

1. はじめに

ハードディスクの面記録密度は市販品レベルでも 150 Gb/in^2 に達し、さらに 1 Tb/in^2 をめざして研究開発が進められている。 1 Tb/in^2 という面密度は 1bit のサイズが 25 nm 平方に対応する。媒体性能を向上させるためには、このように微小な記録状態を観察、評価する技術の確立が必要である。磁気物性の基礎研究から見ても、ナノメートルオーダーの微小領域における磁性体のスピン構造の観察技術の開発が望まれている。

微小な磁区のイメージを観察する手段として、電子顕微鏡技術（スピン偏極電子顕微鏡、ローレンツ電子顕微鏡など）や近接プローブ顕微鏡（磁気力顕微鏡(MFM)、スピン偏極トンネル顕微鏡(SP-STM)、走査ホール顕微鏡、SQUID 顕微鏡など）を用いた観察法が研究開発されている。

ここでは、筆者らが開発した円偏光変調法を利用した近接場磁気光学顕微鏡(MO-SNOM)による微小磁区の観察と問題点、最近開発している液晶素子による円偏光変調法を用いた磁気光学顕微鏡（通常光学系）について紹介する。

2. 磁気光学顕微鏡へのニーズ

ナノ領域の磁気状態を観察する技術としてMFMが使われるが、MFMには問題もある。図1にダマシン法で作製したSi基板埋め込みパーマロイの長方形ドット（ $100 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$ 、厚さ 150 nm ）の配列(ドット間隔 300 nm)のMFM像(SII ナノテクノロジー社SPI-3800を使用)を示す¹。初磁化状態にもかかわらず、全体が同一方向に揃っており、MFM像はプローブの走査方向によって像が異なる。しかしながら、同じ長方形ドットについて、SII ナノテクノロジー SPI-4000 /SPA300HVにより、低磁気モーメントプローブを用い高真空中で測定すると図2のMFM像のように、ランダムに配列した白黒の市松模様が見られる。これが本来の磁化状態の姿である。MFM装置では、AFMのチップの先に磁性体薄膜をコートしたものをプローブとして使い、試料の磁束から受ける力を画像化している。高モーメントを用いた通常MFM装置を用いた場合、磁性体が微小になると、走査の際にプローブからの磁束により磁化されてしまい、MFM像はプローブの走査方向に依存することとなる。

このように、MFMでは特殊な装置を使わない限り、観測す

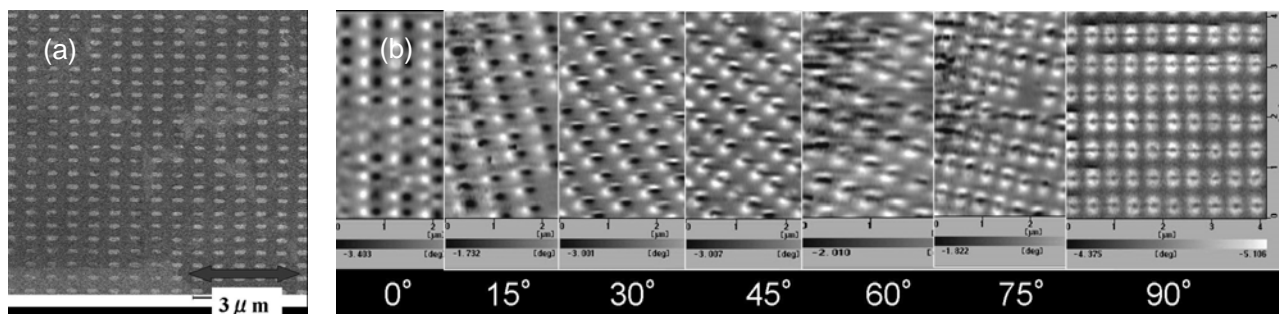


図1 走査方向に依存する MFM 像の例。(a) Si 埋込み長方形ドット($100 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$)配列の SEM 像。(b) MFM 像の走査方向依存性（長方形の長辺方向の走査を 0° とする。）

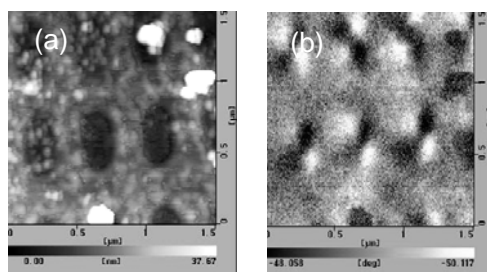


図2 Si 埋込み長方形ドット($100 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$)配列の低モーメントチップを用いた(a)AFM 像と(b)MFM 像

る対象の磁気状態を乱す可能性があり注意が必要である。

これに対し磁気光学顕微鏡は系を乱さず磁気状態を観測することのできる優れた技術である。さらに、MFMが観測しているのは試料の磁化そのものではなく、試料から発生する磁束であるのに対し、磁気光学顕微鏡では試料の磁化そのものを観測できる。

光学顕微鏡の分解能は回折限界で決定され、 $d = 0.6\lambda / NA$ で与えられる。ここに λ は波長、 NA はレンズの開口数(numerical aperture)である。従ってレンズを用いて高い分解能を得るためには波長を短くするか NA を上げるかしかない。通常の対象物レンズの NA は0.5程度であるから、分解能は波長と同程度か少し広い程度であるといえる。従って、500nmの波長の光を用いれば、600 nm程度の分解能でサブミクロンサイズの磁化状態を観測できる。次世代BluRayディスクには $NA=0.85$ のレンズが用いられるが、解像度は350 nm程度になる。さらに NA を大きくする方法として屈折率の大きな液滴を用いことが行われるが、SIL(solid immersion lens)とよばれる半球レンズを用いる方法が知られている。

