

方位磁石集団による磁区演示と「自発的対称性の破れ」

齋藤吉彦 大阪市立科学館 530-0005 大阪市北区中之島4-2-1

2次元三角格子方位磁石集団にはお互いが向きを揃える秩序状態がある。カーアクセサリー用の方位磁石1000個で鮮明な磁区が得られる。磁石で外からこの方位磁石集団をかき乱すと、しばらくして秩序状態が現れて落ち着く。これは強磁性体の高温状態から低温状態への相転移(キュリー温度)に対応する。交換相互作用を知らない初学者にも強磁性体のマイクロ構造の学習が可能になった。この秩序状態の出現は「自発的対称性の破れ」の実例でもある。素人から専門家まで、生の自然現象で磁区と「自発的対称性の破れ」を楽しむことができる。

1. はじめに

わが国では磁石の基本性質を小学校3年で学習する。平成14年度から施行されている小学校学習指導要領には小学校3年の内容として「物質とエネルギー」の項に「(3) 磁石を使い、磁石に付く物や磁石の働きを調べ、磁石の性質についての考えをもつようにする。ア磁石に引き付けられる物と引き付けられない物があること。イまた、磁石に引き付けられる物には、磁石に付くと磁石になる物があること。」と記されている。そして、この知識を基礎にして、電磁気学を学習することになる。今後の学習において、定量的なことをのぞけば、この内容で十分事足りるので、それ以上の概念は不要かもしれない。しかし、子どもの中には「なぜ、鉄が磁石に引き付けられ、アルミが引き付けられないのか?」と疑問を持つものがあるであろう。このような疑問が寄せられた場合、適切な指導はほとんど不可能であろうし、「鉄とは磁石にくっつくものなのだ!」などとこの疑問を愚問として処理されることは想像に難しくない。なぜなら、この疑問に答えるには強磁性体のマイクロ構造についての知識が必要で、これは大学の理系学部の一部でしか教えない。したがって、わが国の教員のほとんどはこの知識に出会う機会がないし、また、たとえ出会ったとしても理解するのは次に述べるように難しいであろう。

強磁性体のマイクロ構造を理解するには磁区概念が必要である。それはおおよそ次のような説明がなされている¹⁾。すなわち、鉄やニッケルなど強磁性体はそれを構成する分子自身が小磁石であり、隣り合う分子磁石がお互い平行になるのが安定で、分子磁石が同じ方向に揃った秩序状態が現れる。しかし、固体全体でこのような秩序が生じることはなく、固体表面の静磁エネルギーを緩和する作用として、

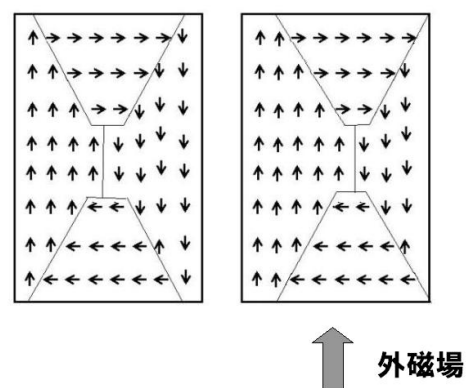


図1 磁区と磁壁の移動:外磁場がない場合(左)とある場合(右)

図1のように複数の秩序状態(磁区)が形成される。すなわち、磁力線をできるだけ外に出さないようにする作用である。その一方で、磁区と磁区との境、磁壁にはいわゆる欠陥エネルギーが蓄積される。この固体表面の静磁エネルギーと磁壁の欠陥エネルギーとの兼ね合いで磁区構造が決まる*。図1に与えたように、強磁性体に作用させる磁場を強くすると、その方向を向く磁区が成長し、逆向きのものは小さくなる。すなわち、磁壁が移動することで強磁性体が磁化されるのである。

強磁性体のマイクロ構造の解説はおおよそこのようなもので、図1のように分子磁石を多数並べた図がしばしば用いられている。量子力学を学び交換エネルギーを知っていれば、秩序化が簡単に導けるので、上記の説明から磁区は必然的な存在として理解

