

1. 物質を、磁石として性質から分類する

● 強磁性

鉄，コバルト，ニッケルなど．それらの合金．

磁石に強く引きつけられる．

永久磁石となる（外から磁場をかけておかなくても磁石でありつづける）物質．

温度を上げると磁石ではなくなる．

● 常磁性

プラチナ，アルミニウム，カルシウムなど．酸素．

弱いながら磁石に引きつけられる．

● 反磁性

金，銀，銅，水銀，ダイヤモンドなど．

弱いながら磁石に反発する

実は，すべての物質が反磁性をもつ．常磁性や強磁性では，反磁性に打ち勝つ大きさの別の性質が発現している．

これらの性質は，量子力学を使わないと説明できないので，ここでは験的な分類を示すだけにする．

2 永久磁石

【構造】

強磁性体には、磁区という構造がある。

磁区は、巨視的な大きさの領域で、その内部の強磁性体の磁気モーメントが配向（向きがそろ）している。

磁区は小さな磁石なので、他の磁区の N 極と S 極が隣接するように並び、磁力線を外部に漏らさない構造になっている。

しかし、外部磁場にさらすと、たくさんの磁区が外部磁場にそろい、全体として強い磁石になる。

外部磁場をとりさっても、磁区の構造が保たれるとき、永久磁石になる。

【例】

ハードディスクの表面には、強磁性体の薄膜があり、磁区の構造を 2 進数のパターンに合わせて制御して、情報を蓄積する。

電車の切符の裏側には、強磁性体の粉末が塗布してあり、乗車の情報を蓄積する。

海底で吹き出した溶岩の中の強磁性体は地磁気によって磁石となる。この磁石の向きを観察することで、地磁気の方法がときどき反転する事実が判明した。

3. 磁化

ある物体が「磁石としてどの程度強いかわ」を定量的に扱うには、その物体内の磁気モーメントを用いる。

個々の磁気モーメントが強くても配向が乱れると磁石にならないので、巨視的な領域にわたって平均した磁気モーメントを用いる。

磁気モーメントの平均値を求めるには、体積 V に含まれる磁気モーメント（ベクトル）の和をとって体積で割ればよい。

これは**磁気モーメントの密度**と考えても良い。

- 1 個の磁気モーメント： \vec{m}_i
- 体積 V の内部にある磁気モーメント： $i = 1, \dots, N$
- 磁気モーメントの平均値（密度）： $\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i$ この量を**磁化**という。

V の内部の磁気モーメントがすべて同じ大きさ (m とする)、同じ向きならば、

- 磁化の大きさ： $M = \frac{mN}{V}$
- 磁化の向き：磁気モーメントの向き

【磁化の単位】

磁気モーメント m : 電流 \times 面積

数密度 N/V : 1/体積

より

磁化 M : 電流/長さ \rightarrow A/m

4. 磁化電流 と 真電流

磁気モーメントを微小な電流ループに置き換えて考える。

物体に一様な磁化があるとき

- 微小な電流ループ（磁気モーメント）を並べると
 - 隣接部分では電流が打ち消しあい
 - 物体の外表面にだけ電流が残る。これを**磁化電流**という。
- **磁化電流と磁化の関係**
 - 磁石の形（底面積 S ，長さ L ）
 - 1 個の磁気モーメント（形：底面 ΔS ，長さ ΔL ，電流 $I_m \rightarrow$ 磁気モーメント $m = I_m \Delta S$ ）

- 磁石に含まれる磁気モーメントの個数 $N = \frac{SL}{\Delta S \Delta L}$

- 磁化の大きさ $M = \frac{mN}{SL} = \frac{I_m \Delta S}{SL} \frac{SL}{\Delta S \Delta L} = \frac{I_m}{\Delta L}$

- 磁石の側面を流れる磁化電流
 - 磁化電流 = 磁気モーメントの層の数 \times 磁気モーメントの電流 $= \frac{L}{\Delta L} I_m$
- 磁化電流 $= \frac{L}{\Delta L} I_m = LM$
- 線積分による表現
 - \vec{M} は磁石内部のどの位置でも同じ大きさ，同じ向き。
 - \vec{M} は磁石外部のどの位置でも 0
 - 周回積分路 C ： 磁石の下底面から，内部を通過して上底面へ，外部を通過して戻る。

- $\oint_C \vec{M} \cdot d\vec{r} = LM = \text{磁化電流}$

磁化電流は，回路を流れる真電流と異なり，

外部の回路に取り出して流すことはできない

5. 磁石の強さ

磁石の強さを磁極付近の B の大きさで表す.

