

論 文

## 帯電測定における近接導体の遮蔽効果

松 井 満\*, 村 崎 憲 雄\*\*, 藤 林 宏 一\*, 飯 塚 正 明\*  
(1991年1月14日受理)

### Sensitivity of a Field Mill Influenced by a Grounded Conductor Placed around the Probe

M. MATSUI,\* N. MURASAKI,\*\* K. FUJIBAYASHI\* and M. IIZUKA\*

(Received January 14, 1991)

Sensitivity calibration of a field mill in nonuniform electric field has been discussed empirically. When the electric field on the probe head is distorted due to a grounded conductor placed in the vicinity of the probe, the sensitivity of the field mill changes so that some errors will be caused in the measurement. In this study, a probe of a field mill which has been enclosed within a hemispherical end of a cylinder, having diameter of  $2r=100$  mm and length of 500 mm, has been set at 100 to 300 mm distance from a high potential plane electrode. A wide guard electrode, as a grounded conductor, has been initially placed on the same plane with the top face of the probe. Displacing the grounded conductor behind the probe, the sensitivity increases due to concentrated lines of electric force toward the salient probe. When the probe saliency  $s$  is small, compared to the sphere radius  $r$ , the concentrated electric field on the probe head can be estimated as that of an equivalent metal spheroid, introduced into a uniform field. Optimum dimensions of the equivalent metal spheroid have been derived empirically.

### 1. まえがき

帯電測定に使用する電界計の感度は、一般に平等電界中で校正されるので、検出部前面の電界が平等電界から変歪すると、測定値には誤差を含む。帯電体の形状および検出部の遮蔽や、帯電体と検出部との位置関係によって生じる誤差、すなわち、検出部前方の物体に起因する平等電界からの変歪については、ある程度検討されている<sup>1,2)</sup>。しかしながら、検出部前方の電界は、帯電体近傍だけでなく、検出部近傍および検出部背後に存在する導体によっても変歪される。検出部近傍および検出部背

キーワード：電界計感度校正、遮蔽効果、電界変歪、電気力線集中、半球棒電極

\* 東京農工大学工学部電子情報工学科 (184 小金井市中町 2-24-16)

Department of Electronic and Information Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Nakamachi, Koganei, Tokyo, 184 Japan

\*\* 帝京大学理工学部電気電子システム工学科 (320 宇都宮市豊郷台 1-1)

Department of Electrical and Electronic System Engineering, School of Science and Technology, Teikyo University, 1-1, Toyosatodai, Utsunomiya, 320 Japan

後に存在する導体による、検出部前方の電界の変歪については、従来あまり検討されていない。

本研究では、この種の原因によって生じる測定上の誤差に関する知見を得るために、特に検出部背後に存在する接地導体の効果について検討した。実験に用いた回転電極型電界計の検出部外形は円筒形の側面に端子箱が付いた形状であり、回転電極のための開口部が、円筒断面の中心に位置している。そこで、直径が上述の端子箱をも包含する大きさで、頂点に開口部を設けた半球棒状の外形を持つ接地金属箱の中に検出部を収納した。外形として半球棒状を採った理由は、一枚のラジアス・ゲージで形状を精密に検査できるためである。検出部背後に置く接地導体として、普遍性を重視し、中心に円孔を持つ接地平板電極を用いた。検出部を収納した半球棒を円孔より突出させ、突出長さを変化させて、電界検出感度を測定した。

この電極構成では、電界計検出部の背後にある帯電体あるいは導体の影響を、接地平板電極により、遮蔽することができる。実際の作業現場における電界測定に際しても、境界条件を整えるために、こういう電極構成を採用できる場合も存在すると考えられる。

なお、球ギャップにおいて、二球の半径が異なる一般

の場合の電界強度の厳密な解と簡単な近似計算法、および半球棒対平板電極における軸上の電界強度の計算法が既に論じられている<sup>8)</sup>。

本研究で用いた半球棒対平板電極においては、平板電極に平行で、中心に円孔を持つ平板電極が、半球棒電極を貫通させている点が上述の既発表研究と異なる。

## 2. 実験方法

実験装置の概要を図1に示す。電界計検出部Pの背後に存在する接地導体を平板電極Bで代表させ、平板電極Aと平行に設置した。平板電極A、Bはいずれも920mm角の亜鉛メッキ鋼板であり、電圧印加時にクーロン力で撓まないように厚さ10mmのベニヤ合板上に接着した。

