

論文の内容の要旨

論文題目 Local Current Evaluation by Magnetic Force Microscopy

(磁気力顕微鏡を利用した局所的電流評価に関する研究)

氏名 才田 大輔

近年、プロセス技術の発達により、数 μm 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。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。本論文では、高い空間分解能を持ち、試料形状とその周囲の磁場勾配分布を同時に観測することができる磁気力顕微鏡(MFM)に着目し、微小なネットワーク系内の個々の電流を定量的に評価できるような測定系の実現を目指した。また、数 μA 程度の電流を検出可能な感度の実現、ならびにMFMで検出される信号と電流の間の定量性の検討を目的とした。さらに、測定において擾乱となる静電引力の影響の抑制方法も検討した。

まず、電流が作る磁場勾配をMFMで観察するとカンチレバーに交流電流に同期したねじれ変位が生じることに着目し、形状を得るためのカンチレバーの変位と磁気力による変位を独立に切り分けて検出する新たな方法を提案した。具体的には、カンチレバーを縦モード共振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する。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た。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(θ)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。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、交流電流とは異なる周波数の交流電圧を利用して制御された直流オフセット電圧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新たに提案し、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することを実現とした。一方、試料に印加する交流電流周波数としてカンチレバーのねじれ共振周波数を利用することで、試料を流れる電流に対して測定系の感度が増加することを明らかにした。幅 $2 \sim 20 \mu\text{m}$ のGaAs/AlGaAsメサストライプ型電流路を用いて、試料内のヘテロ界面を流れる $0.07 \sim 20 \mu\text{A}_{\text{rms}}$ の電流が作る磁場勾配分布を検出できることを確かめた。

次に、提案した測定手法による磁場勾配検出の妥当性について検討した。この方法ではカンチレバーのねじれ変位量を磁気力信号として取り出しているため、カンチレバーの長手方向に直交する向きの力成分に対して感度を持つと考えられる。そのため、カンチレバー長手方向に対して電流路を平行に配置した図1(a)のように、ねじれ変位の方向と磁場勾配の方向が一致する場合には磁気力信号が検出される一方で、電流路を長手方向に直交するように配置した図1(b)のときは、ねじれ変位の方向と磁場勾配の方向が直交するため磁気力信号が検出されないと考えられる。これを確かめるために、幅が異なる電流路で構成されたT分岐型電流路を作製(図1(c))し、その周囲の磁場勾配分布を観察した。T分岐型電流路に合計 $200 \mu\text{A}_{\text{rms}}$ の交流電流を流したときに検出

された電流路の形状像を図 1(d)に、磁気力信号の振幅成分、位相差成分を図 1(e)、図 1(f)にそれぞれ示す。カンチレバーの長手方向に対して電流方向が直交する場合、磁気力信号の振幅値はほぼノイズレベルであることがわかる。一方、平行配置となる場合、電流路の両端の位置で磁気力信号の振幅が増加し、位相差が 180 度変化の様子が確認できる。ところで、数値計算から電流路直上において磁場が一様となること、即ち磁場勾配が存在しないことがわかっている。また、電流路両側側壁付近で逆向きとなる磁場勾配が存在することも明らかにしている。実際に電流路直上で得られた磁気力信号の振幅はほぼノイズレベルとなっている。また、電流路の両端において磁気力信号の振幅と位相差が大きく変化している様子は、磁場勾配がその向きを含めて正しく検出できていることを示している。さらに上下の電流路で電流の向きが逆向きであるため磁場勾配の向きも反転するが、その様子も磁気力信号の位相差の反転として検出できていることが確かめられた。

