

球形磁石を使った鉄玉浮揚現象の動作機構の検討 (磁軸方向の磁力の影響について)

櫻井 勇良*

An examination of the motion mechanism of the iron ball levitation phenomenon
using a spherical magnet
(On the effect of the magnetic force of the magnetic axis direction)

Yuryo SAKURAI

Abstract:

The mechanism of levitation of an iron ball using a spherical magnet is described. It is necessary to examine the action of gravity and magnetic force in order to determine the levitation mechanism. The magnetic flux density of the circumference of the spherical magnet was examined in order to examine the effect of the magnetic force. As a result, the relationship between the movement of the iron ball and the three-dimensional direction in the levitation experiment was verified.

KEY WORDS: Iron ball, Spherical magnet, Levitation of iron ball, Magnetic flux density

要旨:

球形磁石を使った鉄玉浮揚機構について述べている。鉄玉浮揚機構を検討するには、重力と磁力の作用について調べる必要がある。そこで、磁力の影響を検討するために、球型磁石の周囲の磁束密度分布を調べた。その結果を用いて検討した結果、浮揚実験における鉄玉の三次元方向への動きとの関係が検証できた。

キーワード: 鉄玉, 球形磁石, 鉄玉の浮揚, 磁束密度

1. はじめに

筆者は、以前に2個の玉形磁石を使った鉄玉浮揚実験器の開発結果について報告した¹⁾。その後、浮揚の動作機構について検討を行っている。本研究は、その一環として行ったものである。鉄玉を浮揚させる時、なぜ、磁軸方向に磁石を動かしながら浮揚条件を探したのか、その理由について検討を行った。この動作は、鉄玉を浮揚させる時の動作の中で、最も重要なものであったので、その理由を知る必要があると判断した。その根拠を明らかにするのが本研究の目的である。

磁石の影響は、その周囲の磁束密度分布を調べることで推測することができる。したがって、上記の理由を検討するには、使用した磁石の周囲の磁束密度を調べる必要がある。本来であれば、鉄玉が浮揚した状態で、三次元方向の分布を一度に測定でき

ばよいのであるが、その機会が得られなかったので、一次元方向の測定を用い、測定する方向を変えて行った(磁軸方向だけではなく、ほかの軸方向でも測定を行った)。測定は、浮揚点を含め3か所で測定した。その結果、三軸方向成分において、各軸とも磁石の接点付近で磁束密度(磁力)が最小になっているのが確認できた。このために、磁石の接点の鉛直上に鉄玉が存在したといえる。また、磁軸方向(本稿ではY方向)の磁束密度がほかの方向成分より4, 5倍程度高い、すなわち鉄玉へ作用する磁力がそれだけ強いことが確認できた。また、この力は、鉛直方向に位置を少し変えるだけで大きく変化することが確認できた。これらの結果から、なぜ、磁石の位置を磁軸方向に調整することで鉄玉が浮揚したのかが明らかになった。つまり、磁軸方向の磁力がほかの成分より強かったことは、復元力の構成においても支配的であり、上昇力を支配していたことを意味す

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 准教授

る。したがって、この力を調整することにより、重力による下降力との合力により、復元力が構成されたものと考えられる。つまり、磁軸方向への磁石の移動による調整は、復元力の構成を支配している上昇力を調整していたということが確認できた。本稿では、これらについて概要を述べる。

2. 実験器および浮揚方法の概要¹⁾

球形磁石は、磁力が強いネオジウム磁石 (15 mm ϕ , B : 813 mT) を 2 個吸着させて用いる (図 1 参照)。鉄玉 (4.75 mm ϕ , 重量: 0.44 g, 50 個程度) とプラスチックケース (アクリル製, 蓋の外側: 39×68×15 mm, 容器: 34×62×5 mm (6×54×5 mm のプラスチック板入り), 以下ではケースと略す) を用いる。

