

磁石の磁束密度を任意定数とする学生実験の開発

櫻井 勇良*

The development of the laboratory experiment which makes flux density of magnetic to be an arbitrary constant

Yuryo SAKURAI

Abstract:

An experiment confirming the change in size, from the viewpoint of the magnetic, of magnetic flux density was carried out. As a result, the following facts were confirmed.

- (1) There is a case in which magnetic flux density is associated with a homopolar magnet, and a case in which the flux changes from being a repulsive force to attractive force. This phenomenon is dependent on the difference in the magnetic flux density, and it appears when double the original magnetic flux intensity is exceeded.
- (2) The varying in the magnetic flux density which proves the character of magnetic lines of force which arises between magnets can be observed, when two magnets are brought close together.
- (3) The magnetic flux density increases when the magnets are piled up.
- (4) There is a close relation between electromagnetic braking force and magnetic flux density.

KEY WORDS: Magnet, Magnetic flux density, Magnetic lines of force, Magnetic force

要旨:

本研究では、磁石の磁束密度に着目し、その大きさによる変化を確かめる実験を行なった。その結果、以下のよう
なことが確かめられた。

- (1) 同極の磁石同士を近づけた場合、斥力から引力に変化する場合がある。この現象は、磁束密度の差に依存し、
約2倍を超えると現れる。
- (2) 2つの磁石を近づけた場合、磁石間に発生する磁力線の様子を裏付ける磁束密度の変化が観測できる。
- (3) 磁石を重ねた場合、磁束密度は見かけ上増加する。(4) 磁束密度と電磁制動力の関係は密接である。

キーワード: 磁石、磁束密度、磁力線、磁力

1. はじめに

筆者は、大学低年次を対象とする電気基礎実験を担当しており、実験教材の開発を行っている。この実験では、磁気関係のテーマも実施しており、現在、その見直しを行っている。磁石を使った実験でポイ

ントになるのは、磁極を磁束密度であることを経験的に感じていた。そこで、この視点から吟味を行い、磁石の持つ磁束密度の差異を使った実験およびそのための教材の開発を試みた。その結果、使えるような実験を得ることができた。本稿では、それらの概要を報告する。

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 准教授

2. 実験方法と結果

2.1 積み重ねた磁石の磁束密度について

量には外延量と内包量がある。外延量は、対象の合併に対して和が対応する量であり、外延量でない量が内包量である。たとえば、長さ・面積・体積は外延量であり、速さ・温度は内包量である¹⁾。密度・濃度も内包量である。磁束密度は、密度の一種であるので内包量である。和が対応しないことを確かめるのがこの実験の目的である。

2.1.1 実験方法

同程度の磁束密度 B を持つ同材料の磁石を、順方向および逆方向の磁界に積み重ねた場合の磁束密度を調べる。測定場所は、磁極面およびその側面である。

実験では、積み重ねた時の B の変化および用いた磁石の依存性を確かめるために、各種のネオジウム磁石（直径 ϕ : 10 mm, 高さ : 5 mm, B : 400 mT (試料1), ϕ : 10 mm, 高さ : 15 mm, B : 500 mT (試料2), ϕ : 10 mm, B : 400 mT (試料3), ϕ : 10 mm, 高さ : 40 mm, B : 500 mT (試料4), ϕ : 30 mm, 高さ : 15 mm, B : 500 mT) を用いる。 B は、磁束計 (F.W.BELL, Model9200) を用い、センサの端面を片方の磁極（磁石を積み重ねない面）に密着させ、端面全体を測定する。測定した値の中で最高値の値を記録した。

磁石を積み重ねる場合、磁軸のずれが測定結果に影響を与えるので、それぞれの試料の外径とほぼ同等の内径を持つアクリル製のパイプを用いる。磁軸を揃えながら一枚ずつ積み重ねる毎に B を測定し、 B の変化が飽和するまで行う。

