マイクロマグネティックス
(微細領域の磁性とデバイス応用)

九州大学大学院
システム情報科学研究院
電子デバイス工学部門

松 山　公 秀

講 演 概 要

1. 磁区、磁壁

2. マイクロマグネティクスの理論

   平衡条件、ダイナミクス (LLG方程式)

3. 計算機シミュレーション

   シミュレーション手法・・・・有限差分法

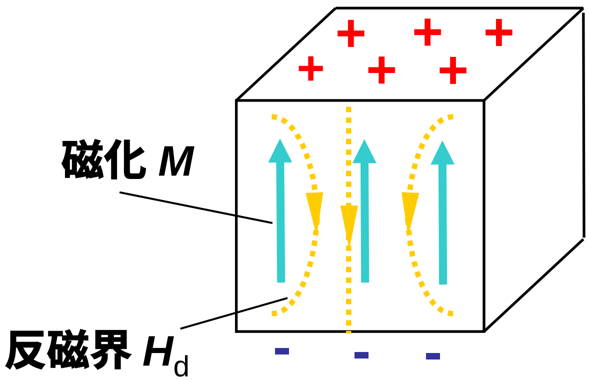
4. 微細領域の磁性とデバイス応用

   磁壁微細構造、薄膜パターン(MRAM)

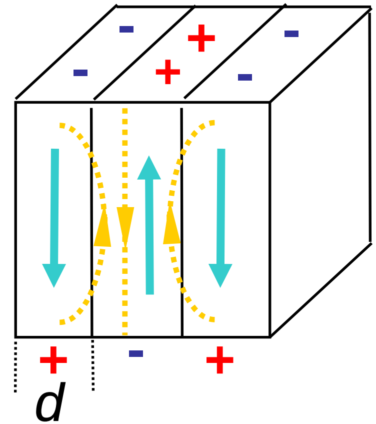
   微粒子、磁気記録媒体

   保磁力機構

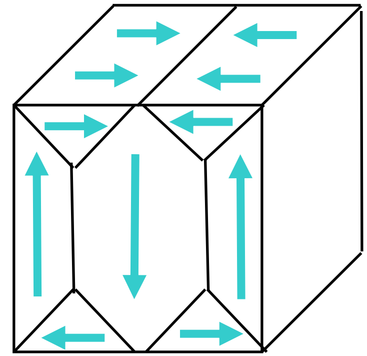
磁区、磁壁



(a) 単磁区



(b) 短冊状磁区と 180°磁壁



(c) 還流磁区と 90°磁壁

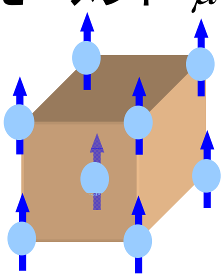
静磁エネルギー
$e_m \propto M^2 d$

磁気弾性エネルギー
$e_{el} \propto \lambda^2 c\, d$

λ: 磁歪定数, c: 弾性率

磁壁エネルギー
$e_w \propto 1/d$ (磁壁数)

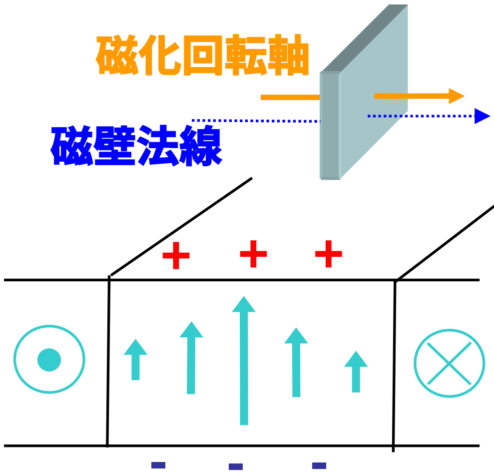
磁気モーメント μ



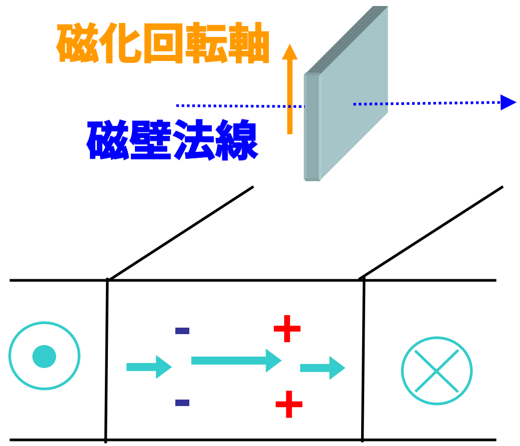
磁化 $M = \dfrac{\sum \mu}{V}$

$$\frac{\partial}{\partial d}\left(e_{m(el)} + e_w\right) = 0 \Rightarrow \text{磁区幅 } d$$

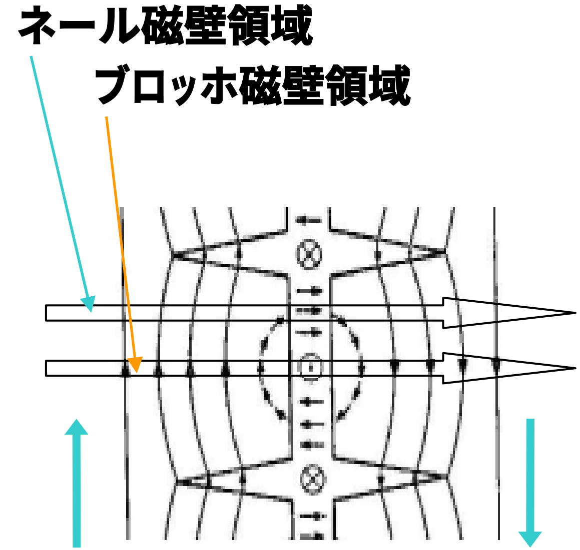
薄膜中の磁壁



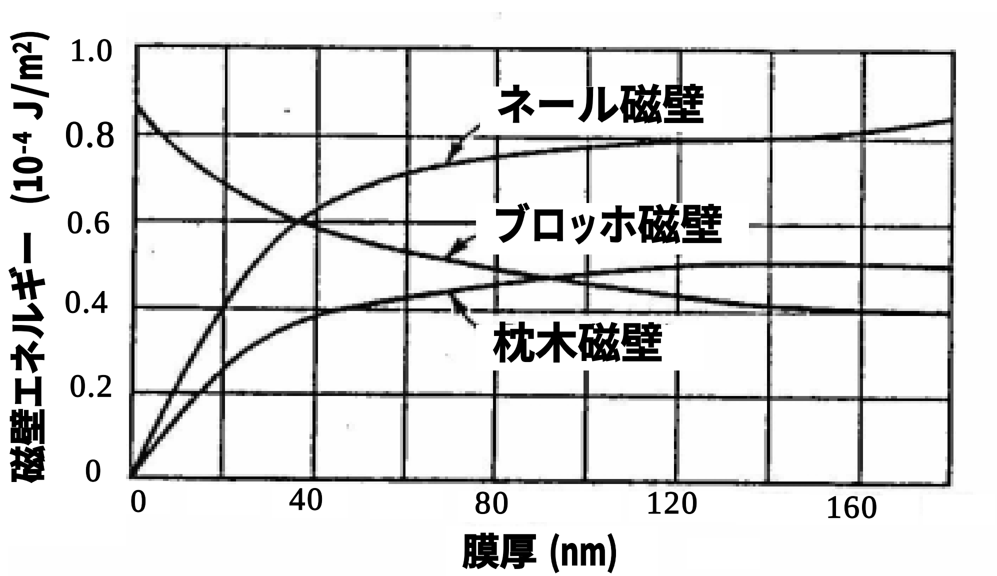
ブロッホ磁壁



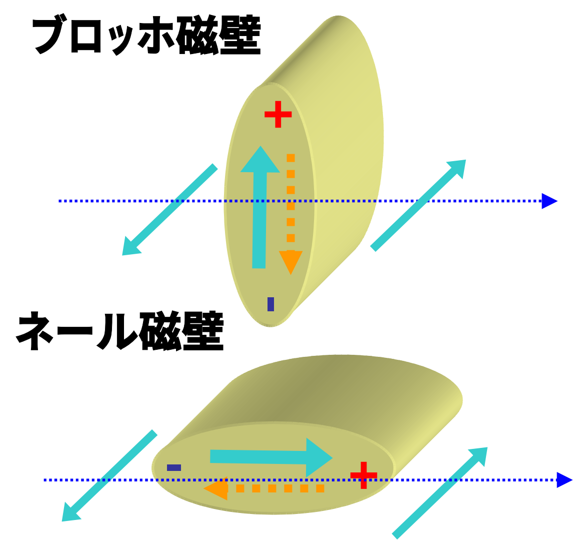
ネール磁壁



枕木磁壁
(cross tie wall)



磁壁エネルギーの膜厚依存性

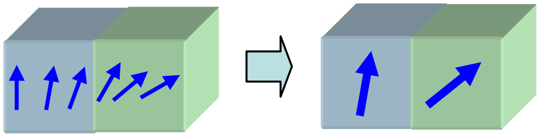


マイクロマグネティクス

磁気モーメント方向の遷移領域を扱える程度にミクロな視点での磁気現象の解析手法

1935 Landau-Lifshitz: **磁区構造解析**

1962 W. F. Brown “Micromagnetics”



1) **静的エネルギー平衡条件**

磁気エネルギーの定式化

エネルギー変分問題

- **交換エネルギー**
- **磁気異方性エネルギー**
- **静磁エネルギー**
  - **反磁界エネルギー**
  - **ゼーマンエネルギー**

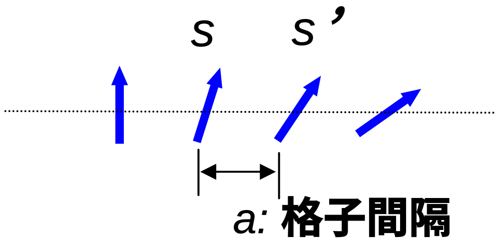
2) **ダイナミクス**

磁化の運動方程式 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)**方程式**

磁気エネルギーの定式化

1) 交換エネルギー

$$\boldsymbol{s}' = \boldsymbol{s} + a\frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{s} + a^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}\boldsymbol{s}$$



$$(\boldsymbol{s}\bullet\boldsymbol{s}) = s^2$$

⇩ 両辺を2階微分

$$\boldsymbol{s}\bullet\frac{\partial^2 \boldsymbol{s}}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \boldsymbol{s}}{\partial x}\right)^2 = 0$$

$$w = -2J\boldsymbol{s}\bullet\boldsymbol{s}'$$

ハイゼンベルグ ハミルトニアン

$$= -2J\,a^2\boldsymbol{s}\bullet\frac{\partial^2}{\partial x^2}\boldsymbol{s}$$

$$= A\left(\frac{\partial \boldsymbol{m}}{\partial x}\right)^2$$

J: 交換積分

A: 交換スティフネス定数
～nJs^2/a (n=2: bcc, 4: fcc)

$$\boldsymbol{m} = \frac{\boldsymbol{s}}{s}$$

($\boldsymbol{m}$: 単位ベクトル)

$$e_{exch} = A(\nabla \boldsymbol{m})^2$$

$$= A\{ (\partial m_x/\partial x)^2 + (\partial m_y/\partial x)^2 + (\partial m_z/\partial x)^2$$
$$+ (\partial m_x/\partial y)^2 + (\partial m_y/\partial y)^2 + (\partial m_z/\partial y)^2$$
$$+ (\partial m_x/\partial z)^2 + (\partial m_y/\partial z)^2 + (\partial m_z/\partial z)^2 \}$$

2) 磁気異方性エネルギー

$$e_{an} = f(m_x, m_y, m_z) = K_u(1 - m_x^2)$$

K_u: 一軸磁気異方性定数

3) 静磁エネルギー

$$e_m = -1/2\boldsymbol{M}\bullet\boldsymbol{H}_d - \boldsymbol{M}\bullet\boldsymbol{H}_{ext}$$

反磁界項　　ゼーマン項

静的エネルギー平衡条件

自由エネルギー

$$G=\int\underbrace{(e_{exch}+e_{an}+e_{m})}_{e}dv$$

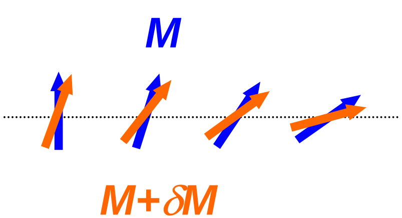
交換　　異方性　静磁

G: 磁化ベクトル$\boldsymbol{M}$(x,y,z)の汎関数, v: 磁性体の体積

Gの極小値を与える$\boldsymbol{M}$(x,y,z) がエネルギー平衡状態

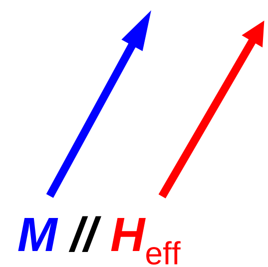
||

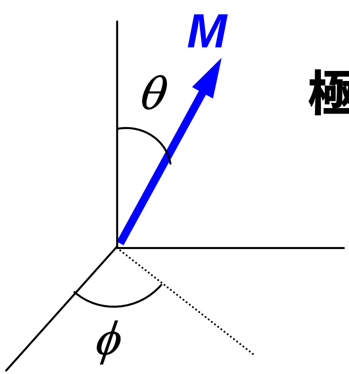
変分問題:　拘束条件 |$\boldsymbol{M}$| = const.



$$\frac{\delta(e+\lambda\boldsymbol{M}^2)}{\delta\boldsymbol{M}}=0 \quad \Rightarrow \quad \underbrace{-\frac{\delta e}{\delta\boldsymbol{M}}}_{\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}}=\lambda\boldsymbol{M}$$

