

同極磁石間に生じる引力

静岡県立科学技術高等学校 自然科学部 3 年
山口敬大 三宅亮誠 浅谷隆一朗 大石桃瑚

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という現象に気づいた。いろいろと試してみると、挟む鉄球の数が奇数個のときはくっつき (図 1)、偶数個のときはくっつかないということが分かった (図 2)。なぜこのような現象が生じるのかを解明したいと考え、研究を始めた。



図 1 鉄球 1 つ



図 2 鉄球 2 つ

2. 磁石について

磁石で一番磁力が強い二面を磁極と呼ぶ。磁力の大きさは、テスラメータを使用し、磁極面の中心の磁束密度 B [T] を測定した。今回の研究では、ネオジウム磁石とアルニコ磁石を使用した。ネオジウム磁石は強力で安定した磁力を持つ。アルニコ磁石は磁力を弱めたり、磁化用コイルで同じ磁力に設定し直したりすることが可能である。

3. 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、その理由を解明する。

4. 仮説の設定

昨年度の研究では、鉄球の個数に関係なく、磁界が相殺されて 0 になる点に関係しているのではないかと考え予備実験を行った。左右の磁石の磁束密度を変えて間に挟んだ鉄球の振る舞いを観察した。結果、相殺点が鉄球内部に在る時にくっつき、境に来ると分かると結論付けたが、斥力や引力の大きさにはばらつきがあったことから、設定した相殺点の位置と実際の相殺点の位置はずれていると考えられた。相殺点が設定位置からずれていたとしても条件通りの結果が得られたことから、以下のような仮説を立てた。

磁界の強さが相殺される点は、くっつくときは磁性体の中心部、離れるときは磁性体同士の境に、直線的にある程度の幅で分布している。また、鉄球や鉄円柱など、磁性体の形が変われば接し方も変わるので振る舞い方も変わる。内部に相殺点があれば球状でなくても同極同士をくっつけることができる。

これらの仮説を証明するために、相殺点の直線的な分布の幅、実際の相殺点の位置、鉄球と鉄円柱の違いを調べるために以下の実験を行う。

- ① 磁力を連続的に変えた磁石を使って計算から相殺点の分布を出す。 (実験 1)
- ② 斥力から引力に変わるときの実際の相殺点の位置を直接的に測定する。 (実験 2)
- ③ 周囲の磁力線を描くことで磁性体内部を推量する。 (実験 3)

5. 実験 1

- (1) 目的 : 磁力の相殺点を意図的に動かし、くっつく時と分かれる時の相殺点の位置の分布を調べる。
- (2) 方法 : アルニコ磁石の値を約 170mT から約 20mT まで約 10mT ずつ弱くしていき、挟んだ磁性体がくっつくか分かれるかを確かめる。アルニコ磁石の磁力は同極

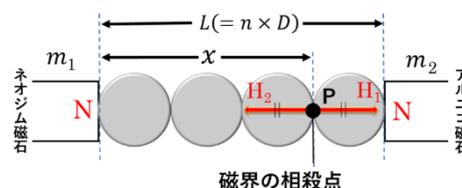


図 3 実験 1 の模式図

のネオジウム磁石を直接くっつけることで磁力を弱める。
 ネオジウム磁石の磁力はほぼ一定で 400mT 程度である。挟む磁性体は鉄球（直径 10 mm と 5 mm）、鉄円柱（厚さ 10 mm と 5 mm）を使用した。図 3 のように二つの磁石間の距離

$$x = \frac{\sqrt{m_1}}{\sqrt{m_1} + \sqrt{m_2}} \cdot L \quad [\text{cm}] \quad \dots \text{式①}$$

L（磁性体の個数 n と磁性体の直径または厚さ D）を決める。ネオジウム磁石の表面磁束密度 m_1 とアルニコ磁石の表面磁束密度 m_2 の測定し、式①より相殺点の位置を決める。

(3) 結果

10mm 径の鉄球 5 個の結果を図 4 に、5 mm 径の鉄球 10 個の結果を図 5 に示す。図中の点線は鉄球同士が反発する（分かれる）位置を示しており、点は式①より算出した相殺点の位置である。右側に書かれた数字①が分かれなかった結果、それ以外は点線部で分かれた結果を示している。10 mm 径の鉄球 5 個では、分かれる時の相殺点の位置は鉄球の境界付近にあり、くっつく時の相殺点の位置は鉄球の中心付近に分布した（図 4）。鉄球 4 個でも同様であったが、鉄球 3 個では、くっつく時の相殺点は境界付近に存在していた。5 mm 径の鉄球（図 5）、10 mm 厚の鉄円柱も同様に、くっつく時の相殺点は境界付近に存在していた。また、5 mm 厚の鉄円柱では、くっつくことなく、全ての場合において分かれた。

