

発電機と電動機に関する実験教材の作製

櫻井勇良

The Manufacture of the Experiment Teaching Material on Generator and Motor

Yuryo Sakurai

Abstract:

In this paper we describe experimental teaching material primarily using the motor, principle for power generation. Additionally, a generator using geomagnetism is described. The cognitive disharmony (surprise, conflict, lack of coordination) was recognized, and this played a role in further understanding of the experiment. In the preparation of this teaching experiment we emphasized a feeling for the phenomenon and the operating principle. In the case of the motor it was possible to observe that rotation direction and rotational state could be changed by changing the magnetic position and polarity by hand: the result was produced experimentally by rearranging parts in the Mabuchi motor. In power generation we worked toward a minimum size. And, the relationship between force and power generation was understood from the experience of the force in moving right and left. The relationship between rotational speed and electric power generation of the coil was demonstrated by producing the geomagnetic generator experimentally with enameled wires attached to the frame of a bicycle wheel and moving the coil by hand without using the motor.

KEY WORDS: Experiment teaching material, Motor, Generator.

要旨:

本研究では、電動機および発電原理器に関する実験教材の作製について述べている。認知的不調和の要素を取入れた教材の開発を目指している。コイル、ボビン、磁石を用いた発電原理器の小型化、マブチモーターの部品を使った可視形モーターの具現化、マブチモーター及び自転車の車輪のフレームを使った地磁気発電機の具現化などを図っている。それぞれの実験器は、実感を伴った理解を誘発するために手動で動かす部分を増やす工夫が施されているのが特徴である。アンケートによると、学習者の約80%が良好な反応を示した。

キーワード: 実験教材、電動機、発電機

1. はじめに

最近、理科離れ、理科嫌い、理工系離れなどの現象が問題視されている¹⁾。これへの対応はいろいろなレベルで実施されている。筆者は、これらの現象の理解とそれへの対応策の検討を脳科学（認知過程学）の知見を取り入れながら行っている。その過程で、対策の一つとして認知過程学の知見を積極的に取り入れた教材が有効であることと、それを開発研究しなければならない、と思うようになった。そこで、認知過程で得られている多くの知見の中で、特に、認知的不調和（驚き、当惑、協調欠如）が学習動機になり易い²⁾、といわれていることと、学習によって得られる記憶は記述的な記憶より経験的な記憶の方が長持ちする^{3), 4)}、という知見に着目し、これらを取り入れた実験教材の開発を行うようになった。認知的不調和には“驚き”、“当惑”、“協調欠如”の三つのタイプがある。“驚き”は、既知の知識に反する事象や情報に出会った時に生じる。“当惑”は、対象となる事項について複数の対立する見解が存在することを知った時に生じる。“協調欠如”は、手持ちの情報が一致しないと気付いた時に生じる。このような認知的不調和の経験が学習の動機付けになる。筆者は、上述の問題への対応策として、この事実に着目した教材を開発している。つまり、学習者の認知過程を踏まえた実験教材の具現化を図るのが本研究の最終目標である。しかし、この実現には、認知過程の把握という大きな壁がある。筆者は、壁の中身を具体的に把握し切れておらず、暗中模索の状況にある。

そこで、現在、筆者は、何らかのヒントを得るために自ら体験・体感することを考え、自らの認知過程を意識した実験教材作りを試みている。つまり、他者の認知過程を踏まえる前に、筆者自身の持つ認知過程を把握することが先決であるとの判断から試している。筆者自身の認知過程について理解が進めば他者の認知過程を想像することができるのではないか、と考えている。現状は、そこまで至っておらず、あくまでの実験器の状態に着目し、“より簡単な構造・操作”、“より見やすく”、“より安価に”、ということに着目しながら試行錯誤を行っている。

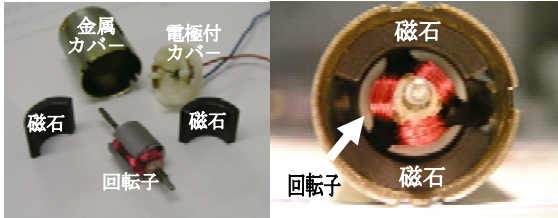
本稿では、その過程で得た電動機の原理器、発電原理器および地磁気発電機の実験教材について報告する。

