

球形磁石を使ったクーロン力の検証実験

櫻井 勇良*

The verification experiment of the Coulomb force using the spherical magnet

Yuryo SAKURAI

Abstract:

An experiment to measure the force between spherical magnets is described. In a previous study, we carried out the examination using a rod-like magnet; this study is an extension to other magnet shapes. We increased the magnet length to diameter (L/D) ratio, and found that above a certain ratio the observed magnetic force changed. As a result of the investigation, it was noticed that there are no reports on spherical magnets in the literature. The experimental findings agreed well with calculated values, although the L/D ratios of the magnets used in this study were not large.

KEY WORDS: Spherical magnet, Coulomb force

要旨:

球形磁石間の磁力を測定する実験について述べている。前の研究において、我々は、棒状磁石を使っている試験を行った。この研究は、他の磁石形への拡張である。我々は、磁石長に対する直径の比率 (L/D) に増やし、ある比率を超えると磁力が変わることを明らかにした。調査の結果、球形磁石についての報告した文献が無いのに気付いた。この研究において使われる磁石の L/D 比率は大きくなかったが、計算値と良く一致位することを確認した。

キーワード: 球形磁石, クーロン力

1. はじめに

二つの磁石間に生成する力は、両者間の距離の2乗に逆比例するといわれる。しかし、これは、点磁極で無限の長さを有する場合あるいはそれに相当する場合に限られる¹⁾。筆者は、以前、有限の磁石を用いた検証実験を行った²⁾。二本の棒磁石を用い、磁石間に生成する力の距離特性を測定した結果、測定値と理論値とのずれが、用いる磁石の長さ直径の比 (長さ/直径) に依存し、長さ/直径の数値が大きくなるほど、測定値と理論値とのずれが少なくなることを明らかにした²⁾。この結果は、上記の条件、すなわち点磁極で無限の長さを有する場合あるいはそれに相当する場合に限られるということを裏付けている。

点磁極の考え方は、理論上考えたものであって、実際的ではないので、測定値と理論値とでは、ずれが生じるのは当然といえる。したがって、ずれが小さくなることはあっても、ずれが無くなることがないことは、文献2の実験結果から容易に想像できる。そこで、小さな球形磁石を用いれば、点磁極に見なせないだろうか考えた。このずれは、背面の磁極および磁極面が平面であることに起因するので、完全に無視できる条件で実験を行うのは困難である。

そこで、どの程度まで近づけることができるのかを検証することを考えて、思考することにした。その過程で、あまり報告されていない球型磁石を使った検証実験を思いついた。

一般的に、点磁極でないものを用いる場合には、磁石間距離を一義的に求められなくなる、すなわち

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 准教授

後述する(2)式で示している r の値を定めるのが、困難になるという指摘³⁾がある。磁極面が球状のものを用いた場合、磁極面が平面であるものに比べれば、磁石間の距離を決めやすくなるかもしれないが、点磁極としてみなせるかどうかは疑問がある。このように、磁極面が球形の磁石を用いて、磁石間の磁力を求めても、計算値を求めるのが困難になる。

そこで、実験することを一旦は躊躇したが、どうなるかを知りたかったので、以前用いた装置を使って測定することにした。その結果、文献2の結果を踏まえると、磁石の長さ/磁石の直径の数値の割には、測定値と理論値とのずれが少なくなる傾向が見られるという意外な結果が得られた(ただし、計算値はあくまでも参考であるが)。

以下では、それらに関する概要について報告する。

2. 実験方法と結果

2.1 実験装置および条件

自動 X-Y ステージ(以下ステージと略す)や光学部品を用いて構成する。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、垂直方向の位置はヘリコイドスタンドで調整する。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を調整する。ステージが動いた距離を電気信号として収録するために、摺動抵抗器(直線型、移動距離と抵抗値の関係が線形)とデジタル式ノギス(～150mm, 誤差±0.03mm, 以下ノギスと略す)を用いる。磁石間に発生する力は、力センサ(ナリカ, E31-6990-16, -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。

