

マイクロカー効果顕微鏡による 高周波磁化挙動の観察

濱 川 佳 弘

(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17日受理)

High Frequency Magnetization Observation with a Kerr Effect Microscope

Yoshihiro HAMAKAWA

Information Storage Research Dept. Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
1-280, Higashi-koigakubo, Kokubunji, Tokyo 185

(Received August 17, 1992)

マイクロカー効果顕微鏡は、磁気光学効果のひとつであるカー効果現象を利用した磁化状態観察装置である。近年の画像処理技術の進歩ともあいまって、微小領域の磁化状態解析の有力な武器になってきた。本稿では、高周波での磁化回転量が観察できる走査型カー効果顕微鏡、各位相における磁区構造が観察できるストロボカー効果顕微鏡について紹介した。これらの装置は、特に小型化、高周波化する磁気ヘッド磁性膜の高周波磁化状態を観察する手段として広く利用されている。さらにこれらによって、高周波での磁壁移動など、マイクロマグネティクスの特長からも新しい知見が得られており、新しい高周波磁化挙動に関する理論の構築が期待される。

1. はじめに

マイクロカー効果顕微鏡は、磁気光学効果のひとつである磁気カー効果を利用した磁化状態観察装置であり、近年の画像処理技術の進歩に伴って、微小領域の磁化状態解析の有力な武器になってきた。この装置は、光を利用していることから、(1)非破壊観察が可能である、(2)磁性膜の表面に厚い保護膜がついていても磁区構造観察が可能であるといった利点を有している。したがって本装置は、複雑な構造をしたデバイス状態の磁性膜の磁区観察に適している。また、高周波信号処理技術の進歩によって、高周波での磁化状態も観察できるようになってきた。以上のことから、磁気記録の分野においては、小型化、高周波化する磁気ヘッド磁気コア部の高周波磁化状態を観察する手段として広く利用されている^{1,2)}。

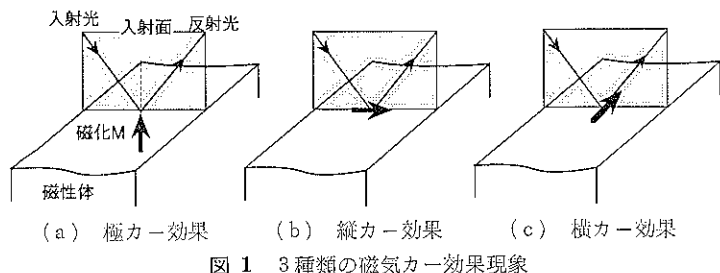
本稿では、最初に磁気カー効果にふれる。つぎに、マイクロカー効果顕微鏡のうち、高周波磁化状態が評価可

能な走査型カー効果顕微鏡とストロボカー効果顕微鏡について述べる。さらに、それぞれについて、筆者の専門である磁気ヘッドへの応用例を紹介する。

2. 磁気カー効果現象

磁気カー効果とは、直線偏光した光が強磁性体によって反射されたときに、その偏光面が回転する(カー回転)現象のことである。この現象は、強磁性体の誘電率がスピンに依存したテンソルとなることに由来することが知られている³⁾。磁気カー効果には、図1に示すように、光の入射面と磁化の方向によって3種類のものがある。すなわち、(a)試料面の法線方向に平行に磁化がある場合(極カー効果)、(b)磁化が試料面内にあつて、かつ、入射面に含まれる場合(縦カー効果)、(c)磁化が試料面内にあつて、かつ入射面と垂直な場合(横カー効果)である。

磁気カー効果の観察は、偏光子(光源からの光を直線偏光にする)と検光子(任意の偏光軸をもつ光だけを通



す) からの光学系によって、偏光子から出てくる反射光の光量を測定することで行っている。磁気ヘッドに使われる磁性膜のように、面内磁気異方性を有する薄膜の場合、縦カー効果を利用した測定が都合よく、このとき、検光子を通して得られる光の強度 I はカー回転角にほぼ比例し、

$$I = A \cos \theta \quad (1)$$

に従って変化することが知られている。ここでは、 A は定数、 θ は光の入射面と磁化のなす角度である⁴⁾。ただし一般の膜では、上記三つの磁気カー効果を同時に考慮する必要がある。この場合、検光子を通して得られる光の強度 I は、文献 4) に定式化されている。本稿では、面内磁気異方性をもつ磁性薄膜に対象を絞り、縦カー効果のみを考慮した場合について解説する。

