

磁性工学05.04.21

第2回 磁石を微細にしていくと？

佐藤勝昭

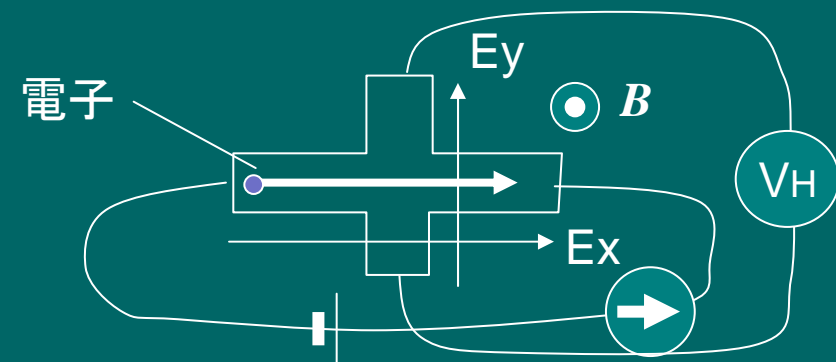
復習コーナー

第1回で学んだこと

- 身の周りにおける磁性材料をハードディスクを例に紹介した。
- 磁界、磁化、磁束密度、磁極、磁気モーメントなどについて概念を紹介した。
- 磁界の測定方法、磁化の測定方法を紹介した。
- 軟質(ソフト)磁性、硬質(ハード)磁性の磁化曲線を示した。

前回の問題

- 10cmあたり1000巻きのコイルに1Aの電流を流したときの磁界の強さはSI単位ではいくらか。cgs単位ではいくらか。
 - 答え: 10000A/m=126Oe
- ホール素子を使って磁界の大きさを測定できることを説明せよ。
 - 半導体に電流を流しながら面に垂直に磁界を印加すると、ローレンツ力でキャリアの進行方向が曲げられるが、外部回路が開いていると電荷が蓄積しホール電圧が生じる。



$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{m}{\tau} \vec{v} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

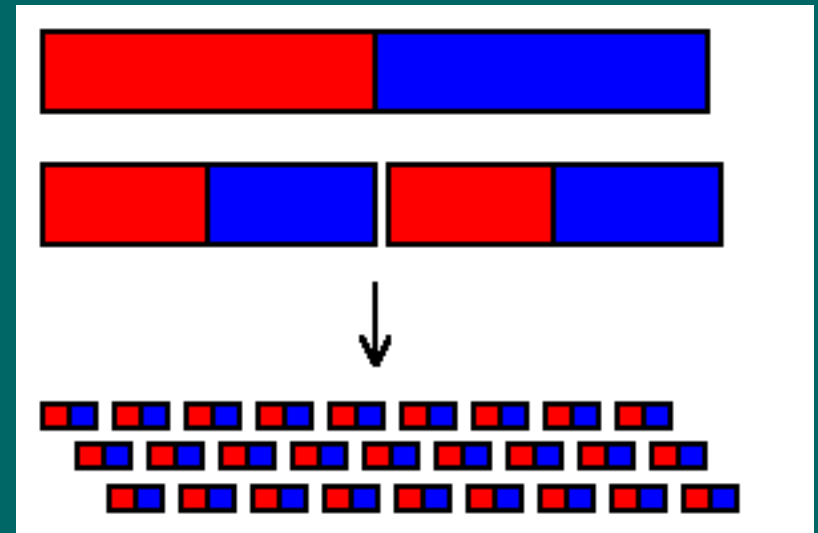
$$dv/dt \rightarrow 0$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = -\frac{e\tau}{m} \left\{ \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_y B \\ -v_x B \end{pmatrix} \right\}$$

$$v_y \rightarrow 0 \text{ とすると } E_y = v_x B = (-J_x / ne) B$$

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/cm²)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。

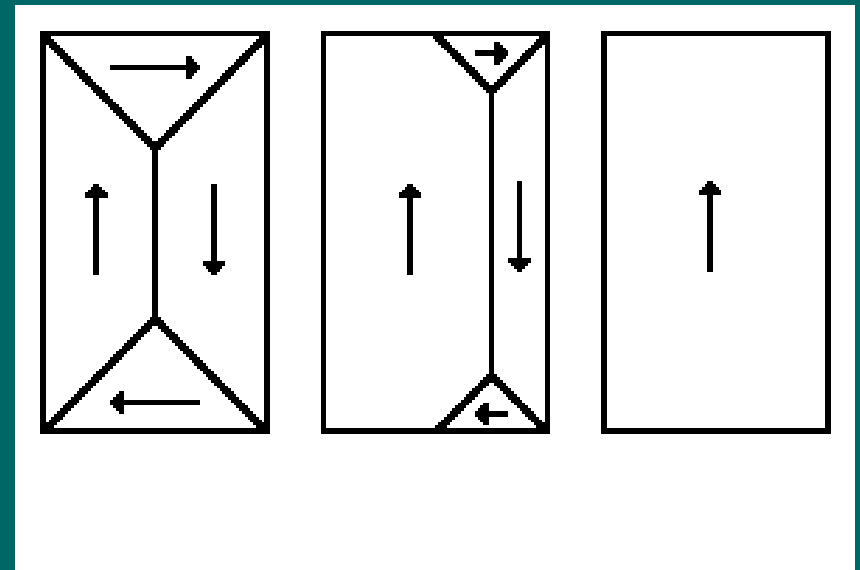


岡山大のHPより

(<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。



強磁性体の磁化曲線 (ヒステリシス)

