

## 磁石落下式誘導起電力実験キットの開発と生徒実験

### Development of Induced Electromotive Force Measuring Device by the Magnet-fall and Student Experiments with This

陳麗<sup>1)</sup>・濱崎 貢<sup>1)</sup>・山口 光臣<sup>2)</sup>・小原 益己<sup>3)</sup>・三井 好古<sup>4)</sup>・小山 佳一<sup>4)</sup>\*  
Li CHEN<sup>1)</sup>, Mitsugi HAMASAKI<sup>1)</sup>, Mitsuomi YAMAGUCHI<sup>2)</sup>, Masumi OBARA<sup>3)</sup>, Yoshifuru MITSUI<sup>4)</sup>,  
Keiichi KOYAMA<sup>4)</sup>\*

<sup>1)</sup> 鹿児島大学共通教育センター

<sup>1)</sup> Education Center, Kagoshima University

<sup>2)</sup> かがしま企業家交流協会

<sup>2)</sup> Kagoshima Enterprise Exchange Society

<sup>3)</sup> 原田学園鹿児島情報高等学校

<sup>3)</sup> Kagoshima JOHO High School, Harada Academy

<sup>4)</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科

<sup>4)</sup> Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

\* koyama@sci.kagoshima-u.ac.jp

**Abstract:** The basic learning of electromagnetic induction is to understand the relationship between the magnitude and direction of the induced electromotive force by changing the magnetic flux, but this cannot be visually grasped as a phenomenon. This is the reason why it is difficult for students to understand the concept of electromagnetic induction. It is required to develop an experimental kit that allows students to understand visually and quantitatively through experiments. In this work, we developed an “induced electromotive force experiment kit” for high school students and taught high school students about electromagnetic induction experiments using this kit. In this report, we outline the experiment kit and our project class of high school/university connection.

**Keywords:** Electromagnetic induction, Magnetic flux, Lenz’s Law, Number of coil-turns

## 1. はじめに

2022年度から実施される次期学習指導要領は、「自然の事物・現象を、質的・量的な関係や時間的・空間的な関係を科学的な視点で捉え、(中略)探究する方法を用いて考えること」と主張している。これを踏まえて改訂高等学校学習指導要領理科解説(理科編)[1]には、電磁誘導に関する実験として、例えばコイルを貫く磁束を変化させたときに発生する「誘導起電力の向きと大きさ」を予想させた上で、「オシロスコープで調べる実験を行い」、磁束の変化と誘導起電力の向きや大きさとの関係を見出して理解させる、と明記されている。このように、高等学校理科(物理)教育において、電磁誘導、誘導起電力の分野は、生徒が実験を行い理解することが前提とされていることから、大学入試センター試験を初めとする各大学入学試験でも出題頻度が高い内容である。さらに、2021年度からセンター試験に変わる大学入試共通テスト(新テスト)でも、改訂学習指導要領に沿って電磁誘導、誘導起電力の実験を取り入れた出題が予想されている。

鹿児島大学理学部は、平成28年度から「かがしま企業家交流協会」との共催でサイエンス・パートナーシップ・プログラム(SPP)を実施し、高等学校の生徒を対象に新しい理科教育に対応する実践的な取り組みを行っている。筆者らはSPPの一環として、生徒がコイルに生じる起電力の大きさを磁石がコイルを貫通する速さとコイルの巻き数との関係として調べ、誘導起電力の現象をオシロスコープを用いて視覚的かつ定量的に理解できる実験キットを開発した。

本稿は、我々が開発した実験キットの概要を述べるとともに、この実験キットを令和元年度の SPP に取り入れた高等学校の生徒の実験についてまとめたものである。

## 2. キットの概要

電磁誘導の実験キットはすでに市販されている[2, 3]。しかし多くの実験キットは、コイル、磁石、パイプなどが一体的に構成されず電磁誘導と誘導起電力を、LED の発光を用いた確認するものに過ぎず、教師による定性的な演示実験に留まっている。高等学校の物理教材として、電磁誘導の現象を生徒が自らオシロスコープを用いて視覚的かつ定量的に測定する安価な市販の実験キットは見当たらない。

