

電気抵抗の温度変化

□ 目的

金属および半導体の電気抵抗を測定し、それぞれの電気抵抗が温度によってどのように変化するかを調べる。

□ 実験用具

試料（銅線、サーミスタ）、抵抗計、温度計、電気ポット、かきませ棒、スタンド

□ 原理

物体の 2 点間に電位差があると、電流が流れる。電位差 V 、電流 I 、および物体の電気抵抗 R の間には

$$V = RI \quad (1)$$

という関係があり、これをオーム (Ohm) の法則という。

物質中を電流が流れるということは、電荷を持った粒子が外部から加えられた電界によって移動することである。その電荷を持った粒子（キャリア；carrier）とは、金属では電子、半導体では電子および正孔^{*1}、電解質ではイオンなどである。

一様な断面積 S の物体中を流れる電流を I 、キャリア（電子または正孔）の電荷を q 、単位体積あたりの数を n 、平均の速さを v とすると、電流 I は物体の断面を単位時間に通過する電荷の量であるから

$$I = nqvS \quad (2)$$

であらわされる。 v は電界の強さ E に比例するからその比例定数を μ とすると

$$v = \mu E \quad (3)$$

となる。この μ は物質中のキャリアの動きやすさをあらわし、易動度 (mobility) という。いま、物体の長さを d 、その両端にかかる電圧を V とすると

$$E = \frac{V}{d} \quad (4)$$

である。(2) 式と (3) 式および (4) 式から

$$V = \frac{d}{nq\mu S} \cdot I \quad (5)$$

^{*1} ある種の半導体内では電子が移動すると、その後に電子の抜け穴（電子の不足した箇所）ができる。この電子の抜け穴ができると、近くの電子がここに移って、抜け穴をうめていく、ということをくり返すことによって、抜け穴の位置はつぎつぎに移動する。すなわち、電子の抜け穴は、あたかも正の電荷をもった粒子のようにふるまい、電子と同じように物質内を動きまわることができるので正孔 (positive hole) と呼ばれる。この正孔も外部から電界が加えられると電界にしたがって移動し、電荷のキャリアとなる。

が得られる。 $d/nq\mu S$ は物体によって決まる定数であるから、これを

$$R = \frac{d}{nq\mu S} \quad (6)$$

とおき、 R をこの物体の電気抵抗という。(5)、(6) から $V = RI$ となり、オームの法則 (1) 式が導かれる。

$S = 1 \text{ [m}^2\text{]}$ 、 $d = 1 \text{ [m]}$ としたときの電気抵抗の値をその物質の抵抗率といい、 $\rho \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$ で表す。すなわち

$$\rho = \frac{1}{nq\mu} \quad (7)$$

である。したがって、物質の抵抗率の大きさは、キャリアの単位体積あたりの数 n と易動度 μ によって決まる。金属と半導体とで、電気抵抗の大きさおよび温度変化の傾向が著しく異なるのは、 n と μ の値の大小と、それらの温度による変化の違いによっている。

金属では、温度が変化してもキャリア（電子）の単位体積あたりの数 n は変化せず、易動度 μ が温度上昇にともなって減少する。したがって、抵抗はほとんど易動度 μ に依存しており、温度が高くなるのにつれて、(7) 式により、抵抗率 ρ は大きくなる。

一方、半導体では、温度の上昇とともに μ は減少するが、それ以上にキャリア（電子と正孔）の単位体積あたりの数 n が変化する。 n は絶対零度では 0 であるが、温度の上昇とともに著しく増加するため、抵抗は主として n によって支配される。したがって、半導体では、温度が高くなるのにつれ、(7) 式により、抵抗率 ρ は金属とは逆に、小さくなる。その減少の仕方は、絶対温度 T に対して指数関数的であることが知られている。

物質の電気抵抗の温度に対する変化の様子を示す値は、温度を t 、電気抵抗を R とすると、つぎのように定義される。

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (8)$$

ここで、 dR/dt は電気抵抗の温度勾配をあらわすから、この α は単位あたりの抵抗についての温度勾配を意味する。 α は、電気抵抗の温度係数と呼ばれ、物質によって異なる値をもち、単位は $[1/^\circ\text{C}]$ である。

