



スピンの世界へようこそ！

～スピントロニクスのための磁性の基礎からスピントロニクスの今後まで～

工博 佐藤勝昭

国立大学法人 東京農工大学名誉教授

独立行政法人 科学技術振興機構 (JST)
さきがけ「次世代デバイス」研究総括



講師 自己紹介

- ▶ 1966年京都大学修士課程修了
- ▶ 1966年NHK入局
[1968 基礎研物性研究部]
- ▶ 1984年 農工大工助教授
1989年 同教授
2005年 同理事(副学長)
2007年 同名誉教授
- ▶ 2007年 JSTさきがけ[次世代デバイス]研究総括
(兼務)研究広報主監、研究開発研究センターフェロー
(現在に至る)
- ▶ 主な著書「光と磁気」(朝倉書店)、「応用電子物性工学」(コロナ社)、「応用物性」(オーム社)、「金色の石に魅せられて」(裳華房)、「機能材料のための量子工学」(講談社)、「理科力をきたえるQ&A」(ソフトバンク)、「半導体なんでもQ&A」(講談社)、「太陽電池のキホン」(ソフトバンク) 他
- ▶ 洋画家: 日府展洋画部常務理事・審査員、
川崎市麻生区美術家協会事務局長、麻生区文化協会総務



CONTENTS

1. 10:00-12:00 知っているのと得をする磁性の基礎

昼食

2. 13:00-13:45 コイルなしに磁気を電気に変える

3. 13:50-14:20 コイルなしに電気を磁気に変える

休憩

4. 14:40-15:15 スピン流がパラダイムを変える

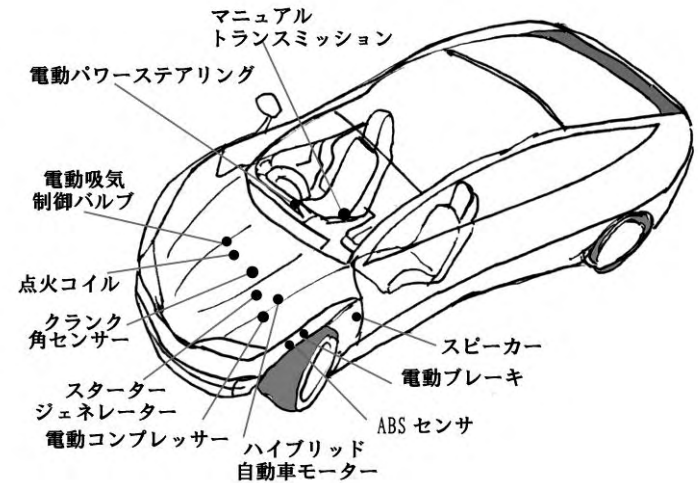
5. 15:20-15:50 スピントロニクス材料

6. 15:55-16:10 まとめと今後のスピントロニクス

□ 16:10-16:30 質疑応答・名刺交換

➤ 質問は各セクションでも受け付けます。





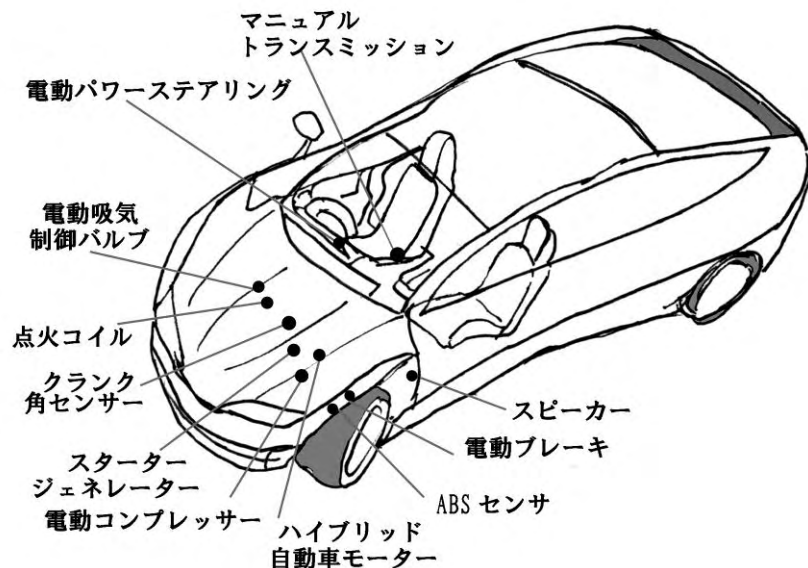
1.知っている と 得をする 磁性の基礎

1.1

こんなところにも磁性体が



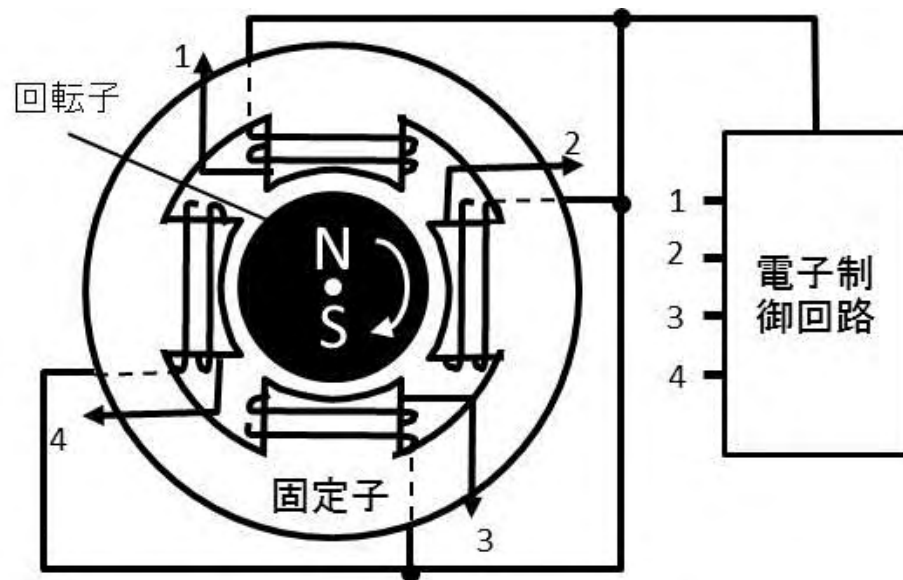
(a)クルマと磁性体



- ▶ 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



モーターと磁石



- ▶ 図はブラシレス・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、となり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行くことで回転します。



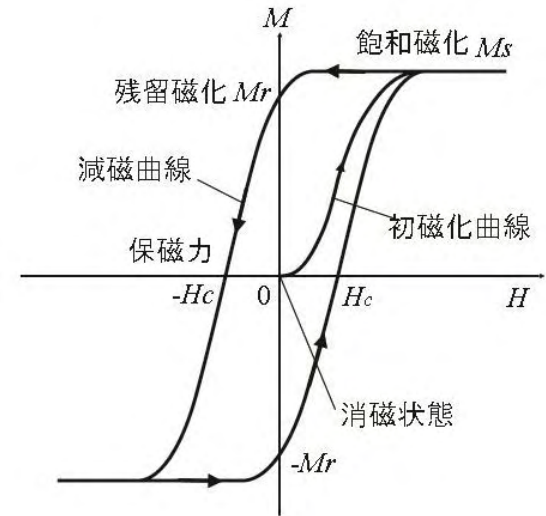
永久磁石

- ▶ 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プロシウム(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BHmax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、マスクミを賑わせていることはご存じだと思います。



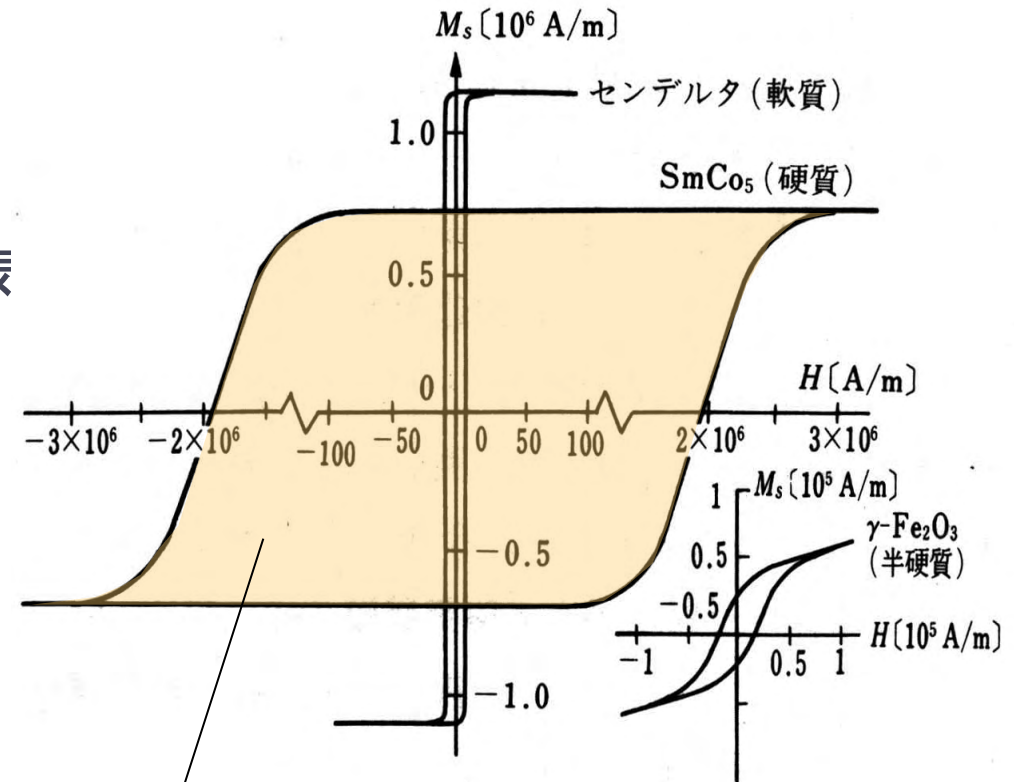
ハード磁性体とソフト磁性体

- ▶ モーターの回転子に使われる永久磁石は、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』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、保磁力が小さく、比透磁率 μ_r の大きなやわらかい磁性体(ソフト磁性体)が求められます。モーター用のソフト磁性体としては、小型のものにはパーマロイ(鉄とニッケルの合金)が、大型のものにはケイ素鋼板(鉄とケイ素の合金)が使われます。



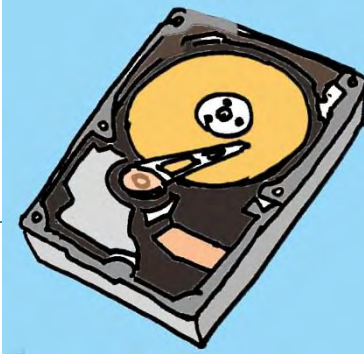
磁気ヒステリシスと応用

- ▶ 保磁力のちがいで用途が違う
- ▶ H_c 小: 軟質磁性体
 - ▶ 磁気ヘッド、変圧器鉄心、磁気シールド
- ▶ H_c 中: 半硬質磁性体
 - ▶ 磁気記録媒体
- ▶ H_c 大: 硬質磁性体
 - ▶ 永久磁石



このループの面積が磁石に蓄積される磁気エネルギー
高周波の場合はヒステリシス損失となる。

(b) 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には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（磁気ディスク）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なので、**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、**適度の保磁力**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。
- ▶ 最近の高密度HDDには、日本で発明された垂直磁気記録方式が使われていますが、このための記録媒体には裏打ち層という磁束の通り道がつけてありますがこれには**ソフト磁性体**がつかわれています。

