

## 論 文

## 微小面積プローブを用いた高解像度表面電位測定

島 田 昭\*

(1987年10月7日受理)

## Electrostatic Surface Potential Measurement with High Resolution Probe

A. SHIMADA\*

(Received October 7, 1987)

An electrostatic probe for high-resolution measurement of surface potential has been designed and developed. It consists of a fine detective electrode of diameter 50  $\mu\text{m}$  and a guard electrode of thickness 25  $\mu\text{m}$ . The resolution characteristics has been tested with a grating pattern electrode. When the probe is at a distance of 50  $\mu\text{m}$  from the surface of measurement object, it exhibits a spatial resolution of 0.12 mm and a spatial frequency resolution of 4.2 cycles/mm. Using the characteristics of spatial frequency response and the Fourier Transformation Method, restoration for intrinsic distribution of surface potential has been investigated. In this method, the spatial resolution of surface potential measurement is improved about more than twice as compared with the measurement data without the restoration.

## 1. まえがき

表面電位の測定は、固体誘電体表面の電荷分布あるいは電位分布状態を知るうえで重要である。とくに、電子写真に用いられる感光体や静电記録に用いられる記録体の特性評価には欠かすことができないものである。しかし、この分野で通常用いられている表面電位計は、記録体上に形成された静电電荷像とそれを現像によって可視化したトナー像との関係を解析するには、十分な解像度が得られない<sup>1)</sup>。また、最近表面電位測定の電気信号から電荷分布状態を直接表示する記録方法が報告されているが、この場合においてもより高解像化することが望まれる<sup>2,3)</sup>。一方、電荷分布の高解像度測定法として電子ビームを使う方法もあるが、この方法は測定用試料に制限があることや電荷分布を破壊せずに測定ができないなどの問題もある<sup>4,5)</sup>。以上のような理由から、従来から表面電位測定に用いられてきた静电誘導方式において、どの程度まで高解像度測定が可能であるか、詳しく検討しておく必要がある。

そこで、本報告において、表面電位測定の特性解析をもとに高解像度測定に適する微小面積プローブを作製し、その解像特性を測定・評価する。さらに、この解像特性を利用し、表面電位測定のより高精度化を図ること

ができる処理法について検討する。

## 2. 微小面積プローブの作製

## 2.1 微小面積プローブの構成

静电誘導を利用した非接触型の表面電位計は、表面電位のセンシング方式により、1)直結増幅方式、2)回転方式、3)Kelvin 法に分類される<sup>1)</sup>。この 3 種類の方法のなかで、感度が高く応答速度にも優れている 1) の方式を本報では用いることにした。図 1 に、表面電位測定装置の微小面積プローブ部分の構成を示す。検出電極とアース間には、検出電極と記録体間との静電容量(約 0.001 pF)に比べて十分に大きな容量をもつコンデンサ  $C_1$  を接続し、検出電極がアースと同等になるようにする。そして、 $C_1$  に誘起される電圧を直接 MOSFET で増幅し、その出力を高精度電圧計で読み取るのである。 $C_1$  の大きさは、測定系の応答速度(1~10 kHz)を考えて 5 pF とした<sup>6)</sup>。

微小面積プローブの詳細部の設計には、文献 1) に述べられている内容と同じ次の 4 点を考慮する必要がある。

- (1) 表面電位測定の走査方向における解像度が高いこと。
- (2) 感度が高く、検出電極と被測定物表面とのギャップが精密に調整でき、かつ一定に保てるうこと。
- (3) ダイナミックレンジが広く、十分に応答速度がされること。
- (4) 取扱いが容易で、できれば信号処理機能をもつこと。

\* 株式会社日立製作所日立研究所 (319-12 日立市久慈町 4026)

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 4026,  
Kuji-cho, Hitachi, 319-12 Japan

と。

とくに、検出電極の径 $D$ やギャップ $G$ およびガード電極部の構成は、上記(1)の項目に密接に結びついているため、次項以下で述べる表面電位測定の特性解析をもとに決めることにした。