金属では、 α は室温付近のあまり広くない温度範囲では、温度にはほとんどよらない定数と考えてよい。そこで、金属の 0°C と 100°C との間の電気抵抗の平均温度係数 α ($\alpha_{0,100}$ と書きあらわす) は、(8) 式より

$$\alpha_{0,100} = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_{100} - R_0}{100} \quad (9)$$

とあらわすことができる。ここで R_0 、 R_{100} は 0°C および 100°C のときの電気抵抗をそれぞれあらわす。

したがって、温度 t [°C] のときの金属の電気抵抗 R_t は、室温付近で、温度範囲のあまり広くないときには、つぎのように近似できる。

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (10)$$

半導体では、 α は物質によって異なると同時に、温度によっても異なる。温度 t [°C] の α_t を求めるには、(8) 式により t [°C] での温度勾配 dR_t/dt を知らなければならない。ここでは1つの方法として、 t [°C] を中心に ± 2 °C の温度範囲、すなわち、 $(t+2)$ [°C] から $(t-2)$ [°C] までの間では、せまい温度範囲なので電気抵抗は温度に対して直線的な変化をするとみなせる、と考える。そこで、それぞれの温度のときの電気抵抗 $R_{(t+2)}$ 、 $R_{(t-2)}$ から、 t [°C] のときの温度勾配をつぎのように近似的に求める。すなわち