図1に試作した測定装置の概観図を示す。摺動抵抗器およびノギスの本体は、ステージの固定部分に設置し、すり接触部分(ノギスの可動部)をステージの稼動部分に接着させた。これにより、ステージが動くとき、それと同じ長さだけ摺動抵抗器のすり接触およびノギスの可動部が動くようになる。これにより、磁石間の距離 r (mm)を横軸、力センサの出力信号(N)を縦軸にしたグラフが得られる(引力が正符号、斥力が負符号となり、上記の数式の場合と逆符号になる)。

球形磁石(ネオジウム, 直径 Φ : 5 mm, 磁束密度 B : 668 mT)の固定は、専用の非磁性材料の道具(ヘリコイドスタンドのストッパとして用いるネジ)を用い、ネジの頭(Φ : 18 mm, 厚さ: 6 mm)の中心に 5.1 mm Φ の穴を開け、磁石の半分程度埋めて、接着剤で固定した。磁石間距離 r の測定範囲は、任意に 0

～15 mm とした。

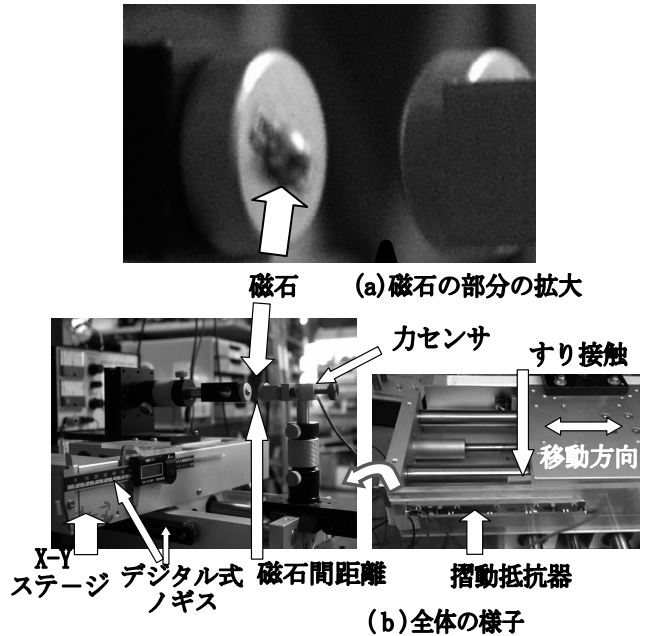


図1 測定装置の概観図

2.2 実験結果

図2に引力の測定例と計算値1および計算値2を示す。計算値については、磁極面が平面である場合の数式は存在する(図3および(2)式参照)が、球面を用いた場合の数式が見あたらなかった。そこで、概略を把握するという視点から、便宜的に既存の(2)式を用いることにした。

$$F_0 = km^2(1/r^2 + 1/(r+2d)^2 - 2/(r+d)^2) \quad (\text{N}) \quad (2)$$

ただし、 m : 磁極の強さ(wb), $k=1/4\pi\mu_0$, μ_0 : 真空中の透磁率, F_0 : 斥力(引力の場合は負の値になる)

本研究では、球面の磁石なので(2)式をそのまま用いることはできず、工夫が必要になる。まず、球形の形状をほかの形状にみなす必要がある。簡易的に、真正面から見た形が円になるので、円筒形の磁石(Φ : 5 mm, 長さ: 5 mm)とみなすことにした。したがって、磁極 m (wb)は、磁束密度(668 mT)に、磁石の断面積(半径 2.5 mm の円の面積)を掛けて求める。この m と r の測定値、磁石の長さ(5 mm)をそれぞれ(2)式に代入して求めた(計算値1)。

