

電子回路作製とオシロスコープによる測定を 組み合わせた実験教育

The experiment education combining electronic circuit fabrications
with oscilloscope measurements

高木 淳[†], 大鐘 亮[†]
Atsushi TAKAGI, Ryo OGANE

Abstract We suggest a new subject using an oscilloscope in the physical experiment class opened for sophomore students in engineering and computer systems. It involves electronic circuit fabrications using so-called bread board that makes it easier for students to connect parts. The goal for this subject is to ensure comprehension for basic physical theories through this experiment and to learn how to use devices commonly employed in each department course, such as an oscilloscope.

1. はじめに

愛知工業大学では、工学部全専攻と情報科学部コンピューターシステム専攻の2年生に対し、全13テーマから成る物理実験を開講している。テーマとしては、力学などの基本的な内容から工学的分野に関わるものまで広範な物理現象を取り上げている。主目的は、これらのテーマを通じて、理科系学生として必要な科学的自然観や思考方法を学生に身につけさせることにある。具体的には、各テーマの理論と実験手法を学び、測定値の取り扱い方、考察の書き方などレポート作成の基本を学ぶことであるが、実際に実験を行う中で、基本的な測定器の操作方法、実験技術を修得することも重要な目的である。すなわち物理実験は、学生がそれぞれの専攻分野で行う本格的な実験の基礎となる側面もある。

このことから、各専攻の実験に直接つながるテーマを開拓し、提案することが重要となる。今回は、電子情報系の専門実験でよく用いられるオシロスコープを使った実験テーマを構築したので報告する。主な内容は、ブレッドボードと呼ばれる基板を用いて、抵抗器などを用いた簡単な電子回路を学生に作製させ、オシロスコープを用いて電圧などの測定を行うというものである。この実験を通じて、学生は電気回路や力学の基本的な物理法則

を学ぶとともに、オシロスコープの基本的な操作方法を習得することができるようになることを期待される。

2. 実験装置及び器具

実験に用いる装置及び器具は、オシロスコープ、ブレッドボード、直流電源、交流電源、位相器、可変抵抗器、交流電流計、抵抗器などである。主なものについて以下で説明する。

2・1 オシロスコープ

オシロスコープとは、1つ以上の時間的に変化する電子信号（電圧）を画面上に表示し、その波形を観測、測定する装置である。図1にオシロスコープの外観写真を示す。スイッチやダイヤルが多く、学生が操作に手間取ることの多い装置である。使用前に操作方法の基本をしっかりと理解する必要がある。

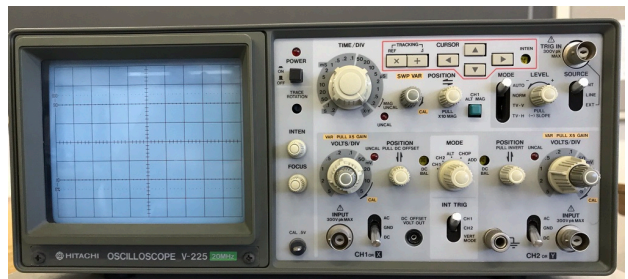


図1 オシロスコープ

[†] 愛知工業大学 基礎教育センター（豊田市）

通常モードでは、図 2 に示すように、画面表示の水平軸 (x 軸) は時間を表し、垂直軸 (y 軸) は電圧を表す。時間、電圧ともに 1 目盛りあたりの数値がレンジによって決まるので、目盛数 (図 2 では時間 8 目盛り、電圧 6 目盛り) を測定することにより、各数値を求めることができる。

また本装置では、電圧を入力するチャンネルが 2 つあるため、同時に 2 つの電圧の時間変化を描くことができる。この状態から、水平軸、垂直軸ともに電圧を示すモード ($x-y$ モード) へ切り替えることにより、2 つの電圧値を x と y 軸へ割り振ることができ、各電圧値の時間変化から時間を消去した関数関係で示すこともできる。

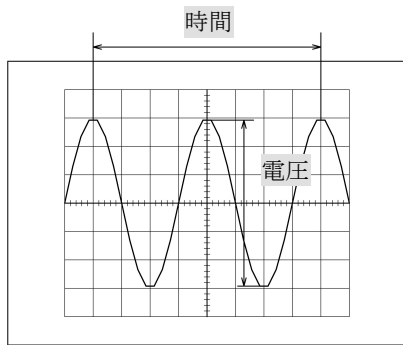


図 2 オシロスコープの画面

2・2 ブレッドボード

ブレッドボードとは、はんだ付けを必要とせず、電子部品や電線を差し込むことにより、簡単に電子回路を組むことのできる基板のことである。図 3 に示した外観写真からわかるように小さな穴が多数空けられており、この穴に電子回路を構成する部品の端子を差し込んで使用する。

