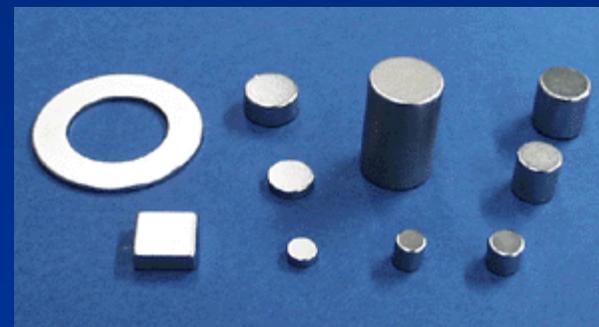


# 身近な磁性

- 磁石(永久磁石)は何で出来ている？
    - 鉄？
    - 磁石を販売しているある会社のHPによると、ネオジウム $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 、サマコバ $\text{SmCo}_5$ 、フェライト( $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ )、アルニコ( $\text{AlNiCo}$ )というのが書かれている。\*
    - 黒板用のボタン磁石：ほとんどがフェライトのボンド磁石(磁性粉と樹脂を混合し成形した磁石)
    - 曲げられる磁石：ラバー磁石(磁性粉をゴムに混合して成形した磁石)
- (\*<http://www.seikosg.com/>)

# 磁性体の用途

- 磁気記録、光磁気記録→IT
- 光アイソレータ→光ファイバ通信
- 永久磁石→モータ、アクチュエータ
- 変圧器、インダクター用磁心



# コンピュータと磁気記録



半導体メモリ

ディスク媒体



ロータリー・  
アクチュエーター

磁気ヘッド

ハードディスクドライブ

- コンピュータのプログラムやデータを格納しておくのがハードディスクHDと呼ばれる磁気記録装置である。
- 画面からプログラムを起動すると、そのプログラムがHDから半導体のメモリに転送される。CPUは、メモリ上の各アドレスに置かれた命令を解読して、プログラムを実行する。

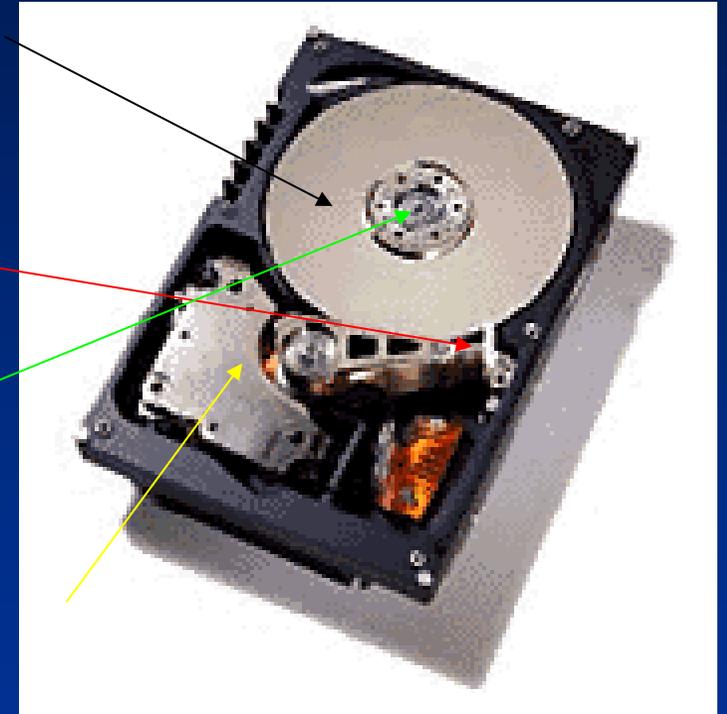
# ハードディスクのどこに磁性体 が使われているか

ディスク媒体：CoCrTaなど硬質磁性合金が使われている

磁気ヘッド：Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>など軟質磁性体が使われている

スピンドルモータ：ネオジム磁石と電磁石の組み合わせ

ロータリー・アクチュエータ：ネオジム磁石と電磁石



# ハードディスク分解のサイト紹介

- おもしろ分解博物館  
<http://www.gijyutu.com/ooki/bunkai/8inch-HDD/8inch-HDD.htm>
- 桜井式モノ分解教室パート2  
<http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/senet/jikken/HDD.htm> (浜島書店のサイト)
- ハードディスク分解絵巻  
<http://cobweb.tamacc.chuo-u.ac.jp/chitta/works/>

# ハードディスク媒体

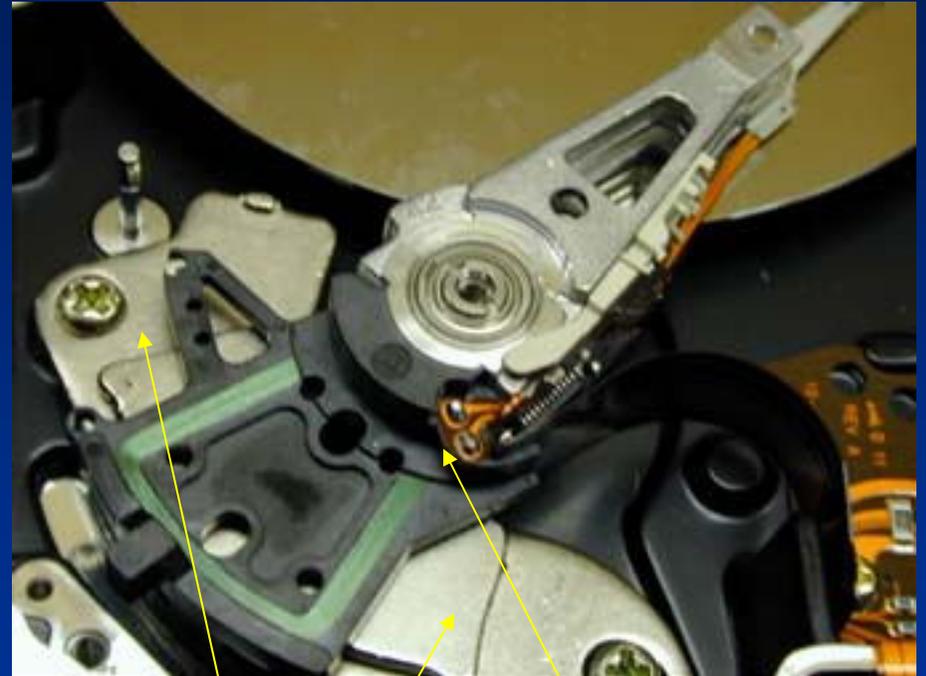
- ディスク媒体は記録用の半硬質磁性体膜を堆積したアルミ円板である。



- [桜井式モノ分解教室パート2](http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/se-net/jikken/HDD.htm)  
<http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/se-net/jikken/HDD.htm> (浜島書店のサイト)