$$\frac{dR_t}{dt} = \frac{R_{(t+2)} - R_{(t-2)}}{4} \quad (11)$$

とし、 α_t は

$$\alpha_t = \frac{1}{R_t} \cdot \frac{R_{(t+2)} - R_{(t-2)}}{4} \quad (12)$$

として求める。

□ 実験方法

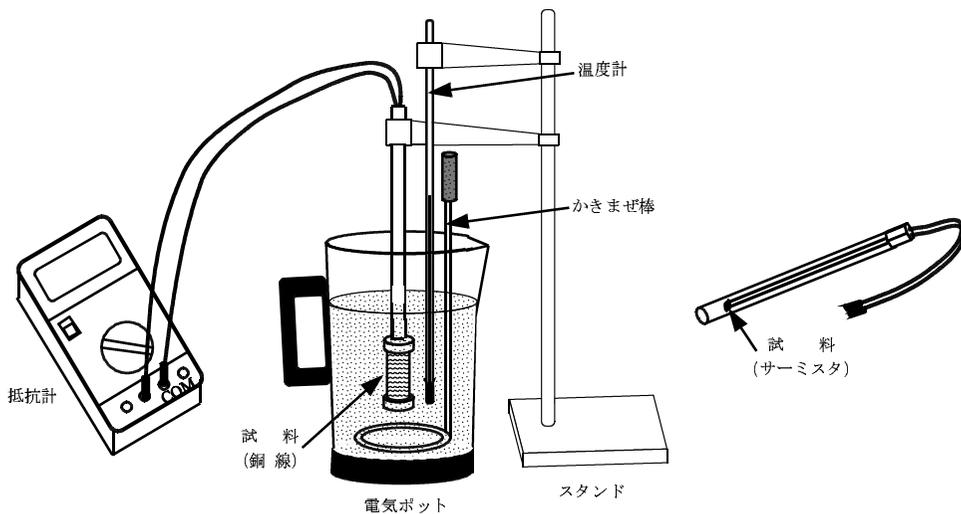


図1 実験装置

- (1) 電気ポットのスイッチを切り(OFF)、電気ポットの中に、試料(金属;ここでは銅線を用いる)と温度計をスタンドを用いて図1のようにセットする。

- (2) 抵抗計のスイッチが切つてあることをたしかめ、試料を接続する。
物体の電気抵抗を測定するには、その物体に電位差（電圧）を加え、加えた電位差と、その電位差によって物体を流れる電流の値とを測定して、(1) 式から抵抗値を算出する。ここで用いる抵抗計は、乾電池が内蔵されていて、求める抵抗値は、メーターで直読できるようになっている。
- (3) かきまぜ棒を電気ポットの中に入れ、水を入れる。水は、試料、温度計、およびかきまぜ棒が十分に浸るくらいの分量を入れなければならない。
- (4) 抵抗計の電源のスイッチを入れる（ON）。
かきまぜ棒を静かに上下して水をかきまぜ、温度計の示度が大体一定の値を示すようになったときの水温を読み取り、同時に、抵抗計で試料の電気抵抗の値を読み取る。
- (5) つづいて、電気ポットの電源のスイッチを入れる（ON）。
ふたたび、かきまぜ棒を静かに上下して、水をかきまぜ、水温が一樣になるようにする。水温が上がるのにしたがって、およそ 10°C おきに抵抗計の値を読み取る。そして、水温が 90°C 前後になるまで、水をかきまぜながら抵抗の測定をつづける。この場合、水温の測定は 30.0°C , 40.0°C , \dots のように正確に 10.0°C おきに行う必要はない。温度によって電気抵抗の変化する様子を全体として求めたいのであるから、およそ 10°C おきに測定をすれば十分である。
- (6) 測定が終わったら、電気ポットおよび抵抗計のスイッチを切る（OFF）。
- (7) 電気ポット内の湯を捨て、電気ポットの温度が下がったら、試料を半導体^{*2}に取り替え、半導体について、上の金属の場合と同様に (1) ~ (6) の測定を行う。ただし、半導体の場合には、温度が低い範囲では抵抗値は温度によって大きく変化するので、水温がおよそ 40°C 以下の範囲では 5°C 程度おきに測定をするとよい。
- 注意 試料の電気抵抗を測定するとき、試料の温度を正確に知りたいのであるが、試料の温度を直接に測定することが難しいので、試料の外側の水温で近似する。したがって、水温と試料との温度の差ができるだけ小さくなるように、細心の注意をはらうことが必要である。すなわち、試料が完全に水中に浸るような分量の水を入れ、温度計は試料のなるべく近くにおく。水温はゆっくりと上昇させ、また実験中は、かきまぜ棒をたえずゆっくりと上下して水を十分にかきまぜ、水中の温度分布が、むらなく一樣になるように心がける。そして、同時に温度計と抵抗計の読みの時間的な差も最小になるように注意しなくてはならない。
- (8) 金属（銅線）および半導体（サーミスタ）について得られた測定結果を、温度 t [$^{\circ}\text{C}$]

*2 この実験では半導体としてサーミスタを用いる。サーミスタ (thermistor) とは thermally sensitive resistor を簡単にあらわした言葉であり、電気抵抗の温度係数が大きい半導体を使った抵抗体である。Ni、Mn、Co、Cu、Fe などの金属の酸化物を素材とし、成形し焼結させて作ったもので、温度測定素子として広く用いられている。

を横軸に、電気抵抗 R [Ω] を縦軸にとって グラフ用紙に記入し、それぞれの測定点のバラツキが最も少なくなるような線を描く。

(9) 金属（銅線）

(8) で描いたグラフを用い、全体の測定点から得られた直線を上下方向に延長し、温度 0°C と 100°C に相当する電気抵抗 R_0 、 R_{100} の値をそれぞれ読み取る（このようにして値を求めることを外挿するという）。

(10) (9) 式を用いて、 0°C と 100°C との間の電気抵抗の平均温度係数 $\alpha_{0,100}$ を求める。

(11) 半導体（サーミスタ）

(8) で描いたグラフを用い、測定した範囲内で任意の温度 t [$^\circ\text{C}$] を選び、そのときの電気抵抗 R_t を読み取る。また、 $(t+2)$ [$^\circ\text{C}$]、 $(t-2)$ [$^\circ\text{C}$] のときの電気抵抗 $R_{(t+2)}$ 、 $R_{(t-2)}$ をそれぞれ読み取る。

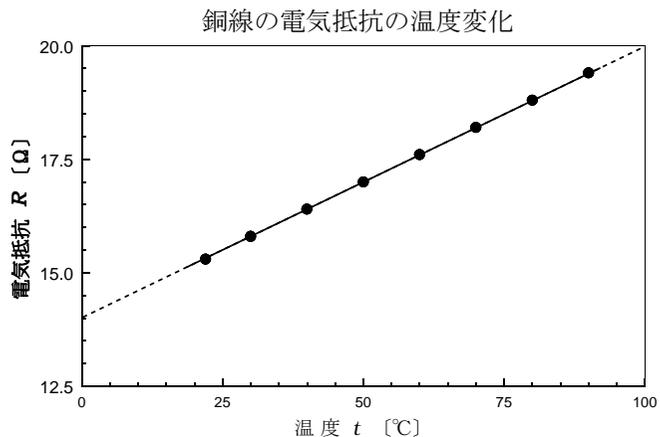
(12) (12) 式を用いて、 t [$^\circ\text{C}$] のときの温度係数 α_t を求める。