図 4 に示すように、各部品を接続するためのエリアが設けられており、通常このエリアに従って電子回路を構成する。外部入出力端子エリアは、電圧計や電流計などの測定機器を接続するとき使用する。部品用エリアに抵抗器や IC チップを接続して回路を形成する。

部品端子を差し込む穴同士の導通には、図 4 にも示した一定のルールがあり、これを十分に理解しておく必要がある。基本的に、横方向につながった穴同士は導通があり、縦方向につながった穴同士は導通がない。

例えば、図 5 の左側のような配線をしてしまうと、横方向の穴同士は導

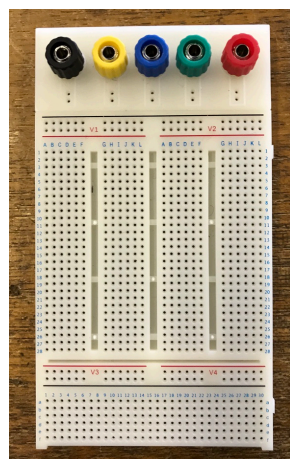


図 3 ブレッドボード

通があるので、抵抗器の端子間はショートしてしまう。図 5 の右側に、2 つの抵抗器を直列に接続する回路図を配線した場合の一例を示す。

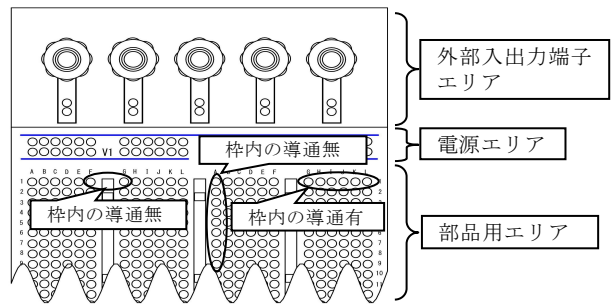


図 4 ブレッドボードの各エリア

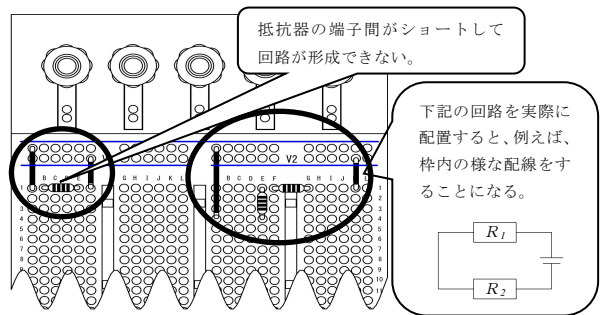


図 5 ブレッドボードの配線例

2・3 その他の装置

直流電源、交流電源、位相器、可変抵抗器については本実験に合わせて自作した。

図 6 に、直流電源と交流電源の外観写真を示す。今後の実験展開等を考慮し、各々、5 V から 24 V までの異なる電圧を発生させることができるようにしてある。図 7 に交流電源を用いた実験の様子を示す。交流電源左側に見える可変抵抗器で回路の電流値を任意に制御し、ブレッドボード上の抵抗器の電圧を変化させることができる。



(a) 直流電源

(b) 交流電源

図 6 自作した電源装置

図8に位相器の外観写真を示す。位相器は、入力端子に交流電源をつないで、位相の異なる二つの交流電圧を出力できるようにした装置である。位相差は位相器内の抵抗器の接続を変えることにより変化させる。現状では、図8にあるように、0～300 kΩの4種類の抵抗器（500 kΩ可変抵抗器は調整用で、予め抵抗値を決めることはできない）で決まった位相差しか発生させられないが、今後、図9に示すようなデジタルスイッチを用いて、抵抗値を任意に決めて実験できるようにする予定である。