## 2.2 表面電位測定の特性解析

微小面積プローブを用いた表面電位測定の解像特性を知るための解析解は、基板電極と検出電極との間に記録体と空気ギャップを配置させた2層の平行平板誘電体モデルを使い求めることができる。詳しい算出方法は文献1)および7)に述べられてあるので、ここではそれを利用して解像特性を求める方法について考える。

平行平板を $xy$ 平面にとり、基板電極面の垂直方向を $z$ 軸とする。記録体上の電荷分布 $\sigma(y)$ を次のように仮定する。

$$\sigma(y) = (\sigma_0/2) (1 + \cos p y) \quad (1)$$

ここで、 $p = 2\pi/\lambda = 2\pi u$ ,  $\lambda$ : 空間波長,  $u$ : 空間周波数である。上述の方法を用いて、検出電極前面に生じる $z$ 軸方向の電界成分 $E_{bz}(m)$ を求める。検出電極を走査したときに検出電極に誘起される電荷の最大値 $Q_{\max}(u)$ と最小値 $Q_{\min}(u)$ は、 $E_{bz}(m)$ を次のように積分して求めることができる。

$$Q_{\max}(u) = 2 \int_0^{D/2} E_{bz}(m) dy = B_0 D + 2B_3 \sin \frac{pD}{2} \quad (2)$$

$$Q_{\min}(u) = 2 \int_{\lambda/2}^{(\lambda+D)/2} E_{bz}(m) dy = B_0 D + 2B_3 \sin p \cdot \frac{\lambda+D}{2} \quad (3)$$

ここで、

$$B_0 = (\sigma_0 l/2) \{ \epsilon_b l + \epsilon_a (m-l) \}$$

$$B_3 = 2\sigma \cosh p m \sinh p l / 4p \{ \epsilon_b \sinh p l \cosh p(m-l) + \epsilon_a \cosh p l \sinh p(m-l) \}$$

$D$  : 検出電極の径

$l$  : 記録体の厚さ ( $T$ )

$m-l$  : 検出電極と記録体表面との距離 (ギャップ $G$ )

$\epsilon_a$  : 記録体の誘電率

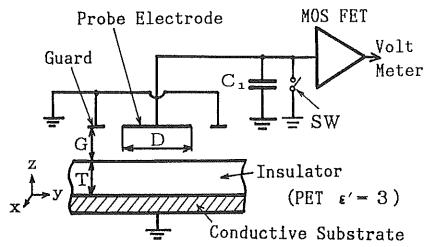
$\epsilon_b$  : ギャップ $G$ の誘電率

である。空間周波数の応答特性 $H(u)$ は、 $Q_{\max}$ と $Q_{\min}$ の差をとり、さらに $u=0$ の $Q(0)$ で規格化して次のようになる。

$$H(u) = \frac{Q_{\max}(u) - Q_{\min}(u)}{Q(0)} = \frac{2B_3}{B_0 D} \sin \frac{pD}{2} \quad (4)$$

実際の $H(u)$ の測定には、(1)式のような余弦波状の電荷分布を作ることがむずかしいため、矩形波状の電荷分布または電位分布パターンを用いる。この場合の $H(u)$ も、フーリエ展開を用いて周波数成分を分け、上述した方法に従って求めることができる。ここでは微小面積プローブの各要素が $H(u)$ 特性に影響するかを簡単に調べるために、余弦波状の電荷分布から求めた(4)式をそのまま用いる。