2. 電動機の原理器の試作

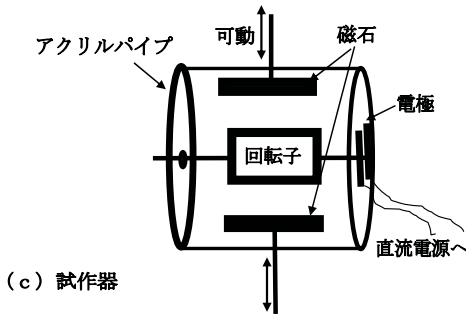
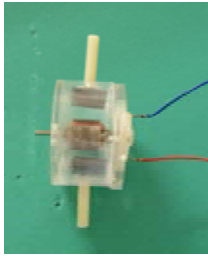
電動機の原理は、フレミングの左手の法則で説明できる。この原理を説明する際に用いられる実験教材はいろいろ存在する。筆者も幾つか試作した経験がある。以下で報告するものは、その中の一つである。市販されている実験教材やこれまで試作したものをながめながら工夫ポイントを模索した。その過程で、臨場界を感じさせるためには実際に使われている電動機を用いた方が効果的なのではないかと考えた。そこで電動機の選定を行い、マブチモーター（RE-280、外径 24mm）を使うことにした（図 1 (a)、(b)）。

動作原理や内部構造が見えるようにする、ということを作製のポイントとした⁵⁾。内部構造を見やすくするためには金属のカバーを外し、透明な材料に取り替える必要があった。そこで、試行錯誤した結果、図 1 (c) に示すようなものを得ることができた。試作品の外側の部品は、外径 50mm、内径 46mm、長さ 22mm のアクリルパイプと外径 50mm、厚さ 5mm の同じ材質の 2 枚の円板によって構成されている。製品の外径は、約 24mm であるので同程度の大きさのものを用いることを考えたが、磁石と回転子との距離を変化させた時の動作確認ができるようにするために大きめのものを用いた。両側の円板の中央に穴を開け、電極や軸受けを取り付け、接着剤で固定する。パイプの側面中央付近に磁石を取り付ける太さ 6mm のプラスチック製の棒を通し、その先に磁石を接着剤で固定する。片方の円板はパイプに固定し、その中央にある軸受けに回転子の片側を差し込む。最後に、残りの円板に固定した軸受けに回転子を通して、回転状態を確かめ、不都合な部分を調整した後に接着剤で固定する。

試作した装置の動作確認を行った結果、金属ケースを透明なものに変えたために回転子の様子が観察できるようになったことに加え、パイプの側面にある磁石がついているプラスチックの棒を調整し、磁石を回転子に近づけると回転子が徐々に回り始め、さらに近づけると回転速度が増加することが確認できた。



(a) マブチモーターの部品 (b) マブチモーターの内部構造



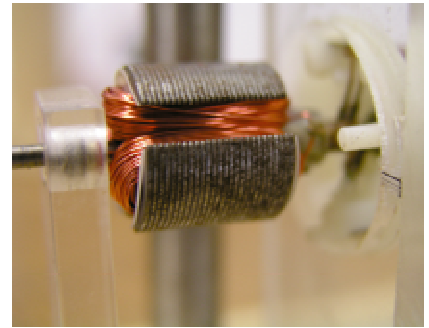
(c) 試作器

図1 分解したマブチモーターの部品を使った試作 (その1)

次に考えたことは、近づける磁石の極性と回転子の回転方向の関係を体感できるようにすることである。試行錯誤の結果、図2に示すような装置を得た。回転部分は、図1(c)と同様に肉眼で観察できるようにした。また、ケースは用いず、回転軸、電極部を加工した平板などで支えるようにした。動作の手順は上記の試作器の場合と同じである。違うのは、磁石の配置の仕方である。事前に通电しておいた回転子に棒状の磁石(アルニコ、 $\Phi 10\text{mm}$ 、長さ100mm、150mT)を垂直に立てたまま近づけると回転子が回り始める。

