

セミナー

磁性超入門

「ようこそ まぐねの国に」



佐藤勝昭

(独)科学技術振興機構

ゼミナー・スケジュール

- 10:00～11:00: 1. イントロ:こんなところにも磁性体が・・・
休憩
- 11:15～12:30: 2. まぐねの国の中心に迫る
質問と昼食
- 13:30～14:45: 3. まぐねの国のふしぎに迫る
休憩
- 15:00～16:15: 4. 新しいまぐねのまち
- 16:15～17:00 質問コーナー

はじめに

- 磁性の初学者の多くが、『まぐねの国』の入口には、しかつめらしい顔をした『磁気物性』の鬼が門番をしていて、むずかしい『なぞなぞ』に答えないと門を開けてもらえないと考えているようですがそんなことはありません。
- この超入門講座では、『まぐねの国』で道に迷った初学者たちに対し、道しるべとなるガイドブックを提供することを目的としています。
- ときには、いきなり聞き慣れない『まぐね語』が出てくる場合がありますが、必ずどこかで説明しますので、とりあえずは『呪文』だと聞き流してください。



第1章 イントロ： こんなところにも磁性体が



第1章は、出口からのアプローチです。すなわち、私がガイドとなって、身近にある磁性体を見つけながら、そこに潜んでいる『磁気物性』と『まぐね語』を一つひとつ解き明かしていく散策に出かけます。さあスタートです。

1.1 クルマと磁性体

- エコカーとして電気自動車EVやハイブリッドカーHVが注目されています。EV, HVでは動力源にモーターが使われます。EVに限らず自動車には、図1.1に示すようにたくさんのモーターが使われています。

窓の開閉, パワーステアリング, ワイパー, ブレーキ, ミラー等々, 高級車では100個ものモーターが使われています。

このほかにも磁性体は, センサー, トランスミッション, バルブなどにも使われています。

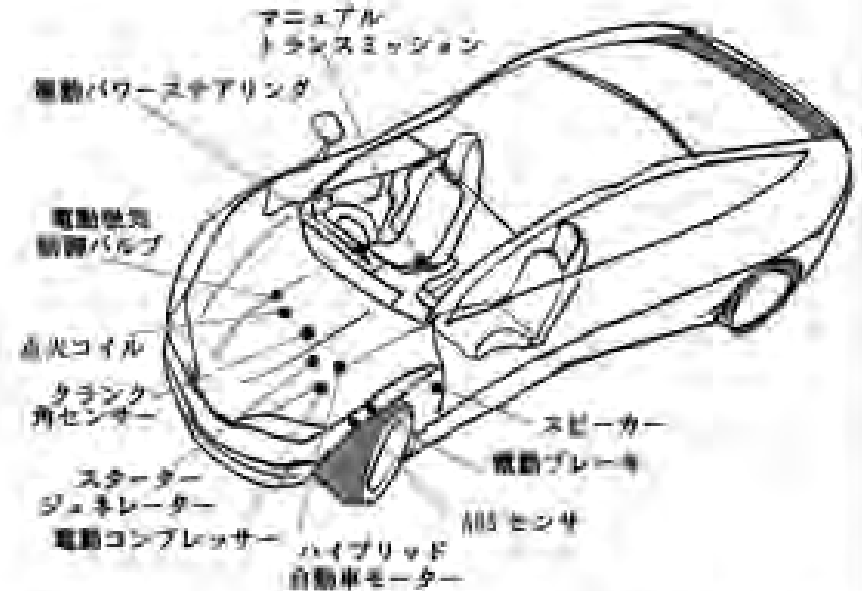


図 1.1 ハイブリッドカーには多数の磁性体が使われている

日立金属のサイト

[<http://www.hitachi.co.jp/environment/showcase/solution/materials/neomax.html>] を参考に作図

1.2 モーターと磁性体

- 図 1.2はブラシレス・モーターの仕組みを模式的に描いたものです。中央には永久磁石という磁性体が回転子として使われています。回転子を多数の固定子を取り囲んでいます。固定子は磁性体にコイルを巻いた電磁石です。電磁石に流す電流を、隣の電磁石に電子回路によって次々に切り替えることによって電磁石が発生する磁界を移動させ、磁界に回転子がついていくことで回転します。

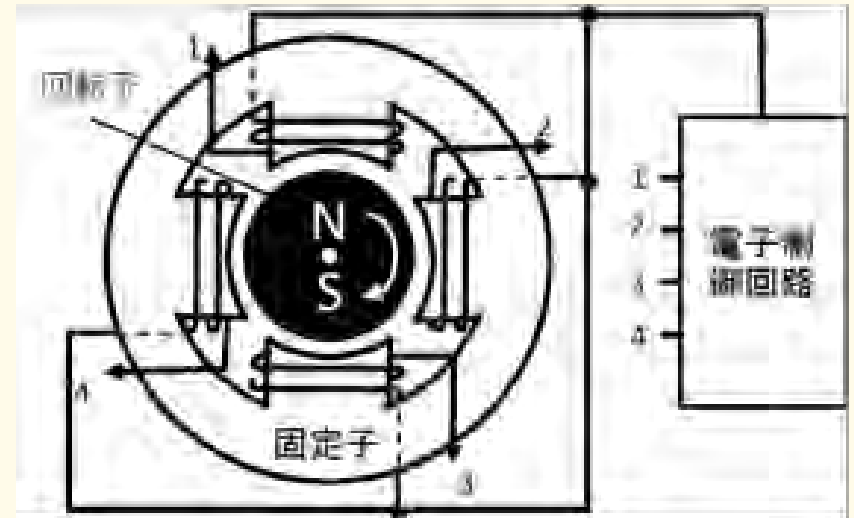


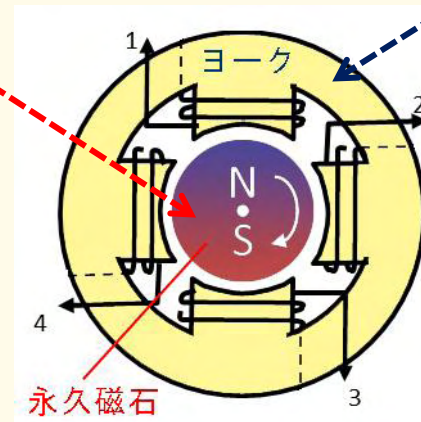
図 1.2 ブラシレス DC モーターの仕組みの模式図
TDK のサイト
[<http://www.tdk.co.jp/techinfo/ninja/daa00253.htm>] を参考に
作図