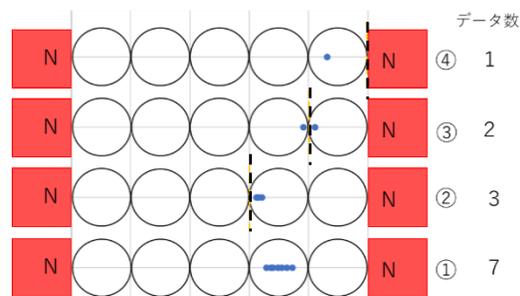


図 4 10 mm 径の鉄球 5 個の相殺点の分布

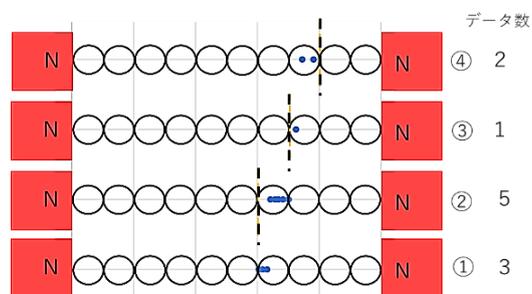


図 5 5 mm 径の鉄球 10 個の相殺点の分布

(4) 考察

くっつく結果でも分かれる結果でも相殺点は幅を持って分布していたが、その幅は分かれる位置や挟む磁性体の個数によって異なり、幅の法則性は見られなかった。くっつく時は相殺点が鉄球内部に存在し、分かれるときは鉄球同士の境界に存在した結果もあったが、くっつく時でも境界付近に分布したり、分かれる時でも磁性体内部に分布したりする結果も見られる。このことから、仮説で立てた、くっつく時は磁性体の中心部、分かれるときは磁性体同士の境に相殺点が存在するという単純な法則性ではないといえる。

6. 実験 2

(1) 目的：磁石についている磁性体の反対から同極磁石が近づくと、先端の磁性体が、近づくと磁石へ移動する。この現象を利用し、先端の磁性体が移動する距離を測定し、その距離を利用して、磁力の相殺点を実測値より求める。

(2) 方法

①実験 2 - I 磁束密度の等しいネオジウム磁石 2 つを同極同士が向き合うように置き、ゆっくりと近づける。圧電素子から出力されたデータとハイスピードカメラの映像（図 6）の両方から判断し、引力に変わった瞬間を定め、間の距離を測定する。これらを磁性体（10 mm）で 1 個から 6 個までをそれぞれ 4 回ずつ、磁性体（5 mm）で 1 個から 3 個までの測定を 3 回ずつ行う。

②実験 2 - II 同極同士で向かい合うネオジウム磁石を実験 2 - I で求めた斥力から引力に変わる距離の分だけ間をあ



図 6 実験の様子

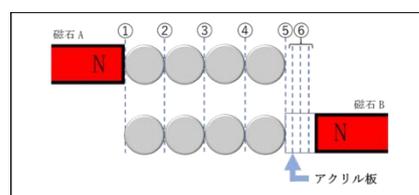


図 7 磁力の測定位置

け、その時の各位置における磁束密度を測定する。図7は測定箇所を示す模式図である。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、磁石を片側ずつ配置して測定をすることにした。

<実験は以下の手順で行う>

左側磁石 A に磁性体をつけて、図7の①から⑥における磁束密度をそれぞれ測定する。右側磁石 B も A と同様に測定する。実験は 10 mm 径の鉄球・厚さ 10 mm の鉄円柱を 1 個、2 個、3 個、4 個、5 個、6 個までをはさむ 6 パターンを行う。実験で求めた磁束密度の値を、Excel を使ってグラフ化し、点と点を滑らかな曲線でつなぎ、2 つの曲線の交点から磁力の相殺点を推定する。

(3) 結果

①実験 2 - I 実験結果を図8に示す。10 mm、5 mm の磁性体において、引力に変わる距離は、磁性体の個数が増えるほど比例的に増加した。10 mm の結果から鉄球の方が鉄円柱よりも傾きが大きいことがわかる。5 mm も同様であった。また 5 mm 1 個では鉄球も鉄円柱もくっつかなかった。

