

ポッケルス効果を用いた光学計測法による 表面帯電分布測定

日月 應裕*, 西巻 竜太, 田中 康寛, 三宅 弘晃, 高田 達雄 (武蔵工業大学)

Measurement of surface discharge by Optical method using Pockels effect

Masahiro Tachimori, Ryuta Nishimaki, Yasuhiro Tanaka, Hiroaki Miyake, Tatsuo Takada
(Musashi institute of technology)

1. はじめに

宇宙機表面に用いられる絶縁材料はプラズマや電子線、プロトンなどの過酷な宇宙環境に曝されると、帯電し、沿面放電が発生する。この沿面放電が発生することによって機器の誤動作や劣化・破壊を引き起こす恐れがある。これを抑制するための帯電防止策を考案には絶縁材料上における沿面放電の解析が必要となる。そこで、本研究では、ポッケルス効果を有するBSO結晶（酸化ケイ素ビスマス）を用いた光学的手法により、沿面放電を観測する手法を開発してきた⁽¹⁾。この手法は、表面電荷によるストリーマ進展の2次元分布を経時的に非破壊・非接触で測定できる利点を有する。そこで、我々は、この手法を利用して、誘電率の違う4種類の絶縁材料上における沿面放電現象の測定を行い、絶縁材料による沿面放電現象の違いを調査したので、以下に報告する。

2. ポッケルス効果を用いた表面電位分布測定原理

ポッケルス効果とは、電気光学効果の一種で、誘電体内部の電界に比例して誘電体の誘電率に異方性が生じる現象である。本測定では、ポッケルス効果を示す誘電体として、BSO結晶を使用している。図1はポッケルス素子に電界が生じている際に、誘電率異方性が発生し、偏光位相差が生じる様子を示している。BSO結晶表面に電荷が帯電すると表面電荷によってBSO結晶内部に電界Eが発生し、結晶内部においてx方向とy方向の比誘電率 ϵ_{rx} , ϵ_{ry} に差が生じる。このとき、結晶に直線偏光を入射すると、結晶内部における入射電界波のx方向およびy方向成分の速度は、それぞれ $c/\sqrt{\epsilon_{rx}}$, $c/\sqrt{\epsilon_{ry}}$ となり、両電界波の間に速度差が生じるため、透過電界波には偏光位相差 $\Delta\theta$ が発生する。この偏光位相差 $\Delta\theta$ と内部電界の結晶の厚さ方向成分Eの関係は次式で表される。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \int_0^d E \, d \quad (1)$$

n_0 : 常光線複屈折率, γ_{41} : ポッケルス定数

ここで、表面電荷による電界Eが結晶の厚さ方向に一定であるとみなせる場合、(1)式は(2)式のように表せる。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \int_0^d E \, d = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} V \quad (2)$$

V: 表面電位

一方、図1のような複屈折を示す素子を、透過光軸を互いに直交に配置した偏光子、検光子（直交ニコル系）間に挿入すると、偏光位相差 $\Delta\theta$ に応じて検光子を透過する光強度が変化する。一般に最大光強度 I_0 、透過光強度Iおよび偏光位相差 $\Delta\theta$ の間には次のような関係がある⁽³⁾。

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta\theta}{2} \quad (3)$$

したがって、最大光強度分布 $I_0(x,y)$ 、透過光強度分布 $I(x,y)$ を測定することにより、BSO結晶の表面電位分布 $V(x,y)$ を求めることができる。ただし、本光学系は反射型であり、透過型に比べ、2倍の位相差が発生するため、本質的に発生した位相差 $\Delta\theta$ は一般に(4)式のようになる。

$$I = I_0 \sin^2 \Delta\theta' \quad (4)$$

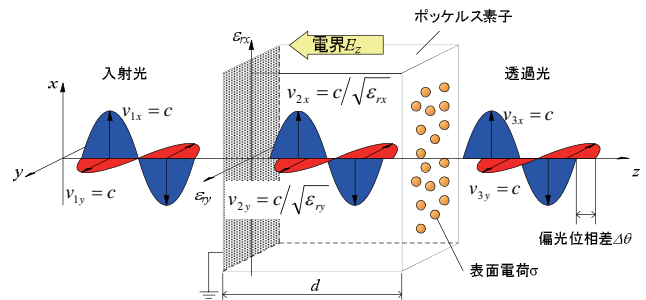


図1 ポッケルス効果により生じる偏光位相差

4. 測定条件

沿面放電は印加する電圧の極性によって、その放電形状が大きく異なる特徴を有するため、針電極に図2に示す振幅5kV、周波数20Hzの交流電圧を印加することによって、絶縁材料上における正負両方の沿面放電の測定を行う。測定に用いた絶縁材料は、表1に記す、市販の4種類の絶縁材料フィルムである。

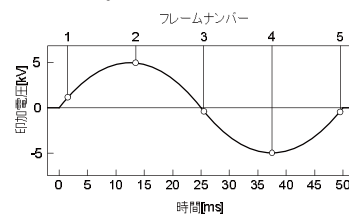


図2 印加電圧波形

表 1 実験供試絶縁体材料フィルム

試料フィルム	比誘電率 ϵ_r	厚さ d
ポリイミド：PI (東レデュボン社製, Kapton®-H)	3.6	25 μm
ポリプロピレン：PP (信越フィルム社製, R タイプ)	2.2	22 μm
ポリエチレンテレフタレート：PET (帝人デュボンフィルム社製, テトロン®)	3.2	25 μm
ポリエチレンナフタレート：PEN (帝人デュボンフィルム社製, テオネックス®)	2.9	25 μm