2.1.2 実験結果および考察

図1に観察例を示す。重ねた磁石の枚数 N による B の変化を見ると、試料4 (●) の場合は、大きな変化が見られなかったが、それ以外の試料では、 N の増加に対して、 B の表示が飽和傾向を示しながら増加する傾向が見られた。なお、磁石を逆方向の磁界になるように、強引に密着させた場合は、 B の表示が減少する傾向を示した。以下では、これらの結果について考察する。

B の表示が変化したことは、 B そのものが変化した場合および検出成分（センサの端面に垂直な成分）が変化した場合が考えられる。前者の場合は、2.2で後述するように、用いた磁石間の B の差が、ある値を超えた場合に起きる可能性がある。しかし、この実験では、同程度の B を有する磁石を用いたので、

これによる影響は、少なく、 B の方向成分の変化による影響が大きいと考えられる。磁力線のイメージ図（図2参照、簡単のため2本だけ示した）を用いると、次のように理解できる。

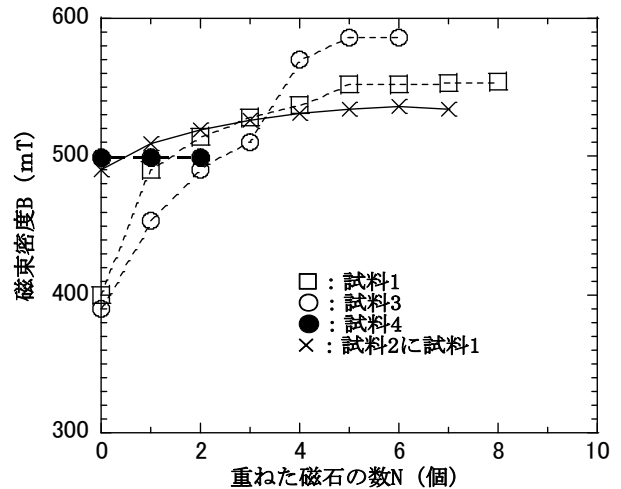


図1 測定例

結論から言えば、 B の表示が増えたのは、図2の②の状態にあった磁力線が①の状態、すなわち Z 方向の磁力成分が増えたためである。そして、 B の表示が減ったのは、その逆の変化、すなわち①の状態にあった磁力線が②の状態になり、 Z 方向の成分が減ったためであると考えられる。 B は、外延量ではないので、加法や減法に対応しないが、方向成分を有しているので、外部条件によりその成分比が変わることが考えられる。そうなれば、 B の表示も変わる。この実験結果は、それを裏付けている。

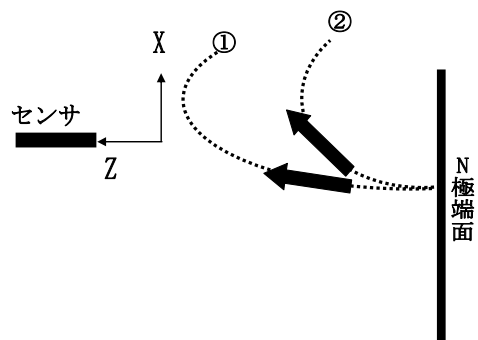


図2 磁力線のイメージ図

以上のように、内包量の一つである B について、その性質、すなわち和が対応しないことを確認した。当初は、変化が現れないと考えていたが、変化が現れる場合と現れない場合があるのがわかった。

2.2 磁石の磁化と磁束密度について

磁石は、磁界の作用で磁界の向きに磁気モーメントをもつ（磁気分極をもつ）物質である。磁気分極の生じる現象を磁化現象と呼び、磁石の性質は、材料および磁化条件に依存する。この磁化現象を再現し、磁気モーメントの変化を確かめるのがこの実験の目的である。

