

## 論 文

# ポッケルス表面電位計の開発と沿面放電残留電荷の 二次元分布測定

清水 康広\*, 熊田 亜紀子\*,<sup>1</sup>, 千葉 政邦\*, 日高 邦彦\*,<sup>2</sup>

(2001年5月31日受付, 2001年10月24日受理)

## Surface Potential Probe Based on Pockels Sensing Technique and Its Application for Charge Density Measurement on Insulating Material

Yasuhiro SHIMIZU\*, Akiko KUMADA\*,<sup>1</sup>, Masakuni CHIBA\* and Kunihiko HIDAKA\*,<sup>2</sup>

(Received May 31, 2001; Accepted October 24, 2001)

A surface potential probe based on Pockels sensing technique is developed and applied to surface potential distribution measurement on insulating material. The probe consists of an SLD (super luminescent diode), a Pockels crystal, a PBS (polarized beam splitter), a 1/8 wave plate and optical fibers. As the detecting part of the probe is isolated from a grounded electrode, this sensor can be placed close to the measured object. The spatial resolution of this sensor is 2mm which is equivalent to the double size of the detecting part. The modulation technique is introduced to this probe and the minimum resolution reaches 10 V. This probe is applied to the measurement of the potential distribution on an insulating material just after occurrence of a surface discharge. From this measured potential profile, the distribution of surface charge density is computed through a surface charge method.

### 1. はじめに

誘電体表面の電位分布や帶電電荷分布を正確に計測する技術は、高電圧機器の絶縁設計の合理化や、電子デバイスの高集積化、静電気応用機器、放電現象の基礎研究など様々な分野において、重要性を増してきている。

表面電位の定量的測定には、通常表面電荷の電気力線の作用を捕捉する方法が用いられる<sup>1)</sup>。実用的な測定器として振動容量型表面電位計などが市販されている。しかし、検出感度・位置分解能は測定対象物との距離に大きく依存することが指摘されている。また、電位検出部に接地電極を有するため高電圧部の測定時には、対象物との距離をとる必要があり高分解能は望めない。

一方、測定部にガード電極を設け、その電位を被測定面の電位と等しくするDCフィードバック方式の表面電位計は、内蔵アンプの昇圧に時間を要するため応答時間が長いうえ、ガード電極から被測定対象物の低電位部位に部分放電が発生する恐れがあり、高圧部( $\geq 10$  kV程度)の測定表

面電位の多点高速測定には向きである。

近年、著者らはポッケルス効果を利用したセンサを開発し、電圧、電界計測に適用してきた<sup>2)</sup>。そこで本研究では各種ガス中や、汚損碍子表面などさまざまな環境下、形状下の表面電位を手軽に直接測定でき、かつ従来型「プローブ」の特長を損なうことがないポッケルス表面電位計を開発した。この表面電位計は、検出電極(浮遊電位の金属電極)に誘起される電位をポッケルス効果により計測する方式をとる。

検出電極としてはセンサの設計の都合上直径1 mmの金属ミラーコーティングを使用したが、原理的には金属である必要はないので誘電体ミラー(もしくは自然端反射光)も利用でき、検出部の大きさはレーザスポット径まで小型化できる。さらにテープファイバやCCDビデオカメラを使用すればスポット内の光輝度分布(すなわち電位分布)が測定でき、検出部の大きさをさらに小さくすることができる。

また、センサの大部分が誘電体で構成されるので被測定対象空間に与える擾乱が少ないうえ、検出部に接地電位を有さないので測定対象物に限りなく近づけることができ、他の方法でのセンサに比べて空間分解能の向上が期待できる。

本研究においては、測定データのノイズを減らすために

キーワード: ポッケルス効果、表面電位計、沿面放電、残留電荷  
\*東京大学大学院工学系研究科 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,  
Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

<sup>1</sup>kumada@hvg.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>hidaka@hvg.t.u-tokyo.ac.jp

