

電磁作用に関する生徒実験用磁石

高 橋 成 和*

Masakazu TAKAHASHI

A Study on the Magnets suitable for Students' Experiment on the Electromagnetic Force

Abstract: The purpose of this study is to seek the magnets suitable for students' experiment on "the force of a magnetic field on a current-carrying conductor".

The main apparatus used in this work is a handmade ampere balance. The investigated magnets are as follows: Fe U-type permanent magnets, Al-Ni-Co U and bar-type permanent magnet, handmade U-type electromagnet and Helmholtz coils.

The results are summarized as follows: 1) A weak magnet does not keep a linear relation between the force and the current because the magnet is magnetized by the current and so the magnetic flux changes into a larger or a smaller density. 2) An expected effect was brought out by a magnet constructed with two iron bar pieces as each pole and from one to four Al-Ni-Co bar permanent magnets as magneto-motive-forces. 3) The non-core electromagnets were suitable one.

I はじめに

磁気に関する学習・指導は、小学校から大学に至るまで行なわれている。そこで使用される磁石を大別すると、永久磁石と電磁石とに分れ、前者には鉄やアルニコなどでできているU形と棒状のものが、後者には鉄芯にエナメル線を巻いたもの、空芯のヘルムホルツコイルなどがある。

一方、電流と磁束の相互作用に関する実験では、永久磁石が主に用いられ、中学理科においては定性的な、高校物理においては定量的な取り扱いがなされている。この定量的実験においても磁束中の電流Iとそれが受ける力Fとの比例関係を探求・検証することのみに留まっており、磁束密度Bには触れていない。これでは片手落ちであり、力Fが電流Iのみならず磁束密度Bにも比例すること、すなわち $F \propto I \times B$ であることが確認できるものでありたい。これを遂行するために適する磁石と、その使用上の留意点を求め、よく学校で使用される種類の磁石についてその個数や相互作用を受ける電線との相対的位置関係などを変えて、検討を行なった。

II 実験装置

教科書などに掲載されている電磁作用に関する実験装置¹⁻¹⁰⁾には、コロ式、振り子式、上皿天秤式¹¹⁾がある。この他には天秤方式が考えられる。前2者は、磁束中の電流が力を受けることを示す定性的実験には、簡便でよい。しかし、電流と磁束の相互作用により、電流を流している電線が移動し、磁石との相対的位置関係が変り、磁束密度一定の条件が設定しにくい定量的実験にはそぐわない。

これに対し、ゼロ位法を用いる天秤方式は定量性をつかむのに適している。この理由は、(1)電線を磁極からの定められた位置に固定し、磁束一定の条件下で電流が受ける力を測定できること、しかも(2)この力の測定が重りに働らく重力との釣合わせにより、直接的かつ容易にできることにある。したがって本研究においてもこの天秤方式を採用した。