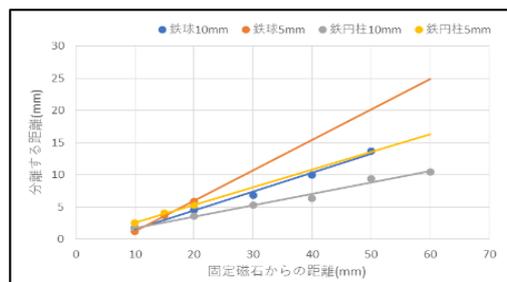


図8 5 mm・10 mmの引力に変わる距離

②実験 2 - II 実験結果

を図9、図10に示す。磁力変化グラフの交点に着目すると、鉄球では個数が増加するにつれて交点は徐々に右側の鉄球内で磁石 A 側(左側)に寄っていった。そして、鉄球が6個の時には交点が先端から2個目の鉄球の内部に位置した。それに対し鉄円柱では、1個では交点が鉄円柱の中心部より少し右側にあるが2個から6個の時には先端の鉄円柱の中心部より少し左側に同じように位置した。

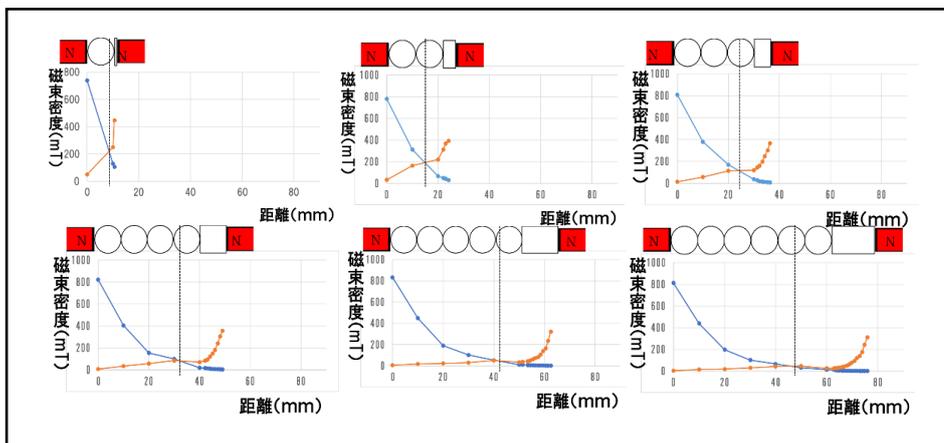


図9 測定結果(鉄球)

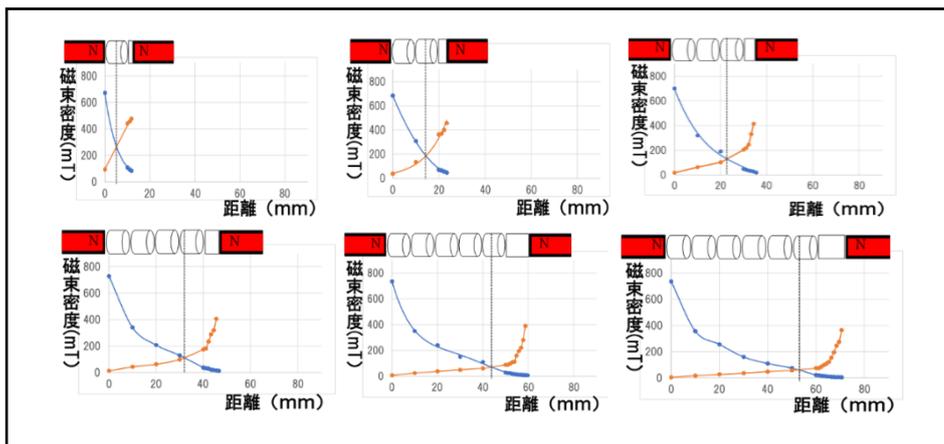


図10 測定結果(鉄円柱)

(4) 考察

①実験 2 - I 10 mm、5 mm いずれにおいても、鉄円柱より鉄球の方が引力に変わりやすくなり、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。それは、鉄円柱の場合、鉄円柱同士の接地面積が大きいいため、ある程度離れても磁力が保たれるからだと考えた。磁性体 5 mm では1個でくっつかなかったため、くっつくにはある程度の

