

電気電子工学科における「実験学」および「電気基礎実験」の運営

岩渕 大行*

Operation of "Experimental Studies" and "Basic Electrical Experiments" in the Department of Electrical and Electronic Engineering

Hiroyuki IWABUCHI

Abstract:

In this report, the operation of "Experimental Studies" and "Basic Electrical Experiments" is introduced, which are required courses for second-year students in the Department of Electrical and Electronic Engineering. Through these courses, students learn scientific thinking, measurement techniques, cooperative spirit, and report-writing techniques. Efforts to improve learning outcomes are also presented.

Keywords: Experiment, Report, Electric circuit, Resistor, Diode, Capacitor

要旨:

本稿では、電気電子工学科の「実験学」「電気基礎実験」の運営を紹介する。「実験学」「電気基礎実験」は2年生の必修科目で、学生がこれらの科目を通して、科学的考察力、電気磁気の原理の理解、測定技術の体得、協力的精神の涵養、報告書作成技術等を学ぶことを目的としている。学生へのアンケート結果や授業改善の取り組みについても紹介する。

キーワード: 実験, レポート, 電気回路, 抵抗, ダイオード, コンデンサ

1. はじめに

「実験学」および「電気基礎実験」は電気電子工学科2年次に配当されている必修科目である。「電気基礎実験」は電気電子工学科の学生が本学で最初に取り組む実験科目であり、直流回路、交流回路を組み立て、動作を検証する。「実験学」では、「電気基礎実験」の内容に関する予習、演習に加え、対数グラフの扱い方、実験データ処理、近似曲線等、実験に関連する基礎的な事項を扱う。これらの科目を通して、科学的考察力、電気磁気の原理の理解、測定技術の体得、協力的精神の涵養、報告書作成技術等を学ぶことを目的としている。本稿では、電気電子工学科における「実験学」「電気基礎実験」授業の運営、改善に関するトピックを紹介したい。筆者は昨年度からこれらの科目の主担をしており、他学科でこのような実験・演習を担当しておられる先生方とも是非意見交換をしたと思っている。

2. 「電気基礎実験1」テーマ紹介

「電気基礎実験」では、1班3～4名の実験班で実験を行い、再履修を含めて令和4年度は16班の体制を基本としている。担当スタッフは専任4名、非常勤1名、技術員3名、SA2～3名とし、スタッフ1～2名が2班を担当してサポートできるようにしている。教科書は使用せず、ガイダンス時に配布するお手製の実験指導書を使用する。

電気基礎実験は金曜日3～4コマに配置され、前期「電気基礎実験1」で10テーマ、後期「電気基礎実験2」で10テーマの実験を実施する。実験室各班の机上には、図1-1のように、配線ボックスと測定器、電源等をあらかじめ用意しておく。抵抗やコンデンサ、ダイオード等の素子は共用の素子ボックスから班ごとに「適当なものを」選んで回路を作成し(図1-2)、測定を行うという流れである。実験の初めに簡単な機材説明は行うが、細かな内容に教員は手出しせず、学生が試行錯誤しながら実験し、質問を出してくれることを期待している。

実験班は、前学期は学籍番号順に編成するが、昨

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 講師

年から後学期は前学期の電気基礎実験の成績順とすることで、班内での学力差が小さくなるようにし、一部の班員のみには作業量が偏らないように配慮することとした。



図 1-1 各実験班の机の上に置かれる機材の例：左奥が配線ボックスで電源・素子・測定器を空中配線にせず配線できる。ドライバは測定器の零点校正用。



図 1-2 実験室の共用素子ボックス：学生は班ごとに適当な素子を選んで回路を組む。当然だが抵抗値、静電容量値などは特定の値のものしかないため、学生の想定したとおりのものがあるとは限らない。

以下、電気基礎実験 1 で実施される 10 テーマを紹介する。

【実験 1】直流回路網の実験（1）

抵抗の直列接続を実験する。図 2 のように 1/4 W 型抵抗を直列に接続し、抵抗 R_1 、 R_2 の両端の電圧 V_1 、 V_2 を所望の値に分圧できるように抵抗を選定する。また、抵抗に 1/4 W を超える電力を消費させた際の様子（色、温度など）を観察してもらおう。オームの法則 $V = RI$ には何となく親しんでいるものの、「抵抗で 1/4 W を消費させる」という、抵抗を電源に対する負荷としてとらえる発想に慣れない様子が見受けられるようである。

