Possibility of Quantitative Evaluation of a Current through Current-Induced Magnetic Field Detection Using MFM

D. Saida, T. Edura*, K. Tsutsui*, Y. Wada*, and T. Takahashi

Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan *Nanotechnology Research Laboratory, Waseda University, 513 Wasedatsurumakicho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0041, Japan

A Current-induced magnetic field was detected by magnetic force microscopy (MFM) in order to evaluate a current flowing in a fine structure. Our system consists of a conventional magnetic force microscope and a feedback system for elimination of electrostatic force. As a first step in investigating the quantitativeness of this method, we observed the magnetic field around sub-micron-width gold wires where two currents joined with a third. First, we confirmed that the detected magnetic force signals qualitatively agreed with distribution of the magnetic field gradient around the sample. The amplitude of the magnetic force signal around the individual current paths was proportional to the current value. By taking account of the strength of the current-induced magnetic field, we theoretically estimated the amplitude ratio between the two different current paths. We then investigated the difference between the magnetic force signals observed around those current paths, and found that the experimental results quantitatively agreed with the theoretical values to some extent.

Key words: magnetic force microscopy (MFM), current detection, magnetic field gradient, electrostatic force, quantitative evaluation in current

磁気力顕微鏡を利用した電流誘起磁場測定における電流定量評価の可能性

才田大輔・江面知彦*・筒井謙*・和田恭雄*・高橋琢二 東京大学生産技術研究所,東京都目黒区駒場 4-6-1 (〒153-8505) *早稲田大学ナノテクノロジー研究所,東京都新宿区早稲田鶴巻町 513 番地 (〒162-0041)

1. はじめに

近年、プロセス技術の発達により、数um角の領域の中に複数の 電極と電流路が含まれるネットワーク系が作製されるようになっ てきた. 例えば、トップダウン形成法により、nm 程度の直径を有 する量子細線や半導体ナノワイヤを用いてネットワーク形状を作 製した例が報告されている 12. このような系において、電極間に 電流計を挿入し回路を流れる全電流を評価することは可能である が、一方で個々の電流路を流れる電流値を評価することは非常に 困難である。電流路の特性評価や断線状況を観察することを考え ると、回路に挿入することなく個々の電流路を流れる電流を定量 的に評価できる測定手法が要求される。実現し得る一つの候補と して、電流により生じる磁場を磁場センサで計測する方法が挙げ られる、これまでに、電流により誘起される磁場を高感度かつ定 量的に検出できる超伝導量子干渉素子(SQUID: superconducting quantum interference device)を用いる SQUID 顕微鏡を利用する 手法が報告されており、IC素子を流れる電流を50μm 程度の空間 分解能で観察したことが示されている³. また, 数um 程度の空間 分解能で磁場を検出することが期待できる走査型磁気抵抗効果顕 微鏡を用いた方法も提案されている 4. しかし、nm 程度の直径の 半導体ナノワイヤなどで形成されたネットワーク系の伝導評価を 目的として使用するためには大幅な空間分解能の向上が要求され る. これに対して、高い空間分解能を有する磁気力顕微鏡(MFM: magnetic force microscopy)を利用することで、近接して流れる複 数の電流が作る磁場勾配分布を電流路の形状と合わせて同時に観 察することが期待できる 5.6. 我々は MFM を利用した電流誘起磁 場測定系を提案し、測定の擾乱となる静電引力の影響を常に抑制 することで、0.07・160 μA 程度の電流が作る磁場勾配分布を高感度に検出できることを示してきた 7·10. また、0.2 μm の間隔で配置された幅 0.5 μm の Au の電流路を流れる電流を観察し、電流路の間で存在する磁場勾配分布が判別できたことを報告している 10·10. 一方で、測定系を電流評価に利用するためには、検出される信号と電流誘起磁場の強度が定量的に対応付けられることを確かめる必要がある. そこで今回、強度が異なる磁場分布の様子を、測定毎のバラツキの影響を防ぐため一度の測定で観察できるように、幅の異なる電流路で構成された T分岐型の電流路を作製した。電流路周辺に作られる磁場分布を MFM で観察し、その強度と磁気力信号の大きさが定量的に一致するかについて検討した。本論文では、T型分岐電流路の等価回路を考え、幅の異なる 2つの電流路周囲で検出されると期待される磁気力信号振幅比の理論値を試算し、MFM による実側値と比較することで測定の定量性について議論する.

