

モータの理論を理解するための教材の開発

Development of Teaching Materials for Understanding the Theory of Electric Motors

櫻田 安志*・横山 安弘**

Yasushi SAKURADA*・Yasuhiro YOKOYAMA**

要 旨

電動機（モータ）は生活に密接にかかわる電力機器であり、電化製品には無くてはならない装置である。しかし、その仕組みは一般市民には良く理解されていない。このような背景において、本研究では固定磁石とコイルの間の相互作用の計測と制御を通してモータの動作原理の理解を助ける教材を開発した。本稿では、開発した教材の概要、動作原理、出力波形などの特性について報告する。

キーワード：電動機、モータ、電磁誘導、磁石つきコマ

1. はじめに

電動機（以下、モータと呼ぶ。）は電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電力機器である。モータは、私達の身の周りの多くの製品に使用されているが、このことは私たちが日常生活のさまざまな場面でモータを活用していることを示している。例えば、家庭においては白物家電と呼ばれる冷蔵庫、洗濯機などの生活関連の家電製品のほとんどにモータが使われている。さらに生活全般においては、交通手段である鉄道から、通信機器である携帯電話に至るまできわめて多くの機器にもモータが使われている。このように考えると、モータは既に私たちの生活に欠かせない存在となっていることが実感できる。

しかし、多くの利用者がモータの仕組みを理解した上で電気機器を使用しているわけではないだろう。その上、電気機器の仕組みやその基本となる原理について理解している人はどの位いるだろうか。むしろブラックボックス化して使用していると考えられるだろう。これらの実態については今後の調査をすべきであるが、2007年（平成19年）12月に公表されたOECD生徒の学習到達度調査（PISA2006年調査）¹⁾から推測すると、実際にモータの原理を学習しているはずの生徒においてもモータの原理を理解している人は多いとはいえないだろう。

モータに限らず、技術に対する理解を促進して科学技術の振興を図るためには、国民の科学技術に対する関心を高める必要がある。特に、学校教育においては、児童・生徒に対して、科学技術の基礎について興味・関心を持たせたり、その原理の理解を促進させたりすることが求められている²⁾。例えば、生活と技術とのかかわりについて理解を深めることは、中学校技術家庭科の技術分野（以下、技術科）の学習指導要領²⁾にも示されている。また、技術科においては、エネルギーの変換方法や力の伝達の仕組みを知ることや、機器の基本的な仕組みを知り、保守点検と事故防止ができることも求めている²⁾。しかし、実際にはものづくりという言葉が先行して、材料とその加工を通しての製作活動が中心となっている。

このような背景から、本研究ではモータの基本的な仕組みをもつコマを作製し、それを動作させることによって電気エネルギーから機械エネルギーへのエネルギー変換（あるいは、その逆のエネルギー変換）を目に見える形で示すことができる教材を提案する。この教材では、電気から機械へのエネルギー変換に加えて、磁気の検出と検出信号を用いた制御を行うことで、アナログ回路での計測制御を行っており、計測から制御までの流れがわかり易く学習できる点がその特徴でもある。

* 弘前大学教育学部技術教育講座

Department of Technology Education, Faculty of Education, Hirosaki University

** 釧路工業高等専門学校教育研究支援センター

Education and Research Support Center, Kushiro National College of Technology

2. 実験装置

2.1 装置の構成

一般的なモータは磁場と電流の相互作用によって発生する力を利用して回転運動あるいは直線運動を出力するものである。なお、一部には磁場を用いずに、超音波振動を利用するモータ（超音波モータ）、静電気力を利用するモータ（静電モータ）があるが、本研究においては磁場と電流の相互作用を原理とするモータを視野に入れた教材装置について考える。

本研究では、磁場と電流の相互作用を原理として回転する磁石つきコマを教材として開発する。通常のモータでは、複数のコイルと磁石の間の力を回転に用いているが、このコマでは力の生じる仕組みを明確に示すために、回転力を発生させるためのコイルは一つ

