

ポッケルス効果を用いた Kapton® フィルム上の表面帯電分布計測^{*1}

The measurement of surface charge distribution on Kapton film using Pockels effect

梅村 宗央・村中 国宏・田中 康寛・深尾 正・高田 達雄・渡辺 力夫・富田 信之^{*2}
室岡 義広^{*3}

Kazuhisa Umemura, Kunihiro Muranaka, Yasuhiro Tanaka, Tadashi Fukao, Tatsuo Takada, Rikio Watanabe,
Nobuyuki Tomita and Yoshihiro Murooka

Key Words: Kapton®, BSO, Pockels effect, surface charge distribution

Abstract : Spacecrafts in space environment are exposed in plasma or are irradiated by high energy cosmic rays. Dielectric materials on the surface of spacecrafts are usually charged up in such environment. The accident gives on unrecoverable damage to the spacecraft. Therefore it is necessary to analyze the mechanism of surface charge distribution on insulating materials in space environment. We have been developing the measurement system for surface discharge pattern on BSO cell which is used as an image detecting device applying Pockels effect. By using this optical method, we can measure the 2-dimensional charge distribution during surface discharge. Furthermore with high speed CCD camera, we can detect the time dependent 2-dimensional images. Here, we would like to show typical results of surface charges on Kapton® film putting on BSO cell.

記号の説明

$\Delta\theta$: 位相差、 E : 電界、 ϵ : 誘電率、
 n_0 : 常光線複屈折率、 γ_{41} : ポッケルス定数、 I : 光強度
V : 速度、 c : 真空中的光速

1. はじめに

宇宙環境において、宇宙機上の絶縁材料は高エネルギー粒子やプラズマなどにさらされ、帯電し、沿面放電の原因となる。この沿面放電が宇宙機表面で発生すると、太陽電池パネル等の絶縁破壊の原因となり、宇宙機の寿命を縮める場合がある。したがって宇宙環境における沿面放電機構の解析は重要である。

そこで、我々は電気光学効果の一種であるポッケルス効果を示す誘電体結晶を用いた光学的手法で沿面放電の2次元分布を計測する手法を開発してきた。この手法で電界を帯びた BSO ($B_{12}SiO_{20}$:酸化ケイ素ビスマス) 結晶に偏光したレーザー光を入射し、透過したレーザー光の2次元光強度分布画像

をハイスピード CCD カメラで捉えることで誘電体表面における表面電荷によるストリーマ進展を2次元で、しかも経時的に測定を行うことができる。また、この手法は光学的手法を利用しているため、測定対象物に対して非破壊、非接触で測定を行うことが可能であるという利点を有する。この手法を応用して、BSO 結晶の上面に絶縁材料 (Kapton® フィルム) を配置し、このフィルム上における表面電荷挙動を測定したので以下に報告する。

