

# 導電性薄膜の電気抵抗

Y. Kondo

Department of Physics, Kinki University, Higashi Osaka, Japan\*

(Dated: December 18, 2008)

導電性薄膜の電圧分布を測定することを通じて、ポテンシャル（電圧）とベクトル場（電界）の概念を学ぶ。

## I. 理論

### A. 電圧と電界

ポテンシャルとベクトル場の例として静電ポテンシャルと電界を考えよう。空間の任意の点  $\vec{r}$  における静電ポテンシャルが  $\phi(\vec{r})$  と表されている場合、その点の電界は

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\vec{\nabla}\phi(\vec{r}) \quad (1)$$

と表すことができる。ただし、ナブラ (nabla) は  $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$  とベクトルのような構造をしている点を強調するために  $\vec{\cdot}$  を付けている。

### B. オームの法則

導体内には自由に動くことのできる電荷が存在するので、もしも電場が一定に保たれるならば電荷の移動が継続する。すなわち、電流が得られる。特に時間的に変化しない電流を「定常電流」と言う。

電流の強さを単位時間内に通過する電荷の総量によって表す。その単位をアンペアと呼び [A] と表記する。電荷の単位クーロン [C] は 1 [A] の電流が流れている時に毎秒通過する電荷の量として定義される。

伝導体の両端に一定の電圧  $V$  [V] を与えると定常電流  $I$  [A] が得られる。定常電流は電圧に比例する。この事実をオームの法則と呼び、この時の比例定数を抵抗と言う。記号としては  $R$  を用いる。すなわち、

$$V = RI \quad (2)$$

となる。抵抗の単位は [V/A] であるが、これをオームと呼び  $[\Omega]$  で表す。

### C. 導電性薄膜の面抵抗

電気抵抗の値  $R$  は導体の種類による他、その長さや断面積に依存する。長さ  $L$  [m]、断面積  $S$  [m<sup>2</sup>] のような物質のある温度における電気抵抗  $R$  [ $\Omega$ ] は

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (3)$$

で表される。 $\rho$  は抵抗率（または比抵抗）と呼ばれ、物質に固有な量である。また、その単位は [ $\Omega \cdot m$ ] である。

今回測定する対象は薄膜の電気抵抗であり、その厚さは測定できないほど薄い。従って、抵抗率（単位体積当たりの電気抵抗）の測定ではなく面抵抗（単位面積当たりの電気抵抗）を測定することにする。リボン状の導電性薄膜を

考えよう。その長さは  $L$ 、幅は  $w$ 、厚さは  $t$  であるとする。ただし、長さの単位は [m] を用いる。オームの法則の式を変形して、

$$\begin{aligned} V &= RI \\ V &= \rho \frac{L}{t \cdot w} I \\ \frac{V}{L} &= \frac{\rho}{t} \frac{I}{w} \end{aligned}$$

が得られる。ここで、電界の強さ  $E = V/L$  (単位は [V/m]) と面電流密度  $i = I/w$  (単位は [A/m]) を導入すると

$$E = \frac{\rho}{t} i = \rho_s i \quad (4)$$

となる。 $\rho_s$  は面抵抗と呼ばれ、その単位は [ $\Omega$ ] である。 $\rho_s$  は単位面積当たりの電気抵抗になる。

## II. 測定対象と装置

### A. 測定対象

測定対象はリボン状の導電性薄膜である。厚さ約 12  $\mu m$  のポリプロピレンフィルムにアルミを蒸着したものである。扱い易くするために、紙に貼り付けてある。

### B. 測定装置

#### 1. テスター

電流や電圧の測定には、テスターを用いる。テスターは様々な電気的な物理量を測定できる「万能」な測定器である。どのような物理量を測定するかは、中央にあるロータリースイッチによって選択することができる。この実験では、2台のテスターを用いて、電圧と電流を測定する。実験に使用するテスターの精度は以下の通りである。