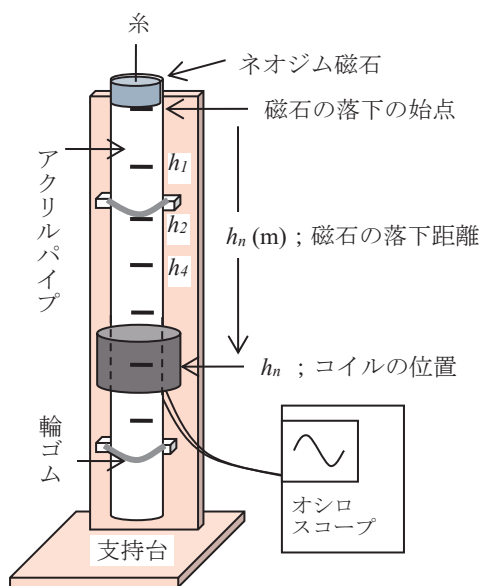


図1 実験キットの概念図



図2 試作した実験キット  
コイルにオシロスコープを接続

い。

キットの主な構成は、透明アクリルパイプ（スケール目盛り付）、コイル（50 回巻、10 回巻ごとのタップ電極付）、ネオジム磁石、デジタルオシロスコープ（トリガー付）、アクリルパイプ固定台、支持台、輪ゴム等である。図 1 は実験キットの概念図であり、図 2 は試作した実験キットである。

図 3 に本キットでネオジム磁石を落下させたときのオシロスコープで検出した波形を示す。コイル

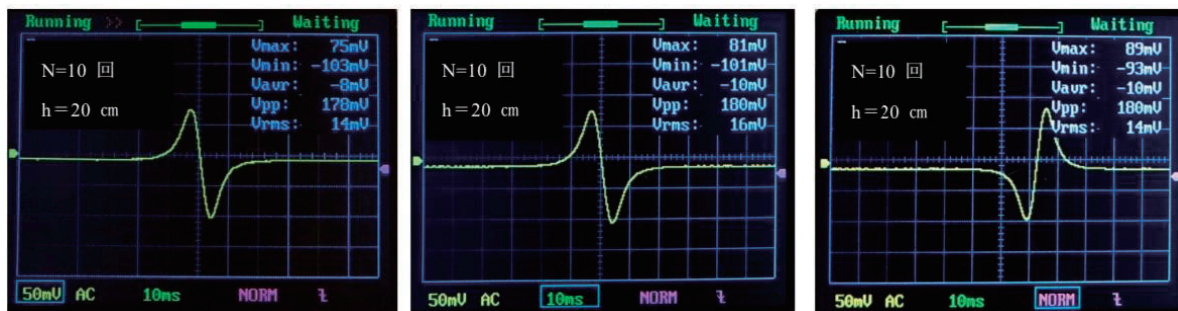


図3 オシロスコープによる起電力の波形

のターン数  $N$  は 10 回巻き、高さ  $h = 20 \text{ cm}$  からネオジウム磁石を落下させた。また、右の波形は、磁石の極性を変えたものである。近年のデジタルオシロスコープは数千円と安価にも関わらず、電圧値や波形のピーク間電圧も表示するので、生徒の目盛りを読むことによる時間の削減と読み間違いを防げる。

## 2. 1. キットの教材としての成果

本実験キットを用いることによって生徒は、次の項目について理解することができる。

- (a) 電磁誘導はコイルを貫く磁束が時間的に変化することによって起こる。
- (b) コイルを貫く外部からの磁束が時間的に変化するとき、コイルにはその変化を妨げる向きに誘導起電力が生じる。
- (c) 誘導起電力の大きさはコイルの巻き数にも依存する。

