磁気抵抗効果の形状効果

Shape Effect of Magnetoresistance Effect

岩出曉美・佐藤武信・沢藤 裕・高橋 実

東北特殊鋼(株), 仙台市太白区長町 7-20-1 (〒982)

A. Iwaide, T. Sato, Y. Sawafuji and M. Takahasi

Tohoku Steel Co., Ltd., 20-1, Nagamachi 7-chome, Taihaku-ku, Sendai 982

Magnetoresistance was studied for circular and width-varied rectangular Ni-Co-Fe ternary alloy thin films. Resistivity was measured using four-point probe. Applying the method of images, the true value of ρ_{av} can be obtained on every film. But that of $\Delta\rho$ cannot, because the angle between the current direction and magnetization direction is not uniform in the film. The behavior of ρ_{av} and $\Delta\rho$ can be understood exactly by the finite element method, allowing the magnetoresistance of variously shaped films to be analyzed by it.

Key words: thin film, magnetoresistance effect, method of images, finite element method

1. はじめに

近年、磁界検出用素子として、強磁性薄膜磁気抵抗効果を用いた MR センサーの開発研究が増加しつつある。磁気抵抗効果素子材料に要求される特性は、MR 比の大きなことに加え、磁気抵抗曲線の形状すなわち、弱磁界下における抵抗変化曲線に、履歴、ディップなどがないことが必要である。磁気抵抗曲線の形状は、磁気異方性や電流の方向と密接な関係があることが知られている¹⁾。一般に、磁気異方性の測定においては形状による反磁界異方性のない円形試料が用いられ、磁気抵抗効果の測定には、電流密度および方向の分布のほとんどない短冊型試料が用いられている。しかし、磁気抵抗効果の異方性を磁気特性の異方性との関連で調べるには、両者を円形の同一試料を用いて測定することが望ましい。しかしながら円形試料での磁気抵抗効果を詳しく検討した例はほとんどない。したがって本報告では、円形試料での磁気抵抗効果を一般的に行われている短冊型試料での測定と対比させ、磁気抵抗効果の形状効果を考察する。また有限要素法による、磁気抵抗効果の試料形状依存の解析を試みる。

2. 試料および実験方法

試料²⁾は電子ビーム真空蒸着法を用い、 10^{-6} Torr の真空中で作製した。基板にはパイレックスガラスを用い、蒸着中の基板温度は 250°C 、成膜速度は $8\text{\AA}/\text{sec}$ で、 35 Oe の磁界を印加して作製した。膜厚は $510\text{\AA}$ である。また成膜に先立ち、基板のベーキングを 10^{-6} Torr の真空中で 400°C に 1 時間保持することにより行った。蒸発用母材には 4~5% の比較的高い MR 比を有し、小さな異方性磁界を示す、 $80\text{ wt\%Ni}-15\text{ wt\%Co}-5\text{ wt\%Fe}$ 合金を使用した。電気抵抗は直流四端子法を用いて測定した。端子は直径 1 mm の銅線の先端を球面に加工し、錘で加圧して膜面に接するようにした。端子間の距離はいずれも等間隔で 2.5 mm とし、印加電流は 2 mA 一定でヘルムホルツコイルを用いて最大 200 Oe までの磁界を印加して測定を行った。試料形状は、まず直径 9 mm の円形試料から出発し、円の中心線（四端子の並ぶ線）に平行にナイフでけがき線を入れることにより、試料幅を $8\sim 1\text{ mm}$ に変化させた。すなわち、形状を円形から鼓型を経て短冊型に変化させた。なお試料は MR 比の測定に先立って、毎回 50 Hz で交流消磁を行った。

3. 実験結果ならびに考察

Fig. 1 に試料幅を変化させて磁気抵抗効果を測定したときの磁気抵抗曲線の一例を示す。それぞれの試料形状での抵抗変化に応じた電圧出力が記録されている。この結果から MR 比を計算により求めた。MR 比は試料に流した電流に対して、磁界を平行および垂直に印加した場合の比抵抗の変化の飽和値 $\rho_{\parallel}$ および $\rho_{\perp}$ から、次式により求められる³⁾。

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_{av}} = \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{(1/3)\rho_{\parallel} + (2/3)\rho_{\perp}} \quad (1)$$

ここで $\Delta\rho$ は異方性比抵抗、 ρ_{av} は平均比抵抗で、近似的に $(1/3)\rho_{\parallel} + (2/3)\rho_{\perp}$ と表せる。Fig. 2(a) に試料幅を $1\sim 9\text{ mm}$ まで変化させた時の ρ_{av} の変化のようすを示し

Fig. 1 Variation of MR-loop with sample width.

