

# モータのしくみに迫る ～電気と磁気の関係～

静岡県立静岡東高等学校

2年 小林 ゆい

## 1 はじめに

私の研究テーマは、モータのしくみに迫ることです。モータに興味を持ったきっかけは、鉄の釘、単三乾電池、ネオジム磁石を使ってモータを作る実験が、とても不思議で面白く、それがどのようなしくみで動いているのかということにとても興味を持ちました。モータのしくみを調べるにあたって、その歴史を調べてみると、モータは、先人達による数多くの研究の積み重ねにより発明され、電界と磁界が生じる物理現象を巧みに利用していることがわかりました。このことから、モータの歴史でキーとなったと考えている実験の追体験を行うことで、モータのしくみについて深く学ぶと共に、科学的な視点や考え方を学んでいきたいと思っています。そして、このような実験を積み重ねることによって、モータがどのようなしくみによって動作しているかという疑問の答えを見つけることができると考えています。

## 2 研究の目的

2019年度では、キーとなったと考えている実験の中で、ボルタの電池を取り上げ実験の追体験をおこないました。ボルタの電池が発明されたことで安定した電源が得られるようになり、その後の電気、磁気学の発展につながっていきました。2020年度では、ボルタの実験結果の考察および、実験環境の改善、ボルタの電池の理解を深めるために学習プログラムの開発などを行いました。本年度は、エルステッドの磁気作用、ファラデーモータ、アラゴの円盤など、モータの歴史の中でキーとなったと考えている実験の追体験をおこなうことで、電気と磁気との関係について理解を深めていきたいと考えています。また、継続して実験環境の改善、学習プログラムのブラッシュアップにも取り組んでいきます。

## 3 研究の方法

### (1) エルステッドの磁気作用

エルステッドは、電流が流れると導線が熱くなる現象を学生に示す際の事前実験のとき、導線の横に置かれていたコンパスの磁針が回転する現象を発見しました。その後、この現象について複数回の実験をおこなった結果、電気と磁気間に密接な関係があることがわかりました。この発見以降、電気と磁気の相互作用に関する研究が活発に行われ、その後のモータの発明へとつながっていきます。実験方法として、ネオジム磁石を机の上に立てておくと、北-南に向きを変える現象を利用した簡易的な方位磁針を作ります。南北の向きに張った銅線の下側に、この方位磁針を置き、安定化電源に適切な電圧、電流値を設定し、銅線に電流を流すことで方位磁針の動きを観察します。

### (2) ファラデーモータ

ファラデーは、エルステッドの実験結果から、「電流から磁力が得られるなら、磁力から電流を得ることも可能ではないか」と考え、水銀を満した容器の中に磁石を立て、容器の下にある電極と上から吊るした電

線との間に電流を流すと、電線が磁石の周りを回転するという実験をおこないました。この現象はファラデーモーターと呼ばれ、世界初のモーターとして知られています。実験方法として、プラスチック容器の中央に、ネオジム磁石、容器の淵にアルミ箔を用いた電極を固定し、ネオジム磁石の真上に、銅線を回転できるように支柱などで吊るして設置します。容器に、電解液として飽和食塩水をアルミ箔の電極と上から吊るした銅線の先端がしっかりと浸かるように入れ、安定化電源に適切な電圧、電流値を設定し、銅線に電流を流し銅線の動きを観察します。

### (3) アラゴの円盤

アラゴは、磁石を銅製の円盤に接近させ、磁石を回転すると磁性を持たない銅円盤も回転する「アラゴの円盤」の現象を発見しました。この現象はのちに、銅円盤に渦電流が流れることにより、円盤が回転することがファークーにより解明され、今日の誘導モーターの発展につながっていきます。実験方法として、銅円盤の代わりに、家庭で手に入りやすいアルミ箔を円盤状に切り、水を張った容器に浮かべ、ネオジム磁石をアルミ箔の円盤の上で触れないように動かし、その動きを観察します。

### (4) 温度管理システムの改善

2020年度に作成した温度管理システムは、明け方など室温が低くなった時、ケース内温度が低下してしまうことがわかりました。ケース内温度が下がるのは、ペルチェ素子から放熱される熱よりもケース内から外へ逃げる熱の方が多いためなので、ペルチェ素子の動作電圧を上げる、ケースの断熱をより良くする、ヒートシンクにFANをつけ熱交換の効率を上げるなどの改善をおこない、その効果を確認します。

