

磁性体相転移 – 磁石をあたためると? –

1 磁石はどうして磁石なの?

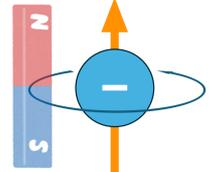
磁石は見えない力で鉄などの物質を引き付けます。では、この力の正体は一体何でしょう?なぜこの世界には磁石と磁石じゃない物質が存在するのでしょうか?その違いについて見ていきましょう。

強力な磁石で持ち上げる →



物質は小さな磁石の集まり

物質は原子核や電子がたくさん集まってできています。それら構成粒子の一つ一つには**スピン磁気モーメント** (以下、スピン) と呼ばれる小さな磁石のような性質があります。この世の全ての物質は小さな小さな磁石の「もと」からなっていて、それらは微弱ながら互いに力を及ぼし合っています。

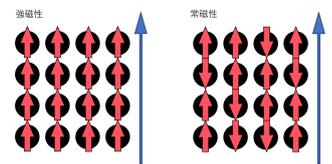


強磁性、常磁性

普通の物質では、構成する原子が持つ電子たちのスピンの向きがバラバラになっています。外側から磁場をかけるとスピンはその磁場の方向に向きを揃えようとし、マクロに*1見てスピンの向きが揃っていると、物質は磁場から力を受けます。

スピンの揃いやすさは物質によって異なり、向きが十分よく揃っていると大きな力で磁場に引きつけられます (鉄などはこのような物質です)。この時物質は**強磁性**を示すといえます。向きがあまり揃っていない時は磁場に引き寄せられず、この時は**常磁性**を示すといえます*2。

強磁性体のうち、外から磁場をかけなくてもスピンの向きが揃っているものは**自発磁化**を持つといえます。ごくごく低温では強磁性体は自発磁化を持ちます。磁石 (永久磁石) とは常温で自発磁化を持つような物質です。



外から磁場をかけた時

2 磁石をあたためる

磁石をあたためると、電子の運動が熱で激しくゆらぎ、そろっていたスピンの向きがバラバラになって自発磁化を失います。これは**強磁性相** (自発磁化を持つ相) から**常磁性相**への転移、すなわち「磁石が磁石じゃなくなる」転移です。

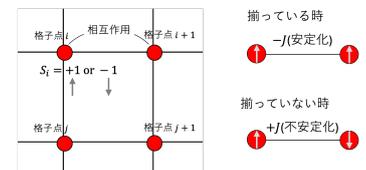
転移が起こる温度は磁石の種類により異なります。例えば強力な磁石として知られているネオジム磁石は熱に弱く (300 °C程度)、サマリウムコバルト磁石という磁石は熱に強い (800 °C程度) です。

3 磁石の理論: Ising モデル

磁石は、物質の中の電子の「スピンが揃おうとする」働きによってつくられます。この性質のみを抽出して単純化したのが**Ising モデル**と呼ばれる磁石の数理モデルです。

このモデルの力学法則 (ハミルトニアン) は数式で次のように書けます:

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{S}_i \hat{S}_j, \quad \hat{S}_i = \pm 1 (i = 1, \dots, N)$$



Ising モデルのしくみ

つまり、「 N 個の格子点の上にスピンの役割をする変数が乗っていて、隣同士のスピンの向きが同じだとエネルギーが小さく、異なっていると大きくなる」というしくみです。平衡統計力学の枠組みを適用すると、ある温度以下ではスピン変数のマクロな期待値が 0 でない値を取ることがわかり、これが強磁性相を表します。

Ising モデルの力学はスピン変数をひっくり返しても変わりません。これは磁石のもつ対称性 (**スピン反転対称性**) です。

*1 物質を原子や電子がたくさん (10^{24} 個程度) 集まった集合体として見た時に、という意味です。逆に、原子や電子など個々の構成要素に着目する見方を「ミクロな見方」といいます。ミクロとマクロの違いはスイミーみたいなものだと思います。

*2 物質によっては、磁場をかけると電子のスピンの向きが磁場と逆向きに揃おうとするもの (**反磁性体**) もあります。ある物質が磁石になれるかどうかは、物質を構成する原子の中の電子の配置や、電子同士の相互作用の大きさなどさまざまな要因によって決まります。