2. 磁気力信号の理論値の試算

2.1 試料構造

表面に膜厚 0.1 μm の酸化膜を持つ Si 基板上に、電子線描画と リフトオフにより、Ti と Au の積層構造(両者の膜厚は同じ設計 値、実測値で合計の高さ 80 nm)で構成された T 型分岐構造の電 流路を作製した(Fig. 1(a)). Au と Ti の抵抗の違いから、電流は Au 層を集中的に流れるものと考えている. 試料の電気抵抗を小さ くするために、MFM で観察する部分で電流路幅が最も小さくな るようにし、他の部分では電流路の幅を 2 倍以上大きく設計して いる. MFM で観察する領域において、T 分岐を構成する電流路の 幅(W)を $0.2 \, \mu m$, $0.3 \, \mu m$, $0.4 \, \mu m$ と変えることで,各電流路周囲に異なる強度で磁場が存在する様子を MFM で一度に観察できる構造としている。 さらにフォトリソグラフィーとリフトオフプロセスにより各電流路端に電極を作製し,外部電圧源から電圧を印加できる構造とした。 Fig. 1(a)に示したように,測定では上側($W=0.2 \, \mu m$)と下側($W=0.3 \, \mu m$)の電流路が並列回路となるように交流電圧(Y)を印加した。 試料に流すことのできる電流許容量は幅の最も狭い電流路を流れる電流値で制限されるため,幅 $0.2 \, \mu m$ の電流路に流れる電流方許容量(理論値で $160 \, \mu A$)以下となるようにした。なお,測定した電流範囲はRef.10 での測定範囲とほぼ同じである。 試料を流れる全電流(I_{total})は電流計で観察した。

2.2 試料等価回路を用いた電流ならびに磁気力信号強度比の試算

電流はAu 層を流れるものと考え、電流路形状(幅、断面積)を 考慮に入れながらAu の抵抗率(ρ = $2.0 \times 10^8 \Omega m$)を用いて各電 流路の抵抗を試算した 10^{10} 、電極と電流路の接合部に接触抵抗(R_0) があると考えたときの試料等価回路を Fig. 1(b)に示す、等価回路 をもとに、試料合成抵抗(R_{total})と上側と下側の電流路を流れる 電流の比(I_1 : I_2)をそれぞれ計算した。

$$R_{total} = (6 + R_c) + \frac{(28 + R_c)(26 + R_c)}{2R_c + 54}$$
 (1)

$$I_1: I_2 = (26 + R_c): (28 + R_c)$$
 (2)

試料合成抵抗の実測値は約 110Ω であったことから、式(1)より 試料の接触抵抗は約 60Ω と求められた。その結果、式(2)より、今回作製した T型分岐電流路では上下の電流路を流れる電流はほぼ同程度の大きさとなることがわかった。ところで、MFM によ

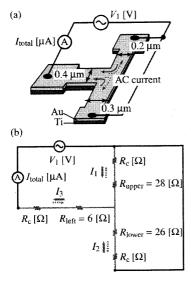


Fig. 1 (a) Schematic illustration of our sample structure. A T-junction of gold wires where two current paths joined another wider path was fabricated. (b) Equivalent circuit of the T-junction of wires. The resistance of each current path in the T-junction of wires was evaluated by taking account of the widths of the wire.

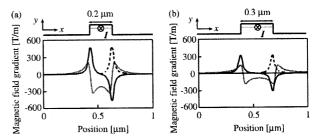


Fig. 2 Calculation of magnetic field gradients around Au wires. Simulation models are described above each graph. (a) Calculated gradients of B_x component (black line) and B_y component (grey line) around 0.2 μ m wide current path at a current of 100 μ A. A dotted line shows an absolute value of the gradient of B_x component. (b) Calculated magnetic field gradients around 0.3 μ m wide current path at a current of 100 μ A.

