

クリップモータのコイル形状に関する回転特性の解析

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 静岡大学教育学部 公開日: 2012-03-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 江口, 啓, 櫻井, 康平, 畑, 俊明 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00006491

クリップモータのコイル形状に関する回転特性の解析

ANALYSIS OF ROTATION CHARACTERISTICS CONCERNING COIL SHAPE OF A PAPER
CLIP ELECTRIC MOTOR

江 口 啓* 櫻 井 康 平** 畑 俊 明***

Kei EGUCHI, Kouhei SAKURAI, Toshiaki HATA

（平成23年10月6日受理）

Abstract

Recently, an electric car attracts many attentions to reduce the carbon dioxide exhausted by the car. For this reason, it is important to learn the mechanism of an electric motor in the primary school and the secondary school. The function of the electric motor is based on the interaction between electricity and magnetism. To study the interaction between electricity and magnetism, a paper clip electric motor is one of the most popular teaching materials. The paper clip electric motor is built with a permanent magnet and a coil by winding the copper wire several times and creating loops. However the simplicity of making a coil does not allow plenty of scope for student's activities. In this paper, we analyze the rotation characteristics concerning the coil shape of a paper clip motor. The theoretical results enable us to create the various types of paper clip electric motor. The validity of the theoretical results was confirmed through computer simulations and experimental classes. The experimental classes showed that the variety of the coil shape stimulates the students' creativity.

1. 緒言

近年、地球温暖化を始めとする環境問題に注目が集まっている。地球温暖化の原因の一つとして、大気中の温室効果ガスの濃度の上昇が挙げられる¹⁾が、この温室効果ガスのうち、人為的に排出されるものの中で最も温度上昇に影響を与えるものは二酸化炭素である。このため、京都議定書において各国が二酸化炭素の削減目標を設定し、排出量を抑えようと働きかけている。このような流れを受け、環境負荷の小さい乗用車として電気自動車の普及が進められている。自動車メーカーにおいては2010年4月には三菱自動車工業株式会社からi-MiEV²⁾の個人向けの販売が、2010年12月には日産自動車株式会社からLEAFの販売されており、経済産業省においては、電気自動車（EV）やプラグインハイブリッド車（PHV）の普及に先進的に取

*静岡大学教育学部

**丸栄陶業株式会社

***静岡大学名誉教授

り組むモデル事業として「EV・PHVタウン構想」を打ち出して、首都圏や関西を中心に電気自動車用の急速充電施設の設置が進められるなどの施策を行っている。このように、今後はこれまでのガソリンなどの化石燃料を燃焼させて動力を得る内燃機関を用いた自動車から、モータとバッテリーを利用した電気自動車の普及が広がっていくことが予想される。

一方、学校教育においても、環境問題やエネルギー問題は重要視されてきている。旧中学校理科学習指導要領においては、「ア:エネルギー資源」「イ:科学技術と人間」の2項目だけの学習だったものが、新中学校理科学習指導要領では総合的に考える力を養う「(7) 科学技術と人間」が「ア:エネルギー」「イ:科学技術の発展」「ウ:自然環境の保全と科学技術の利用」の3項目に細分化された。特に、「ウ」では「持続可能な社会をつくることが重要であると認識すること」が明文化されている。また、中学校技術科においては、新たに「エネルギー変換に関する技術」が設けられるとともに、学習目標として「技術と社会や環境とのかかわりについて理解を深め、技術を適切に評価し活用する能力と態度を育てる。」と明記されるなど、環境問題やエネルギー問題を重要視した内容に改訂されている。このように、現在の社会情勢からも今後はモータに関する学習の重要度が高まっていくものと考えられる。

モータに利用される原理や法則を扱う教科としては、中学校理科や技術・家庭科が挙げられるが、これらの教科で広く利用されている教材の一つとしてクリップモータ^{3~8)}がある。クリップモータは最も基本的な直流モータであり、その長所として、回転の原理を簡潔に例示できる点、安価に製作が可能である点、身近な材料で回転の様子を観察できるので製作者の興味を引くことができる点などが挙げられる。その一方で、クリップモータが最小限の部品で構成できるために、生徒はマニュアルに沿って組み立てるだけになってしまいがちである点、回転力が小さいために大きな装置を動かすための動力源としては利用できない点などが短所として挙げられる。なかでも、新学習指導要領第1章総則第1教育課程編成の一般方針において、「主体的に学習に取り組む態度を養い、個性を生かす教育の充実に努めなければならない。」と明記されていること、また、同第4指導計画の作成等に当たって配慮すべき事項2(2)として「各教科等の指導に当たっては、体験的な学習や基礎的・基本的な知識及び技能を活用した問題解決的な学習を重視するとともに、生徒の興味・関心を生かし、自主的、自発的な学習が促されるよう工夫すること。」と明記されていることから、クリップモータを教材として扱う上で、生徒がモータに工夫を加える余地が少ない点が最大の問題^{3~8)}である。クリップモータは、電気と磁気の関係性を明らかにし、モータの仕組みを説明する際に有効な教材であるが、クリップモータの製作において生徒の個性を反映するような要素があることが望ましい。

