メソスコピックスケール十字型磁性細線における電流磁気効果 Galvanomagnetic Effect of a Cross-Shaped Magnetic Wire on a Mesoscopic Scale

木村 崇^{*}、生嶋 君弥^{*}、若家 富士男^{*, **}、蒲生健次^{*, **}

^{*} 阪大院基礎工、豊中市待兼山町 1-3 (560-8531)

^{**} 極限科学研究センター、豊中市待兼山町 1-3 (560-8531)

T. Kimura^{*}, K. Ikushima^{*}, F. Wakaya^{*, **} and K. Gamo^{*, **}

^{*} Grad. Sch. of Eng. Sci., Osaka Univ., 1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka, Osaka 560-8531

^{**} RCMSEC, 1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka, Osaka 560-8531

(1999 年 10 月 27 日受理、2000 年 1 月 25 日採録)

A cross-shaped Co wire on a mesoscopic scale was fabricated by using electron-beam lithography, and the galvanomagnetic effect was measured at room temperature. Many jumps in the Hall resistance were observed. In order to explain these jumps, exchange interactions with the current and voltage probes were considered, and the Hall resistance was calculated. The calculated result reproduced three jumps in the observed Hall resistance. It was found that the Hall resistance curve of a cross-shaped wire can be controlled by the ratio of the coercive forces of the magnetizations of the probes. The magnetoresistance of a narrow wire with two crossing points was understood by using the present model to calculate the magnetization process.

Key words: magnetic thin film, planar Hall effect, exchange interaction, magnetic device, magnetoresistance

1. はじめに

強磁性体における電流磁気効果は、磁性体自身の持つ磁化のため、独特の特性を示す^{1), 2)}。代表的な例としては、異方性磁気抵抗効果 (AMR)、プレーナーホール効果 (PHE)、異常ホール効果などがある。最近、これらの特性から微細な構造の磁性体の磁化過程を調べる研究が行われている。

近年の微細加工技術の進歩により、メソスコピックスケールの磁性体の作製が可能になってきた。このように磁性体を小さくしていくと、磁性体の磁化そのものが小さくなり、磁化を直接測定するのが困難になってくる。しかし、電流磁気効果を用いると、磁気抵抗やホール抵抗を通して微弱な磁化の変化を観測できるため、微細な磁性体の磁化過程を詳細に調べる事ができる。最近では、磁性細線中の磁壁の運動や磁壁の抵抗などを調べる研究がいくつか行われている^{3), 4)}。微細なサイズの磁性体では、単磁区近似が良く成り立ち、形状磁気異方性により磁化容易軸が制御できるため、磁化過程の解析が比較的容易になる。

我々は、今までに、ミリメートルスケールの十字型形状を持つ強磁性薄膜の電流磁気効果を研究しており、交差部の磁化が引き起こすホール抵抗は、電流、電圧端子からの交換エネルギーを考慮することによって説明できる事を報

告している⁵⁾。本研究では、その十字型細線のサイズをより小さくサブミクロンスケールにした場合の電流磁気効果について報告する。このように、磁性体のサイズを小さくすることにより、磁化容易軸だけでなく、保磁力も制御する事が可能になり、各端子の保磁力の違いを持たせることができる。本論文では、そのような保磁力の違いが電流磁気効果に及ぼす影響を詳しく調べた。

2. 実験方法

試料は、熱酸化された Si 基板上に電子ビーム用レジスト Poly-Methyl-Metacrylate を厚さ約 300 nm でスピンコートし、その後、電子ビーム露光装置を用いて微細パターンを描画し、磁性金属 Co を 10^{-6} Torr の高真空中で蒸着し、リフトオフする事によって作製された。Fig.1 は、作製された十字型磁性細線の電子顕微鏡写真である。横方向細線、縦方向細線の線幅はそれぞれ、150 nm、1 μ m で、試料の膜厚は 30 nm である。Fig.1 のように、磁場を横方向細線に平行に加え、縦方向細線に電流を流した場合のホール抵抗を横方向細線を用いて、室温にて測定した。

Fig. 1 Secondary-electron-microscopy image of a cross-shaped Co magnetic wire on a mesoscopic scale and a probe setup for Hall resistance measurement.

