PG 薄板の磁気浮上玩具、コインの落下挙動を制御した科学玩具の紹介

広瀬技術コンサルタント
広瀬洋一

1. はじめに

2015 年から毎年秋、東京タワーで開催される“キッズ環境科学博士”に、JABM では『磁石すきすきチーム』を組み、磁石を用いた種々の科学玩具を展示している。

その中には、（１）直方体形状のネオジム磁石を並べた磁石列上を反磁性体の熱分解黒鉛（PG：Pyrolytic Graphite）の薄板を磁気浮上させて、往復運動させる玩具が含まれる。その他、（２）同じ磁石を用いて配置を工夫した磁石列上を、１円や 10 円のコインや銅やアルミニウムの薄板が落下するときの挙動を、内部に発生する渦電流を利用して、制御する玩具も含まれる。

“百聞は一見に如かず”、下手な説明より、YouTube に投稿した下記の動画をご覧いただきたい。

YouTube に投稿した科学玩具

（１）反磁性体 PG 薄板の磁気浮上現象を利用した玩具

https://www.youtube.com/watch?v=g5wDfKTpBnk&feature=youtu.be

Magnetic Levitation of Pyrolytic Graphite
2016/06/01
Penguin’ s Skating. Ver.1 “Wow! It’ s slippery than Ice.”

（２）PG 薄板の磁気浮上現象と同様な磁石列を用いたコインの落下挙動の制御

https://www.youtube.com/watch?v=oTJoNyX7ieQ
Diamagnetic Levitation of Pyrolytic Graphite and Falling Coins
2016/02/23

（３）磁石列上を落下するコインや非磁性金属薄板の挙動を内部に発生する渦電流で制御する玩具

https://www.youtube.com/watch?v=v7X6bmRdM0Y

Controlled Movement of Falling Coins on the Magnet Array
2017/03/28

いずれの玩具も、同じ直方体形状のネオジム焼結磁石をフェライト系ステンレス鋼（SUS ４３０）の薄板上に並べて磁石列を形成している。磁石の磁気エネルギー積は 48MGOe で、寸法は、長さＬ１２mm×幅 W ６mm×厚さｔ３mm、着磁方向は厚さｔ方向である。

以下、これらの２種類の玩具について紹介する。

2. 反磁性体の PG 薄板の磁気浮上現象を利用した玩具

2.1. 反磁性体の磁気浮上の実例

複数の磁石をどのように配置しても磁石間の反発力を利用しただけでは磁石を安定浮上させることはできない。そのことはアーンショーの定理として知られている。

磁石のコマを回転させてジャイロ効果で姿勢を保つことにより、ある回転数の範囲内（約 18 ～ 40rps）で、互いに反発しあう配置としたドーナツ状の磁石の上で安定磁気浮上させることはできる。そのような玩具は“Levitron”や“U-CAS”の商品名で市販されている。これらは、コマの回転が遅くなるとコマは反転して落下する。やはり、アーンショーの定理は有効である。

ところが、反磁性体は全く別である。磁石で安定浮上させることができる。その代表例は、酸化物超電導体である。液体窒素で冷やした YBCO で代表される高温超電導体を磁石上にマイスナー効果で安定浮上させたり磁石列上を走らせたりすることが可能である。さらに、ピン止め効果により、磁石列上の一定範囲に固定させることができる。そのため、磁石列を長手方向に中心軸周りに回転させて、横向きや下向きにしても落ちずに走らせることもできる。

さらに、アンドレ・ガイム博士は超伝導磁石のつくる強磁場（16T）を利用してカエルを磁気浮上させ[(1)]、2000 年にイグノーベル賞を受賞している。カエルの主成分は水で、水も反磁性体である。強磁場を発生する超電導磁石を用いれば、カエルやトマト、水滴を磁気浮上させることができる[(2)]。

