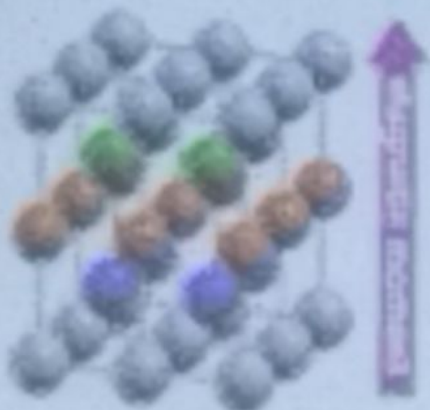
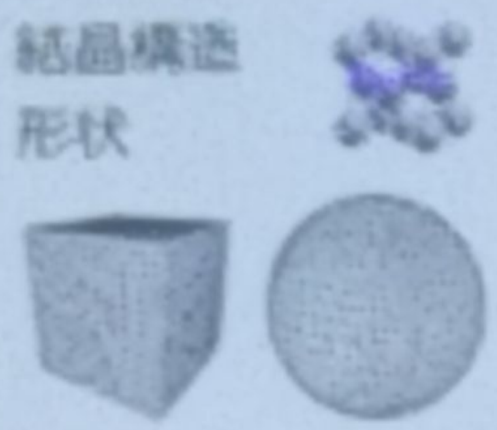
■ 磁気異方性

定義：磁気モーメントの特定方向への向きやすさ



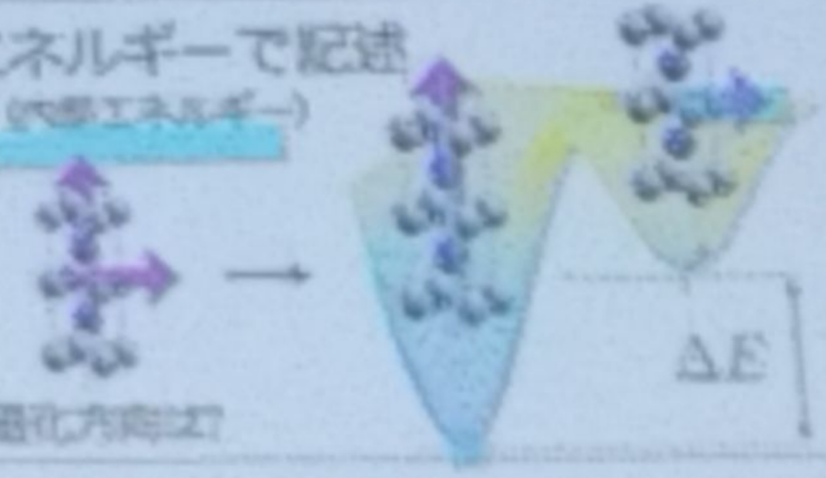
=

・結晶構造
・形状



&

・エネルギーで記述
(内部エネルギー)



