

展示「ゆらゆら磁石」の製作について

松浦 康平^{*}，西岡 里織^{**}，斎藤 吉彦^{**}

概要

強磁性体原子の熱運動を想像させる展示装置を製作し、大阪市立科学館の展示場で公開している。強磁性原子に対応するのは袋ナットに永久磁石をつけた磁気回転子で、これを三角格子点に 37 個配置した。静止状態では磁気回転子が一つの渦を描くように向きを揃える。6 個の磁気回転子をそれぞれ強制的に回転させたり、外部から他の磁石で系全体を励起させたりすることが可能で、これらの方法によって磁気回転子群の集団運動を観察することができる。

1. はじめに

著者の一人(斎藤)は方位磁石を用いて強磁性を示す教具を考案した^{1,2}。これは市販の方位磁石を構成子とする 2 次元三角格子結晶で、1000 個用いたものを強磁性体の可視的モデルとして大阪市立科学館と大阪市立大学理学部で展示している。方位磁石にはカーアクセサリー用のものを使用している。直径 3cm のプラスチック容器に 3mm のフェライト磁石が油に浮いて水平面内で自由に回転できるようにしたものである。図 1 がその写真で、強磁性体の磁区や「自発的対称性のやぶれ」を図 1 のような現象で解説を行っている。さらに、図 2 のように外部から磁石によって系を乱すことで疑似的に熱運動のような現象を起こすことで強磁性体の強磁性-常磁性転移についての解説も行っている。上記のデモンストレーションが可能なのは、方位磁石同士の相互作用が強く地磁気の影響がほとんど現れないためである。南部陽一郎博士が見学に来られるなど専門家からの評価は高く、著者の一人(斎藤)はこの開発で大塚賞(日本物理教育学会、2006 年)を受賞している。ただし、次に述べる 2 つの課題が解決されないまま、今日に至っていた。

- ① 方位磁石の単価が 500 円と高価であり、さらに近年では製造されていないので、入手困難である。そのため、このデモンストレーションはほとん

ど普及しなかった。

- ② 図 2 のように強磁性-常磁性転移をイメージできるものの、方位磁石の摩擦が大きいため短時間で静止状態になる。強磁性分子の熱運動に対応する方位磁石の集団運動を観察することは困難であった。

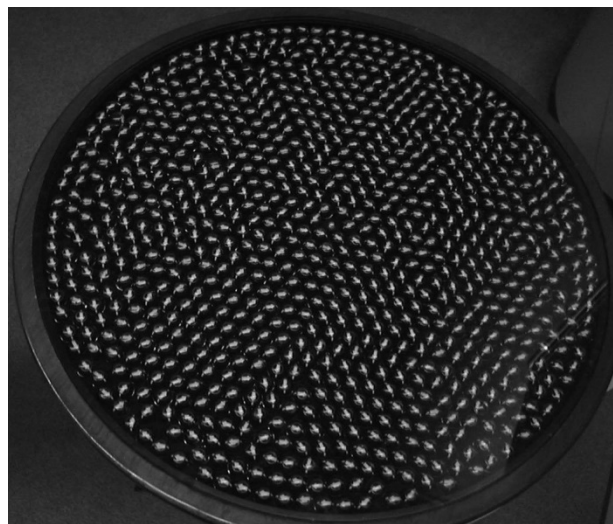


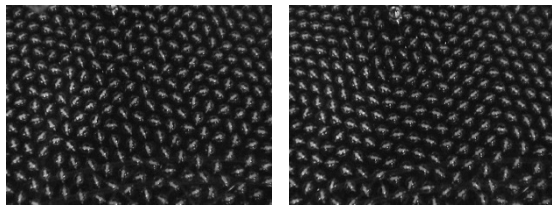
図 1. 1000 個の方位磁石による磁区イメージ

これらの課題を解決するものとして、著者の一人(松浦)が、方位磁石の代替品として袋ナットに強力磁石を付けて非磁性の釘の上に置くという安価で簡単な方法を考案した^{3,4}。図 3 はその一例で、摩擦が小さいので、磁気回転子群の集団運動の観察も可能となる。さらに、取り付ける磁石や袋ナットの大きさなどが自由に

