

方位磁石結晶と鉄のミクロ構造

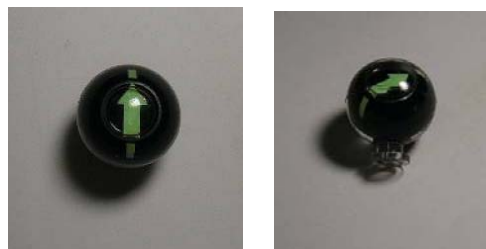


図 1. フェライト磁石を使ったカーアクセサリー用の方位磁石

方位磁石を規則正しくたくさん並べたものを方位磁石結晶と名づけてみました。方位磁石は磁石が自由に回転するように工夫された単純なもので、常に北を指します。地球が磁石で、北極が S 極、南極が N 極だからですね。ところが、強い磁石を使った方位磁石（図 1）がたか

集まると、磁石同士の作用で北を指さずに面白いことがおこります。本誌でも何度か簡単に紹介してきましたが、その後、さらに面白いことが分かってきました¹。今回は少し詳しく紹介したいと思います。

方位磁石が数少ない場合は簡単に推測できます（図 2）。N 極と S 極が引き合っ



図 2. 方位磁石を少数個並べた場合。

た同極同士が反発することから理解できると思います。7 個の場合はどうなるでしょうか？これまで随分たくさんの人に考えていただきましたが、正解された方は今までで、理論物理学者と高校生の 2 人だけです。本稿の最後に答えがあるので、読者の皆さんも挑戦して下さい。

さて、本稿の主題は磁石を多数ならべた方位磁石結晶です。科学館の展示場 4 階にある「磁石のテーブル」は方位磁石結晶を観察する展示装置で、

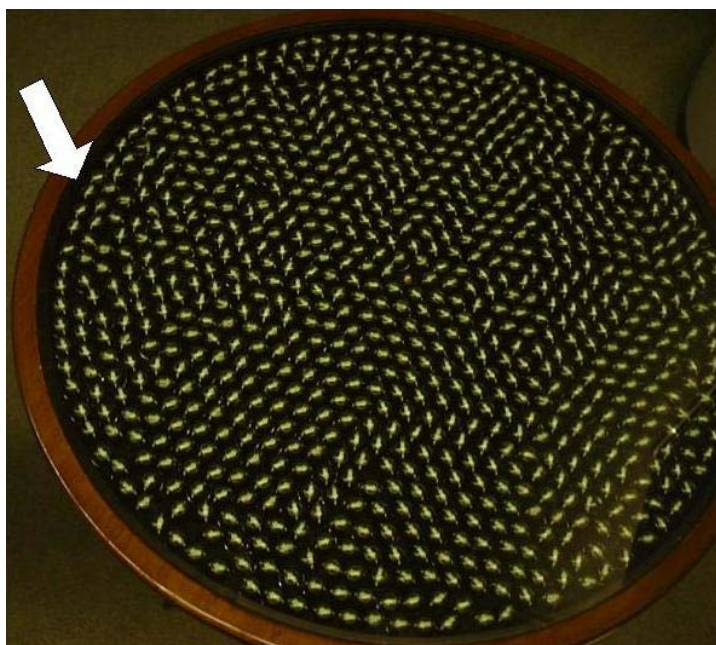


図 3. 方位磁石 1000 個。近所同士が同じ向きに揃おうとしている。

約 1000 個の方位磁石を並べたものです(図 3)。次のような特徴が見えると思いますがいかがでしょうか？どれもいいですから、一個の方位磁石に注目してください。あたかも隣近所と同じ方向を指したいかのようです。また、境界部分（矢印の部分）の方位磁石は、境界に接するように向きを揃えようとしています。境界がない場合（無限遠方まで無限個並べた場合）、方位磁石全部が同じ方向を指すことが、数値計算で示されています。以上の特徴は鉄とそっくりなのです。鉄原子は磁石の性質を持っていて（原子磁石）、図 4(左)のように鉄の中で原子磁石の向きが揃った領域（磁区）を複数作ります。鉄の表面では、原子磁石が表面に沿って向きを揃えます。多くの物理学者は磁区を意識して図 3 を観察するので、「方位磁石結晶は鉄とそっくりだ！」と感激されるようです。読者の皆さんはいかがでしょう？