平板電極A、Bの端部からの放電は空間電荷を生じさせ、電界計指示の誤差の原因となるので端部を丸めた。平板電極の周囲には、直径50mmの円柱の一側面を削り落とし、断面を横幅35mmのD字形に整形した長尺材を、導電性接着剤を塗布した布テープを用いて取り付けた。四隅は直径50mmの四分の一球に仕上げた。

平板電極Bの中央に設けた円孔に半球棒状外形を持った電界計検出部Pを挿入し、検出部Pと平板電極Aとの距離をd、検出部Pの平板電極Bからの突出量をsとした。半球棒の外形を持つ電界計検出部Pの突出量sが半球半径rより小さい場合には、平板電極Bと電界計検出部との間に隙間を生じないように、穴あき補助電極板を平板電極Bの裏側に挿入した。突出量sに対応した、径の異なる穴あき補助電極板を10枚用意した。裏打ちベニヤ合板には、穴あき補助電極板を収めるために、あらかじめ割り抜きを施した。

平板電極Aに可変直流高圧電源を接続して帯電平面を模擬した。平板電極Aに22kVの直流電圧を加えても、直流電源の供給電流は30nA以下であった。この電流は平板電極A、Bの端部からの放電ではなく、平板電極Aの支持碍子に流れる漏れ電流であって、晴天が続くと100pA以下となつた。平板電極の支持碍子の並列絶縁抵抗は $2 \times 10^{11} \Omega$ を越えた。

実験に使用した回転電極形電界計(Statiron ESV-3A, シンド静電気製)の回転電極のための開口径は22mmである。検出部に図2に示すように、頂部に直径22mmの開口部を持つ半球状帽子(球径100mm)と円筒(直径100mm、長さ450mm)を取り付け、外形を半径r=50mmの半球棒に整えた。半球状帽子および円筒はステンレス鋼板製である。

測定時には、平板電極Aと検出部Pとの距離dを一定に保ち、平板電極Bを所定の距離sだけ移動させて

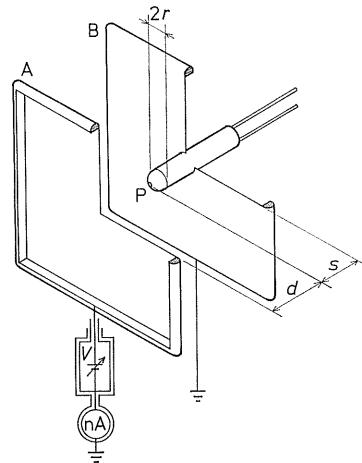


図1 平行平板電極の一方を貫通する電界計

Fig. 1 A field mill penetrating one of a parallel plate electrode.

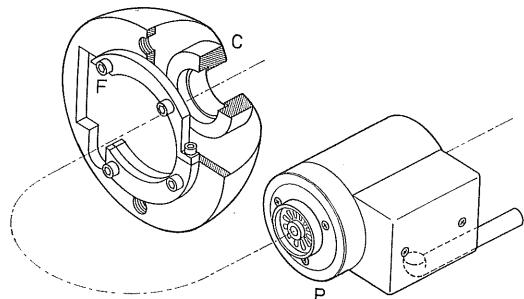


図2 半球状キャップを付けた電界計検出部

Fig. 2 Field mill enclosed within a hemispherical cap.

平行平板電極間距離を $d+s$ とした。検出部Pの平板電極Bからの突出量はsとなる。電界計は一定値の検出器として使用した。すなわち、電極表面での電界強度の変化を表すのに、電極表面での電界強度をある一定の値とするのに必要な平板電極への印加電圧をもって、その指標とした。

突出量 $s=0$ の場合、検出部Pの開口径に等しい直径の円孔を持つ補助電極板を使用した。平板電極Aに電圧 $V_0$ (電界計支持部の指針が適切な目盛線と一致するために必要な電圧で22kV程度)を印加して、電界計の指示を記録した。このとき、平板電極A、B間に平等電界 $E_0 = V_0/d$ が形成されている。上述の記録値は $E_0$ に対応する。次に、平板電極Bをsだけ移動させて、検出部Pが突出量 $s>0$ だけ平板電極Bから突出するとき、電界計の指示が $E_0$ となるように、平板電極Aへの印加電圧 $V$ を調整した。検出部Pを突出させると、電気力線は検出部Pの先端へ集中するので、常に $V < V_0$ である。