(a), (b), (c) を理解するために、磁束の発生源としてネオジウム磁石を用いた。また、コイルのタップを選択してコイルの巻き数を容易に変えられるようにした。さらに、コイルの中心を通過するネオジウム磁石の速さを段階的に変化できるように、任意の高さにコイルを設定できるようにした。

誘導起電力の大きさと向きを視覚的かつ定量的に理解するために、小型デジタルオシロスコープを組み込んだ。

## 3. 生徒実験

ここでは、当日の生徒実験の指導書をもとに、我々が開発した実験キットの利用の仕方と実験結果を紹介する。

### 3. 1. 実験の目的

コイルに生じる起電力と磁石の速さやコイルの巻き数との関係を実験キットで調べ、誘導起電力の現象を理解する。

### 3. 2. 実験の原理 [4, 5]

図4(a) のようにN極をコイルに近づけると、コイルを左向きに貫く磁束が増加する。このときコイルには、左向きの磁束の増加を妨げるために、誘導電流によって右向きの磁束が生じる。また、図4(b) のようにN極をコイルから遠ざけると、コイルを左向きに貫く磁束が減少する。このときコイルには、左向きの磁束の減少を妨げるために、誘導電流によって左向きの磁束が生じる。このように、コイルを貫く外部からの磁束が変化するとき、コイルにはその変化を妨げる向きに誘導起電力が生じる。

コイルを貫く磁束を  $\Phi$  として表せば、磁石の運動によって  $dt$  間に磁束が  $d\Phi$  変化した場合コイルに生じる誘導起電力は、

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

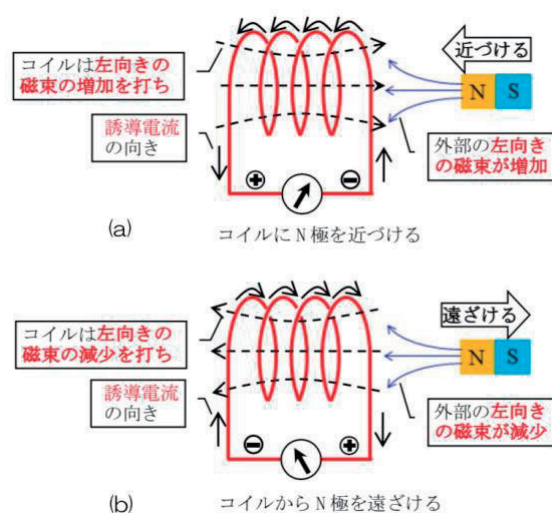


図4 電磁誘導の原理

で与えられる。ただし、高校物理の教科書では微分形ではなく、 $d$ の代わりにデルタ  $\Delta$  を用いた式で表してある。(1) 式の負の符号は、コイルの誘導起電力はコイルを貫く磁束の変化を妨げる向きに生じる(レンツの法則)ことを示している。

$N$  回巻きのコイルについて (1) 式は次のように表される。

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

ここで、図1のような実験キットで、落下させた永久磁石が固定したコイルを通過したときに生じる誘導起電力  $V$  を考える。開発した実験キットの透明パイプにはコイル位置からの距離を示す目盛りをつけており、一定の距離(高さ)  $h_n$  から磁石をほぼ初速度ゼロで落下させることができる。磁石とパイプとの摩擦力を無視できるとすれば、コイル位置での磁石の速さ  $v_n$  は力学的エネルギー保存則より導くことができ、コイル通過時の  $v_n$  は、

$$v_n = \sqrt{2gh_n} \quad (3)$$

で求まる。磁石の高さに比べコイルの幅が十分小さいとき、コイルの磁束の変化  $d\Phi/dx$  の最大値は磁極がコイル通過時の速さ  $v_n$  で決まる。つまり同じ磁石を用いれば、誘導起電力  $V$  はコイルの巻き数  $N$  と磁石の落下位置  $h_n$  の平方根に比例する。