# 磁気ヘッドアクチュエータ

- 磁気ヘッドは、ジンバルと呼ばれるヘッドアセンブリに搭載され、ロータリーアクチュエータで駆動される。



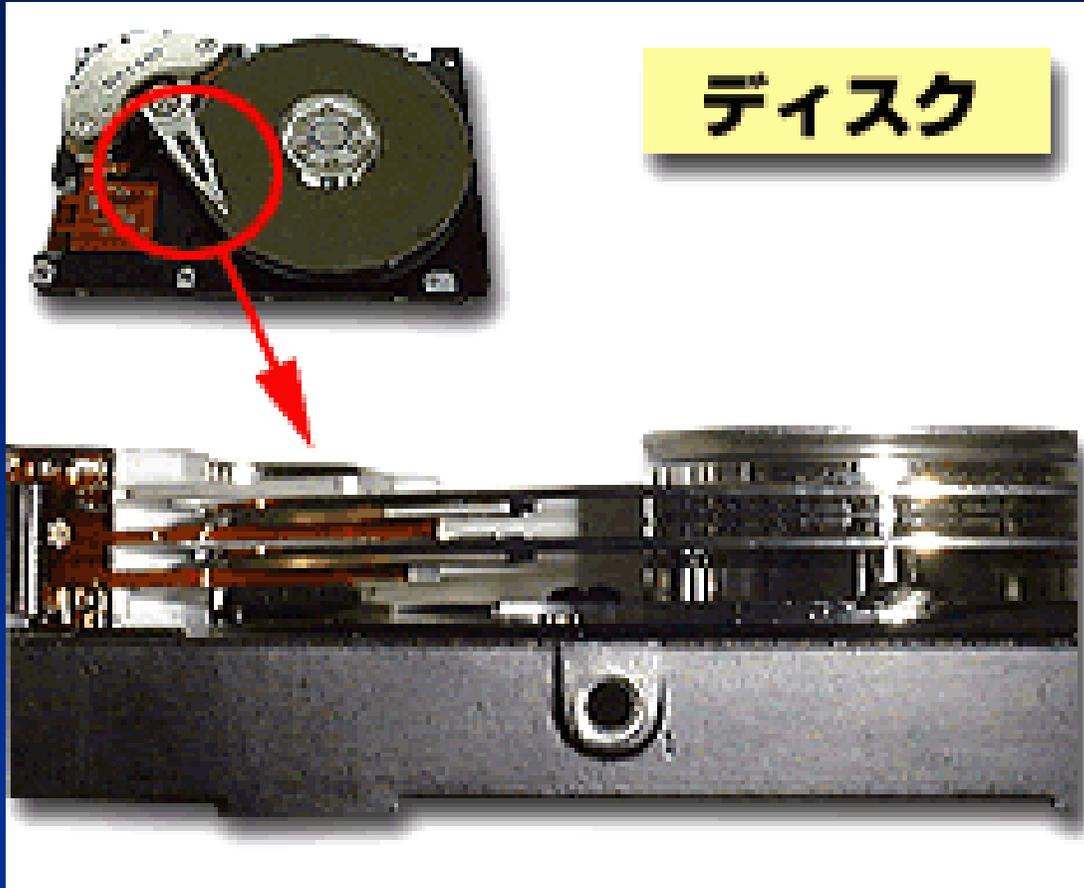
桜井式モノ分解教室パート2

<http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/senet/jikken/HDD.htm>

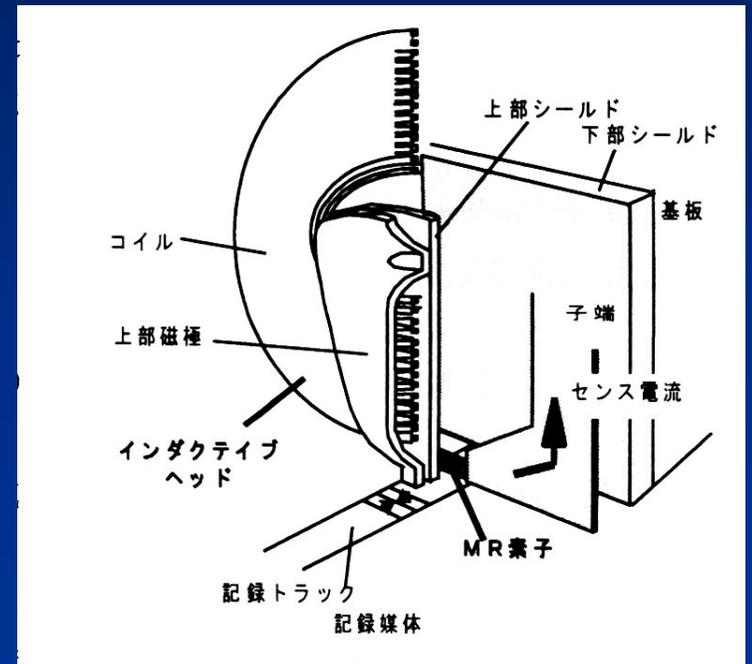
強力な磁石      ムービングコイル

# 磁気ヘッド拡大図

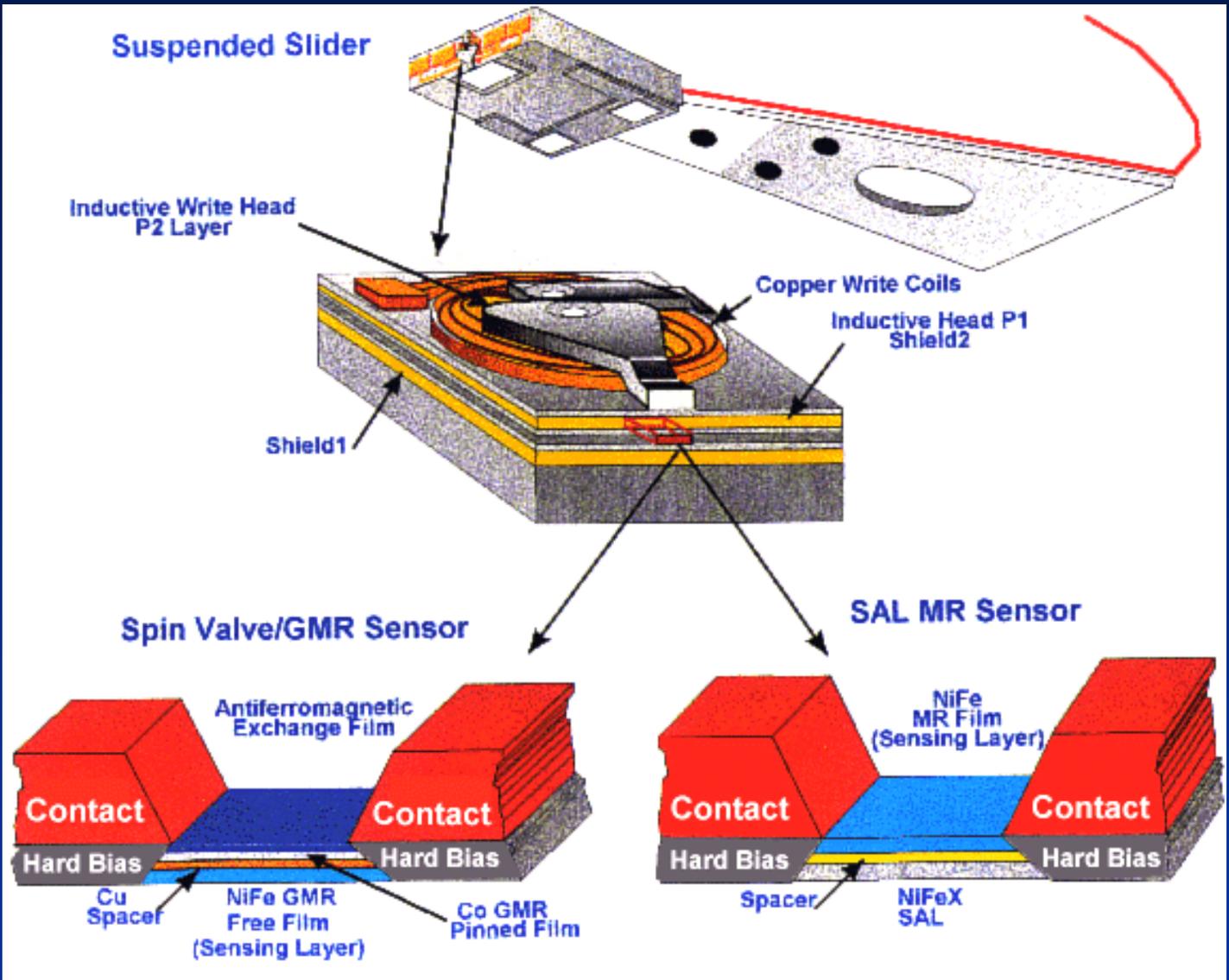
ディスク



IODATAのHPより



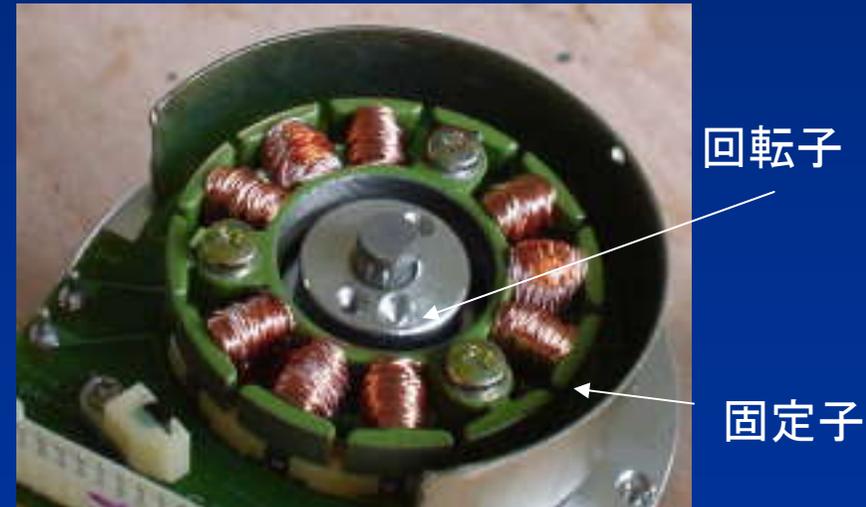
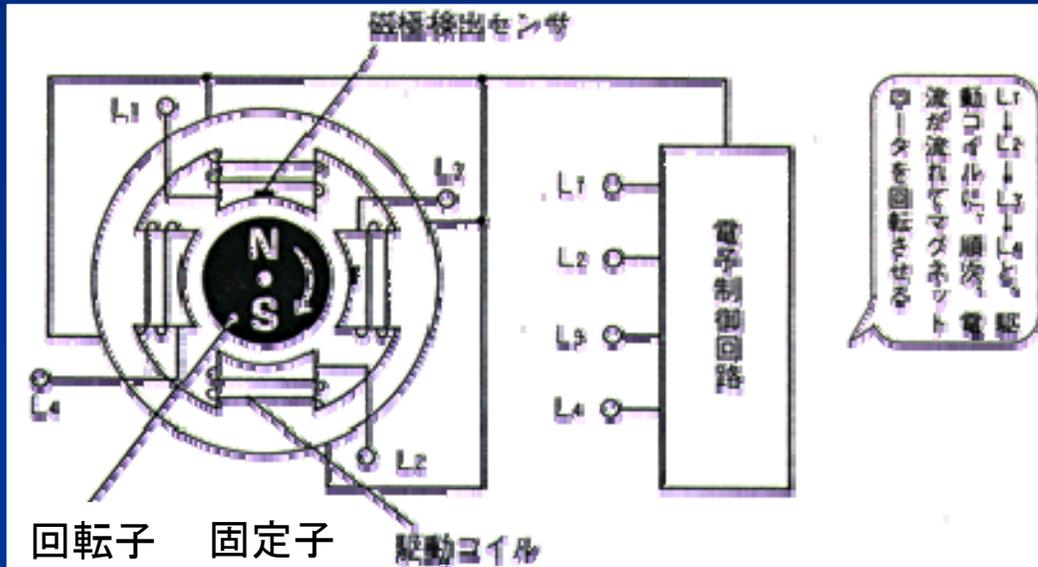
# 磁気ヘッド



