

第46回 C I S 研究所パートナー会 議事録

日時 2015年2月24日(火) 13時～17時

場所 C I S 会議室

- 1) サロン 講師 久米 健次様
テーマー 磁気浮上



会議風景

磁気浮上コマ :



磁気浮上コマの実演

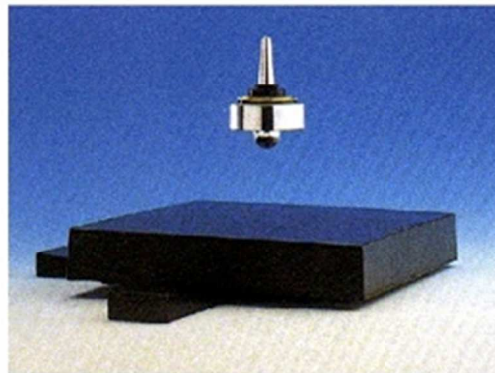
宙に浮くのは夢：

子供の頃に読んだ西遊記、出てくるに孫悟空が筋斗雲に乗って空中高く飛び大活躍するお話。最近では、人気漫画のドラゴンボールへ受け継がれてオリジナルの孫悟空とはかけ離れた行動力で子供たちを中心に非常によく知られたキャラクターで、一番の人気の秘密は宙を飛ぶ、宙に浮くという現実では見慣れていない光景にある。また、奈良では、吉野川で洗濯している女の白い足を見て墜落した久米の仙人の例にもあるように、人は「宙に浮く」ことを夢みてきた。

今日の話は、CISパートナーの久米様の「磁気浮上コマ」についてサイエンス思考でお話を聞くチャンスとなった。

久米様のプレゼン資料より転載

磁気浮上コマ【1】



2015年2月24日 at CIS
K. Kume

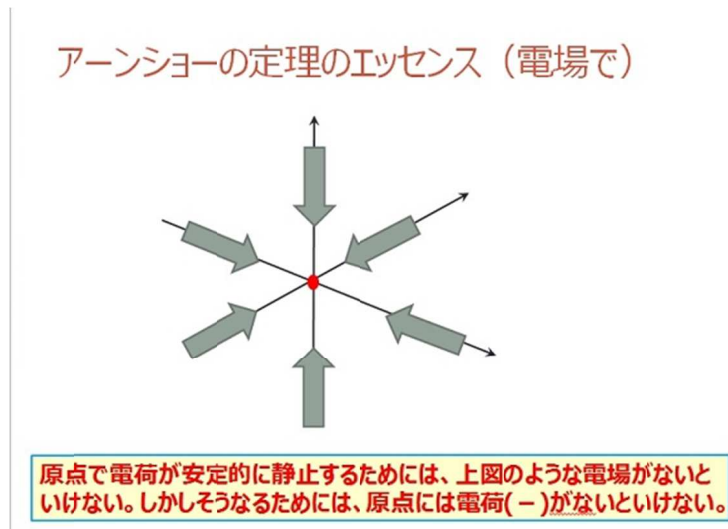
磁石の力を使って、物体を安定に空中に浮かせたい。

素朴に「磁石のN極同士、S極 同士は反撥するので、この反撥力で物体を浮かせられる」ように思える。

ところが、静電場や静磁場では、電荷や磁荷のない空間にはポテンシャルの極小点が出来ず、安定的に物体を浮かせることは不可能・・・と思わせる定理がある。

⇒ アーンショーの定理 (Earnshaw 's theorem) ----- 19世紀

下の図で、赤い点にある電荷が静止するためには、周りから中心に向けて抑えられていないとダメ。 ということは、この点を原点とすると、原点にマイナスの電荷がないとできない。



静電場や静磁場 ⇒ 渦なし ⇒ ポテンシャルあり
 電荷がない領域 ⇒ 電場Eも磁場Hも湧き出しなし。

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \text{ポテンシャルが定義できる} \quad \mathbf{E} = -\text{grad } \Phi$$

$$\text{div } \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \Delta \Phi = 0$$