通常の磁気光学顕微鏡は、ほとんど直交した偏光子と検光子の間に磁性体を置き、磁性体によるわずかな偏光回転を光の強弱として画像化する。コントラストを高めるため、正負の磁界に対する画像の差をとっている。この方法だと、そもそも直交偏光子の条件なので画像が暗い、定量的な測定がむずかしいなどの問題点があった。

私どもの研究室では、最近、より高感度で定量性のある磁気光学顕微鏡を開発した。この特集の主題の近接場光学系ではないが、はじめにこれについて簡単に紹介する。

この顕微鏡では、図3に示すように、光源—偏光子のあとに回転する4分の1波長板、または、電界で光学遅延が制御できる液晶素子を置き、試料にあてる光の偏光状態を右円偏光→直線偏光→左円偏光→直線偏光というように変調す

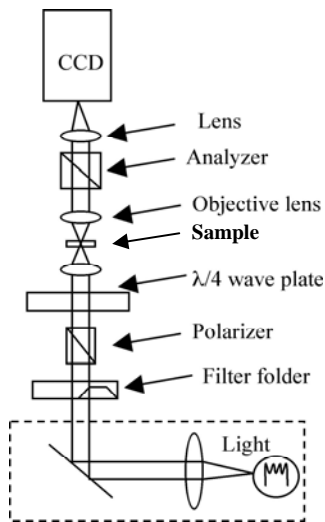


図3 円偏光変調法を用いた磁気光学顕微鏡の構成図

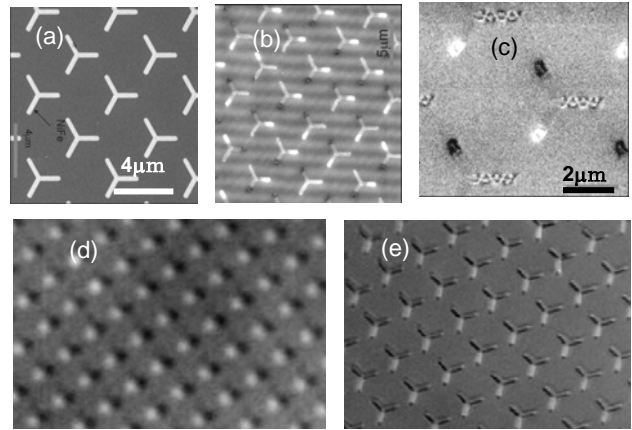


図4 Y字ドット配列の(a)SEM像、(b)MFM像、(c)低モーメントMFM像、(d)磁気光学顕微鏡像($NA=0.5$)、(e)磁気光学顕微鏡像($NA=0.85$)

る。それぞれの偏光状態で測定したCCD画像から、画像処理演算によって、ファラデー回転像、磁気円二色性像を再構成することができる^{2,3}。直線偏光に対する画像と円偏光に対する画像の差がファラデー効果に、左右円偏光に対する画像の差が円二色性(楕円率)に対応する。

図4に示すのは、Si埋込Y字型パーマロイ・ドット(腕の長さ1.4 μ m、腕の幅300nm)の(a)SEM像、(b)(c)MFM像、(d)(e)磁気光学顕微鏡像(測定波長500 nm)である。レンズの NA は、(d)は0.5、(e)は0.85である。(3)では300 nmの幅の腕が明瞭に分解している。

図5は、この顕微鏡(レンズの $NA=0.5$)を用いて測定したPt/Co光磁気ディスクに記録された磁界変調記録された矢羽根型磁区のMO像である。トラックピッチは1.6 μ m、記録マークの幅は1 μ m、長さは6 μ mである。

レンズの NA を0.85とし、測定波長を405 nmにすれば、分解能を290 nm程度まで上げられるが、通常の光学系で得られる磁気光学像はせいぜいこのくらいが限界である。これより高い分解能で記録マークを観察するには近接場光を使わなければならない。

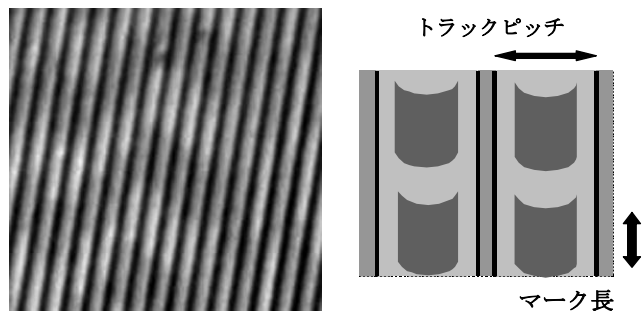


図5 Pt/Co ディスクにレーザストローブ磁界変調法により光磁気記録された矢羽根形ピットの磁気光学顕微鏡像

3. 近接場顕微鏡⁴⁾

狭い開口部を用いて回折限界を超える顕微鏡を作ろうというアイデアは、1928年に英国のSynggeによって提案された⁵⁾。しかし、実用的な近接場光学顕微鏡(SNOM)の原型となったのは、1984年のPohlらの論文であった⁶⁾。SNOMによる最初のイメージングは1985年になされ、20nmという高分解能が得られた⁷⁾。その後、細く引き伸ばされたマイクロピペットを用いたSNOMが開発され⁸⁾、ピペットのテーパを改良し液体を満たすことによって空間分解能が向上し、実用レベルのSNOMが実現した⁹⁾。