3. マイクロカー効果顕微鏡

縦カー効果を利用した従来の磁区観察装置では、光を斜め入射する必要があるために、入射光と反射光は、対称に配置した別々のレンズに通す必要があった。そのために、磁区観察の空間分解能を向上させることが難しかった。Argyle らは、入射光と反射光を1本の対物レンズに通すことによって、カー効果による磁区観察の空間分解能を $\sim 0.5 \mu\text{m}$ にまで向上した⁵⁾。それ以来、カー効果による微小磁性膜の磁区観察が、盛んに行われるようになった。本稿では、入射光と反射光を1本の対物レ

表1 マイクロカー効果顕微鏡の種類

マイクロカー効果顕微鏡	測定周波数	時間分解能	評価量	備考
一括	$\sim 50 \text{ Hz}$	$\sim 1/25 \text{ s}$	磁化方向	差分法による背景画像の補正(画像処理)
走査型	$\sim 50 \text{ MHz}$	時間平均	磁化回転量	ロックインアンプによる高 S/N 化
ストロボ	$\sim 50 \text{ MHz}$	$\sim 2 \text{ ns}$	磁化方向	ストロボ法による時間分解能の向上

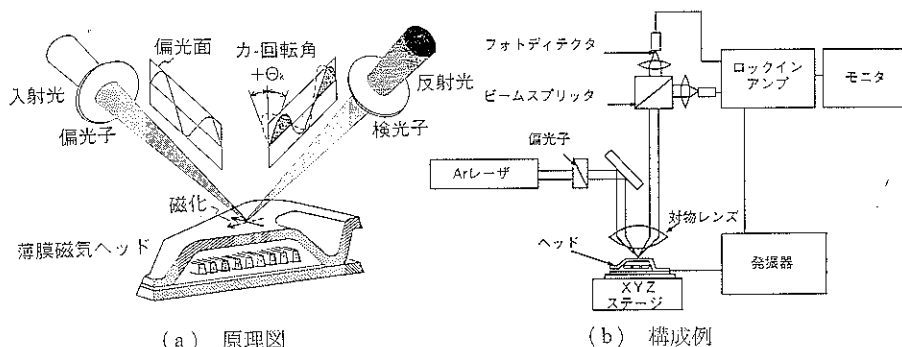
ンズを通して高分解能を図ったカー効果顕微鏡を、マイクロカー効果顕微鏡と総称している。

現在、表1に示す3種類のマイクロカー効果顕微鏡が開発されている。いずれも信号の高 S/N 化を図るために、それぞれ備考に示した信号処理の工夫を行っている。いずれも空間分解は約 $0.5 \mu\text{m}$ である。この中で最も一般に行われているのは、磁化の方向を白黒のコントラストで現す一括カー効果顕微鏡である。しかし、この装置の測定周波数は低周波 ($\sim 50 \text{ Hz}$) に制限される。したがって本稿では、磁気ヘッドの高周波磁化状態解析に広く利用されている、走査型カー効果顕微鏡とストロボカー効果顕微鏡について詳しく紹介する。

3.1 走査型カー効果顕微鏡

3.1.1 走査型カー効果顕微鏡の概要

図2(a)に走査型カー効果顕微鏡の測定原理を示す⁶⁾。



入射光を偏光子により直線偏光とし、かつ細く絞って薄膜磁気ヘッドの磁気コア面に照射する。ヘッドのコイルによって発生する磁界により、磁気コアの磁化が、図中の実線から破線のように回転すると、磁気カー効果によって反射光の偏光角が Θ_k だけ回転（カー回転）する。したがって、検光子を通して反射光量を測定すると、磁化回転量を光量の変化として検出することができる。すなわち、コイルに高周波電流を通電することにより、それに対応した磁化回転量を検出することができる。また、細く絞った入射光をヘッドの磁気コア面上で走査することにより、磁気コア全面の磁化回転量分布を高分解能で評価できる。