だけにしてある。

この装置の、コマおよび台座の素材にはアクリル樹脂（以下、アクリル）を用いている。アクリルを素材として用いる事により、コマの回転や制御に必要な軽量化が行える。また、素材の透明性のため、磁石、コイルの配置や、磁石とコイルの相対位置なども一目で確認することができるといった利点もある。

図1に本研究で教材として提案する磁石つきコマと、その駆動装置を示す。図1の左側のコマの回転部分は、直径55 [mm]、厚さ8 [mm]の円盤である。このコマの下部には、コマの外周から8 [mm]の位置に直径10 [mm]の磁石を4個取り付けられている。図2に示すように、この磁石は内側が貫通しており、この部分を使ってコマにねじ止めをする事ができる。な

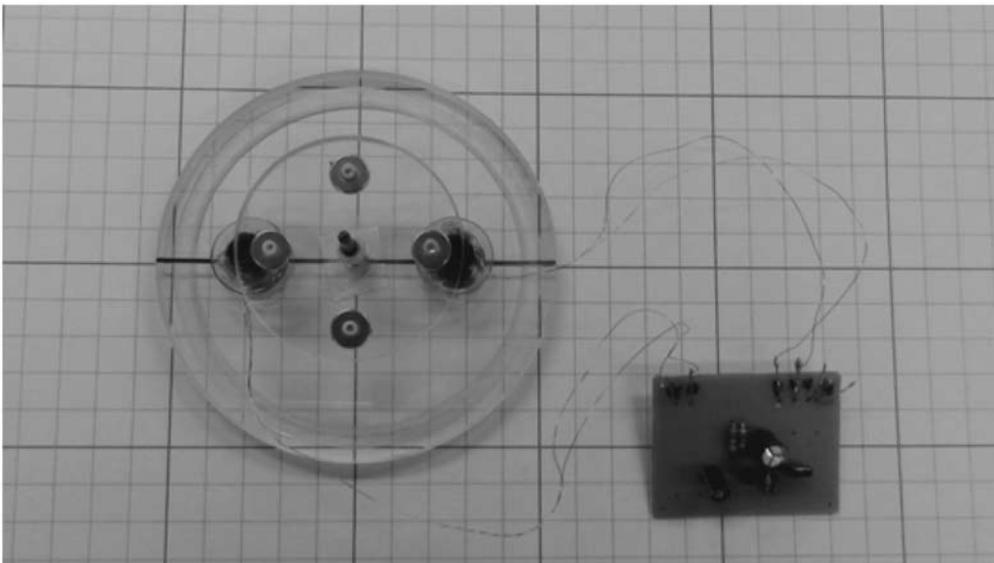


図1 磁石つきコマ（左）と、その制御回路（右）

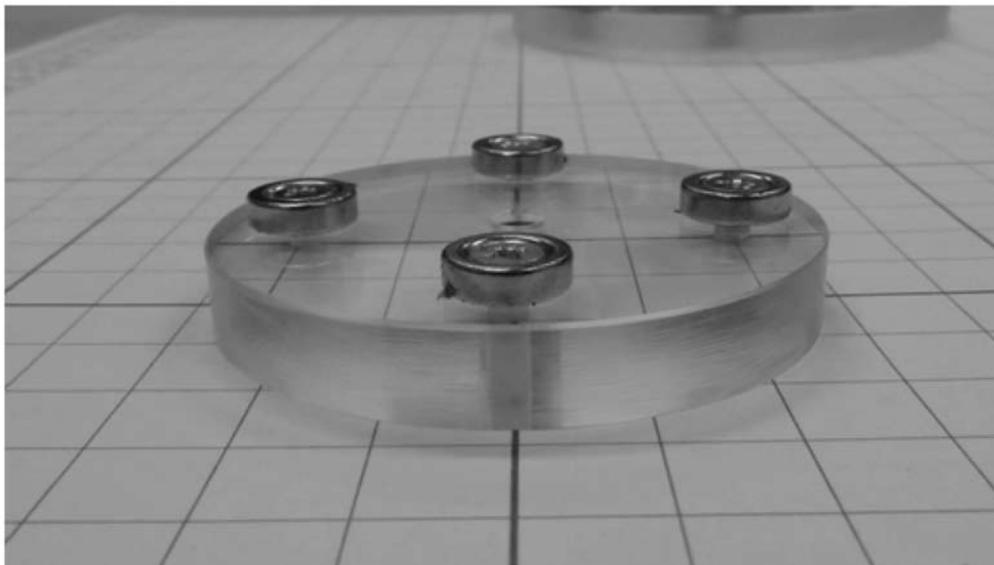


図2 コマ部分への磁石の取り付け

お、これらの磁石はすべて上部（図1において見えている方）をS極とし、下部をN極としてある。このように片方の極（ここではN極）を下方向に揃えて止める理由は次の通りである。

このコマでは固定した磁石の磁極に対して反発する磁力を、台座に固定した電磁石（以下、コイル）を使って加えてやり、回転力を制御している。複雑な制御を行わずタイミングを固定するだけで、適切なタイミングで反発力を発生させるためには、磁石の磁化の方向を揃えておく都合が良い。したがって、磁石およびコイルの極性は逆にしても動作に関する問題は本質的に生じない。なお、単純な拡張として制御回路を複数のコイルで実現する事で、リニアモータのようにN極とS極を上手に併用して、より大きな回転力を得る事も可能である。

コマを支えている台座は、厚さ10 [mm]、直径108 [mm]の円形で、コマ同様アクリル製である。この装置には、コマに取り付けた磁石の位置を検出する検出コイル（図1のコマの左側）と、検出信号に基づいてコマを駆動する駆動コイル（図1のコマの右側）が、それぞれに台座の中心から距離30 [mm]の対称な位置に取り付けられている。したがって、コイルは磁石に比べ、中心に対してわずかに外側の位置に配置されていることになる。

