

## コイルにおける誘導起電力測定器の試作 -磁石の位置の相関測定-

櫻井 勇良\*

Trial manufacture of induced electromotive force measuring instrument in a coil :  
Correlation measurement with magnet position

Yuryo SAKURAI

### Abstract:

In this study, a trial manufacture vessel that measures induced electromotive force in the coil is described. The magnet passes through the hollow part of the coil. The following are automated: Transfer of the magnet and measurement of the voltage. The relationship between position of the magnet as it passes through the coil and the position and induced electromotive force is examined. Existing sewing machine is decomposed and is remodeled. Experiment and measurement were carried out using various coils with good results.

**KEY WORDS:** Magnet, Coil, Induced electromotive force, Trial manufacture vessel

### 要旨:

磁石とコイルを用いて電磁誘導現象を再現する場合、一般的に磁石は、自然落下させるあるいは手で動かすなどの手法が取られる。この手法は、単なる事象の再現の場合は良いが、系統的な実験を行なう場合には、何らかの工夫が必要になる。そこで、本研究では、ミシンを改造し、磁石を上下運動させる装置を試作した。試作器を用いて磁軸の運動方向とコイルの中心軸の位置関係を変えながら層数や巻数の異なるコイルの誘導起電力特性を調べた。その結果、誘導起電力がコイルの層数や巻数に対して比例的に発生するすなわち理論値と類似する領域とそうでない領域があることおよびコイルにおける誘導起電力と磁石の位置の相関関係を確かめることができるようになった。

**キーワード:** 磁石、コイル、誘導起電力、電磁誘導現象

### 1. はじめに

磁石とコイルを使った電磁誘導現象は、演示実験として良く用いられる。磁石は、自然落下あるいは手で動かされるのが一般的である。それによってコイルに誘導される電流は、検流計で検知される。誘導電流の方向性は、検流計の指針の振れ方から判断できる<sup>1)</sup>。誘導起電力の発生の再現あるいはその確認を行うだけならこの方法で充分であるが、例えば、

磁石とコイルの位置関係によって誘導起電力の生成状況の関係を知りたい場合は、他の方法で行わなければならない。筆者は、以前、この関係を調べるために誘導起電力の波形を記録する装置を試作したことがある<sup>2)</sup>。モータの駆動により磁石を移動させ、その移動距離を電気信号で記録することで磁石の位置と誘導起電力波形の関係を知らることができた。しかし、この装置は、マブチモータの1方向の回転力を用いていたので、磁石を往復運動させることができない。また、磁石に糸を取り付け、その糸をリール

---

\*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科  
准教授

で巻き取ることで磁石を移動させたが、リールの大きさの関係で巻き取れる長さが短いために、磁石の移動速度の可変幅が狭くなる。さらに、巻き取った糸を手作業で元の位置に戻すなどの操作が面倒である、などの問題があった。そこで、これまでの経過を踏まえ、磁石の運動波形と誘導起電力波形が同時に把握できる装置を試作することを考えた。具現化すれば、自然落下させるあるいは手で動かす場合に比べて、1) 測定条件となる磁石の運動が安定する、2) 系統的、定性的および定量的な実験が可能になる、3) 新たな知見を得る可能性がある、などの利点が見られるはずである。

本研究の目的は、磁石の運動によるコイルにおける誘導起電力の生成状況を把握し、定性的な理解を深めることができるような実験器を得ることである。そのために、試作した実験器の特性を調べ、その有用性を確かめた。その結果、概ね良好な結果が得られるような実験器を得ることができた。

## 2. 実験器の試作

### 2.1 構想について

以前、筆者は、マブチモータを用いて磁石を往復運動させるものを試作したことがある。しかし、往復運動の直進性や速度などの安定性において問題があった。この経験を踏まえ、往復運動機構を有する機器を改造することを考え、その具現化を図ることにした。具体的には、廃品のミシンを改造することを考えた。

往復運動機構を取り入れるのは、誘導起電力の原理（フレミングの右手の法則）における磁界の方向および導体の運動方向の違いによる結果を得るためである。フレミングの右手の法則を検証するだけならば 1 方向の運動で充分であり、往復運動機構の導入は不要である。

### 2.2 概要

試作した実験器の全体像を図 1 (a) に示す<sup>2)</sup>。構造を見ながら分解し、必要な部分（上下運動の部分）以外のものをできる限り取り除いた。試料には、各種のコイルを用いる。ホルダーは、後述する電圧センサやリード線を挟むのに用いる。以下では、拡大図 ((b) ~ (e)) を用いて述べる。

まず、カムの部分に取り付けてあったミシン針を支えるための鉄製の支柱を取り除き、その代わりに磁石を上下運動させるためのアルミ管（直径 $\Phi=6\text{mm}$ 、長さ $=360\text{mm}$ ）を取り付ける（図 1 (b) 参照）。

そして、この管の上端に磁石を取り付ける。アルミ管に直接磁石を取り付けたのでは磁石の着脱作業が困難になる。そこで、一旦、磁石をブラインドナット（アルミ製、M6）に接着剤（アロンアルファ）で固定し、そのブラインドナットをアルミ管の先端に取り付けることを考えた。ブラインドナットを取り付けるためにアルミ管の先端は、ダイスによって雄ネジが約 1 cm 切られている（図 1 (c) 参照、この図は取り付け後の写真である）。これにより磁石の着脱が容易になった。