ポテンシャルがラプラス方程式を満たす。

もし、極値点があると、x、y、zすべての方向について2階微分が正
 ⇒ ラプラス方程式を満たせない。

ということで、ポテンシャルフィールドには極値がない。

参考文献紹介



高橋 秀俊 (著) 電磁気学 (物理学選書 3)
 単行本 - 1959/5

1937年に東京帝国大学(現・東京大学)理学部物理学科を卒業し、助手に就任。1942年に助教授に、1957年に教授に昇進した。早くから電磁気学、特に回路論的思考を深く身につけ、分野にとられない自由な発想で数多くの卓越した研究を行った。中でも1942年の「1次元系では相転移現象は起こらない」ことの簡潔明瞭な証明は周囲に深い感銘を与え、また、1944年にチタン酸バリウムが強誘電体であることを指摘して、その後の日本の強

誘電体研究進展の口火を切ったことは著しい。その後、戦後にまで引き続いて、強誘電体、熱雑音などで大きな仕事をした。 ウィキペディアより転載

大きさを持った剛体的な帯電体があれば、不安定性を避けることが出来そうでもあ
る・・・が、それも出来ないことが示される。(参照：高橋秀俊 電磁気学)

ということは、次の可能性が残される

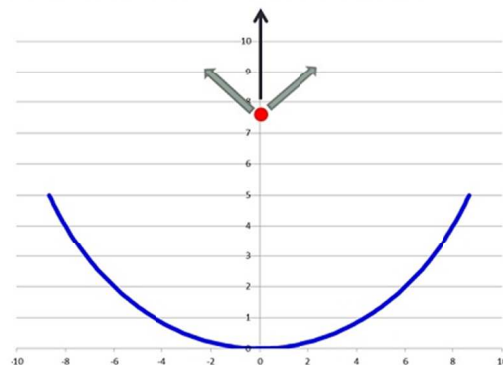
- ① static にやるのがダメなら、動的効果で安定化させる
- ② 磁性体を組み込む (アーンショーの定理が成立しない)
- ③ 動的に制御する

例

- ① 磁気浮上ゴマ
- ② カエルの浮上 (イグノーベル賞)、霜田 (簡単な磁気浮上装置) --- 反磁性体でできる。
双極子の受ける力は磁界の勾配に比例するので、勾配を大きくすれば超強磁場はな
くても磁気浮上を実現できる。
- ③ リニア、Levitron Revolution

とはいってもお椀型の形状で何とか極値を持ってないか (= 安定点がないか) ? と素朴に思
っていしまう。そこで、下図のようなお椀型の電荷分布の場合について電界の計算をやっ
てみよう。

そういわれても、何となく電荷を空中に浮かせることは出来そうな
気がしませんか? 下図のような「お椀型」の電荷分布で、電荷を
空中に浮かべられないか? (磁場の場合も同様)



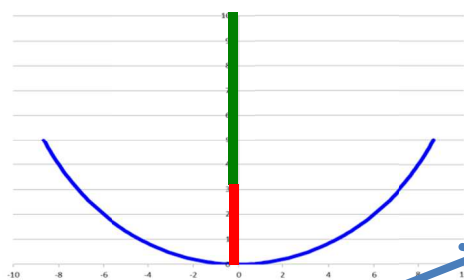
電場を計算してみると事情が分かるはず。

軸上でしか解析的に電場は計算できない

⇒ しょうがないので、軸付近の電場を数値的に求めてみる

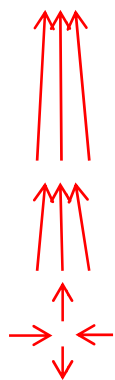
(もう少し、スマートなやりかたもあるけれど)

2つの領域に分かれる (赤色と緑色の領域)

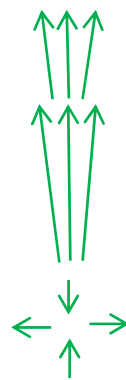


上下方向に不安定になると、底抜けして物体は落ちてしまう。

上下方向に安定な領域では、前後左右の不安定性をどうにか (動的効果で) やり過ごす



お椀の底に近い部分 (赤色の領域) 軸上の電場は上に行くほど強くなるので、電気力と重力が釣り合う点では、底抜け状態になって物体の重力を安定に支えられない。でも、この場合は電界は中心軸方向を向いていて、前後左右には安定。