磁性体の幅が必要だと考えられる。磁性体 10 mm が 1 個と磁性体 5 mm が 2 個の結果が異なったことから、磁性体同士の接地面積の差や周囲の空間の条件などが関係しているのではないかと考えた。

②実験 2 - II 2つの磁束密度の曲線の交点は磁界の打ち消し合う相殺点と考えられる。実験 2 では、磁性体に斥力が働くとき、磁性体同士の境界に相殺点がないことがあった。そのため、相殺点は磁性体の境にあるときにも分かれるが必ずしも磁性体同士の境になくてもよいと考えられる。

7. 実験 3

(1) 目的：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、磁力の相殺される位置では磁力が空間的にどのように分布しているのかを考察する。

(2) 方法：図 11 のように空間を磁力線が貫いていると考えると、テスラメータ(ホール素子)を置く向きを 90 度回転させて、

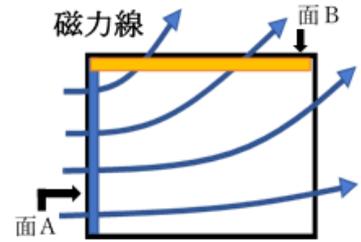


図 11 空間における磁力線

A 面と B 面において磁束密度を測定すれば縦に何本、横に何本通っているか推定でき、磁力線を描けると考えた。10 mm 径の鉄球・10 mm 厚の鉄円柱をつけた磁石の周りに 1 mm 間隔の方眼紙を敷き、1 マスごとの磁束密度を測定する。測定した数値を $\div 20$ した値を四捨五入して、その面を貫いた磁束の本数とする。その本数を点の数として、記入用紙のマスに、貫く本数が分かるように書き込み、磁束が貫くように線でつなぐ。間の距離を 15 mm、10 mm、5 mm、1.7 mm (実験 2 鉄球が他方へ引き付けられた距離) して同様に作図する。磁性体 2 つの場合の作図も同様に行う。

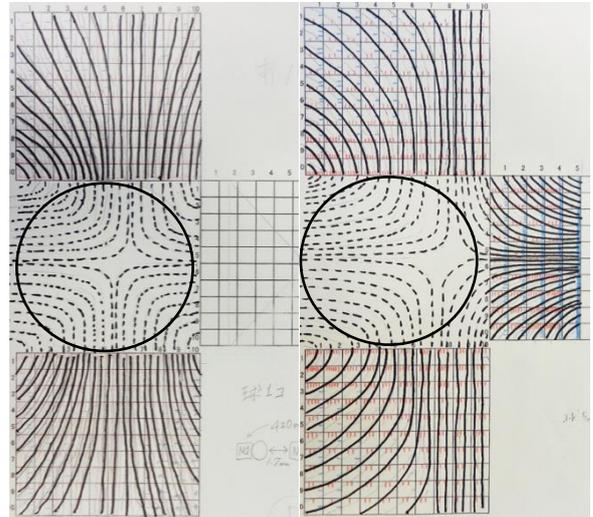


図 12 鉄球 1 個 間の距離 5 mm (右)
鉄球 1 個 間の距離 1.7 mm (左)

(3) 結果

図 12 は同極を向かい合わせた磁石の間に磁性体を挟み、磁石までの距離を 5 mm、1.7 mm にしたときの磁力線の作図である。鉄球内部の磁力線の本数は、磁性体に入り込む磁力線の本数から推定した。鉄球の内部に存在する、磁力線が避け合っできる空白域は、磁石を近づけるほど、左に寄っていく事が分かった。間の距離が 15 mm、10 mm では、磁力の空白域は磁性体の外部右側に存在した。鉄円柱の結果も同様であった。磁性体を二つにして、先端からの距離を、実験 2 の結果に基づき、間の距離を鉄球が引き付けられる距離 (鉄球 4.5 mm、円柱 3.5 mm) にした (図 13)。鉄球・鉄円柱どちらも、空白域が磁性体同士の間あたりに分布していた。また空白域の大きさは、断面で見ると大体 4 mm^2 だということがわかった。

