

磁気計測技術の現状と課題

二本 正 昭

(株)日立製作所中央研究所 185 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1992年8月25日受理)

Current Technologies and Topics of Magnetic Measurements

Masaaki FUTAMOTO

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.
1-280 Kokubunji, Tokyo 185

(Received August 25, 1992)

磁性材料の磁化状態評価に用いられている主な磁気計測技術の現状を解説した。

光、電子および磁性探針を検出プローブにそれぞれ用いる偏向顕微鏡法、電子ビームトモグラフィ法、磁気力顕微鏡法など各計測技術の測定原理、計測対象、計測分解能を比較し、各計測技術の特徴を述べた。さらに、これらの磁気計測法を磁気記録のキー要素である磁気ヘッドと磁気記録媒体の磁化状態解析に応用して得られた代表的な結果を示し、それぞれの計測技術で得られる磁気情報の相違を紹介した。最後に、マイクロ領域の磁気記録の現象解明をするために求められている磁気計測技術に対する課題を述べ、計測技術の空間分解能のさらなる向上可能性を展望した。

キーワード

1. はじめに

1931年に Bitter がコロイド状のマグネタイト粉を用いて、初めて磁壁を観察して以来¹⁾、磁気計測技術は磁性材料研究の進展とともに急速な発展を遂げてきた。磁性材料の改良や、磁性物理現象の解明において磁化状態の解析技術は大きな役割を果たしてきた。とりわけ、磁気テープやハード磁気ディスクに代表される磁気記録分野では、情報化社会の進展を背景に10年で10倍以上の速度で高密度化が進んでおり、磁化状態の解析技術の位置付けは、近年、ますます重要になってきている。実際、磁気記録に関する記録媒体や磁気ヘッドの特性は、磁性材料の磁区構造と密接に関係しており、機能向上の指針を得るため各種の磁気計測技術が有効に使われている。

磁性材料の磁化現象を理解するためには、磁性材料の表面および内部で磁壁の構造を観察し各磁区の磁化の方向と強度を計測する必要がある。また、磁化が動的な現象であることを考慮すると、静的のみならず動的な計測も望まれる。磁気記録には、これらの計測項目がすべて含まれており、しかも記録密度の向上に対応して磁気記録の最小単位が年々微細化していることから、高分解能

な計測技術が必要になってきている。図1は、ハード磁気ディスク装置における磁気記録単位の変遷を示す。現在は、トラック幅が数 μm 、ビット長が約1 μm の数 μm^2 の記録単位が用いられているが、研究開発レベルでは赤血球1個の大きさ以下のサブミクロンレベルの磁気記録

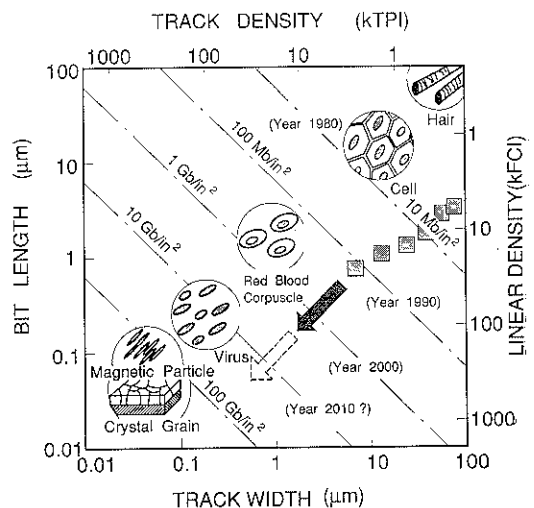


図1 ハード磁気ディスク装置における磁気記録単位の微細化トレンド

が実現されている^{2,3)}。さらに西暦 2010 年頃には、磁気記録の単位はビールス 1 個の大きさになるものと予測されている。このような背景に應えるかのごとく、近年、磁気計測技術においても電子線ホログラフィー顕微鏡 (Electron Holography Microscope)⁴⁾、スピン偏極走査電子顕微鏡 (Spin Polarized Scanning Electron Microscope: スピン SEM)^{5,6)}、電子ビームトモグラフィ法 (Electron Beam Tomography, または通称磁場 SEM)^{7,8)}、あるいは走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM)⁹⁾から派生した磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscope: MFM)¹⁰⁾ など、磁区構造の高分解能観察を可能とする新しい手法がつつぎと開発された。

本論文では、これら各種の磁気計測技術の現状を述べるとともに磁気記録にこれらの計測技術を適用して得られた主な結果を紹介する。また、今後の磁気計測技術に求められている課題にも言及したい。なお、各計測技術の測定原理や応用例に関しては、本特集号で計測技術ごとに詳しい解説が行われているのでそちらを参照していただきたい。

2. 磁気計測技術の現状

2.1 各種計測技術の位置付け

現在用いられている磁気計測技術の測定原理、検出プローブの種類、観察対象、計測分解能などを比較した結

果を表 1 に示す。磁気計測で用いられる主なプローブは光と電子であるが、最近開発された磁気力顕微鏡では磁性針をプローブに用いる。光を用いる計測に、ビッター法と偏光顕微鏡 (Magneto-Optical Microscopy) がある。ビッター法は磁性粉が磁壁の部分に凝集した状態を直接もしくは光学顕微鏡を用いて観察する方法であり、光を用いて検出するのが通常である。偏光顕微鏡では、磁性体表面で反射もしくは透明な磁性体を透過した光が磁化の影響で偏光面が回転する現象 (Kerr 効果, Faraday 効果) を応用する。代表的な方法に走査型カー効果顕微鏡法 (Scanning Kerr Microscopy)¹¹⁾がある。細く絞ったレーザー光を試料表面で 2 次元的に走査するのと同期して偏光した反射光の強度を測定するものであり、磁化方向や磁化方向の変化の分布を 2 次元的な顕微鏡像として観察することができる。さらに、この方法では数十 MHz 程度で変化する磁区構造を動的に計測できる。光をプローブに用いる計測は、大気中で非破壊で手軽に磁化状態を観察できるという大きな特徴があるが、観察の分解能は光の波長によって制限され、0.5 μm 程度となっている。

光の代わりに波長の短い電子ビームを用いれば、観察の分解能は向上する。たとえば、光の代わりに磁性粉の凝集状態を走査型電子顕微鏡で観察するビッター SEM 法 (またはコロイド SEM 法)¹²⁾では 0.05 μm 程度の分解能で磁区構造を調べることができる。電子と漏洩磁場

