

研究報告

方位磁針を利用した磁力線描画教材の開発

牧原 義一 三重大学教育学部 514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

磁石や電流のまわりの磁力線を実験的に可視化する方法として、細かい砂鉄や鉄粉を撒く方法、複数の方位磁針を置く方法などが良く用いられている。本稿では、方位磁針の裏側に鉛筆の芯を取りつけた器具を用いて、磁力線を紙上に描画・記録して磁力線の様子を可視化する新たな方法について述べる。また、いくつかの磁力線の描画結果とその特徴を紹介するとともに、本教材を用いた実習に対する受講者の意見・感想についても報告する。

1. はじめに

目に見えない磁界（磁場）の様子を可視化するために磁力線が用いられる。磁界の定義に基づく計算により描画された磁力線のパターンが、多くの教科書やウェブサイト上に公開されている¹⁾。一方、磁力線を観察するための実験的な方法としては、ア) 細かい砂鉄や鉄粉をふりかけて粒子のつくるパターンを観察する、イ) 小さく切ったカラークリップをふりかけて立体的なパターンをつくる²⁾、ウ) 多くの小さな方位磁針を置いて磁針が作るパターンを観察する、などがある。しかし、ア)、イ)の方法では、きれいなパターンをつくることは技術的にそれほど容易ではなく、後始末も面倒である。また、ウ)では多数の方位磁針が必要であり、磁力線を1本の線として表示できない。そこで、取り扱いが容易で準備や後片付けも簡単な「方位磁針を利用して磁力線を描画する新たな教材」を開発した。

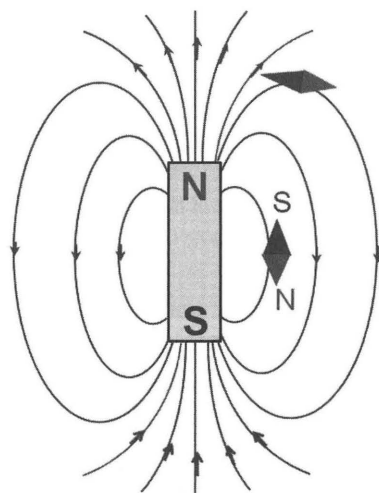


図1 棒磁石のまわりの磁力線と方位磁針

2. 磁力線の定義と新たな磁力線の可視化法

図1に、棒磁石のまわりの磁力線の様子を示す。磁力線は、その接線の向きがその位置における磁界の向きを、その密度が磁界の強さを表すものとして定義される。すなわち、空間内の磁界の向きは磁界中に置いた小さな方位磁針のN極が指す向きであり、この方位磁針の方向はその位置の磁力線の接線の向きと一致する。このような磁力線の定義を利用すると、自由に回転できる方位磁針のN極が指す向きにゆつくりと方位磁針を進めたときのその移動経路を記録することにより、1本の磁力線を描画することができる。

3. 磁力線の描画

3.1 磁力線描画用方位磁針の作製

方位磁針の移動経路を記録するための簡便な方法として、方位磁針の底部中央位置に鉛筆の芯を固定したものを作製した。例えば図2に示すように、透明な方位磁針（ナリカ、OG-40）の裏側中央部分にある内径2.0mm、深さ2.5mmの穴を利用して、この穴に長さ4～5mmの鉛筆の芯を差し込み、芯が落下しないようにその上からセロハンテープで固定した後、芯の頭のテープを取り除いて記録できるようにした。裏に穴の無い方位磁針では、底部にセロハンテープを貼った上に小さな鉛筆の芯を接着剤で固定すればよい。あるいは、鉛筆の芯を取り付け可能な容器を作製して、その容器に方位磁針をセットする方法も考えられる。

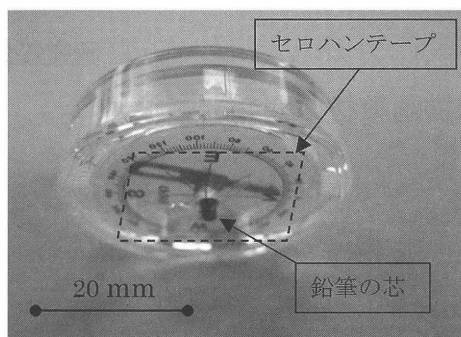


図2 磁力線描画用方位磁針 (底部から撮影)

