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

Polarization Properties of Bent Optical Fiber Probes and Magneto-Optical Imaging in Scanning Near-Field Optical Microscopy with the Polarization Modulation Technique

> 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* 東京農工大学工学部,東京都小金井市中町2-24-16 (電184-8588) *セイコーインスツルメンツ(株)基盤技術部,千葉県松戸市高塚新田 563 (電270-2222)

T. Yoshida, J. Yamamoto, A. Iijima, T. Ishibashi, K. Sato, K. Nakajima,* and Y. Mitsuoka*

Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2–24–16 Nakacho, Koganei, Tokyo 184–8588 *Technology Center, Seiko Instruments Inc., 563 Takatsuka-shinden, Matsudo, Chiba 270–2222

The scanning near-field optical microscope (SNOM) is well known as a tool for observing nano-structures. On that account, a SNOM to which a certain magneto-optical (MO) measurement technique is applied, or MO-SNOM, is likely to become a powerful tool for nanometric studies on magnetism. In our study, a transmission-illumination mode SNOM with a bent optical fiber probe, which operates as a cantilever in atomic force microscopy (AFM), was employed. Incorporation of the polarization modulation technique into this system has made it possible to resolve magnetic structures with a high sensitivity of up to 1 mrad and a resolution of approximately 1/5 times the wavelength of the light source (argon ion laser: 488 nm). The behavior of polarized light in the probes, however, prevents quantitative analysis of MO effects. This paper describes an investigation into the polarization properties of the bent optical fiber probes, based on their Stokes parameters. A method for acquiring pure signals dependent on ellipticity or rotation in MO imaging is presented.

Key words: scanning near-field optical microscopy, atomic force microscopy, magneto-optical effect, polarization modulation technique, bent optical fiber probe, Stokes parameters

1. はじめに

近年,磁気記録の高密度化が急速に進行するとともに、サブ ミクロンサイズのマークが記録されるようになり,媒体ノイズ が深刻になってきた.この状況の中,さらなる高記録密度を実 現するためには,記録状態を観察,評価し,媒体性能を向上さ せることが要求される.また、ナノメートルオーダーの微小領 域における磁性体の観察は磁気物性の基礎研究においても重要 である.そのため、微小な磁気構造を観察する手段として、走 査型近接場光学顕微鏡 (SNOM) に磁気光学 (MO) 効果測定技術 を応用した近接場磁気光学顕微鏡 (MO-SNOM) が注目されて いる.

SNOM を利用して微小な磁気構造を観察する研究は 1992 年の Betzig らによる報告¹¹以来,盛んに行われるようになり, 最近では,プローブの改良²,制御方法^{31,4},解析法⁵⁾,アーティ ファクト⁶⁾などに関する研究が多く報告されるようになった.

我々は以前に,原子間力顕微鏡 (AFM) のカンチレバーの代わりにベントタイプ光ファイバープローブを用いた SNOM に

クロスニコル法を適用し、磁気光学像の観察^{71.8)}を行った.しか し通常、磁気光学効果は非常に小さいためクロスニコル法では 検出感度が低いという問題があった.そこで、高感度化を目指 し、円偏光変調法⁹⁾を適用した近接場磁気光学顕微鏡の開発を 進めてきた.これまでに、この顕微鏡の感度と分解能を評価す るために、Pt/Co多層膜ディスク上に磁界変調法で記録された マークの観察¹⁰⁾を行い、その結果、磁気光学効果の感度 ~1 mrad、空間分解能 ~100 nm を得ることができたが、プローブ の偏光特性が円偏光変調法を用いた磁気光学効果の測定に影響 するため、定量化には至らなかった.

本研究では、ベントタイプ光ファイバープローブの偏光特性 をストークス法¹¹⁾で評価し、円偏光変調法を適用した SNOM における磁性材料の定量的観察を検討した.