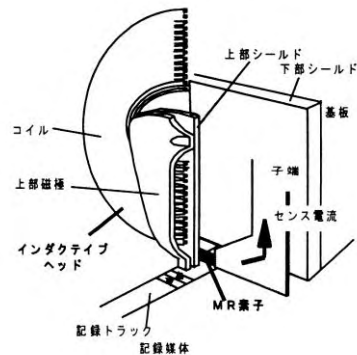


磁気ヘッド

磁気ディスクに磁気情報を書き込んだり、記録された磁気情報を読み出したりするのが磁気ヘッドです。磁気ヘッドは可動のヘッドアセンブリの先のスライダーに取り付けられており、磁気ディスクの数ナノメートル上空に浮上しています。

記録

- ▶ 磁気情報をディスクの磁性体書き込むには、マイクロメータサイズの小さな電磁石を使います。電磁石のコイルも薄膜で作られているのです。コイルで発生した磁界を磁気ディスク媒体に伝えるための磁心(コア)としては、ソフト磁性体の薄膜が使われます。記録されるビットの円周方向のサイズは数十nmという小ささなのでヘッドにはナノメートルの加工精度が要求されます。

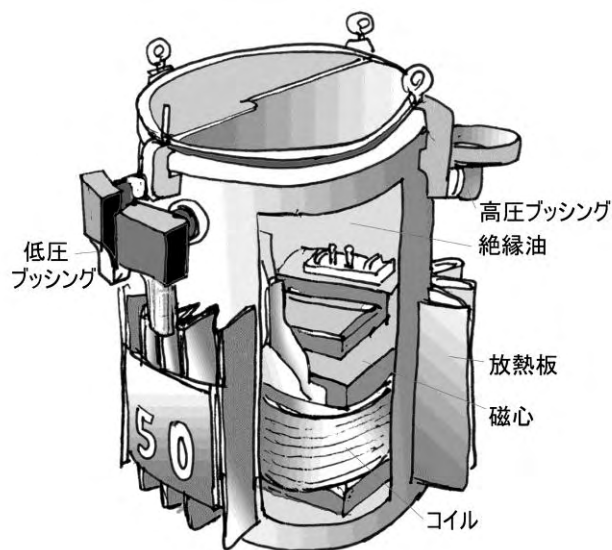


再生

- ▶ 磁気ディスク媒体に記録された磁気情報を電気信号に変えて読み出すために以前はコイルが使われていましたが、1990年代の半ばから、磁気の強さを電気抵抗の変化を通して電気信号に変換する「磁気抵抗(MR)素子」が使われます。
- ▶ この素子には、ノーベル物理学賞受賞で有名な巨大磁気抵抗効果(GMR)、あるいは、トンネル磁気抵抗効果(TMR)が使われます。
- ▶ MR素子には、極めて薄い非磁性体をソフト磁性体ではさんだ多層膜が使われています。



(c) 変圧器 (トランス)

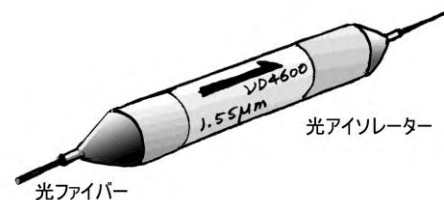
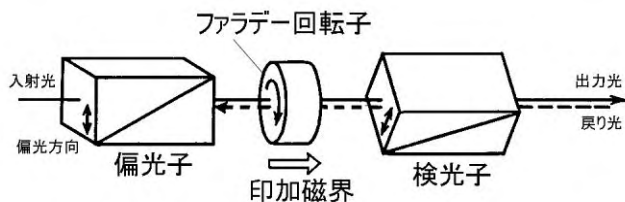


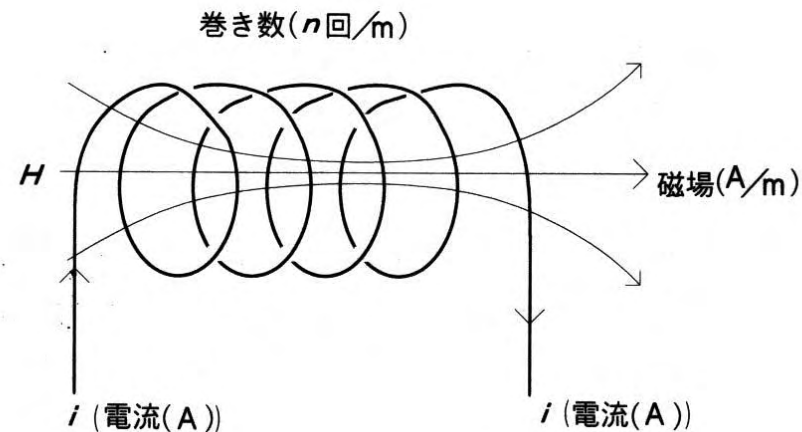
- ▶ トランスにおいては、コア(磁芯)と呼ばれる軟磁性体に1次コイルと2次コイルの2つのコイルが巻いてあります。1次コイルに交流電圧を加えるとコア内に交流磁束が発生、2次コイルはこの交流磁束による磁気誘導で、巻き数比に応じた交流電圧を出力します。
- ▶ コアには、1次電流に磁束が追従するように磁氣的に**ソフト磁性体**が使われます。トランスでは磁性体のヒステリシスや渦電流によってエネルギーが熱として失われるので、保磁力が小さく、電気抵抗率の高い材料が好まれます。
- ▶ このため、積層珪素鋼板やフェライト(絶縁性の鉄の酸化物)が使われます。電柱の上に灰色の円筒が乗っていますが、あの円筒の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ためのものです。



(d) 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。





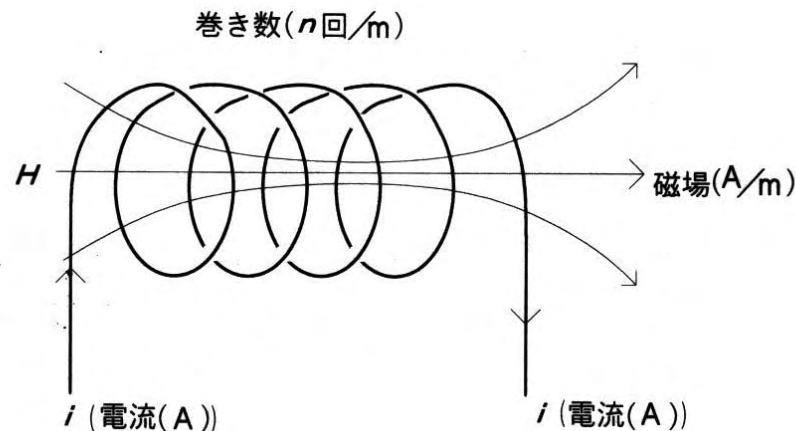
1.知っているのと得をする磁性の基礎

1.2

磁気学の基礎



磁界の定義 (1)



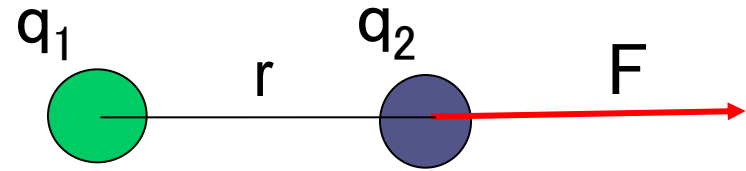
1. 電流による定義

- 単位長さあたり n ターンのソレノイドコイルに電流 i [A]を流したときにコイル内部に発生する磁界*の強さ H [A/m]は $H=ni$ であると定義する。

*応用磁気系用語では磁界、物理系用語では磁場という。
いずれも英語ではmagnetic fieldである。



磁界の定義(2)



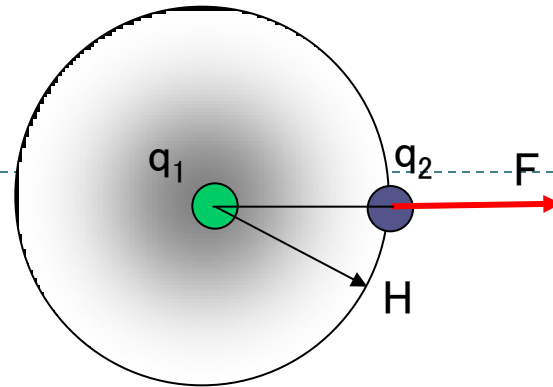
2. 力による定義

・距離 r だけ離れた磁極 q_1 [Wb] と磁極 q_2 [Wb] の間に働く力 F [N] は、磁気に関するクーロンの法則 $F = kq_1q_2/r^2$ で与えられる。 k は定数。

磁極 q_1 がつくる磁界 H 中に置かれた磁極 q_2 [Wb] に働く力 F [N] は $F = q_2H$ で与えられるので、磁界の大きさは $H = kq_1/r^2$ で表される。



2つの定義をつなぐ



- ▶ 一方、 q_1 から磁束が放射状に放出しているとして、半径 r の球面を考える。
- ▶ ガウスの定理により $4\pi r^2 B = q_1$ であるから $B = q_1 / 4\pi r^2$
- ▶ 磁束密度 B [T=Wb/m²]と H を結びつける換算係数 μ_0 を導入すると $B = \mu_0 H$ となる。
- ▶ すると $H = q_1 / 4\pi \mu_0 r^2$ 。
となり、これよりクーロンの式の係数 k は $k = 1 / 4\pi \mu_0$ となる。
- ▶ 従って、クーロンの式は $F = q_1 q_2 / 4\pi \mu_0 r^2$

+ [T]はテスラ、[Wb]はウェーバーと読む。

cgs-Gauss系の単位[G](ガウス)との関係は、 $1[\text{T}] = 10000$

真空の透磁率 μ_0 は、 $4\pi \times 10^{-7}[\text{H/m}]$ ここに[H]はヘンリー



SI単位系とcgs-emu単位系

- ▶ 磁界Hの単位: SIではA/m、cgsではOe(エルステッド)
 - ▶ $1[\text{A/m}] = 4\pi \times 10^{-3}[\text{Oe}] = 0.0126[\text{Oe}]$
 - ▶ $1[\text{Oe}] = (4\pi)^{-1} \times 10^3[\text{A/m}] = 79.7[\text{A/m}]$
- ▶ 磁束密度Bの単位: SIではT(テスラ)、cgsではG(ガウス)
 - ▶ $1[\text{T}] = 1[\text{Wb/m}^2] = 10000[\text{G}]$
- ▶ $B = \mu_0 H + M$; cgsでは $B = H + 4\pi M$
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}[\text{H/m}]$;
真空中で $H = 1[\text{A/m}]$ の磁束密度は $4\pi \times 10^{-7}[\text{T}] = 1.256[\mu\text{T}]$
cgsで測った $H = 1[\text{Oe}] = 79.7[\text{A/m}]$; $B = 100[\mu\text{T}] = 1[\text{G}]$
- ▶ 磁化M: 単位体積 $[\text{m}^3]$ あたりの磁気モーメント $[\text{Wb} \cdot \text{m}]$
 $M = 1[\text{T}] \rightarrow M = (10000/4\pi)[\text{emu}] = 796[\text{emu}]$



磁界の発生

▶ 電磁石

▶ 空心電磁石 ソレノイド

1cmあたり100ターン

1Aの電流を流すと10000A/m、

磁束密度は $4\pi \times 10^{-7} \times 10^4 = 12.6\text{mT}$

超伝導電磁石

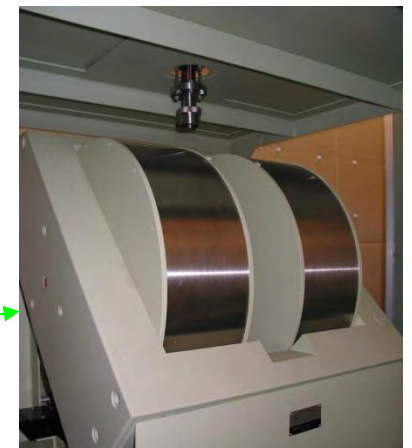
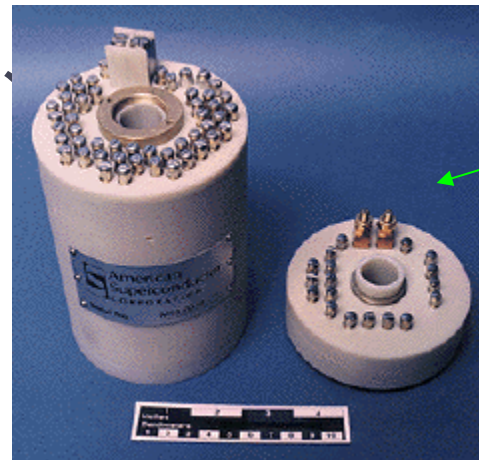
10cmに1000ターン、