しかしながら、前者では液体窒素で酸化物超電導体を、後者では液体ヘリウムで超電導磁石コイルを、極低温まで冷やす必要がある。

一方、熱分解黒鉛 PG の薄板はネオジム焼結磁石を用いれば、室温で磁気浮上させることができる。

2.2. 反磁性体に働く反発力

磁石上の反磁性体に働く磁気反発力（F）は次式で計算されることが知られている。[(3)]

$$F=(\chi V/\mu_0)\, B\,dB/dz \quad (1)$$

ここで，μ_0 は 真空の透磁率，χと V はそれぞれ磁気浮上体の磁化率と体積を表す。また B は磁界強度，dB/dz は B の高さ z 方向の勾配である．式（1）は，反磁性体が浮上して安定する位置 z では、重力m g に等しくなる。すなわち、

$$F = mg = (\chi V/\mu_0)\, B \cdot dB/dz \quad (2)$$

反磁性体の密度をρとして m/V ＝ρであるため式（3）のように表すことができる。

$$-\rho g \mu_0 / \chi = -B \cdot dB/dz \quad (3)$$

両辺に－を付けたのは、磁化率がマイナスで、左辺の B・dB/dz もマイナスのため、両辺の計算式をプラスにするためである。

左辺からより小さな磁力で反磁性体を浮上させるためには、磁化率の絶対値が大きくて、密度ρが小さい反磁性体の選択が適していることが分かる。表 1 に代表的な反磁性体について磁化率χの値 [4] と密度ρの値を示す。

表 1 代表的な反磁性体の磁化率χの値と密度ρ

Material	χ [x 10^{-5}]	ρ（g/cm^3）
Superconductor (YBCO)	－ 1 x 10^5	6.3
Pyrolytic Graphite	－ 40.9	1.6~2.2
Bismuth	－ 16.6	9.78
Silver	－ 2.6	10.5
Lead	－ 1.8	11.35
Carbon (graphite)	－ 1.6	2.09~2.23
Copper	－ 1.0	8.96
Water	－ 0.91	1.00

(Pyrolytic Graphite は Pyrolytic Carbon と呼ぶ場合もある。また高度に面方向に配向していることから Highly Oriented Pyrolytic Graphite, 略して HOPG, 同様に後者の呼び方では HOPC と呼ぶ場合もある。)

既に例示した酸化物超伝導体のχは－ 1 で、その絶対値は他の反磁性体のχと比べて桁違いに大きい。超伝導体は全ての磁力線を跳ねのけて通さない。ただし、あくまでも液体窒素で冷やしたときの特性値である。その他の物質については、酸化物超伝導体とは全く比較にならないものの、熱分解黒鉛（PG）とビスマスのχの絶対値が大きめであることが知られる。ビスマスを用いた磁気浮上の実験例も散見するが、密度ρも考慮すると磁気浮上玩具に用いる反磁性体としては PG が最も適していることが分かる。

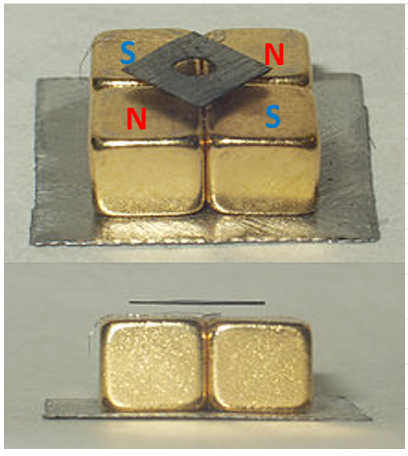


図 1 に、PG の薄板を 4 個の立方体形状の磁石を並べその上に載せて浮かせた例を示す。

図 1 熱分解黒鉛（PG）薄板の磁気浮上 [4]

図 1 の例では 4 個の磁石は上下方向に互いに NS の極性が反対になるように組み合わせてある。4 個の直方体形状の磁石を平面状に並べるときのもっとも安定した配列である。

この場合、磁石上の PG 薄板の浮上位置における－ B・dB/dz の分布を考えると、それぞれの磁石の上にピークができていることが知られる。そのため、上から眺めた平面図では、四角形の PG 薄板は、4 辺が 4 個の磁石の対角線に平行になるような位置で安定する。換言すれば、PG 薄板の 4 隅が、－ B・dB/dz の分布のピークの山の間に入り込んだ状態で安定する。

それでは、4 個の磁石が一体となった磁石、すなわち元の立方体の 1 辺の寸法を a として、2a × 2a × a の寸法の磁石を準備して同じ PG 薄板を載せたらどうなるだろうか？ 着磁方向は上下方向すなわち厚さ a に平行な方向である。

この場合、浮上安定するポイントが無くなるだけでなく、反発力がほとんどなくなり PG 薄板は浮上しなくなる。すなわち、(3) 式の右辺の－ B・dB/dz はかなり小さくなってしまう。