λ: 未定係数　　$\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}$: 等価磁界

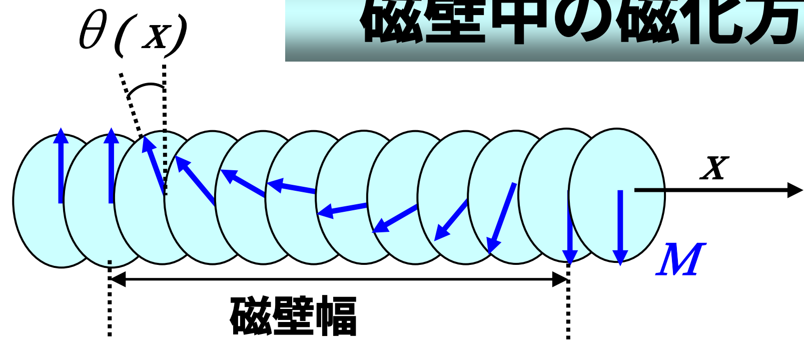


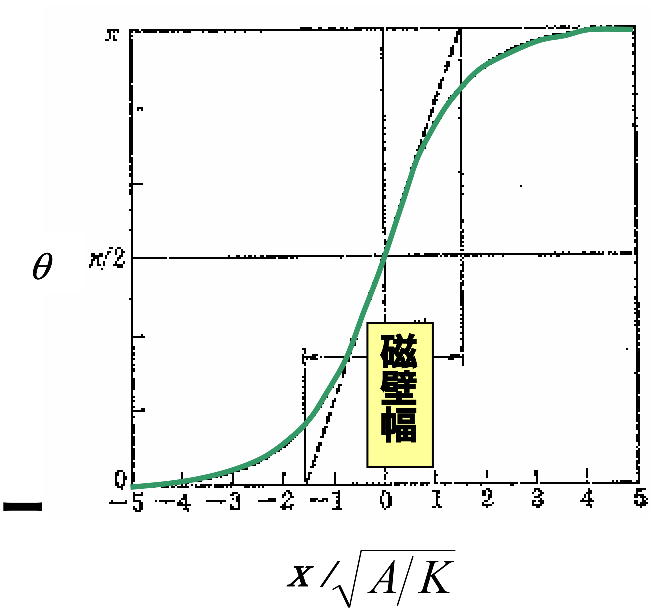


極座標表示

$$\frac{\delta e}{\delta\theta}=0 \qquad \frac{\delta e}{\delta\phi}=0$$

磁壁中の磁化方位分布





磁壁エネルギー G

$$G = \int \{ A(\frac{d\theta}{dx})^2 + K\sin^2\theta \} dx$$

交換エネルギー　　磁気異方性エネルギー

e

最小化

$$\frac{\delta e}{\delta\theta} = \frac{\partial e}{\partial\theta} - \frac{d}{dx}\{\frac{\partial e}{\partial(d\theta/dx)}\} = 2K\sin\theta\cos\theta - 2A(\frac{d^2\theta}{dx^2}) = 0$$

$$\ln\{\tan(\frac{\theta}{2})\} = \sqrt{\frac{A}{K}}\, x$$

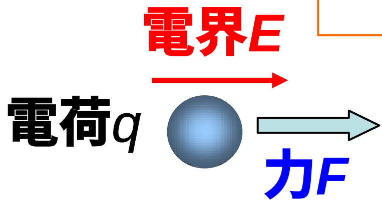
磁壁幅パラメータ

磁壁幅: $\pi\sqrt{\frac{A}{K}}$　　Fe ～40 nm
（約300原子）

電荷が電界から受ける力

$$\boxed{U = qV}$$

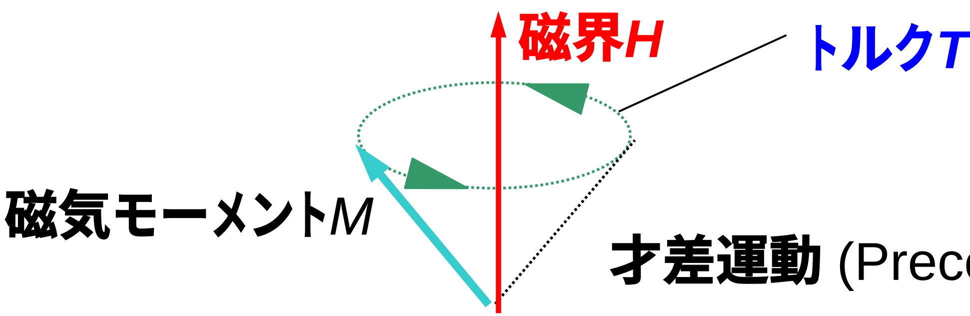
$$\boxed{F = -\frac{\partial}{\partial x}U = -q\underbrace{\frac{\partial}{\partial x}V}_{\text{電界}E}}$$



磁気モーメントが磁界から受けるトルク

$$\boxed{U = -\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{H}}$$

$$\boxed{T = -\frac{\partial}{\partial \theta}U = \boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}}$$



才差運動 (Precession)

磁界による磁化の才差運動

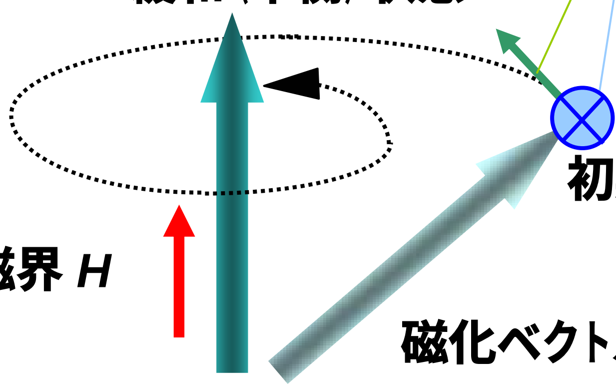
Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式

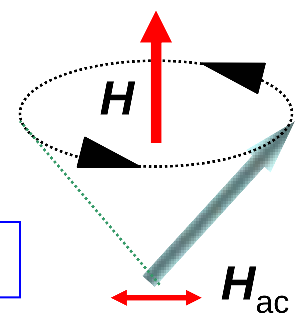
$$\frac{d\boldsymbol{M}}{dt} = \underbrace{-\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}_{eff}}_{\text{トルク項}} + \underbrace{\frac{\alpha}{|M|} \boldsymbol{M} \times \frac{d\boldsymbol{M}}{dt}}_{\text{制動項（摩擦項）}}$$

γ：ジャイロ磁気定数

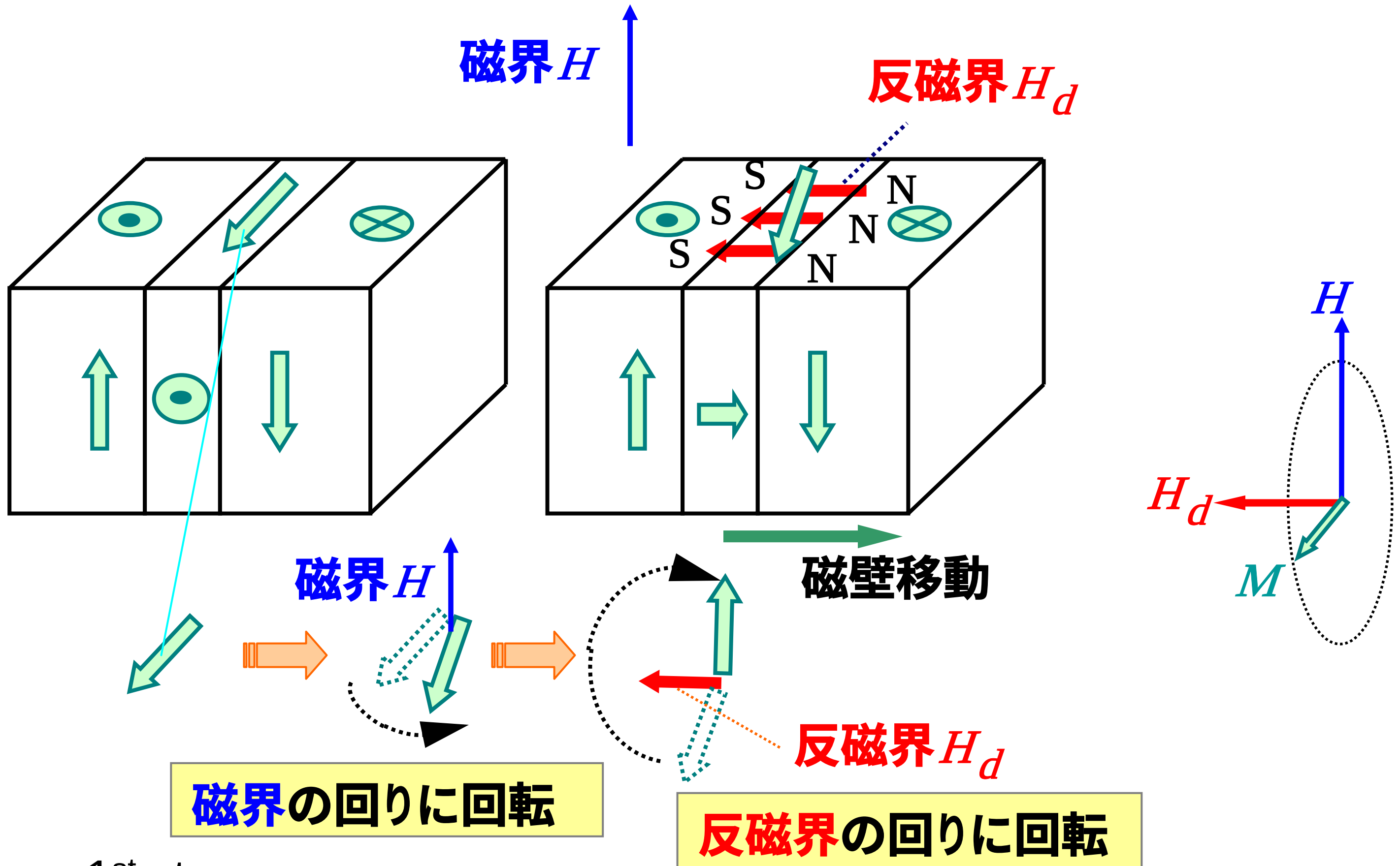
α：ダンピング定数

磁気エネルギーの格子系への散逸（格子振動）





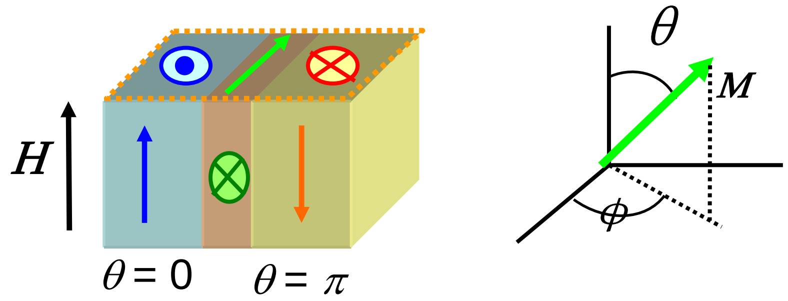
磁界による磁壁の移動



1st step

2nd step

LLG方程式による磁壁動特性解析



磁壁エネルギー G

$$G = \int \{ \underbrace{A\left(\frac{d\theta}{dx}\right)^2}_{\text{交換エネルギー}} + \underbrace{K\sin^2\theta}_{\text{異方性エネルギー}} + \underbrace{2\pi M^2 \sin^2\theta \sin^2\phi}_{\text{反磁界エネルギー}} - \underbrace{MH\cos\theta}_{\text{ゼーマンエネルギー}} \} dx$$

e

LLG方程式（極座標表示)

$d\theta/dt = -(\gamma/M \sin\theta)/(\delta e/\delta\phi) - \alpha \sin\theta (d\phi/dt)$

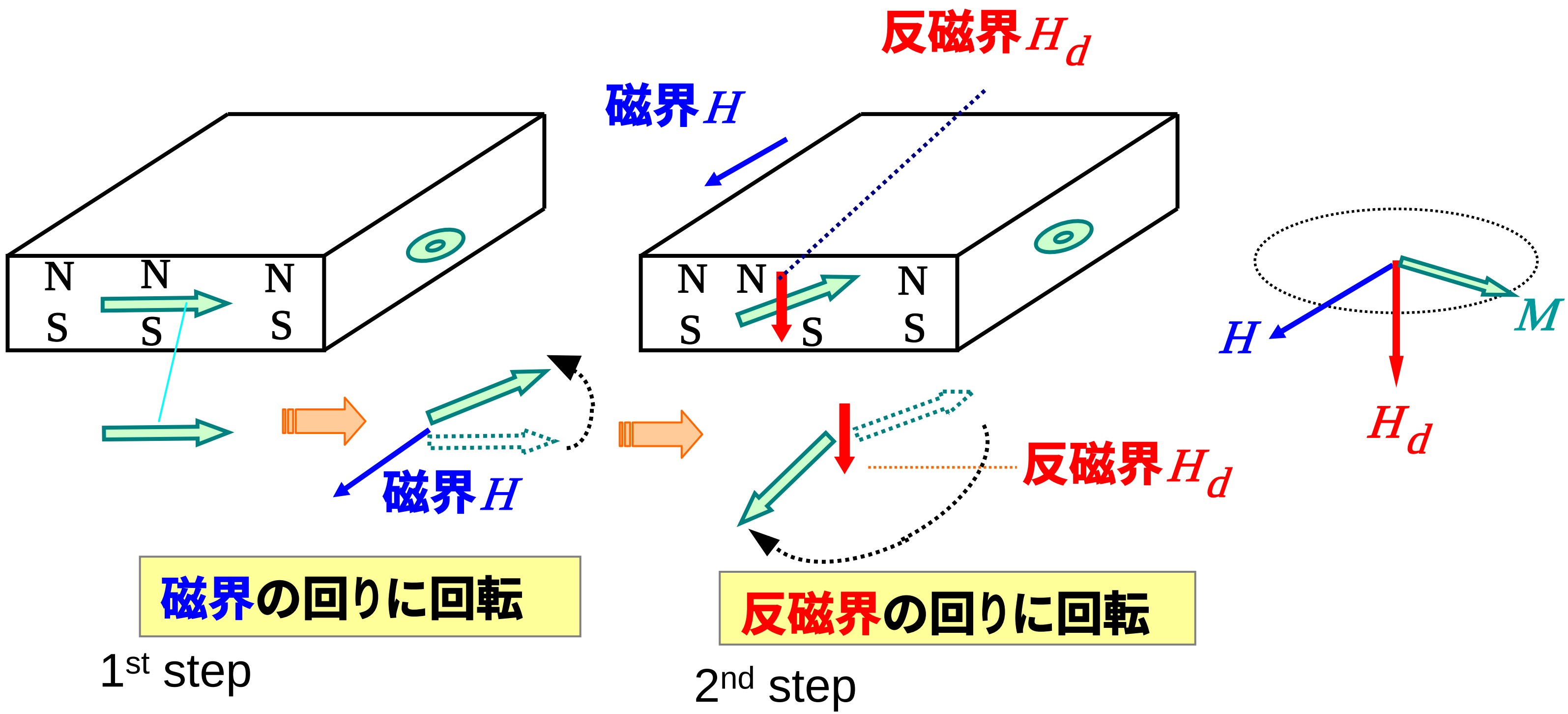
$d\phi/dt = (\gamma/M \sin\theta)/(\delta e/\delta\theta) - \alpha/\sin\theta (d\theta/dt)$

θ: **磁壁位置**　ϕ: **磁壁運動量**　**（共役変数）**

磁壁の質量 $\left(2\pi\gamma^2\sqrt{A/K}\right)^{-1}$

Fe: 1.4×10^{-11} [kg/m^2]

薄膜における磁化反転

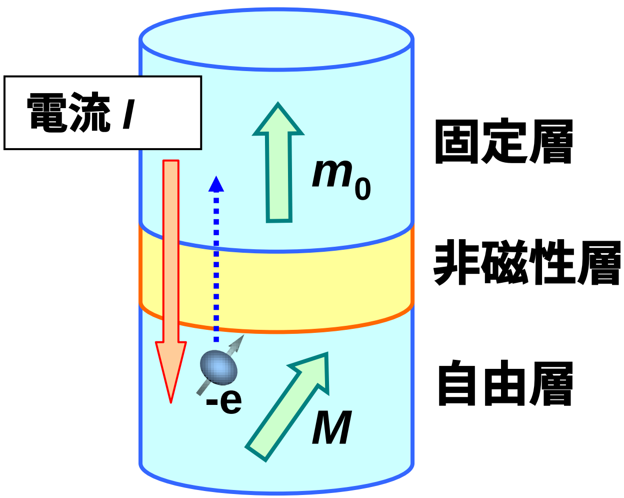


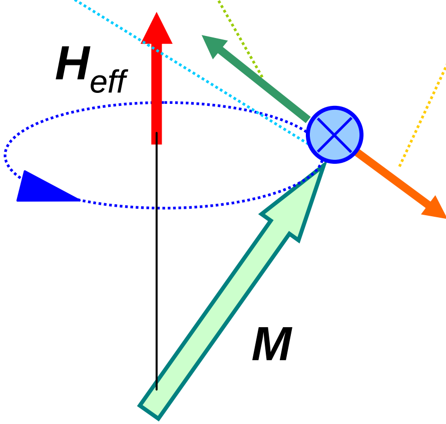
反磁界 H_d
磁界 H
N
S
N
S
N
S
N
N
S
S
N
S
H
M
H_d
磁界 H
反磁界 H_d
磁界の回りに回転
1st step
反磁界の回りに回転
2nd step

スピン注入トルク

スピン偏極した電流により直接トルクを与える

$$\frac{d\boldsymbol{M}}{dt} = \underbrace{-\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}}_{\text{トルク項}} + \underbrace{\frac{\alpha}{|M|} \boldsymbol{M} \times \frac{d\boldsymbol{M}}{dt}}_{\text{制動項}} + \underbrace{\beta (I/e) \{ \boldsymbol{M} \times (\boldsymbol{M} \times \boldsymbol{m}_0) \}}_{\text{スピン注入トルク項}}$$