まだまだ鉄とそっくりなことがあります。鉄の性質を考えながら、方位磁石結晶との類似性を見ることにしましょう。

なぜ鉄同士は反応しないのか？

鉄は図 4(左)のように磁区が集まったものです。磁区は原子磁石が同じ方向を向いて集まったものですから微小な磁石で、磁極は図 4(右)のようになっています。それぞれの磁区の磁極がお互いを打ち消しあって、磁力が鉄から外へ出ないようになっています。ですから、鉄は微小磁石でできて

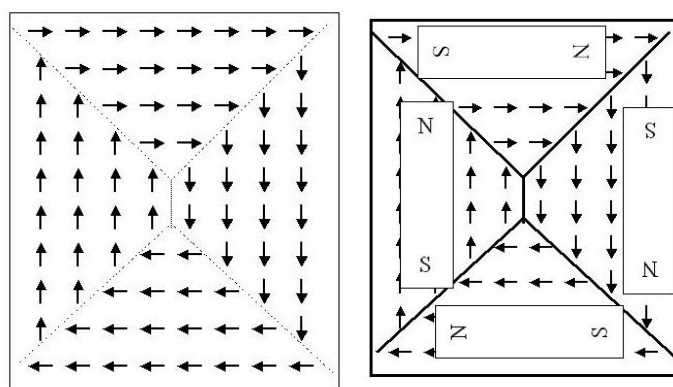


図 4．磁区構造(左)。磁区は鉄を構成する微小磁石である（右）。

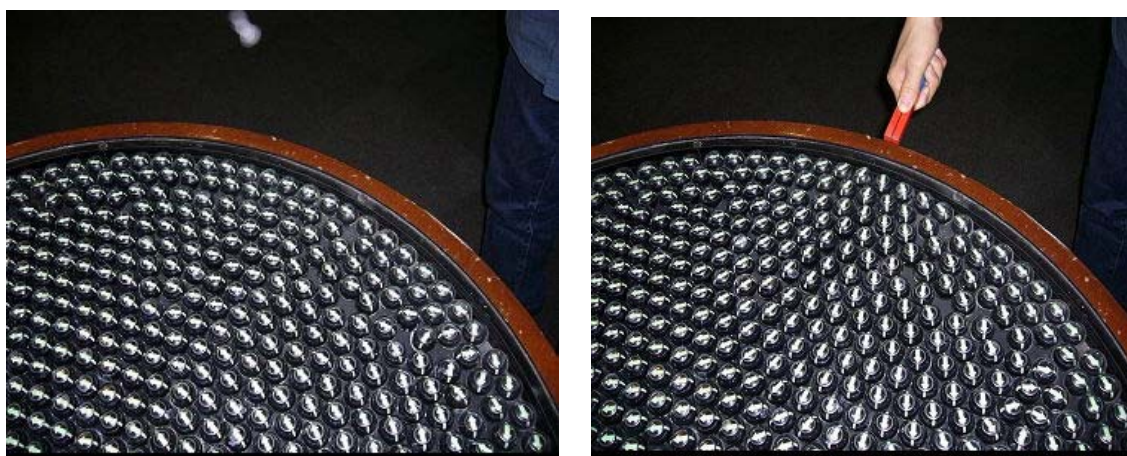


図 5．方位磁石結晶の磁化。右は左の方位磁石結晶に磁石を近づけた様子。

いるものの、鉄同士はお互い全く作用しないのです。図3の方位磁石結晶に磁区構造が見えるでしょうか？。

なぜ鉄が磁石つくのか？

図5は方位磁石結晶に磁石を近づけた様子です。たくさんの方位磁石が近づけた磁石と同じ向きに揃っています。

鉄が磁石にくっつくときの原子磁石の様子を想像させてくれます。この想像はほとんど

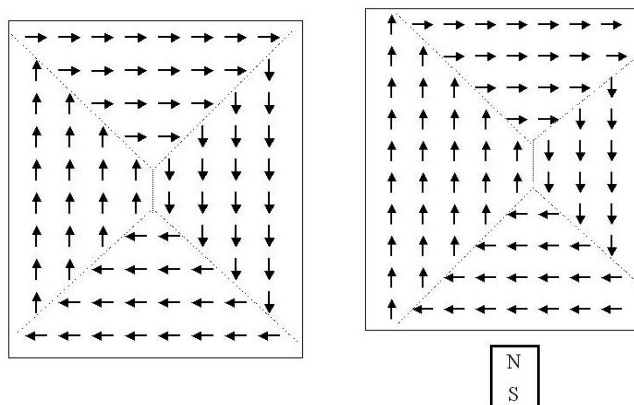


図6．磁壁の移動。鉄（左）に磁石を近づけると、一部の原子磁石が向きを変えて、鉄が磁化される。

正しいのですが、実際はもっと面白いことが起こっています。図6のように、一部の原子磁石だけが向きを変えます。磁区構造に注目すると、磁壁（磁区の境界）が移動して、近づけた磁石と同じ向きの磁区が大きくなり、逆向きの磁区が小さくなっています。これは、鉄全体としては近づけた磁石と同じ向きの磁石になることを意味しています。それで、磁石となった鉄が磁石に引き付けられるのです。磁石を鉄から遠ざけると、図6(左)のように磁壁が元に戻って、鉄は磁力を失います。方位磁石結晶の磁壁の移動はまだ観察できていませんが、いきなり磁石を図5のように近づけずに、慎重に実験すれば観察できると思われます。

