

# 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 (☎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 (☎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) 効果測定技術を用い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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>、制御方法<sup>3), 4)</sup>、解析法<sup>5)</sup>、アーティファクト<sup>6)</sup>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、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<sup>7), 8)</sup>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<sup>9)</sup>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<sup>10)</sup>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プローブの偏光特性をストークス法<sup>11)</sup>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 (セイコーインスツルメンツ(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

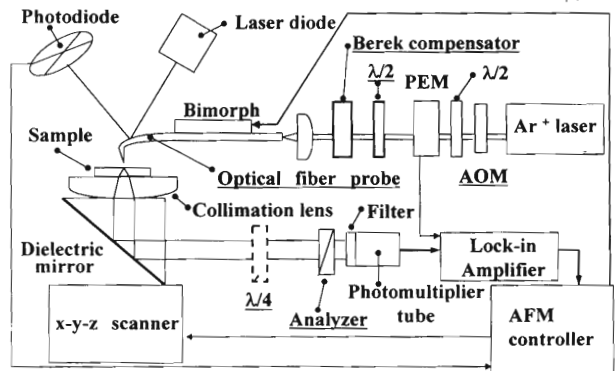


Fig. 1 Schematic diagram of SNOM with the polarization modulation technique combined with optical elements to measure the Stokes parameters.

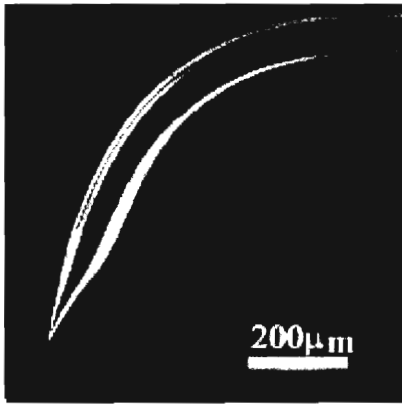


Fig. 2 Magnification of a bent optical fiber probe.

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<sup>+</sup> 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  $\theta$  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  $0^\circ$  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  $\theta$  に対し、透過軸が  $0^\circ$  ( $x$  軸方向)、 $45^\circ$ ,  $90^\circ$  ( $y$  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 ( $0^\circ$ ) を挿入し、検光子 ( $45^\circ$ ) を透過後の光強度  $I_{q45}(\theta)$  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。

$$\begin{aligned} S_0(\theta) &= I_x(\theta) + I_y(\theta) \\ S_1(\theta) &= I_x(\theta) - I_y(\theta) \\ S_2(\theta) &= 2I_{xy}(\theta) - [I_x(\theta) + I_y(\theta)] \\ S_3(\theta) &= 2I_{q45}(\theta) - [I_x(\theta) + I_y(\theta)] \end{aligned} \quad (1)$$

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、 $45^\circ$  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。

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

### 2.3 プローブのストークスパラメータ

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  $\theta$  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

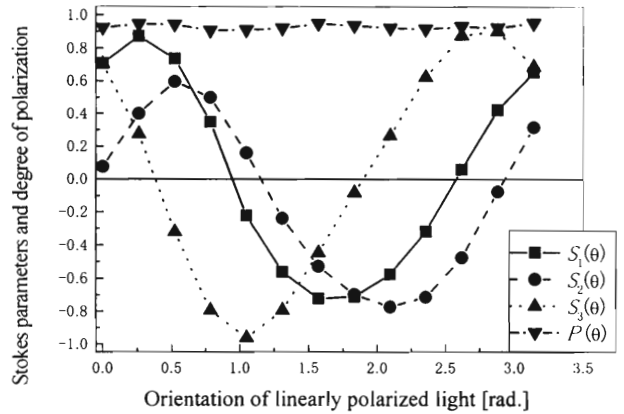


Fig. 3 Polarization property of a bent optical fiber probe.

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。

### 3. プローブの偏光特性の補償

方位角  $\alpha$ 、位相差  $\Delta$  の波長板に角度  $\theta$  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。

$$\begin{aligned} S_0(\theta) &= 1 \\ S_1(\theta) &= \cos 2\alpha \cdot \cos 2(\theta - \alpha) \\ &\quad - \cos \Delta \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin 2(\theta - \alpha) \\ S_2(\theta) &= \sin 2\alpha \cdot \cos 2(\theta - \alpha) \\ &\quad + \cos \Delta \cdot \cos 2\alpha \cdot \sin 2(\theta - \alpha) \\ S_3(\theta) &= \sin \Delta \cdot \sin 2(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

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  $\Delta$ 、正弦波の位相から方位角  $\alpha$  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  $\Delta$  に調節

