

電磁石に関する一研究

A Study of an Electromagnet

井 頭 均 *

Abstract

An electromagnet is one of the most important teaching tools in science education. It provides a lot of fun to students and keeps them interested in science.

In this study I examined two points about electromagnet. The first point was the relation between the number of turns on the coil and the strength of the magnetic force. I verified that they were directly proportional.

The second point was the relation between the quantity of iron in the core and the strength of the magnetic force. First I wound the leading wire on a thick straw without an iron center, then I measured the magnetic force. It was very weak. Next I inserted an iron wire into the straw (coil) and measured the magnetic force again. It was much stronger, enough that a small nail could be lifted up. The number of nails lifted up increased as the number of iron wires in the straw was increased. This shows that the amount of iron in the coil of an electromagnet is directly related to the magnetic force.

キーワード：電磁石、鉄心の数量、磁力

I、はじめに

電磁石は電気と磁石の関係を理解するうえで重要な教材であるとともに、児童や生徒の科学に対する興味や関心を高めることができる最も代表的な教材であり、小学校から高校までの間にくり返し採り上げられている。小学校の理科では、主に第5学年の「A(3)電流の働き」の単元で電磁石を学習する。そして学習指導要領には、次のように掲げられている。

ア 電流を流れているコイルは、鉄心を磁化する働きがあり、電流の向きが変わると、電磁石の極が変わること。

イ 電磁石の強さは、電流の強さや導線の巻き数によって変わること。

これを受けて教科書には、電流の流れを変えたり乾電池を1個用いた場合と2個を直列に用いたときの電磁石の強さを比較したり、コイルの巻き数が100回巻きと200回巻きの電磁石の磁力の違いを調べる実験が掲載されている。そして、子ども達は実際に導線を釘に巻いて電磁石を作ったり様々な実験を

したりしながら、電磁石についての理解を深めていくことになる。

しかし、これらの実験のほとんどが、吊り上げることができる釘の数が多いか少ないかを比べるだけの定性的な扱いとなっている。そこで本研究では、これらの実験を単に定性的だけではなく、定量的にすることを試みたのである。また、他の条件は一定にして、電磁石に鉄心を入れないときの磁力の強さや、鉄心の数量を少しずつ増やしていったときの磁力の強さの変化について調べてみた。

本研究の目的

- 1、電磁石のコイルの巻き数と磁力の強さの関係を確かめる。
- 2、電磁石の鉄心の有無、あるいは数量と磁力の強さの関係を明らかにする。

II、電磁石のコイルの巻き数と磁力の関係(実験1)

教科書では100回巻きと200回巻きの2種類だけを比較して、コイルが100回巻きのほうが磁力が弱い、

* Hitoshi IGASHIRA 教育学部教授 理科教育法、保育内容「環境」、科学と文明

200回巻きの方が磁力が強いという結論になっている。これに対して筆者は、電磁石のコイルの巻き数と磁力の強さはきれいな比例関係になるのか、それとも放物線のような曲線の関係であるのかをもう少し定量的に知りたいと考えたのである。

そこで本研究では、電源やコイルに使用する導線の長さなど他の条件は一定にしておいて、コイルの巻き数を順次増やして、そのときの磁力の強さを調べ、電磁石のコイルの巻き数と磁力の強さの関係を定量的に明らかにしようとした。

磁力の強さを測定するにはホール素子を使った測定機や磁束密度計などを使用すると便利であるが高額なこともあり、ここでは最も簡易的な方法として電磁石に吸い付く釘の数量で測定することにした。

1、実験方法

(1) 主な材料と器具

- ①コイル用の導線： $\phi = 0.55$ mm、長さ8.3 mのエナメル線（実際にはウレタン塗装）
- ②電源：単3のアルカリ乾電池1.5 V用
- ③鉄心： $\phi = 4$ mm、長さ10 cmの鉄釘を焼き鈍したもの。
- ④吊り下げる釘： $\phi = 1$ mm、長さ14 mmの鉄釘。数本ずつ金網の上に載せ、ガスバーナーで赤くなるまで加熱したあとと放置して冷却し、焼き鈍し処理しておく。
- ⑤電子台秤：最小目盛0.1 g、1.200 gまで測定可能