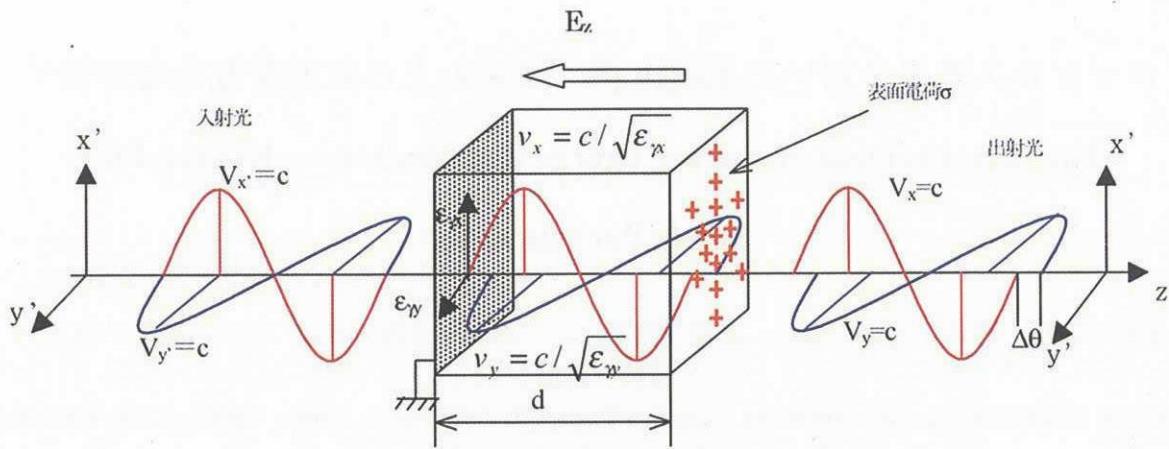
2. ポッケルス効果

BSO 結晶は電界により誘電率異方性を生じる素子である。 BSO 結晶表面に電荷が帯電すると表面電荷により BSO 結晶内部に電界が発生し、結晶内部において誘電率異方性が生じる。例えば、第1図に示すように BSO 結晶表面に表面電荷 σ が存在すると、電界 E_z が発生し、x 方向および y 方向の比誘電率 ϵ_x 、 ϵ_y に差が生じる。今、厚さ d の BSO 結晶表面上に放電によって生じた電荷が帯電しているとする。この結晶に直線偏光を入射させると、誘電率異方性により x 方向と y 方向の伝播速度 v_x 、 v_y の間に速度差が生じるため、透過光には偏光位相差 $\Delta\theta$ が生じ、透過光は橢円偏光になる。この橢円偏光が偏光子に対して、透過光軸を直交に配置した検光子を通過すると電界がない場合には観測されない透過光が観測される。観測される透過光強度を I、入射光

平成15年11月28日、第6回宇宙飛翔体環境研究会

^{*2} 武蔵工業大学

^{*3} 芝浦工業大学



第1図 誘電率異方性による位相差

強度を I_0 とすると、一般に以下の式が成り立つ。(文献 5)

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta\theta}{2} \quad (1)$$

従って、透過光強度を測定することにより BSO 結晶を通過する際に生じた位相差 $\Delta\theta$ を算出することができる。また、この位相差 $\Delta\theta$ は次の式で表される。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{41} \int_0^d E_z(x, y) dz \quad (2)$$

(2)式より誘電率異方性によって生じた偏光位相差 $\Delta\theta(x, y)$ は内部電界 $E_z(x, y)$ に依存していることがわかる。このような効果をポッケルス効果と呼ぶ。表面電荷 $\sigma(x, y)$ による電界 $E(x, y)$ が結晶の厚み方向で一定であると見なせる場合は、(2)式は以下のように表すことができる。

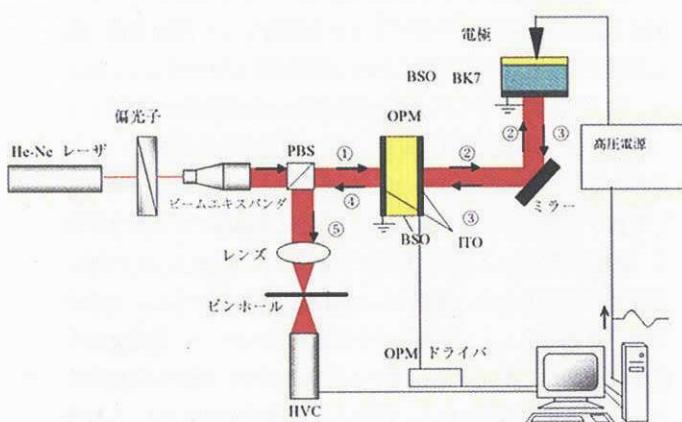
$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{41} E_z(x, y) d \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{41} \frac{\sigma(x, y)}{\epsilon_o \epsilon_r} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで ϵ_r は BSO の比誘電率である。従って、 $\Delta\theta(x, y)$ を算出する