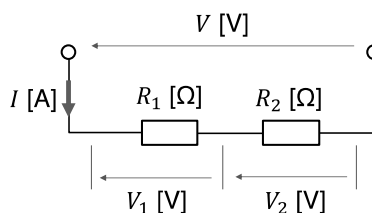


図 2 分圧実験回路

【実験 2】直流回路網の実験（2）

抵抗の並列接続を実験する。図 3 のように抵抗 R_1 、 R_2 を並列に接続した回路で、それぞれの抵抗に流れる電流 I_1 、 I_2 を測定し、理論値との誤差を考察する。

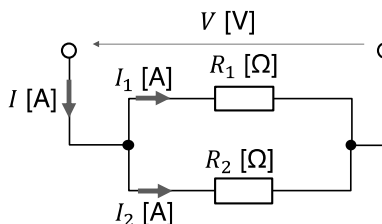


図 3 分流実験回路

【実験 3】ブリッジの実験

ブリッジ回路の原理を実験する。図 4 の回路では、 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ が平衡条件となり、この条件が満たされた時には検流計 G に電流が流れない。そこで、 R_2 、 R_3 には誤差の小さい D 級抵抗と呼ばれる抵抗を用い、可変抵抗 R_1 を平衡がとれるよう調整する。このときの抵抗 R_4 の値を求め、公称値と比較する。回路がだんだん複雑になり、何を求めるか手順をあらかじめ考えて実験を進める必要が出てくる。

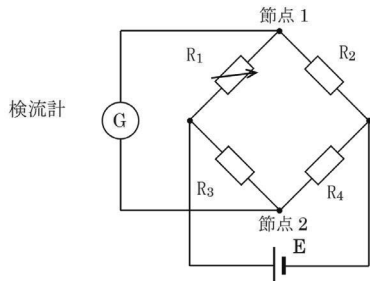


図4 ブリッジ回路

【実験4】直流回路網の実験（3）

キルヒホッフの法則の実験を行う。電気回路の任意の節点において、流れ込む電流の総和と流れ出す電流の総和は等しくなる（キルヒホッフの電流則）。また、電気回路の一つの閉路に沿って一周すると、負荷の両端の電圧の総和と起電力の総和は等しくなる（キルヒホッフの電圧則）。

実験では、図5のように回路を構成し、左右2箇所の直流安定化電源の電圧を変化させた際の電流 I_1 ・ I_2 ・ I_3 を測定し、理論値と比較する。

【実験5】オシロスコープの実験

アナログオシロスコープの動作を体験する。ファンクションジェネレータとオシロスコープを接続して波形を観測するシンプルな内容だが、オシロスコープの扱いが初めての学生も多く、特にアナログオシロスコープなので輝点を表示させるところから苦戦している学生が多い。

- ・同軸ケーブルの接続法
 - ・波形の表示法
 - ・トリガー
 - ・AC結合とDC結合
- など、学ぶところの多い実験である。

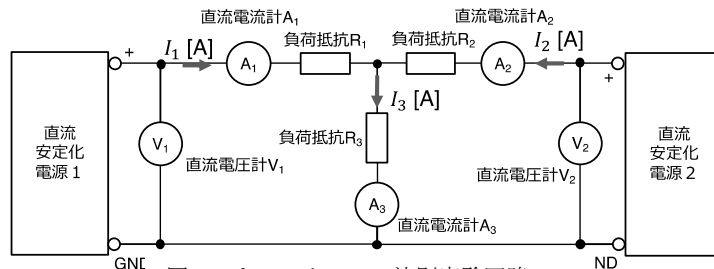


図5 キルヒホッフの法則実験回路

【実験6】ダイオードの実験1 静特性

ダイオードの電流・電圧特性を測定する。ダイオードの性質は、順方向の電圧を印加すると極めて電流を流しやすく、逆方向の電圧を印加しても電流は流れない（微量だが逆漏れ電流は存在する）ものであり、その性質をシリコンダイオード、発光ダイオード及びゲルマニウムダイオードで比較する。

