

## 真空中における沿面放電時のリアルタイム帯電分布測定に関する研究

Real Time Measurement of Surface Charge Distributions  
under Vacuum Flashover Events

山納 康, 宮内 康寿, 小林 信一

Yasushi YAMANO, Yasutoshi MIYAUCHI and Shinichi KOBAYASHI

Most studies on flashover events in vacuum have reported that the surface charging on insulator has a great influence on the flashover. However, regarding most studies related to the surface charging, their measurements were carried out after high voltage excitation or flashover events. In this research, the measurement of 2-dimensional surface charge distributions in real time has been carried out in vacuum by Pockels effect. With this measuring method, the charge distributions on a dielectric sample can be measured from the high voltage application to the surface flashover event. This paper describes the changes of the surface charge distributions on a PET film under non-uniform ac voltage application in vacuum. Moreover, using this method, the charge distribution before and after one flashover event on the PET film has been measured.

Keywords: Vacuum, Charge, Flashover, Real time measurement, Pockels effect

## 1. はじめに

真空容器内で導体を固定し絶縁するためには、固体絶縁体が必要不可欠である。しかし、その固体絶縁体の表面に沿って発生する沿面放電が同一距離のギャップ間よりも低い電圧で発生するため、真空機器(真空遮断器、高エネルギー加速器等)の小型化・大電力使用を図る上で問題となっている。現在、沿面放電耐電圧を向上させるために多くの処理が存在するが、実際の沿面放電機構が解明されていないため、それらが適切な処理とは断言できていない。これまでの多くの研究者により、様々な沿面放電機構が提案されているが<sup>[1][2]</sup>、それらの大部分は、陰極におけるトリプルジャンクション(陰極-絶縁体-真空接合部)からの電子放出、電子衝突による絶縁体からの二次電子の発生、そして帯電へと至る過程が沿面放電の発生プロセスにおいて重要であろうという点で一致している。よって、真空

中の沿面放電前後の絶縁体表面の帯電分布特性を調べることがその機構を解明するキーポイントとなっている。

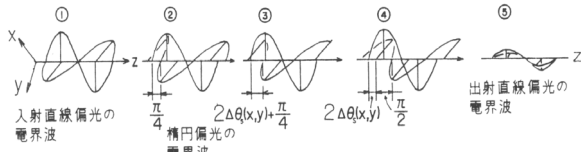
これまでの研究では電圧印加後や沿面放電後の帯電分布特性を測定していた報告はある<sup>[3]</sup>。しかし、現象の解明には電圧印加時の帯電状態を知る必要がある。本研究では、電気光学効果の一つであるポッケルス効果を応用し<sup>[4]</sup>、真空中の絶縁体表面の電荷量とその分布を実時間で測定することを目的とした。この測定法により、放電進展段階における絶縁物上の帯電を把握することが可能となる。この測定法は大気中、ガス中において現在盛んに行われているが、本研究ではそれを真空中における測定に応用した<sup>[5]</sup>。

## 2. 実験装置及び方法

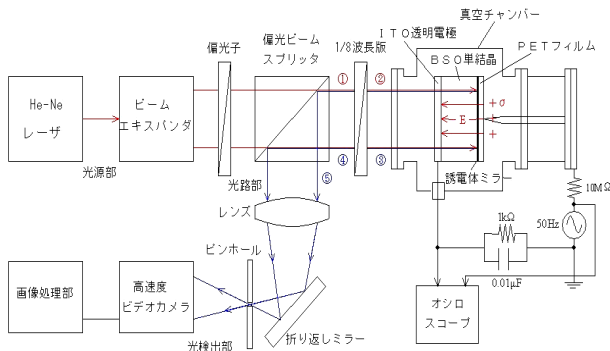
本研究で使用した反射型表面電荷分布測定装置の概略図を図1に示す。試料には、ポッケルス効果を有する誘電体としてBSO( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ )単結晶体、絶縁体としてPETフィルムを用いた。表1にそれぞれの試料の特性を示す。BSOはポッケルス効果を持つため、BSO

表1 試料の特性

	BSO( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ )単結晶	PET フィルム
サイズ	幅 6.2mm×6.2mm, 厚さ 0.5mm	厚さ 0.05mm
比誘電率	56	3.5
比抵抗	$10^{16}\Omega \cdot \text{m}$	$10^{19}\Omega \cdot \text{m}$
感度係数	$15 \times 10^{-13} \text{m/V}$	—