モーターの永久磁石

- 永久磁石としては、日本で開発されたネオジム磁石がつかわれています。この磁石は、レアアースであるネオジム(Nd)と鉄(Fe)の化合物 $\text{NdFe}_2\text{B}_{14}$ を主成分とするもので、温度特性を改善する目的でディスポロシウム(Dy)など他のレアアースが添加されています。磁力の強さを表すエネルギー積 BH_{max} が一番高く、小型で性能のよいモーターが作れるのです。近年、世界最大の供給国である中国の生産調整によってレアアースが高騰して、マスコミを賑わせていることはご存じだと思います。

硬い磁性体と軟らかい磁性体

- 回転子には永久磁石が使われています。モーターの性能は、永久磁石で決まると言っても過言ではありません。
- 永久磁石にちょっとやさっと外部磁界を加えてもN・Sをひっくり返すことができませんよね。このように磁化反転しにくい磁性体をかたい磁性体(ハード磁性体)といいます。
- 磁性体のかたさを表す尺度として、N・Sを反転させるために必要な磁界の強さ『保磁力 H_c 』を使います。
- 一方、固定子の電磁石においてコイルを巻くための磁心(コア)は、モーターの外枠(ヨーク)に取り付けられています。コアやヨークに使う磁性体は、電流によって発生する磁界によって直ちに大きな磁束密度が得られる磁性体でなければなりません。このためには、やわらかい磁性体(ソフト磁性体)が求められます。



1.3 コンピュータと磁性体

- コンピュータの大容量記憶を受け持つハードディスク(HDD)には、図1.3に掲げるように多数の磁性体が活躍しています。
- このうち回転する磁気記録媒体では、デジタルの情報をNSNS・・・という磁気情報の列(トラックと呼ばれる)として円周上に記録されています。
- 一度NSの向きを記録したら、永久磁石のようにいつまでも変わらないことが必要ですから、磁気的にかたい磁性体(ハード磁性体)が使われます。ただし、永久磁石とちがって、磁気ヘッドの磁界によってNSの向きを反転できないと記録できませんから、適当な保磁力をもつ磁性体が使われます。
- よく使われるのは、コバルト(Co)とクロム(Cr)と白金(Pt)の合金の多結晶薄膜です。磁性というと鉄が思い浮かびますが、HDDの記録媒体に鉄が使われていないのはビックリですね。

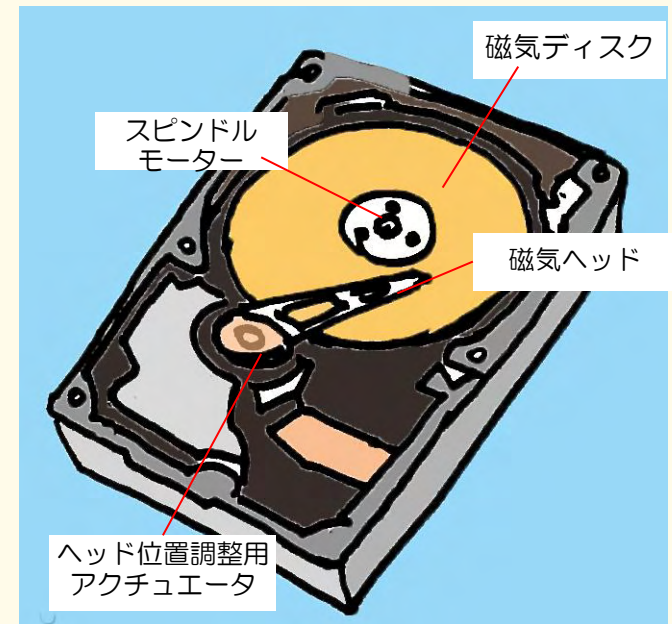


図1.3 パソコンのハードディスクドライブ(HDD)には、記録媒体としてハード磁性体が、記録ヘッドにはソフト磁性体が使われている

(図の出典：佐藤勝昭「理科力をきたえるQ&A」p101)

1.4 変圧器(トランス)

- 交流の電圧を上げたり下げたりするための仕掛けが変圧器です。トランスにおいては、コア(磁芯)と呼ばれる軟磁性体に1次コイルと2次コイルの2つのコイルが巻いてあります。
- 1次コイルに交流電圧を加えるとコア内に交流磁束が発生、2次コイルはこの交流磁束による磁気誘導で、巻き数比に応じた交流電圧を出力します。コアには、1次電流に磁束が追従するように磁氣的に軟らかいソフト磁性体が使われます。
- トランスでは磁性体のヒステリシスや渦電流によってエネルギーが熱として失われるので、保磁力が小さく、電気抵抗率の高い材料が好まれます。このため、積層珪素鋼板やフェライトが使われます。
- 電柱の上に灰色の円筒が乗っていますが、あの円筒の容器には油の中にトランスが入っています。油は絶縁を保つとともに、トランスの熱を外に逃がす

