

## 1 実験器具とヒトとの付き合い \*計測器は万能か?\*

今日科学技術の進展によって、ヒトが受けることができるその恩恵はますます大きなものになっています。その背景には、研究や開発に必要な物理量を測定するための実験器具の精密化も寄与していることも一つにあると考えられます。

皆さんが研究をする際には、このような洗練された、もっと言えば自動的に精密な物理量を与えてくれる器具を使用していることが多々あると考えられます。特に人間の五感では測定し切れないようなものについては、それを媒介とするような測定器具の助けを利用しなければ、実験を行なうことすら困難であると思います。

さらにその実験の目的に見合うような精度を得る上でも、実験器具はより精密でなくてはなりません。幸い現在は技術の進展に伴い、あらゆる分野に対してあらゆる分野の実験器具が作られており、中にはその実験器具さえ使えば自動的に実験を行なってくれる装置もあるぐらいだと思います。

つまり、既に作られているものさえ使えば、ヒトはその実験器具に対して関与しなくても実験器具から結果を得ることができることになります。しかしヒトの手なしに、計測器を決められた通り利用しさえすれば、本当に正しい実験結果が得られてその事実を考察できる状態に持っていけるようになるのでしょうか。

この報告書では、電気回路の簡単な2つのモデルを通じて、そのモデルを実際の回路として組み、その特性を評価することを考えます。この2つのモデルは、どちらもよく似たモデルではあるのですが、もしも計測器が全ての事実を表しているというのならば、大きな差異は生じないと考えべきでしょう。今回はこの点について言及して、果たして実験においては計測器さえあれば本当に成立するのかについて考えていくことにします。

## 2 電気回路を Background としたモデル

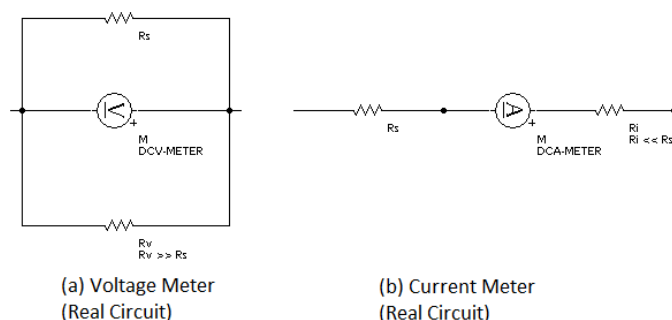
今回想定するモデルは電気回路なので、簡単な電気回路に関する前提は必要だと思います。この章では電気回路において最も基本的な素子である「抵抗」の測定法について、考えていきます。

### 2.1 電圧計と電流計

直流電源を利用した電気回路を考える上で、その電気回路中に流れる電圧と電流を測定することは、その回路の特性を理解する上でも重要です。従来、原始的な測定としては回路に流れる電流や電圧の力学的な作用を利用して、今ほど精度はよくありませんでした。現在ではこの電圧と電流を測定するための技術は進展していて、中には両方の値を4、5桁の精度で測定できる機械も安価に手に入る時代となっています。



図1 電圧計と電流計の回路記号

図2 電圧計と電流計を利用した測定の方法(抵抗  $R_s$  が測定したい素子(負荷))

これらの測定機器を使いこなすには、その機械に応じた正しい利用の方法をする必要があります。例えばこれらの電気回路における測定器では図2のような配線の仕方によって接続します。ここで上の図で示されている  $R_v, R_i$  というのはそれぞれ電圧計、電流計における内部抵抗です。電圧計の場合は測定したい負荷抵抗  $R_s$  を電圧計と並列に接続し、かつ  $R_s \ll R_v$  となるように配置します。一方、電流計の場合は  $R_s$  を電流計と直列につなぎ  $R_s \gg R_i$  となるように接続します。つまり測定したい負荷が通常の抵抗の範囲内であれば、これらの測定器は期待されるような測定が可能であると言えます。