本研究では、クリップモータのコイル形状に関する回転特性を解析することで、生徒が各々の工夫を製作に反映できるようなクリップモータ教材の開発を行う。具体的には、以下に示すコイル形状をもつクリップモータに関して検討を行う。①コイルの片側を加工することで、回転すると対称形の図形の浮かぶ、回転対称型コイルを用いたクリップモータ。②平面的なコイルを立体的に展開した形状を持つ、籠形コイルを用いたクリップモータ。③複数のコイルを連結した形状を持つ、連結コイルを用いたクリップモータ。以上の3種類について、それぞれ回転トルクの変化の理論解析を行った後、実践授業を行うことで提案教材の検討を行う。

2. クリップモータの回転原理

2.1 円形コイルを用いたクリップモータ

本節では、提案教材の基礎となる円形コイルを用いたクリップモータの回転原理について説明する。図1に示すように、クリップモータの構成部品は大きく分けると入力電源となる乾電池、磁界を与えるための界磁磁石、コイルを作るためのエナメル線、コイルを支えるクリップ、クリップを固定するための土台の4種類である。製作方法は、まずエナメル線を円形に巻いて作った円形コイルの両端の皮膜を削り取り、その円形コイルを界磁磁石の両端に立てたクリップで支持する。この円形コイルに通電することで、コイルの発生する磁界の変化によってコイルに電磁力を発生させる。図1に示すように、電流の向きをX軸方向、力の働く向きをY軸方向、磁界の働く向きをZ軸方向と仮定すると、コイル上辺では $-X$ 方向に、下辺では X 方向に電流が流れる。このため、フレミングの左手の法則からコイル上辺には $-Y$ 方向に、コイル下辺には Y 方向に力が働くことになり、コイルに回転力が生まれる。このままの状態だと、コイルが 180° 回転した場合に、コイルに働く回転力がそれまでの回転方向とは逆向きに働くために回転力が失われる。このため、コイルの製作においては、コイルの皮膜を削る際に片側を全面、もう片側を半面だけ削ることで、モータの整流子に相当するものを加工によって製作する必要がある。その際に留意すべき点として、支持部を中心に上部下部と分けた場合には、常に半巻き分の余分な導線が不釣り合い量として上下のどちらかに存在する点である。コイルに発生する力は界磁磁石に近いほど強くなり、また、流れる電流が強いほどコイルに働く力は強くなる。すなわち、図2に示すように不釣り合い量を持つ側が最も界磁磁石に近づく真下に来る時から、 $\pm 90^\circ$ の範囲の半面を削るのが最も効率的な皮膜の削り方となる。

2.2 円形コイルを用いたクリップモータの回転実験

本節では、図3に示す実験装置を用いることで、界磁磁石とコイルとの距離、コイルの巻き数と磁力の強さを変化させた場合において、何回巻いたコイルが界磁磁石からどの高さまで離れていても回転できるか否かを測定する。実験に用いた器具を表1に示す。実験に用いたコイルは、2.1節で説明したように皮膜を剥がした。また、コイルの直径の違いによる誤差を減らすために、それぞれの巻き数につき4個のコイル（a～d）を用いた。なお、この実験に用いたフェライト磁石の中心を通った場合の磁束密度の変化は図4の通りである。



図1 クリップモータの回転原理

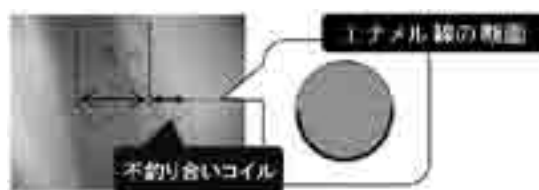


図2 最適な皮膜の削り方

表1 実験材料

単1電池1個	0.6mm エナメル線
わに口クリップ	高さ固定器
消しゴム	紙やすり
クリップ	矩形フェライト磁石 (25mm × 15mm × 5mm)



図3 回転実験装置

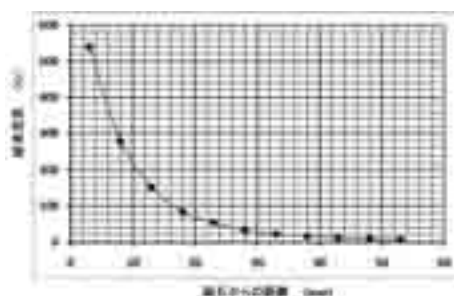


図4 界磁磁石の磁束密度の変化

実験手順は、以下の通りである。

1. エナメル線を電池に巻き付けてコイルを製作する。ここで、コイルの直径は約32mmに定める。
2. 紙やすりを用いてコイルの片端を全面、もう一端を半面だけ削る。
3. クリップを伸ばして、固定器にコイルをセットする。固定器は磁石とコイルの下部との距離が3mmになる地点からスタートして、5mm単位で磁石からの距離を離す。具体的には、3mm, 8mm, 13mm, 23mm, 28mm, 33mm, 38mm の7種類の距離に対して実験を行う。ここで、コイルの初期位置は、コイルを界磁磁石に対して垂直に立てた状態 ($\theta = 0$) とする。
4. モータ部と電池を導線で繋ぎ、回転の可否を調べる。