IBMのHPより

# モーターと磁石

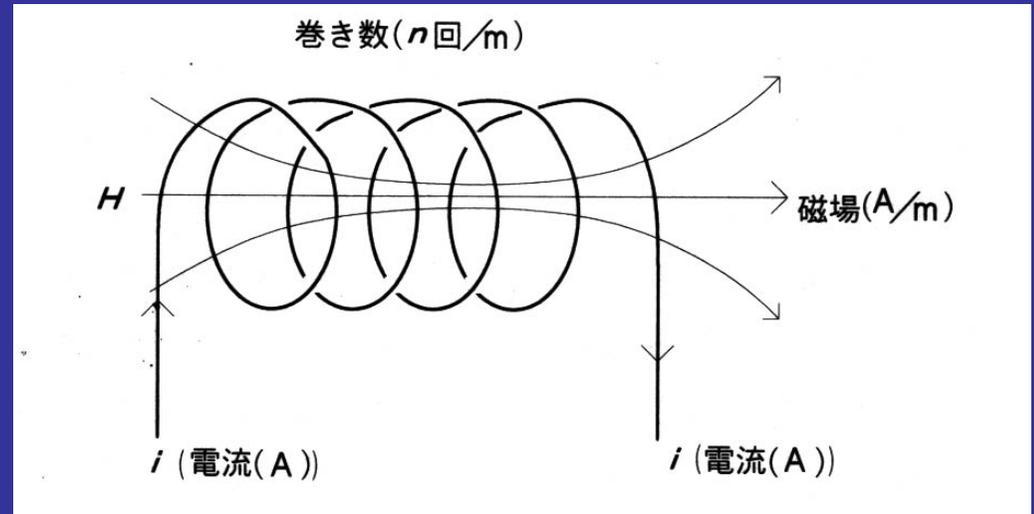
- 直流モーターは、回転子と称する磁石が、固定子と称する電磁石の中に置かれている。磁極の位置をホール素子で検出し、分割された電磁石に流される電流を順次切り替えることにより、磁界の回転を生じ、回転子に運動を与える。
- 固定子のコイルの磁心には軟質磁性体が使われている。



おもしろ分解博物館

<http://www.gijyutu.com/ooki/bunkai/JV-1500/jv-1500.htm> より

# 磁場の定義(1)

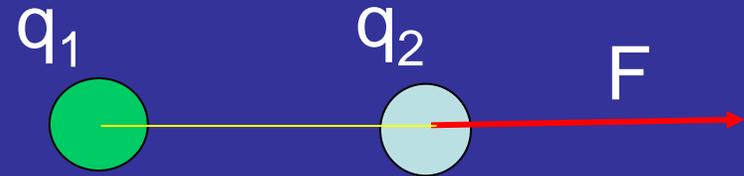


## 1. 電流による定義

- 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場\*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)

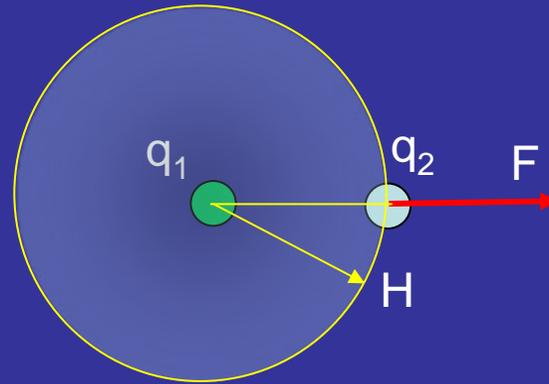


## 2. 力による定義

・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  $B$  [ $\text{T} = \text{Wb}/\text{m}^2$ ]と  $H$ を結びつける換算係数  $\mu_0$ 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 $F = q_1 q_2 / 4\pi \mu_0 r^2$

+ $[\text{T}]$ はテスラ、 $[\text{Wb}]$ はウェーバーと読む。

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

真空の透磁率 $\mu_0$ は、 $4\pi \times 10^{-7}[\text{H}/\text{m}]$ ここに $[\text{H}]$ はヘンリーと読む。

# 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 $H = 1[\text{Oe}] = 79.7[\text{A/m}]$ ;  $B = 100[\mu\text{T}] = 1[\text{G}]$
- 磁気分極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、

