

## 論 文

## 回転プローブ法による表面電荷分布の測定

菊 池 清 明\*, 鈴 木 昭\*

(1978年10月13日受付)

## Measurement of Surface Charge Density by Use of Rotating Probe Method

K. KIKUCHI\* and A. SUZUKI\*

(Received October 13, 1978)

The present paper describes an apparatus to monitor the surface charge deposited on insulator. The capacitive probe of the apparatus coupled to a charge sensitive amplifier is rotating and scanning over the surface of the specimen. A map of the charge distribution is displayed as the image on the cathode-ray oscilloscope. The sensitivity of the probe; the measurable charge density is about  $4.3 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ . The effective area of the probe is  $2.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ .

## 1. ま え が き

表面電荷分布の測定はミクロな摩擦帶電現象および絶縁物の物性に関する多くの情報を提供してくれるが、これには感度の高い測定装置が要求される。

表面電荷分布の測定法には、i) ポテンシャルプローブ法<sup>1-3)</sup>、ii) 振動プローブ法<sup>4)</sup>等の研究が報告されている。振動プローブ法は、プローブの構造が複雑であり、しかも有効面積を小さくすると、信号がきわめて微弱になるので、検出装置として高感度增幅器が必要になる。一方、ポテンシャルプローブ法はプローブの構造が簡単で、帶電体表面の電荷分布を画像表示することが比較的簡単にできる。しかし従来の方法では増幅器の入力容量を極力小さくしないと変換効率が低下する欠点を有している。また初段増幅器の入力抵抗もきわめて大きいものが必要である。

本研究は、ポテンシャルプローブ法の利点を生かし、上記の欠点を解決することを目的としたもので、ここでは検出装置に電荷増幅器を用いた高感度の表面電荷分布画像表示装置について解析、試作を試みた。本報告はその結果を述べたものである。

## 2. 測 定 原 理

図1は電荷増幅器を示したもので、利得Gを有する高

入力インピーダンスの演算増幅器と、帰還容量  $C_f$ 、高抵抗Rから構成される。 $C_0$ は入力容量と分布容量の和である。いま静電容量  $C_s$  に電荷  $Q$  を印加すれば、t秒後における出力電圧  $v_0$  は、 $C_f \gg (C_s + C_0)/G$  のとき、

$$\left. \begin{aligned} -v_0 &\doteq Q/C_f \cdot \exp(-t/\tau) \\ \tau &\doteq RC_f G \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。測定時間が短く  $t \ll \tau$  が成立する範囲では電荷  $Q$  は  $C_s$ 、 $C_0$  に無関係に求めることができる。以上のように電荷増幅器は  $C_0$ 、 $C_s$  等の不確定な要素を打ち消すことができる利点を有するので、これをプローブ法と組み合わせることにした。

図2は表面電荷分布測定器の構成を示したもので、プローブは同期電動機Mで回転する円板に取り付けられ、円板上に組み立てられた電荷増幅器に接続されている。試料は接地した試料台の上に置き、試料台を一定速度で一方向に移動させ、表面全体を円弧状に走査するようにした。図3は等価回路を示したもので、 $C_s$  は厚さ  $d_s$ 、比誘電率  $\epsilon_s$  なる試料の静電容量、 $C_p$  はプローブと試料間の静電容量である。試料の表面電位を  $V$  とすれば、プローブの走査により生ずる出力電圧  $v_0$  は、一般に  $C_p \ll C_0$ 、 $C_s$  と考えられるから、測定系の伝達関数は、

$$\left. \begin{aligned} -\frac{V_0(S)}{I(S)} &= \frac{G/(C_0 + (1+G)C_f)}{S + 1/R[C_0 + (1+G)C_f]} \\ I(S) &= SC_p V \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で与えられる。いま仮に図4(a)に示す試料上の走査に対し、時間  $T_1$ 、 $T_2$  間に一定電位  $V_0$  が存在していたと仮定すれば、各時間に対する出力電圧  $v_0$  は  $T_1 \leq t < T_2$  のとき、

\* 神奈川大学工学部電気工学科(221 横浜市神奈川区六角橋3-27)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kanagawa University, 3-27, Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama 221, Japan

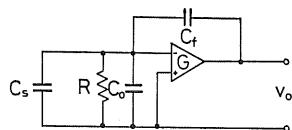


図 1 電荷増幅器の基本回路

Fig. 1 Elementary circuit of a charge sensitive amplifier.