2.2.1 実験方法

表 1 に試料を示す。磁石同士を近接させることは、素手でも行えるが、それでは測定条件を揃えるのが困難である。そこで、図 3 の実験装置を用いる。このシステムは、自動 X-Y ステージ（以下ステージと略す）や光学部品などで構成される。磁石は、フェライト磁石（直径：29.5 mm、厚さ：5 mm、磁束密度 B ：60 mT）を用いる。磁石間距離 d (mm) は、移動用のステージを移動させることで調整する。したがって、図 3 に示すように、2 個の磁石の内、片方の磁石 (S1) を土台に固定し、もう片方の磁石 (S2, N2) をステージに固定する。 B は、磁束計 (F.W.BELL, Model9200) を用いて測定する。センサの端面を土台に固定した磁石 (S1) の端面に平行になるように配置し、固定する（磁軸に直交な成分を測定する）。

表 1 使用した磁石

試料名	大きさ(mm)	磁束密度 B (mT)	
M1	$\Phi 29.5 \times 5$	60	Ferrite
M2	$\Phi 10.0 \times 10$	320	Fe-Nd-B
M3	$\Phi 20.0 \times 5$	280	Fe-Nd-B
M4	$\Phi 30.0 \times 15$	500	Fe-Nd-B

ステージを動かす速度や水平方向の位置は、手動のコントローラで行う。垂直方向の位置は、ヘリコイドスタンドを用いる。磁石は、ステージの固定部分と稼動部に取り付け、ステージを動かすことで両者間の距離 d を調整する。磁石間に発生する力は力センサ(ナリカ, E 31-6990-16, -50～50 N, 精度 0.1 N)で、電圧値は電圧センサ（ナリカ, -20～20 V, 分解能 10 mV）で測定し、パーソナルコンピュータで

収録する。試料は、専用の非磁性材料の道具を用いて固定する。この測定では、 F , L , B を検出する必要があるが、 d は、摺動抵抗器（100 mm, 10 k Ω , 直線型）およびデジタル式ノギス（～150 mm, 誤差 ± 0.03 mm）を用いて測定した。磁束計の出力および摺動抵抗器の電圧は、電圧センサ（ナリカ, ± 1 V（分解能 1 mV）, -20～20 V（分解能 10 mV））で、石間に発生する力は、力センサ(ナリカ, E 31-6990-16, -50～50 N, 精度 0.1 N)で測定する。

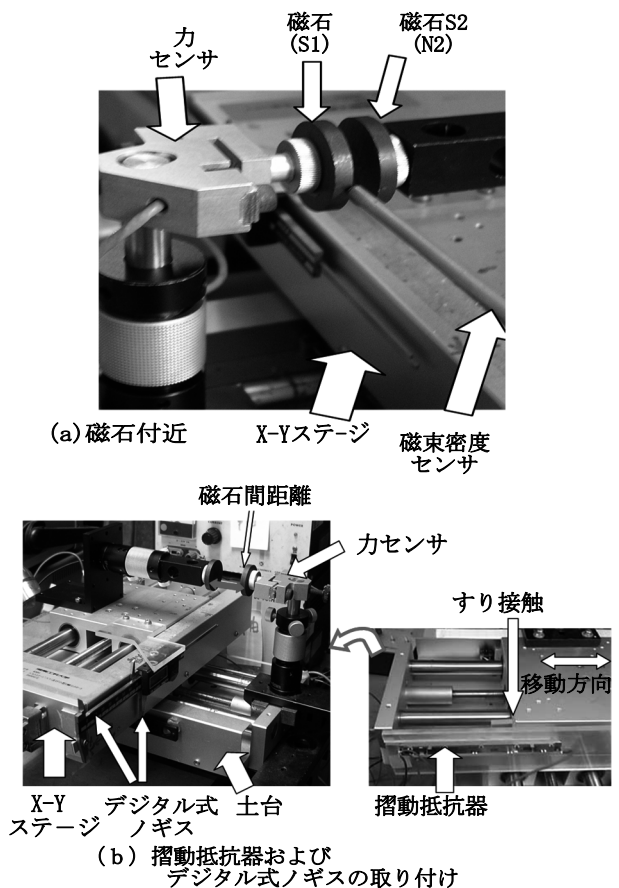


図 3 測定装置の外観

2.2.2 実験結果および考察

表 1 の試料を用い、組み合わせを変えながら同極同士を近づけた結果、斥力から引力に変わる現象が見られる場合と、見られない場合があった。

表 2 力の符号変化の有無

○：有． ×：なし

試料	M1	M2	M3	M4
M1	×(1)	○(5.3)	○(4.7)	○(8.3)
M2		×(1)	×(1.1)	×(1.56)
M3			×(1)	×(1.79)
M4				×(1)