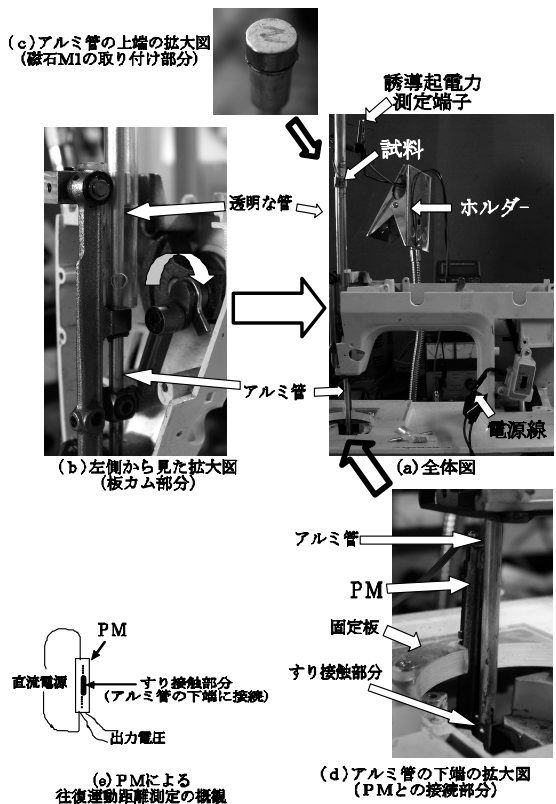


図 1 試作器の外観<sup>2)</sup>

次に、磁石の往復運動を電気信号で記録することについて述べる。以前、X-Yステージの動きを電気信号に変える時、小型の摺動抵抗器（100mm、10 k $\Omega$ 、3 端子付、以下では PM と略す）を電圧加減用として用いたことがあったので、同じ方法を用いることにした。つまり、電気信号に変換する運動物体すなわちアルミ管の下端と PM のすり接触部分に接続

する方法である。すり接触の変化に伴う電圧の変化は、すり接触端子以外の2つの端子を電源端子、電源端子の1つとすり接触端子を検出端子として用いることにより測定できる。PMの出力電圧 $V_1$ は、予めPMの電源端子に印加しておいた電圧の分圧値が検出される。PMのすり接触部分の移動距離と抵抗変化は、直線関係なので、測定した $V_1$ から運動距離を求めることができる。なお、アルミ管が上昇したときの検出電圧が大きくなるようにした。

以上のことを実現するために、次のような加工を行なった。まず、PMのすり接触部分に付いている幅約1mmのT形の金属片をアルミ管の下部に直接取り付けを考える、アルミ管の下端の中央付近に幅約1mmの溝を長さ方向に切り、そこにすり接触部分を差し込み、アロンアルファで接合した。なお、PMの本体は、一旦、加工した厚さ5mmの透明な板にアロンアルファで固定し、その板をミシンの本体にネジで固定した。

次に、運動する磁石がコイルに接触しないようにするために、13mm $\Phi$ の透明な管（内径=11mm、長さ=260mm）をカバーとして取り付け、その中で磁石が動くようにした（図1（b）参照）。透明な管を用いたのは、磁石とコイルの位置を調整する時に磁石が見えるようにするためである。

最後に、コイルの装着について述べる。13mm $\Phi$ の透明な管（内径=11mm、長さ=260mm）を用いて作ったコイルを装着する方法は2つある。1つは、上記のカバーとして用いた管を取り外し、そこへコイルを作るときに使用した管を入れる方法である。もう1つは、コイルを作った時に用いた管からコイルを取り外し、そのコイルを上記のカバーとして用いた管に差し込む方法である。

### 3. 実験方法

測定は、イージーセンス（中村理科（現ナリカ）、E31-6990-70）および専用の電圧センサ（中村理科（現ナリカ）、E31-6990-08（ $-20\sim 20$ V、分解能10mV）、E31-6990-10（ $-1\sim 1$ V、分解能1mV））を用いて行なう。供給電圧は、電圧調整器（100V、10A）を用いて調整する。コイルと磁石の位置関係および磁石の位置と誘導起電力波形の関係を知らるために、PMの出力電圧（ $V_1$ ）と誘導起電力（ $V_0$ ）の時間変化を測定する。測定値は、全てパーソナルコンピュータで収録する。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 1層1巻きコイルにおける誘導起電力特性（磁石運動速度依存性）

ここでは、試作器の特性を調べるために最も簡単な条件下すなわち1層1回巻きのコイルにおける誘導起電力特性を測定する。図1（c）のように、ブラインドナットに取り付けた磁石M1（ネオジウム、 $\Phi=10$ mm、高さ=5mm、磁束密度 $B=320$ mT）をアルミ管の先端に固定する。1mm $\Phi$ のエナメル線を用いたコイル（層数 $M=1$ 、巻き $N=1$ を用意し、磁石の上下運動距離（約35mm）の中間にコイル長の中心をそろえて取り付ける。磁石の運動速度は、電源電圧は100Vまで変化させて調整する。専用のプログラムを起動させ、測定開始のタイミングを見て電源をONにする。そして、測定が終了したら電源をOFFにする。サンプル間隔時間（100 $\mu$ s $\sim$ ）やサンプル数（1000 $\sim$ ）は任意とする。

図2に測定例を示す（サンプル間隔時間=100 $\mu$ s、サンプル数=2000）。 $V_1$ は、磁石の上下運動を電気信号に変えたPMにおける電圧降下の値である。磁石が上昇運動すれば電圧値が増加し、磁石が下降運動すれば電圧値は減少するようした。電圧の最高値（最低値）から次の最高値（最低値）までが往復運動距離（約70mm）になる。 $V_0$ は磁石の通過に伴ってコイルに誘導される起電力である。コイル長の中心と磁石の往復運動の中心をそろえたため、 $V_0$ の生成が磁石の上昇および下降の運動距離（各35mm）の中間位置で零電位になり、その前後で対称的な波形になっているのがわかる。

