

モーターの製作とエネルギー変換効率

三条高等学校 笹川民雄

(1) 単元名

電流と磁界、電磁誘導と交流 (物理)

(2) 指導目標

モーターは現代生活に欠くことのできないものである。種々のモーターを製作して、その動作原理を調べる。また、モーターは電気エネルギーを力学的エネルギーに変換する装置である。この観点から直流モーターのエネルギー変換効率を測定する。

(3) 指導計画

本校では物理は3年生の理系で3単位で履修する。今年度はその初年度であり課題研究は12月初旬から、班単位でテーマを決め、6時間をかけて実施する予定である。従って、以下は課題研究の一例として考えていただきたい。

(4) 展開

● 直流クリップモーターの製作と原理

エナメル線、クリップ、フェライト磁石、消しゴム、木の台を用意し、写真2-1のように組み立てて、電池につなぐとコイルは勢いよく回転した。回転軸となるエナメル線は一方は全部のエナメルを、他方は下半分だけはがした。

図2-1はこのモーターを真横から見た図である。半分だけはがされたエナメル線がクリップと接触したときだけ電流が流れ、コイルは電磁石となり台に置かれた磁石と力を及ぼし合い回転する。回転角が 90° を越すと、電流は遮断され、以後回転角が 270° になるまでコイルの慣性で回り続ける。回転角が 270° を越すとまた、電流が流れ電磁石のN極と磁石のN極が反発しあい回転力が生じ、最初の位置に戻る。このクリップモーターは電磁力

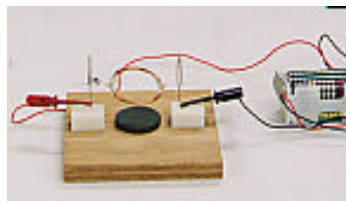


写真2-1

とコイルの慣性を利用して回転することがわかる。

● 交流モーターの製作と原理

直径1mmの銅ホルマル線でコイルを4つ作り、図3-1のように配置し、向かい合った1対のコイルはつないでおき、同じ向きに電流を流して磁界をつくる。コイルと の対は交流電源 (スライダック) に接続し、コイルと の対にはコンデンサーを直列につないで交流電源に接続する。

電流を10Aを越えない程度に流して観察した。4つのコイルの中央に磁針を置くと、写真3-1のように勢いよく回った。このことからコイルの中央には回転磁界が発生していることがわかる。また、写真3-2のように磁針のかわりにアルミ缶を針状の先端を持つ指示棒の上ののせて観察すると、やはり磁針と同じ向きに回転した。さらに、コイル、にコンデンサーのかわりに500巻きコイルを直列に接続したら、アルミ缶の回転の向きが逆転した。

回転磁界ができる理由を考える。コイル、にはコンデンサーが直列につないであるので電流の位相は電圧の位相に比べ 90° 進む。電源電圧を $V = V_0 \sin \omega t$ とすると $I = I_0 \sin(\omega t + 90^\circ) =$