空白は未測定、()内の数字は磁束密度比

表 2 に、力の変化の有無 (○, ×) および二つの磁石の磁束密度の比を示す．磁束密度の比は、同じ製品の場合のものを 1 とした．同じ製品でも測定する場所によりばらつきがあるので厳密には同じであるとは言えないが便宜的に同じと見ないし、磁束密度の比を 1 とした．

表 2 を見ると、試料 M1 と組み合わせた場合、力の性質の変化が見られ、それ以外の試料同士では、それが見られないのがわかる．この違いについて考えた結果、試料間の B の大きさの比が影響するのがわかった．力の性質の変化が見られる場合とそうでない場合との磁石間の磁束密度の比を比べると、前者の場合は磁束密度の比が 4.7～8.3 となり、後者の場合は 1～1.79 となっていることがわかった．

次に、斥力から引力に変わることを検証するために、 d と磁力の関係を調べた．図 4 に試料 M1 と試料 M3 の測定例を示す．この図を見ると、 d が約 5 mm 以下に短くなるにつれて斥力が減少し、ある距離以下では、引力に変わる．また、力の種類が変化は、磁極の変化を意味すると考えられる．それを検証するために、実験前後における、試料の端面の半径方向における B を測定した．

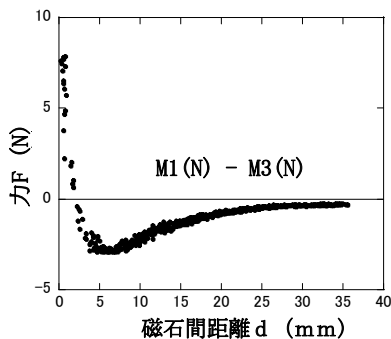


図 4 測定例

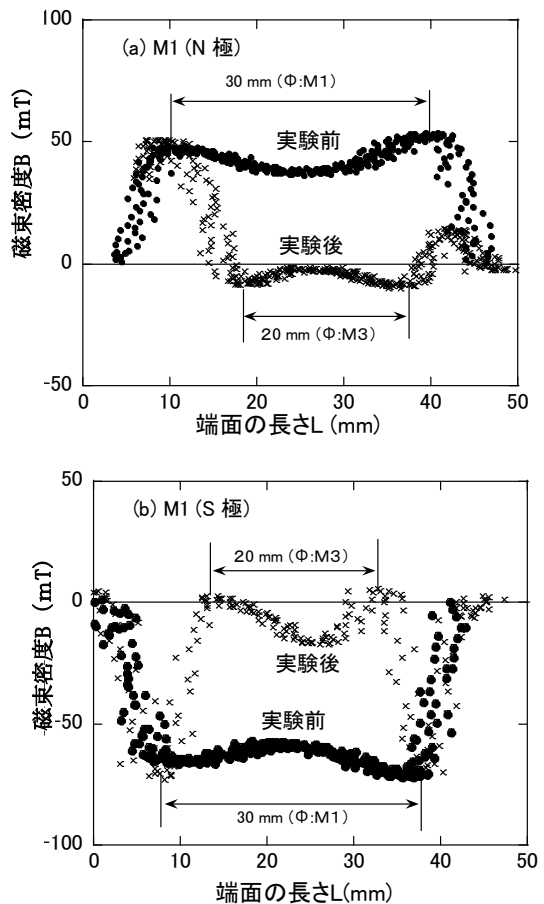


図 5 実験前と実験後の磁束密度分布特性 (M1)