このことから、－ B･dB/dz を大きくして PG 薄板を浮上させるためには、適度の大きさの磁石を隣接する磁石同士の NS の向きが互いに反対となるように並べる必要があることが分かる。

2.3. 反磁性体の磁気浮上に適した磁石形状について

前述のように、磁石については (3) 式の右辺－ B・dB/dz が大きくなるような磁石の選択と磁石配列とすることが重要となる。磁石の材質に限れば、B の大きなすなわち磁気エネルギー積がより大きなネオジム焼結磁石が適しているのは明白である。

しかし、実際にどのような形状の磁石を選択し、どのような配列にしたら、右辺の－ B・dB/dz が大きくなるかについては直感的には分かりにくい。

○ 1 個の直方体形状の磁石上における－ B・dB/dz について

直方体形状の磁石の真上における距離 z の位置における磁束密度の計算式として次式が知られている。[5]

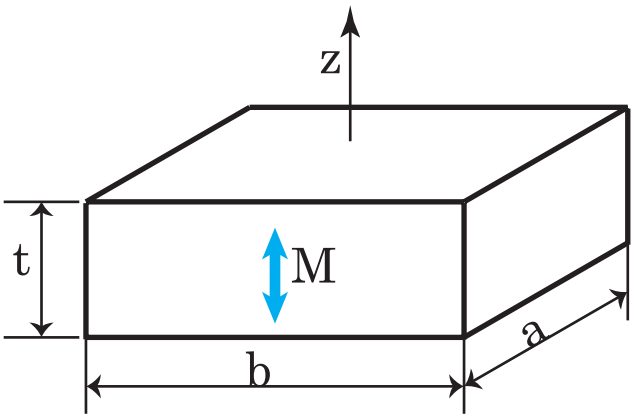


図 2 計算に用いた直方体磁石の寸法

$$B(z)=Br/\pi * [\arctan(a*b/(2z*(4z^2+a^2+b^2)^{0.5})) - \arctan(a*b/(2(t+z)*(4(t+z)^2+a^2+b^2)^{0.5}))] \quad (4)$$

この式を用いて、実際の PG 薄板の浮上距離が約 1 mmのため z を 1 mmとして、磁石寸法を変えた時の－ B・dB/dz を計算してみる。

dB/dz は (4) 式を z で微分した式を導きそれを用いるのが厳密な計

算方法である。しかし、かなり煩雑な計算式になってしまう。ここでは簡略な方法として、Δｚを 0.01 mmとして B（1.01）と B（1.00）を計算し、ΔB = B(1.01) − B（1.00）、ΔB／Δｚを計算してｄ B／ｄ ｚの替わりに用いた。

なお、PG 薄板を浮上させて往復運動させるのに用いた玩具の磁石列は、幅方向には N 極 S 極が交互になるように、一方長手方向は同じ極が並ぶように配置してある。その配列を想定し、長手方向に相当するｂは十分大きめの 50mm と固定し、幅ａを変えた時の－ B・dB/dz の値を計算した。計算結果を図 3 に示す。

なお、図には磁石の厚さｔをパラメーターとして変えて計算した結果を示す。

用いた磁石は N48 で Br 値として 13,900Gauss を用いた。

縦軸の単位は kG^2/mm である。

図 3 から、次のようなことが分かる。

〇－ B・dB/dz は当然であるが、厚さｔが厚いほど大きくなる。

〇－ B・dB/dz は幅ａの影響が顕著である。 1 mmから広がるとともに急激に大きくなり、 2 ～ 3 mmで極大値をとる。さらに幅ａが広くなると、急に小さくなる。