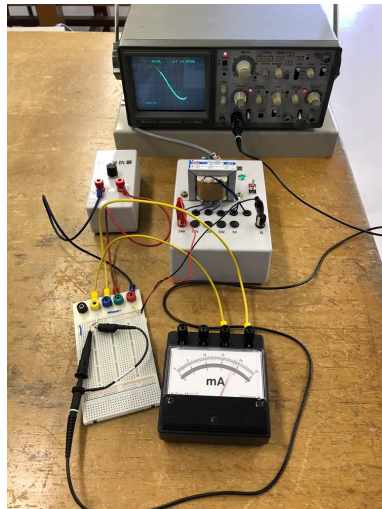


図7 交流電源を用いた実験の様子

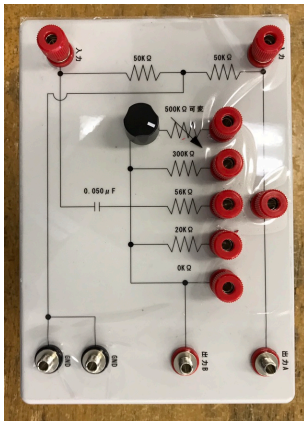


図8 位相器



図9 デジタルスイッチ

3. 実験に必要な理論

本実験に必要な物理的知識は、電磁気学で学ぶ初歩的なオームの法則、キルヒホッフの法則、交流に関する理論および力学で学ぶ単振動を組み合わせたリサージュ図形などである。以下に主なものについて示す。

3・1 キルヒホッフの法則

電気回路において、任意の節点に流れ込む電流の総和と任意の閉回路の電圧の総和に関する法則である。例えば、図10に示す回路にキルヒホッフの法則を適用すると以下ようになる。

- ・ B点： $I_1 = I_2 + I_3$
 - ・ ABDEFA 閉回路： $R_1 I_1 + R_2 I_2 = \varepsilon$
 - ・ BDCB 閉回路： $R_2 I_2 - R_3 I_3 = 0$
- よって ε 、 R_1 、 R_2 、 R_3 が既知ならば、3つの式を連立して解くことにより I_1 、 I_2 、 I_3 を求めることができる。

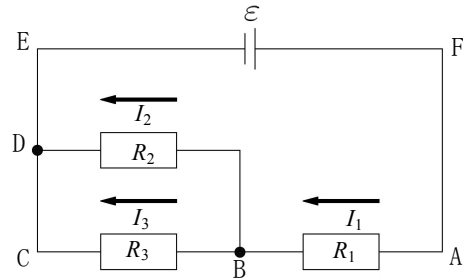


図10 キルヒホッフの法則の回路図の例

3・2 交流とオームの法則

回路に加える交流電源電圧 $V(t)$ が正弦関数を用いて

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t) \tag{1}$$

で与えられるものとしよう。 V_0 は電圧の最大値を示しており、交流の最大電圧と呼ばれる。定数 ω は角振動数である。この交流電源と抵抗値 R の抵抗で図11の回路を組む。このとき、それぞれの瞬間にオームの法則が成立するため、回路に流れる電流 $I(t)$ は

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} = I_0 \sin(\omega t) \quad (I_0 \equiv \frac{V_0}{R}) \tag{2}$$

で与えられる。電流の最大値である I_0 を最大電流と呼ぶ。

電圧 $V(t)$ と電流 $I(t)$ のそれぞれの時間平均値は0となるが、時間に関する2乗平均値は0とならない。2乗平均平方根を V_e 、 I_e で表し、それぞれの実効値と呼ぶ。

それらを求めると

$$V_e \equiv \sqrt{V(t)^2} = \sqrt{V_0^2 \sin^2(\omega t)} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_0 \tag{3}$$

$$I_e \equiv \sqrt{I(t)^2} = \sqrt{I_0^2 \sin^2(\omega t)} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 \tag{4}$$

である。

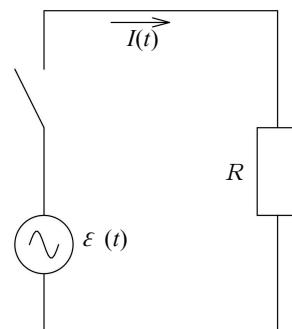


図11 交流とオームの法則

3・3 位相器

図 12 のような回路を組み、入力端子に交流電源をつなぐと、位相の異なる 2 つの交流電圧が出力される。交流電源の周波数を f とし、G に対する出力 A の電位を $V_A = a \sin(2\pi ft)$ とすると、G に対する出力 B の電位は