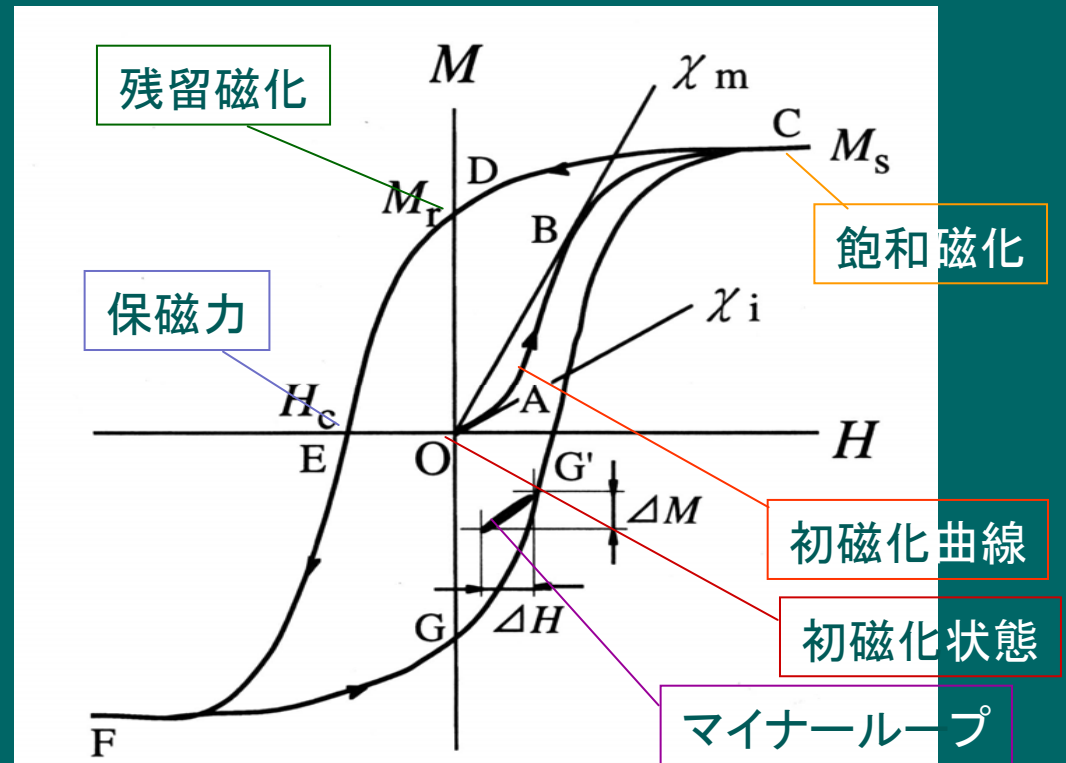
- $O \rightarrow B \rightarrow C$: 初磁化曲線
- $C \rightarrow D$: 残留磁化
- $D \rightarrow E$: 保磁力
- $C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow C$: ヒステリシスループ

H_c による磁性体の分類

H_c 小: 軟質磁性体

H_c 中: 半硬質磁性体

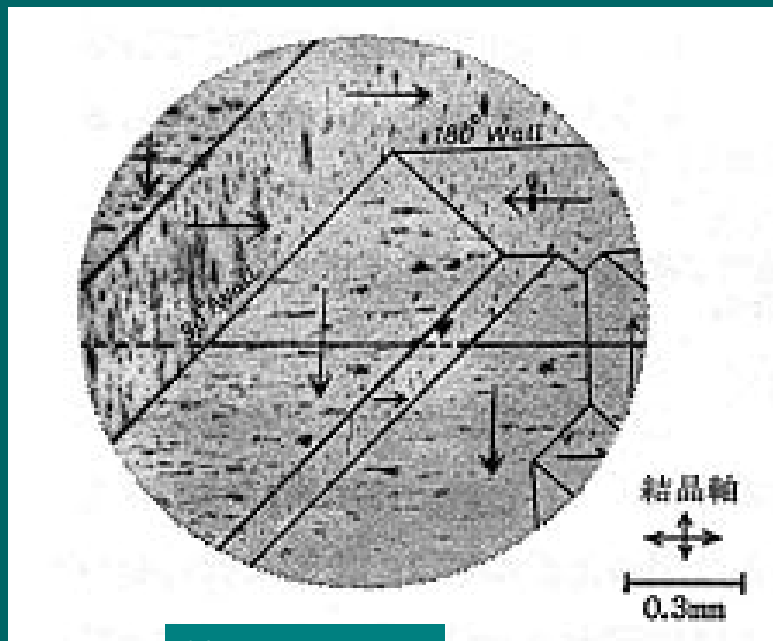
H_c 大: 硬質磁性体



(高梨: 初等磁気工学講座テキスト)

