

クリップモータのパソコン制御

Controlling a Paper-clip Motor by a Personal Computer

周 游* 小山 英樹**
 ZHOU You KOYAMA Hideki

手作りモータとして教材にも多く用いられているクリップモータをパソコンで制御する簡易なシステムを開発した。電子回路部分は安価なインターフェース基板と汎用電子部品のみを使用し、低コストで製作可能である。乾電池などの外部電源を用いていないため持ち運びもしやすく、従来のクリップモータのようにショートによる過大電流の恐れもない。0～約60mAまで9段階でモータに流す電流を制御でき、その電流の変化はモニタ上の表示に加え、LEDの点灯でも確認することができる。電圧の時間変化からコイルの回転速度を測定することができるため、コイルの製作・改善に対する生徒の創意工夫を促す効果も期待できる。一方で、良く回るコイルを生徒に製作させるためには工夫が必要であること、電池を用いていないためにモータの動作原理を誤解しやすいこと、などの課題もあることが中学校における授業実践より明らかになった。

キーワード：電流、磁界、コンピュータ、教材、USB-IO

1. はじめに

磁界中の電流が受ける力（電磁力）を利用して電気エネルギーを力学エネルギーに変換するモータ（電磁モータ）は輸送機器や各種の産業機器だけでなく、家庭電化製品など身近なものにも多く使用されており、学校教育において児童・生徒にその基本的な動作原理を理解させることは非常に重要である。そのための教材として、永久磁石による磁界中でエナメル線のコイルに電流を流し、生じた電磁力によりそのコイルを回転させるものがある。コイルの支持にゼムクリップが用いられていることからクリップモータと呼ばれるこの教材は、さまざまなものが報告されている¹⁻⁹⁾が、最も簡単なものは単3乾電池1本と数十cmのエナメル線、エナメル除去用のサンドペーパー、ゼムクリップ2本と固定のためのセロハンテープだけで作る³⁾ことができる。

それだけでもエネルギー変換技術の教材として有効なクリップモータであるが、もしこれをパソコンで制御することができれば、情報技術（プログラムによる計測・制御）も併せて学ぶことができる中学校技術・家庭科（技術分野）の複合教材として利用することができる。また理科の授業で用いれば、コンピュータを活用した実験を容易に進めることが可能となる。本研究はこのような学校現場での利用を目的とした、簡易で低コストのクリップモータ制御システムの開発を目的としている。

2. システムの開発

(1) インターフェースと電子回路

本システムの開発にあたり重視した点は、教育現場での利用がしやすいよう、低コストで簡易な構成にすることである。そのためにまずパソコンとのデータ入出力のためのインターフェースには、安価で入手可能な

Km2Net 製 USB 接続デジタル入出力モジュール（USB-IO 2.0）¹⁰⁾を選んだ。この入出力モジュールはポート1として8ビット、ポート2として4ビットの合わせて12ビットのデジタルデータの入出力を行うことができ、それぞれの端子には最大25mA（ただし全端子合計で80mAまで）の電流を流すことができる。プログラムは専用の開発環境を使うわけではなく、汎用性のあるMicrosoft Visual Basic や Excel VBA で作成が可能である。

モータの回転速度を制御するためには、モータに流す電流を変化できるようにする必要がある。D/Aコンバータと外部電源（乾電池など）を使用して実現する方法が一般的であるが、今回のシステムはできるだけ簡易な構成にすることから、外部電源の使用は避けたい。そのためには、パソコンからできる限り大きな電流を取り出して流すことができるようにする必要がある。そこで、図1に示すようにUSB-IOのポート1（8ビット）を出力ポートとし、8つの端子のそれぞれに抵抗と