た、図中●印で示したのが実測値である。 ρ_{av} は試料幅が1~4 mmのときには試料幅には依存せず、約 $17 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ の一定の値をとるが、それ以上の試料幅では試料幅が大きくなるに従って増加する。この試料幅が大きいところでの ρ_{av} の増加は、幅方向での電流密度の大きさの分布が生じるためであると考えられ、一般的に鏡像法により補正が行われる⁴⁾。Fig. 3に円形および短冊型試料での四端子法による電気抵抗の測定の概要図を示した。また補正式は円形試料と短冊型試料で異なり、円形試料の場合には、

$$\rho_s = \frac{V}{I} \cdot \frac{\pi}{\ln 2 + \ln \left[\frac{\left\{ \left(\frac{d}{s} \right)^2 + 3 \right\} / \left\{ \left(\frac{d}{s} \right)^2 - 3 \right\}} \right]} \quad (2)$$

で表され、短冊型試料の場合には、

$$\rho_s = \frac{V}{I} \cdot \frac{d}{s} \cdot c \quad (3)$$

で表せる。ここで V は出力、 I は印加電流、 d は試料幅で s は端子間距離、 c は補正係数を表す。また ρ_s はシート抵抗で膜厚を考慮していない。膜厚は510 Åで非常に薄いため、厚さ方向の電流の分布はなく、一様であるとして、 ρ_s に膜厚をかけることにより膜の比抵抗 ρ が求まる。

$$\rho = \rho_s \cdot t \quad (4)$$

t は膜厚を表す。

鏡像法による ρ_{av} の補正の結果をFig. 2(a)に◎印で示した。試料幅が1~5 mmのものは短冊型試料として補正を行い、試料幅が9 mmのものは円形試料として補正を行った。なお試料幅が6~8 mmのものはその形状が鼓型となるので補正は行わなかった。補正を行った結果いずれの値も、試料幅が4 mm以下の短冊型試料の値と一致した。したがって円形試料の ρ_{av} は鏡像法により補

Fig. 2 Sample width dependence of ρ_{av} , $\Delta\rho$ and MR ratio.

正することができるということがわかった。

次に、 $\Delta\rho$ の実測値の試料幅依存性をFig. 2(b)に●印で示した。 $\Delta\rho$ は試料幅が1~3 mmのときには約 $0.75 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ の一定の値をとるが、それ以上の試料幅では試料幅が大きくなるに従って減少する。そこで ρ_{av} の場合と同様に鏡像法により $\rho_{\parallel}$ と $\rho_{\perp}$ の補正を行い、 $\Delta\rho$ を求めた。補正の結果をFig. 2(b)に◎印で示す。 $\Delta\rho$ の補正値は試料幅が1~3 mmの場合には約 $0.75 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ の一定の値をとるが、それ以上の試料幅では試料幅が大きくなるに従って減少し、なおかつ補正を行う前の値を下回る。これにより $\Delta\rho$ の試料幅に対する変化は、鏡像法による電流密度の補正では不十分であることがわかった。磁気抵抗効果は電流と磁化のなす角に依存して変化し、

Fig. 3 Arrangement of a four-point probe.

電流と磁化のなす角を θ とした場合、そのときの比抵抗を $\rho(\theta)$ とすると $\rho(\theta)$ は次式で表せる。

$$\rho(\theta) = \rho_{\parallel} \cos^2 \theta + \rho_{\perp} \sin^2 \theta \quad (5)$$

$\theta = 90^\circ$ および $\theta = 0^\circ$ のときの $\rho(\theta)$ の差が $\Delta\rho$ となるが、 θ に変化がある場合 $\Delta\rho$ の値が変化する。したがって上記の実験結果において試料幅が大きいく所 $\Delta\rho$ が減少してしまうのは、試料内で電流と磁化のなす角が 90° または 0° 一様とはならず、場所により変化していることが容易に想像できる。

そこで試料内の電流分布を有限要素法により再現し⁵⁾、 $\Delta\rho$ に及ぼす影響について解析を試みた。以下に有限要素法による電流分布の求め方について説明する。まず円形試料のモデルでは試料の対称性を考え、四端子の並んだ線で分けた半円の部分を 120 個の要素に分けた。境界条件として、①電流端子の当たる節点は固定境界とし、電流端子間の電位差を 30 mV とした。また実際の膜の厚さは薄く、膜の厚さ方向での電流分布はないと考え、上記節点に対応する下面の節点も等電位の固定境界とした。②膜面および外周部は自然境界とし、電流はこの自然境界と平行に流れるとした。

これらの条件のもとに、各節点 i での電位 ϕ_i を Laplace の方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_x \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_y \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

を用い、有限要素法により解いた。ここで α_x, α_y はそれ

Fig. 4 Current distribution. Points 1, 2, 3, 4 are probe positions.