コマ部分に取り付けられている磁石は、M3の皿ねじ用のねじ穴が付いたネオジム磁石³⁾で、そのサイズはφ10 (直径)、t3 (厚さ) である (いずれも単位は [mm])。また、この磁石の表面磁束密度は340 [mT] (3400 [G])、吸着力は1.7 [kg] (いずれも、メーカー

公称値)で、比較的強力な磁石である。前述の様に、この磁石の磁化の方向は、ねじ穴の貫通の方向である。そのため、固定した場合、ねじの接合面に対して垂直な方向に極性が現れる。今回用いた磁石では、皿ビス面（皿ねじの頭が入る面）の極性がN極となる。図2はコマ部分を逆にした状態の写真であるが、この図において上側がN極、下側がS極となっている。

図3に、台座上の検出コイル、駆動コイル、コマ本体の様子を示す。図3において、磁気による位置の検出コイルは左側に、反発力によるコマの駆動コイルは右側にある。コイルの作製時には、導線を多数回巻くことを考えて、両コイルの導線には直径0.18 [mm]の比較的細いポリウレタン線を用いている。また、これらのコイルのボビン（糸巻き）には安価なミシン用のものを用いている。このボビンのリブ（外側の広い部分）の直径は20.5 [mm]、内側（コイルを巻く部分）の直径は8.2 [mm]である。これらのコイルには導線を多数回巻く必要があるが、手巻きでは時間がかかるため手巻きの代わりに電動ドリルを用いてコイルを巻いている。したがって、コイルの巻き数は不明であるが、次のようにして大まかな値を試算することは可能である。直径0.18 [mm]のポリウレタン線の1 [m]当たりの抵抗は約0.7 [Ω]である。また実測の結果、検出コイルの両端の抵抗値は14.7 [Ω]、駆動コイルは15.33 [Ω]であることから、両者に基づいて導線の長さを計算すると約21 [m]巻かれていることが分かる。