表 1 磁気計測技術の比較

観察方法	原 理	プローブ	手 法	観察対象	定量性	分解能	試料制約
電子線ホログラフィー	磁場による透過電子の位相シフト	電 子	透 過	磁束密度	◎	0.01 μm	等厚薄膜
ローレンツ顕微法 ・デフォーカス法 ・スリット法 ・位相差検出法	・内部磁場による透過電子の軌道偏向				×	0.05 μm 0.02 μm 0.01 μm	
電子ビームトモグラフィ法 (磁場 SEM)	・漏洩磁場による電子ビームの軌道偏向およびコンピュータトモグラフィによるデータ処理			漏洩磁場	◎	0.1 μm	平坦表面 (試料回転)
スピン SEM 法	・2次電子のスピン偏極度の検出			磁 化	○	0.1 μm	清浄表面
SEM 法 ・2次電子検出 ・反射電子検出	・漏洩磁場による2次電子の軌道偏向 ・内部磁場による反射電子の軌道偏向	光	反 射	漏洩磁場 磁束密度	×	0.5 μm	平坦表面
偏光顕微法 ・カー効果 ・ファラデー効果	・反射光の磁化による偏光面回転 ・透過光の磁化による偏光面回転		透 過	磁 化	○	0.5 μm	
ビッター法 ・ビッター SEM 法	・漏洩磁場による磁性粉の配列		反 射	漏洩磁場	×	1 μm (0.05 μm)	平坦表面
磁気力顕微法	・漏洩磁場中で磁性探針に働く磁気力	磁 性 針	磁性針変位検出	漏洩磁場	△	0.02 μm	平坦表面

もしくは磁性材料との相互作用そのものを応用した磁気計測技術として、電子線ホログラフィー法、ローレンツ顕微鏡法、電子ビームトモグラフィー法、スピン SEM、通常の走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いる方法など多くの計測技術が開発されている。電子ビームを用いるため、いずれも真空中で計測を行う必要があるが、計測技術によっては $0.01\mu\text{m}$ 程度の高分解能で磁区構造などを調べることができる。電子線ホログラフィー法は、 $0.01\mu\text{m}$ に及ぶ高分解能で磁束量子 ($h/2e=2.067\times 10^{-16}\text{Wb}$) の数十分の1に及ぶ微弱な磁束の変化を定量的に測定でき、最も高感度・高分解能な磁気計測技術として位置づけることができる。ローレンツ顕微鏡法には、デフォーカス法 (Fresnel Technique)、スリット法 (Foucault Technique)、位相差検出法 (Differential Phase Contrast Technique) があるが、位相検出法¹³⁾ が最も観察分解能が高くしかも磁化の定量性にもすぐれている。検出器の構成や得られた磁気信号の処理方法に継続的に工夫が加えられつつあり、今後、有力な磁化状態の計測技術として活用される可能性がある。電子ビームトモグラフィー法は、漏洩磁場中を通過する電子ビームのローレンツ力による偏向量を電子ビームの入射方向を変えて計測し、医用のX線 CT 像と同様に計測結果を計算機で処理して3次元的な漏洩磁場強度分布を計測するものである。 $0.1\mu\text{m}$ の空間分解能で定量ができ、しかも 100MHz で動的に変化する漏洩磁場強度を計測することができる⁷⁾。

電子線ホログラフィー法、ローレンツ顕微鏡法、電子ビームトモグラフィー法の測定原理は、いずれも磁性体もしくは漏洩磁場中を電子ビームが透過するときの位相シフトや軌道偏向量を計測するものであるが、2次電子もしくは反射電子を計測に用いる手法としてスピン SEM

と通常の SEM を用いる計測法がある。スピン SEM は、試料から放出される2次電子のスピン磁気モーメントが、磁化と同じ方向を向いていることを利用した磁区観察技術である。細く絞った電子ビームで試料表面を走査し、放出された2次電子のスピン偏極度を検出して画像信号とすることにより、磁区像が得られる。 $0.1\mu\text{m}$ 程度の空間分解能で磁化方向の検出ができ、しかも表面形状に影響されない磁化コントラストが得られる。

通常の SEM を用いた方法は比較的早く開発された磁気計測法であり、磁性体表面の漏洩磁場による2次電子の軌道偏向を応用するものと^{14,15)}、内部磁場による反射電子の軌道偏向を応用する方法がある^{16,17)}。観察の空間分解能は $0.5\mu\text{m}$ 程度である。

最近開発され、高分解能な磁気計測技術として注目され始めた技術に MFM がある。MFM は、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM)¹⁸⁾ の探針を磁性材料探針に置き換えたもので、磁性体表面の漏洩磁場分布を計測することができる。漏洩磁場中で走査したときに磁性探針に働く 10^{-10}N オーダーの力を、探針を支持するカンチレバーに生ずる微小変位として計測し、顕微鏡像とし出力するものである。非破壊で試料の磁化状態を高分解能で計測でき、さらに STM あるいは AFM モードで同一場所の形態情報の計測も可能なことから¹⁹⁾、マイクロマグネティクスの研究手法として大きな期待が寄せられている。分解能は磁性材料探針の形状、とくに先端曲率に依存し小さいほど高い空間分解能が得られ、最高の分解能として $0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ の値が報告されている²⁰⁻²²⁾。この観察技術はまだ開発途上であり、一属の高分解能観察化とともに、STM、AFM など他の探針走査型顕微鏡と組合せて磁気情報と形態情報や組成情報を同一場所から計測できる総合的な高分解能計測技術