#### 1. 電圧を測定する場合

測定電圧の  $\pm 1.5\%$  か  $\pm 2$  digits (最小の読みの2数字分) の大きい方。例えば、電圧の表示が 197.0 mV ならば、その誤差は  $\pm 197.0 \times 0.015 \approx \pm 3$  mV になる。一方、電圧の表示が 005.0 mV ならば、 $\pm 2$  digits の方を考慮して、 $\pm 0.2$  mV になる。

#### 2. 電流を測定する場合

測定電流の  $\pm 2.0\%$  か  $\pm 4$  digits (最小の読みの4数字分) の大きい方。電圧の場合と同様に考える。

#### 2. 測定キット

測定には電池ボックス、電極、鉄板などがファイルケースにセットされた実験キットとテスターを2台用いる。

\*URL: <http://www.phys.kindai.ac.jp/kondo>; Electronic address: [kondo@phys.kindai.ac.jp](mailto:kondo@phys.kindai.ac.jp)

### III. 実験 I : 面抵抗の測定

#### A. 目的

与えられた導電性薄膜の面抵抗を求める。

#### B. 測定原理

リボン状の導電性薄膜に電流を流し、そのときに生じる電圧分布を測定して面抵抗を求める。測定を始める前に、

- 電界強度はどのように求めれば良いか？
- 電流密度はどのように求めれば良いか？

を考えよ。

#### C. 測定

##### 1. 測定準備

図のように装置をセットする。テスターの電流計と電圧計のモードを間違えないようにすること。

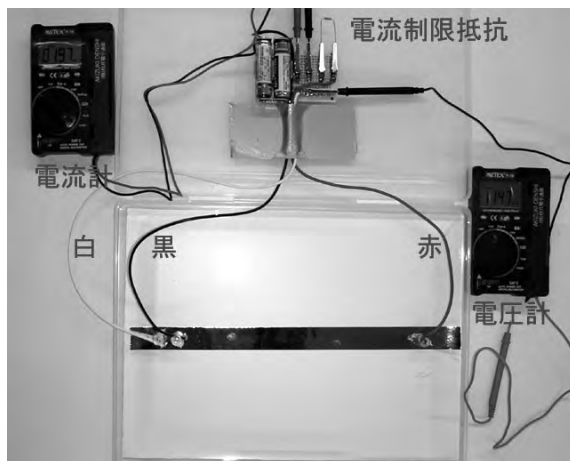


FIG. 1: 装置のセットアップ

電流制限抵抗は  $\sim 100 \Omega$  を用いる。



FIG. 2: 装置のセットアップ (詳細)

#### 2. 測定

測定は以下の手順に従って行う。

##### 1. 予備実験

リボンの取り扱いと測定に慣れるために、短いリボンを用いて、本実験の予行演習をする。

- 細いフェルト・ペンを用いて、長辺に沿って 4 mm 間隔の直線を描く。
- 回路に流れる電流が安定していることを確認し、その値を記録する。安定していなければ、各部の接触不良の可能性があるので、接触を取り直す。
- 電圧計の読みが 10.0 mV になる点を、テスター棒をフェルト・ペンで描いた線に沿って軽く接触させながら探す。見つければテスター棒を少し強く押す。リボンがへこみマークすることができる。図を参照。

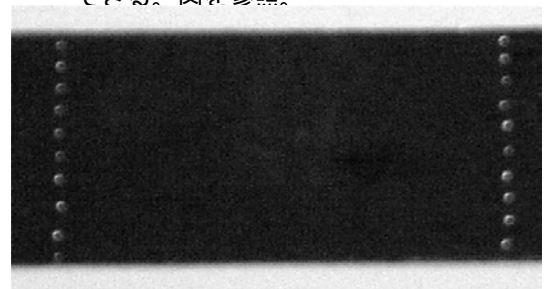


FIG. 3: マークされたリボンの拡大図。マークの数は実際の実験の場合と異なる可能性がある。

- 同様に、10.0 mV となる点をフェルト・ペンで描いた直線（リボンの端も含む）の間でも探す。
- 同様に、50.0 mV まで 5 mV 間隔でマークをリボンにつける。
- リボンの形状の測定を行う。最初にスケールでリボンの長さを 10 回測定する。次に、リボンの長さ方向に 5 cm 毎に油性マーカーでマークをつけて、その幅をノギスで測定する。