^{*}東京大学大学院新領域創成科学研究科

^{**}大阪市立科学館中之島科学研究所

変更でき、磁気能率や慣性モーメントなどを自由自在に変更できる利点もある。



[1]

[2]

図 2. 強磁性-常磁性転移のデモンストレーション

[1]磁石で外から方位磁石集団をかく乱すると、[2]しばらくすると各方位磁石が静止し磁区が生成される。前者を高温での常磁性状態、後者を低温での強磁性状態と対応付けた解説をしている。

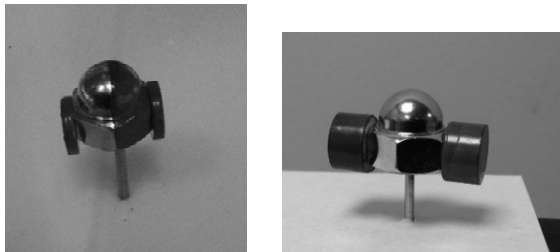


図 3. 袋ナットを用いた磁気回転子

袋ナット(M6)にネオジム磁石を付けたものと(左)、袋ナット(M8)にフェライト磁石をつけたもの(右)。左は試作で、右は展示に、それぞれ使用したものである。

著者らはこの磁気回転子の集団運動を観察する展示装置の試作を行い、大阪市立科学館の展示場で運用し、その経験をもとに展示装置として製作した。そして「ゆらゆら磁石」と名付けて、大阪市立科学館で2018年3月から公開している。本稿では「ゆらゆら磁石」の製作までと、それが表現する現象について報告する。

2. 試作

4×4個の磁気回転子を100mm間隔で正方格子状に並べ、アクリルケースで覆い、一つの磁気回転子を外部から回転させることができるものを試作し(図4)、展示場で運用した。磁気回転子は、10mmの六角袋ナット(M6)とネオジム磁石(表面最大磁束密度200mT、10mmφ×1.2mm)を使用した。図5に示すのは、外部から磁気回転子を回転させる機構である。つまみを押して軸を磁気回転子の頭に触れさせ、その状態のまま軸を回転させることで磁気回転子が回転する。押すのを止めると磁気回転子は軸の制御から解放されて集団運動に加わる。当初、外部から他の磁石で磁気回転子群に運動を与える機能もつけたが、磁気回転子

が回転軸から外れるという事象が生じたので中止した(図6)。

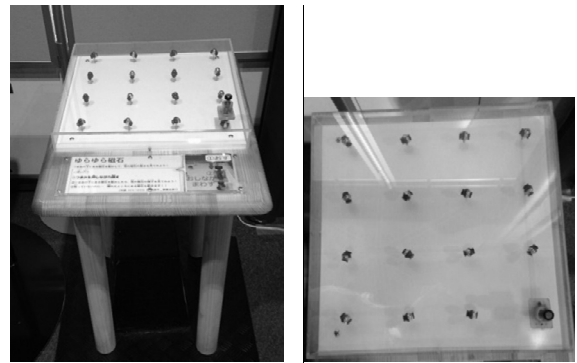


図 4. 試作品



図 5. 回転を与える機構

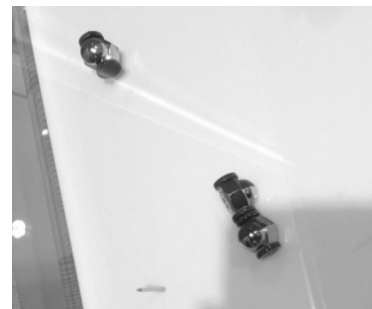


図 6. 回転軸から外れた磁気回転子

図5の機構を理解し利用することができる見学者は多くはなかったが、利用できた場合は磁気回転子群の動きを楽しんでいた。この見学者の反応から、操作方法の単純化が必要であると考えた。また、磁気回転子群は正方格子の配置であるとして、反強磁性秩序を示すので²⁾、強磁性体の視覚教材とはならない。さらに、強磁性を見るには磁気回転子の向きを明確にする必要があった。