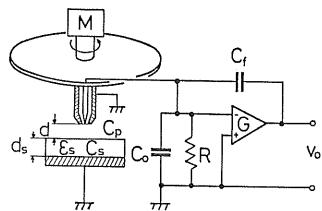


図 2 回転プローブ法の構成

Fig. 2 Arrangement of a rotating potential probe system.

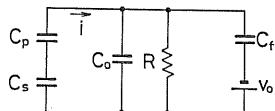


図 3 装置の等価回路

Fig. 3 Simplified equivalent circuit of a system.

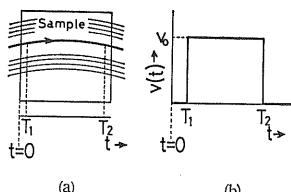


図 4 (a) 試料表面の走査

(b) 応答特性を計算するための表面電位変化

Fig. 4 (a) Probe raster over the sample.  
(b) Variation of surface potential to calculate a response.

$$-v_0 \div C_p / C_f \cdot V_0 \exp \{-(t-T_1)/\tau\} \quad (3)$$

$T_2 - T_1 \ll \tau$  とすれば

$$-v_0 \div C_p / C_f \cdot V_0 \quad (4)$$

 $t \geq T_2$  のとき、

$$\begin{aligned} & -v_0 \div C_p / C_f \cdot V_0 [\exp \{-(T_2-T_1)/\tau\} - 1] \\ & \times \exp \{-(t-T_2)/\tau\} \end{aligned} \quad (5)$$

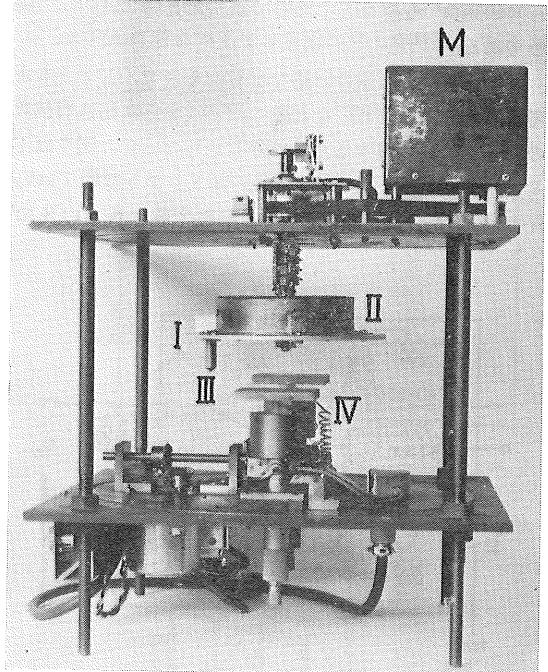
となり、出力電圧  $v_0$  は忠実に表面電位の様子を表わす。変換利得  $\eta$  は

図 5 測定装置

M: 同期電動機, I: 回転円板, II: 電荷増幅器, III: プローブ, IV: 試料台

Fig. 5 Construction of the apparatus.

M: synchronous motor, I : rotating plate, II : charge sensitive amplifier, III : probe, IV : specimen.

$$\eta = C_p / C_f \quad (6)$$

で表わされ、帰還容量  $C_f$  を小さくすれば高い変換効率が得られることを示している。試料の表面電荷に対しては、簡単のために電荷が表面上に帯電していると仮定する。表面電荷密度を  $\sigma$  とし、プローブの有効面積を  $A$  とすれば

$$\sigma = C_f v_0 / A \cdot (1 + \epsilon_s d / d_s) \quad (7)$$

となり、有効面積、比誘電率および寸法の計測より電荷密度が求められる。

### 3. 装置の構成

図 5 は試作した装置（シールドケースを除いた）を示したもので、I は回転円板で同期電動機 M に結合されている。II はシールドケース内に入れた電荷増幅器で、III はプローブ、IV は試料台である。針電極は  $1.5 \text{ mm}^{\phi}$  の真鍮棒の先端を尖らせて用いた。プローブの回転半径は  $60 \text{ mm}$ 、回転数は同期電動機 M により  $1 \text{ rps}$  とした。試料台は 4 個取り付けられ、下部に設けた同期電動機により、 $1 \text{ mm/s}$  で移動するようにした。試料台の高さはマイクロメータにより任意に設定できる。試料寸法は