熱揺らぎ効果

磁化への熱揺らぎの影響をランダム磁界により模擬

$$\frac{d\boldsymbol{M}}{dt} = -\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}_{eff} + \frac{\alpha}{|M|} \boldsymbol{M} \times \frac{d\boldsymbol{M}}{dt}$$

$$H_{eff} = H_{exch} + H_{an} + H_{ext} + H_{d} + H_{th}$$

交換　異方性　外部磁界 反磁界　熱揺らぎ等価磁界

$$H_{th} = \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma M (\Delta V)(\Delta t)}}$$

$k_B T$: **熱エネルギー**

α : **ダンピング定数**

γ : **ジャイロ磁気定数**

Δt : **時間ステップ**

ΔV :**体積要素**

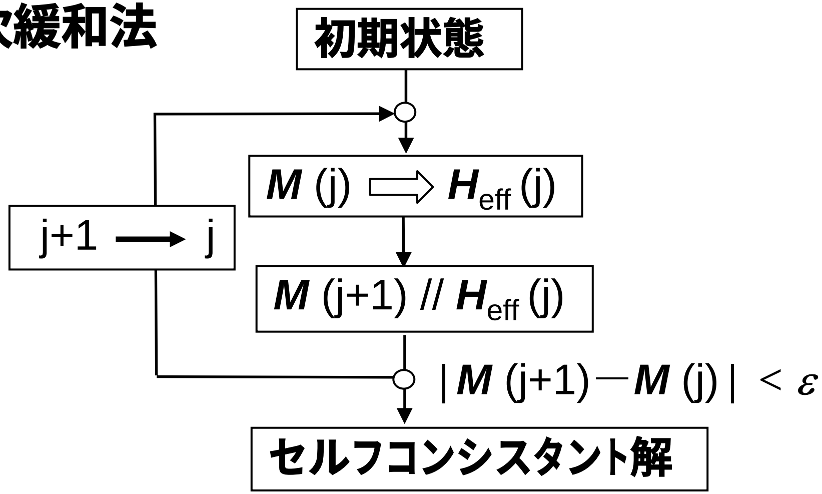
マイクロマグネティクス解析手法

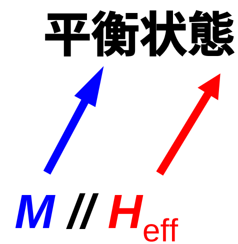
1) Raileigh-Ritz法

磁化分布状態をパラメータを含む関数で表現

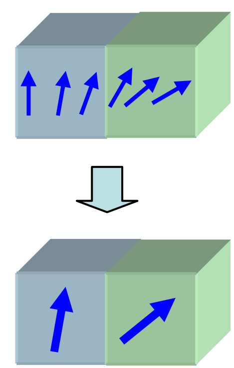
パラメータに関してエネルギーを最小化

2) 逐次緩和法





3) 有限要素法



4) 有限差分法

磁性体を計算格子に要素分割

$$\frac{dM}{dt} \cong \frac{\Delta M}{\Delta t} \qquad \frac{dM}{dx} \cong \frac{\Delta M}{\Delta x}$$

有限差分法による数値計算

LLG方程式

$$\frac{d\boldsymbol{M}}{dt} = -\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}_{eff} + \frac{\alpha}{|M|} \boldsymbol{M} \times \frac{d\boldsymbol{M}}{dt}$$

$$-\frac{\delta e}{\delta \boldsymbol{M}}$$

等価磁界＝
磁気エネルギーの磁化に関する変分

異方性等価磁界 $$H_{an} = -\delta\left(\left(Ku(1-m_x{}^2)\right)/\delta\boldsymbol{m}\right)/M = (2K_u/M)m_x$$

$\overset{K_u}{\longleftrightarrow} x$

交換等価磁界 $$H_{exch} = -\left(\delta\left(A(\nabla m)^2\right)/\delta\boldsymbol{m}\right)/M = (2A/M)/(\nabla^2\boldsymbol{m})$$

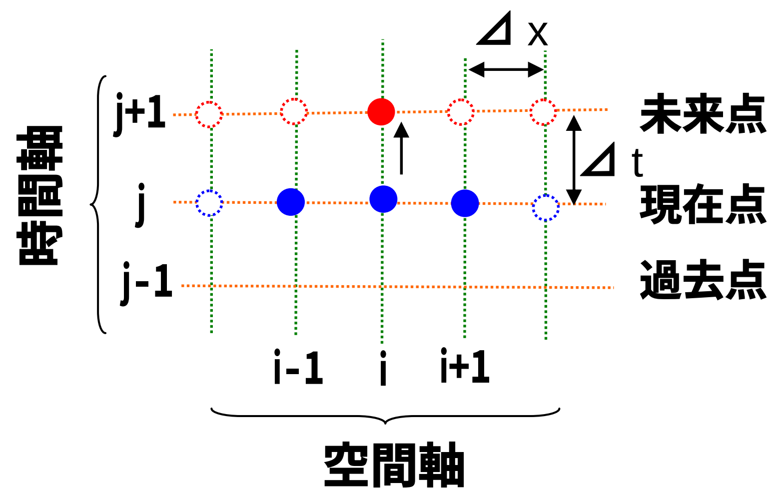
時間軸離散化

$$\frac{d\boldsymbol{M}}{dt} = \frac{\boldsymbol{M}(i, j+1) - \boldsymbol{M}(i, j)}{\Delta t}$$

空間軸離散化

$$\nabla^2\boldsymbol{m} = \frac{\boldsymbol{m}_{i-1} - 2\boldsymbol{m}_i + \boldsymbol{m}_{i+1}}{(\Delta x)^2}$$

放物型偏微分方程式



計算格子模型

講 演 概 要

1. 磁区、磁壁

2. マイクロマグネティクスの理論

   平衡条件、ダイナミクス (LLG方程式)

3. 計算機シミュレーション

   シミュレーション手法・・・・有限差分法

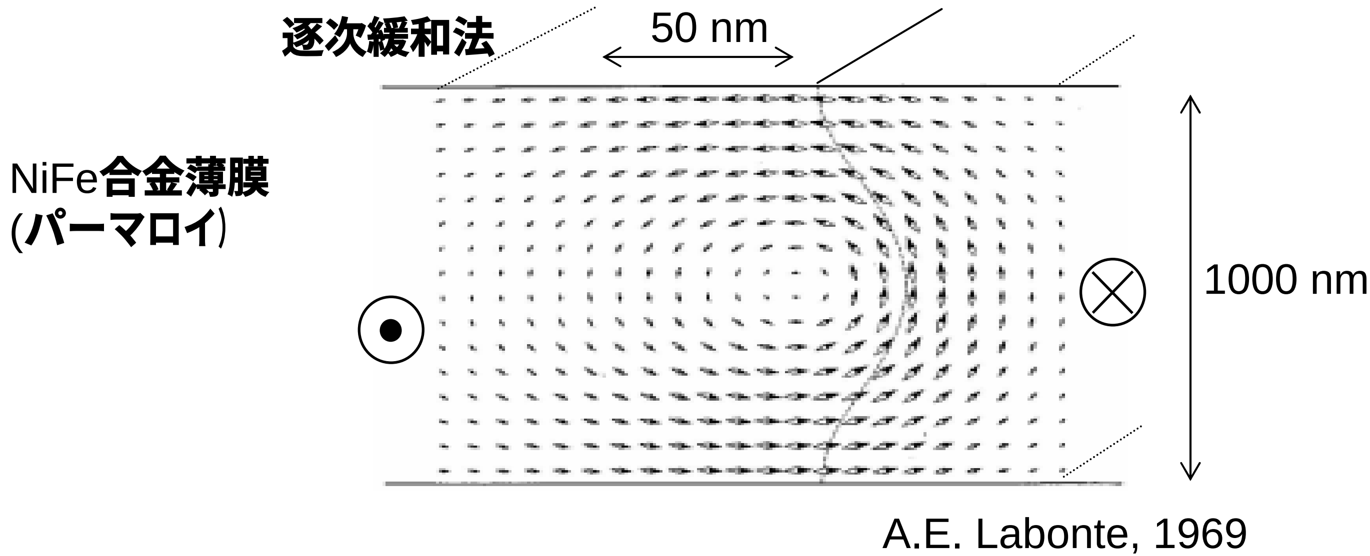
4. 微細領域の磁性とデバイス応用

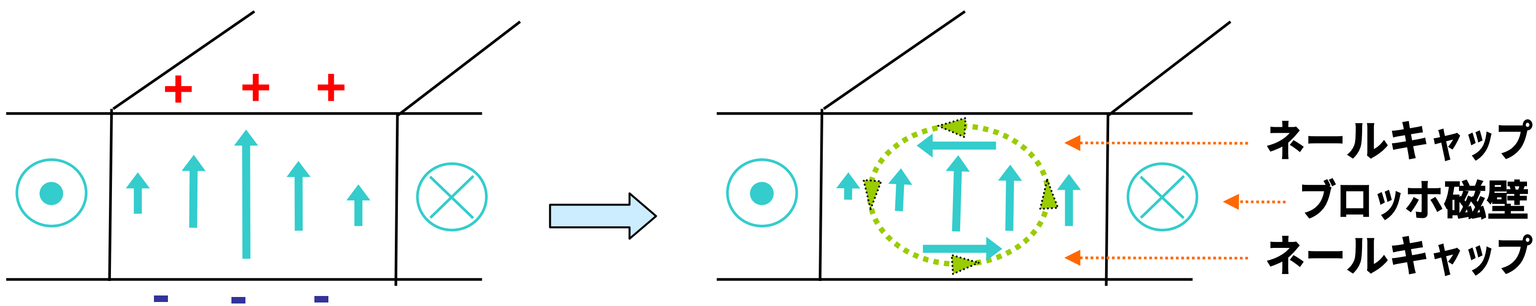
   磁壁微細構造、薄膜パターン (MRAM)