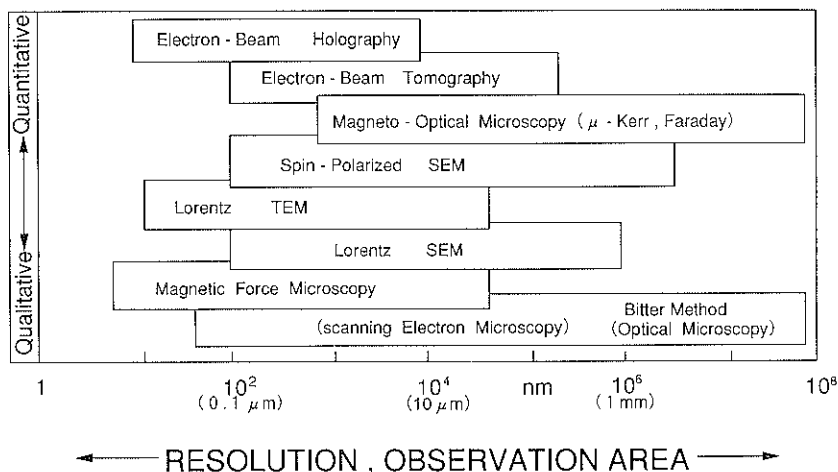


図 2 各種磁気計測技術の位置づけ

に発展する可能性を秘めている。

図 2 に、各種磁気計測技術の現状の位置づけを比較して示す。定量性が高い計測技術としては、電子線ホログラフィー法、電子ビームトモグラフィー法が、また、観察の空間分解能が高い計測技術として電子線ホログラフィー法、MFM、位相差検出型のローレンツ顕微鏡法が挙げられる。磁気計測技術としては、定量性と観察の分解能がともに高い方法が望ましい。しかし実際には、観察試料に制約があったりあるいは計測の対象に限られるため、図 2 に示した各種の計測法を組合せて用いられることが多い。

2.2 磁気記録研究における磁気計測技術の役割

磁気記録の研究では、各種の磁気計測技術を応用して磁化状態解析が積極的に行われている。図 3 に、磁気記録系の構成と磁気計測に用いられている主な計測技術を合わせて示す。磁気記録系は磁気ヘッドと記録媒体からなっている。磁気ヘッドのコイルに電流を流すことによってヘッド先端に磁場が発生し、この磁場の影響を受けて記録媒体が磁化される。磁気ヘッドと記録媒体は相対的に移動しているため、ヘッドに流す電流の向きを逆転させることにより磁化方向が逆向きの磁区がつぎつぎに形成される。磁気ヘッドでは、パーマロイ膜などを磁極に用いた薄膜磁気ヘッドが、記録媒体にはめっきやスパッター法で形成した Co 系の多結晶の薄膜記録媒体が用いられることが多い。

記録媒体に形成される磁区の大きさは、現状のハード磁気ディスク製品で磁気ヘッドの走行方向の長さ（ビット方向）が約 $1\mu\text{m}$ 、これと直行する方向（トラック方向）の長さが約 $10\mu\text{m}$ である。互いに隣接する磁区の境界には磁壁が形成されるが、静磁エネルギーを下げるためジグザグ状となり磁化遷移領域が存在する。磁気記録

の高密度化を実現するためには、磁区の寸法を微細化する必要がある。このためには、磁気ヘッドのトラック幅を狭くするとともにヘッド先端から急峻で強い磁場を発生させる必要がある。薄膜磁気ヘッドの磁極に形成される磁区とヘッド先端に発生する磁界には強い相関がある。磁極に形成される磁区の観察にはスピン SEM、走査型カー効果顕微鏡が、ヘッド先端から発生する磁界の計測には電子ビームトモグラフィー法や MFM²²⁻²⁴⁾などが用いられている。記録媒体に形成された磁区観察には、電子線ホログラフィー法、透過型ローレンツ電子顕微鏡法、スピン SEM、ビッター法、MFM^{23,24)}などさまざまな計測技術が用いられている。記録媒体に形成された磁区構造、とくに磁化遷移領域の構造は磁性膜の微細構造と密接に関係しており、両者の相関関係の解析が磁気記録の高密度化を図るうえで、ますます重要になってきている。ビット方向の記録密度を向上するためには、磁化遷移領域をできるだけ狭くする必要がある。記録媒体に用いられる薄膜は、通常、結晶粒径が $20\sim 50\text{nm}$ の多元合金の結晶であり、磁化状態解析にも高分解能な解析が望まれている。

以下、磁気ヘッドおよび磁気記録媒体の磁化状態解析に各種磁気計測技術を応用することによって得られた結果を紹介する。

2.3 磁気ヘッドへの適用例

スピン SEM を用いて観察した薄膜磁気ヘッドの上部磁極の磁区像と磁化の方向の模式図を図 4 に示す²⁵⁾。スピン SEM 像のコントラストは結像の条件によって変化する、図 4 (a) の明るい部分の磁化の向きは右向き、暗い

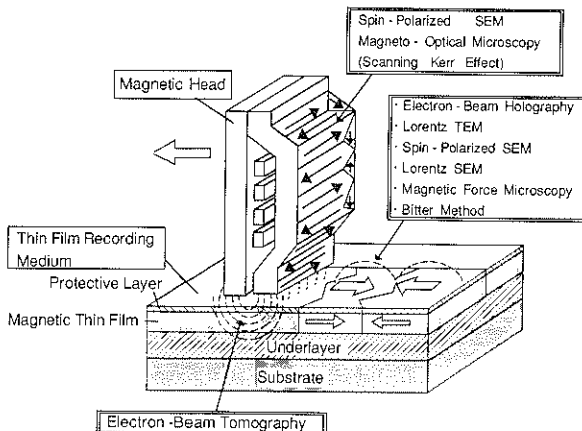


図 3 磁気記録系の構成と磁気計測に用いられている主な技術

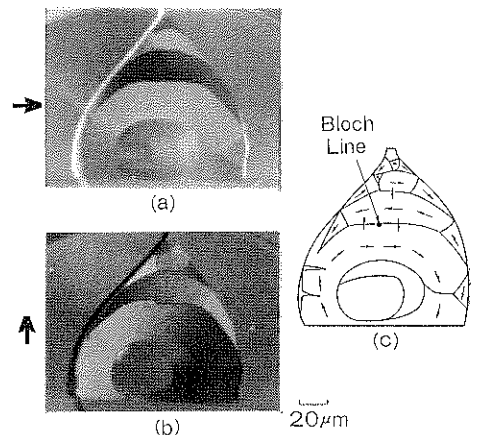


図 4 スピン SEM を用いて観察した薄膜磁気ヘッドの磁区構造²⁵⁾
(a) (b) 結像条件を変えて観察したスピン SEM 像。矢印の方向の磁化が明るく観察されている。(c) 磁区構造の模式図

部分の磁化の向きは左を向いている場合に対応している。図4(b)では、結像条件を変えて観察した例であり、磁化が上向きの場合にはコントラストが明るく、逆に下向きのときには暗くなるようになっている。図より明らかなように、バックギャップのスルーホール部を中心に円周状にコントラストが白から黒に連続的に変化している。これより、磁化の向きが連続的に回転していることがわかる。このようなデータから、磁気ヘッドの磁極に形成した磁区の構造を図4(c)に示すように決定することができる。この磁気ヘッドでは、下方のバックギャップ部の周りに沿って磁化がゆるやかに回転した磁区構造をとっていることがわかる。