100A流すと 10^6A/m ;1.26T

▶ 鉄心電磁石

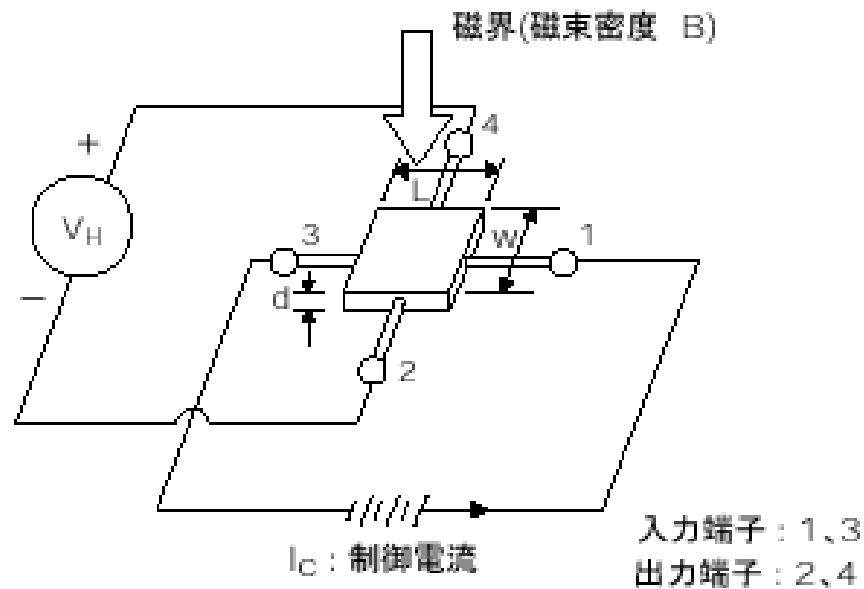
約 $B=2\text{T}$ 程度

水冷コイル



磁界の測定

- ▶ ガウスメータ
ホール素子で測定



$$V_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_c \cdot B \quad (R_H: \text{ホール係数})$$

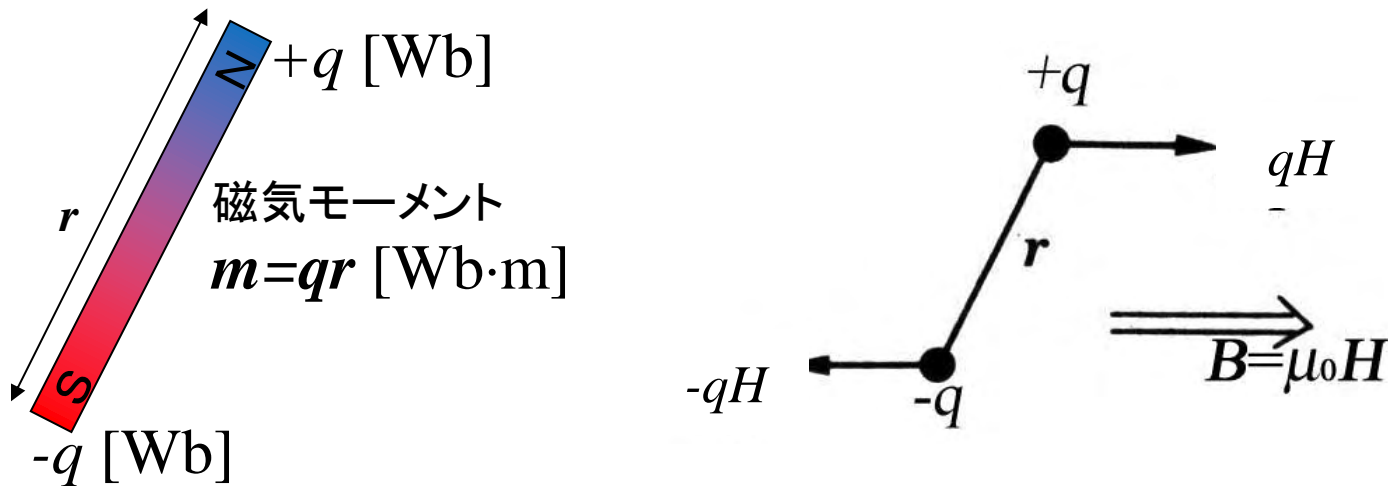


磁極と磁気モーメント

- ▶ 磁石には、N極とS極がある。
- ▶ 磁界中に置かれた磁性体にも磁極が誘起される。磁極は必ず、NSの対で現れる。(単極は見つかっていない)
- ▶ 磁極の大きさを q [Wb]とすると、磁界によってNSの対に働くトルクは $-qHd\sin\theta$ [N・m]=[Wbm][A/m]
- ▶ 必ずNSが対で現れるなら $m=qr$ を磁性を扱う基本単位と考えることができる。これを磁気モーメントという。単位は[Wbm]



磁気モーメント



- ▶ 一様な磁界 H 中の磁気モーメントに働くトルク T は

$$T = qH r \sin \theta = mH \sin \theta$$

- ▶ 磁気モーメントのもつポテンシャル E は

$$E = \int T d\theta = \int mH \sin \theta d\theta = -mH \cos \theta \longrightarrow E = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{H}$$

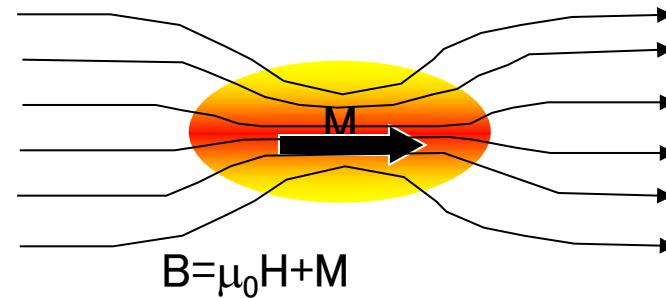
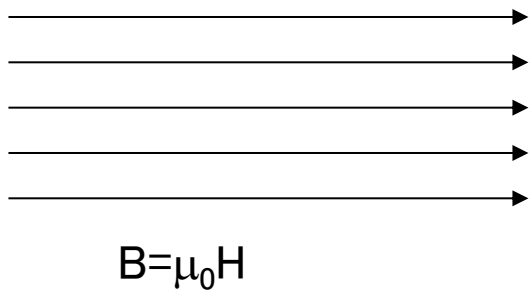
単位: $E[\text{J}] = -m[\text{Wb} \cdot \text{m}] \cdot H[\text{A}/\text{m}]$;

(高梨: 初等磁気工学)



磁界（磁場） H 、磁束密度 B 、磁化 M

- ▶ 磁界 H 中に置かれた磁化 M の磁性体が磁束密度は、真空中の磁束密度に磁化による磁束密度を加えたものである。すなわち、 $B = \mu_0 H + M$



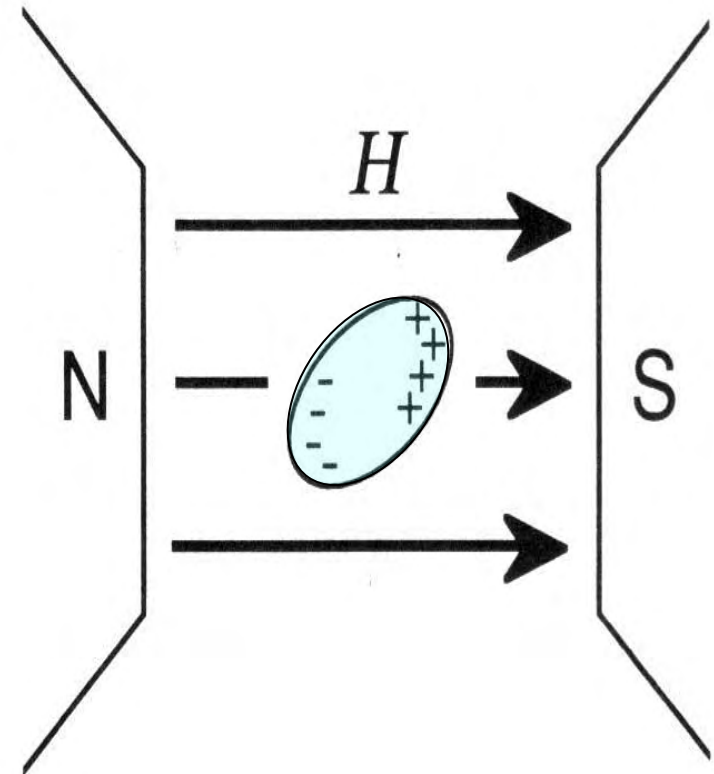
磁性体があると磁束密度が高くなる。



磁化

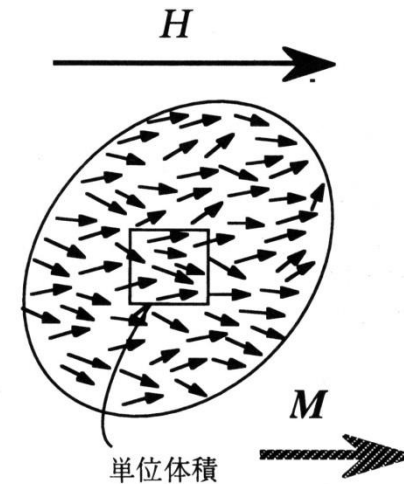
- ▶ 磁性体に磁界を加えたとき、その表面には磁極が生じる。
- ▶ この磁性体は一時的に磁石のようになるが、そのとき磁性体が磁化されたという。

(a)



磁化の定義

- ▶ ミクロの磁気モーメントの単位体積あたりの総和を磁化という。
- ▶ 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、磁化 M は式 $M = \sum \mu_k$ で定義される。
- ▶ 磁気モーメントの単位は $\text{Wb}\cdot\text{m}$ であるから磁化の単位は Wb/m^2 となる。



磁化曲線

- ▶ 磁性体を磁界中に置き、磁界を増加していくと、磁性体の磁化は増加していき、次第に飽和する。
- ▶ 磁化曲線は磁力計を使って測定する。



VSM:試料振動型磁力計

試料を0.1～0.2mm程度のわずかな振幅で80Hz程度の低周波で振動させ、試料の磁化による磁束の時間変化を、電磁石の磁極付近に置かれたサーチコイルに誘起された誘導起電力として検出する。誘導起電力は試料の磁化に比例するので、磁化を測定することができる。