SNOMを利用した微小な磁気構造の磁気光学観察は1992年にBetzigらにより報告¹⁰⁾され、その後、プローブの改良¹¹⁾、制御方法^{12),13)}、解析法¹⁴⁾、アーティファクト¹⁵⁾などに関する研究が多く報告されるようになった。

4. SNOM/AFM システム

図6に我々の採用した透過モードのSNOMのブロック図を示す。基本となっているのはカンチレバー方式のAFMを用いたセイコーインスツルメンツのSPI3700型SNOMである^{16,17)}。通常のSNOMでは、ファイバの先端と試料表面との距離をshear forceを用いて制御しているが、ここで用いたシステムでは、光楯子によるAFMモードを用いて制御している。プローブはバイモルフによって15kHzで振動しており、そのQ-curveのslopeによって上下調整用の圧電アクチュエータにfeedbackをかけている。試料面上の走査も圧電アクチュエータによって試料台を動かすことによって行われている。このことにより、AFMトポグラフィ像とSNOM光学像が同時に得られるという利点をもっている。

最も重要な部品である**プローブ**について説明しておく。光ファイバにはsingle mode ファイバ(コア径3.2 μ m、クラッド径125 μ m)を用いており、図7の写真のように曲げて、先端部を尖らせプローブとしている。この形状を作るには、ファイバの曲げる位置にCO₂ レーザを照射し内部を熱で軟化

させ、ファイバを彎曲することができる。本研究で用いたプローブは、熱引き法とエッチング法を組み合わせで作製された。プローブの先鋭化した開口部付近は、金属(Al、Au)を真空蒸着して被覆する。プローブを回転しながら被覆し、先端部に開口を残す。金属の被覆によりクラッド層からの漏れ光を防ぎ、伝搬光が散乱してくることを防ぐ。金属(Al)被覆の厚みは100-150nm、先端部の開口(金属被覆のなくなった部分)は直径80-100nmである。

プローブは、プローブホルダーに固定される。ホルダーには、バイモルフ(振動子)があり、プローブをその固有周波数(約15kHz)で振動させるために用いる。プローブの彎曲部が鉛直方向を向くよう取り付けが、この装着には若干の習熟を要する。

プローブホルダー上に光てこ部のアセンブリがすっぽりと覆うように乗る。プローブと試料との間の原子間力による変位の差を検出するために、光てこを用いる。プローブの直線部の背の部分には反射ミラーが作られており、半導体レーザを照射し、反射光を4分割型ディテクタで検出する。原子間力によるプローブのたわみによる反射角の変化を感度よくとらえることができる。

プローブと試料との距離(浮上量)はAFMユニット(SPI3700)の制御部で20-30nmになるよう制御された。プローブが試料に接近して原子間力が強まるとその固有周波数が変化するので、光てこの出力の電気信号にも変化が現れ、これをチューブ型のピエゾアクチュエータにフィードバックして位置制御を行う。

光源は、アルゴンイオンレーザの488nmである。この光は音響光学変調器(AOM)を用いon-offされる。開閉はプローブの振動と同期しており、ロックイン検出が行われる。プローブが試料に接近したときのみ光をonとすることでSNを高めている。レーザ光は偏光光学系を通し、カップラでファイバに結合する。

プローブから出たエバネセント光は試料表面で伝播する光に変換され試料を透過する。光は集光レンズで集光され

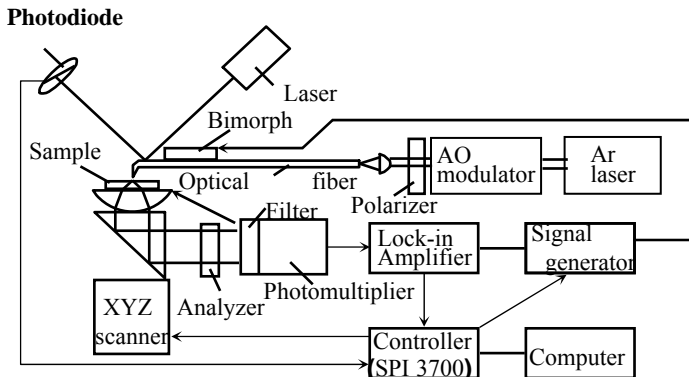


図6 ベースになったSNOMシステム



図7 曲げて先端部を絞ったSNOM用ファイバ・プローブ

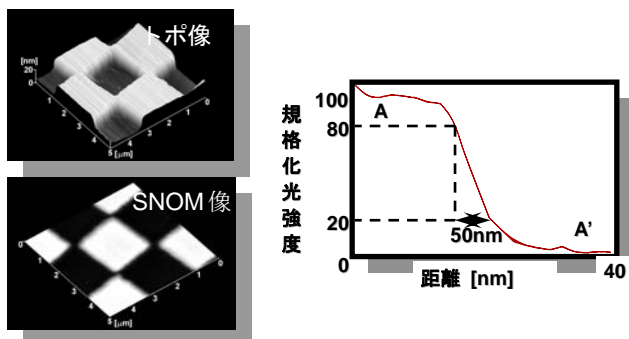


図8 Crの市松模様トポ像とSNOM像と、光強度のプロファイル。

る。レンズは試料ステージを兼ねており、xyzピエゾアクチュエータで微動することができる。透過光は偏光無依存のダイクロイックミラーで反射されフィルタ(光でこ用半導体レーザ波長除去)と検光子を通して光電子増倍管に導かれる。