図 2 (b) は、走査型カー効果顕微鏡の構成例である。ヘッドは $0.1\mu\text{m}$ /ステップのステッピングモータ駆動の精密 XY ステージ上に固定されている。ヘッドのコイルは、発振器により所定の周波数、電流で励磁される。光源は、波長 514nm の Ar レーザーである。Ar レーザーは偏光子で直線偏光とし、対物レンズにより細く集光しヘッドの磁気コア面に照射する。磁気コア面上での Ar レーザー光のスポット径は、対物レンズによって異なり、 $\times 40$ （開口数：0.85）で直径 $1.2\mu\text{m}$ 、 $\times 100$ （開口数：1.25、油浸）で $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ とすることができる。反射光はビームスプリッタにより 90° 度偏光角が異なる 2 光束に分離し、磁化回転量を光量の変化に変換する。それぞれの光は高感度フォトディテクタで検出した後、さらに S/N を高めるためにロックインアンプで光量の変化を時間積分する。信号の強弱はモニター TV に白黒のコントラストとして表示する。現在報告されている最高測定可能周波数は 50MHz である。

つぎに、走査型カー効果顕微鏡像を解釈する場合に注意すべきことについて記す。走査型カー効果顕微鏡で得られた信号の強弱は、通常、磁化回転量の大小に対応している。しかし磁化の方向と光の入射面のなす角度によって、信号の強弱と磁化回転量の大小が対応していない場合がある。前述したように、カー回転角は磁化の向きと光の入射面とのなす角度に依存する。図 3 にその様子を示す。横軸 Θ_0 は、無励磁状態での磁化の向きと光の入射面とのなす角度、縦軸はカー回転角である。無励磁では、実線で示すように Θ_k は $\Theta_0=0^\circ$ 度、すなわち、磁化 M と入射面が並行のときに最大となる。 $\Theta_0=\pm 90^\circ$ 度のときにはカー回転角が生じない。つぎに $\Theta_0=\Theta_1$ で、かつ高周波磁界により磁化回転が $\pm\theta$ 生じた場合を考える。この場合には入射面に対する磁化の向き Θ_0 は $(\Theta_1\pm\theta)$ となる。この結果、カー回転角は $\Delta\Theta_{k1}$ 変化する。同様に $\Theta_0=+90^\circ$ 度に近い Θ_2 では $\Delta\Theta_{k2}$ のカー回転角の変化が生じる。走査型カー効果顕微鏡では、カー