### 3. 3. 実験の手順

(1) 図1のように、コイルを取り付けたアクリルパイプを支持台に固定する。

※ 磁石は糸で吊るして、パイプの内壁に接触しないように落下させる。

(2) コイルを  $h_1$  の位置に固定し、コイルの10回巻きのタップにオシロスコープを接続する。

(3) アクリルパイプの上端(落下の始点)から磁石を落下させ、オシロスコープにトリガーが掛かることを確認する。

※ 磁石は糸で吊るして、パイプの内壁に接触しないように落下させる。

※ この操作を何回か繰り返し、要領を身に付けると良い。

(4) 磁石がコイルを通過した瞬間、オシロスコープのディスプレイに電圧の波形が現れることを確認する。

(5) オシロスコープに表示される電圧の最大値 ( $V_+$ ) と最小値 ( $V_-$ ) を読み取り、データ表に記録する。コイルを  $h_1$  の位置に固定したまま、コイルの20回、30回、40回、50回のタップにオシロスコープを接続し、( $V_+$ ) と ( $V_-$ ) を読み取り、データ表(表1)に記録する。

(6) コイルを  $h_n$  ( $n=2, 3, \dots$ ) の位置に移動させ、(4)と(5)の測定を行いデータ表に記録する。

### 4. 実験のデータと解析

表1は生徒に測定値を記録させる実験ワークシートの例で、実際にコイルの巻き数(タップ)替えて測定した値を示している。表1aはコイルの巻き数10回のデータであり、表1bは巻き数20回、表1cは巻き数30回、表1dは巻き数40回、表1eは巻き数50回のデータである。ここで、表の( $V_+$ )はオシロスコープ波形(誘導起電力)の最大値(プラスピーク値)で、( $V_-$ )は最小値(マイナスピーク値)である。

生徒は、磁石がコイル通過時の落下の速さ  $v_n$  を(3)式を用いて落下距離  $h_n$  から計算し、表2に記録する。さらに生徒は、表1からコイルの巻き数ごとに起電力の最大値  $V_+$  と最小値  $V_-$  のそれぞれの平均値と磁石の落下距離(速さ)を表2に整理する。データ表2からコイルの巻き数ごとに、磁石の速さと起

電力の大きさのグラフを作成する。磁石のコイル通過時速さ $v_n$ と誘導起電力 $V$ の関係グラフの例を図5に示す。

表1 コイルの巻き数ごとに、磁石の落下距離と起電力の大きさ記録

表 1 a	コイルの巻数 (10 回) (単位 : mV)											
	1 回		2 回		3 回		4 回		5 回		平 均	
落下距離(cm)	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	48	77	48	77	46	75	46	77	48	79	47	77
20	75	103	75	103	75	103	75	105	75	103	75	103
30	93	123	95	123	95	123	93	123	95	123	94	123
40	111	141	111	139	113	141	111	139	111	140	111	140

表 1 b	コイルの巻数 (20 回) (単位 : mV)											
	1 回		2 回		3 回		4 回		5 回		平 均	
落下距離(cm)	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	111	152	111	150	107	150	113	152	109	150	110	151
20	168	206	166	202	168	204	166	204	168	206	167	204
30	210	247	208	247	210	245	210	247	210	247	210	247
40	245	283	245	283	245	279	249	283	245	281	246	282

表 1 c	コイルの巻数 (30 回) (単位 : mV)											
	1 回		2 回		3 回		4 回		5 回		平 均	
落下距離(cm)	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	170	223	170	223	168	219	168	221	168	221	169	221
20	253	300	253	298	251	298	249	298	251	300	251	299
30	316	361	314	361	318	365	316	363	314	361	316	362
40	369	411	371	413	367	409	371	413	369	413	369	412

表 1 d	コイルの巻数 (40 回) (単位 : mV)											
	1 回		2 回		3 回		4 回		5 回		平 均	
落下距離(cm)	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	225	290	227	292	227	288	225	288	227	290	226	290
20	332	393	330	389	332	391	334	395	334	391	332	392
30	419	474	423	480	421	476	419	476	419	476	420	476
40	488	543	490	543	488	541	486	543	486	547	488	543