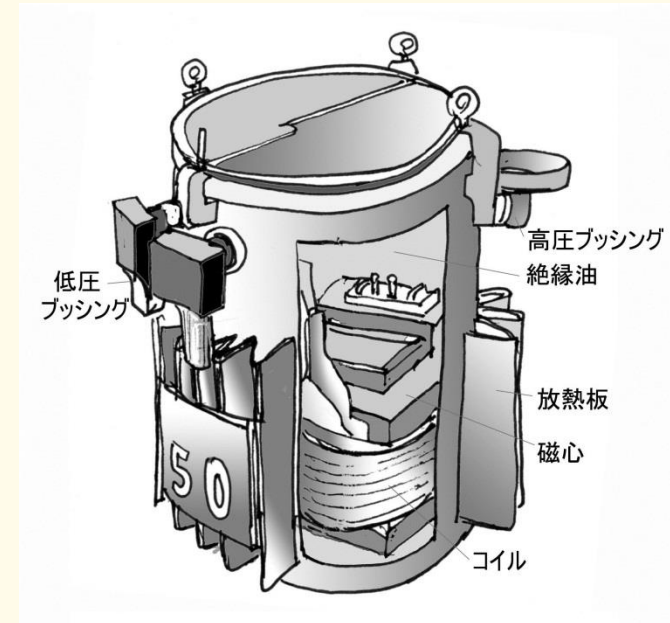


図1.4 柱上トランスには磁心としてソフト磁性体が使われている

中部電力のサイト

(http://www.chuden.co.jp/kids/kids_denki/home/hom_kaku/index.html) を参考に作図

1.5 光ファイバー通信と磁性体

- 家庭にまで光ケーブルが敷かれ、私たちは高速のインターネット通信やデジタルテレビジョン放送を楽しめるようになりました。光ケーブルには光ファイバーが使われ、大量のデジタル情報を光信号として伝送しています。光ファイバー通信の光源は半導体レーザー(LD)です。レーザー光はデジタルの電気信号のオンオフにしたがってピコ秒という短い時間で点滅しています。
- もし通信経路のどこかから反射して戻ってきた光がLDに入るとノイズが発生して信号を送ることができなくなります。これを防ぐために、使われるのが光を一方通行にして戻り光をLDに入らなくする光アイソレーターです。これには、通信用の赤外光を透過する希土類鉄ガーネットという磁性体の磁気光学効果(ファラデー効果)が使われています。

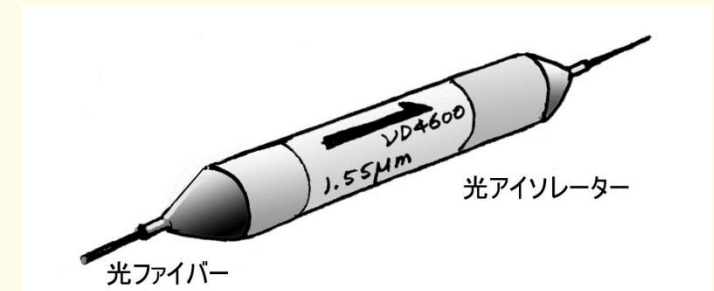
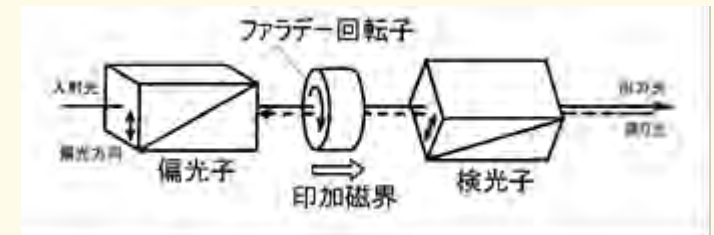


図1.5 光ファイバー通信において戻り光が半導体レーザーに入ること防ぐための光アイソレーターには、通信用赤外線に対して透明な磁性体YIGがファラデー回転子として使われている

Q&A コーナー

Q1.1: 磁性がかたいとかやわらかいという表現がよくわかりません。

- まぐねの国では、磁性体に磁界を加えたとき、弱い磁界でも磁化の反転(N・Sのひっくり返し)が起きるなら「やわらかい」、強い磁界を与えないと磁化が反転しないとき「かたい」と表現します。これを説明するには磁気ヒステリシスの知識が必要です。
- 図1.6は、磁性体を特徴付けるヒステリシス曲線です。横軸は、外部磁界Hの強さ、縦軸は磁化Mの大きさを表しています。くわしくは第3回に説明しますが、磁化Mが反転する磁界Hを保磁力 H_c と呼び、磁性体の「かたさ」を表します。

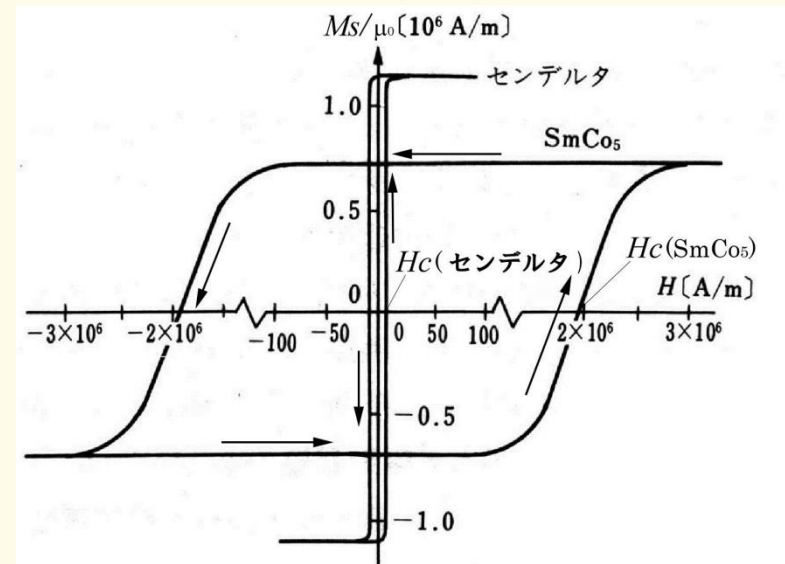


図1.6 ハード磁性体 SmCo_5 とソフト磁性体センデルタの磁気ヒステリシス曲線(佐藤勝昭編著「応用物性」(オーム社)p.208図5.10による)

図において、永久磁石材料であるハード磁性体 SmCo_5 は磁化を反転させるのに200万A/m(約25 kOe)もの磁界が必要なのでかたいのですが、ソフト磁性体センデルタでは地磁気の大きさより小さい10 A/m(約0.13 Oe)で簡単に反転するくらい軟らかいことがわかります。