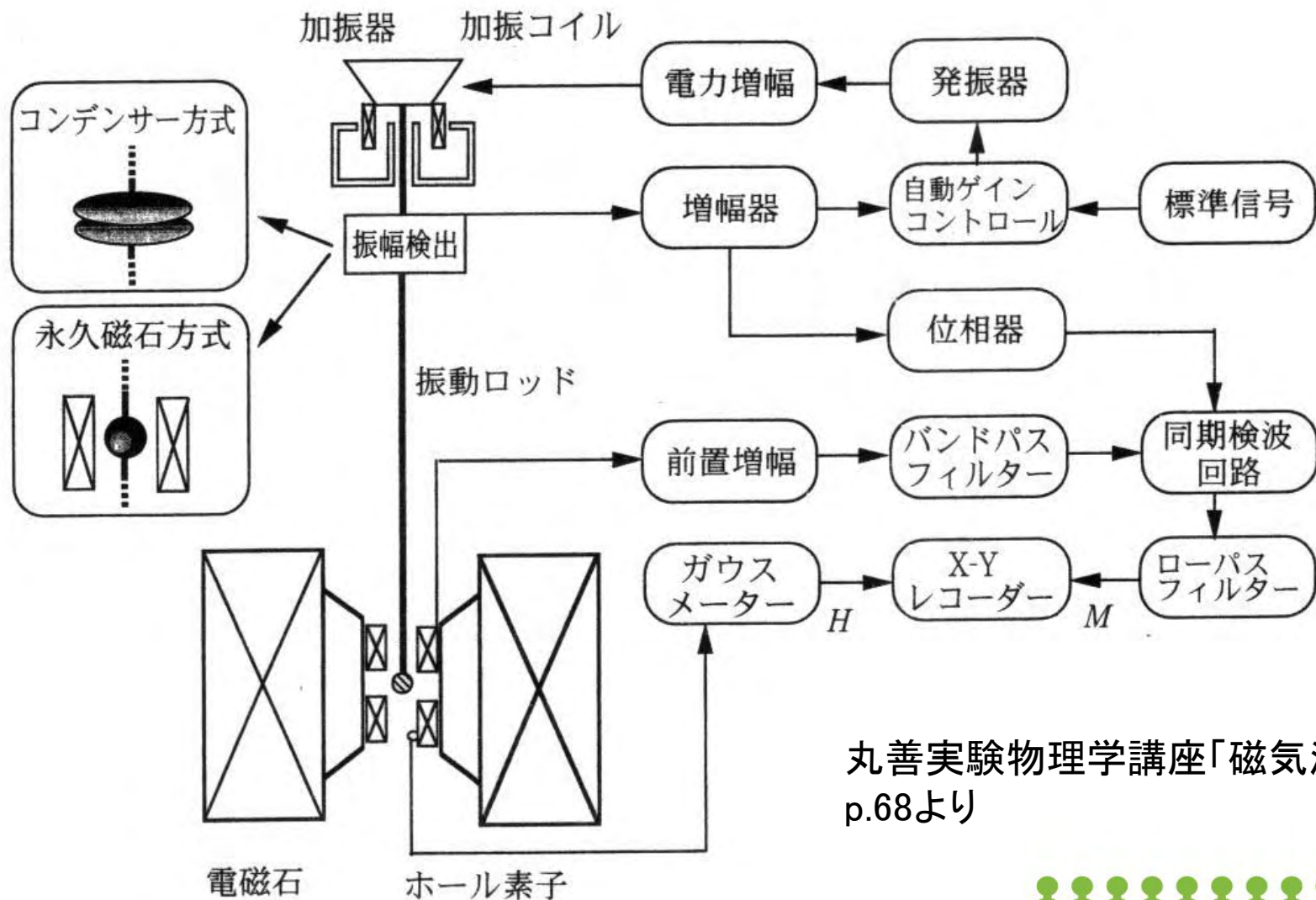
スピーカーと同じ振動機構

磁極付近に置いたサーチコイル

電磁石



VSMブロック図

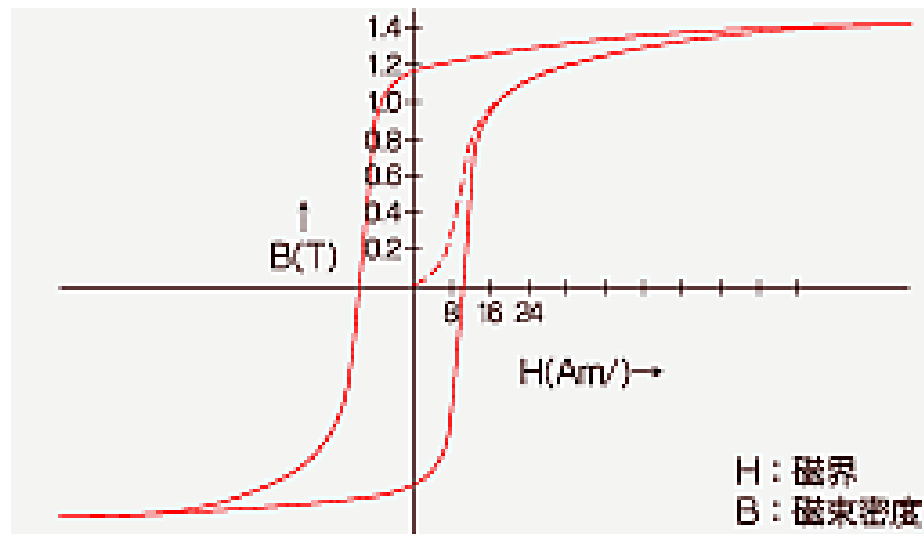


丸善実験物理学講座「磁気測定I」
p.68より



ソフト磁性

- ▶ パーマロイ*に磁界を加えると磁化は急に増大しわずか40[A/m](地磁気程度)の磁界で飽和する。
- ▶ 保磁力が10[A/m]と小さいので非常に小さな磁界で磁化反転する。
- ▶ 磁化しやすく、磁界の変化によく追従する磁性をソフト(軟らかい)磁性とよび、このような磁性体を軟質磁性体と称する。

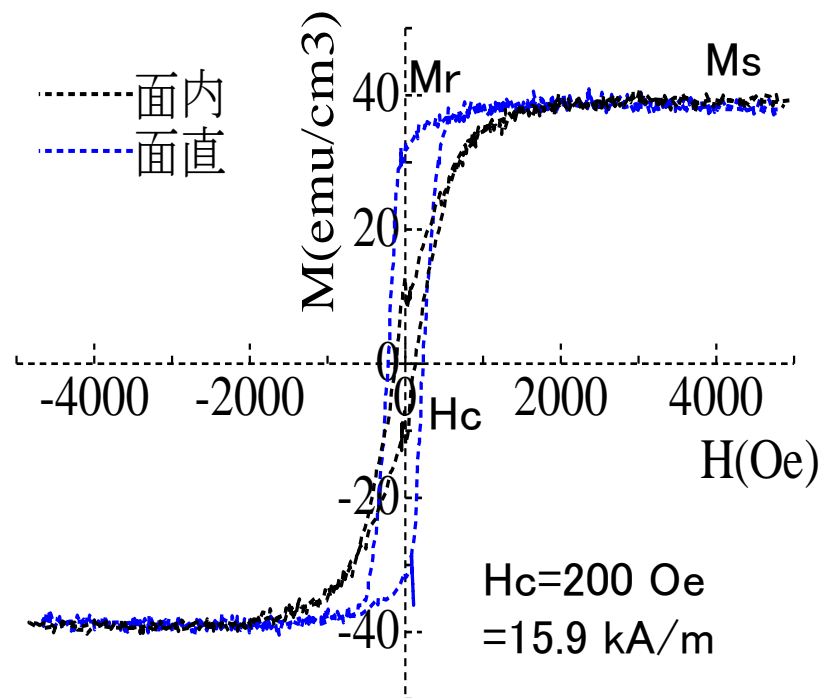


- ▶ 中野パーマロイのHP
http://www.nakano-permalloy.co.jp/j_permalloy_pb.html
より



セミハード磁性

- ▶ 物理システム工学実験「磁性」で作製している $\text{Y}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$ の磁化曲線は、膜面に垂直な磁界に対し明瞭なヒステリシスを示す。
- ▶ 1つの向きに強い磁界を加えていったん飽和磁化 M_s に達した後、磁界を取り去っても、残留磁化 M_r が残る。
- ▶ 磁化を反転させるには、保磁力 H_c より大きな磁界を加えなければならない。

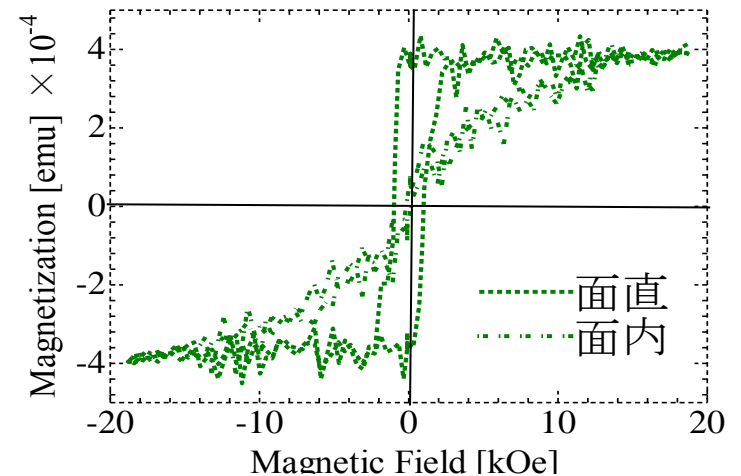
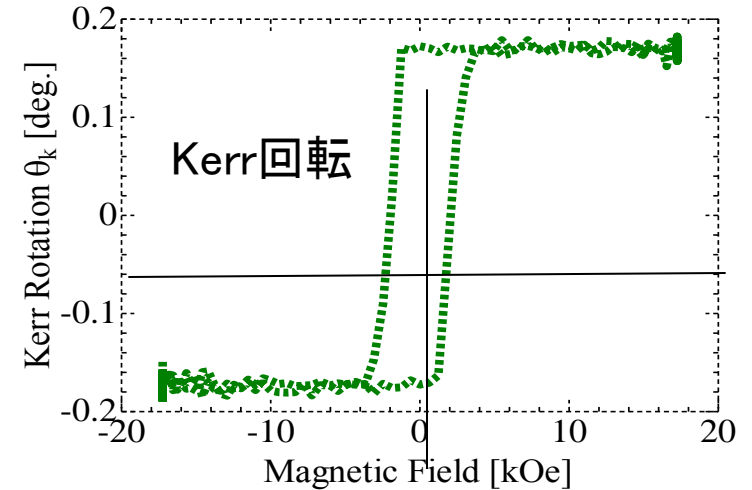


$\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_{10}\text{O}_{12}$
ガラス基板 650°C焼成
塗布回数10回