### 3. 実験結果および検討

平板電極Aと電界計検出部Pの先端との距離  $d=2r, 4r, 6r$  ( $r$ は半球棒の半径) の各場合に、検出部背後に置く接地平板電極Bの位置、すなわち、電界計検出部Pの平板電極Bからの突出量  $s$ を変化させた。このとき、突出量  $s=0$  の場合と同一の電界計指示を得るために必要な平板電極Aへの印加電圧  $V$ を測定した結果を図3に示す。図3の縦軸は  $s=0$ における平板電極Aへの印加電圧  $V_0$ で規格化してある。横軸は検出部Pの半球棒半径  $r$ で規格化した突出量  $s/r$ で目盛ってある。接地平板電極Bから検出部Pの先端部が突出するに従い、平板電極Aに印加すべき電圧  $V$ は低下し、検出部Pの先端における電気力線の集中の度合は、縦軸の値の逆数  $1/V$ を指標として表される。

突出量  $s$  が小さい条件下では、突出先端の電界強度は、帯電平板電極と半球棒状電極との距離  $d$  に依存しない。領域  $s/r > 6$  では、 $V/V_0$ の値は、 $d/r$ に対応したほぼ一定の値に達している。図3の中の曲線および直線は解析解による近似であって、後に詳述する。

平行平板電極の辺縁付近は開放空間に臨んでいるので、平行平板端部近くの帶電体、接地導体の影響を実験的に検討した。平行平板電極の端部近くに、直径40cm、平行平板電極の辺長を考慮して長さ1.5mの直円柱形接地導体を、高電圧印加電極から放電しない程度に接近させても、電界計の指示は減少しなかった。この結果から、平行平板電極の一方、電極Bを貫通している電界計検出部Pの先端の電界は、平行平板電極A、Bの辺

縁近傍に存在する接地導体によっては影響されないと結論できる。

いま、図4(a)に示すように、円孔を持った接地平板電極Bから  $s$ だけ突出している電界計検出部P(半径  $r$ の半球棒)の先端の電界強度を、次のように解析解で近似する。図4(b)に示すように、半回転楕円体突起(突起高さ  $b$ 、回転半径  $a$ )を付けた無限に広い平面電極で、平等電界  $E_0$ を仕切ったとき、突起頂上の電界強度

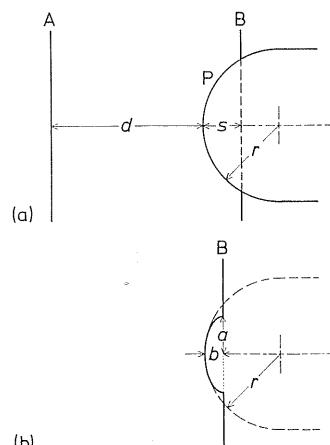


図4 突出した検出部とその等価回転楕円体

- (a) 平行平板間の半球棒
- (b) 等価回転楕円体

Fig. 4 Salient probe and its equivalent spheroid.  
 (a) Salient probe penetrating one of parallel plate electrode.  
 (b) Equivalent hemispheroid on a plane.

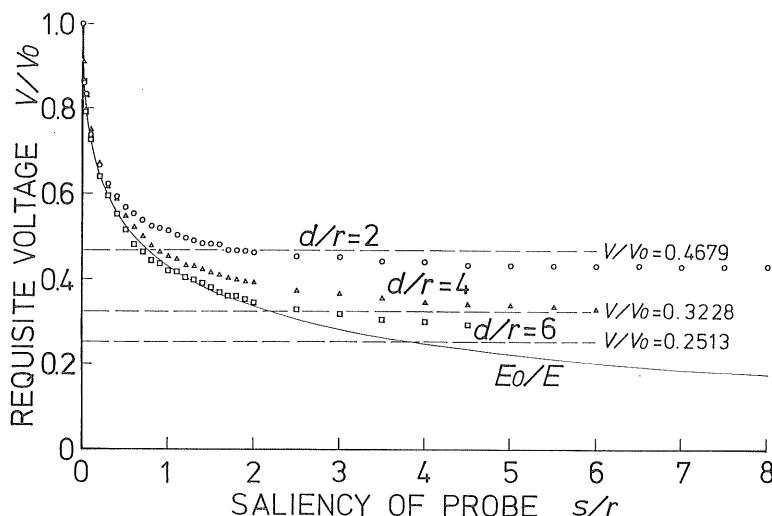


図3 突出した検出部への電界集中度の測定結果

Fig. 3 A measure of concentrated lines of force toward the salient probe.