Q1.2: 磁界と磁場とはどう違うのですか？

また、A/mとかOeとかいう単位がよくわかりません。

- まぐねの国に入って、まず戸惑うのが、表記や単位が統一されていないことです。表記が学問体系によって異なる場合もあります。例えば、magnetic field という英語ですが、電気系では磁界と訳し、物理系では磁場と訳すなどの違いがありますが、同じことです。
- さらには、磁界の単位も、国際標準では、SI系の [A/m] を使うことが推奨されていますが、いまも多くの書物ではcgs-emuの [Oe] を使っていたりします。
- A/mとOeの関係は
 $1[\text{Oe}] = 1000/4\pi[\text{A/m}] = 79.7[\text{A/m}]$ です。逆に
 $1[\text{A/m}] = 4\pi/1000[\text{Oe}] = 0.01256[\text{Oe}]$ です。



物理学者は磁場という

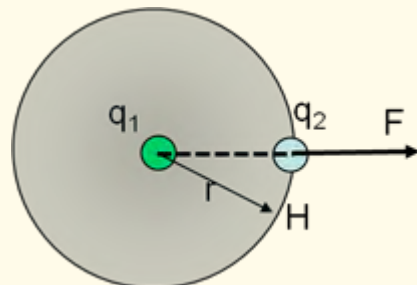


電気系は磁界という

Q1.3: なぜ磁界をA/mと電流であらわすのですか？

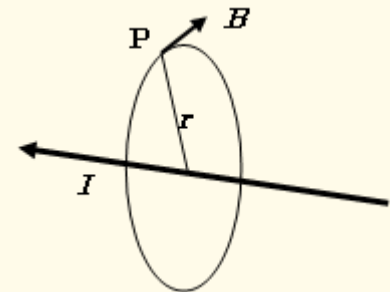
(1) もともと磁界は力で定義されていました

- 距離 r だけ離れた磁荷 q_1 と磁荷 q_2 の間に働く力 F は、磁気に関するクーロンの法則 $F=kq_1q_2/r^2$ で与えられます。
- k は定数です。 q_1q_2 が同符号なら反発し、異符号なら引き合います。磁極 q_1 がつくる磁界 H 中に置かれた磁極 q_2 に働く力 F は $F=q_2H$ で与えられるので、 q_1 のつくる磁界は $H=kq_1/r^2$ で表されます。
- ガウスの定理により、半径 r の球面上の全磁束は中心の磁荷に等しいので、 $4\pi r^2 B=q_1$ となり、磁界は $H=q_1/4\pi\mu_0 r^2$ で表されるのでクーロンの式の係数 k は $k=1/4\pi\mu_0$ であることがわかりました。



(2) 単磁極が存在しないのに、それを使って磁界を定義するのは合理的ではありません。そこで注目したのが電流のつくる磁界です。

- I [A]の電流がP点に作る磁界はビオサバールの法則によって $H=B/\mu_0=(I/2\pi r)$ です。
- 1[A]の電流が作るリング状の磁界にそって、仮想的な磁荷を一周させたときの仕事が1[J]だったとき、磁荷は1[Wb]と定義します。
- 磁束密度 B は、磁界に垂直に流れる1[A]の電流の1[m]あたりに作用する力が1[N]となるときの $B=1$ [T]と定義されています。



Q1.4: ネオジム磁石のほかにどのような磁石があるのか、ネオジム磁石はどれほど強いのですか。

- 磁石(永久磁石)を販売しているある会社の製品一覧をみると、ネオジムNd₂Fe₁₄B、サマコバSmCo₅、フェライト(BaFe₁₂O₁₉)、アルニコ(FeAlNiCo)というのが書かれています。ネオジム磁石はレアアースNdと鉄とホウ素の金属間化合物、フェライトは鉄の酸化物です。サマコバの主成分は鉄ではありません。
- 図1.9は、永久磁石の性能指数であるエネルギー積BHmax(磁石が給えることのできる最大の磁気エネルギーで、B-Hヒステリシス曲線の面積に相当)変遷を表すグラフです。ネオジム磁石の登場でいかに飛躍的に向上したかがわかるでしょう。