$V_B = a \sin(2\pi ft - \theta)$ となり、位相差は

$\theta = 2 \arctan(2\pi fRC)$ で与えられる。これは、次のように導出される。

まず $2\pi f = \omega$ とおくと、図 12 の電流 I は

$$I = 2V_A / (R + \frac{1}{i\omega C}) \quad (5)$$

と書くことができる。 $V_A - V_B = IR$ から

$$\begin{aligned} V_B &= V_A - 2V_A R / (R + \frac{1}{i\omega C}) \\ &= V_A \left(\frac{-R + 1/(i\omega C)}{R + 1/(i\omega C)} \right) = V_A \left(\frac{1 - i\omega RC}{1 + i\omega RC} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

となり、ここで、

$$\begin{aligned} 1 - i\omega RC &= r \exp(-i\theta') = r(\cos\theta' - i \sin\theta') \\ &= r \cos\theta' - ir \sin\theta' \end{aligned} \quad (7)$$

とおけるので $r \cos\theta' = 1$, $r \sin\theta' = \omega RC$ から

$\tan\theta' = \omega RC$ が導かれ、 $\theta' = \arctan(\omega RC)$ となる。式 (6)

を書き直すと

$$\begin{aligned} V_B &= V_A \frac{\exp(-i\theta')}{\exp(i\theta')} \\ &= V_A \exp(-2i\theta') = V_A \exp(-i\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ここで $\theta = 2\theta'$ とした。

$V_A = a \exp(i\omega t)$ とすると、式 (8) は $V_B = a \exp(i(\omega t - \theta))$

となる。すなわち、 $V_A = a \sin(\omega t) = a \sin(2\pi ft)$ とすると、

$V_B = a \sin(\omega t - \theta) = a \sin(2\pi ft - \theta)$ となり、位相差は

$$\theta = 2\theta' = 2 \arctan(\omega RC) = 2 \arctan(2\pi fRC) \quad (9)$$

となる。

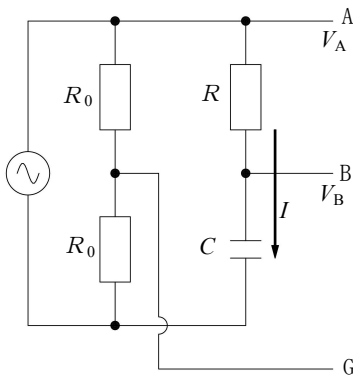


図 12 位相器の回路図

3・4 リサージュ図形

互いに垂直な方向に運動する 2 つの単振動を、2 次元的に合成することにより描かれる図形を一般にリサージュ図形という。いま、角振動数の等しい 2 つの単振動の方向をそれぞれ x 軸、 y 軸に取り、それぞれ

$$x = a \sin(\omega t), \quad y = b \sin(\omega t - \theta) \quad (10)$$

とする。両式から t を消去して軌道を求めると

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2 \frac{xy}{ab} \cos\theta = \sin^2\theta \quad (11)$$

となり、図 13 に示すように、一般に楕円となる。($\theta = 0$ または π のときは直線となる。) この楕円が y 軸と交わる点の間隔を A , $B = 2b$ とすると

$$A = B \sin\theta \quad (12)$$

となり、

$$\theta = \arcsin\left(\frac{A}{B}\right) \quad (13)$$

が得られ、作成したリサージュ図形から A , B を測定することにより、位相差 θ を求めることができる。

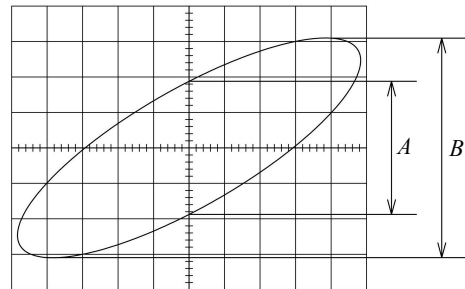


図 13 リサージュ図形

4. 実験概要

実験項目は、以下の直流電圧の測定、交流電圧および周波数の測定、交流電圧の位相差の測定の 3 項目である。

4・1 直流電圧の測定

図 14 を見て、ブレッドボードに図 10 と同じ抵抗回路を組み、結線を行う。抵抗値については、各抵抗器の色を見て識別し記録しておく。直流電源の電圧を 1 つ決めて (図 14 では 24V) 回路に電流を流し、オシロスコープを用いて、抵抗 R_1 , R_2 , R_3 の各電圧値を測定する。

3・1 で述べたキルヒホッフの法則を用いて、抵抗 R_1 , R_2 , R_3 を流れる電流値 I_1 , I_2 , I_3 を計算し、各抵抗の抵抗値と電流値から、オームの法則により各抵抗の電圧値を計算する。オシロスコープにより測定した各抵抗の電圧値を比較し、誤差率を計算する。