ポッケルス結晶の基準電位面に交流電圧(10 kHz)を印加し、電界変調をかけてロックインアンプで出力を測定する方法を用いた。

この表面電位計の分解能、精度の検討を行い、さらに2 mm厚PMMA板上の沿面放電の残留電荷分布を計測したので報告する。

## 2. ポッケルス表面電位計

### 2.1 ポッケルスセンサ

本研究にて開発した縦型変調反射型ポッケルスセンサの構造を図1に、センサ部の写真を図2に示す。このセンサは、光源、BGOポッケルス結晶( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , 3 mm × 3 mm × 30 mm), PBS(Polarized Beam Splitter, 偏光ビームスプリッタ), 1/8波長板, プリズム, レンズ, 定偏波光ファイバ, マルチモードファイバ, O/E変換器により構成されている。BGO結晶の先端面は電位検出電極として $1 \text{ mm} \phi$ の金属ミラーを、1/8波長板側の端面は基準電位部として下地用透明電極および一部にCr-Auコートを蒸着加工してある。

光源として波長830 nmのスーパーレミネッセントダイオード(SLD)を使用し、定偏波光ファイバを通じて偏光ビー

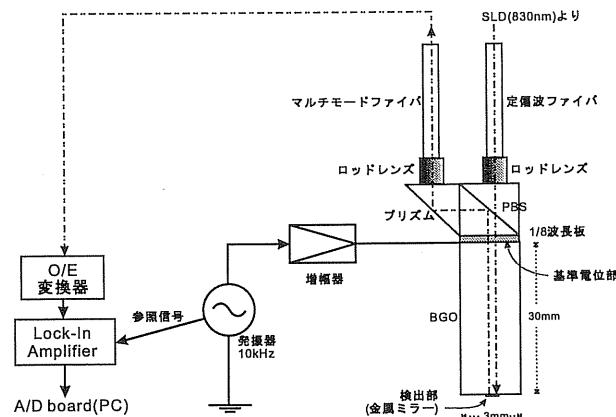


図1 反射型ポッケルスセンサの構造

Fig.1 Structure of reflection-type Pockels sensor.

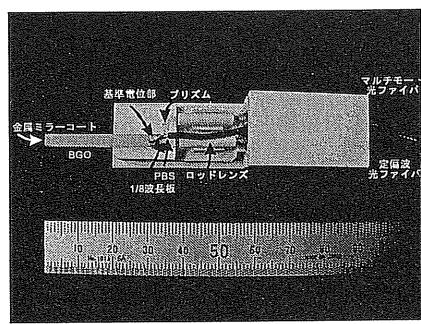


図2 反射型ポッケルスセンサ

Fig.2 Reflection-type Pockels sensor.

ムスプリッタに入射する。PBS透過光は1/8波長板を介してポッケルス結晶に入射し、BGO先端に蒸着された金属ミラーコートにて反射往復させる。出射光はPBSを介して検出する。

このセンサは光の伝搬方向と平行な電界成分に対して感度を持つ縦型変調センサであるため、ポッケルス結晶出射時には、光路に沿った電界成分の積分、即ち結晶両端の電位差に比例した位相差 $\theta$ が偏波間に加わる。PBS検出光強度 $I_{\text{out}}$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} I_{\text{out}} &= \frac{I_{\text{in}}}{2} \{1 - \cos(\theta + \theta_p)\} \\ &= \frac{I_{\text{in}}}{2} \left\{1 - \cos\left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{\text{BGO}} + \theta_p\right)\right\} \quad (1) \end{aligned}$$

$I_{\text{in}}$	: 入射光強度
$\theta$	: ポッケルス効果による位相差
$\theta_p$	: 1/8波長板による位相差
$V_{\text{BGO}}$	: BGO結晶間電位差 (検出電極、基準電位部間の電位差)
$V_\pi$	: 半波長電圧

半波長電圧 $V_\pi$ は使用光波長及び結晶の材質で定まり、本研究で開発したセンサにおいては $V_\pi$ は20.6 kVである。また1/8波長板は $\theta_p = 0.2\pi \text{ rad}$ 程度になるように、調整配置した。

ポッケルス結晶の基準電位部分を接地すれば、結晶先端の検出電極の電位を測定することになる。また基準電位部には任意の電圧を印加することもできるので、高電圧部位における電位測定も可能である。

