磁性流体を用いた磁場センシング*

大谷 幸利** 棚橋 昌史*** 吉澤 徹**

Magnetic Field Sensing using Magnetic Fluids

Yukitoshi Otani, Atsushi Tanahashi and Toru Yoshizawa

Birefringence occurs when light passes through a magnetic fluid in a magnetic field. The phase difference caused by this phenomenon increases as the magnetic field is intensified. We have proposed an optical heterodyne method using Stabilized Transverse Zeeman Laser(STZL) for the detection of this phase difference caused by a magnetic field. Here analytical and experimental considerations are given to improve the conventional method. Higher sensitivity can be realized owing to the reflection type sensing used in an improved optical arrangement. An optical fiber is also proved to be applicable when the temperature is compensated for.

Key words: birefringence, magnetic fluid, optical heterodyne, fiber sensor

1. ま え が き

磁性流体は、機能材料の新素材として幅広い応用が期待されている。そのなかで「強磁性コロイド溶液である」という性質から光学的複屈折をもつことが報告されており¹⁾、磁場センサへの試みもなされている²⁾。それらでは2枚の偏光子を使用し、透過光の光強度比から磁気複屈折量を測定する方法がとられてきた。しかし、この手法では外乱光や光源光強度の揺らぎ、受光素子の特性による影響を受けやすいなどの問題点がある。筆者らは、周波数安定化横ゼーマンレーザ³⁾を光源とした光ヘテロダイン干渉法により複屈折位相差を測定する手法⁴⁾の開発を行ってきた。これにより高い感度をもつ実用的な測定が可能となった。今回、磁場の強度だけでなく方位を考慮し、光のストークスパラメータを用いて複屈折位相差の算出を行うとともに、反射型測定法⁵⁾により光を磁性流体中に2回透過させ感度の増大を図った。さらにその応用例として偏波面保存光ファイバを使用することにより光ファイバ磁場センシングを試みた。ここで使用した干渉計では、温度などの外乱の影響により生ずる偏波面保存光ファイ

バの複屈折位相差を補償でき、精度よいセンシングが可能となった。

2. 磁性流体の磁気複屈折性

磁性流体は水やケロシン、イソパラフィンなどの有機溶媒の液体中にコロイドサイズ（直径約10nm）のマグネタイト強磁性微粒子を混入し、オレイン酸などの界面活性剤を用いて安定分散させた溶液である。通常は黒色不透明であるが、液体のまま数10 μ m オーダの厚みにすると光を透過するようになる。図1に示すように磁場中の磁性流体に光が入射すると磁気複屈折が生じ、磁場方向に平行な方向と垂直な方向に位相差が生じる。これは磁性流体中の強磁性微粒子が磁場により磁化されて方向性を持って配列するため、磁場方向

Fig.1 Birefringence of light passing through the magnetic fluid.

* 原稿受付 平成4年8月24日

** 正会員 東京農工大学工学部（小金井市中町2-24-16）

*** 学生会員 東京農工大学工学部

とそれに垂直な方向とでは誘電率が異なり光学的異方性が生じることに起因する。このときそれぞれの方向の屈折率を $n_{\parallel}$, $n_{\perp}$ とすると、厚さ d の磁性流体を透過した光に生じるリターディション ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_{\parallel} - n_{\perp}) \quad (1)$$

ここで、 λ は光の波長である。屈折率 $n_{\parallel}$, $n_{\perp}$ は強磁性微粒子の配列の割合により変化し、複屈折量 ($n_{\parallel} - n_{\perp}$) の値は磁場強度の増加に伴い飽和的に大きくなる傾向がある。したがって磁性流体に印加される磁場強度は位相差を測定することにより計測することができる。

3. 位相差測定による磁場センシング

3.1 理論的検討

図2のような光学系において、おのおのの光学素子をミュラー行列で表し、それらを透過した光のストークスパラメータ⁶⁾を考えることにより、磁場の強度と方位を考慮した複屈折位相差を求める。

Fig.2 Optical arrangement for analyzing phase difference induced magnetic field birefringence.