Fig. 2 Hall resistance of the cross-shaped Co wire. The arrows indicate resistance jumps.

3. 実験結果、および考察

3.1 十字型磁性細線のホール抵抗

Fig.2 は、十字型細線のホール抵抗である。外部磁場が十分大きく磁化が外部磁場方向に揃っている場合は、交差部の磁化は電流に対して垂直であるため、ホール抵抗は現れないが、減磁していくと、磁化が電流垂直方向から傾くため、ホール抵抗に変化が現れる。その後、磁場を負方向に昇磁していくと、 $H=-100$ Oe（負方向にスイープした場合）で、ホール抵抗に正の跳びが現れる。更に昇磁していくと、 $H=-200$ Oe で再び正の跳びが現れる。その後、負方向磁場の増加と共に磁化が、磁場の方向に揃おうとするため、ホール抵抗は減少していくが、 $H=-400$ Oe、 $H=-600$ Oe で、負の跳びを持っている。また、 -700 Oe $> H > -1000$ Oe の付近にも、数個の小さな跳びが観測されている。これらの特性は、磁化が反転するときの PHE により生じていると考えられるが、単純な磁化回転の機構では、説明する事ができない。

3.2 数値計算モデル

このようなホール抵抗の振る舞いを理解するために、我々は、各電流、電圧端子から交差部が受ける交換相互作用を考慮した場合の交差部の磁化過程、およびホール抵抗を数値計算した。電極からの交換相互作用を単純化するために、Fig.3 のように、十字型細線を 5 つの領域に分割する。この場合、交差部の磁化 M が受ける交換相互作用 E_{ex} を求めると、

$$E_{ex} = J \left(\int_{S_1} dS \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M} + \int_{S_2} dS \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M} + 2 \int_{S_3} dS \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M} \right) \quad (1)$$

となる。ここで、 J は交換結合定数、 $\mathbf{M}_1$ 、 $\mathbf{M}_2$ 、そして $\mathbf{M}_3$ は、 V_+ 、 V_- 、及び I 端子の磁化ベクトルである。ここで、今回

Fig. 3 Definitions of the magnetizations M , M_1 , M_2 , and M_3 in the cross-shaped wire.

Fig. 4 Calculated results of the directions of magnetizations M , M_1 , M_2 , and M_3 as a function of the applied magnetic field in a negative sweep, when the angle is 1° .

の試料は、電流端子 I_+ 、 I_- を対称に設計しているため同じ磁化で表せると仮定した。

磁化 M_1 、 M_2 、および M_3 の方向 θ_1 、 θ_2 および θ_3 は、形状磁気異方性とゼーマンエネルギーを考慮した一斉磁化回転モデルにより決定した。ここで、各磁化の保磁力の関係は、試料形状の関係から、 $H_{c1} < H_{c2} < H_{c3}$ の関係式を満たすと仮定している。また、交差部の磁化 M は、(1) 式を最小にするように回転すると仮定した。但し、磁化 M が受けるゼーマンエネルギー、静磁エネルギー等は、無視している。

(1) 式が最小になる θ の値は、次のようになる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{S_1(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) + 2S_2 \cos \theta_3}{S_1(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) + 2S_2 \sin \theta_3} \quad (2)$$

ここで、 S_1 および S_2 は、 M_1 または M_2 と M 、および M_3 と M の境界面の面積であり、この場合、 $S_2/S_1=1/0.15=6.3$ である。

3.3 数値計算結果

Fig.2 のホール抵抗において、磁化反転が終了する際のホール抵抗変化が負の値から 0 に収束している。これは、測定時に磁場方向が縦方向細線の垂直方向から少しずれているために生じたと考えられる。この影響を考慮するため、計算では磁場が横方向細線から 1° 傾いていると仮定した。

Fig. 5 Calculated result of the Hall resistance. The arrows indicate the resistance jumps which are related to discontinuous rotations of M_1 , M_2 , and M_3 .