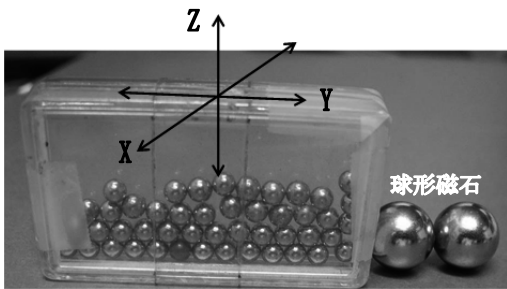
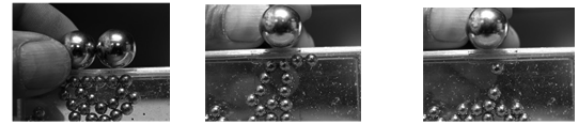


図 1 球形磁石と鉄球入りプラスチック容器¹⁾

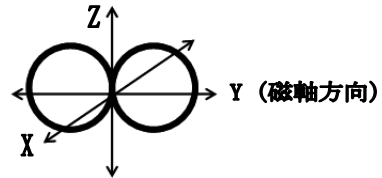
図 2 に観察例を示す。浮揚のコツは、図 2(a)に示すように、鉄玉を複数吸着させた状態を保ちながら磁石を約 90 度回す (図 2(b)) ことである。次に、磁石の吸着点の位置を鉄玉が並んでいる中心線の位置 (Y 方向) に揃えながら X 方向に磁石を左右にゆっくり動かす。この動作で吸着している鉄玉の数を 2,3 個までに減らす。その後は、鉄玉の動きを注視しながら、さらにゆっくり X 方向に磁石を左右にゆっくり動かすと、落下が途中で止まり、磁石からある距離の所で、安定に浮揚する鉄玉が現れるようになる (図 2(c)参照)。浮揚する鉄玉の数は、図 2(e)のように複数になる場合もある。なお、浮揚した鉄玉と磁石の接点間は約 13.5 mm であった (図 2(d)参照)。



(a) 鉄玉吸着 (b) 磁軸を90度回す (c) 微調整



(d) 約13.5 mm (e) 複数の鉄玉浮揚例



(f) 玉形磁石と座標の関係

図 2 球形磁石を用いた時の鉄玉揚例¹⁾

3. 磁束密度分布測定

3.1 磁束密度分布測定

3.1.1 測定方法

実際には、図 1 に示すように磁石の下部に鉄玉が存在するので、そのような配置における測定を行えばよいが、センサの配置および測定自体が困難であったので、位置関係を逆にして、すなわち磁石の上部にセンサを配置して測定を行った。磁束密度は、磁石の周りに対照的に存在することを踏まえれば、センサの位置関係を逆にしても問題ないといえる。

図 3(b)の測定装置は、自動 X-Y パルスステージ、2 軸ステージコントローラ、磁束計 (F.W.BELL, Model9200)、パーソナルコンピューター(PC)、直流安定化電源、光学部品などで構成する。センサ (端面直径: 5 mm) は、端面の前面から入射する成分は正、それ以外 (側面) から入射する成分は負の表示になる。センサの配置は、図 2(f)の座標を用い行う (図 3(a)参照)。X・Y・Z 軸の各成分を $B_x \cdot B_y \cdot B_z$ とする。移動距離特性は、センサを動かさず、磁石を移動させる。 ΔZ は、Z 方向における磁石の表面とセンサの端面の中心との間隔である。電圧値に変換された磁束密度は、電圧センサ (中村理科 (現ナリカ)、

E31-6990-08 (-20~20 V, 分解能 10 mV), E31-6990-10 (-1~1 V, 分解能 1 mV), イージーセンス・リンク (ナリカ, E31-6985) で検知し, PC で収録する。

本稿では, 各軸方向に平行な成分 (B_x の X 方向への分布, B_y の Y 方向への分布, B_z の Z 方向への分布) および B_z の X・Y 方向における移動距離特性について述べる。

