

リング磁石による浮上について

高橋 善樹

福島県立会津高等学校, 965-0831 会津若松市表町 3-1

yokkun831@nifty.com, <http://homepage2.nifty.com/ysc/>

昨年 7 月に「新理科教育メーリングリスト (ml@rika.org)」で話題になった, リング磁石による円板磁石の安定浮上について, この実験を報告された飯島氏より考察の依頼をいただいた。私がホームページで公開していた拙論「磁気浮上に関する覚書き」をネット検索で発掘していただいたのがきっかけである。さっそく興味深いこの実験を追試するとともに, ある程度の納得できるモデルが得られたので報告したい。

1 浮上とぶらさがりの不思議

リング磁石の穴に透明なアクリルパイプを垂直に挿入し, 円板磁石を異なる磁極が向かい合うように (リング磁石の上面に吸いつく方向で) パイプに入れると数 cm のところで安定して浮上する (写真 1 左)。異極どうしを対面させて反発すること自体不思議に見えるが, これはリング磁石の特性のためである。上面を N 極とした場合, リング部分から出た磁力線はその一部が穴に引き込まれるから, 穴のすぐ上は磁場が反転しており実質的に S 極になっている。したがって穴の上では, S 極を下にした円板磁石が反発力を受けて浮上する。ただし, ここで既に疑問がひとつ生じる。なぜ円板磁石が回転してしまわないのかが不思議に思われるのである。

そこでそのまま全体を上下さかさまにしてみると, 今度は円板磁石はリング磁石から引力を受けて落ちてこない (写真 1 右)。重力のためにわずかにつりあいの位置が下がるが, ほぼそのまま中空にぶらさがって安定する。これも磁石どうしの引力のみによって, 支持のないまま中空へつり下げることが一般に不可能なことからすると不思議に見える。明らかに円板磁石の上下変位に対して磁力が復元力として作用しており, したがって円板磁石はリング磁石の穴の上数 cm の平衡点で上下に振動することができる。写真の条件では, 円板磁石がパイプの口から出るほどの振幅を与えてはじめて, 落下する。



写真 1 磁石の反発で浮上。そのままひっくり返すと … !?



2 リング磁石がつくる磁場の特性

以上の現象は, 初歩的には次のようなリング磁石の特性のためと考えることもできる。リング磁石の N 極を上にした場合, 穴のすぐ上は実質的に S 極となっているが, 穴からやや離れたところから上は N 極としてはたらく。したがって S 極を下にした円板磁石は, 平衡位置より下に変位すると穴の S 極から反発力を受け, 上に変位すると引力を受けるのである。

しかしこの定性的な考察は, 円板磁石の上面の N 極が受ける力を無視しており, したがって通常起こるべき円板磁石の反転が起こらないことを説明できない。また, アクリルパイプによる支持が必要なことから明らかなように, この安定点は横方向には不安定である。穴の中心軸上は対称性からすぐにわかるように横方向の力の平衡点である。しかし, これは不安定な平衡点でありいわば位置エネルギーの鞍点である。そのため支持のない円板磁石は, 横へのずれとともに増大する力によってただちにリング面

方向に動いてくっついてしまう。つまり、ここでは磁石を反転させる偶力の効果よりも横にずらす力の作用が勝っているといえる。こうした効果の原因を探るためには、どうしてもリング磁石がまわりにつくる磁場の形状を知る必要がある。

3 リング磁石の円電流モデル

永久磁石は本質的に微小な同一方向への円電流の集合として考えることができる。まず円板磁石の場合を考えると、内部ではとなりあう微小円電流の方向が逆向きに接するために打ち消しあい、実質的に円板磁石の側面を流れる表面電流に帰着する（図1左）。したがって薄い円板磁石は、半径が同じ円電流がよいモデルとなる。

リング磁石の場合を考えると、リングの内側表面には外側と逆向きの表面電流が現れる（図1右）。したがって薄いリング磁石は、半径が異なる同心円上を逆向きに流れる円電流の組とするのがモデルとして妥当と思われる。

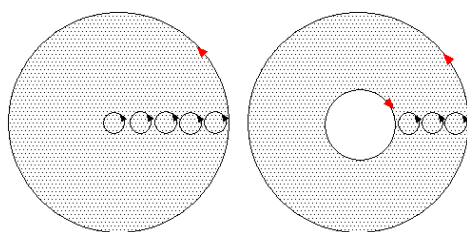


図1 円板磁石とリング磁石の表面電流

数学・技術計算ソフトを用いてモデル計算した結果を図2に示す。リング磁石の厚みを考慮していないが、まわりに生じる磁場の特性をある程度再現できていると思われる。まず、磁石のN極面から出た磁力線の一部が穴へ吸い込まれてその吸い込み口にS極をつくる。また、かろうじて吸い込みを免れた磁力線は穴の上方におおいかぶさった後に外向きに方向転換して大回りにリングのS極面へと向かう。この上向き磁力線が穴の存在によって絞られていることが、後から述べるように今回の現象において重要な働きをしているのである。