実験結果を表2に示す。実験結果から、クリップモータはコイルの巻き数に比例して回転しやすく、またコイルと界磁磁石との距離が離れるほど回転し難くなることが分かる。

表2 回転実験

試料番号	内径	外径	1st coil	2nd coil	3rd coil	4th coil	5th coil	6th coil	7th coil	8th coil	9th coil	10th coil
A	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
B	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
C	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
D	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
E	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
F	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
G	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
H	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
I	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	29.7	32.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30.1	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	31.3	33.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

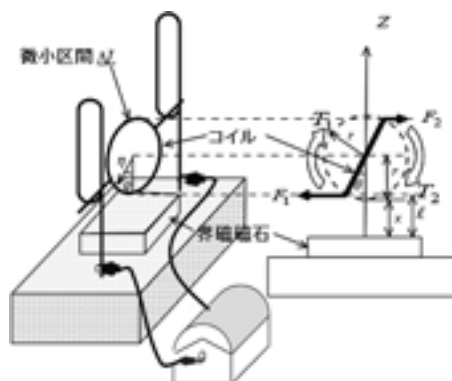


図5 コイルと磁石との位置関係

2.3 円形コイルを用いたクリップモータの回転トルクの理論解析

円形コイルを用いたクリップモータの回転力について、界磁磁石の中心とコイルの中心が一致する場合における中心軸上の円形コイルの下端の微小区間 ΔL に働く電磁力を考える。ここで、コイルと磁石との位置関係は図5に示す通りである。コイルの回転力 F は、磁界中に置いた電流の流れている導体に働く電磁力を考えれば良いので、磁束密度を B 、コイルに流れる電流を I 、導体の長さを ΔL とすると、式(1)で表わされる。

$$\vec{F} = \Delta L \vec{I} \times \vec{B} \quad (1)$$

同一の長さで同一の電流が流れる区間 ΔL についての変化を考えるため、円形コイルのクリップモータに働く回転力は磁束密度 B によって変化する。そこで、コイルの下端が受ける磁束密度 B の変化を考える。界磁磁石がコイルに与える磁束密度 B は、界磁磁石表面からの距離の2乗に反比例する。界磁磁石が十分に大きく、コイルがどの位置にあっても界磁磁石中心の磁束密度の変化が適用できるものと仮定すると、磁束密度 B はコイル下端と界磁磁石との距離 l によって変化する。コイルは回転運動をするため、コイルと界磁磁石との距離を x 、コイルの半径を r 、コイルが最も下端にある時を $\theta = 0$ とすると、界磁磁石との距離と磁束密度 B の変化

は式(2)のように表わされる。

$$l = x + r(1 - \cos \theta), \quad B \propto \frac{1}{\{x + r(1 - \cos \theta)\}^2} \quad (2)$$

式(2)で求められた磁束密度はコイルを作る導線それぞれに働くため、コイルの回転力はコイルの巻き数に比例する。力を受ける導線はコイルの巻き数を n とすると、片側は n 本、もう片側は半巻き分の不釣り合い量を加えた $n+1$ 本である。また、コイル下端に働く力 F_1 は式(3)のように表わされる。この時、図5に示す様に、コイルに沿って座標 (η, φ) を導入する。ただし、 $\varphi=0$ は最下端とする。従ってコイルに沿って積分すると次式となる。

$$F_1 \propto \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{(n+1)\eta d\varphi}{\{x + r(1 - \cos \theta)\}^2} \quad (3)$$

この力による回転トルク T_1 は図5のように時計方向に作用し、その値は次式となる。但し、時計方向を正とする。

$$T_1 \propto \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{(n+1)r \cos \theta \eta d\varphi}{\{x + r(1 - \cos \theta)\}^2} \quad (4-1)$$

しかし、この積分は複雑な式となり積分により値が得られたとしても、本論文の趣旨である下端が回転トルクの主要な働きををすると言う事を明確に示せない。そこで、 $\varphi=0$ 近傍のみに代表区間 ΔL をとり、 $\Delta L = \eta d\varphi = 1$ として評価することとした。従って、式(4-1)は近似的に次式となる。

$$T_1 \propto (n+1) \frac{r}{\{x + r(1 - \cos \theta)\}^2} \cos \theta \quad (4-2)$$

同様に、今度はコイル上端の区間 ΔL に働くトルクについて考える。式(4-2)と比較して 180° 位相がずれた地点の n 本の導線がある時を考えればよいのでこの区間に働くトルク T_2 は式(5)のように表わされる。

$$T_2 \propto n \frac{r}{[x + r\{1 - \cos(\theta + \pi)\}]^2} \cos(\theta + \pi) \quad (5)$$

回転トルク T はこの下端に働くトルク T_1 と下端に働くトルク T_2 の合計である。従って、回転トルク T の変化は式(6)として表わされる。

$$\begin{aligned} T &\propto (n+1) \frac{r}{\{x + r(1 - \cos \theta)\}^2} \cos \theta - n \frac{r}{[x + r\{1 - \cos(\theta + \pi)\}]^2} \cos(\theta + \pi) \\ &\cong (n+1) \frac{r}{[x + r(1 - \cos \theta)]^2} \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)においては、コイルが磁石に一番近くなる瞬間におけるトルクのみでコイル全体にかかるトルクを近似的に扱うことが可能であることを表し、距離のファクタとして導入されている分母も磁場の項に繰り込めることを意味している。式(6)についてコイル下端との距離を