ことにより $\sigma(x, y)$ を観測することができる。なお、計測原理の詳細は既報(文献 3)を参照されたい。

3. 測定装置

今回の実験では大気中で針電極に高電圧を印加して沿面放電を発生させ、これにより BSO 結晶表面に電荷を帯電させ、その経時変化を観測した。BSO 結晶は厚さ $200\mu\text{m}$ 、底面積は $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ である。BSO 結晶の下層に厚さ $1000\mu\text{m}$ の BK7 を装着し、BSO 結晶を補強している。また、BK7 の背面には ITO(透明電極)が蒸着されている。さらに BSO 結晶上面には全反射膜を装着して反射率を向上させている。今回は絶縁材料である Kapton® フィルムを BSO 結晶上に配置し、その表面の電荷分布を測定したが、全反射膜を装着することによって結晶上にある材料の光強度による影響を無視できるようにした。この偏光位相差の測定には He-Ne レーザーを使用した。He-Ne レーザーから出射した波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$ のレーザー光は表面電荷分布を 2 次元で計測するため、ビームエキスパンダにより直径 1mm から直径 40mm に拡大し、偏光ビームスプリッタ(PBS)を透過することにより、直線偏光となる(第2図、①)。通常、電荷による電界は微小であり、また BSO 結晶はあらかじめ自然複屈折性を有する。ここでは測定感度を向上させ、また自然複屈折を取り除くために変調技術を使用する(文献 3 参照)。この変調法では入射光にあらかじめ適当な偏光位相差 $\Delta\theta_M$ を与える。入射された直線偏光は光位相変調器(OPM)によって $\Delta\theta_M$ が生じる。 $\Delta\theta_M$ の位相差を持ったレーザー光は BSO 結晶に入射する(第2図、②)。BSO 結晶内には結晶表面の電荷が電界を形成するため、光位相差 $\Delta\theta_S$ が発生する。BSO 結晶の上面で反射した偏光は光位相変調器を再度通過し(第2図、③)、偏光ビームスプリッタに戻る(第2図、④)。そしてその界面で反射した偏光(第2図、⑤)は、レンズ、ピンホールを通り、ハイスピードビデオカメラ(HVC)で 2 次元の光強度分布として観測される。



第2図 測定装置

4. 矩形波光位相変調法

測定システムを構成する光学素子は残留応力などにより自然複屈折を持っているが、この自然複屈折は不均一に分布しているうえ、個々の自然複屈折を合わせると無視できない大きさになってしまう。つまり、測定される位相差 $\Delta\theta$ は自然複屈折によるもの $\Delta\theta_N$ と表面電荷によるもの $\Delta\theta_S$ の和である。

$$\Delta\theta = \Delta\theta_N + \Delta\theta_S \quad (4)$$

第3図中の I_{off} は入射光がない状態での光強度である。カメラのホワイトノイズ、暗電流によって入射光がなくとも最大光強度に対して最大3.5%程度の微小な光強度が検出される。変調がない場合の光強度はノイズである I_{off} に近いため検出感度が悪い。そこで、沿面放電により発生する位相差 $\Delta\theta_S$ に $\pm\Delta\theta_M$ の矩形波変調信号を加え、演算処理することにより $\Delta\theta_S$ の検出を容易にする。以下に理論式を示す。

矩形波変調をし、沿面放電が発生した際の光強度 I_s^+ と I_s^- はそれぞれ(5)、(6)式で表される。

$$I_s^+ = \gamma I_0 \sin^2(\Delta\theta_N + \Delta\theta_S + \Delta\theta_M) + I_{off} \quad (5)$$

$$I_s^- = \gamma I_0 \sin^2(\Delta\theta_N + \Delta\theta_S - \Delta\theta_M) + I_{off} \quad (6)$$

ただし、 γ は光学系部品の透過率、反射率、カメラの感度分布に関する係数とする。

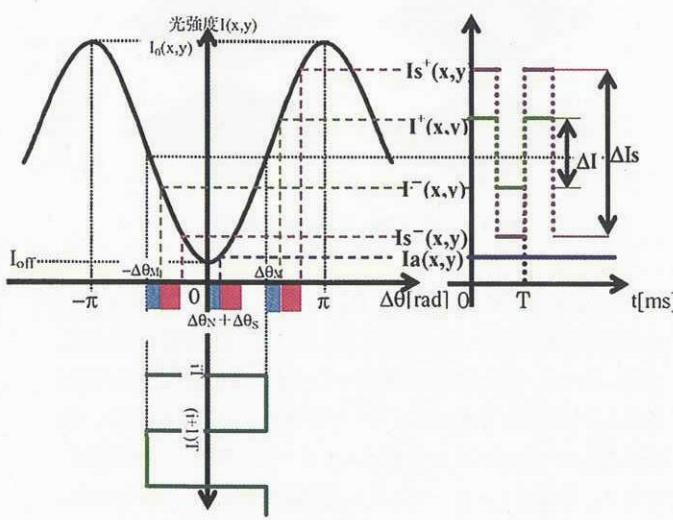
さらに(7)と(8)式の差 $\Delta I_s (= I_s^+ - I_s^-)$ は

$$\Delta I_s = \gamma I_0 \sin 2(\Delta\theta_N + \Delta\theta_S) \sin 2\Delta\theta_M \quad (7)$$

$$I_M = \gamma I_0 \sin 2\Delta\theta_M \quad (8)$$

ここで、(8)式のように I_M を定義する。

また、ポッケルス効果による位相差を持たない光強度を I_a とし、変調による位相差 $\Delta\theta_M$ が発生している際の光強度を I_m^+ 、 I_m^- とすると、それぞれ(9)～(11)式のように表すことができる。