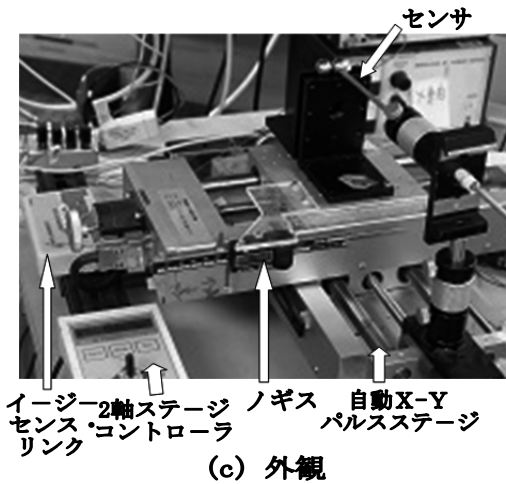
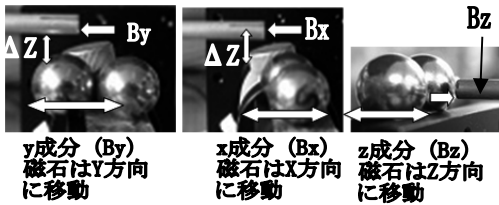
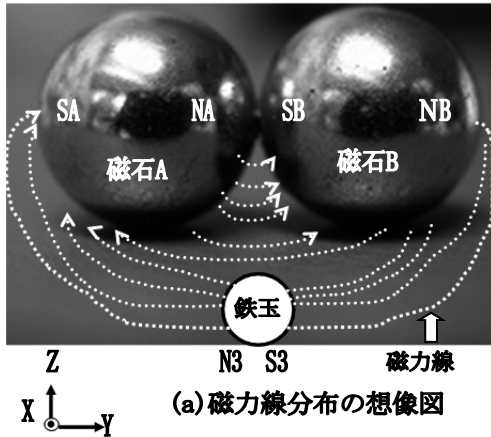
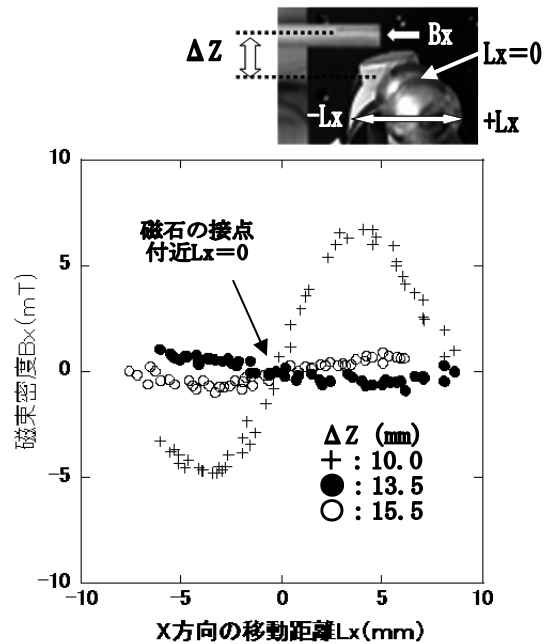


図3 磁束密度分布測定装置の外観図

3.1.2 測定結果および考察

まず, 図 3(b)の中央の B_x の X 方向の距離特性について述べる。図 4 に測定例を示す。測定範囲は, 磁石の直径 (15 mm, 磁石の接点が原点) とした (ΔZ : 10.0, 13.5, 15.5 mm)。ここで必要な結果は, 鉄玉が浮揚していた場所, すなわち磁石の接点付近の結果である。この領域を見ると, ΔZ : 10.0, 13.5, 15.5 mm の範囲では, 磁束密度は, ほぼゼロとなっていることから, 作用していた磁力は, 小さかったといえる。