そして、一旦回転子から磁石を遠ざけ、磁石の上下を逆にした状態で同じ様に近づけると、回転子の回転方向が逆になる。磁石を立てた状態ではなく、磁極の端面を回転子に近づけても同じ現象が確かめら

れる。ただし、この場合、磁石を近づけた際、磁石が回転子に吸着して回転しなくなる場合があるので注意が必要である。このように、内部構造を見えるようにし、磁石の位置が変えられるようになったため、臨場感のある観察実験ができるようになった。また、ストロボを使って回転子の回転数の測定を行えば、さらに感動的な観察実験を演出することができる。



回転子部分の拡大図

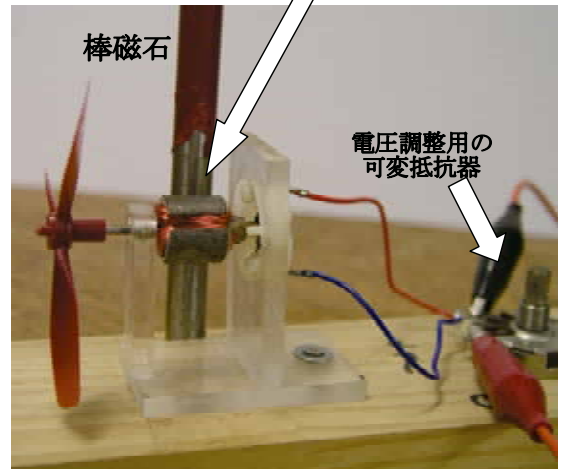


図2 分解したマブチモーターの部品を使った試作器 (その2)

3. 発電原理器の試作

3.1 発電機の概要

発電機の原理は、フレミングの右手の法則で説明できる。変化しない磁界中を導体が動くあるいは静止している導体に時間と共に大きさが変化する磁界

が作用すると導体に電圧・電流が誘導される。

3.2 試作の動機

毎年、12月の月上旬に開催された小学生を対象とするあるイベント（ものづくり教室）に筆者が参加したことがきっかけである。この教室は、市内の小学生を対象に実施され、毎年好評を得ている。5年前に筆者は、このイベントに初めて参加し、文献6、7を参考にしてアクリルパイプ、棒磁石、ボビン、エナメル線、発光ダイオードを使った発電原理器を参加者に試作させた。そして、次年度の参加が決まり、題材探しを始めた時、前回の発電原理器を改善することを考えた（小型化）。

3.3 試作器の概要

上述したイベントに最初に参加した時に試作した発電機の概要を図3に示す（1号試作器）。この発電器は、コイル、磁石（直径：10mm、長さ：100mm、磁束密度：150mT）、磁石の移動用パイプ（内径：11mm、外径：15mm、長さ：300mm）で構成される簡単なものである。コイルは、ボビン（形式：P-1G、長さ：46mm、中空外径：20mm、内径：15mm、つばの直径：40mm）と0.2~0.3mmΦのエナメル線を用いて作る（巻数2500~3500）。発電の様子を可視化するために発光ダイオードを用いる。図4と図5から分かるようにコイルの中空を磁石が通過すると向きの異なる電圧が誘導される。したがって、1個の発光ダイオードではその様子が確認できないので2個接続する。ダイオードの接続線の組み合わせを異極同士にし、電圧の極性の変化に応じて1個ずつ交互に光るようにする。交互に光る様子から発電する電圧の極性が異なることが確認できる。

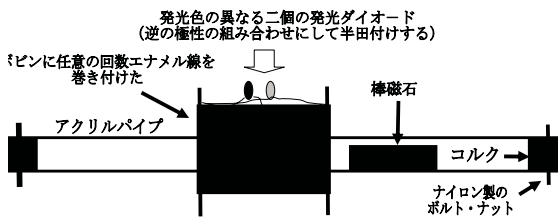
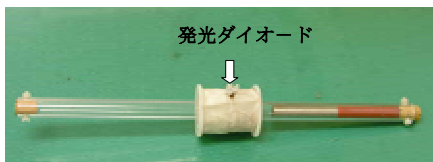