13mm、コイルの半径を16mm、コイルの巻き数を3とし、コイル下端が最下端にある時に働くトルクを100%として、回転トルクの変化を求めると図6に示すグラフが得られる。但し、同図においては、回転トルクが $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ の区間でのみ作用するので、この区間での回転トルクだけを図示している。また、この時のコイルの上端と下端に働いているトルクのそれぞれの变化を求めると、図7に示すグラフが得られる。

2.4 考察

回転トルクは、 $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ の区間でのみ作用するので、残りの 180° の区間は慣性力だけによって回転する。コイルには、半巻き分の不釣り合いがあり、この不釣り合い量がクリップモータの回転を難しくする。しかしながら、巻き数が増加していった場合、この不釣り合い量の影響の割合は相対的に小さくなる。また、クリップモータでは、片端の導線に回転トルクのピークが来ている時に、もう一端のコイルに働く回転トルクは全体の力に対して非常に小さいものとなる。クリップモータは半回転分しか電流を流さないため、電流を流している時に磁石から遠い側の導線は回転の最中にほとんど回転トルクを与えないことになる。これは、クリップモータにおいては片側にしか界磁磁石が存在しないこと、またコイルと界磁磁石との距離がコイルを支えるクリップの長さによって制限されることが原因である。コイルの径が小さくなればその分だけ距離の差による回転トルクの差は解消されるが、モーメントを考えた場合にはトルクが小さくなるという問題点がある。

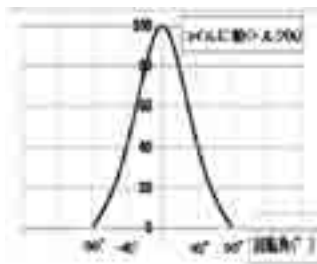


図6 円形コイルの回転トルクの変化

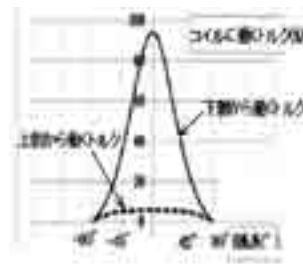


図7 円形コイルの回転トルクの割合

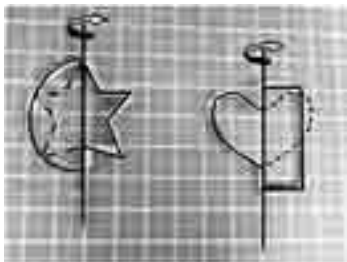


図8 回転対称型コイル

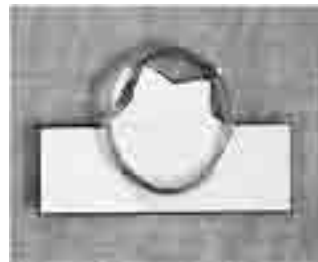


図9 回転対称型コイルの型紙の一例

3 回転対称型コイルを用いたクリップモータ

3.1 回転対称型コイルの構成

回転対称型コイルは、2章で示したクリップモータのコイルの片側が回転トルクに与える影響が小さいという特徴を利用したものであり、図8のように回転への影響の小さい片側のコイルを折り曲げて加工することで、回転時に折り曲げた形に合わせた対称形の図形が浮かび上がるものである。回転対称型コイルを用いたクリップモータは、これまでのクリップモータと部

品点数は変わらず、低価格を維持したまま導入が可能である。また、これまで通りのクリップモータの製作を行った後、製作したコイルに再び加工を加えるだけでよいので、導入が容易である。

3.2 回転対称型コイルを用いた実践授業

提案教材の有効性を確認するために、小学生と中学生を対象に実践授業を行った。実践授業の詳細は下記の通りである。

①小学生を対象とした実践授業：

日時 2009年9月19日 対象 小学生12名（3年生9名 4年生1名 5年生2名）

小学生を対象とした実践授業では、コイルが回転する仕組みを小学生に説明した後、はじめに円形クリップモータを製作してもらった。ここでは全員の児童が円形のクリップモータを製作することができた。回転対称型コイルに関しては、児童が円形コイルを用いたクリップモータを完成させた後に、星型やハート形になる回転対称型コイルを例示し、図9に示す型紙に沿って円形コイルを折り曲げることで製作してもらった。実践授業の後に、提案教材に関して生徒がどのような感想を持ったか、また対称性をどのように理解しているのかを、自由記述式のアンケートによって検証した。アンケートでは、「コイルの両端を止める際、指の力が足らず、コイルがほどけてしまう。」「エナメル線の被膜を半分だけ削る作業を正確に行うのが困難であった。」などの理由から、クリップモータ自体の製作を難しいと感じる生徒が多くみられた。しかしながら、「星形になったのがすごかった」「丸や星の形をしていておもしろかった」など提案教材が児童の関心を引いていたことを示す結果も合わせて得ることができた。

②中学生を対象とした実践授業：

日時 2009年11月18日 対象 浜松市立都田中学校 1年生 37名

中学生を対象とした実践授業では、右ねじの法則やフレミングの左手の法則など、電磁気学の基礎的な内容を基に、クリップモータの回転する仕組みを中学生に説明した後、実際にクリップモータを製作してもらった。小学生対象の場合と同様に、円形コイルを用いたクリップモータを完成させた後、星型やハート形になる回転対称型コイルを例示し、型紙に沿ってコイルを折り曲げることで星型の回転対称型のコイルを製作してもらった。