本研究においてはS/N比を向上させるため、ポッケルス結晶の基準電位部に微小交流電圧を印加して信号を変調する方式<sup>3)</sup>を採用した。

### 2.2 変調システムと電圧校正

ポッケルス結晶の基準電位部に印加する信号を $V_m \sin \omega t$ とすると、光出力は、(1)式の $V_{\text{BGO}}$ を、 $V_{\text{BGO}} + V_m \sin \omega t$ に書き換えた式で与えられる。さらにベッセル級数展開を用いて変形すると最終的に

$$\begin{aligned} I_{\text{out}} &= \frac{I_{\text{in}}}{2} \left\{ 1 - J_0\left(\frac{\pi V_m}{V_\pi}\right) \cos\left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{\text{BGO}} + \theta_p\right) \right. \\ &\quad + 2J_1\left(\frac{\pi V_m}{V_\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{\text{BGO}} + \theta_p\right) \sin \omega t \\ &\quad - 2J_2\left(\frac{\pi V_m}{V_\pi}\right) \cos\left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{\text{BGO}} + \theta_p\right) \cos 2\omega t \\ &\quad + 2J_3\left(\frac{\pi V_m}{V_\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{\text{BGO}} + \theta_p\right) \sin 3\omega t \\ &\quad \left. - \dots \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

となる。変調周波数は10 kHz、変調信号の振幅 $V_m$ は100 Vとした。

O/E変換器検出信号をロックインアンプで変調周波数で同期検波し、変調周波数成分((2)式の右辺カッコ内第3項)

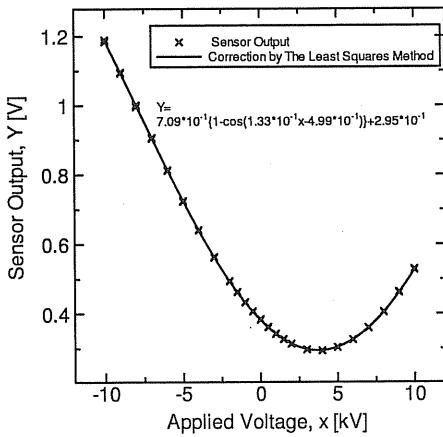


図3 電圧校正曲線(直流成分)

Fig.3 Calibration curve of sensor output.

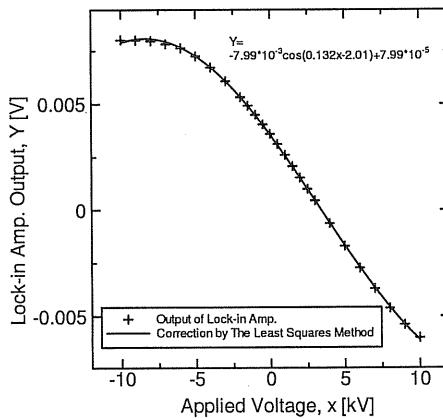


図4 電圧校正曲線(変調周波数成分)

Fig.4 Calibration curve of lock-in amplifier output.

を観測する。変調を行うことにより、変調周波数と周波数の異なる雑音成分が除去することができる。

センサ出力の電圧校正には、実験式を利用する。具体的には、検出電極に直接直流電圧を印加し、電圧校正曲線を計算する。なおこの成分は、 $\frac{\pi}{V_{\pi}} V_{BGO} + \theta_p$  が  $\pm \frac{\pi}{2}$  を超えるような高い電圧  $V_{BGO}$  を測定する場合、 $\pm \frac{\pi}{2}$  を超えたのか超えていないのか判別できない。そこでこのような電圧の測定時には検出信号の直流成分((2)式の右辺カッコ内第1,2項)も同時に観測し、両者を照らし会わせることにより電圧を推定する。

図3, 4に、センサ出力の直流成分、変調周波数成分それについての電圧校正曲線計算結果例を示す。

### 2.3 表面電位測定システム

図5にポッケルスセンサを用いた表面電位計の構成を示す。XYプロッタ可動部にポッケルスセンサを取り付け、被測定対象物(5章で後述する沿面放電の残留電荷測定時)には、2 mm厚のアクリル板)をXYプロッタ上に置く。プロッタ可動部を測定したい部分近傍までプログラムにより動かし、その点で実際に検出電極に誘起された電位を測定