II-A 天秤の製作

実験装置を図1に示す。これは3つの部分から構成され、図の中央が天秤本体、左側が磁石の位置を変えるための微動送り装置、右側が許容電流5Aの直流安定化電

*島根大学教育学部理科教育研究室

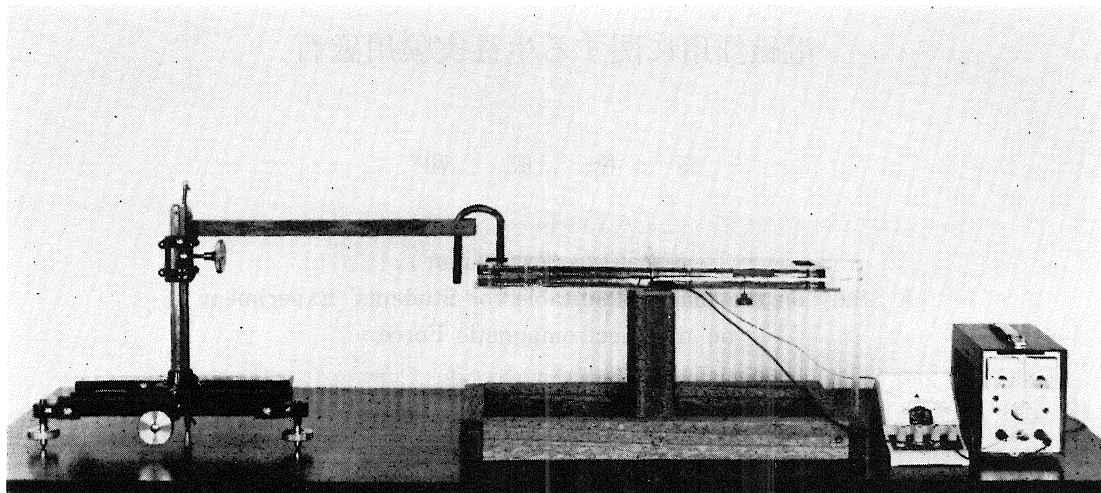


図 1 実験装置全体写真。左から磁石を上下左右に微動送りする装置、この腕についている口は鉄製U形磁石、天秤本体、電流計、直流安定化電源である。

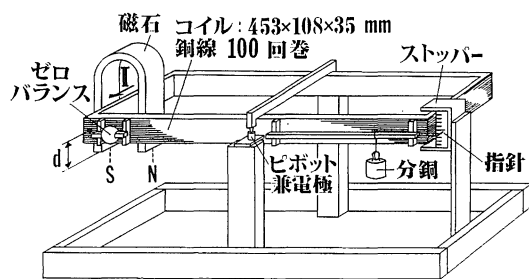


図 2 天秤本体略図。

源である。

本体は図2に示すように、長方形コイルを桿とする天秤と磁石から構成されている。

コイルは平均寸法が453mm×108mm×35mmであり、3mm厚の亚克力製巻きわくに0.85mmφのエナメル銅線を4層にして100回密に巻いてある。このコイルは、短辺方向の中心線(対称軸)が水平な回転軸になるように、2つのピボットで支えられており、これを支点にして振動できる。

このピボットは3mmφの鉄製ビスを加工して作った。受けの側は、台に立てた柱に固定されており、ビスの先端をドリルの先でV字形に穿孔し、また、この穴に入りコイルに固定される他方の側は、先端を鋭角にグラインダーで直円錐状にテーパ研磨してある。

力学的平衡状態における回転軸の水平性は、ピボットを作るネジを上下に移動し調節することにより得た。また、コイル面が水平になるように水準器で確認をとりながらコイルのわくにねん土を重りのかわりにつけて、ゼロバランスをとった。

コイルに流す電流はピボットを通して導いた。コイルの左側の短い1辺を構成する電線に流れる電流と、これにまたがらせて置いた磁石がつくる磁束との相互作用により、この電線の電流は鉛直方向に力を受け、コイル面は傾く。これを水平に戻す重りをコイルに吊り下げ、この支点からの距離と重さから電線の電流に働らく力を求めるのだが、この重り(20あるいは50g)を吊り下げる目盛つきの横渡し棒を、コイル前面に支点の高さで設けた。

実際の測定時には、まず重りを吊り下げ、これにバランスするだけの電流を流す方法をとる。このときバランスがとれないで、磁石と電線の相対的位置がずれると、磁束の状態が変わり、ひいては電磁力が変わることとなる。したがって一層バランスがくずれぬ方向に走り、調節がしにくい。これを補うため、バランスが崩れても、定められた磁束を持つ場所の近傍に電線が束縛されるようにストッパーを設けた。感度調節機構はつけていない。

II-B 検討を加えた磁石

実験で使用した磁石は図3に示す次の5種である。

- | | | |
|------|---|-----------|
| 永久磁石 | { | 鉄製U形磁石 |
| | | アルニコ製U形磁石 |
| | | アルニコ製棒状磁石 |