理論的に、電流 I ・電圧 V 間の特性は I_s を飽和電流、 q :電気素量、 k :ボルツマン定数、 T :絶対温度、 m :ダイオード固有の定数としたとき、

$$I = I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right\} \quad (1)$$

の形で与えられる。筆者は実験結果とこの式を比較する考察を行ってみるよう誘導しているが、学生の反応はあまり芳しくない。

【実験7】ダイオードの実験2 整流回路

ダイオードを用いた整流回路の実験をする。ダイオードを利用して交流を直流に変換する操作を整流と呼ぶが、整流方法には、半波整流と全波整流とがある。図6は実験で使用する全波整流回路で、出力波形をオシロスコープで観測する。

電気基礎実験では唯一 100V 電源を使用する実験であるため、短絡が起こらないよう配線時に注意を呼び掛けている。

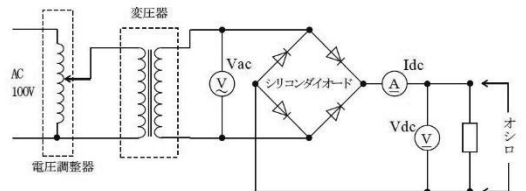


図6 全波整流回路

【実験 8】トランジスタの実験

図 7 のようにトランジスタのエミッタ接地回路を構成し、増幅率を求める実験である。まずベース電流 I_b をパラメータとしてエミッタ-コレクタ間電圧 V_{CE} とコレクタ電流 I_c 間の特性を取得する。次にベース電流 I_b とコレクタ電流 I_c の関係を表すグラフを作成し、グラフの傾きから増幅率を導出する。よくある手法ではあるが、初めての学生には実験手順も複雑で分かりにくく、難しい実験との声も多かった。

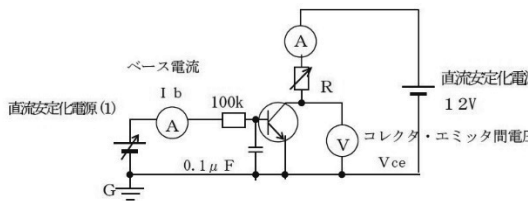


図 7 エミッタ接地回路

【実験 9】直流回路網の実験 (4) テブナの定理

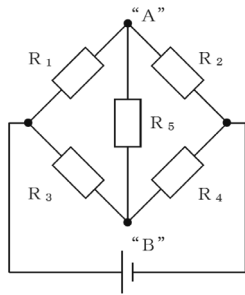


図 8 テブナの定理 (平衡にならないブリッジ回路)

テブナの定理(フランス人技師 Thévenin に由来する電気回路網に関する定理だが、Thévenin と独立して鳳秀太郎教授も同時期に発明したことから、鳳・テブナの定理とも書かれる。筆者はこちらの名称を推したい。ちなみに鳳秀太郎教授は与謝野晶子の実兄にあたる。)を実験する。

図 8 のような回路において $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ が成り立つときは、ブリッジの平衡条件から抵抗 R_5 には電流が流れない。平衡条件が満たされないときの R_5 に

流れる電流は、鳳・テブナの定理から次の手順で求められる。

- ・ R_5 を除去した状態で端子 A と B の間の電圧 V_0 を求める。
- ・ 電圧源を短絡し、抵抗 R_5 も除去する。この状態で回路を A B から見た抵抗 R_0 を求める。

以上の測定結果を用いると、抵抗 R_5 を流れる電流は、電圧源を V_0 とすると、

$$I = \frac{V_0}{R_5 + R_0} \quad (2)$$

と求めることができる。

【実験 10】ゲート回路の実験

ダイオードやトランジスタを用いて、論理回路の基本である AND 回路・OR 回路・NOT 回路を作成し、それぞれ真理値表の確認をする。

図 9 は AND 回路の構成例である。スイッチ A および B の状態を入力とし、5V 側に接続したときが入力"1"に相当する。両方とも 5V 側に接続されていればダイオード D1, D2 に電流が流れないため LED が点灯し、A または B どちらか 1 つでも接地側に接続してあれば、LED 両端の電圧が低下して LED が点灯しない、"0"出力となる。回路で"0","1"信号を構成でき、また自分たちで他の論理回路を構成してみる課題もあることから、面白い実験であると感じる学生が多いようであった。