* 分子磁石が無遠方まで並んでいる系は、固体表面から出る磁力線がないので、分子磁石全てが同方向を向くのが安定である。

できる。しかし、初学者にとって秩序化が納得できないので、これは全くの天下りの説明であり、現実味がなく説得力に欠けるものである。実際、初学者は分子磁石を磁気双極子に対応させて理解しようとするが、双極子-双極子相互作用は平行になるのが安定とは限らない。2つの双極子が並んだ方向を向くのがエネルギー最小の状態であるが、これとは垂直な方向に揃うとかなり不安定である(表1)。最隣接近近似による簡単な計算では、全てが同じ方向に揃う(図2右)より、図2左の方が安定である。また、通常の方角磁石を並べると全てが北を向く。古典的に扱う限り、図1のような磁区の図説はあまりにも現実離れしたものであろう。もし、実際に方位磁石集団が磁区を生成したなら、一目瞭然で、磁区概念は初学者にも普及できるであろうが、方位磁石では磁区は生じないと推測するのが常識的であろう。

表1.双極子-双極子相互作用

双極子の向き	→→	↑↓	↑↑	→←
エネルギー比	-2	-1	1	2

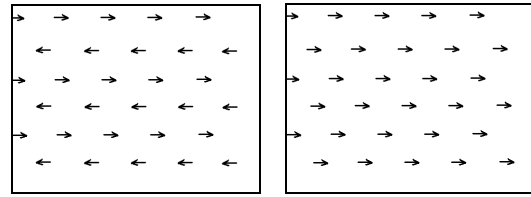


図2 三角格子点上に並んだ方位磁石。最隣接近近似の計算では、左の方が右より安定である。

われわれは文献2)で、2次元三角格子上に並べた方位磁石集団が磁区を形成することを示した。しかし、ここで示したものを磁区と標榜するのは、著者の思い込みと評されることがあった。350個の方位磁石に現れる磁区を示したのであるが、磁区が不鮮明で説得力に欠けたようである。このような批判が出る程度なので、初学者にこれを磁区と理解させるのは困難であろう。誰しもが納得する磁区を得ることが我々の課題であった。

方位磁石を増やせば鮮明な磁区を得ることが期待できるので、1000個を使用した。それで得た磁区が図3で、鮮明なものとなった。本稿では、2章で方位磁石1000個による磁区のデモン