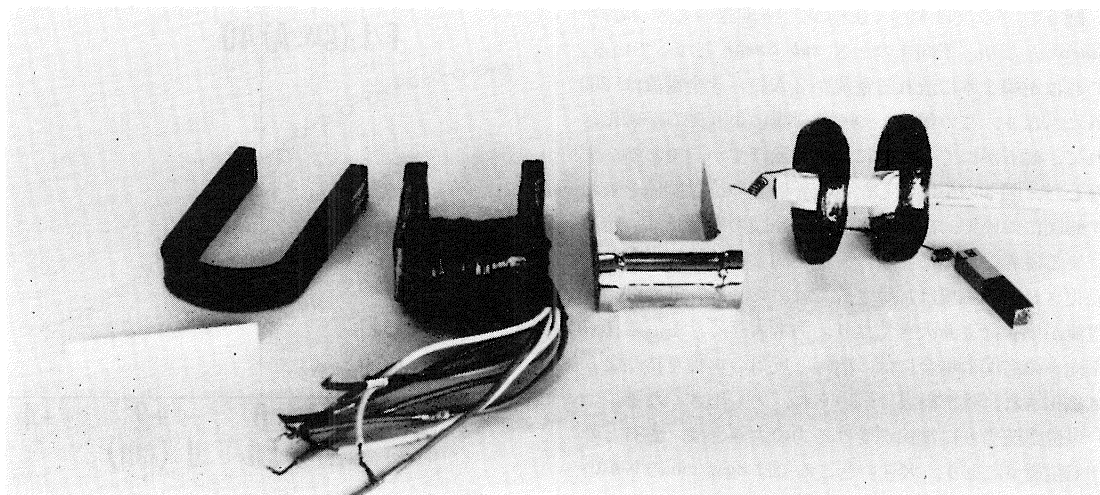


図 3 実験に使用した磁石。左から鉄製U形磁石、鉄芯U形電磁石、アルニコ製U形磁石、ヘルムホルツコイル、アルニコ製棒磁石。大きさの基準としてタバコを左下に置いた。

電磁石 { 鉄芯U形電磁石
ヘルムホルツコイル

永久磁石は市販のものを用い、電磁石は自作である。鉄芯U形電磁石は、アルニコ製U形磁石と同形状・同寸法のものである。厚さ1mmのブリキ板9枚を絶縁して重ねたものをU形に折り曲げて鉄芯とした。コイルはU形の底の部分にエナメル線を100回毎に端子を出しながら800回巻いたものである。

ヘルムホルツコイルは内径49mm、外径67mmの300回巻ドーナツ状の円形コイル2個で構成した。これら2つの電磁石とも電流を2A以上流すと手で触れられない程の発熱をきたした。

III 実験結果と考察

III-A 鉄製U形磁石

まず、図1に示した状態での鉄製U形磁石についての測定結果を図4に示す。1本の電線を流れる、電流Iと100本の電線に働く合力Fは比例関係にない。もう一步進めた磁石の上下の向き、電線との位置関係を変えての測定結果が図5である。ここで電流と磁束線の向き、したがって力の向きは変えていない。また、磁石の端を原点にした電線の中央までの距離dで両者の相対的位置関係を表わす。ただし、電線が磁石の外にあるときを+、内にあるときを-とする。また図5の左上にある説明図のように磁極を上向きにしたときの測定点は●印、下向きにしたときは○印で描くことにする。