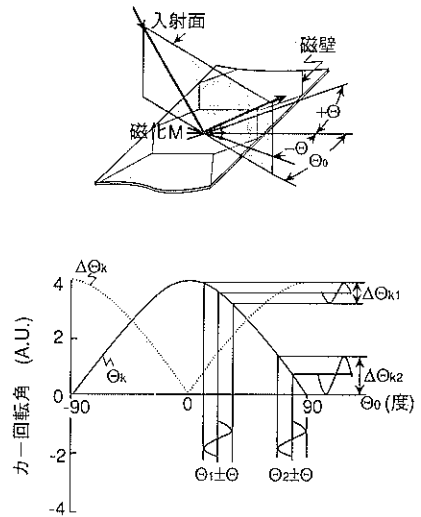


図 3 入射面と磁化の向きのなす角度 Θ_0 に対するカー回転角の変化

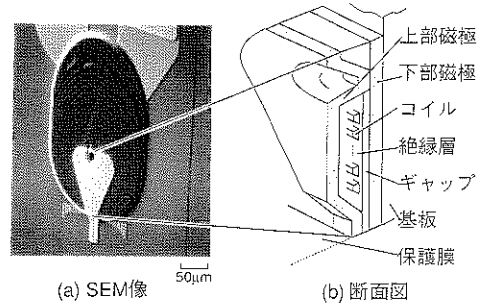


図 4 薄膜磁気ヘッドの構造

回転角の変化分 $\Delta\Theta_{k1}$ あるいは $\Delta\Theta_{k2}$ を測定し、磁気コアの磁化状態を知る装置である。したがって図中に破線で示したように磁化回転が同じである場合、 $\Delta\Theta_{k1} < \Delta\Theta_{k2}$ となり、 Θ_0 が $\pm 90^\circ$ 度に近いほど大きな信号が得られる。磁化回転が大きくても、 $\Theta_0=0^\circ$ 度近くでは小さな信号しか得られない。逆に、磁化回転が小さくても、 $\Theta_0=\pm 90^\circ$ 度近くでは信号は大きくなる。したがって、磁化回転量を正確に見積るには、磁化の方向と光の入射方向をいろいろと変えてカー信号像を測定し、総合的に評価する必要がある。

3.1.2 走査型カー効果顕微鏡による研究例

走査型カー効果顕微鏡の研究例を紹介する前に、観察の対象となる薄膜磁気ヘッドの概要を述べる。図 4 に薄膜磁気ヘッドの構造を示す。薄膜磁気ヘッドは、非磁性の基板の上に、磁性膜からなる下部磁気コア、ギャップ (Al_2O_3 , SiO_2 など)、コイル (Cu など)、絶縁層 (レジスト)、さらに上部磁気コア、ヘッドを保護するための保護膜 (Al_2O_3 , SiO_2 など) を積層した構造になっている。

る。薄膜磁気ヘッドの動作原理は以下のである。コイルに電流を流し、上部磁気コア、ギャップ層、下部磁気コアからなる磁気回路に磁束を導く。このとき、ギャップからの漏れ磁束によって記録媒体に情報を記録する。また、記録媒体からの漏れ磁束を磁気コアに導き、コイルに発生する誘導起電力を再生信号として検出する。薄膜磁気ヘッドの記録再生特性は、強磁性膜からなる磁気コアの磁化状態に大きく依存する。したがって、磁気コアの磁化状態を調べることが重要な課題となっている。

図5(a)は、走査型カー効果顕微鏡の観察例を示す。これは薄膜磁気ヘッドのコイルに1MHzの正弦波電流を通電した場合の、磁化回転量の大小を白黒のコントラストで表示したものである。磁化回転が大きい領域(白のコントラストで示された領域)は不均一に分布している。この磁化回転の大きい領域が、磁壁移動に伴うものか、単純な磁化回転によるものかを知ることは、高周波

での磁区構造を明らかにするという意味で興味深いことである。これは、測定点でのカー信号波形を解析することによって明らかになる。図5(b)は、A点(ライン上に見える磁化変化の大きな領域)、図5(c)は、B点(磁気コアの中央部で磁化変化の小さな領域)のカー信号波形のコイル電流依存性である。A点のカー信号波形はコイル電流によらず方形波で、磁化変化が急峻であることを示している。すなわち磁化の向きの大きく異なる二つの領域がレーザースポット内を通過したと考えられ、この領域では、磁壁移動が生じている。一方、B点のカー信号波形はコイル電流と同じ正弦波状である。また、コイル電流が大きくなるのに伴い、カー信号強度は大きくなる。したがってB点は単純な磁化回転領域といえる。走査型カー効果顕微鏡では、以上の解析をすることによって磁壁を推定し、高周波での磁区構造を明らかにすることができる。

[磁化状態の周波数依存性]

図6は、薄膜磁気ヘッドの磁気コア部の走査型カー効果顕微鏡像の周波数依存性を示す。1MHzでは白く表わされた帯の幅から数 μm の磁壁移動が起こっていることがわかる。周波数が10MHzに増加すると、磁壁移動量は約1/3程度に小さくなる。さらに高周波になると、磁気コアの左右周辺部では磁壁移動、磁化回転ともに抑制されてくる。50MHzでは、磁壁移動に伴う信号はほ