4・2 交流電圧および周波数の測定

図 15 を見て、ブレッドボードに抵抗回路を組み、結線を行う。抵抗値については、抵抗器の色を見て識別し記録しておく。可変抵抗を用いて、電流値を 0~10 mA で 1 mA 間隔で変化させ、各電流値に対する抵抗の電圧値をオシロスコープを用いて測定する。オシロスコープには、交流電圧として正弦波が描かれる。測定する電圧は正弦波の振幅の 2 倍の電圧値である。電圧目盛り（縦軸）と同様に、正弦波の周期 T を時間目盛り（横軸）を読み取ることにより求める。

各電流値に対する電圧目盛りの測定値から、3・2 で述べた各実効値を求め、それに対応する電流値のグラフ（原点を通る直線）を描き、その傾きから求めた抵抗値 R_E を求める。 R_E と抵抗器の実際の抵抗値を比較し、誤差率を計算する。交流電圧の周波数 $f = 1/T$ を求め、実際の周波数 60 Hz となっているか確認する。

4・3 交流電圧の位相差の測定

図 16 を見て、ブレッドボードに抵抗回路を組み、結線

を行う。移相器の端子 C を可変抵抗につなぎ、抵抗値を変化せると、3・3 で述べた位相の異なる 2 つの交流電圧が図 17 の様に出力される。続いて、端子 C を抵抗値 0, 20, 56, 300 k Ω の各抵抗に接続し、2 つの交流電圧の位相差に相当する t を測定する。抵抗値が ∞ (出力 A を抵抗に接続しない状態) においても同様に測定する。また、波形の 1 周期 T を測定する。 $\theta_1 = (t/T) \times 360^\circ$ の計算により 2 現象観測による位相差 θ_1 を求める。

次に、オシロスコープのモードを $x-y$ モードに切り替え、移相器の端子 C を可変抵抗に再度つないで抵抗値を変化せると、3・4 で述べたリサージュ図形が図 13 の様に出力される。続いて、先と同様に端子 C を抵抗値 0, 20, 56, 300 k Ω の各抵抗に接続し、図 13 の A および B を測定する。式 (13) の計算により、リサージュ図形による位相差 θ_2 を求める。

各抵抗値から、式 (9) に示した回路計算による位相差 θ_3 を求める。 θ_1 および θ_2 と比較し、誤差率を計算する。各抵抗値におけるリサージュ図形はスケッチする。