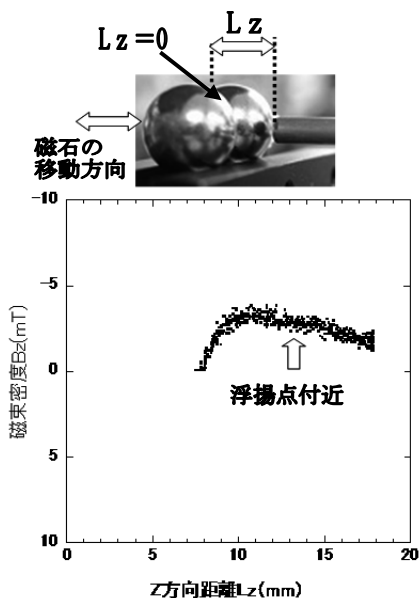


図 5 B_z の Z 方向の移動距離特性

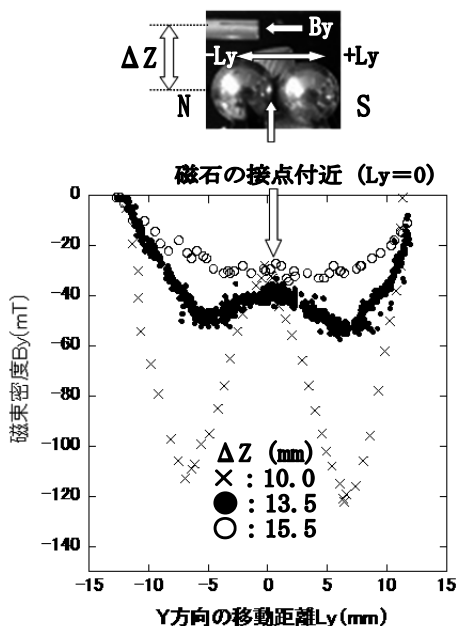


図 6 B_y の Y 方向の移動距離特性

次に、図 3(b)の右側の B_z の距離特性について述べる。図 5 に測定例を示す。 L_z の基点は、磁石の接点

である。測定し範囲での B_z の表示がマイナスの領域であったことから、センサの端面の前面から入射する成分 (正) よりも、それ以外 (側面) から入射する成分 (負) が支配的であったことがわかる。これは図 3(a) の磁力線分布の想像図からも理解できる。また、浮揚点付近に着目すると、 B_z の分布が小さいこともわかる。図 5 の結果で重要なのは、後述する復元力の大きさを検討する際に用いる浮揚点付近の B_z の大きさ (約 3~4 mT) が重要になる。

最後に、図 3(b)の左側の B_y の距離特性について述べる。図 6 に測定例を示す。ここで必要な結果は、ケースの幅(5 mm)すなわち L_y が ± 2.5 mm における結果である。この領域を見ると、 ΔZ : 10.0, 13.5, 15.5 mm の範囲では、X 方向成分(図 4)および Z 方向成分(図 5)と同様に磁束密度の分布が大きく変化しないのが分かる。これらの結果から、浮揚点付近は、磁束密度の分布が少ない、すなわち安定な磁力が作用していたことが確認できた。また、X 方向成分(図 4)および Z 方向成分(図 5)に比べて図 6 における数値が大きかったことから、この方向、すなわち磁軸方向の磁力の作用がほかの方向に比べて大きかったといえる。

次は、影響が大きいと考えられる B_z 成分に限定し、その X 方向および Y 方向における移動距離特性を検討する (図 3(a)の右側参照)。

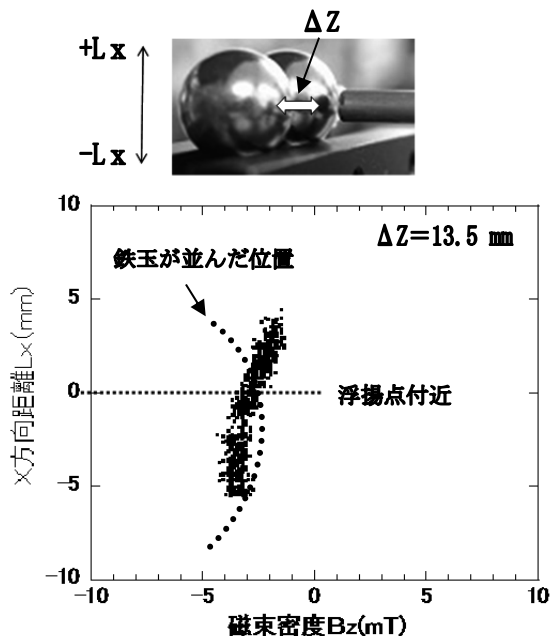


図 7 B_z の X 方向の移動距離特性

まず、X方向について述べる。図7に測定結果を示す。Lxを紙面の縦方向に変化させたので、図の縦軸にLxを表示した。ここで注目するのは、図2(e)との関係である。Lxはケースの長さ方向であり、円弧を描くように鉄玉が複数浮揚した方向である。図7で浮揚点を境にして、Lxが変化すると磁束密度もいくらか大きくなるのがわかる。これを反映して磁力が鉄玉に作用したために、図2(e)のように鉄玉が並んで浮揚したといえる。なお、並んだ鉄玉の想像位置を図7に波線で記述した。