図8はこの装置でCrの市松模様を観測したAFMトポグラフィ像とSNOM像である。エッジの立ち上がりから算出した分解能は50nmである。

5. クロスニコル法によるMO-SNOM像

直線偏光をプローブに入射し、試料の磁気光学効果による偏光の回転を検光子により検出すれば磁気光学効果を用いたイメージングができるはずである。しかし、単なる光学像に比べ磁気光学像はコントラストが大変低いのである。一般にプローブ光の波長において十分な光の透過強度を保った場合、ファラデー回転としてはせいぜい1-2°と小さいためである。もう1つの原因は光ファイバ・プローブの偏光特性にある。ファイバを彎曲させたことおよび先端部を絞ったことにより、入射直線偏光は光学遅延(optical retardation)を受け楕円偏光になる。楕円の長軸と短軸の比の2乗が消光比と呼ばれるが、これが当初は9程度のものから400程度まで大きくばらついていた。これを補償するために2分の1波長板と4分の1波長板を組み合わせ、最適化すると消光比10程度のプローブでも70程度に改善された。

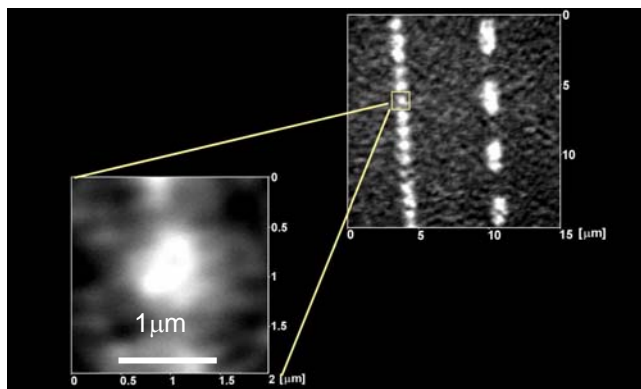


図9 クロスニコル法で測定したDyIG光磁気ディスクに記録されたマークのMO-SNOM像

この方法により、磁性ガーネット薄膜に光磁気記録された磁気マークの観測を行った¹⁸⁾。図9は、Bi置換ディスプロシウム鉄ガーネット(DyIG)薄膜MOディスクに光強度変調により光磁気記録された微小磁区(3 μm×1 μmおよび0.7 μm×1 μm)のMO-SNOM像である。コントラストとしては0.3程度が得られたが、拡大図に示すようにマーク形状がはっきりしておらず、十分な解像度が得られなかった。

6. 円偏光変調法によるMO-SNOM像

磁気光学効果は非常に小さいため偏光子・検光子法では検出感度が低いという問題があった。そこで、われわれは光弾性変調器(PEM)による円偏光変調法を適用することによって高感度化することを目指した。図10にこの方法のブロック図を示す。鉛直から45°の方位の直線偏光をPEMに入射すると、光の電界の鉛直成分と水平成分との間にpHzで変調された光学遅延を与える。光学遅延量の変調振幅を4分の1波長に設定すれば左右円偏光が交互に現れる。この変調光を磁性体試料に入射し、透過光を鉛直方向に向けた検光子を通すと、変調周波数(p=50kHz)成分I(p)が楕円率を、その2倍の周波数(2p)の成分I(2p)が回転角を与える¹⁹⁾。

$$\begin{aligned}
 I(0) &= I_0 R \{1 - 2\theta_k \cdot J_0(\delta_0)\} \\
 I(p) &= I_0 R \cdot 2\eta_k \cdot 2J_1(\delta_0) \\
 I(2p) &= -I_0 R \cdot 2\theta_k \cdot 2J_2(\delta_0)
 \end{aligned} \quad (1)$$

PEMによる円偏光変調法をSNOMに適用する場合、AOMは変調を止め連続光ができるようにしている。これは、AOMの変調周波数の高調波とPEMの変調周波数との間でビートが生じ画像に縞模様が生じることを防ぐためである。このSNOM装置を用いて、図5に示したPt/Co人工格子薄膜MOディスクに光磁気記録された記録マークを観察した。MOディスクには、グループ(溝)が刻まれているが、グループの無い平坦な部分にも光磁気記録されているものを用いた。図11は、この記録マークを上記の円偏光変調法を用いたMO-SNOMでイメージングしたものである²⁰⁾。図11の左の図はAFMトポグラフィ像で、凹凸のあるグループ像のみが見られるが、これに対し平坦部のMO像には、明確に矢羽形状

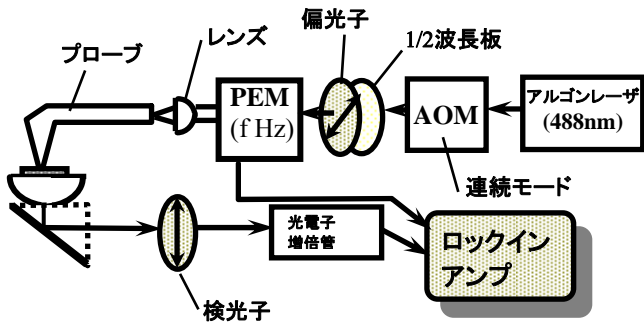


図10 PEMによる円偏光変調法を適用したSNOMシステム

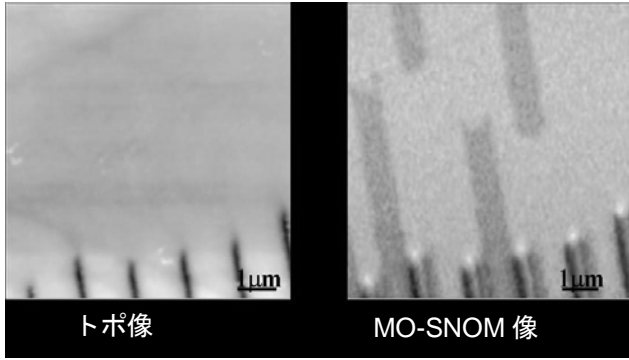


図 11 円偏光変調法を用いた MO-SNOM を用いて観察した Pt/Co ディスクの記録マーク(幅 1 μm, マーク長 6 μm)