   微粒子、磁気記録媒体

   保磁力機構

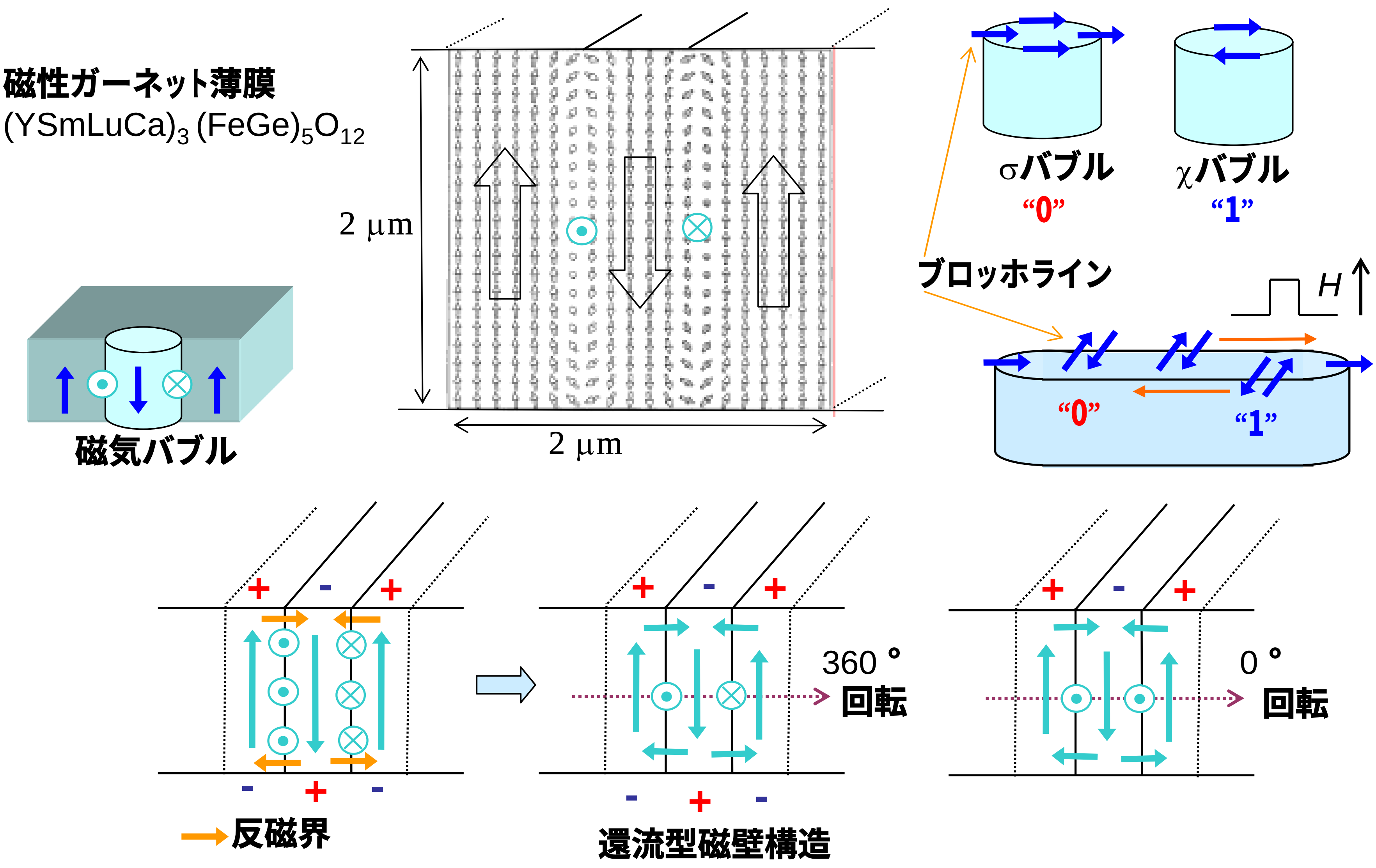
面内磁化膜中の非対称ブロッホ磁壁



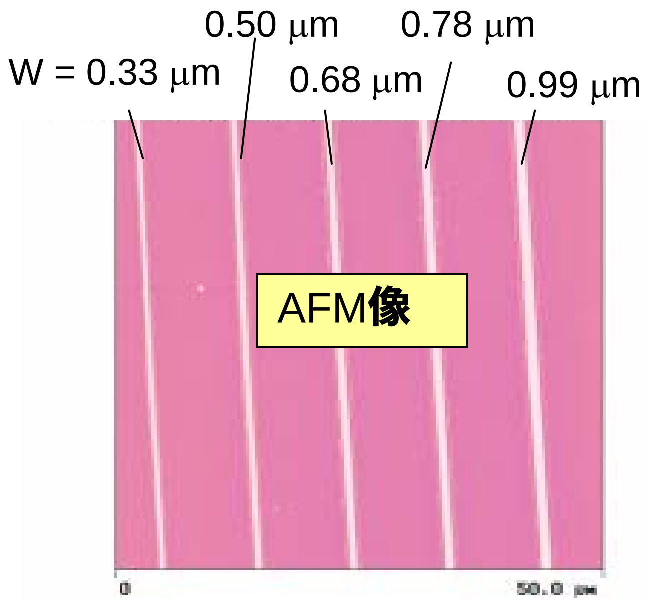


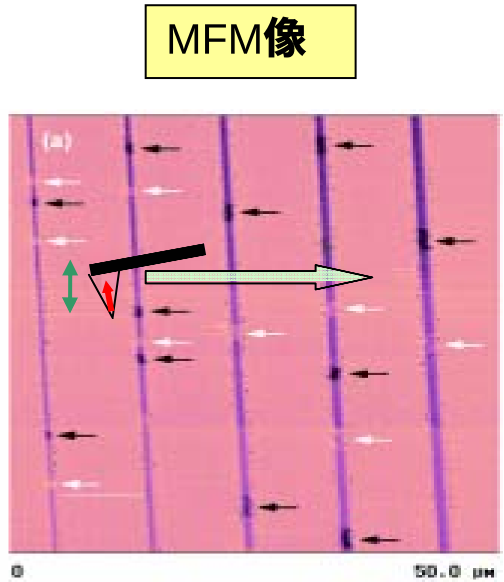
ボルテックス磁化構造による膜厚方向の反磁界低減

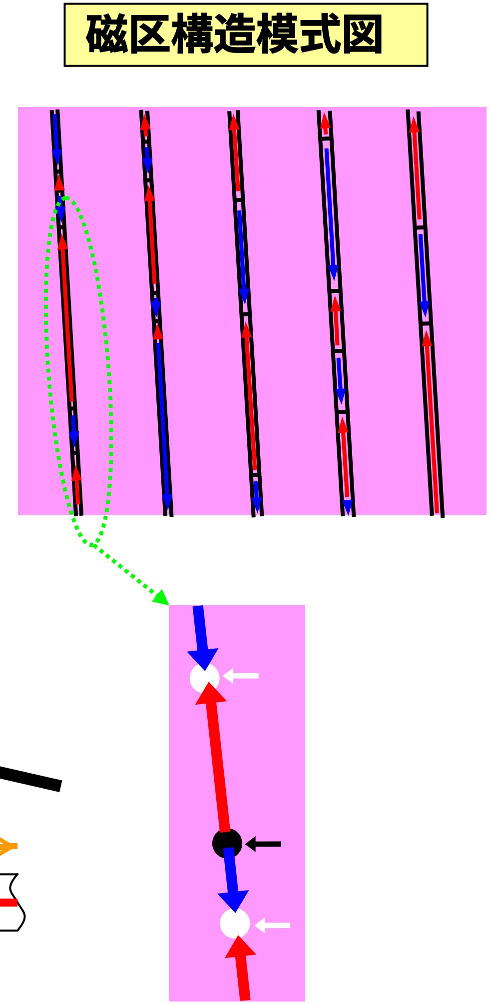
垂直磁化膜中のツイスト磁壁

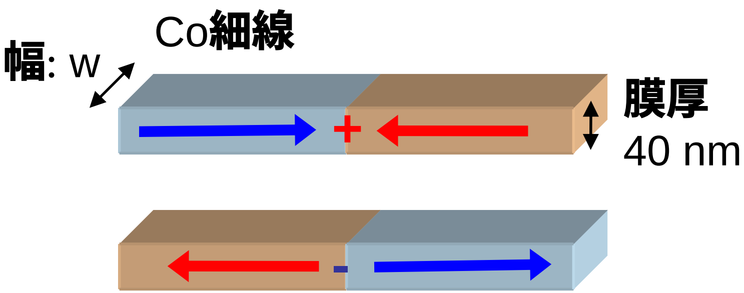


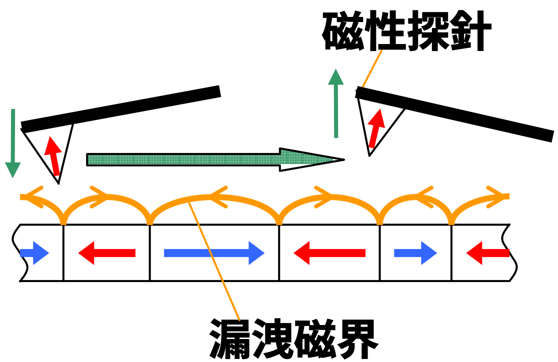
磁性細線中の対向磁壁









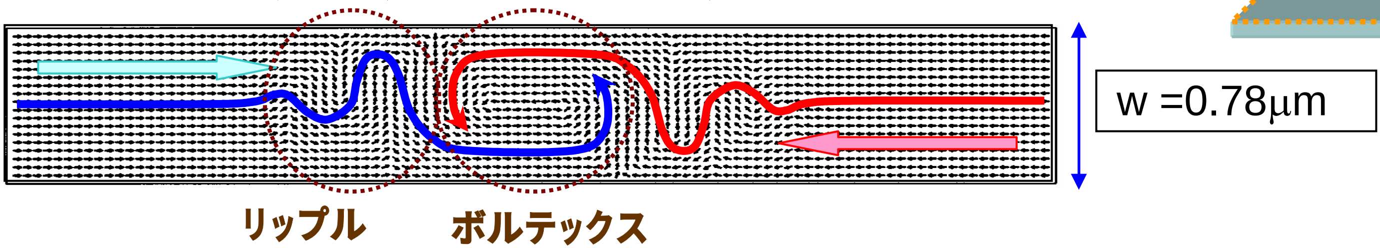


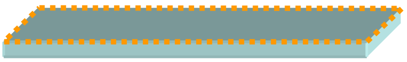
走査型磁気力顕微鏡(MFM)による磁区観察

対向磁壁の磁化分布状態

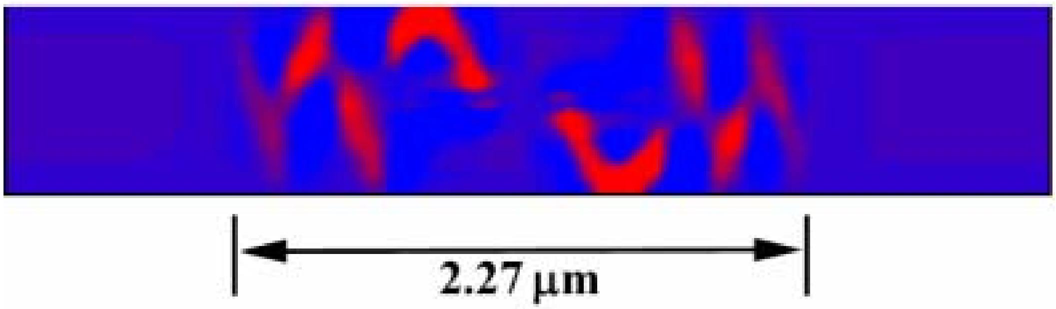
MFM観察とマイクロマグネティックスシミュレーションの比較

磁化ベクトル分布 (シミュレーション)

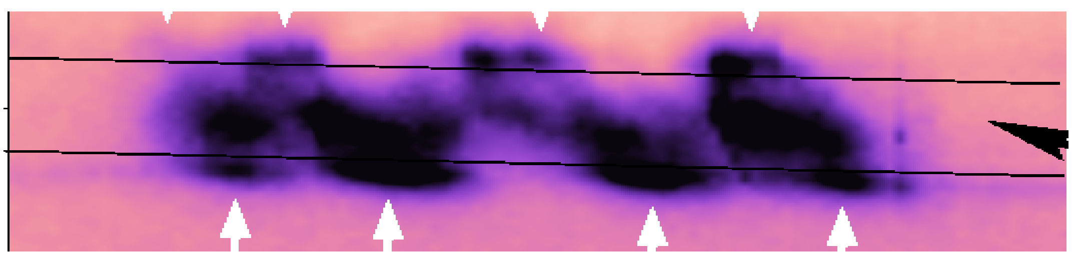


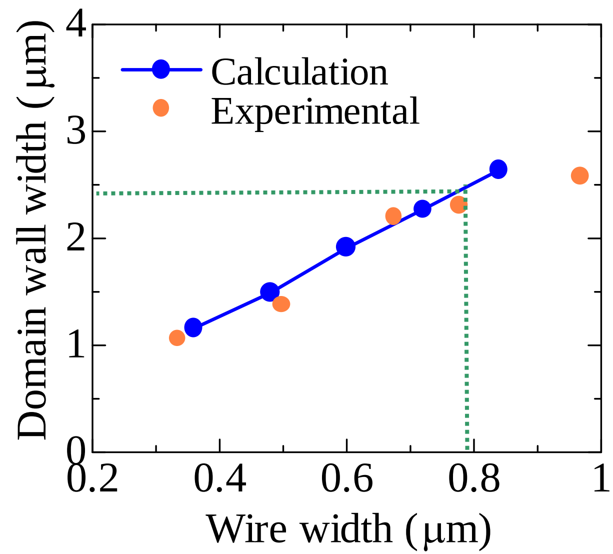


磁気力分布 (シミュレーション)



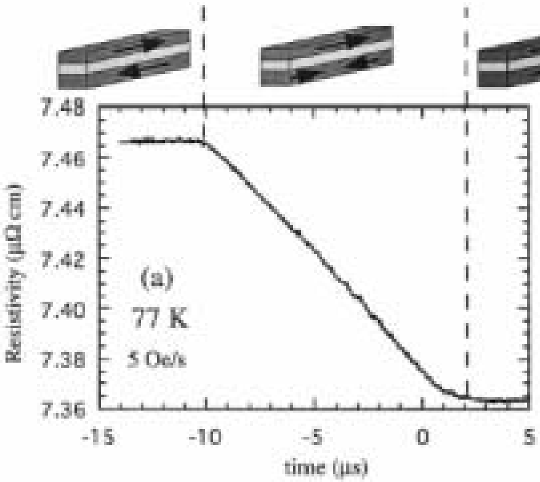
MFM像

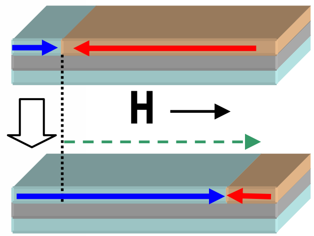




磁壁の制御とデバイス応用

磁界による磁壁の転送

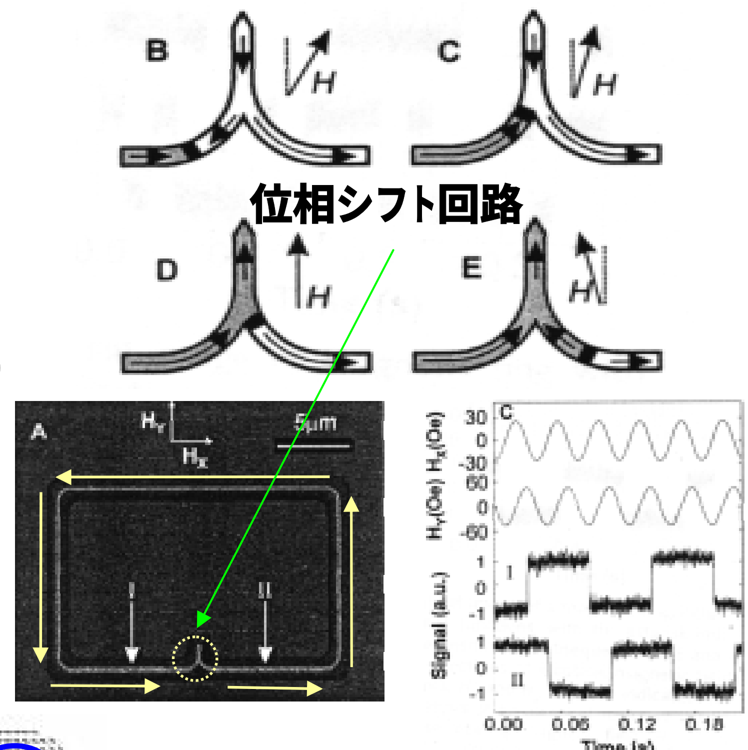




V = 182 m/s (H = 88 Oe)

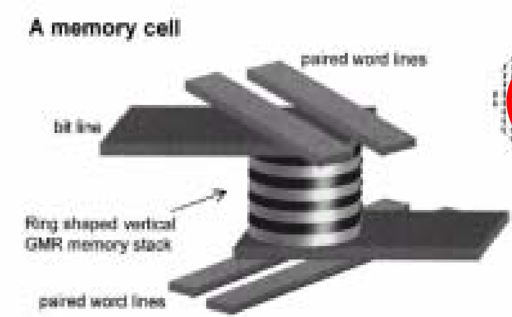
T. Ono et al., JAP 85 (1999) 6181

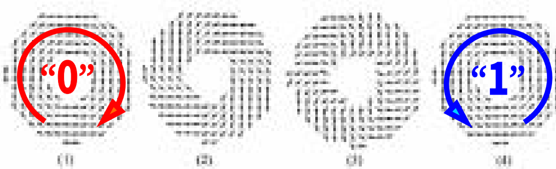
スピンロジックゲート



D. A. Allwood et al.,
Science 296 (2002) 2003

スピンカイラリティによる記録





J-G. Zhu et al., JAP 87 (2000) 6669

講 演 概 要

1. 磁区、磁壁

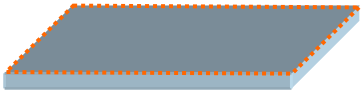
2. マイクロマグネティクスの理論
    平衡条件、ダイナミクス (LLG方程式)

3. 計算機シミュレーション
    シミュレーション手法・・・・有限差分法

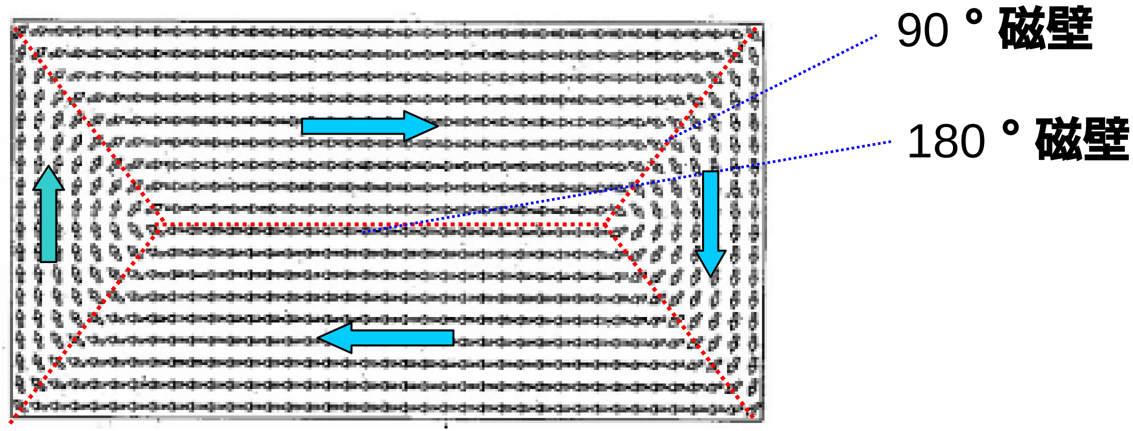
4. 微細領域の磁性とデバイス応用
    磁壁微細構造、薄膜パターン(MRAM)
    微粒子、磁気記録媒体
    保磁力機構