第3図 矩形波光位相変調法

$$I_a = \gamma I_0 \sin^2 \Delta\theta_N + I_{off} \quad (9)$$

$$I_m^+ = \gamma I_0 \sin^2(\Delta\theta_N + \Delta\theta_M) + I_{off} \quad (10)$$

$$I_m^- = \gamma I_0 \sin^2(\Delta\theta_N - \Delta\theta_M) + I_{off} \quad (11)$$

(10)、(11)式から

$$I_m^+ - I_m^- = I_M \sin 2\Delta\theta_N \quad (12)$$

また、(9)～(11)式から

$$I_m^+ + I_m^- - 2I_a = I_M \frac{1 - \cos 2\Delta\theta_M}{\sin 2\Delta\theta_M} \cos 2\Delta\theta_N \quad (13)$$

(12)、(13)式から、 I_M は(14)式のように表すことができる。

$$I_M = \sqrt{(I_m^+ - I_m^-)^2 + (I_m^+ + I_m^- - 2I_a)^2} \frac{\sin^2 2\Delta\theta_M}{(1 - \cos 2\Delta\theta_M)^2} \quad (14)$$

(12)式より

$$\Delta\theta_N = \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{I_m^+ - I_m^-}{I_M} \quad (15)$$

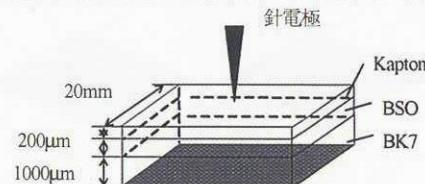
(4)、(7)、(15)式よりポッケルスセンサの表面電荷による位相差 $\Delta\theta_S$ は

$$\Delta\theta_S = \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{\Delta I_s}{I_M} - \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{I_m^+ - I_m^-}{I_M} \quad (16)$$

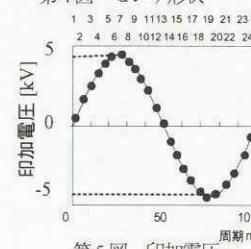
従って、ポッケルス効果による位相差が発生しない状態 I_a 、変調電圧のみを印加した状態 I_m^+ 、 I_m^- 、沿面放電を発生させた状態 I_s^+ 、 I_s^- それぞれの光強度を測定することにより、BSO結晶表面の電荷による位相差 $\Delta\theta_S$ を(16)式のように導くことができる。

5. 測定結果と考察

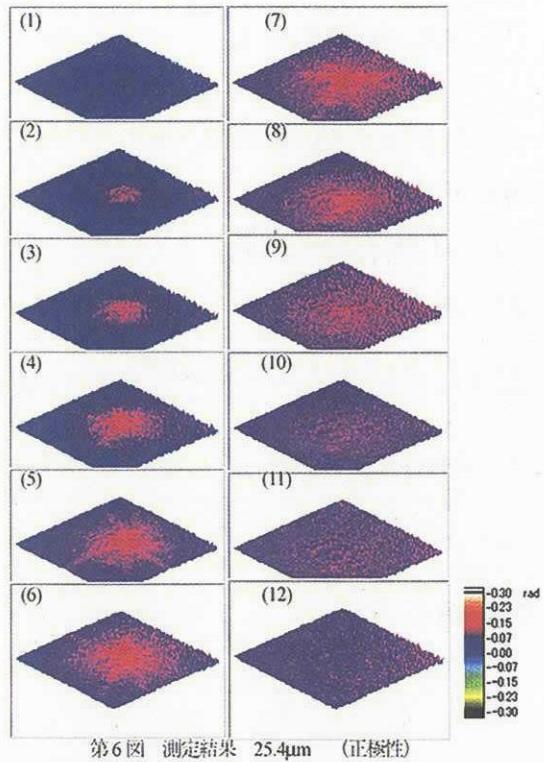
5-1 Kapton®フィルム上の表面電荷挙動 予備実験としてBSO結晶上にKaptonフィルムを配置した状態で、試料中央に針電極を垂直に配置し、針電極とBK7背面のITO(透明電極)間に振幅5kV、及び8kV、10Hzの正弦波電圧を印加した。