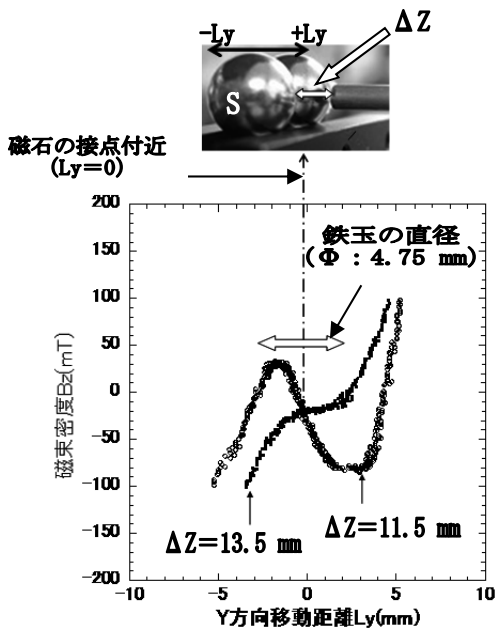


図8 BzのY方向の移動距離特性

次に、Y方向に磁石を動かした場合の結果を述べる。図8に測定結果を示す。この方向は、磁軸の方向なので、Bzが大きくなっており、磁石の接点を境にして、正負がほぼ対象になる。ここで着目するのは、 $\Delta Z = 13.5 \text{ mm}$ における磁石の接点付近である。この部分に比較的均一な領域があり、その幅が鉄玉の直径(4.75 mm)とほぼ同じ大きさになっている。図6の所でも述べたが、浮揚させるために、磁石を磁軸方向(Y方向)に移動させた(±Lyに移動させた)のは、この方向の磁力の影響が支配的であったからであることが、図8の結果からも確認できた。

4. 復元力について

4.1 概要

図9にイメージ図を示す。図(a)は、復元力がない場合である。この場合は、必ず上下いずれかに動くので、安定に留まるのが困難である。それに対して、図9(b)の場合は、復元力が作用するので、安定に浮揚することができる。

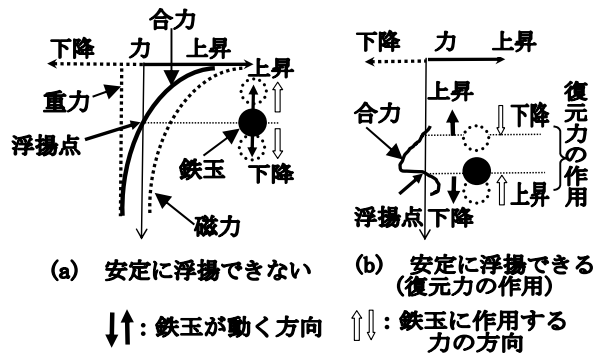


図9 復元力の想像図

4.1.1 復元力の作用範囲の確認

鉄玉に作用する復元力は、点ではなく、図9(b)に示すように、ある範囲に及んでいると考えられる。そこで、図9(b)の復元力の作用と記述してある領域の存在を、図10の状態(鉄玉に自由に外力を与えることが可能である)を使って確かめた。

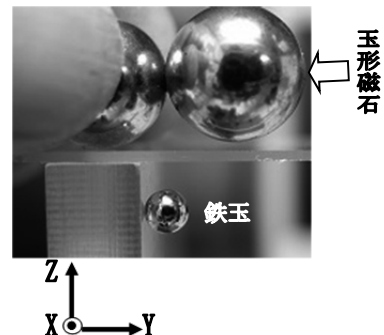


図10 ケースを取り除きプラスチックの板を垂直に立てかけて鉄玉を浮揚させた例

外力を加えて鉄玉を少し移動させ、いったん止めて、その位置で外力取り除く。その時鉄玉に復元力が作用していれば、元の位置に戻る。しかし、復元力が働かなければ、元に戻らないはずである。