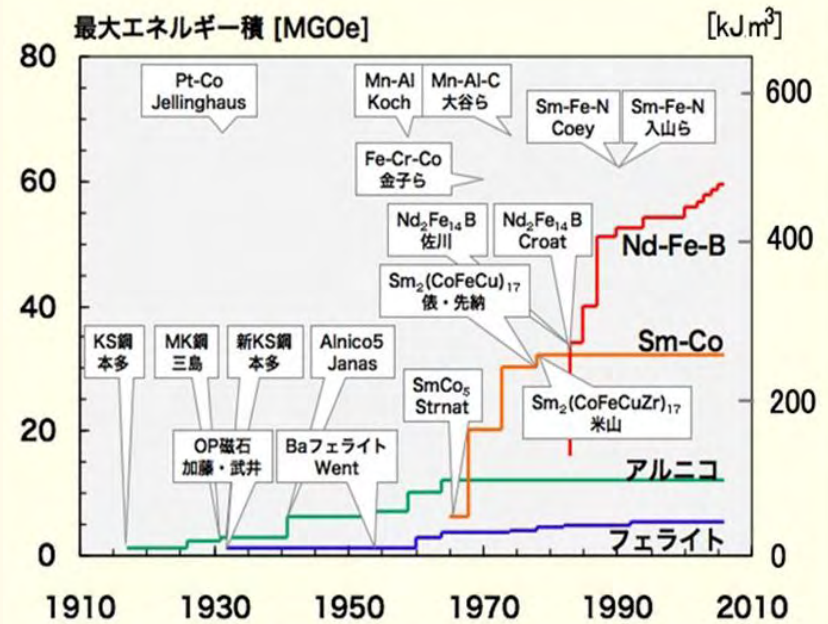


図1.9 永久磁石のエネルギー積BHmaxの変遷

佐藤勝昭「理科力をきたえるQ&A」(ソフトバンククリエイティブ、2009) p.95の図「磁石特性の推移」に加筆

Q1.5: ヒステリシス曲線の縦軸の磁化とは何ですか。

- 磁性体に磁界 H を加えたとき、図1.10 (a)に示すようにその表面には磁極が生じます。つまり磁性体は一時的に磁石のようになりますが、そのとき磁性体は磁化されたといえます。
- 磁性体の中には図1.10(b)に矢印で示す磁気モーメントがたくさんあります。磁気モーメントについてはQ1.6で説明しますが、矢の先がN、後ろがSであるような原子サイズの磁石だと考えてください。
- 単位体積内の磁気モーメントのベクトル和をとったものを磁化といえます。磁界を加える前に磁気モーメントがランダムに向いておれば、ベクトル和つまり磁化 M はゼロですが、磁界を加えると磁化はゼロでない値をもち、(a)のようにN極とS極が誘起されるのです。
- k 番目の原子の1原子あたりの磁気モーメントを μ_k とするととき、磁化 M は式

$$M = \sum \mu_k \quad (1.5)$$

- で定義されます。和は単位体積について行います。Q1.6で述べるように磁気モーメントの単位は $[\text{Wb}\cdot\text{m}]$ ですから、磁化の単位は体積 $[\text{m}^3]$ で割って $[\text{Wb}/\text{m}^2]$ となります。これは磁束密度 B の単位である $[\text{T}] = [\text{Wb}/\text{m}^2]$ と同じです。

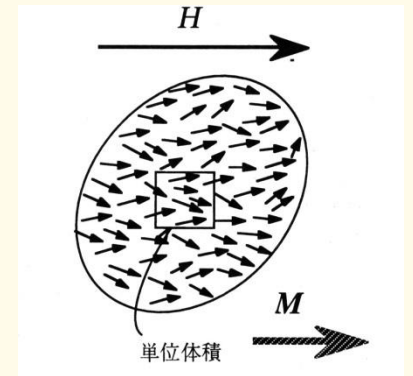
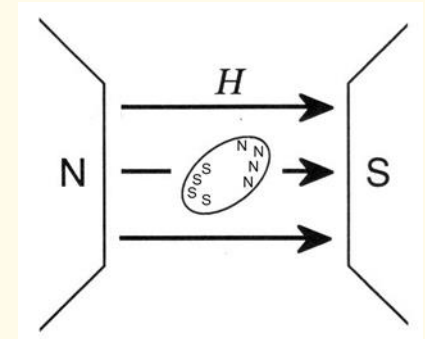


図1.10 磁化は単位体積あたりの磁気モーメントとして定義される
出典：高梨弘毅「磁気工学入門」
(共立出版, 2008) p10、図1.7、
図1.8

Q1.6:磁気モーメントを説明してください

- 電気の場合、 $+q$ と $-q$ の電荷のペア距離 r だけ離れているとき、電気双極子モーメントは qr であらわされます。
- 一方、磁気については、電荷と違って単磁荷はありませんから、磁極は必ず、N・Sの対で現れます。そこで、仮想的な磁荷のペア $+q$ と $-q$ を考え、磁荷間の距離 r を無限に小さくしても $m=qr$ は有限な値を保つと考えます。必ずN・Sが対で現れるなら

$$m=qr \quad (1.6)$$

というベクトルを磁性を扱う基本単位と考えることができます。これを磁気モーメントと呼び矢印で表します。単位は $[\text{Wb}\cdot\text{m}]$ です。

- 図1.11に示すように一様な磁界 H 中の磁気モーメント $m=qr$ を置いたとき、磁気モーメントに働くトルク T は磁界とモーメントのなす角を θ として次式で表されます。

$$T=qHr \sin\theta=mH \sin\theta \quad (1.7)$$

- 磁気モーメントのもつポテンシャルエネルギー E は、トルクを θ について積分することにより

$$E=mH\cos\theta=m\cdot H \quad (1.8)$$

となります。

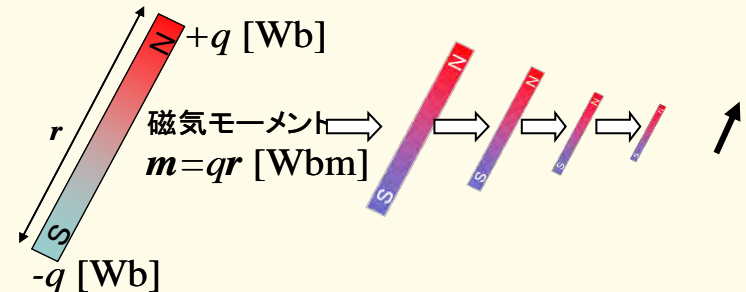


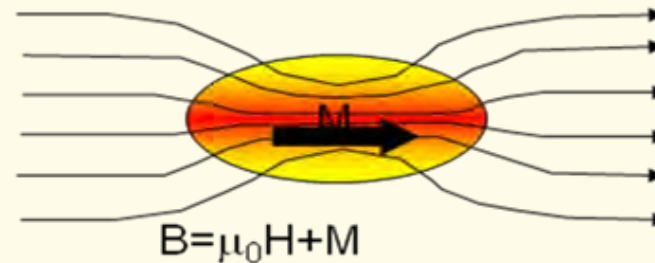
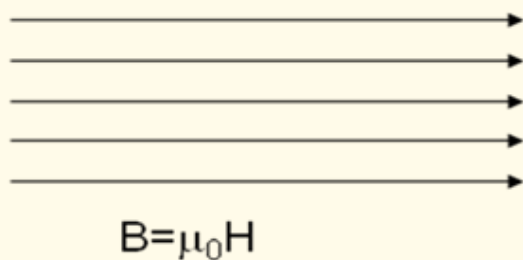
図1.11 仮想的な磁石の微細化の極限が磁気モーメントとなる