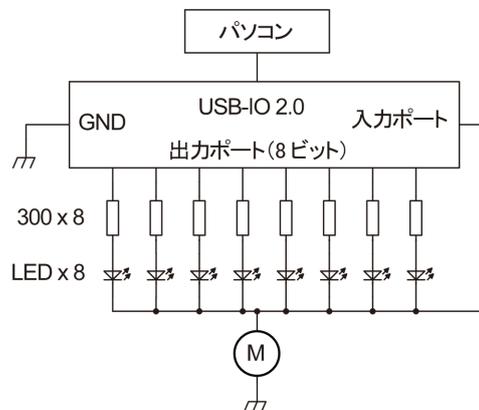


図1. モータの制御回路

*兵庫教育大学大学院（修士課程）教育内容・方法開発専攻行動開発系教育コース 修了生

**兵庫教育大学大学院教科教育実践開発専攻生活・健康・情報系教育コース 教授

LED を接続して、その電流を合わせてモータに流すようにした。

この場合、出力ポートの各端子のうち、デジタル値が「1」の端子からのみ電流が流れるため、モータに流れる電流は出力ポートの「1」の数に比例する。つまり、出力ポートに出力する「1」の数を変えることで、0を含めて9段階で電流を変化させることができる。D/A 変換を利用した場合に比べて段階数は少ないが、教育現場での利用には十分と思われる。各 LED は、逆電流（デジタル値が「0」の端子に流れ込む電流）の防止の機能もあるが、電流の有無を点灯で示すインジケータとしての機能もあり、モータに流れる電流を視覚的に確認することができる。LED のカソードは、モータだけでなく USB-IO のポート 2（入力ポート）にも接続されている。これは後で述べるようにモータの回転速度測定用である。

ユニバーサル基板を用いて製作した電子回路部分の例を図 2 に示す。この例では、電流が流れている端子の数が分かりやすくなるよう、色の異なる LED を 4 種類使用している。図で手前側にある 2 つの金属のピン（チェック端子）がモータへの接続端子である。ミノムシクリップ付きのコードでモータに接続する。

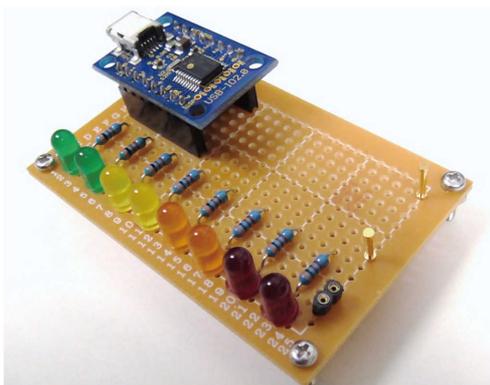


図 2. 電子回路部分の外観

出力できる電流が最大 80mA であることを考えると、各端子の電流は 10mA 以下にしなければならない。LED の順方向電圧が約 2V であることから、接続する抵抗は 300Ω とした。この状態で、実際に出力電流を測定した結果を図 3 に示す。測定は、図 1 のモータの代わりにデジタル・マルチメータ (ADCMT 7351E) を接続し、モータ部分を短絡した状態で行った。測定の際使用した LED はすべて HLMP-3507 (緑色) である。

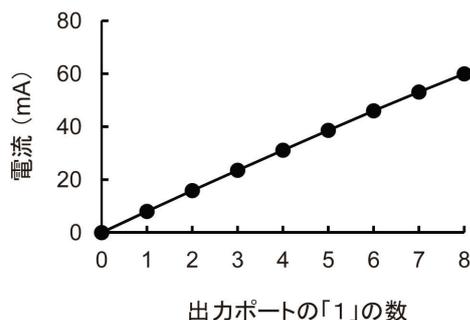


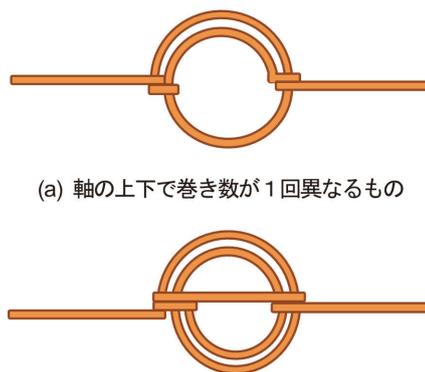
図 3. 出力電流の測定結果

測定結果を見ると、電流値は「1」の数に概ね比例しており、8ビットすべてが「1」のときの電流（約 60 mA）は 80mA 以内に収まっていることがわかる。

なお、本システムでモータに流す電流が最大で約 60 mA 程度であるという事実は、実は従来のクリップモータに比べて安全面でも大きなメリットとなる。従来のクリップモータでは導通状態（コイルに電流が流れている状態）では乾電池をショートすることになり、過大な電流が流れて乾電池の発熱や液漏れ、破裂などの恐れがあるが、本システムではその心配はない。