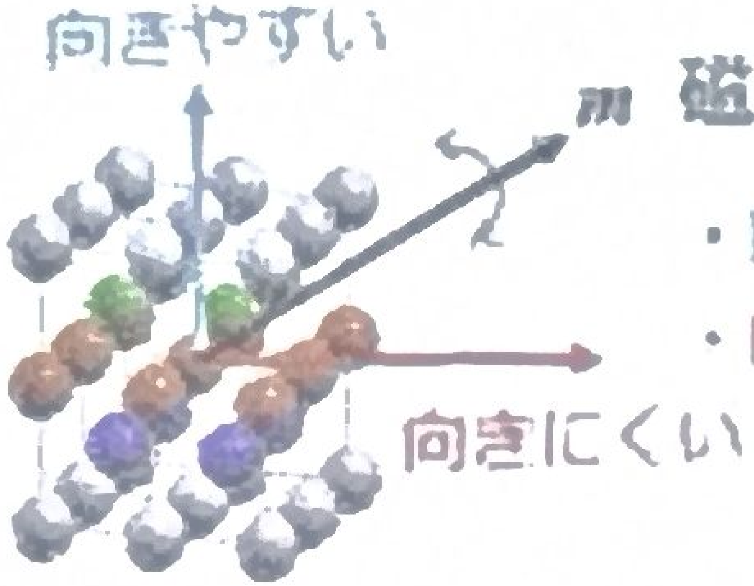
応用

・永久磁石　(高い異方性)
▶ ダイナモ，発電効率

・電磁鋼板　(低い異方性)
▶ 鉄心，発電効率

・垂直磁化膜(高い異方性)
▶ スピントロニクス，磁気メモリ

磁気異方性とは？



磁気モーメントが・・・

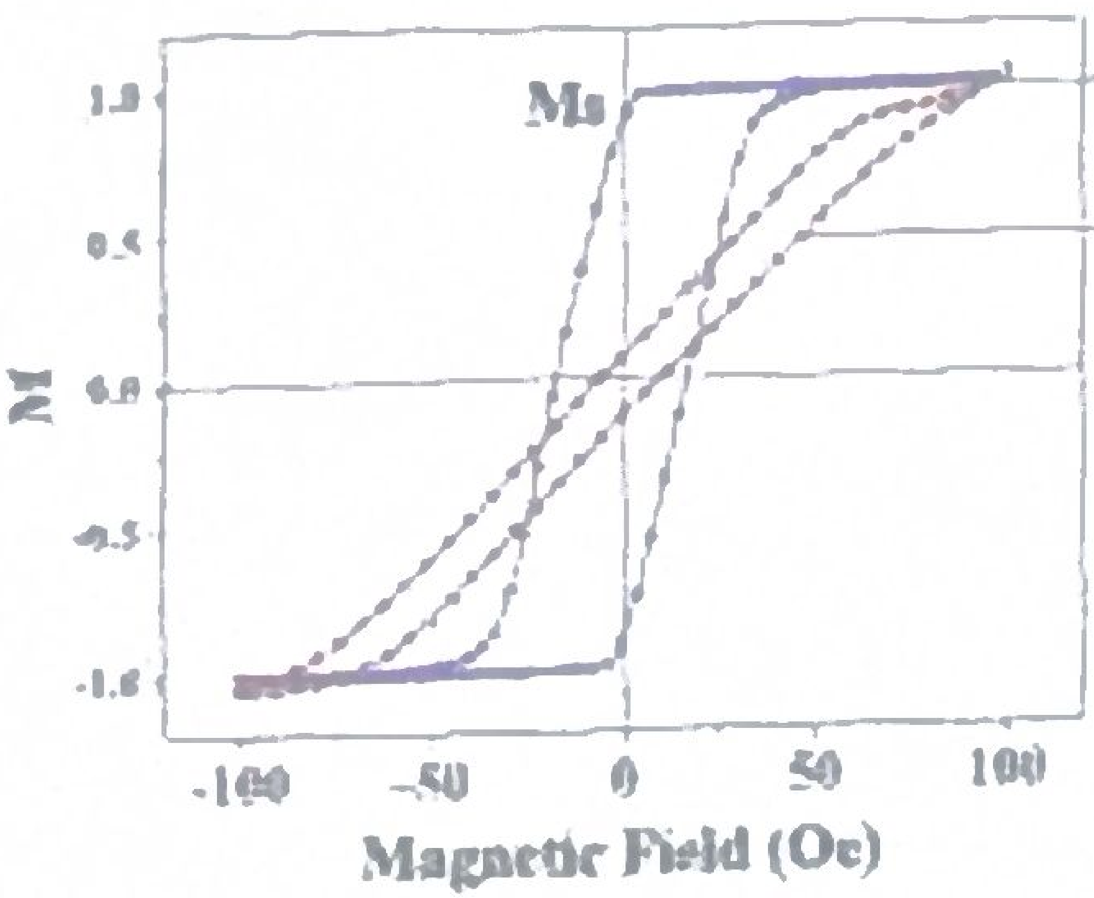
- 向きやすい方向＝磁化容易軸
- 向きにくい方向＝磁化困難軸

内部エネルギーの差

‖

磁気異方性エネルギー　K_u

磁気ヒステリシスとの関係



磁化容易軸
磁化困難軸

飽和に必要な
磁場の強さが異なる

様々な磁気異方性

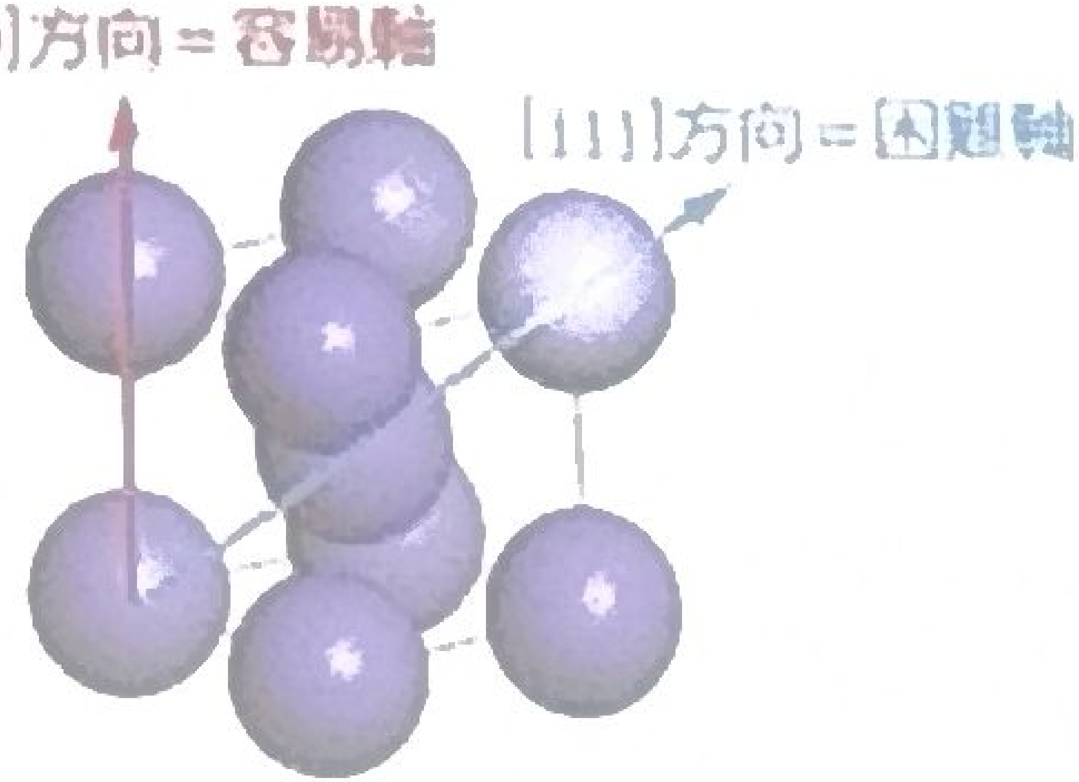
- 結晶磁気異方性・・・格子の対称性に依存（結晶構造）
- 形状磁気異方性・・・磁性体の形状に依存（構造，μm~mm）
- 誘導磁気異方性

