

電磁誘導法による永久磁石の強度測定 — “サイエンスメイト” の物理実験への適用 —

The intensity measurement of two permanent magnets by electromagnetic induction method - The application of “sciencemate” to physical experiments -

遠藤 将一¹⁾・井上 桂太¹⁾・松尾 隆祐²⁾

Shoichi ENDO¹⁾, Keita INOUE¹⁾, Takasuke MATSUO²⁾

市販されている簡便なインターフェースである“サイエンスメイト”を用いて永久磁石の強度測定を行った。ファラデーの電磁誘導の法則に基づいて、一对の磁石がコイルを横切るときの誘導起電力の時間変化を測定し、磁石間の磁束から磁石の磁束密度を求めた。電気自動車、通信機器、家電などの省エネルギー技術の鍵を握るレアアース磁石である Nd-Fe-B 磁石は強力で、金属酸化物であるフェライト磁石の約 2.5 倍の値を示した。パソコンに精通していない者も対象にする学生実験の課題として適当である。

1. 現代社会における磁石の重要性⁽¹⁾

ボードにメモ用紙を貼り付けるボタン磁石や銀行、乗車券などの磁気カードを除いて、日常生活の中で永久磁石を目にする機会はほとんどないが、実は様々な分野で使われている。冷蔵庫、洗濯機、エアコン、パソコン、携帯電話機・・・と枚挙に暇がない。何よりも大切な生命を守るための医療にも使われ、MRI（磁気共鳴画像装置）では強力な磁石がガンの探知を可能にしている。自動車ではワイパー、パワーウィンドー、電動ステアリング、各種メーターなど 1 台あたりなんと 100 個（2 kg）以上の磁石が使われている。

自動車といえば、最近では燃費がガソリン車の 1 割で済むといわれる電気自動車への流れが加速している。電気の貯蔵能力の大きい小型軽量の電池の開発が急がれている。搭載するモーターの高効率化が更なる燃費の向上を可能にする。その鍵となるのが強力な永久磁石である。このように、多くの電気機器に使われてい

るモーター一つとってみても磁石は省エネルギー化のエースになり得る。

ハイブリッドカーの場合は発電機も搭載する。電磁石を用いる大型発電機は別として、交通機関、コージェネ発電や風力発電などに使われる比較的小型の発電機の高効率化は強力な磁石の使用によって実現する。省エネルギー・省資源は地球温暖化を招く CO₂ 排出を抑制する。

2. 永久磁石の種類⁽¹⁾

ある種の石が南北を指すということは紀元前から知られて航海用羅針盤に使われたが、その石が採取されたのがギリシャのマグネシア地方ということで磁石がマグネットと名付けられた。一方、今日の工業的な磁石の合成は金属磁石、酸化物磁石ともに 20 世紀初頭に日本で始まった。これまでに世界中で開発された各種磁石の歴史を最大エネルギー積との関係で示したのが図 1 である。この中の主な磁石、3 種について簡単に紹介する。

連絡先：遠藤将一 sendo@cis.ac.jp

1) 千葉科学大学危機管理学部動物・環境システム学科
Department of Animal and Environmental System,
Faculty of Risk and Crisis Management, Chiba
Institute of Science

2) クラーク記念国際高等学校大阪キャンパス
CLARK Memorial International High School, Osaka
Campus

(2010 年 09 月 30 日受付, 2010 年 12 月 16 日受理)

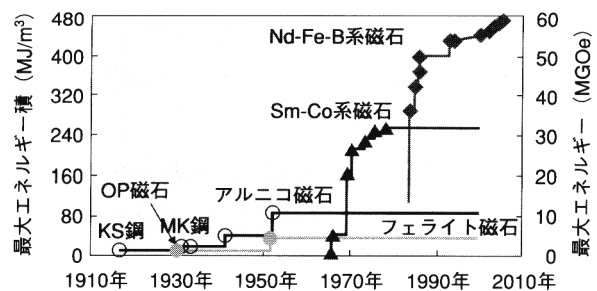


図 1. 磁石の歴史⁽¹⁾

フェライト磁石

1930 年代に武井 武博士らによって発明された (CoFe)O・Fe₂O₃ に始まる金属の酸化物磁石である。現在は Ba、Sr フェライト磁石が主流で磁気カードや磁気テープに使われている。安価で多くの家電品や車の電装品にも使われている。