ちなみに、今回の円板磁石の安定はこの磁力線の絞込みの位置で生じており、またコマをまわして安定させる「U-CAS」は、この絞込みの上の磁力線が外に開くところでの反発を利用している。したがって両者の磁極は逆向きである。

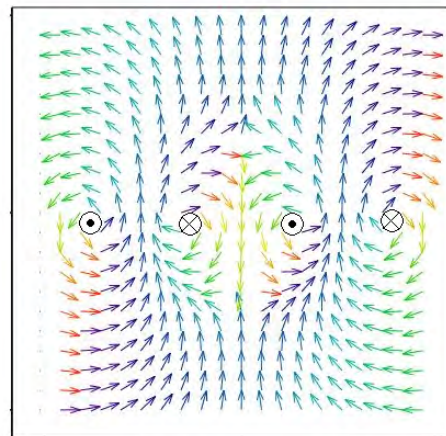


図2 円電流モデルによるリング磁石の磁場

4 磁場の「鞍点」について

リング磁石の上の磁力線が分かれたところに行き、平行する磁力線が一時的に密になっている場所では、その方向に限って安定な平衡点ができる。図3で淡く塗りつぶしたところがそれにあたる。ここに下をS極とした円板磁石をおくと、上下方向に対しては復元力が生じるのである。これはちょうどリング磁石の中心部と同様の状態であり、中心部では逆に下向きの磁力線が強く絞られており、上をS極とした円板磁石が強く引き込まれて、やはり上下に安定することはすぐに確認できる。

ただし、今回考察している平衡位置では、リング穴上部の反転した磁場からの反発も手伝っており、中心部の平衡と異なって上下非対称である。リング磁石中心に向かう変位に対する復元力は非常に強く、中心から離れる上方への変位に対する復元力は弱い。しかし、磁石を2枚重ねにするなどして磁場を強化してやれば、全体を上下さかさまにしたときにも重力にうちかつだけの復元力を得ることができる。

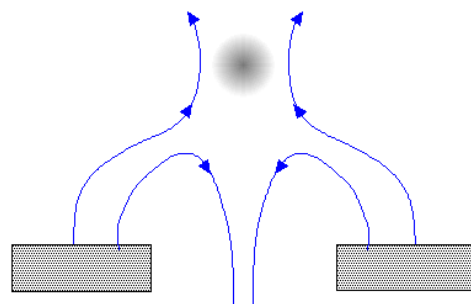


図3 リング磁石の絞り効果

このように磁力線が絞られたところに磁力線の方向が一致する磁石を配置すると、その磁石は磁力線の方向に限って変位に対する復元力を受けることになり、安定したつりあいの状態になる。ここでは明らかに磁石の回転に対しても復元力が働き、単なる反発の配置（「U-CAS」の場合これにあたる）と異なってその場での反転は起こらないことがわかる。ただし、磁力線と垂直な方向への変位に対しては、ずれとともに増幅する外向きの力を受けることになるから、垂直方向に対しては必ず不安定な平衡点になるのである。この特性は、磁力線が磁石内部を含めて必ず閉曲線となり、決して湧き出しおよび吸い込みを持たないという本質的な磁場の性質によるものである。

これと同じ事情は電場から力を受ける電荷においても存在する。電荷が全方向に復元力を受けることがあるとすれば、明らかにその場所は電気力線の湧き出し（負電荷の場合）または吸い込み（正電荷の場合）である。ところが、電気力線の湧き出しまたは吸い込みは、電場の源となる電荷がある場所にしかない。第2の電荷が同じ場所を占め得ない以上、電荷が全方向に復元力を受けるような安定な平衡点は存在し得ない。電荷が電気力だけで安定する平衡点は存在しないのである。これを「アーンショウの定理」という。

磁場の中の磁石においても同じ事情が起こり、たとえある方向に対して復元力があって安定な平衡が成立するとしても、一般にそれに垂直な方向では変位と同じ方向に力を生じてしまう。位置エネルギーに関していえば、こういう場所はある方向には極小、

垂直方向には極大となるいわゆる「鞍点」にならざるを得ず、これは本質的には磁力線が湧き出し・吸い込みを持たないことと同値である。ただし、唯一反磁性体においては反磁化の動的なフィードバックによって安定な平衡点ができることが知られており、強力な磁場のもとでガラスを完全浮遊させ、無重力に等しい状態に置くことにより、レーザで熔融させて真球をつくる実験などが報告されている。^[3] 超伝導体の磁気浮遊も完全反磁性によるものと考えることができ、類似の現象といえるだろう。

参考文献

- [1] 「ふしぎ発見！磁石のおもしろ実験」
新理科教育メーリングリスト（ml@rika.org）
Rika:004941～005979 飯島秀治 ほか
- [2] 高橋善樹：「磁気浮上に関する覚書き」
<http://homepage2.nifty.com/ysc/hujou.pdf>
- [3] 本河光博：「強い磁場をつくる」
岩波講座 物理の世界 極限技術 3

（2007.02.12）