鉄が永久磁石になる理由

強力な磁石にくっついた後の鉄は永久磁石になります。このときの磁区の様子が図7です。図6よりもさらに強力な磁石に近づけると、磁壁は不純物や欠陥などを乗り越えて移動します。次に磁石を遠ざけると、磁壁は元の位置（図6(左))へ戻ろうとするのですが、図7(右)のように、乗り越えてしまった不純物や欠陥

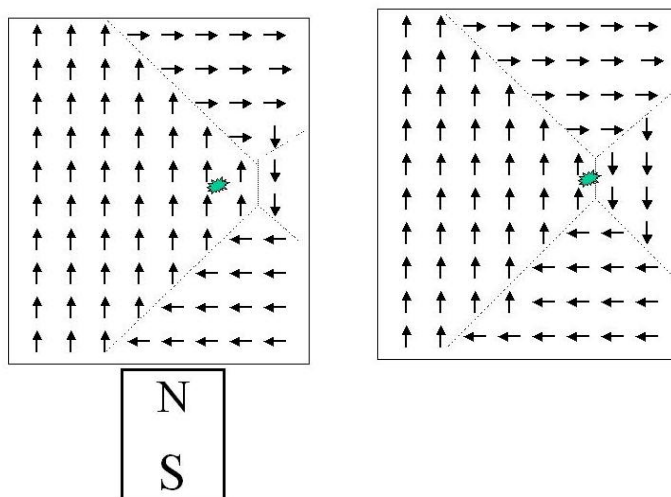


図7．鉄が永久磁石になるときの様子。強力な磁石の作用で磁壁は不純物を乗り越えて移動するが、その後、磁石が遠ざかると、磁壁は不純物を乗り越えることができず、元の状態に戻ることができない。

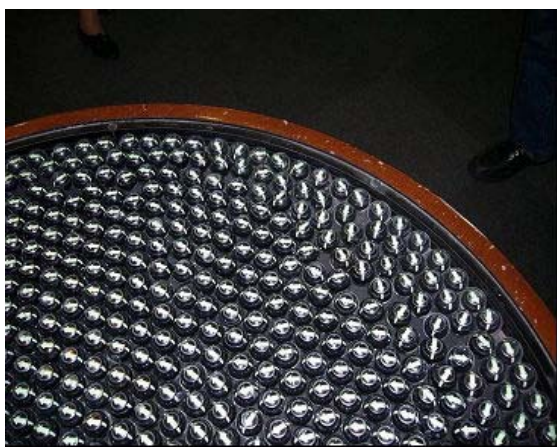


図 8. 方位磁石結晶の永久磁化。図 5 (右)から磁石を遠ざけたときの磁区構造。図 5 (左)と比較すると、右側の磁区が磁化されているのが分かる。

てが規則正しく並ぶことはありません。ところどころに欠陥ができています。おそらく、この欠陥に磁壁がひっかかっているのでしょう。慎重に実験すれば図 7 のような様子が観察できると思われます。

熱い鉄

熱い鉄は磁石につきません。図 9 は磁石につけたクリップを熱した様子で、クリップが磁石に反応しなくなるという連続写真です。鉄を 770°C 以上に熱すると、原子磁石はお互いの相互作用より熱運動が勝って、好き勝手に回転します。その結果、磁区構造がなくなり、磁石に反応しなくなります。冷えると原子磁石は熱による回転を止め、磁区構造が再び現れます。