2. プローブの偏光特性

2.1 測定装置

測定は Fig.1 に示すように,透過型 SNOM (セイコーインス ッルメンツ(株)製 SPI-3700) に,磁気光学効果測定用に光弾性 変調器 (PEM) と偏光子などを加えた装置で行った.ベントタ イプ光ファイバープローブの偏光特性をストークス法で測定す るために,フォトカプラの前に 1/2 波長板,検光子の直前に方 位角 0°の 1/4 波長板を任意に挿入できるように設置した.さ らに,3節で述べるプローブの補償を行うために,任意の方位 角および位相差を設定できる Berek 補償子を設置した.測定用



Fig. 1 Schematic diagram of SNOM with the polarization modulation technique combined with optical elements to measure the Stokes parameters.



Fig. 2 Magnification of a bent optical fiber probe.

プローブは Fig. 2 に示すように, ステップ形シングルモード ファイバーの先端部分を曲げ, 先鋭化, Al 被覆し, 150 nm 以 下の開口を有するベントタイプ光ファイバープローブを用い た. 光源は Ar⁺ レーザ(波長 488 nm)を用いた.

2.2 測定方法

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.フォトカプラの前に配置 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 光の伝播光成分をレンズ (NA=0.6)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.集光レンズおよび誘 電体ミラーによる偏光特性の影響は,後述するプローブによる ものよりも十分小さいと考えられるが,後述する偏光補償によ りそれらの影響は除外される.試料による偏光特性への影響を 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.

測定手順は次のとおりである.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.

 $S_{0}(\theta) = I_{x}(\theta) + I_{y}(\theta)$ $S_{1}(\theta) = I_{x}(\theta) - I_{y}(\theta)$ $S_{2}(\theta) = 2I_{xy}(\theta) - [I_{x}(\theta) + I_{y}(\theta)]$ $S_{3}(\theta) = 2I_{qxy}(\theta) - [I_{x}(\theta) + I_{y}(\theta)]$ (1)

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、(2) 式となる.

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

Fig. 3 にベントタイプ光ファイバープローブのストークスパ ラメータを測定した結果を示す. $S_1(\theta)$, $S_2(\theta)$, $S_3(\theta)$ は全光強度 $S_0(\theta)$ で規格化し, プロットした. $S_1(\theta)$, $S_2(\theta)$, $S_3(\theta)$ 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が変化していることから波長板のよ うにふるまうことがわかる. 波形のわずかな歪みはベント部



Fig. 3 Polarization property of a bent optical fiber probe.

分,テイパー部分,開口部分の形状の非対称性から生じると考 えられる。

一般的に SNOM で使用されるストレートタイププローブに おいても位相差が生じるが、ベントタイププローブではベン ディングによる光弾性により、位相差が生じたり、クラッドを 伝播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播する成分であると考えられる.

プローブの偏光特性の補償

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 ときの波長板のストークスパラメータは,(3)式で表せる.

$$S_{0}(\theta) = 1$$

$$S_{1}(\theta) = \cos 2\alpha \cdot \cos 2(\theta - \alpha)$$

$$-\cos \Delta \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin 2(\theta - \alpha)$$

$$S_{2}(\theta) = \sin 2\alpha \cdot \cos 2(\theta - \alpha)$$

$$+\cos \Delta \cdot \cos 2\alpha \cdot \sin 2(\theta - \alpha)$$

$$S_{3}(\theta) = \sin \Delta \cdot \sin 2(\theta - \alpha)$$
(3)

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.

そこで Berek 補償子の方位角を $\alpha + \pi/2$, 位相差を Δ に調節



Fig. 4 Polarization property of a bent optical fiber probe after compensation.

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 9, 1999

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 Fig.4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、 $S_1(\theta) \ge S_2(\theta)$ の変化は入射直線偏光の 回転を表している.以上から、ベントタイプ光ファイバープ 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.