光源である直交2周波光のストークスベクトル $S^{(7)}$ は次のように表される。

$$S = \begin{bmatrix} a_x^2 + a_y^2 \\ a_x^2 - a_y^2 \\ 2a_x a_y \cos \omega_b t \\ 2a_x a_y \sin \omega_b t \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで図2に示すとおり、直交2周波光の成分の方向をそれぞれ x , y 方向とし、 x 方向を方位0とする。 a_x , a_y はそれぞれ x , y 成分の振幅、 t は時間、 ω_b は2周波数の差のビート周波数である。磁性流体中で生じる磁気複屈折の主軸方向は印加される磁場の方向となる。この磁場の方位を θ とすれば、磁性流体の磁場強度によって生じる複屈折は式(1)で示したリターディション ϕ と方位 θ で表され、この位相子のミュ

ーラ行列 M は式(3)で与えられる。

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \phi) \sin^2 2\theta & (1 - \cos \phi) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \phi \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \phi) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos \phi) \cos^2 2\theta & \sin \phi \cos 2\theta \\ 0 & \sin \phi \sin 2\theta & -\sin \phi \cos 2\theta & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

また方位 45° 偏光子のミュラー行列 P は式(4)で与えられる。

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

45° 偏光子透過後の光のストークスベクトル I は式(5)の演算で得られる。

$$I = P \cdot M \cdot S \quad (5)$$

フォトディテクタで得られる光強度 I_0 は式(5)のストークスベクトルの第1行となり式(6), (7)のように表される。

$$I_0 = \frac{1}{2} \{1 + (1 - \cos \phi) \sin 2\theta \cos 2\theta\} a_x^2 + \frac{1}{2} \{1 - (1 - \cos \phi) \sin 2\theta \cos 2\theta\} a_y^2 + a_x a_y \left[\{1 - (1 - \cos \phi) \cos^2 2\theta\}^2 + \{\sin \phi \cos 2\theta\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times \cos \{\omega_b t - \psi(\theta, \phi)\} \quad (6)$$

$$\psi(\theta, \phi) = \tan^{-1} \frac{\sin \phi \cos 2\theta}{1 - (1 - \cos \phi) \cos^2 2\theta} \quad (7)$$

この光強度信号は周波数 ω_b のビート信号であり、その位相 $\psi(\theta, \phi)$ はリターディション ϕ 、および磁場の方位 θ の関数となる。いいかえれば、得られるビート信号の位相変化は磁場の強度と磁場の方位に起因するものとなる。いま磁場強度が一定であるとき、つまり ϕ を一定としたとき、パラメータ θ に対する $\psi(\theta, \phi)$ の値は図3のような変化をする。図3より $\psi(\theta, \phi)$ は変曲点をもつ π 周期の関数であり、

Fig.3 Relation of phase difference and azimuthal angle of magnetic field.

$\theta = 0, \pi/2, 3\pi/2, \dots$ で極大値, 極小値をとることがわかる。つまり磁場の方位が直交 2 周波光の方位と一致したとき, 検出位相差の変化量が最大となる。

3. 2 実験的検討

磁性流体の磁気複屈折による位相差測定は, 周波数安定化横ゼーマンレーザ STZL (Stabilized Transverse Zeeman Laser) を光源とした光ヘテロダイン干渉法により行った。使用した光学系を図 4 に示す。STZL からの発振光は周波数の非常に接近した互いに直交する 2 つの直線偏光となっており, それぞれの偏光面は x, y 方向である。光アイソレータを出射した 2 偏光はミラーの反射により磁場中の磁性流体を 2 回透過し, 2 倍の磁気複屈折を受けるとともに同一光路を戻す。ここで磁性流体に印加する磁場は電磁石を用い, 電流によって変化させた。磁場の方位は x 方向とした。2 倍の位相情報をもった戻り光は光アイソレータによりレーザ側へは戻らずそれとは直角の方向に出射し, 検光子で干渉された後, フォトディテク

Fig.4 Experimental arrangement for sensing of magnetic field.