(マーク長 6 μm)が観測されている。磁気光学効果の感度～1mrad、空間分解能～100nmを得ることができた。グループのある部分では、白黒が反転したゴーストが現れているが、凹凸をなぞることやプローブ・試料間の多重散乱によって生じるアーティファクトであると思われる。

7. プローブの偏光伝達特性^{21, 22)}

前節に述べたように、円偏光変調法により、明瞭な MO-SNOM イメージングを得ることができたが、観測している磁気光学効果が回転角をみているのか、楕円率をみているのか判定できない。それは、使用した光ファイバ・プローブの偏光伝達特性がわからないためである。そこで、我々は、円偏光変調法を適用した SNOM による磁性材料の磁気光学効果の定量的観察をめざして、プローブの偏光特性をストークス法²³⁾で評価し解析した。

6.1 ストークスパラメータの測定法

ストークスパラメータは次のように定義される。電界ベクトル E を

$$E = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \text{ で定義すると、4つのパラメータ } S_0 \sim S_3 \text{ は次}$$

式で与えられる。

$$S_0 = \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle$$

$$S_1 = \langle |E_x|^2 \rangle - \langle |E_y|^2 \rangle$$

$$S_2 = \langle E_x \cdot E_y^* \rangle + \langle E_x^* \cdot E_y \rangle$$

$$S_3 = -i \left[\langle E_x \cdot E_y^* \rangle - \langle E_x^* \cdot E_y \rangle \right]$$

偏光度 P は S を用いて次のように与えられる。

$$P = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0$$

S_0 は光強度、 S_1 は x 方向の直線偏光性、 S_2 は 45° 方向の直線偏光性、 S_3 は円偏光性を表している。

プローブのストークスパラメータおよび偏光度を far field で測定した。光強度をロックインアンプで検出するために、音響光学変調器(AOM)による強度変調を行った。フォトカブラの前に配置した 1/2 波長板で光源からの直線偏光を角度 θ の直線偏光に変換し、プローブの入射端に導いた。プローブ先端からの出射光の伝搬光成分をレンズで集光し、誘電体ミラーで反射後、光電子増倍管 (PMT) で受光した。プローブ以外の偏光特性を除くため、試料は用いなかった。PEM は電源を off、Berek 補償子は位相差、方位ともに 0° にした。

測定手順は次の通りである。入射直線偏光の角度 θ に対し、透過軸が 0° (x 軸方向)、45°、90° (y 軸方向) の検光子を透過後の光強度 $I_x(\theta)$ 、 $I_{xy}(\theta)$ 、 $I_y(\theta)$ および検光子の直前に 1/4 波長板 (0°) を挿入し、検光子 (45°) を透過後の光強度 $I_{qxy}(\theta)$ を測定した。この 4 つの値から(1)式により $S_0(\theta)$ 、 $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 、 $S_3(\theta)$ を算出した。

$$S_0(\theta) = I_x(\theta) + I_y(\theta)$$

$$S_1(\theta) = I_x(\theta) - I_y(\theta)$$

$$S_2(\theta) = 2I_{xy}(\theta) - [I_x(\theta) + I_y(\theta)] \quad (2)$$

$$S_3(\theta) = 2I_{qxy}(\theta) - [I_x(\theta) + I_y(\theta)]$$

ここで、 $S_0(\theta)$ 、 $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 、 $S_3(\theta)$ はそれぞれ、全光強度、x 軸方向の直線偏光強度、45° 方向の直線偏光強度、右回り円偏光強度を表す。また、偏光度 $P(\theta)$ は全光強度に対する全偏光強度の比で表され、式(3)となる。

$$P(\theta) = \sqrt{S_1(\theta)^2 + S_2(\theta)^2 + S_3(\theta)^2} / S_0(\theta) \quad (3)$$

6.2 プローブの偏光伝達特性

ベントタイプ光ファイバ・プローブのストークスパラメータを測定した結果を図 12 に示す。 $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 、 $S_3(\theta)$ は全光強度 $S_0(\theta)$ で規格化したものがプロットしてある。 $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 、 $S_3(\theta)$ は入射直線偏光の偏光面の回転角 θ に対し、それぞれ正弦波的に変化している。方位とともに位相差 $S_3(\theta)$ が変化していることからこのプローブは、波長板のようにふ