検出コイルにつながる導線は制御回路の入力側に接続されており、制御回路において増幅されて出力される。この出力は駆動コイルの入力となり、上向きの磁

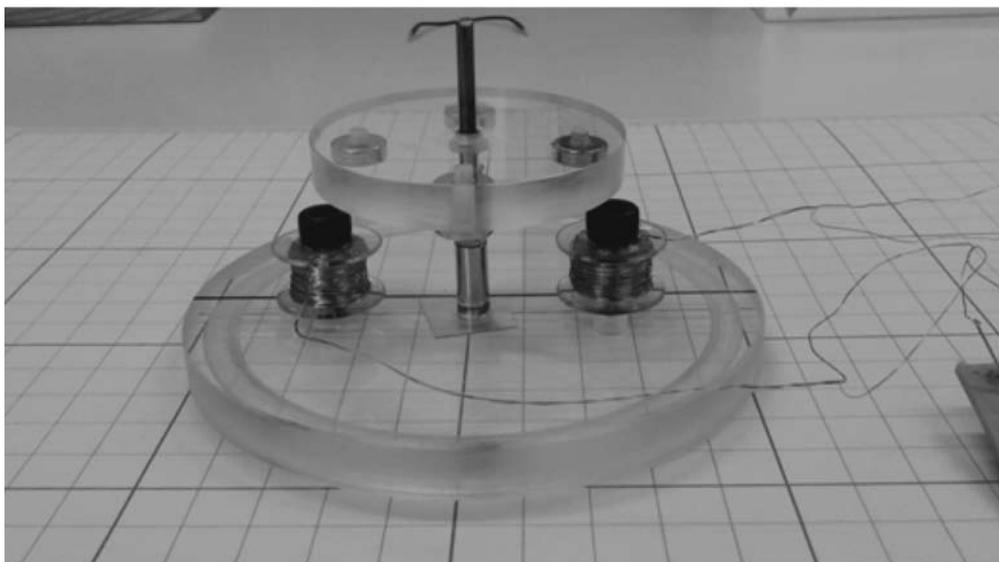


図3 検出コイル（左）、駆動コイル（右）とコマ、（中央）の位置関係

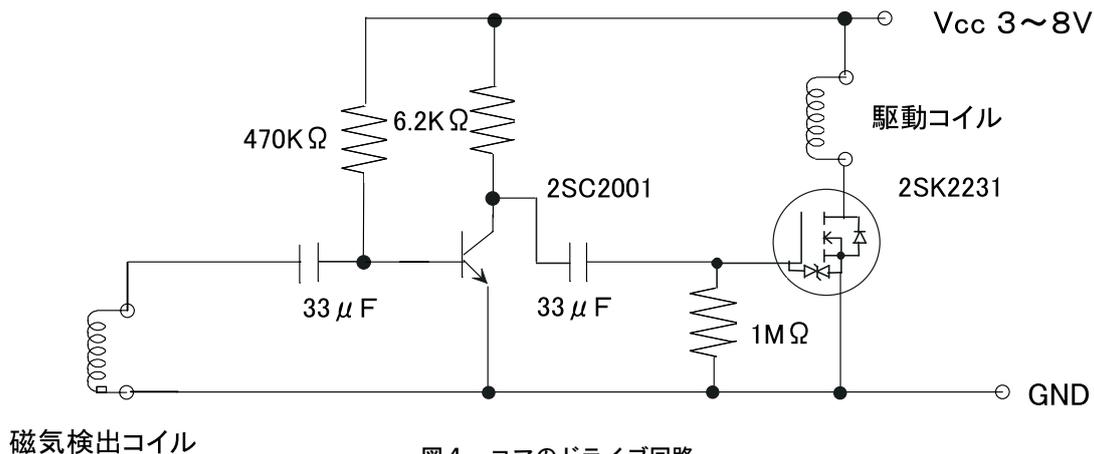


図4 コマのドライブ回路

束（磁場）を発生させる。この磁場とコマ上の固定磁石との間の反発力がコマの駆動力となる。

なお、先述のように極性が逆のものも入手することができるため、これらを組み合わせてリニアモータなどへの応用も可能と考えられる。リニアモータでは、N極とS極の組み合わせによる可動部分と、コイルによる固定部分が存在し、固定部分の極性の制御によって駆動力を発生させる。これらの関係は、この装置のコマとコイルの関係とまったく同じものであり、この装置の制御部分はリニアモータの基本構造部分に対応しているとも考えられる。この考え方を拡張して、複数の駆動コイルに極性が逆の磁束を発生させて、反発力と吸引力とを同時に加えるといったリニアモータの原理を再現することは難しくない。なお、この場合には、いきなり広げて直進運動にする必要はなく、便宜的に回転運動の環境を利用して、リニアモータの原理の理解やそれに基づいての回転の高速化の検討をするといった応用も可能である。