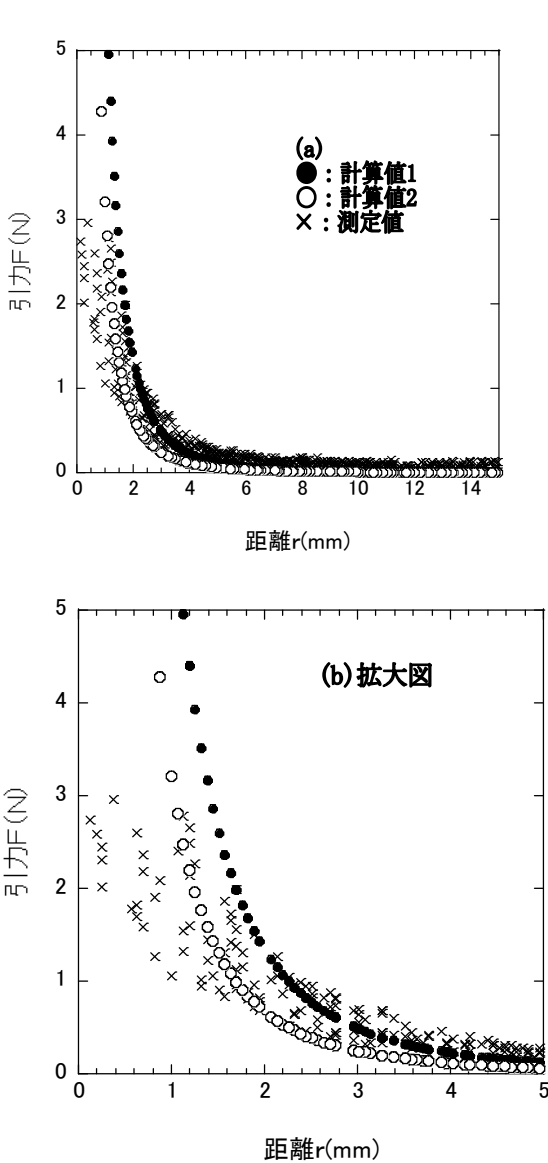


図2 引力の距離特性

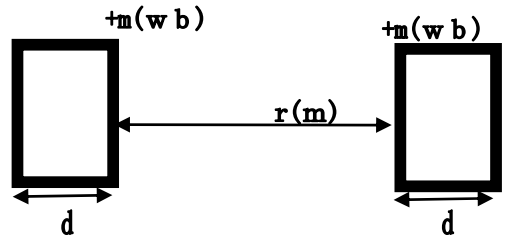


図3 (2) 式の有限長磁石における配置図

球形磁石を、簡易的に円筒形の磁石にみなしたが、実際の断面積が、それよりも小さいので、計算値1より小さな値になる。そこで、一例として、断面積を半分にした(2.5 mmの半径を約1.77 mmにみなした)時の数値(計算値2)を求め、図2に併記する。

図2(a)から、全体的に見ると計算値と測定値と比較的よく一致しているのがわかる。横軸を拡大してみると、計算値1より計算値2の方が測定値と類似するのがわかる(図2(b)参照)。 r が約2 mm以下になると、計算値と測定値との差が大きくなり、測定値が計算値よりも小さくなる傾向が見られる。

この差の原因を決定するのは、困難である。磁石間に生成する力は、(2)式に示すように、 r と m が支配しているので、それらの値に差が生じれば、自ずと力にも差異が現れる。特に、 r については、その2乗の逆数に比例しているので、影響力は、大きいといえる。その影響は、 r が短くなるほど、大きくなることは、容易に考えられる。

一般的に、点磁極でないものを用いる場合には、磁石間距離を一義的に求められなくなる、すなわち、(2)式で示している r の値を定めるのが困難になるという指摘³⁾がある。このことが $r=2$ mm以下において生じたために、ほかの時に比べて測定値と計算値との差が大きくなったものと考えられる。

次に、文献2の結果と比較する。計算値と測定値との差が比較的小さかった時の結果(長さ/直径の比が50と最も大きかった)と比べて見る(図4参照)。

図4を見て、まず、気づくことは、引力の大きさと測定値に含まれるノイズの違いである。この差は、文献2の磁石(約150 mmのアルニコ磁石、 $\Phi:3$ mm、 B :約100 mT、試料M2)と本研究で用いた球形の磁石の磁束密度(668mT)の差に起因するといえる。用いる磁石の磁束密度が高くなると、信号対雑音比(S/N比)が高くなるので測定値の信頼性が高くなる。図4(b)の場合は、ノイズの出現を平滑化するために、ウィンドウサイズを15と任意に定めてスムージングを施した。それに対して、同図(a)は平滑化を施す必要