Sm-Co 磁石

本多光太郎博士による KS 鋼に始まる金属磁石の一種で、大きいエネルギー積をもち機器の小型化に貢献している。ウォークマンはこの磁石によって生まれた。

Nd-Fe-B 磁石

金属間化合物磁石であって、あらゆる種類の磁石中で最大のエネルギー積を持つ。ハードディスクドライブの小型化を可能にした。電気自動車用モーターの高効率化の主役である。Sm と同じ希土類元素ではあるが Nd の方が安価である。しかし、希土類の埋蔵量の 90% が内モンゴルなど中国にあるといわれ、最近、中国政府は自国の電気自動車産業の育成の戦略として、希土類元素の輸出の大幅削減を宣言した。日本の産業への影響が気遣われている。

本稿では、フェライト磁石と Nd-Fe-B 磁石 (直径 30 mm、厚さ 5 mm) についての測定結果を紹介する。

3. 実験方法

3.1 測定の原理

磁気測定には様々な方法があるが、ここでは電磁気学の教科書に必ず出てくる最も基本的な現象の一つである電磁誘導法を用いた。先に著者の一人 (松尾) が試みた方法⁽²⁾ を改良したものである。図 2 のように向かい合わせた一対の円盤型磁石を四角形のコイル (巻き数 N) をはさんで前後に振動させる。磁石の N 極か

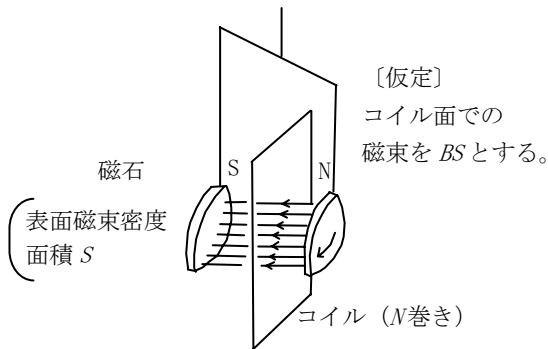


図 2. コイルを挟んで一対の磁石を振動させる

ら S 極に向かって磁力線が発生する。この磁力線が平行で外側に膨らまないかと仮定すると、断面積 S の磁石の表面磁束密度が B の場合、コイル面での磁束 Φ は BS となる。測定で磁石を振動させるとコイル内に入る磁

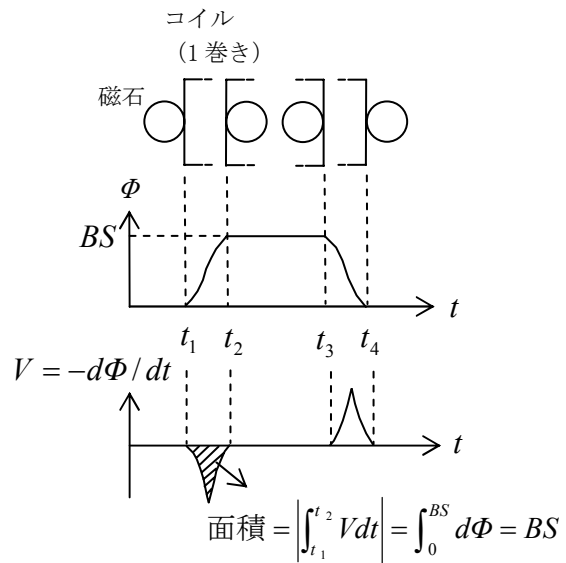


図 3. 電磁誘導法による磁束密度の測定原理

力線の数、従って、磁束 Φ が変化し、コイルに誘導起電力 $V = -N \cdot d\Phi/dt$ が発生する。 $N = 1$ の場合を図 3 に示す。図 3 の上図のように円形の磁石が左からコイル内に入って来ると、中図のようにコイル内の磁束が変化し、コイルには下図のような起電力が発生する。斜線の面積から磁石の BS が求まる。このようにして、目的とする磁石の磁束密度 B を決定できる。

実際の実験装置を図 4 に示す。コイルは 10 cm 角の枠に 0.2 mm 径のホルマル線を 20 回巻いたものである。長さ 1 m の吊棒の下端につけた磁石がコイルを挟んで平行に振動するように、吊棒の上端と横棒の接続部にベアリングを用いた特殊な回転機構を製作した。