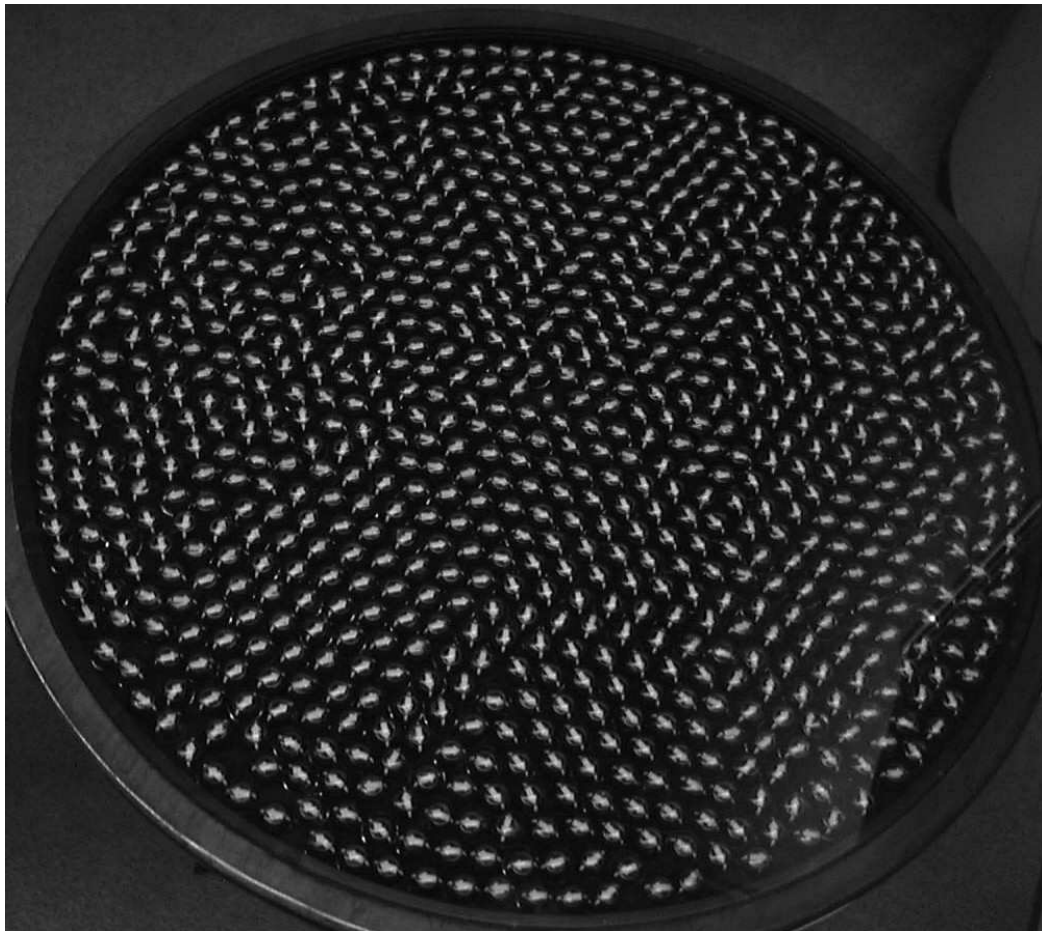


図3. 方位磁石1000個上に生ずる磁区

ストレーションを与え、3章で強磁性体における「自発的対称性の破れ」との関係性を考察し、4章でデモンストレーションの評価を述べる。

2. 方位磁石上に形成される磁区

使用する方位磁石はカーアクセサリに用いられるもので(図4)、球形(直径 30mm)のプラスチック容器の中でフェライト磁石の付いた矢印がオイルに浮いて水平方向に回転する。プラスチック容器表面の最大磁束密度は1.5 mT、フェライト磁石の形状は8×6×3 mm、磁極は8×3 mm面、表面磁束密度は約50 mTである。

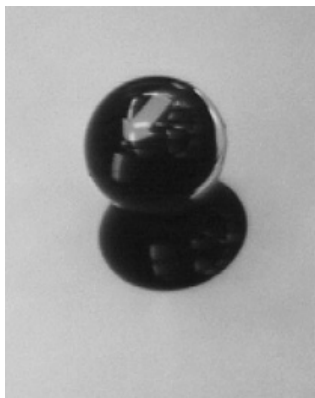


図4 カーアクセサリ用の方位磁石

この方位磁石約 1000 個を円形に敷き詰めた様子が図3で、磁区が形成されていることが分かる。これを水平面で回転させても磁区構造は変化せず、地磁気の影響をほとんど受けない。