微小磁性体の磁化分布状態

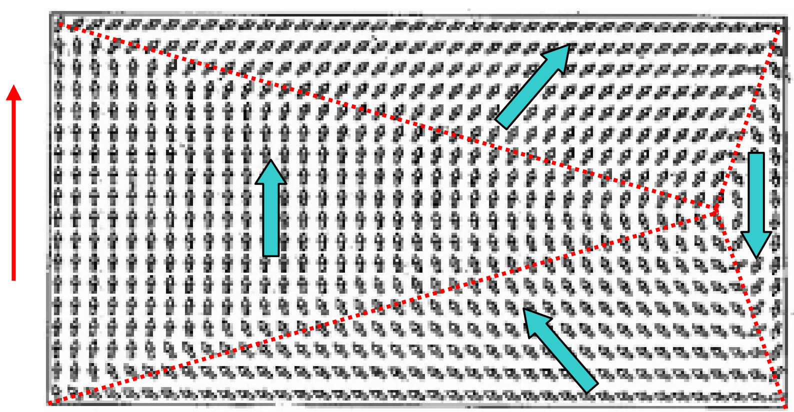
磁性薄膜パターン



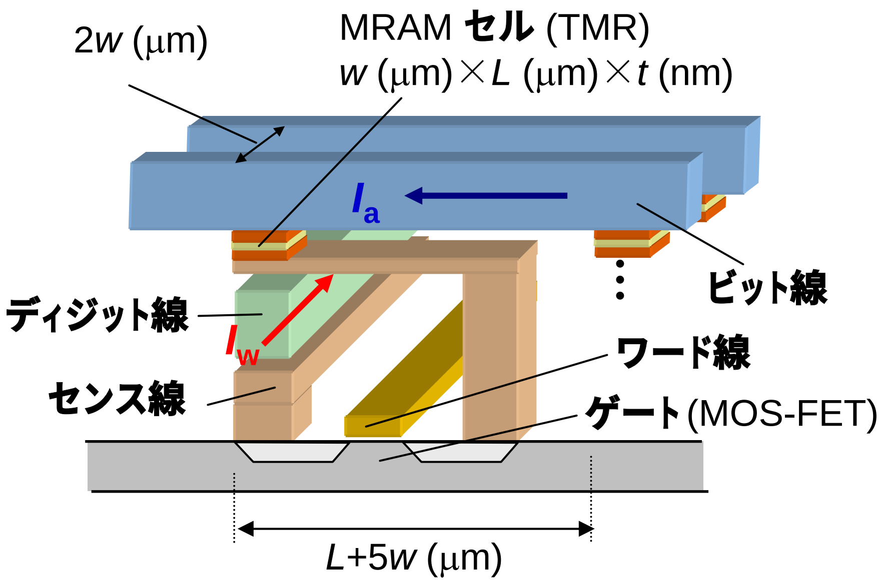
10×5 μm



磁界H = 80 Oe



MRAM動作シミュレーション



1-MTJ, 1-transistor MRAM

記憶セルパターン形状：$L \times w \times t$

- **パターン幅** w ： 0.05 μm 〜 0.5 μm
- **形状比** L/w ： 1.0 〜 1.5
- **膜厚** t ： 1 nm 〜 6 nm

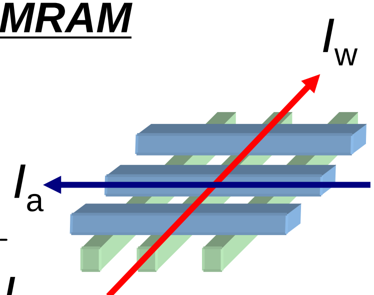
ビット線形状 ：

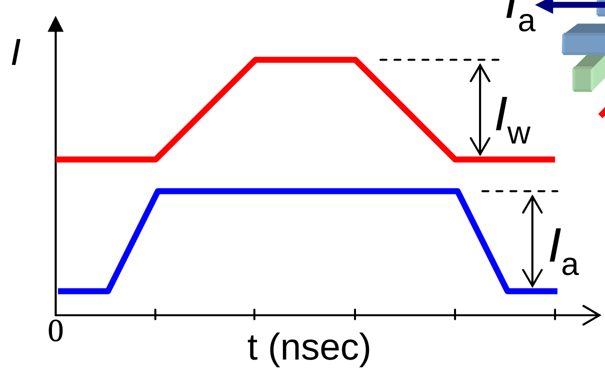
- **断面形状** ： $w \times 0.3$ μm
- **セルとのスペーシング** ： 0.05 μm

ディジット線形状 ：

- **断面形状**： $L \times 0.4$ μm
- **セルとのスペーシング** ： 0.15 μm

電流一致選択方式





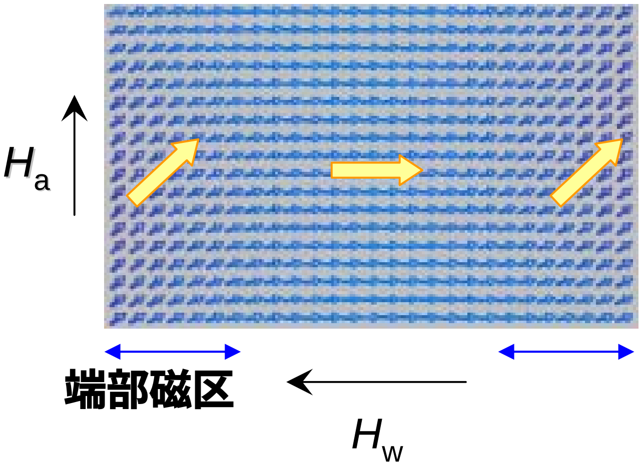
Landau-Lifshitz-Gilbert ***方程式の数値計算***

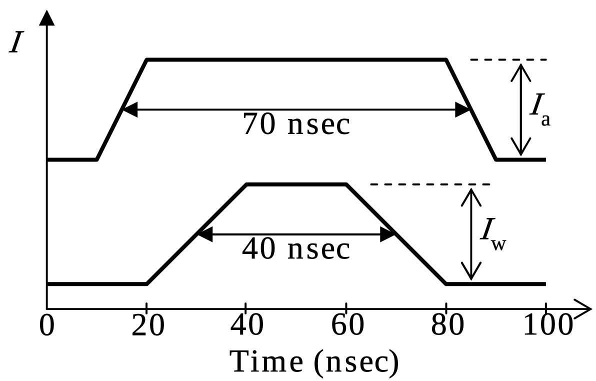
↓

直交導体電流磁界による
MRAMセルのスイッチング特性解析

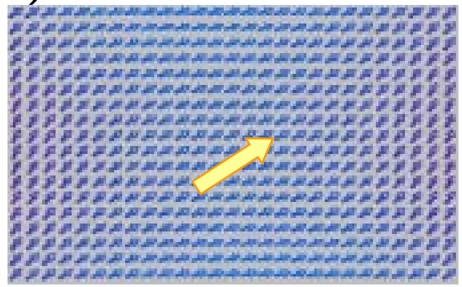
直交導体電流磁界によるMRAM記憶セルの磁化反転過程

(w = 0.1 μm, L/w =1.5, t =3 nm)

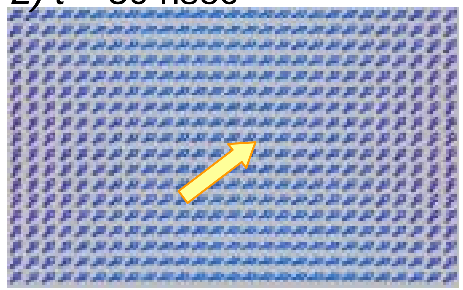




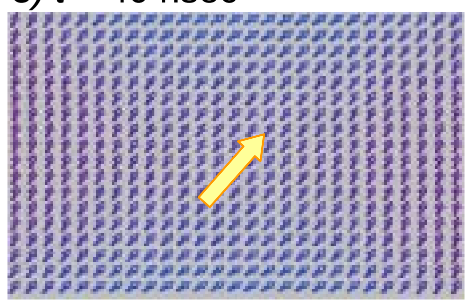
1) t = 20 nsec



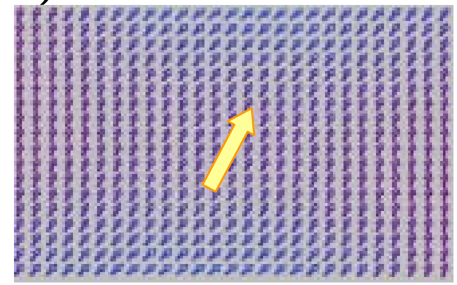
2) t = 30 nsec



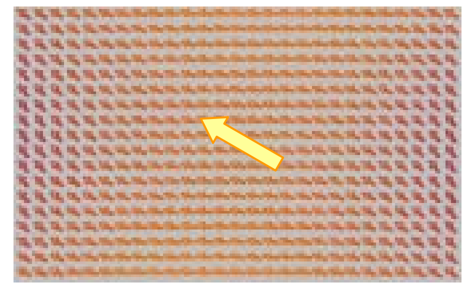
3) t = 40 nsec



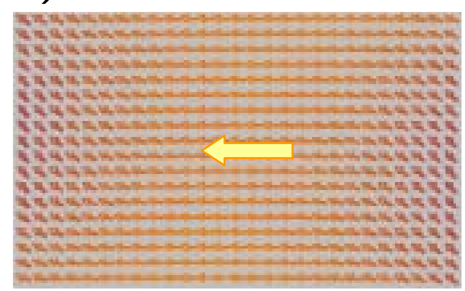
4) t = 50 nsec



5) t = 60 nsec

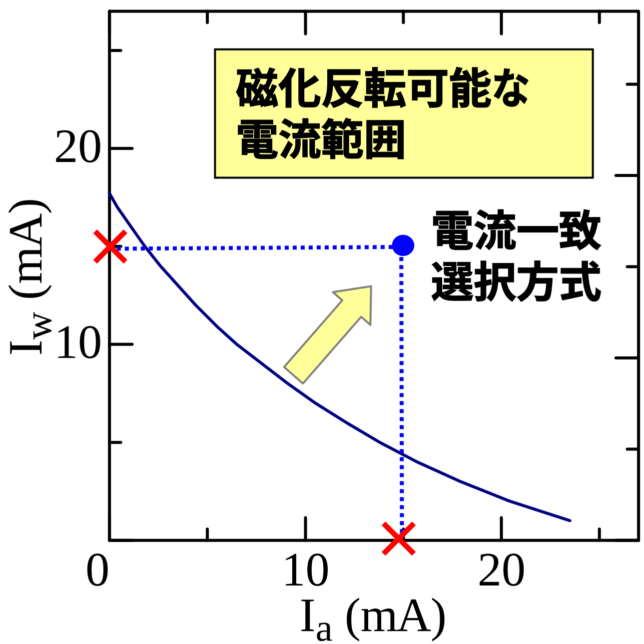


6) t = 70 nsec

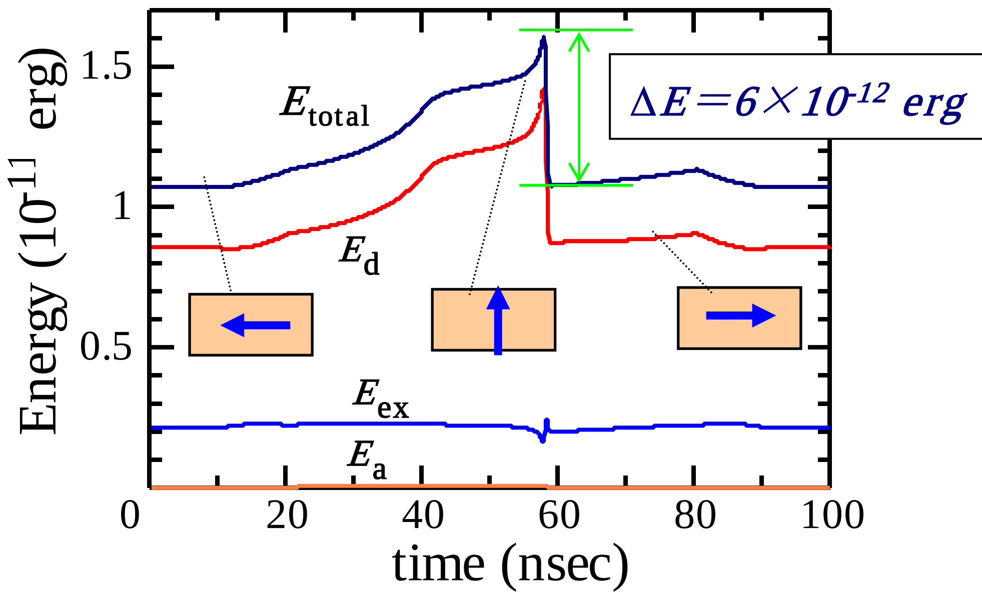


磁化反転モードは、一斉磁化回転型に近い。

磁化反転電流



磁化反転過程における エネルギー変化

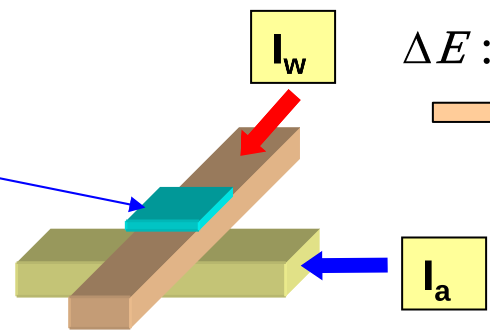


$E_{total} = E_d$(反磁界)+ E_{ex}(交換)+ E_a (異方性)

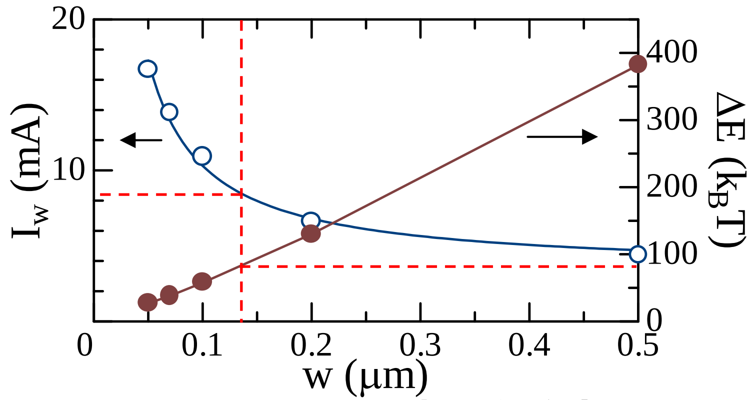
ΔE : スピン反転時のエネルギー障壁

⇒ **反磁界エネルギーE_dの寄与が支配的**

セルサイズ
(100×150 nm², t = 3 nm)

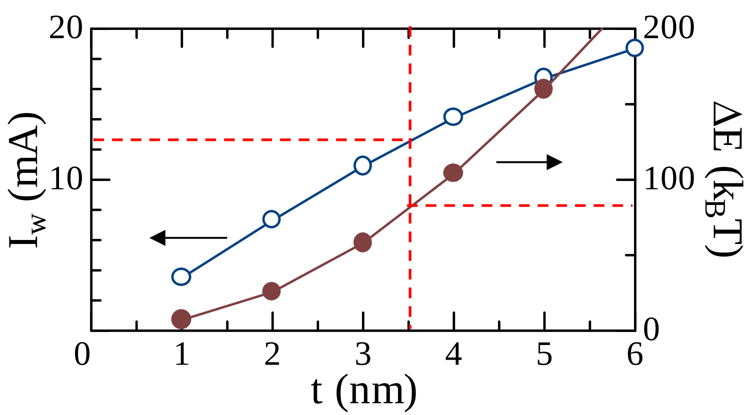


スイッチング電流および熱安定性指標のセル幅・膜厚依存性



I_wおよびΔEのセル幅w依存性

(L/w=1.5, t=3 nm)



I_wおよびΔEのセル膜厚t依存性

(w=0.1 μm, L/w=1.5)

一斉磁化回転に近い反転モード

静磁エネルギーの寄与が支配的

$I_w \propto H_{swt} \propto t/w$

$\Delta E \propto (t/w)\times V = 1.5\,wt^2$

w=0.1 μm, L/w=1.5 (0.8 Gbit/cm²相当)で
熱安定性指標：$\Delta E > 80\,k_B T$を満たす条件

$t > 3.5$ nm ⇨ I_w=12 mA

講　演　概　要

1. 磁区、磁壁

2. マイクロマグネティクスの理論

   平衡条件、ダイナミクス (LLG方程式)

3. 計算機シミュレーション

   シミュレーション手法・・・有限差分法

4. 微細領域の磁性とデバイス応用

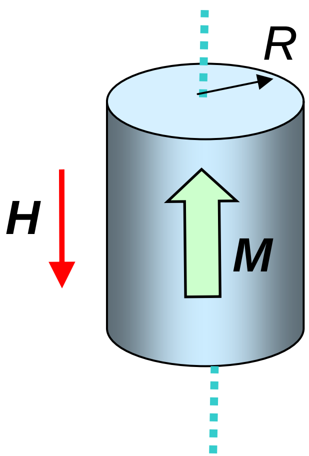
   磁壁微細構造、薄膜パターン(MRAM)