Q1.7: 磁束密度 B と磁化 M の関係を教えてください。

- 図1.12(a)に示すように磁界 H [A/m]のあるとき、真空中の磁束密度は $\mu_0 H$ [T]ですが、磁化 M [T]の磁性体の中の磁束密度 B [T]は、(b)に示すように真空中の磁束密度に磁化 M による磁束密度 M を加えたものになります。

すなわち、
$$B = \mu_0 H + M \quad (1.9)$$

と表されます。 $B = \mu_0 (H + M)$ という表し方もあります。この場合、 M の単位は[A/m]です。



磁性体があると磁束密度が高くなる。

図1.12 (a) 真空中と (b) 磁化 M の磁性体における磁束密度 B

磁化率と比透磁率

- 磁化 M が外部磁界 H に比例するとき、その比

$$\chi = M / \mu_0 H \quad (1.10)$$

- を磁化率(susceptibility)と呼びます。物理の分野では帯磁率と呼ぶことがあります。磁化率を使うと、上の式は $B = \mu_0(1 + \chi)H$ と書き直すことができます。一方、電磁気学で学んだように B と H の関係は比透磁率 μ_r を用いて $B = \mu_r \mu_0 H$ と表せますから、比透磁率は磁化率を用いて

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (1.11)$$

- と書けます。

M-H曲線とB-H曲線では保磁力が異なります。

- 磁化曲線にヒステリシスがあるときは、図1.13のようにM-H曲線とB-H曲線では保磁力が異なります。M-Hにおける保磁力を MH_c 、B-Hにおける保磁力を BH_c と区別して書くことがあります。

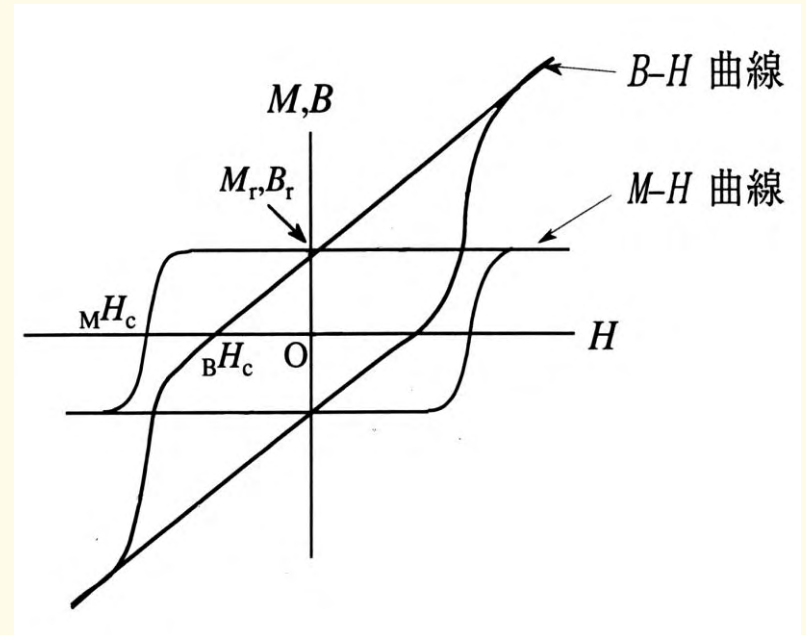


図1.13 B-H曲線とM-H曲線とでは保磁力が異なる

出典：高梨弘毅「磁気工学入門」
図2.8 p.45 (一部改変)

Q1.8 磁性体という言葉の説明なしに使っていましたが、磁性について説明してください。

- 磁性とは、物質が磁界の中に置かれたときにおきる磁気的な変化のしかたを表すことばです。どんな物質もなんらかの磁性を示します。たとえばヒトの体でも、水分子の H^+ (プロトン)の核磁気モーメントが強磁界中で磁気共鳴することを用いてMRIという診断が行われていることはご存じですね。強磁界中に置くとリンゴも浮き上がります。このように、**どんな物質も磁性をもつ**のです。
- 磁性は、反磁性、常磁性、強磁性、フェリ磁性、反強磁性、らせん磁性、SDW(スピン密度波)、傾角反強磁性などに分類されます。巨視的な磁化をもつのは、強磁性、フェリ磁性、傾角反強磁性です。
- 超伝導状態にある物質には磁束が侵入できません。これをマイスナー効果と呼びます。第2種の超伝導では磁束は磁束量子として侵入します。

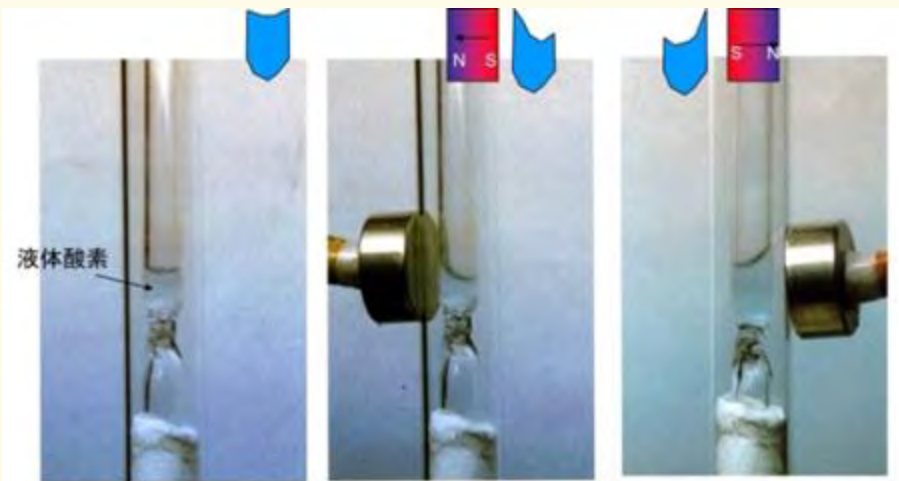
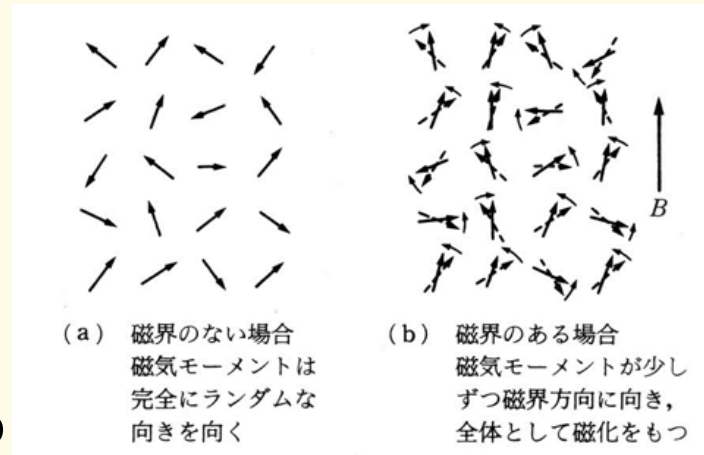
反磁性(diamagnetism)

