

同極磁石間に働く引力

静岡県立科学技術高等学校 自然科学部
山口敬大 三宅亮誠 浅谷隆一朗 大石桃瑚 堀池琉久

1. 研究動機

私たちは、同極を向かい合わせた磁石の間に鉄球を挟むと引力が生じることに気が付いた。また、挟む鉄球の数が奇数個のときはくっつき、偶数個のときはくっつかないということに疑問を持ち研究を始めた。

2. 目的

なぜ挟む鉄球の個数によってくっつき方に違いが生じるのか、また、なぜ同極同士であるのに鉄球を挟むことで引力が生じるのかを解明すること。

3. 磁石について

磁極の強さは、磁石の持つ磁気量(単位: Wb)によって表わされるが、磁気量を測定する機器が学校には無く、測定器のある磁束密度(単位: T)で磁力の大きさを測定することにした。本研究では、ホール素子を利用したテスラメーターを使用した。磁束密度は磁石の表面で一様ではなく、ネオジウム磁石では端が弱く、アルニコ磁石では端が強いことが測定で分かった(図1・2)。実験で使用していくと、磁力の強さがネオジウム磁石はほとんど変化しなかったが、アルニコ磁石では強くなったり弱くなったりと変化しやすかった。その後、アルニコ磁石を磁化用コイルで着磁すると、元に戻すことが出来た。そこで、本研究では強力かつ安定した磁力を持つネオジウム磁石と磁化用コイルで同じ磁力に設定することが可能なアルニコ磁石を使うことにした。

4. 実験 1 鉄球を同極同士の磁石の間に挟んだ時の鉄球が分離する条件

(1) 目的: 相殺点が鉄球の間にあると離れ、鉄球内部にあるとくっつくとい仮説を立て、それが成り立つかを調べる。

(2) 準備物: アルニコ磁石(m_1)、ネオジウム磁石(m_2)、直径 10mm の鉄球、テスラメーター

(3) 方法: 図3のように二つの磁石の間に挟む鉄球の数より磁極間の距離 d を決め、ネオジウム磁石を 440mT とした時の磁力の相殺によって 0mT となる位置(P 点)を設定する。アルニコ磁石による P 点での磁界の強さを H_1 、ネオジウム磁石による P 点での磁界の強さを H_2 とし、この二つの磁界の強さが等しくなる m_1 の値を計算により算出する(式③)。 m_1 の理論値をアルニコ磁石で再現し、実際の鉄球の様子を観察する。 m_1 の算出過程を以下に示す。

＜ m_1 の理論値の算出＞

磁界の強さは次の式で表される。

$$H \text{ [N/Wb]} = k \cdot \frac{m}{r^2} \quad \dots \text{式①}$$

$H_1 = H_2$ より、次式が導かれる。

$$k \cdot \frac{m_1}{x^2} = k \cdot \frac{m_2}{(d-x)^2} \quad \dots \text{式②}$$

②の式を m_1 について解く。

$$m_1 = m_2 \cdot \frac{x^2}{(d-x)^2} \quad \dots \text{式③}$$

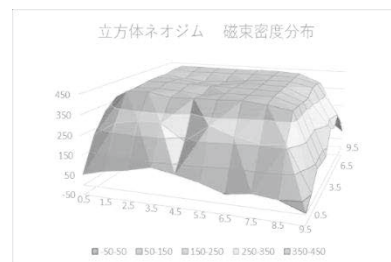


図1 ネオジウム磁束分布

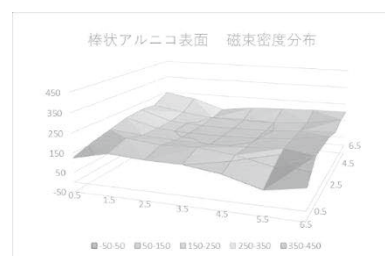


図2 アルニコ磁束分布

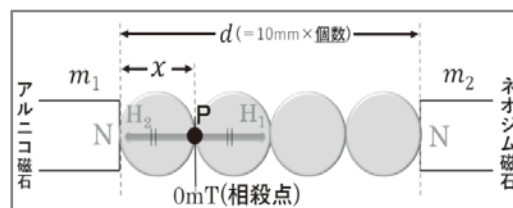


図3 測定模式図

H : 磁界の強さ[N/Wb]

k : 比例定数($\approx 6.33 \times 10^4$)[N・m²/Wb²]

r : 磁極からある点までの距離[m]

m : 磁極の強さ[Wb]

x : 磁極(m_1)からの距離[m]

d : 磁極間の距離[m]