図3 発電原理器の1号試作器の概観

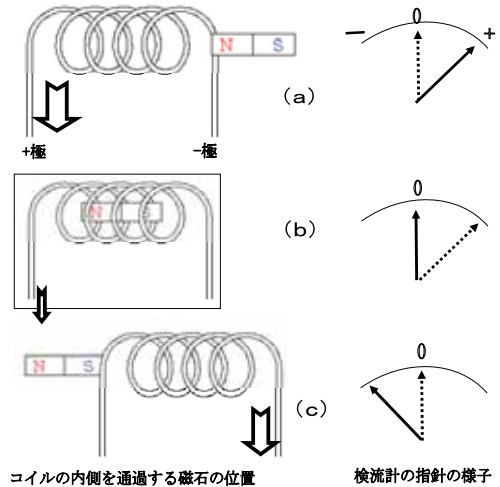


図4 コイルの内側を通過する磁石の位置と検流計の指針の関係

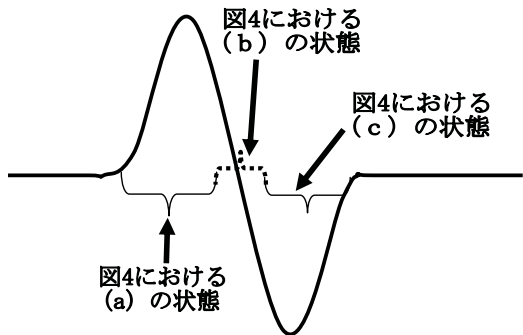


図5 磁石がコイルの内側を通過した際に誘導される電圧波形の概観図

このタイプの発電器の大きさは、用いる磁石の大きさに依存するので磁石を小型にすれば実験器も必然的に小さくなる。そこで、小型の磁石を用いることと磁石の通過路に工夫を施すことを試みた。磁石の小型化については、1号試作器の棒磁石を小型のネオジム磁石（直径：10mm、高さ：5mm、磁束密度：320mT、10mmΦ、磁束密度：755mT）に変えて観察した結果、同じように発光ダイオードが光ることで確認できた（図6参照、2号試作器）。

4. 地磁気発電機の試作

4.1 地磁気・発電機の原理

地表で観測される地磁気の大部分は、地球のコアに流れる電流に起因するといわれている。発生への寄与が小さいものとしては、地殻の磁化、電離層に流れる電流、地殻・マントル・海水などに流れる電流がある。地磁気の強さは、地球の内部および外部の要因により絶え間なく変化している。地磁気の強さは、場所により異なり、 $24\sim 66\mu\text{T}$ の磁力を有する（東京付近は約 $45\mu\text{T}$ ）^{8),9)}。

発電機は、フレミングの右手の法則に則り導体（コイル）を磁界中で動かすことによって起電力を得るものである。一般の発電機は、永久磁石による静磁界をもとにして起電力を得ている。地磁気発電機は、永久磁石の代わりに地磁気をもとに起電力を得るものである。

4.2 試作器の概要および実験

4.2.1 ボビンを使ったもの

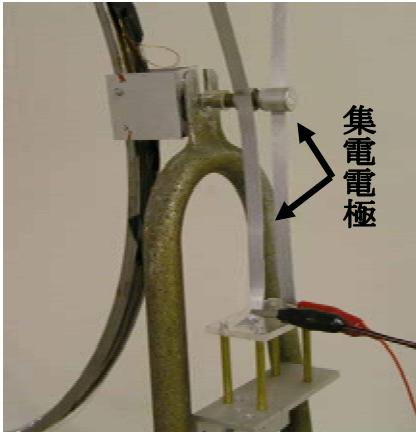
地磁気を使って発電現象を演示する時、手軽なものとしては、エナメル線をボビンに巻き付けて作ったコイルを使う場合がある。そこで、 $0.3\text{mm}\Phi$ のエナメル線をボビン（外径： 70mm 、幅： 60mm ）に 3500 回巻いてコイルを試作した（図 9 参照）。コイルの両端に検流計を接続し、コイルを片手に持って大気中で手首をひねる動作を行うとひねる速度に応じた起電力が発生するが観察できる。ひねる方向により起電力の極性が変わるのも観察できる。地磁気をコイルの端面で切るようにゆっくり動かした場合、検流計の指針はゆっくり振れる。地磁気の方向、コイルを動かした方向（コイルが地磁気を切る方向）、検流計の指針の振れ方などの情報を元に発電原理すなわちフレミングの右手の法則との比較対応を行なうことができる。これにより、フレミングの右手の法則と発電現象との対応が実感できることが期待できる。