お椀の上方の領域 (緑色の部分) 電場は上に行くほど弱くなるので、物体の重力と電場が釣り合う点で安定になる。でも、この場合には、軸付近の電場は外向きで、左右・前後方向は安定にならない。

ということで、ポテンシャルフィールドだけでは、安定点はない。

従って、動的効果で不安定性をなんとかやりくりする・・・市販の磁気浮上ゴマは、コマの歳差運動の効果で、前後・左右方向の不安定性を、安定化させている。

コマの歳差運動の効果で、前後・左右方向の不安定性を、安定化させている。

磁気浮上ゴマにもいろいろとあるが、ここでは絶縁体の永久磁石による浮上ゴマについて考える。永久磁石の表面を導体でつつんだタイプのものもあり、その場合は誘導電流効果も考慮する必要あり。



ここでちょっと一服

磁気浮上ゴマの考案：

Roy Harrigan（発明家） 1983年に特許

「何人かの物理学者に『永久磁石による磁気浮上は不可能。そんなことを考えるのは人生の時間の浪費だ。』と、いわれながらも、成功」



磁気浮上ゴマの実演：コマの重さの調整、水平の調整などが必要でかつ磁界の影響下で回さないといけないので、少し熟練が必要。

コマの自転効果で、何故、アーンショーの定理の不安定性から逃れることが出来るのか？？
が、ポイント

上下には安定な領域ではないと話にならない。

では、前後左右の不安定領域で、何故安定化できるのか？

ソモソモ、コマを力学的に完全に扱うのはそんなに簡単ではない。

逆立ちゴマが、ひっくり返る理由も説明するのは簡単ではない。

ラトルバック（ラトル＝ガタガタ、バック＝逆回転）の説明。

「ケンブリッジの卵」下村（慶応大）

ニュートン力学に尽きているものの、意外と難しい。

磁気浮上ゴマについては、いくつかの学術論文があり、何らかの仮定をして、安定化するメカニズムが「あり得るだろう」ということは示している。

が、決定的に現象を説明できているかどうかは未だわかっていない（と私は思う）

コマは何故安定に浮揚できるか・・・2つの点

①コマの上下がひっくり返って、土台の磁石にくっつかないか？

コマの周りの磁界は、コマにトルクを与える。

地面でコマが回るときに倒れないのと同じ理由でコマは倒れない。

角運動量がトルクの変化方向に変化⇒歳差運動

よって、この点は比較的簡単に説明できる

②軸から遠ざかって、スライドしてしまわないのはなぜか？

この点の説明はそれほど簡単ではない。

⇒大抵の説明では、適当にお茶を濁している。

コマがホドホドにふらついて、歳差運動するので安定になっている。あまり高速回転だと、コマの軸の方向が一定で、アーンショーの定理から不安定化（回転は安定／スライドに不安定）

実際の磁気浮上ゴマは、浮上のためのパラメータの設定が微妙

以下は、下記の論文による磁気浮上安定化の理由説明

現象の説明として正しいかどうかはわからないが、磁気浮上を可能にするコンフィギュレーション（配置）があることを示してはいる。

Simple theory for the Levitron®, T. Jones, M. Washizu and R. Gans,
J. Appl. Phys. 82(2), 15 July 1997

直感的にはなかなかわかりにくい。

磁気双極子に働く力であることや磁界の高次の変化量で決まっていること

磁気双極子 m が磁界から受ける力

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \nabla \mathbf{B} \quad \mathbf{m} \text{ と } \mathbf{B} \text{ で内積}$$