$40 \times 40 \text{ mm}^2$  を標準としたので試料走査時間は約 0.108 秒である。

図 6 は電荷増幅器の回路を示したもので、ドリフトを考慮して Twin FET を初段に用い、さらに超低周波数のドリフトを補償するために帰還を行なった。図 7 はドリフト特性を示したもので、長時間ドリフトは約  $0.1 \text{ mV/h}$  以下になっている。時定数は回路定数より  $1.1 \times 10^4$

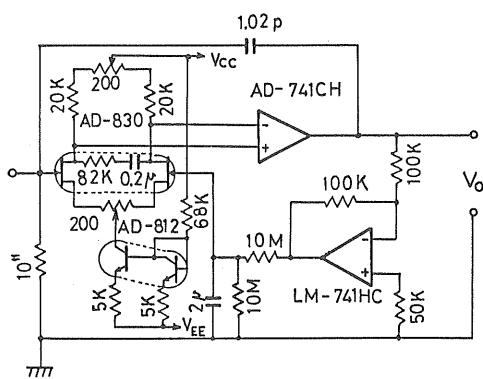


図 6 電荷増幅器の回路構成

Fig. 6 Circuit diagram of a charge sensitive amplifier.

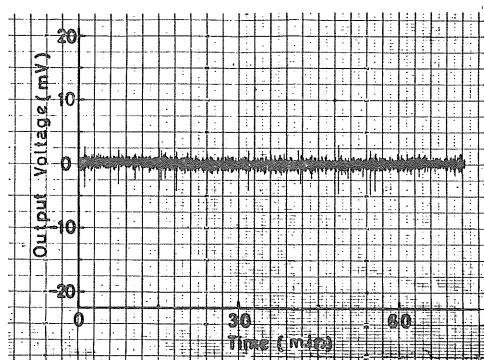


図 7 ドリフト特性

Fig. 7 Drift characteristic.

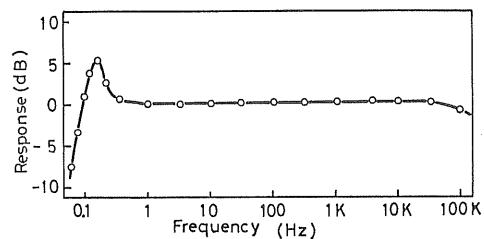


図 8 周波数特性

Fig. 8 Frequency characteristic.

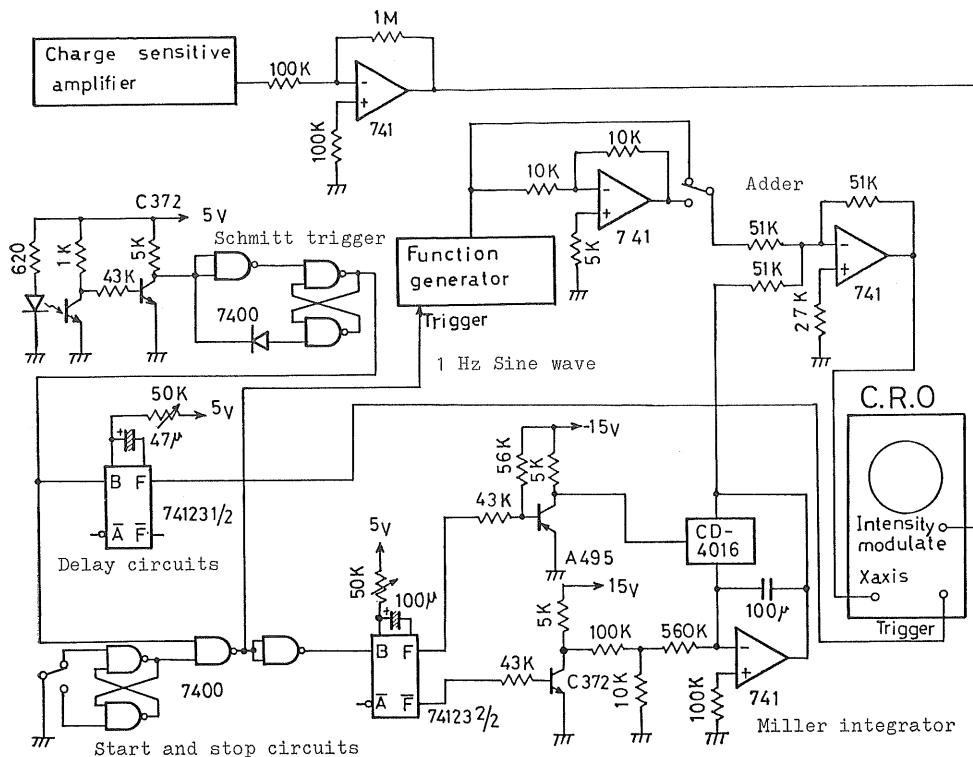


図 9 オシロスコープ上に画像表示するための回路構成

Fig. 9 Circuit diagram to display image on C.R.O.