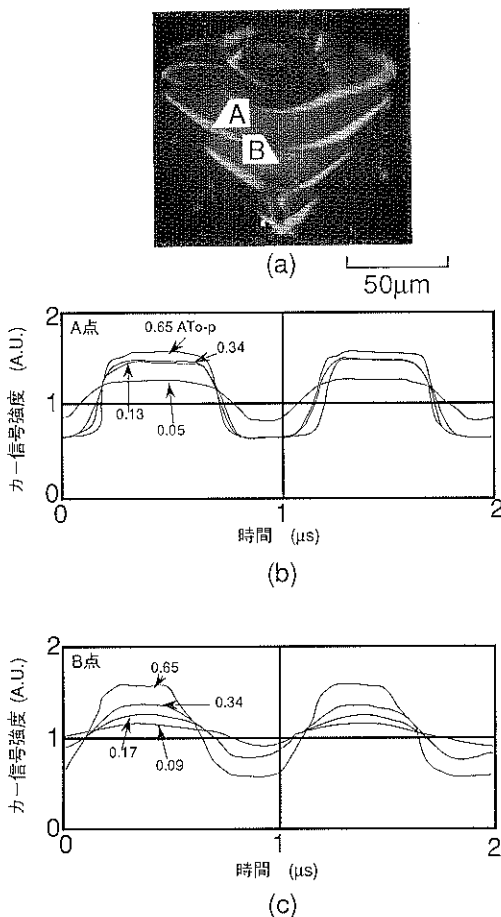


図5 走査型カー効果顕微鏡像とカー信号波形の対応

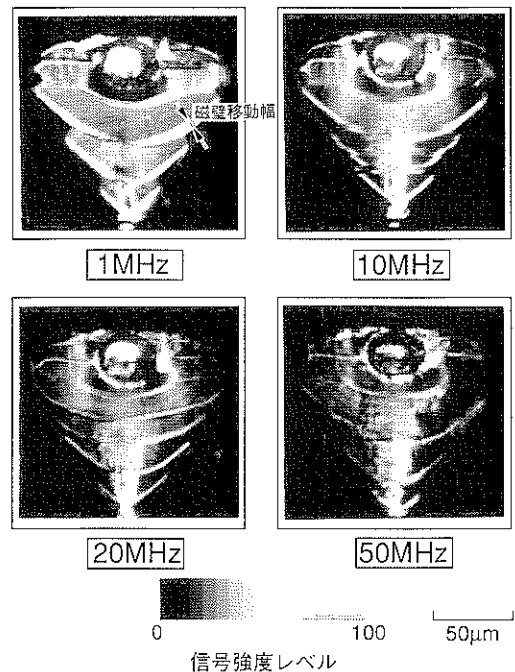


図6 磁極の走査型カー効果顕微鏡像の周波数依存性

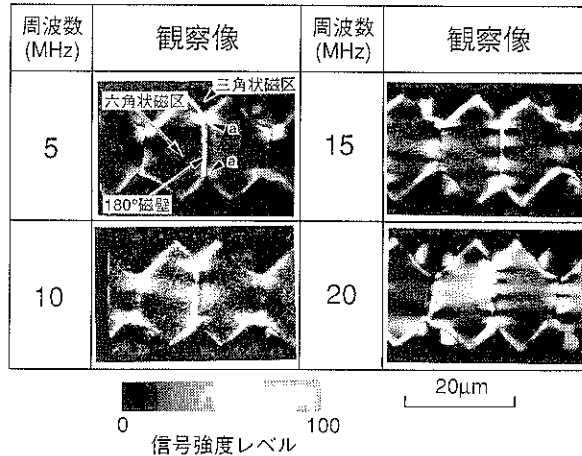


図 7 ストライプ形状磁性膜の走査型カー効果顕微鏡像の周波数依存性

とんど検出されなくなり、磁気コア中央部でしか磁化回転は生じない。周波数が高まるとともに磁気コアの周辺部において磁化の変化が抑制されることは、磁気コア周辺部で透磁率が低下することを示している。

図 7 は、ストライプ形状に加工した Co 系非晶質膜の走査型カー効果顕微鏡像の周波数依存性を示す。5 MHz では、六角状磁区内の磁化の変化はほぼ一様である。しかし、周波数が高くなると 180 度磁壁から六角磁区内にかけて白と黒のコントラストが交互に現れる。すなわち、磁化回転の大きな領域と小さな領域が交互に現れるようになる。磁化回転の小さい黒い縞の数は、周波数が高くなるほど多くなる。このような磁化挙動については、180 度磁壁の弦振動モデルが提案されている⁸⁾。今後、これらの観察結果をもとに、高周波磁化挙動に関する新しい理論の構築が期待される。