中心軸上のコマが釣り合っている平衡点周りで、磁界を「渦ナシ+湧きだしナシ」の条件を付けて、円筒座標でテイラー展開してコマに働く力を計算してみる。

円筒座標で B_z と B_r とを、平衡点（ $z = z_0$ 、 $r = 0$ ）の周りで、2次のオーダーまでテイラー展開し、 $\text{div} \mathbf{E} = 0$, $\text{rote} = 0$ の条件を考慮すると

$$B_z = B_0 [1 + \alpha_1 z + \alpha_2 (z^2 - r^2/2) + \dots]$$

$$B_r = B_0 [-\alpha_1 r/2 - \alpha_2 z r + \dots]$$

$$\alpha_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{1}{B_z} \frac{\partial^n B_z}{\partial z^n} \right) \Big|_{r=0, z=z_0} \quad \text{展開係数}$$

となる。この表式から磁気双極子に働く力を計算してみる。

仮定① コマが常に軸方向（上方）を向いているとすると。

$$\mathbf{m} = m_z \hat{\mathbf{z}}$$

$$\mathbf{F} = m_z \alpha_2 B_0 [2z \hat{\mathbf{z}} - r \hat{\mathbf{r}}]$$

どうやっても、 z 方向（上下）か r 方向（左右）のいずれかの方向に**不安定化する！**
（～アーンショーの定理）

仮定② コマが常に磁界の方向を向いているとする。

$$\mathbf{m} = m_z \mathbf{B}(\mathbf{r}) / |\mathbf{B}|$$

$$\mathbf{F} = \frac{m_z}{2} \cdot \frac{\nabla \mathbf{B}(\mathbf{r})^2}{|\mathbf{B}(\mathbf{r})|}$$

2次のオーダーまでとって

$$F_z = 2m_z \alpha_2 B_0 z$$

$$F_r = B_0 \left(\frac{1}{4} m_z \alpha_1^2 - m_z \alpha_2 \right) r$$

安定化のための条件

$$m_z \alpha_2 < 0$$

$$m_z (\alpha_1^2 - 4\alpha_2) < 0$$

この条件下で、コマの上下方向と左右の安定性のため関係は

$$m_z < 0 \text{ and } \alpha_1 < 0 \text{ is required for equilibrium}$$

$$\alpha_2 > 0 \text{ and } \alpha_1^2 > 4\alpha_2 \text{ for stability}$$

これらの条件を満たす廃位は実現可能！

以上の議論は、下記による

Simple theory for the Levitron®, T. Jones, M. Washizu and R. Gans, J. Appl. Phys. 82(2), 15 July 1997

少し違う議論が

M. Berry, Proc.R.Soc. London, Ser. A452, 1207(1996)

⇒ 「mがB方向」とは仮定せず、時間平均を考えて、mのB方向への射影が不変と仮定している

しかし、以上のように説明されても、直感的にはわかりにくい。

ソモソモ、動径方向の安定性は、テイラー展開の2次の効果で、しかも、

その展開係数の微妙な大小関係に依存している！

さらに、大前提の自転方向が概ね磁界の方向になることが、「ある領域」の回転数の場合に成り立たないと
いけない。コマの力学は入っていない。

パラメータ

- ・コマの安定性が失われる領域
 - ミソスリ運動の角度が3° ~ 5° 位
 - 回転数 1100 ~ 1200 rpm (18-20 Hz) 以下：質量に依存して変化
- ・コマの重さの微妙な調整が必要
- ・温度によって磁化の様子が変わるので、コマの重量の再調整が必要

オモチャ以外に関連した現象はあるか？

⇒ 中性子（中性で磁気能率アリ）のトラップなど

まだ、現象の理解は消化不良です。

理解するだけではなく、新方式を考えたいものですが・・・。

新展開があれば、第2ラウンドで

END

以上、 久米様のプレゼン資料より

磁気浮上については、釈然としない部分があり、継続調査としましょう。

2) 自由な討議を行う。

70歳を過ぎる高齢者の集まりとなると、高血圧、前立腺肥大、頻尿、尿酸値、等 共通する疾病に悩まされている会話が多く、高齢者は健康障害を気にしていることが伺える。本日は、山本の膝の手術および、リハビリの様様とともに、スキーのできる状況まで回復できた例を写真で解説。



膝関節手術とリハビリについて語る山本

3) 次回

3月31日(月)

講師 生駒 篤一 様

ホームページ URL

<http://www.cis-laboratories.co.jp/>

以上