

有限フェリ磁性体としての Fe/Cr 人工格子の磁性 Magnetism of Fe/Cr Multilayers Considered as Finite-Size Ferrimagnets

金子明生・小野輝男・宮島英紀・壬生攻*・細糸信好*・新庄輝也*

慶應義塾大学理工学部, 横浜市港北区日吉 3-14-1 (〒223-8522)

*京都大学化学研究所, 宇治市五ヶ庄 (〒611-0011)

A. Kaneko, T. Ono, H. Miyajima, K. Mibu*, N. Hosoi*, and T. Shinjo*

Faculty of Science and Technology, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

*Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji 611-0011

(1998 年 10 月 13 日受理, 1999 年 1 月 21 日採録)

The magnetization processes of antiferromagnetically coupled Fe/Cr multilayers with two Fe layer thicknesses, such as $[\text{Fe} (40 \text{ \AA})/\text{Cr} (10 \text{ \AA})/\text{Fe} (20 \text{ \AA})/\text{Cr} (10 \text{ \AA})]_N$ were studied. These multilayers can be considered as artificial ferrimagnets with finite numbers of layers. There are substantial differences between the magnetization processes for multilayers with even and odd numbers of Fe layers, when the magnetic field is applied along the easy axis. Because of the finite number of Fe layers, multilayers with even numbers of Fe layers show the surface spin-flop transition before the bulk spin-flop with increasing magnetic field, since the end Fe layers are subject to half the exchange coupling of the inner Fe layers. By measurement of the magnetization curve and the field dependence of the magnetic torque, the spin-flop transition for samples was investigated, and the exchange-coupling energy in samples with 2, 3, and 5 Fe layers was directly evaluated.

Key words: Fe/Cr, ferrimagnet, finite number of layers, magnetic torque, surface spin flop, exchange coupling

1. はじめに

金属人工格子は、基礎研究のためのモデル物質、及び新機能を持つ新物質という2つの観点から研究されてきた。前者としては界面磁性や2次元磁性の研究、後者としては垂直磁気異方性や巨大磁気抵抗効果の発見が挙げられる。このような研究の中で発見された磁性層間の交換結合を利用することで、反強磁性体やフェリ磁性体のモデル物質を人工的に作製することが可能となった。これら人工的な磁性体では、バルクでは観測が困難な現象を見ることが出来る。

反強磁性的に結合した Fe/Cr 人工格子膜において、Fe 層が全て同じ膜厚の場合、Fig. 1(a)のような磁化配置をとる。この時、隣り合う Fe 層の磁化が互いに反平行に向いた配列は反強磁性体の磁気モーメントの配列と同じであり¹⁾、人工的な反強磁性体と見なせる。同様に、1層おきに Fe 層厚を変えた場合は、2種類の異なる大きさの磁気モーメントを持つフェリ磁性体に相当する (Fig. 1(b), (c))。これら人工的な磁性体の特徴は、磁化、交換結合や結晶磁気異方性などの物理量の大きさを、それぞれ磁性層厚、非磁性層厚や結晶成長面を変えることで制御することができる点である。また、層数が少ないことから有限の大きさを持った磁性体として扱うことができるので、バルク磁性体では測定が難し

い「表面効果」などを調べることができる。表面のスピンフロップ現象は以前から論じられていたが²⁻⁴⁾、バルク磁性体ではその影響が小さく一般に測定が困難である。

本研究では、人工的なフェリ磁性体と見なせる $\text{Fe} (40 \text{ \AA})/\text{Cr} (10 \text{ \AA})/\text{Fe} (20 \text{ \AA})$ を用いて、磁化過程と Fe 層間の交換結合について調べた。磁化過程は Fe 層の数が偶数と奇数の場合で本質的な差があり、前者において表面スピンフロップを確認した。交換結合は、隣り合う Fe 層間のみに働くものと仮定してパラメータフィッティングによりその大きさを求める通常の方法ではなく、直接的に評価することを試みた。その結果、Fe 層の磁気モーメントは隣り合う層の磁気モーメントとだけでなく、さらに第2近接 Fe 層とも結合していることを示唆する結果を得た。