ハード磁性：Co₆₆Cr₁₇Pt₁₇

- ▶ 次世代ハードディスクは垂直磁気記録になるといわれている。
- ▶ 垂直媒体としては、CoCrPt系の薄膜が検討されている。



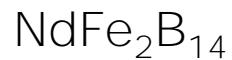
磁石のいろいろ



フェライト磁石



ネオジウム磁石



サマコバ磁石



アルニコ磁石



ラバー磁石



キャップ磁石

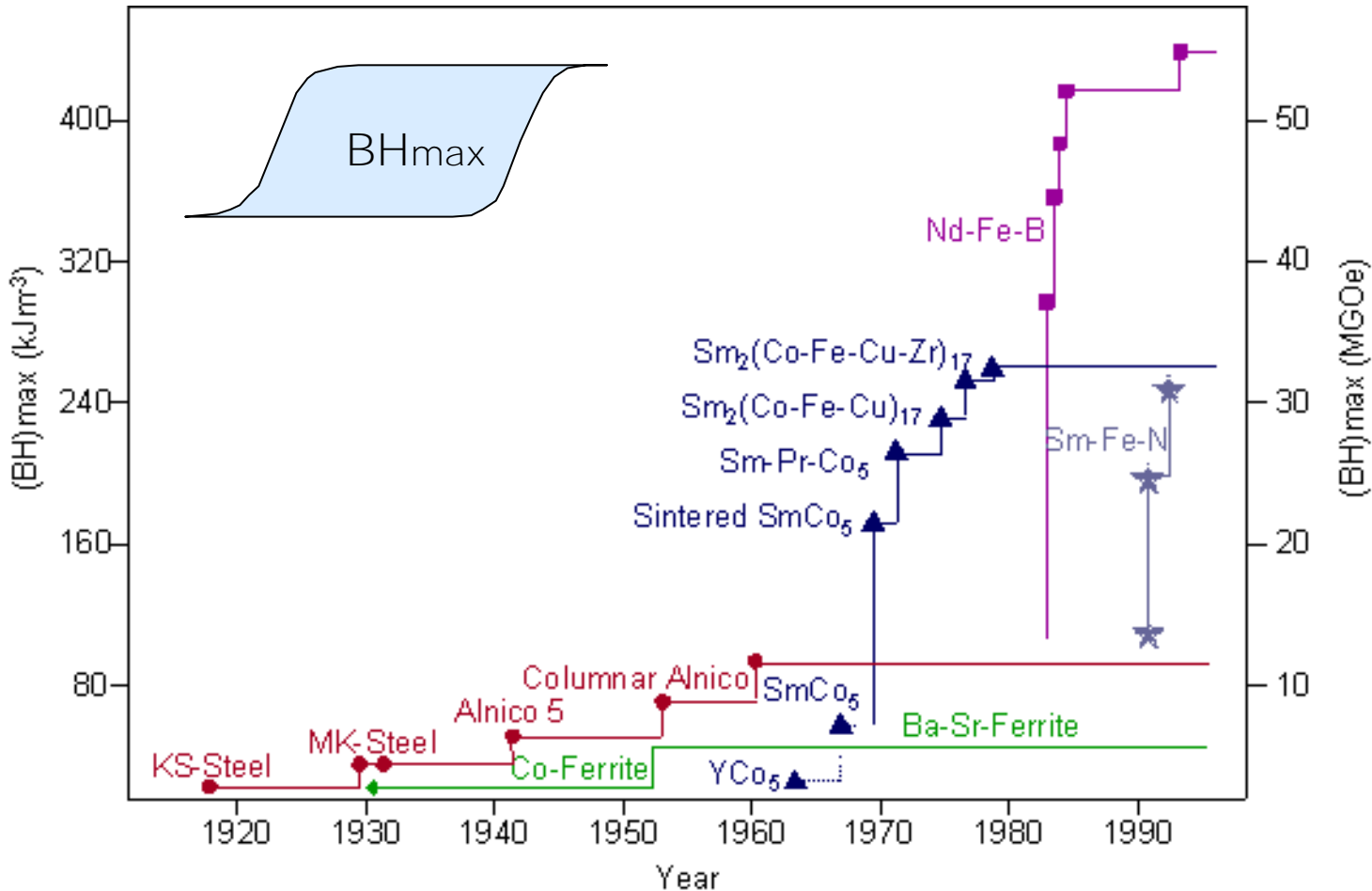


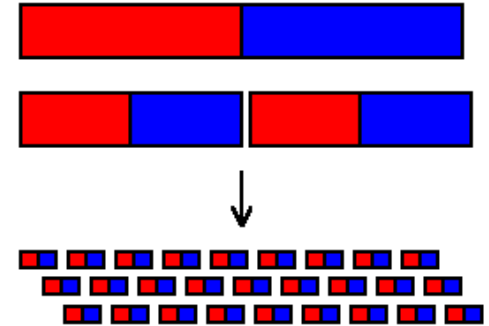
磁石応用製品



永久磁石の最大エネルギー積(BH)max の変遷

---(http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic_materials/history.htm)-----





1.知っているのと得をする磁性の基礎

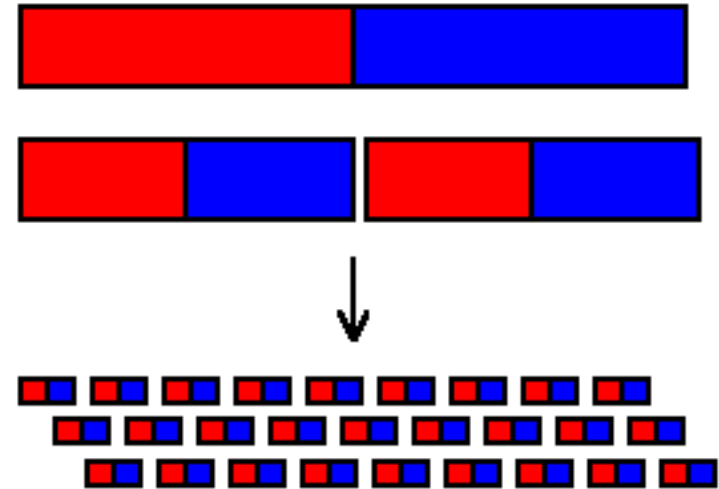
1.3

磁石をどんどん分割すると？



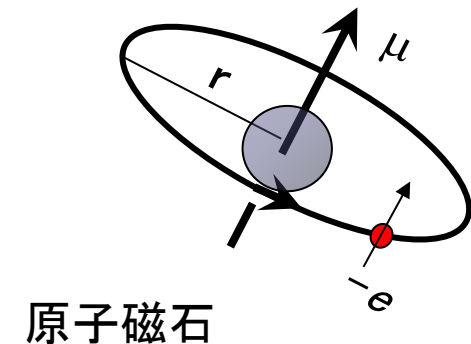
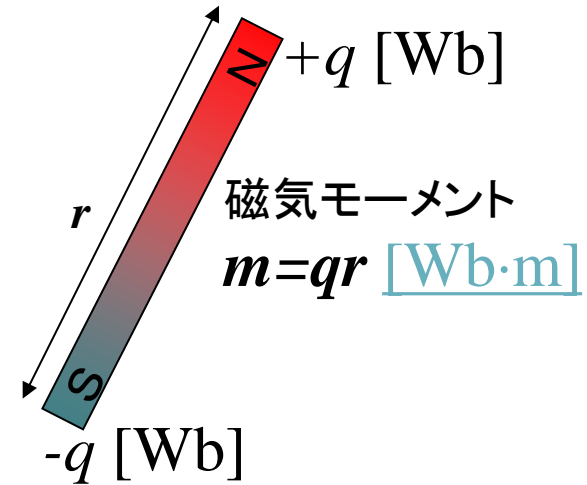
磁石をどんどん分割すると？

- ▶ 磁石は分割しても小さな磁石ができるだけ。
- ▶ 両端に現れる磁極の大きさ(単位 Wb/cm^2)は小さくしても変わらない。
- ▶ N極のみ、S極のみを単独で取り出せない。



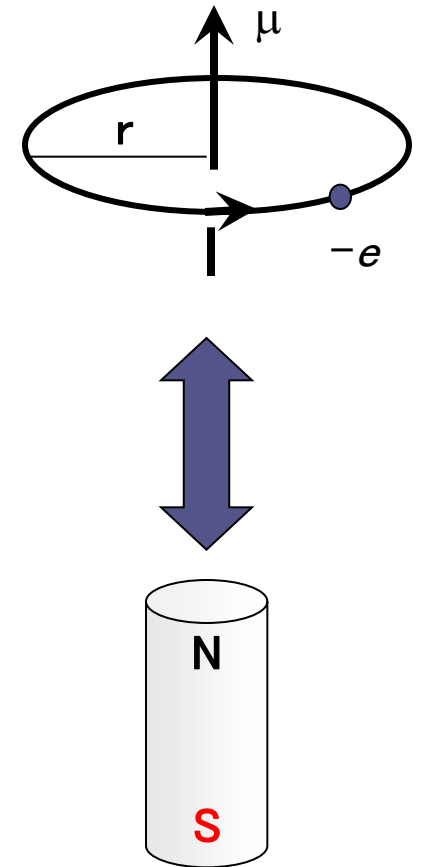
原子磁石の成り立ち：電子軌道とスピン

- ▶ さらにどんどん分割して
原子のレベルに達しても
磁極はペアで現れる
- ▶ この究極のペアにおける
磁極の大きさと間隔の積を
磁気モーメントとよぶ
- ▶ 原子においては、電子の軌道運動による電流と電子のスピンによって磁気モーメントが生じる。



環状電流と磁気モーメント

- ▶ 電子の周回運動→環状電流
- e [C]の電荷が半径 a [m]の円周上を線速度 v [m/s]で周回
→1周の時間は $2\pi a/v$ [s]
→電流は $i=-ev/2\pi a$ [A]。
- ▶ 磁気モーメントは、電流値 i に円の面積 $S=\pi a^2$ をかけることにより求められ、 $\mu=iS=-eav/2$ となる。
- ▶ 一方、角運動量は $\Gamma=maav$ であるから、これを使うと磁気モーメントは $\mu=-(e/2m)\Gamma$ となる。

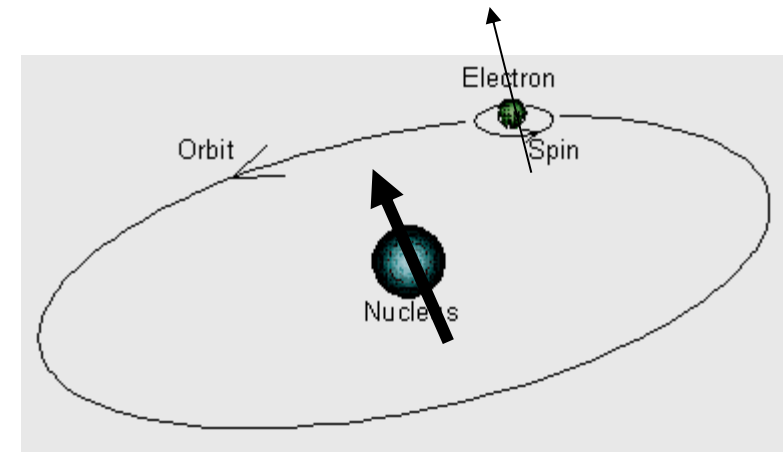


軌道角運動量の量子的扱い

- ▶ 量子論によると角運動量は \hbar を単位とするとびとびの値をとり、電子軌道の角運動量は $\Gamma_l = \hbar L$ である。 L は整数値をとる
- ▶ $\mu = -(e/2m) \Gamma$ に代入すると次式を得る。
軌道磁気モーメント
- ▶ $\mu_l = -(e\hbar/2m)L = -\mu_B L$

ボーア磁子 $\mu_B = e\hbar/2m = 9.27 \times 10^{-24} [\text{J/T}]$

単位: $[\text{J/T}] = [\text{Wb}^2/\text{m}] / [\text{Wb}/\text{m}^2] = [\text{Wb} \cdot \text{m}]$



もう一つの角運動量：スピン

- ▶ 電子スピン量子数 s の大きさは $1/2$
- ▶ 量子化軸方向の成分 s_z は $\pm 1/2$ の2値をとる。
- ▶ スピン角運動量は \hbar を単位として $\Gamma_s = \hbar s$ となる。
- ▶ スピン磁気モーメントは $\mu_s = -(e/m)\Gamma_s$ と表される。
- ▶ 従って、 $\mu_s = -(e\hbar/m)s = -2\mu_B s$
- ▶ 実際には上式の係数は、2より少し大きな値 g (自由電子の場合 $g=2.0023$) をもつので、 $\mu_s = -g\mu_B s$ と表される。



スピンとは？

- ▶ ディラックの相対論的電磁気学から必然的に導かれる。
- ▶ スピンはどのように導入されたか
 - ▶ Na(ナトリウム)のD線のゼーマン効果(磁界をかけるとスペクトル線が2本に分裂する。)を説明するためには、電子があるモーメントを持っていてそれが磁界に対して平行と反平行とでゼーマンエネルギーが異なると考える必要があったため、導入された量子数である。
- ▶ 電子スピン、核スピン