表 1 e	コイルの巻数 (50回) (単位: mV)											
	1 回		2 回		3 回		4 回		5 回		平均	
落下距離(cm)	V+	V-	V+	V-	V+	V-	V+	V-	V+	V-	V+	V-
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	279	354	281	354	279	352	283	356	279	354	280	354
20	413	484	411	480	411	482	411	478	411	480	411	481
30	515	582	515	582	517	584	517	582	515	582	516	582
40	602	669	600	665	604	665	606	673	600	665	602	667

表 2 磁石の速さ  $v_n$  と起電力  $V$  の平均値

磁石の運動	速さ (m/s)	起電力の平均値 (単位: mV)									
		巻き数 10 回		巻き数 20 回		巻き数 30 回		巻き数 40 回		巻き数 50 回	
落下距離 (m)	$v_n = \sqrt{2gh_n}$	$N_1V_+$	$N_1V_-$	$N_2V_+$	$N_2V_-$	$N_3V_+$	$N_3V_-$	$N_4V_+$	$N_4V_-$	$N_5V_+$	$N_5V_-$
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	1.40	47	77	110	151	169	221	226	290	280	354
0.20	1.98	75	103	167	204	251	299	332	392	411	481
0.30	2.42	94	123	210	247	316	362	420	476	516	582
0.40	2.80	111	140	246	282	369	412	488	543	602	667

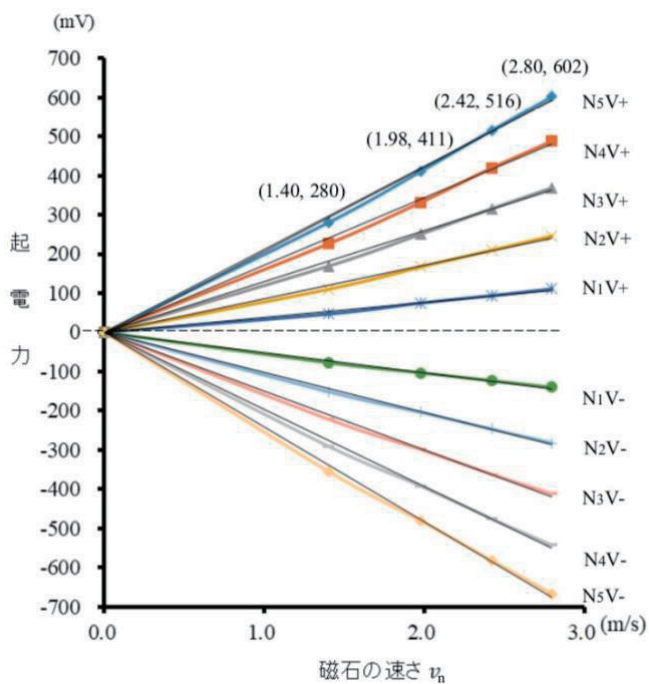


図 5 巻き数  $N$  を変えたときの磁石のコイル通過時速さ  $v_n$  と誘導起電力  $V$  の関係

図5からわかるように、コイルの巻き数  $N$  が一定の場合、誘導起電力  $V$  の最大値は磁石のコイル通過時の速さに  $v_n$  に比例する。図中の黒直線は測定値の1次関数による最小二乗法フィッティングの結果である。 $N$  が多いとき、 $v_n$  の小さいときに測定値とフィッティング結果に差が生じており、十分な高さからの磁石の落下が必要と示唆されるが、生徒の誘導起電力の理解には十分な結果と考える。

表3は、表1から磁石の落下距離ごとに誘導起電力の最大値  $V_+$  と最小値  $V_-$  のそれぞれの平均値とコイルの巻き数  $N$  を整理したものである。表3から誘導起電力  $V$  とコイルの巻き数  $N$  の関係をまとめると、図6に示すグラフになる。誘導起電力  $V$  はコイルの巻き数  $N$  に対して直線的に変化する。図中の黒直線は測定値の1次関数による最小二乗法フィッティングの結果である。図6から生徒は、誘導起電力がコイルの巻き数  $N$  に比例することを定量的、視覚的に理解をできる。