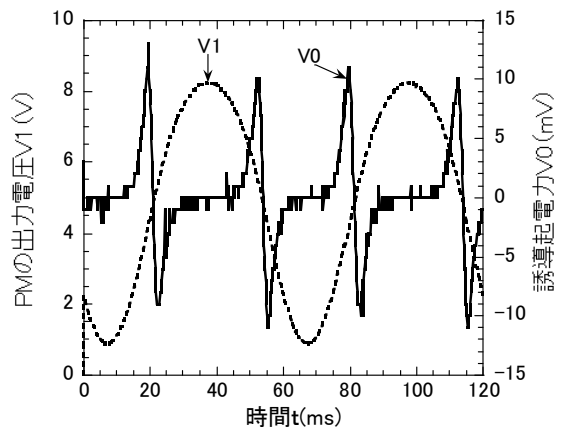


図2 1層1回巻きコイルにおける測定例

$V_1$ の波形は、正負の対称性から磁石の上下運動の等速性が判断できる。この図を見るとピーク位置が若干異のわかる。そこで、 $V_1$ と $V_0$ について繰り返し測定を行い、それらのばらつきの程度を調べた結果、時間のばらつきは数ms程度、電圧のばらつきは数mV程度であるのがわかった。また、1往復当りの距離の誤差を調べた結果、約±2mm程度であることがわかった。

次に、磁石の運動速度 $v$ と $V_0$ の関係について述べる。ミシンのカムが動き始める電圧約50Vから100Vまで任意に段階的に変化させて $v$ を調整する。

図3に $v$ に対する $V_0$ の測定値(●)および2種類の計算値(計算値1(破線)、計算値2(実線))を示す。計算値1および計算値2は以下のようにして求めた。

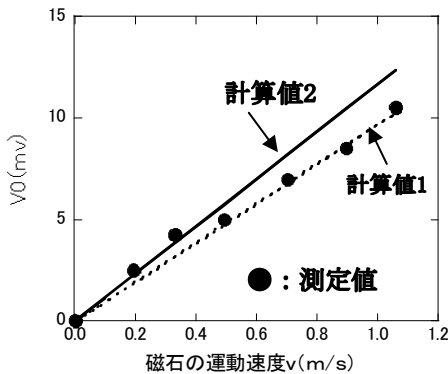


図3 N=1のコイルにおける誘導起電力の磁石の運動速度依存性

まず、計算値1の算出について述べる。ここでは、固定したコイルを単なる導体とみなし、その近くで磁束の時間変化( $\Delta \Phi / \Delta t$ )が発生した場合を想定する。磁束の時間変化は、磁石がコイル付近を通過したことによって起こる。したがって、導体に誘導される起電力 $e$ は、(1)式によって求まる。(1)式の負の符号は、誘導起電力の向きが磁束の変化を常に妨げようとする向きに発生する意味である。

$$e = -\Delta \Phi / \Delta t \quad (v) \quad (1)$$

スイッチを用いて磁束を供給した場合は、スイッチをON(OFF)→OFF(ON)に要した時間を $\Delta t$ およびそれぞれの時の磁束の差を $\Delta \Phi$ と定めることができる。つまり、磁束を印加した時および磁束の印加を止めた時を明確に得ることができ

るので $\Delta t$ および $\Delta \Phi$ は容易に求められる。このように、スイッチを用いた場合は、差を求める時の基準および求める範囲がはっきりしている。しかし、今回のように磁石を動かして磁束を与える場合は、差を求める時の基準および求める範囲が明確にはないので工夫が必要である。本稿では以下のようにして定めた。

まず、 $\Delta \Phi$ について述べる。磁石が近づくにつれて、磁束が大きくなり、最接近で最大となる。それ以降は、磁石が遠ざかるにしたがって磁束は弱くなる。したがって、 $\Delta \Phi$ は、その差を求めればよい。 $\Delta \Phi$ の最低値は測定感度に依存するので、ここでは便宜的に、零とした。つまり、磁石がコイルに最も接近した時の、コイルが存在する場所における磁束密度 $B$ (測定値約220mT)にコイル( $\Phi$ :約13mm)の開口面積 $S$ ( $m^2$ )を乗じて $\Delta \Phi$ を求めた。

次に、 $\Delta t$ について述べる。誘導起電力は、磁極に依存し、S極が通過した場合とN極が通過した場合とでは、起電力の極性が逆になる。つまり、磁石の高さの半分の距離に、磁石の運動速度( $m/s$ )を乗じれば $\Delta t$ が求まる。

以上のようにして求めた $\Delta \Phi$ および $\Delta t$ を用いて計算値1を求めた(図3の波線)。

次に、計算値2について述べる。これは、磁石を固定し、その付近を導体(コイル)が運動した場合を想定している。一般に、磁界中で導体が運動した場合の誘導起電力 $e$ は、数式(2)で求められる。

$$e = v_0 \cdot B_0 \cdot L \cdot \sin \theta \quad (v) \quad (2)$$

$v_0$ は導体の運動速度( $m/s$ )であるが、ここでは磁石の運動速度を用いる。 $L$ はコイルの開口面( $\Phi=13mm$ )の円周の長さ( $m$ )である。 $\theta$ は導体と磁界とのなす角度であり、ここでは使用状況から判断して90度( $\sin \theta=1$ )とする。 $B_0$ (T)は(1)式の場合と同じ値(約220mT)を用いる。