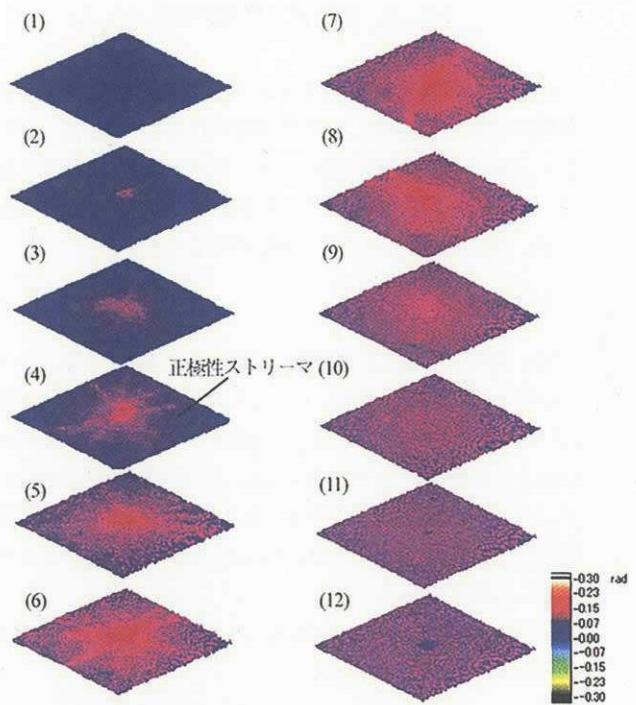
第4図 センサ形状



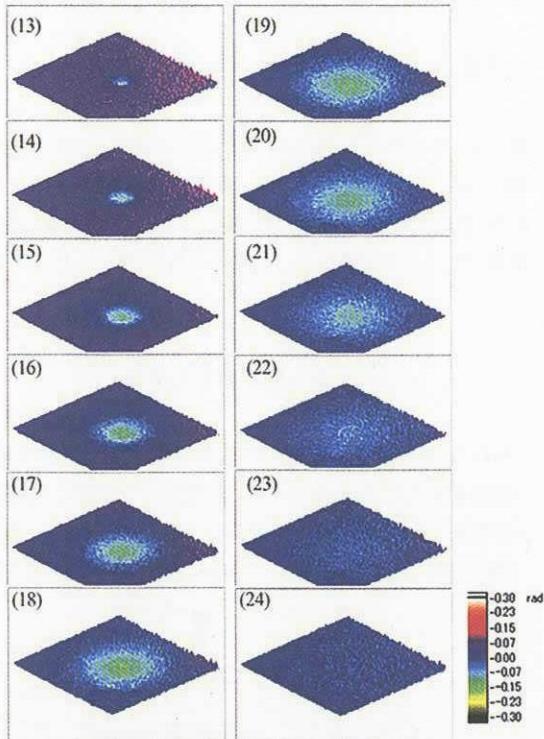
第5図 印加電圧



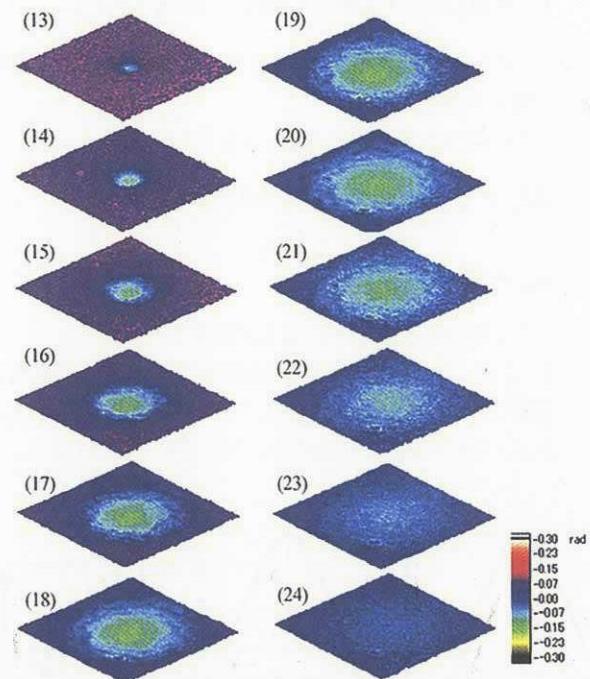
第6図 測定結果 25.4 μm (正極性)



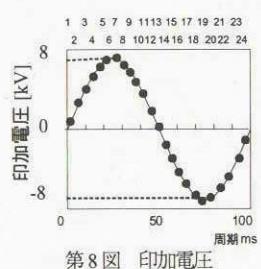
第9図 測定結果 25.4 μm (正極性)



第7図 測定結果 25.4 μm (負極性)



第10図 測定結果 25.4 μm (負極性)