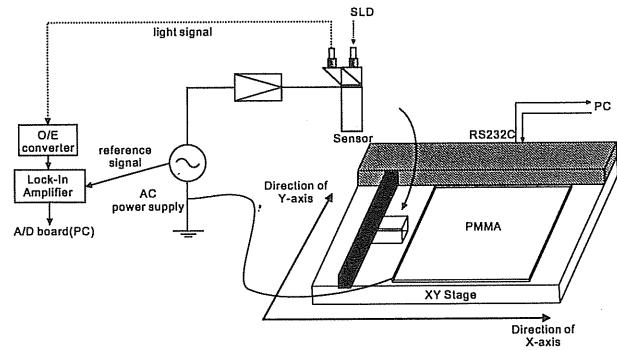


図5 ポッケルス表面電位計

Fig.5 Pockels surface potential probe.

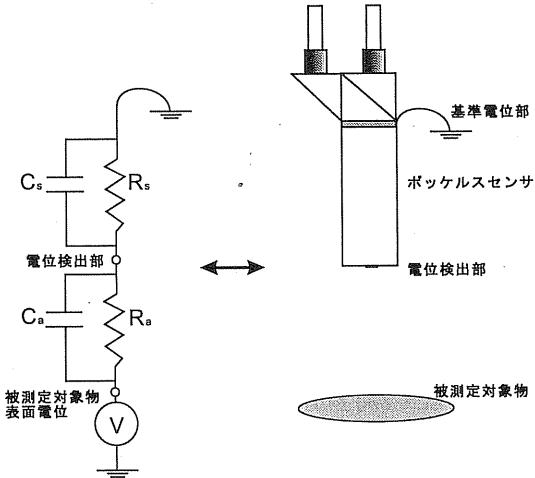


図6 センサと測定対象物の簡易等価回路

Fig.6 Equivalent circuit.

する。XYプロッタはRS-232Cインターフェースを有しており、プロッタ可動部の制御、センサ出力およびプロッタ可動部位置の読み取りはすべてPCで行う。

ポッケルス表面電位計の簡易等価回路を図6に示す。センサ及びセンサと被測定対象物間のすき間は、等価的に容量成分と抵抗成分を用いて表すことができる。センサを被測定対象物近くに移動させた場合、回路にステップ電圧が印加されたことと等価であるから、検出電極電位は最初は容量分圧で決まる値となる。しかし時間の経過とともに抵抗部による値へと変化していくことが予想される。

そこでセンサ出力の時間特性を検証するために、金属板を測定対象物とし、直流電圧を印加した場合のセンサ出力の時間変化を測定した。測定対象物に印加した電圧は1 kVであり、センサと対象物との距離は2 mmとした。結果が図7である。図7の横軸は0を直流電圧を印加した瞬間としたときの経過時間、縦軸はセンサ出力である。

同図より出力が時定数125秒程度で減少していくことが分かる。使用したポッケルス結晶の体積抵抗率は $10^{12} \Omega \cdot m$ 以上であるが、表面漏れ抵抗により検出電極に誘起された電荷が漏洩(真電荷が蓄積)していると考えられる。

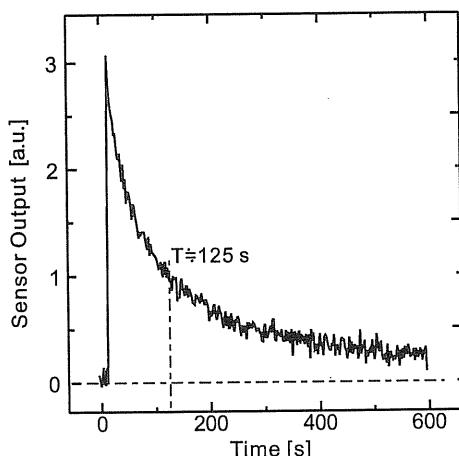


図 7 直流電位測定時のセンサ出力時間特性  
Fig.7 Charge of sensor output with time.