自由記述式の事後アンケートでは、小学生対象の実践と同様に「加工の難しさ」を挙げる生徒が多くみられたが、大多数の生徒が、「おもしろい」「またやってみたい」と回答していた。回転対称型のコイルに関しては、加工が難しく、もっと加工の優しい図形を求める回答が寄せられた。その一方で、時間内に上手く加工が終わらなかったが、自宅に戻って続きをしたら上手く回せたという記述もあった。

3.3 回転対称型コイルを用いた実践授業の結果と考察

小学生対象の実践では製作が難しいという回答が目立ったが、児童の中には最初に配られたエナメル線では物足りずに、新しいエナメル線で2個目のコイルを作り始める児童の姿も見られた。また、中学生の実践においても、このような形ならもっと易しく加工できるのではないかと提案する生徒や、自宅に持ち帰ってさらに教材を工夫するなど、教材に対して強い関心を示していた。このように、回転対称型コイルを用いたクリップモータは、児童・生徒の関心・意欲・態度を育てるという点では良好な結果を示した。

対称性に関する学習は小学6年生の学習内容であり、今回の参加者はまだ学習していない児童ばかりであったが、全体の約1/4の児童が左右対称になる図形を考案できており、一定の理解が得られたと考えられる。また、どちらの実践授業においても、回転対称型コイルが生徒の興味を引いていた反面、多くの生徒が製作の難しさを感想として挙げていた。今回の2例の実践では皮膜の削りやすさを考慮し、径が太めのエナメル線（0.8mm）を使用した。このことが、曲げ加工を困難にした原因であると考えられる。この点を改善することができれば、回転対称型コイルはクリップモータの発展として生徒の興味や関心を高めるのに有効な教材になると考えられる。

4 籠型コイルを用いたクリップモータ

4.1 籠型コイルを用いたクリップモータの特徴

回転対称型コイルのようなコイルに加工を施すという手法は生徒の興味や関心を引く上で有効であったが、エナメル線を曲げるという作業が難しいという意見が多数寄せられた。そのために、コイル加工の別の手段として、図10に示す立体的な形状を持つ籠型コイルを考案した。籠型コイルは図10に示すように、円形のコイルのそれぞれの導線を特定の角度に展開することで、球体のような形状に加工したものである。具体的には、複数回巻かれた円形コイルをクリップモータの回転方向にずらすことで籠型コイルは製作される。籠型コイルの特徴としては、円形コイルよりも回転体としてバランスの取れた形状となる点、一度に多くの導線を曲げることが必要な回転対称型とは異なり加工が容易になる点などが利点として挙げられる。

4.2 籠型クリップモータを用いた回転トルクの解析

2章で求めた円形コイルを用いたクリップモータの理論式を利用することで、籠型コイルに働く回転トルクの変化について解析を行う。同解析においては、3巻きのコイルを用いるものと仮定し、コイルと界磁磁石との距離を x 、コイルの半径を r とする。

籠型コイルにおいても、最適な回転トルクを得るのは不釣り合い量を持つ側が界磁磁石に近い側に位置する場合になる。図11に示すようにコイルを a° だけ展開した場合には、式(4.2)が $\pm a^\circ$ だけ移動したものと、 $\pm 2a^\circ$ だけ移動したものがそれぞれ1本ずつ存在することになる。このため、下端に働く回転トルク T_1 は式(7)で表わされる。

$$T_1 \propto \frac{r}{\left[x+r\{1-\cos(\theta+2a)\}\right]^2} \cos(\theta+2a) + \frac{r}{\left[x+r\{1-\cos(\theta+a)\}\right]^2} \cos(\theta+a) + \frac{r}{\left[x+r\{1-\cos(\theta-a)\}\right]^2} \cos(\theta-a) + \frac{r}{\left[x+r\{1-\cos(\theta-2a)\}\right]^2} \cos(\theta-2a) \quad (7)$$



図10 籠型クリップモータ



図11 籠型コイルの形状

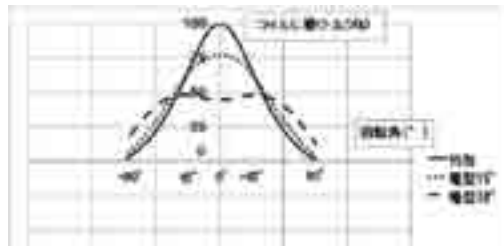


図12 籠型コイルの回転トルクの変化



図13 実践の様子

一方、コイル上端に働く回転トルク T_2 の変化は、式(6)の場合と同様に無視することができるために、図11の籠型コイルの回転トルク T は式(8)として求められる。

$$T \propto T_1 \quad (8)$$

式(8)についてコイル下端と界磁磁石との距離を13mm、コイルの半径を16mmと設定し、3巻きの円形コイルの下端が最下端にある時に働くトルクを100%として、展開角度を15°、30°と広げていった場合の回転トルク T の変化を求めると図12に示すグラフが得られる。但し、回転トルクは $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ の区間だけに作用するので、この区間での回転トルクだけを図示している。