・・・etc.

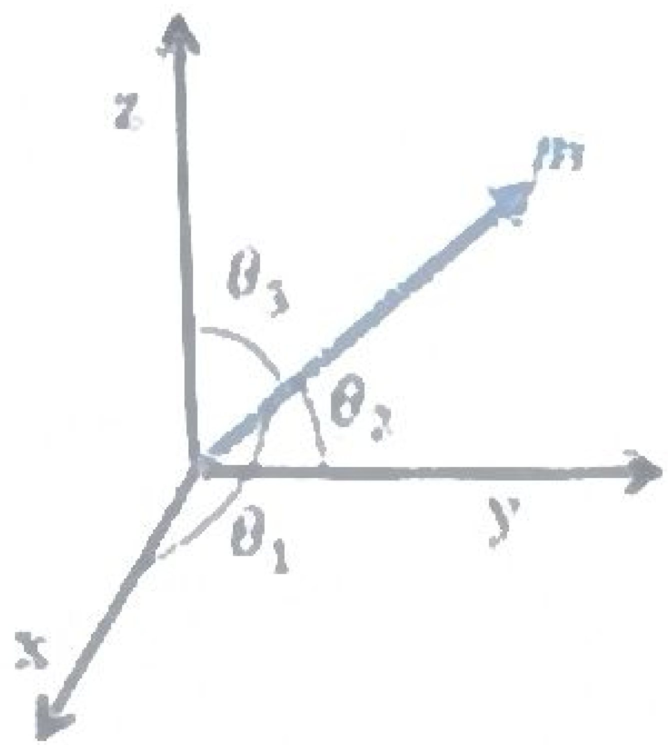
エネルギーなので合算できる

便利

結晶磁気異方性



ex) bcc-Fe



磁気モーメントの回転に要するエネルギー

$\alpha_1 = \cos\theta_1$

$\alpha_2 = \cos\theta_2$

$\alpha_3 = \cos\theta_3$

異方性エネルギーの表現

・・・ $\cos\theta_i\,(=\alpha_i)$ の多項式で展開して表す　便利

・立方晶の場合

$$E_A = \underline{\underline{K_1}}\left(\sum_{i,j}\alpha_i^2\alpha_j^2\right) + \underline{\underline{K_2}}(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2)$$