上記の試作とその運用の教訓をもとに、主に次の3点を改良し、製作することにした。

- ① 磁気回転子の向きが分かりにくいので、1mm厚のネオジム磁石から6mm厚のフェライト磁石に変更

する(図 3)。

- ② 磁気回転子の回転操作が複雑で見学者の多くは十分な観察をすることができなかったため、ゴム板で磁気回転子を回転させる方法を採用する(次章、図7右参照)。
- ③ 強磁性状態を示す三角格子の配置の模型を製作し²、初学者に対して強磁性が明らかになるように37個の磁気回転子を配置する。

3. 展示装置「ゆらゆら磁石」

製作した展示は、37個の磁気回転子を80mm間隔で三角格子状に並び、強化ガラスで覆い、6個の磁気回転子を外部から回転させる機能と棒磁石で全体を励起する機能を備えたものである(図7左)。磁気回転子は、12.5 mmの六角袋ナット(M8)とフェライト磁石(表面最大磁束密度 120mT、10mm ϕ $\times$ 6.0mm)を使用した。外部から磁気回転子を回転させる機構は板ゴムで磁気回転子を回転させるものである(図7右)。この展示装置を「ゆらゆら磁石」と名付けて2018年3月1日から公開している。



図7. 製作品(左)と外部から回転を与える機構(右)

図8が静止した状態で、これまでこの2つの状態が観察されている。図8上が基底状態で中心を除いて一つの渦を描くように対称的に向きを揃える。図8下がポテンシャル極小の状態で、一つの渦を描くが縁の一边だけが渦とは逆向きの状態になる。強磁性体の磁区がイメージできるであろう。ほとんどの場合が基底状態となり、まれにポテンシャル極小の状態となる。



図8. 「ゆらゆら磁石」の静止状態
基底状態(上)とポテンシャル極小状態(下)

この安定状態からゴム板や棒磁石で励起すると各磁気回転子が相互作用しながら激しい運動を10秒程度続けた後、安定状態を基にした振動が静止するまで続く⁵。強磁性分子の熱運動がイメージできるもので、動画をTwitterに投稿したところ、再生回数が10万回近くになるなど大きな反響を得ている⁶。図9はその瞬間を撮った写真である。励起が小さいとしばらく「熱運動」した後、励起前の状態で静止する。励起が大きいと最初と異なった状態で静止することがある。また、一つの磁気回転子だけを励起すると、作用が波のように伝搬するのが観察できる。まさにマグノンイメージさせる現象である。



図9. 集団運動の瞬間

図 10 は双極子近似による解で[1][2]が図 8 に対応するものである。[3]もポテンシャル極小の解であるが、ポテンシャルの谷底が浅いようで、まだ自然な操作では実現したのを確認していない。図 11 は製作前の模型で丁寧な手作業で実現したもので、わずかな励起で運動状態になってしまう。