(a) He-Ne レーザの電界波



(b) 実験装置の概略図

図1 反射型表面電荷分布測定装置

内部に電界が印加されると誘電率異方性が発生し、BSO 内部を通過する光に偏光位相差を生じさせる。本研究では、この効果を利用して帯電電荷による BSO 内部の電界を測定し、これを変換することで電荷密度を測定している。BSO の片面には誘電体ミラーが蒸着され、PET フィルムをその上に配置し、その中心に針電極を接触させて、高電圧を印加する。図1に示すように光源として用いた He-Ne レーザ(10mW)の光は、ビームエキスパンダで直径 14 mm に広げられ、偏光ビームスプリッタ(PBS) で直線偏光に(図1の ①)の電界波、以下同様)、1/8 波長板で楕円偏光にされる(②)。その He-Ne レーザの光を真空容器内に配置された BSO に入射し、誘電体ミラーで反射させる。電圧印加による PET フィルム上の帯電によって BSO 内に電界  $E$  が印加されるとポッケルス効果により反射光に偏光位相差  $\Delta\theta$  が生じる(③)。その偏光位相差分のみが偏光ビームスプリッタにより透過され(⑤)、それを高速度ビデオカメラで撮影し、その光強度  $I$  を測定する。ここで、光強度  $I$  と偏光位相差  $\Delta\theta$  の関係は、(1)式で与えら

れる。

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2\left(\Delta\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1)$$

$I_0$ : 入射光強度

(1)式より、光強度の測定により  $\Delta\theta$  が求まる。また、 $\Delta\theta$  が求めれば、ポッケルス効果による(2)式の関係式から、BSO 内部の電界が測定できる。ここで、BSO 内部の電界が、PET フィルム上の帯電によるものと仮定すると、PET フィルム上の表面電荷分布が測定できる。

$$\Delta\theta = \beta E \quad (2)$$

$\Delta\theta$ : 偏光位相差、 $\beta$ : ポッケルス係数を含む定数、 $E$ : BSO 内部の電界

実験は、まず BSO 内部に印加される電界と He-Ne レーザの反射光強度の関係性を求めた。この校正結果を基に、試験容器内を  $10^{-3}\text{Pa}$  台まで排気し、真空中において針電極に交流電圧を正極性から印加した場合の PET フィルム上の電荷密度の変化と電圧・電流波形を同時測定した。また、比較のため同様の試験を大気中でも行なった。

### 3. 実験結果と考察

#### 3-1 印加電圧と He-Ne レーザの反射光強度との関係

図2に示すように、PET フィルム上の帯電の代わりに電極(銀ペーストを塗布)を配置し、電極に電圧を印加することで、電極が配置された領域のみ電界が測定されるかどうかを調査した。その結果を図3に示す。同図より、PET フィルム中心線上に塗布された銀ペーストの領域で印加電圧(印加電界)が測定されていることがわかる。次に、印加電圧と He-Ne レーザの反射光強度の関係性を調査した。図4に印加電圧に対する He-Ne レーザ光の反射光強度の関係性を示す。同図より、本測定系では最小電圧感度  $26.7\text{V/bit}$  で測定されることがわかった。この結果から、PET フィルム上に帯電

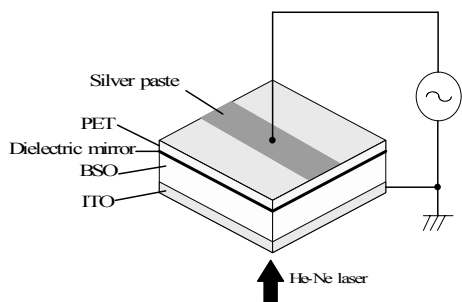
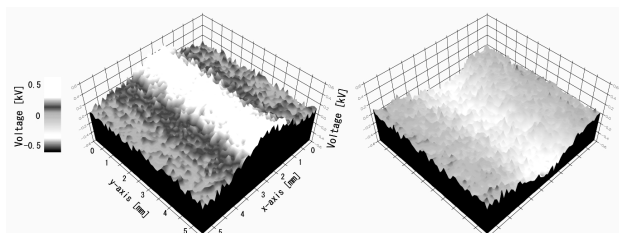