この磁区の特徴は以下のとおり。

(1) 非常に安定で、地磁気の影響をほとんど受けない。

(2) 磁区内の方位磁石は結晶軸方向を指す(図5)。

(3) 磁壁は結晶面と一致する(図5)。

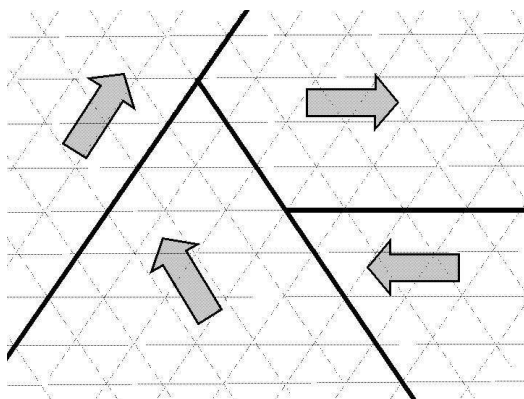


図5 磁区内の磁化の方向と磁壁が生じる面

(4) 境界にある方位磁石は境界に接するよう向きを揃える。

(1)の安定性は格子欠陥が適度に含まれているからとされる。なぜなら、欠陥がないように三角格子点上に並べた場合は地磁気の影響を受けることがあり、また、欠陥は磁壁の移動を妨げる¹⁾からである。(2)(3)(4)は図3から推測できるであろう。(2)より、三角格子方位磁石集団は全てが結晶軸方向を向くのが基底状態で、基底状態は3重に縮退していると考えられる。これは決して最隣接近似では説明できない状態である。(4)は表面エネルギーを小さくするための現象で、強磁性体のように磁区が生じる必要条件と考えられる。

図6はキュリー温度に対応するもので、磁石で秩序を乱した不安定な状態(上)から、数秒後に秩序が生じた安定な状態(下)に落ち着いたところである。三角格子方位磁石集団の相転移である。



図6 磁石で磁区を乱した不安定な状態(上)から、数秒で磁区が形成される(下)。

2. 「自発的対称性の破れ」

「自発的対称性の破れ」とは、自然法則や運動方

程式が対称性を持っていても、現実の自然界がその対称性を持たない場合をいう。この現象は現実の世界のいたるところで生じている。例えば、DNA が地球上に誕生したことを考えよう。元々、イオンと電子がクーロン力で運動しているだけの世界であって、混沌としているはずなのに、強烈な秩序が生じたのである。DNA に限らず生物の存在自身がそうである。社会現象も同様で、人間はそれぞれ自由な思考を持つのに、人間社会は混沌とせず、さまざまな社会制度、文化、流行などの秩序が生じる。混沌という対称性が破れてある種の秩序が生じるのである。自然界や世の中が多様なのは、このように対称性が自発的に破れている現象とも理解することができよう。

この考えを定式化して、物理現象を理解するのが、場の量子論における「自発的対称性の破れ」である。強磁性体の磁性、超伝導や超流動などの凝縮現象³⁾、素粒子の質量起源⁴⁾、インフレーション宇宙⁵⁾などの理論の基礎となるもので、現代物理学において重要な概念となっている。しかし、これらは全て場の量子論におけるもので、決して目視できるものではない。ところが、前章で示したデモンストレーションは「自発的対称性の破れ」の実例であり、しかも目視できる。そして、それは強磁性体内部での現象を想起させるものである。ただし、三角格子方位磁石集団の「自発的対称性の破れ」は古典的なものであり、一方、強磁性体のそれは量子論的なものである。相互作用が全く別物であることに注意が必要である。以下では「自発的対称性の破れ」を例示するとともに三角格子方位磁石集団と強磁性体との違いを考察する。

強磁性体のモデルとして次のような単純化したモデル（ハイゼンベルグモデル）を考える⁶⁾。強磁性体を構成する分子はそれ自身が小磁石であり、隣り合う分子磁石がお互い平行になるのが安定で、分子磁石同士が平行ならどの方向を向いてもエネルギーは最小である*。このことから強磁性体の基底状態は分子磁石の向きが全て同じ方向に揃った状態であることが分かる。分子磁石の方向はどの方向に揃ってもよいので、基底状態は無限に縮退してい

* これは量子論的な効果（交換エネルギー）であって、古典的な磁石同士の相互作用の場合は表1のように、お互いが平行であってもエネルギー最小とは限らない。

る。すなわち、この系は回転対称性を有している。ある基底状態と他の基底状態の間には系の自由度に相当する高いポテンシャルの壁が存するので、ひとたび一つの基底状態が実現すると他の基底状態へ遷移することはほとんど不可能である。場の量子論では無限自由度を扱うので、それぞれの基底状態は全く独立のものとなり、それぞれが別々のヒルベルト空間に属する。この基底状態の一つが、現実の秩序化された状態に対応するのである。これが強磁性体における回転対称性の自発的な破れである。マグノンはこの基底状態からの励起状態であるスピン波である。また、前章で触れたように、磁壁の欠陥エネルギーを仮定すれば、静磁エネルギーを緩和する作用として磁区構造を理解することができる。