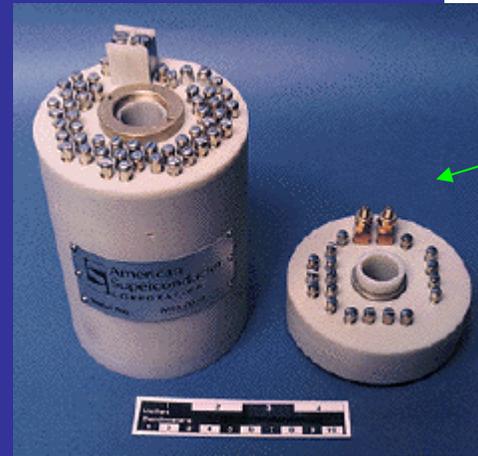
100A流すと $10^6\text{A/m}$ ;1.26T

- 鉄心電磁石

約 $B=2\text{T}$ 程度

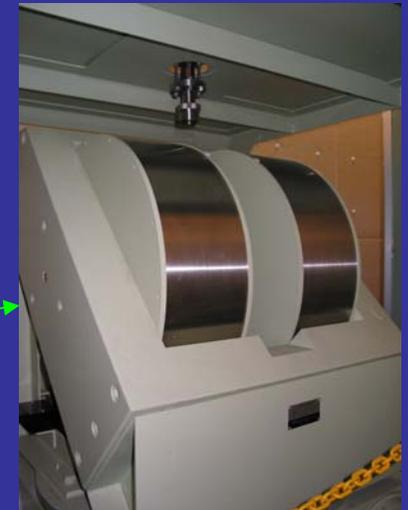
水冷コイル

空心ソレノイドコイル  
せいぜい10mT →



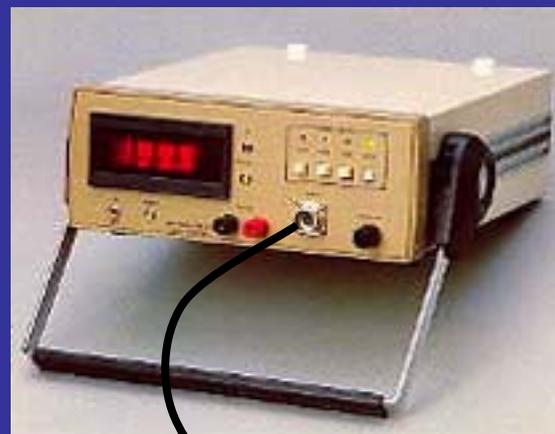
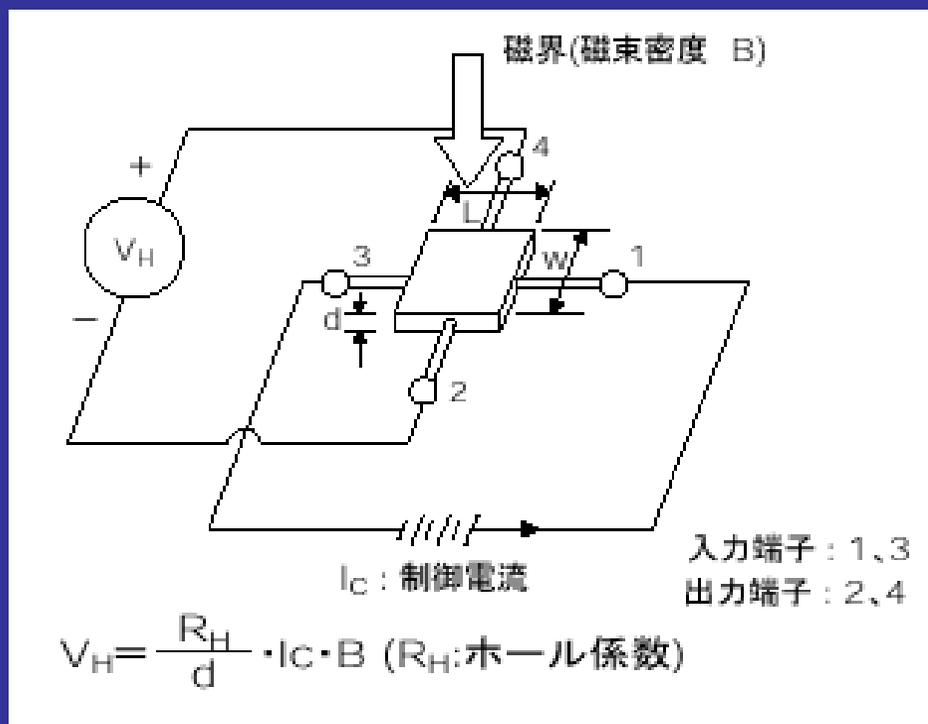
超伝導コイル  
最大10T

鉄心電磁石 →



# 磁界の測定

- ガウスマータ  
ホール素子で測定



ホール素子

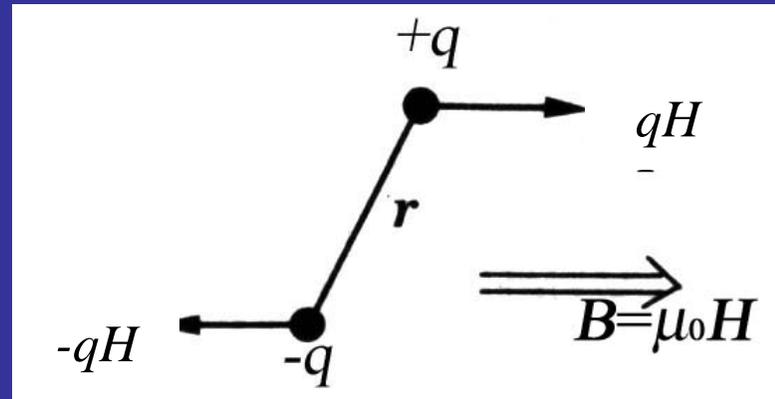
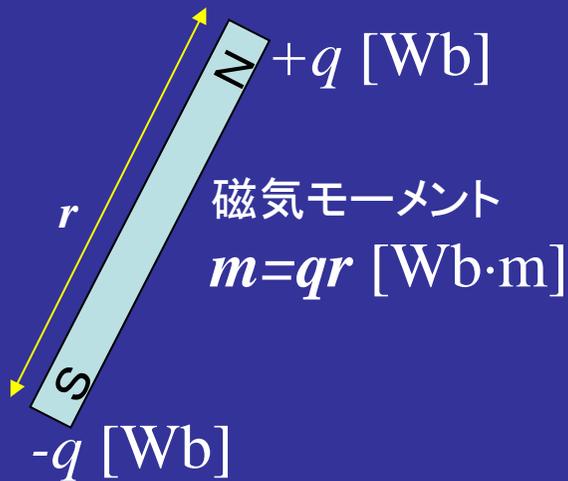


ホール・プローブ

# 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)
- 磁荷(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出来る。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

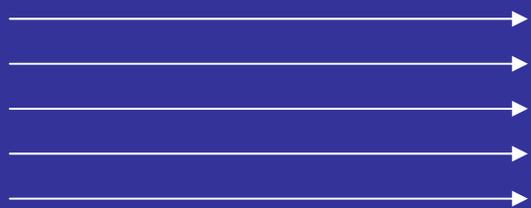
$$E = \int T d\theta = \int mH \sin \theta d\theta = -mH \cos \theta \longrightarrow E = -m \cdot H$$

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

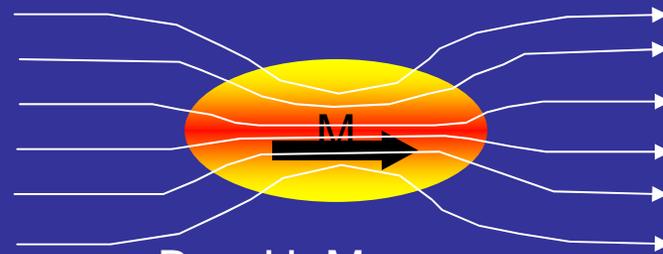
(高梨: 初等磁気工学講座)より

# 磁場 $H$ 、磁束密度 $B$ 、磁気分極 $M$

- 磁場 $H$ 中に置かれた磁気分極 $M$ をもつ磁性体の磁束密度は、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、 $B = \mu_0 H + M$