##### 2. 本実験

十分習熟したならば、教員に申し出ること。本実験用のリボンを渡す。

##### 3. データの解析

測定が終了したならば、リボンの端から 10.0 mV、...、50.0 mV のマークまでの長さをフェルト・ペンで描いた直線に平行に（直線の中間も）測定する。横軸に長さ、縦軸に電圧のグラフを作成する。すべての測定点を平均せずにグラフにプロットすること。

次に、最小 2 乗法によってグラフの傾きを求める。この傾きから面抵抗を求めよ。

#### D. 後かたづけ

グラフを描き、教員のチェックを受けたら使用した装置を片づける。教員が必要と判断した場合は、再実験を行うので装置は許可を得てから片づけること。

## IV. 実験 II : 電流分布の推定

### A. 目的

ある特定の条件における長方形の導電性薄膜の対角線の中点における電流密度を求める。

### B. 測定原理

導電性薄膜(対象物)を流れる電流を直接測定することは不可能である。しかしながら、その表面の電圧分布は対象物に影響を与えることなく電圧計で表面上の多数の点の電圧を測定することによって知ることができる。この電圧分布を知ることにより、表面の電界の分布を求めることができる。その電界と面抵抗の積から電流の分布を推定することができる。

### C. 測定装置

#### 1. 測定対象および測定キット

測定対象は長方形の導電性薄膜である。実験 I で用いたものと同じ素材である。また、測定キットは実験 I で用いたものと同じである。

### D. 測定

#### 1. 測定準備

図 3 のリボンを長方形の測定対象に変えて、装置をセットする。電流を流すための電極の位置は対角線上で頂点から 3 cm の位置とする。電圧計の基準点の位置は 3 番目の頂点とする。電極の位置の概略は図 4 を参照のこと。このとき、電流制限抵抗については実施時に指示する。

#### 2. 測定

以下のように行う。

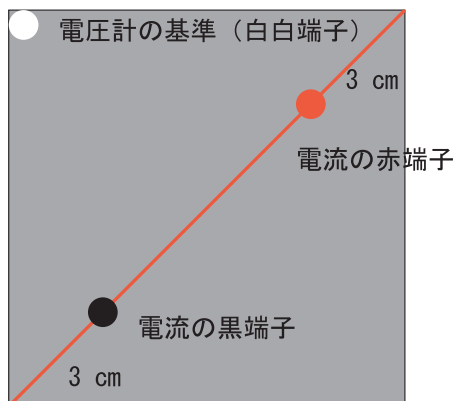


FIG. 4: 電極の位置

- プラス側の電極の近くの電圧  $E_+$  とマイナス側の電極の近くの電圧  $E_-$  を測定する。電極にできるだけ近くの点の電圧を測定すれば良い。

- $E_- + \frac{n(E_+ - E_-)}{5}$  (ただし  $n = 1, 2, 3, 4$  である) の電圧の点を探す。まず、 $n = 1$  の場合を行い、次に  $n = 2$  のように測定する。点の数は滑らかな曲線を描けるように考慮して決めること。長方形の辺の近くでは点を密に取るようにすること。

- 時間的に余裕があれば、 $E_- + \frac{(n + \frac{1}{2})(E_+ - E_-)}{5}$  (ただし  $n = 0, 1, 2, 3, 4$  である) の電圧の点を探す

電極を動かさないように特に注意して測定を行うこと。動かしてしまうと、実験を最初からやり直さないといけない。

#### 3. データの解析

測定データをもとに等電位線を描く。等電位線から電界の様子を知ることができる。次に、対角線の中点における電界の強度と実験 I で求めた面抵抗から電流密度を推定する。

## V. レポートの提出

2 つの実験に対して 1 つのレポートを提出すればよい。ただし、2 番目の実験に関しては「レポートの計算の項目」においてどのようにして電流密度を推定したかが分かるように詳細な記述が要求される。

考察の課題の例として、

- 蒸着されているアルミの厚さを推定する。
- 等電位線は長方形の辺と直交するはずである。理由を考えよ。

を挙げておく。