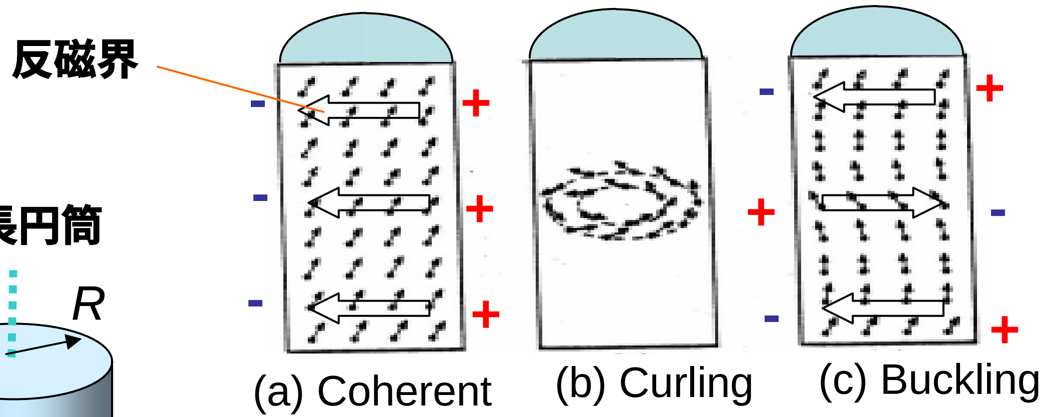
   微粒子、磁気記録媒体

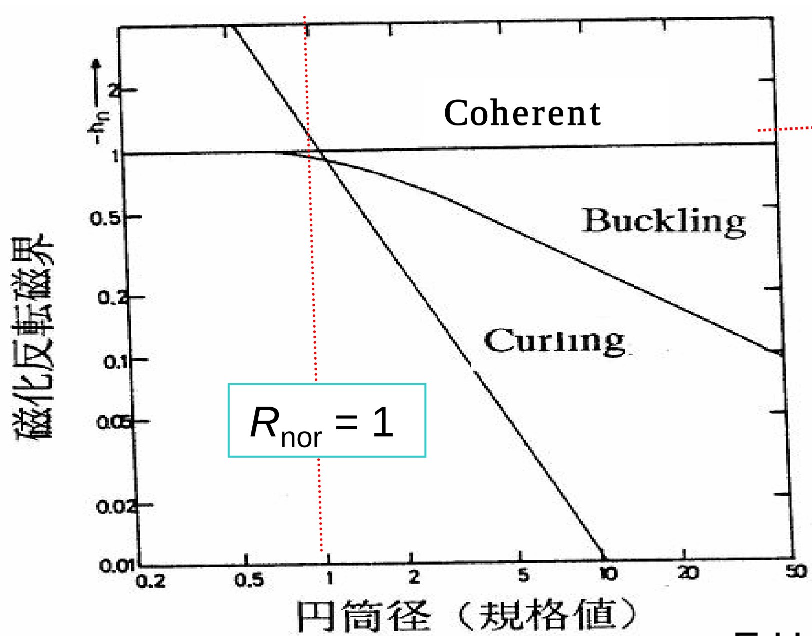
   保磁力機構

磁性微粒子の磁化反転モード

無限長円筒





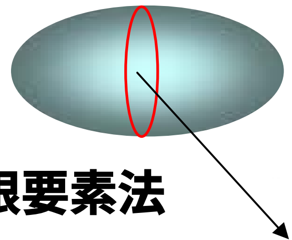


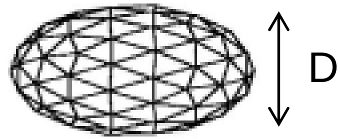
$$H = \frac{M}{2\mu_0}$$

$$R_{nor.} = \frac{R}{(\sqrt{A}/M)}$$

E.H. Frei et al., 1957

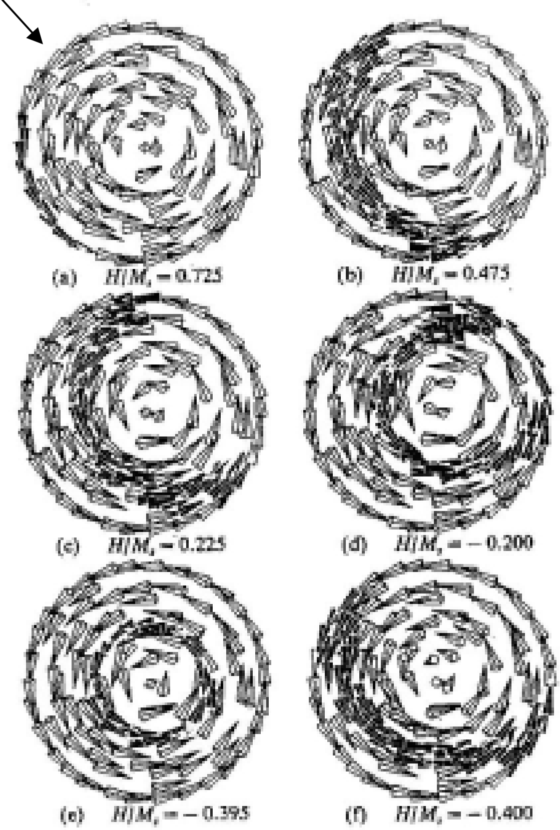
回転楕円体磁性体の非対称Curling型磁化反転

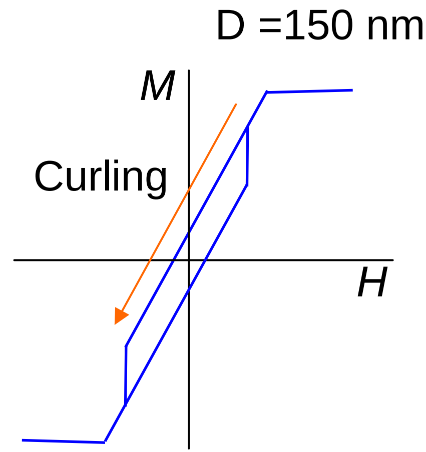


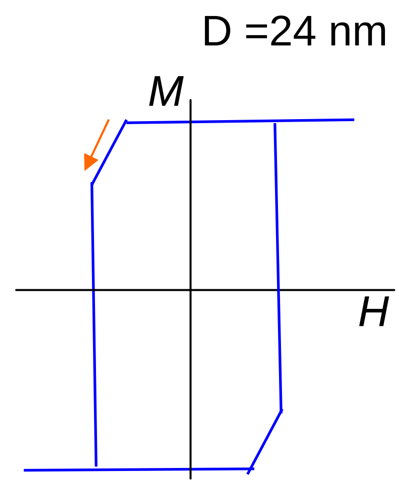


有限要素法

D =150 nm

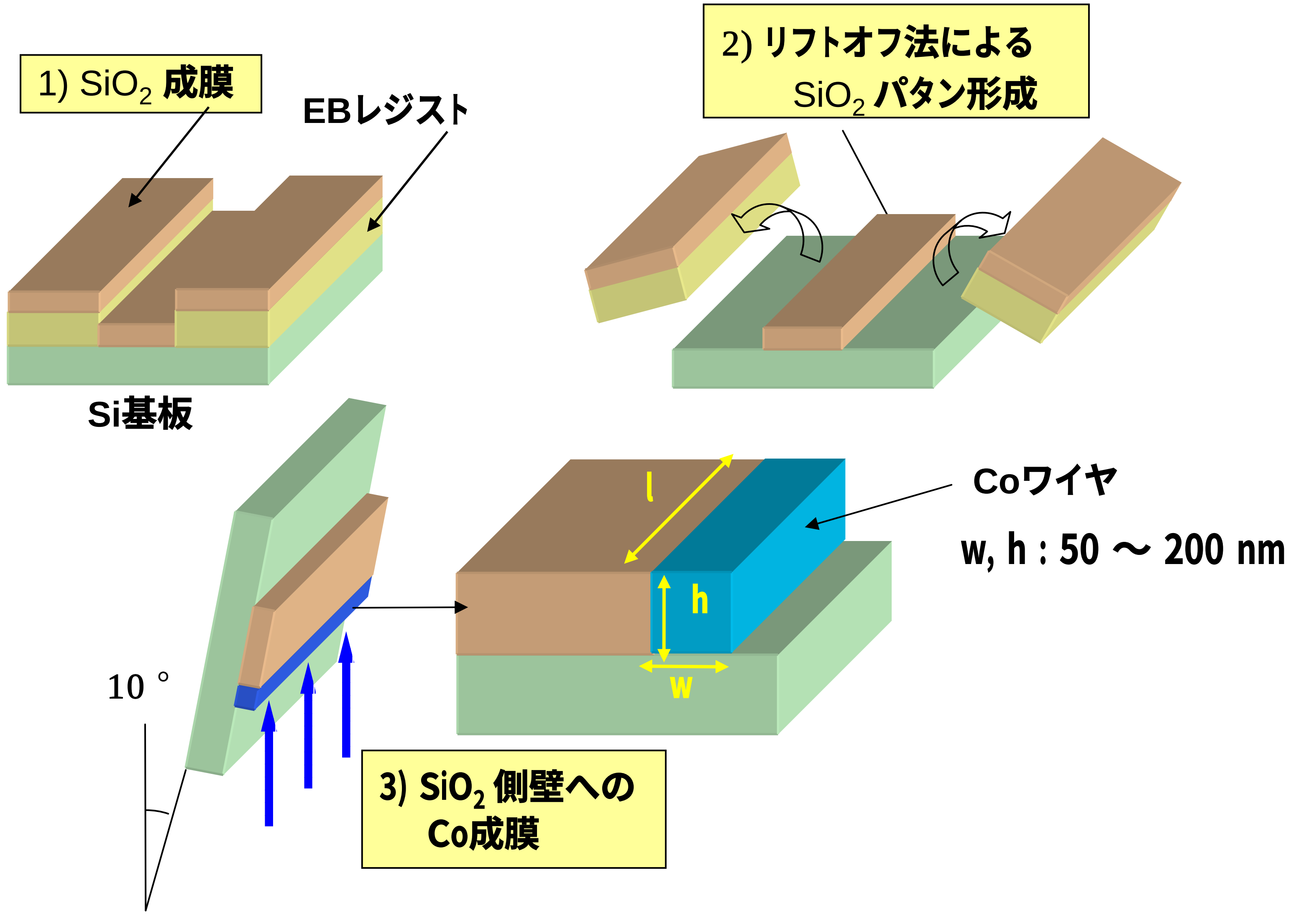




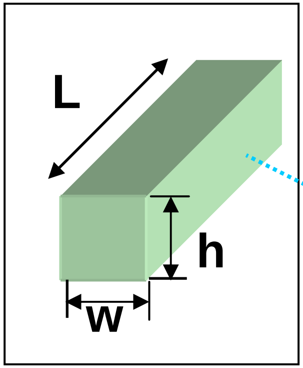


D.R. Fredkin et al. 1989

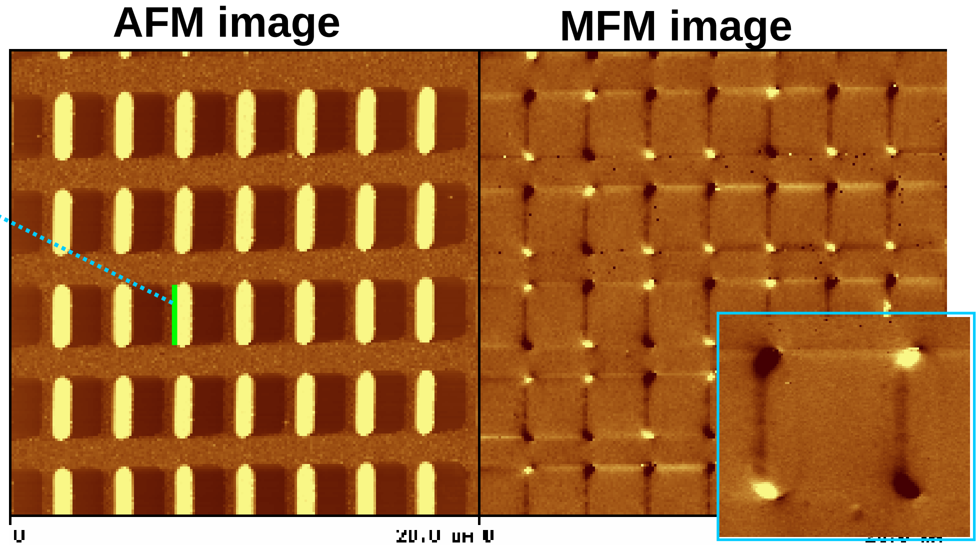
パターン側壁成膜によるCoナノワイヤの作製



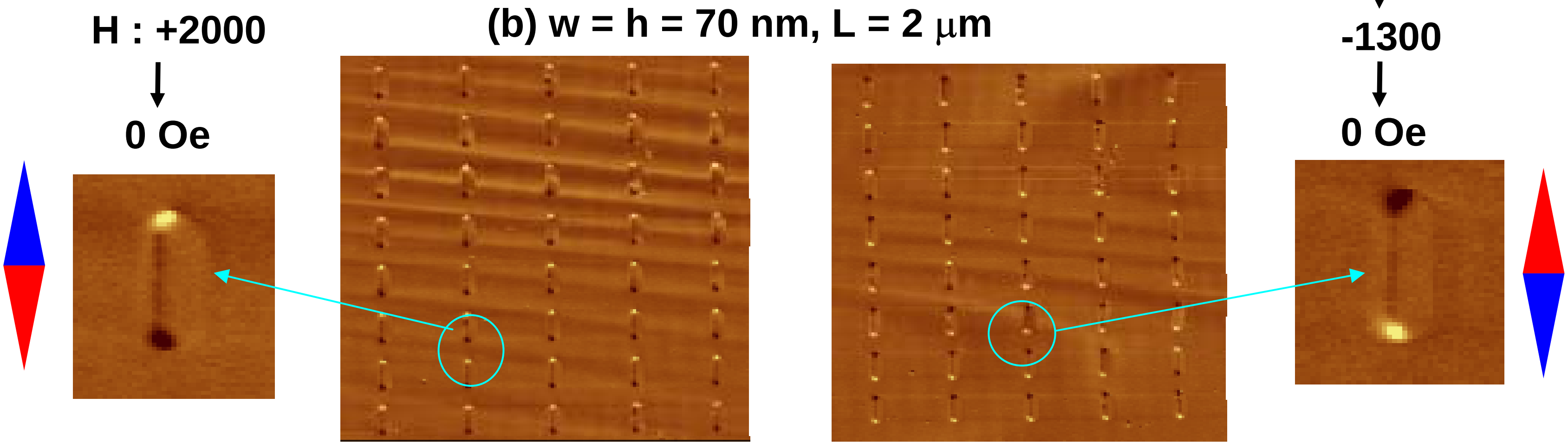
CoナノワイヤのAFM, MFM像



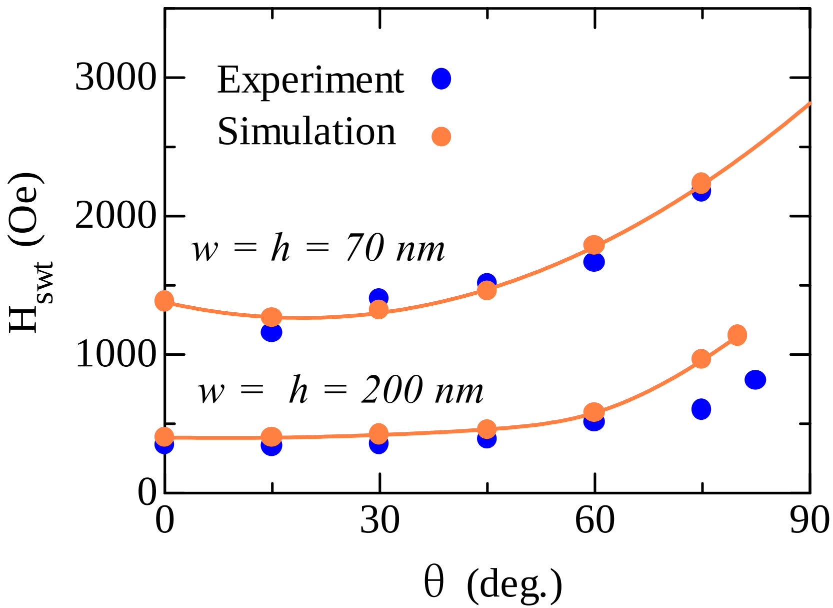
(a) w = h = 200 nm, L = 2 μm

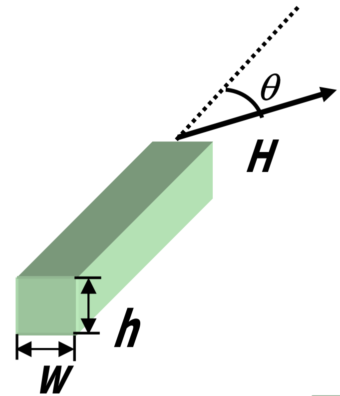


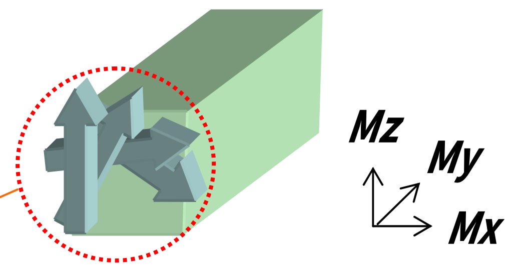
(b) w = h = 70 nm, L = 2 μm



Co ナノワイヤの磁化反転特性