三角方位磁石集団の場合は、前章で述べたように基底状態は方位磁石が結晶軸方向に向きを揃えた状態で、3重に縮退していると考えられる。すなわち、3回対称性を有している。図3が示す一つの磁区がこの対称性の破れた状態であって、一つの結晶軸方向へ秩序化された状態が実現している。すなわち、3回対称性が自発的に破れているのである。マグノンに対応する伝播波も存在する^{2), 7)}。

ところで、この秩序化は強磁性体のように最隣接近近似で導くことはできない(図2)。これを理解するには遠距離相互作用を考慮する必要がある、最隣接近近似で理解できる強磁性体と異なる点である。また、構成子同士の相互作用も全く異なる(表1)。このように、三角格子方位磁石集団と強磁性体とは相互作用が全く異なるにもかかわらず、よく似た現象を示すのである。

4. 評価

本稿で紹介したデモンストレーションは大阪市立科学館の展示品として公開し、著者はこの展示を使って磁区の解説を試みている(図7)。実際に方位磁石集団の磁区を見せ、「このように鉄の分子磁石は揃っている。」と解説している。生の現象を見るので磁区を納得しやすいようである。ただし、原子分子の概念のない小学生には困難である。秩序化の理由や強磁性体の相互作用とデモンストレーションのそれとの違いについては、理解を期待できないし、不要な混乱を招くので触れないことが多い。このデモンストレーションによって、磁区は教員だけでなく、市民へも普及し得るようになった。



図7 展示場で公開した展示装置. 方位磁石 1000 個をターンテーブルに敷き詰めたもの. 全体を回転させることで、磁区が地磁気に影響されないことが分かる.

さらに、このデモンストレーションは現代物理学における基礎概念、「自発的対称性の破れ」をイメージすることにおいても有効であろう。この概念の説明に、3章で述べた強磁性体のモデルがしばしば引用されるが、図を用いた説明が限度である。それに対して、このデモンストレーションは何度でも自発的に対称性の破れる様を見せてくれる。著者は展示場での解説や講演など機会があればこのデモンストレーションを用いて解説を試みている。一般市民にはまだまだ難解のようであるが、「自発的対称性の破れ」をこれから学ぶ者にとっては効果的であろう。また、既に学んだものにとっても、目視できるので楽しい現象である。

現代の薄膜磁気デバイスにおいても、このデモンストレーションは有益な示唆を与えられる。ここでは、双極子-双極子相互作用が基礎の一部となるのだが、この計算は最隣接近似が使えないので、長距離相互作用を扱わねばならず、困難である⁸⁾。したがって、実モデルによるシミュレーションは示唆に富む情報を与えるであろう。実際、文献2)で、三角格子の磁区だけでなく、磁区の中を伝わるマグノンや準安定状態としての磁区の存在をも示した。後者は正方格子の場合に現れるものである。正方格子の場合、磁気双極子は格子の対角線方向を向き、隣同士が直角になるようなパターンを形成するのが安定である。ところが、磁区が形成された三角格子から正方格子へ準静的に変化させることで、準安定な磁区を作ることができる。文献2)の写真を