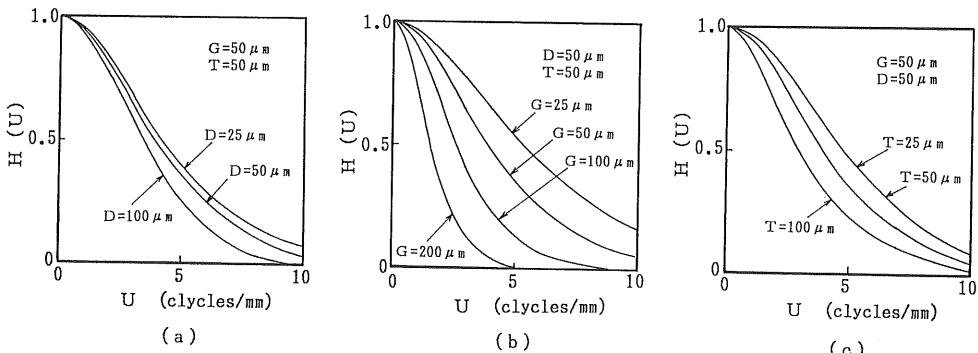
検出電極の径 $D$ 、ギャップ $G$ 、記録体の厚さ $T$ をそれ



D=Probe Diameter T=Insulator Thickness  
G=Air Gap C<sub>1</sub>=Input Capacitance

図1 微小面積プローブの構成

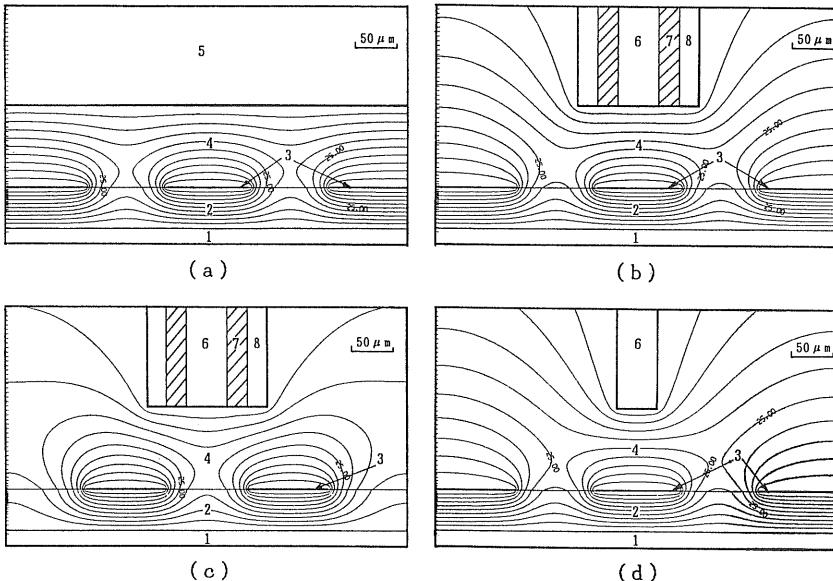
Fig. 1 Geometry of a high-resolution probe and basic parameters.



(a) Effect of probe diameter, (b) Effect of air gap, (c) Effect of insulator thickness.

図2 平板プローブの空間周波数特性解析結果

Fig. 2 Calculated spatial frequency response by solving Poisson's equation for a planar probe geometry.



1. Conductive Substrate 2. Insulator ( $\epsilon' = 3$ ) 3. Charge Distribution 4. Air Gap ( $\epsilon' = 1$ )  
 5. Plane Electrode 6. Probe Electrode 7. Insulator ( $\epsilon' = 3$ ) 8. Guard Electrode

(a) Parallel plane electrode, (b) Probe located above the center of rectangular charge pattern,  
 (c) Probe located above the halfway of charge patterns, (d) Probe without guard electrode.

図 3 プローブ電極の各種構成による電位分布の変化

Fig. 3 Distribution of electric potential for some kinds of probe geometry.

ぞれパラメータにして  $H(u)$  特性に及ぼす効果について調べた結果を図 2 に示す。図 2(a) は、 $G$  と  $T$  を固定し、 $D$  を  $25, 50, 100 \mu\text{m}$  としたときの  $H(u)$  特性の変化を示している。この結果から、 $D$  が  $25 \mu\text{m}$  の場合でも  $50 \mu\text{m}$  の場合でも  $H(u)$  特性に大きな違いはないことがわかる。一方、検出電極に入る信号量は  $D$  の 2 乗で決まるため、感度は  $D$  を  $50 \mu\text{m}$  にしたほうが  $25 \mu\text{m}$  よりも 4 倍高くなる。以上の理由から、 $D$  は  $50 \mu\text{m}$  に設定することにした。