### (5) 学習プログラムのブラッシュアップ

前回取り組んだ「プリント基板をつかったアクセサリを作ろう」の応用として、同様の基板エッチングを用いて、5V基準電圧発生器のプリント基板を作成するプログラムを考えました。プログラム作成において、手を動かしながら学んでいくスタイルである「ハンズオン形式」を用い、対象者にわかりやすい概要や手順書の作成を目指しました。また、新型コロナウイルス感染症防止対策の観点から、プログラム開催時における換気の重要性を踏まえ、換気が効果的にこなえていることの確認として、空気中の二酸化炭素濃度のモニタリングと記録をおこなえるシステムの構築をおこないます。

## 4 結果

### (1) エルステッドの磁気作用

徐々に銅線に流れる電流値を大きくしていくと、1.5[A]の電流値で方位磁針が反時計回りに向きを変えました。また、電流の流れる方向を反対方向にすると、方位磁針が時計方向へ向きを変えることを確認しました。エルステッドは、実験を続けていく中で、磁針のふれで電気量（電流の強さ）を測定できると考えていたと伝えられています。そこで、市販の方位磁針を用いて、銅線に流れる電流と方位磁針の移動角度の測定をおこない、磁針のふれと電流の強さの関係を調べることで、簡易的な電流計として使用することができるかどうか実験をおこないました。実験結果から、0.1[A]の電流値でも方位磁針がふれたこと、グラフが思っていたよりも線形に近いため、方位磁針の感度をよくするなどの改良をおこなえば、簡易的な電流計として使用できると思いました。

## (2) ファラデーモータ

ファラデーは、銅線を回転させる方法と磁石を回転させる方法の2通りの実験をおこないましたが、今回は、銅線を回転させる方法での実験をおこないました。銅線側をプラス、アルミ箔電極側をマイナスとした時、反時計回りに銅線が回転し、電流の流れる方向を逆向きにしてみると、時計回りに回転することを確認しました。実験は電圧2.4[V]でおこない、動作時の電流値は、0.1[A]から0.6[A]でした。

## (3) アラゴの円盤

円形のプラスチックトレイに水を入れ、円盤状に切り取ったアルミ箔盤を水に浮かべます。ネオジウム磁石を円盤の上で触れないように円形に回転するように動かすと、磁石を動かした方向と同じ方向に、円盤が追従して回転することを確認しました。また、磁石を動かした方向と同じ方向へ自由に動くことを確認するために、1円硬貨と小さく切ったアルミ箔片で実験をおこなったところ、どちらも磁石を動かした方向と同じ方向に追従して動くことを確認しました。複数の1円硬貨を同時に動かす実験をおこなうため、1円硬貨を複数枚浮かべたところ、まるで磁石同士が引き合うように、1円硬貨が水面を移動し、硬貨同士が吸引してくっつく現象に気づきました。驚いて色々実験をおこなってみると、1円硬貨と丸めたアルミ箔球の場合、反発することなどがわかりました。まるで磁石のような振る舞いをすることに、とても興味を持ち、そのしくみを調べてみたいと思いました。

## (4) 温度管理システムの改善

ペルチェ素子の動作電圧を上げることにより、ペルチェ素子による放熱面の温度を上げます。2020年度の制作時、ペルチェ素子の動作電圧は、制御回路との兼ね合いから5[V]としました。今回、動作電圧を上げるにあたって、ペルチェ素子の仕様、最大電流6[A]、最大使用電圧15.4[V]、CPUクーラー用のFANの仕様、動作電圧12[V]、動作電流0.24[A]、使用する安定化電源の最大電圧8[V]など、各仕様からペルチェ素子の動作電圧を8[V]とすることにしました。次に、ケースの断熱をより良くするため、断熱材をケース上面、底面、背面に取り付けることによって、断熱効果を高めました。なお、ケース前面と側面は、ケース内がよく観察できるように取り付けないこととしました。最後に、ケース内ヒートシンクにCPUクーラー用薄型12cmFANを取り付け、ヒートシンクの熱交換の効率を高めました。また、測定データの記録を行うため、センサーの値をRaspberry pi4へ入力し、クラウドへの測定データ記録ができるようにしました。実際にケース内温度の変化を測定したところ、夜間の低温時にも安定してケース内温度が保たれていることの確認ができました。