異方性定数（1次）　異方性定数（2次）　$K_1 \gg K_2$

ちなみに α_i^3 や α_i^5 の項は無い ・・・ 結晶の異方性によって消える

・六方晶の場合

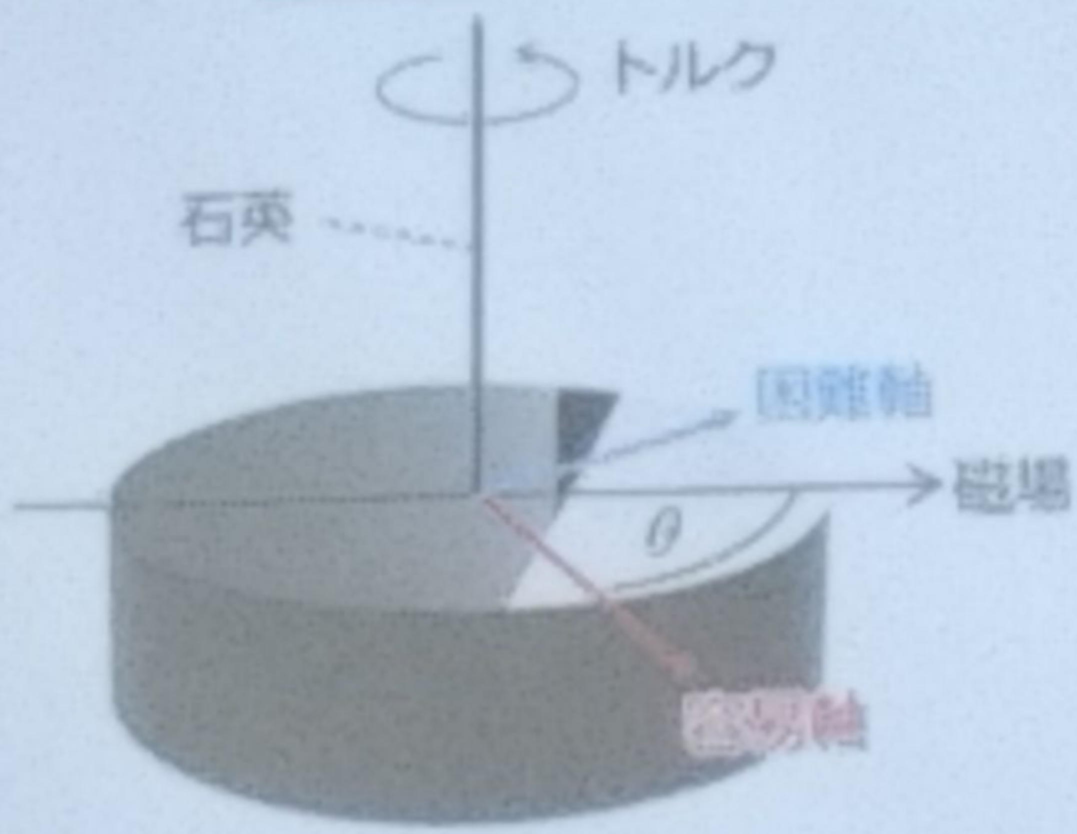
$$E_A = \underline{\underline{K_1}}\sin^2\theta + \underline{\underline{K_2}}\sin^4\theta$$