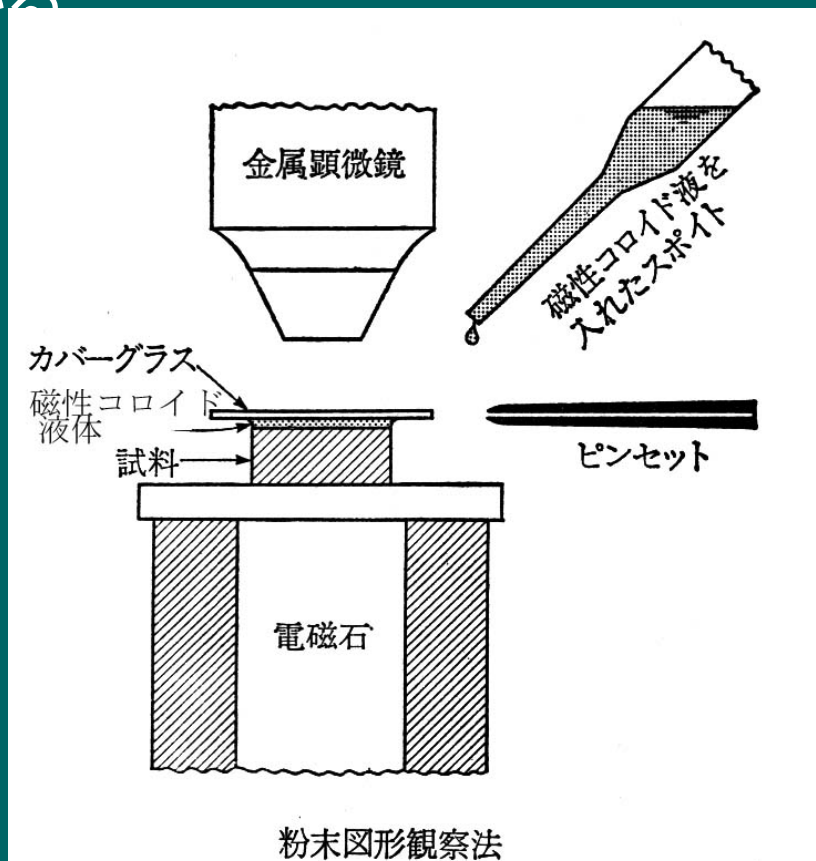
磁性体を顕微鏡で見ると

- 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



0.3 mm

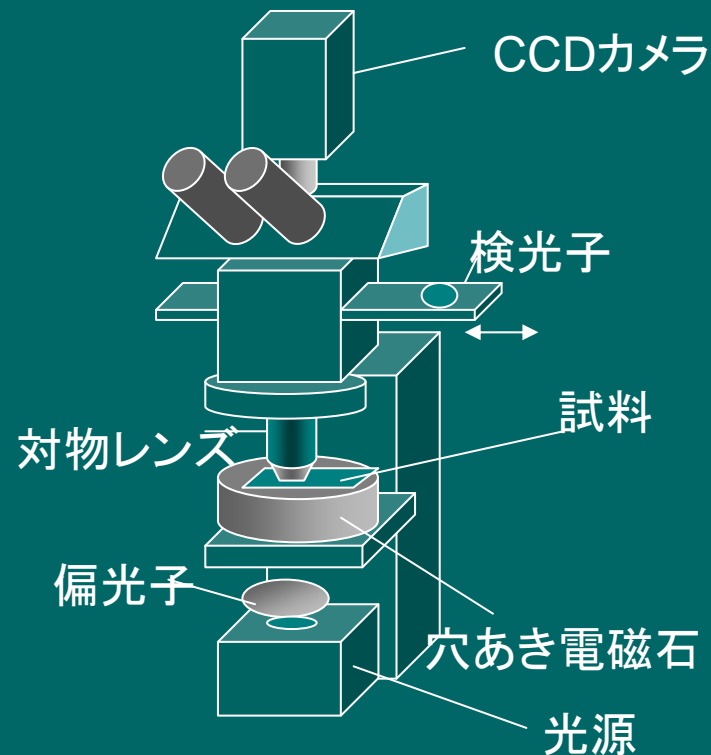
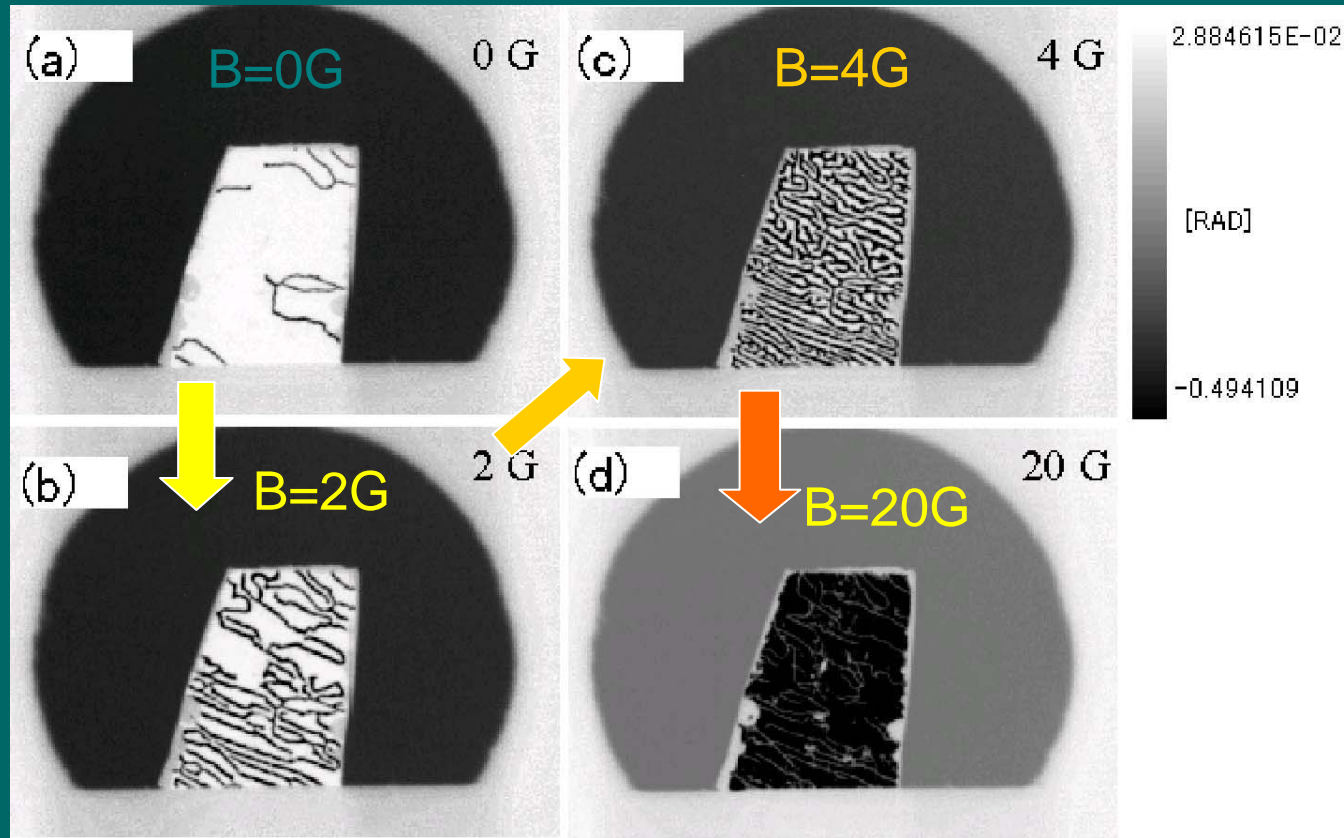
ミリメートルサイズ