この2種類の計算値と測定値(片側の磁極による $V_0$ )を比べると、図3に示すように直線関係が類似するのがわかる。

なお、2種類の計算値を求めたのは、確認のためであり、両者の差は、計算過程で求めた $\Delta \Phi$ や $\Delta t$ 等に起因すると考えられる。

#### 4.2 1層N巻きコイルにおける誘導起電力特性

13mm $\Phi$ の管に0.5mm $\Phi$ のエナメル線を巻きつけ、テープで形が崩れないようにしてからコイルのみを取り外す。それを、予め装着してある13mm $\Phi$ の透明な管に装着し、コイル長の中心と磁石の往

復運動の中心をそろえる。コイル長は、巻数 $N$ を1から100まで任意に変化させて調整した。4.1と同じネオジウム磁石（ $\Phi=10\text{mm}$ 、高さ $=5\text{mm}$ 、 $B=320\text{mT}$ ）を用いる。図4（ $N=10$ ）および図5（ $N=100$ ）に測定例を示す。各図の上部にコイルに対する磁石の代表的な位置関係のイラストを示す（大きさは1/1）。

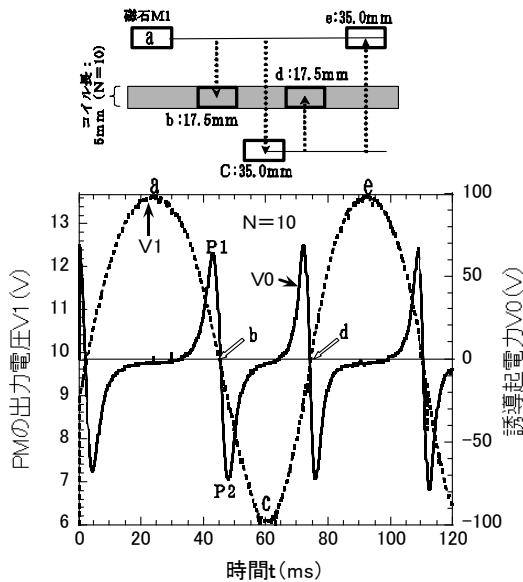


図4  $N=10$ の測定結果および磁石とコイルの位置関係（磁石の運動の中心をコイル長の中心にそろえた場合）

図6に測定した全ての誘導起電力波形から読みとった正の最大値から負の最大値までの値（ $V_{pp}$ ）と $N$ との関係を示す。この図の（a）は全体の特性であり、（b）は（a）における比例範囲（ $N=10$ まで）における測定値との比較図である。図6（b）の計算値は、図3における計算値を用いることで求まる。なお、測定値が計算値1よりも計算値2と近似していたので計算値2を用いることにした。図3では1巻きにおける誘導起電力の片方のピーク値を求めたが、ここでは $V_{pp}$ なのでその値を2倍する必要がある。さらに、 $N$ が複数なので $N$ 倍する必要がある。つまり、 $9.5 \times 2 \times N$ （mV）となる。図6（a）を見ると、 $N$ の増加に対して $V_{pp}$ が比例する（ $N \sim 10$ ）、飽和する（ $N=10 \sim 30$ ）、そして緩やかに減少する（ $N=30 \sim$ ）という3種類の変化を示すのがわかる。以下では、この変化について考察する。

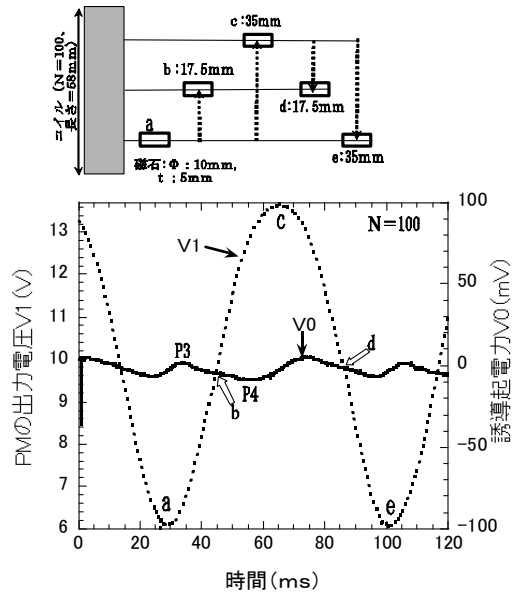


図5 測定結果および磁石とコイルの位置関係（磁石の運動の中心をコイル長の中心にそろえた場合）

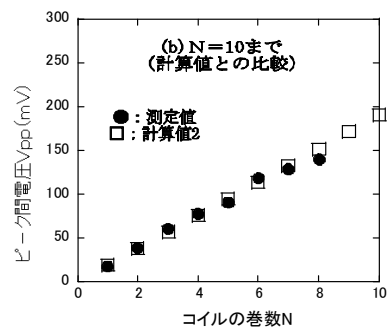
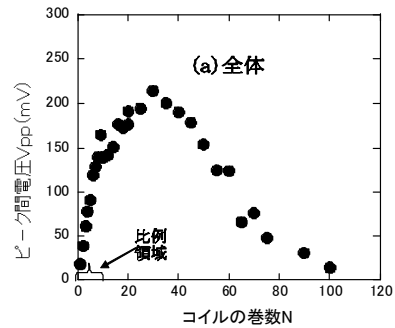


