

静電誘導法による電場測定と誘電感受率の測定

日大生産工

○大熊 康典

日大・理工

野木 靖之

1 まえがき

電荷があるとその周囲には電場が作られる。平面や球面などに一様に電荷が分布した特別な場合の電場の構造は、ガウスの法則を使って数学的に簡単に知ることができる。このような電場は、理系学生の基礎知識として講義や演習で詳しく教えられている。

本研究の目的は、講義で教える電場の典型例を実験で演示することである。そのために、簡便であるがやや複雑な電場測定にも対応することができる電場センサーを試作した¹⁾。測定原理は、電場中に置かれた導体の表面に誘起する電荷量から電場を求める静電誘導法²⁾である。この電場センサーを使って、電気双極子が平面状に分布した場合に作られる電場を測定し、理論値と比較を行った。また、この実験に使用した電気双極子を模擬する平行平板電極間に誘電体を挟み込み、同様の実験手法を用いて、誘電体の分極と外部電場強度の関係を測定し、理論値と比較を行った。

2 電場センサー

本実験で使用した電場センサーを図1に示す。薄い導体板を2枚向かい合わせ、それらを抵抗 R_p により電氣的に接続した簡単なものである。

一般に、一様電場中に置かれたこのような導体板の端縁部には電荷が集中するため、導体表面の電場は場所に依存する。しかし、導体板の周囲に図1に示すガードリングを取り付けると、電荷の集中はガードリングで起こ

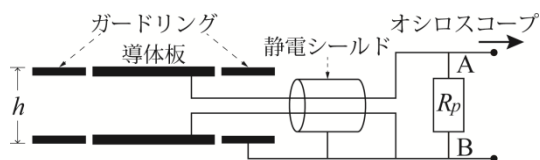


図1 ガードリング付き電場センサー

り、内側の導体面上ではほぼ一定となる³⁾。実験では、2つの電極に高周波電圧を印加して電場を作る。電極外部の電場を測定する場合には、2つの電場センサーを電極から等距離に対向して配置する必要がある。その理由は、電場センサーの2枚の導体板に等量の正負の電荷を誘起させ、端子A、Bに接続したオシロスコープから検出される電流以外の余分な電流が R_p に流れ込まないようにするためである。ただし、この場合の R_p を流れる電流は、本来の値の2倍となる。

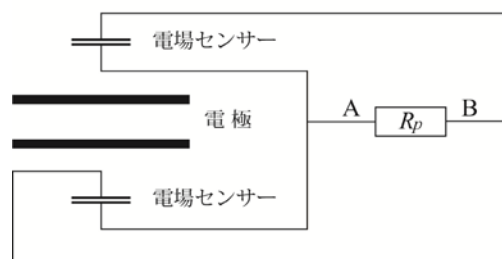


図2 電場センサーの配置

電場センサーは、厚さ0.1 mmの2枚の銅板を厚さ2 mmの木板に接着したもので、仕上がりの外厚は $h = 2.5$ mmである。銅板の面積が大きいほど電場センサーの出力 V_p は大きくなるが、空間分解が悪くなる。実験では電場の構造に合わせて、長さ15cmで幅4cmの帯型形状の電場センサーを使用した。ガードリングの材料は電場センサーと同じ厚さの銅板で、幅は5mmである。

3 電気双極子が作る電場

間隔 d 離れた2つの点電荷 $-q$, q の対は電気双極子と呼ばれ、双極子モーメント p が定義される。方向は $-q$ から q へ向き、大きさは

$$p = qd$$

Measurement of Electric Field and Estimation of dielectric susceptibility by
Method of Electrostatic Induction

Yasunori OHKUMA and Yasuyuki NOGI

で、 $\mathbf{p}$ の中心から位置 $\mathbf{r}'$ ($r' \gg d$) の電場は

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r'^3} \left[\mathbf{p} - \frac{3(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}')\mathbf{r}'}{r'^2} \right]$$

である。

図3のように、 $-\ell/2 \leq z \leq \ell/2$ の範囲に x 方向へ幅 w で電気双極子が一様分布している場合の y 軸上の電場の r 成分と θ 成分は、

$$E_r = -A \sin \theta \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \left[\frac{1}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{3r^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \right] dz$$

$$E_\theta = -A \cos \theta \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \frac{1}{(r^2 + z^2)^{3/2}} dz$$