秒である。したがって  $\tau \gg$  走査時間の関係を十分満足している。図 8 は利得の周波数特性を示したもので、約 0.25 Hz~100 kHz 間で平坦な特性を有している。図 9 は表面電荷分布をブラウン管オシロスコープに濃淡で表示するための回路構成を示したものである。プローブは試料表面上を円弧状に走査するので、X 軸の円弧状掃引信号を得るために、プローブの回転と同期した 1 Hz の正弦波の極値の一部を、ミラー積分器によって作られたのこぎり波に加算する方法を用いた。同期信号は回転軸に取り付けた円板に穴をあけ、フォトインタラプタを用いとり出した。

#### 4. 装置の特性および測定例

プローブの有効面積の決定には、測定用電極<sup>1)</sup>を用い電位  $V_0$  を一定に印加し、出力パルス信号の振幅とプローブと電極間距離  $d$  との関係が (4) 式より

$$V_0/v_0 = C_f/\epsilon_0 A \cdot d \quad (8)$$

を満足する範囲内で計算により求めた。図 10 は  $V_0/v_0$  と  $d$  との関係を示したもので、I は帰還容量を取り付けないとき、すなわち分布容量のみの測定結果で、II は附加容量 1.02 pF を接続した場合である。それぞれの結果より  $d=0.2 \sim 0.8$  mm の範囲内で直線関係を満足していることがわかる。これより有効面積  $A$  は (8) 式より  $2.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  となり、直径に換算すると 0.6 mm となる。また変換利得は  $C_f=1.1 \text{ pF}$ 、 $d=0.4 \text{ mm}$  のとき約  $5.6 \times 10^{-3}$  となる。

装置の総合特性を調べるために図 11 に示した短冊電極を用い、それぞれの電極に図示した電圧を加え走査した。図 12 はこの結果を示したもので、(a) は任意の走査

線に対する出力電圧  $v_0$  の波形を示したものである。使用した電極配置に対して分解能は立上り時間より約 1.8

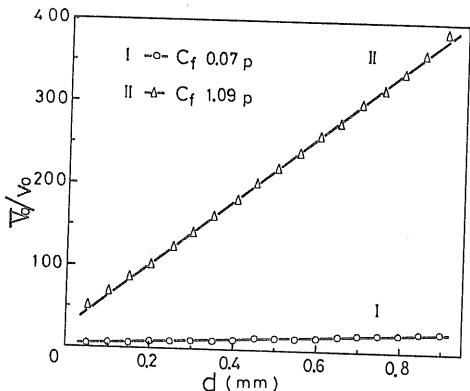


図 10 電極間距離の変化による応答特性

Fig. 10 Normalized inverse pulse amplitude vs. probe-surface distance.

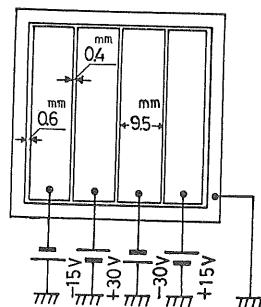


図 11 総合特性測定用短冊型電極

Fig. 11 Electrode array to measure a overall characteristics of the apparatus.

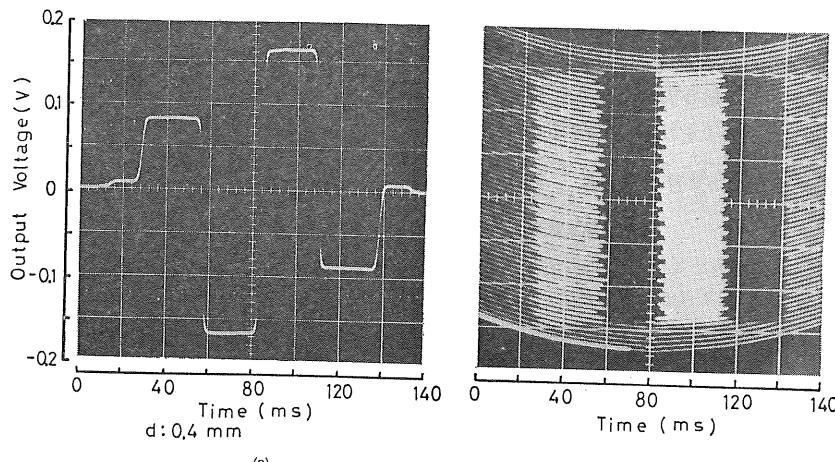


図 12 (a) 出力電圧波形

(b) オシロスコープによる画像

Fig. 12 (a) Output waveform.