まず、Z方向（鉛直方向）について述べる。木製の棒と定規を用意する。浮揚している鉄玉の付近に定規を設置する。これに直角になるように棒を配置し、鉄玉の上部（下部）に接触させる。その状態で下方（上方）に棒を移動させ、鉄玉が落下（上昇）するまで移動させることを5回繰り返し、平均した結果、鉄玉が元の位置に戻らなかった位置は、浮揚点（約13.5mm）から上方に約4mm、下方に約5mm付近であった。

次に、X方向およびY方向について述べる。鉄玉にX方向の外力を加えると、磁石が丸いので円周方向に鉄玉が動いた。これは、図2(e)の結果からも理解できる。そこで、棒をもう一本用意し、鉄玉が円周方向（上方）に移動しないようする。その棒を固定した後、鉄玉に外力を加えて、落下するまで移動させることを5回繰り返し返した。その移動距離を平均した結果、約10mmとなった。Y方向では、その距離は、約1mm以下と短かった。

この結果から、復元力の及ぶ範囲は、幅（Y方向）約1mm、長さ（X方向）約20mm、高さ（Z方向）約9mmの領域であり、図1のケースをさらに小さくした空間であることが確認できた（この中心が浮揚点である）。復元力のX方向の範囲が広がったことは、この方向（ケースの長さ方向）に複数の鉄玉が浮揚する場合もあったことから理解できる。Y方向の領域が狭かったのは、図6および図8の結果からわかるように、作用している磁力が強かったためにバランスが崩れやすかったためと考えられる。

最後に、鉄玉に作用している力（-Z方向）をばねばかり（0~0.1N、最小目盛 2×10^{-3} N）で測定した。ばねばかりのフックに木製の棒をかけ、その棒と鉄玉を接触させる。木製の棒をゆっくり鉛直方向に鉄玉と一緒に移動させ、鉄玉が落下した時のばねばかりの指示を読むということをして5回繰り返し、平均した結果、約 4×10^{-3} Nとなった。この値は、使用した鉄玉（0.44g）に作用する重力（ 4.3×10^{-3} N）と類似する。

以上の結果から、用いた鉄玉が安定に浮揚するには、約 4.3×10^{-3} Nの重力と同程度の磁力の作用が必要であると考えられる。一般に、磁気吸引力は(1)式²⁾で求められるので、磁束密度を算出し、その数値と図6の浮揚領域の実測値（3~4mT）と比較することにした。この式は、磁石・物体の断面積が平面の場合について用いられるが、球面の場合の数

式が見当たらなかったため、正確な数値を求めるといよりは、図6の浮揚領域の数値と比べてどのようになるかを知るとい意味で用いることにした。

$$F = B^2 \cdot S / 2 \cdot \mu_0 \quad (1)$$

ここで、 F は吸引力（N）、 B は磁束密度（T）、 S は断面積（ m^2 ）、 μ_0 は真空の透磁率（ $4 \cdot \pi \times 10^{-7}$ ）である。(1)式の S に鉄玉の表面積の半分（約 $35.2 \times 10^{-6} m^2$ ）、 F に 4.3×10^{-3} Nを代入した結果、 B は約5.3mTとなり、図6の浮揚領域の数値と近いことがわかった。

5. まとめ

鉄玉を浮揚させる時、なぜ、磁軸方向に磁石を動かしながら浮揚条件を探したのかについて、磁石の磁束密度分布を測定して検討した結果、磁軸方向の磁力が復元力の構成を支配していたために、磁軸方向に磁石を移動させて、調整をしなければならなかったことが確認できた。また、大まかなではあるが、復元力の存在、復元力の作用領域の立体的な把握および鉛直方向に作用する力（磁力）の見積もりなどを行った結果、概ね良好な結果が得られた。

今回の測定対象は、三次元的現象なので本来は、三次元測定を行わなければならない。しかし、測定機器の関係で次元毎に測定せざるを得なかった。磁石の磁束密度に資料依存性がなく、対称性を有していれば、二次元測定結果を用いて三次元化も可能である。しかし、実際の磁石の磁束密度分布は、試料依存性を有し、非対称性の場合が多い。したがって、三次元測定を行う必要がある。これについては、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 櫻井勇良：応用物理教育, 39(2), pp.109-112 (2015).
- 2) 平井紀光：やくにたつ電磁気学, p.179 (ムイスリ出版, 2011).