ファラデー効果を用いた磁区イメージング

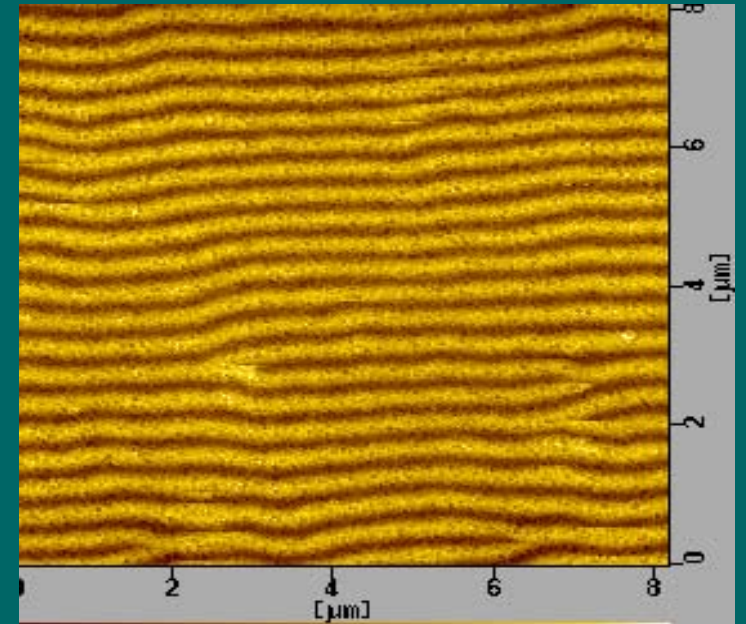
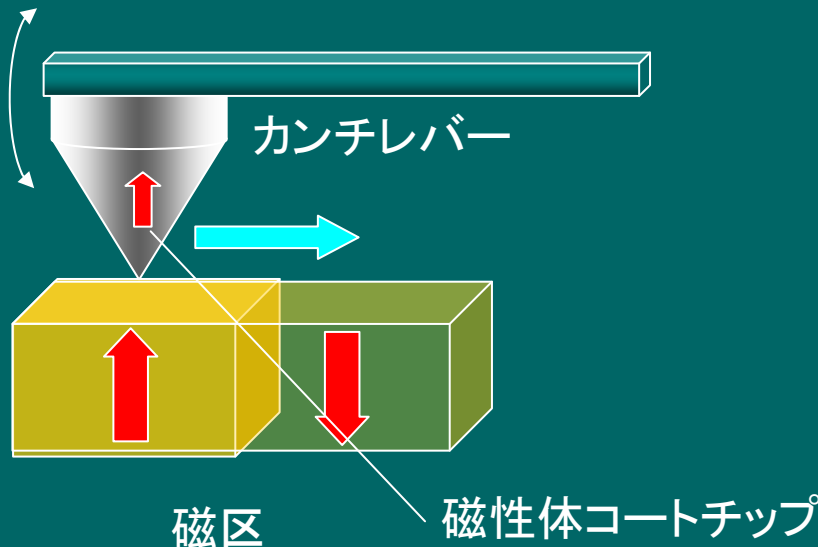
- ファラデー効果を用いて磁区を画像化