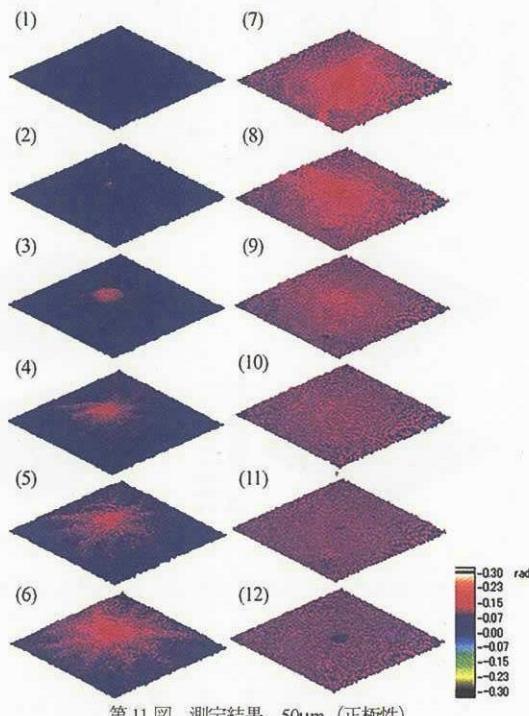


第8図 印加電圧

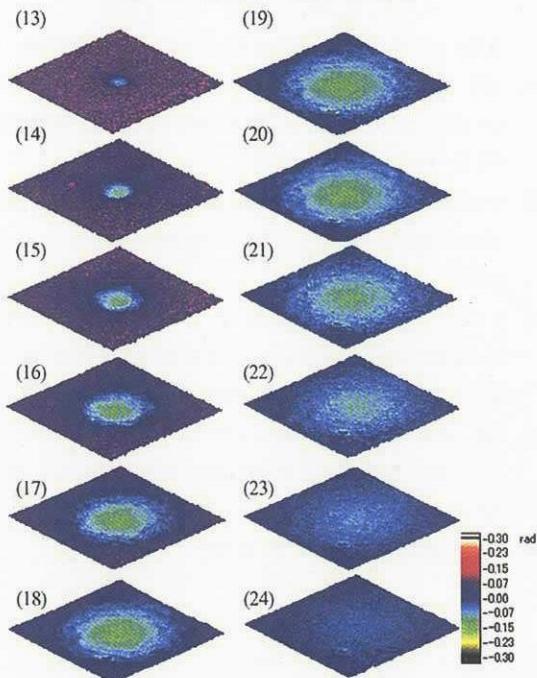
第6,7,9,10図は厚さ 25.4 μm の Kapton® フィルム上での表面帯電分布の経時的変化を 4ms ごとに表している。印加電圧の上昇、下降に伴って、表面電荷の挙動を示しており、正極性電圧が印加されると放射状に正極性ストリーマが進展し（文献 4 参照）、負極性電圧が印加されると負極性ストリーマが同心円状に進展しており、正極性ストリーマよりも進展範囲が狭いことがわかる。印加電圧の振幅 5kV、及び 8kV に着目すると、8kV の場合、電

界の強さも大きくなることから、電極付近の電荷による影響で一面に光強度差が強くなっているのがわかる。また、ストリーマを形成する電荷による信号が強くなっている。

厚さ $25.4\mu\text{m}$ の Kapton[®] フィルムで表面電荷の挙動を捉えることができたので、厚さ $50\mu\text{m}$ の Kapton[®] フィルムで測定を試みた。その測定結果を第 11,12 図に示す。なお、印加電圧の振幅は 8kV とした。この印加電圧について厚さ $25.4\mu\text{m}$ と $50\mu\text{m}$ の測定結果を比較すると、電極付近の電荷によって中心部の信号がじんじん見えるが、 $50\mu\text{m}$ では正極性ストリーマの形状に対する影響が小さいことがわかる。しかし、正極性電圧のピークを過ぎると、

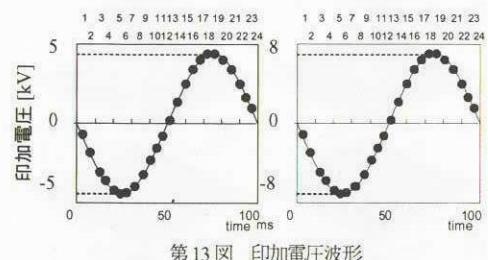


第 11 図 測定結果 $50\mu\text{m}$ (正極性)

