スピンエレクトロニクス No.2

61908697 佐々木良輔

立方晶系の磁歪エネルギー

[100] 方向で観察した場合

　このとき $\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\beta} = (1, 0, 0)$ なので

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{3}{2}\lambda_{100}\left(1 + 0 + 0 - \frac{1}{3}\right) + 3\lambda_{111}\left(0 + 0 + 0\right) \\ &= \lambda_{100}\end{aligned}$$

となる.

[010] 方向で観察した場合

　このとき $\boldsymbol{\alpha} = (1, 0, 0)$, $\boldsymbol{\beta} = (0, 1, 0)$ なので

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{3}{2}\lambda_{100}\left(0 + 0 + 0 - \frac{1}{3}\right) + 3\lambda_{111}\left(0 + 0 + 0\right) \\ &= -\frac{1}{2}\lambda_{100}\end{aligned}$$

となる.

Neel 磁壁の計算

　磁壁の幅 D は交換エネルギー E_{ex}, 磁気異方性エネルギー E_k, 静磁エネルギー E_d の和を最小にするように定まる.

交換エネルギー

　交換エネルギーは最近接スピン同士の交換エネルギーの和なので, 最近接原子数を z, 単位格子内の原子数を n とすれば単位体積あたりの交換エネルギーは

$$e_{ex} = \frac{1}{2}\frac{1}{a^3}\sum_j^n\sum_i^z(-2J\boldsymbol{S}_i \cdot \boldsymbol{S}_j) = \frac{1}{2}\frac{1}{a^3}\sum_i^n\sum_j^z(-2JS^2\cos\theta_{ij})$$

ここで θ_{ij} が十分小さければ E_{ex} は定数項を除いて

$$e_{ex} = -\frac{JS^2}{a^3}\sum_{(i,j)}\left(1-\frac{1}{2}\theta_{ij}^2\right) \simeq \frac{1}{2}\frac{JS^2}{a^3}\sum_{(i,j)}\theta_{ij}^2$$

隣り合う原子同士でスピンが等角度に回転するならば

$$\theta_{ij} = a\frac{\pi}{D}$$

ここで単純立方格子を仮定すると $n=1$, またスピンの回転方向がある結晶軸と平行だとすると, 最近接格子数は 6 だが $\theta_{ij} \neq 0$ なる原子は 2 つのみになるので

$$e_{ex} = \frac{1}{2}\frac{JS^2}{a^3}\left(a\frac{\pi}{D}\right)^2 \times 1 \times 2 = \frac{JS^2}{a}\left(\frac{\pi}{D}\right)^2$$

したがって磁壁全体での交換エネルギーは

$$E_{ex} = \int_0^D \frac{JS^2}{a}\left(\frac{\pi}{D}\right)^2 dx = A\left(\frac{\pi}{D}\right)^2 D \tag{1}$$

となる. ただし $A = JS^2/a$ は交換 Stiffness 定数である.

磁気異方性エネルギー

一軸磁気異方性のもとで磁気異方性エネルギーは

$$e_k = K_u \sin^2\theta$$

で表されるので

$$E_k = \int_0^D K_u \sin^2\theta dx$$

$\theta = \pi x/D$ より $x = D\theta/\pi$ とすれば

$$\begin{aligned} E_k &= K_u \int_0^\pi \sin^2\theta d\theta \times \frac{D}{\pi} \\ &= \frac{K_u}{2\pi}D\int_0^\pi (1-\cos 2\theta)d\theta \\ &= \frac{K_u}{2}D \end{aligned} \tag{2}$$

となる.

静磁エネルギー

Neel 時癖は図 1 のように磁壁の接線方向に回転することから, 正味では磁壁の法線方向に磁化を持つ. その単位体積あたりの静磁エネルギーは面内方向の反磁場 $H_{d,\parallel}$ と面内方向の磁化の実効値 $M_\parallel$ を用いて

$$e_d = \frac{1}{2} H_{d,\parallel} M_\parallel$$

ここで図 2 のように楕円柱として磁壁を近似すれば反磁場係数は

$$N_\parallel = \frac{T}{D+T}$$

となるため

$$H_{d,\parallel} = \frac{T}{D+T} \frac{M_\parallel}{\mu_0}$$

したがって

$$E_d = \int_0^D \frac{T}{D+T} \frac{1}{2} \frac{M_\parallel^2}{\mu_0} dx = \frac{1}{2} \frac{T}{D+T} \frac{M_\parallel^2}{\mu_0} D \tag{3}$$