同じようなことが方位磁石結晶でも起こります。図 10(左)は磁石で方位磁石結晶を攪乱したときのもので、方位磁石は好き勝手に回転しています。これが熱い鉄と同じ状態です。磁石による攪乱を止めると、図 10(右)のように磁区構造が表れます。これが磁石に反応する冷たい鉄と同じ状態です。

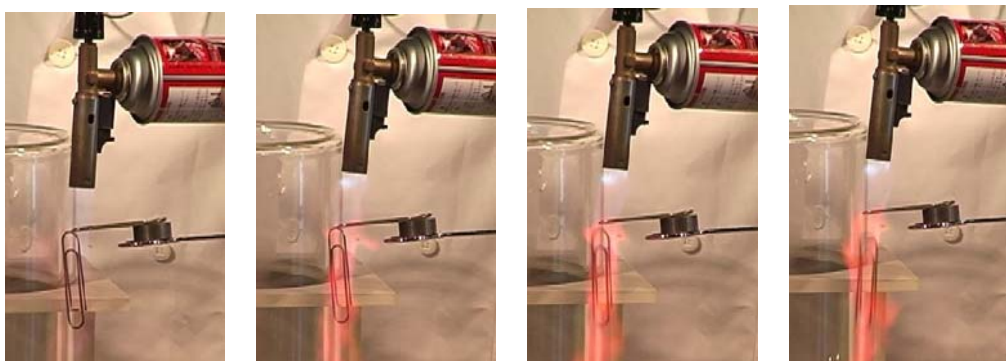


図 9. 磁石に着いたクリップを熱する様子。十分熱になると磁石に着かない。

を再び乗り越えることができません。それで、鉄は磁化されたままです。これが永久磁石です。つまり、磁壁が不純物や欠陥にひっかかっているのです。「不純物や欠陥を注入し、できるだけ強烈に磁壁をひっかける。」これが強力磁石の開発らしいです。図 8 は図 5 (右)の状態から磁石を遠ざけたときの様子です。図 5 (左)と図 8 を比べると、右側の磁区が磁化されているのが分かります。この方位磁石結晶は、円形の容器に球形の方位磁石をできるだけたくさん詰めたものですから、方位磁石全



図 10. 方位磁石結晶を磁石で攪乱したところ（左）。右はその後現れた磁区構造。

正方格子方位磁石結晶

ここまで見てきた方位磁石結晶は容器にできるだけたくさん詰めて作ったものですから、三角格子点上に並んでいます。そして、方位磁石は近所同士が同じ向きに揃っていました。この性質を強磁性といいます。ところが、正方格子点上に並べると、これまで見てきたのとは全く異なります。図 11 で、一つの方位磁石に注目して下さい。その近傍にある方位磁石の向きの平均をとる