(b) Image on C.R.O.

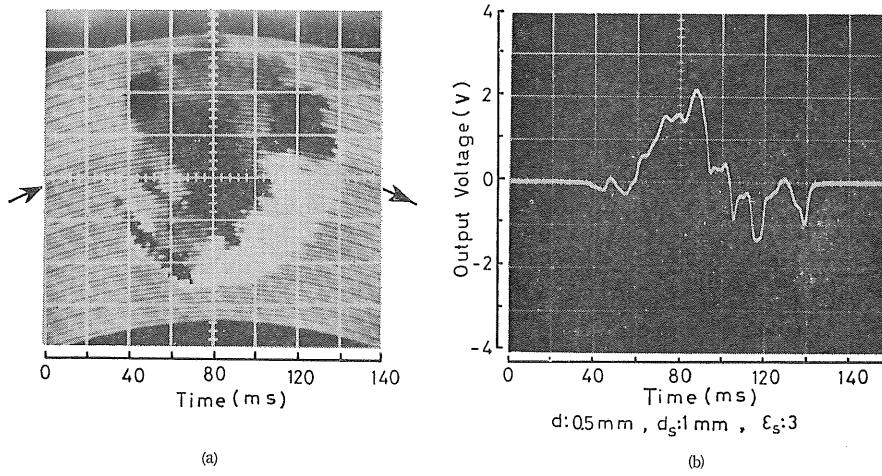


図 13 エレクトレット上の電荷分布

(a) オシロスコープによる画像  
(b) 矢印の部分の走査による出力電圧波形

Fig. 13 Charge distribution on electret.

(a) Image on C.R.O.  
(b) Output waveform through a probe scanning on allowed line.

mm である。 (b) は得られた画像である。各電極の電位に比例した濃淡の画像が得られている。画像端面の凹凸は円板の回転むらによって生じたものである。

図 13 はアクリル樹脂に円板電極を用いて熱エレクトレット法により作成したエレクトレットの十電極面に対する測定の一例を示したものである。(a) はその画像で、黒い部分が正、白い部分が負に帶電していることを示す。(b) は矢印を付した部分の走査による信号波形で、電荷増幅器の出力を 10 倍の反転増幅器で増幅したあとの波形である。これより正の極大値に対する電荷密度(表面にのみ帶電していると仮定して)は  $2.14 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ 、負の極大値については  $1.36 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$  となる。

試作した装置の感度は、雑音およびドリフト特性を考慮し、最小検出可能出力電圧を 5 mV とすると、表面電位に対しては  $d=0.4 \text{ mm}$  のとき約 1 V、表面電荷に対しては  $4.3 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$  (ただし  $\epsilon_s=3$ 、 $d_s=1 \text{ mm}$ ) である。

## 5. 結 言

ポテンシャルプローブ法と電荷増幅器を組み合わせた表面電荷分布測定装置について述べた。利点は、i) 増

幅器の入力容量、装置および配線の分布容量の影響が無視できる、ii) 極端に高い抵抗を使用しないでよい、iii) 高感度となる、iv) 装置が安定しているので取扱いが簡単となる、v) プローブが回転しているので 2~4 個の試料の同時測定が可能となり、比較測定ができる、等である。

今回はプラウン管上に白黒画像として表示することを目的としたものであるが、カラー表示、X-Y 記録計に描かせることも可能である。

終りに本研究に対し、熱心に実験を行なってくれた当時の学生木下弘君と本装置の製作に全面的に協力していただいた故落合勝治氏に心から感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) D.K. Davies : J. Sci. Instrum., 44 (1967), 521.
- 2) T.R. Foord : J. Phys. E., 2 (1969), 441.
- 3) K.A. Hughes and P.E. Secker : *ibid.*, 4 (1971), 361.
- 4) F. Nordhage and G. Bäckström : J. Electrostatics, 2 (1976), 91.