磁気センサなどとの組み合わせを行うことにより、磁場の様子を回転の様子と数値で観察することが可能であるため、その時間的変化の様子から交流モータの様子を理解することができる。特に、モータはその回転速度が速いため、モータの回転の様子は、オシロスコープなどの波形として観察することが多いが、それと磁場との対応が可視化できれば、モータをはじめとする磁気応用に関する理解をより深めることが可能となる。

2.2 回路の動作

図4にコマのドライブ回路の回路図を示す。この回路では、コマの磁石からの磁束変化の影響で検出コイルに発生した電圧信号を二つのトランジスタ

2SC2001, 2SK2231の接続で増幅し、駆動コイルに大きな磁束（磁場）を発生させる。ここで、2SC2001はNPN型シリコントランジスタで小信号用のものである。このトランジスタは、小型ラジオやカセットテープレコーダーなど、一般的な小型の電気機器に使われている⁴⁾。なお、この部分には小信号用のNPN型トランジスタであれば他の型のものを用いても問題ない。一方、2SK2231はシリコンNチャンネルMOS形のFET（電界効果トランジスタ）で、リレーの駆動や、DC-DCコンバータ、モータのドライブ（駆動）用として使われている⁵⁾。

コマの動作は次の通りである。まず、コマを台座上で左右どちらかに軽く回転させてやる。このコマは左右どちらにも、初めに回転力を与えた方向に回せる。コマの磁石が検出コイル付近を横切るとき、磁気検出コイルでコマの磁石からの磁束（磁場）の変化が信号として検出される。この信号をトランジスタ2SC2001で増幅して次段に接続する。この信号によって、次段のFETによるスイッチがONになって駆動コイルの磁束（磁場）が発生する。すなわち、駆動コイルによって回転するコマの磁石部分が通り過ぎるタイミングで、コマに取り付けた磁石に対して反発するようにN極の磁束が発生する。その反発力がコマの回転方向に対する回転力となる。

この回路への印加電圧は3~8[V]である。その際に3[V]程度の印加電圧でも回転はするが、その場合は停止しやすい。安定して回転するためには3.5[V]以上の印加電圧が必要である。したがって、電池での駆動を考えた場合には、アルカリマンガン電池・マンガン電池（初期電圧1.5[V]程度）およびニッケル水素電池（初期電圧1.2[V]程度）では3本以上が必要となる。なお、印加電圧3.5[V]時の電流

