

真空沿面放電時のトリプルジャンクションにおける電子放出箇所の微視的観測

Local Area Observation of Electron Emission Site at Triple Junction in Vacuum Surface Flashover Events

工学部 電気電子システム工学科 山納 康

Dept. of Electrical and Electronic Systems, Yasushi Yamano

1. はじめに

真空機器の小型化、大電力化使用を図る上で固体絶縁物表面に発生する沿面放電が問題となっている。一般的に真空沿面放電は、絶縁体表面の帯電がその進展に大きく影響を及ぼすと考えられている。

真空中の沿面放電機構においては大きく三段階に大別ができる。まず、初期段階は、陰極からの電子の供給であり、これは陰極と絶縁体と真空の三重点（以下、「陰極トリプルジャンクション」と呼ぶ。）が電気絶縁上において弱点であり、ここから電子が供給されると考えられる。特に陰極と絶縁体との接合が不完全で間隙がある場所で、電界が強められ電子放出が生じると考えられている。中間段階としては、これまで様々な説が提唱されているが、多くは陰極から放出された電子と絶縁体とで相互作用が起こり、二次電子放出現象、帯電現象および吸着ガスの脱離現象が相俟って起こっていると考えられている。そして最終段階では、主に放出されたガス中で荷電粒子の増殖が起こり、放電に至ると考えられている。ここで中間段階は沿面放電の進展にとって重要であり、絶縁体上の帯電が電子の挙動や二次電子放出特性、さらに脱離ガス特性にも影響を及ぼすと考えられるため、沿面放電時における絶縁体表面の帯電メカニズムの解明が求められている。

このような背景のもと本研究では真空中の沿面放電時における絶縁物上の帯電分布をリアルタイムに測定することに成功している⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。これにより、真空中の沿面放電前後における絶縁体上の帯電分布の様子が明らかになった。今後、より一層の沿面放電メカニズムを解明するには、その開始段階であるトリプルジャンクションからの電子放出箇所を特定する必要がある。本研究では、これまで培われてきた測定技術を更に高度化することで、トリプルジャンクション近傍における絶縁体上の帯電の様子を調べることで電子放出箇所を特定することを試みている。ここでは、その開発段階で帯電測定の高度化のためのノイズの低減策について報告を行う。

2. 帯電測定方法

本研究では、ポッケルス効果を応用する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ポッケルス効果とは、圧電気現象を示す結晶にのみ生じる特殊な電気光学効果のひとつである。自然の状態では誘電率異方性を示さないが、誘電体に外力を作用させるとそれにともない誘電率異方性が発生し、透過光に偏光位相差を生じさせる。ここで、外力が電界であるときに電気光学効果であり、その誘電体に光を入射させ、電界印加により生じた透過光を測定し、その誘電体の透過光に生ずる偏光位相差 $\Delta\theta$ が、印加電界の強さ E の一乗に比例するとき、この電気光学効果をポッケルス効果という。また、そのような効果を示す素子をポッケルス素子と呼ぶ。本測定法では、この効果を利用して帯電電荷によって生ずるポッケルス素子内部の電界を測定する。

本実験では、後述するように絶縁体としてPETフィルムを、ポッケルス素子としてBSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)単結晶を用いる。本実験での帯電はPETフィルム(厚さ 50 μm)上に生じると仮定し、PETフィルムおよびBSO素子(厚さ 0.5mm)が薄く、また、その反対側の光学用ガラス上には接地されたITO電極が配置されていることから、帯電電荷から発生する電界はBSOへの垂直成分が支配的であるとみなす。更

