

磁気浮上に関する覚え書き

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

BXT02731@nifty.com, <http://homepage2.nifty.com/ysc/>

岩手大学の佐々木修一氏らのグループによる「鉄球浮上」が報告されたのをきっかけに、磁気浮上ゴマ、横倒しゴマ…という科学おもちゃの解析・自作にはじまるかねてからの磁力による物体浮上に対する関心が再び呼び起こされた。報告されている「鉄球浮上」は、実際普及用に開発された実験道具を購入して確認したが、なかなかおもしろい現象ではあるものの「160年来の根本定理を覆す」可能性に言及するのはやや唐突で性急な感じがしている。これについては未だ結論にはいたっていないが、磁気浮上に関する理論と実際について今のところ私が得ている知見についてまとめておく。

1 磁気浮上おもちゃ

磁気浮上ゴマ (商品名: U-CAS 写真1) がおもちゃとして売り出されたのを友人の紹介で知って、さっそく購入したのが十数年前であったと思う。鉛直平衡位置での反転をジャイロ効果で阻止するというその原理には感動したものである。既製品の浮上用の正方形磁石は、中央付近の磁化が反転しているという特殊なもので、実験室での再現は難しいと思われたが、その後2枚重ねのドーナツ磁石で目的の磁場の再現に成功し、コマの方も中央に軸穴のあいた円形磁石を使用して自作することができた。



写真1 U-CAS (スーパーレビトン)
初代 U-CAS より強力になっているらしい

一方、数年後に磁石を仕込んだ細長いコマを横に浮かせて回転させるという横倒しゴマ (商品名: サイエンスレボリューション) が発売されたが、これも何とか近いものを自作することができて、高教研

会津支部物理専門部の研修会で製作会をしたこともあった (写真2)。こちらの方は、鉛直方向の平衡位置を確保して水平方向に逃げるのをガラス板で支持するというものであった。うまく調整すると、軸とガラス板の接触圧を非常に小さくすることができ、摩擦を小さくしたもとで長時間コマを回し続けることができた。

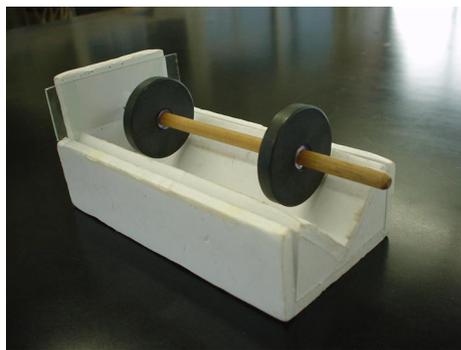


写真2 横倒しゴマ

性能は既製品に劣るが自分で調整する楽しみが…

昨年みつけて会津物理サークルでも紹介した井戸型の永久運動おもちゃ (写真3) においても、回転軸が基台から浮いており、同様の支持方法がとられている。ただし、こちらの方は一方で糸につながれていて、水平方向への逃げを阻止し、また糸のねじれを回転方向の反転にうまく使っている。



写真 3 永久運動おもちゃ

自励ゴマと同じくみでトランジスタのフィードバックを用いている

以上のように私が出会って関心をもったおもちゃの中に、磁力による浮上をとりいれたものがいくつかあるが、いずれも鉛直方向への平衡点での浮上を確保しつつ、何らかの方法で水平方向への逃げまたは鉛直面内での回転を阻止して浮上の状態を維持しているものである。同様の状態は写真4のような単純な磁石の浮上に見られる。中央の支持棒がなければ、磁石はただちに水平方向に逃げると同時に回転してくっついてしまう。



写真 4 ドーナツ磁石の浮上

(浮いた磁石の重さは?)

一方、何の支持も必要としない磁気浮上が存在する。それは超伝導体の上での小磁石の浮遊である。これはあとから述べるように、完全反磁性によるものであり外部からの動的な制御を必要としない完全な安定浮遊の一例である。

2 鉄球浮上について

岩手大学の佐々木氏らの「鉄球浮上」の報告^[1]は、ドーナツ磁石の側面で平形プラスチックケース内の鋼鉄球を吸い付けると、2列目の球が無接触で浮上するというものである。もちろん磁石の位置や鋼球の配列に条件があり、ある程度の試行錯誤が必要だが、ケースの中とはいえ無接触で浮遊する鋼球のようすはなかなかのものである(写真5)。