図 5 に試料 M1 と試料 M3 を用いた時の試料 M1 の N 極 ((a)) と S 極 ((b)) の端面における測定結果を示す (縦軸の正は N 極、負は S 極を示す)．横軸の端面の長さ L は、磁石の端面上を直径方向にセンサを平行に移動させた距離である．図の中央が磁石の中心付近である．両図から実験後の試料 M1 (N 極および S 極) において極性変化が現れており、その範囲が試料 M3 と向かい合った領域であることがわかる．

以上のように、同極の磁石を向かい合わせて強引に近づけた場合、両者に働く力が、斥力から引力に変化することがあることが確かめられた．また、この現象は、用いる磁石の持つ B の比に依存し、その差が少なくとも約 4.7 倍以上の場合に起こりやすいことがわかった．

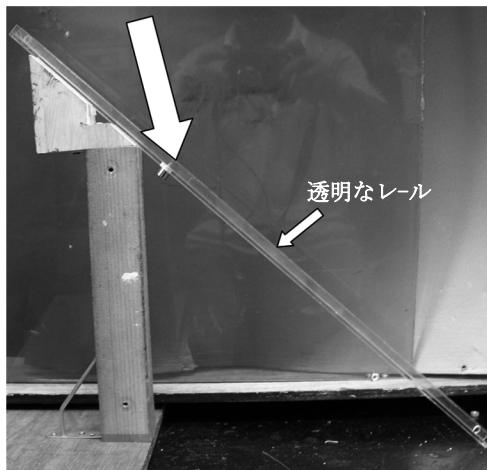
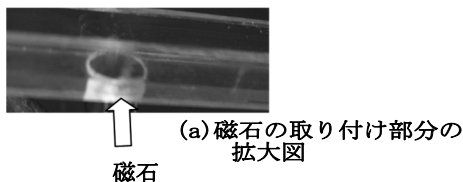
2.3 磁束密度と電磁制動の関係について

うず電流による電磁制動現象は、よく知られる事象の一つである。制動力は、 B の大きさに影響を受ける。その関係を調べるのがこの実験の目的である。

2.3.1 磁極面を金属片が通過する場合

2.3.1.1 実験装置の試作および実験概要

図 6 に試作した実験装置 1 を示す。木製の土台（レールを 40 度傾けて固定する）、コの字型のアクリル製の透明なレール（以下レールと呼ぶ、長さ：500 mm、厚さ：3 mm）、各種磁石、アルミ片（9.5×80×1 mm）、などで構成する。磁石は、直径 ϕ が全て 10 mm であるが B が異なる（高さ（磁束密度 B ）：2 mm (210 mT)、5 mm (360 mT)、5 mm (440 mT)、10 mm (480 mT)、15 mm (500 mT)、30 mm (510 mT)）。レールの上端から約 160 mm の所に直径 10 mm の穴を開け、レールの底面と磁極面が水平になるように磁石を取り付ける。レールの上端にアルミ片の上端を揃え、その状態から落下させ、レールの下端にアルミ片の下端が到達するまでの落下時間 t (sec) をストップウォッチで 5 回測定し、平均値を求める。



(b) 実験装置の全体図

図 6 試作装置 1 の外観

2.3.1.2 実験結果および考察

図 7 に B と t の関係を示す。 t は測定値の平均値である。なお、電磁制動がない場合、すなわち磁石がない場合の落下時間は、 $B=0$ のところにプロットした。 $B=0$ を基点としてグラフを見ると、 t が B の一次関数となっているのがわかる。 t の違いを、うず電流による電磁制動力の違いであると解釈すると、アルミ片に作用する制動力は、 B に比例するといえる。