となる。ただし、 $A = pw/4\pi\epsilon_0$ である。積分⁴⁾を実行すると、

$$E_r = 2A \sin \theta \left[\frac{\ell}{r^2[r^2 + (\ell/2)^2]^{1/2}} - \frac{(\ell/2)^3}{r^2[r^2 + (\ell/2)^2]^{3/2}} \right]$$

$$E_\theta = -A \cos \theta \frac{\ell}{r^2[r^2 + (\ell/2)^2]^{1/2}}$$

となる。

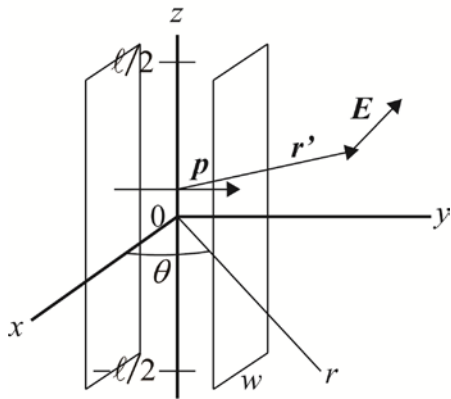


図3 電気双極子分布

3 実験結果

実験では、長さ $\ell = 30$ cm、幅 $w = 3$ cm の銅板2枚を間隔 $d = 2$ cm で対向させて図3の電気双極子電極を作り、複巻きトランスに接続して電場を発生させた。電場を測定するために、2個の帯型電場センサーを $y = \pm 14$ cm に電極と平行に設置し、電場センサーの中心位置を $z = 0$ に合わせた。 E_r を測定する場合は電場センサーの表面を r 方向に固定し、 E_θ の場合は θ 方向に固

定した。それぞれの電場の θ 依存性は、電場センサーを固定したまま双極子電極を θ 方向に回転して測定した。 E_r と E_θ は、 R_p の両端電圧 V_p から求めた。

測定結果を図4に示す。黒丸印は E_r で白丸印は E_θ である。実線は r , ℓ , w , d に実験で使ったそれぞれの値を代入した理論値である。 q は、測定した電極の電荷量を電極の面積で除した値を使用した。

電場センサーで測定された電場の強さと θ 依存性は理論値と良く一致していることが分かる。

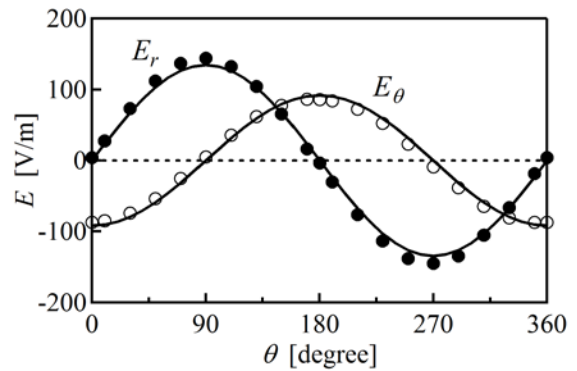


図4 電気双極子を作る電場

4 まとめ

静電誘導法を用いた電場センサーによる電場測定法により、電気双極子を作る電場を測定し、理論値と比較した。その結果、ガウスの法則から導かれる電場構造を実験で演示できることが分かった。

また、この測定法の有効性が確かめられたことから、同様の手法で、誘電体の分極と外部電場強度の関係や、誘電体境界面での電束密度の連続性についても検討した。その結果、講義で学ぶ基本的な誘電体の特徴を実験で演示できることが分かった。

【参考文献】

- 1) 大熊康典, 野木康之, 「静電誘導法による電場測定」, 日本大学生産工学部第44回学術講演会 教養・基礎科学部門, 8-7, 2011年12月
- 2) Yasunori Ohkuma, Taeko Ikeyama, and Yasuyuki Nogi, "Double-sensor method for detection of oscillating electric field", Rev. Sci. Instrum. **82**, (2011), pp.043501/1-6
- 3) 飯田修一, 大野和郎, 神前 熙, 熊谷寛夫, 沢田正三, 「物理測定技術 -電気的測定-」(朝倉書店), pp.131-132
- 4) 森口繁一, 宇田川銑久, 一松 信, 「数学公式I」(岩波全書), p.111