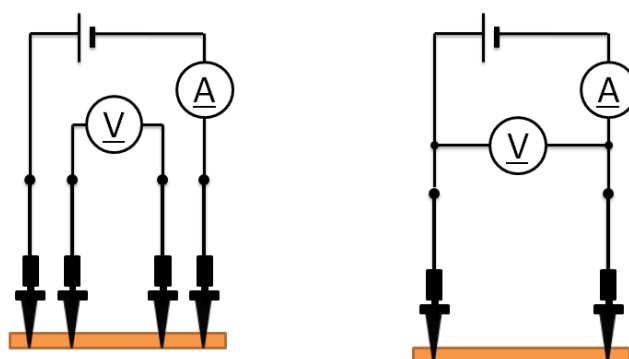
## 2.2 単純な抵抗測定モデル

次に前節で示した電流計と電圧計の2つを用いて、ある負荷抵抗の抵抗値を測定することを考えましょう。直流回路においては、ある抵抗  $R$  に電圧  $V$  ががかかっており、流れる電流が  $I$  のとき、次の Ohm の法則が成立します。

$$V = RI, R = V/I$$

つまり測定器によって読み取った電圧と電流の比を取るだけで、その負荷抵抗の抵抗値を求めることができます。この式が持つ意味は、電流がたくさん流れれば流れるほど、あるいは抵抗に電流が流れるときに必要な仕事(電圧)が小さいほど、抵抗が低いということが分かると思います。

すなわちここから、素子にかかる電圧と流れる電流さえ分かれば抵抗値が分かるのだから、測定したい負荷に対して電圧計を並列に、電流計を直列にさえつなげば抵抗の測定が可能であると言え



(a) four-terminal measurement (b) two-terminal measurement

図3 四端子法と二端子法

ます。このつなぎ方として想定される回路は2つあります。この回路の様子を図3に示します。

図3において、橙色の棒として示されているものが抵抗測定したい試料を示しています。(a)は4つの端子を素子に接続していることから、これを四端子法 (four-terminal measurement) と言います。一方 (b) は2つの端子を素子に接続しているので、これを二端子法 (two-terminal measurement) と言います。

この2つのモデルの違いは、電圧計の端子を銅線につなげているか試料につなげているかの違いであると言えます。これは測定器が規定している回路配置を満たしていることになるので、理論上はどちらの方法でも正しく抵抗  $R$  を求めることができるでしょう。

### 3 検証の方法

前章では、実験を検証する上で利用する回路に関する紹介をしました。この章では、2つの結果が同じ結果を与えるかどうかを検証するための方法を与えることにします。

#### 3.1 モデルに必要なもの

今回のモデルを検証する上で必要なものについて述べます。

今回は測定する負荷試料として、最も汎用的に利用されている抵抗である  $1k\Omega$ ,  $50\Omega$ ,  $10\Omega$  の炭素皮膜抵抗と、スズメッキ銅線 (抵抗  $10^{-4} - 10^{-5}\Omega$  程度:誤差 5%) を利用します。この抵抗や銅線は、あまり大きな電力や電圧を与えると破壊する恐れがありますが、今回の測定に置いてはあまり大きな電圧を加えないので、十分 Ohm の法則が成立する範囲で測定ができると考えられます。

今回は電圧源として直流電源装置を利用します。これは電圧を可変にできるので、任意の電圧を調整する際に便利です。また素子に接続する際は、接続による抵抗の発生を最小限にするため IC クリップを使用します。

電流、電圧の測定にはデジタルマルチメータ (精度 3-4 桁程度) を使用します。このディジタ

ルマルチメータは定格電圧や電流を超えると使用することはできませんが、この定格よりも小さな値の範囲で測定をします。

### 3.2 モデルの実験方法

次に図3で示された回路に関する実験方法について説明します。

まず直流電源やデジタルマルチメータの配置については、図3に規定されている通りに接続します。また測定試料の接続にはICクリップを利用しますが、接続する際に試料を挟み込むように接続します。

実際に抵抗値を求めて検証するときは、まず回路にかける電圧を0Vにしてみ、デジタルマルチメータが校正されていることを確認します。次に電圧値を0Vに対して十分に大きな値に設定します。このときの電圧値と電流値から、抵抗値を割り出します。ただこのとき、電圧と電流をかけた積(電力)が0.25W以内に収まるように与える必要があります。これは抵抗に熱を発生させすぎないようにするためです。

これを図3で示した四端子法と二端子法の2つの配置について検証します。そしてここから得られた結果を利用して、抵抗値が一致しているかどうかを検討することになります。

## 4 検証の結果と疑問への答え

### 4.1 モデルから得られた抵抗測定の結果

表1 四端子法と二端子法における抵抗測定の結果

試料の種類	四端子法における抵抗値 [ $\Omega$ ]	二端子法における抵抗値 [ $\Omega$ ]
炭素皮膜抵抗 (1k $\Omega$ )	$9.99 \times 10^2$	$1.00 \times 10^3$
炭素皮膜抵抗 (50 $\Omega$ )	49.8	60.5
炭素皮膜抵抗 (10 $\Omega$ )	9.66	17.1
スズメッキ銅線	$2.11 \times 10^{-4}$	6.73