測定系の定量性を検討するため、T分岐型電流路周囲でそれぞれ検出された磁気力信号の振幅比と各電流路を流れる電流比を比較した。まず、試料等価回路を考え、上側と下側の電流路を流れる電流の大きさはほぼ同じとなることを明らかにした。次に、上側と下側の電流路のそれぞれにおいて周囲に作られる磁場勾配の大きさを数値計算をもとに、上側の電流路周囲で検出される磁気力信号 (R_u) の方が、下側の電流路周囲で検出される磁気力信号 (R_l) と比較して、理論的には 1.5 倍大きくなることを明らかにした。図 1(e)に示したX-X'ならびにY-Y'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図 1(g)、1(h)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、 $R_{l,u} : R_{l,l} = 1.1 : 1.0$ 、 $R_{r,u} : R_{r,l} = 1.1 : 1.0$ となった。理論値では $R_u : R_l = 1.5 : 1.0$ 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(図. 2)。ここでは各電流路に全電流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、図. 2 では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 ($R_{l,u}$, $R_{l,l}$) 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。図. 2 の黒の点線は R_u に対して描いた近似直線であり、グレーの点線は R_l 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 $4.7 \mu\text{V}$ 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、全電流値に対する依存性を調べた結果を図. 3 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、図. 2 の近似曲線の傾きの比から平均として $R_u : R_l = 1.2 : 1.0$ 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。

最後に、測定系の空間分解能を明らかにすべく、幅 $0.5 \mu\text{m}$ の電流路が $0.2 \mu\text{m}$ 離れて平行に配置された試料に $I_{\text{total}} = 160 \mu\text{A}_{\text{rms}}$ の電流を流したときに、その周囲に作られる磁場勾配分布をMFMで検出した。図 4(a)に検出

された形状像，磁気力信号の振幅成分ならびに位相差成分を，図 4(b)に*L-L'*に沿って得られた各ラインプロファイルをそれぞれ示す．得られた磁気力信号の特徴は数値計算で確かめた磁場勾配分布と良く一致した．また，0.2 μm 離れた 2 点での磁場勾配分布が判別できていることから，我々の測定系の空間分解能が 0.2 μm 以下であることがわかった．より正確な空間分解能を議論するためには，0.2 μm 以下に近接して電流が流れるような試料を作製する必要がある．

以上，本論文では電流が作る磁場勾配を 0.2 μm 以下の空間分解能で観察できるMFMを利用した測定系を提案し，0.07 ~ 360 μA_{rms} の電流が作る磁場勾配分布を定性的に検出できることを実証した．また，検出される磁気力信号と電流との間の定量性にも検討を加え，ある程度の一致を示すことを確かめた．