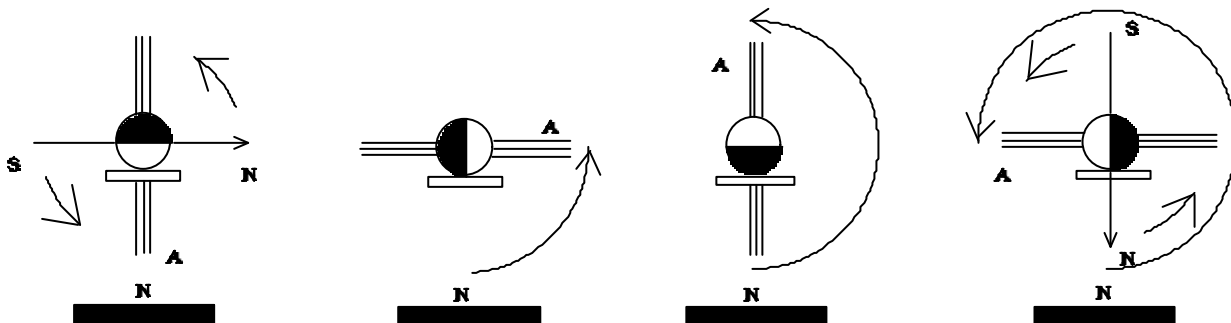


図2-1

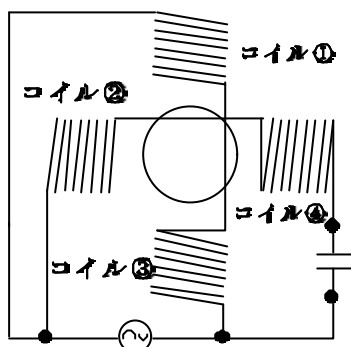


図 3 - 1

$I_0 \cos \omega t$ となる。一方、コイル ①、② の電流は電源電圧に対する位相のずれはなく、 $I = I_0 \sin \omega t$ である。ただし、ここでは簡単のために電流の最大値は等しいとした。図3-2のようにコイル ①、② の方向に y 軸を、コイル ③、④ の方向に x 軸をとる。コイル ①、② による磁界 H_1 は $H_1 = n I_0 \sin \omega t$ の y 成分だけをもち、コイル ③、④ による磁界 H_2 は $H_2 = n I_0 \cos \omega t$ の x 成分だけをもち、このことから合成磁界の大きさ H は $H = (H_1^2 + H_2^2)^{1/2} = n I_0$ となり、x 軸からの向きを θ とすると $\tan \theta = \tan \omega t$ 、よって $\theta = \omega t$ となる。以上のことから合成磁界 H は一定の大きさで角速度 ω で回転することがわかる。家庭の交流電源は 50 Hz なので、1 秒間に 50 回、回転することになる。

次にアルミ缶が回転する理由を考える。実際はアルミ缶に対して磁界が回転しているのであるが、ここでは磁界を静止させ、アルミ缶を逆方向に回転させて考える。すなわち、磁界とともに回転する系から見た場合を考える。図3-3のA点では自由電子はローレンツ力 $f = e v B$ を紙面に垂直に裏



写真3-1



写真3-2

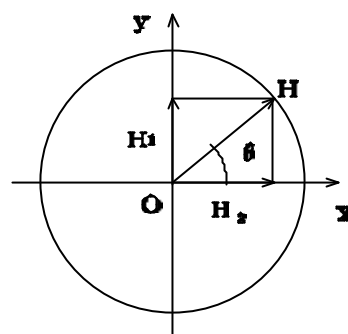


図 3 - 2

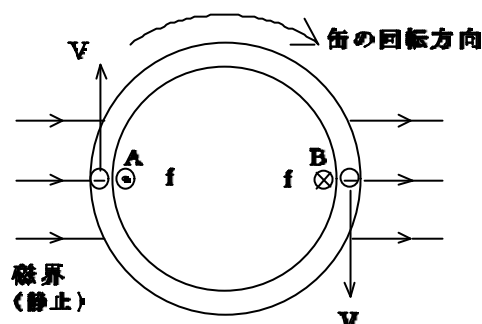


図 3 - 3

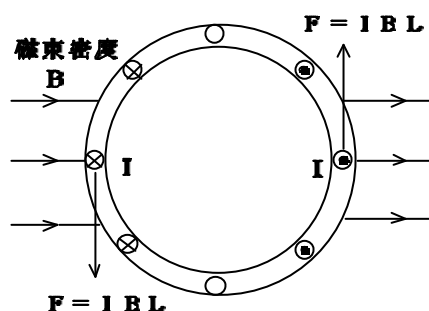


図 3 - 4

から表に向かって受けることになるので、誘導電流は紙面に垂直に表から裏に向かって流れる。同様にしてB点ではA点と逆向きに電流が生ずる。



写真4-1

誘導電流をアルミ缶全体にわたって描いたものが図3-4である。これらの誘導電流が磁界から電磁力 $F = I L B$ を受けアルミ缶が回転する。ここで v は磁界と缶との相対速度であるので、缶と磁界の回転数が一致するまで缶の角速度が増すことがわかる。また、回転力は最初、缶が静止しているときに最大で速度の増加とともに小さくなる。