図6 コイルの巻数 $N$ とピーク間電圧 $V_{pp}$ の関係（層数 $M=1$ ）

まず、 $N=30$  以上における変化について述べる。コイルの中をコイル長より短い磁石が移動した場合、磁石の移動によって誘導される起電力と  $N$  の関係は、 $N$  の変化に対して無限に比例するとは考え難い。すなわち、ある範囲までは  $N$  に依存して増えるが、それ以上の  $N$  に対しては反応しない、すなわち起電力の大きさが一定になると考えられる。これは、磁石の持つ磁束密度分布に依存するからである。磁石付近は強いが、磁石から離れれば磁束密度は弱くなる、すなわち誘導起電力が発生する確率が低くなると考えられる。しかし、結果はそうはならず、 $N$  の増加に伴い、 $V_{pp}$  が減少する傾向が見られた。これは、誘導された起電力の間で打ち消し合いが起きたものと考えられる。つまり、コイルに生成する起電力は、磁石の移動に伴い複数の場所すなわち 1 巻毎に生成するので生成した起電力の間には位相差が生じる。実際に検出するのは、それらが合成されたものである。したがって、位相差の状態によっては、生成した起電力よりも小さな値が検出される場合がある。それが起きたものと考えられる。

$N$  極および  $S$  極は、誘導起電力の生成に単独で関与する。したがって、コイルの中空を磁石が通過した場合、誘導起電力の値やその波形は、磁極の通過の仕方に依存する。図 2 のように磁石の運動距離の中心に 1 本の導体（1 巻きのコイル）が存在する場合は、2 つの磁極の通過に伴い、正側および負側に電圧が出現し、それが合成され 1 つの交流波形となる（片方の磁極が優位に作用した場合は交流波形にはならない）。1 巻きのコイルの場合は、このように単純な理解で済むが、 $N$  が複数になると導体数の増加に伴い、生成する誘導起電力の導体間における位相差の状態が複雑になってくる。位相差の状態が複雑になれば、誘導起電力の合成値は単純な合成とはならず、打ち消される成分も現れるので、誘導された起電力よりも小さな値が検出される可能性が高くなることが考えられる。これが現れたために  $N$  が増加したにもかかわらず誘導起電力が増えず、逆に減少したものと考えられる。

この打ち消し作用については、上述のような考えで理解できるが、実際にその存在を確かめることを試みたのでその概要を以下に述べる。

1mm $\Phi$  のエナメル線を 13mm $\Phi$  の透明な管（内径=11mm、長さ=260mm）に巻きつけ、 $N=40$  の専用のコイルを作った（0.5mm $\Phi$  のエナメル線では、後述のリード線の接合が困難であったので 1mm $\Phi$  のエナメル線を用いた）。そして、コイルの各導体間における誘導起電力を測定するためのリード線を 5 巻き毎にはんだ付けで結合した。リード

線には 1～5 まで番号を付け、3 区間（例えば、1－5 間、1－2 間、4－5 間）を同時測定した。測定する区間の組み合わせを変えて測定した結果、コイルの中空を磁石が運動する場合、導体と磁極との位置関係により、誘導される起電力の波形（電圧の大きさ、符号および時間的な変化）の様子が異なり、それらが混在することが確かめられた。もちろん、打ち消し作用が存在することも確かめられた。

$N=10$  までの間で  $V_{pp}$  が比例していたのは、打ち消し作用が少ないためであり、それには、コイル長（0.5～5mm）が使用した磁石の高さ（5mm）よりも短いことおよび磁石の磁束密度分布が関係していると考えられる。

そこで、使用した磁石の磁束密度分布特性を測定した。誘導起電力の生成に深く関与する成分すなわち磁極に平行な成分の高さ方向における分布特性を測定した。測定には X-Y ステージを用いた。センサの軸は、磁極と平行にし、磁軸に沿って移動させた。

その結果を図 7 に示す。上部には磁石の大きさとの関係をわかりやすくするためにイラストを加えた（大きさ比は 1/1）。

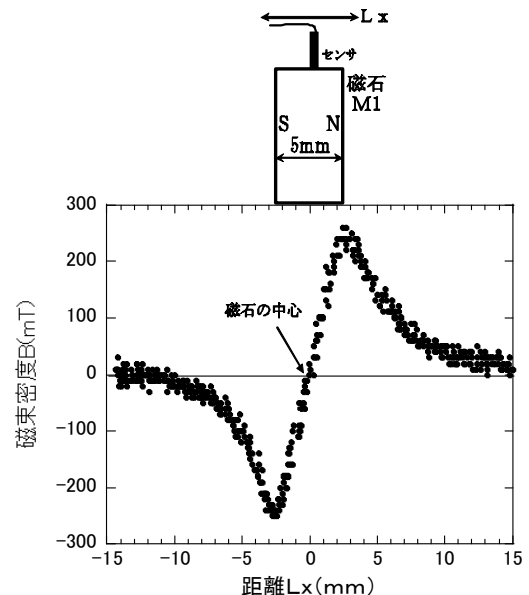


図 7 磁石 M1 の側面における磁軸方向の磁束密度分布特性（磁石の端面に平行な成分）

図 7 を見ると、両磁極付近でそれぞれ磁束密度が最大になるのがわかる。この分布特性と  $V_0$  の生成との関わりを知るために、図 4 および図 5 の結果と比較することを考えた。

まず、 $V_0$  が最大値になる時の磁石の位置について、図 4 の中の b 点と d 点に着目して調べる。その結果、ピークは、先に通過する磁極とコイルの入り口の端面がそろった時および後から通過する磁極とコイルの出口の端面がそろったときに、それぞれ現われるのがわかる。また、ピーク位置 P1 と P2 の距離が約 5mm となり、磁石の高さと同等であるのがわかる。