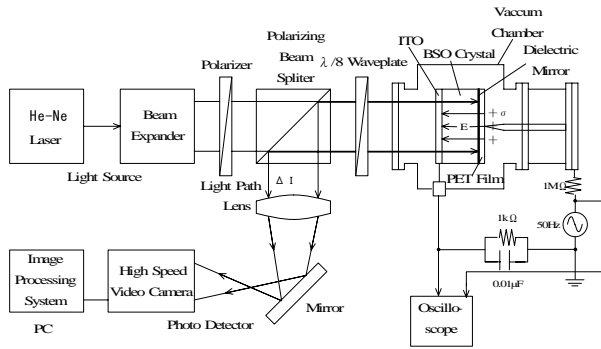


図 1 実験装置の概略

表 1 ポッケルス素子と PET フィルム

	BSO(Bi ₁₂ SiO ₂₀) Crystal	PET Film
Length×Width	6.2mm×6.2mm Square	15mm×15mm Square
Thickness	0.5mm ^t	0.05mm ^t
Relative permittivity	56	3.5
Volume resistivity	10 ¹⁶ Ω·m	10 ¹⁹ Ω·m
Pockels coefficient	γ ₄₁ =5×10 ⁻¹² m/V	—

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(2)式に示すようにポッケルス効果によって反射光に偏光位相差 $\Delta\theta$ が生じる。

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

β はポッケルス係数を含む定数である。

BSO 素子からの反射光は偏光ビームスプリッタにより、直線偏光の光学軸と 90° なす成分が高速ビデオ側に導かれ、高速ビデオカメラで検出される。光強度 I と偏光位相差 $\Delta\theta$ の関係は、次式で与えられる。

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2\left(\Delta\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 I_0 : 最大入射光強度である。 $\Delta\theta$ が 0 ならば偏光ビームスプリッタにより透過する光強度は、 $I/I_0=0.5$ となり、帯電によって生じた偏光位相差 $\Delta\theta$ によって、その光強度が 0.5 から変化する。(3)式と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。さらに(1)式で 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ことになる。

3. 実験装置

本研究で使用した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 (Bi₁₂SiO₂₀) 単結晶体、絶縁体試料として 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。使用した BSO 単結晶のサイズは、光学的有効面積が 6.2mm×6.2mm で、厚さが 0.5mm^t のものを使用した。BSO の片面には、He-Ne レーザ光反射用の誘電体ミラーが片面に蒸着されている。更に絶縁体としての PET フィルムがその上に配置され、そのほぼ中心に高電圧が印加される針電極を接触させる。BSO 素子は、それを機械的に補強するための光学用ガラス(BK7)上に光学用接着剤で固定されている。光学用ガラス上にはアース電極用の ITO が蒸着されている。ITO の膜厚は、約 20nm でその抵抗値は約 80Ω/□である。

に高速度ビデオカメラの測定画素内で帯電電荷密度が一定であると仮定すると、表面電荷密度は次式で表される。

$$\sigma = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 σ は表面電荷密度、 ϵ_r は BSO の比誘電率、 ϵ_0 は真空の誘電率、 E は BSO 内の電界である。

図 1 に本実験の概略図を示す。同図に示すようにビームエキスパンダで拡げられた He-Ne レーザ光は、偏光ビームスプリッタ(PBS) で直線偏光に、1/8 波長板で楕円偏光にされる。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。再び 1/8 波長板を通過することで、He-Ne レーザの光は BSO 内で偏光位相差が生じなければ円偏光になる。電圧印加による PET フ

光源としては、He-Ne レーザ（波長 632.8nm、出力エネルギー10mW、ビーム径 0.68mm）を利用し、これを 20 倍のビームエキスパンダで拡大している。受光部としては、高速度ビデオカメラ（フォトロン社製 FASTCAM-NET）を用いる。撮影条件は、撮影速度 500 コマ/秒、シャッター速度 1/20000 秒、素子の解像度 512（横）×240（縦）ピクセル、256 濃度階調である。