2. 実験方法

試料は、化学エッチング処理をした $\text{MgO} (001)$ 基板上に超高真空蒸着法により作製した。基板温度 200°C で、 $100 \text{ \AA}$ の Cr buffer 層を作製し、その上に $\text{Fe} (40 \text{ \AA})$ 層、 $\text{Cr} (10 \text{ \AA})$ 層、 $\text{Fe} (20 \text{ \AA})$ 層、の順に積層させた。最後に、酸化防止のため $50 \text{ \AA}$ の Cr cap 層を積層した。蒸着速度は Fe, Cr いずれも約 $0.1 \sim 0.2 \text{ \AA/s}$ である。Fe 層の積層数 N が偶数の時、 $[\text{Fe} (40 \text{ \AA})/\text{Cr} (10 \text{ \AA})/\text{Fe} (20 \text{ \AA})/\text{Cr} (10 \text{ \AA})]_{N/2}$ 、奇数の時、 $[\text{Fe} (40 \text{ \AA})/\text{Cr} (10 \text{ \AA})/\text{Fe} (20 \text{ \AA})/\text{Cr} (10 \text{ \AA})]_{(N-1)/2} + \text{Fe} (40 \text{ \AA})$ の構造を持つ。ここでは $N = 2, 3, 5, 9, 10$ の試料を作製した。以下、積層数 N の試料を $\{\text{Fe/Cr}\}_N$ 、 k 番目の Fe 層を $\text{Fe}(k)$ と表記する。Fig. 1(b), (c) に $N = 9$ (奇数)、 10 (偶数) の構造を模式的に表す。

試料作製中、RHEED を用いて膜の表面構造と平坦性を観察した。試料作製後、X 線回折により膜厚方向の構造を評価した。これらより、 (001) 配向した良質のエピタキシャル膜であることを確認した。SQUID 磁力計により磁化 (M) 測定を行い、飽和磁化 M_s を求めた。また、薄膜用磁気トルク計を用いて磁場の大きさを固定して方向を変化させた磁気トルク (L) 曲線、磁場の方向を固定して大きさを変化させた磁気トルクの磁場依存性を測定した。前者より結晶磁気異方性 K_1 、面内に誘起された一軸異方性 K_0 を求めた。なお、測定はすべて室温で行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 磁化、及び磁気トルク測定

Fig. 2 に、磁場を容易軸方向に印加した場合の $\{\text{Fe/Cr}\}_N$ ($N = 2, 3, 5, 9, 10$) の (a) $M-H$, (b) $L-H$ 曲線を示す。飽和磁気モーメント

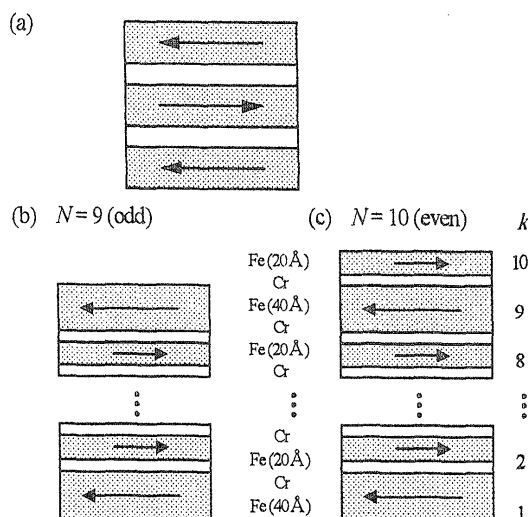


Fig. 1 Low-field state of the Fe/Cr multilayer coupling antiferromagnetically with (a) equal Fe layer thicknesses and two alternate Fe layers of different thicknesses: (b) $\{\text{Fe/Cr}\}_N$ ($N = \text{odd}$); $[\text{Fe}(40 \text{ \AA})/\text{Cr}(10 \text{ \AA})/\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(10 \text{ \AA})]_4 + \text{Fe}(40 \text{ \AA})$ and (c) $\{\text{Fe/Cr}\}_N$ ($N = \text{even}$); $[\text{Fe}(40 \text{ \AA})/\text{Cr}(10 \text{ \AA})/\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(10 \text{ \AA})]_5$ multilayer.