図2 校正用の電極配置



(a) 印加電圧 0.5kV (b) 印加電圧-0.5kV

図3 図2の電極配置での電位分布の測定結果

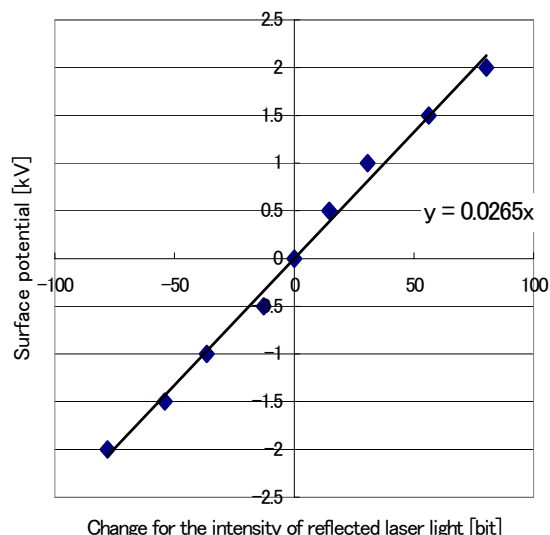


図4 印加電圧に対する反射光強度の変化量

電荷が均一に分布したと仮定した場合、(2)式より最小検知電荷密度が求められ、 $9.7\mu\text{C}/\text{m}^2$ の感度で帯電電荷密度を測定できることがわかった。

$$\sigma = CV/S \quad (2)$$

$\sigma$ : 1画素面積あたりの電荷密度、 $C$ : BSO 試料と PET フィルムの合成静電容量、 $V$ : 印加電圧、 $S$ : 1画素の面積