図5は、磁極の一部の磁区構造をカー効果顕微鏡で観察した結果である²⁶⁾。5 MHz の周波数の電流を流しながら走査型カー効果顕微鏡で測定した場合を、コイルに

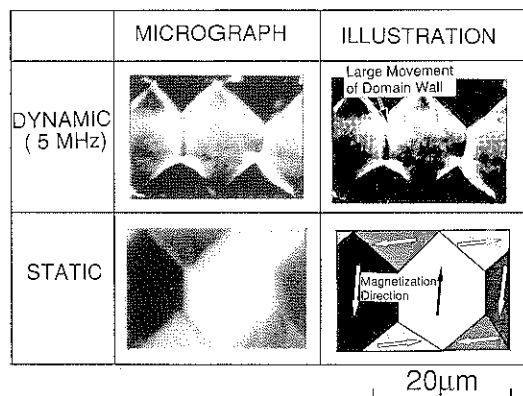


図5 走査型カー効果顕微鏡による磁極の磁区構造観察結果²⁶⁾

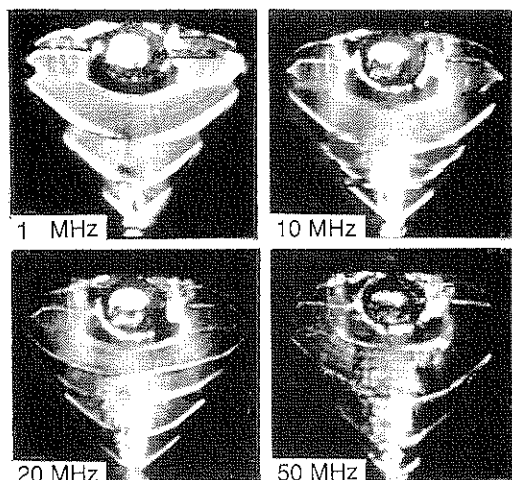


図6 走査型カー効果顕微鏡で観察した磁気ヘッドの駆動状態の磁区構造の動的変化²⁶⁾

電流を流さない場合について一括型のカー効果顕微鏡で観察した結果と比較して示した。静止状態で測定した磁区像には、六角状磁区と三角状磁区が認められる。5 MHz の周波数の駆動状態では磁壁の動的な移動が起こり、磁化変化量の大きい場所と小さい場所が混在する。駆動状態で測定した走査型カー効果顕微鏡像において、明るいコントラストの部分は磁化変化量が大きく、磁壁が激しく移動している部分を示す。一方、磁化回転が起こっている部分は暗いコントラストとして観察されている。

図6は、薄膜磁気ヘッドの磁極の磁区構造の動的変化の様子を走査型カー効果顕微鏡で観察した結果である。測定周波数を、1、10、20、50 MHz と変えたときの磁壁移動の様子が示されている。周波数 1 MHz では、明るい部分の幅から判断して数 μm の磁壁移動が生じていることがわかる。周波数が 10 MHz と高くなると磁壁移

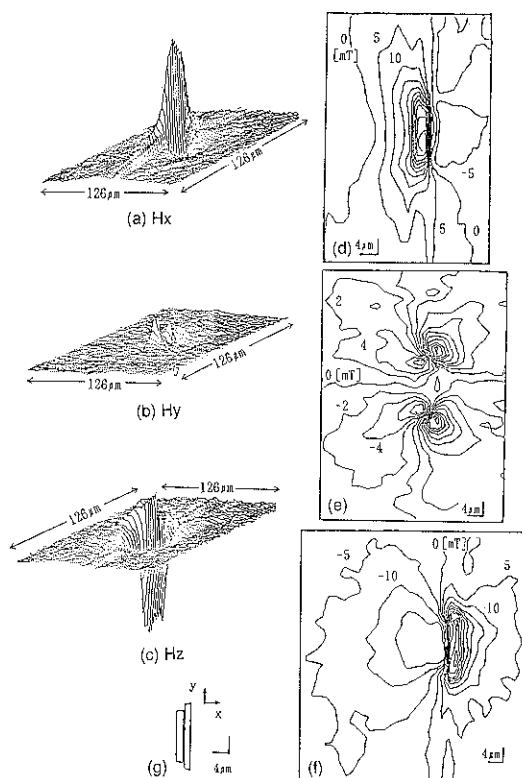


図7 電子線トモグラフィで測定した磁気ヘッドの磁界強度分布²⁷⁾

(a) ビット方向の磁界成分、 H_x 、(b) トラック幅方向の磁界成分、 H_y 、(c) 垂直方向の磁界成分、 H_z 、(d) H_x 成分の等高線表示、(e) H_y 成分の等高線表示、(f) H_z 成分の等高線表示、(g) 直上から観察した磁気ヘッド先端部の形態

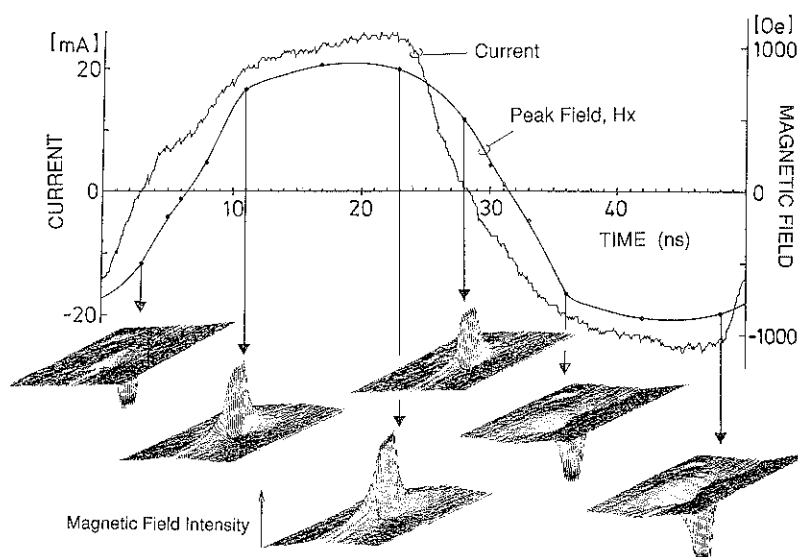


図 8 磁気ヘッドの励磁電流とビット方向の磁界分布 H_x の時間変化²⁷⁾

動量は約 1/3 になるとともに、磁極の周辺部で磁化回転が抑制される傾向がある。20, 50 MHz とさらに周波数が高くなると、磁壁移動、磁化回転ともにさらに減少する。50 MHz では、磁壁移動に伴う信号はほとんど検出されなくなり、また、磁極の中央部付近に変化が限定される。周波数が高くなると磁極の周辺部において磁化の変化が抑制されるのは、磁極周辺部で透磁率が低下して渦電流損失が起こっているためと解釈されている。このように、スピン SEM や走査型カー効果顕微鏡による磁化状態解析により、磁気ヘッドの磁極に形成される磁区構造の静的および動的挙動の解析が進められている。