(2) クリップモータ

本システムでは最大で約 60mA の電流しか供給することができないため、小電流で効率よく回転するようモータに工夫を施す必要がある。まずコイルであるが、一般的には図 4 (a) に示すように軸の上半分と下半分で巻き数が 1 回異なるものが多く使われている。しかしこれでは当然重量のバランスがとれないため、回転させるために余計なトルクが必要になる。そこで、図 4 (b) に示す上下巻き数が同じ形状のコイルを製作し使用することとした。直径 0.5mm のエナメル線を用い、単 3 乾電池に 6 回巻いて製作した。コイルの直径は約 14 mm である。



(a) 軸の上下で巻き数が 1 回異なるもの

(b) 軸の上下で巻き数が同じもの

図 4. コイルの形状

コイルを巻いたのち、軸部分のエナメルをサンドペーパーで除去し、電流が流れるようにする。このとき、片側は全面除去するが、もう片側は半面のみ除去するにしなければならない。これは、両方とも全面除去すると、コイルが 180° 回転したときに電流の向きも逆になり、コイルの回転を妨げる向きに力が働くからである。片側の軸のエナメルを半面のみ除去することで、180° 回転したときには電流が流れなくなり、コイルが惰性で回転を続けるようになる。

モータのシャーシ部分は、簡単に組み立てられるよう、図 5 に示すようにステンレス製の L 型金具を 2 個、ネオジム磁石（2 個）で固定したものを使用した。これの側面にやはりネオジム磁石を使用してゼムクリップを取り付け、コイルを支持すると同時に電流を流す電極とした。磁石で固定しているため、組み立てる際にドライバーなどの工具は不要である。ゼムクリップの上部にミノムシクリップ付きコードを取り付け、基板（図 2）と接続

して使用した。

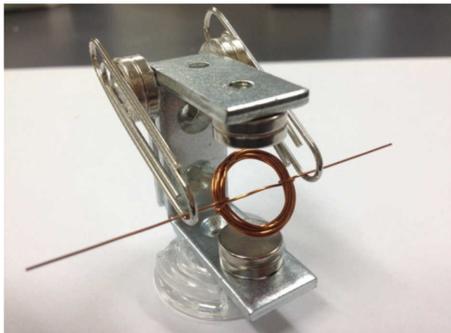


図5. モータ本体

コイルを回転させるために必要な磁界は、シャーシの上下に積層して配置されたネオジム磁石により作られる。図6は、積層する磁石の数と磁束密度の関係測定した結果である。磁石は上下に同じ数（1～6個）ずつ配置し、内側の磁石の間隔を24 mmに固定してその中央の磁束密度をガウスメータ（Hirst Magnetics GM08）にて測定した。磁束密度は磁石数に応じて単調に増加し、上下6個ずつでは約140 mTとなる。ただしそれほど大きく増加するわけではないため、以降の実験では上下2個ずつ使用することにした。

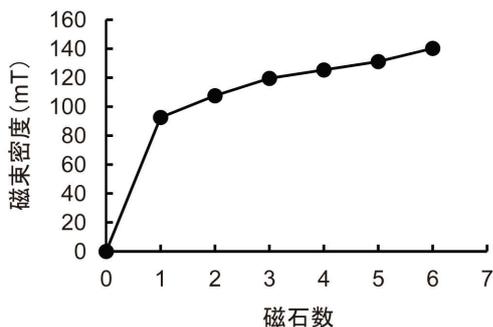


図6. 磁束密度の測定結果

L型金具の固定、ゼムクリップの固定、および磁界形成のため使用したネオジム磁石はすべて同じもので、100円ショップで1パック4個入りで販売されているものである。磁石の直径は13 mm、公称磁束密度は2000 Gauss（200 mT）である。1台のモータで合計10個の磁石を使用している。

(3) 回転速度の測定

以上の回路とモータを製作し、パソコンに接続して制御を行ったところ、コイルが電磁力により回転することを確認した。そこでこのモータの動作を定量的に評価するため、コイルの回転速度の測定について検討した。