## (5) 学習プログラムのブラッシュアップ

「5V基準電圧発生器のプリント基板作成」プログラムでは、2020年度の「プリント基板をつかったアクセサリを作ろう」と同様の基板エッチングを用いることにより、電気工作やプログラミングがスムーズにつながることができ、学習プログラムの幅が広がることが期待できます。プログラム作成においては、手を動かしながら学んでいくスタイルである「ハンズオン形式」を用い、実験内容や手順をイメージしやすくすることに留意しました。二酸化炭素濃度のモニタシステムの構築においては、経済産業省「二酸化炭素濃度測定器の選定等に関するガイドライン」にて推奨されている、検知部にNDIR(Non Dispersive InfraRed:非分散型赤外線吸収)を用いた測定器の中から、単光源二波長方式センサーを採用したものを選定しました。測定値を液晶などに表示するとともに、クラウド上に測定値を記録できるシステムを構築しました。

## 5 考察

### (1) 磁石につく金属とつかない金属の違い

磁石には、N極とS極があります。鉄でできた磁石を細かく刻んでいき、最終的に鉄原子になるまで小さくなくても、N極とS極がある磁石のままです。原子は、原子核の周りを電子が回っています。この電子の動きが磁力を生み出して、極性は、電子の回転する方向によって決まると考えられています。鉄でできた磁石を、磁石になっていない鉄に一定方向にこすると、磁石になっていない鉄も磁石になります。磁石になっていない鉄は、電子の回転する方向が揃ってなくバラバラなため、お互いに磁力を打ち消し合い磁石になりません。磁石になった鉄は、電子の回転する方向がそろっているため、磁力が打ち消されることなく磁石になります。鉄には、電子の回転方向が揃いやすいという性質があり、磁石になっていない鉄に、磁石を一定方向にこすることで、バラバラだった電子の回転する方向を揃えることができ、磁石になるというわけです。このように、磁石につく鉄と、つかない銅やアルミの違いは、磁力を生み出す電子の回転する方向に関係していると考えられます。

電子は、スピン（自転）しながら軌道運動をしています。電子のスピンは、アップスピン（右回転）とダウンスピン（左回転）があり、このスピン運動により発生する磁気モーメント（磁気の方向性）が磁性の根源と考えられています。鉄、銅、アルミ原子の電子配置を比べてみた時、鉄原子の特徴は、最外殻軌道の一つ低い軌道である3d軌道に不対電子が4つあることが特徴的です。銅とアルミ原子も不対電子が1個ありますが、これら電子は、最外殻軌道にあるため、自由電子として金属原子どうしの結合に使用されるため、金属結合された金属結晶の中では、磁気モーメントは発生しないと考えられます。鉄原子の不対電子は3d軌道にあり、金属結合時、最外殻軌道4sにある対電子が自由電子となるため、3d軌道の磁気モーメントは残り、金属としての鉄は強磁性を持つこととなります。これらのことから、磁石につく金属と、つかない金属の違いは、金属結合時に自由電子となる最外殻軌道の下の軌道に不対電子があるかないかの違いで、不対電子の個数が磁性の強さに関係していると考えられます。

### (2) エルステッドの磁気作用の実験で、電流を流した銅線の近くの方角磁針が動いたしくみ

物質や物体は、現在の状態を維持しようとする性質があります。銅線に電流が流れると、流れていない状態を維持しようと、電流を阻止する方向に磁界が発生します。この磁界の力により方位磁針が動くと考えられます。電流の向きと発生する磁界の向きとの関係は、アンペアの右ネジの法則といわれ、直線状の電流が流れると、電流の流れる方向に右ねじを進めた場合のねじの回転する方向に、この電流を取り巻くように、円形の磁界が発生します。