表3 コイルの巻き数  $N$  と起電力  $V$  の平均値

磁石の運動	起電力の平均値 (単位: mV)							
	$h_1 = 10(\text{cm})$		$h_2 = 20(\text{cm})$		$h_3 = 30(\text{cm})$		$h_4 = 40(\text{cm})$	
巻き数 $N$ (回)	$h_1V_+$	$h_1V_-$	$h_2V_+$	$h_2V_-$	$h_3V_+$	$h_3V_-$	$h_4V_+$	$h_4V_-$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	47	77	75	103	94	123	111	140
20	110	151	167	204	210	247	246	282
30	169	221	251	299	316	362	369	412
40	226	290	332	392	420	476	488	543
50	280	354	411	481	516	582	602	667

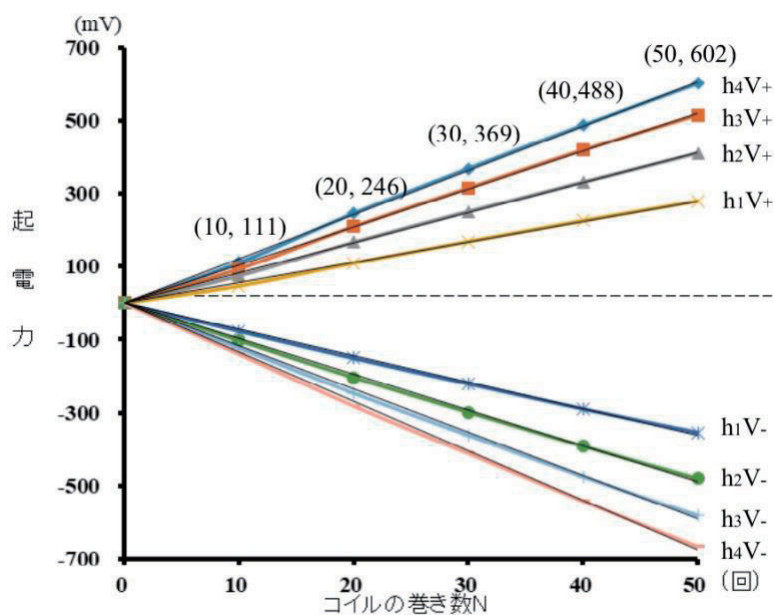


図6 高さ  $h$  を変えたときの誘導起電力  $V$  と巻き数  $N$  との関係

## 6. まとめ

今回我々は、図1で示した誘導起電力実験キットを開発し、磁束を発する磁石の落下、磁石のコイル通過、オシロスコープを通した波形など生徒に視覚的に誘導起電力を理解できることを示した[6]。さらに授業でオシロスコープの数値を読み取り、表を作成しグラフ化することによって、誘導起電力の大きさは磁石の速さとコイルの巻き数と比例することを定量的にも理解を深められる。

2019年8月に鹿児島大学理学部で開催されたSPPでの本キットを使った実験の様子を図7に示す。学校の異なる高校生4名が1つのチームとなって、9チームで実験を行なった。また、多くの高校理科教員の参加もいただいた。実験後、生徒らは議論やインターネットを使った資料収集し、最後に研究発表を行なった。



図7 生徒の実験の様子

SPPに参加した生徒や教員は今回の実験キットを利用した研究活動に関して、次のような感想や意見を述べた[7]。

- ① 大学受験の物理の勉強にとっても役立つと思います。
- ② この実験の道具は手作りなので、どのようにしたらこのように装置を安く作って実験することができるかの良い勉強の機会だと思います。
- ③ 今後は、「考えること」を大切に、様々なことに興味・関心を持ち、自分の意見を持つことを進んでやっていきたいです。
- ④ これまでの自分にない視野を広げることができました。
- ⑤ 今回の講座ではたくさんを知ると同時に、チームワークや協調性の大切さを感じた。この講座で学んだことを今後の学校生活に生かしていきたいと思います。