3.2 磁力線の描画方法と描画結果

紙の上にセロハンテープ等で棒磁石を固定し、磁石の近くに置いた磁力線描画用方位磁針を軽く紙に押し付けながら、磁針のN極(またはS極)が指す向きにゆっくりと方位磁針を移動させてゆくことにより、その移動経路が紙上に記録され、磁石のまわりの磁力線を描画することができる。方位磁針の底部が透明であれば、記録経過の観察や、記録の一時停止・再開などをより容易に行うことができる。

図3に棒磁石(長さ73 mm)のまわりの磁力線の描画例を示す。この例は筆者によるものであり、描画には約5分の時間を要した。磁力線が弧を描いてN極からS極へ向かう様子や、N極から離れると磁力線の間隔が広がる様子など、教科書等でよく見られるような磁力線のパターンが記録されている。また、磁石から離れた位置では、磁力線のパターンが図1のような対称的なパターンから少しずつれているが、このことは地磁気の向きを考慮することによって定性的に説明することができる。

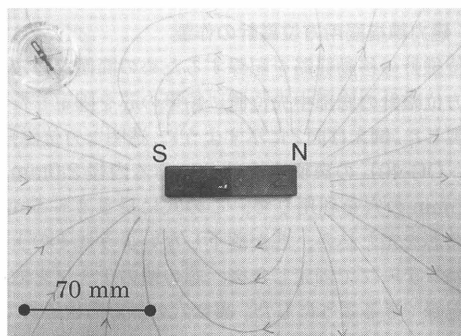


図3 棒磁石のまわりの磁力線

図4は、2本の棒磁石を一行にならべたときの磁力線の描画結果である。N極同士を向い合わせた場合に両磁石のN極から出た磁力線が互いに反発する様子や、N極

とS極を向い合わせた場合に片方の磁石のN極から出た磁力線がもう一方の磁石のS極に入る様子など、向かい合う磁極の違いに対応した磁力線のパターンの特徴が明瞭に記録されている。

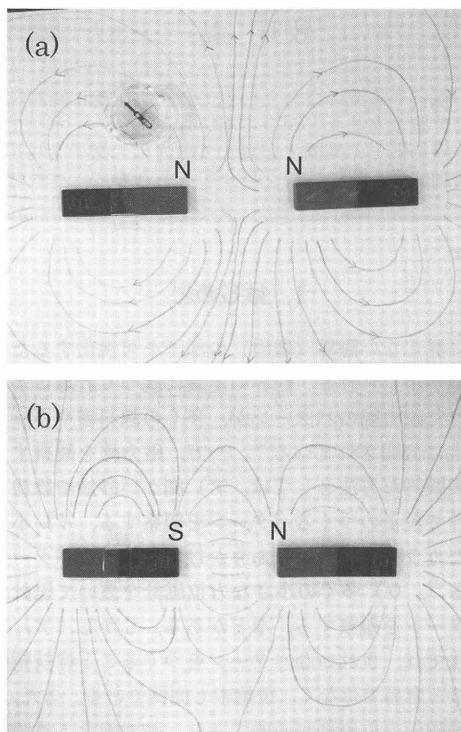


図4 2個の棒磁石のまわりの磁力線
(a) N極同士を向い合わせた場合
(b) N極とS極を向い合わせた場合

図5に直線電流 I のまわりの磁力線の描画結果を示す。数A程度の電流による磁界の強さは、図3に示すような永久磁石による磁界の場合に比べて小さい。本実験では電流が作る磁界(磁力線)を明確に描画するために、杉原³⁾によって考案された「S-cable」と呼ばれる大電流導線を用いた。図5(a)、(b)の導線のまわりには $I = 40\text{A}$ 相当の直線電流による磁界が生じている。(a)は直線電流に垂直な平面上に鉄粉を撒いたときの鉄粉のつくるパターンであり、(b)は同じ条件での磁力線の描画結果である。鉄粉のパターンから直線電流のまわりの同心円状の磁力線のパターンが推測される。一方、(b)の導線に近いところでは明確な同心円状の磁力線が記録されている。しかし、図中の点線円内の導線の左側からスタートする3本の磁力線を反時計回りに描画してゆくと、導線のまわりを一周したとき、方位磁針はスタート位置より導線から離れた位置に到達している。これは、

直線電流から少し離れた部分では、磁界が弱いことに起因する描画の誤差が拡大するために生じた結果であると推察される（次節 4. を参照）。また、この方法では電流のまわりの磁力線の描画開始位置を任意に設定せざるを得ないため、描画結果から磁界の強さを定性的に評価することはできないことを指摘しておく。