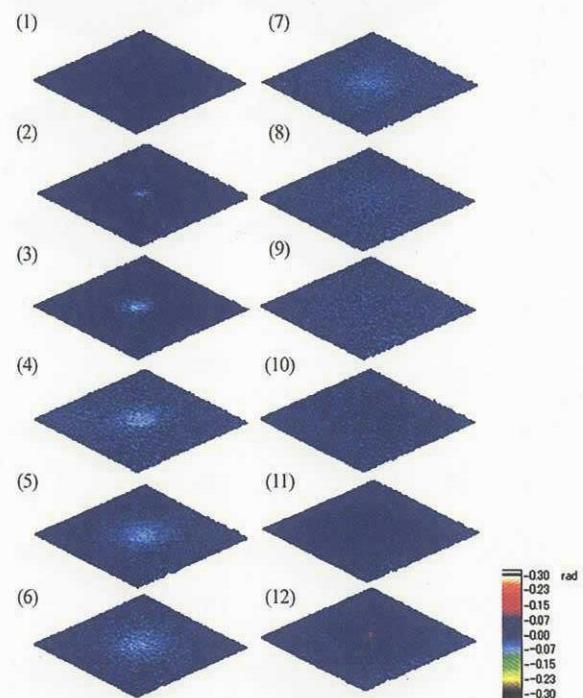


第 12 図 測定結果 $50\mu\text{m}$ (負極性)

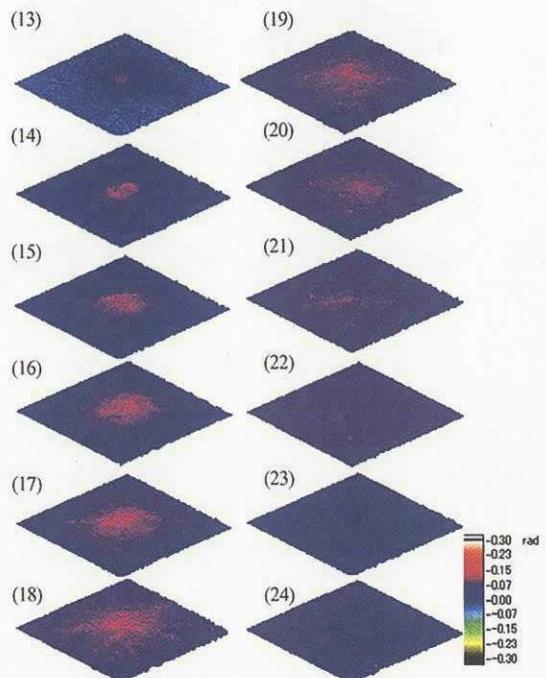
電極付近の電荷によって、信号が一面に広がっている。負極性の電荷については類似した挙動を示す。