$G$  の  $H(u)$  特性に及ぼす影響は、図 2(b) のようになり、 $G$  の設定がプローブの解像性を決める最も重要な因子であることがわかる。この結果から、 $G$  を  $25 \mu\text{m}$  くらいにすることが望ましいが、実際に  $25 \mu\text{m}$  のギャップで測定するとギャップ間で放電することもあり、本報の実験では  $G$  の最小限界は  $50 \mu\text{m}$  前後であった。記録体の厚さの影響は、図 2(c) の結果からわかるように、 $H(u)$  特性にそれほど敏感ではない。

以上の解析結果から、 $D$  は  $50 \mu\text{m}$  に設定し記録体には厚さ  $50 \mu\text{m}$  のポリエチレンテレフタレート (PET) のフィルムを用い、 $G$  を種々変えて  $H(u)$  特性を測定することにした。

### 2.3 ガード電極部の構成

微小面積プローブを作製する上で、次に決めなければ

ならないのが、ガード電極部の構成である。ガード電極部の構成は、検出電極周辺部分の電位分布を差分法を用いて求め、その結果をもとに検討した<sup>8)</sup>。図 3 はプローブ電極の各種構成の違いによる電位分布の変化を示す。計算条件は、 $G=100 \mu\text{m}$ ,  $T=50 \mu\text{m}$ ,  $u=5$  本/mm で矩形波状の電荷分布を仮定している。図 3(a) は平板電極を仮定したときの電位分布である。有限の大きさをもつ検出電極を使う場合、検出電極近傍の電位分布がこの平板電極の電位分布とはほぼ等しくなるようにガード電極部を構成させる必要がある。図 3(b) (c) は、検出電極とガード電極との距離を  $25 \mu\text{m}$  とし、その間を絶縁材 ( $\epsilon' = 3$ ) で充填し、さらにその回りを肉厚  $25 \mu\text{m}$  のガード電極で覆ったプローブ構成の場合の電位分布である。図 3(b) はプローブが電荷分布パターンの中央に位置した場合、図 3(c) はプローブが電荷分布パターンの間に位置した場合の電位分布である。両結果の検出電極近傍の電位分布が図 3(a) の平板電極の場合の電極付近の電位分布とはほぼ等しいことがわかる。図 3(d) はガード電極のない場合の電位分布である。ガード電極がない場合、図 3(d) の結果から検出電極の側面部への電気力線の入り込みが多く、これが解像特性を劣化させる原因になることがわかる<sup>9)</sup>。

以上の検討から、作製する微小面積プローブの検出電極部の構成は、図 4 に示すようにした。

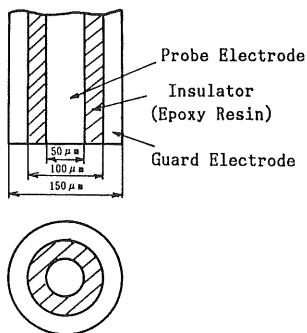


図 4 検出電極部の構成

Fig. 4 Arrangement of the probe tip.

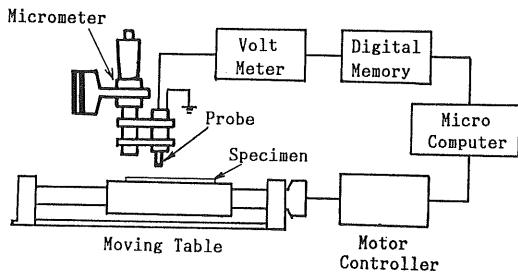


図 5 測定装置の全体構成

Fig. 5 Schematic layout of probe and scanning system.

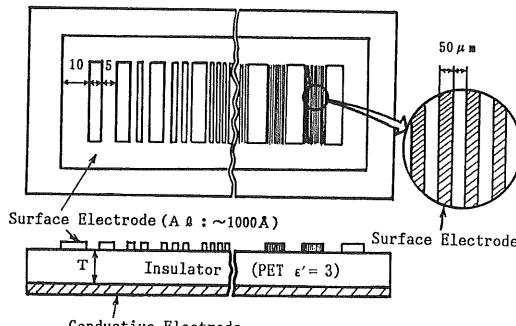


図 6 空間周波数特性測定用試料の構成

Fig. 6 Specimen for measurement of spatial frequency response.