4.3 籠型コイルを用いた実践授業

提案教材の有効性を確認するために、小学生と中学生を対象に実践授業を行った。実践授業の詳細は下記の通りである。

①小学生を対象とした実践授業：

日時 2010年9月11日

対象 小学生18名（1年生3名 2年生6名 3年生4名 4年生2名 5年生1名 6年生2名）

小学生に対する実践授業は、独立行政法人国立青少年教育進行機構の子ども向け教材開発・普及活動助成事業のご支援を頂いて実施した。実践授業では、コイルが回転する仕組みを小学生に説明した後、実際にクリップモータを製作してもらった。図13は実践授業の様子である。籠型コイルに関しては、円形コイルを用いたクリップモータを完成させた後に籠型コイルを例示し、円形コイルを展開することで製作してもらった。実践授業の後に、提案教材に関して生徒がどのような感想を持ったかを、自由記述式のアンケートによって検証した。アンケートでは、単純にクリップモータが回ることに関心を覚える生徒が大多数であり、特に籠型について記述する生徒は見られなかった。

②中学生を対象とした実践授業：

日時 2010年11月18日 対象 浜松市立都田学校 1年生 32名

中学生に対する実践授業は、科学技術振興機構（JST）サイエンスパートナーシップ・プロジェクトのご支援を頂き、中学校技術・家庭科の授業において実施した。実践授業では、右ねじの法則やフレミングの左手の法則などの電磁気学の基礎的な内容を基に、クリップモータの回転する仕組みを中学生に説明した後、実際にクリップモータを製作してもらった。さらに、円形コイルを用いたクリップモータを完成させた後に籠型コイルを例示し、自分たちの作った円形コイルのクリップモータと例示した籠型コイルの回転の違いについて自由記述形式で回答してもらった。アンケートでは、考察を記入した生徒のうち円形コイルと籠型コイルとの回転の違いについて、回転速度の違いを指摘する生徒が3名現れた。

4.4 籠型コイルを用いた実践授業の結果と考察

籠型コイルは、コイルの展開角度を大きくしていくと回転トルクの変化は次第に緩やかになっていく。これはコイルが展開されることで、それぞれのエナメル線に働く力の最大点が回転位置によって異なるためである。このことから、籠型コイルは瞬間における最大回転トルクの大きさが円形コイルよりも劣るために、始動時は回転しにくくなる。その一方で、回転を開始した後では円形コイルに比べて長い間回転トルクが働き、安定した回転が可能となる。また、籠形コイルでの被膜の削り方は、円形コイルと同様に $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ の区間で回転方向が切り替わるようにコイル両端の皮膜を削るが、籠型コイルにおいては有効な回転トルクが得られる区間が導線の展開角度によって変わるという特徴がある。

我々が普段目にする直流モータは多くの場合に電機子の相数を増やすことで、常に安定した回転トルクが生まれるように工夫されている。コイルを展開することで強い回転トルクの発生する位置を分散させ、安定した回転を実現する籠型コイルは、円形コイルと比較して実用的なモータに近い考え方を持ったコイルであると言える。小学生を対象とした実践授業では、籠型コイルに加工した際に、回転していたモータが回転しなくなる場合が多くみられたため、籠型コイル自身に特別な興味を示す生徒はあまり見られなかった。一方、中学生を対象とした実践授業では、2種類のクリップモータを比較する形で生徒の反応を調べたが、回転トルクの最大の力は小さくなるが、回転トルクが均一になることでスムーズに回転するという籠型コイルの特徴をよくつかんだ回答が得られた。このように、学習の進んだ中学生を対象とした場合では、コイルの形状の違いによる回転の変化に気づくだけの力が備わっているため、生徒の興味や関心を引くだけでなく、なぜそのような変化が起こるのかという発展的な学習を促すことができる。このため、単純に回るだけの教材から、実用的なモータの学習へと関連付けることも可能となる。この点において、籠型コイルは新しいクリップモータの一つとして有効な教材であると考えられる。

5 連通型コイルを用いたクリップモータ

5.1 連通型コイルを用いたクリップモータの特徴

連通型コイルとは、複数のコイルを連結した形状を持つコイルである。具体的には、図14に示すようにコイルの皮膜を全て削った側同士をねじり合わせることで、二つのコイルの軸をずらさずにコイルを繋げたものである。連通型では2つのコイルがなす角度を変化させることで

回転トルクに変化を与えることができるという特徴を持つ。また、連通型コイルは図15に示すように、電流の流し方によって直列連通型と並列連通型の2種類に分類できる。ここで、直列連通型とはコイルの一端からもう一端へ電流が流れるように配線したものであり、並列連通型とは中央の連結部分からそれぞれの端に電流が流れるように配線したものである。