次に、同じ視点で図 5 の b 点と d 点に着目して調べる。図 4 と比べると  $V_0$  が零になる位置はいずれも運動距離の約半分の所であるのは同じであるが、 $V_0$  の値が小さくかつ波形の変化が小さくなる傾向が見られる。また、図 4 の P1-P2 の間隔（約 5mm）と比べると図 5 の P3-P4 の距離が約 25mm と長くなるのがわかる。

そこで、このピーク間距離の違いが何を意味するのかを確かめるために、図 6 で用いた波形についてピーク間距離を調べた。その結果、図 6 において比例関係が見られた範囲ではその距離が約 5mm であり、それ以外では 5mm より長くなる傾向が見られた。前者におけるピーク間距離（5mm 程度）と用いた磁石の高さ（5mm）が類似していたことから、効率よく誘導起電力が検出される条件として、コイル長が磁石の高さより短い場合であることが確かめられた。

最後に、図 6（b）について述べる。測定値と計算値が良く一致しているのがわかる。この結果から、ここで使用した磁石およびコイル（1 層 N 巻き）を用いた場合、誘導される起電力が計算値と一致するのは、 $N=10$  以下であるといえる。

#### 4.3 コイル長の中心から磁石の運動距離の中心をずらした時の誘導起電力特性の変化

4.2 では磁石の往復運動の中心位置をコイル長の中心位置にそろえたが、ここでは、その位置関係をずらした時の特性を調べる。磁石の上端がコイルの上端から上へ約 23mm のところから、磁石の下端がコイルの下端から下へ約 45mm の間で磁石が動けるようにした。コイルは、4.2 で用いた  $N=100$ （コイル長=58mm）のものを用いた。

図 8 に  $V_{pp}$  と磁石の運動距離（コイルの上端を零にし、そこから上方を負の値、下方を正の値とした）の関係を示す。図 8 の右横に代表的な磁石の位置(a、b、c)に関するイラストを書き加えた（大きさ比は

1/1）。図を見ると、磁石の位置の変化に対して  $V_{pp}$  の変化が規則的であるのがわかる。 $V_{pp}$  が最大になる位置が 2 ヶ所（a、c）有り、共に移動の中心位置がコイルの上端および下端であるのがわかる。一方、 $V_{pp}$  が最低になるのは、磁石の運動距離の中心がコイル長の中心と一致した場所（b）すなわちコイルの中空で上下に対称的に運動した時であるのがわかる。

以上のように、磁石の往復運動の中心をコイルの上端および下端付近に設定した時に、誘導起電力が有効に検出できることがわかった。

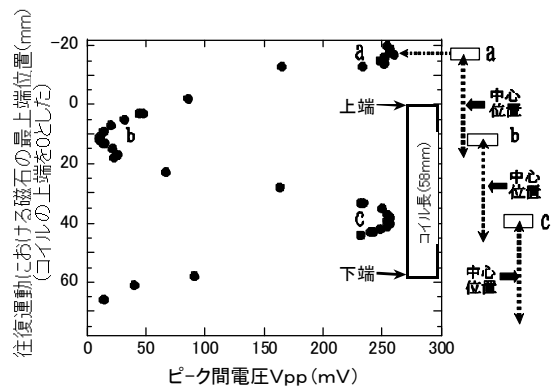


図 8 コイルの中空における磁石の運動の中心位置を変えた時の  $V_{pp}$  特性

#### 4.4 M層 1 回巻きコイルにおける誘導起電力特性

4.1 および 4.2 では層数  $M$  を 1 として、コイル長に沿って  $N$  を増やしたコイルを用いて測定を行なった。ここでは、コイル長をエナメル線の  $\Phi$  とし、開口面の半径方向にコイルを巻き、層数  $M$  を増やしたコイルを用いて測定を行なった。以下に誘導起電力特性について述べる。

図 9 に示すように、13mm  $\Phi$  の透明な管（内径=11mm、長さ=260mm）と 2 枚の亚克力板（厚さ=5mm、40～180mm 四方）を用いてポピンを作り、それに 1mm  $\Phi$  のエナメル線を巻きつけてコイルを作った。 $M$  は任意に 1～55 とした。それ以外の条件は、上述の実験と同じである。透明な管の中を磁石が上下運動する。

図 10 に波形の観測例を示す（ $M=19$ ）。この図の下部が測定結果であり、上部は、コイルの位置、磁石の位置、誘導起電力波形の関係を示すイラストである（大きさ比は 1/1）。但し、コイルの直径は、

実寸ではなく、磁石がコイルの中空を移動している様子を表わすために横方向に延長させてある。磁石の運動距離の中心にコイルを配置したので上下運動のそれぞれの中心で誘導起電力が発生しており、2つの磁極が通過するので電圧波形はほぼ対称的になるのがわかる。

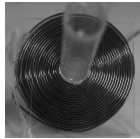


図 9 N=1、M=20 のコイルの外観(上から見た)

