝導電流、電界ともに比較的大きい領域（図中 A、B）の導電率について考察する。図中 A の領域は導電率が約  $10E-15$  であり、B の領域では約  $6E-15$  である。これを比較すると A の領域の導電率に比べて B の領域の導電率が小さいことが分かる。これ以外の領域でもおおむね、照射面側の導電率は対向電極側よりも大きくなっている。これは電子線照射され、電荷が通過した領域では高エネルギーの電子が通過したことにより、試料に物理的なダメージを与え、導電率が変化したと考えられる。

このような現象は、一般的に RIC (radiation induced conductivity) として知られており、今回の実験結果は RIC が実際に試料内部で生じることを示していると考えられる。しかし、今回の導電率の差は比較的に小さな差であり、今回使用した Teflon® 波電子線照射によって生じる RIC が比較的小さな材料であると考えられる。しかし、今回の実験によって、電子線を照射した試料において、導電率が分布することが確認できた。

## 8. まとめ

PEA 法を用いて、電子線照射用小型な測定器を開発した。さらに開発した装置を用いて、外部回路電流を測定することにより、伝導電流および伝導率を算出する測定システムを提案し、それらの算出を試みた。

### 参考文献

- [1] 藤井, 園田, 西本: 「宇宙環境における帯電放電現象及び材料劣化」  
電学論 A, 113, 9, pp609-617 (1993)
- [2] 電気学会技術報告 第 834 号 pp. 10-13
- [3] 平成 14 年 修士論文高橋聡史  
「宇宙環境下における内部帯電計測装置の開発」
- [4] 前野, 福永, 田中, 高田: 「高分解能 PEA 電荷測定装置における信号処理」  
電学論 A, 115, 5pp. 405-410 (1995)
- [5] 足立, 田中, 高田: 「空間電荷測定 PIPWP 法と PEA 法の比較と電荷量校正」  
電学論 A, 118, 11pp. 405-410 (1995)
- [6] 電気学会技術報告 第 834 号 pp. 6-9

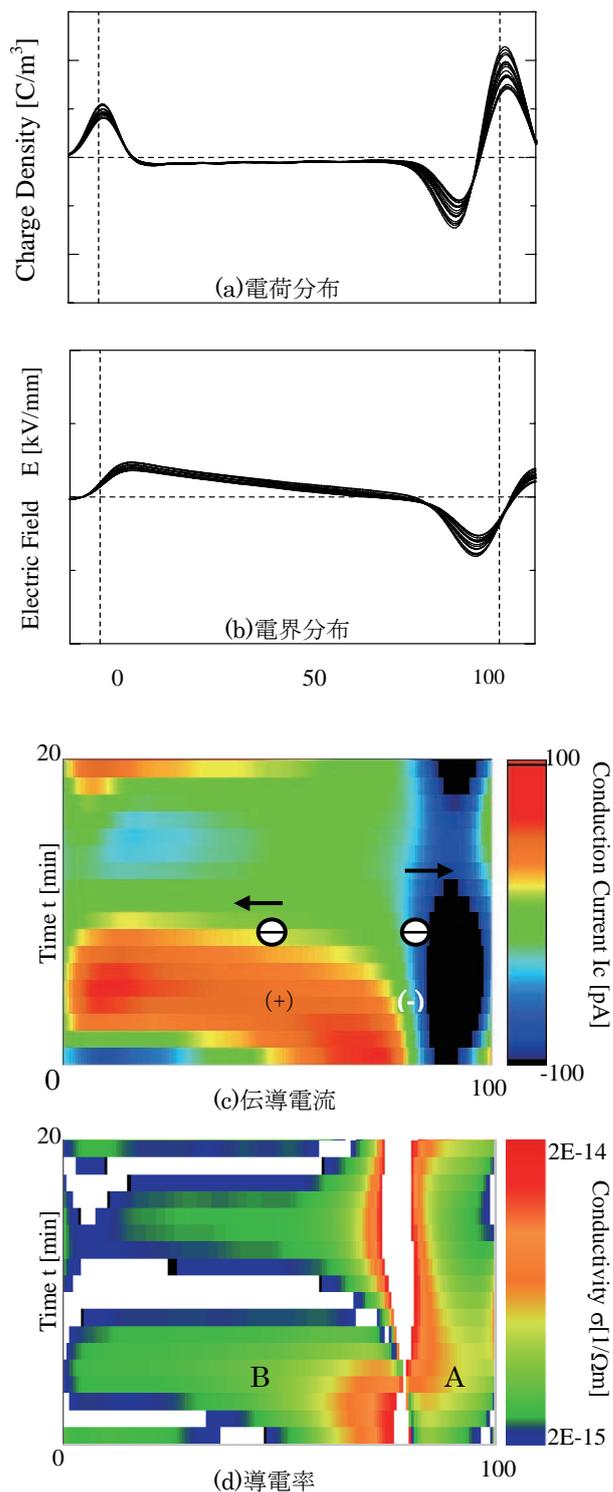


図 14 照射後の測定結果(a)電荷分布 (b)電界分布 (c)伝導電流 (d)導電率