ぞれ x 方向（四端子の並んだ方向）、 y 方向（四端子と直角をなす方向）の導電率である。 x 方向に磁化している場合は、 $\alpha_x = 1/\rho_{\parallel}$ 、 $\alpha_y = 1/\rho_{\perp}$ を、また y 方向に磁化している場合は $\alpha_x = 1/\rho_{\perp}$ 、 $\alpha_y = 1/\rho_{\parallel}$ とし、計算では実験により求められた値、 $\rho_{\parallel} = 17.65 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、 $\rho_{\perp} = 16.88 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ を代入した。これらの条件のもとに ϕ_i が求まると、電界 E_i が、

$$E_i = -i \frac{\partial}{\partial x} \phi_i - j \frac{\partial}{\partial y} \phi_i \quad (7)$$

として求め、各要素での電流密度は

$$j = \sigma E_i$$

から求められる。この電流密度から求められる電流の様子を図示すると Fig. 4 のようになる。矢印の方向が電流の方向を表し、また矢印の長さが電流の大きさを表す。図からわかるように、中心線から遠ざかるに従って、電流の大きさが減少し、また、電流の方向が試料内で様になっていない。円形試料で磁気抵抗効果を考える際にこれを考慮する必要があることがうかがえる。上記の計算結果から $\rho_{\parallel}$ 、 $\rho_{\perp}$ を求めるには、Fig. 4 で A-B を結ぶ面を流れる電流 I と電圧端子間のポテンシャル V から、電圧端子間の電気抵抗 $R (= V/I)$ を求め、これと A-B 間の断面積 S 、電圧端子間の距離 s より、 x 方向および y 方向に磁化したときの比抵抗 $\rho (R \cdot S/s)$ を計算すればよい。これより直ちに $\Delta\rho, \rho_{av}$ が求められる。次に試料幅が 1 mm, 3 mm, 4.8 mm, 7.8 mm のものについても同様に有限要素法による計算を行った。以上述べた有限要素法による $\Delta\rho, \rho_{av}$ 、MR 比の計算結果をそれぞれ Fig. 2(a), (b), (c) に $\times$ 印で示した。この図からわかるように、計算結果は実験結果と非常に良く一致し、有限要素法による磁気抵抗効果の解析が有効であることがわかった。逆に、有限要素法を用いることにより、円形試料の実験結果から $\rho_{\parallel}, \rho_{\perp}$ の真の値を導出することができ、異形試料での磁気抵抗効果の異方性の解析が可能になった。

4. ま と め

1) 試料幅に対する ρ_{av} の変化は、鏡像法を用いて補正を行うことにより、試料幅には依存しない一定の値をとる。したがって、鏡像法を用いることによって、円形試料の ρ_{av} を短冊型試料の ρ_{av} へ変換することができる。

2) $\Delta\rho$ は試料幅が大きくなると、試料内での電流と磁化のなす角が場所によって異なるため、鏡像法による補正では十分に補正することができない。

3) 有限要素法によって、円形試料など短冊型試料以外の形状の試料における MR 効果の解析が可能であることがわかった。これより、異形試料での磁気抵抗効果

の異方性の解析が可能になった。

文 献

- 1) 宮崎照宣, 安島孝浩, 佐藤文隆: 日本応用磁気学会誌, **14**, 221 (1990).
- 2) 岩出暁美, 佐藤武信, 高橋 実: 日本応用磁気学会誌, **15**, 319 (1991)
- 3) T. R. McGuire and R. I. Potter: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-11**, 1018 (1975).
- 4) F. M. Smits: *The Bell System Technical Journal*, **37**, 711 (1958).
- 5) 植山高次: 新日鉄技報, **341**, 23 (1991).

1991 年 11 月 12 日受理, 1992 年 1 月 30 日採録