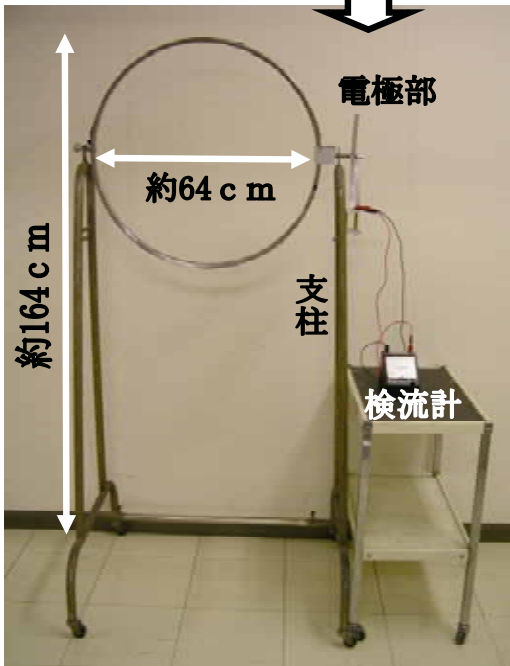
図 9 コイルを使った地磁気発電機

4.2.2 自転車のフレームを用いたもの

授業において地磁気の存在およびそれを使って発電が起きることを少しダイナミックに演示したいと考えていた。資料を調べた結果、文献 10 に示すように市販されていることが分かったが、価格が 7 万円程度と高価であったので購入をひかえ、自作品で実験することを考えた。そこで、費用削減を踏まえ木材で作った枠（ $1\text{m}\times 1\text{m}$ ）を用いて発電用のコイルを試作し、予備実験を行った。その結果、強度計算をしないまま行ったため、回転運動を続けている途中で枠が壊れてしまうことを経験した。この経験から軽量で強度が保てる木材以外の材料で枠を作ることと考え、材料の探索を行った。その結果、自転車のフレーム（直径：約 64cm ）を使うことを思い付いた。その完成状況を図 10 に示す。その製作状況を以下で述べる。



(a) 電極部（拡大）



(b) 装置の外観

図 10 自転車のフレームを使った地磁気発電機

まず、古くなった自転車から前輪を取り出し、余計なものを取り除きフレームのみの形にする（後輪より取り外しが簡単であったので前輪を用いた）。そして、中心線に沿った位置に回転用の固定軸（金属

管）を2つフレームの外側に取り付ける。片方の固定軸には、コイルに誘起される起電力を外部に取り出すためのリング状の電極を適当な距離をおいて2つ取り付ける（もう一方の軸には細工は施さない）。そして、フレームの外側の溝に0.5mmΦのエナメル線を巻きつけてコイル（巻数：300回）を作製し、それを固定台に取り付ける。コイルの両端は、固定軸に取り付けた専用の電極に接続し、回転軸の電極から外部に電圧を取り出すための電極を取り付ける。これで発電した電圧を取り出すことができる。

次に、コイルを回転させる方法について述べる。当初、モーターを使った駆動装置を使うことを考えて試行した。その結果、回転させる時は良かったが回転を終了する際、電源を切ってもコイルの運動は直ぐには止まらず、慣性による問題が発生することが分かった。また、駆動装置を使ったのでは実験・観察に臨場感が不足することを感じた。そこで、その方策も併せて検討した結果、機械的な力を使うよりも、観察者自身の手を使って回した方が臨場感のある観察実験ができることを体験したので、その方法を取り入れることにした（図10参照）。