磁性ガーネットの磁化過程を見る

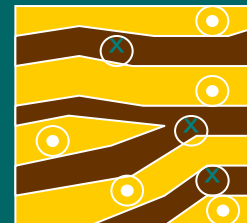


磁気力顕微鏡で見ると

- 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。

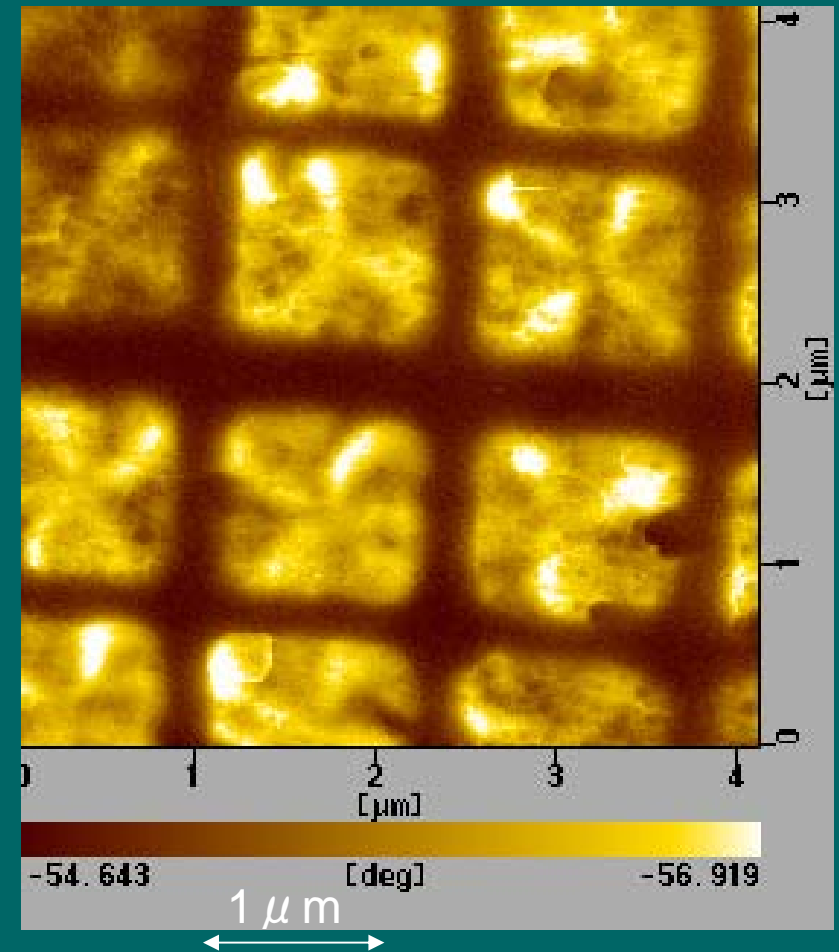


$2\ \mu\text{m}$ ← →
ミクロンサイズ



μm 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° 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

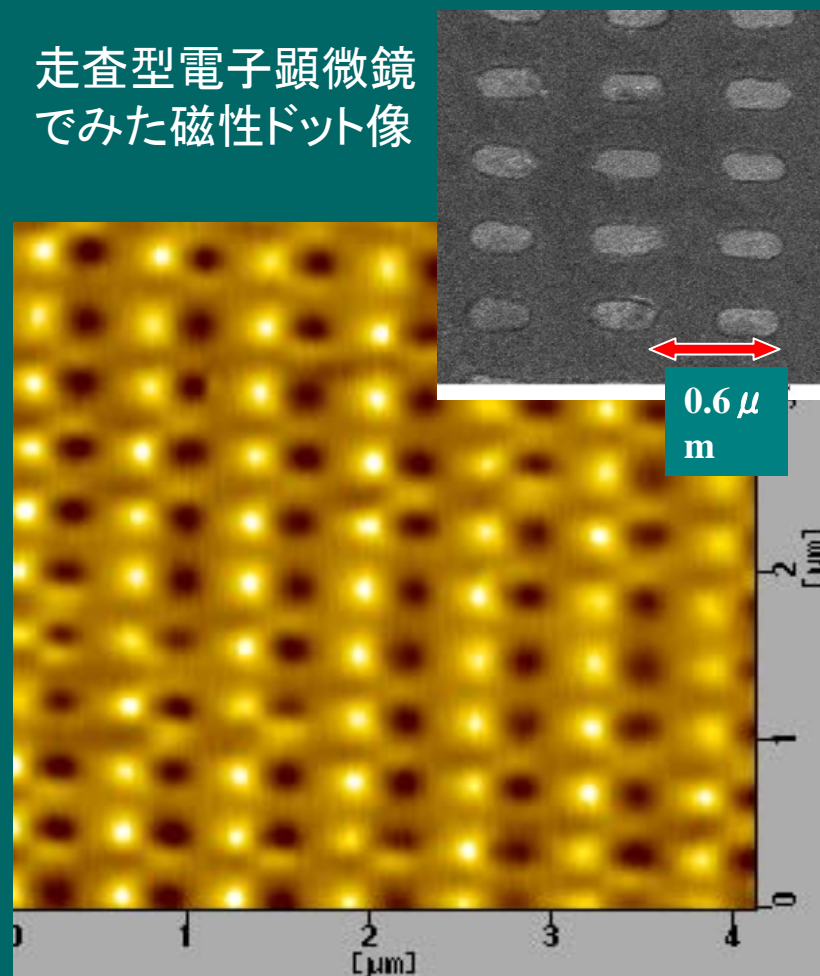


シリコンに埋め込んだパーマロイ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)のMFM画像(佐藤研松本剛君測定)