(4) 結果：実験 1 の結果を表 1 に示す。表中の左から 2 列目には 0 mT を設定した位置、右端には結果が示されている。全ての実験において予想通りの結果を得た。ただし、分かれる時でも、斥力が強い分かれ方や、ただくっつかないだけのような斥力の弱い状態で分かれる時もあった。くっつく時でも、引力が強いくっつき方や、くっついた状態で少しでも動かせばすぐに離れてしまう場合もあった。

表 1 実験 1 結果

鉄球 の数	設定する 0mT の位置 (左から)	予想	磁束密度[mT] m ₁ : m ₂ (理論値):(固定値)	実験の結果
3	1 個目と 2 個目の間	分かれる	110 : 440	1:2 で分かれた
3	1 個目の鉄球の中	くっつく	17.6 : 440	くっつく
4	1 個目と 2 個目の間	分かれる	48.9 : 440	1:3 で分かれた
4	2 個目の鉄球の中	くっつく	158.1 : 440	くっつく
5	2 個目と 3 個目の間	分かれる	196 : 440	2:3 で分かれた
5	1 個目の鉄球の中	くっつく	81 : 440	くっつく
6	2 個目と 3 個目の間	分かれる	110 : 440	2:4 で分かれた
6	2 個目の鉄球の中	くっつく	48 : 440	くっつく

(5) 考察：結果より鉄球の偶数個、奇数個に関係なく、磁界が相殺されて 0 mT になる点が鉄球の境に来ると分かれ、鉄球の内部に来るとくっつくと考えられる。そのため、二つの磁石の磁力が同じ時、0 mT の点が磁極から等しい距離となるので、鉄球が偶数個の場合は 0 mT が鉄球同士の境となり反発し、奇数個の場合は真ん中の鉄球内部となりくっついたと考えられる。しかしながら、くっつき方や分かれ方の様子より、0 mT の位置の正確さには疑問が残る。

5. 実験 2 引力に変わる距離を測定

(1) 目的：斥力から引力に変わる瞬間の実際の磁力の相殺点の位置を実測値で確かめる。

(2) 準備物：ネオジム磁石(440mT)、直径 5mm10mm の鉄球、直径 10mm 厚さ 5 mm, 10mm の鉄円柱、厚紙、圧電素子、ハイスピードカメラ、テスラメーター、電圧計

(3) 方法

実験ア：ネオジム磁石(440mT) 2 つを同極同士が向き合うように置き、片側の磁石に鉄球を付ける。逆側からもう一方の磁石を近づけてき、間に挟んだ鉄球のうち、先端の鉄球が近づいてきた磁石へと移動する様子をハイスピードカメラで撮影する。また、その瞬間の磁石までの距離を測定する。圧電素子を磁石の後ろに設置し、斥力から引力に変わる瞬間の電圧の時間変化から移動の瞬間を特定するよう工夫した。鉄球を鉄円柱や 5 mm 球に替えて同様に実験する。

実験イ：磁石と鉄球の間隔を実験アで計測した「鉄球の移動する瞬間の距離分」にして配置する。左右両方に磁石があると、両側の磁力の影響を受けるために正確な磁束密度の値が求められないと考え、磁石を片側ずつにして磁石からの距離を決めて磁力を測定する。鉄球と磁石の間をあけて配置する時は、鉄球の間に厚紙を挟み、鉄球が磁石に引き寄せられて空間が無くならないように固定する工夫をした。厚紙の間にテスラメーターのセンサー部を挿入して磁力を測定する。

(4) 結果

(ア) 実験アの結果：図 4 より、引力に変わる距離と個数の関係はどちらも比例関係のように増加していることが分かる。直線近似すると、鉄球の方が鉄柱よりも傾きが大きいことがわかる。5 mm の時でも、個数と引力に変わる距離の間には比例関係が見られる。鉄球・円柱ともに 1 個の時は磁石をつけたまま動き、5 mm の鉄球・鉄円柱では引力はほとんど生じなかった(図 5)。圧電素子のデータでも引力に変わる瞬間を検出することが出来なかったため、引力に変わる瞬間はないと判断した。また、3 mm 鉄球と 5 mm 鉄球 1 つずつを組み合わせて左磁石からの距離が合計 8 mm となるようにして実験を行なったところ、どちらも先端の鉄球は移動した。移動の時の右側磁石の距離は、左端が 5 mm の時が 1.2mm、3 mm の時が 0.8mm であった。