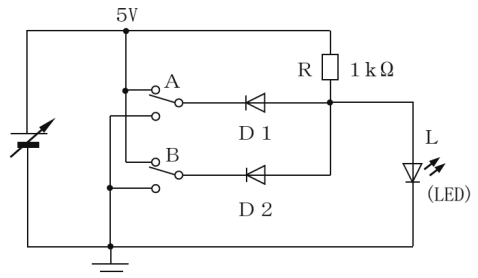


図 9 ゲート回路の実験 (AND 回路)

3. 「電気基礎実験2」テーマ紹介

後学期に行われる「電気基礎実験 2」では、交流回路、コンデンサ、コイルなどを扱う。以下、電気基礎実験 2 で実施される 10 テーマを紹介する。

【実験 1】交流電圧計測の実験

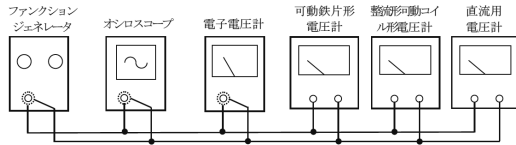


図 10 交流電圧測定

図 10 のように、ファンクションジェネレータで発生させた波形を様々な電圧測定器で測定する。測定器によって測定の原理や目盛りの振り方に違いがあるため、測定器による違いを考察する。

【実験 2】コンデンサの実験（1）

この実験ではコンデンサの静電容量を測定する。厚さ 4 mm のベークライト、PET、ポリ塩化ビニル（それぞれ比誘電率の異なる誘電体）をアルミ板で挟んだ構造のコンデンサを用意し、図 11 のようにアルミ板をずらした際の静電容量を LCR メータで測定する。また、別のコンデンサを直列接続、並列接続した際の合成容量を測定する。

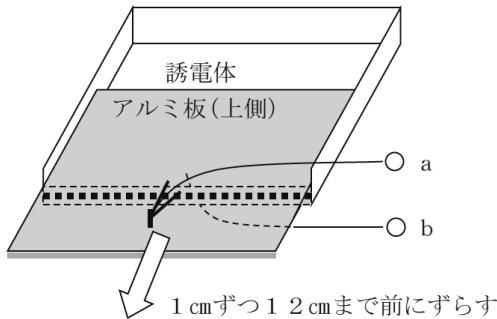


図 11 コンデンサ（静電容量測定）の実験

【実験 3】コンデンサの実験（2）

この実験ではコンデンサの放電特性を測定する。図 12 の回路で SW を閉じてコンデンサを充電した後に SW を開くと、抵抗を流れる電流 I は、

$$I = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

で与えられる（微分方程式を解けば得られるが、学生向けの指導書に導出は掲載していない）。したがって、電流を片対数グラフにプロットすると、時定数 $\tau = RC$ で I が初期値の $\frac{1}{e}$ 倍になることが読み取れる。測定した時定数の値から静電容量 C を逆算し、公称値との誤差を算出する。

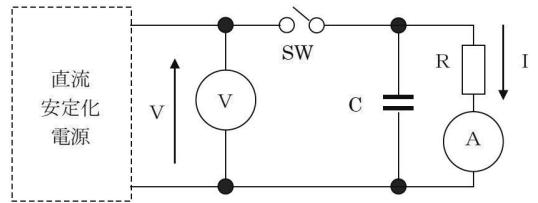


図 12 コンデンサ（放電特性）の実験

【実験 4】オペアンプの実験

オペアンプ（ μ PC251C）の反転増幅回路を実験する。図 13 のように回路を構成すると、出力信号が入力信号の $-\frac{R_1}{R_2}$ 倍になる。 R_1 を 5 種類入れ替えながら、信号の電圧増幅率、電力増幅器の測定を行う。

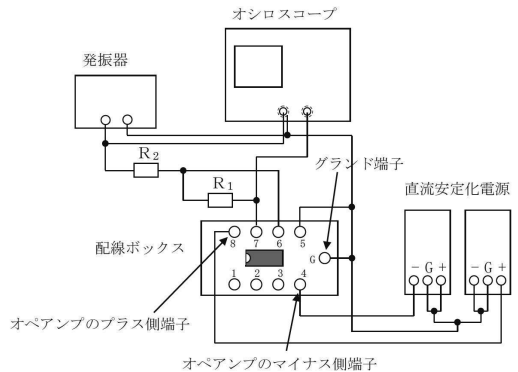


図 13 オペアンプの実験

【実験 5】インダクタンスの実験（1）

この実験では学生自らボビンにコイルを巻き（巻き数 400-600 回）、特性を測定する。作成後は 2 つ以上のコイルを直列・並列接続し、合成インダクタンスを LCR メータで測定する。また、図 14 のようにコイルに電流を流した際の磁束密度を測