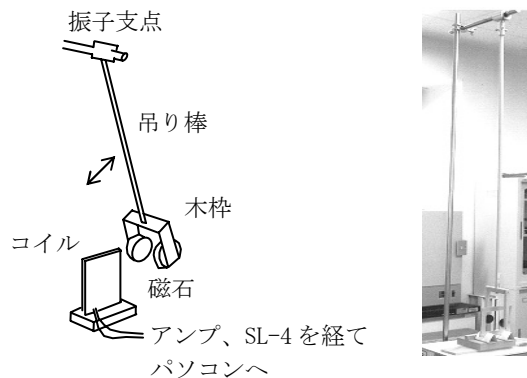


図 4. 測定装置

3.2 電圧の測定法

通常は、デジタルボルトメーターをインターフェースを介してパソコンに接続して電圧の時間変化を測定する。ここでは、(株) 内田洋行が理科教材として市販してい



図 5. サイエンスメイトとパソコンの組み合わせ

る“サイエンスメイト (sciencemate) SL-4”⁽³⁾ を使用した。パソコンに習熟していなくても手軽に使えるのが一番で、しかも比較的安価である。図 5 のように、パソコンにサイエンスキャプチャーを介してつないだ電圧センサーにコイルの両端を接続する。センサーは電圧用以外にも電流、気温、光、pH、圧力用など多種のものが用意されている。

試みにスズ (Sn) の融点を検出してみたところ、融

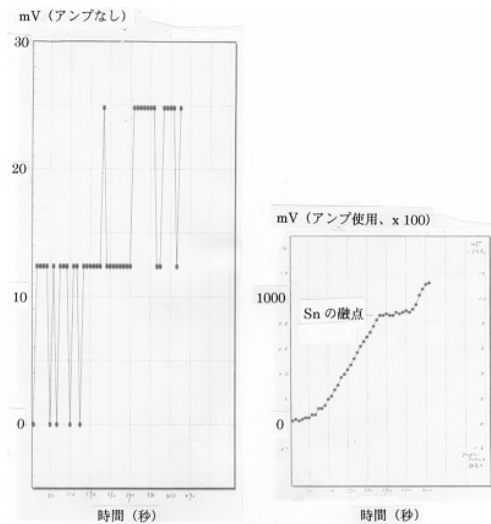


図 6. 熱電対の起電力測定による Sn の融点検出
(左：アンプなし、右：アンプ使用)

解に相当する温度付近でアルメルクロメル熱電対の起電力をまともに測定することができなかった (図 6

(左))。カタログに電圧分解能が明記されていないのでメーカーに問い合わせたところ、12 mV と大きくてこのままでは到底使えないことが明らかになった。その対策として、直流アンプを製作して、コイルからのシグナルを増幅して電圧センサーに入れることにした。100 倍に増幅した結果を図 6 (右) に示す。Sn の融解にともなって熱電対の起電力が一定になっていることが認められる。

3.3 誘導起電力測定と実験法の改良

フェライト磁石の測定結果のうち、2 つの磁石間の距離が 4.1、1.7、0.8 cm の場合について図 7 に示す。

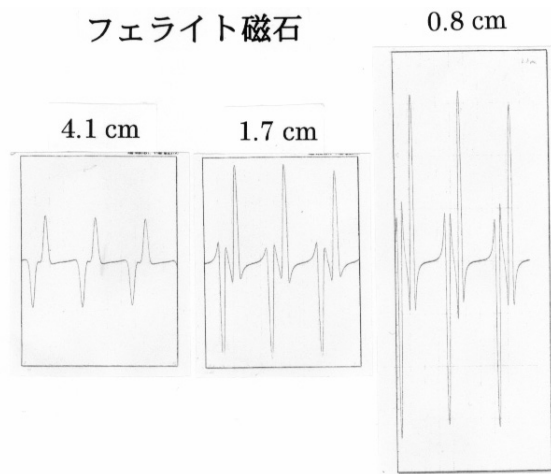
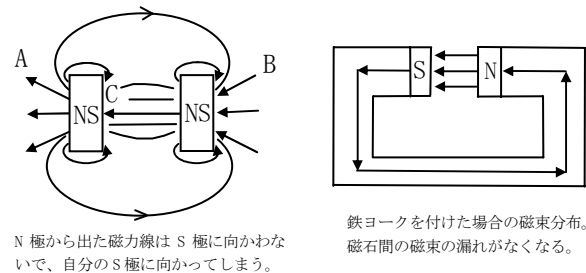