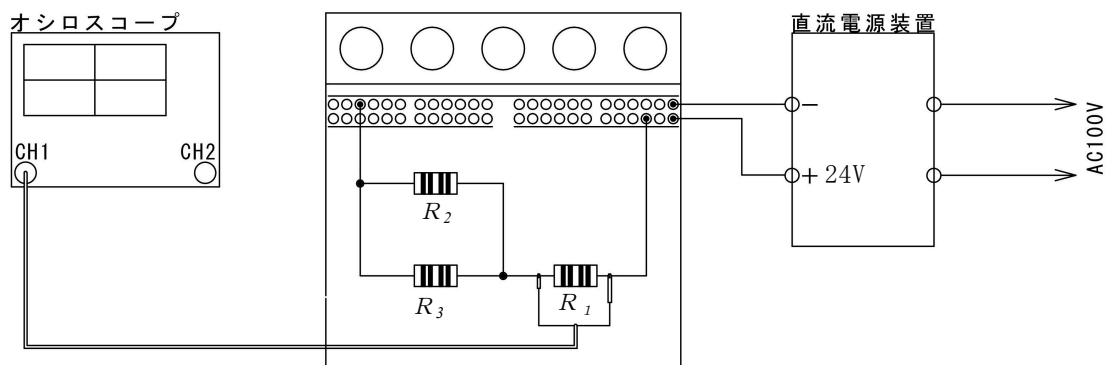


図 14 直流電圧の測定の配線図

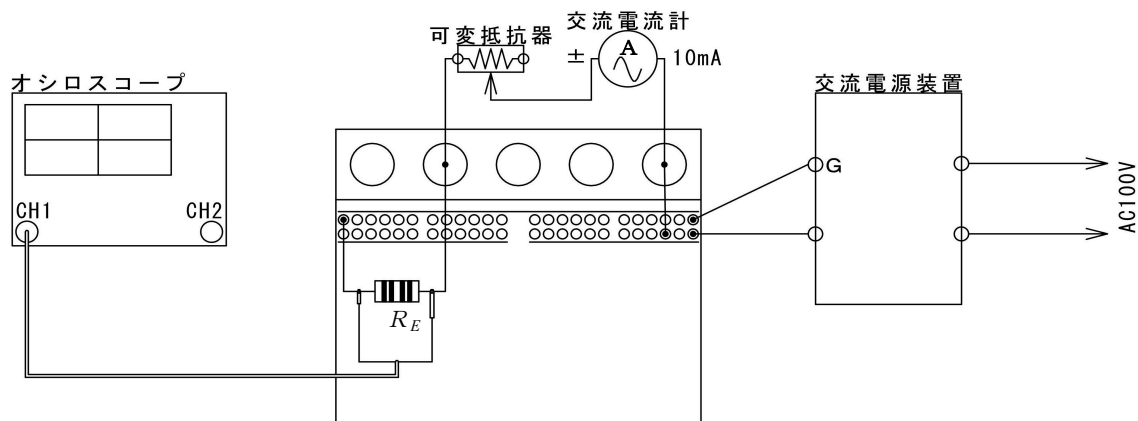


図 15 交流電圧および周波数の測定の配線図

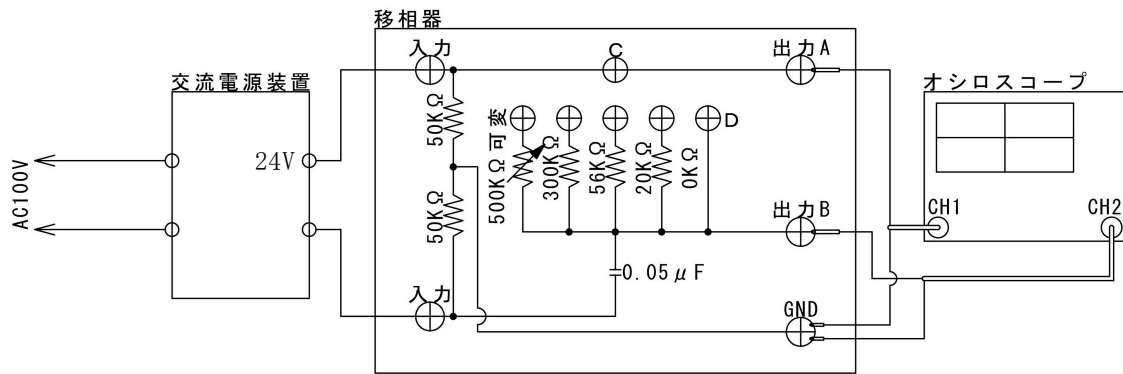


図 16 交流電圧の位相差の測定の配線図

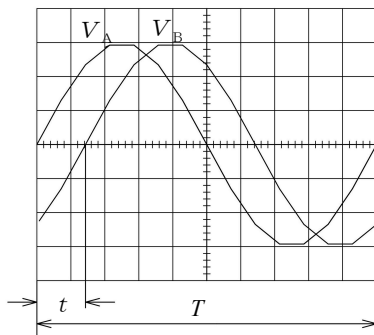


図 17 交流電圧の 2 現象観測

5. まとめ

今回、電気系の学生にとって重要かつ基礎的な電気回路に関する物理実験テーマを構築した。測定装置として、特に電子情報系の弱電分野でよく用いられるオシロスコープを取り入れた。専攻での実験等で学生が同様装置を使用する場合、できるだけスムーズに取り扱えるように、

基本操作を教育することが一つの目的である。

同時に、オシロスコープを用いることにより、力学で学ぶ単振動の合成であるリサージュ図形を電気回路で学ぶ交流電圧を用いて描けることがわかる。単に電圧や電流を測定するだけでなく、講義で学んだ基本的な理論を実験により結びつけ、学生に会得させることがもう一つの重要な目的である。

平成 29 年度の前期までに、物理実験テーマとして必要な 5 セットの実験装置及び器具を揃えることができたので、後期の物理実験において、電子情報専攻の学生を対象に試験的に本実験を実施した。初期に、抵抗器の選択により測定する電圧値に有意差が得られないなどの問題点が生じたが、対処後は時間的にも無理なく実験ができ、学生のみならず指導するティーチングアシスタントの評判も良好であった様である。今後は、細かな操作上の問題点などの確認と **2・3** でも述べた決まった抵抗値でしか使用できない位相器を任意の抵抗値で利用できるようにするなどの改良を加えていく予定である。

(受理 平成 30 年 3 月 10 日)