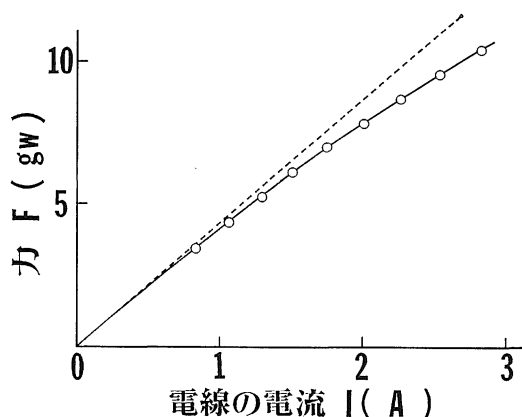


図 4 図1の状態では測定した電流Iと力Fの関係。磁束は鉄製U形磁石による。

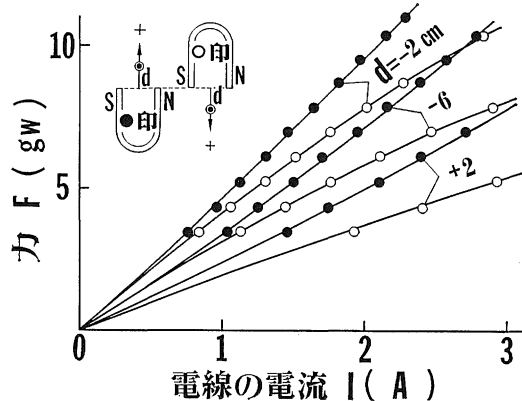


図 5 鉄製U形磁石の向き・電線との位置関係dを変えての電流Iと力Fの関係。磁石の磁極が上向きするとき●印、下向きするとき○印でプロットした。

図5のグラフはすべて磁極が、上向きるとき *super-linear* となり、下向きるとき *sub-linear* となっている。これは電線1本に流れる電流が2 A のとき全電流は200 A にもなり、この電流がつくる磁場により磁石が磁化されて、磁石がつくる磁束に影響を及ぼすからである。すなわち、図5の中に示した電流と磁石の位置関係を表わす略図において、磁極が上向きの左図の場合では、電流による磁界のために磁石は磁極と同じ極性を持つように磁化され外部磁場は加算されて強められる。その効果は電流が増せばより大きくなり、力も大きくなる。磁極が下向きの右図の場合には、磁極と反対の極性を持つように磁化され、外部磁場は弱められ、力も小さくなる。

単位電流当りに電線が受ける力の大きさは、磁石との相対位置 d により、大きいところでは 3gw/cm のちがいがあがる。これは磁石の周りの磁束密度が位置により違うため、したがって電磁作用にかかわる定量的実験においては d をしっかり固定しておく、必要性を示唆している。

Ⅲ-B アルニコ製U形磁石

電流による磁石の磁化の影響を軽減するには、まず電流をへらすことがあげられる。しかし、これは力も同時に小さくなり、力の測定に困難さを来たす。何故ならば教育用の実験器具は、初心者が使用する配慮から、破損しないものが望まれる。いまの場合、支点の精巧さを犠牲にしてもこの事を満たしたい。したがって、支点には何程かの摩擦が存在するからである。よって、この摩擦が無視できるだけの力が生じることが要求される。

