

## パーマロイ薄膜における磁気微細構造と磁気抵抗効果の同時計測

北大(院)○小野貴弘 北大工 浜田弘一、有田正志、岡田亜紀良

### 要旨

ローレンツ法により、NiFe 薄膜の磁気微細構造、MR の同時測定を行った。その結果、試料の磁化状態はその中心部と縁部で異なることが確認された。膜内部の磁化分布から見積もった MR 値は抵抗実測値と対応していることが明らかになった。

### 1. 緒言

磁気抵抗効果 (MR 効果) を利用したデバイスが実用化されているが、その特性はデバイス内部の微細な磁化分布状態と密接な関わりがある。そのため磁気微細構造と電気特性を直接に関連付ける同時計測が重要な意味合いをもつと思われるが、この種の研究例はあまりない。本研究においては異方性磁気抵抗効果を示す NiFe (パーマロイ) 合金薄膜を例にとり、膜中の各微小領域の磁気抵抗特性、磁化への寄与の解析を試みた。

### 2. 実験方法

自作の特殊ステージを用いて透過型電子顕微鏡 (TEM) ローレンツ法による磁気微細構造観察と磁気抵抗効果の同時計測を行った。実験に使用した試料の概略図を Fig.1 に示す。表面を窒化処理した SiN/Si (全厚 380 μm、窒化膜 1 μm) を加工することにより中央部に厚み約 0.1 μm の SiN 膜が残存する 3mm φ のディスクを作製した。これを基板として、厚さ 30nm、長さ 2mm、幅 100 又は 50 μm の NiFe 膜 (Ni:79.1%, Fe:20.9%) を蒸着した。蒸着に際しては長手方向に 300 Oe の磁場を印加することにより一軸異方性を付加してある。また Au 電極 80nm を蒸着することにより観察時の抵抗測定を可能にした。

磁場の印加には、TEM 対物レンズの残留磁場を用いた (Fig.2)。試料を傾斜させていない場合には、磁場が試料面にほぼ垂直に印加 ( $H_0$ ) されているため、NiFe 膜面内の磁場 ( $H$ ) はゼロである。他方、試料を傾けると  $H=H_0 \sin \phi$  ( $\phi$  は傾斜角) の面内磁場成分が印加され、試料の磁化状態を変化させることができる。なお抵抗測定には直流四端子法を用いた。

### 3. 実験結果と考察

観察された像 (ローレンツ像) の模式図を Fig.3(a) に示す。リップルと呼ばれる縞状のコントラストが見られ、各局所領域での平均磁化はこのリップルに垂直であるため、リップルの分布を観察すると磁気微細構造がわかる。

試料の幅 100 μm の例を Fig.3(b) に示す。磁場の増加に伴いリップルの傾きが減少し、磁化の向きが容易軸 (水平方向) からずれていくことがわかる。ここで 1 本のリップル線に着目してみると、直線ではなく緩やかな S 字カーブとなっている。このことは試料の磁化が空間的に一様ではなく、図中の上下

縁部分における磁化の方向が中央部と異なっていることを示している。幅 50 μm の結果を Fig.3 (c) に示す。リップルの傾きは Fig.3(b) に比べ大きく、磁化の向きが変化しにくいことがわかる。このことは試料幅の減少に伴い反磁場の影響が大きくなることから理解できる。

Fig.4 に、リップルの傾きから求めた磁化方向の磁場依存性を示してある。縁部は中央部に比べ磁化しにくいということがはっきりとわかる。また試料幅の影響は中央部の方が顕著である。このように大きさの限られた磁性薄膜においては、縁部からの距離により磁化状態が異なる。故に MR 効果への寄与は、場所ごとに異なるといえる。