[参考] スピン発見のきっかけになった ナトリウムの発光スペクトル

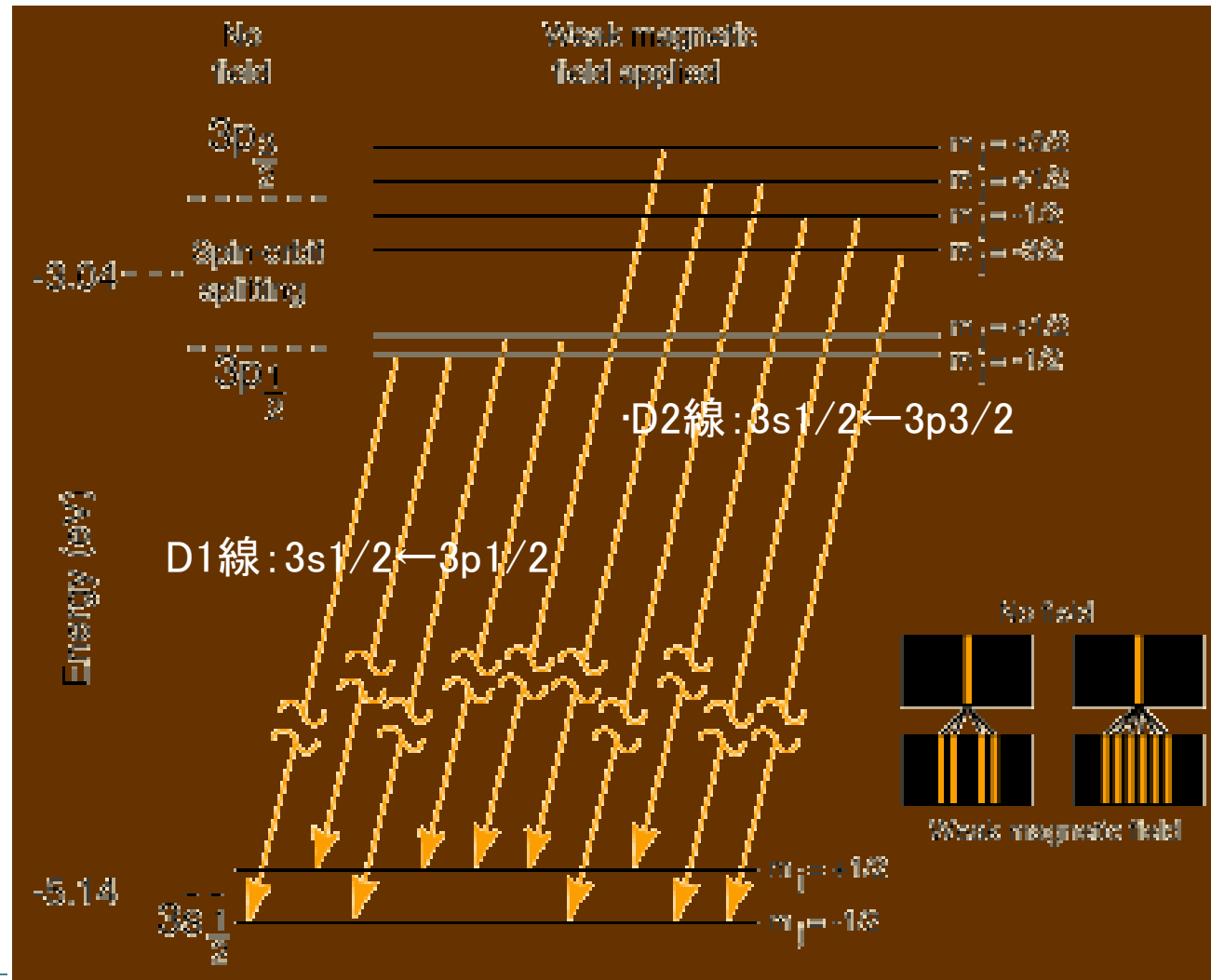
- ▶ NaランプはD線と呼ばれる波長589.6nmと589.0nmの2本のオレンジ色の輝線スペクトルを示し、トンネルなどの道路照明に使われている。

NaのD線発光に対応する遷移

- ・ D1線 : $3s_{1/2} \leftarrow 3p_{1/2}$
- ・ D2線 : $3s_{1/2} \leftarrow 3p_{3/2}$

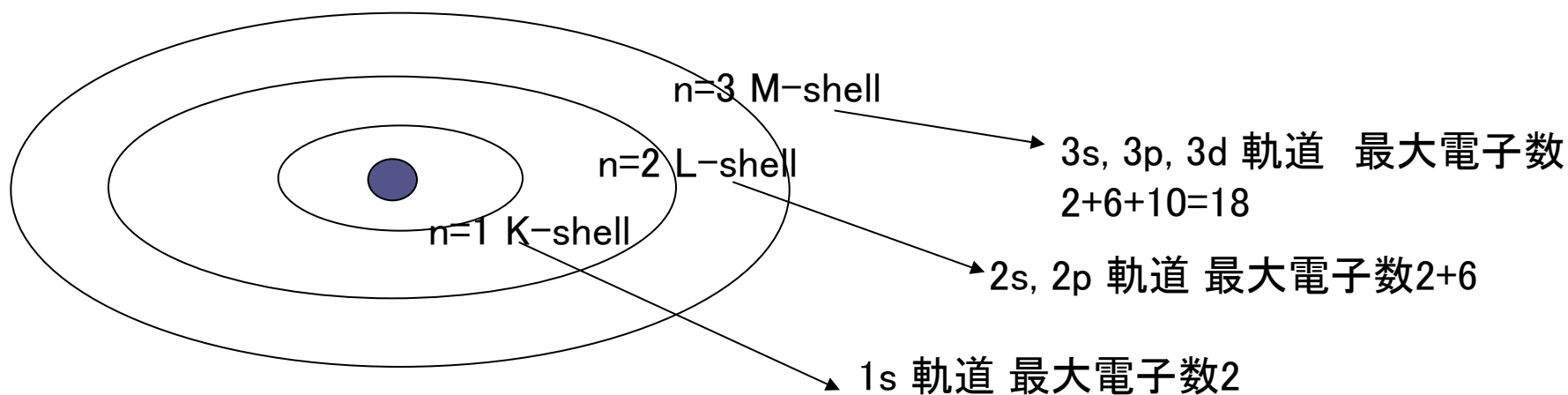
[参考] スピン発見のきっかけになった実験 NaのD線のゼーマン効果

- ▶ NaのD線に磁場を加えるとスペクトル線の分裂が起きる。
- ▶ この分裂は軌道によるものでは説明できず、スピンを導入することで説明された。



電子の軌道占有の規則

1. 各軌道には最大2個の電子が入ることができる
2. 電子はエネルギーの低い軌道から順番に入る
3. エネルギーが等しい軌道があれば、まず電子は1個ずつ入り、その後、2個目が入っていく



1.知っている と 得をする 磁性の基礎

1.4

なぜ初磁化状態では磁化がないのか



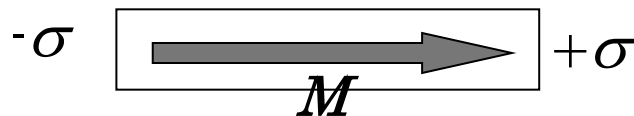
初磁化状態と磁区

- ▶ 磁化が特定の方向を向くとすると、N極からS極に向かって磁力線が生じます。この磁力線は考えている試料の外を通過しているだけでなく、磁性体の内部も貫いています。この磁力線を**反磁界**といいます。反磁界の向きは、磁化の向きとは反対向きなので、磁化は回転する静磁力を受けて不安定となります。
- ▶ 磁化の方向が逆方向の縞状の**磁区**と呼ばれる領域に分かれるならば、反磁界がうち消し合って静磁エネルギーが低下して安定するのです

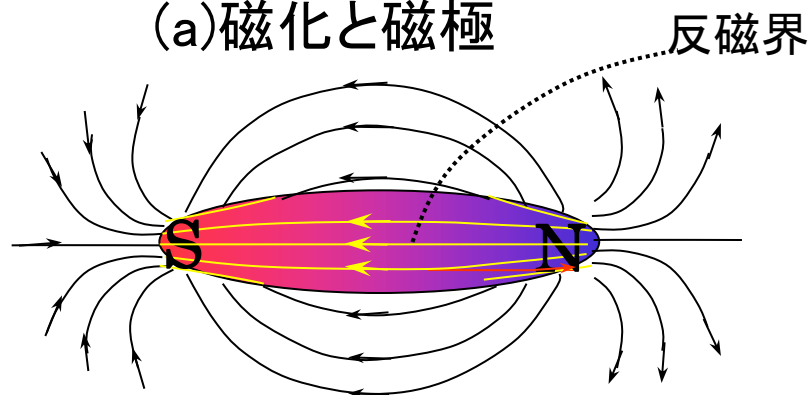


反磁界(demagnetization field)

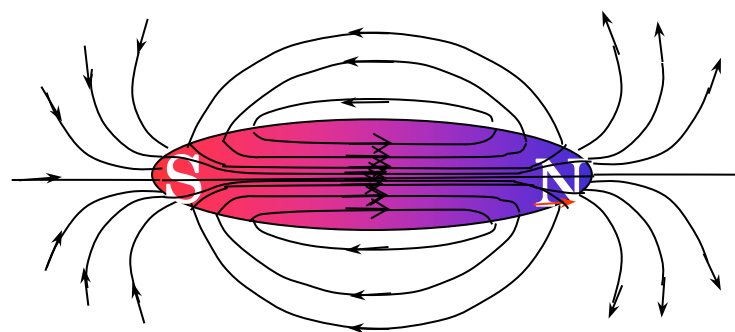
- ▶ 磁性体表面の法線方向の磁化成分を M_n とすると、表面には単位面積あたり $\sigma = M_n$ という大きさの磁極 (Wb/m^2) が生じる。
- ▶ 磁極からはガウスの定理によって全部で σ / μ_0 の磁力線がわき出す。このうち反磁界係数 N を使って定義される磁力線 NM は内部に向かっており、残りは外側に向かっている。すなわち磁石の内部では、 M の向きとは逆方向の**反磁界**が存在する。
- ▶ 外部では磁束線は磁力線に一致する。



(a) 磁化と磁極



(b) 磁力線



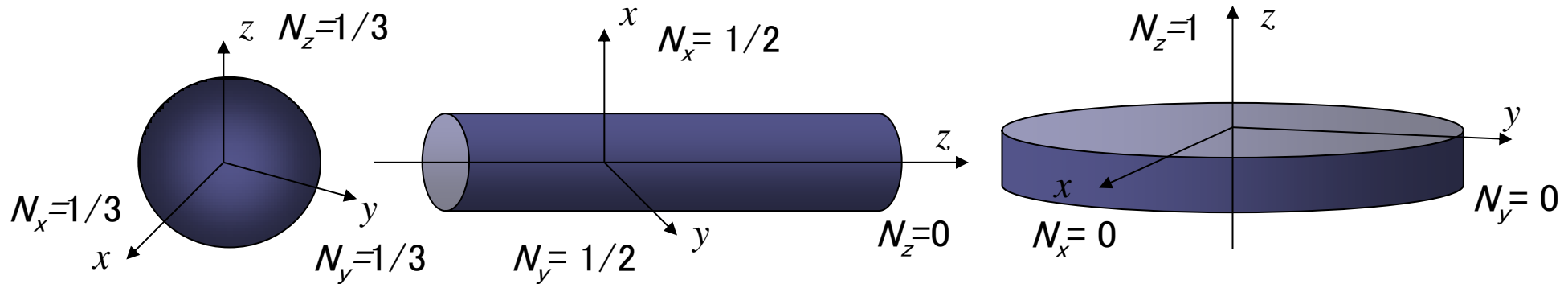
(c) 磁束線



反磁界係数 N (近角強磁性体の物理より)