Fig.4 は、負方向にスイープした場合の各磁化の方向の磁場依存性である。正の方向に磁化が飽和した状態から減磁していくと、 $\theta=90^\circ$ の容易軸方向へ M_3 は回転していく。それに伴い交換エネルギーも変化するので、(2) 式に従い M も回転する。そして、磁場を負方向にスイープしていくと最も保磁力の小さい M_1 が磁化反転を起こす。このため、 θ も (2) 式に従い不連続に変化する。さらに負方向磁場を大きくしていくと、 M_2 も磁化反転を起こす。これにより M も再び不連続に変化する。そして、最後に M_3 の磁化も一斉磁化回転モデルに従うスイッチング磁場で不連続に変化する。それによっても、 M は不連続に変化する。その後は、連続的に磁場の方向に揃っていく。このように、 M は、各端子部の不連続な磁化回転によって引き起こされる3つの不連続な回転を伴いながら回転していく事が分かる。

計算により求められた交差部の磁化 M の磁化過程をもとにホール抵抗を計算する。この場合、面内の磁化過程のみ考慮したので、ホール抵抗は PHE にのみよるものである。PHE によるホール抵抗は、電流方向と磁化方向との間の角度を ϕ とすると、下記のような関係で表されるのが知られている²⁾。

$$\frac{\Delta R_{\text{Hall}}}{R_{\text{Hall}}} = \frac{R_{\text{Hall}}(H) - R_{\text{Hall}}(H=0)}{R_{\text{Hall}}(H=0)} \propto \sin 2\phi \quad (3)$$

Fig.5 は、負方向に磁場をスイープした場合の十字型細線のホール抵抗の計算結果である。Fig.2 と比べてみると、ホール抵抗曲線の概観がほぼ一致しており、 $H=-100$ 、 -200 、および -400 Oe の跳びが再現されているのが分かる。これにより、実験で観測されたホール抵抗の跳びが、各端子の磁化の不連続な回転によって引き起こされているのが分かる。しかし、3 つめの跳びの後、計算結果では一度に負の領域まで落ちるのに対して、実験結果では、一度、正の領域で止まり、 $H=-600$ Oe で、再び負の跳びを持ち、その後も数個の小さな跳びを持ちながら、負の値になっていくのが分かる。このように、実験では計算で現れない跳びが、

Fig. 6 Calculated Hall resistance assuming that the four probes have different coercive forces.

Fig. 7 Calculated Hall resistance assuming $H_{c1}:H_{c2}:H_{c3}:H_{c4} = 1:2:4:6$.

いくつか観測されている。これらの違いが生じる原因としては、 M_3 のピン止めが考えられる。3 つめの跳びは、 M_3 の不連続な回転によって生じるものである。この場合、 M_3 が理想的に一斉磁化回転モデルに従うとすると、Fig.4 に示したように、 160° から -150° に不連続に変化するのであるが、 M_3 は線幅が $1\mu\text{m}$ であり比較的太く、薄膜であるため、ピン止めサイトが存在しやすく、そのようなサイトによって、磁化が数回ピン止めされて、回転したと考えられる。また、先程の計算では、電流端子 $I+$ 、 $I-$ の磁化は同じ磁化で表せると仮定したが、実際は少し異なり保磁力の違いがあると考えられる事もできる。Fig.6 は、 $I+$ 、 $I-$ の磁化も M_3 、 M_4 で表し、保磁力に差を持たせた場合の計算結果である。この場合、4 つめの負の跳びも再現できている。

このように、十字型交差部の磁化回転を接続されている端子の磁化の保磁力差により、制御できる事がわかった。これにより、各端子の保磁力に適当に差を持たせる事により、ホール抵抗の特性をうまく制御してやる事ができる。Fig.7 は、各端子の保磁力の比を、 $H_{c1}:H_{c2}:H_{c3}:H_{c4}=1:2:4:6$ に設定した場合のホール抵抗の計算結果である。微細化した十字型磁性細線では、このような特性が室温で観測する事ができるので、応用的にも非常に興味深い。

Fig. 8 Secondary-electron-microscopy image of Co wire having two crossing points, and probes setups of magnetoresistance and Hall resistance, which are represented by white and black characters, respectively.

Fig. 9 Observed magnetoresistance and Hall resistance of a Co wire with two crossing points.