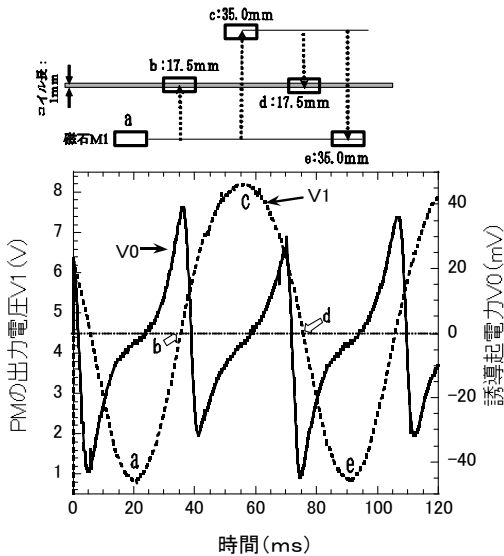


図 11 コイルの層数Mとピーク間電圧  $V_{pp}$  の関係 (コイル長=1mm)

図 10 測定結果および磁石とコイルの位置関係 (M=19)

図 11 にMと  $V_{pp}$  の関係を示す。図を見ると、 $V_{pp}$  は、 $M=20$  付近までは増加傾向を示すが、それ以上になると変化が少なくなるのがわかる。このように、Mがある値以上になっても  $V_{pp}$  が増加しないことについては、誘導起電力の生成に寄与する要因の1つである磁石の持つ磁束密度分布の影響が考えられる。

そこで、図 7 の時と同じ手法で磁石の周囲における磁束密度分布を測定した。センサの軸は、磁石端面と平行にし、磁軸と直角方向に移動させた。その結果を図 12 の下部に示す。その上部のイラストは、

コイルの直径と比べるためのものである(大きさ比は 1/1)。これらの図を見ると、磁石の中心から見てBが測定限界になる  $L_m$  の値(約 27.5mm)が、図 11 において  $V_{pp}$  が飽和傾向を示すMの値(20 前後、透明な管を含むコイルの半径=26.5mm)に類似するのがわかる。また、図 11 で用いたコイルが 1mm  $\Phi$  のエナメル線によって作られているので横軸のMの値は、長さの単位(mm)に直せる。したがって、図 12 の  $L_m$  に重ねて見ることができる。その結果、図 11 で  $V_{pp}$  が直線的に変化している範囲と図 12 でBが直線的に変化している範囲(10mm 以下)がほぼ重なるのがわかる。

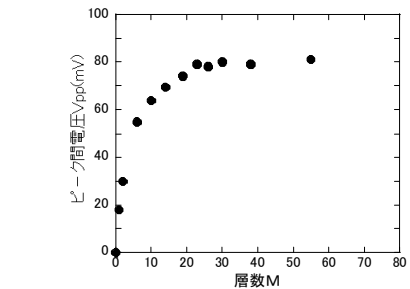


図 12 磁石M1 の端面における半径方向の磁束密度分布特性 (磁石の端面に平行な成分)



#### 4.5 磁極がコイルの開口面に対して平行に上下運動した場合の誘導起電力特性

4.4 までは、磁石がコイルの中空を通過するように移動させたが、ここでは、磁極面をコイルの開口面に近接させ、平行に保った状態で、上下に運動させた場合の誘導起電力特性について述べる。

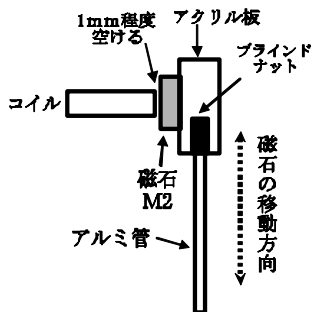


図 13 磁石とコイルの位置関係の概観図

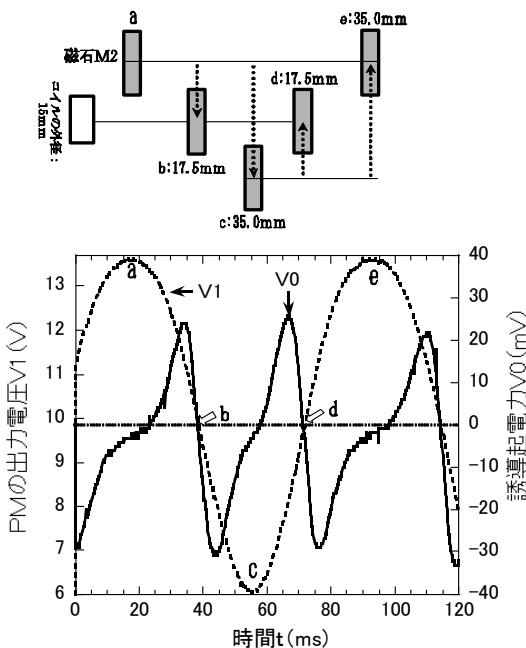


図 14 測定結果および磁石とコイルの位置関係 (N=15)

場合の誘導起電力特性について述べる。

磁石は、これまで用いたものより少し大きめの磁石 M2（ネオジウム、 $\Phi=20\text{mm}$ 、高さ $=5\text{mm}$ 、磁束密度 $=265\text{mT}$ ）を用いる。M2 の固定は、M1 と同じようには、ブラインドナット（アルミ製、M6）を用いて固定する。まず、磁石を固定するアクリル板（ $5\times 10\times 25\text{mm}$ ）の厚みの部分に穴（ $6.1\text{mm}$ ）を空ける。その板の片面にアロンアルファで M2 を固定し、穴にブラインドナット（アルミ製、M6）を差し込んで一体化させる（図 13 参照）。コイルの形状は、4.2 で用いたものと同じである。1mm  $\Phi$  のエナメル線を用い  $N=60$  までのものを用いた。磁石の運動の中心はコイルの中心にそろえる。

波形の観測例を図 14 に示す。測定した全ての波形から読みとった  $V_{pp}$  と  $N$  の関係を図 15 に示す。この図を見ると図 11 と類似していたので、ここでも磁石の磁束密度分布を測定した。