5. 測定結果

図3～6に各試料での測定結果を記す。測定結果より、負極性放電ではどの試料においても針電極を中心として同心円状に放電が進展していることがわかる。負極性放電は針電極より電子が放出されることによって進展すると考えられるため、絶縁材料によらず一定の電子が供給されるため、絶縁材料による違いがないと考えられる。一方、正極性放電では各試料において、放射状にストリーマを形成している様子が見られるが、そのストリーマ形状が試料によって違うことが確認できる。ストリーマが形成される過程で、その先端部では電子と正イオンの再結合による発光が起こる。この光エネルギーは絶縁材料表面より光電子を放出させるのに十分なエネルギーとなる⁽²⁾。そのため、絶縁材料の沿面放電ではストリーマ進展時には、材料からの光電子放出と、それに伴う材料のイオン化が起こっていると考えられる。絶縁材料によるストリーマ形状の違いはこれらによって起こると考えられる。光電子の放出は、電子雪崩の初期電子になりうるため、ストリーマ進展状態に影響を与えると考えられ、正イオンはそれ自身で電界を作るため、正イオンの密度がストリーマの進展方向を左右し、ストリーマが樹枝状に分岐する要因となることがわかっている⁽³⁾。そのため、絶縁材料表面のイオン化の状態によってストリーマの形状が大きく変わってくると考えられる。

5. おわりに

誘電率の異なる4種類の絶縁材料上における交流沿面放電測定を行い、絶縁材料によってストリーマ形状の違いがあることがわかった。その結果より、ストリーマ形状の違いと材料のイオン化の関係を考察した。今後、この関係の調査のためにも、より多くの絶縁材料の沿面放電測定を行っていく必要があると考えられる。

文 献

- (1) Y. Zhu, T. Takada, Y. Inoue and D. Tu: IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.3, pp.460 (1996)
- (2) 湯本, 堺: 「絶縁材料からの光電子放出と放電進展」, 電学誌, 109 巻, 第 1 号, pp1~8(平成元年)
- (3) 室岡, 小山: 「ナノ秒コンダ沿面放電の研究(I)」, 防衛大学校理工学研究報告, 第 34 巻, 第 1 号, pp85~98(平 8 年 9 月)

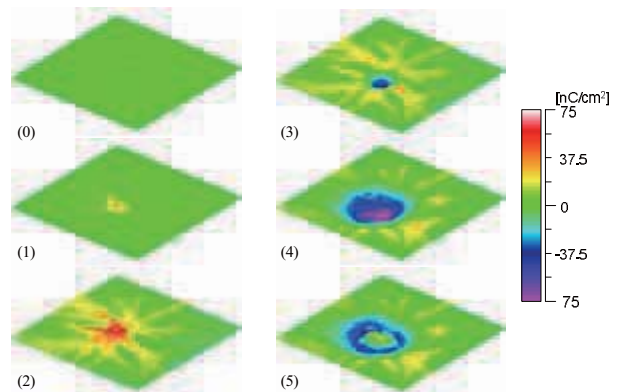


図 3 PI フィルムにおける交流沿面放電

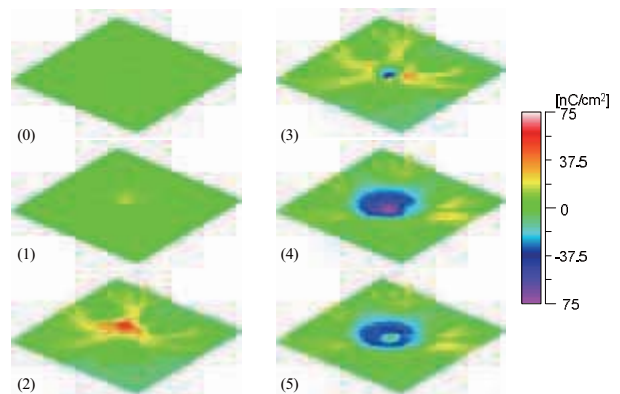


図 4 PP フィルムにおける交流沿面放電

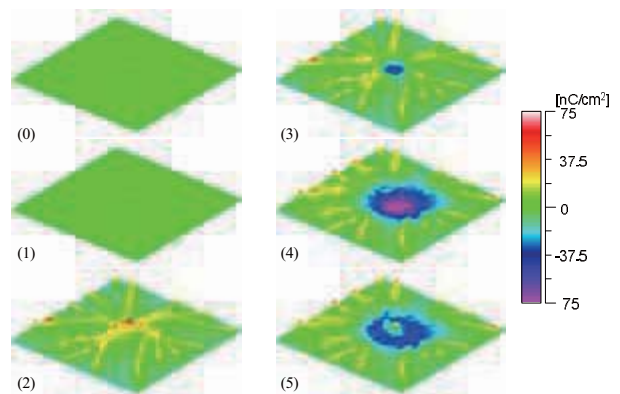


図 5 PET フィルムにおける交流沿面放電

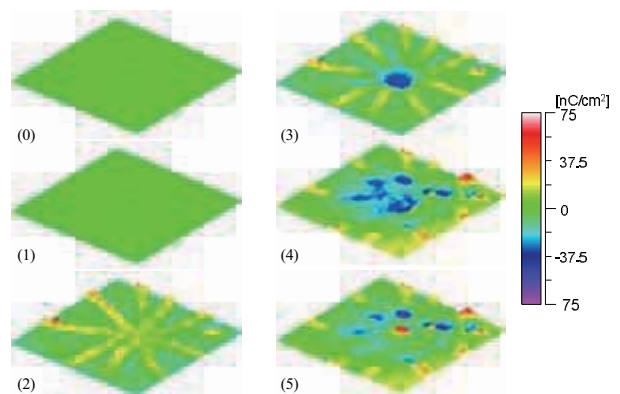


図 6 PEN フィルムにおける交流沿面放電