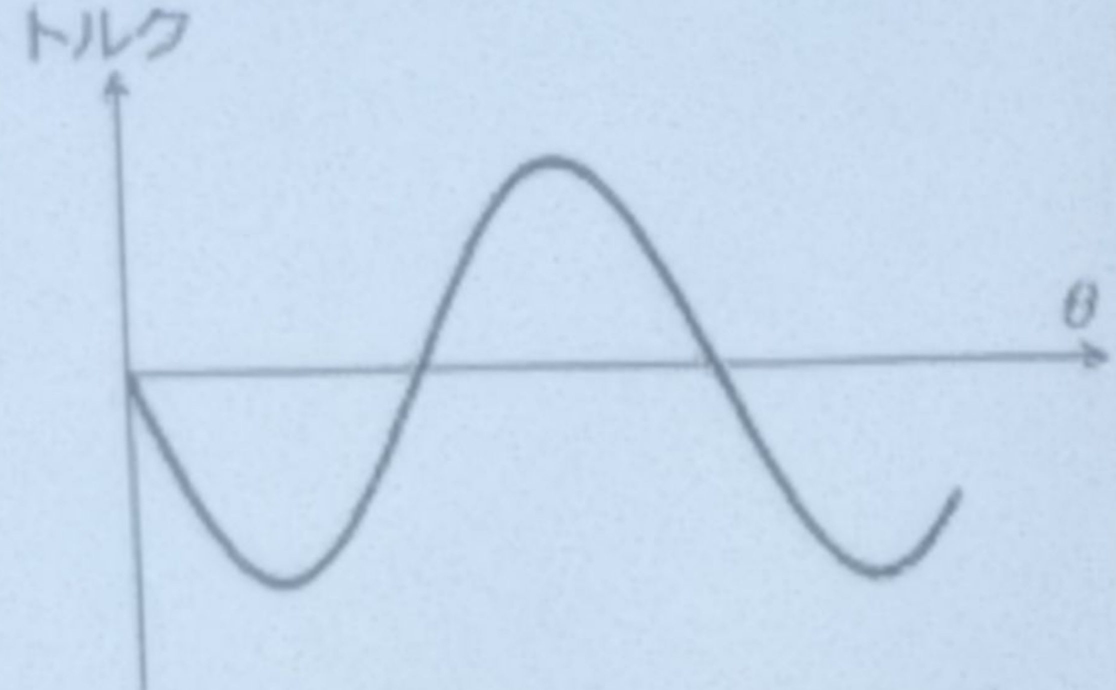
＊ θ ・・・ c軸となす角度

1次　2次

磁気異方性の解析

・トルク計測





→ 三角関数でフィッティング

→ K_1, K_2を算出

問題点
・大きな単結晶が必要
・加工の作業が大変

磁気異方性の解析

- 磁化曲線より算出（SQUID, VSM）

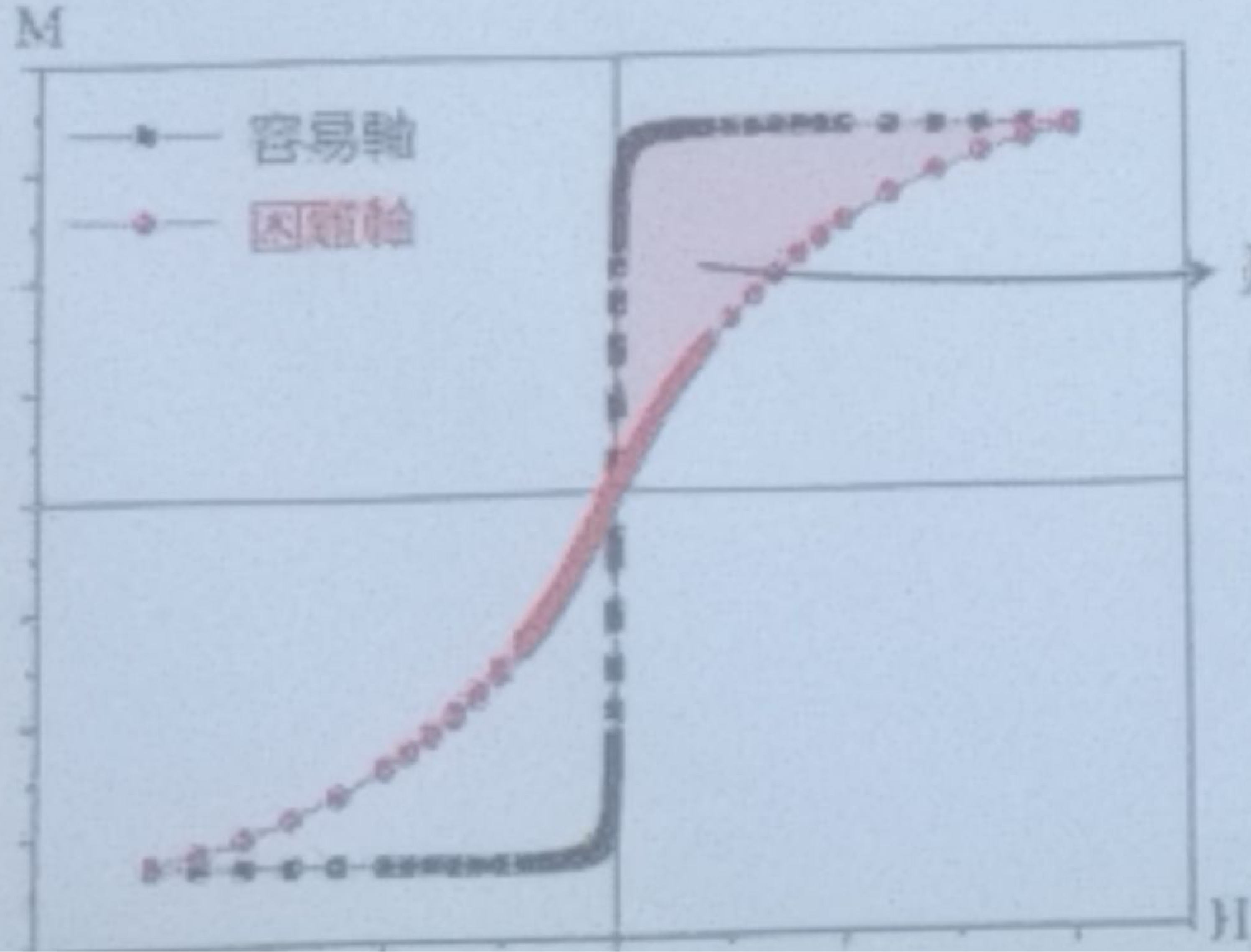
容易軸 の飽和に必要なエネルギー
困難軸 の飽和に必要なエネルギー

差分より算出

$\int HdM$　で表せる

より

磁場×磁化＝磁化曲線の面積



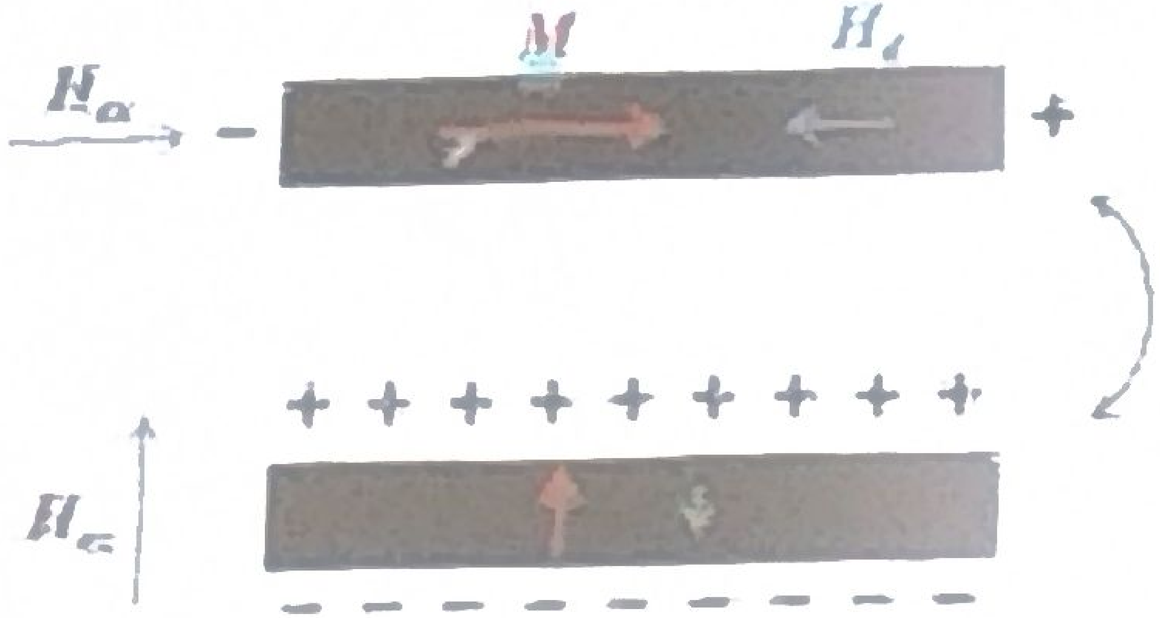
サンプル全体の

差分の面積＝（有効）磁気異方性

＊試料の形状に異方性があるときは
形状異方性を加える必要がある

形状磁気異方性

"反磁場"