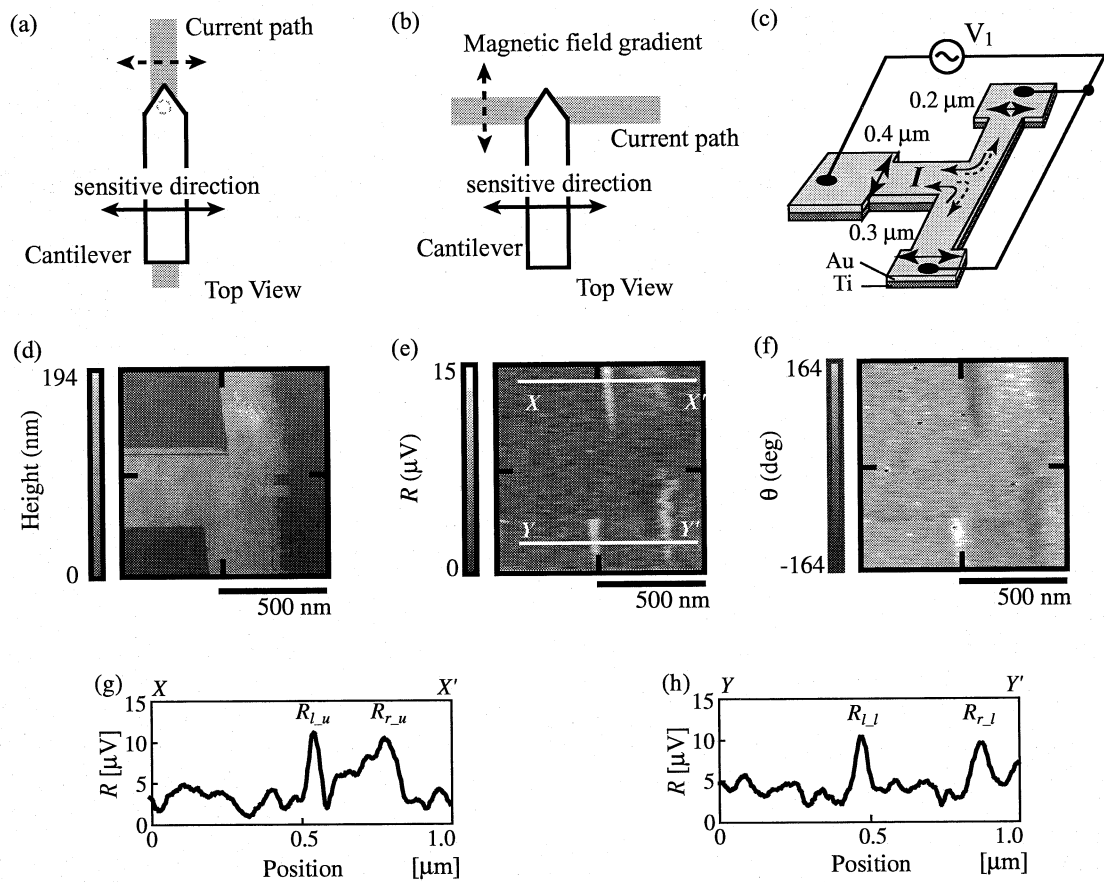


図 1 カンチレバーと電流路の配置が(a) 平行となる場合と(b) 直交となる場合. (c) T分岐型電流路の構造と, その(d) 形状像. 合計 $200 \mu\text{A}_{\text{rms}}$ の電流を流したときに MFM で検出された磁気力信号の(e) 振幅成分, (d) 位相差成分. (g) X - X' に沿って得られたラインプロファイル. (h) Y - Y' に沿って得られたラインプロファイル.

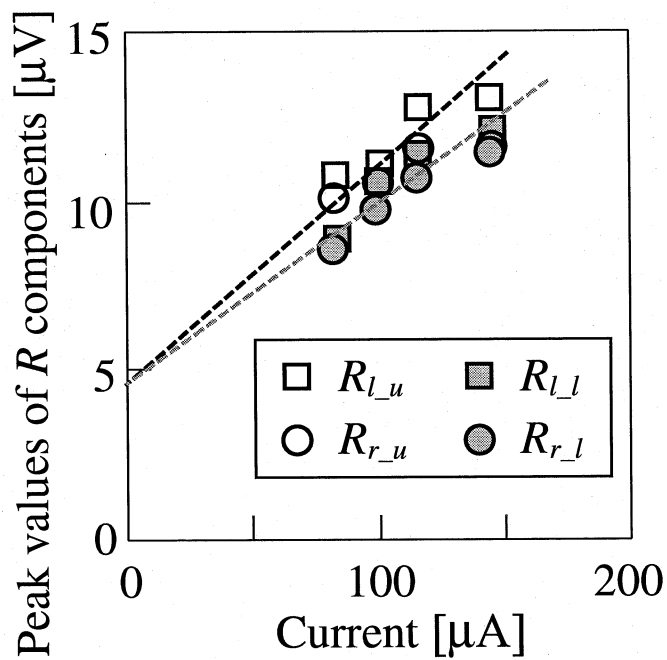


図 2 T 分岐型電流路周囲の磁場勾配分布を観察したときに得られた磁気力信号振幅成分の電流依存性. 黒の点線は R_u に対して描いた近似曲線であり, グレーの点線は R_l に対して描いた近似曲線を表す.

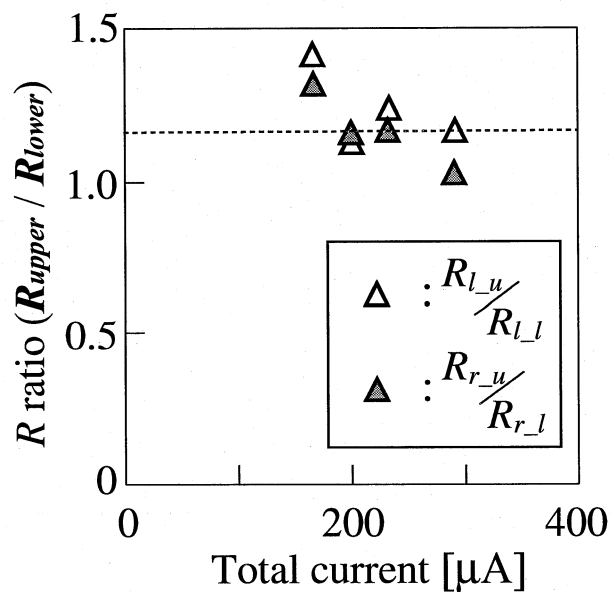


図 3 磁気力信号振幅比の電流依存性.