m_s は、全ての Fe 層の磁気モーメントが磁場方向に向いた場合に、 $m_s = M_s S_1 [(N+1)/2] + M_s S_2 [N/2]$ と表される。ここで S は試料表面積、 t_k は Fe 層の膜厚で $t_1 = 40 \text{ \AA}$ 、 $t_2 = 20 \text{ \AA}$ である。また、 $[\]$ はガウス記号である。零磁場における試料全体の磁気モーメントは、Fe 層間が反強磁性的に結合していると仮定すると、Fe(40 Å) 層の磁気モーメントが磁場方向に、Fe(20 Å) 層の磁気モーメントが磁場と反平行に向いた場合に、 $m_r = M_s S_1 [(N+1)/2] - M_s S_2 [N/2]$ と表される。したがって、与えられた Fe 層の膜厚に対して、飽和磁化に対する残留磁化の比は

$$\frac{M_r}{M_s} = \frac{2 \left[\frac{N+1}{2} \right] - \left[\frac{N}{2} \right]}{2 \left[\frac{N+1}{2} \right] + \left[\frac{N}{2} \right]}, \quad (1)$$

となる。 N が偶数の場合は常に $1/3$ である。実験結果では、この比の値は 0.33 ($N=2$), 0.60 ($N=3$), 0.50 ($N=5$), 0.43 ($N=9$), 0.33 ($N=10$) であり、式(1)に各 N を代入した値に相当する。したがって、これらの試料は、Fe 層の磁気モーメントが反強磁性的に結合しており、人工的なフェリ磁性体と見なして良いことがわかった。 M_s は測定した試料全体の磁気モーメント m_s を用いて、 $m_s / \{S_1 [(N+1)/2] + S_2 [N/2]\}$ となる。 $N=2$ において約 5% のずれがあるが、ほぼバルク値と同じである。この微小な差異は Fe と Cr の界面の影響や S の測定誤差などに起因するものと考えられる。

$\{\text{Fe/Cr}\}_9$ の磁化曲線では $H = 1.5 \text{ kOe}$ で磁化の跳びが現れた。一方 $\{\text{Fe/Cr}\}_{10}$ では $H = 1.2 \text{ kOe}$, 1.8 kOe の 2 箇所に跳びが確認された。磁気トルクに関してもほぼ同じ磁場で急激な変化を示した。 $\{\text{Fe/Cr}\}_9$ では Fe<5>に対して磁化配置が対称であるために、 $H = 1.5 \text{ kOe}$ において磁場と反平行を向いていた Fe(20 Å) 層の磁気モーメント全体がスピントロップする。一方 $\{\text{Fe/Cr}\}_{10}$ では、隣り合う Fe 層間でのみ結合しているとする、内側の Fe(20 Å) は隣り合う 2 つの Fe(40 Å) と結合しているのに対し、表面の