となる. 一方で磁化の面内成分は $M_\parallel = M_s \sin\theta$ なので, $D \ll T$ のもとで $N_\parallel \simeq 1$ とすれば

$$\begin{aligned} E_d &= \int_0^D \frac{1}{2\mu_0} \left(M_S \sin\theta\right)^2 dx \\ &= \frac{M_S^2}{2\mu_0} \int_0^D \sin^2\theta dx \\ &= \frac{M_S^2}{2\mu_0} \frac{D}{2} \end{aligned} \tag{4}$$

ここで (3) と (4) が $D \ll T$ で一致すべきなので

$$M_\parallel = \frac{M_S}{\sqrt{2}}$$

であり

$$E_d = \frac{1}{4} \frac{T}{D+T} \frac{M_S^2}{\mu_0} D$$

を得る. 以上から Neel 磁壁のエネルギー E_N は

$$E_N = A \left(\frac{\pi}{D}\right)^2 D + \frac{K_u}{2} D + \frac{1}{4} \frac{T}{D+T} \frac{M_S^2}{\mu_0} D$$

となる.

D の見積もり

$$
\begin{aligned}
E_N &= A\left(\frac{\pi}{D}\right)^2 D + \frac{K_u}{2}D + \frac{1}{4}\frac{T}{D+T}\frac{M_S^2}{\mu_0}D \\
&\simeq \left(\frac{1}{4}\frac{T}{D+T}\frac{M_S^2}{\mu_0} + \frac{K_u}{2}\right)D + A\pi^2\frac{1}{D} \\
&=: aD + \frac{b}{D}
\end{aligned}
$$

とする. この極値は $D > 0$ から

$$
\begin{aligned}
\frac{dE_N}{dN} = a - \frac{b}{D^2} = 0 \\
D = \sqrt{\frac{b}{a}}
\end{aligned}
$$

である. また極値において

$$
\left.\frac{d^2E_N}{dN^2}\right|_{D=\sqrt{b/a}} = 2\frac{b}{(b/a)^{3/2}} > 0
$$

であり, 最小値となっている. したがって $T \gg D$ かつ $K_u \ll M_S^2/2\mu_0$ のとき

$$
a \simeq \frac{1}{4}\frac{M_S^2}{\mu_0}
$$

なので

$$
D = \sqrt{A\pi^2 \cdot \frac{4\mu_0}{M_S^2}} = \frac{2\pi}{M_S}\sqrt{A\mu_0} \tag{5}
$$

$$
E_N = \frac{1}{4}\frac{M_S^2}{\mu_0}\frac{2\pi}{M_S}\sqrt{A\mu_0} + A\pi^2\frac{M_S}{2\pi\sqrt{A\mu_0}} = \pi M_S\sqrt{\frac{A}{\mu_0}} \tag{6}
$$

となる. また $D \gg T$ のとき

$$
a \simeq \frac{K_u}{2}
$$

なので

$$
D = \sqrt{\frac{2}{K_u} \cdot A\pi^2} = \pi\sqrt{\frac{2A}{K_u}} \tag{7}
$$

$$
E_N = \frac{K_u}{2}\pi\sqrt{\frac{2A}{K_u}} + A\pi^2\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{K_u}{2A}} = \pi\sqrt{2AK_u} \tag{8}
$$

となる.

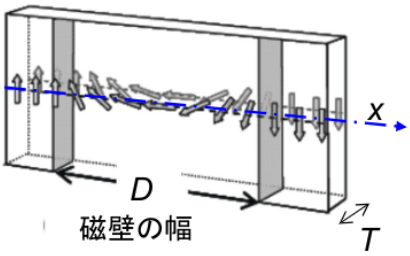

図１　Neel 磁壁の断面図 (授業スライドから)

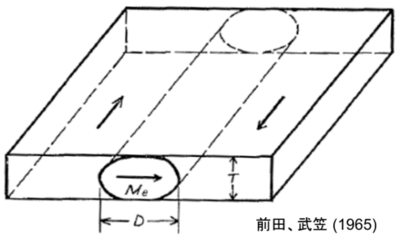

図２　楕円柱による模式図 (授業スライドから)