磁気ヘッド先端で発生する磁界強度分布を計測するために電子線トモグラフィー法が用いられている^{7,27)}。図 7 は、電子線トモグラフィーで測定したトラック幅 17 μm の薄膜磁気ヘッドの磁界強度測定結果の例である。10 MHz の駆動状態の磁気ヘッド先端部から 0.5 μm の位置のビット方向 (H_x)、トラック方向 (H_y)、および垂直方向 (H_z) の磁界強度分布である。駆動状態の磁気ヘッドの磁界分布を計測するためにパルス状の電子ビームを用いたストロボ技術が使われている。図 7 (a) から (c) は磁界強度分布の各成分を 3 次元的に表示した結果、(d) から (f) は磁界強度分布を等高線表示で示したものである。磁気ヘッドの中心部で H_x 方向の磁界強度が最大で周辺部に近づくに従い強度が低下していること、トラック幅の外にも磁界が発生していることなど、磁気ヘッドの形状と実際の磁界分布の関係を知ることができる。図 8 は、磁極がパーマロイからなる薄膜磁気ヘッドに 20 MHz の周波数の電流を流しながら測定した H_x 方向

の磁界強度分布の時間変化の計測結果である。電流値に対し実際に測定された磁界強度は、約 3 ns の時間遅れがあることがわかる。時間遅れの主な原因は磁極部における渦電流損失であり、透磁率の高い CoTaZr 非晶質薄膜を磁極に用いた磁気ヘッドではこの時間遅れがほとんどなくなることも見出されている²⁷⁾。電子線トモグラフィー法では、0.1 μm 程度の空間分解能で磁界分布を計測でき、しかも 1 ns の時間分解能で動的な磁界変化を調べることができる。今後、磁気ヘッドの動作解析に積極的に活用されるものと思われる。

2.4 磁気記録媒体への適用例

磁気記録媒体の磁化状態を調べるのに最も手軽な方法はビッター法である。磁性コロイドを試料にふりかけて

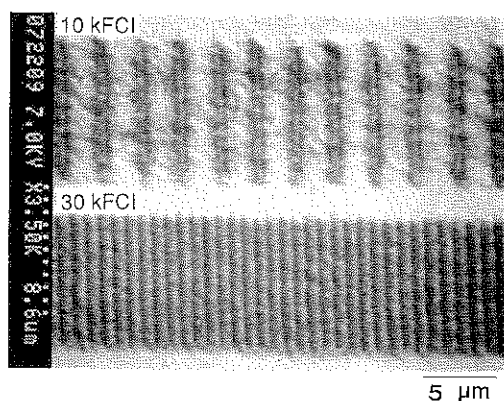


図 9 10kFCI, 30kFCI の線記録密度で磁気記録した媒体のビッター SEM 像

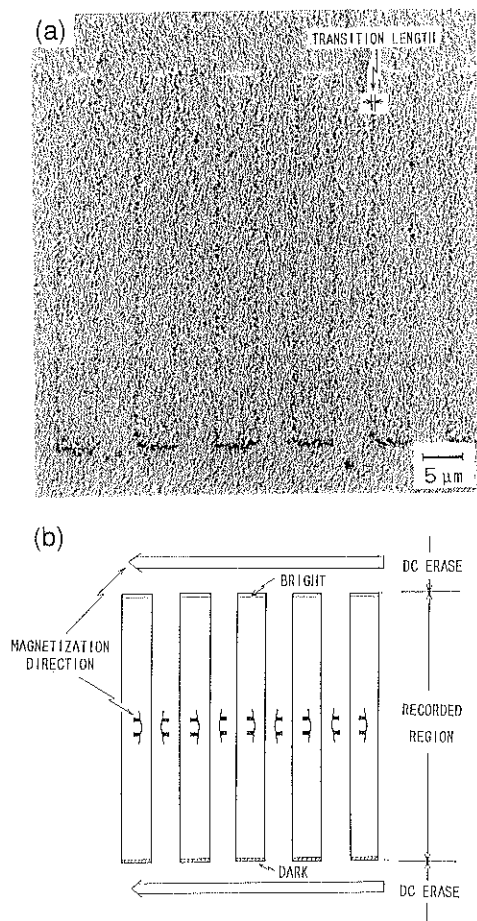


図 10 デフォーカス法のローレンツ顕微鏡で観察した磁気記録媒体。記録密度は 5 kFCI²⁹⁾
(a) ローレンツ顕微鏡像, (b) 説明図

光学顕微鏡もしくは SEM で観察すれば、磁気記録パターンに対応した縞状の模様が観察できる。図 9 は、10 kFCI (kilo-Flux Change per Inch, ビット長 $2.54 \mu\text{m}$) および 30 kFCI (ビット長 $0.85 \mu\text{m}$) の線記録密度で磁気記録をした媒体のビッターパターンを SEM で観察した例である。媒体は、CoCrPt 系の面内磁気記録媒体である^{3,28)}。記録ビット長に対応した縞状のパターンが認められ、磁気記録を行った場所と記録されていない領域を区別することができる。しかし、磁化遷移領域などの微細構造を調べるのは難しい。

磁気記録を行った磁性薄膜を基板から剝離し、透過電子顕微鏡を用いてローレンツ法でより微細な磁区構造を調べることができる。図 10 はデフォーカス法のローレンツ顕微鏡で観察した例である²⁹⁾。細い縞状の模様は磁気リップルに起因するコントラストであり、リップルの微細構造をもとにミクロな磁化状態の議論が行われている。図 10 (b) はローレンツ像に対応する説明図である。記録ビットの両端部の白と黒のコントラストがはっきり認められる。また、隣接する記録ビットの境界の幅から磁化遷移領域を $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ と見積ることができる。図 11 は、ローレンツ像と同一場所から得られた通常の透過電子顕微鏡像を比較して示したものである。この媒体の結晶粒径は $0.02 \sim 0.05 \mu\text{m}$ であり、ローレンツ像で観察された磁気リップルの数十分の一以下である。結晶粒のオーダーで記録媒体に不均質性が存在することを考慮すると、磁気的にもこれに近いミクロな構造の存在が予測される。しかし、デフォーカス法のローレンツ顕微鏡法では磁気情報観察の分解能が不十分である。最近、位相差検出のローレンツ顕微鏡法を用いて結晶粒径に匹敵する分解能で磁区構造の観察を行う技術が開発され、磁気記録媒体の磁化状態解析に応用され始めた^{13,30)}。この