- アルミなど導電性の物体に磁界を加えると、物質内に回転する電流が生じて、磁界の変化を弱めようとします。このような性質を反磁性と呼びます。
- 積算電力計にはこの性質が使われています。超強磁界中でリングが浮上するのもリングが反磁性を示すからです。



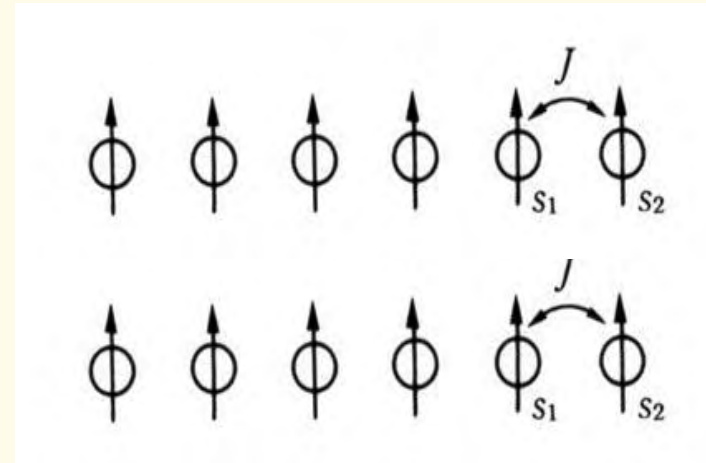
常磁性(paramagnetism)

- ルビー(クロムを含む酸化アルミニウム)のように遷移金属を含む絶縁物の多くは、ランダムに向いている磁気モーメントを持っており、強い磁界を加えると磁界方向に向きを変えて、磁界に引きつけられる性質、常磁性を持ちます。
- 液体酸素も常磁性をもつので図のように磁石に引き寄せられます。
- バナジウム、白金などの金属においては、自由電子が起源のパウリの常磁性と呼ばれる温度に殆ど依存しない常磁性が見られます。



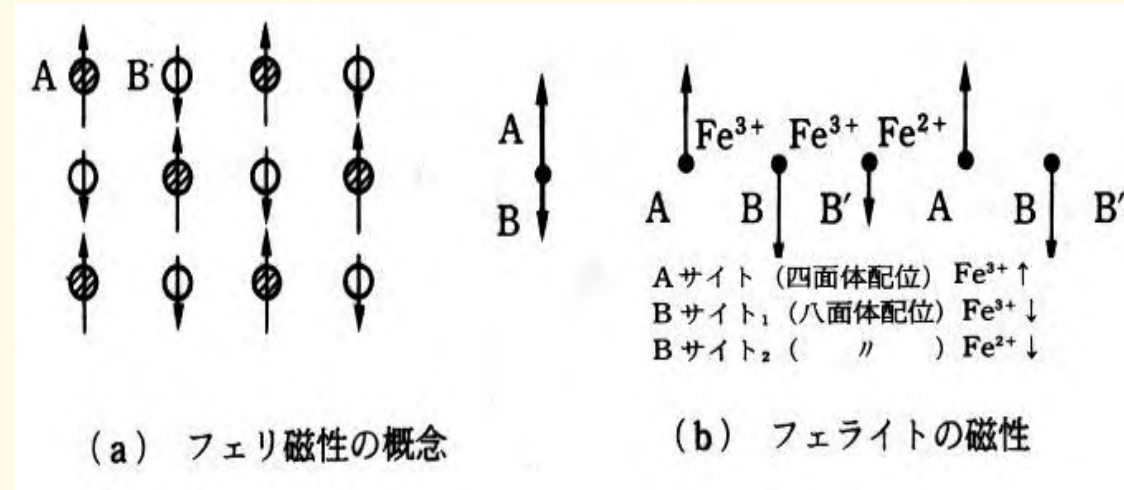
強磁性(ferromagnetism)

- 鉄やコバルトのように磁界を加えなくても磁気モーメントの向きがそろっていて自発磁化をもっている物質は強磁性体と呼ばれます。
- ハードディスクや電気自動車のモーターに使われるのは強磁性体です。



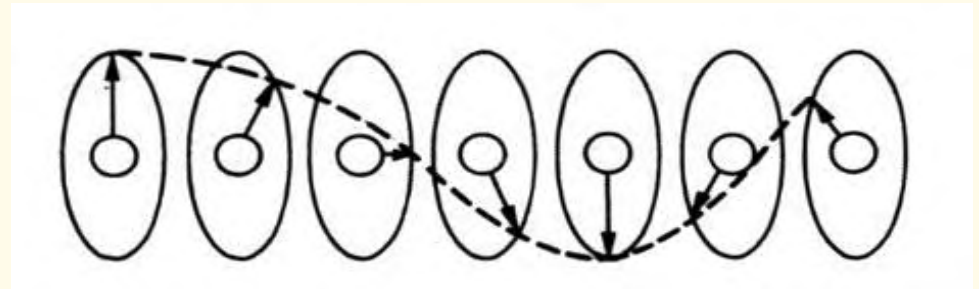
フェリ磁性(ferrimagnetism)