図8に再掲した。

4. おわりに

以上述べたように、方位磁石集団によるデモンストレーションは素人から専門家までそれぞれのレベルで生の自然現象として磁区や「自発的対称性の

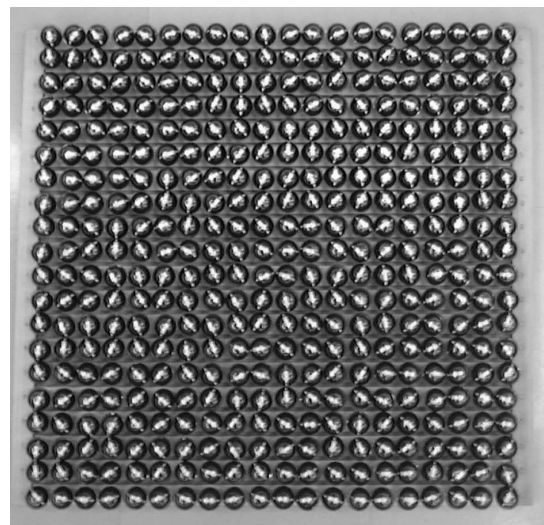
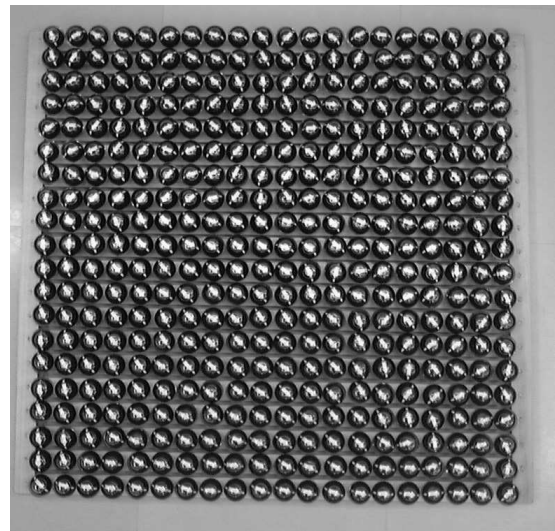
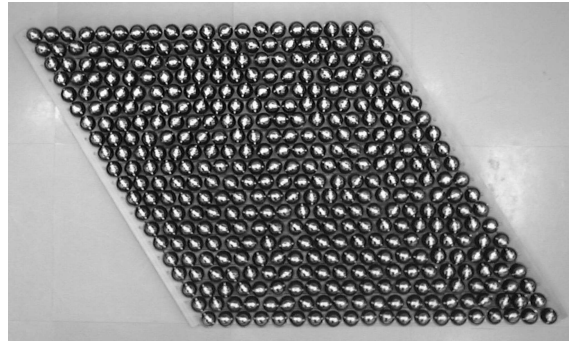


図8 準安定状態の磁区. 三角格子に生じた磁区(上)は準静的に変形された正方格子に残る(中). これに僅かな振動を与えると磁区は消失する(下).

破れ」を楽しむことができる。天下りの的に知るのでなく、個人が自然現象を観察することにより理解できるもので、科学教育の理想と自負している。広く普及することを願う。

謝辞

保江邦夫先生には方位磁石集団の磁区形成現象を発見した当時から「世紀の大発見」と常に励まして頂きました。この励ましがなかったら、本研究の成果はなかったと思います。保江先生には厚く御礼申し上げます。高橋憲明先生には、本稿の執筆を薦めて頂き、執筆に当たっては貴重なコメントを頂きました。菅野礼二先生には草稿を丁寧に読んで頂き、貴重なコメントを頂きました。両先生に感謝します。また、方位磁石の入手に関しては榊エス・ジー・エスの渋谷勝氏に便宜をはかって頂きました。ターンテーブルは、彩美術工房の松井俊二氏に考案いただきました。両氏に謝意を表します。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金(奨励B)平成12年度課題番号12914022、および平成13年度課題番号13914023の助成によるものです。

引用文献

- 1)近角聰信:「強磁性体の物理」裳華房(1991),キッテル:「固体物理入門」丸善(1979)
- 2)Y.Saito and K.Yasue: Frontier Perspectives 10-1 (2001) 28-31,
<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/SBSpreprint/FP.htm>
- 3)H.Umezawa : 「場の量子論 ミクロ、マクロ、そして熱物理学の最前線」培風館(1995)
- 4)戸塚洋二:「素粒子物理」岩波(1992)
- 5)小玉英雄:「相対論的宇宙論」丸善(1991)
- 6)武田暁:「場の理論」裳華房(1991)
- 7)
<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/SBSpreprint/mag.mpg>
- 8)K. De' Bell, A. B. Maclsaac and J. P. Whitehead : Rev. Mod. Phys. 72 (2000), 225-257.