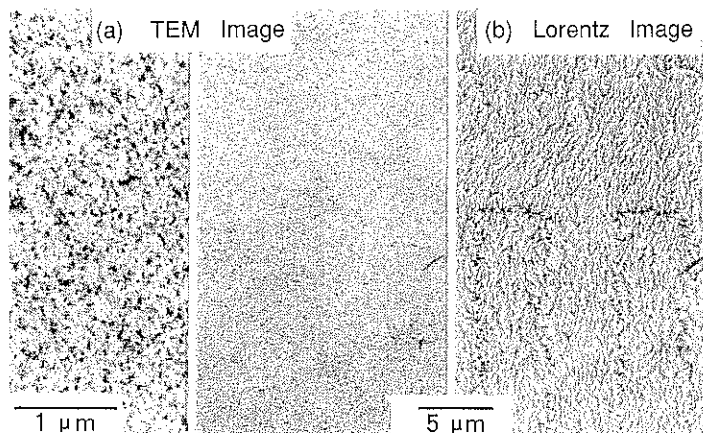


図 11 ローレンツ顕微鏡で観察した磁区像と同一場所の透過電子顕微鏡像の比較²⁹⁾

技術の活用により、磁気記録媒体のミクロな磁化状態の解明がさらに進むものと期待される。

非破壊で磁気記録媒体の磁化状態を観察するのにスピン SEM が有効である。図 12 は、Co 系の薄膜面内磁気記録媒体の記録状態をスピン SEM で観察した結果である³¹⁾。磁化の向きの反転に対応して、白と黒の縞状のコントラストとして磁区構造がはっきりと認められる。また、拡大して観察した像においてはジグザグ状の磁化遷移領域も認められている。しかし、最近の磁気記録媒体では記録密度の向上に対応して磁化遷移領域の幅もどんどん狭小化する傾向にある。スピン SEM の現状の空間分解能は $0.1\mu\text{m}$ 程度とされている。薄膜磁気記録媒体を構成する結晶粒の大きさが $0.02\sim 0.05\mu\text{m}$ であることを考えると、今後スピン SEM を薄膜磁気記録媒体の研究により有効に適用するためには分解能がもう 1 けた向上することが望まれる。

図 13 は、MFM および AFM で薄膜磁気記録媒体を観察した例である¹⁹⁾。AFM 像からは磁気記録媒体の形態情報が、MFM 像からは磁気情報が得られる。ここで観察した記録ビットの大きさは $0.64\mu\text{m}^2$ で、現状の磁気ディスク装置で用いられている記録ビットの大きさの約 1/20 に相当する。MFM 像では、ビットの境界が白と黒のコントラストとして観察されている。図中の a— a 部を磁性探針で走査したときのカンチレバーに働いた磁気力の分布を (c) に示してあるが、正弦波状に変化していることがわかる。また、MFM 像の中央部では記録された磁気ビットが乱れているのが認められるが、対応する AFM 像を見るとこの部分は表面が窪んでいるところに相当している。記録密度が大きくなってくると、磁気記録媒体の表面のミクロレベルの平坦性がきわめて重要になってくることなどを知ることができる。

記録密度を飛躍的に向上できる記録技術として垂直磁

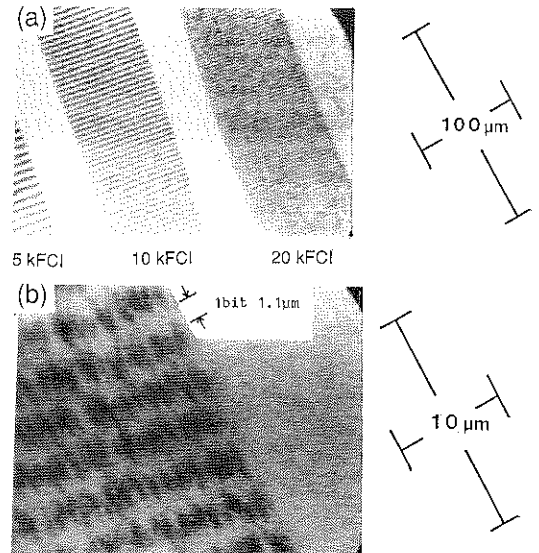


図 12 磁気記録した Co 系薄膜媒体のスピン SEM 像³¹⁾
(a) 低倍率像, (b) 高倍率像

気記録方式の研究が活発に推進されている。最後の観察例として、垂直磁気記録媒体の電子線ホログラフィーによる観察結果^{32,33)}を紹介する。垂直磁気記録では磁化の向きが記録媒体の面に対して垂直になっているため、記録状態を観察するためには断面切片試料を準備するのが望ましい。試料の切り出しにはマイクロームを使用する。図 14 は、200 kFCI および 300 kFCI で磁気記録を行った試料を電子線ホログラフィーで観察した結果である。同図中には観察に用いた断面切片試料の透過電子顕微鏡像も合わせて示してある。200 および 300 kFCI のビット長は、それぞれ $0.127\mu\text{m}$, $0.085\mu\text{m}$ に相当する。図 14 は媒体表面直上の漏洩磁場の強度分布である。