ここで、磁束密度を大きくする必要性が生じる。これを実行する1つの方法としてアルニコ製磁石の使用が考えられ、これを検討した。

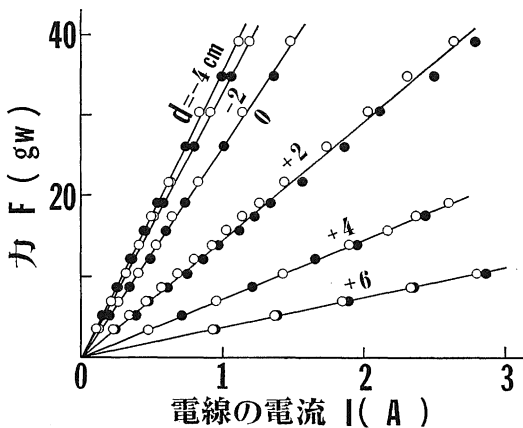


図6 アルニコ製U形磁石の向き・電線との位置関係 d を変えての電流 I と力 F の関係。

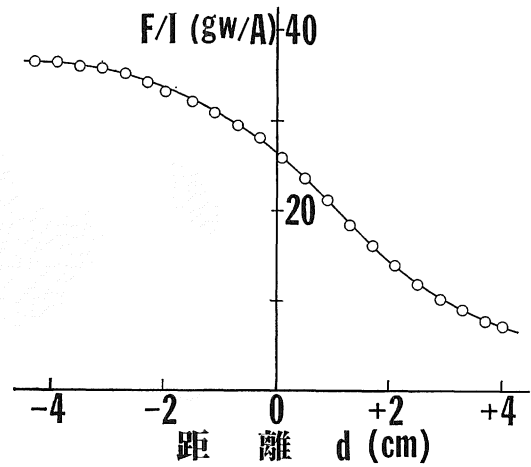


図7 アルニコ製U形磁石の位置による磁力の違い。

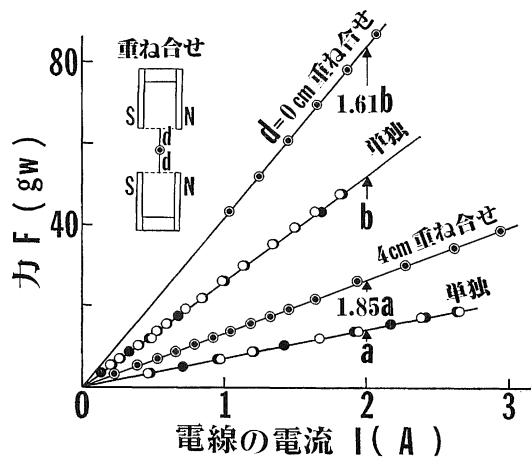


図8 アルニコ製U形磁石による電磁力。磁石1つの場合(単独)と、電線に対しこれと同じ位置関係を保って上下に相対して置いた2つの磁石の場合(重ね合せ)の比較。

結果を図6に示す。最も磁力が大きい位置での磁束密度は、鉄製に比べて8倍である。この大きになると、上記の影響が隠されて、力 F は電流 I に比例している。しかし、鉄製と同様で、位置により磁束密度がかなり異なっている。この程度を、電線の磁石からの距離 d と単位電流あたりに受ける力 F/I の関係として図7に示した。

次に、磁束密度を2倍にするために2つの磁石の同極どうしを相対して置き、4つの極の中央に電線を置いた場合と、この位置関係を保って一方の磁石を取り去った場合を比較する。結果は図8に示す通りで、2つの磁