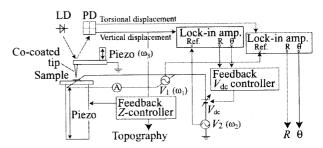


Fig. 3 Experimental setup. We extracted the amplitude (R) and the phase (θ) difference synchronized with the frequency of an ac current from the cantilever torsional displacement to evaluate the magnetic force, while the vertical displacement signal due to the mechanical vibration was used to control the height of the tip.

り検出される磁気力信号は、電流路周囲の磁場勾配の大きさに比 例する. そこで,幅 0.2 μm ならびに幅 0.3 μm の電流路にそれぞ れ100 µAの電流が流れたときに周囲に作られる磁場勾配をRef.7 に示した式を用いて計算した (Fig. 2). ここで、各電流路の断面 に対してxならびにy座標を定義している. 黒の実線はdB/dxを, グレー線は dB/dx をそれぞれ表している。また、点線は dB/dxの絶対値を表している。 dB/dx は電流路の両側側壁付近で逆向き の勾配が存在する様子を示し、dB/dx は電流路の両側側壁付近で 同一方向で同程度の大きさの勾配があり、なおかつ電流路の直上 でも大きな勾配が存在する様子を示している。また、Ref.7の式か ら、磁場勾配の大きさは電流値と電流路の幅の逆数に比例するこ とがわかっている.上側と下側の電流路のそれぞれにおいて両側 側壁付近に存在する最大磁場勾配の大きさを比較した結果,両者 の間に1.5倍の違いが現れることがわかった. すなわち, 理論的に は、上側の電流路周囲で検出される磁気力信号(Rw)の方が、下 側の電流路周囲で検出される磁気力信号(R)と比較して、1.5倍 大きくなることが判明した.

3. MFM による電流誘起磁場測定系

Fig. 3 に MFM を利用した電流誘起磁場測定系の概要を示す. Ref. 10 で示したように,この測定系は,試料に対し

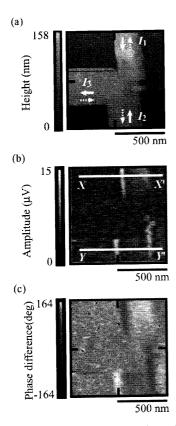


Fig. 4 (a) Topography of the T-junction of gold wires and (b) amplitude and (c) phase difference of the magnetic force signals at a total current of $200~\mu A$.

て交流電圧 (N) を印加したときに電流が作る磁場勾配分 布を MFM で検出するものである.カンチレバーは縦モー ド共振で振幅約 200 nm で励振させながら試料に周期的に 接触させ、その縦方向変位量を形状像を得るための高さ方 向制御に利用している. また, 磁場勾配中で磁性探針に磁 気力が働くことで生じるカンチレバーのねじれ変位の中で, 交流電流に同期する成分をロックインアンプを用いて取り 出し磁気力信号としている. 形状像と磁気力信号は同時か つ独立に検出している. ここで, 実測される磁気力信号の 振幅値(R)ならびに交流電圧との位相差(hetaは, それぞれ観測 点における磁場勾配の強度と向きにおおよそ対応している. ねじれ信号を取り出しているため、我々の測定系はカンチ レバーの長手方向に直交する向きの磁場勾配に対して感度 を持つ、ところで試料に交流電圧を印加する場合、探針と 試料の間の電位差が交流電圧に同期して変化することで生 じる静電引力が、カンチレバーのねじれ変位に影響を及ぼ す問題がある. この問題に対して, Ref. 10 に示した静電引 力を抑制する方法の中で、交流電流とは異なる周波数の交 流電圧 $(V_2(\omega_2))$ を利用して制御された直流オフセット 電圧(Vdc)を印加して探針と試料の間の電位差をバランス させる方法を採用し、試料を流れる電流に影響を与えるこ となく静電引力の影響を逐次抑制した. なお, 磁性探針の磁 化方向は、各実験前に永久磁石を用いて探針の長手方向にそろう ように着磁を試みた後で使用した.