### 3-2 真空中条件下における正極性電圧印加時からの実時間帯電測定

真空中( $4 \times 10^{-3}\text{Pa}$ )において、針電極に交流電圧(波高

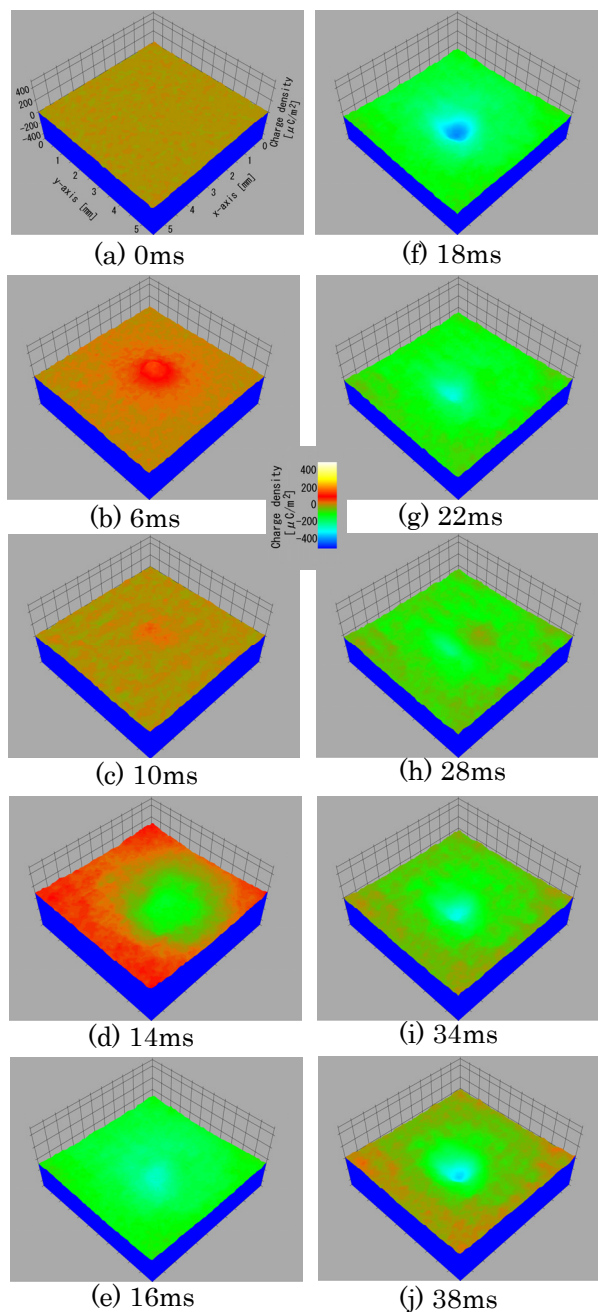


図5 真空中における PET フィルム上の電荷密度の時間変化、(a)~(j)は図6に対応

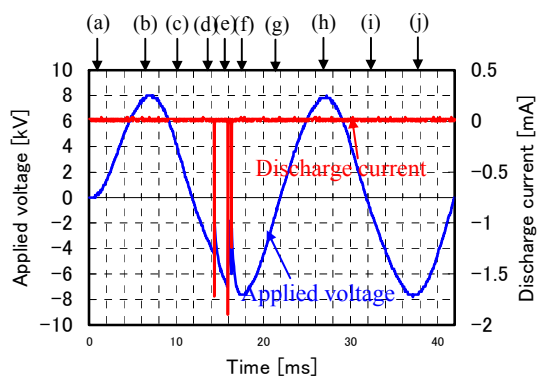


図6 電圧波形と放電電流波形

値:約8kV)を正極性から2サイクル印加した時の PET フィルム上の表面電荷密度の時間変化を図5(a)-(j)に対

応する印加電圧・放電電流波形を図 6 に示す。図 6 より、負サイクルの電圧印加時においてのみ沿面放電が発生している様子が確認された。これは、負極性の電圧が印加されると電圧印加側の針電極が陰極になることから、針電極のトリプルジャンクションで電界強度が非常に高くなる。その結果、その陰極トリプルジャンクション部から電子が放出されやすくなり、沿面放電が発生すると考えられる。

電圧印加からの各時刻における帯電分布を調べてみると、図 5(b),(c)の帯電分布より、正極性電圧印加時では針電極近傍に正の帯電が観測された。同様の結果が文献[3][6]でも観測されている。文献[6]では、このような帯電は陽極トリプルジャンクション部分の電界の強まりにより、局所的に誘電体内の価電子帯における電子が伝導帯へ励起したため、あるいはトリプルジャンクション近傍に存在していた自由電子やトラップ電子の存在によって、正に帯電したものと考えられている。

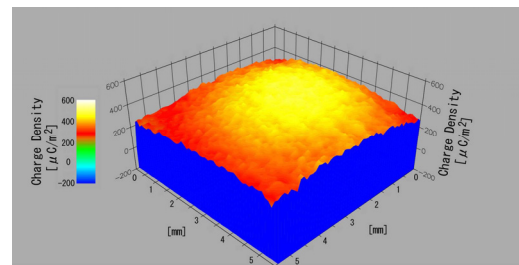
同図(d)の負極性電圧印加時で沿面放電直前では、負電荷だけでなく正電荷が PET フィルム上に分布した。負極性の帯電は針電極が存在する点の近傍に多く帯電しているが、正極性の帯電は周辺に多く帯電している。一方、同図(c)では、針電極近傍に正極性の帯電がわずかに存在しているが、周囲にはほとんど正極性の帯電は存在していなかった。このことから、10msec～14msec の間に何らかの現象が起こり、PET 上の帯電分布が変化したことがわかる。図 6 より図 5(d)の瞬間には、針電極に約 $-4\text{kV}$ の電圧が印加されていること、また、同図(c)においては、針電極近傍に正極性の帯電が存在していたことより、針電極から電子放出が起こったと推測される。これにより、針電極周辺には負極性の帯電が生じたと考えられる。周辺に正極性の帯電が生じた理由は定かではないが、負極性の帯電が生じたことによる針電極周辺の電界分布の変歪によって、2次電子なだれた帯電過程が発生し、正極性の帯電が発生したと推測される。

沿面放電後の図 5(e)では、PET フィルム上のすべての領域に負の帯電が観測された。また、2 サイクル目の負極性電圧印加時においては沿面放電が発生していない。図 5(e)以降の帯電分布において総じて言えることは、2 サイクル目の帯電分布は、PET フィルム全

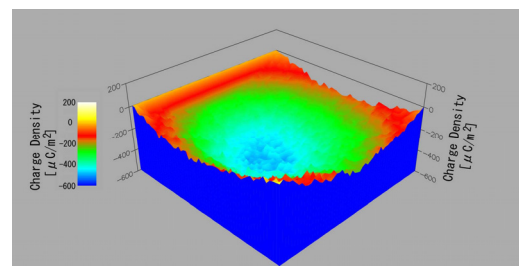
がほとんど負帯電になっている。このようなことから、1 サイクル目に起きた沿面放電によるコンディショニング効果が現れ、絶縁耐力が上昇したと考えられる。