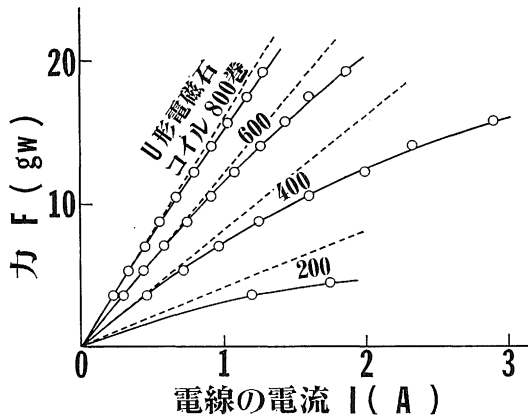


図 9 U形電磁石による電磁作用：電線との位置関係 $d = -4\text{cm}$ 、電磁石のコイルの電流 1 A のときの巻数による違い。

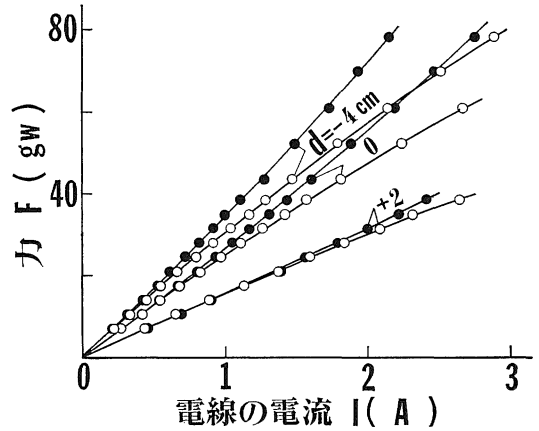


図 11 U形電磁石による電磁作用：電磁石のコイルの電流 1 A、800 巻のときの電線との位置関係 d による違い。

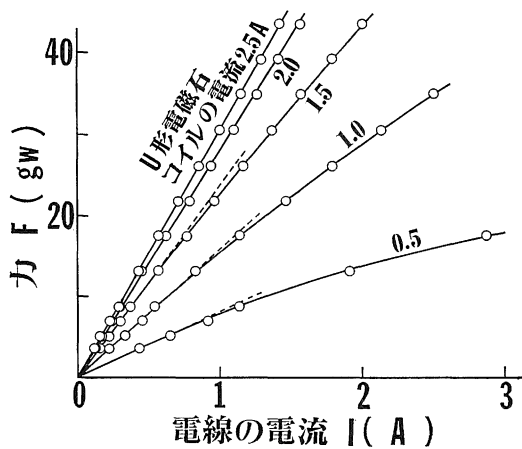


図 10 U形電磁石による電磁作用：電線との位置関係 $d = -4\text{cm}$ 、電磁石のコイル 800 巻のときのコイルの電流による違い。

石の電流に及ぼす効果は、各々の磁石単独による効果の重ね合せになっていない。

III-C U形電磁石

磁束密度を 2 倍、3 倍……する方法として電磁石の電流を変えて調節することがあげられる。そこで、鉄芯 U 形電磁石を用い、電流・コイルの巻数を変えることにより磁束密度を変えての実験結果を図 9～11 に示す。

まず d を -4cm に固定し、電磁石の電流 i を 1 A に定めてコイルの巻数 n を変えたときの図 9 を見ると、 n が小さく磁束が弱いときは非線型性が大きく、巻数が増すにつれ直線関係に近づく。このことは n を 800 巻に固定

し i を増していく図 10 においてもうかがえる。しかも、グラフの傾きの増加のしかたが i を増すにつれて緩慢になっている。これは鉄芯が磁氣的飽和現象を起し始めていると考えられる。したがって、この方法では電磁力が磁束密度に比例することをつかむことは望めない。

III-D ヘルムホルツコイル

電線を通る電流 I による鉄芯の磁化、またコイルの電流 i による鉄芯の磁氣的飽和をなくすには鉄芯を撤去すればよい。平行磁場が望まれるので小型のヘルムホルツコイルを使用した。この結果は図 12 のように、力 F が電流 I と磁束を作るヘルムホルツコイルを通る電流 i の両者に美事に比例している。しかし、コイルの中心磁

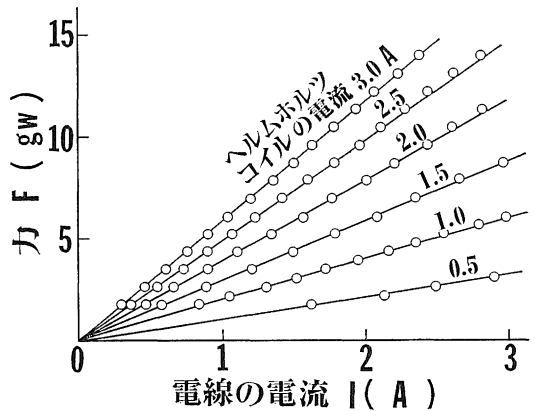


図 12 ヘルムホルツコイルの電流を変えたときの電磁作用。

* 並列して置く場合は、磁束が作用する電線の長さが 2 倍になる効果に相当する。

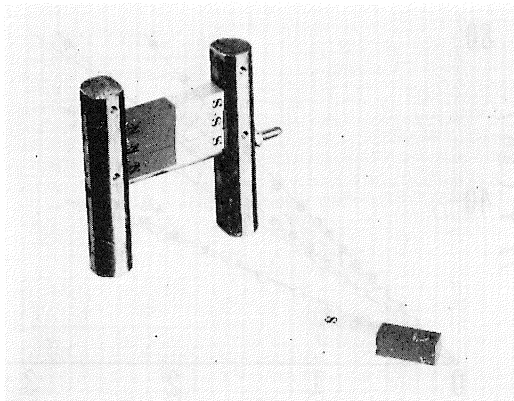


図 13 2本の鉄棒の間に棒状アルニコ製磁石をはさんだU形磁石。はさむ棒磁石の本数を変えて鉄棒間の磁束を変える。

場を電流と半径から算出し、これをもって電線に作用する磁束密度として電流 I に働らく力を導き比較すると、実験値は $3/8$ 程度であった。これはコイルが作る磁場の大きさが場所により異なるのと合せ、2つの円形コイルで囲まれる領域の外では磁束の向きが反対となることにも大きく起因する。

Ⅲ-E 棒状アルニコ磁石の組合せ

ヘルムホルツコイルは大学において学習する分野であり、中・高校では永久磁石を用いることが望まれる。このとき、今まで述べてきたことを総括して、磁荷が大きく、磁石と電線の位置関係 d を変えない、すなわち磁石を動かさずに磁束密度が2倍、3倍……とできる必要がある。この条件を満たすものとして、鉄棒と棒状アルニコ磁石を組合せた図13に示すU形磁石があげられる。