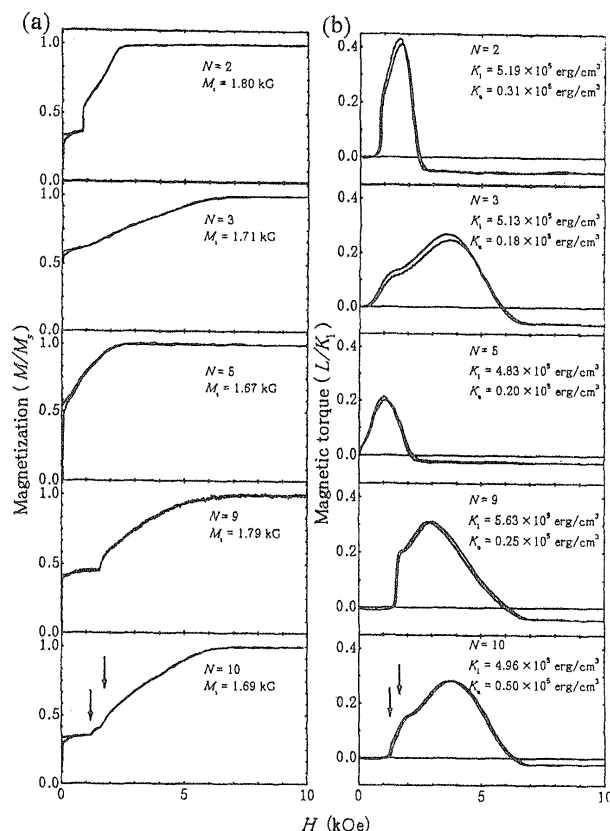


Fig. 2 Magnetization curve (a) and magnetic torque (b) for $\{\text{Fe/Cr}\}_N$ ($N = 2, 3, 5, 9, 10$) multilayers in fields applied parallel to the magnetic easy axis.

Fe(20 Å)<10>は Fe(40 Å)<9> 1 つだけと結合している。したがって、低磁場の場合、表面の Fe(20 Å) 層の磁気モーメントを外部磁場に反平行に向かせている交換結合エネルギーは半分しかないことになる。このため、まず、表面の Fe(20 Å) 層の磁気モーメントが $H = 1.2 \text{ kOe}$ においてスピントロップしたと考えられる(表面スピントロップ)。次の $H = 1.8 \text{ kOe}$ における跳びは、内側の Fe(20 Å) 層の磁気モーメントのスピントロップによるものと考えられる。

3.2 数値計算による磁化過程

表面スピントロップ過程、及びその M - H 、 L - H 曲線上への現れ方を調べるために、 $N=9, 10$ の場合について数値計算を行った。系の単位面積あたりのエネルギー E は、ゼーマンエネルギー、磁気異方性エネルギー、交換結合エネルギー E_{ex} の和として、次のように表される。

$$E = \sum_{k=1}^N \left\{ -M_k H \cos(\theta_k - \alpha) - \frac{1}{8} K_1 t_k \cos 4\theta_k - \frac{1}{2} K_u t_k \cos 2(\theta_k - \theta_{ku}) \right\} + E_{ex},$$

$$E_{ex} = - \sum_{k=1}^{N-1} J_1 \cos(\theta_k - \theta_{k+1}) + \sum_{k=1}^{N-1} J_2 \cos^2(\theta_k - \theta_{k+1}) \quad (2)$$

ここで J_1 , J_2 は交換結合エネルギー定数 (J_1 : bilinear, J_2 : biquadratic coupling constant), α , θ_k , θ_{ku} はそれぞれ Fe 層の $[100]$ 軸と、磁場、磁化、一軸異方性の容易軸となす角度である。 E_{ex} は、従来から用いられているように、隣り合う磁気モーメントのなす角度のみに依存し、角度の余弦の 2 次まで展開した形式とした。また、

Fe 層内の交換結合は層間の交換結合に比べ非常に大きいので、Fe 層内では磁気モーメントが飽和しているものとして扱った。なお、類似した系で既に行われているものには Fe/Gd⁹, Fe/GdFe⁹ がある。ただし、これらは Fe と Gd, または GdFe の直接交換結合によるもので、Fe, Gd 及び GdFe 各層内の交換結合が層間のそれと同じオーダーであるため、層内での磁気モーメントの分布を考慮する必要がある。