このことを調べるために長軸に平行な幅 5 μm の領域に試料を分割し、全体の抵抗  $R_t$  が各領域の抵抗  $R_i$  の並列回路で表されるものとして解析をした。

$$\frac{1}{R_t} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \quad (1)$$

ここで幅 100、50 μm に対してそれぞれ  $N=20$ 、10 である。また磁場による抵抗の変化は  $\cos^2 \theta$  に比例することが一般に知られている ( $\theta$  は電流と磁化の成す角)。よって各領域における  $\theta$  を  $\theta_i$  とすると、 $R_i$  は

$$R_i = N \{ R_0 + \Delta R_m (1 - \cos^2 \theta_i) \} \quad (2)$$

で表される。 $R_0$  は  $H=\infty$  における試料全体の電気抵抗、 $\Delta R_m$  は抵抗の極大値と  $R_0$  の差である。 $\theta_i$  はローレンツ像から、また  $R_0$ 、 $\Delta R_m$  は MR 曲線の実測値から得られる。巾 100 μm の試料においては  $R_0=139.24 \Omega$ 、 $\Delta R_m=0.96 \Omega$  であった。こうして求めた MR 曲線の一例が Fig.5 に示してある。ここで MR 比は最大抵抗値で規格化した値である。

$$MR \text{比}(\%) = \frac{\{R_i(H) - (R_0 + \Delta R_m)\}}{R_0 + \Delta R_m} \times 100 \quad (3)$$

抵抗の実測曲線とローレンツ像から得られた MR 曲線はほぼ一致しており、このモデルがほぼ妥当であることを示している。試料各部の MR 比を求めた結果の例が Fig.6 に示してある。これを見ると縁部の MR 比は磁場の影響を受けにくいことがはっきりと

わかる。内部の領域になるにつれ曲線は徐々に鋭くなり、縁から  $10\text{-}15\mu\text{m}$  の位置においては試料全体のMR曲線と重なる。つまり縁から十数  $\mu\text{m}$  以下の領域において縁の影響が大きく、高い抵抗値を示すことがわかる。同様のことが幅  $50\mu\text{m}$  の試料についても観察された。

以上のことから、本手法により磁気微細構造と磁気抵抗効果を結びつけることが可能になったといえ

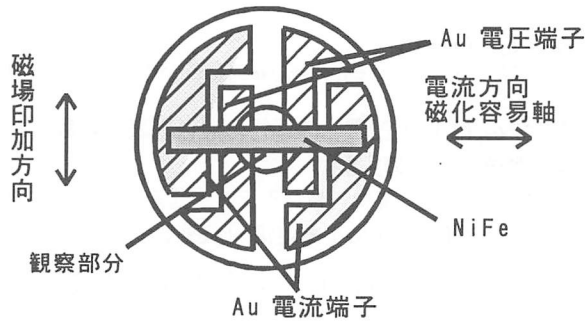


Fig. 1 観察用試料の概略図

る。特にパーマロイにおいて「縁の影響が十数  $\mu\text{m}$  程度である」という結果はデバイスの微細化に関連して、意味ある結果といえるであろう。しかしながら現状においては、リップルの方向認識を目測で行っているため、誤差も大きく、また領域分割も次元である。より詳細な解析を行うためにFFT等を用いた画像解析法について検討中である。