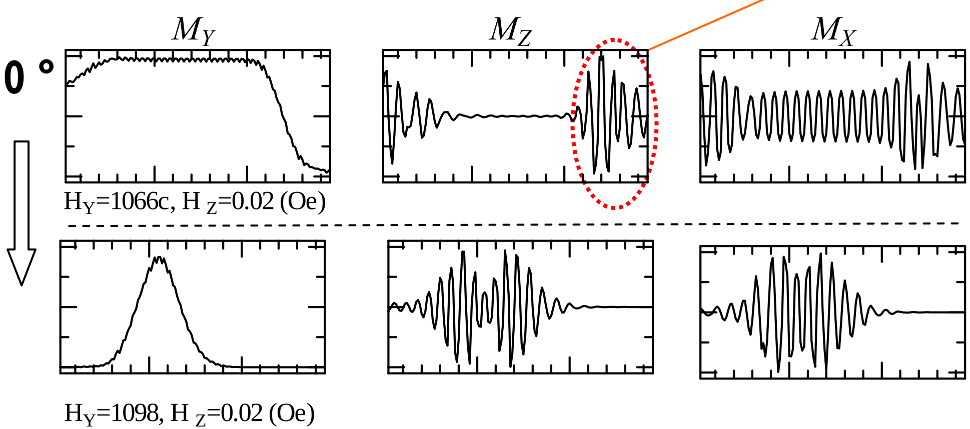






w = h = 70 nm, L = 0.72 μm

θ = 0 °

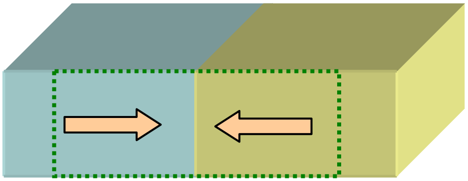


ワイヤ端部における
螺旋状スピン分布形成

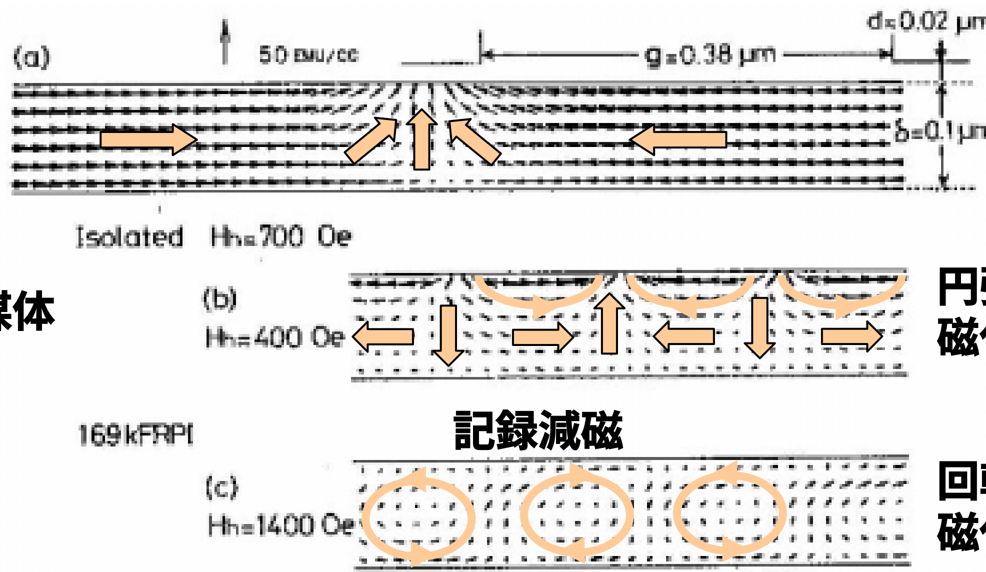
磁気記録状態のマイクロマグネティクス

長手磁気記録媒体の記録磁化状態 (膜断面)

Y. Nakamura et al., 1989



γ-Fe_2O_3粒子塗布媒体

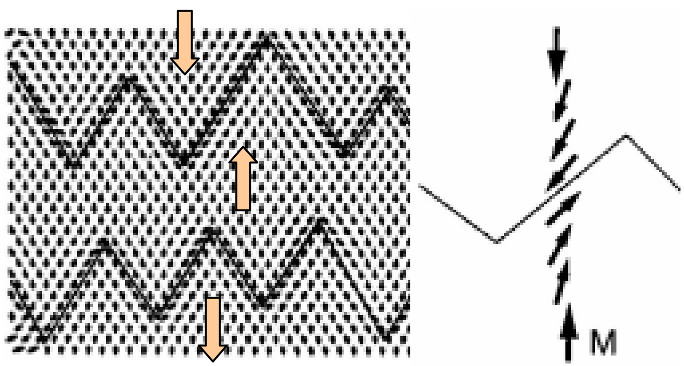


円弧状
磁化モード

回転
磁化モード

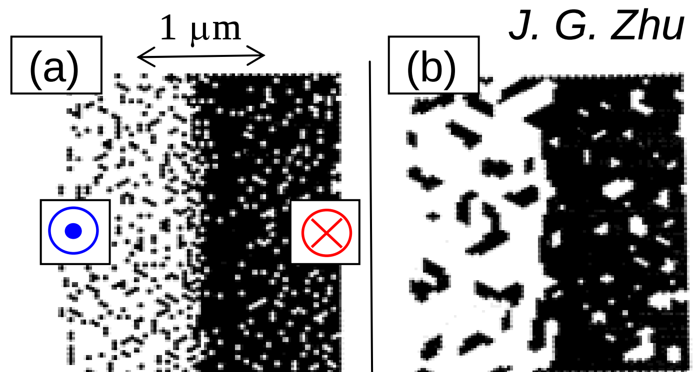
記録ビット境界の鋸歯状磁壁 (膜面内)

J. G. Zhu et al., 1988



垂直磁気記録媒体の記録磁化状態

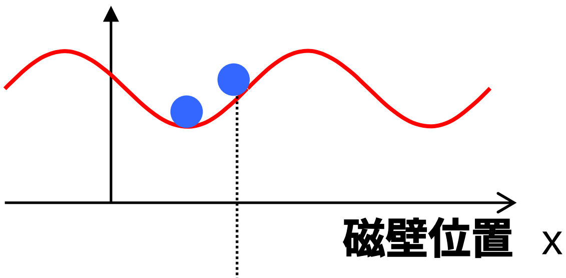
J. G. Zhu et al., 1991



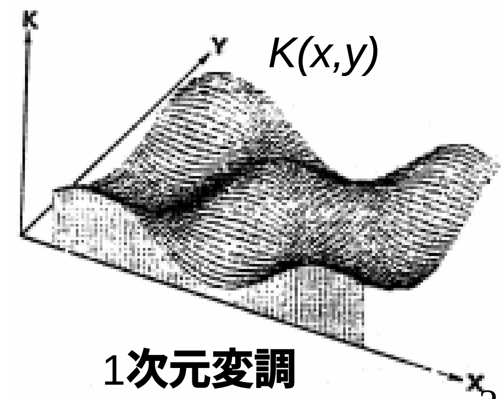
結晶粒間相互作用: (a)無, (b)有

磁壁抗磁力

磁壁エネルギー $E(x)$



$$H_c = \frac{1}{2M}\frac{\partial E}{\partial x}$$

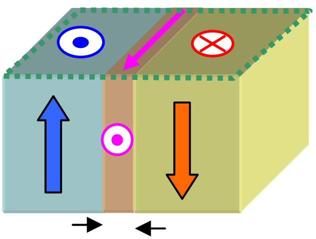


1次元変調

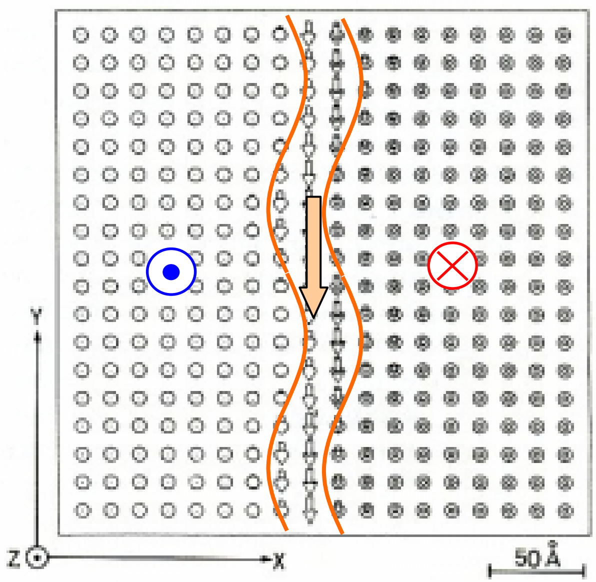
$$K = K_0 + K_m \sin(\frac{2\pi x}{\lambda})$$

2次元変調

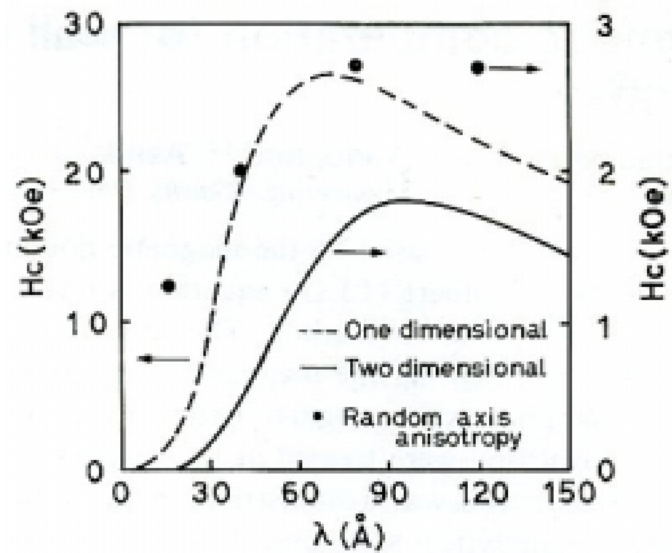
$$K = K_0 + K_m \sin(\frac{2\pi x}{\lambda})\sin(\frac{2\pi y}{\lambda})$$