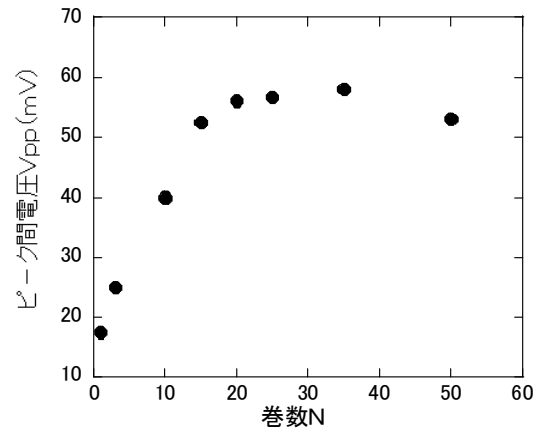


図 15 コイルの巻数  $N$  とピーク間電圧  $V_{pp}$  の関係

図 16 の下部に磁束密度分布の測定結果を示す。上部は、磁束密度分布特性から見積もった起電力の誘導が有効に起きると考えられる領域の概観図である（大きさの比は 1/1）。下部の図を見ると、垂直方向の  $B$  は、距離の増加に伴い減少し、約  $25\text{mm}$  付近で測定限界になった。図 15 で用いたコイルは、1mm  $\Phi$  のエナメル線で作られているので、図 11 と図 12 を比べたように、図 16 と比べることができる。その結果、図 16 で得られた  $25\text{mm}$  の範囲が、図 15 の  $N=25$  ( $V_{pp}$  の飽和が始まる) に相当することおよび図 15 で  $V_{pp}$  が直線的に変化している範囲と、図 16 で  $B$  が直線的に変化している範囲（ $10\text{mm}$  程度）がほぼ重なるのがわかる。

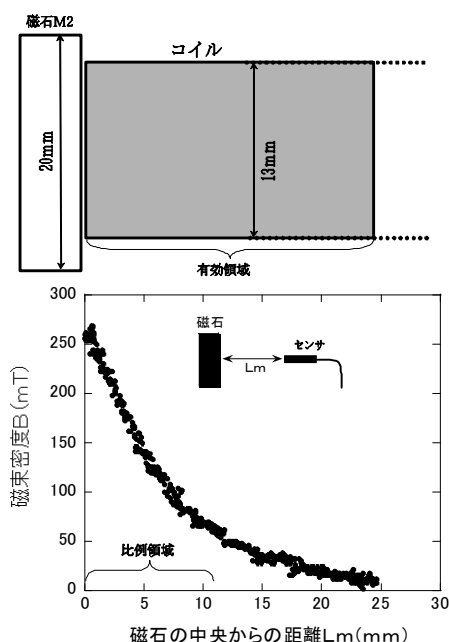


図 16 磁石M2 の磁軸方向の磁束密度分布特性  
(端面に垂直な成分)

## 5. 教材としての活用について

磁石とコイルを使った電磁誘導現象は、中学校の理科において学ぶことになっている<sup>4)</sup>。それによると、電流とその利用という内容で、「(イ) 磁石とコイルを用いた実験を行い、磁界中のコイルに電流を流すと力が働くこと及びコイルや磁石を動かすことにより電流が得られることを見いだすこと」と記述してある。この実験は、乾電池（直流電源）、検流計、スイッチ、コイル、磁石、リード線などを用いれば簡単にできる。この実験については、「レンツの法則、フレミングの法則は扱わないこと。<sup>4)</sup>」となっていることを踏まえると、単純に事象の再現あるいは事象の存在を知ることにと留めたものと考えられる。

したがって、磁石への運動は自然落下あるいは手動により与えるものと考えられる。

これらのことを踏まえると、磁石の運動を機械的にするあるいは複数の信号を同時に複数検出することが可能な本装置の活用度は、低いことが予想できる。本装置の活用度を高めるのは、単元で用いるよりも、授業外の理科活動例えば課外活動や夏休みを利用して行われる自由研究<sup>5)</sup>の題材として用いる方が適すると考えられる。

## 6. まとめ

コイルの中空を、磁石が上下に運動した場合および磁極面がコイルの開口面付近を上下に運動した場合の、誘導起電力の生成状況が把握できる実験器を得るために、ミシンを改造して試行錯誤を行った。その結果、磁石がコイルのどこをどのように運動すると、誘導起電力の大きさおよびその波形がどのように変化するのかが確認できるようになった。また、コイルの巻数および層数を変えた測定を通して、コイルの巻数および層数を変えた測定を通して、コイルと磁石を用いた誘導起電力特性には、磁石の長さ、磁石の磁束密度分布特性、コイルの長さ、コイルの層数が密接に関わっていることが確かめられた。これらの結果ら、試作した実験器は、有用なものであるといえる。

## 参考文献

- 1) 山田盛夫：「レンツの法則の実験の工夫」，物理教育，第 58 巻，第 4 号，pp. 221-222，2010
- 2) 櫻井勇良：「電磁誘導現象を観察する装置の試作」，物理教育，第 58 巻，第 1 号，pp. 22-23，2010.
- 3) 櫻井勇良：「ミシンを使った電磁誘導現象観察実験器」，物理教育，第 62 巻，第 2 号，pp. 87-88，2014.
- 4) 文部科学省：「中学校の指導要領 第 4 節理科」，[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/old-cs/1322464.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/old-cs/1322464.htm)
- 5) 安藤英俊：「理科の自由研究の意義と現状」，理科の教育，第 60 巻，第 702 号，5，2011.