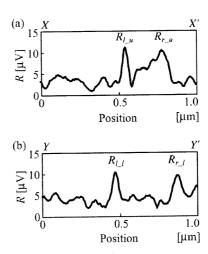


Fig. 5 Line profiles of the amplitude of the magnetic force signal obtained along (a) the X X line shown in Fig. 3(a)(ii) and (b) the Y Y line.

4. MFM による磁気力信号の検出

4.1 電流路周囲の磁場勾配検出の定性的な検討

カンチレバーの長手方向をT型分岐の上下の電流路(W=0.2 μ m, $W = 0.3 \mu$ m) に対して平行になるように配置させて、交流 電流を流した時に誘起される磁場勾配分布を MFM で観察した. $I_{\text{total}} = 200 \, \mu A$ の交流電流を流した時に、検出された電流路 の形状像と磁気力信号の振幅成分,位相差成分をそれぞれ Fig. 4(a), Fig. 4(b)ならびに Fig. 4(c)に示す. 我々の測定 系ではカンチレバーの長手方向に直交する向きの磁場勾配 に対して感度を持つため, ref. 9 で確かめたように, 測定系 が感度を持つ向きに磁場勾配が存在しない左側の電流路 ($W=0.4~\mu m$) 周囲では、磁気力信号がノイズレベルとな っていることがわかる.一方,上側と下側の電流路におい て, 各電流路の両側壁付近で磁気力信号の振幅が増加し, 位相が 180 度変化している様子が確認できる. また、電流 路左側側壁(あるいは右側側壁)に注目すると、上下の電 流路で位相が反転していることがわかる. ここで, 実験で 得られた磁気力信号と Fig. 2 の磁場勾配分布を比較すると, 実験では電流路周囲に存在する磁場勾配のうち、dB/dxの 寄与が捉えられているものと思われる. よって Fig. 4 は, 意図し た着磁方向の磁化成分で得られた磁気力信号ではなく、カンチレ バーの長手方向に直交する向きの探針の残留磁化によって捉えら れたものであると考えられる.

4.2 磁気力信号検出の定量性に関する検討

MFM を利用した磁気力信号検出による電流評価の定量性を検討するために、検出される磁気力信号の振幅強度が試料周辺磁場強度とどの程度対応がつくかについて調べた。Fig. 4(b)に示した XXならびに YYに沿って得られた磁気力信号振幅成分のラインプロファイルをそれぞれ Fig. 5(a), 5(b)に示す。上側と下側の電流路における磁気力信号の振幅ピーク値の比を電流路の左側側壁付近ならびに右側側壁付近で各々比較したところ, $R_u: R_J=1.1:1.0$, $R_{Cu}: R_{CJ}=1.1:1.0$ となった。電流路周辺での磁場強度

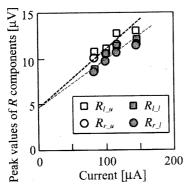


Fig. 6 Current dependence of the peak values of the amplitude components in magnetic force signals.

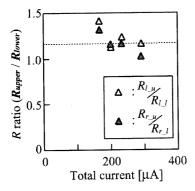


Fig. 7 Current dependence of the amplitude ratio. Here, the amplitudes of magnetic force signals obtained around the upper wire ($W=0.2~\mu m$) and the lower wire ($W=0.3~\mu m$) are compared. A dotted line shows an average value of R ratio.