表面磁極によって物質内部に生じる磁場
（常に反対方向）

飽和に必要なエネルギーが異なる

$$H_{eff} = H_{ex} - H_d$$

・反磁場

$$E_d = \frac{1}{2} H_d \cdot M_s$$

$$= 2\pi M_s^2 \underbrace{\left(N_x \alpha_1^2 + N_y \alpha_2^2 + N_z \alpha_3^2\right)}_{\text{形状で決まる項}}$$

N: 反磁場係数

- x方向に十分長い針

$$N_x = 0, N_y = \frac{1}{2}, N_z = \frac{1}{2}$$

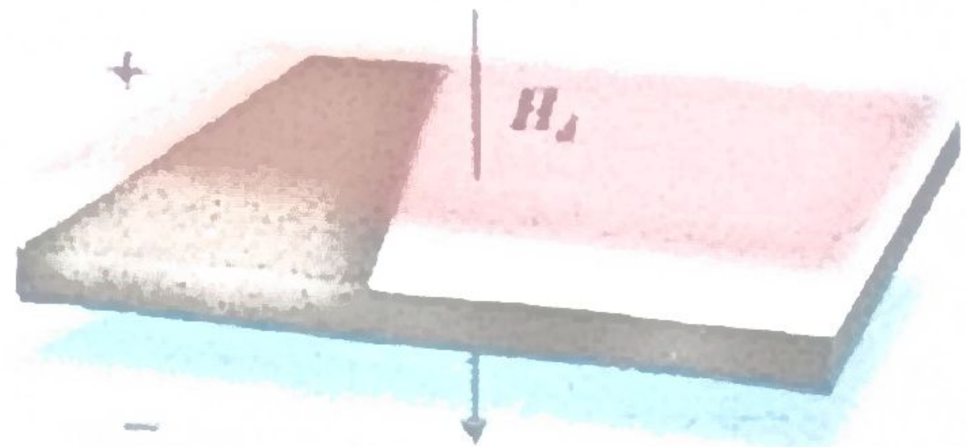
$$E_d = \pi M_s^2(\alpha_z^2 + \alpha_y^2) = \pi M_s^2 \sin\theta$$