$$B = \mu_0 H$$

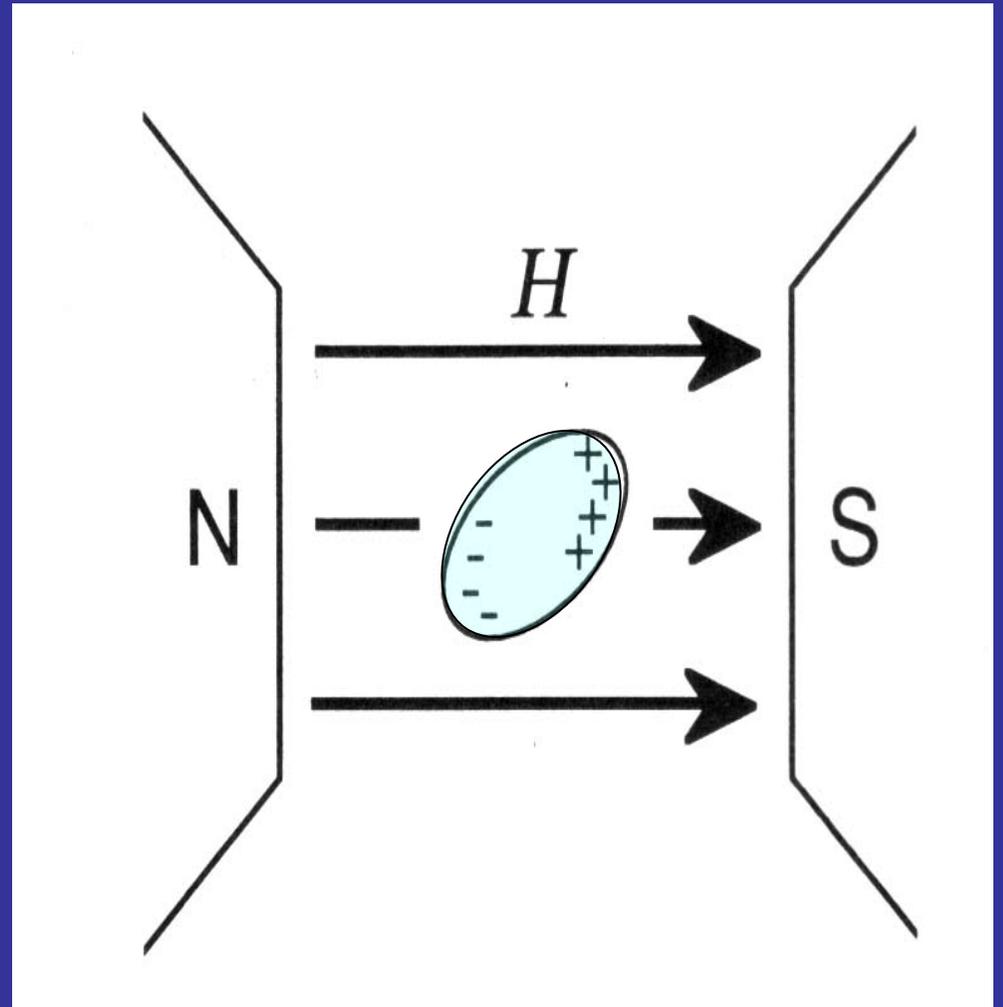


$$B = \mu_0 H + M$$

磁性体があると磁束密度が高くなる。

# 磁気分極(磁化)

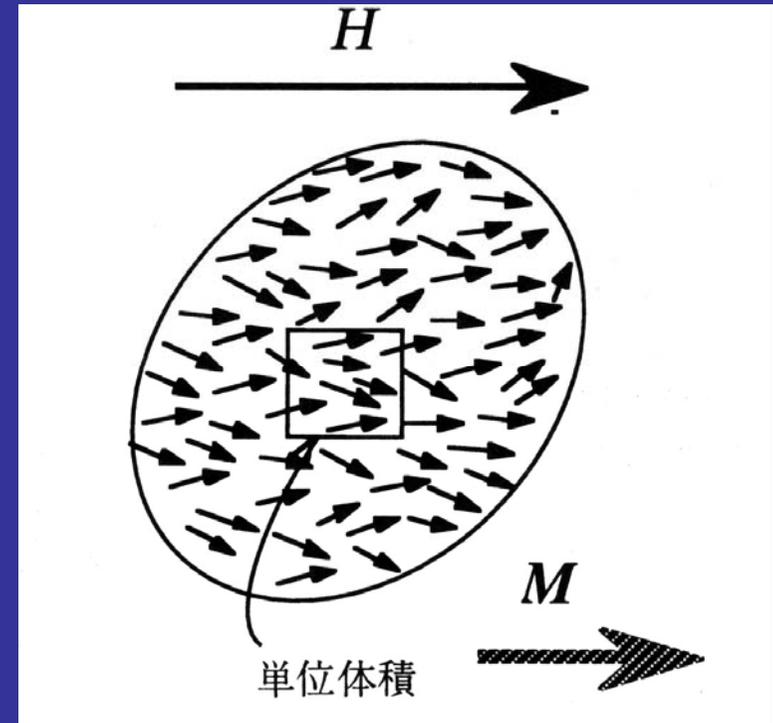
- 磁性体に磁界を加えたとき、その表面には磁極が生じる。
- この磁性体は一時的に磁石のようになるが、そのとき磁性体が磁化されたという。



(高木・初等磁気工學講座)より

# 磁気分極(磁化)の定義

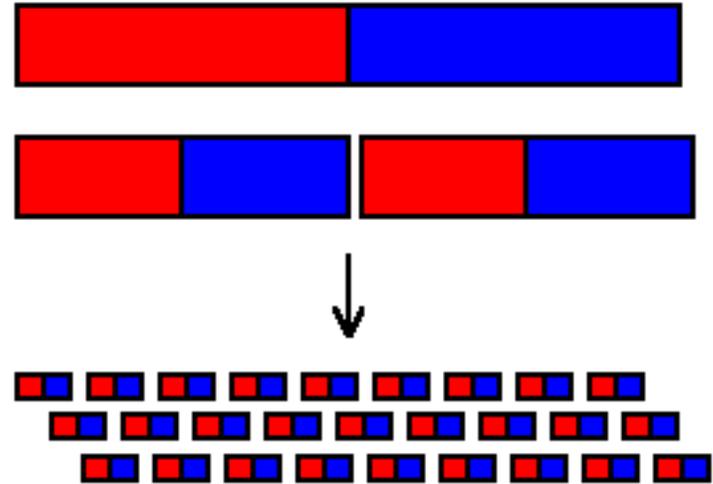
- ミクロの磁気モーメントの単位体積あたりの総和を磁気分極 magnetic polarization という。磁化 magnetization ともいう
- $K$  番目の原子の1原子あたりの磁気モーメントを  $\mu_k$  とするとき、磁気分極  $M$  は式  $M = \sum \mu_k$  で定義される。
- 磁気モーメントの単位は  $\text{Wb}\cdot\text{m}$  であるから磁気分極の単位は  $\text{Wb}/\text{m}^2$  となる。



(高梨:初等磁気工学講座)より

# 磁石を切るとどうなる

- 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<sup>2</sup>)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。

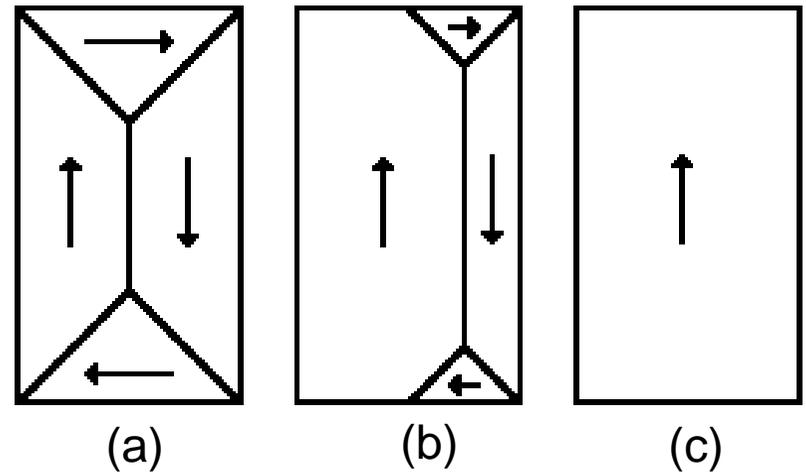


岡山大のHPより

(<http://www.magnet.okayama-u.ac.jp/magword/domain/>)

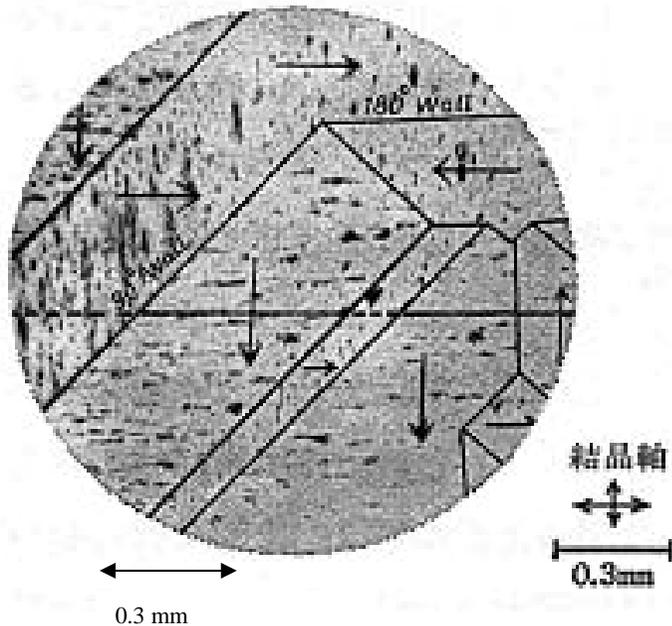
# 磁化過程と磁区(domain)

- (a)は着磁される前、すなわち磁石としての性質を示さない状態を表しています。構造的に、内部のスピンは互いに打ち消しあって磁石としての性質がゼロになるような配置をしています。外から磁界を加えると、(b)のようにその方向を向くものが増え、その体積も増えていきます。(c)のように全部のスピンの同一方向を向くとこれ以上磁化が増えないので、飽和したといえます。

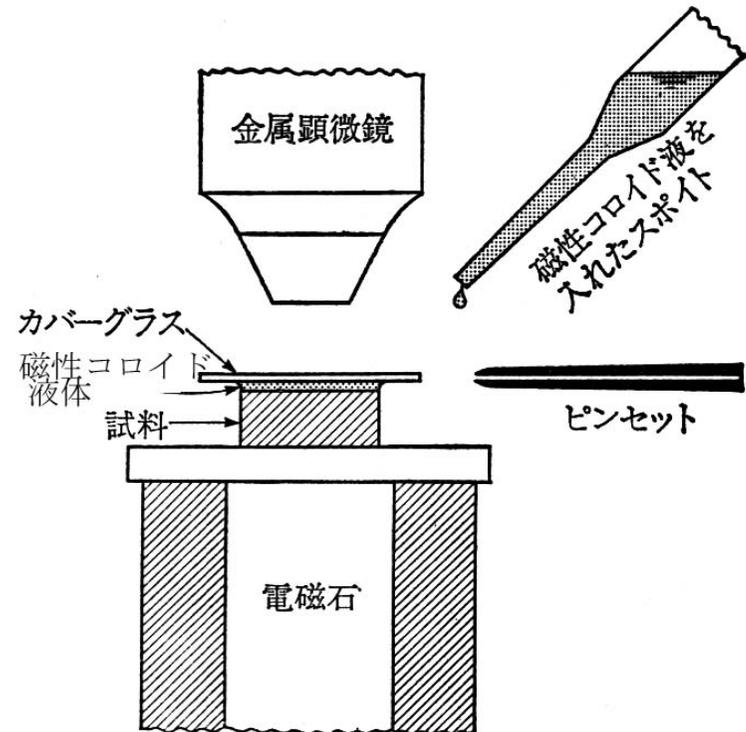


# 磁性体を顕微鏡で見ると

- 図は、磁性微粒子の磁性体に塗布して顕微鏡で観察した磁区像である。(ビッターパターン)
- 外部磁界を加えないとき、磁性体は全体がいくつかの磁区に分かれ全体としての磁化を打ち消している。