今回開発した誘導起電力実験キットが多くの学校で利用され、理科教育に役立つことを願う。

## 謝辞

SPPは、鹿児島大学理学部とかがしま企業家交流協会との共催で実施したものである。企業家交流協会には実験に関わる全ての経費を負担していただいた。さらに、講座の広報や実施要綱の作成など、当協会の事務局に全面的に支援していただいた。講座の終了に当たり、厚くお礼を申し述べます。なお、参加した生徒と高等学校の引率の先生方、TAとして実験の補助指導をしていただいた鹿児島大学大学院理工学研究科の学生にも謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 文部科学省「高等学校学習指導要領解説(理数編)」(平成30年7月)。
- [2] ケニス株式会社：<https://www.kenis.co.jp/products/catalogue/>
- [3] ヤガミ株式会社：<http://ec.yagami-inc.co.jp/shop/default.aspx>
- [4] 啓林館「物理基礎」高等学校教科書(平成23年)
- [5] 原康夫「物理学基礎」第五版 P267-273
- [6] 小山佳一、濱崎貢、陳麗、三井好古、小原益己、山口光臣：物理学実験キット、特願2020-007200
- [7] かがしま企業家交流協会「産学連携 高大接続講座」令和元年度



## Appendix

### 本キットの応用

このキットは生徒に電磁誘導の事象を、オシロスコープの波形をとおして理解させることを主な目的として開発したものであるが、次のような力学的事象を確認することも可能である。

#### (1) ばね振り子による振動

図 A1 は、コイルばねにネオジム磁石によるばね振り子装置である。図 A2 は、ばね振り子装置による起電力の様子をオシロスコープで観測したものである。

磁石の振動が周期的であることと、定性的ではあるが振動が減衰していることが確認できる。ネオジム磁石の質量が与えられれば、振動の周期を測定してばねのバネ定数を求めることができる。

ばねに上下する外力の加振機構を付加すれば、振幅が一樣な単振動を観測することができる。また、加振機構の繰り返しの振動数をばねの固有振動数に一致させれば、共振現象を観測することができる。さらに、ばねにダンパを付加しその減衰比を変化させることによって、異なる減衰振動が観測できる。

#### (2) 単振り子による振動

図 A3 は、アクリルパイプを取り除き、単振り子とコイルを組み合わせた単振り子装置である。ネオジム磁石の振動の様子は、オシロスコープによって、図 A2 と同様の起電力の波形を観測できる。ここでも、振り子の長さが与えられれば、振動の周期を測定して、重力加速度を求めることができる。

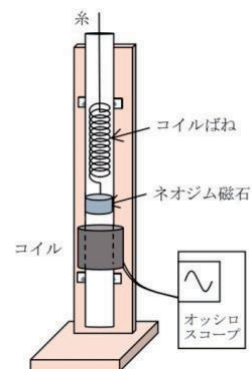


図 A1 ばね振り子減衰振動装置

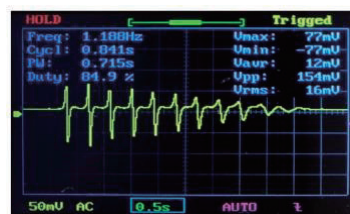


図 A2 磁石の振動による起電力は系の減衰振動

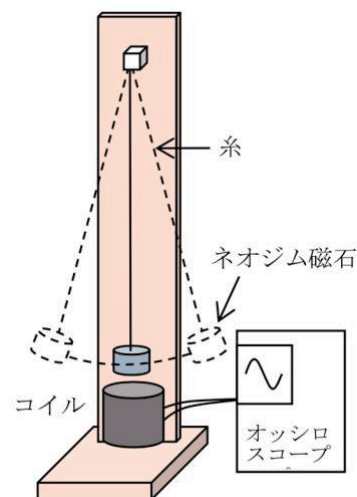


図 A3 単振り子装置