- 薄膜

$$N_x = 0, N_y = 0, N_z = 1$$

$$E_d = 2\pi M_s^2 \alpha_z^2 = 2\pi M_s^2 \cos\theta$$

形状異方性エネルギー



※θ: 磁場との角度

結晶磁気異方性の起源

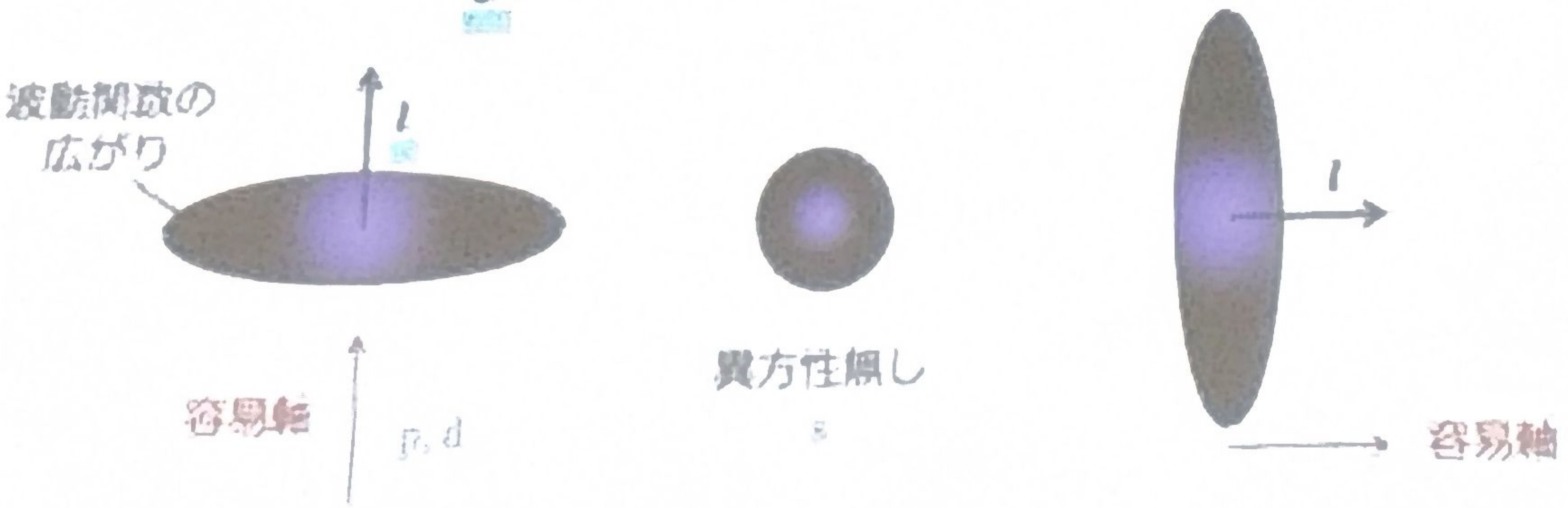
…波動関数の対称性の破れが原因

↓　　　　　　　　↓

3d電子軌道　　　結晶構造 → 薄膜の重元素

モーメント

l



「スピン軌道相互作用」が起源 $\propto Z^4$　　$\boldsymbol{l} \cdot \boldsymbol{s}$

内積で表現可

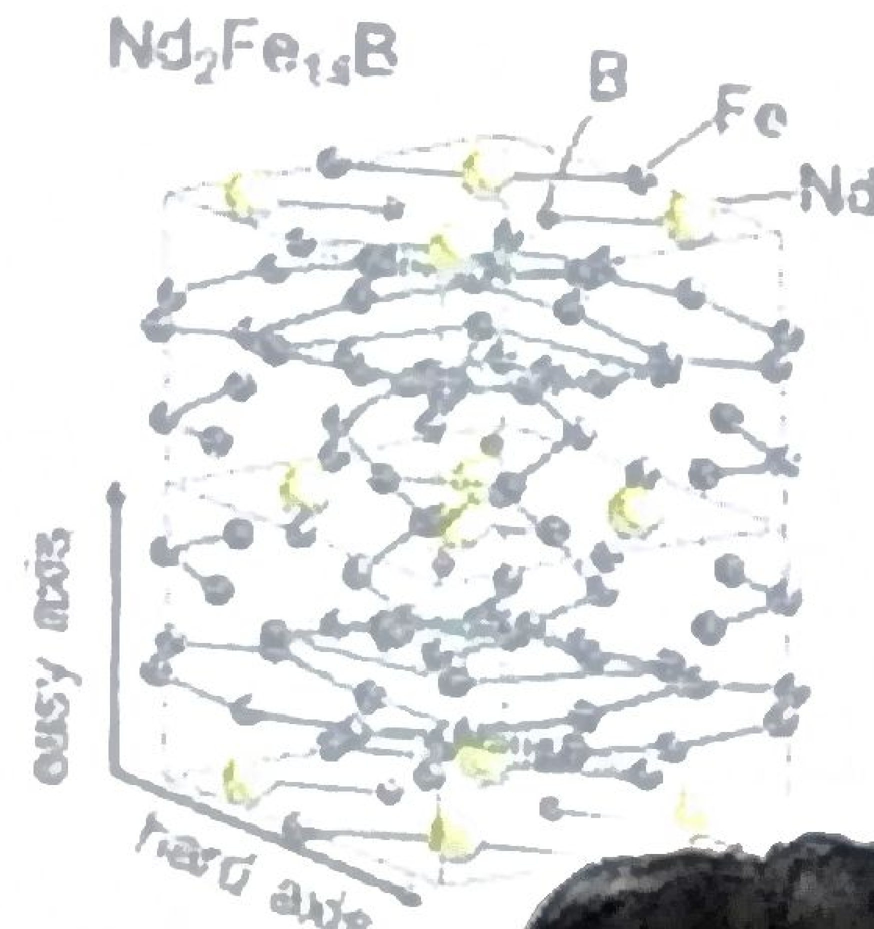
実際の材料

・3d遷移金属（Fe^{3+}等）

結晶場
→ 軌道角運動量の凍結