図 7. フェライト磁石の測定例 (木枠使用) で、数字は磁石間距離。

結果は、必ずしも図 3 の下図のようにシンプルではなく、複雑な様相を呈している。これは図 2 のように、例えば N 極から出た磁力線のすべてが平行に走って相手の S 極に入るといことが成り立っていないためと考えられる。その様子を図 8 (左) に示すが、N 極から出た磁力線は遠い相手の S 極に向かわないで自分のすぐ裏側の S 極に向かってしまう。その結果、発生する



N 極から出た磁力線は S 極に向かわないで、自分の S 極に向かってしまう。

鉄ヨークを付けた場合の磁束分布。磁石間の磁束の漏れがなくなる。

図 8. (左) 磁力線の漏れを示す。(右) 鉄枠を用いて漏れを無くする。

誘導起電力が複雑になると説明できる。

その対策として、図8(右)のように2つの磁石をつなぐ枠(ヨーク)を鉄に代えた。そうすると、例えば、左側の磁石の裏のN極から出た磁力線はヨークから漏れ出すことなく進んで右側の磁石のS極に入ることになる。

4. 結果と考察

上記の方法によって、フェライト磁石について図9に示すようにシンプルな結果が得られた。

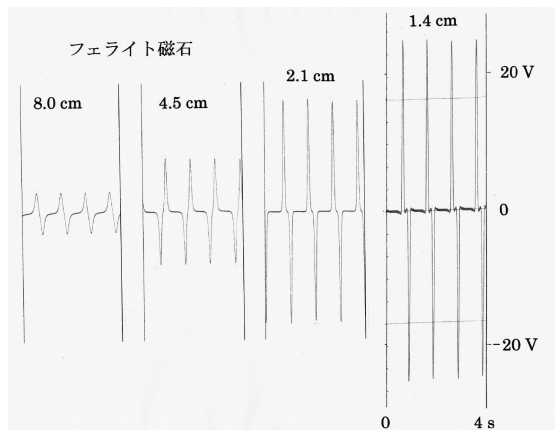


図9. 鉄ヨークを用いたフェライト磁石の測定

このようにして Nd-Fe-B 磁石についても測定した。距離毎に得られた6本のピーク1本々々についてサイエンスメイトに付属のソフトを用いて面積を求めて平均し、それをコイルの巻き数20で割ったもの(磁束 Φ)をさらに磁石の面積で割り算して磁石の磁束密度(B)とした。結果を図10に示す。

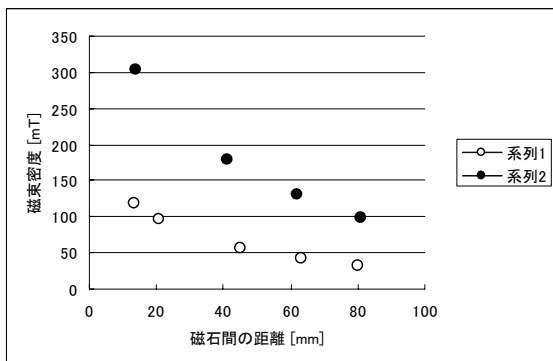


図10. フェライト磁石(系列1)とNd-Fe-B磁石(系列2)について磁石間距離の関数として得られた磁束密度

しかし、磁束密度はそれぞれの磁石に固有の値であり、距離によって変化する値ではない。やはり、2つの磁石の間の磁力線の走り方が磁石間の距離に応じて変化しているとみなされる。磁石間の距離が大きくなると磁力線が外側に膨らみ出し、図2あるいは図8(右)のような平行の条件が充たされなくなる。その結果、コイルの位置での磁束(Φ)が磁石間の距離に応じて変化するのだろう。このような場合、磁力線の膨らみをもっとも抑えられる距離0(ゼロ)に外挿した値を磁束密度(B)とみなす。このように図10を見ると、フェライト磁石の磁束密度が150 mT(ミリテスラ)程度であるのに対して、Nd-Fe-B磁石では400 mT程度と2.5倍ほど大きく、後者が強力で今後の産業の目玉となっているのが頷ける。

以上、ささやかな実験結果を紹介した。安価なインターフェースを用いて、手作りの装置とパソコンをつないで手軽に実験ができる一方で、ファラデーの電磁誘導について理解を深めることができる。理系の学生実験のテーマとして適切ではと考えている。

参考文献

- (1) 篠原 肇、徳永雅亮：磁石は地球を救う -省エネ時代のエース-、化学同人、2005.
- (2) 川上智史、権野翔太郎、松尾隆祐：うちゅう、**23**(3)、16-18、大阪市立科学館、2003.
- (3) ウチダ理化学機器カタログ、Vol. 60、pp. 224-235、2009-2010.