まず長さ95mm、直径20mm ϕ の2本の鉄製丸棒を正方形断面に近づけ整形し、これらを並行して固定する。次に、この間に棒磁石を1本、2本……とはめ込んで全体をU形に構成する。棒磁石を脱着して、起磁力を調節し、2本の鉄棒の間の磁束密度を2倍、3倍……と変える。

これを用いての結果を図14に示す。やはり棒磁石の数が少なく、磁束が弱いときは電流 I による磁化の影響を受け、力と電流の関係に非線型性が生じる。しかし電流が小さいときには、棒磁石の数と力が比例関係にあり、当初の目的が達成されたことになる。

Ⅳ おわりに

電磁作用は、ベル、冷蔵庫のポンプ、ガストープの安全装置などの家庭用品から、モーター、メーター、電

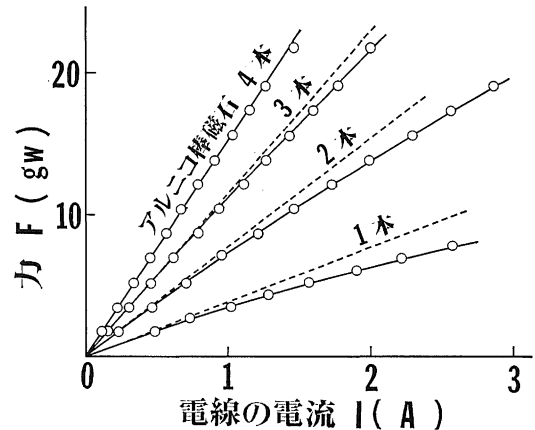


図 14 図13の磁石による電磁作用。

磁バルブなどの動力、計測、自動制御システムにかかわる現代工業技術に、またサイクロトロンなどの科学研究に至るまで、数知れない分野、部分に浸透し利用されている。このフレミングの左手の法則に代表される自然科学史上の大発見が教育の場においても、電磁気学の一斑として取り上げられている意義は大きい。この学習場面における、実験で、力が電流と合わせ磁束密度にも比例することを探求・検証するに相応しい磁石並びにその用法について1つの知見を示した。

まだ永久磁石については、形状、寸法、あるいはその組合せかたに、また電磁石については、これらのことと合せ、鉄芯の材質など検討の余地を残す。例えば、ヘルムホルツコイルを効率よく使う大きさや、また鉄芯を珪素鋼板やダストコアにして磁氣的飽和を改善する方策を練ることなどである。

しかしここで述べた結果は、生徒・学生実験に用いる装置の設計・製作への指針を十分に与えている。

終りに、本研究にあたり島根県津和野町立木部中学校教諭 波多野捷二氏（現在、島根大学教育学部科学教育研究室に内地留学中）の協力を得た。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 中込八郎, 藤井 清: 物理実験ハンドブック (講談社) 226 (1977)
- (2) 中込八郎: 最新教育物理実験 (聖文社) 292 (1967)
- (3) 伊神大四郎, 大塚誠造, 小林学: 中学校理科観察と実験の事典 (第一法規出版) 153 (1973)

- (4) 生地富雄：科学の実験 臨時増刊(共立出版) 16, 229 (1965)
- (5) 山内恭彦, 平田森三, 富山小太郎：PSSC 物理下 (岩波書店) 521 (1963)
- (6) 後藤道夫, 岸野安彦, 馬目秀夫：理科実験指導シリーズ物理 (講談社) 110 (1982)
- (7) 那波信男：実験観察教材教具 (東京書籍) 443 (1978)
- (8) 岡崎良吉：実験観察教材教具 (東京書籍) 451 (1978)
- (9) 池本義夫：物理実験事業 (講談社) 433 (1978)
- (10) 芦葉浪久 *et al*：原色図解理科実験大事典自作実験編 (全教図) 140 (1977)
- (11) 磁石を上皿天秤や台秤の上へのせ, 電流との相互作用の力を秤で直接測定する方法。