磁壁幅 δ=40 A



異方性の不均一による磁壁の変形



抗磁力の異方性変調周期依存性

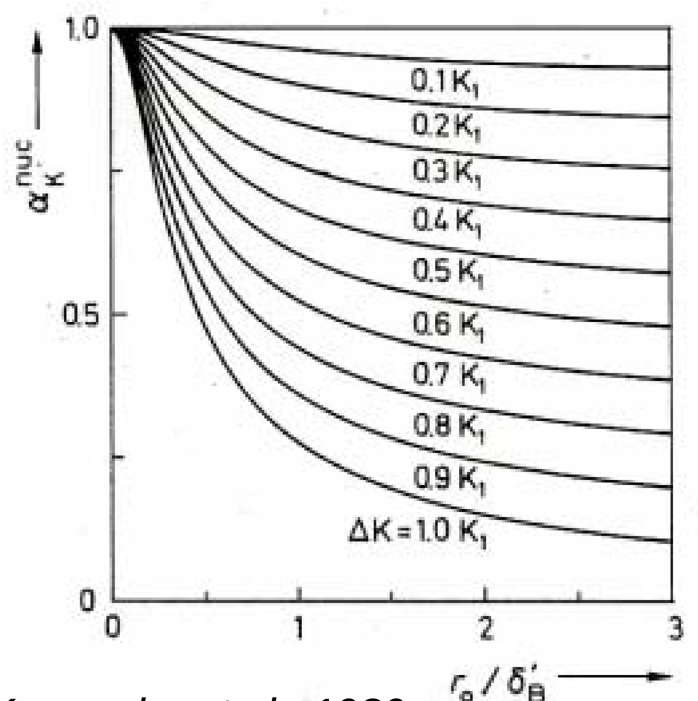
磁化反転核発生磁界

単磁区一斉磁化反転 $$H_c = \frac{2K}{M}$$

核発生型磁化反転 $$H_c = \frac{2K}{M}\alpha - N_{eff} M$$

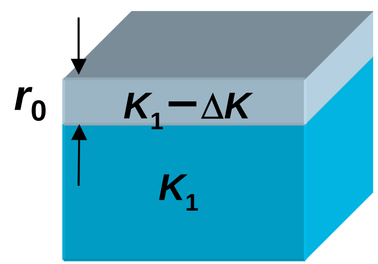
反磁界効果

- **表面での磁気異方性の低下**
- **磁気異方性分散, 配向分散**
- **粒子間相互作用**

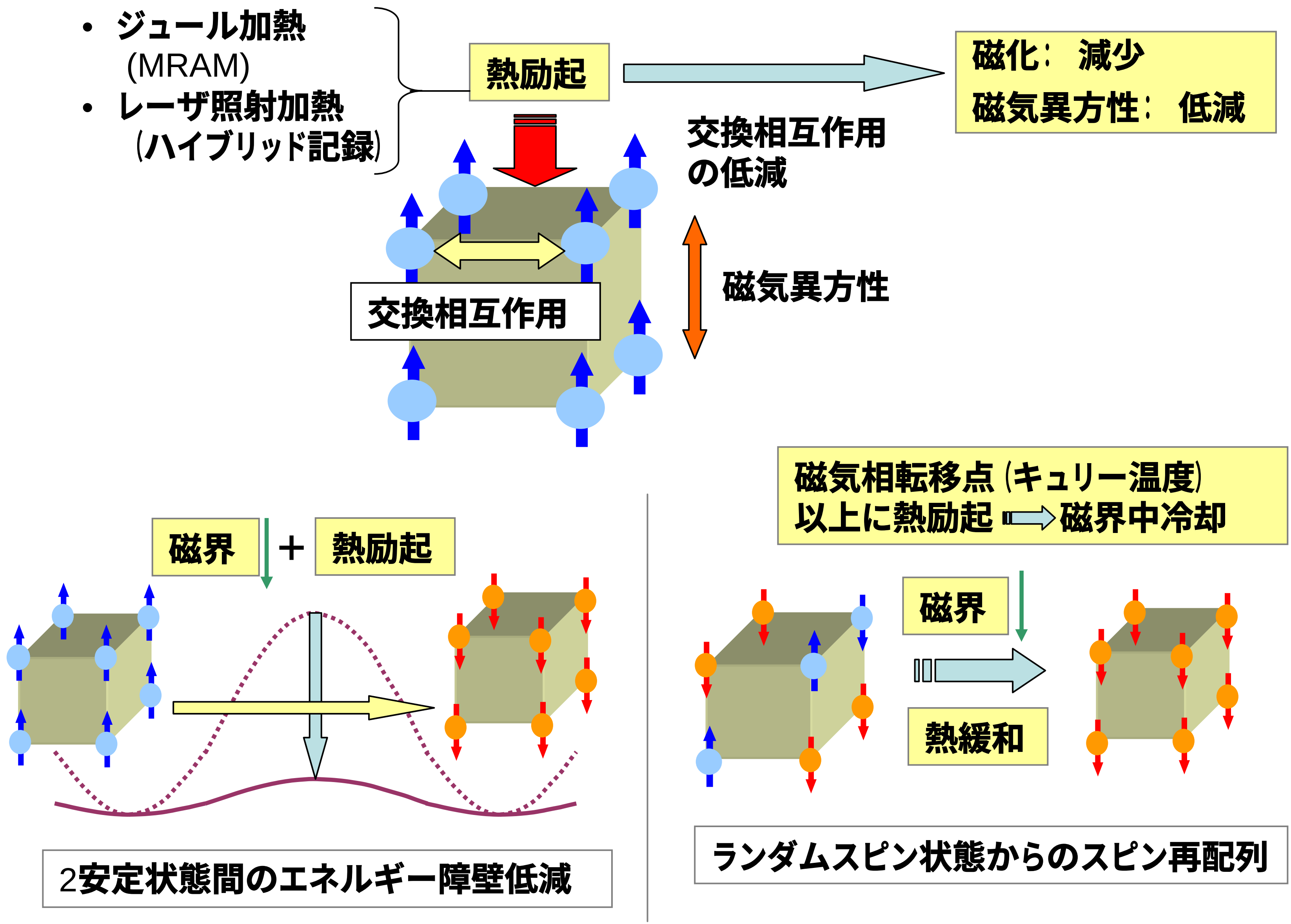


H. Kronmuler et al., 1989

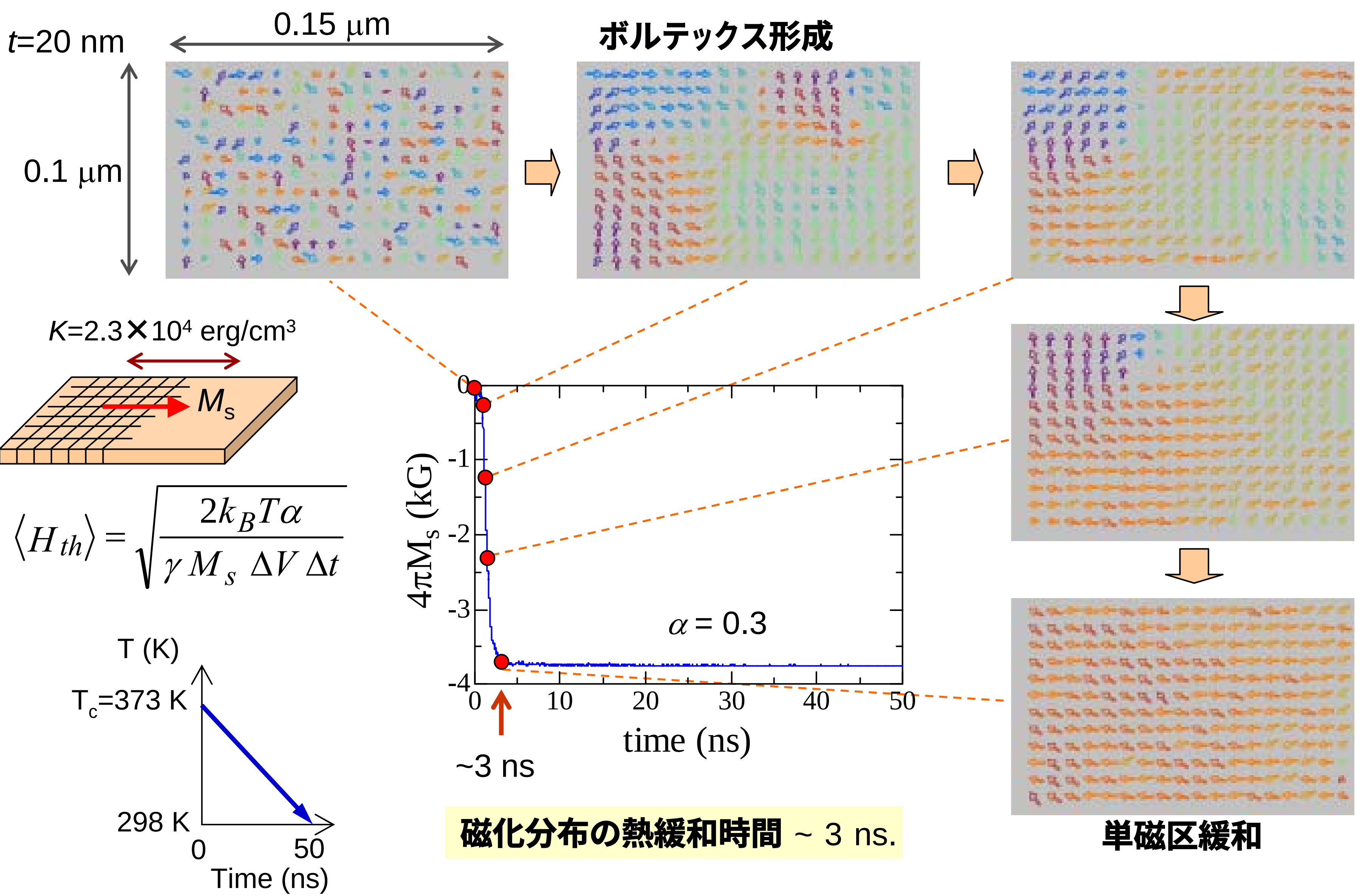
δ_B **磁壁幅**



熱アシストによる低電力スピン制御

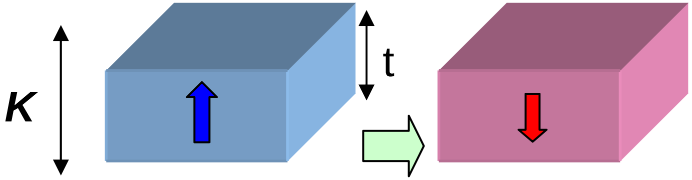


降温時の磁化オーダリング過程



ナノドットの熱アシスト磁化反転

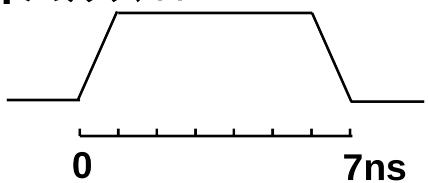
D =20, 70 nm, t = 20 nm



磁気異方性 $K = 60\ k_B T/V$

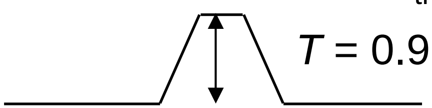
K =8.0✕10^4 erg/cm^3 (D=70 nm)
2.9✕10^5 erg/cm^3 (D =20 nm)

磁界パルス H



熱パルス T

⇔ **等価ランダム磁界** H_{th}

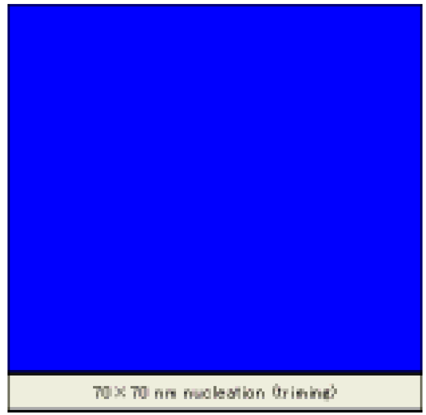


$T = 0.99\ T_c$

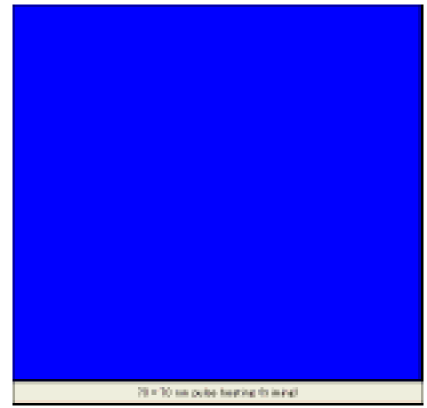
$$H_{th} = \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma M(\Delta V)(\Delta t)}}$$

D =70 nm

H =300 Oe, T = R.T.

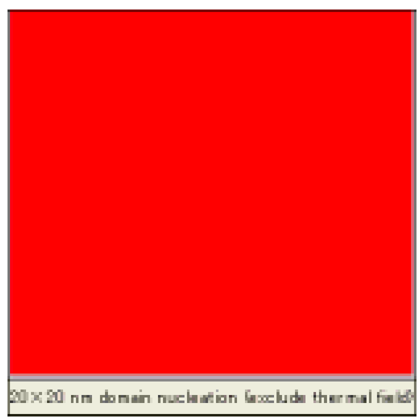


H =150 Oe, T=0.99 T_c.

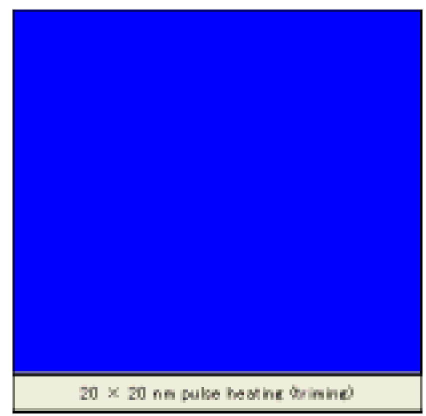


D =20 nm (〜1 Tb/inch^2)

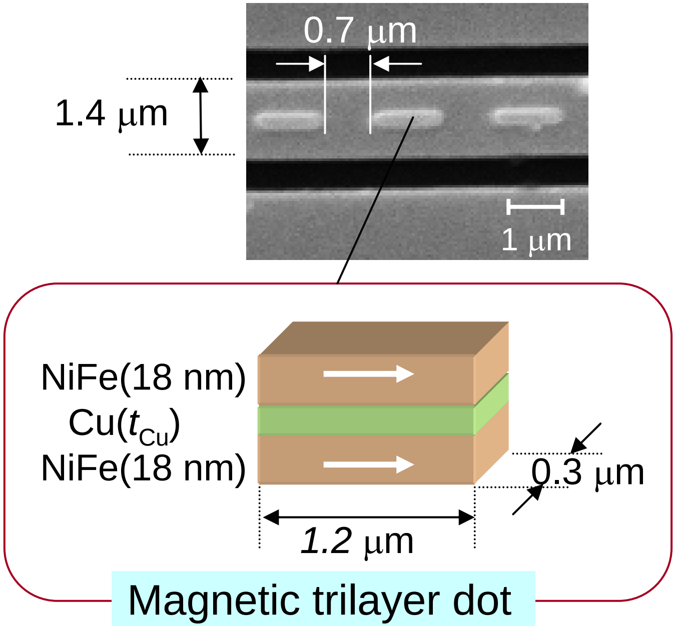
H =4500 Oe, T = R.T.



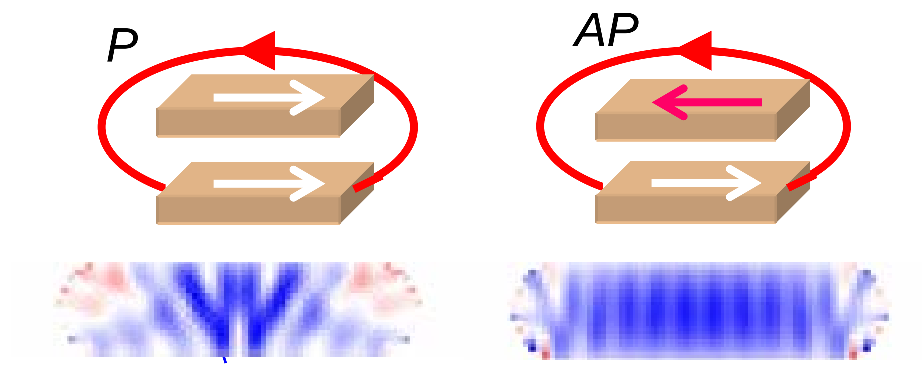
H =400 Oe, T=0.99 T_c.

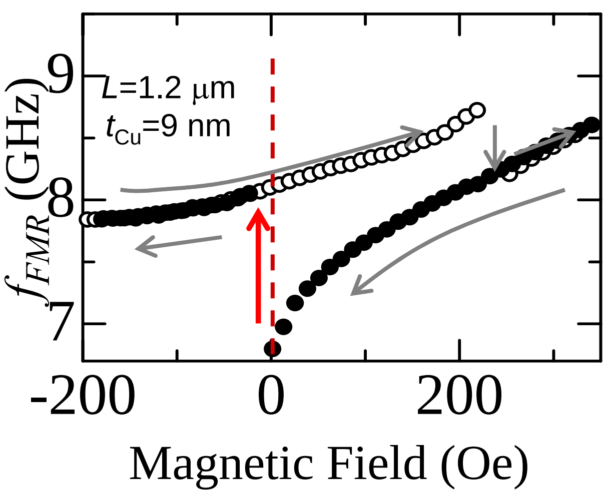


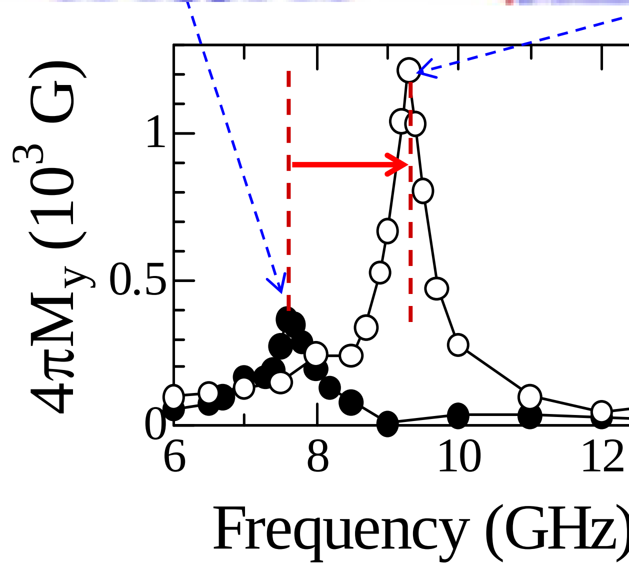
静磁結合による強磁性共鳴周波数制御



$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi}\sqrt{(\boldsymbol{H}_{\mathbf{ext}} + H_k)(\boldsymbol{H}_{\mathbf{ext}} + H_k + 4\pi M_s)}$$







まとめ

1. **磁区：** 単磁区， 多磁区 (静磁エネルギー低減)
   磁壁： ブロッホ磁壁, ネール磁壁, 枕木磁壁

2. **マイクロマグネティクス**
   平衡条件： Σ (交換エネルギー, 異方性エネルギー, 静磁エネルギー)
   ⤷ 最小化：変分問題
   ダイナミクス： LLG方程式・・・ 等価磁界 ⇨ トルク
   ⤷ 才差運動 ＋ 制動

3. **計算機シミュレーション**
   有限差分法： 時間差分, 空間差分 ⇨ 放物型偏微分方程式

4. **微細領域の磁性とデバイス応用**
   磁壁微細構造： 非対称ブロッホ磁壁、ツイスト磁壁, 対向磁壁
   微小磁性体： 軟磁性薄膜パターン, MRAM記憶セル, 微粒子磁化反転モード
   磁気記録媒体： 磁化回転モード, 磁化遷移領域

5. **保磁力機構:** 磁壁ピニング型, 磁化反転核形成型