定する。

コイルを手作りするには、途中で断線が起った
こり、巻き直したり、ハンダで接続しなおしたり苦
労も多い。

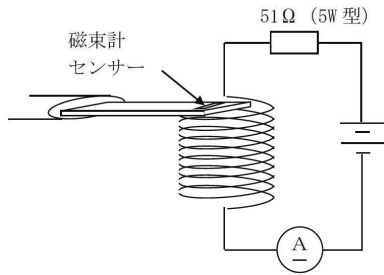


図 1 4 インダクタンスの実験 (磁束密度の測
定)

【実験 6】インダクタンスの実験 (2)

インダクタンスの実験 (1) で作成したコイルを
使って、自己インダクタンスの測定を行う。

図 1 5 の回路では、オシロスコブの CH1 に現
れる電圧 V_1 と CH2 に現れる電圧 V_2 の比は、

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{2\pi fL}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} \quad (4)$$

となる。 $R \gg 2\pi fL$ となるように R を選べば電圧の比
($\frac{V_2}{V_1}$) は簡単になり、

$$\frac{V_2}{V_1} \cong \frac{2\pi fL}{R} \quad (5)$$

から自己インダクタンス L を求めることができる。

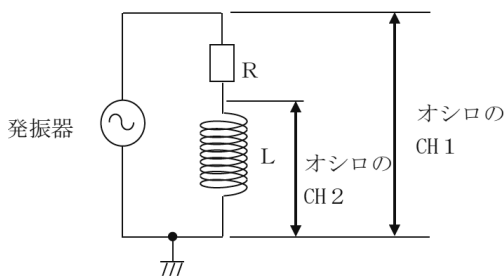


図 1 5 インダクタンスの実験 (自己インダク
タンスの測定)

【実験 7】インダクタンスの実験 (3)

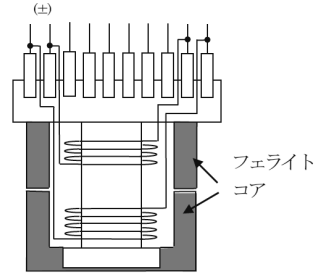


図 1 6 インダクタンスの実験 (相互インダク
タンスの測定)

この実験ではコイルの相互インダクタンスを測
定する。図 1 6 のようにボビンに 2 つ別々のコ
イルを巻き付け、フェライトコアを差し込んで固定
したサンプルを班ごとに作成する。2 つのコイル
間の相互インダクタンス M は、電圧電流特性から

$$V(t) = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (6)$$

となる。また 2 つのコイルの自己インダクタンス
 L_1L_2 を用いると、相互インダクタンスは $M =$
 $k\sqrt{L_1L_2}$ と書ける。ここで現れる係数 $k (<1)$ を
実験で求めることを目的としている。

この実験でも巻く途中でコイルが断線したり、
コイルの巻き方によって特性が大きく異なってい
たりと、学生からは苦勞したという声が多い。

【実験 8】交流ブリッジの実験

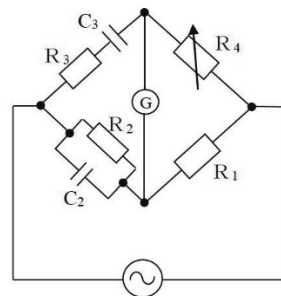


図 1 7 交流ブリッジの実験

図17のような交流ブリッジ回路では、インピーダンスを用いた $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$ が平衡条件となる。図17の回路はウィーンブリッジと呼ばれ、これを用いて交流ブリッジ回路の平衡条件を実験する。可変抵抗器 R_4 と電源の周波数 f を変化させ、平衡に達した時の値を理論値と比較する。やり方に悩んでいる班も、変化させるパラメータが2つあることに気づくと順調に進むことが多い。