〇その極大値となる幅ａは磁石厚さｔが厚めになるほど広くなるが、その影響はそれほど大きくない。

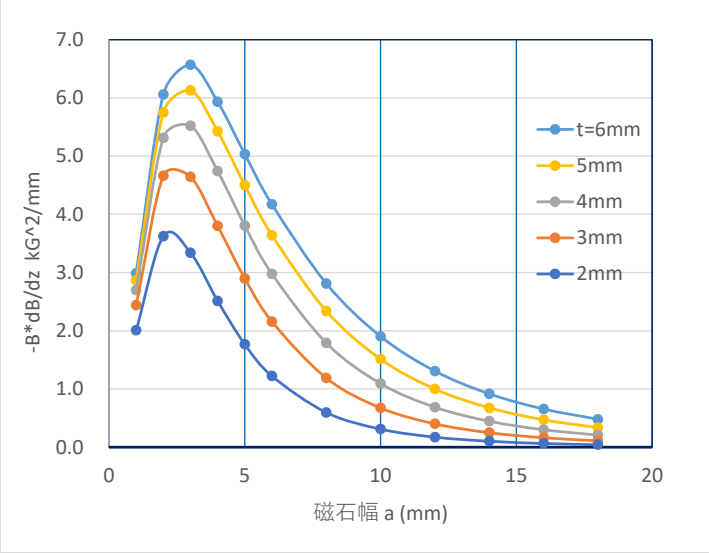


図 3 直方体形状の磁石の 1 mm上での－ B・dB/dz と磁石幅との関係

いずれにしても、この計算結果からも、磁石の幅は、広めにするのは得策でないことが分かる。また実際に実験した結果では、小さ目の磁石を N 極 S 極が交互に反対になるように並べることにより、PG 薄板の磁気浮上が可能になっている。そのような配置にすることにより、特に dB/dz の絶対値が大きくなることが推測される。

2.4. PG 薄板を往復運動させる玩具の補足説明

実際の玩具の磁石列は、図 4 に上から眺めた平面図で示すように、6 × 12 × 3 mmの直方体磁石を幅方向に 9 列、長手方向に 23 個の計 207 個を並べて作ってある。着磁方向は厚さｔ 3 mmに平行方向である。幅方向には N 極 S 極が交互になるように、長手方向には両端を除いて同じ極同士が並ぶようにして、ヨークを兼ねた 1．5 mm ｔの SUS４３０フェライト系ステンレス鋼の薄板に、接着剤を使わずに単に磁気吸着させて並べてある。

長手方向には同じ極となるように並べているため、互いに反発する。それでも、磁石寸法の長さを幅 6 mmの 2 倍としていることも幸いして、ステンレス薄板への磁気吸着力による摩擦抵抗で、互いに密着させることが可能である。断面図に示すように、ベース板の両端の磁石は、PG 薄板が往復運動する際に、飛び出し防止用として磁石列の両端に配置したアクリル角棒に触れないよう、内側に 10 度曲げ加工してある。

ベースの板は長手方向に湾曲状に曲げて、さらに、図 5 に示した図 4 の AA′、BB′、CC′ 位置の断面図から分かるように、両端に捩じりを加えてある。

そのような構成とすることにより、単に、ダイアフラムエアーポンプを用いて、両端からノズルを介して吹き込むことにより、PG 薄板は往路と復路で軌道を変えて走り続ける。

PG 薄板は長手方向の片側のノズル①から吹き込まれたエアーで加速され、手前側の磁石列を走る。他端に近づくとスピードが落ちる。そうすると、ベースに捩じりが加えてあるため、坂上となっている手前側から向こう側に移動する。すなわち往路と異なる磁石列上に移動する、そこでノズル②から吹き込まれているエアーで加速され、他端に移動する。他端でスピードが落ちて、手前側の磁石列上に移動する。

以上の繰り返しで、単に両側に配置した 2 つのノズルからエアーを流し続けるだけで、特別な制御機構を必要とせずに、PG 薄板は往路と復路で軌道を変えてサーキット状に動き続ける。