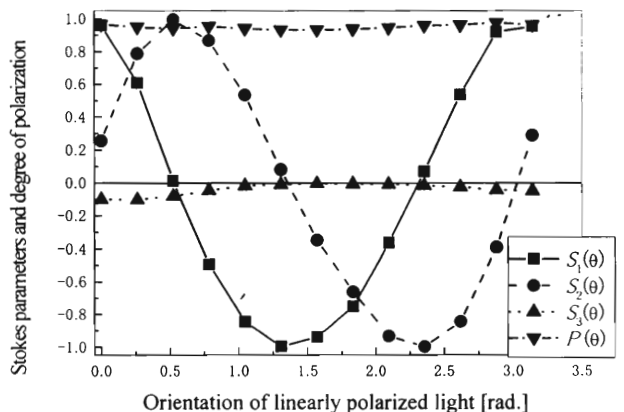


Fig. 4 Polarization property of a bent optical fiber probe after compensation.

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、 $S_1(\theta)$  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、ベントタイプ光ファイバプローブは、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  $45^\circ$  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  $\eta_F$ , ファラデー回転角  $\theta_F$ ) をもつ試料および角度  $0^\circ$  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。

$$\begin{aligned} I(\theta) &\approx I_0 T \\ I(f) &\approx I_0 T \cdot 4J_1(\delta_0) \cdot \eta_F \\ I(2f) &\approx -I_0 T \cdot 4J_2(\delta_0) \cdot \theta_F \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $I_0$ ,  $T$ ,  $\delta_0$ ,  $J_n(\delta_0)$  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、 $\eta_F$ ,  $\theta_F$  に比例する。しかし、光軸に波長板 (位相差  $\Delta$ , 方位角  $\alpha$ ) 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  $\alpha$  と一致させると、

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

となり、 $I(f)$  には位相差  $\Delta$  に応じて  $\eta_F$ ,  $\theta_F$  が混ざった信号が現れる。また、 $I(2f)$  には、さらに方位角  $\alpha$  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、 $\alpha = 0$  とすると、

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

となり、両周波数成分とも位相差  $\Delta$  と  $\eta_F$ ,  $\theta_F$  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  $\Delta = \pi/2$  にする必要がわかる。

##### 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  $\mu\text{m}$ , マーク長は 6  $\mu\text{m}$  で、この多層膜の磁気光学効果は、ファラデー楕円率  $\eta_F \sim 0.47^\circ$ , ファラデー回転角  $\theta_F \sim 0.74^\circ$  である。Fig. 5 は円偏光変調法を適用した MO-SNOM を用いて、 $8 \times 8 \mu\text{m}$  で観察したトポグラ

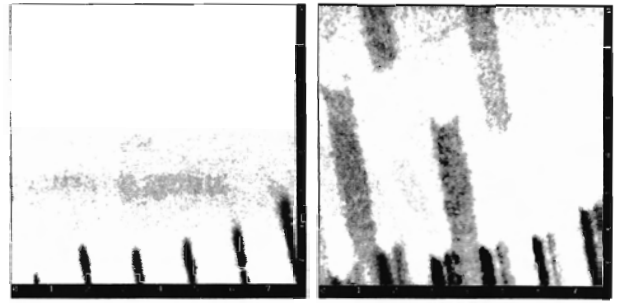


Fig. 5 Topographic image (left) and magneto-optical image (right) obtained with an MO-SNOM. The scanned area is  $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ . Recorded marks were written on a Pt/Co multi-layer disk (track pitch: 1.6  $\mu\text{m}$ , mark length: 6  $\mu\text{m}$ ) by the light pulse magnetic field modulation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

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  $3 \times 3 \mu\text{m}$ , ロックインアンプのレンジは 300  $\mu\text{V}$  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 ( $\Delta = 0$ ) 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) と (b) ではコントラストに大きな差は見られないが、Fig. 6(c) と (d) ではかなり差があることがわかる。この違いは  $1f$  成分と  $2f$  成分の信号に対する係数と多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、

$$\begin{aligned} I(0) &\approx I_0 T \cdot C_0 \\ I(f) &\approx I_0 T \cdot 4J_1(\delta_0) \cdot C_1 \cdot (\cos \Delta \cdot \eta_F - \sin \Delta \cdot \theta_F) \\ I(2f) &\approx -I_0 T \cdot 4J_2(\delta_0) \cdot C_2 \cdot (\sin \Delta \cdot \eta_F + \cos \Delta \cdot \theta_F) \end{aligned} \quad (7)$$

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  $\eta_F$  に依存し、Fig. 6(b), (c) は  $\theta_F$  に依存した像が得られると考えられる。

(7) 式において

- 84 (1998).
- 6) H. Hatano, Y. Inoue, and S. Kawata: *Jpn. Appl. Phys.*, **37**, L1008 (1998).
  - 7) 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).
  - 10) 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