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。

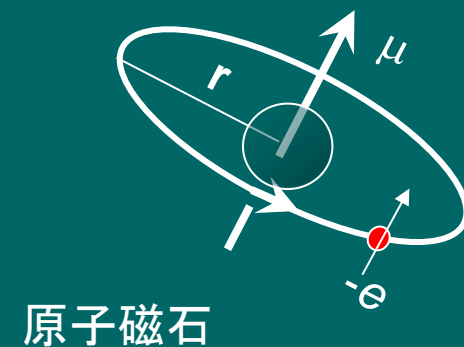
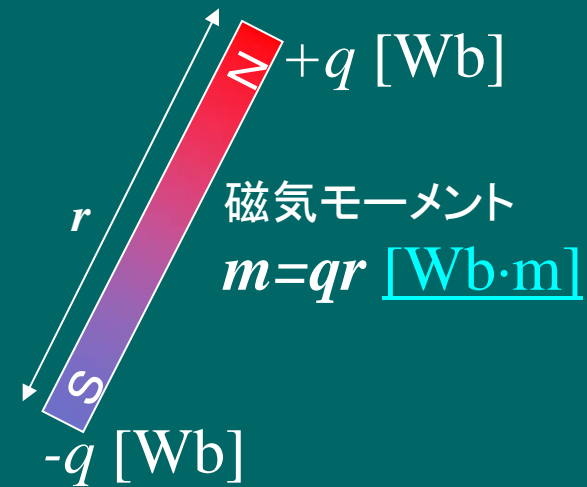
走査型電子顕微鏡
でみた磁性ドット像



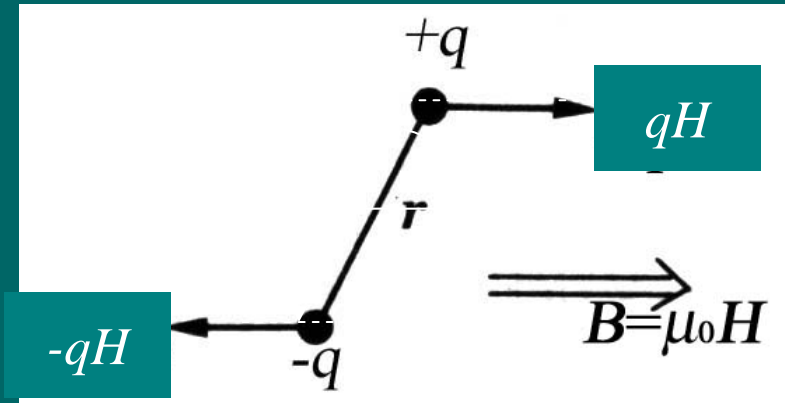
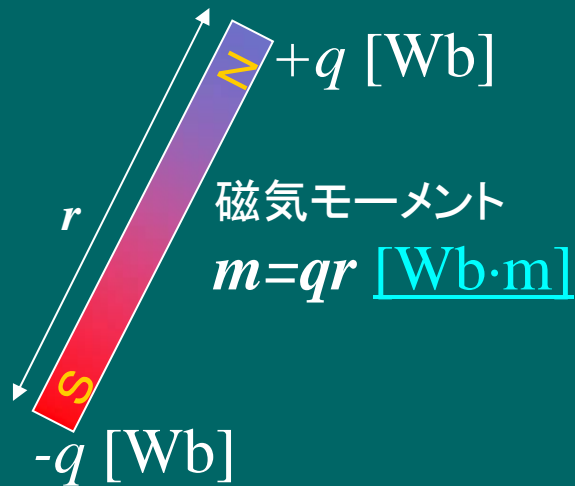
磁気力顕微鏡で見た磁性ドット配列の磁気構造

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

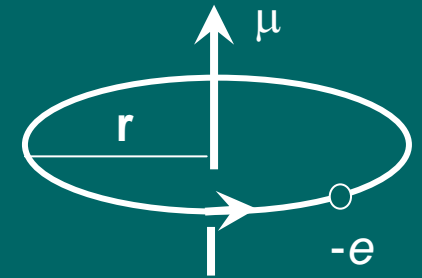
$$E = \int T d\theta = \int mH \sin \theta d\theta = -mH \cos \theta \implies E = -m \cdot H$$

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

環状電流と磁気モーメント

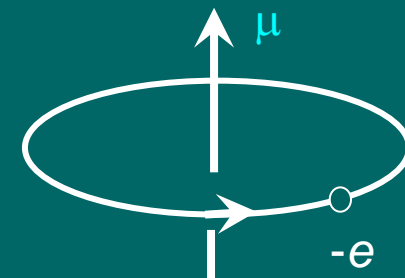
- 電子の周回運動→環状電流
- e [C]の電荷が半径 a [m]の円周上を線速度 v [m/s]で周回
→1周の時間は $2\pi a/v$ [s]
→電流は $i=-ev/2\pi a$ [A]。
- 磁気モーメントは、電流値 i に円の面積 $S=\pi a^2$ をかけることにより求められ、 $\mu=iS=-eav/2$ となる。
- 一方、角運動量は $\Gamma=maav$ であるから、これを使うと磁気モーメントは $\mu=-(e/2m)\Gamma$ となる。



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 $L_l = \hbar L$ である。 L は整数値をとる
- $\mu = -(e/2m) \hbar L$ 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