● 円筒型の長い棒磁石

・ 磁化電流は長いソレノイドコイル (単位長さあたり n 巻き, 電流 I , $M = nI$) と同じ

$$\cdot B = \mu_0 nI = \mu_0 M$$

その根拠は

・ 長さ L の棒磁石 (磁化 M) = 長さ L のソレノイドコイル (巻き線の密度 n , 電流 I)

・ ・ ・ 周回積分路 C : 磁石の下底面から, 内部を通過して上底面へ. 外部を通過して戻る.

$$\cdot \cdot \cdot \text{磁化電流} = ML. \text{ソレノイド電流} = nLI, \quad \therefore M = nI$$

$$\cdot \cdot \cdot \text{ソレノイドコイルの磁場 } B = \mu_0 nI$$

$$\cdot \cdot \cdot \text{棒磁石の磁場 } B = \mu_0 M$$

● 円板 (半径 a , 厚み L) の磁石

・ 教科書例題 11.6 参照

$$\cdot B = \frac{L}{2a} \mu_0 nI = \frac{L}{2a} \mu_0 M$$

磁石の形状によらない, 材質としての磁石の強さを表すには, 磁化 M を用いればよい.

磁石の強さの指標として, M を磁気分極という場合と, $\mu_0 M$ を磁気分極という場合がある.

磁気分極を $\mu_0 M$ と定義するとき, その単位は B と同じで T (T を Wb/m^2 ともいう. 後に学ぶ).

6. 真空中の「磁場の強さ \mathbf{H} 」と磁束密度 \mathbf{B}

これまで「磁場 \mathbf{B} 」とって来たが、正式には、 \mathbf{B} は**磁束密度**という。
これに対して**磁場の強さ \mathbf{H}** という量を別に導入する。

【背景】

磁性体が存在しない場所（真空中）では、磁場の起源は真電流である。

磁性体が存在する場所では、磁場は真電流によるものと、磁化電流によるものがある。

磁性体中で、真電流による磁場だけを分離して論じたいとき、磁場の強さ \mathbf{H} を用いる取り扱いが容易である。

永久磁石の場合には適用できないが、物質の磁化は外部磁場に比例して変化すると考えて良い。

そこで、外部磁場として（真電流だけがつくる）磁場の強さ \mathbf{H} を利用すると、物質の磁気的な性質を単純な形で表せる。

【真空中の \mathbf{H} と \mathbf{B} の関係】

真空中では、磁束密度と磁場の強さの区別は、本来は必要ないのだが、歴史的に次のような定義となっている。

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \left(\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} \right) \text{ 括弧内の式から、} \mathbf{H} \text{ の単位は } \text{A/m} \text{ である。}$$

磁場の強さを用いてアンペールの法則を書き直すと（ μ_0 を取り去る）

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = \sum_k I_k = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S} = \text{周回積分路を貫く真電流の総和}$$

7. 磁性体中の H と B の関係

- 磁性体中でも

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = \text{積分路を貫く真電流}$$

が成り立つように H を定義する.

- 磁性体中では

- ・ 磁性体の存在を磁化に代表させる
- ・ 磁性体がつくる磁場を磁化電流により計算する

ので, アンペールの法則は

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \times (\text{真電流} + \text{磁化電流})$$

よって

$$\text{磁化電流} = \frac{1}{\mu_0} \oint \vec{B} \cdot d\vec{r} - \oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = \oint \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{H} \right) \cdot d\vec{r}$$

一方,

$$\text{磁化電流} = \oint_C \vec{M} \cdot d\vec{r} \quad (4 \text{ 番目のスライド})$$

だから, 両式を等しいとおくと, 被積分関数どうしの等式

$$\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{H}$$

すなわち

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M}$$

となる.

8. 透磁率

電流がつくる磁場の強さ H が磁化の原因であると考え

・ ・ 永久磁石でも、磁化が作られる間は、そう考えてよいだろう

磁化 M と 磁場の強さ H に比例関係が成り立つとする： $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

・ ・ 磁化が弱いとき、常磁性や反磁性では、これでよい

このとき

磁性体中の磁場の強さと磁束密度にも比例関係がなりたつ

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu\vec{H}$$

比例係数 μ を磁性体の透磁率という。

真空では、 H の定義から $B = \mu_0 H$ となっているので、 μ_0 を形式的に「真空の透磁率」と呼ぶ。