$E$  は次式<sup>4)</sup>で表される。

$a > b$  (偏平回転橈円体) のとき

$$E = E_0 k^3 / \{(1+k^2)(k - \tan^{-1} k)\} \quad (1)$$

ここで

$$k = \sqrt{a^2 - b^2} / b \quad (2)$$

$b > a$  (偏長回転橈円体) のとき

$$E = E_0 k^3 / \{(1-k^2)(\tanh^{-1} k - k)\} \quad (3)$$

ここで

$$k = \sqrt{b^2 - a^2} / b \quad (4)$$

$a=b$  で半径  $a$  の半球状の突起では、電界強度  $E$  は次式で表される。

$$E = 3E_0 \quad (5)$$

近似に用いる半回転橈円体の突起の曲率半径が、半球棒半径  $r$  と等しいとすると、次式が成り立つ<sup>5)</sup>。

$$a^2/b = r \quad (6)$$

実験に用いた電界計検出部 P の平板電極 B からの突出量  $s$  に縮小係数を掛けて、突起高さを  $b$  とし、回転半径  $a$  の値を (6) 式より算出して上述の解析値にあてはめた。縮小係数を順次に変えて、実験データを代表する曲線を求める試行を繰返し、次の近似方法を得た。

電界計検出部 P の平板電極 B からの突出量  $s$  の半分、すなわち  $b=s/2$  を (6) 式に代入して、 $a$  の値を求め、(1)から(5)式で求まる  $E_0/E$  を、 $V/V_0$  の近似値として図 3 に記入した。(電界計検出部 P の突出量  $s$ ) < (半球棒半径  $r$ ) の範囲内では、近似値と実測値はよく一致しているといえる。

電界計検出部 P の平板電極 B からの突出量  $s$  が大きい場合には、半球棒状電極の先端の電界は、平板電極のない場合、すなわち、平板電極と半球棒状電極との間の電界<sup>3)</sup>で近似できるであろう。したがって、検出部 P の近傍の電界は、回転双曲面電極と無限平板電極との間の

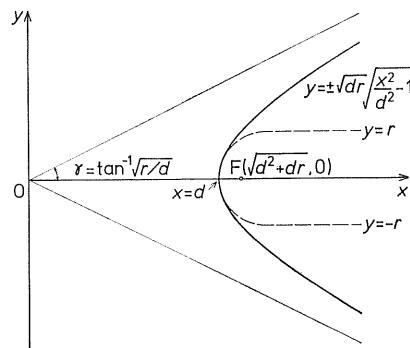


図 5 半球棒状電界計検出部先端の電界算出用回転双曲面

Fig. 5 Hyperboloids of revolution to estimate the concentrated electric field on the top of the probe enclosed within a hemispherical end of a cylinder.

電界<sup>4)</sup>で近似できる。図 5 に示すように、平板電極 A と電界計検出部 P との間の距離が  $d$  で、検出部外形は半径  $r$  の半球棒であるから、等価な回転双曲面の先端の曲率半径を  $r$  とし、 $x=0$  面からの距離を  $d$  とする回転双曲面を考える。この回転双曲面の  $x$  軸からの距離  $y$  は次式で表される<sup>5)</sup>。

$$x^2/d^2 - y^2/dr = 1 \quad (7)$$

漸近線は次式で表される。

$$y = \pm \sqrt{r/d} x \quad (8)$$

双曲線の開き角の  $1/2$  を  $\gamma$  とすると、 $r$  は次式で表される。

$$\gamma = \tan^{-1} \sqrt{r/d} \quad (9)$$

双曲線の焦点を  $F(f, 0)$  で表すと、 $f$  は次式で表される。

$$f = \sqrt{d^2 + dr} \quad (10)$$

平板電極と回転双曲面電極間に電圧  $V$  を印加すると、回転双曲面先端の電界  $E$  は次式で表される<sup>4)</sup>。

$$E = V / [d \sin \gamma \tan \gamma \ln \{\cot(\gamma/2)\}] \quad (11)$$

$d/r=2, 4, 6$  の各場合、すなわち、 $r=50$  mm で、 $d=100, 200, 300$  mm の各場合について、 $\gamma$  の値を (9) 式より算出し、(11)式より導く  $V/dE$  で  $V/V_0$  の値を次のように近似した。