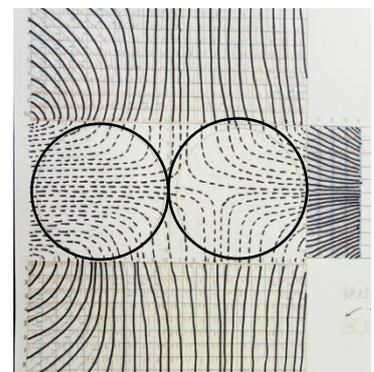


図 13 鉄球 1 個
間の距離 4.5 mm

(4) 考察

空白域は磁力が相殺されている領域と考えられる。今回の磁性体 2 個の結果と実験 2 - II の結果を比べてみると、相殺領域のぎりぎりの位置に実験 2 - II で求めた相殺点があった。このことから、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 12 の間隔 5 mm の時と、1.7 mm の時を比較すると、どちらも、相殺点が磁性体の内部にあるが、5 mm 間隔の時は、

右側の磁石に引き寄せられない。相殺領域の位置のわずかな違いで振る舞いが変わることが分かった。両者の違いは、近づけている磁石の側から入り込む磁力線の数だと考えられる。入り込む磁力線が十分でない、先端の磁性体を引っ張る力が生じないと考えた。

8. 総合考察

①相殺点の分布にはある程度の幅があることについての考察

実験1では、相殺点には幅があり、その幅は同じでないことが確認された。実験3では、互いの磁石からの磁力線がぶつかるために、同極磁石間にはひし形のような約2mm四方(約4mm²)の空白域が生じていることが分かった。実験2-IIの結果を合わせてみると、相殺領域の中に実験2-IIでの相殺点が含まれていたことから、相殺点の周囲に磁力の弱い空間(相殺領域)が広がっているため、境に相殺点が無くても分かれると解釈できる。

②鉄球や鉄円柱など磁性体の形状に違いがあれば振る舞いは違うことについての考察

実験1や実験2の結果は、明らかに球と円柱で異なるものとなった。実験3の結果から考えると、鉄球より鉄円柱の方が磁力線の入る表面積が大きく、磁性体の両端に入り込む磁力線の数も多かった。その違いの一番の要因は磁性体同士の繋がり方ではないかと考えられる。点で接する鉄球では磁力線を放散しやすく、数を挟むほど左側磁石からの影響が小さくなりやすい。鉄円柱は接する面が大きいので、磁力線が遠くまで継続的に届くのではないかと考えた。

9. まとめ

相殺点の分布は、くっつく時に磁性体の中心部にあり、分かれる時に磁性体同士の境界に存在するという仮説を立てて3つの方法から仮説の検証を行った。両側からの磁石による磁界が相殺される点に着目し、その位置を理論式から求め、引力や斥力の生じ方を実験で確かめた。結果からは、磁性体がくっついたり分かれたりする相殺点は幅を持って分布したが、現象と分布の間には法則性は見られなかった。また、磁石の同極を向か合わせて、片方の磁石に鉄球を数個つけ、もう片方の磁石を近づけると先端の鉄球が移動する現象を利用して、相殺点を実測する方法では、先端の鉄球が他方へ移動するとき、相殺点は鉄球の内部にあり、その位置は条件とともに変化することがわかった。さらに、間に挟む鉄球を小さくしたところ、5mm鉄球では引力が発生しないことがわかった。空間的に磁力を見るために、磁力線を推定する実験からは、磁力が相殺される場所は、点ではなく領域として存在していることが推察された。こうした結果から、引力が発生する条件は左右の磁石から磁性体に入り込んでいる磁力線の本数が関係していると考えられる。また、5mmの鉄球では磁力線が相殺される領域の中に入ってしまうために引力が発生しないなど、引力を生じるために必要な幅があることが分かった。

10. 今後の課題

磁力を連続的に変化させる試みも行ったが、今回の実験では困難だったため、今後実現するための工夫を考えたい。実験3において、磁束密度を定量的に表現することが難しかったため、磁力線のより正確な表し方を確立し空間的に磁力を見る方法を考えていきたい。

11. 参考文献

- ・啓林館「物理 改訂版」
- ・実教出版「電気基礎1」
- ・山部恵造「磁石のふしぎ 磁場のなぞ」けやき出版
- ・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
- ・NeoMag「ギャップ距離と空間磁束密度」https://www.neomag.jp/seminar_60.php
- ・NeoMag「磁石の原理について知ろう」
https://www.neomag.jp/mag_navi/column/column007.html
- ・山口敬大 他(2019)「同極磁石間に働く引力」科学技術高校自然科学部(2019 静岡県生徒理科学研究論文集)