(2) 電磁石の作製

- ①直径約3.5 cmの厚紙の円板の中心に穴を開けて、直径5 mm、長さ9 cmのストローの両端に通す。
- ②ストローの両端を約1 cm、4片に切り開き、ホッチキスで円板を固定すると、幅7 cmの車軸の両端に車輪が付いたようなボビンが出来上がる。ボビンに鉄心となる長さ10 cmの釘を差し込む。
- ③エナメル線の一端を約30 cm余らせて、ボビンに20回、40回、60回と順次巻き付けてコイルの巻き数を増やしていく。余ったエナメル線は切らずに束ねておく。束からもう一方の端を約30 cm引き出す。エナメル線の両端を紙やすりで擦ってエナメルを剥がし、乾電池につなぐ。

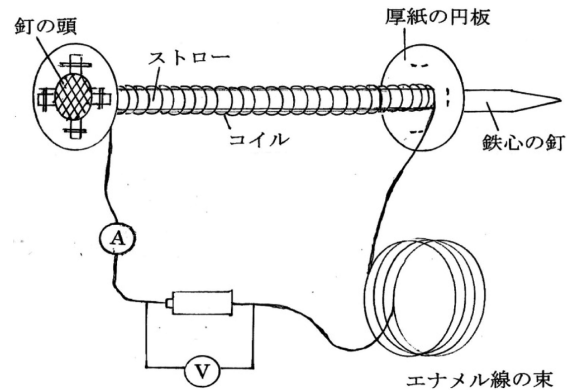


図1、電磁石の模式図

(3) 磁力の強さの測定

コイルの巻き数が20回増えるごとに電流を流して釘を付着させ、静かに持ち上げて小皿で受けて移動させ、電流を止めて釘の数量を測定した。測定は7回行い、中央の5回の平均値を求めた。なお、つり上げる途中で多数の釘が落ちた場合は、やり直した。

2、結果

(1) 釘の本数と重さの関係

最初、電磁石で吊り上げられた釘の数を、ピンセットを用いて数えていたが数が増えるにしたがって数えることが難しくなったので、釘の数を数える代わりに、台秤で吊り上げられた釘の重さを測定し、釘の本数と重さの関係式から本数を計算することにした。

釘の本数と重さの関係を調べたところ、ほぼきれいな直線となり、次のような関係式が得られた。

$$y \approx 0.14x \quad (x \text{ は釘の本数、} y \text{ は釘の重さ})$$

しかし考えてみれば、電磁石の磁力の強さを釘の

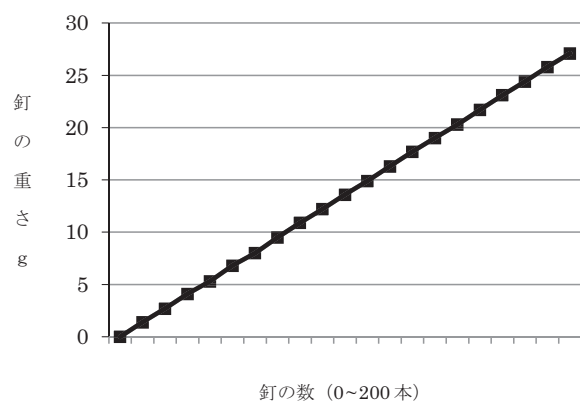


図2、釘の本数と重さの関係

本数で表さなくても、釘の重さで表すほうが簡単であり、これ以降は釘の数量を本数（本）ではなく、電子台秤で測定した重さ（g）で表すことにした。

(2) エナメル線の抵抗値

電磁石のコイルに使用するエナメル線は長さ8.3 mと長く、その一部はコイル状に、他の部分は束ねた状態となる。導線を伸ばした状態でもコイル状であっても直流電流の場合は電気抵抗が変わらないことを知識としては知っていたが、確かめたことがなかったのでテスターを用いて実際に測定してみた。

この結果エナメル線の抵抗値は、使用前の円形に束ねた状態、長く伸ばした状態、ボビンに350回巻きにした状態のいずれの場合も約0.6Ωを示し、殆ど違いが認められなかった。ちなみに銅の抵抗率は $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (20℃)であるので、 $2r = 0.55$ 、 $\ell = 8.3 \text{ m}$ の銅線の抵抗値を計算から求めると約0.57Ωとなり、計測値とはほぼ同じ値となる。

(3) コイルの巻き数と磁力の強さ

エナメル線の巻き数を10回ずつ増やすごとに乾電池につないで、釘を付着させて吊り上げ、付着した釘の重さを測定した。また、そのときの電圧、電流を測定した。つり上げる瞬間に離れ落ちる釘がかなりあってばらつきが大きいので、測定は5回くり返し、中央の3回の平均値を出した。結果を図3に示す。