がなかった。

次に気づくことは、計算値と測定値とのずれである。両図を比べると、図4(b)の場合は、ノイズが目立っていたけれど、計算値とのずれが大きい領域がなく、全体的にずれる傾向が見られる。それに対して、同図(a)では、磁石間距離が約2mm以下の時とそれ以上の時とで計算値との差が異なっているのがわかる。

2mm以下においてその差が大きくなる、すなわち、引力の測定値が計算値に比べて小さくなるのは、磁石が球形であることに起因する影響が関与していると考えられる。気になることは、背面の磁極の影響である。

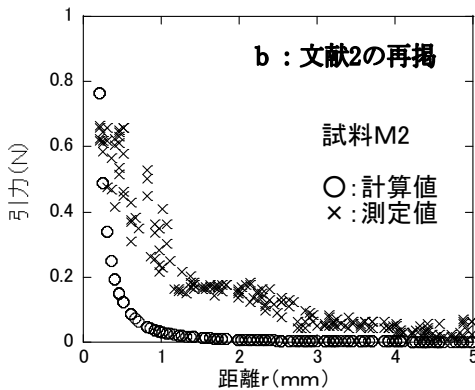
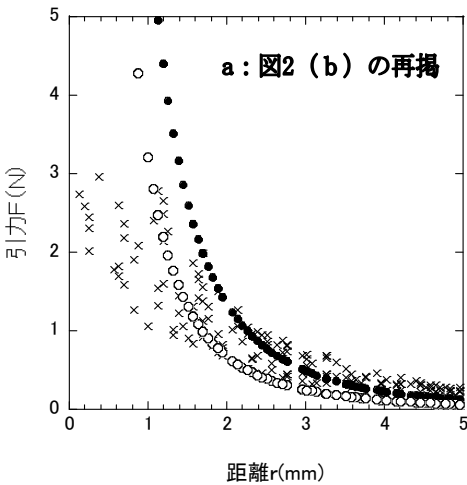


図4 文献2の結果との比較

ここで、円筒形の磁石の長さと同じ直径を持つ球形の磁石を図3のように配置した時を考える。円筒形の場合は、磁極が平面なので、背面の磁極の影響は、図3に示すように、磁石の長さの距離を隔てて現れる。一方、球形の場合は、磁極が半球になっているので、背面の磁極は、前面から d の距離ではなく、その半分になる。仮に、磁束密度が同じであれば、平面磁極において作用している磁力に比べて、球形磁石の方が、作用している時の磁極間距離が短くなるので強くなる。

これを踏まえると、図4(a)において、 $r=1$ mm以下の引力の測定値の増加が鈍っていたのは、対面している磁石の背面の磁極との斥力の影響が考えられる。

以上のように、球形磁石を用いて文献2の結果と比較検討した結果、ある距離までは、計算値と一致する結果が得られるが、近距離になった場合は、距離に対する測定値の増加が鈍化するのが明らかになった。

球形磁石は、磁石の長さに対する直径の比率が1であるが、同じ比率の円筒形の磁石に比べれば、 S/N 比が高く、計算値とのずれも相対的に小さいことが明らかになった。しかし、(2)式を用いた計算値は、あくまでも、仮の計算であるので、適応できる計算式を得る必要がある。今回の結果から、基本的には、(2)式のような形になると考えられるが、磁曲面が平面ではなく、球面であるので、それを反映した、何らかの係数が必要になると考えられる。

3. まとめ

今回、あまり検討されない、球面磁極の場合の磁極間力の距離特性を検討した結果、細くて長い棒磁石を用いた場合に比べて、ばらつきが少ない結果が得られることが明らかになった。今後は、リング型同士、棒磁石とリング型磁石、円形型とリング型あるいは棒磁石を用いた場合の検証実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 山本義隆：磁力と重力の発見3, pp.924-926 (みすず書, 2004).
- 2) 櫻井勇良：科学教育, 37 (1), pp.56-60 (2013).
- 3) 米満澄：電気と磁気のお話, p310 (アグネ技術センター, 2009).