ミリメートルサイズ

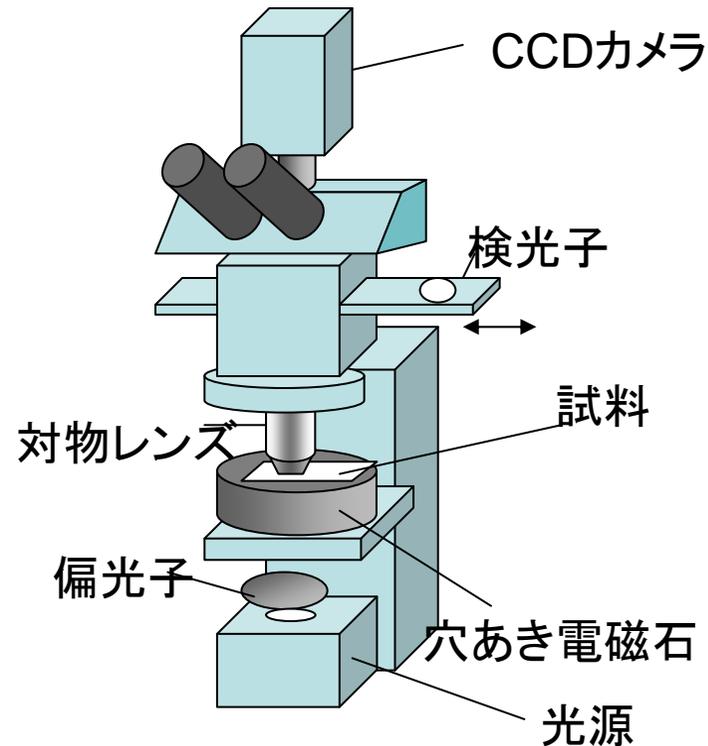
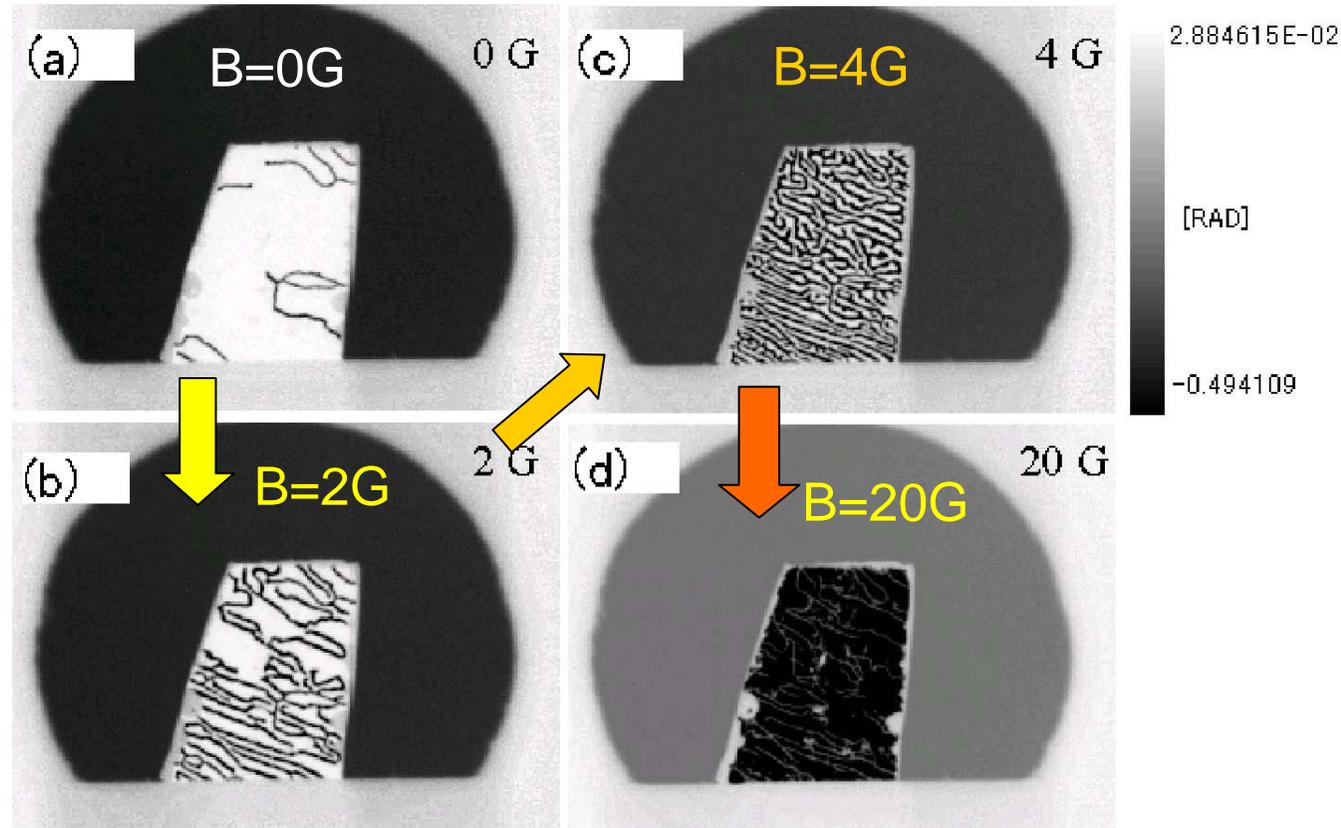


粉末図形観察法

# ファラデー効果を用いた磁区イメージング

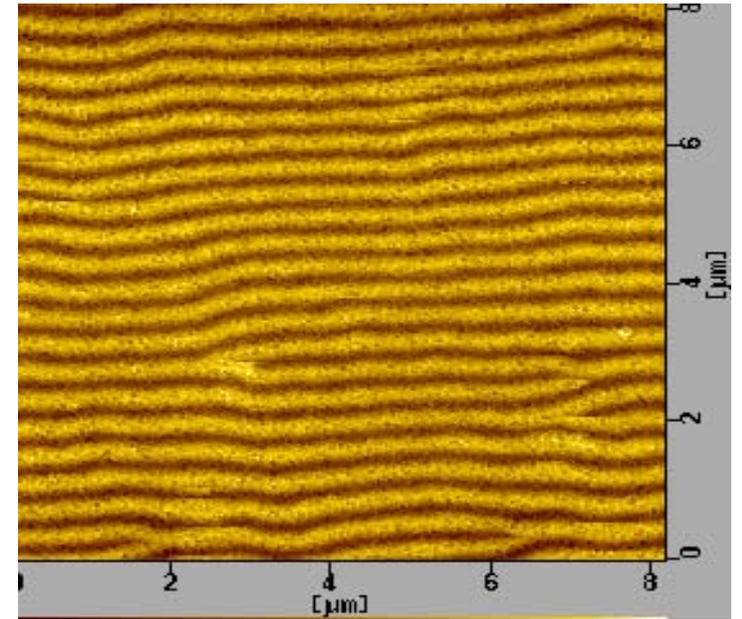
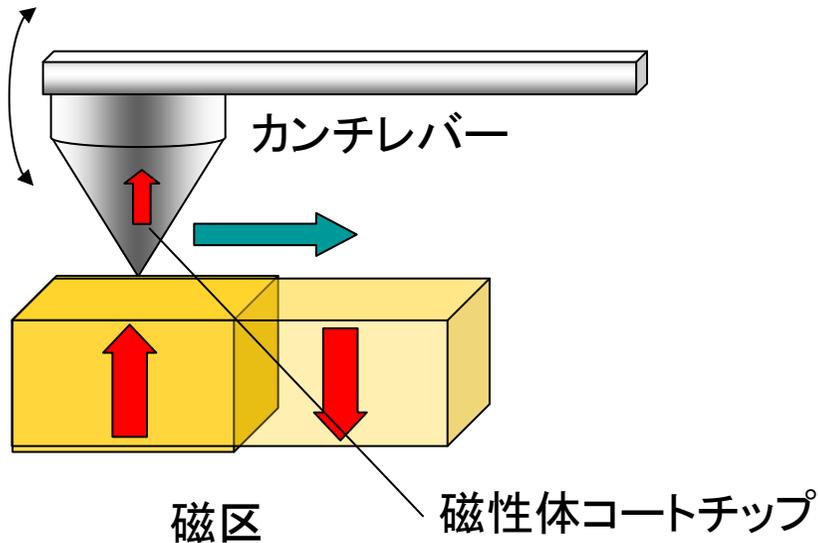
- ファラデー効果を用いて磁区を画像化

磁性ガーネットの磁化過程を見る

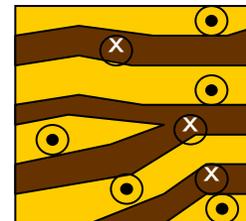


# 磁気力顕微鏡で見ると

- 磁気力顕微鏡(MFM)は、微小な磁石を先端部にもつカンチレバーに働く磁気力を測定し画像化する。光学顕微鏡を使っても観測できない小さな磁区もMFMを使えば観測できる。