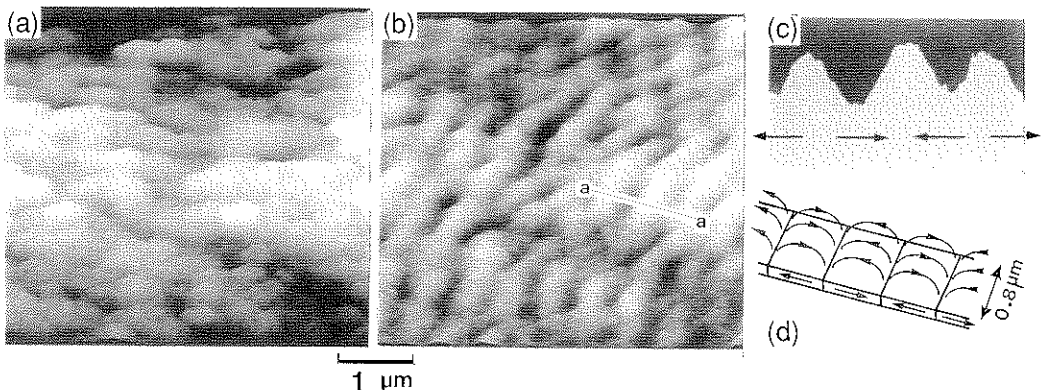


図 13 磁気記録を行った薄膜媒体の (a) AFM 像, (b) MFM 像, (c) a-a 部を磁性探針で走査したときの磁気力の変化, (d) 記録ビットの説明図¹⁹⁾

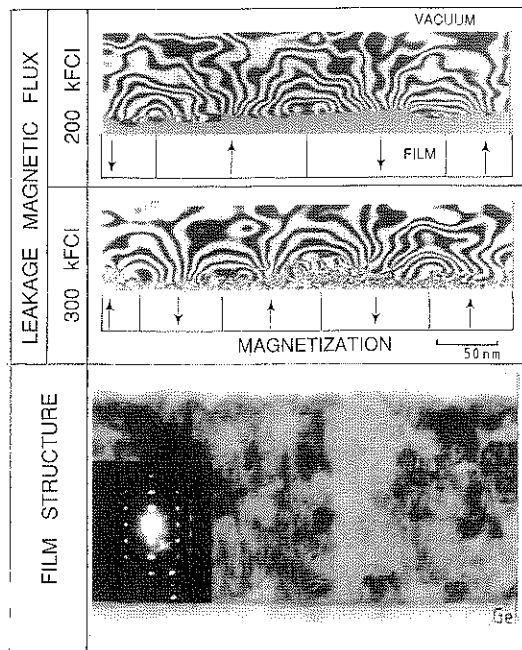


図 14 垂直磁気記録した試料の電子線ホログラフィー像³²⁾

記録ビットに対応した半円弧状の縞模様がほぼ規則正しく観察されているように見えるが、300 kFCI で記録した媒体の場合ビット長は $0.072 \sim 0.087 \mu\text{m}$ の範囲で、200 kFCI で記録した媒体の場合 $0.020 \sim 0.135 \mu\text{m}$ の範囲で分布している。磁気記録媒体を構成する結晶粒の大きさが平均 $0.043 \mu\text{m}$ と記録ビットの長さに近い場合、結晶粒界が磁壁の分布に影響したものと解釈されている。また、電子線ホログラフィーではマイクロ領域の漏洩磁場強度あるいは媒体表面の磁化強度の定量を行うことができる。たとえば、300 kFCI で記録した媒体表面の磁化強度は媒体の飽和磁化の 63% (254 kA/m) であることなどが明らかになっている。電子線ホログラフィー法は、マイクロ領域の磁化状態を定量的に調べるのにきわめて有効であり、磁気記録の高密度化ひいては磁気記録の物理現象解明に今後大きな役割を果たすことが期待される。

3. 課題と今後の展望

磁気計測技術の現状を主に磁気記録分野から眺めてきた。各種の磁気計測技術が磁気ヘッドや記録媒体の磁化状態解析に積極的に適用され、マイクロ領域の磁化現象の解明が進められている。磁気記録は、今後とも 10 年で 10 倍以上の割合で高密度化が進み、より微細な領域の磁化現象を高い空間分解能で計測する技術の重要性はますます大きくなるものと考えられる。磁気記録の究極で

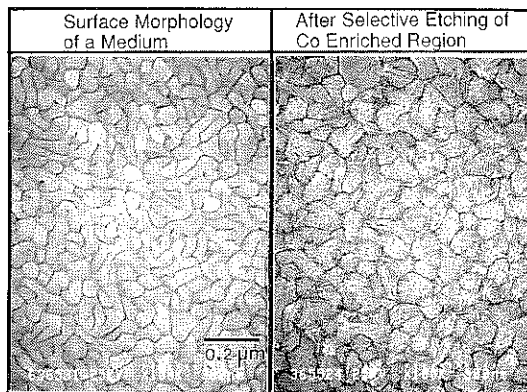


図 15 Co 系の磁気記録媒体の高分解能 SEM 像³⁶⁾
(a) エッチング前の SEM 像, (b) Co に富んだ部分を選択的にエッチングした後の SEM 像

は、結晶粒 1 ～ 数個に一つの磁区を形成することになるとの見方がある³⁴⁾。結晶粒の大きさは数 nm から数十 nm であるが、最近の研究の結果、磁性材料の結晶粒の内部には構成元素が偏析したさらなる微細構造が存在することが明らかになってきた^{35,36)}。図 15 は、Co 系の磁気記録媒体の高分解能 SEM 像である。Co に富んだ部分を選択的に溶解するエッチング液で処理することにより、結晶粒の内部に数 nm の幅の溝ができていく。磁化現象がこのようなマイクロな組成偏析にどのような影響を受けるかは明らかではないが、磁性物理の観点からも興味をもたれる。超マイクロレベルの磁化状態解析を行うためには空間分解能が 1 nm 以下の高度磁気計測技術の開発が待たれる。

通常の電子顕微鏡の空間分解能は 1 nm 以下であり、磁性材料あるいは漏洩磁場と相互作用を得た後の電子ビームが担う磁化情報の S/N を上げることににより、原理的には電子ビームを用いた磁気計測技術で十分この目標を実現できる可能性はあると思われる。この場合、コンピュータを応用した画像処理技術の有効活用と計測の目的にあった適切な試料処理の技術開発が不可欠であろう。また、最近注目されている MFM などの STM 関連技術の発展にも期待がもたれる。MFM の探針の改良などにより、一層の高分解能・非破壊の磁気計測技術としての開発が待たれる。また、磁性材料の偏極したスピンを検出するスピン偏極 STM^{37,38)} は、原子レベルの空間分解能で磁化情報を計測できる技術として期待される新しい磁気計測技術である。

磁性分野では、積層膜における巨大磁気抵抗効果の発現など新しい物理現象も見出されている。高度な磁気計測技術の開発および応用により、磁気記録のみならず磁性物理の理解がさらに進むことを期待したい。