### (3) ファラデーモータの実験で、電流を流した銅線が磁石の周りを回転するしくみ

銅線に電流が流れると、流れていない状態を維持しようと電流を阻止する方向に磁界が発生します。この時、銅線が磁石の磁界の中にあつた場合、「磁石の磁界」と「電流がつくる磁界」の向きが同じ場所では、磁界は強められ、逆に「磁石の磁界」と「電流がつくる磁界」の向きが逆の場所では、磁界は弱められます。この磁界の強さの差により、電流（銅線）に磁界の強いほうから弱い方の方向へ力が働くことにより、銅線は磁石の周りを回転すると考えられます。

### (4) アラゴの円盤の実験で、円盤が回転するしくみ

アルミ箔盤の直上に円柱のネオジウム磁石のS極を上、N極を下にして接触しないよう配置したとき、磁

石のN極からはアルミ箔盤の方向に磁界が出ています。磁石をアルミ箔盤に触れないよう右に移動させたとき、磁石の移動方向である右側は磁界が増えるのを妨げる向きである上方向に磁界が発生し、左側は磁界が減るのを妨げる向きである下方向に磁界が発生します。この磁界により磁石の右側にあるアルミ箔盤では右ネジの法則により、反時計回りに渦電流が発生し、磁石の左側にあるアルミ箔盤では、同様に時計回りに渦電流が発生します。このようにアルミ箔盤には、磁石による磁界と渦電流による電流が発生している状態となり、フレミング左手の法則により、アルミ箔盤に磁石の進行方向と同じ方向に力が発生することで、磁石と同じ方向に回転すると考えられます。

#### (5) 水に浮かべた1円硬貨同士が吸引し、1円硬貨と丸めたアルミ箔球が反発するしくみ

1円硬貨、アルミ箔片、丸めたアルミ箔球などでも吸引、反発実験をおこないました。また、近くにあった磁石の影響なども考え、磁石を離すとともに、磁力に影響を受けないPETボトルのキャップなどでも実験をおこないました。注意深く観察したところ、浮かべたものによって水面の状態が違うことに気づきました。1円硬貨を浮かべた水面を観察すると、硬貨のエッジ部分を境に水面が凹んでいることに気がつきました。アルミ箔球やプラキャップを浮かべた水面を観察すると、球やキャップの周りの水面が盛り上がっていることに気づきました。水の表面には、表面積をできるだけ小さくする強い力（表面張力）が働いており、水滴はこの力によって球体になります。水に浮かべた1円硬貨やプラキャップ同士が吸引するしくみは、水面が凹んでいる同士、盛り上がっている同士は、水面の位置エネルギーが同じなので、くっつくことにより、その表面積が減ることになり安定した状態に近づくためと考えました。一方、1円硬貨とプラキャップなど、異なる水面の状態のもの同士は、水面の位置エネルギーが違うためと、近づくことにより表面積が増えることになるため反発すると考えました。

## 6 おわりに

今回、ボルタの電池に続き、エルステッドの磁気作用、ファラデーモータ、アラゴの円盤の実験と、モータの歴史の中でキーとなった実験の追体験を積み重ねていくことで、モータが動作する基本的なしくみについて理解が深まったと感じています。また、アラゴの円盤の実験をおこなっている中、水面に浮かべた2枚の1円硬貨が、まるで磁石のN極とS極のように引き合うことに気づき、とても驚きました。このような新たな疑問や気づきが自分の体験として生まれてくることに、とても「ワクワク」した気持ちになりました。また、2019年度の実験で課題になった、より良い実験環境の構築を目標に、温度管理システムの改良を行いました。研究をおこなう上で測定したデータの質は、そのまま研究の質に直結するため、より良い実験環境を整えることは非常に大切なことだと考えています。また、実際に問題点を整理し、改善策を考えてシステムを改良していくことで、学びを深めていくことができていると感じています。学習プログラムの開発においては、今後、私が追体験をおこなっていく中で感じた、「不思議だな」「面白いな」といった「ワクワク」するような気持ちを共有することができる「体験プログラム」としてまとめていきたいと考えています。そして、プログラムを体験してくださった方に、「科学って楽しいな」と感じていただくことができれば、とても嬉しく思います。

## 参考文献

山崎俊雄、木本忠昭 新版電気の技術史 オーム社  
渡辺勇 電気を発見した7人 岩波書店  
佐藤勝昭 磁気工学超入門 ようこそ、まぐねの国へ 共立出版  
有馬郎人ほか 新版理科の世界2 大日本図書