この章では今までの検証モデルを踏まえた結果、抵抗値がどのように測定されたかを示します。表1は、四端子法と二端子法によって測定された負荷の抵抗値を示しています。

まず炭素皮膜抵抗 1k $\Omega$  の場合は、どちらの抵抗値もほぼ同じ値を取っていること、及び規定されている 1k $\Omega$  と抵抗値もほぼ一致していることから、どちらの方法を取っても同じということが分かります。この結果だけでは、計測器を見ててもどちらかが劣っていることは理解されません。

ところが、もしもこの抵抗を 50 $\Omega$ , 10 $\Omega$  としていった場合は、異なった抵抗が表れています。一般には二端子法の方が抵抗値が大きく表れていることが分かります。実際、二端子法における相対誤差はこの時点で大きくて、50 $\Omega$  の場合は 21% 程度、10 $\Omega$  の場合は 71% 程度の違いが表れてい

ます。

さらにスズメッキ銅線に試料を選ぶとこの違いは明確で、本来スズメッキ銅線には  $10^{-4} - 10^{-5}$  程度しか抵抗は与えられていないはずなのに、二端子法においては抵抗値が明らかに  $1\Omega$  よりも大きくなっています。どうやら上から考えると、大きな抵抗の試料を利用した場合はどちらも正しい結果を与えますが、小さな抵抗を利用するとまったく異なった結果が生じる、ということが結論付けられると思います。もっと言えば小さな抵抗を扱う際に、二端子法を利用するのは不十分であることが理解されます。この理由について、次の節で考えてみましょう。

## 4.2 二端子モデル崩壊の理由

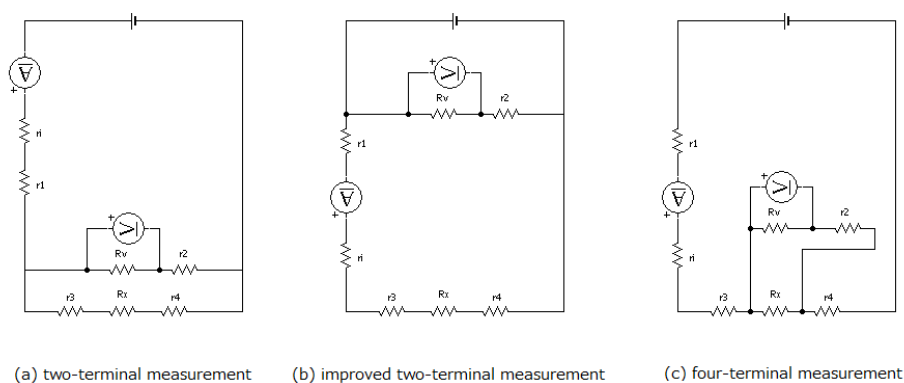


図4 二端子法、四端子法の測定回路に銅線と内部抵抗を加えたもの ((a),(b) は二端子法、(c) は四端子法)

前節では負荷抵抗が大きな抵抗を扱ったときには、その測定される抵抗値は二端子法でも四端子法でも同じ結果が出るものの、小さな抵抗においては二端子法は不適合な方法であったことが分かりました。なぜこのようなことが起きたのか、この節では簡単に考えてみたいと思います。

図4は、試料の抵抗  $R_x$  に対して電圧計、電流計の内部抵抗  $R_v, r_i$  に加え、銅線の内部抵抗  $r_1, r_2, r_3, r_4$  を考慮したものです。ここで抵抗の記号に小文字の  $r$  を利用したのは、この抵抗は通常測定試料の抵抗に比べて極めて小さいということを意識した上で書いたもので、この場合においてもこの抵抗は短絡同然だと考えてもいいものです。また前節では二端子法と四端子法の接続法は2つしかないと言いましたが、二端子法のつなぎ方について電圧計の設置の仕方が2つあるので、(b)として二端子法の別の配置の方法も入れるようにしました。

この図を使って、各電流がどう流れていくかを考えてみましょう。まず正しく抵抗値を計測できた四端子法ではどうでしょうか。この場合銅線の抵抗  $r_3, r_4, r_1$  や電流計の内部抵抗  $r_i$  は、試料の抵抗  $R_x$  や電圧計の内部抵抗  $R_v$  よりも極めて小さいと考えられます。ただし  $r_3, r_4$  はICクリップと接触している点で、他の  $r_1, r_2$  に比べたら大きな抵抗をはらんでいる可能性があるとしています。