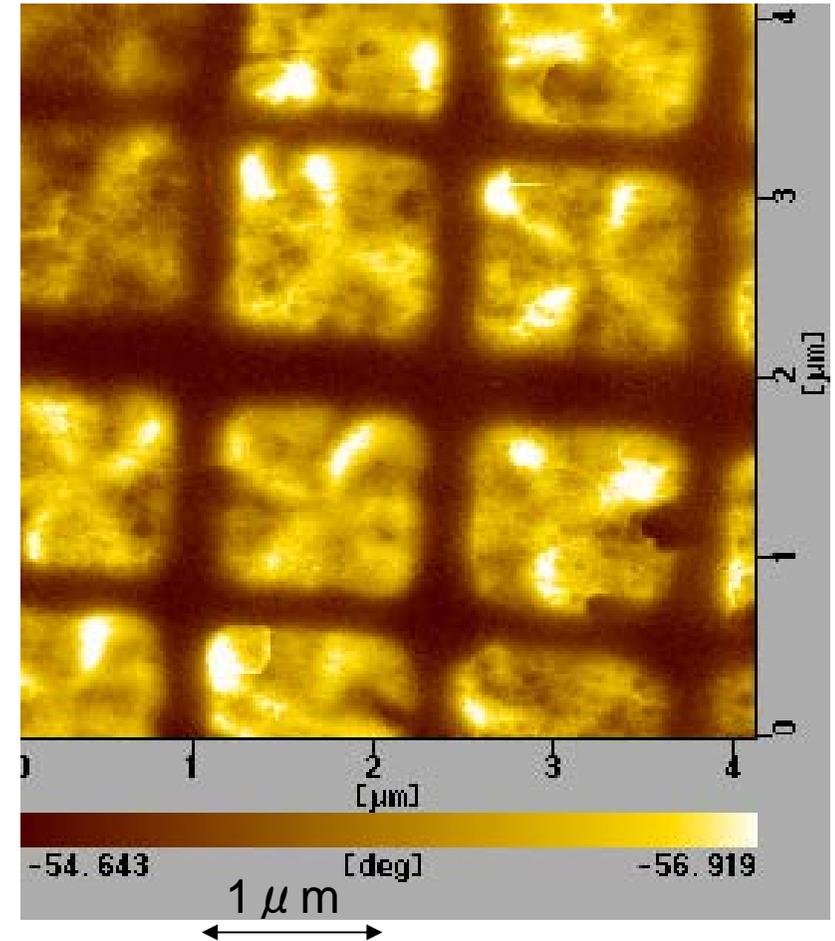
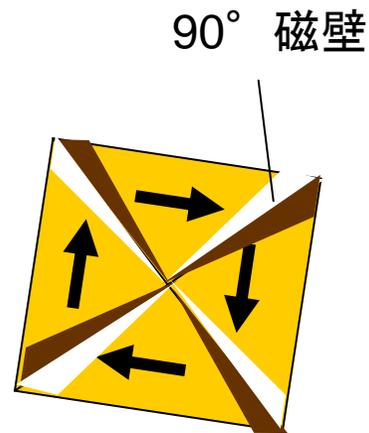


2 μm  
ミクロンサイズ



# $\mu\text{m}$ サイズの磁性体と環流磁区

- 表面に磁極を作らない磁気構造が環流磁区(closure domain)である。
- $90^\circ$  磁壁にそって生じるわずかな磁極のため、MFM画像が見られる

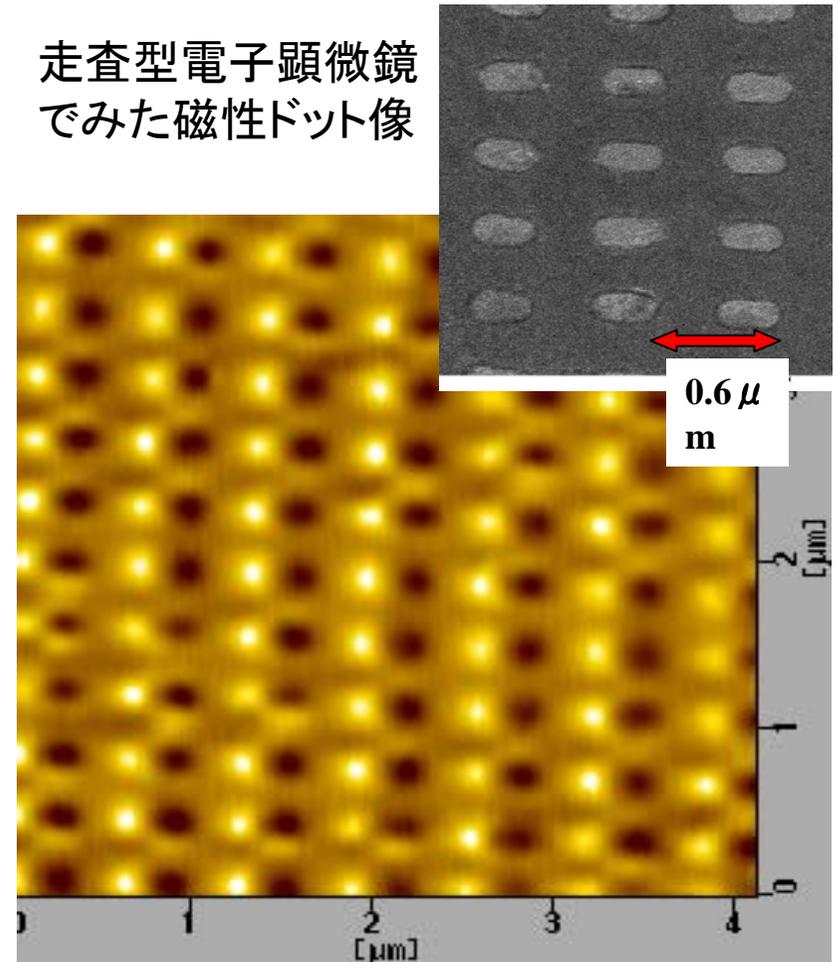


シリコンに埋め込んだパーマロイ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ )のMFM画像(佐藤研松本剛君測定)

# ナノ構造磁性体の磁極

- 図は、シリコンに埋め込んだ100nm × 300nmのサイズの磁性体ドットの電子顕微鏡像と磁気力顕微鏡像である。
- 白・黒の対が並んでいるが、白がS極、黒がN極である。

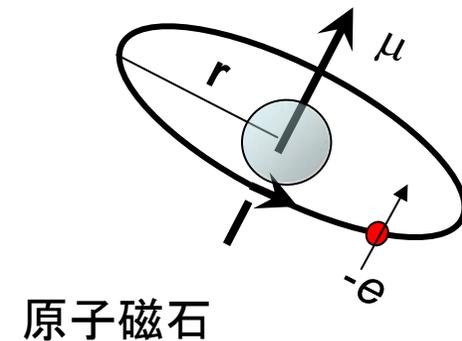
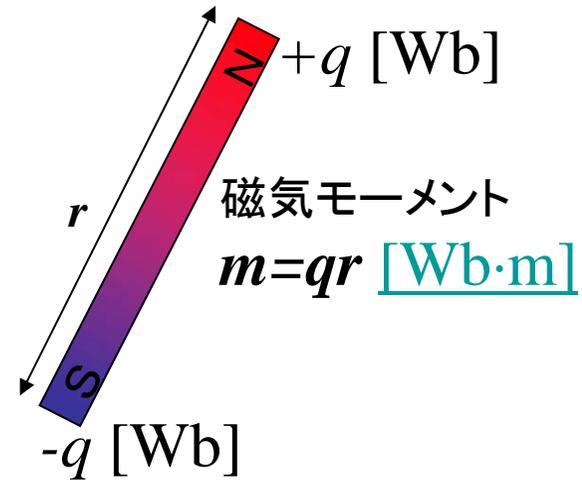
走査型電子顕微鏡  
でみた磁性ドット像