コイルの巻き数が10回までは磁力が非常に弱く、つり上げることができる釘はほとんど0であった

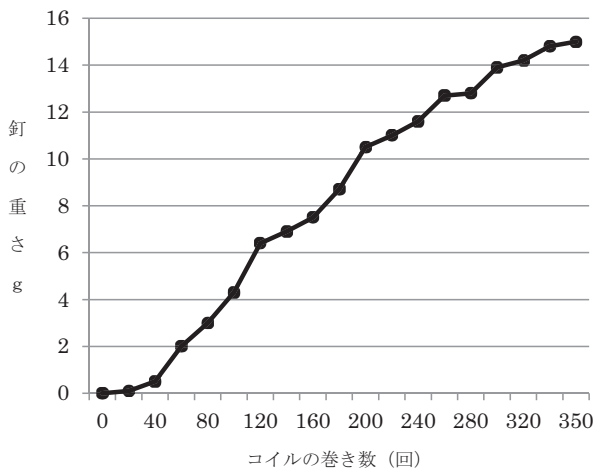


図3、電磁石のコイルの巻き数と吊り上がった釘の重さの関係

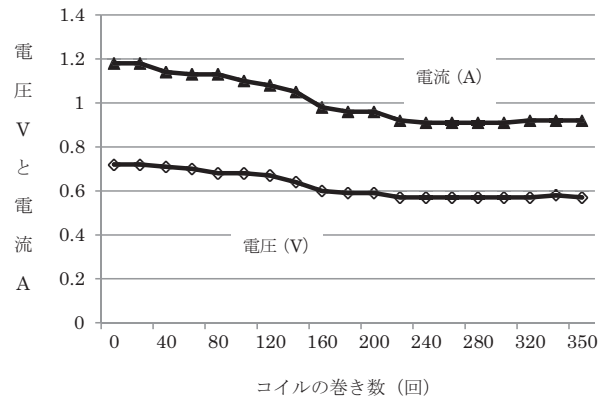


図4、電圧と電流の変化

が、巻き数が20回になってようやく1本の釘がつり上がる程度であった。その後、コイルの巻き数とつり上がる釘の重さはほぼ直線状に増加している。そして、260回を超えた頃から若干傾斜が緩やかになる傾向がある。

このときの電圧、電流の変化を図4に示した。実験する前の新品の乾電池の電圧は1.53 Vであったが、巻き数0回のエナメル線につないだ瞬間、電圧は0.72 Vに降下した。そのときの電流は1.18 Aであった。実験をしている間に電圧は徐々に低下を続け、最終的に0.57 Vまで低下した。同様に電流も1.18 Aから徐々に減少して、最終的には0.92 Aとなった。

III. 電磁石の鉄心の数量と磁力の強さ (実験2)

筆者は小学校で電磁石を作って以来、電磁石といえば鉄の釘や棒にエナメル線を何回も巻いて作るというのが常識となって何の疑いをもつことなく過ごしてきた。しかし、鉄心のない電磁石は電磁石として働くのであろうか、あるいは鉄心の数量を徐々に増やしたとき、磁力はどのように変化するのであろうかという疑問が湧いてきた。

そこで、もっと太いストローの周囲にエナメル線を巻いた電磁石を作って、その中に鉄心として細い針金を1本ずつ差し込んで増やしていったときの磁力の変化を調べることにした。

1. 実験方法

(1) 主な材料と器具

- ①コイル用の導線： $\phi = 0.4 \text{ mm}$ 、長さ9.2 mのエナメル線。実験1ではエナメル線の電気抵抗

が小さいので電流が約1.2 Aも流れ、乾電池への負荷が大き過ぎた。これを改良するために、前回よりも細くて長いエナメル線を使用した。

- ②電源：乾電池の代わりに乾電池直流定電圧電源装置 (TM-4S、UCHIDA) を使用した。
- ③鉄心： $\phi = 1.2 \text{ mm}$ の軟鉄の針金を4 cmの長さに切ったものを40本準備し、1本ずつ焼き鈍し処理を行った。すなわち、針金を1本ずつガスバーナーで赤くなるまで加熱したあと、セラミック網上に放置冷却した。

(2) 電磁石の作製

- ①太さ7 mm、長さ7 cmの太いストローの一端に、中心に直径7 mmの穴を開けた厚紙製の円板を固定する。円板から4 cm離れたところに2枚目の円板を通し、幅4 cm、内径7 mmのボビンを作る (図5)。
- ②エナメル線を上記のボビンに、できるだけ均等に360回巻く。エナメル線の両端は約30 cm伸ばしてある。
- ③厚さ0.2 mmのポリエチレン膜をセロテープで貼って、コイルの一端を閉じた。