XY ステージによる 1 回あたりの測定を 2 秒以内とし、誘起電荷減少による出力誤差は 2 % 以下にしている。さらに 1 ステージの測定が終了すると、センサを接地された電極に近づけ、5 秒以上かけて漏れ抵抗により検出電極に蓄積した真電荷を逃がしてから次のステージの測定を行っている。

なお使用した XY ステージは 1 mm 間隔のサンプリングで 10 cm を測定する場合（測定点としては 100 点）で約 2 秒かかる。例えば 10 cm × 10 cm の領域を 1 mm 間隔で測定するには、サンプリングと真電荷放出を繰り返して行うため、トータルで約 700 秒要する。

### 3. 表面電位分布・電荷密度分布解析手法

ポッケルスセンサを用いて得られるデータは対象物表面の電荷によってセンサに誘起された電位である。よって、測定対象物表面の電位、もしくは帶電電荷密度分布を知るには、センサの出力と対象物表面の電荷量（電荷密度）の関係が明らかになっていなければならない。

ポッケルスセンサの検出電極に誘起される電位は、センサが対向する（直面する）被測定点位外の電荷にも依存するので、センサ出力はそれらの電荷全体の作用として表現することになる。

被測定対象物が誘電体の場合、センサ位置を移動させてても表面の帶電電荷分布は変化しないので、測定対象物表面全体を図 8 に示すように  $N$  枚 ( $N$  要素) に分割し、 $j$  枚目 ( $j$  要素) の帶電電荷密度を  $\sigma_j$ 、 $i$  要素に対応する位置でのセンサ出力を  $W_i$  としたときに (3) 式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_i \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a(1,1) & \cdots & a(1,N) \\ a(2,1) & \cdots & a(2,N) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a(N,1) & \cdots & a(N,N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_i \\ \vdots \\ \sigma_N \end{pmatrix} \quad (3)$$

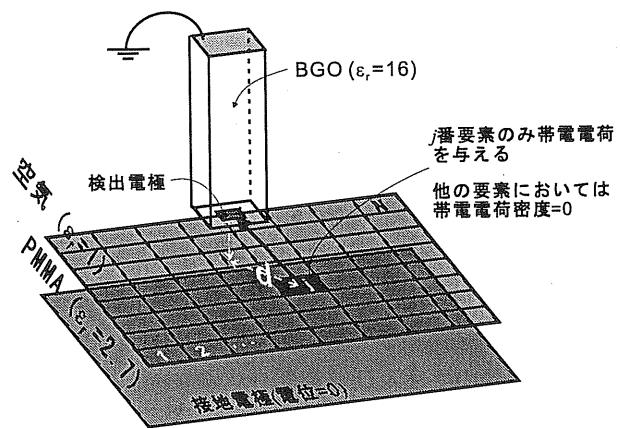


図 8 誘起電位計算モデル  
Fig.8 Computation model for induced potential.

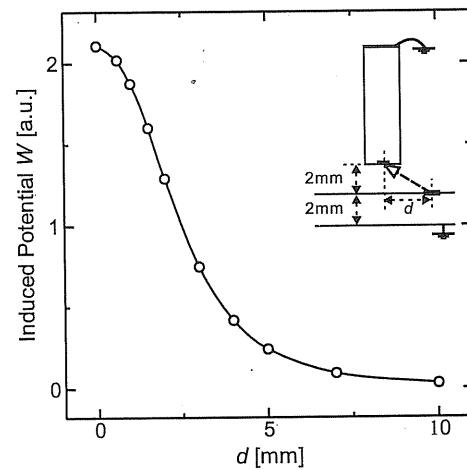


図 9 誘起電位計算結果  
Fig.9 Computation result of induced potential.