発電の状態の観察は、検流計を用いて行った。フレームの回転角度や回転方向を変えると誘導起電力の極性が変わることが確認できた。そこで、フレームの開口面と地表との角度と検流計の指針の振れ方を観察し、それらの関係を調べた。その状況を以下に述べる。観察例として、フレームの開口面が地表に対して垂直方向になっている状態から時計方向に回転させた時について述べる（図11参照）。

まず、開口面が45度回転し地表と平行になるまでに検流計の指針は0→+→0と一往復振れる。そして、さらに45度回転させると、今度は、逆方向に検流計の指針は0→+→0と一往復振れる。さらに1/2回転すると、検流計の指針は0→-→0、0→-→0と先の振れを繰り返す。したがって、1回転で2周期の交流電圧が発生する。振れる方向が変わるのは、誘導電圧の極性が変わったことを意味する。地磁気の方角に対するコイルの移動方向が逆方向になるために、誘導電圧の極性が逆になるのである。これは、フレミングの右手の法則を用いることで容易に説明ができる。

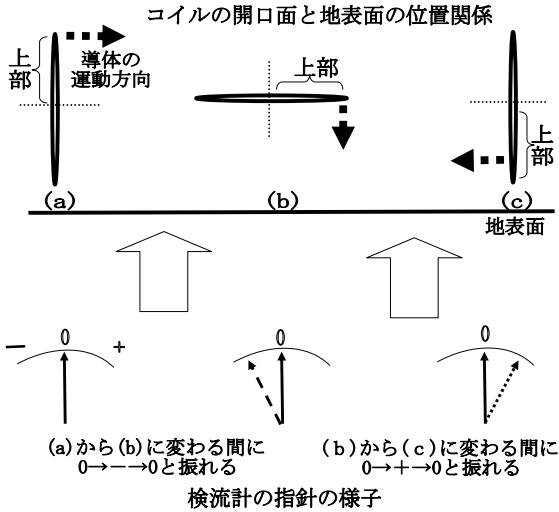
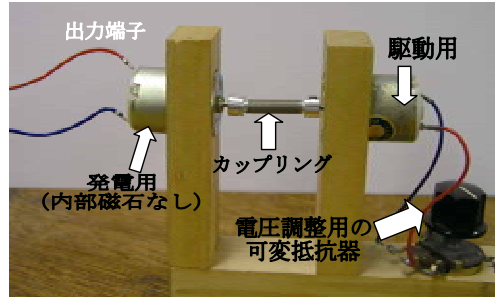


図 11 コイルと地表面の位置関係と検流計の指針の変化の概観図(時計回りに 1/2 回転)

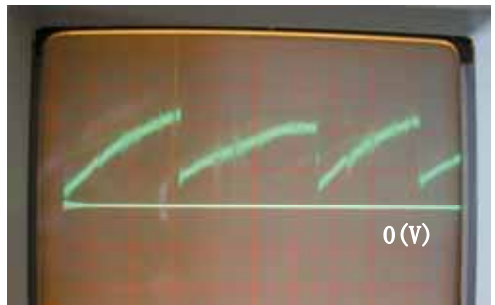
4.2.3 マブチモーターを使ったもの

筆者は、以前、発電機と電動機について現象および構造における異なる事や類似することなどを演示するための実験器を模索していた。その過程で、2 個のマブチモーターの回転軸同士を結合させることを思いついた。その後、この考えに基づいた実験器は、文献 11 に示すように市販されていることを知った。しかし、この製品は、1 万円と意外と高価であったので購入をひかえ、自作品で実験することにした。

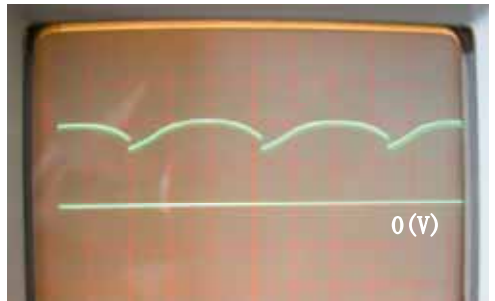
片方のモーターを駆動用とし、電圧を供給して回転させると、発電機となるもう一方のモーターの回転軸も強制的に回され、通常は電圧を供給する端子から電圧が出力される。このことをヒントにし、高速で回転する地磁気発電機の試作を行うことにした。試行錯誤の結果、先の教材を参考にし、永久磁石の代わりに地磁気を使うようにするために発電用のモーターの内部にある 2 個の永久磁石を取り外し、再度同じように組み合わせたものを得た(図 12 (a) 参照)。