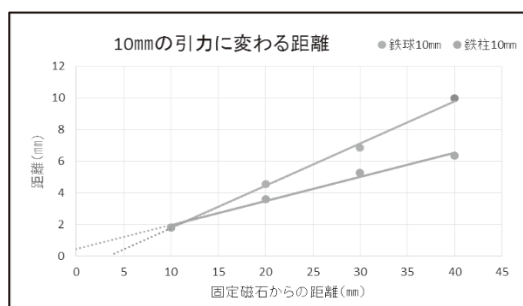


図 4 10mm の引力に変わる瞬間

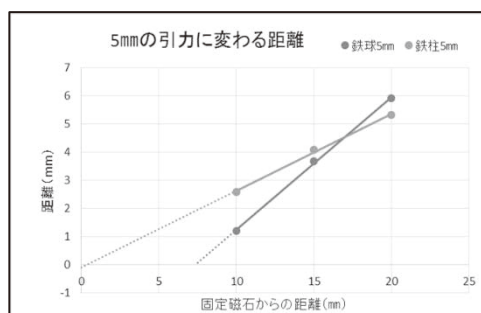


図 5 5 mm の引力に変わる瞬間

(イ)実験イの結果：左右の磁石からの各位置における磁力を測定して、図6のように2つのグラフを重ね、相殺点をグラフの交点から求めた。図6 (a)より、鉄球4個の時は、左から3個目と4個目の鉄球の間の付近に相殺点がある。図6 (b) (c) (d)より、鉄球3個、2個、1個の時は、先端の鉄球の内部に相殺点があり、その位置は中央付近から右側へと徐々に寄っていく。