$a(i,j)$  は、 $\sigma_j = 1, \sigma_{k|k \neq j} = 0$  とした場合のセンサ出力  $W_i$  と等価であるので、図 8 に示すモデルを用いて算出する。すなわち、測定対象物の表面をプロッタの最小移動幅分に分割し、ある微小領域に基準帶電電荷密度  $\sigma$  を与えその他の部位は帶電電荷密度を 0 とした条件下で、ポッケルスセンサの検出電極に誘起される電位を数値電界計算手法を用いて求めればよい。

測定対象物として厚さ 2 mm の PMMA（比誘電率 2.7）を用いた場合の、基準帶電電荷を与える領域と検出電極との水平距離  $d$  を変化させて誘起電位を計算した例を図 9 に示す。センサと測定対象物との垂直間隔は 2 mm としている。電界計算手法としては、一般三次元形状を比較的簡単に模擬できる三角形表面電荷法<sup>4,5)</sup>を用いた。

表面電位計で測定するデータ数  $N$  は約 5000 程度あり、 $N^2$  にも及ぶ全ての行列要素  $a(i,j)$  を求めるのは現実的ではない。そこで誘起電位  $W$  は、距離  $d$  の関数として表すことができると近似し、この近似式を代表的な計算値より求めて  $a(i,j)$  を推定した。

$W_1 \sim W_N$  は測定結果より既知であるから、 $\sigma_1 \sim \sigma_N$  は(3)式の逆行列を解くことにより求めることができる。しかし実際には電界計算時の形状近似誤差や桁落ち誤差のため、 $N$  が 100 を超えるような場合逆行列計算は困難である。そこで表面電荷密度分布  $\sigma_1 \sim \sigma_N$  を適当に与え(初期値としては  $W_1 \sim W_N$  を定数倍したものを用いる)、係数行列  $a(i,j)$  を乗算した値が測定値  $W_1 \sim W_N$  に一致するよう電荷密度分布  $\sigma_1 \sim \sigma_N$  を変化させる繰り返し演算を行う。

#### 4. センサの感度及び解像度

##### 4.1 感度

ポッケルスセンサの最小電位差分解能は、同一電位差に対するロックインアンプの出力変動で決定する。ロックインアンプの出力変動は周囲のノイズ等で決定され、本研究の状況では、 $1 \mu\text{V}$  オーダであることが経験的にわかつている。つまり、ポッケルスセンサの端面間電位差  $V_{\text{BGO}}$  がある量だけ変化した時に、ロックインアンプ出力の変位量が  $10 \mu\text{V}$  オーダ以上であれば、その変化量  $\Delta V_{\text{BGO}}$  を検出することができる。

図 4 に示した電圧校正曲線の定数を用いて最小電位差分解能  $\Delta V_{\text{BGO}}$  を算出した。結果を図 10 に示す。 $-3.2 \sim 9.9 \text{ kV}$  の範囲において最小電位差分解能は  $15 \text{ V}$  以下であり、 $3 \text{ kV}$  においては  $9.8 \text{ V}$  に達している。

##### 4.2 解像度の検討

正極性沿面放電の残留電荷など不平等性が強い表面電界分布測定を行う場合、表面電位計には高い空間分解能が求められる。そこで、ポッケルスセンサの空間分解能を、数值計算により算出する。

センサを近づければ空間分解能が上るのは自明であるが、検出電極のサイズで決まる要素があると予想されるので、ここでは垂直方向の間隔をミラーコートの半分のサイズである  $0.5 \text{ mm}$  に近づけた場合を検証する。

具体的には図 11 に示すように、ステップ状に幅  $s$  だけ表面電位が 0 から 1 に変化する被測定対象物より、垂直方向に間隔  $0.5 \text{ mm}$ 、水平方向に  $x \text{ mm}$  離して配置したセンサの検出電極に誘起される電位を算出した。電位のステップは二つと想定し、これらのステップ幅  $s$  を  $1 \sim 3 \text{ mm}$  に変化させて計算を行った。計算には電荷重畠法を用い、二次元直交座標近似を行っている。

結果を図 12 に示す。ステップ幅  $s$  が  $2 \text{ mm}$  及び  $3 \text{ mm}$  の場合はセンサの検出電極に誘起される電位は想定した二つの電位ステップのとおりに二つの山が確認できるが、 $s$  が  $1 \text{ mm}$  の場合は、想定した二つのステップは確認できず、一つの山としか確認できない。ポッケルスセンサと平板間の間隔を  $0.5 \text{ mm}$  とした場合、センサの解像度は検出電極サイズの 2 倍程度が限界であることがわかる。