〔磁気ヘッドのノイズ解析への応用〕

つぎに走査型カー効果顕微鏡が磁気ヘッドのノイズ解析に使われている例を示す。薄膜磁気ヘッドには、図 8 に示すように、再生波形に歪み(ウィグル)が生じたり、再生出力が変動する場合がある。これがヘッドのエラーの原因になり、高記録密度化の妨げになっている⁹⁾。

図 9 (a) は著しい再生波形歪みを発生した薄膜磁気ヘッドの磁気コアを走査型カー効果顕微鏡で観察した像である。このヘッドは、上部磁気コアと下部磁気コアが磁気的につながるバックコンタクト部に向かう磁化回転の大きな領域 (A 点)、および、比較的磁化回転の小さい領域 (B 点) に別れている。(b) は A、B 点の電流-カー信号強度曲線 ($I-K$ 曲線) である。A 点の $I-K$ 曲線は、磁化容易方向に測定した $I-K$ 曲線に類似しており、磁化回転がコイル電流に追従していない。A 点では磁壁移動が起きていると考えられる。これに対し、B 点ではカー

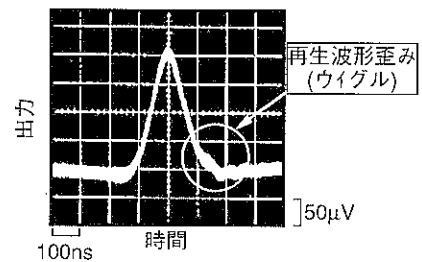


図 8 薄膜磁気ヘッドの再生波形歪み

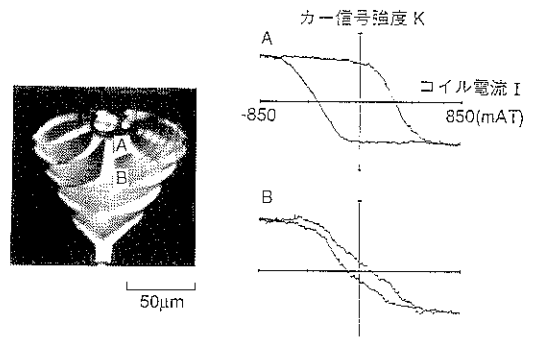

(a) 走査型カー効果顕微鏡像 (b) 電流-カー信号強度曲線($I-K$ 曲線)

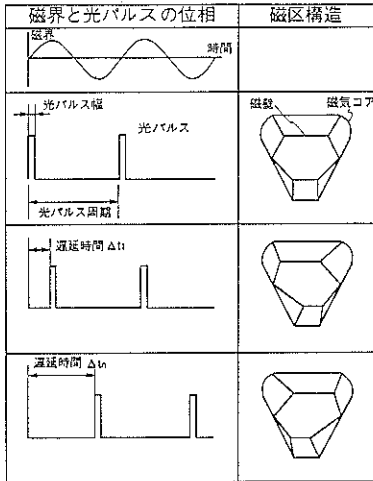
図 9 再生波形歪みの大きいヘッドの磁化状態

信号強度、すなわち磁化回転がコイル電流に追従している。すなわち A 点で観察された磁壁の時間遅れがウィグルの一原因と考えられる。このようなバックコンタクト部に見られる磁区構造の変化は、この部分に働く局所的応力が、磁気弾性効果を通して磁気異方性を乱すことによるものと考えられている¹⁰⁾。