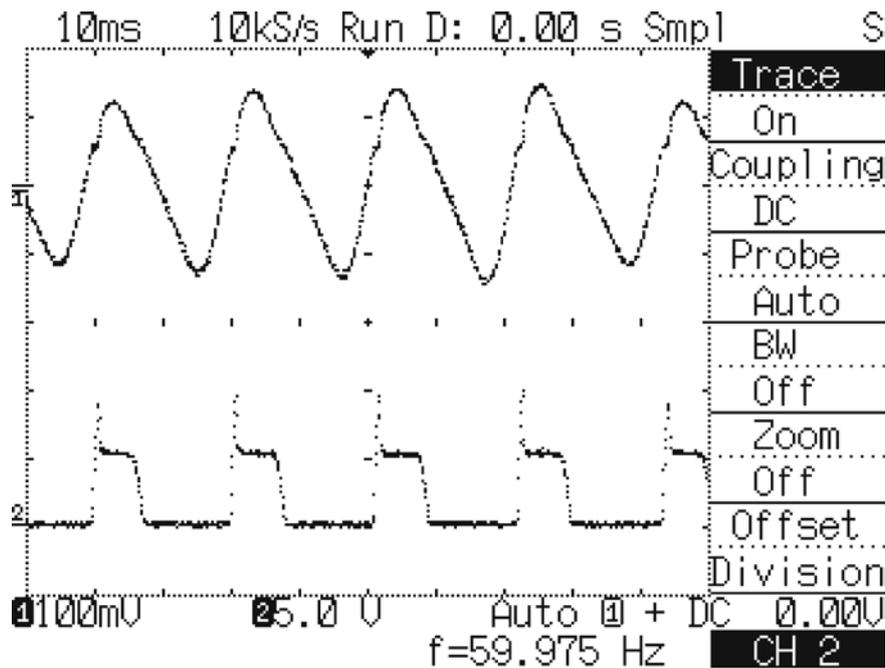


図5 検出コイルの電圧波形（上）とドレインの電圧波形（下）

は150 [mA] 程度であった。電源として電池を用いる場合には、比較的大きな電流を流すことから電池の容量には注意をする必要がある。

3. 検出波形と出力波形

図5に検出コイルの端子間電圧の波形（上側）と、FETのドレインの波形（下側）を示す。両者の大きさを比べると、検出コイルの信号波形が増幅されて、ドレイン側で数十倍の電圧で出力されていると考えることができる。したがって、ここではFETは駆動コイルを動作させるためのスイッチの役割と信号を増幅する増幅器の役割を果たしているといえるだろう。

図5上側の検出コイルの波形に注目する。検出コイルの波形は、コマの回転の様子を反映しているため、コマの回転数に対応した周波数の正弦波に近い交流の信号が得られている。この擬似的な正弦波の周波数は60 [Hz] 程度と低い。正弦波交流に近い波形であることを併せて考えると、この装置をモータとして捉えるだけでなく、簡易低周波発振器と考えることもできる。私達のこれまでの研究においても、市販の小型モータを発電機として用いる装置の報告を行っている⁶⁾が、モータ内のブラシなどの影響によって、発電波形にはノイズが目立っていた。また、市販のモータとギヤボックスを使用した場合、発電周波数も数十キロヘルツ台と高く、音との関連で交流を捉えるための教材としては不適當であった。本研究のコマの位

置検出信号は可聴周波数であるため、音声として交流を確認することも可能である。すなわち、オシロスコープを併用することで、波形と音の対応を観察する事が可能となる。

コマの回転は駆動コイルの磁場のタイミングに依存している。したがって、検出コイルの位置を変えることで速度を変えることができる。これは検出コイルの位置を変える行為が、生じる磁力のタイミングを変えることに相当することによる。例えば、効率よく回転力を与えたい場合は検出コイルの位置を回転方向に僅かにずらしてやり、磁石が駆動コイル上を通り過ぎた後に磁場を発生させて、生じる反発力の回転方向性を効率よく伝えてやればよい。このような制御（遅延）は回路上で行うことも考えられるが、回路的な難しさはブラックボックス的な扱いにつながる恐れがあるので、ここではコイルの配置によって制御のタイミングを調整することを考えている。したがって、電子回路について専門的に学習する生徒や学生に対しては遅延回路などを導入することも可能である。

4. まとめ

本研究では、固定磁石とコイルの間の相互作用によって磁力を発生させ、それを駆動力とするコマを提案した。このコマは、モータと同様の基本構造を持っている上、その構造が単純であるため、反発力の発生する様子や、それに伴う回転の様子を解り易く見せる

ことができる。併せて、発生する電圧の波形を確認することで、電気エネルギーから機械エネルギーへのエネルギー変換の様子を観察することが可能となる。

さらに、計測と制御の観点から考える。この装置における二つのコイルの役割は、それぞれ位置検出センサと、それに基づく制御出力装置である。この装置はアナログ回路であるが、計測から制御への情報伝達の経路が明白で、その動作のメカニズムは理解しやすくなっている。学習指導要領ではコンピュータを使った計測と制御についての学習を求めている²⁾が、コンピュータを使った制御の学習の前段階で、計測と制御の関わりを具体的に示す教材を用いる事で、計測制御の流れを具体的に理解することができるようになる。このようにメカニズムの学習を行うことで、単に物を作る、測るといった単体の作業のみを行うのではなく、ものの仕組みについて考究し、そのメカニズムを理解することの大切さを学ぶことができる。また、作業の流れを工夫することによって、新たな仕組みについて考究することも可能となるだろう。