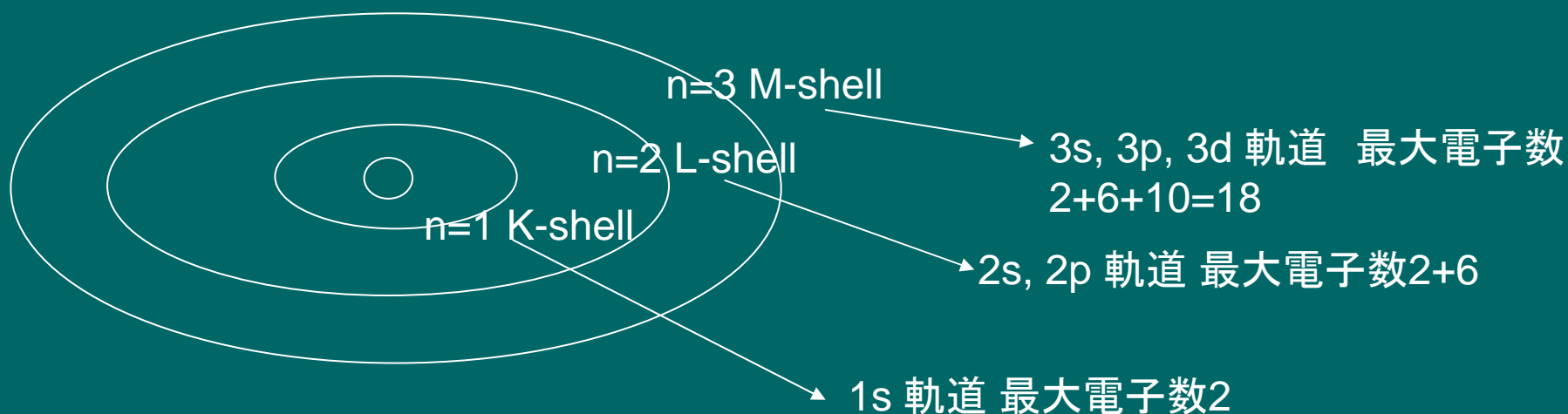
- 電子スピン量子数 s の大きさは $1/2$
- 量子化軸方向の成分 s_z は $\pm 1/2$ の2値をとる。
- スピン角運動量は \hbar を単位として $\Gamma_s = \hbar s$ となる。
- スピン磁気モーメントは $\mu_s = -(e/m)\Gamma_s$ と表される。
- 従って、 $\mu_s = -(e\hbar/m)s = -2\mu_B s$
- 実際には上式の係数は、2より少し大きな値 g (自由電子の場合 $g=2.0023$) をもつので、 $\mu_s = -g\mu_B s$ と表される。

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

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

* Lanthanide Series

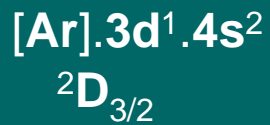
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

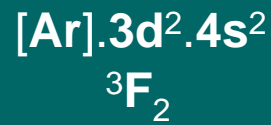
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

3d遷移元素

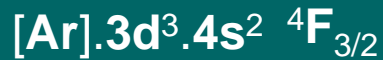
スカンジウム



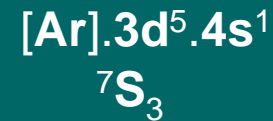
チタン



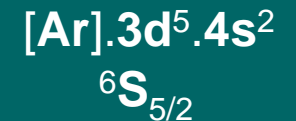
バナジウム



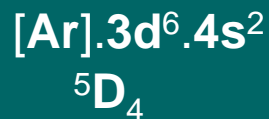
クロム



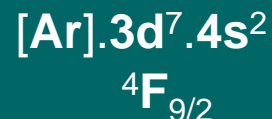
マンガン



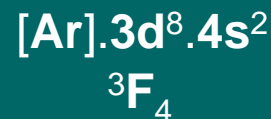
鉄



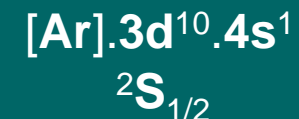
コバルト



ニッケル



銅

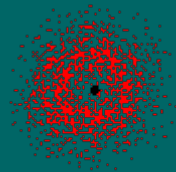


- WebElementsTM Periodic table (<http://www.webelements.com/>) より

軌道角運動量量子と電子分布の形

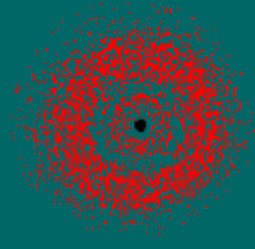
- s, p, d, f は軌道の型を表し、それぞれが方位量子数 $l=0, 1, 2, 3$ に対応する。sには電子分布のくびれが0であるが、pには1つのくびれが、dには2つのくびれが存在する。

1s



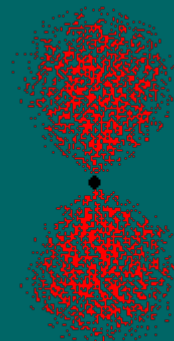
a 1s orbital

2s



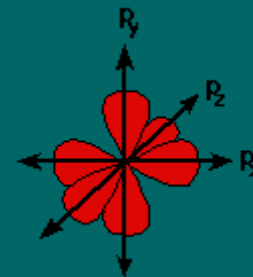
a 2s orbital

2p



a p orbital

3d



局在した原子(多電子系)の合成角運動量

- 軌道角運動量の加算
軌道角運動量(方位)量子数を l とすると、その量子化方向成分(磁気量子数) $m=l_z$ は、 $l, l-1, \dots, -l+1, -l$ の $2l+1$ とおりの値を持ちうる。
- 1原子に2個のp電子があったとする。
p電子の方位量子数 l は1であるから、磁気量子数は $m=1, 0, -1$ の3つの値をもつ。原子の合成軌道角運動量 $L=2, L_z=2, 1, 0, -1, -2$ をとる。