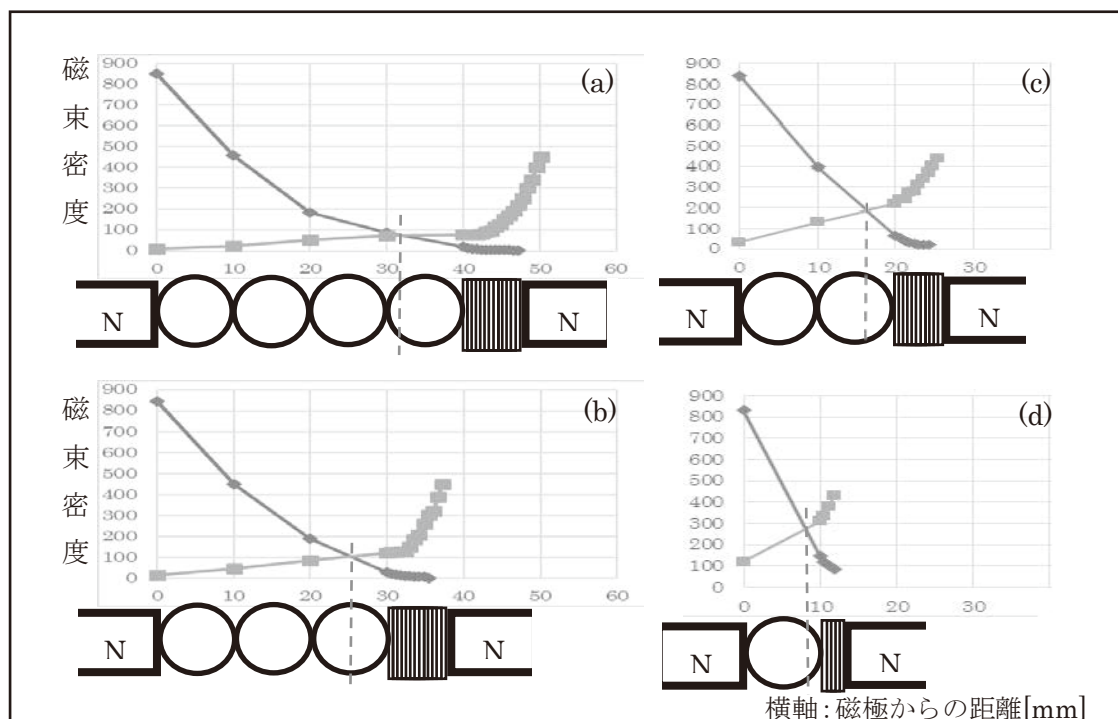


図6 実験イ 結果グラフ

(5) 考察

(ア)鉄球、鉄柱5mm 1つではくっつかなかったため、くっつくにはある程度の幅が必要だと考えられる。10mm、5mm いずれにおいても、鉄柱より鉄球の方が引力に変わりやすく、引き寄せるときの間の距離が大きくなることから、鉄球の方が磁力の影響を受けやすいと考えられる。鉄柱の場合、鉄柱同士の接触する面積が大きいので磁力がある程度離れても保たれるのかもしれない。図4と図5を見ると、鉄球では5mm、10mm いずれにおいても横軸約5mmのところへ収束していく。このことから、5mm という幅が意味を持つものだと考えられる。

鉄球、鉄柱10mmが1つと5mmが2つの結果が異なったことや、3mm球と5mm球で左右を入れかえた結果が異なったことから、鉄球同士、鉄柱同士の接触する面積の差や周囲の空間の条件なども磁化には関係していると考えられる。鉄柱については5mm 2つと10mm 1つは条件的には同じようだが結果は異なった。鉄柱5mmだと間に隙間ができてしまい磁力線が鉄柱内だけでなく、空气中に逃げてしまうのかもしれない。それでも10mm同様5mmでもきれいな比例関係を示すということは、切れ間による影響も一定の割合で生じるということだろうか。

(イ)実験1では、鉄球が分かれる時の磁力の相殺点は鉄球同士の境付近に在ると考察したことから、先端球が移動する時の相殺点はどの実験でも球同士の境にくると予想した。しかしながら、その考えとは異なる結果となった。結果から鉄球が移動する時の磁力の相殺点は鉄球の個数が4個、3個、2個と減っていくに従って鉄球の境

から鉄球の内部さらに反対側の端へと寄っていった。また、鉄球1個の時の磁力の相殺点が鉄球の内部より右側に寄っているにも関わらず近づく磁石に磁石ごとくっついた。以上のことから、先端の鉄球内部の磁化について考えてみる。図7における磁石Bが近づく前の先端の鉄球内部では、磁気モーメントは右向きにN極で揃っていたが、磁石Bが鉄球に近づいていくと鉄球の先端の原子磁石は徐々に逆向きへと磁化されていく(図7)。磁石Bが鉄球を引きつける時は、鉄球内部に相殺点が生じていても磁石B側の鉄球の先端の引力が反対側よりも大きくな

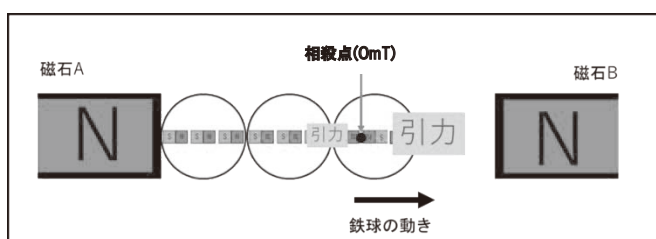


図7 磁石B側の引力が大きい時

っているために引き寄せられるのではないだろうか。

6. 実験3 鉄球内部の磁力線を描く

(1) 目的：実験2で、同極同士の磁石の間に挟む鉄球の個数を小さくしていくと5mmでくっつかなくなった。このことから、直線状での磁力からではこの現象を説明することが出来ないと考えた。そこで、鉄球内部の磁力線を推定することで、空間的に磁力をとらえ実験2の結果を考察する。

(2) 準備物：ネオジム磁石、直径10mmの鉄球、テスラメーター、方眼紙、A4方眼拡大用紙、黒ペン、色ペン(2色)

(3) 方法：ネオジム磁石(440mT)を同極同士向き合わせて置き、実験2で測定した移動する瞬間の距離を空け、その間に10mm鉄球を挟み、周りの磁束密度を1mm間隔(縦横それぞれ)で測定する。計測した数値を÷20した値を四捨五入し、その面を貫いた磁束の本数としてその数分だけA4方眼拡大用紙の1マスに点を打つ。また、貫く方向が分かるように1マスの中へ、磁力線が入ってくる辺に点を打つことにする。マスに記入した点を磁束が貫くように線でつなぎ、様子を分かりやすくするために、代表の線を黒ペンで書く。

(4) 結果：以下、測定エリアを上、下、右と呼ぶことにする。推定したものは破線で示す。また、測定するにあたって、上下のエリアの磁力線が左右どちらの磁石からのものか判断する基準として、カーブしていく方向を見た。左にカーブしていくものは、左の磁石からの磁力線、右へカーブしていくものは右の磁石のものと判断した。