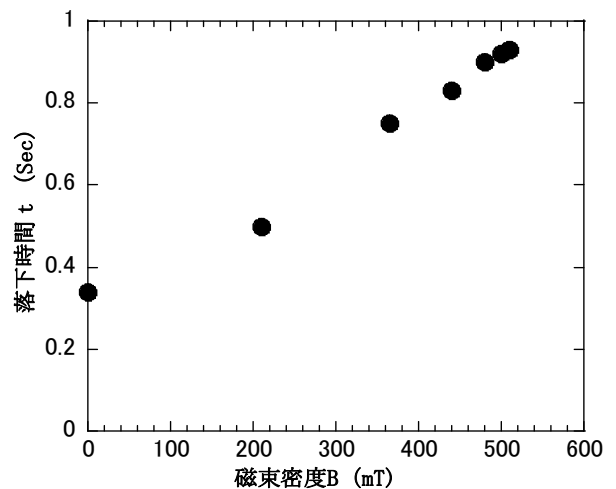


図 7 落下時間の磁束密度特性

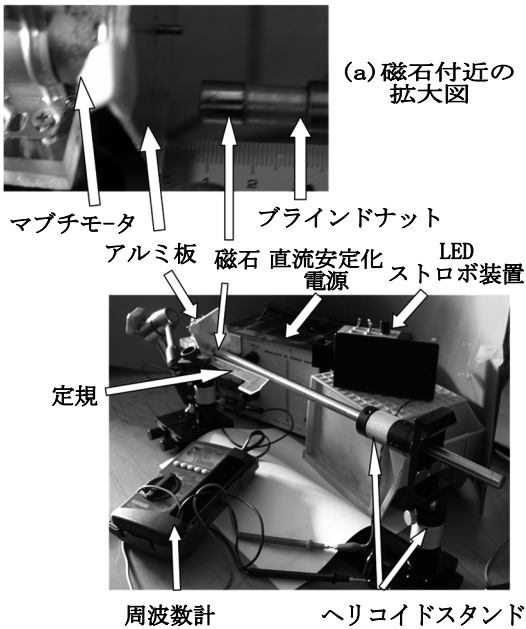
2.3.2 回転するアルミ板に磁極を近づける

2.3.2.1 実験装置の試作および実験の概要

図 8 に試作装置 2 を示す。マブチモータ (RE-280) の回転軸にアルミ板（50×50×2 mm、中央に直径 2 mm の穴）を接着剤で固定する。マブチモータは専用の土台を使って固定し、それをヘリコイドスタンドに取り付ける。磁石（直径：10 mm、高さ：5 mm、 B ：320 mT）は、一旦、プラインドナット（アルミ製、M6）に接着剤で固定し、それを非鉄系の金属棒（先端が M6 のネジになっている）に取り付ける。金属棒はヘリコイドスタンドをつかって取り付け、磁石とアルミの両面が平行に向き合うようにする。これらを光学用のレールに装着して完成させる。磁石とアルミ板との距離や位置関係は、ヘリコイドスタンドで調整する。

マブチモータに任意の電圧を供給し、アルミ板を回転させる。アルミ板の外側の任意の場所に、磁石の端面をアルミ板に平行に近づけた時のアルミ板との距離と回転数の関係を調べる。回転数 N は、LED

ストロボ装置（ナリカ，A05-7846）とデジタルテスタ（三和，CD800a）で測定する。アルミ板と磁石の端面との距離は，取り付けてある定規で測定し，その距離におけるBは，磁束計で測定する。



(b) 実験装置の全体図

図8 試作装置2の外観

2.3.2.2 実験結果および考察

図9に磁石とアルミ板の距離 d に対する回転数 N (●), 磁束密度 B (×) 電磁力 Fr (○) の関係を示す。なお， Fr は，フレミングの右手の法則および左手の法則によって求まるが，次のような方法で任意単位の数値を求めた。(1)式は，(2)式から(4)式で求まる因子によって構成され，それらを代入すると，(5)式のようになる。この式では I , e , R , l などの数値が必要になるが，これらの数値を正確に求めるのが困難だったので，任意単位 (a. u.) の数値を求め，ほかの因子との関係を調べた。