□ 実験例

金属（銅線）

銅線

温度 t [$^\circ\text{C}$]	電気抵抗 R [Ω]
22.0	15.3
30.0	15.8
40.0	16.4
50.0	17.0
60.0	17.6
70.0	18.2
80.0	18.8
90.0	19.4



測定結果のグラフから外挿によってつぎの値を求める。

$$0^\circ\text{C} \text{ のときの電気抵抗 } R_0 = 14.0 \text{ } [\Omega]$$

$$100^\circ\text{C} \text{ のときの電気抵抗 } R_{100} = 20.0 \text{ } [\Omega]$$

したがって、この銅線の 0°C と 100°C の間の電気抵抗の平均温度係数 $\alpha_{0,100}$ [$1/^{\circ}\text{C}$] は

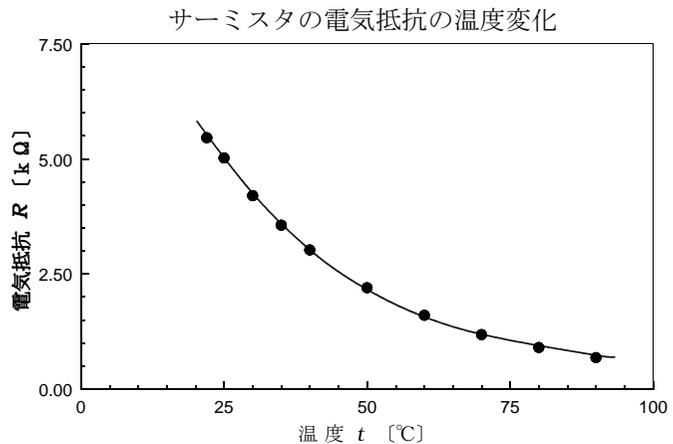
$$\begin{aligned}\alpha_{0,100} &= \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_{100} - R_0}{100} = \frac{1}{14.0} \cdot \frac{20.0 - 14.0}{100} \\ &= 0.0043 \text{ [}1/^{\circ}\text{C}\text{]}\end{aligned}$$

となる。

半導体 (サーミスタ)

サーミスタ

温度 t [$^{\circ}\text{C}$]	電気抵抗 R [$\text{k}\Omega$]
22.0	5.46
25.0	5.02
30.0	4.20
35.0	3.56
40.0	3.02
50.0	2.20
60.0	1.60
70.0	1.18
80.0	0.90
90.0	0.68



測定結果のグラフからつぎの値を読み取る。

$t = 35$ [$^{\circ}\text{C}$] (任意の温度を選ぶ)

$$\begin{aligned}35^{\circ}\text{C} \text{ のときの電気抵抗} & R_{35} = 3.56 \text{ [k}\Omega\text{]} \\ (t+2) \text{ [}^{\circ}\text{C}\text{]} \quad \dots \quad 37^{\circ}\text{C} \text{ のときの電気抵抗} & R_{37} = 3.39 \text{ [k}\Omega\text{]} \\ (t-2) \text{ [}^{\circ}\text{C}\text{]} \quad \dots \quad 33^{\circ}\text{C} \text{ のときの電気抵抗} & R_{33} = 3.87 \text{ [k}\Omega\text{]}\end{aligned}$$

したがって、このサーミスタの 35°C における電気抵抗の温度係数 α_t [$1/^{\circ}\text{C}$] は

$$\begin{aligned}\alpha_{35} &= \frac{1}{R_{35}} \cdot \frac{R_{37} - R_{33}}{4} = \frac{1}{3.56 \times 10^3} \cdot \frac{3.39 \times 10^3 - 3.87 \times 10^3}{4} \\ &= -0.034 \text{ [}1/^{\circ}\text{C}\text{]}\end{aligned}$$

となる。

□ 問

金属および半導体（サーミスタ）は、その電気抵抗が温度によって変化する性質を利用して、温度測定、自動温度調節器および電圧制御などの素子として使用されている。

この実験で測定した試料を用いて、室温から 80℃ までの温度が測定できるような温度計を作りたい。銅線とサーミスタとではどちらがより精密に温度を測定できるだろうか。また、その理由を説明しなさい。