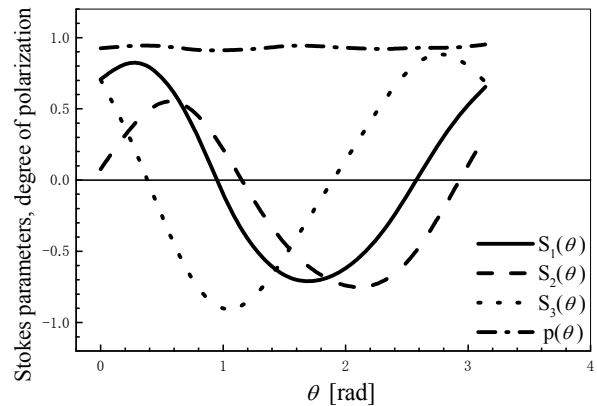


図 12 ベントタイプ光ファイバ・プローブのストークスパラメータの入射偏光方位依存性

るまうことがわかる。波形のわずかな歪みは彎曲部分、テーパ部分、開口部分の形状の非対称性から生じると考えられる。

ベントタイププローブでは折り曲げによる光弾性のために位相差が生じるばかりでなく、クラッドを伝搬するモードが発生して、開口からの出射光は偏光度が低下すると考えられる。しかし、偏光度はほぼ一定で、約 0.93 という、かなり高い値が得られており、開口から放出される光は大部分がプローブのコアを伝搬する成分であると考えられる。

6.3 プローブの偏光特性の補償

前節に述べたように使用したベントタイププローブは高い偏光度をもち、偏光伝搬特性は波長板と同様のふるまいをすることがわかった。従って、適当な位相補償子を用いることによって補償できるはずである。

一般に、方位角 α 、位相差 Δ の波長板に角度 θ の直線偏光が入射した時の波長板のストークスパラメータは、式(4)で表せる。

$$\begin{aligned} S_0(\theta) &= 1 \\ S_1(\theta) &= \cos 2\alpha \cdot \cos 2(\theta - \alpha) - \cos \Delta \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin 2(\theta - \alpha) \\ S_2(\theta) &= \sin 2\alpha \cdot \cos 2(\theta - \alpha) + \cos \Delta \cdot \cos 2\alpha \cdot \sin 2(\theta - \alpha) \\ S_3(\theta) &= \sin \Delta \cdot \sin 2(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

これらの式から $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 、 $S_3(\theta)$ はそれぞれ正弦波で表され、 $S_3(\theta)$ の振幅値から位相差 Δ 、正弦波の位相から方位角 α が求まることがわかる。

本研究では波長依存性のない Berek 補償子を採用した。補償子の方位角を $\alpha + \pi/2$ 、位相差を Δ に調節し、実際にプローブの偏光特性の補償を行った。その結果を図 13 に示す。位相差を表す $S_3(\theta)$ の振幅が非常に小さく、位相差は 0.1 ラジアン以下になっており、ほぼ直線偏光になっていることがわかる。また、 $S_1(\theta)$ と $S_2(\theta)$ の変化は入射直線偏光の回転を表している。

以上から、ベントタイププローブは、ほぼ波長板として扱うことができ、偏光補償が可能であるといえる。

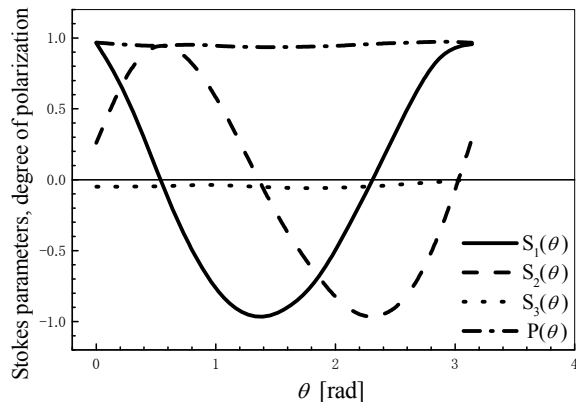


図 13 Berek 補償子による位相補償後のストークスパラメータ

8. 位相補償したファイバを用いた磁気光学イメージング²⁴⁾

光軸に波長板(位相差 Δ 、方位角 α)が存在する場合、 $I(p)$ 、 $I(2p)$ は、磁気光学効果と単純な比例関係にならない。検光子の角度を波長板の方位角 θ と一致させると、

$$\begin{aligned} I(0) &\approx I_0 T \\ I(p) &\approx I_0 T \cdot 4J_1(\delta_0) \cdot (\cos \Delta \cdot \eta_F - \sin \Delta \cdot \theta_F) \\ I(2p) &\approx I_0 T \cdot 4J_2(\delta_0) (1/2 \cdot \sin 2\alpha - \cos 2\alpha \cdot \sin \Delta \cdot \eta_F \\ &\quad - \cos 2\alpha \cdot \cos \Delta \cdot \theta_F) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、 $I(p)$ には位相差 Δ に応じて η_F 、 θ_F が混じった信号が現れる。また、 $I(2p)$ には、さらに方位角 θ を含む項のため、磁気光学効果の検出が困難になることが分かる。

ここで、 $\alpha=0$ とすると、

$$\begin{aligned} I(0) &\approx I_0 T \\ I(p) &\approx I_0 T \cdot 4J_1(\delta_0) \cdot (\cos \Delta \cdot \eta_F - \sin \Delta \cdot \theta_F) \\ I(2p) &\approx -I_0 T \cdot 4J_2(\delta_0) \cdot (\sin \Delta \cdot \eta_F + \cos \Delta \cdot \theta_F) \end{aligned} \quad (6)$$

となり、両周波数成分とも位相差 Δ と η_F 、 θ_F を含む信号が現れる。したがって、楕円率および回転角を分離して得るためには方位角 $\alpha=0$ 、位相差 $\Delta=0$ あるいは $\Delta=\theta/2$ にする必要があることがわかる。