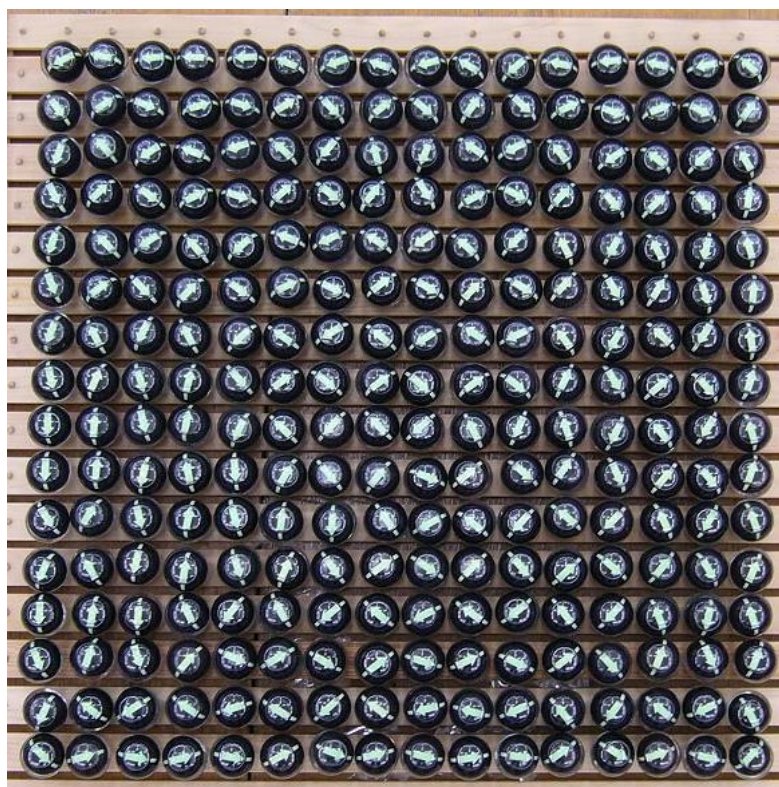


図 11. 正方格子方位磁石結晶

と、向きが全てキャンセルされてしまいます。このような状態を反強磁性といい、磁石にほとんど反応しない状態です。「方位磁石結晶が鉄とそっくり」だけでも非常に興味深いのですが、並べ方を変えると全く違う磁性を示すのです。これは脅威です。では、三角格子から正方格子へ徐々に変化させたらどんなことが起こるのでしょうか、新たな好奇心がわきあがってきます。

実際やってみたのが図 12 です。左下あたりに強磁性を示す部分が残りました。

た。これを少し揺ると、強磁性のパターンは消失し、反強磁性のパターンになります。図 12(下)は過飽和や過冷却の“過”でしょうか？西松毅先生（東北大金研）が開発された数値計算ソフト²を使うと、いろんな考察ができます。例えば、三角格子と正方格子の間で、強磁性と反強磁性との混在が見えます(図 13)。図 12(下)は摩擦や変形など理想からのずれによるものかもしれません。興味の尽きないところですが、紙数が尽きてしまいました。続きは論文¹をお楽しみください。

最後に、西松毅先生には多くの計算例や計算方法を教えていただき、議論をしていただきました。ここに謝意を表します。

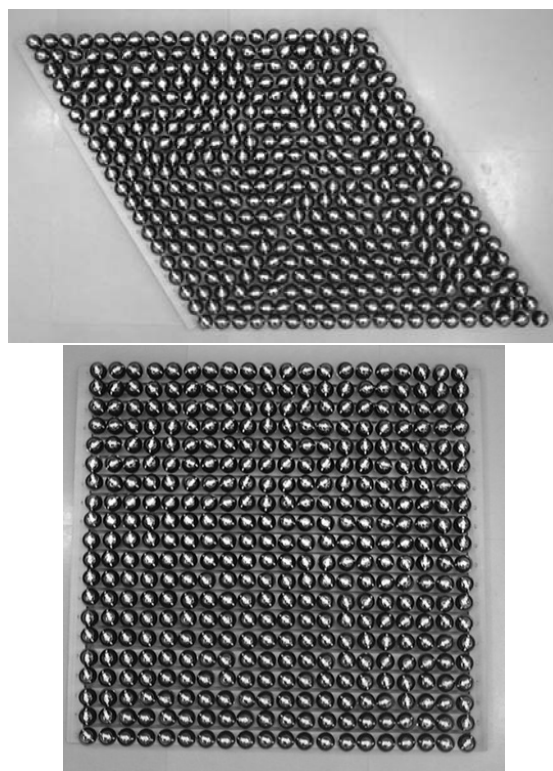


図 12. 三角格子(上)から正方格子(下)への変形

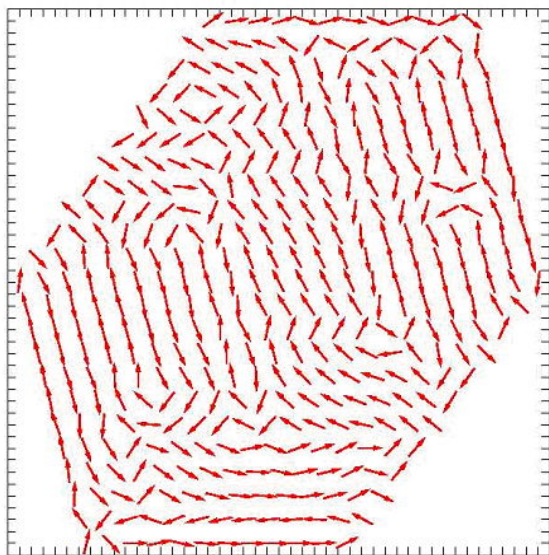


図 13. 強磁性と反強磁性の混在



図 14. 7 個の方位磁石。中心部が北を指す。

斎藤吉彦：学芸員

¹ 斎藤吉彦，西松毅：「方位磁石結晶における強磁性と反強磁性」近畿の物理教育 14 号 <http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/>

² <http://loto.sourceforge.net/compasses/>