4. 磁気光学像の観察

4.1 円偏光変調法

ベントタイプ光ファイバプローブが波長板として扱えるとし たときに、円偏光変調法で得られる信号について考える. 初め に、円偏光変調法の測定原理を以下に示す. 光弾性変調器 (PEM) で 45°方向の入射直線偏光に変調周波数 f (Hz) で位相 差 $\delta = \delta_0 \sin 2\pi ft$ を与えて偏光状態を変調させ,その変調光が 磁気光学効果(ファラデー楕円率 $\eta_{\rm F}$,ファラデー回転角 $\theta_{\rm F}$)を もつ試料および角度 0°の検光子を透過するとき,その光強度 には直流成分I(0)以外に,変調周波数成分I(f), 2次高調波成 分I(2f)が現れる.

 $egin{aligned} &I(heta) pprox I_0 T \ &I(f) pprox I_0 T \cdot 4 J_1(\delta_0) \cdot \eta_{
m F} \ &I(2\,f) pprox - I_0 T \cdot 4 J_2(\delta_0) \cdot heta_{
m F} \end{aligned}$

ここで, I_0 , T, δ_0 , $J_n(\delta_0)$ はそれぞれ, 光強度, 試料の透過率, PEM により生じる位相差, ベッセル関数である. (4) 式からわ かるように, I(f), I(2f) はそれぞれ, η_F , θ_F に比例する. しかし, 光軸に波長板(位相差 Δ , 方位角 α)が存在する場合, I(f), I(2f) 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 α と一致させると,

 $I(0) \approx I_0 T$ $I(f) \approx I_0 T \cdot 4J_1(\delta_0) \cdot (\cos \varDelta \cdot \eta_{\rm F} - \sin \varDelta \cdot \theta_{\rm F})$ $I(2f) \approx I_0 T \cdot 4J_2(\delta_0)$ (5)

×(1/2・sin 2α -cos 2α ・sin Δ ・ $\eta_{\rm F}$ -cos 2α ・cos Δ ・ $\theta_{\rm F}$) となり, I(f)には位相差 Δ に応じて $\eta_{\rm F}$, $\theta_{\rm F}$ が混ざった信号が現 れる.また, I(2f)には、さらに方位角 α 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わかる.

ここで、さらに、α=0とすると、

$$I(0)\approx I_0T$$

 $I(f) \approx I_0 T \cdot 4J_1(\delta_0) \cdot (\cos \varDelta \cdot \eta_{\rm F} - \sin \varDelta \cdot \theta_{\rm F})$ (6) $I(2f) \approx -I_0 T \cdot 4J_2(\delta_0) \cdot (\sin \varDelta \cdot \eta_{\rm F} + \cos \varDelta \cdot \theta_{\rm F})$

となり,両周波数成分とも位相差 $\Delta \ge \eta_{\rm F}, \theta_{\rm F}$ 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 α =0,位相差 Δ =0,あるいは Δ = $\pi/2$ にする必要があることがわかる.

4.2 観察用試料

磁気光学像観察用の試料として、光パルス磁界変調法により マークが記録された Pt/Co 多層膜ディスクを用いた.この ディスクはガラス基板上に Pt(8Å)/Co(3Å)を150Å 積層した 構造をもつ.トラックピッチは 1.6 μ m、マーク長は 6 μ m で、 この多層膜の磁気光学効果は、ファラデー楕円率 $\eta_{\rm F} \sim 0.47^\circ$ 、 ファラデー回転角 $\theta_{\rm F} \sim 0.74^\circ$ である.Fig.5は円偏光変調法を 適用した MO-SNOM を用いて、8×8 μ m で観察したトポグラ



Fig. 5 Topographic image (left) and magneto-optical image (right) obtained with an MO-SNOM. The scanned area is $8 \times 8 \,\mu m^2$. Recorded marks were written on a Pt/Co multi-layer disk (track pitch: 1.6 μ m, mark length: $6 \,\mu$ m) by the light pulse magnetic field modulation technique.

フィと磁気光学像である. MO 像からわかるように, マーク形 状は磁界変調法特有のものである.