回転数 f (本実験では N) と B を(5)式に代入 (ほかの因子は定数) して算出した値を図9に示した。

$$Fr = I \cdot B \cdot l \quad (1)$$

I はうず電流 (A), B は磁束密度 (T), l は導体の長さ (m) である。

$$I = \frac{e}{R} \quad (2)$$

I はうず電流 (A), e は誘導起電力 (V), R はアルミ板の抵抗値 (Ω) である。

$$E = v \cdot B \cdot l \quad (3)$$

v は運動速度 (m/s), l は導体の長さ (m), B は磁束密度 (T) である。

$$v = r \cdot \frac{\omega}{t} \quad (4)$$

r は回転半径 (m), ω は角速度 (rad/sec), t は時間 (sec) である。 Ω は， $2 \cdot \pi \cdot f$ (Hz) である。

$$Fr = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r \cdot I \cdot B^2 \cdot \frac{R}{t} \cdot l^2 \quad (5)$$

図を見ると， d を短くする，すなわち磁石をアルミ板に近づけると， B と Fr (アルミ板の回転方向と逆方向に作用する) が増えるので N は減少する。

以前，指で摘んだ状態の磁石を使って現象を観察・体感するだけであったが，今回の実験により，制動力と磁束密度の関係を定量的に把握することができた。なお，制動の働き方をフレミングの右手および左手の法則を使って説明すると，図10のようになる。この図のように，アルミ板の回転方向 (上方) に対して常に，逆方向 (下方) に力が発生するのがわかる。この力が制動力である。

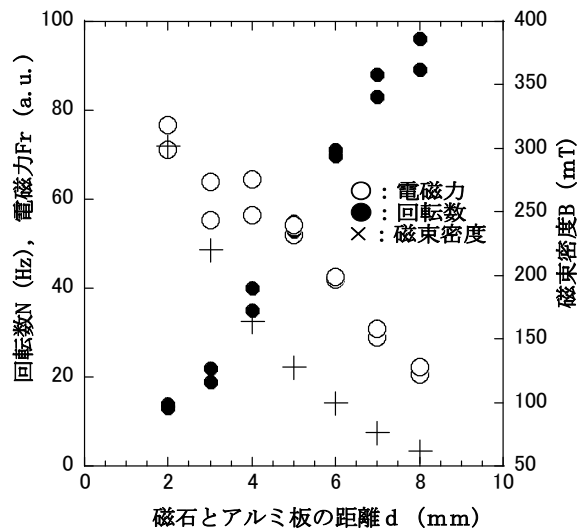


図9 磁石とアルミ板の距離と磁束密度，回転数および電磁力の関係

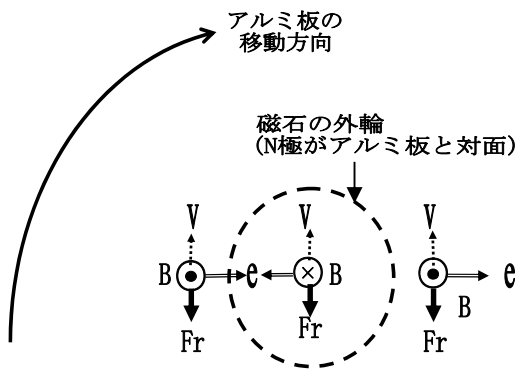


図 10 フレミングの右手および左手を使った説明図

3. まとめ

以上のように、これまで実施してきた磁石の磁束密度に関する実験に対して、工夫を施した結果、学生実験の実験教材として使えるものをいくつか得ることができた。

今後は、学生の技量を踏まえた視点からの吟味が必要になる。筆者は、文献 2 の意見に共感を抱く者の一人であり、徹底的に実験する、実験で確かめる、実験で理解するという教育観を持つ一人でもある。わかりきったと思っていたことが、実は、そうではなかったことに気付かせてくれるのが実験およびその教材を開発する楽しみの一つでもある²⁾という指摘があるが、筆者も同感である。

参考文献

- 1) 関沢正躬：学習指導要領改革の試み，科学，**80**(5)，p.520 (2010)．
- 2) 左近修治：わかりきったことを実験する効果，物理教育，**54**(4)，p.315 (2006)．