● 静電モーターの製作と原理

写真4-1のように、スチロールコップを先端に針のついた支持台の上にのせ、コップの側面近くに2本の釘を向かい合わせて置き、この2本の釘をそれぞれバンデグラフ起電機の正極と負極に接続する。起電機のスイッチを入れるとコップは勢いよく回転した。

高電圧の釘の先端からの放電（コロナ放電）により、電荷はコップの表面に移動する。図4-1のA点ではコップの表面は正に帯電し、同符号の電荷を持つ釘から斥力を受ける。コップが回転してB点付近に近づくと、負極の釘から引力を受ける。B点ではコロナ放電によりコップの表面の正電荷は電氣的に中和され、さらに負電荷を帯びる。そ

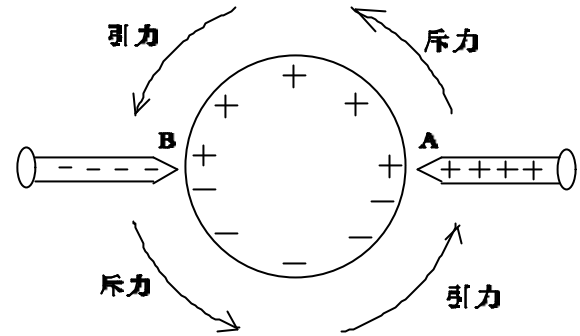


図4-1

して、また負極の釘から斥力を受ける。以上のことが繰り返されコップの回転は加速されていくと考えられる。

● 直流モーターのエネルギー変換効率の実験

(ア) 目的

直流モーターでおもりを持ち上げる仕事を行い、電気エネルギーの力学的エネルギーへの変換効率を測定する。また、線形モーターモデルで理論的な変換効率を導き、実験結果と比較する。

(イ) 準備するもの

直流モーター、糸、おもり、ボビン（または、糸巻き）、スタンド、電圧計、電流計、スイッチ、乾電池、ストップウォッチ

(ウ) 方法

モーターの回転軸にボビンをしっかりと取り付け、糸を巻き付け、糸の先端におもりをつるす。

図5-1のように配線しモーターに約1.5Vの電圧をかけ、床の上にあるおもりを持ち上げる。このとき、モーターの両端の電圧 V 、モーターを流れる電流 I 、おもりを引き上げるのに要する時間を測定する。おもりの質量を変えて繰り返し実験する。

測定結果をもとに、モーターがおもりになした力学的仕事 $W = m g h$ とモーターに供給された電気エネルギー $Q = I V t$ を計算によって求める。また、エネルギー変換効率を計算する。

(エ) 結果と処理

表5-1は測定結果をまとめたものである。

(オ) 考察

表5-1から、おもりの質量が大きくなるにつれ、電流 I も増加していることがわかる。これは、

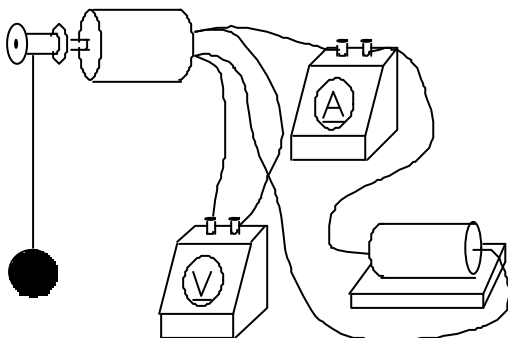


図5-1

おもりの 質量 m [kg]	持ち上げる 距離 h [m]	仕事 $W=mgh$ [J]	時間 t [s]	電流 I [A]	電圧 V [V]	電気エネルギー $Q=IVt$ [J]	変換効率 $e=W/Q \times 100\%$
0.020	1.6	0.31	1.2	0.61	1.4	1.0	31
0.025	1.6	0.39	1.4	0.71	1.3	1.3	30
0.030	1.6	0.47	1.6	0.81	1.3	1.7	28
0.035	1.6	0.55	2.0	0.91	1.2	2.2	25
0.040	1.6	0.63	2.6	1.1	1.2	3.4	19