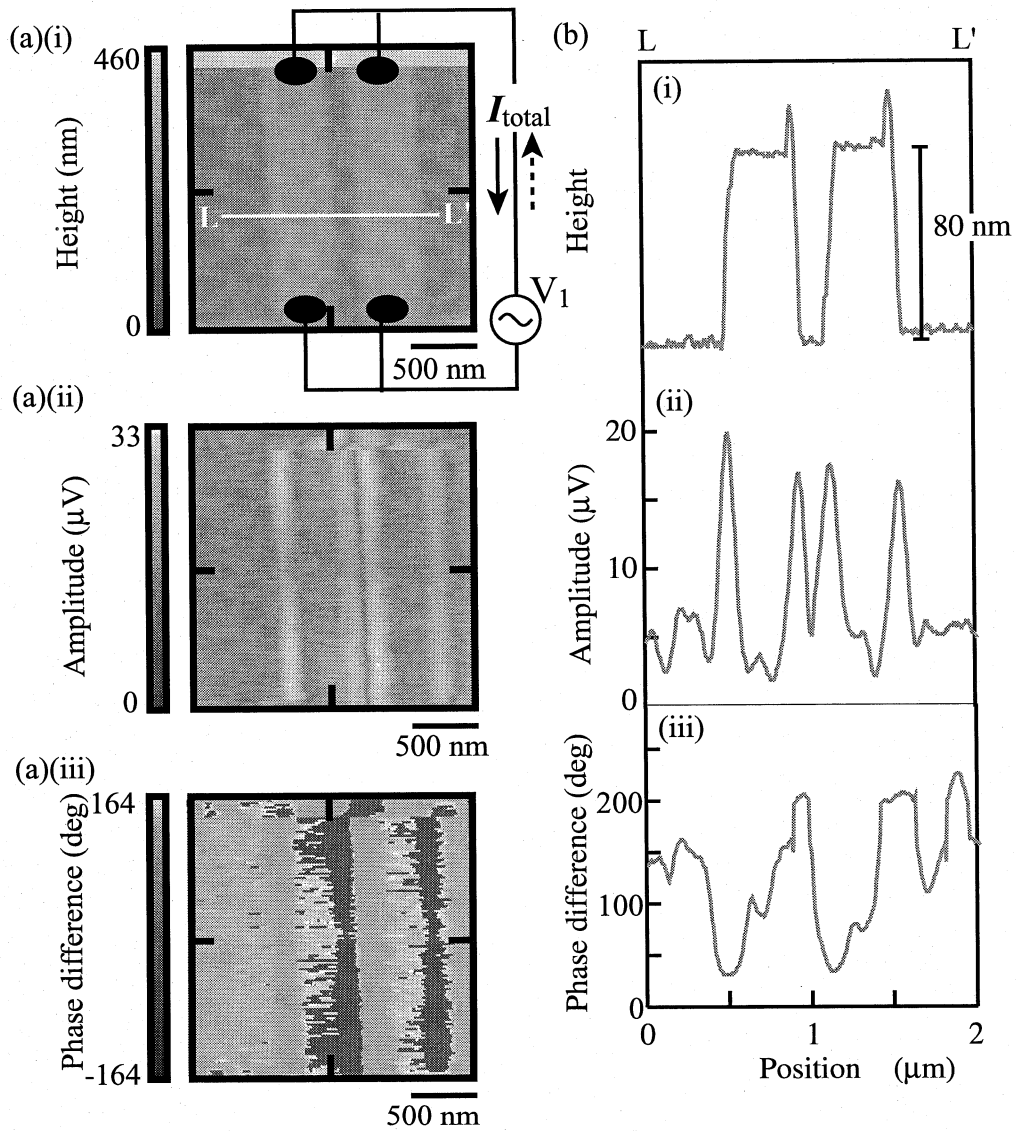


図 4 (a) $I_{\text{total}} = 160 \mu\text{A}$ のときに得られた(i) 形状像と磁気力信号の(ii) 振幅成分, (iii) 位相差成分. (b) (a)(i)に示した L-L'に沿って得られた各ラインプロファイル.