### 3. 空間周波数特性の測定

#### 3.1 実験方法

本実験に用いた測定装置の全体構成を図5に示す。微小面積プローブはマイクロメータに取り付け、プローブと記録体とのギャップを精度よく設定できるようにした。測定用試料は位置コントロールのできる精密移動台の上に固定し、移動台を図中の矢印方向に走査し測定する（走査速度：50 mm/s）。測定データはデジタルメモリを介してマイコンに入力できるようにした。マイコンは精密移動台の送り制御およびデータの入力、記憶、さ

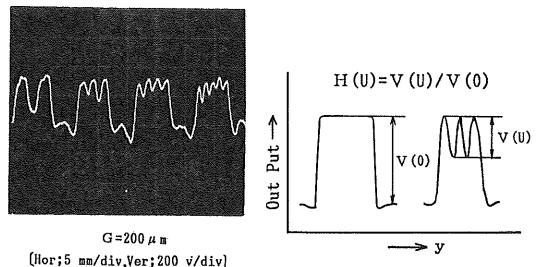
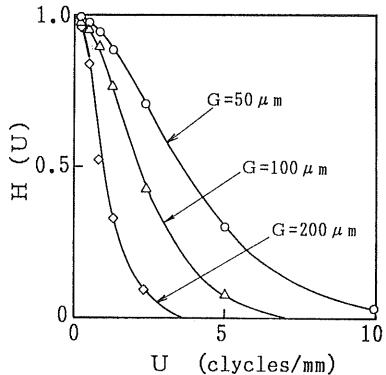
図 7 測定結果例と  $H(u)$  の求め方Fig. 7 An example of output response and a way of calculating  $H(u)$ .

図 8 空間周波数特性の測定結果

Fig. 8 Measurement results of spatial frequency response.

らに高精度化の信号処理に用いた。

測定用試料は、図6のようにポリエチレンテレフタレートのフィルムを用い、その両面をAl蒸着した後、表面をフォトエッチングで、 $u$ が0.1~10本/mmのパターンを形成させた。電位分布の作成は、表面電極部に外部電源から電圧を印加するか、または電極部をアースに接続し、その他の記録体表面部分をコロナ放電を用いて一様に帯電させる方法を用いた。本報ではおもに前者（電極への印加電圧400V）を用いた。

#### 3.2 実験結果とその検討

図7に空間周波数特性測定の出力例と  $H(u)$  の求め方を示す。 $H(u)$  は、光学系の解像度を評価するときに用いるMTF特性と同様である。作製した微小面積プローブを用いて、ギャップを50, 100, 200 μmと設定し、それぞれの空間周波数特性を測定した。結果を図8に示す。図8の特性は、図2(b)の計算から求めた特性に対応している。

次に、空間周波数  $u$  を固定し、 $H(u)$  の値と  $G$  の関係を調べた。結果を図9に示す。図中の点線が計算から予測される特性で、実線が測定結果である。この結果から、 $G$  を大きくするほど計算値と測定値がずれることがわかった。

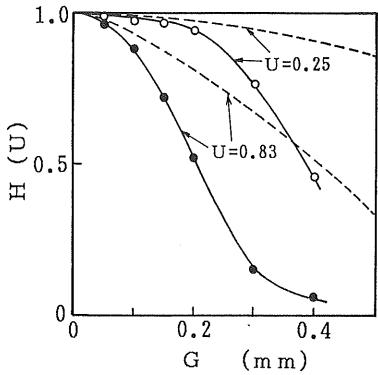
図 9  $H(u)$  と  $G$  の関係

Fig. 9 Relationship between spatial frequency responses and air gap.