【実験9】【実験10】位相差と共振回路

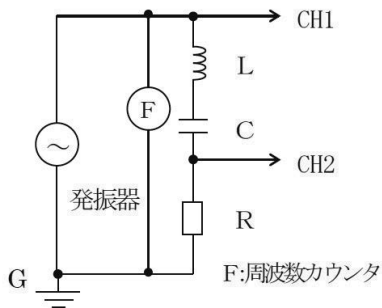


図18 直列共振回路

この実験では、LCR直列回路を構成し、位相差と共振周波数を測定する。位相差と共振周波数が、

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega CR} - \frac{\omega L}{R}\right) \quad (7)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

(ただし、 $\omega = 2\pi f$)
 で与えられることを調べておき、あらかじめ理論値を算出しておくことが肝心である。

4. 学生へのアンケート結果

電気基礎実験1を受講した学生へ、「面白かった実験」「難しかった実験」を複数回答で挙げてもらうアンケートを実施した結果が図19-20である。回答数は57名で、グラフの縦軸は該当すると答えた学生の割合（最大1）を示している。

「面白かった実験」「難しかった実験」とともにゲート回路の実験が突出していた。前学期の最後に行う実験で、強く印象に残っていることの他、この実験

では指導書で指示された回路を作成するだけでなく、自分たちの班でNAND, NOR回路を設計してみよ、という応用課題があることが学生の興味を惹いたことが考えられる。

また注目すべき点は「オシロスコープの実験」が難しかったと感じる学生が多かった点である。実験自体は単純であるものの、初めてオシロスコープに触れる学生が多いにもかかわらず、実験時に詳細な機器説明を省いて試行錯誤させているため、戸惑いがあったものと思われる。学生からのアンケートコメントでも「オシロスコープについてもう少し詳しく説明が欲しい」「オシロスコープの使い方がいろいろやってみたがいまいち理解できなかったので、説明が欲しいと思った。」など多く挙げられていた。オシロスコープについては、汎用測定器で卒業研究また卒業後にも触れる機会が多いと思われ、実験後に補足で操作説明をする等今後改善を試みたい。

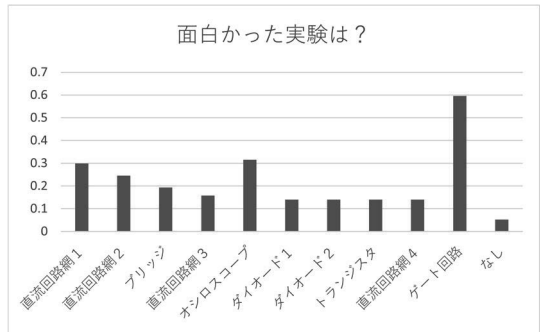


図19 学生へのアンケート結果（面白かった実験）

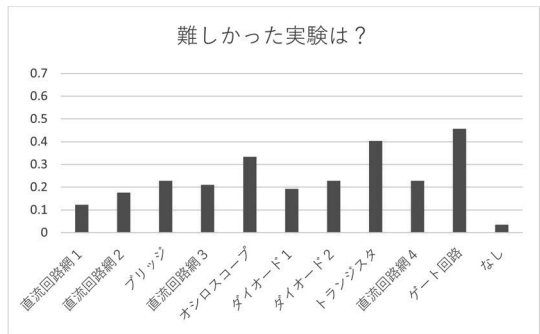


図20 学生へのアンケート結果（難しかった実験）

4. 実験ノートとレポート作成

電気基礎実験では、実験終了 1 週間後の 12:00 を締切としてレポートを毎回提出する。すべての実験に出席し、レポートを提出することが単位取得の条件となっており、欠席した実験は、都合のよい時間に補習として一人で（複数人いる場合は班を作って）実験を行うこととしている。補習の対応は技術員の方をお願いしている。

レポートの採点はテーマごとに割り振られた教員が担当する。レポートのフィードバックが重要であり、試行錯誤中であるが、現在はレポートの提出、フィードバックは Moodle の機能を利用してオンラインで行っている。レポートの作成方法はガイダンス時や実験学の授業中に解説し、お手本のレポートも配布する。それでもはじめのうちは、実験レポートに何を書けばよいか分からない、という声が学生から上がることが多い。よく注意しているポイントは、