磁石を右側に配置せず左側のみに置いた場合、鉄が磁化されて、磁石と同じようにN極からS極へ向かう磁力線が出ていることが分かった。しかし、磁石を右側に配置すると、磁力線が交わらない磁力の空白域が円柱や鉄球の外側(右側)に生じた。10mm間隔の時には、図8より磁力線がぶつかる場所は鉄球・鉄柱の外にあり、5mm間隔にすると内部にくる(図9)。また、どちらの図でも磁力線のぶつかる場所は鉄球の方が左寄りである。図10は、間に挟む鉄球を2個にして、先端からの距離を、4.5mmにしたときのものである。この条件は実験2(ア)において2個の鉄球のうち先端が移動する時の距離を再現したものである。磁力線が交わらない空間が、鉄球と鉄球の間あたりから2個目の中心部あたりにわたってみられる。赤丸は実験2(イ)で求めた磁力の相殺点を表している。

(5) 考察：図11のように磁石を右側に配置すると、磁力線が交わらない磁力の空白域が円柱や鉄球の外側(右側)に生じ、鉄球の方がその領域が左寄りであったことは、鉄球の方が右側からの磁石の影響を受けやすいとした実験2(ア)の結果を支持するものである。また、磁力の空白域が、磁力が相殺されたところだと考えると、図8、9の結果は、実験2(イ)結果に矛盾しない。図11のように、鉄球1個では磁力の空白域は縦に長い形であり、図10のように形が歪になるのは、左右の磁石の磁極面の磁束密度が一樣ではないことや、測定する際に、磁石・鉄球の位置が少しずれてしまい、一直線に並んでいなかったことが原因だと考えられる。鉄2個の結果(図10)を実験2(イ)の結果と比較してみると、磁力の相殺される空間のぎりぎりの位置に相殺点があることになるため、相殺領域の中心に相殺点が来るとは限らないと考えられる。

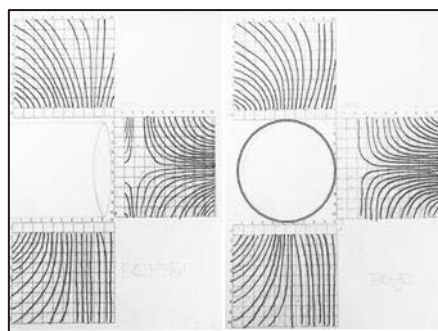


図8 両側同極磁石の間に鉄1個 10mm

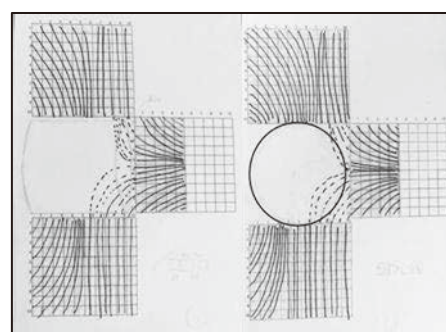


図9 両側同極磁石の間に鉄1個 5mm

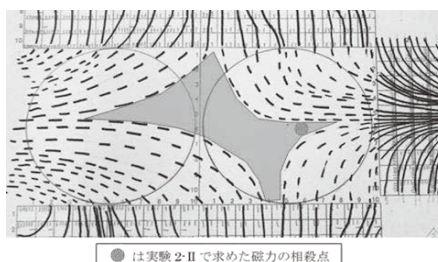
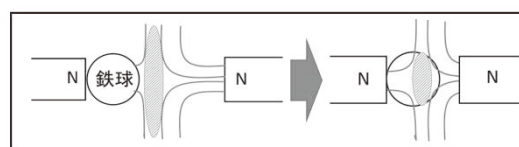
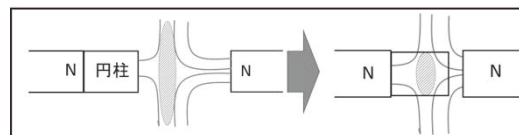