全体のループの中では  $R_x$  と  $R_v$  が並列となっていますが、 $R_v$  の方が今は  $R_x$  よりも電圧計の仕

様から大きいと考えられますので、この並列回路部分の全体の抵抗は  $R_x$  程度になるはずですが、また並列回路に流れる電流も  $R_x$  の方に流れようと動きます。すなわち、この全体の回路は  $R_x, r_3, r_4$  と言った抵抗が直列に接続されている状況となっていますが、直列回路では電流はまったく同じように流れるので、電流計で読み取られる電流と  $R_x$  に流れる電流はほとんど同じと言っていいはずですが、また電圧については、 $R_x$  両端に電圧計がつながっていますので、 $r_3, r_4$  の値に関わらず  $R_x$  にかかる電圧が与えられるようになります。すなわち読み取られる電圧と電流は、 $R_x$  によるものとなるので、正しい抵抗値が測定できるようになります。

一方実験で利用した二端子法 (a) についてはどうでしょうか。この回路の場合に流れる電流については、やはり  $R_v$  の抵抗が  $r_3, r_4, R_x$  よりも極めて大きいことから、電流が  $r_3, r_4, R_x$  が直列につながった部分にかかり、従って電流計が示す電流値は  $R_x$  によるものとなります。ところが電圧計の位置を見てみると、 $r_2$  の抵抗を無視すれば  $r_3, r_4, R_x$  と直列につながった部分の電圧値を読み取ってしまうこととなります。つまり電圧計で読み取られる電圧はあくまで  $r_3 + r_4 + R_x$  の抵抗が寄与する電圧であって、 $r_3, r_4$  の効果が無視できない場合は、十分な精度を得ることができません\*1。

以上のことをまとめると、 $R_x$  が  $r_3, r_4$  を無視できない程度の小さな抵抗の場合、四端子法では測定される抵抗値は  $R_x$ 、二端子法では測定される抵抗値は  $r_3 + r_4 + R_x$  であると言えます。このことから、計測器の使い方さえちゃんと分かれば、正しく実験できる、ということは誤りで、負荷抵抗の値を吟味した上でどのような抵抗測定法を用いるかを検討する必要があると言えます。

## 5 むすび \*計測器はヒトなしには生かせない\*

今回は、単純な直列回路の抵抗測定法を通じて、回路配置に関係なしに抵抗が測定できるのかについて考えていきました。今回取り扱った2つの回路は、非常に単純なものではありますが、特に物性などで小さな抵抗値を測る場合においては、2つの方法でも明らかな違いが表れていることが分かりました。

現代の計測技術の進展によって物理量の精密な測定が行なえるようになったことは、一番最初の導入で触れました。計測技術があらゆる分野で発展したことは、その程度はあるにしろ様々な技術者が考案した成果であって、それを否定することはできないと思います。

しかし今回の簡単な回路の実験を通じて分かったことは、このような精密化された計測計を利用しても、最終的にはヒトが関与して実験の方法を工夫しなければ、誤った結果を導いてしまう、ということです。すなわち、物理量を測りたいと思ったときには、例えば今回の例で言えば、抵抗の値を吟味したように、実験したい事柄と適合した形の測定方法を考案しなくてはなりません。つまり計測器自身では、実験結果を反映することはできないのです。

皆さんが学生実験などを行なう際、このようなことを考えながら実験しているでしょうか。まどろっこしい方法だとか、面倒な方法だとか考えていませんか。しかし、そうやって実験方法として

---

\*1 (b) についても電圧計の位置については同じことが言えるので、抵抗値は正しく求められないこととなります。

(実験書などに) 示されているものは、その実験で十分な精度を取って考察に持っていくために重要なものです。皆さんが最終的に研究するときには、このような方法を自分である程度考えなくてはならないのですよ？

きっと将来、計測器の進展はさらに華やかになっていくと思います。しかし、使い方を見極めるために実験事項に関連する事柄をよく学習していくことは、そういった意味で無駄ではないと思われます。どのような前提のもとでその実験を行なうのか。このような点について、実験する際にはよく吟味する必要があるのだ、と私は考えます。

## 参考文献

- 1) 廣瀬明：“電気電子計測”，数理工学社 (2003)
- 2) 近藤浩：“電気計測”，森北出版 (1997)