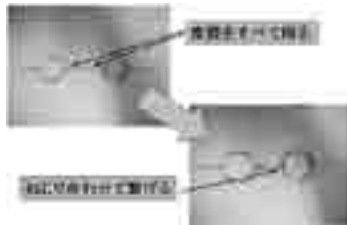


図14 コイルの連結



図15 直列連通型コイルと並列連通型コイル

5.2 直列連通型コイルの回転トルクの解析

理想状態において、直列連通型クリップモータにおけるコイルを抵抗であると仮定した場合、同じ巻き数の円形コイルとの回路の抵抗の大きさ比較をすると図16のように表現できるため、直列連通型コイルの回路全体の抵抗は円形コイルの場合と比較して倍になる。すなわち、直列連通型コイルに流れる電流は円形コイルに流れる電流の半分になるので、直列連通型コイルのコイル一つに働く回転力は式(1)から円形コイルの半分になる。また、直列連通型コイルは、図17に示すように2つのコイルのなす角度を変化させることによってコイル全体の回転トルクが変化する。このことから、コイルの半径 r の n 巻きコイルを2個持つ直列連通型コイルでは、コイルと界磁磁石との距離が x になる位置にコイルを置いた時の回転トルク T は、片側のコイルを基準として固定し、もう一方を a° 回転させた場合に、式(9)で求められる。

$$T \propto \frac{1}{2}(n+1) \frac{r}{\{x+r(1-\cos\theta)\}^2} \cos\theta + \frac{1}{2}(n+1) \frac{r}{[x+r\{1-\cos(\theta+a)\}]^2} \cos(\theta+a) \quad (9)$$

式(9)において、コイル下端と界磁磁石との距離を13mm、コイルの半径を16mm、巻き数3の円形コイルに働く最大の回転トルクを100%として、この回転トルク T について、コイルのなす角度 a を 90° 毎に変化させていった場合の回転トルクの変化を求めると、図18に示すグラフが得られる。但し、回転トルクは $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ の区間だけに作用するので、図18ではこの区間での回転トルクだけを図示している。

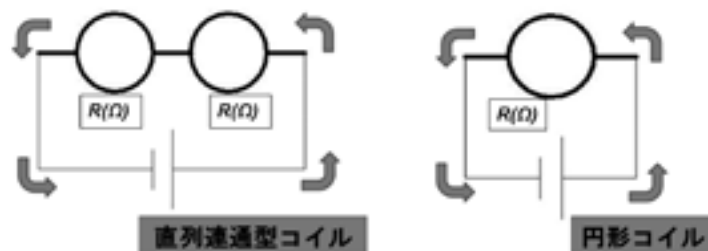


図16 等価回路による比較



図17 直列連通型コイルの角度の変化

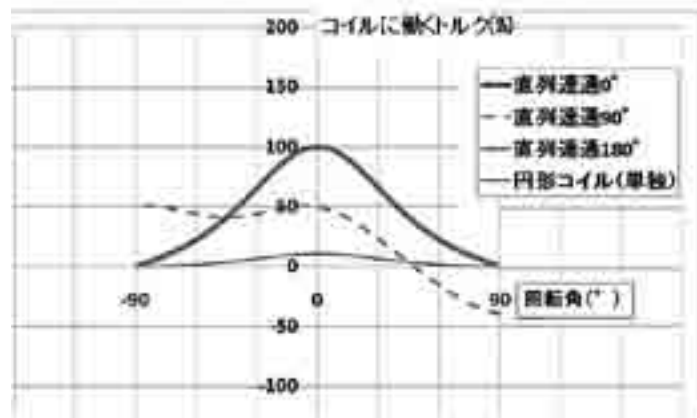


図18 直列連通型コイルの回転トルクの変化

5.3 並列連通型コイルの回転トルクの解析

理想状態において、並列連通型クリップモータにおけるコイルを抵抗であると仮定した場合、同じ巻き数の円形コイルとの回路の抵抗の大きさ比較をすると図19のように表現できる。この並列連通型コイルの回路全体の抵抗は円形コイルの場合と比較して半分になる。すなわち、並列連通型コイルのそれぞれのコイルに流れる電流は円形コイルに流れる電流の倍になるので、並列連通型コイルのコイル一つに働く回転力は式(1)から円形コイルと同様になる。また、並列連通型コイルも、直列連通型コイル同様コイルのなす角度を変化させることによってコイル全体の回転トルクは変化する。このことから、コイルの半径 r の n 巻きコイルを2個持つ並列連通型コイルをコイルと界磁磁石との距離が x になる位置に置いた時の回転トルク T は、円形コイル2個分の回転トルクが働くものと同様であると考えられる。そのため、片側のコイルを基準として固定し、もう一方を a° 回転させた場合、回転トルクは式(10)で求められる。

$$T \propto \left[(n+1) \frac{r}{\{x+r(1-\cos\theta)\}^2} \cos\theta \right] \cdot H \left[-\left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] + \left\{ (n+1) \frac{r}{[x+r\{1-\cos(\theta+a)\}]^2} \cos(\theta+a) \right\} \cdot H \left[-\left(\theta + a + \frac{\pi}{2} \right) \left(\theta + a - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (10)$$

ここで、 $H(\cdot)$ はヘビサイドのステップ関数である。式(10)において、コイル下端と界磁磁石との距離を13mm、コイルの半径を16mmとし、3巻きの円形コイルに働く最大の回転トルクを100%と定義して、この回転トルク T についてコイルのなす角度 a を 90° 毎に変化させていった場合の回転トルクの変化を求めると、図20に示すグラフが得られる。