$$V/V_0 = \sin \gamma \tan \gamma \ln \{\cot(\gamma/2)\} \quad (12)$$

これから、それぞれ、次の値を得る。

$$V/V_0 = 0.4679, 0.3228, 0.25125$$

これらの値を図 3 に記入してある。

$d/r=4$  のとき、上述の  $V/V_0=0.3228$  はたまたま、実測曲線と  $s/r=6.0$  付近で交差している。このときの、平板電極 A、電界計検出部 P および接地平板電極 B の相対位置を図 6 に示す。図 6 には (7) 式で表される回転双曲面の断面も実線で示してある。すなわち、図 6 に示す幾何学的電極配置ならば、平行平板電極においても、半

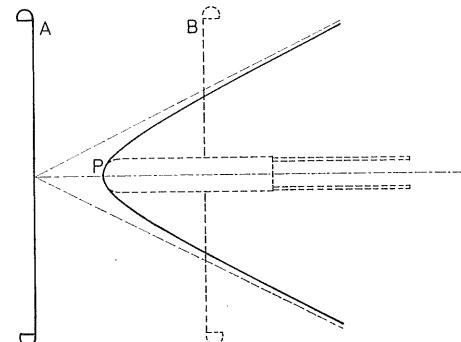


図 6 等価回転双曲面と平板電極

Fig. 6 Geometrical setup of one of equivalent hyperboloids of revolution and a plate electrode.

球棒状の検出部Pの先端の電界強度は、実線で示す回転双曲面の先端電界強度に極めて近い。

#### 4. ま と め

距離  $d+s$  の平行平板電極において、半径  $r$  の半球棒状外形を持つ電界計検出部が、円孔を開けた接地平板電極から、突出量  $s$  だけ突き出ている場合の、突出先端の電界強度について実験および検討を行い、次のことを明らかにした。

- (1) 突出量  $s$  が小さい条件下では、突出先端の電界強度は、帯電平板電極と半球棒状電極との距離  $d$  に依存しない。突出先端の電界強度は、突端部の曲率半径  $r$  で、突出量  $s/2$  の半回転橍円導体突起を付けた無限に広い平板電極で、平等電界を仕切ったときの、突起頂点の電界強度で近似できる。
- (2) 突出量  $s$  が大きい場合には、突出先端の電界強度は、無限に広い帯電平面電極からの距離が  $d$  であって、先端の曲率半径が  $r$  である回転双曲面電極の先端の電界強度で近似できる。

平行平板電極において、半球棒状外形を持つ電界計検出部が円孔を開けた接地平板電極から突き出しているとき、半球棒先端の電界強度は、数値計算で求まる。数値

計算の利点は、検出部の外形を境界条件として任意に設定できるという融通性にある。しかしながら、どういう形状が製作容易で、検出部先端への電気力線の集中の度合が解析解で精度良く近似できるかを検討するには、実験による検証が必要である。検出部の外形を半球棒状に整えた電界計を製作し、平等電界からの変歪を測定したところ、この形状は製作が極めて容易で、解析解による精度の良い近似式が適用可能であることが判明した。

#### 謝 辞

電界解析のための数値計算の種々の手法と、その相互間の関連性、電界解析のための数値計算に用いるモデルの選択法、半球棒対平板電極系において、電界解析上の留意点をご教示頂いた、大分大学教授 足立宜良博士に心からの感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 村崎憲雄：電気学会雑誌，82 (1962) 1272
- 2) 村崎憲雄、松井 満、河野 昇、大野董雄：電気学会雑誌，90 (1970) 2051
- 3) 伊佐 弘：電気学会雑誌，91 (1971) 1730
- 4) 電気学会：電気工学ハンドブック新版，p. 462，電気学会 (1988)
- 5) 栗田 稔：いろいろな曲線，p. 82，共立出版 (1967)