クリップモータは先に述べたように、コイルに電流が流れる状態（通電状態）と流れない状態（遮断状態）を繰り返しながらコイルを回転させる。コイル1回転当たり、1回の通電状態と1回の遮断状態がある。通電状態のときはコイルの両端の電圧はほぼゼロ、遮断状態のときは電源電圧（約5 V）とほぼ同じ値になるので、コイルの電圧の変化を測定すれば、回転速度を求めることが

できるはずである。図1の回路図で各LEDのカソードがUSB-IOのポート2（入力ポート）に接続されているのはそのため、通電状態では「0」、遮断状態では「1」のデジタル値がパソコンに取り込まれる。1秒当たりのこのデジタル値の変化を2で割れば、回転速度（回/秒）が得られることになる。

このようにして求めた回転速度の測定結果を図7に示す。図7には、比較のため、LEDとフォトトランジスタを用いて光学的に測定したもの（コイルの回転により光が遮られた回数を測定し、それを2で割ったもの）も示している。図から明らかなように、電気的に求めた回転速度は光学的に求めたものよりも高い値を示している。

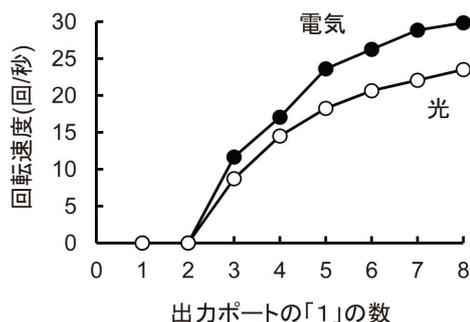


図7. 回転速度の測定結果（改良前）

この差が生じる原因を調べるため、コイルの両端の電圧の変化をオシロスコープを用いて測定した。その結果の一例を図8に示す。

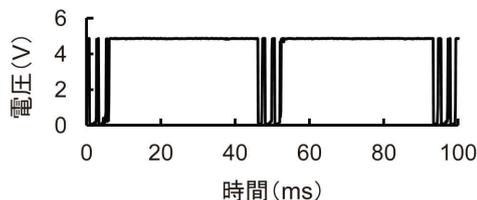


図8. コイルの両端の電圧の変化

図8は、出力ポートの「1」の数を最大の8にして測定したものである。これを見ると、通電状態（約0 V）のときに、瞬間的に遮断状態（約5 V）になることがあることがはっきりとわかる。これはコイルが回転により振動し、ゼムクリップとの接触が瞬間的に断たれることによるものと考えられる。図7の測定結果（電気的な方法によるもの）は、これらの瞬間的な変化もカウントしているために高めの値になったものと思われる。

そこで、この瞬間的な変化による誤差をソフトウェアで解決することにした。つまり、瞬間的な遮断を遮断状態とみなさないよう、プログラムの改良を行った。USB-IOのデータ入力にかかる時間が2 msのため、本システムでは2 msごとに入力ポートのデータを読み込んでいるが、連続して3回「1」となった場合のみ、遮断状態であると判断するようにした。改良後のプログラムを使用して回転速度を測定した結果を図9に示す。電気的な方法と光学的な方法の差が大幅に改善されていることがわかる。

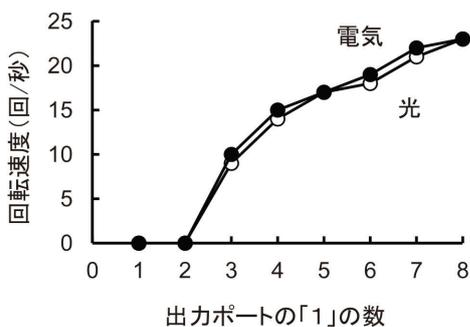


図9. 回転速度の測定結果 (改良後)

3. 授業実践

開発したシステムを用いて、国立大学附属中学校の選択授業（技術）で授業実践を行った。先に述べたように本システムはエネルギー変換と計測・制御を同時に学習できる点が大きな特長の1つであるが、予定された授業時間が1単位時間（50分）のみであったため、コイルを製作して実際に回してみることでモータの原理を学ぶ、というような内容に限定して実施した。回転速度が表示されることで、よりよく回るコイルを作るために生徒たちが工夫をすることも期待される。