4.3 観察方法

(4)

Fig. 5 において, トラック付近のコントラストの変化からわ かるように, 通常, プローブ顕微鏡ではトポグラフィーに依存 して光強度が変化する効果 (アーティファクト)が現れ, 見か け上の像が観察されてしまう. そのため, 測定はトラックのな い平坦な部分で行い, 光強度が一定になるようにした. 磁気光 学像の観察は Fig. 1 のシステムにおいて, AOM を使用せずに 行った. PEM による変調を行い, 円偏光変調法で測定した. ス キャンエリアは $3 \times 3 \mu m$, ロックインアンプのレンジは 300 μV にした.

観察は以下のように行った.

①あらかじめ、プローブの偏光特性を測定して偏光補償 (Δ =0)し、1f成分と2f成分を観察した.

②さらに、補償子の位相差を調節し、 $\Delta = \pi/2$ にして、1f成分と 2f成分を観察した.

4.4 観察結果と考察

Fig. 6 に前述の測定条件で観察した磁気光学像を示す. 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. Fig. $6(a) \ge (b)$ ではコントラストに大きな差は見ら れないが, Fig. $6(c) \ge (d)$ ではかなり差があることがわかる. この違いは 1f 成分 2f 成分の信号に対する係数 28 層膜が もつ磁気光学効果の違いから生じると思われる.

ここで、プローブの位相差 $\Delta=0, \pi/2$ のときに検出される信 号強度について考える. 1f成分と 2f成分の信号強度は、実際 の測定では、測定系の感度をかけた量になるので、(6) 式より、

 $I(0)\approx I_0T\cdot C_0$

 $I(f) \approx I_0 T \cdot 4J_1(\delta_0) \cdot C_1 \cdot (\cos \varDelta \cdot \eta_{\rm F} - \sin \varDelta \cdot \theta_{\rm F})$ (7) $I(2f) \approx -I_0 T \cdot 4J_2(\delta_0) \cdot C_2 \cdot (\sin \varDelta \cdot \eta_{\rm F} + \cos \varDelta \cdot \theta_{\rm F})$

と表せる. $C_0, C_1,$ および C_2 はシステムの周波数特性およびプ

ローブの偏光度などによって決まる係数である.

今回の測定条件において、プローブの偏光特性が完全に補償 されていた場合,(7)式から Fig. 6(a),(d) は $\eta_{\rm F}$ に依存し、Fig. 6(b),(c) は $\theta_{\rm F}$ に依存した像が得られると考えられる.

(7) 式において

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 9, 1999



(a) 1f component at $\Delta = 0$



(c) 1f component at $\Delta = \pi/2$ (d) 2f component at $\Delta = \pi/2$

Fig. 6 Magneto-optical images of 1f component and 2f component with the retardation of the optical fiber probe adjusted to 0 and $\pi/2$; (a) 1f at $\Delta = 0$, (b) 2f at $\Delta = 0$, (c) 1f at $\Delta = \pi/2$, (d) 2f at $\Delta = \pi/2$. The scanned area is $3 \times 3 \,\mu m^2$ in all the images.

 $K_f = 4 J_1(\delta_0) \cdot (C_1/C_0)$ (8) $K_{2f} = -4J_2(\delta_0) \cdot (C_2/C_0)$

とおくと、 $\Delta = 0, \pi/2$ のときに検出される信号成分から、ファ ラデー楕円率およびファラデー回転角は,

$$\begin{aligned}
\Delta &= 0 \quad \mathcal{O} \\
\exists \\
\eta_{\mathrm{F}} \approx K_{f}^{-1} \cdot I(f) / I(0) \\
\theta_{\mathrm{F}} \approx K_{2f}^{-1} \cdot I(2f) / I(0)
\end{aligned}$$
(9)

Δ=π/2 の場合 $\theta_{\rm F} \approx K_f^{-1} \cdot I(f) / I(0)$ (10) $\eta_{\rm F} \approx K_f^{-1} \cdot I(2f)/I(0)$

と表せる. すなわち, それぞれの信号成分 I(0), I(f), I(2f) を測 定し,係数を求めると,楕円率と回転角を求めることができる.

ここで, Fig. 6 の像からそれぞれの信号成分について信号強 度を見積もり、それらを使って楕円率と回転角の大きさを表現 してみる.