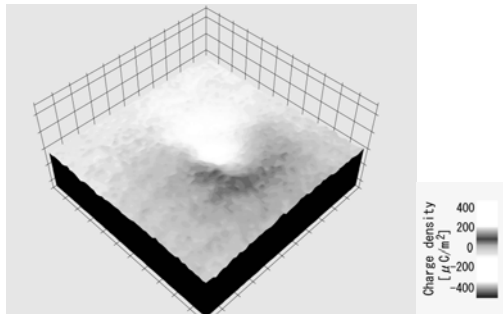


図3 真空沿面放電時の帯電分布の一例

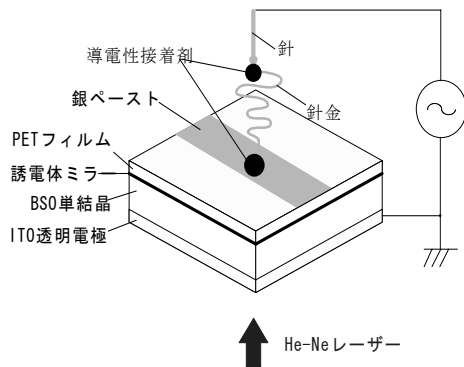


図4 表面電位確認用の電極配置

なお、同図の中心付近の電位は、1.5kV 程度を示しており、1kV よりも高い値が表示されているが、これについてはポッケルス素子の電位測定校正することで正確な電位に修正することが可能である（ここでは校正できていない）。本研究では、帯電測定を正確にする必要があるため、このようなノイズを低減する策を講じる必要がある。

このようなノイズの原因として、光学系における不要な光学ノイズが挙げられる。BSO ポッケルス素子に電界が印加されていないときの図 1 の高速度ビデオカメラで撮影された反射光画像の様子を図 7 に示す。図 8 に図 7 の白線（a）～（b）間の光強度の様子を示す。図 7 および図 8 から明らかなよう

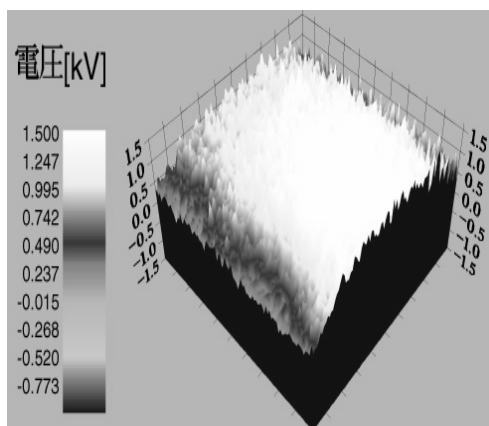


図5 PET 上の 2 次元表面電位分布

4. 実験結果

図3にこれまでの本測定装置で観測された真空中における絶縁体 (PET) 上の帯電の様子を示す。同図は、縦横 6.2mm×6.2mm 上の PET フィルム上の帯電電荷分布である。このとき高電圧電極は、PET 上の中心にあり、そこから帯電の変化が確認できる。しかしながら、同図でも確認できるが、帯電分布にはノイズ成分が含まれている。そこで図4に示すような電極配置で、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5に示す。印加電圧は、1kV である。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が測定されており、BSO 内の電界が測定されていることがわかる。図6に図5の断面図を示す。同図において、中心部分には銀ペーストが塗布されており、1kV の電位が測定されなければならない。しかしながら、測定データでは、電位は一定になっておらず、かなりのノイズが含まれ

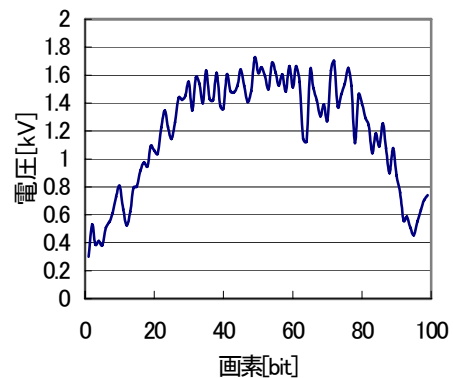


図6 PET 上の表面電位断面図



図8 反射光画像

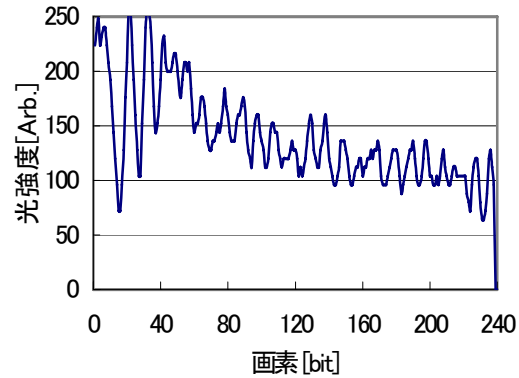


図9 光強度 (図8の(a)~(b)間)