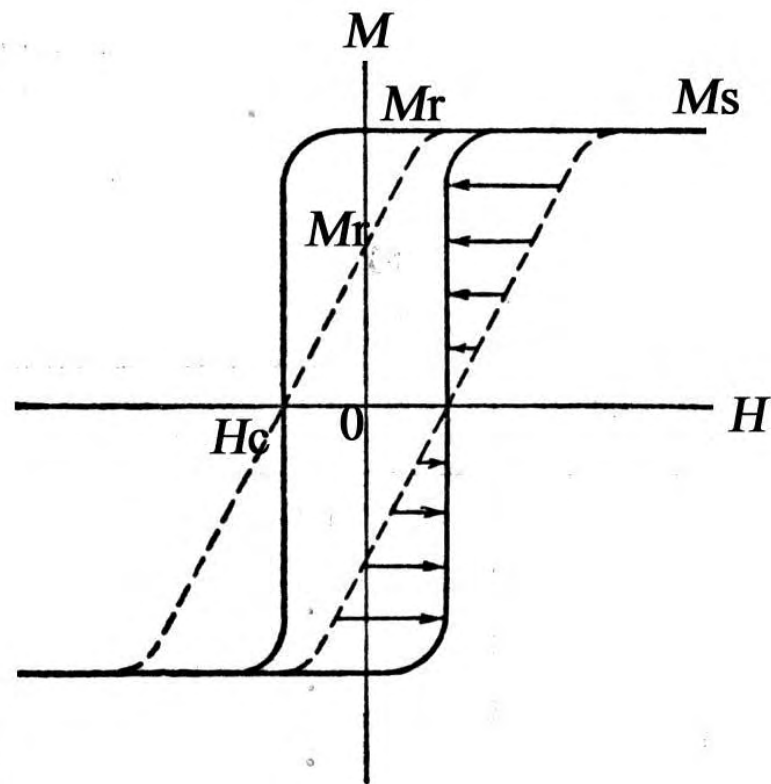
N の x, y, z 成分を N_x, N_y, N_z とすると、 $H_{di} = -N_i M_i / \mu_0$ ($i=x, y, z$) と表され、 N_x, N_y, N_z の間には、 $N_x + N_y + N_z = 1$ が成立する。

- ▶ 球形: $N_x = N_y = N_z = 1/3$
- ▶ z 方向に無限に長い円柱: $N_x = N_y = 1/2, N_z = 0$
- ▶ 無限に広い薄膜の場合: $N_x = N_y = 0, N_z = 1$ となる。
- ▶ 実効磁界 $H_{\text{eff}} = H_{\text{ex}} - NM / \mu_0$



反磁界補正

- ▶ N の x, y, z 成分を N_x, N_y, N_z とすると、 $H_{di} = -N_i M_i / \mu_0$ ($i=x, y, z$)と表され、 N_x, N_y, N_z の間には、 $N_x + N_y + N_z = 1$ が成立する。
- ▶ 球形： $N_x = N_y = N_z = 1/3$
- ▶ z 方向に無限に長い円柱： $N_x = N_y = 1/2, N_z = 0$
- ▶ 無限に広い薄膜の場合： $N_x = N_y = 0, N_z = 1$ となる。
- ▶ 実効磁界 $H_{\text{eff}} = H_{\text{ex}} - NM / \mu_0$



(近角強磁性体の物理より)



反磁界と静磁エネルギー

- ▶ 磁化 M が反磁界 $-H_d$ のもとにおかれると
 $U=M \cdot H_d$ だけポテンシャルエネルギーが高くなる。
- ▶ 一様な磁界 H 中の磁気モーメント M に働くトルク T は
 $T=-MH \sin \theta$
- ▶ 磁気モーメントのもつポテンシャル E は
 $U=\int T d\theta = -\int_0^\theta MH \sin \theta d\theta = MH(1-\cos \theta)$
- ▶ エネルギーの原点はどこにとってもよいので
ポテンシャルエネルギーは $U=-M \cdot H$ と表される。 $H=-H_d$ を代
入すると反磁界によるポテンシャルの増加は
 $U=M \cdot H_d$



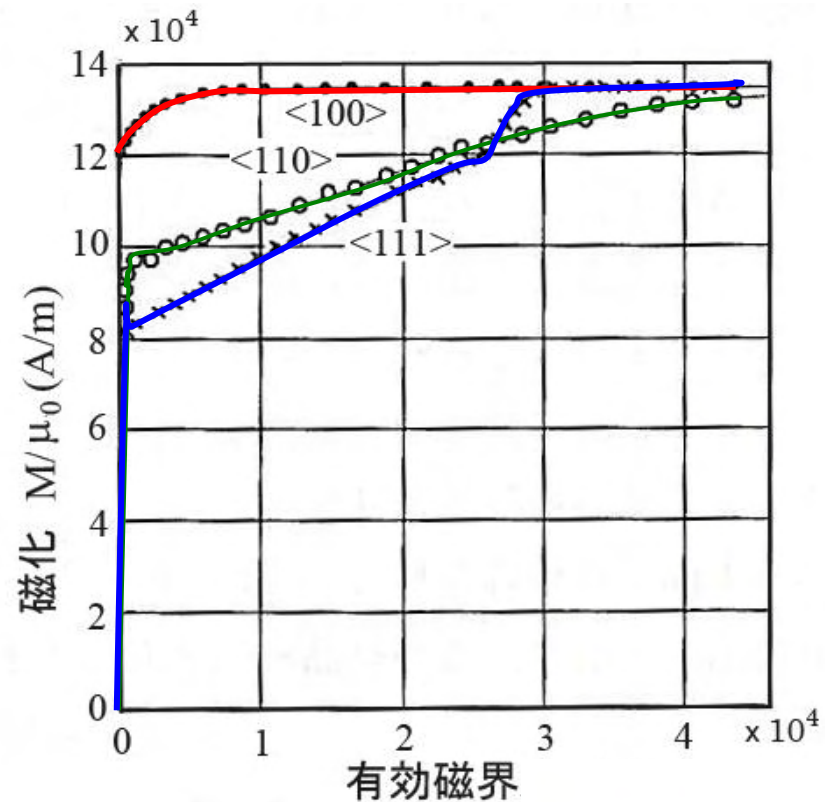
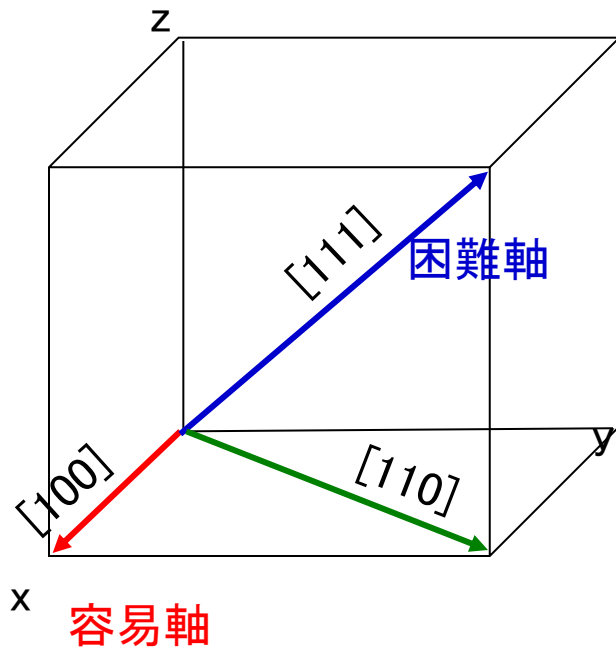
磁気異方性

- ▶ 磁性体は半導体と違って形状・寸法・結晶方位とか磁化の方位などによって物性が大きく変化する。
- ▶ 1つの原因は上に述べた反磁界係数で、**形状磁気異方性**と呼ばれます。反磁界によるエネルギーの損を最小化することが原因です。
- ▶ このほかの原因として重要なのが**結晶磁気異方性**です。結晶磁気異方性というのは、磁界を結晶のどの方位に加えるかで磁化曲線が変化する性質です。
- ▶ 電子軌道は結晶軸に結びついているので、磁氣的性質と電子軌道との結びつき(スピン軌道相互作用)を通じて、磁性が結晶軸と結びつくのです。半導体にも、詳しい測定をすると異方性を見ることができます。これに比べ一般に半導体の電子軌道は結晶全体に広がっているため、平均化されて結晶軸に依存する物性が見えにくいのです。