Fig.6(a), (b) について, 像のラインプロファイルから信号強 度を算出すると, それぞれ

$$I(f) = 75 \,\mu V$$

 $I(2f) = 90 \,\mu V$ (11)

であった.

また, Fig. 6(c), (d) について信号強度を算出すると, それぞ れ

$$I(f) = 216 \,\mu \text{V}$$

 $I(2f) = 66 \,\mu \text{V}$ (12)

という結果が得られた.

ここで, Kf および K2f を考慮すると

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 9, 1999

が得られる. Pt/Co多層膜の楕円率(0.47°)と回転角(0.74°)の 比と比較すると、 A=0 においては誤差があるものの矛盾しな い結果になった. $\Delta = \pi/2$ においては、かなりよい一致が得ら れた. ⊿=0におけるずれは、プローブの偏光の補償が十分で ないことや、測定上の誤差によるものと思われる.以上のこと から,プローブの偏光補償を行うことで,1f,2fの信号成分か ら、それぞれの磁気光学効果をほぼ分離して得ることができる と考えられる.

今回の実験は、ベントタイプ光ファイバープローブの偏光特 性と磁気光学像のコントラストの関係に注目して行ったので, 磁気光学効果の絶対値は求めていない、しかし、プローブの偏 光補償がほぼ可能であること、得られた磁気光学像のコントラ ストが磁気光学効果と測定系の感度に比例していることから, 直流成分 I(0) を測定することで定量化が可能であると考えら れる

5. ま と め

今回, ベントタイプ光ファイバーの偏光特性をストークス法 で評価した.以下にまとめる.

(1) プローブの開口から出射される伝播光成分の偏光度 P は 0.93 以上というかなり高い値が得られた. プローブ内で偏 光はほぼ保存されているといえる.

(2) ストークスパラメータの入射直線偏光の回転角依存性 から、プローブは波長板としてふるまい、補償子による偏光補 償が可能であるといえる.

(3) Pt/Co多層膜上の記録マークを近接場磁気光学顕微鏡 で観察した. プローブの偏光特性を補償することにより, 楕円 率と回転角,それぞれに依存する磁気光学像が得られた.この ことから直流成分を測定することにより、定量化が可能である と考えられる.

謝 辞 本研究に用いた Pt/Co 多層膜ディスクをご提供い ただいた(株)日立製作所中央研究所の牛山順子氏に感謝いたし ます. また本研究は科研費基盤研究 A の助成を受けて行われ ました. 関係者各位に感謝いたします.

文 献

- 1) E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M. H. Kryder, and C. H. Chang: Appl. Phys. Lett., 61, 142 (1992).
- 2) T. Yatsui, M. Kourogi, and M. Ohtsu: Appl. Phys. Lett, 73, 2090 (1998)
- 3) J. W. P. Hsu, Mark Lee, and B. S. Deaver: Rev. Sci. Instrum., 66, 3177 (1995).
- 4) B. L. Petersen, A. Bauer, G. Mayer, T. Crecelius, and G. Kaindl: Appl. Phys. Lett., 73, 538 (1998).
- 5) E. B. McDaniel, S. C. McClain, and J. W. P. Hsu: Appl. Opt., 37,

84 (1998).

- H. Hatano, Y. Inoue, and S. Kawata: Jpn. Appl. Phys., 37, L1008 (1998).
- Y. Mitsuoka, K. Nakajima, K. Honma, N. Chiba, H. Muramatsu, and T. Akita: J. Appl. Phys., 83, 3998 (1998).
- 8) K. Nakajima, Y. Mitsuoka, N. Chiba, H. Muramatsu, T. Ataka, K. Sato, and M. Fujihira: *Ultramicroscopy*, **71**, 257 (1998).
- 9) K. Sato: Jpn. J. Appl. Phys., 20, 2403 (1981).
- T. Ishibashi, T. Yoshida, J. Yamamoto, K. Sato, Y. Mitsuoka, and K. Nakajima: J. Magn. Soc. Jpn., 23 (to be published).
- 11) 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).

1999年3月8日受理, 1999年6月16日採録