(a) 試作品の外観



(b) 内部磁石が無い場合の発電波形 (V: 2mV/div, H: 0.5ms/div)



(c) 内部磁石がある場合の発電波形 (V: 1V/div, H: 0.5ms/div)

図 12 改造したマブチモーターを用いた地磁気発電機

発電状態の観察は、応答速度の関係で検流計ではなくオシロスコープを用いて行った。回転数はLEDストロボ装置を用いて測定した。図 12 (b) には、2V の直流電圧を印加した時の発電波形の観測例を示す(約 3100 回転/分)。図に示すように約 5mV の大きさを持ち、約 1.6m s 間隔でのこぎり波状の電圧

が現れた。この間隔は、マブチモーターの回転子が一回転する時の発電回数に関係するので、図1(b)の状態のマブチモーターを用いて確認した。すなわち、回転子が1回転した場合の発電が起きる回数を調べた。目視しながら回転子を回し、金属カバーの内側にある2つの磁石との対面状態の変化を調べた結果、12回の発電が起きるので分かった。つまり、3100回転/分により37200回/分の発電が起きていたことになる。これより、1回の発電に要する時間を算出($60\text{ s} / 37200\text{ 回転}$)すると約1.6msとなり、のこぎり波の出現間隔(約1.6ms)と類似した。

図12(c)には、図12(b)と同じ条件で回転させた時の内部磁石のある発電用のモーターの発電波形の測定例を示す。図12(b)と比べると出現間隔は類似していることが分かる。発電の大きさについては、平均化して見た場合、地磁気を用いた場合(図12(b))は約2.5mV、磁石を使った場合(図12(c))は約1.9Vとみなせる。この値を比べると、手を加えない場合のモーターによる発電は、磁石を取り除き地磁気を使った場合に比べて約800倍大きいことが分かる。この違いは、用いた磁気の強さ依存する事が考えられるので地磁気の大きさとマブチモーターの磁石の強さを比較した。地磁気の強さについては、文献8、9を参考とし、東京付近の地磁気の強さ(約 $45\mu\text{ T}$)とする。一方、マブチモーターの磁石の強さについては、磁束計で測定した結果、約40mTであった。これらを比べると約1000倍の差があり、両者の平均発電電圧の比(約800倍)と類似することが確認できた。

以上のように、試作した装置により地磁気発電現象の観察を試みた結果、手を使った観察の方が臨場感を強く感じられるような印象を持った。記述的な経験よりも体験・体感することの方が学習方法として好ましいことは、認知学的見地⁴⁾からも裏付けられており、それを体感できた。

5. アンケート結果

試作した実験器は、筆者が担当する電磁気学の授業においてフレミングの右手の法則及び左手の法則を再現するために全て同時期に用いた。したがって、個々の実験器毎ではなく実験器全般にわたる印象を探るためのアンケートを実施することにした。回答は、各項目について“はい”、“いいえ”、“その他”のいずれか一つを選択するようにした。43人による回答結果を表1に示す。表中の回答欄の左側の数字は回答者数であり、()内の数字は百分率%の数値で

ある。ほとんどの項目において約80%の学生が“はい”と回答しており、筆者が実演中に感じた情感を裏付ける結果が得られた。観察後において、自主的に追実験をする者あるいは報告書の作成において自主的に質問してくる者が2~3割存在していたことから実験教材を用いた効果が連鎖していることを感じた。

表1 アンケート結果

質問事項	回答：回答人数(百分率%)		
	はい	いいえ	その他
面白かった	34(79.1)	1(2.3)	8(18.6)
興味・考察意欲が増した	36(83.7)	1(2.3)	6(14)
現象を適切に扱っていた	36(83.7)	1(2.3)	6(14)
現象を理解するのに役立った	31(72.1)	1(2.3)	11(25.6)
現象を分かりやすく演示していた	32(74.4)	3(7)	8(18.6)
操作が簡単だった	35(81.4)	3(7)	5(11.6)
工夫が感じられた	35(81.4)	1(2.3)	7(16.3)