実際の授業においては、装置の作製を行うこと、装置を動作させてコマを回転させることだけでなく、装置の動作の様子を理解させるために波形のモニタを行うことなども必要であるため、オシロスコープなどを用いる必要がある。その場合でも、回路内の電気信号は、実習で使用する程度の機能をもった安価なオシロスコープで十分に観察可能である。

次にコマの材料について考える。アクリルを用いた際の利点は、軽量である点、透明で内部構造が可視化できる点であるが、加工の難しさやコストを考えると必ずしも最善の方法とはいえない。特に、実習教材として活用する場合には、部品の加工を工程にどの程度入れるかが重要な問題となる。実際、生徒・学生に円形の削り出し・芯出しなどの加工をさせるのは、実験室の環境的にも、技術的にも難しい。このようなことから、代替の部品として安価な既存の部品の転用を検討すべきである。例えば、プーリーなど安価で既に円形で芯出しが済んでいる部品を活用することで、難しい加工が減り、さらに加工のコストを下げる事が可能となる。今後は、このような可能性を探る必要があるだろう。

さらに、電気の基礎知識の習得の視点から考える。エネルギー問題を電気の視点から考える場合には、直流、交流の概念およびそれらの相違点などを正しく理解しておく必要がある。例えば、電力の計算において、その単位をW (ワット) としてのみ理解すること

が多いが、交流も含めて電力を考えるときに、VA を用いる場合もある。このような表記はテーブルタップにも使われているものであるが、仮にW とVA の違いについて説明を求められても、交流についての知識がないと説明を理解することができない。少なくとも、位相の概念が必要となる。

今回の装置の検出コイルには、正弦波が現れており、そのタイミングをどのように駆動コイルに伝えるかで回転力を制御することが可能である。このタイミングは位相そのものと考えて良く、タイミングを考えることで、位相の概念の理解を促すことも可能となる。

近年、化石エネルギーからの再生可能エネルギーへの移行が叫ばれているが、これを進めることは電気という形態でのエネルギー利用の頻度と量が増加することを意味している。こういった流れにより、現在のインフラストラクチャーについては新たな設備投資が必要とされている。また、これに併せて電気関連技術の更なる発展、既存設備・技術の整理・再認識が必要とされるだろう。

このような技術の発展、インフラストラクチャーの更新には多額の費用がかかる。どのような形での費用負担であれ、それは受益者である国民が支払う事になる。このように考えると、科学技術に対して国民の理解を得て科学技術の社会的受容性の向上を図ることは、これまで以上に重要なこととなるだろう。このような意味で、今回提案したような基礎的な科学の知識を普及するための教材はさらに必要となるであろう。

文 献

- 1) PISA2006年調査については、例えば、[http://www.pisa.oecd.org/pages/0,2987,en_32252351_32235731_1_1_1_1,00.html](http://www.pisa.oecd.org/pages/0,2987,en_32252351_32235731_1_1_1_1_1,00.html)、あるいは、http://202.232.86.81/b_menu/hakusho/html/hpaa200801/08060518/018.htm
- 2) 中学校学習指導要領第8節、pp.98-99、平成20年3月告示、文部科学省、東山書房 (2008)
- 3) サンギョウサプライ、<http://www.e-sangyo.jp/>
- 4) <http://www.alldatasheet.jp/datasheet-pdf/pdf/208931/TEL/2SC2001.html>
- 5) <http://www.alldatasheet.jp/datasheet-pdf/pdf/30611/TOSHIBA/2SK2231.html>
- 6) 櫻田安志、横山安弘、模型用小型直流モータを用いた交流発電機、弘前大学教育学部研究紀要クロスロード、Vo.13、pp.7-16 (2009)

(2010. 2. 1 受理)