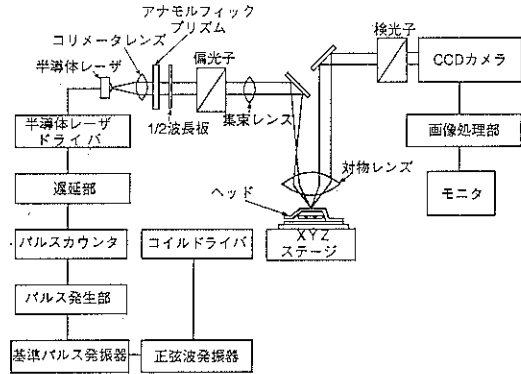
3.2 ストロボカー効果顕微鏡

3.2.1 ストロボカー効果顕微鏡の概要

図 10 (a) にストロボカー効果顕微鏡の原理を示す¹¹⁾。



(a) 原理図



(b) 構成例

図 10 ストロボカー効果顕微鏡の概要

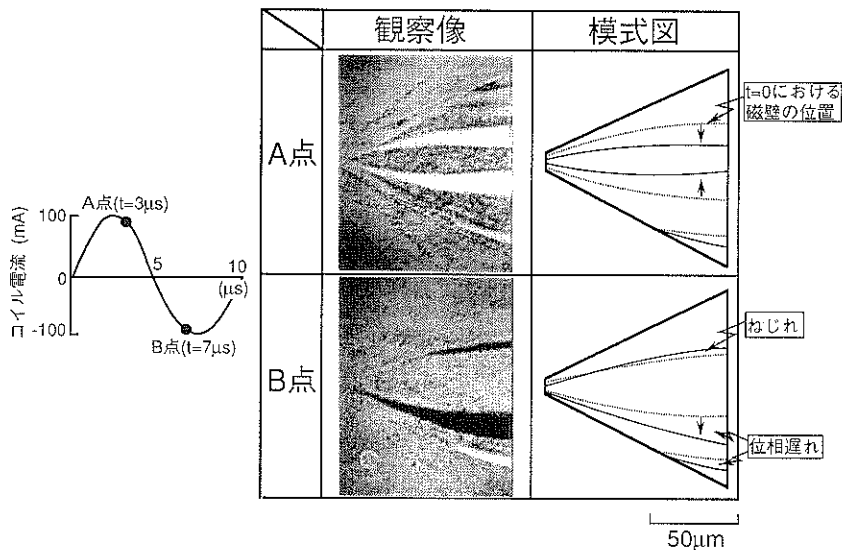


図 11 ストロボ法による磁壁挙動の観察

本装置は、一括型カー効果顕微鏡にストロボ法を導入したものである。ストロボ法では、磁気コアに照射する光をパルス化し、かつ磁気ヘッドのコイル電流と同期させ、コイル電流の位相をゆっくりと制御する。このようにして、高速で変化する磁化を低速変化に変換し、各位相での磁区像を観察することができる。図 10 (b) に、本装置の構成例を示す。光源は半導体レーザーで、パルスドライバにより最小パルス幅 2ns の光パルスを生ずる。光パルスは、ヘッドのコイル電流に同期させている。光パルス幅はコイル電流周期の 1/10 以下とする必要がある。カー信号強度は検光子で光量に変換された後、CCD カメラで検出される。さらに画像処理により、

初期状態の磁化像との差分、すなわち磁化変化分のみの抽出、強調を行い、像のコントラストを増加している。本装置では、磁区像の時間変化を一周期にわたって各位相で観察できる。

3.2.2 ストロボカー効果顕微鏡による研究例

図 11 に、観察例とその模式図を示す。A 点は 0~3μs、B 点は 0~7μs 間の磁壁の移動の様子を示している。図中破線は $t=0$ 、実線は $t=3\mu s$ あるいは $t=7\mu s$ での磁壁の位置を示す。A 点 (0~3μs) について見ると、磁壁移動によって磁化の方向が変化した領域 (図中白) が 3 ヲ見られる。しかし、3 領域とも白であり磁性膜中央部に見られる二つの白い領域の大きさはほぼ等しいこと