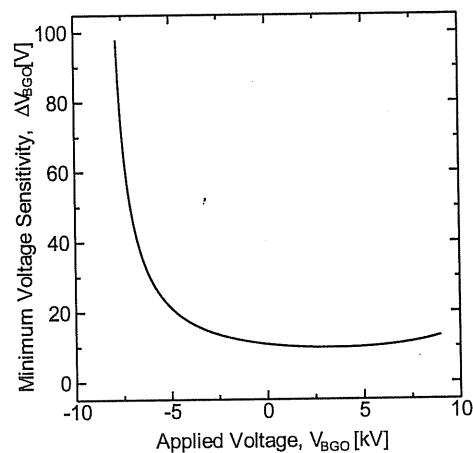


図 10 最小電位差分解能

Fig.10 Minimum detectable potential difference.

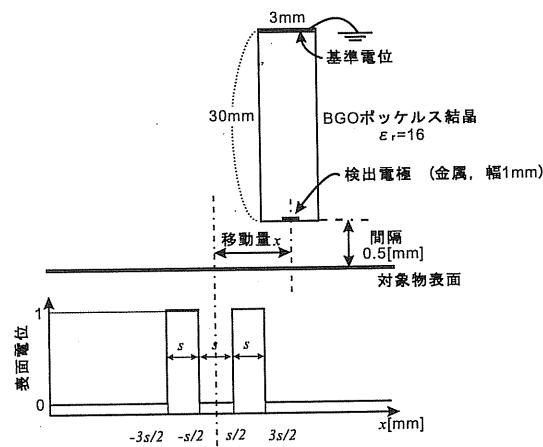


図 11 解像度評価用モデル

Fig.11 Model for estimation of resolution.

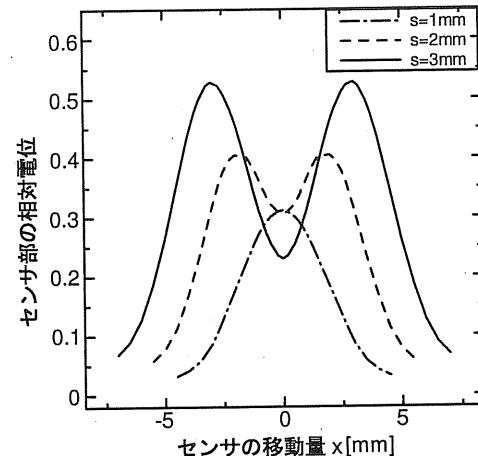


図 12 計算による解像度の検討

Fig.12 Resolution of surface potential probe.

#### 5. 負極性沿面放電の残留電荷分布測定

厚さ  $2 \text{ mm}$  の PMMA(polymethacrylmethyl,  $\epsilon_r = 2.7$ ) 上に  $6 \text{ mm}\phi$  の円錐電極を置き、負極性インパルス電圧(ピーク値  $-14 \text{ kV}$ )を印加し沿面放電を発生させた。なお PMMA 板には背後電極をつけ、また表面には一本の細い溝をつけ

た。これは、負極性沿面放電が溝等に沿って進展しやすい性質を活かし、放電進展の場所をある程度制御するためである。

この負極性沿面放電の残留電荷による誘起電位をポッケルス表面電位計を用いて測定した。表面電位計の検出電極と測定対象物 (PMMA)との間隔は 2.0 mm に設定し、 $80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  の領域を 1 mm 間隔で水平方向に動かした。なお、検出電極と測定対象物の間隔は、PMMA 板上に基準箔電極を置き、基準箔電極上で誘起される電位測定値より算定した。検出電極と PMMA 表面間に放電が起きるのを防止するため、SF<sub>6</sub> を検出電極と測定対象物間に吹きかけている。

電位測定後に、トナーを用いて取得した放電图形を図 13 に示す。電極より、放射状にストリーマが進展した後に、右

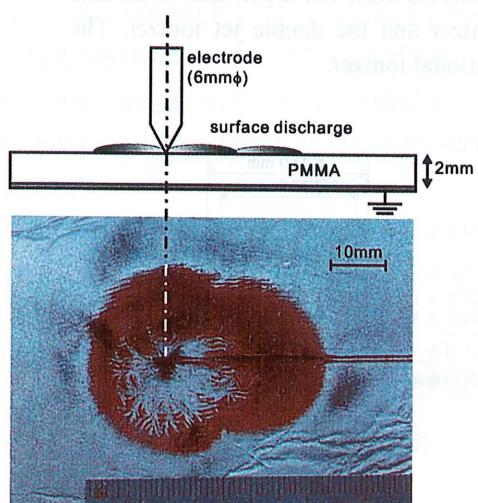


図 13 Lichtenberg 図形  
Fig.13 Lichtenberg figure.