さて、図 5 中のスケールに注目していただきたい。(a) と (b) のスケールとそれぞれの磁力線のパターンの比較から分かるように、同じ大きさの直線電流において、鉄粉の場合より方位磁針を用いた方法がより遠方まで磁力線のパターンを視覚化できている。このことは、磁界中の磁針に働く摩擦力が紙上の鉄粉に働く摩擦力に比べてはるかに小さいために、方位磁針による方法がより広範囲の磁力線のパターンを可視化できることを示している。

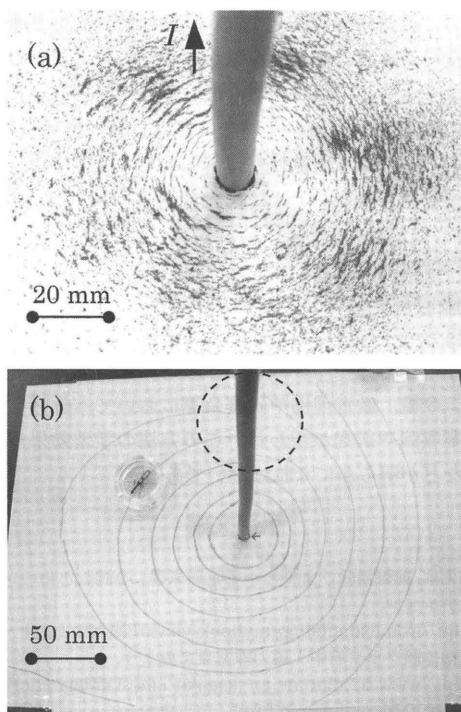


図 5 直線電流 I のまわりの磁力線
(a) 細かい鉄粉を撒いた場合
(b) 本教材による描画結果

図 6 は直線電流の近くに棒磁石を置いた場合の磁力線の描画結果である。直線電流による同心円状の磁界と棒磁石による磁界が合成された特徴的な磁力線の様子が記録されている。ここで、図中の番号 1, 2 で示す磁力線は棒磁石の N 極から出たあと電流を反時計回りにまわって互いに近付き、さらに番号 3, 4 の磁力線とも近付いて、

図中の点線円内に示すように、電流を反時計回りにまわる 1 本の線に合流するような振る舞いを示した * (* これら 4 本の磁力線は、このあとほぼ同じ経路で電流を反時計回りにまわるが、煩雑になるためその経路は描かれていない)。しかし、棒磁石の N 極から出た磁力線は最終的には棒磁石の S 極へ入るべきであり、その意味で 1 ~ 4 は明らかに誤った磁力線である。また、図中の番号 5 で示した急激に折れ曲がる磁力線は、わずかな位置の変化でその経路が変わるため、大きな誤差を含むものと考えられる。以上の結果は、複雑で微妙な磁力線を描く場合、この方法には精度的に限界があることを示している。

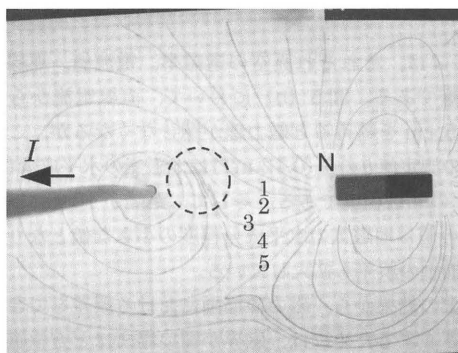


図 6 直線電流と棒磁石による磁力線の描画例

4. 磁界の強さと描画の誤差

この方位磁針を用いて磁力線を描画する方法では、無限にゆっくりと方位磁針を動かさない限り、少しずつ誤差を生じることが原理的には避けられない。方位磁針を速く動かすと、本来の 1 本の磁力線上からその接線方向に方位磁針が少し外れてしまい、方位磁針の移動とともにそのずれが次第に拡大してゆく。その結果、例えば前節で示したように、直線電流のまわりの磁力線を描く場合、その磁力線は同心円状にはならず、螺旋 (helical) 状のパターンになると考えられる。しかし実験では、図 5 (b) に示すように、直線電流に近く磁界が比較的強い位置では、同心円状の磁力線が描画された。一方、直線電流から離れた磁界が弱い位置では、前述したように磁力線は閉じずに螺旋的なパターンを示した。

図 7 に 40 A の直線電流のまわりの磁束密度 B (直線電流に垂直な面内の成分) の測定結果を示す。測定には PASCO 社の磁気センサ (PS-2112) を用いた。導線の直径は 8.0 mm であるが、測定値と理論値 ($B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$) はほぼ一致していることが分かる。ここで、式中の