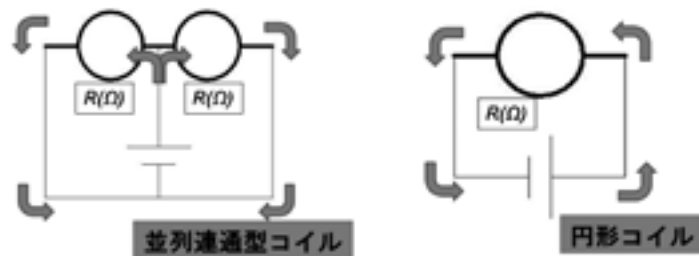


図19 等価回路による比較

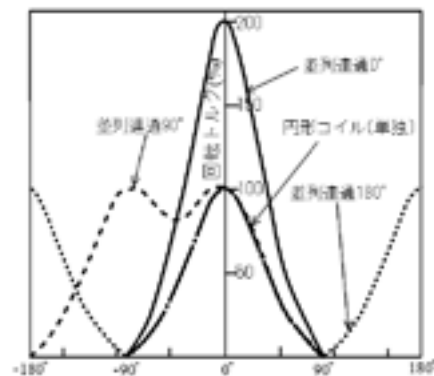


図20 並列連通型コイルの回転トルクの変化

5.4 並列連通型コイルに対する考察

直列連通型コイルは2つのコイル同士のなす角度を大きくしていくと、籠型コイルの場合と同様に回転トルクの変化が穏やかになっていく。このことから、直列連通型コイルも籠型コイルと同様に瞬間における最大回転トルクでは円形コイルには劣るが、回転を開始した後では円形コイルに比べて長い間回転トルクが働き、安定した回転が可能であると考えられる。また、トルクの働く区間もコイル同士のなす角度を調整することによって変えることができ、籠型コイルと同様の特徴がある。さらに、直列連通型コイルは、回転トルクの大きさは円形コイルと同等であるものの、流れる電流が半分になるため、消費電力の面においては優れている。そのため、長時間の稼働に耐えることが可能である。

一方、並列連通型コイルは2つのコイルをそれぞれ円形コイル単独の場合と同じように回転させることができる。そのため、並列連通型コイルは非常に回転しやすいという特徴を持つ。また、直列連通型と同様にコイル同士のなす角度を変えることで回転トルクの変化が緩やかになる。その場合の並列連通型コイルに働く回転トルクは、角度をずらした円形コイルのグラフの重ね合わせで求めることができる。実際に並列連通型コイルの製作を行う場合は、トルクのピークを考えることなく、円形コイルの時と同様に片側を半面だけ削ればよいので、容易な製作が行える。

6. 結論

本研究では、電流と磁界の関係の学習に利用される教材であるクリップモータについて、コ

イル形状に関する回転特性の解析を行った。具体的には、生徒たちが自分自身の個性を生かした発想の基に創造的なものづくり学習を行うことのできる教材として、コイルに加工を加えるという手法によって、回転によって像の浮かぶ回転対称型コイル、立体的な形状を持つ籠型コイル、複数のコイルを連ねた形状を持つ連通型コイルを用いたクリップモータを提案し、それぞれの回転トルクの変化の解析を行った。理論解析の結果、コイルの形状それぞれの特性に合わせて、被膜を削る部分に考察が必要であることや、回転トルクを打ち消しあわないためにコイルの巻く方向が重要になるといった、製作に新しい要素を取り入れることを可能にした。これにより、クリップモータの製作はこれまでの単なる回転するだけの教材から、実際に実用化されているモータに近い特性を持たせることのできる教材となり、また、生徒の製作の自由度を拡大することによって、生徒の興味や関心を引き付けられる可能性を持った教材であることを示すことができた。

最後に、本実践にご協力頂いた浜松市立都田中学校に深く感謝します。また、本研究は科学研究費補助金（20500775）、及び、科学振興機構の援助を頂いた事を記し謝意を示します。

参考文献

- 1) 環境省：報道発表資料，気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4 次評価報告書，2007
- 2) たとえば、三菱自動車, i-MiEV ホームページ
<http://www.mitsubishi-motors.co.jp/i-miev/>（アクセス日：2011年3月10日）
- 3) 教材の部屋ホームページ：わにぐちクリップモータ
<http://www.rika-kyouzai.sakura.ne.jp/kyouzai21.html>（アクセス日：2011年3月10日）
- 4) 科学工作ホームページ：超安価な手作りモータ
<http://iruka.la.coocan.jp/craft/motor/index.html>（アクセス日：2011年3月10日）
- 5) 中山雅茂：コーチングを取り入れたものづくり授業に関する研究 - 小学校理科 クリップモーターの製作 -, 第10巻 pp.121-130, 北翔大学生涯学習システム学部研究紀要, 2010
- 6) 加藤 和男, 渡辺 雅浩：製作/調整容易な手作りモータ教材の開発：指導ボランティアテキストを兼ねて, 第19巻 pp.13-20, 電気学会研究会資料, FIE, 教育フロンティア研究会, 2006
- 7) 宮本 憲武, 山本 勝博：色素増感太陽電池の教材化への試み (2)：液体ポリエチレングリコールの使用とクリップモーターによる動作確認, 第54巻3号 pp.172-173, 化学と教育, 2006
- 8) 楠田純一：究極のクリップモーター（左巻健男・内村浩 編著：おもしろ実験・ものづくり辞典），pp.217-219, 東京書籍, 2002