表 5 - 1

おもりの質量が大きくなるとモーターの回転数が小さくなり、誘導起電力が減少し電流が流れやすくなるためであると考えられる。また、表5-1から電流 I の増加とともにエネルギー変換効率が31%から19%まで小さくなることからわかる。これはモーターの内部に電気抵抗があり、供給された電気エネルギーの一部がジュール熱 $R I^2$ に変わり、 I の2乗に比例して損失されるからであろう。モーターの内部抵抗をテスターで測定してみると 0.80Ω であった。

モーターがおもりを引き上げるときの諸量の関係を線形モーターモデルで考えてみる。図5-2のように、磁束密度 B の磁界中を質量 M 、長さ L の導体棒がなめらかな導線上を速度 v で運動しながら、おもりを引き上げているとする。ここで I はモーターを流れる電流、 V はモーターの両端にかかる電圧、 R はモーターの内部抵抗である。

速度 v で磁界中を運動する導体部には誘導起電力 $v B L$ が生じる。これは電池の起電力の向きと逆であるので、キルヒホッフの第2法則は次のようになる。

$$V - v B L - R I = 0 \quad \text{-----}$$

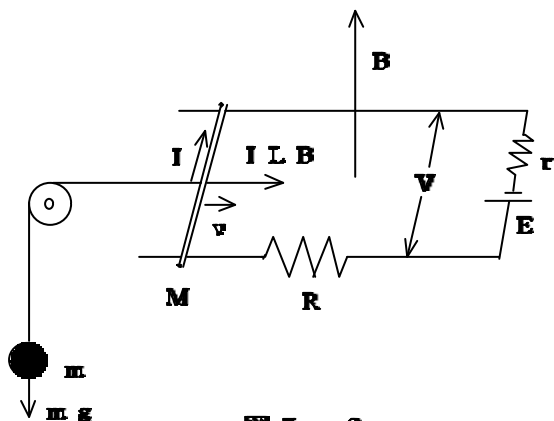


図 5 - 2

また、導体棒とおもりの加速度を a とすると、棒とおもりを一体とみなした運動方程式は

$$I L B - m g = (M + m) a$$

である。ここで、 m はおもりの質量である。おもりが等速度で上がっていく場合を考える。このときは加速度 a が 0 なので、上の式はつり合いの式

$$I L B - m g = 0 \quad \text{-----}$$

となる。

誘導起電力による供給電力 $(v B L) I$ が電磁力による仕事率 $(I L B) v$ に等しいことに注意して式に I をかけ、式に v をかけて加えると

$$V I - R I^2 - m g v = 0 \quad \text{-----}$$

が得られる。この式から、1秒間を考えるとモーターに供給された電気エネルギー $I V$ は内部抵抗でのジュール熱 $R I^2$ とおもりを引き上げる力学的仕事 $m g v$ によって消費されることがわかる。

式よりエネルギー変換効率 e は次のように表される。

$$e = m g v / I V = 1 - R I^2 / I V \quad \text{----}$$

また、式より $I = m g / B L$ となり、これを式に代入して $v = V / B L - R m g / (B L)^2$ となる。これらの式から次のようなことがわかる。おもりの質量 m を大きくした場合、引き上げる速度 v が小さくなり、誘導起電力 $v B L$ が減少し、電流 I は m に比例して増加する。それにもない電磁力 $I L B$ が大きくなり、この力が重力とつり合うようになる。それと同時にモーターの内部抵抗で発生するジュール熱 $R I^2$ が大きくなり、エネルギー変換効率 e は小さくなるのである。表5-1の実験結果はここで考察した線形モーターモデルの振る舞いとよく一致していることがわかる。