図 14 に前述の測定条件で観察した磁気光学像を示す。

(a)と(b)は位相差 $\Delta=0$ で測定した磁気光学イメージで、(a)[p成分]は楕円率像、(b)[2p成分]は旋光角像を示す。一方、(c)と(d)は位相差 $\Delta=\pi/2$ で測定したもので、(c)[p成分]が旋光角像、(d)[2p成分]は楕円率像である。それぞれコントラストの異なる像が得られ、明瞭にマーク形状が確認できた。同じ旋光角の像なのに(b)と(c)とではコントラストが異なるのは

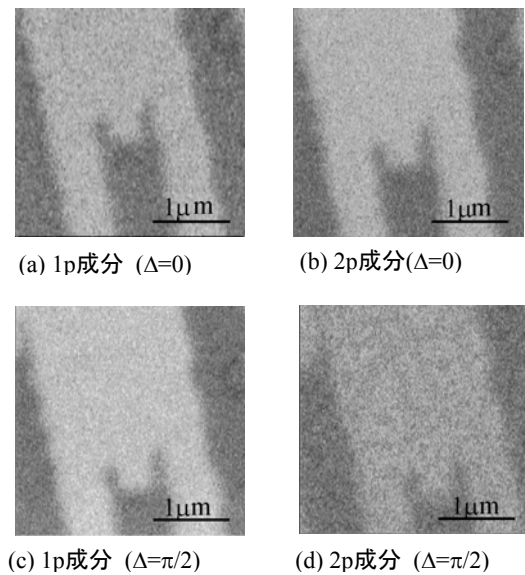


図 14 補償後に観測した Pt/Co-MO ディスクの記録マークの MO-SNOM 像 (a) $\Delta=0$, 1f 成分: 磁気楕円率像、(b) $\Delta=0$, 2f 成分: 磁気旋光像、(c) $\Delta=\pi/2$, 1f 成分: 磁気旋光像、(d) $\Delta=\pi/2$, 2f 成分: 磁気楕円率像

p 成分の検出系と 2p 成分の検出系のゲインの違いによると考えられる。

図 15 はマーク長 $0.2\ \mu\text{m}$ の矢羽型記録マークのカー楕円率による SNOM 像である。ラインスキャンにより、ほぼ 100nm の解像度が得られていることがわかる。矢羽形状の再現が悪いが、この観察に用いたプローブの先端開口部の形状がゆがんでいたためと見られる。

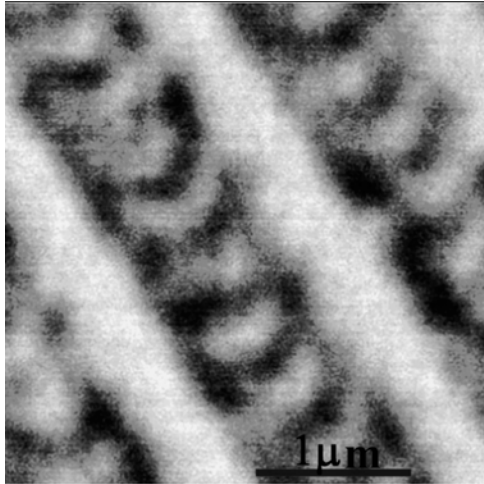


図 15 Pt/Co-MO ディスクに記録されたマーク長が $200\ \text{nm}$ の矢羽根形記録マークの MO-SNOM 像

参考文献

- 1 佐藤勝昭、清水伸一郎、手塚智之、石橋隆幸、森下義隆、瀬瀬明伯: ダマシシ法によるナノ磁性体埋込構造の作製と非線形磁気効果, 電気学会マグネティクス研究会資料 MAG03-131, 2003 年 10 月, p.21-26.
- 2 X. R. Zhao, N. Okazaki, Y. Konishi, K. Akahane, Z. Kuang, T. Ishibashi, K. Sato, H. Koinuma, and T. Hasegawa: Magneto-optical Imaging for High-Throughput Characterization of Combinatorial Magnetic Films, *Applied Surface Science* **Vol. 223**, No.1-3, (2004) p.73-77.
- 3 T. Ishibashi, Z. Kuang, Y. Konishi, K. Akahane, X. R. Zhao, T. Hasegawa and K. Sato: Novel Magneto-Optical Microscope using Polarization Modulation Technique; *Transaction of the Magnetic Society of Japan*, **Vol. 4** (2004) p. 278-281.
- 4 D.W.Pohl: *Near Field Optics* eds. D.W.Pohl and D. Courjon (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1993) p.1-5.
- 5 E.H. Syngé: A Suggested Method for Extending Microscopic Resolution into the Ultra-Microscopic Region”, *Philosophical Magazine* **Vol. 6** (1928) p. 356-362.
- 6 D. W. Pohl, W. Denk, and M. Lanz: Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$, *Applied Physics Letters*, **Vol. 44** Issue 7, (1984), p. 651-653.
- 7 D.W. Pohl, W. Denk and U. Dürig: Optical Stethoscopy: Imaging with $\lambda/20$, *Proceedings of SPIE* **565**, (SPIE, Washington, 1985), p.56-61.
- 8 A. Harootunian, E. Betzig, M. Isaacson and A. Lewis:

9. まとめと今後の課題

ベントタイプの光ファイバ・プローブを照射モードとして用いた透過型 SNOM において円偏光変調法を用いることによって鮮明な光磁気記録マークの磁気光学像を観察することができた。ベントタイプの光ファイバ・プローブの偏光伝達特性は波長板とほぼ同様であることがストークス法により確認されたので、適当な補償を行うことにより、変調周波数成分が磁気楕円率に、変調周波数の 2 倍の成分が磁気旋光にそれぞれ対応させることができた。開口部の直径が 80nm のプローブを用いて 100nm 程度の解像度を得ることに成功、 $0.2\ \mu\text{m}$ の長さの記録マークを明確に観測できた。