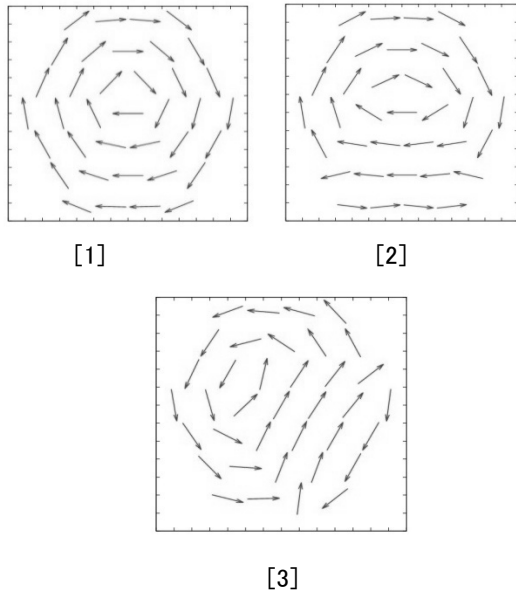


図 10. 双極子近似による静止状態

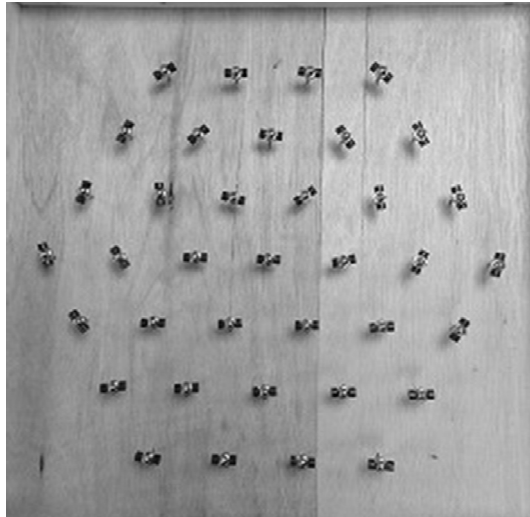


図 11. ポテンシャル極小状態の実現例

4. まとめ

強磁性体の熱運動を想起させる展示を製作した。見学者が本展示装置を楽しむ光景はしばしば見かけられる。また、製作前の動画を Twitter に投稿したところ、再生回数が 10 万回近くになるなど大きな反響を得ている⁶。

磁石同士の相互作用を楽しむ、というだけなら及第点は得られている。ただし、「熱運動」を楽しむには背景となる知識が必要で、初学者が自発的に「熱運動」

を楽しむのは困難である。人が解説すればその可能性は十分にあるので、展示解説ビデオを制作し、解説者養成のための研修会などを実施したい。

鉄などの強磁性体はキュリー温度を越えた高温では磁性を失い、強磁性から常磁性に転移することは有名である。この磁気回転子群は強磁性体の熱運動を分子レベルで想像させるので、その転移も可視化されることが期待されるであろう。しかし、強磁性体の分子同士の相互作用は量子力学的な交換相互作用によるもので、巨視的な磁石同士の相互作用とは本質的に異なる。したがって、磁気回転子群で強磁性体のような磁気相転移が生じるかどうかは自明ではない。実際、2 次元三角格子双極子結晶に関して、強磁性体の常識とは反する強磁性－反磁性の転移を導く計算も可能である^{7,8}。統計力学の新たな知見が磁気回転子群から得られることを期待し、まずは磁気回転子にベアリングを加えることで摩擦をさらに小さくし、「相転移」近傍での「熱運動」を実現したいと考えている。

最後に、システム光輝の藤原清氏と花岡康夫氏には試作段階から磁気回転子に与える回転機能など多くの助言をいただき、展示装置「ゆらゆら磁石」が完成することになった。厚く御礼を申し上げます。

¹ 斎藤吉彦:物理教育 53(2005) 103-108

² 斎藤吉彦, 西松毅:近畿の物理教育 14 (2008)2-7

³ 松浦康平, 斎藤吉彦:近畿の物理教育 23 (2017) 10-13

⁴ 特願 2016-143258

⁵ https://youtu.be/OEmBIS_AHbQ

⁶ https://twitter.com/gakugei_osm/status/958227015240269825

⁷ 斎藤吉彦:大阪市立科学館研究報告 25(2015)1-5

⁸ 斎藤吉彦:日本物理教育学会近畿支部 第 44 回物理教育研究集会 発表予稿集 2015 年 11 月 21 日