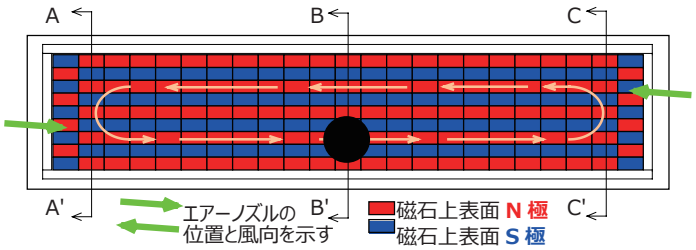


図 4 PG の磁気浮上往復運動玩具の磁石列の配置方法を示す平面図
PG 薄板は黄色の矢印に沿って走り続ける。

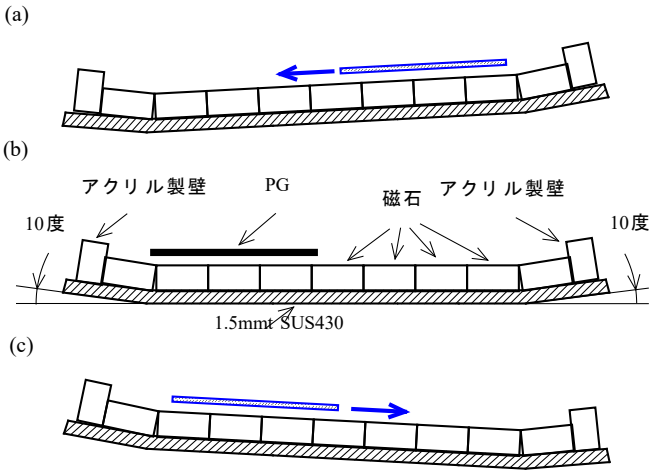


図 5 図 4 の (a)AA′、(b)BB′、(c)CC′ 断面図

長手方向に捩じりを加えてあるため、中心部の (b)BB′ 断面を基準に、(a)AA′ 断面と (c)CC′ 断面は反対方向に傾いている。

3.　磁石列上を落下するコインや非磁性金属薄板の挙動を内部に発生する渦電流で制御する玩具

渦電流の効果を示す代表的な実験例として、銅製やアルミニウム製のパイプの中に挿入した磁石を落下させる方法が知られている。渦電流効果により、磁石はゆっくり落下する。

パイプの替わりに２枚の平行に並べた銅製やアルミニウム製の板の間を落下させたり、あるいは、適度の厚さのこれらの材料の板を斜めに置いて、その上で磁石を滑らせたりしても渦電流の効果を示すことができる。

東京タワーで開催された“キッズ環境科学博士”展で展示した科学玩具も、渦電流を利用している点ではこれらの道具立てと全く同じである。異なるのは、図６に概略図を示すように、１個の磁石でなく、多数の磁石を用いて磁石列を作り、その上を、１円、10 円コインや銅製やアルミニウム製の薄板等、種々の材料を落下させたことにある。また、単に、落下速度を変えただけでなく、磁石列を工夫して、動きに変化させたことにある。

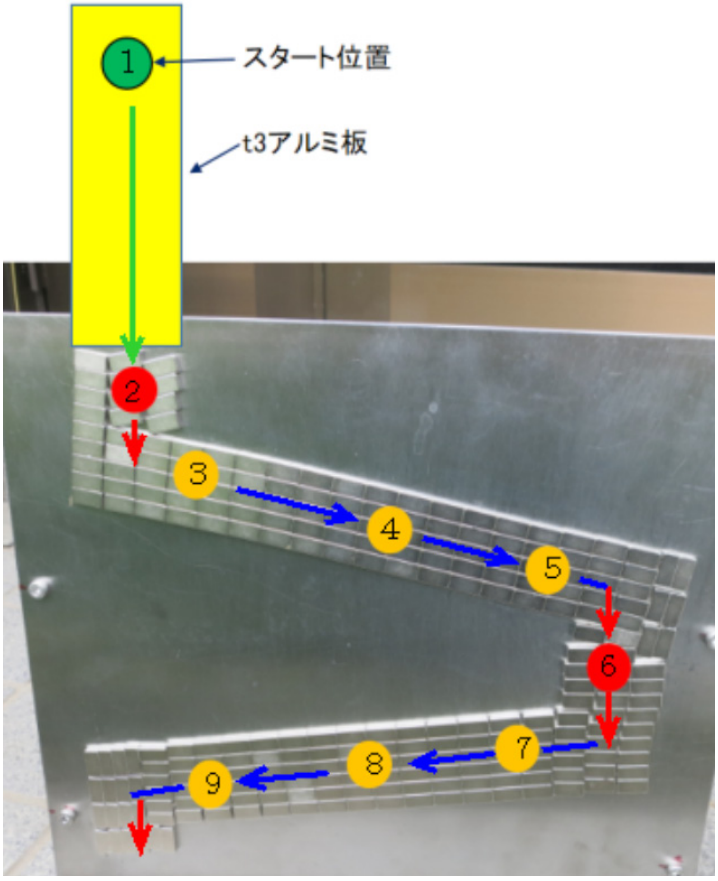


図６　磁石列上を落下するコインや非磁性金属材料薄板の落下挙動を渦電流で制御する玩具の概略図
スタート位置●①からコインを落とすと、●②の位置で急停止して、その後は●③～●⑥～●⑨で示すように移動する。赤矢印↓ではゆっくり落下し、青矢印→では、速く動く。