→ $\langle L \rangle = 0$
→ スピン軌道相互作用は小さい
→ K_uは小さい

・4f系（Dy　ネオジム磁石等）

結晶の歪み
→ 軌道角運動量は残る
→ スピン軌道相互作用が大きい
→ K_uは大きい



実際の材料

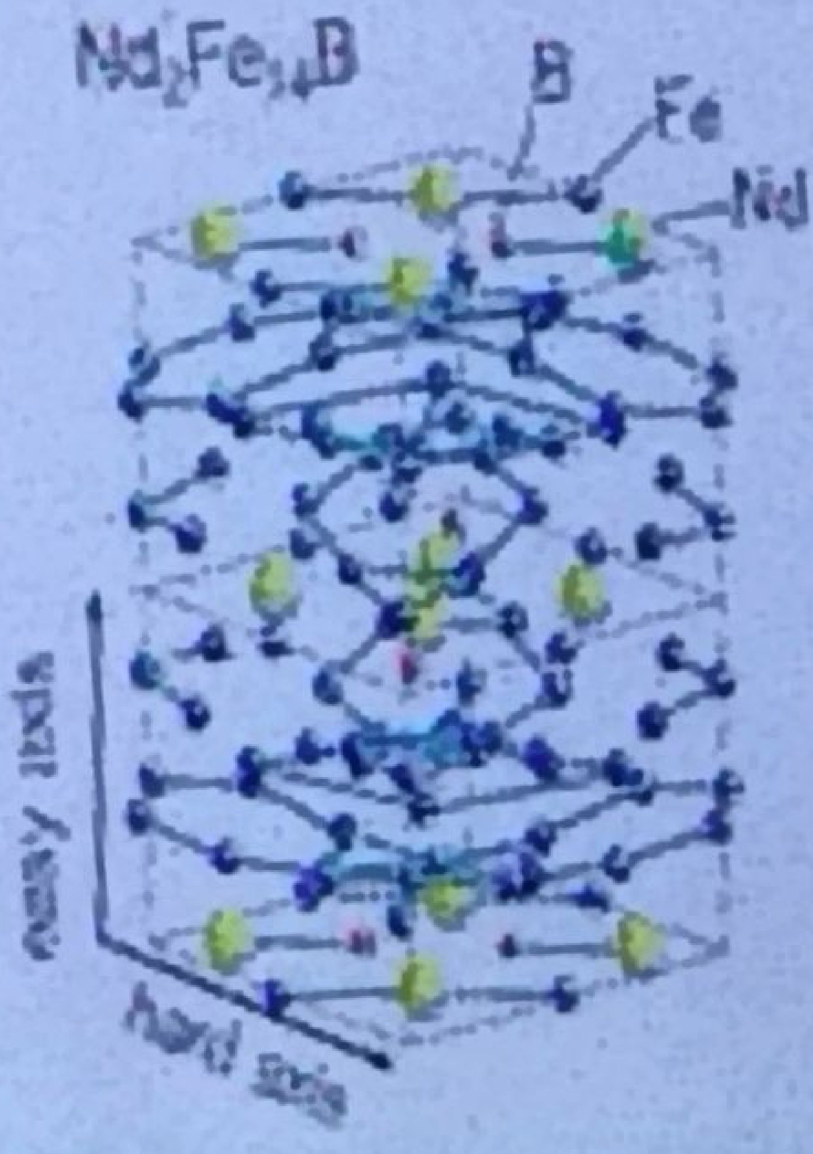
- 3d遷移金属（Fe^{3+}等）

結晶場
→軌道角運動量の凍結
→ $\langle L \rangle = 0$
→スピン軌道相互作用は小さい
→ K_u は小さい

$L1_0$ FeNi

- 4f系（Dy　ネオジム磁石等）

結晶の歪み
→軌道角運動量は残る
→スピン軌道相互作用が大きい
→ K_u は大きい



課題

① 磁気異方性の高い磁性材料を調べなさい

・物質名

・磁気モーメント（M_s）

・磁気異方性定数（K_u）

・磁気異方性がなぜ高いか