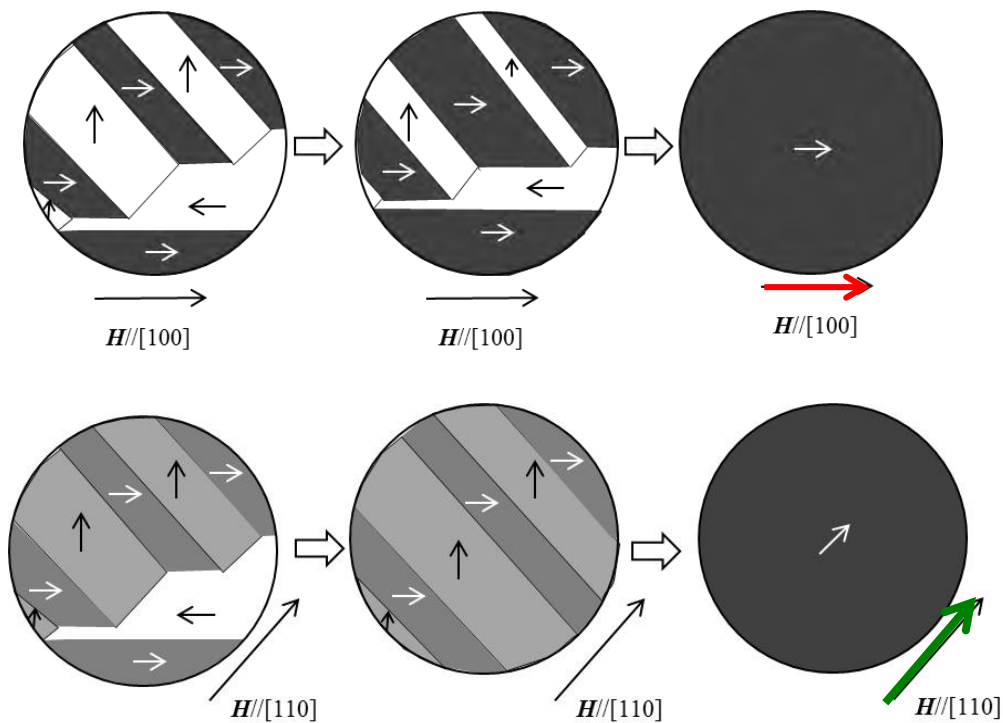
結晶磁気異方性

- ▶ 磁化しやすさは、結晶の方位に依存する。
- ▶ 鉄は立方晶であるが、 $[100]$ が容易軸、 $[111]$ は困難軸

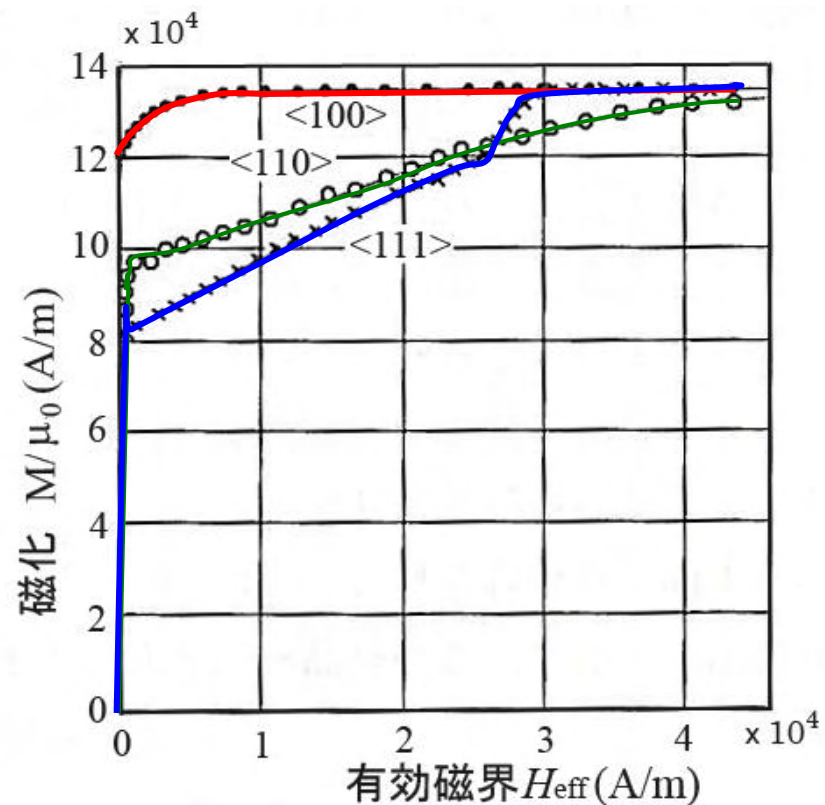


Feの結晶磁気異方性と磁壁移動・磁化回転

磁壁の移動と磁化回転

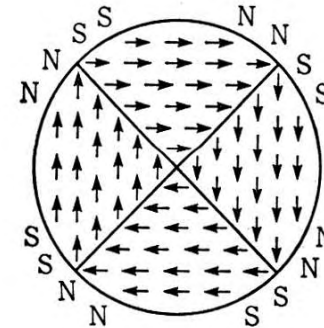


Feの磁化曲線

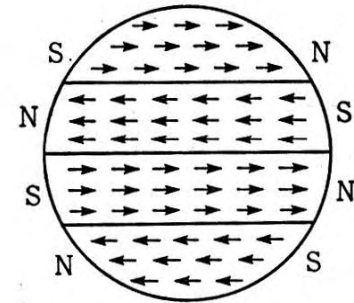


円板磁性体の磁区構造

- ▶ 全体が磁区に分かれることにより、全体の磁化がなくなっている。これが初磁化状態である。
- ▶ 磁区の内部では磁化は任意の方向をランダムに向いている訳ではない。
- ▶ 磁化は、結晶の方位と無関係な方向を向くことはできない。磁性体には**磁気異方性**という性質があり、磁化が特定の結晶軸方位(たとえばFeでは[001]方向および等価な方向)を向く性質がある。
- ▶ [001]容易軸では図のように(001)面内では[100][010][−100][0−10]の4つの方向を向くので90°磁壁になる。
- ▶ [111]容易軸では



(a) 磁気異方性の大きい立方晶円板の磁区構造

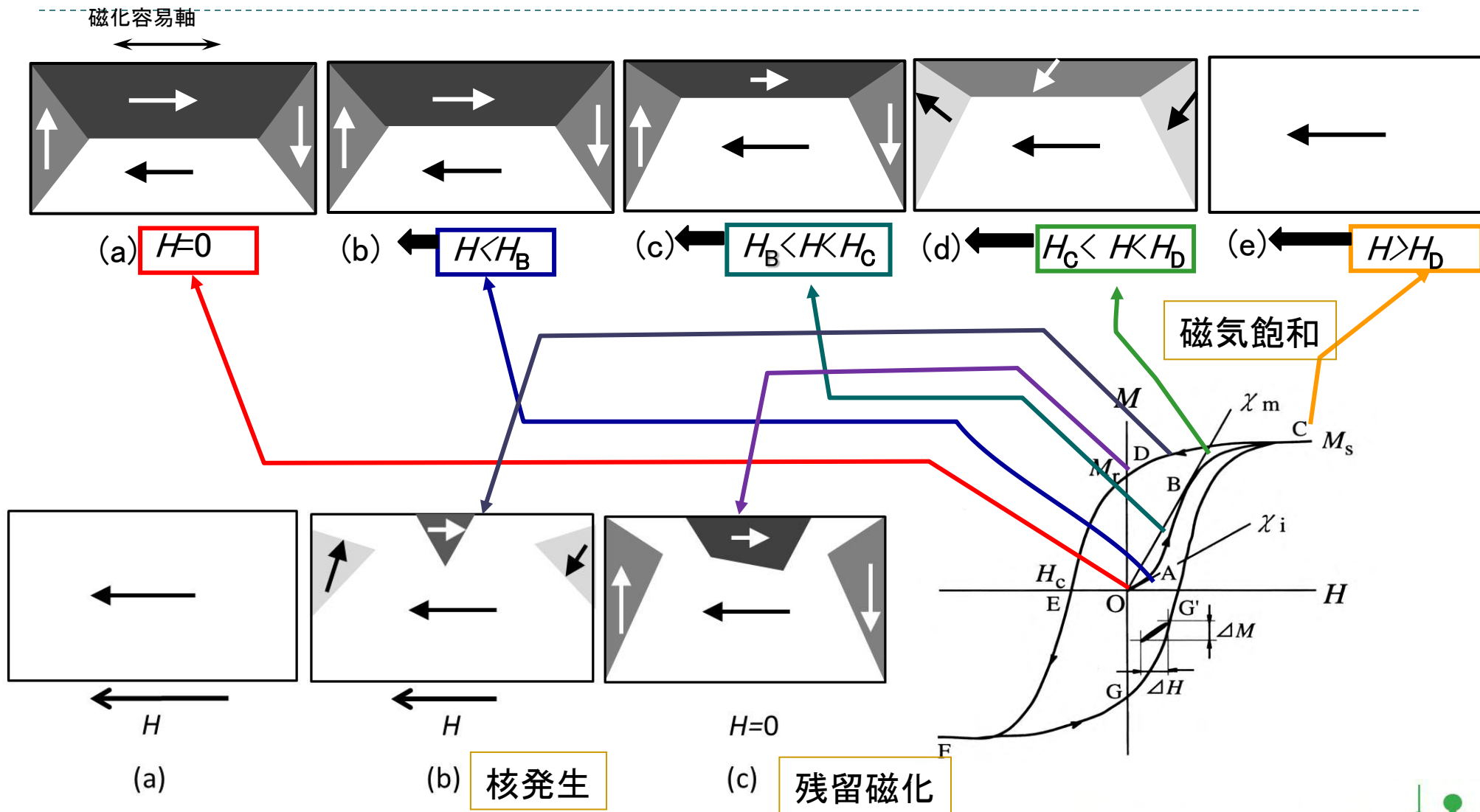


(b) 磁気異方性の大きい一軸晶円板の磁区構造

(近角：強磁性体の物理)



ヒステリシスを磁区で説明する



さまざまな磁区とマイクロマグネティクス

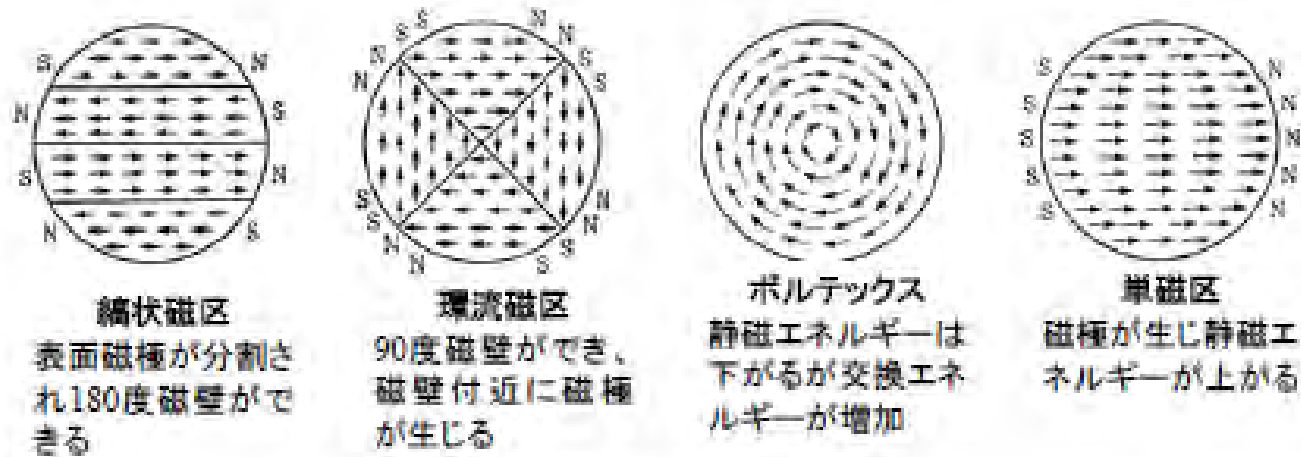


Fig. 21 さまざまな磁区

- ▶ Figは、結晶の対称性により磁区が変わる様子の例として、縞状磁区(stripe domain)と環流磁区(closure domain)を示している。磁性体を微細化して直径 $1\mu\text{ m}$ 付近になると、スピンは面内に分布してvortex状態となり中心部に垂直方向のスピンの成分をもつようになる。さらに微細化すると単磁区になる。



微小磁区のMFM観察

- ▶ 磁区の観察には、ビッター法といって、磁性微粒子を含むコロイドを磁性体上に滴下して光学顕微鏡で観察する方法が古くから使われている。このほか磁気光学顕微鏡、ローレンツ電子顕微鏡、磁気力顕微鏡、走査型ホール顕微鏡、走査型SQUID顕微鏡、スピン偏極電子顕微鏡、X線MCD顕微鏡などで観察することが可能である。Fig. 22には、いくつかの例について筆者のMFM観察結果を示す

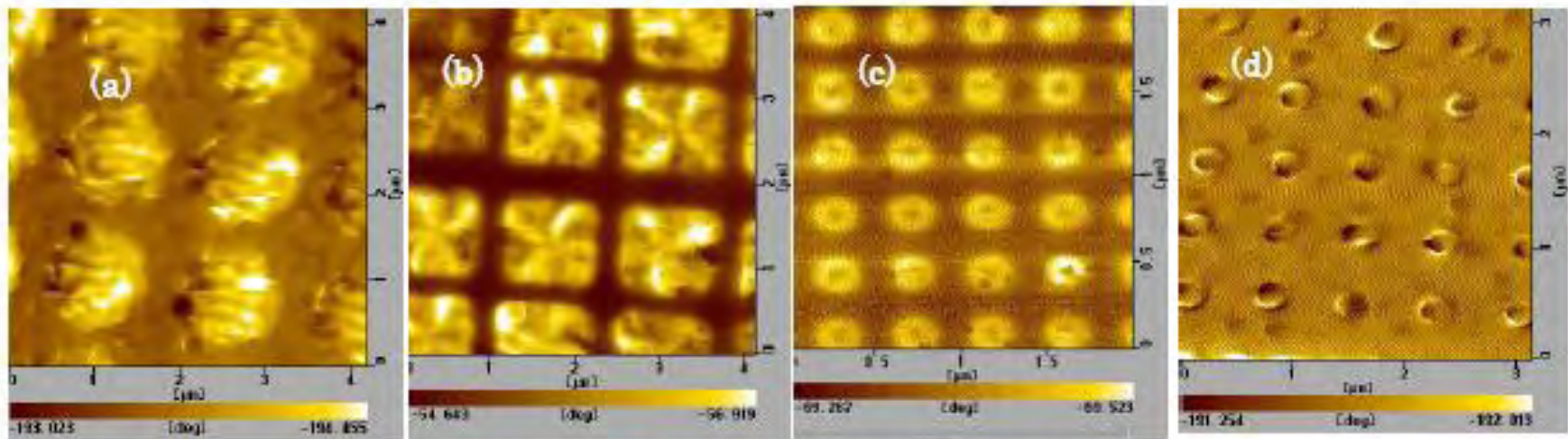


Fig. 22 MFMで観察した微細ドットのスピ構造 (a) 縞状磁区(Co円形ドット $1.2\mu\text{m}\phi$)、(b) 環流磁区(パーマロイ正方形ドット $1.2\mu\text{m}$)、(c) ボルテックス(パーマロイ円形ドット $300\text{nm}\phi$)、(d) 単磁区(Co円形ドット $100\text{nm}\phi$)