今後の課題としては、いかに偏光特性のよいファイバ・プローブを安定的に供給できるかという問題がある。実際、30 本に 1 本くらいしか、特性のよいプローブが得られなかった。また、反射の MO-SNOM 像を得るための努力をしたが、プローブが近づくると反射光が得られなくなり、よいデータが得られなかった。

本研究は、文部科学省科学研究費基盤研究(A)および特定領域研究(A)「微小領域の磁性と伝導」の助成を受けて行ったものである。また、円偏光変調法を用いた顕微鏡技術については、東京農工大学 21 世紀 COE プログラムの一環として進めているものである。

Super-resolution fluorescence near-field scanning optical microscopy, *Applied Physics Letters*, **Vol. 49** (1988) p. 674-676.

⁹ E. Bezig, J.K. Trautman, T.D. Harris, J.S. Weiner and R.L. Kostelak: Breaking the diffraction barrier: Optical microscopy on a nanometer scale, *Science* **Vol. 251** (1991) p.1468-1470.

¹⁰ E. Betzig, J.K. Trautman, R. Wolfe, E.M. Gyorgy, P.L. Finn, M.H. Kryder and C.-H. Chang: Near-field magneto-optics and high density data storage, *Applied Physics Letters*, **Vol. 61** (1992) p.142-144.

¹¹ T. Yatsui, M. Kourogi and M. Ohtsu: Increasing throughput of a near-field optical fiber probe over 1000 times by the use of a triple-tapered structure, *Applied Physics Letters*, **Vol. 73** (1998) p.2090-2092

¹² J. W. P. Hsu, Mark Lee and B. S. Deaver: A nonoptical tip-sample distance control method for near-field scanning optical microscopy using impedance changes in an electromechanical system, *Review of Scientific Instruments*, **Vol. 66**, Issue 5, (1995) 3177-3181.

¹³ B. L. Petersen, A. Bauer, G. Mayer, T. Creelius and G. Kaindl: Kerr-rotation imaging in scanning near-field optical microscopy using a modified Sagnac interferometer, *Applied Physics Letters*, **Vol. 73** (1998) 538-540.

¹⁴ E. B. McDaniel, S. C. McClain, and J. W. P. Hsu: Nanometer Scale Polarimetry Studies Using a Near-Field Scanning Optical Microscope, *Applied Optics*, **Vol. 37** (1998) p. 84-92.

¹⁵ H. Hatano, Y. Inoue and S. Kawata: A Near-Field Scanning Optical Microscope Which Measures Both Constant-Height and Constant-Gap Images, *Japanese Journal of Applied Physics*, **Vol. 37**, Part 2, No. 8B, (1998) L1008-L1010

-
- ¹⁶ M. Fujihira, H. Mononobe, H. Muramatsu and T. Ataka: Chemistry Letters **Vol.3** (1994) 657
- ¹⁷ N. Chiba, H. Muramatsu, T. Ataka, and M. Fujihira: Observation of Topography and Optical Image of Optical Fiber End by Atomic Force Mode Scanning Near-Field Optical Microscope, Japanese Journal of Applied Physics, **Vol. 34**, Part 1, No. 1, (1995) p.321-324.
- ¹⁸ K. Nakajima, Y. Mitsuoka, N. Chiba, H. Muramatsu, T. Ataka, K. Sato, M. Fujihira: Polarization effect in scanning near-field optic/atomic force microscopy (SNOM/AFM), Ultramicroscopy, **Vol. 71**, Issue 1-4, (1998) p.257-262
- ¹⁹ K. Sato: Measurement of Magneto-Optical Kerr Effect Using Piezo-Birefringent Modulator, Journal of Applied. Physics, **Vol. 20**, No. 12, (1981) p.2403-2409.
- ²⁰ T. Ishibashi, T. Yoshida, J. Yamamoto, K. Sato, Y. Mitsuoka and K. Nakajima: Magneto-optical imaging by scanning near-field optical microscope using polarization modulation technique, Journal of Magnetic Society of Japan, **Vol. 23**, No.1-2, (1999) p.712-714.
- ²¹ T. Ishibashi, T. Yoshida, A. Iijima, K. Sato, Y. Mitsuoka and K. Nakajima: Polarization Properties of Bent-type Optical Fiber Probe for Magneto-optical Imaging, J. Microscopy **Vol.194**, Issue 2-3, (1999) p.374-377.
- ²² 吉田武一心、山本仁、飯島文子、石橋隆幸、佐藤勝昭、中島邦雄、光岡靖幸：近接場磁気光学顕微鏡用プローブの偏光特性と磁気光学像；日本応用磁気学会誌 **Vol.23** No.9, (1999) p.1960-1964.
- ²³ 川上彰二郎、白石和男、大橋正治：光ファイバとファイバ形デバイス（培風館、1996）
- ²⁴ K.Sato, T.Ishibashi, T.Yoshida, J.Yamamoto, A.Iijima, Y.Mitsuoka, and K.Nakajima: Observation of Recorded Marks of MO Disk by Scanning Near-Field Magneto-Optical Microscope; Journal of Magnetic Society of Japan, **Vol. 23**, Suppl. S1 (1999) p.201-204