M - H 測定より求めた M_s , L - α 測定より求めた K_1, K_u, θ_{ku} を用いて、各 H, α に対して E を最小とする θ_k を求めた。 $N=9$ の時 $J_1 = -0.52 \text{ erg/cm}^2, J_2 = 0.09 \text{ erg/cm}^2$, $N=10$ の時 $J_1 = -0.58 \text{ erg/cm}^2, J_2 = 0.06 \text{ erg/cm}^2$ を用いた。 Fig. 3 に $\{\text{Fe/Cr}\}_N (N=9, 10)$ の M - H, L - H 曲線の計算結果を示す。計算結果は Fig. 2 の実験結果をおよそ再現している。また、計算結果から得られた各磁場における $\{\text{Fe/Cr}\}_{10}$ 人工格子内の磁化配置を Fig. 4 に図示した。

表面スピントロップ現象は Fig. 4 の磁気モーメント配列に見ることができる。すなわち $H=1.2 \text{ kOe}$ では、表面の Fe (20 Å) の磁気モーメントのみがスピントロップした状態で、他の層は若干変化するものの、Fe (40 Å) 層の磁気モーメントはほぼ磁場方向、Fe (20 Å) は磁場に反平行を向いた状態になる。また、表面スピントロップした Fe (20 Å) に近い磁気モーメントほど大きく回転し、反対側は回転が小さい。このような配列は磁壁と類似している。その後 $H=1.8 \text{ kOe}$ 付近で、 $\langle 8 \rangle, \langle 6 \rangle, \langle 4 \rangle, \langle 2 \rangle$ の順で内側の磁気モーメントがスピントロップする。ただし、表面の Fe $\langle 10 \rangle$ の

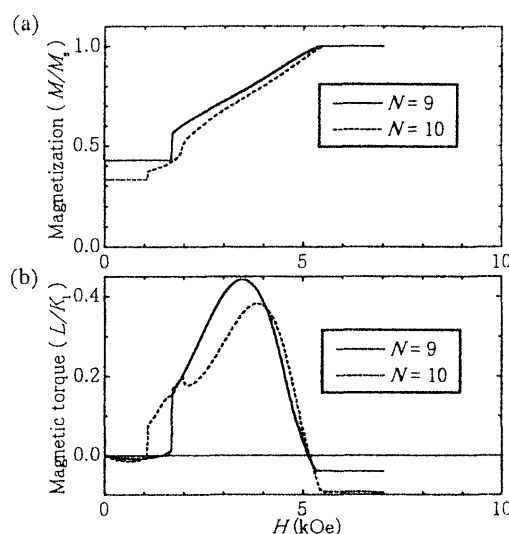


Fig. 3 Numerically calculated results for (a) the magnetization curve and (b) the magnetic torque of $\{\text{Fe/Cr}\}_N (N=9, 10)$ multilayers in fields applied parallel to the magnetic easy axis.

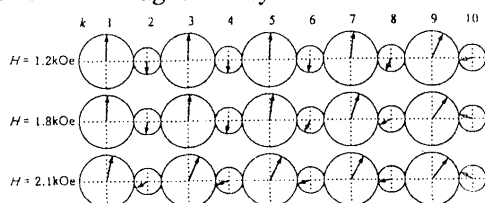


Fig. 4 Variation of the Fe magnetic moment in $\{\text{Fe/Cr}\}_{10}$ in fields applied parallel to the magnetic easy axis.