- ・ 章番号を付ける。
- ・ 実験方法は回路図を載せ、手順を文章で説明する。
- ・ 使用器材、器具は、第三者がレポートを読んだだけで実験を再現できるように記載する。
- ・ 図の番号、説明は図の下、表の番号、説明は図の上に記載する。
- ・ 実験結果のグラフは大きく見やすく、軸の名称と単位を忘れずに記載する。
- ・ グラフについて文章で説明する。（「結果は図〇〇のようになった。」だけでなく、グラフの性質について数値を用いて説明する文章を書く）
- ・ 考察では、原理から求められる理論値と比較し、その差が生じた理由について記述する。

等である。

実験時には実験ノートを準備、記入し、学期末に提出するように指示している。実験ノートについても何を記入してよいかかわからず、提出前にあわてて過去の方まで記入を始める学生が見受けられた。そこで実験ノートについては以下のような注意を与えることにした。今後は実験の巡回中にも注意したい点である。

- ・ 時系列順に実験結果を記入しながら実験する。おかしところは随時確認し、その場ですぐやり直しができるようにする。
- ・ ボールペン等後から消したり改ざんしたりできないような筆記具を使用する。

5. 実験学の運営

電気基礎実験はきちんと予習をして臨めば得るものは非常に多いが、予習が不十分で実験内容を理解していないと単に作業をただで終わってしまう。電気基礎実験の予習を確実にを行うこと、電気基礎実験に必要な基礎知識（電気の物理・電気回路・電気計測・電気数学）を再確認することを目的として「実験学」の授業を運営している。

コロナ下では、「電気基礎実験」はいち早く対面での実験を再開したが、「実験学」の授業はオンデマンド式で、電気基礎実験の実験計画書を適宜 Moodle にアップロードさせる形で実施していた。

実験学の対面授業の再開に合わせて、まず教室を新たに整備した IoT ルームとし、学生一人一人が授業中に PC で実験計画書を作成し、授業時間内に Moodle にアップロードする形式に変更した。他の班のメンバーにも気軽に質問ができるよう座席は班を問わず自由席とし、学生同士の相談を（換気対策のうえで！）奨励した。また、授業担当教員と SA は、IoT ルーム内を巡回し、学生からの質問に適宜答えられるような体制を構築した。

実験学の授業で作成する実験計画書は、レポートの前半部分「表紙」「実験の目的」「実験方法」予習のための「事前準備課題」で構成する。「事前準備課題」では、ちょうど図 1-2 と同じ素子ボックスの写真を学生に提示したうえで下図 2-1 のような課題を出し、実験でどの素子を選べばよいかを考えさせられるようにしている。

【事前準備課題 直流回路網の実験】

素子ボックスの写真を参考に、実験で使用する 1/4W 抵抗を 200~800Ω のなかから選べ。抵抗で消費される電力が 1/4W になる電圧 V_m [V] をあらかじめ計算せよ。

図 2-1 実験学で実施する事前準備課題の例

IoT ルームを利用した授業形式（計画書の作成）はすぐに効果が表れ、授業中は学生同士が相談する姿を頻繁に見かけるようになった（図 2-2）。「電気基礎実験」の際に、回路作成や素子の選定に手間取る時間も減少した。



図 2 2 - 1 「実験学」授業風景：IoT ルームの PC で学生が実験の予習レポート（計画書）を作成している。



図 2 2 - 2 「実験学」授業風景：教員や SA は教室を巡回して学生の質問に適宜答えている。学生は教室内を自由に動き回って相談してよい仕組みである。

デアが出てきている。現在検討中のものでは以下のようなものがある。

- ・レポートの返却を一人ひとり行う。：現在 Moodle のフィードバック機能を利用して行っているレポートフィードバックを実験時に対面で行った方が、学生のレポートの質の改善につながるのではないかと。

- ・実験試問を行う。：実験内容や得られた実験結果について、一人ひとり言葉で説明してもらい、理解度のチェックをするのがよいのではないかと。

今後も議論を重ねながら授業の改善を継続していきたい。

6. おわりに

本稿では、電気電子工学科における「実験学」「電気基礎実験」の運営と、その改善の取り組みについて紹介した。実験を行う中での課題や今後の改善については、教員・技術員・学生スタッフから活発にアイ