を考慮に入れて試算した理論値では R_u : R_i = 1.5 : 1.0 となったこ とを考えると、実験で得られた磁気力信号振幅の差は若干小さい ことがわかる. また, ラインプロファイルを取った各側壁付近で の磁気力信号振幅成分の電流依存性を調べた(Fig. 6). ここでは 各電流路に全電流(Lotal)の半分の電流が流れていることを考慮に 入れ、横軸は各電流路を流れる電流値(A, A) としている. いず れも磁気力信号振幅成分が電流に比例する傾向が得られている. この結果は、測定系が電流強度の変化を磁気力信号振幅の強度変 化として定量的に検出できることを示している. 一方で, Fig. 6 において外挿値は原点を通らずオフセットがあることが確認でき る.この結果は、外挿値は原点を通るが低磁場側で信号がノイズ に埋もれているという傾向とは異なるものである. このような数 μV 程度の大きさのオフセットは Ref. 10 でも確認されており、こ のオフセットはカンチレバーのねじれ変位の中で磁気力とは異な る原因で誘起される変位によるものであると考えられる. その原 因として、カンチレバーの機械的な励振や試料上での走査によっ てもカンチレバーにねじれ変位が誘起されているためと考えてい る。そこで、実測された磁気力信号の中にはオフセットが一様に 含まれているものと考えて、上側と下側の電流路においてそれぞ れ左側側壁付近を観察して得られた磁気力信号の振幅ピーク値 (R_{u}, R_{u}) を用いて、最小二乗法を利用してそれぞれの近似直 線を求めた. Fig.6の黒の点線は R_a に対して描いた近似直線であ り、グレーの点線は Rに対して描いた近似直線を表している. そ の結果、オフセットは4.7μVと見積もられた、上側と下側の電流 路で得られた磁気力信号の振幅に対して、オフセット分を校正し てその比をとり、全電流値(Autal)に対する依存性を調べた結果を Fig. 7 に示す. 上側と下側の電流路における磁気力信号の振幅ピー ク値の比は、Fig.6の近似曲線の傾きの比から平均として R_a : R_i = 1.2:1.0 となることがわかった. T分岐の上側の電流路周囲で磁場 強度が強くなるという傾向を MFM で検出できていることが確か められたが、オフセット分を校正した後でも実験値は理論値と比 べて小さくなっており、その原因を明らかにすることはできなか った、今後、定量測定を実現するためには、実験値が理論値と比 べて小さくなった原因を追究するとともに、磁気力とは異なる原 因で誘起されるカンチレバーのねじれを抑制して測定値のバラツ キを抑える必要がある. その上で、観察領域の中で磁場強度に明 確な差が現れるような試料を用いて、その磁場強度の違いをMFM で観察する必要があると考えている.

5. まとめ

我々は、幅が異なる電流路で構成させた T型分岐電流路を作製し、交流電流を流したときに周囲に作られる磁場勾配分布をMFMで観察した。各電流路周囲に異なる強度で磁場が存在する様子を一度に観察し、磁場強度の違いを磁気力信号の違いとして捉えられるかを検討した。カンチレバーのねじれ変位の中には磁気力とは異なる原因で誘起される成分が含まれており、磁気力信号にオフセットとして含まれることがわかった。異なる強度の磁場を捉えた磁気力信号をオフセット分を校正した上で比較したところ、理論値と比較して小さい値ではあったが、電流路周囲の磁場強度の違いを反映した結果が得られていることが確かめられた。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金および文部 科学省 IT プログラム世界最先端 IT 国家実現重点研究開発プロジェクトの助成を受けて行われた。

References

- S. Kasai, M. Yumoto and H. Hasegawa: Solid-State Electronics, 47, 199 (2003).
- Z. Zhong, D. Wang, Y. Cui, M. W. Bockrath and C. M. Lieber: Science, 302 1377 (2003).
- 3) S. Chatraphorn, E. F. Fleet, F. C. Wellstood, L. A. Knauss and T. M. Eiles: *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2304 (2000).
- M. Nakamura, M. Kimura, K. Sueoka and K. Mukasa: Appl. Phys. Lett., 80, 2713 (2002).
- 5) Th. Kebe and A. Carl: J. Appl. Phys., 95, 775 (2004).
- T. Alvarez, S. V. Kalinin and D. A. Bonnell: Appl. Phys. Lett., 78, 1005 (2001).
- 7) D. Saida and T. Takahashi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 4874 (2003).
- 8) D. Saida and T. Takahashi: J. Magn. Soc. Jpn., 28, 417 (2004).
- 9) D. Saida and T. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys., 43, 4643 (2004).
- 10) D. Saida, T. Edura, K. Tsutsui, Y. Wada and T. Takahashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **29**, 306 (2005).
- D. Saida, T. Edura, K. Tsutsui, Y. Wada and T. Takahashi: to be published in Jpn. J. Appl. Phys.
- 12) Rika nenpyo (in Japanese), p. 480 (Maruzen Co., Tokyo, 1998).

2005年10月19日受理, 2006年1月16日採録