- 隣り合う原子の磁気モーメントが逆向きだが大きさが違うため全体では正味の磁化が残っている磁性。
- フェライトや磁性ガーネットはその代表格です。



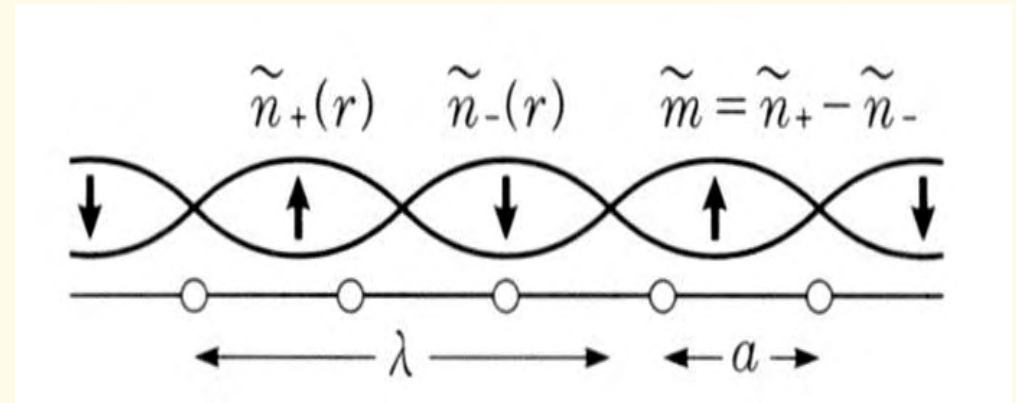
らせん磁性(screw magnetism)

- 磁気モーメントが一定周期で回転しているため全体として磁化を持ちません。
- Mn(マンガン)はこのような磁性をもつと考えられています。



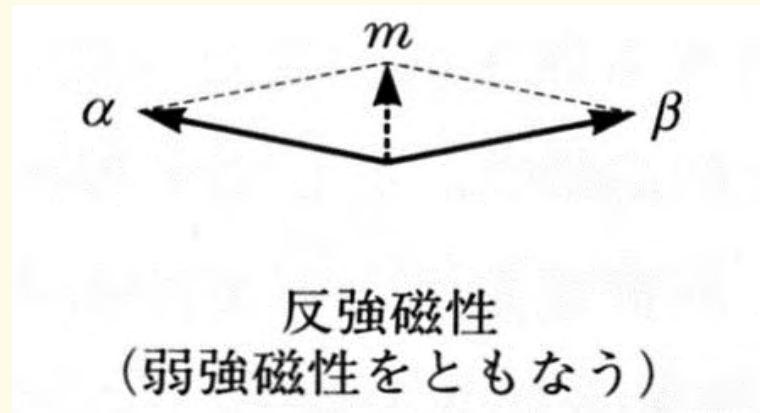
スピン密度波(SDW:spin density wave)

- 電子のスピンの大きさと向きが波状に分布している状態。全体として磁化は生じない場合(Cr)と一つの向きのスピンの優勢で正味の磁化を持つ場合(Mn₃Si)がある。スピン密度波の周期aは必ずしも結晶格子の周期λと一致しない。



傾角反強磁性 (canted antiferromagnetism)

- 反強磁性において2つの副格子磁化が傾いたために、副格子磁化と垂直方向に正味の磁化が生じる場合を傾角反強磁性とよぶ。
- 希土類オルソフェライトに見られる。



Q1.9: 磁石にくっつく磁性体はどれですか？

- 実際につかわれる磁石にくっつく磁性体は、**自発磁化**をもつ強磁性体とフェリ磁性体です。磁石につくという点では、オルソフェライトなど傾角反強磁性体もくっつきますが磁化は非常に弱いです。
- 鉄やコバルトなどは、磁界を加えなくても原子の磁気モーメントの向きがそろっているため磁化があるのです。これを鉄の磁性という意味でferromagnet（強磁性体）といいます。
- フェライトでは、隣り合う原子磁気モーメントが反強磁性的に（互いに逆方向に）そろえあっているのですが、両者でモーメントの大きさが異なっているため、全体として正味の自発磁化が残っています。これをフェライトの磁性という意味でフェリ磁性体といいます。ふつう磁性体といえば、強磁性体とフェリ磁性体を指します。

室温付近で強磁性を示す元素

元素名(記号)	α 鉄 (Fe)	コバルト (Co)	ニッケル (Ni)	ガドリニウム (Gd)
Tc(K)	1043	1388	627	292

室温以下で強磁性を示す元素

元素名 (記号)	テルビウム (Tb)	ディスプロシウム (Dy)	ホロミウム (Ho)	エルビウム (Er)	ツリウム (Tm)
Tc(K)	224	85	20	19.6	25

強磁性を示す元素と化合物

- 元素のうち、室温付近で強磁性を示すのは、表に示すようにFe, Co, NiとGdのたった4つしかありません。
- 低温で強磁性になる元素Tb, Dy, Ho, Er, Tmを含めても強磁性元素は10程度です。
- これ以外の元素は、反強磁性のように全体としての磁化が打ち消しているとか、常磁性、反磁性など磁気秩序をもたない弱い磁性しか示さないのです。
- 遷移金属や希土類を含む化合物や合金についても、ほとんどの物質は、室温では弱い磁性しか示さないのです。

Q1.10:質問に出てきた自発磁化を説明してください。

- 磁界を加えなくても磁気モーメントの向きがそろっている状態です。これは、磁気モーメントどうしの中にそろえあう力が働いているためです。自発磁化は強磁性体において見られます。
- 反強磁性体でも、同じ磁気モーメントの向きの集団（副格子）の中では自発磁化があるが、もう一つの副格子の自発磁化と打ち消しあって、マクロの磁化が失われています。フェリ磁性体では、副格子磁化のバランスが崩れているために、差し引きの結果、正味の自発磁化が残っています。