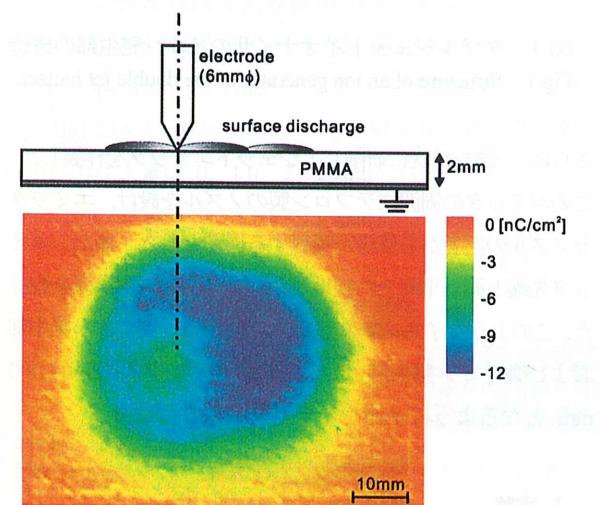


図 14 電荷密度分布  
Fig.14 Charge density distribution.

側に二つ目のストリーマがステップ状に進展している。また電極を設置した付近は、逆放電の痕跡がみられる。

測定データを基に表面電荷密度分布を計算した結果を図 14 に、図 13 とスケールを等しくして示す。電極を設置した部分の電荷密度が周辺部に比べて絶対値が小さいがこれは逆放電によるものである<sup>6)</sup>。電荷密度の小さい領域と、電荷图形にみられる逆放電の痕跡とは定性的には一致している。

逆放電を形成する正ストリーマの太さは、数 10 ~ 数 100 μm といわれ<sup>7)</sup>、個々のストリーマの識別は、今回の測定結果からは難しい。

ストリーマの微細構造を議論するにはより空間分解能、解像度の高いセンサの開発が望まれる。

## 6. まとめ

本研究では電位センサとして優れた特質を持つポッケルスセンサについて、光を信号として用いているということと、軽量コンパクトで移動しやすいという特長を活かし、ポッケルス電位センサを用いた表面電位計の開発を行った。さらに表面電荷密度を正確に測定するためのシステム構成および計算方法の提案評価を行い、負極性沿面放電の残留電荷分布測定を行った。

表面電位計の解像度は、ポッケルスセンサの電位検出部(検出電極)の大きさと、対象物との距離によって決定される。開発したセンサの電位検出部は金属ミラーコーティングにより 1 mm まで小型化しており、センサと測定対象物との距離を 0.5 mm とした場合でセンサの解像度は検出部の大きさの 2 倍程度である。

また測定データのノイズを大幅に減らすためにポッケルス結晶の基準電位面に交流電圧 (10 kHz) を印加し、電界調をかけてロックインアンプで出力を測定する方法を用いた。その結果センサの最小電位差分解能は 3 kV 測定時に 9.8 V に達した。

## 参考文献

- 1) 宅間董, 八島政史, 河本正: 静電気学会誌, **22** (1998) 102
- 2) K.Hidaka: IEEE Electr. Insul. Magazine, **12** (1996) 17
- 3) 前野恭, 高田達雄: 電気学会論文誌 A, **107** (1987) 395
- 4) 宅間董, 河野照哉: 数値電界計算法, コロナ社 (1980)
- 5) 濱田昌司, 山本修, 宅間董: 電気学会放電研究会資料, ED-98-169 (1998)
- 6) 熊田亜紀子, 千葉政邦, 日高邦彦: 電気学会論文誌 A **121-A**, No.8 (2001) 797
- 7) 電気学会技術報告: 不平等電界沿面放電特性, (II 部) 184 号 (1985)