(3) 磁力の測定方法

磁力の強さは、つり上がる釘の重さの測定では先ほどと同じであるが、精度を上げる目的でやり方を次のように変更した。すなわち、針を7回吊り上げて重さを測定し、最大と最小を切り捨て、5回の平均値を求めた。



2. 結果

(1) コイル内に針金が入っていない場合

針金を1本も入れない状態で電源につないだ場合、0.1 gの釘を1本もつり上げることができなかった。そこで微弱な磁力の有無を調べるために、方位磁石に近づけて動くかどうかを確かめてみた。

約10 cm離れた状態で、方位磁石の針が電磁石の動きに連動して若干動いて反応する程度である。さらに近づけていくと、1~2 cm離れた状態で、コイルの動きに連動して方位磁石の針が回転するようになった。これらの結果より鉄心がない場合、電磁石の磁力はゼロではないが非常に微弱であることが分った。

(2) 針金の数量と磁力の関係

コイルの中心に差し込む針金を1本ずつ増やし、その都度、つり上げることができる釘の重さを測定した。結果を図6に示す。差し込む針金が10本くらいまでは、針金の数とつり上がる釘の重さは概ね比例関係にあるが、その後、つり上がる釘の重さは増加しているが、増加率はやや鈍くなる。

(3) 針金の動き

実験をしているとき、電流を入れたり切ったりしたとき、電磁石の中からカサカサという音がすることに気が付いた。そこで、電源のスイッチを入れたり切ったりしながら電磁石のストローの中を上側から観察したところ、電流が流れていないときは針金が互いに乱雑に傾いて立っているが、電流が流れると同時に針金はストローの内側にピタリと貼り付くように直立する。針金が複数の場合、互いに排斥し合うように一番離れた場所に直立する。電流が切れ

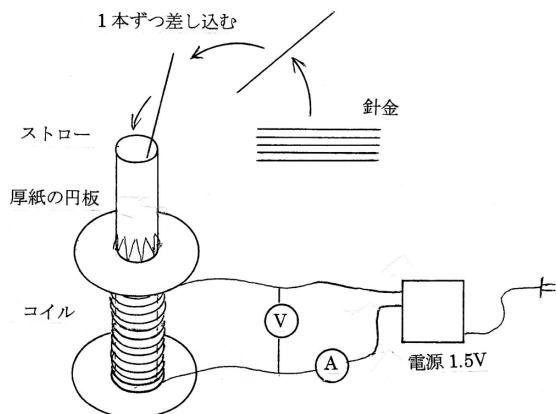


図5、実験2で用いた電磁石 (写真と模式図)

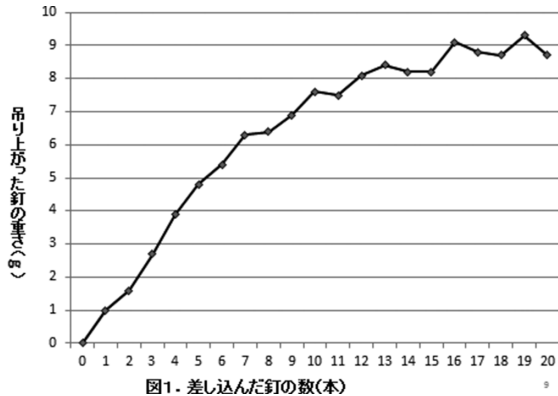


図1. 差し込んだ釘の数(本)
図6. 鉄心の数量と磁力の関係

ると、再び元のように乱雑に傾いてしまう。カサカサ聞こえる音は、ストロー内の針金が動くときに出来る音であった。

①針金が1本のとき

針金を差し込んだときは、ストローの中で斜めに傾いて立っているが、電気を通すと同時にストローの内側にピタッと貼り付いて直立する。電気を切ると再び斜めに傾く。

②2本のとき

最初は、互いに関係なく斜めに傾いて立っているが、通電と同時に、互いに反対側にストローの内側に貼り付いて直立する。

③3～5本のとき

電気が流れていないときは、互いに関係なく乱雑に斜めに傾いて立っている。通電と同時に3本のときは、正三角形の3つの角の位置に、4本のときは正方形の4つの角の位置に5本のときは正五角形の角の位置に、ストローの内側に貼り付いて直立する。電気を切ると同時に、元のように乱雑に傾いた状態に戻る。