場合に比べ、角度変化が小さいため、個々の M - H, L - H 曲線上の変化は小さく、実験結果においては全体で1つの変化として現れている。 $N=\infty$, すなわちバルクのフェリ磁性体では反平行を向いていた磁気モーメントは全て等価なので一斉にスピントロップする。したがって、順番にスピントロップするのは磁性層の数の有限性を反映した結果とすることができる。

3.3 交換結合

交換結合エネルギー E_{ex} を求める一般的な方法は、 E_{ex} が隣り合う磁気モーメントのなす角度 θ に依存すると仮定し、 E_{ex} を次のように展開するものである。

$$E_{ex}(\theta) = -J_1 \cos \theta + J_2 \cos^2 \theta \quad (3)$$

そして、磁化や Kerr 効果の測定結果にパラメータフィッティングにより適合させ交換結合定数 J_1, J_2 を求める。このような方法では、磁気異方性も含めてフィッティングを行うため、パラメータの数が多く、求めた値の信頼性は乏しい。そこで Fe 層間の交換結合エネルギー E_{ex} は、ある磁気モーメントの角度 θ を基準として相対角度 $\theta_i = \theta - \theta_i$ のみに依存すると仮定し、 $N=2, 3, 5$ について E_{ex} の角度微分を直接的に求めた。

まず、 $\{\text{Fe/Cr}\}_2$ について、単位体積あたりの磁化 M , 磁気トルク L は、

$$M = M_1 \frac{t_1}{t_1 + t_2} \cos(\theta_1 - \alpha) + M_2 \frac{t_2}{t_1 + t_2} \cos(\theta_2 - \alpha),$$

$$L = M_1 H \frac{t_1}{t_1 + t_2} \sin(\theta_1 - \alpha) + M_2 H \frac{t_2}{t_1 + t_2} \sin(\theta_2 - \alpha), \quad (4)$$

と表される。さらに、 E_{ex} は $\theta = \theta_1 - \theta_2$ の変数として $E_{ex} = E_{ex}(\theta)$ と表す。(2)式において $N=2$ とした場合の式から Fe 層の磁気モーメントの安定条件として

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_1} = M_1 H t_1 \sin(\theta_1 - \alpha) + \frac{1}{2} K_1 t_1 \sin 4\theta_1$$

$$+ K_u t_1 \sin 2(\theta_1 - \theta_{ku}) + \frac{dE_{ex}(\theta)}{d\theta} = 0,$$

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_2} = M_2 H t_2 \sin(\theta_2 - \alpha) + \frac{1}{2} K_1 t_2 \sin 4\theta_2$$

$$+ K_u t_2 \sin 2(\theta_2 - \theta_{ku}) - \frac{dE_{ex}(\theta)}{d\theta} = 0, \quad (5)$$

の関係式を得る。 M - H, L - H 測定より $M_s, K_1, K_u, \theta_{ku}$ がわかっているので、 H を一定とすると、磁気モーメントの角度 θ_1, θ_2 及び $dE_{ex}/d\theta$ の3つの未知数に対して、(4)式と(5)式の4つの方程式が得られる。そこで、 M - H, L - H 曲線から(4)式を用いて、磁気モーメントの角度 θ_1, θ_2 の磁場依存性を求め、次に(5)式に $M_s, K_1, K_u, \theta_{ku}, \theta_1, \theta_2$ を代入して、2つの式からそれぞれ $dE_{ex}/d\theta$ を2つ求めた。最後に、 $dE_{ex}/d\theta$ を θ について台形法により積分して2つの E_{ex} を求めた。磁場を容易軸、困難軸方向に印加することで、合わせて4つの E_{ex} を得た。結果を Fig. 5 に示す。 $E_{ex1}: H \parallel [100]$ は(5)の第1式から磁場を[100]方向に印加した場合について求めたことを表す。(3)式を用いて交換結合定数を評価すると、 $J_1 = -0.50 \text{ erg/cm}^2, J_2 = 0.07 \text{ erg/cm}^2$ となった。

$\{\text{Fe/Cr}\}_3$ の場合、幾何学的対称性により2つの表面の磁気モーメントの角度 θ_1, θ_3 は互いに等しいとすると、 $\{\text{Fe/Cr}\}_2$ の場合に帰着される。すなわち $\theta_1 = \theta_3, \partial E_{ex}/\partial \theta_1 = \partial E_{ex}/\partial \theta_3 = \partial E_{ex}/\partial \theta$ である。