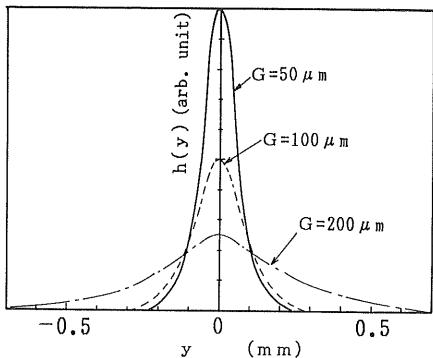
図 10 線広がり関数  $h(y)$  の分布特性

Fig. 10 Characteristics of line spread function.

る。この原因は、計算では  $xy$  平面で  $x$  方向に検出電極が無限に広がっていると仮定しているのに対して、実際は有限であるため、検出電極に入る信号量はその分だけ小さくなる。さらに、ギャップを広げた場合に急激に測定特性が悪くなるのは、入力信号が小さいと MOSFET の S/N 比特性の制限から、增幅特性が悪くなってしまうことによる。

図 8 の測定結果をもとに、フーリエ逆変換して LSF (line spread function)  $h(y)$  を求めた結果を図 10 に示す<sup>10</sup>。 $h(y)$  の特性は、測定系のインパルス応答特性に対応している。 $h(y)$  の半値幅から、本実験で用いたプローブの解像性を評価すると、 $G=50 \mu\text{m}$  で  $0.12 \text{ mm}$ 、 $G=100 \mu\text{m}$  で  $0.18 \text{ mm}$ 、 $G=200 \mu\text{m}$  で  $0.44 \text{ mm}$  となる。これらの値を空間周波数に換算すると、それぞれ  $4.2$ 、 $2.8$ 、 $1.1 \text{ 本/mm}$  となる。

#### 4. 高精度測定のためのデータ処理

##### 4.1 復元化処理

微小面積プローブによる表面電位測定において、解像

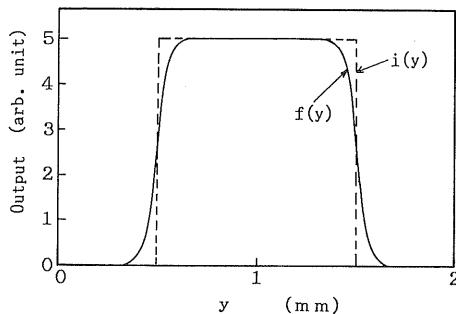


図 11 1 mm 幅パターンの電位分布測定結果

Fig. 11 Measurement result of surface potential with a rectangular distribution of 1 mm line width.

特性を劣化させる原因是、検出電極と被測定物との間にギャップがあることと、検出電極が  $x$  方向に無限で  $y$  方向に無限でないことがある。この劣化は高解像測定の障壁になるが、逆にこの劣化特性を事前情報として正確に得ておけば、その情報を利用して測定データを復元化処理することにより被測定物の真の電位分布に近づけることができる<sup>10,11)</sup>。その処理方法について述べる。

記録体上の真の電位分布を  $i(y)$  とすると、この  $i(y)$  は表面電位の測定値  $f(y, z)$  および劣化度合を表わす特性関数  $h(y, z)$  をフーリエ変換した  $F(u)$  と  $H(u)$  を用い、次式のようなフーリエ逆変換により求めることができる。

$$i(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(u)}{H(u)} \exp(i2\pi y u) du \quad (5)$$

次項において、この復元化処理を実際の測定に適用して、どの程度まで高精度化を図れるかを検討する。

##### 4.2 処理結果とその検討

本実験は、3.1 節で述べたのと同じ方法により作製した線幅 1 mm の電位パターンの試料を用い、その電極に  $400 \text{ V}$  の電圧を印加して矩形波状の電位分布を模擬的に作り行なった。図 11 は、 $G$  を  $50 \mu\text{m}$  に設定して表面電位を測定した結果である。図中の点線は真の電位分布である。図 11 の測定データと図 8 の結果を用い、(5) 式に従い  $i(y)$  を求めた。その結果を図 12 に示す。(5) 式の計算において、 $H(u)$  は分母にきていたため、 $H(u)$  の値を  $u$  のどの範囲まで使うかが重要である。図 12 の実線は、 $u=6 \text{ 本/mm}$  までは図 8 の  $H(u)$  の値を使い、それ以上の高周波領域では  $H(u)$  を 1 として計算した結果である。この結果から、実際の表面電位測定で生じた劣化部分、たとえば矩形波の片の部分は、 $0.3 \text{ mm}$  以上あるが、本復元化処理によりその半分の  $0.15 \text{ mm}$  以下に改善できることがわかった。さらに、復元特性を上げ