IV. 考察

1. コイルの巻き数と磁力の関係

実験1の結果(図3)では、電磁石の磁力はコイルの巻き数におおよそ比例して大きくなることが

分った。但し、巻き数が260回を超えた頃から、磁力の増加する割合が徐々に小さくなっている。教科書には100回巻きと200回巻きの電磁石は出てくるが、どうして300回巻きや400回巻きの電磁石が出てこないのが、今回の結果からもある程度予想がつくだろう。実際に巻き数を400回、500回のコイルを作るためにはさらに長いエナメル線が必要となり、エナメル線が長くなると電気抵抗が大きくなって電流が減少するので、磁力が強くなることにつながらないからである。

2. 釘の数と重さ

小学校では安全面から電磁石でつり上げるのにクリップなどを用いているが、実験を定量的にするためにできるだけ小さくて軽い釘を用いた。しかし実験を進めていくうちに小さい釘の数を短時間で正確に数えることの難しさにぶつかった。いろいろ考えているうちに、電子天秤で釘の重さを測定し、その値から釘の数量を計算する方法にたどりつき、さらには釘の数を数えなくても磁石の強さを釘の重さで直接表せばよいという考えに至った。あとで考えれば些細なことではあるが、実験を進める筆者にとっては重要なことである。

3. 電磁石の鉄心の数量と磁力の関係

導線のコイル内の磁場の強さ(H)は、次の式で表さる。

$$H = \mu^0 n I \quad (\mu^0: \text{真空の透磁率}, \\ n: \text{単位長さ当りの巻き数}, I: \text{電流})$$

(1) 鉄心がゼロの場合

コイルの中に針金が1本も入っていないとき、0.1gの釘を1本もつり上げることができなかったが、方位磁石の針が反応したことから微弱ではあるが磁力が働いていることが分る。ここでは透磁率とは磁化のしやすさとも理解しておけばよいが、説明しておく、真空の透磁率は $\mu^0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ と非常に小さい値で、空気透磁率も真空と殆

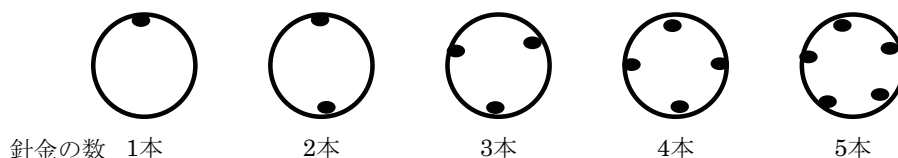


図7. 電流を流したときの針金の位置 (ストローの上側から見たところ)

ど変わらないくらい小さい。

(2) 差し込む針金の数量と磁力の強さの関係

しかし、磁性体の鉄の透磁率は空気の2,000倍から数千倍、純鉄になるとこれがさらに大きくなり、コイル内に針金を入れることによって磁場の強さが増大するのである。図2の結果をみると、中に差し込む針金の本数が増えるにしたがって、つり上がる釘の数量が増加して強い磁力が得られることが分る。しかし、針金が10本を超えた頃から、つり上がる釘の数量の増加率は徐々に小さくなっている。

これらの原因についてはよく分からないが、磁力の強さをつり上がる釘の数量で測定する今回用いた方法自体に限界があるのかも知れない。

(3) コイル内の針金の動き

筆者はこれまでに、コイル内の細い針金の動きを調査した研究や報告を見たことがなかったので、今回の発見は非常に興味深いものであった。電流を流すと同時に針金がストローの内面に貼り付くように直立する理由としては、ストローの内面がコイルに一番近くて磁場が強く、また針金自身も磁化されて、磁力線と同じ方向に並ぶからだと考えられる。また、針金が複数の場合、磁化された針金のN極とN極、S極とS極が互いに反発し合って一番離れた位置に直立するからではないだろうか。

今回の実験を進めていくうちに、磁力の強さをつり上げることができる釘の数量で定量化する今回の実験には少し無理があることを痛感したが、磁力のおおよその強さを知るには、この方法が最も簡単である。著者は今後、これまでに学んできた電磁石に関するいろいろな知識や経験を通して、磁石のもっている不思議な力や自然の不思議さを学生達に伝え続けていきたい。

○主な参考文献

- ・石井忠浩 2009 電流と磁界 中学理科 pp.136-146 受験研究社。
- ・近角聡信 1978 強磁性体の物理(上) p.15, p.38 裳華房。
- ・左巻健男 2005 中学理科の自由研究 pp.60-63 誠美堂出版。
- ・文部科学省 2008 小学校学習指導要領 理科編。
- ・脇島修 2005 電磁石の強さの考察 大阪と科学教育 19 pp.3-6. 大阪府教育センター。