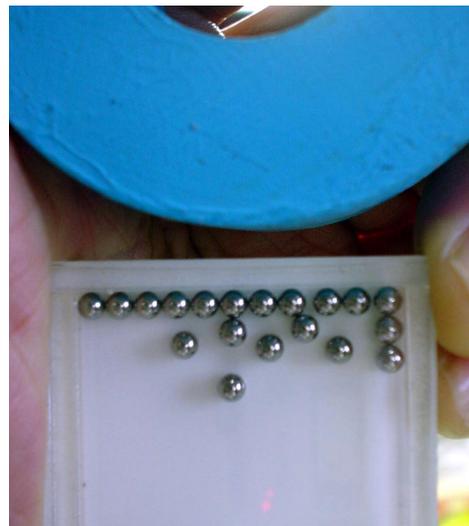


写真 5 鋼球の無接触浮上

条件により 2 段 3 段浮上することもある

これは、鋼球がすべてドーナツ磁石のつくる磁場の方向に磁化し、1 段目と 2 段目の鋼球の配列は相互に反発し合う向きになることがポイントであると思われる。鉛直方向に安定な平衡点ができる理由は容易に推察できる。しかし、この場合に磁場の方向はプラスチックケースの壁に拘束されているのだから、壁が水平方向への「逃げ」を阻止しているに違いないと私は即座に考えたが、原論文を精査してみると壁には接触していないのだという。論文はプラスチックの反磁性による反発の可能性に論及しているが、壁から実際に反発を受けているのならば私はむしろ静電気力のせいではないかと疑っている。

ちなみに、磁力によって浮かばせるおもちゃでもそうであったように、鉛直方向に安定な平衡点があるとき、それが同時に水平方向の平衡点であったとしても、それは一般に磁力だけでは不安定な平衡点である。鉛直面内のポテンシャルを描けば、鉛直方向に極小、水平方向に極大となるいわゆる鞍点となると思われる。しかし、平衡点には違いがないから水平方向の支持は微小な力ですむという特徴がある。

いずれにせよ磁力以外の力が、安定な平衡点を作り出す上で不可欠な働きをしているのである。また、永久磁石ではなく磁化した鋼球であるということも重要であるように思われる。磁化は可逆的な範囲で起こっているため、外部磁場の強さとともに変化するため、磁化のしくみそのものに動的なフィードバック機構が内包していると考えられるからである。

ところで、佐々木氏らの論文によれば鋼球の浮上は「160年来の根本定理」＝アーンショーの定理を覆すかもしれない現象であるとされている。さて、これはどういう意味なのであろうか？

3 アーンショーの定理

アーンショーの定理は本来電気力に関する法則であり、「電気力だけで電荷を安定した平衡に置くことはできない」というものである。数学的にはガウスの法則と同値であり、電荷がない空間の電場は湧き出しも吸い込みももたないから、平衡点があったとしてもその近傍で試験電荷が受ける力が全方向に復元力にはなり得ないことは自明である。数学的には「ラプラスの方程式 $\Delta\phi = 0$ を満たす領域で、ポテンシャル ϕ は極値をとることがない」と表現され、容易に証明することができる。

さて、磁力に関するアーンショーの定理とは何であろうか？ 磁荷は本質的に双極子としてのみ存在するから、電荷が電場から受ける力の平衡と同一に論じることはできない。磁場内に置かれた磁気双極子のポテンシャルエネルギーのふるまいを論じなければならぬのである。

磁場 \mathbf{B} の中にある磁気モーメント \mathbf{m} に対するポテンシャルエネルギーは、

$$U(\mathbf{r}) = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r})$$

である。 \mathbf{m} の大きさが一定であれば、 \mathbf{B} と同じ方向を向くときに U は最小になるから、定数 $\kappa > 0$

により

$$\mathbf{m} = \kappa \mathbf{B}$$

とおけば、

$$U(\mathbf{r}) = -\kappa B^2$$

となる。もし \mathbf{r} が安定な平衡点であると仮定すると、この点で力の微分は負でなければならない。すなわち、

$$\nabla \cdot (-\nabla U) = \kappa \nabla \cdot \nabla B^2 < 0$$

となる。しかるに

$$\nabla \cdot \nabla B^2 > 0$$

は自明であるから、 $\kappa < 0$ でなければならず仮定に反する。したがって、 \mathbf{r} は安定点ではあり得ない。[2] [3]

ただし、 \mathbf{m} が反磁性体による場合は、常に $\kappa < 0$ となるから安定な平衡点をもつことができるのである。超伝導体の上での磁石の浮上や強磁場中における物体の浮上はこれにあたる。ガラスなどを浮上させてレーザーによって溶融させ、無重力に等しい状態で完全球を作製する実験などが報告されている。[3]

参考文献

- [1] S.Sasaki, I.Yagi, M.Murakami :
「Levitation of an iron ball in midair
without active control」
Journal of Applied Physics
Vol.95, No.4, 15 Feb 2004
- [2] V.D.Barger, M.G.Olsson :
「電磁気学—新しい視点に立って— I」
小林, 土佐訳 (培風館)
- [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

(2005.06.15)