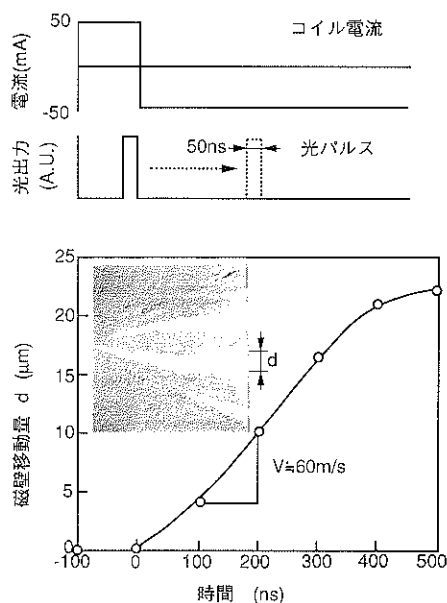


図 12 磁壁移動のパルス磁場応答

から、磁壁移動の位相差は小さいと考えられる。一方、B 点 ($0 \sim 7 \mu\text{s}$) では白、黒二つの領域が混在している。このことは、磁壁の移動に時間的位相遅れがあることを示している。位相遅れは異なった磁壁間で見られるとともに、図中“ねじれ”と示したように、一つの磁壁でも部分的に位相遅れが生じる。

図 12 は、パルス磁界を印加した場合の磁壁の移動過程を測定した結果である。磁場方向が反転する時間を 0 として、磁壁の移動量 d を示した。磁壁は速度が 60 m/s の等速度で移動し、 $400 \sim 500 \text{ ns}$ たって停止することがわかる。この結果から、磁壁の慣性質量、磁壁の渦電流損失による制動など、磁壁の運動を考えていくうえで基本的かつ重要な情報が得られる。このように、ストロボカー効果顕微鏡は、磁壁の運動を調べる手段として有効な方法である。

4. おわりに

マイクロカー効果顕微鏡は、磁気光学効果のひとつで

あるカー効果を利用した磁化状態観察装置である。近年の画像処理技術の進歩ともあいまって、微小領域の磁化状態解析の有力な武器になってきた。本稿では、高周波での磁化回転量が観察できる走査型カー効果顕微鏡、各位相における磁区構造が観察できるストロボカー効果顕微鏡について紹介した。これらの装置は、特に小型化、高周波化する磁気ヘッド磁性膜の高周波磁化状態を観察する手段として広く利用されている。

こうした実用面への応用もさることながら、高周波での磁壁移動など、マイクロマグネティクスの観点からも新しい知見が得られており、新しい高周波磁化挙動に関する理論の構築が期待される。

今後、マイクロカー効果顕微鏡は、画像処理、信号処理技術のさらなる進歩に伴い、磁化挙動の単発現象も含めて高 S/N、高分解能で観察できるようになると思われる。その結果、現在問題になっている各種ヘッドノイズの原因も解明されていくものと思われる。

文 献

- 1) 由比藤勇, 瀬尾洋右, 佐々木忍, 濱川佳弘, 椎木一夫: 日本応用磁気学会誌 **13**, 519 (1989).
- 2) 由比藤勇, 佐々木忍, 濱川佳弘, 森脇英稔, 西岡浩一: 日本応用磁気学会誌 **14**, 636 (1990).
- 3) 佐藤勝昭: 光と磁気 (朝倉書店, 1988) p. 14.
- 4) W. Rave, R. Schäfer and A. Hubert: J. Magn. Magn. Mater. **65**, 7 (1987).
- 5) B.E. Argyle and F. Suits: Digests of the INTERMAG Conf. HC-5 (1985).
- 6) P. Kasiraj, R.M. Shelby, J.S. Best and D.E. Horne: IEEE Trans. **Magn.** **22**, 837 (1986).
- 7) 由比藤勇, 濱川佳弘, 佐々木忍, 椎木一夫: 電子情報通信学会, 磁気記録研究会資料, MR 90-63 (1990).
- 8) Y. Hamakawa, I. Yuitoo, S. Sasaki and K. Shiiki: J. Appl. Phys. **69**, 2444 (1991).
- 9) R.E. Jones, Jr.: IEEE Trans. **Magn.** **15**, 1619 (1979).
- 10) R.E. Jones, Jr. and R.D. Holmes: IEEE Trans. **Magn.** **25**, 3203 (1989).
- 11) B. Petek, P.L. Trouilloud and B.E. Argyle: IEEE Trans. **Magn.** **26**, 1328 (1986).