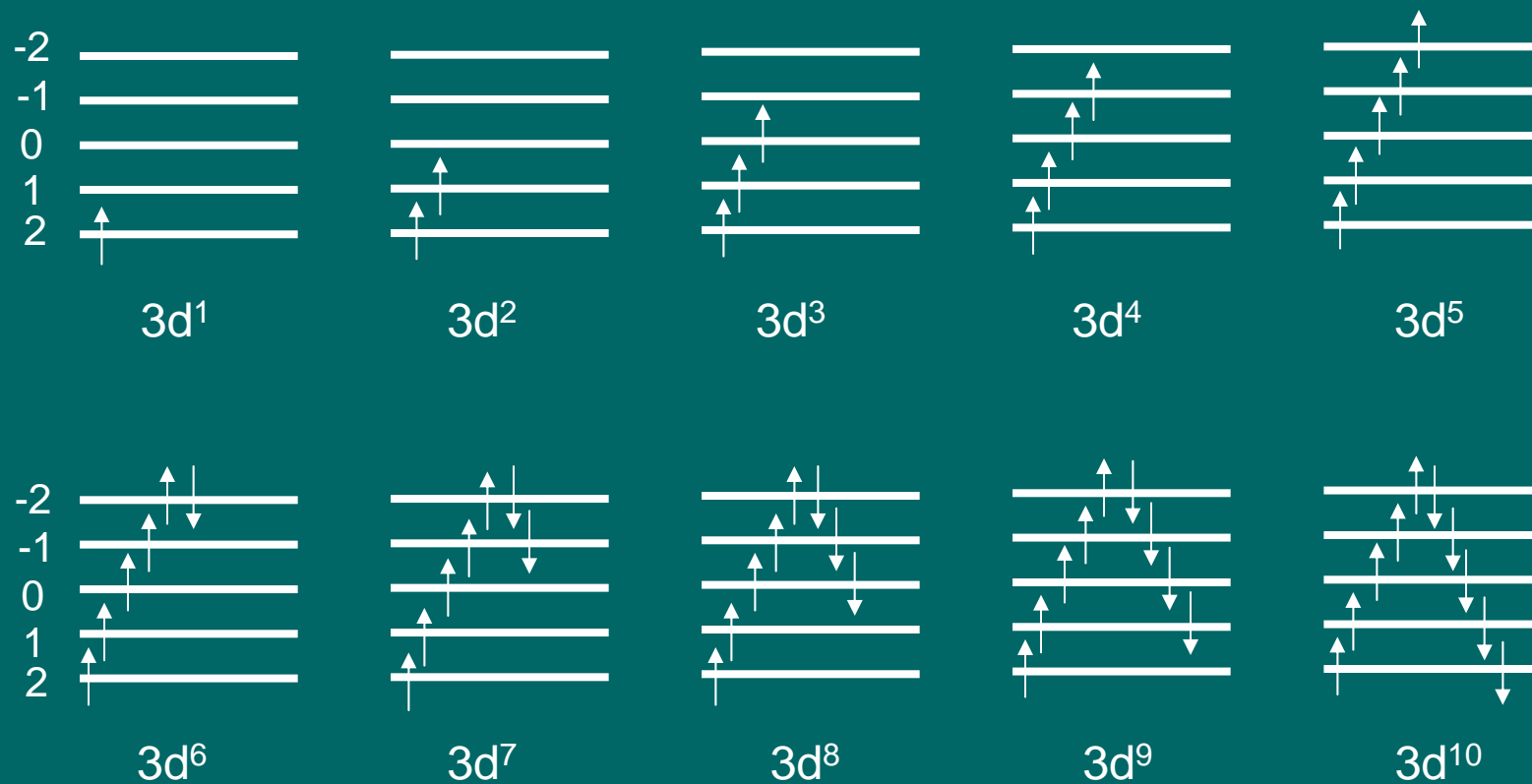
フントの規則

- 原子が基底状態にあるときの L , S を決める規則
 1. 原子内の同一の状態(n, l, m_l, m_s で指定される状態)には1個の電子しか占有できない。(Pauli排他律)
 2. 基底状態では、可能な限り大きな S と、可能な限り大きな L を作るように、 s と l を配置する。(Hundの規則1)
 3. 上の条件が満たされないときは、 S の値を大きくすることを優先する。(Hundの規則2)
 4. 基底状態の全角運動量 J は、less than halfでは $J=|L-S|$ 、more than halfでは $J=L+S$ をとる。

多重項の表現

- 左肩の数字 $2S+1$ (スピン多重度)
 - $S=0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2$ に対応して、1, 2, 3, 4, 5, 6
 - 読み方singlet, doublet, triplet, quartet, quintet, sextet
- 中心の文字 L に相当する記号
 - $L=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ に対応してS, P, D, F, G, H, I...
- 右下の数字 J_z
- 例: $\text{Mn}^{2+}(3d^5)$ $S=5/2$ ($2S+1=6$), $L=0$ (\rightarrow 記号: S)
 ${}^6S_{5/2}$

遷移金属イオンの電子配置



演習コーナー

3価遷移金属イオンのL,S,Jを求め多重項の表現を記せ

イオン	電子配置	L	S	J	多重項
Ti ³⁺	[Ar]3d ¹				
V ³⁺	[Ar]3d ²				
Cr ³⁺	[Ar]3d ³				
Mn ³⁺	[Ar]3d ⁴				
Fe ³⁺	[Ar]3d ⁵				
Co ³⁺	[Ar]3d ⁶				
Ni ³⁺	[Ar]3d ⁷				