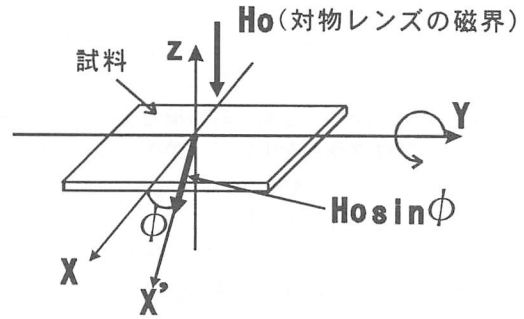


Fig. 2 試料傾斜による面内磁場の印加

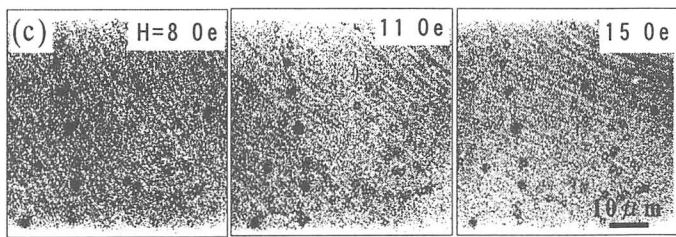
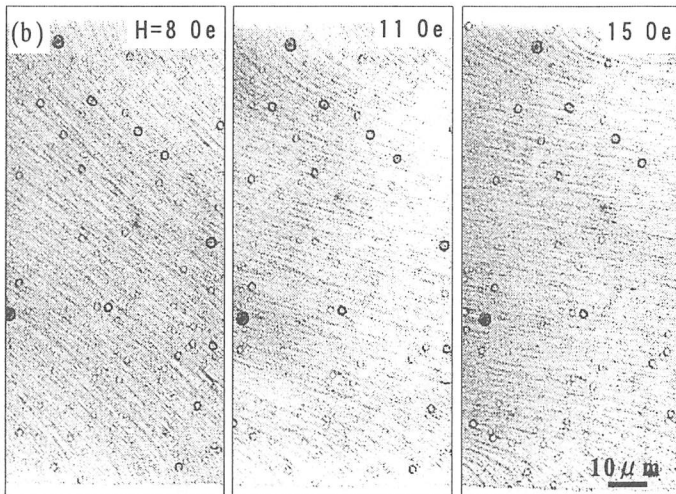
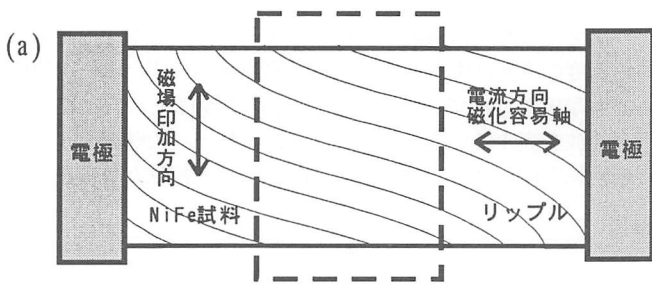


Fig. 3 面内磁場変化によるリップルの変化  
(a); 模式図 (b)(c); Fig. 3(a)の点線領域内の観察像  
(それぞれ幅  $100\mu\text{m}$ 、および  $50\mu\text{m}$ )

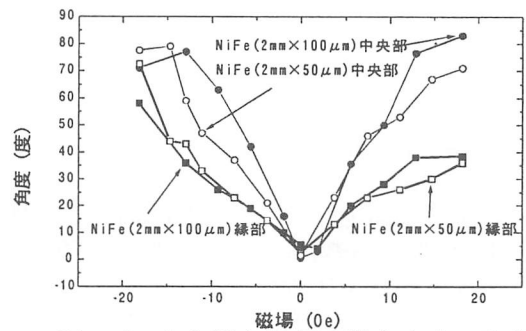


Fig. 4 中央部と縁部の磁化方向の変化 (水平方向を0度とする)

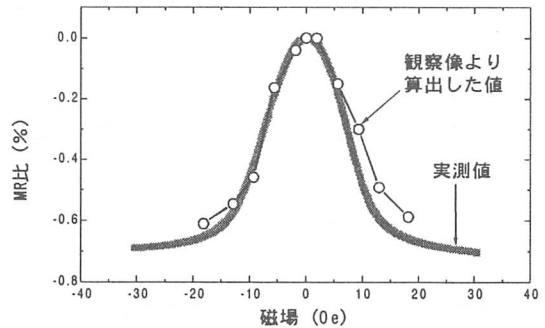


Fig. 5 試料全体の磁気抵抗効果 (抵抗実測値とTEM像による評価:巾  $100\mu\text{m}$ )

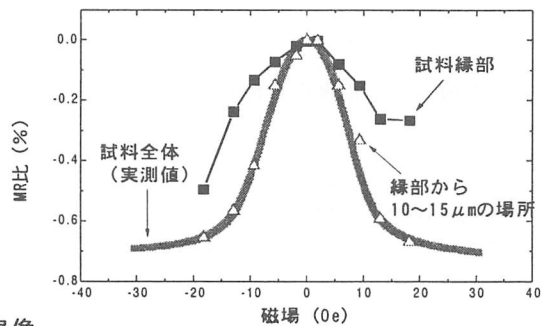


Fig. 6 各領域のTEM像から求めたMR比 (Fig. 5に対応)