○磁石列上を移動する非磁性材料の内部に発生する渦電流

図７に直方体形状の磁石を図の左右長手方向には同じ磁極となるように、その直角方向には N 極 S 極が交互に並ぶように配置した場合の、磁石表面における磁界の分布を模式的に示す。

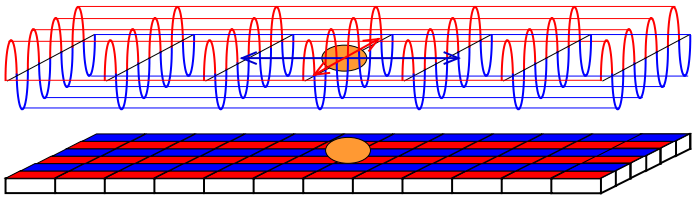


図７ 磁石列とその上の磁界の分布
磁石表面上の非磁性金属材料薄板は⇔方向には動きやすいが、⇔方向に動きにくい。

このような磁石列上に置かれたコインや非磁性金属材料の薄板（以下薄板と略称する）が動く場合、⇔方向には動きやすい。なぜならば、⇔方向に動く場合薄板を通過する磁界は変化しないからである。一方、⇔方向に動く場合は、薄板を通過する磁界は大きく変化する。そのため、渦電流が発生する。発生する渦電流の作る磁界は Lenz の法則により、磁石列の磁石の作る磁界と反発するように発生する。すなわち動きにくくなる。

なお、図６に示す実際に作った玩具の磁石列上を落下するコインの動きを示す図で、動きが遅くなる赤矢印の部分では、図７の赤矢印の方向に動く状態となるように、そして、図６の動きやすく速く動く青矢印の部分では、図７の青矢印の方向に動く状態となるように、磁石列を構成してある。

実際に、図のように磁石を配置した磁石列上で、銅製の薄板を動かしてみると、図の矢印の向きで、動かしやすさが全く違うことが実感できる。

展示した科学玩具は前述の PG の磁気浮上玩具と同様に、同じ磁石を SUS430 の薄板上に並べて作ってある。接着剤は用いず、単に磁気吸着させてある。そのため、磁石列の傾き等の調整が容易である。実際にコイン等の落下挙動を観察しながら試行錯誤でより適した磁石列に作り込むことができる。

なお、渦電流は比抵抗ｒが小さいほど、すなわち電気伝導度κが大きいほど発生しやすい。すなわち渦電流によるブレーキがかかりやすくなる。また、重力による落下速度は密度ρが小さいほど遅くなる。そのため、極めて定性的ではあるが、1/（ｒρ）が大きいほど、ゆっくり移動すると推測される。

動画には材料毎のこれらの数値や、銅の 1/（ｒρ）を１００とした相対値も示してあるので、参照願います。（ただし、動画では比抵抗をρ、密度をｄとして 1/（ρｄ）の相対値を示してある。）

4.　おわりに

実際のネオジム磁石は、パソコンの HDD やスマートフォンに組み込まれ、これらの機器の高性能化、小型化に役立っている。また、HEV や EV の駆動モータ、エアコンの圧縮機用モータ、風力発電機にも用いられ、省エネルギー・温暖化防止に大きく貢献している。

それに対して、ここで紹介したネオジム磁石を用いた玩具は、あくまでも玩具で実用性は全くない。それでも、磁石の不思議さ面白さを子供たちに紹介する一つの方法として、そして子供たちが科学に興味を示す一助として、少しでも役立つのではないかと期待している次第である。

ところで、冒頭、アンドレ・ガイム博士がカエルの磁気浮上でイグ・ノーベル賞を受賞したことを紹介した。同氏はその 10 年後の 2010 年に「二

次元物質グラフェンに関する革新的実験」でノーベル賞も受賞した。今日まで両方のノーベル賞を受賞したのは同氏だけである。

ノーベル賞を一緒に受賞したコンスタンチン・ノボセロフ博士に会った人から聞いた話では、グラフェンは熱分解黒鉛（PG）にスコッチテープを張り付けて薄片を剥ぐ方法を繰り返すことにより分離したとのことである。恐らく、カエルの磁気浮上の前に、ネオジム磁石を用いた PG 薄板の磁気浮上も試していたと思われる。その遊び心が二つのノーベル賞の受賞につながったことになる。“必要は発明の母”とされているが、それと同等以上に遊び心も発明の母であることを示している。

子供たちにもぜひ磁石を使った玩具を自作して遊んで頂きたい。

参考文献

（1） https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.372654
M. D. Simon, A. K. Geim , “Diamagnetic levitation: Flying frogs and floating magnets” Journal of applied physics, Vol 87, No 9 (2000). p6200

（2） https://www.ru.nl/hfml/research/levitation/diamagnetic-levitation/
High Field Magnet Laboratory (HFML)
Diamagnetic Levitation
(The HFML is part of the European Magnetic Field Laboratory, with labs in Nijmegen, Dresden, Grenoble and Toulouse.)