$\{\text{Fe/Cr}\}_2$, $\{\text{Fe/Cr}\}_3$ いずれの場合においても、容易軸、困難軸方向にそれぞれ磁場を印加した時、同じ H であっても磁気異方性により θ_1, θ_2 は異なる値をとる。あるいは、異なる H で同じ θ_1 の場合が存在するが、 θ_2 の値は異なる。しかし $\theta = \theta_1 - \theta_2$ に対する $E_{\text{ex}}(\theta)$ 曲線は、 M, L に 2% ずつ、 α に 5° の測定誤差を見積もった場合の誤差 (Fig. 5 中のエラーバー) 内でよく一致している。これから、 $E_{\text{ex}}(\theta)$ は印加磁場方向、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の値そのものには依存せず、隣り合う磁気モーメントのなす角度 $\theta = \theta_1 - \theta_2$ のみに依存すると仮定できる。また、 E_{ex} は $\cos \theta$ の項だけでは表せない、何らかの高次項 ($J_2 > 0$) が存在しているものと考えられる。

同様の解析が、 $\{\text{Fe/Cr}\}_5$ の場合も可能である。 $\theta_3 = \theta_1, \theta_4 = \theta_2$ より、磁気モーメントの角度の変数として $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の 3 つが存在する。 E_{ex} は相対角度 $\theta_2 = \theta_1 - \theta_2, \theta_3 = \theta_2 - \theta_3$ の関数として $E_{\text{ex}}(\theta_2, \theta_3)$ と表される。上述より、 $N=2, 3$ の場合に E_{ex} は $\theta = \theta_1 - \theta_2$ のみの関

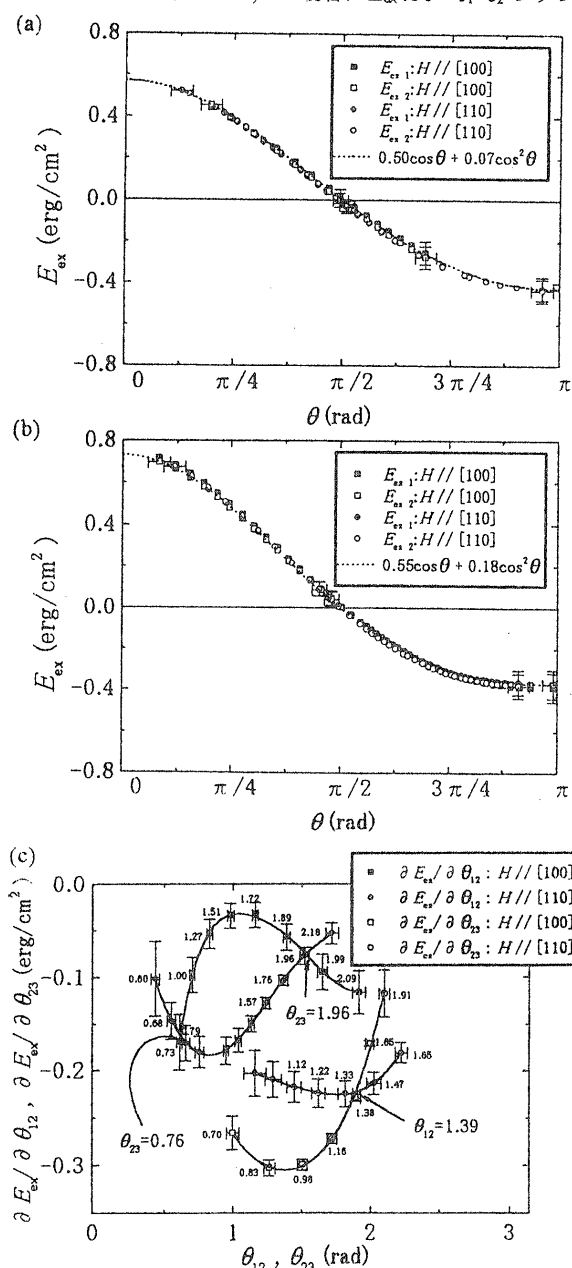


Fig. 5 Exchange-coupling energy in $\{\text{Fe/Cr}\}_N$ ($N =$ (a) 2, (b) 3, (c) 5)