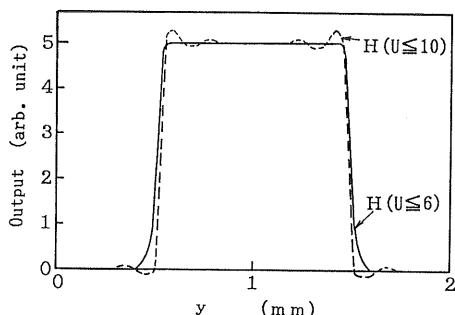


図 12 復元化処理をした結果

Fig. 12 Results of restoration for surface potential measurement.

ようとして、 $H(u)$  の値を 10 本/mm まで取り計算した結果が、図 12 の点線である。この結果からわかるように、 $H(u)$  の値を高周波領域まで広げると、波形に振動が現われ、真の電位分布とはかなり異なったものになる。 $H(u)$  の値をどの範囲まで用いるかを種々検討した結果、本実験では  $u=6$  本/mm 程度までが限界であった。

## 5. まとめ

表面電位測定の特性解析をもとに高解像度測定に適する微小面積プローブを作製し、空間周波数特性を測定することにより解像性を評価した。さらに、その特性を利用して測定の高精度化を図る復元化処理法について検討し次の結果を得た。

(1) 作製した微小面積プローブの構成は、検出電極径 50  $\mu\text{m}$ 、検出電極とガード電極との距離 25  $\mu\text{m}$ 、ガード電極の肉厚 25  $\mu\text{m}$  である。

(2) 同上の微小面積プローブの解像限界は、検出電極と記録体とのギャップを 50  $\mu\text{m}$  に設定した場合、0.12

mm で、空間周波数で 4.2 本/mm であった。

(3) フーリエ変換を用いて測定データを復元化処理することにより、表面電位測定の精度を 2 倍以上改善することができた。

以上のことにより、微小面積プローブを用いて高精度の表面電位測定が可能になったが、解像性についてはまだ十分ではない。さらに高解像度化を図るために検討を進めていくとともに、非破壊で高精度に電位分布を測定できる新しい方法についても検討していく必要があると考えられる。

本研究を進めるに当たり、終始ご指導いただいた日立研究所安西正保氏、保志信義氏に謝意を表するとともに、本論文の電位分布計算においては熊坂隆夫氏の指導をいただいたことに感謝します。

## 参考文献

- 1) 松井 満：静電気学会誌, 10 (1986) 217
- 2) L.S. Jeromin and L.M. Klynn : J. Appl. Photogr. Eng., 5 (1979) 183
- 3) 富田雅和、田辺育夫、内田 覚、日高 信、木脇久智：電子写真学会誌, 24 (1985) 108
- 4) G.F. Fritz, D.C. Hoesterey and L.E. Brady : Appl. Phys. Lett., 19 (1971) 277
- 5) 松木 真：電子通信学会論文誌, J63-C (1980) 545
- 6) 菊池清明、鈴木 昭：静電気学会誌, 3 (1979) 92
- 7) R.M. Schaffert : *Electrophotography*, pp. 310-316, Focal Press, London (1965)
- 8) 浅野和俊：静電気学会誌, 11 (1987) 204
- 9) B. Scruton and B.H. Blott : J. Phys. E, 2 (1973) 473
- 10) A. Rosenfeld and A.C. Kak : *Digital Picture Processing*, Academic Press, New York (1976)
- 11) 島田 昭、安西正保：電子写真学会第 52 回研究討論会論文集, p. 16, 電子写真学会 (1983)