（3） 例えば、下記文献等
http://www.chem.aoyama.ac.jp/Chem/ChemHP/phys3/top/pdf_files/New_Diamond_2014_1.pdf
阿部 二朗、“トピックス夢の技術 - 磁気浮上グラファイトの光駆動技術 -” , New Diamond Vol. 30 No. 1（2014）p31

（4） https://en.wikipedia.org/wiki/Diamagnetism
Diamagnetism (Wikipedia)

（5） https://product.tdk.com/info/ja/products/magnet/technote/designguide.html
磁気回路設計ガイド 2. マグネット中心線上の磁束密度 B(X) 計算式

その他参考情報

（1） https://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolytic_carbon
Pyrolytic carbon (Wikipedia)

（2） https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_levitation
Magnetic levitation (Wikipedia)

（3） 磁気浮上磁石列に用いる最適な磁石の幅について

図 3 に示したように、反磁性体への反発力を増すための最適な磁石幅すなわち－ B*dB/dz を最大にする磁石幅 a は 2 ～ 3 mm とかなり狭いことが分かった。このように幅が狭い方がそれより広い磁石に比べて磁力線が磁石直上で広がりやすく、特に－ dB/dz が大きくなるためである。ただし、これはあくまで 1 個の磁石（単独磁石）についての計算結果である。

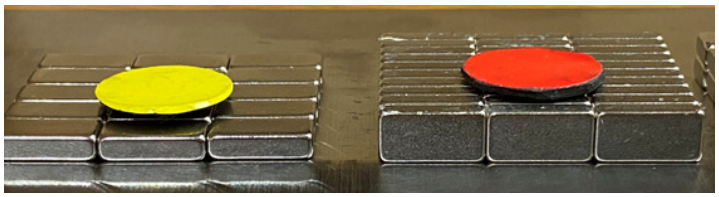
実際に PG 薄板の磁気浮上玩具の磁石列に用いた磁石は、b=12mm, a=6mm, t=3mm である（t が着磁方向）。磁石幅 a は 6mm と単独磁石で計算した最適幅の 2 倍以上と広い。図 3 からは、幅 6mm では反発力は半分程度に小さくなると予想される。それでも十分な浮上力が得られている。

単独磁石の N 極を上側に置いた状態での磁力線を考えると、N 極から上方に向かう磁力線は広がりながら反転して裏側の S 極に向かう。

それに対し、実際に P G薄板の磁気浮上玩具に用いた磁石列を想定し、両側に反対の磁極すなわち上面が S 極の磁石を並べた場合を考えると、中央の N 極から出る磁力線は両側の S 極に引き寄せられるように向かう。そのため、 N極から出る磁力線は単独磁石の場合より広がる。そのため、磁石上面の z 方向の B の低下の度合い－ dB/dz は増加することになる。－ B*dB/dz も増加し、反発力が増す。

同様に考えると、 N極 S 極を交互に並べた磁石列では、磁石の直上における磁力線を広げる効果により、反磁性体への反発力に比例する－ B*dB/dz が極大となる最適磁石幅も、単独磁石での計算結果より広くなると予想される。

実際に、長さ b、幅 a、厚さ t の寸法が、① 12 × 6 × 3mm^3 と② 12 × 3 × 6mm^3 の 2 種類の磁石を用いて（厚さ t に平行方向が着磁方向）、 N S 極が交互に並ぶように配置した磁石列上での P G薄板の浮上試験を行った。その結果、図に示すように、前者は厚さが半分であるにもかかわらず、 P G薄板への反発力が大きいことが確認された。すなわち、磁石列とした場合の磁石幅は 3 mm より 6mm の方が適していることが分かる。



① 12 × 6 × 3mm^3　　② 12 × 3 × 6mm^3

2 種類の寸法の異なる磁石を用いた磁石列上での PG 薄板の浮上試験結果