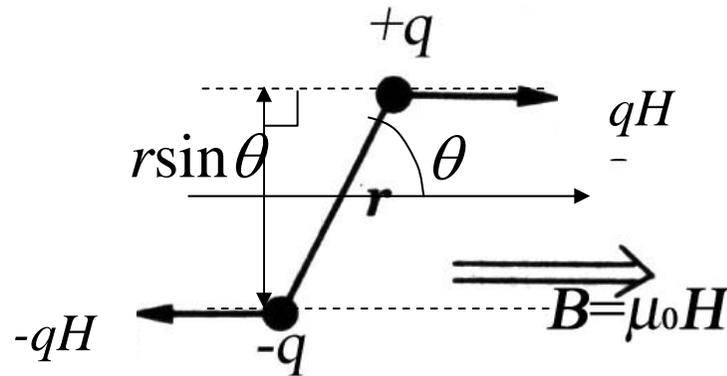
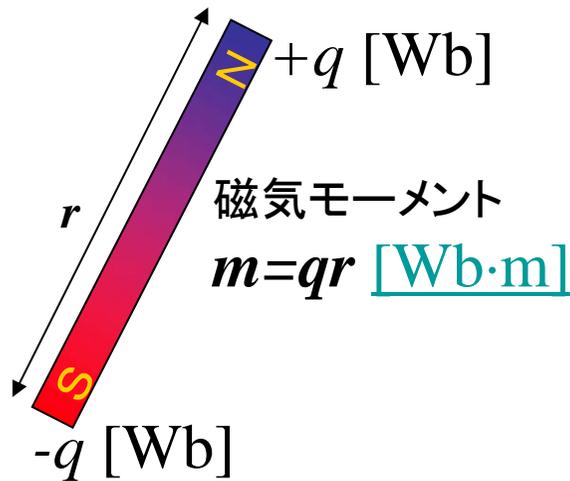
磁気力顕微鏡で見た磁性ドット配列の磁気構造

# 究極の磁石：原子磁気モーメント

- 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。



# 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

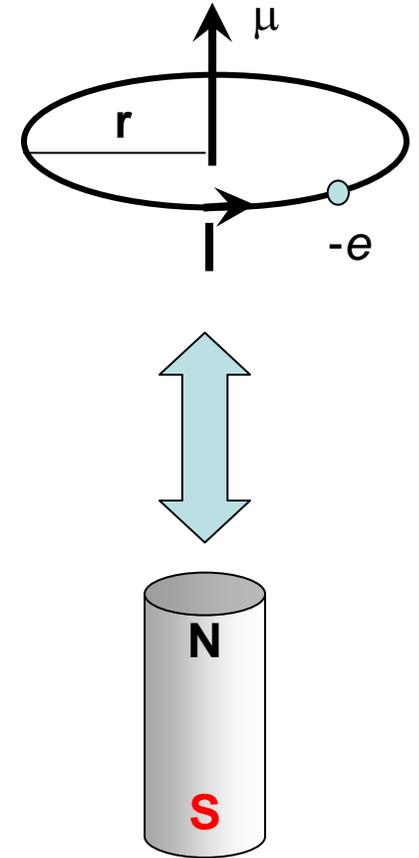
$$E = \int T d\theta = \int mH \sin \theta d\theta = -mH \cos \theta \Rightarrow E = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{H}$$

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

(高梨: 初等磁気工学講座)より

# 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。



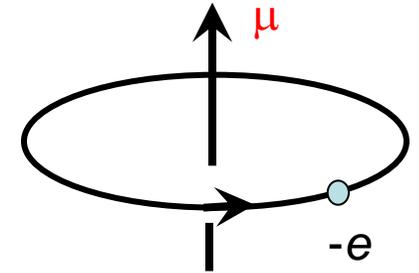
# 軌道角運動量の量子的扱い

- 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

$$\text{軌道磁気モーメント } \mu_l = -(e\hbar/2m)L = -\mu_B L$$

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

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。

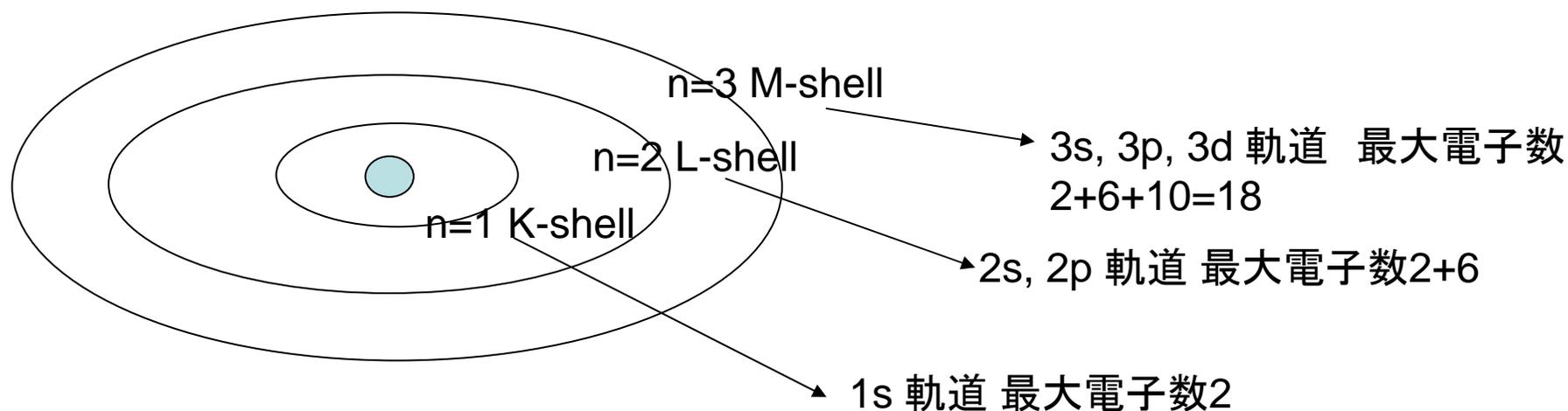
# スピンとは？

---

- 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

# 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



# 主量子数と軌道角運動量量子数

- 主量子数  $n$
- 軌道角運動量量子数  $l=n-1, \dots, 0$

$n$	$l$	$m$					軌道	縮重度
1	0			0			1s	2
2	0			0			2s	2
	1		1	0	-1		2p	6
3	0			0			3s	2
	1		1	0	-1		3p	6
	2	2	1	0	-1	-2	3d	10

# 元素の周期表

## Periodic Table of the Elements

3d遷移金属

1A																		0
1	<b>H</b>																	<b>He</b>
2	<b>Li</b>	<b>Be</b>										<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>	<b>Ne</b>	
3	<b>Na</b>	<b>Mg</b>										<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Ar</b>	
4	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>
5	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Tc</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>	<b>Xe</b>
6	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>	* <b>La</b>	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Re</b>	<b>Os</b>	<b>Ir</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>At</b>	<b>Rn</b>
7	<b>Fr</b>	<b>Ra</b>	+ <b>Ac</b>	<b>Rf</b>	<b>Ha</b>	<b>Sg</b>	<b>Ns</b>	<b>Hs</b>	<b>Mt</b>	<b>110</b>	<b>111</b>	<b>112</b>	<b>113</b>					

\* Lanthanide Series

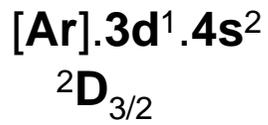
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>

+ Actinide Series

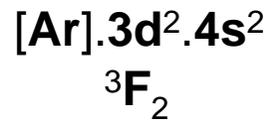
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>

# 3d遷移元素

スカンジウム



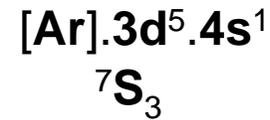
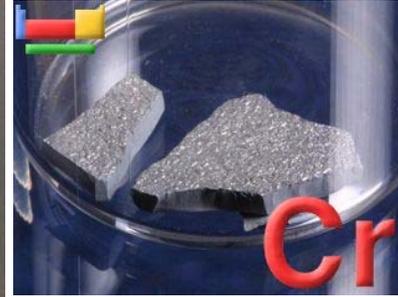
チタン



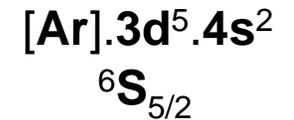
バナジウム



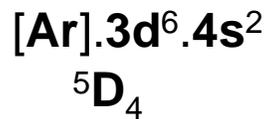
クロム



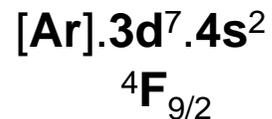
マンガン



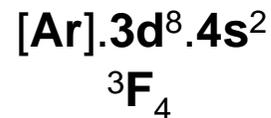
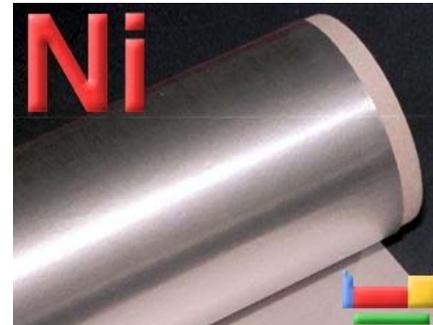
鉄



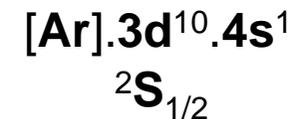
コバルト



ニッケル



銅



- WebElementsTM Periodic table (<http://www.webelements.com/>) より