謝 辞

本解説論文を書くにあたって貴重なデータを提供していただいた(株)日立製作所日立研究所の光岡勝也博士、小田原工場の鈴木博之氏、中央研究所の青井基博士、木多幸雄博士、稲葉信幸博士、濱川佳弘氏、品田博之氏、松田好文氏に感謝します。

文 献

- 1) F. Bitter : Phys. Rev. **38**, 1903 (1931).
- 2) C. Tang, M. Chen, T. Yogi and K. Ju : IEEE Trans. Magn. **MAG-26**, 1689 (1990).
- 3) M. Futamoto, F. Kugiya, M. Suzuki, H. Takano, Y. Matsuda, N. Inaba, N. Miyamura, K. Akagi, T. Nakao, H. Sawaguchi, H. Fukuoka, T. Munemoto and T. Takagaki : IEEE Trans. Magn. **MAG-27**, 5280 (1991).
- 4) A. Tonomura : J. Appl. Phys. **61**, 4297 (1987).
- 5) K. Koike, H. Matsuyama and K. Hayakawa : Scanning Microscopy/1987 Suppl. 1 Ed. O. Johari (SEM, AMF O'Hare, IL, 1987) p. 241.
- 6) K. Koike and K. Hayakawa : J. Appl. Phys. **57**, 4244 (1985).
- 7) H. Shinada, S. Fukuhara, S. Seitou, H. Todokoro, S. Otomo, H. Takano and K. Shiiki : IEEE Trans. Magn. **MAG-28**, 1017 (1992).
- 8) J. B. Elsbrock, W. Schroeder and E. Kubalek : IEEE Trans. Magn. **MAG-21**, 1593 (1985).
- 9) G. Binning and H. Rohrer : IBM J. Res. Develop. **30**, 355 (1989).
- 10) Y. Martin, D. Ruger and H. K. Wickramasinghe : Appl. Phys. Lett. **52**, 244 (1988).
- 11) P. Kasiraj, R. M. Shelby, J. S. Best and D. E. Horne : IEEE Trans. Magn. **MAG-22**, 837 (1986).
- 12) K. Goto and T. Sakurai : Appl. Phys. Lett. **30**, 355 (1977).
- 13) J. N. Chapman and G. R. Morrison : J. Magn. Magn. Mat. **35**, 254 (1983).
- 14) D. C. Joy and J. P. Jakubovics : Phil. Mag. **17**, 61 (1968).
- 15) T. Tanaka and A. Kokubu : IEEE Trans. J. Magn. Japan. **TJMJ-1**, 508 (1985).
- 16) R. Shimizu, T. Ikuta, M. Kinoshita, T. Murayama, H. Nishizawa and T. Yamamoto : Japan. J. Appl. Phys. **15**, 967 (1976).
- 17) K. Tsuno, K. Ueno and Y. Harada : Japan. J. Appl. Phys. **20**, 1467 (1981).
- 18) G. Binning, C. F. Quate and Ch Gerber : Phys. Rev. Lett. **56**, 930 (1986).
- 19) Y. Honda, S. Hosaka, A. Kikugawa, S. Tanaka, Y. Matsuda, M. Suzuki and M. Futamoto : Japan. J. Appl. Phys. **31**, L1061 (1992).
- 20) 保坂純男 : 日本応用磁気学会誌 **16**, 511 (1992).
- 21) P. Hobbs, D. Abraham and H. Wickramasinghe : Appl. Phys. Lett. **53**, 2357 (1989).
- 22) P. Grutter, T. Jung, H. Heinzelmann, A. Wadas, E. Mayer, H. R. Hidber and H. J. Guntherodt : J. Appl. Phys. **67**, 1437 (1990).
- 23) 武笠幸一, 建部勝彦, 稲上浩二, 飯塚雅博 : 日本応用磁気学会誌 **16**, 519 (1992).
- 24) 末岡邦昭, 輪湖公一, 佐井文憲 : 日本応用磁気学会誌 **16**, 525 (1992).
- 25) M. Mituoka, S. Sudo, N. Narishige, M. Hanazono, Y. Sugita, K. Koike, H. Matsuyama and K. Hayakawa : IEEE Trans. Magn. **MAG-23**, 2155 (1987).
- 26) 由比藤勇, 濱川佳弘, 佐々木忍, 椎木一夫 : 電子情報通信学会技術研究報告 MR 90-63, p. 1 (1990).
- 27) H. Shinada, H. Suzuki, S. Sasaki, H. Todokoro, H. Takano and K. Shiiki : IEEE Trans. Magn. to be published.
- 28) Y. Matsuda, N. Inaba, M. Suzuki, H. Takano and M. Futamoto : J. Magn. Soc. Japan **15**, 1001 (1991).
- 29) Y. Matsuda, K. Takagi and Y. Shiroishi : Japan. J. Appl. Phys. **31**, 2729 (1992).
- 30) Y. Yajima, Y. Takahashi, M. Takeshita, T. Kobayashi, M. Ichikawa, Y. Hosoe, Y. Shiroishi and Y. Sugita : Submitted to J. Appl. Phys.
- 31) H. Aoi, R. Tsuchiya, Y. Shiroishi and H. Matsuyama : IEEE Trans. Magn. **MAG-24**, 2715 (1988).
- 32) Y. Honda, M. Futamoto, S. Hasegawa, T. Kawasaki, F. Kugiya, M. Koizumi, K. Yoshida and A. Tonomura : J. de Physique Colloque C 8, Tome **49**, 1969 (1988).
- 33) S. Hasegawa, T. Kawasaki, J. Endo, A. Tonomura, Y. Honda, M. Futamoto, K. Yoshida, F. Kugiya and M. Koizumi : J. Appl. Phys. **65**, 2000 (1989).
- 34) Y. Nakamura : J. Mag. Soc. Japan. **15**, 497 (1991).
- 35) Y. Maeda and M. Asahi : J. Appl. Phys. **61**, 1972 (1987).
- 36) H. Suzuki, N. Goda, S. Narishige, Y. Shiroishi, N. Shige and N. Tsumita : IEEE Trans. Magn. **MAG-27**, 4718 (1991).
- 37) R. Wiesendanger, H. J. Guntherodt, G. Guntherodt, R. J. Gambino and R. Ruf : Phys. Rev. Lett. **65**, 247 (1990).
- 38) R. Wiesendanger, D. Burgler, G. Tarrach, A. Wadas, D. Brodbeck, H. J. Guntherodt, G. Guntherodt, R. J. Gambino and R. Ruf : J. Vac. Sci. Technol. **B 9**, 519 (1991).