図10 両側同極磁石の間に鉄2個
磁石との間隔4.5mm



(a) 鉄球の場合



(b) 鉄柱の場合

図11 同極磁石間に鉄1個を挟み磁石を近づける模式図

7. 全体考察

実験 1 より、計算上では磁力の相殺による 0 mT の位置が鉄球と鉄球の間に来ることで鉄球が分かれたということから、鉄球の個数は関係なく 0 mT の位置でくっついたり分かれたりすると考えられた。このことを踏まえると、実験 2 で先端の鉄球が移動する時、右側の磁極から鉄球までは、空気層によって磁力が低下するため弱い磁極と同じになると考え、分かれた位置つまり鉄球と鉄球の間に磁力の相殺点があると考えた。しかし、実際に磁力を測ると相殺点が鉄球の内部にあることがわかった。このことから、相殺点は内部であっても、近づく磁石によって鉄球内部の原子磁石の向きが変えられ、鉄球の両端に同じ磁極ができたと考えられる。そこで、先端の鉄球が移動する時の間隔をあけた時と、それより間隔を広くした時で、鉄球の左右の磁束密度がどのようになっているのか測定してみた。すると、くっつく間隔では、先端の鉄球の左右の磁束密度は 30 mT と 104 mT で、差は 74 mT であり比はほぼ 1 : 3 になっていた。また、くっつかない間隔では、40 mT と 72 mT で、差は 32 mT、比はほぼ 1 : 1.8 になっていた。先端の鉄球において、両端の磁力は移動する側が大きいだけでは、鉄球は離れず、両端に優位な引力の差ができた時に他方へと引き付けられ移動したと考えた。直線的に考えると、右側の磁力の方が大きいなら移動するのではないかと考えられるが、実際には、左右の差が約 2 倍でも移動しなかった。そこで空間的に磁力をとらえることにした。左側では小さな引力の働く範囲が広く、右側では大きい引力の働く範囲が狭いと考え、結果的には左の方に引き寄せられるようになる。このように引力の働く範囲を考慮すると、空間的な合力として右側の力が大きくなるような引力が加わると移動すると考えた。

鉄球 1 個のとき、相殺点が鉄球の中心よりも右側にあったが磁石ごとくついたことから、鉄球内部に 0 mT があざえすれば引力が発生すると考えた。しかしながら、5 mm の鉄球・鉄柱では間隔 0 mm でも引力を確認できなかった。8 mm (5+3) の時には 3 mm の鉄球が、6 mm (3+3) の時には 3 mm の鉄球が離れるが、5 mm の鉄球・鉄柱、3 mm の鉄球では引力が発生しなかったことから、鉄球内部に相殺点があてても、引力が発生できないといった、挟む強磁性体の厚みには限界があり、その限界は 5 mm 程度と推察される。それは何故かを実験 3 の結果で考えると、磁力線の存在しない空間が鉄球内部にできていることが確認されたことから、磁力の相殺は点ではなく領域として存在していると考えた。そのため、5 mm の鉄球・鉄柱は相殺領域を全て覆いきれず、磁極と 5 mm の鉄球・鉄柱の間には斥力しか働かなかったと考えた。

8. まとめ

同極間に挟む鉄球の個数によってくっつき方が違う理由は、0 mT の位置がどこにくるかによって決まり、個数には関係ないことが分かった。また、同極同士であっても相殺点が鉄球内部にあれば、両端に同じ磁極が出来るためにくっつくが、磁力の相殺は点ではなく幅を持った領域であると考えられ、その幅は 5 mm 程度とみなされる。従って相殺領域より、大きな鉄球を挟まなければ、同極磁石同士をくっつけることができないと考えられる。

9. 今後の課題

磁石の磁束密度は面において端・角の方が強くなることや、厚紙を使用することでの透磁率の変化など、磁石の性質や特徴を考慮して再度実験を行いたい。また、相殺点の推定を鉄円柱でも行い、鉄球との違いなどから、磁力の相殺が領域であることを踏まえたうえで、より正確な結果を手に入りたい。

10. 参考文献

- (1) 啓林館「高等学校理科用 物理 改訂版」
- (2) 実教出版「高等学校工業科用 電気基礎 1」
- (3) 山部恵造「磁石のふしぎ 磁場のなぞ」けやき出版
- (4) 山川正光「今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしい磁石の本」日刊工業新聞社出版
- (5) NeoMag「ギャップ距離と空間磁束密度」https://www.neomag.jp/seminar_60.php
- (6) NeoMag「磁石の原理について知ろう」
https://www.neomag.jp/mag_navi/column/column007.html
- (7) 「はじめての人でも分かるホールセンサーの原理と種類」
<https://www.fujiele.co.jp/semiconductor/ti/tecinfo/news201707140000/>