3.4 磁気抵抗とホール抵抗の関係

次に、このような交差部の磁化変化を磁気抵抗でみると、どのようになるのかを調べるために、Fig.8のような試料を同様の方法で作製し、磁気抵抗とホール抵抗を図に示す端子配置で測定した。Fig.9は、細線の磁気抵抗とホール抵抗の測定結果である。

ホール抵抗は、前述の十字型磁性細線とほぼ同一の特性を示しており、交差部、および各端子の磁化は同様の振舞いで理解できると考えられる。一方、磁気抵抗は、 $H=500$ Oe 付近から減少しはじめ、磁場を負方向に加えていった時の $H=-100$ Oe で負の跳びを持っている。その後、 $H=-200$ Oe で正の跳びを持ち、その後、磁気抵抗は上昇し、一定になる事がわかる。この $500 \text{ Oe} < H < -500 \text{ Oe}$ の磁場領域の磁気抵抗の Dip は、この場合、細線部の磁化が回転しているとは考えにくいので、交差部の磁化の回転による AMR であると考えられる。また、磁気抵抗の跳びが現れる磁場は、ホール抵抗に跳びが現れる磁場と一致しているのが分かる。これより、磁気抵抗の跳びは、ホール抵抗と同じ起

源で生じているのがわかる。ホール抵抗から得られた磁化過程を用いて考えてみると、 $H=-100$ Oe の跳びは、Fig.8 に示している長さ $2 \mu\text{m}$ の細線の磁化の磁化反転に対応している。この場合、 $-100 \text{ Oe} > H > -200 \text{ Oe}$ では、長さ $2 \mu\text{m}$ の磁化と長さ $4 \mu\text{m}$ の磁化が反平行になっており、2つの磁化の間に磁壁が存在する事になる。このような磁壁は AMR により抵抗を小さくする。これより $H=-100$ Oe の負の跳びは、磁壁の生成により生じたものであると考えられる。また、 $H=-200$ Oe では、 $4 \mu\text{m}$ の磁化も反転するため、磁壁が消滅する。よって、 $H=-200$ Oe の磁気抵抗の跳びは、磁壁の消滅により生じたものである事が分かる。

4. まとめ

横方向線幅 150 nm 、縦方向線幅 $1 \mu\text{m}$ の Co 磁性細線を作製し、その電流磁気効果を測定し、交差部の磁化過程を調べた。十字型磁性細線のホール抵抗には、面内の磁化回転に伴う PHE が観測されたが、数個の跳びが観測された。これらの跳びを説明するため、電圧、電流端子からの交換相互作用を考慮し、各端子の磁化を一斉磁化回転モデルで仮定した場合の交差部の磁化過程、およびホール抵抗を数値計算した。計算されたホール抵抗の概観は、実験結果と一致しており、また、観測された3つの跳びを再現する事ができた。しかし、実験結果には、計算に現れていない跳びも観測されており、これらは、縦方向細線の不連続な磁化回転の際のピン止めによって生じていると考えられる。また、電流端子も非対称にし、保磁力が異なると仮定した場合のホール抵抗の数値計算も行い、それにより、4つの跳びを再現する事ができた。十字型磁性細線のホール抵抗曲線は、各端子の保磁力比を変えることにより制御でき、応用的にも興味深い特性が現れる事を示した。また、磁性細線の磁気抵抗に現れる跳びも、計算で得られた磁化過程を仮定し磁壁の抵抗を考慮する事で説明する事ができた。

謝辞

本研究は、文部省科研費・特定領域研究「微小領域の磁性と伝導」の援助により行われた。

文献

- 1) J. P. Jan: *Solid State Phys.* 5 (1957) 17.
- 2) L. Berger: *J. Appl. Phys.* 69 (1991) 1550.
- 3) Y. Otani, S. G. Kim and K. Fukamichi: *IEEE Trans. Magn.* 34 (1998) 1096.
- 4) T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto, K. Mibu, N. Hosoi and T. Shinjo: *J. Appl. Phys.* 85 (1999) 6181
- 5) T. Kimura, F. Wakaya, J. Yanagisawa, Y. Yuba and K. Gamo: *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (1999) 4737.