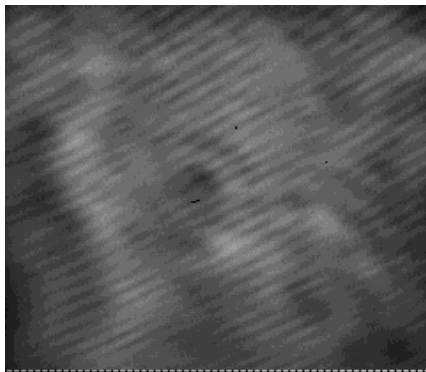


図9 改良後の反射光画像

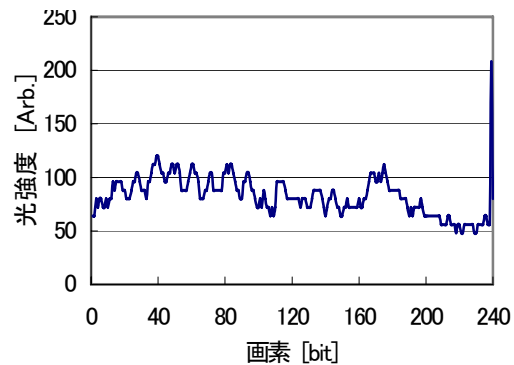


図10 改良後の光強度 (図9の(a)~(b)間)

に、反射光画像には干涉縞が確認できる。この干涉縞の原因としては、ポッケルス素子における BSO と ITO の界面および補強用の光学ガラスでの多重反射や真空容器の光学窓における反射が考えられる。そこで、真空容器の光学窓を反射防止膜付きのものに交換し、さらに図 1 の光学系で高速度ビデオの前段にピンホールを挿入することで干涉縞の抑制を試みた。これらの対策は何れも不要な反射光の除去のためである。図 9 にこれらの対策を講じたときの反射光画像を、図 10 に図 9 の白線 ((a)~(b)間) の光強度の様子を示す。図 9 から、干涉縞はかなり抑制されていることがわかる。また、図 10 から光強度の振幅が小さくなっていることがわかる。

今後は、これらの光学系を用いて、図 4 の電極系を用いて PET 上の電位が正確に検出できるか検証する予定である。

本研究の成果と参考文献

- (1) Y.Yamano, Y.Miyauchi, S.Kobayashi, Y.Saito : "Measurement of Surface Charge Distributions on Insulating Films under AC Electric Field in Vacuum by Pockels Effect", *Proc. of Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, pp.660-663, 2002
- (2) 山納康, 小林信一, 齊藤芳男 : 「真空中における沿面放電前後の絶縁物上の帯電測定」, 2004 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, p.445(2004)
- (3) 宮崎将宏, 山納康, 小林信一, 齊藤芳男 : 「真空中における沿面放電現象と絶縁物上の帯電分布の時間変化」, 2005 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, p.35(2005)
- (4) 山納康, 宮内康寿, 小林信一, 齊藤芳男 : 「真空中における PET フィルム上沿面放電時の実時間 2 次元帯電分布測定」, 電気学会論文誌 A (投稿中)
- (5) T.Kawasaki, T.Terashima, S.Suzuki, T.Takada, "ac surface discharge on dielectric materials observed by advance Pockels effect technique", *J. Appl. Phys.*, **Vol.76**, No.6, pp.3724-3729 (1994)
- (6) 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