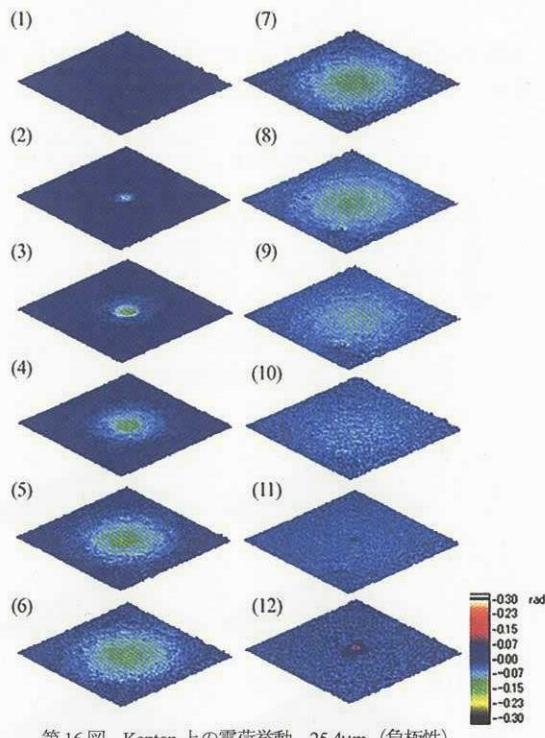
第 13 図 印加電圧波形



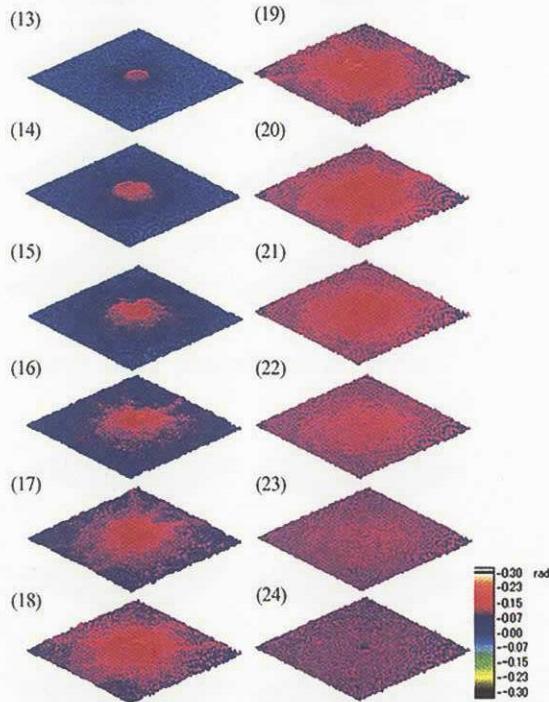
第 14 図 Kapton[®] 上の電荷挙動 $25.4\mu\text{m}$ (負極性)



第 15 図 Kapton[®] 上の電荷分布 $25.4\mu\text{m}$ (正極性)



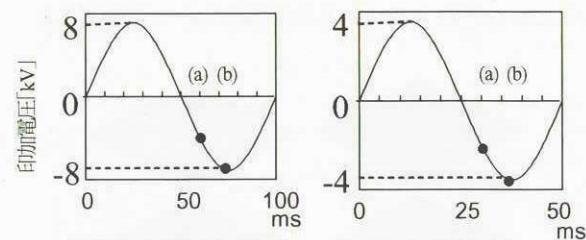
第16図 Kapton 上の電荷挙動 25.4 μm (負極性)



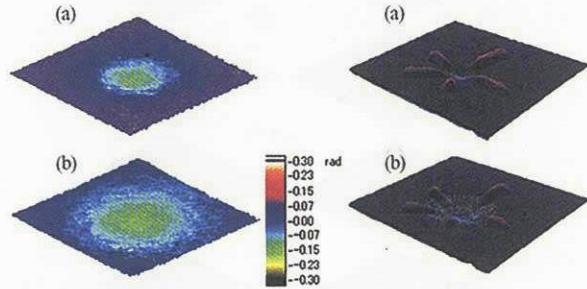
第17図 Kapton®上の電荷挙動 25.4 μm (正極性)

5-2 BSO結晶上とKapton®フィルム上の比較 Kapton フィルム上の電荷分布とこれまで測定していた BSO 結晶上の帶電分布を比較すると (第 19 図)、BSO 結晶上では負極性電圧を印加した際にも正極性電荷が比較的長時間残存していたのに対し、今回

のデータでは電荷が比較的短時間で消滅しており、表面電荷の減衰が速いと考えられる。今回の実験ではフィルム上の帶電分布を高感度で測定するために、新たに誘電体ミラーを有する BSO 結晶を作製し、計測に用いたため、BSO 素子自体の特性が従来のものと異なることが考えられる。従って、従来の測定結果との差異は BSO 結晶の違いによるものであると考えられる。今後は BSO 結晶の構造による実験結果の差を検証し、実験精度を高める必要がある。



第18図 印加電圧 (左 Kapton 上、右 BSO 結晶上)



第19図 BSO 結晶上とフィルム上の比較 (左 Kapton®上、右 BSO 結晶上)

参考文献

- 1) 放電ハンドブック：電気学会放電ハンドブック出版委員会編 電気学会
- 2) 川崎 俊之、寺嶋 宗弘、鈴木 三郎、高田 達雄：「ポッケルス素子を用いた絶縁フィルム上の交流沿面放電電荷分布の測定法」電気学会論文誌 A 112巻 第 11 号 pp.938 (平 4)
- 3) Y. Zhu, T. Takada, D. Tu : "An optical measurement technique for studying residual surface charge distribution" J. Physics D: Applied Physics, Vol.28, pp. 1468-1477, (1995)
- 4) Y. Zhu, T. Takada, Y. Inoue and D. Tu: "Dynamic observation of Needle-plane Surface Discharge using the Electro-optical Pockels Effect" IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.3, pp.460 (1996)
- 5) 池田 達哉、大葉 友春、高田 達雄、室岡 義玄：「沿面コロナストリーマ中の電位・電界分布の2次元動的測定」電気学会論文誌 A 120巻 第 6 号 pp.687 (平 12)
- 6) 電気学会技術報告 第 892 号 (2002)