### 3-3 大気中条件下における実時間帯電測定

大気中条件下における PET フィルム上の表面電荷密度分布を図 7 に、対応する印加電圧・放電電流波形を図 8 に示す。図 7(a)より、正極性沿面放電後の帯電分布は、PET フィルム上に正電荷が針電極中心から放射状に分布している様子が観測された。一方負極性沿面放電では、図 7(b)より負電荷が円盤状に分布している様子が確認された。真空中においては、正極性の沿面放電が発生していないので比較はできないが、負極性のときは、大気中では針電極を中心に円錐形に負帯電しているのに対して、真空中においては、PET フィルム全体が負帯電になり、特に針電極近傍で大きく負に帯電する傾向がある。また、真空中においては、放電直前に正極性の帯電と負極性の帯電が混在することが



(a) 6msec (図 8 の(a))



(b) 16msec (図 8 の(b))

図 7 大気中における PET フィルム上の電荷密度の時間変化

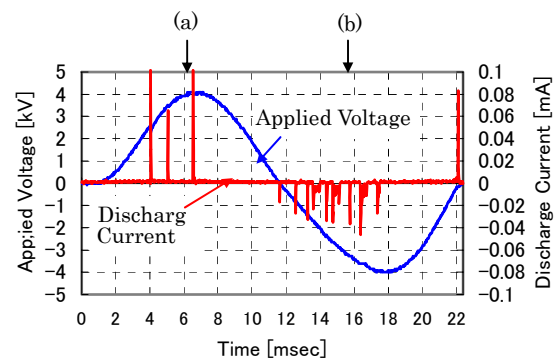


図 8 印加電圧波形(50Hz)と放電電流波形

あるが、大気中ではそのようなことは無かった。放電電流の大きさも真空中と大気中では異なっていた。以上より、真空中と大気中の沿面放電時の帯電分布には、明らかな相違があり、これは沿面放電のメカニズムの違いによるためであると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果は、以下のように要約できる。

- ・ポッケルス効果を利用して真空中において絶縁体表面上の電荷量とその分布を実時間で測定することが可能となった。
- ・真空中における負極性の沿面放電直前の帯電分布は、正極性の帯電と負極性の帯電が混在していることがある。
- ・真空中において負極性の沿面放電後の帯電分布は、負極性の帯電が全面に生じ、特に針電極近傍に多く帯電した。
- ・真空中と大気中の条件下で沿面放電直前・直後の帯電分布を比較したところ、明らかに違いが観測された。

なお、本研究の一部は、平成13, 14年度文部科学省科学研究費奨励研究(A)(課題番号 13750241)および平成

15年度文部科学省科学研究費若手研究(B)(課題番号 15760191)および平成15年度埼玉大学教育改善推進費(学長裁量経費)による支援を得て行われた。

#### 参考文献

- [1] H. Craig Miller: "Surface Flashover of Insulators", *IEEE Trans. Elect. Insul.*, **Vol.24**, No.5, pp.771-772, 1998
- [2] R. V. Latham: "High Voltage Vacuum Insulation", Academic Press, London, pp.300-303, 1995
- [3] Y.Yamano, A.Ohashi, K.Kato, H.Okubo, Y.Hakamata: "Charging Characteristics on Dielectric Surface by Different Charging Processes in Vacuum", *IEEE Trans. Diel. Elect. Insul.*, **Vol.6**, No.4, pp.464-468 (1999)
- [4] 川崎俊之: 「電気光学効果を応用した誘電体表面電荷分布の測定に関する研究」、武蔵工業大学博士論文、1993
- [5] Y.Miyauchi, Y.Yamano, S.Kobayashi, Y.Saito: "Real-Time Measurement of Surface Charge Distributions on Insulating Films under AC Electric Field in Vacuum by Pockels Effect", Proc. of 2003 J-K Joint Symposium on ED and HVE, pp.69-72 (2003)
- [6] Tumiran, M.Maeyama, H.Imada, S.Kobayashi, Y.Saito: "Flashover from Surface Charge Distribution on Alumina Insulators in Vacuum", *IEEE Trans. Diel. Elect. Insul.*, **Vol.4**, No.4, pp.400-406 (1997)