6. まとめと今後の課題

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

1. 電動機の原理器を得るためにマブチモーターを改造した実験教材を試作した結果、通電した導体(コイル)の運動(回転)速度とそれがさらされる磁界の強さの関係が体感できる実験器が得られた。文献5の場合、外側が透明な材料になっているだけである。本稿で述べた試作器は、磁石の位置を変えられるので動作機構・原理に関する実験も体感できる点特徴である。

今後は、磁石の位置、磁極の種類、通電電流値などの調整が可能で回転数が測定できる可視形の装置を開発する予定である。

2. 発電原理器については、以前作成したものを小型化するために試行錯誤した結果、磁束密度が大きい小型のネオジウム磁石を用いることで磁石の通過用のアクリルパイプを省いても発光ダイオードを動作させるのに十分な発電が起きることが確かめられた。その結果、当初300mmの長さであった実験器の大きさを約46mmまでに短くすることができた。小型化に伴い、磁石の動きが見えなくなる、という懸念があるが、逆にこのことを使った実演を行うことにより、認知過程を刺激することも可能である。例えば、

説明をせず、実験器を左右に動かして発光ダイオードが動作する状況を観察させれば、“何故発光ダイオードが光るのか”という驚きの認知を誘発することができる。この驚きの認知が発電に関する知識獲得への学習誘導へのきっかけになる可能性もある。

今後は、コイルの中空を磁石が通過するタイプではなく、コイルの端面を磁石が通過するタイプの発電原理器（可視型）を開発する予定である。

3. 地磁気発電機については、エナメル線とボビンを使ったもの、自転車の車輪のフレームにエナメル線を巻き付けたもの、マブチモーターの磁石を取り外したものを地磁気中で運動・回転させて発電現象を観察することができる実験器が得られた。

今後は、ワンウェイクラッチを用い、モーターの回転を止めた時に発生するコイルの慣性力による問題の解決を図り、回転速度の高い状態の発電現象が容易に観測できるようにする。これらの実現を図ると共に地磁気発電力の長期観測を行うことを考えている。地磁気は時間、季節によって変わると言われているので地磁気発電力の変化を調べることでその実態を確認する予定である。

引用文献

- 1) 黒川ほか：「今、なぜ、若者の理科離れか」, 2005, 財団法人 日本学術協力財団.
- 2) 稲垣佳世子・鈴木宏昭・亀田達也：「認知過程研究」, 157-160, 2002, 放送大学大学教育振興会.
- 3) 大石高生・久保田競：「記憶と情動の脳科学」, 32-37, 2006, 講談社.
- 4) 湯澤正通：「認知心理学から理科学習への提言」, 214-223, 2004, 北大路書房.
- 5) <http://www.netsea.jp/shop/40856/tsu-0006> (透明構造のモーター) .
- 6) <http://search.12rikachan.com/cgi-bin/lookup?type=teacher&method=infoframe&id=125696868525446&sid=125696868525446&digest=798a6b270fb2b3682eb37fb41c1484f7&sequence=2&page=0&numbers=20&code=105300&image=0&imflag=0&lines=1> (ナリカ、発電原理実験器のカタログ) .
- 7) <http://www3.kenis.co.jp/Product/1120090.htm> (ケニス、発電原理器説明器（発電コイル）のカタログ) .
- 8) <http://www.magnet.okayama-u.ac.jp/magword/geomag/> (地磁気について) .
- 9) <http://www.s-yamaga.jp/nanimono/chikyu/chijiki-02.htm> (地磁気について) .
- 10) http://www.shimadzu-rika.co.jp/kyoiku/butsuri/denryu/135_270.html (地磁気力発電機のカタログ) .
- 11) http://www.shimadzu-rika.co.jp/kyoiku/butsuri/denryu/135_290.html (モータ・発電機実験器のカタログ) .