□ 導体・半導体・絶縁体のエネルギーバンド構造

原子内で電子のエネルギーは、その原子に特有なとびとびの値（エネルギー準位という）しかもつことができない。

一方、固体のように原子が集めた状態では電子のもつことのできるエネルギーは有限の幅になり、それをエネルギーバンドと呼ぶ。エネルギーバンドは電子が存在できないエネルギー領域によって分離されている。この電子が占めることが禁じられているエネルギー領域はバンドギャップと呼ばれている。このように固体での電子のエネルギー領域はバンドギャップを挟んだ不連続なバンド構造をしている(図 2)。

固体中の電子はエネルギーバンド内をエネルギーの低い方から順に詰まっていく。1つのエネルギーバンド内が電子で一杯に満たされると次の電子はバンドギャップを超えて次のエネルギーバンドに入る。このとき、エネルギーバンドの埋まり方は2種類に分けられる。

1つは、あるエネルギーバンドが途中までしか埋まっていない場合である。そのエネルギーバンド内のいくつかの電子は熱エネルギーなどで周りの電子よりエネルギーバンド内の少し高いエネルギーの状態になる。それらの電子は周りのエネルギー状態に電子がないため、自由に動き回ることができる。電界をかけると、電子は電界の方向と逆方向に動き出し、電流が流れる。このような固体は導体のふるまいをする(図 3)。

もう1つはあるエネルギーバンドまでが電子で完全に満たされ、それより高いエネルギーバンドが空である場合である。このような場合、電子は少し高いエネルギー状態をとることができない。したがって、電界をかけても電子は身動きをとることができないため、電流は流れない。このような固体は絶縁体である(図 4)。

半導体（真性半導体^{*3}の場合）は温度、その他の条件によって、絶縁体もしくは導体の両面の性質を示す。

絶対零度の場合、絶縁体と同じように、あるエネルギーバンドまで電子で完全に満たさ

^{*3} 半導体の電気伝導の機構には2つあって1つは純粋な半導体が示すものであり、もう1つは不純物を加えた半導体にみられるものである。ここでは簡単のため、純粋な半導体（真性半導体）の場合について述べる。

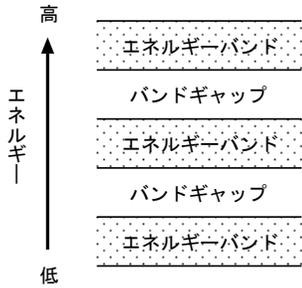


図2 帯構造

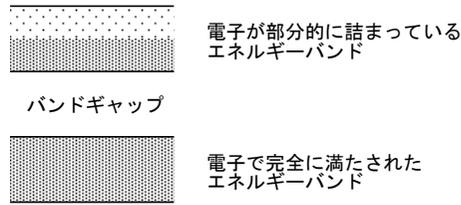


図3 導体

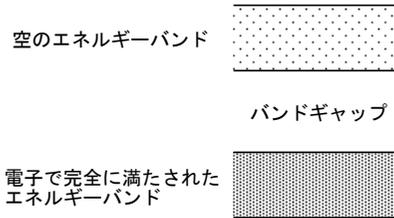


図4 絶縁体

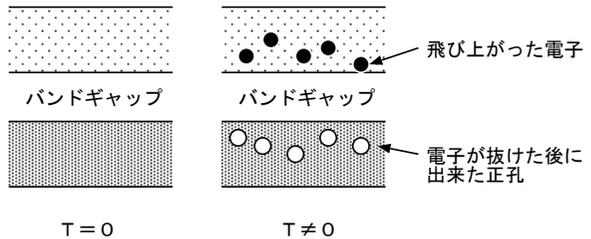


図5 半導体

れ、それより上のエネルギーバンドには完全に電子がないので、絶縁体としてふるまう (図5)。

半導体の特徴は、一般的にバンドギャップの幅が比較的狭いことである。温度が高くなると、一部の電子は熱エネルギーを得てバンドギャップを飛び越えて、それより上の空のエネルギーバンドに飛び上がる (励起される)。一方、飛び出した電子のあとには空の軌道すなわち正孔 (ホール) が残る。励起された電子と電子の抜けたあとにできた正孔は、ともに電界をかけると移動し、電気伝導に寄与する。この場合、半導体は導体としてふるまう。

このように半導体は熱などの外部刺激を増やすことで電気的性質を変化させることができる。純粋な半導体は伝導性が低いので、一般には半導体に不純物を混ぜることによって電子や正孔の密度を上げ、適当な伝導度や性質を持つように作製される。