(a) コイルの製作



(b) システムを使用した実験

図10. 授業の様子

表1. 授業内容と時間配分

日	内容	時間(分)
	1日目	クリップモータの原理の説明
	コイルの製作	10
	システムを使用した実験	10
2日目	内容	時間(分)
	システムを使用した実験	10
	まとめ (感想記入等)	5

実際には授業（1日目、平成26年7月8日実施）の初め約15分間は別の内容（前の回から持ち越された内容）を行わなければならなくなったため、表1に示す通り、1週間後（2日目、平成26年7月15日実施）の初めにも本システムを使用した授業を15分程度行った。生徒は2年生6名と3年生5名の計11名で、3つのグループに分かれて実験を行った。

まず初めにスライドでクリップモータの原理について説明（約15分）した後、生徒一人ひとりにあらかじめ必要な長さ（約40cm）に切断したエナメル線およびコイルを巻くための単3乾電池を配り、コイルの製作を行った（約10分）。製作の際は授業者が前で作り方を実演し、それを見ながら生徒が製作できるようにした。最後は各グループ1台用意したシステムを用い、モータを回転させることを試みた（約10分）。授業の様子を図10に示す。

結果として、残念ながら1日目の授業時間内には、誰もコイルを回転させることができなかった。そこで生徒が製作したすべてのコイル（11個）について、授業後にその原因を調べてみることにした。その結果を表2に示す。

表2. 生徒が製作したコイルの問題点

コイルの問題点	コイルの数
①軸の直線性不良	11
②軸の長さ不適切	4
③固定不十分	5
④エナメルの除去不十分	9
⑤エナメルの除去位置不適切	2
⑥エナメルの過剰除去	2

問題点には大きく分けてコイルの形状に関するものとエナメルの除去に関するものがあり、前者には軸の直線性が悪いもの、軸の長さが不適切なもの、コイルを巻いた部分の固定が不十分なもの、などが見受けられた。特に軸の直線性不良は11個すべてにおいて確認されている。生徒に作り方を指導する際には、軸が直線になるようにすることが非常に重要であることを強調する必要がある。これらの問題が見られるコイルの例を図11に示す。

エナメルの除去に関しては、除去が不十分なために導通しないもの、除去位置が不適切なもの（ゼムクリップに接触する部分が除去されていないもの）、過剰に除去されたもの（半面だけ除去すべきところを全面除去したもの）などがあった。除去不十分と判断されたものが9個と最も多かったが、残りの2個のコイルにも除去位置や過剰除去の問題があり、エナメル除去がうまくできていないコイルは1つもなかった。

このようなコイル製作の難しさは一般のクリップモータにおいても指摘され、解決方法が検討されてきた。コイルの形状に関しては、理想的なコイルの形状を図示し



(a) 軸の直線性不良



(b) 軸の長さ不適切・直線性不良

図11. コイルに見られた問題点の例

た型紙を用意し、これを用いて製作・調整させる方法が提案され、効果が確認されている²⁾。エナメル除去の問題に対しては、除去の手順の改善（半面除去する側を先に処理する）や絶縁性のある油性ペンの利用（過剰除去への対策として）などが提案されている³⁾。なお、本研究で用いたエナメル線は色の濃いものであり、除去した部分との色の違いが比較的わかりやすいが、現在ホームセンターや電子パーツ店で販売されているものの多くは被覆が透明なポリウレタン線である。サンドペーパーではがした部分の色の違いがわかりにくいいため、この点についても今後検討が必要になると思われる。

生徒が製作した11個のコイルは、2日目の授業までの間にすべて修理・調整し、本システムを用いて動作の確認を行った。その結果を表3に示す。表3には、各コイルごとに、確認できた問題点（表2の番号で表示）と調整前および調整後の回転速度を示している。なお、回転速度の数値はコイルに流す電流を最大にして（出力ポートの「1」の数を8にして）行った結果である。表に示した通り、調整前はわずかに回転が見られたNo.4を除き、ほとんどのコイルで全く回転が見られなかったが、調整後は毎秒9～23回の回転をさせることができた。