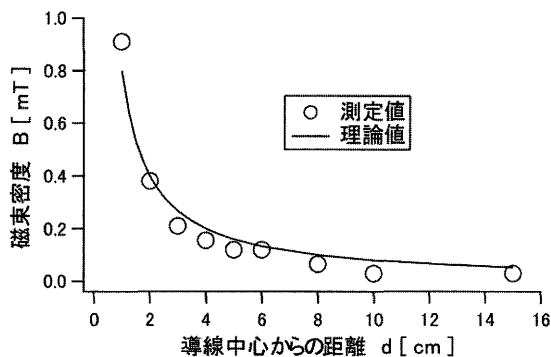


図7 直線電流 (40A) のまわりの磁束密度

μ_0 , I , d は、それぞれ真空の透磁率、電流値、導線からの距離である。図5 (b) において、直線電流からの距離が5 cm を越えると磁力線が閉じなくなるが、この距離での測定値 B の値 (0.12 mT) は地磁気の水平成分 (0.03 mT) の4倍程度である。そして、距離が10 cm 以上では B の値は地磁気の水平成分程度の小さな値となり、同時に描画の誤差も拡大している。

以上の結果から、磁力線描画における誤差をできるだけ小さくするためには、磁界が弱い場所ほど方位磁針をゆっくりと動かす必要があることが分かる。また、図6のような複雑で微妙な磁力線を描く場合は、描画結果を理論的に考察したり、シミュレーション結果と比較したりするなどして、その妥当性を確認しなければならない。

5. 実習とその感想

本学教育学部小学校課程の2, 3年生 (40名) と小・中学校の現職の先生 (12名) を対象にして、今回考案した教材を用いた磁力線の描画についての実習をそれぞれ実施した。実習では、各自が磁力線描画用方位磁針を作製した後、図3および図5に示すような1個の棒磁石および直線電流のまわりの磁力線の描画を行った。教材の作製および磁力線の描画の両方とも、特筆すべき問題は無く作業はスムーズに行われた。また、描画結果については、ほとんどの場合本稿の写真で示したものと同程度、あるいはもっと対称性の良い磁力線のパターンが得られた。中には、磁力線が交差するような結果になった人 (2名) や、磁針が揺れて描きにくいなどの意見 (1名) もあったが、1～2回練習するうちにそのような

例は無くなった。

受講者の意見や感想としては、「方位磁針があればどこでも磁力線を描くことができるので、便利で面白い」、「鉄粉を使う方法に比べて、簡単に磁力線を可視化できる」、「後片付けが簡単」、「磁力線の向きが分かる」、「ゆっくりと何本も磁力線を書いて記録して、いつでも見直すことができる」、「磁石から遠ざかると、磁力線の間隔が広がってゆくことを発見できた」、「磁力線が決して交差することがないということを再確認できた」、「地磁気と磁石の影響の及ぼし合いについてよく理解できた」など、その多くが肯定的なものであった。また、小学校教員の受講者からは、「現場ですぐに実践したい」という意見をいただいた。このような感想や意見の中に、今回開発した磁力線描画法の特徴とその有効性が良く表現されている。

一方、改善すべき点として、「磁力線が教科書通りにならないことがある」、「誤差が出やすい」、「磁界の強さが分からない」、「磁石のすぐ近くの線を描けない」、「平面での磁力線しか描けない」などの意見が寄せられた。このような内容も本教材の特徴であり、使用に際して注意すべき点である。

6. おわりに

簡便で取り扱いやすい磁力線描画用方位磁針を用いて、自分の手で磁力線を描くことにより、磁石や電流のまわりの磁力線のパターンを体験的に理解することができる。今後、教育現場や研修会等において本教材を用いた授業実践や研究が行われ、この方法の学習効果や改善方法などが明らかになれば幸いである。

引用文献

- 1) 例えば、前野昌弘:「よくわかる電磁気学」を読むためのシミュレーション,
<http://irobutsu.a.la9.jp/mybook/ykwkrEM/sim.html>
- 2) 科学体験クラブ府中: 磁力線を見てみよう,
<http://www.h7.dion.ne.jp/~kagaku/LinesOfMagneticForce/LinesOfMagneticForce.html>
- 3) 杉原和男: 午後の理科室,
<http://www.eonet.ne.jp/~sugicon/index.html>

(2013年 4月24日初回原稿受付)

(2013年 12月 6日改訂原稿受付)