数としてよいことが示されたので、同様に、 $E_{\text{ex}}(\theta_2, \theta_3)$ とするのは妥当である。この時、 $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2 = \partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_3$, $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2 = \partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_3$ である。したがって、未知数は $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2, \partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_3$ の 5 つとなるが、(5) 式に相当する式として $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ に関する式が 3 つ、(4) 式に相当する式が 2 つ、合計 5 つの式が得られるので、これらの未知数は一意に求まる。

Fig. 5(c)において、 $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ [100] は、磁場を [100] 方向に印加した $M-H, L-H$ 曲線から求めた $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ を示す。各点に記入した数値は θ_2 の値である。 $N=2, 3$ の場合同様、印加磁場方向が異なると、同じ H においても磁気異方性が異なるため $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は異なる値をとる。ここで興味深いのは、上記の理由により、異なる H において、 θ_2 は同じでも θ_3 が異なる磁化配置が実現されることである。もし、隣り合う Fe 層間のみで結合していると仮定して E_{ex} を (2) あるいは (3) 式で表したとすると、 $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2 = J_1 \sin \theta_2 - J_2 \sin 2\theta_2$ であるから、 $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ は α, θ_2 に依らないので、 $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ [100] と $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ [110] は一致するはずである。実験結果では、Fig. 5(c)に見られるように両者は一致しないが、それらが同じ値をとる交点では θ_3 も同じ値を持つ。したがって、 $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ は θ_3 に依存し、 θ_3 が異なるために $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ [100] と $\partial E_{\text{ex}} / \partial \theta_2$ [110] が一致しないものと考えられる。すなわち、 E_{ex} を (2), (3) 式で表した、隣り合う Fe 層間のみで結合しているとすると単純な仮定は不十分であり、Fe 層は隣り合う Fe 層、及び第 2 近接 Fe 層とも結合していることを示唆している。

4. まとめ

人工的なフェリ磁性体と見なせる、Fe 層厚を 1 層おきに変えた Fe/Cr 人工格子膜を作製し、磁化過程及び交換結合について調べ、以下の結果を得た。(1) Fe 層の数か偶数か奇数かで磁化過程に本質的な差があることがわかった。Fe 層の数か偶数の時に表面スピントロップが観測された。(2) Fe 層が 2, 3 層の場合について交換結合定数を直接的に評価する方法を考察した。その結果、2 層の場合 $J_1 = -0.50 \text{ erg/cm}^2, J_2 = 0.07 \text{ erg/cm}^2$, 3 層の場合 $J_1 = -0.55 \text{ erg/cm}^2, J_2 = 0.18 \text{ erg/cm}^2$ と評価した。また、第 2 近接 Fe 層間との交換結合が存在する可能性があり、実際に、 $\{\text{Fe/Cr}\}_5$ においてそれを示唆する結果が得られた。

謝辞 本研究の一部は慶応義塾大学大型研究助成制度の援助を受けて行われた。

文 献

- 1) R. W. Wang and D. L. Mills: *Phys. Rev. B*, **50**, 3931 (1994).
- 2) W. Saslow and D. L. Mills: *Phys. Rev.*, **171**, 488 (1968).
- 3) D. L. Mills: *Phys. Rev. Lett.*, **20**, 18 (1968).
- 4) F. Keffer and H. Chow: *Phys. Rev. Lett.*, **31**, 1061 (1973).
- 5) K. Takanashi, Y. Kamiguchi, H. Fujimori, and M. Motokawa: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **61**, 3721 (1992).
- 6) M. Motokawa and H. Dohnomae: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **60**, 1355 (1991).