授業実践2日目は、調整済みのコイルをそれぞれ生徒に渡し、システムを用いて動作を確認することから始めた。全員の生徒が、自分が製作したコイルが回転することを確認することができた。

授業後に生徒に感想を書いてももらったが、「難しかった」「たいへんだった」「くやしい」「残念」などの記述が多く見られた。やはり、1日目の授業時間内に誰もコイルを回転させることができなかったことが原因であると思われる。しかし、2日目には修理・調整済みのコイ

表3. 各コイルの問題点と調整結果

コイルの番号	グループ	問題点	回転速度(回/秒)	
			調整前	調整後
No. 1	1	①③④	0	11
No. 2		①③④	0	13
No. 3		①④	0	15
No. 4	2	①②⑥	4	22
No. 5		①②⑤	0	12
No. 6		①②④	0	16
No. 7		①②④⑥	0	23
No. 8	3	①④	0	9
No. 9		①③④	0	15
No. 10		①③④	0	16
No. 11		①②④⑤	0	18

ルを使用して全員が回すことができたため、「びっくりしました」「すごかった」などの驚きを表す記述も見られた。1人だけ、コイルで電気が作られることに驚いた旨の記述があり、原理を誤解している可能性のある生徒がいることがわかった。本システムは乾電池を使用しないため、電流の経路が分かりにくい。本システムを用いて授業を行う際には、その仕組みを十分説明する必要がある。

4. まとめ

本研究では安価で比較的容易に使用できるインターフェース基板を用い、汎用の電子部品を使用した簡易なクリップモータ制御システムを開発した。外部電源（乾電池等）を使用していないためコンパクトで持ち運びやすく、また汎用のプログラミング言語でプログラムが作成できるためカスタマイズも容易である。基板の出力ポート（8ビット）の「1」の数に比例した電流がモータに流れるため、0を含めて9段階で電流を制御することができ、各端子の通電状態はLEDの点灯で確認できる。コイルが1回転する間に通電状態と遮断状態が1回ずつあり、それぞれ異なる電圧を生じるため、それを利用して回転速度を測定・表示することが可能である。回転速度を知ることができるため、生徒の意欲を向上させ、コイル製作に対する工夫を促す効果があると思われる。また、最大でも60 mA程度の電流しか流れないため、乾電池を使用した従来のクリップモータのようにショートにより過大電流が流れる恐れはない。

中学生を対象に授業実践を行ったところ、よく回るコイルの製作・調整が難しいこと、電池を使用していないために動作原理を誤解しやすいこと、などの課題が明らかになった。本システムを使用する際には、その仕組みについて十分生徒に説明するとともに、型紙の利用などコイルの製作・調整をしやすくする工夫が必要である。

参考文献

- 1) 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—, 化学と教育, 第54巻, 第3号, pp. 172-173 (2006).
- 2) 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), 電気学会研究会資料, FIE-06-22, pp. 13-20 (2006).
- 3) 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—, 北翔大学生涯学習システム学部研究紀要, 第10号, pp. 121-130 (2010).
- 4) 江口啓, 櫻井康平, 畑俊明: 回転残像を生じるクリップモータを用いた実践授業, 日本産業技術教育学会誌, 第53巻, 第3号, pp. 161-167 (2011).
- 5) 平島由美子: クリップモーターの工夫, 物理教育, 第60巻, 第2号, p. 127 (2012).
- 6) 石原学, 加藤康弘, 田中昭雄: クリップモータカーの実験課題の応用性と評価, 小山工業高等専門学校研究紀要, 第45号, pp. 81-84 (2012).
- 7) 加藤和男: 製作/調整容易な手作りモータ教材の開発(第二報)(実験ボランティア/教師テキストを兼ねて), 電気学会研究会資料, FIE-12-011, pp. 41-46 (2012).
- 8) 山口静夫: クリップモータによる回転と発電の原理を学ぶ教材の開発, 九州共立大学総合研究所紀要, 第6号, pp. 49-52 (2013).
- 9) 才木崇史, 古賀雅夫, 星野由雅, 森下浩史: 小学校での新しいクリップモーターの活用を目指して, 教育実践総合センター紀要, 12, pp. 245-251 (2013).
- 10) 小松博史: かんたん! USBで動かす電子工作, オーム社 (2011).