HWP: Half wave plate with 67.5° azimuthal angle
PBS: Polarizing beam splitter
FR: Faraday rotator

Fig.5 Optical arrangement of isolator.

タにより光電変換されビート信号として検出する。フォトディテクタで検出されるビート信号は次式で表すことができる。

$$I_0 = \frac{1}{2} [a_x^2 + a_y^2 + 2a_x a_y \cos(\omega_0 t - 2\phi)] \quad (8)$$

この検出信号を STZL の制御信号を基準信号として位相計により位相検出する。

測定に用いた光アイソレータの光学系を図 5 に示す。光アイソレータに入射した 2 つの直交する直線偏光は偏光ビームスプリッタ PBS1 で x, y 方向成分に分かれ, ファラデー回転子により反時計方向に 45° 旋光する。さらに進相軸方位が 67.5° の $1/2$ 波長板 HWP を通過することにより, 反時計方向に 45° の旋光を受けるので入射光とは 90° 方位の異なる 2 直線偏光として PBS2 で再び重ね合わされる。一方戻り光は PBS2 で x, y 方向成分に分けられ HWP, FR を通過するが, HWP は光の進行方向に対して常に同じ方向に旋光させ, FR は前進光とは逆方向に旋光させる。よって PBS1 で再び重ね合わされた 2 直線偏光はレーザ側へは戻らず, それと直交する方向に出射され, アイソレータとして機能することになる。

3. 3 結果と考察

今回測定に用いた磁性流体を表 1 に示す。前節で述べた反射型光学系による 2 回透過の場合と往路のみで得た 1 回透過の場合についての結果を図 6 に示す。磁場強度と位相差との関係は単調で滑らかな曲線で表されており, 磁場強度の増加に伴い位相差も増加する。これは磁性流体中の強磁性微粒子の磁化と配向の性質に起因すると考えられる。12mT 以下の弱磁場下においては関係が直線的であり, 測定位相差から磁場強度を求めるのに都合がよく, またその傾きも大きいので測定位相差から感度よく磁場強度を得ることができる。2 回透過による位相差は 1 回透過による値の 2 倍量となっており, 測定感度の倍増が可能となっている。

この光ヘテロダイン法による測定方式は位相計により電氣的に位相検出を行っているので, 0.1° までの位相分解能をもつ。したがって, 図 6 の直線範囲を用いることによって 12mT の範囲で 0.01mT の感度をもつ。さ

Table 1 Fundamental properties of magnetic fluids

Item Sample	Diameter of ferromagnetic particle	Solvent	Thickness $d(\mu\text{m})$	Concentration (vol%)	Coefficient of viscosity (cp) at 25°C	Transmittance (%)
No.1	Smaller than 12nm	Kerosene	15	6.0	—	31.1
No.2	Smaller than 12nm	Kerosene	30	12.0	15.7	9.17

Fig.6 Relation of magnetic field and phase difference. (Sample No.1)

らに直線範囲を越えて飽和磁場まで測定を行えば25mTまで測定が可能となる。ただしこの場合、磁場強度への変換はルックアップテーブルを使う必要があり、感度は直線範囲を越えると悪くなる。

4. 光ファイバを導入した磁場センシング

4. 1 実験

磁場センシングを行う際に前章に述べた光学系は空間伝播であった。この測定法を応用して、光ファイバによって各コンポーネントを結合し、フレキシブルな磁場センシングを試みた。偏波面保存光ファイバは2つの直交固有モードをもっているため直交する2偏光を独立して伝送することができる。したがってSTZLを光源とした光ヘテロダイン干渉法による位相差測定において、STZLから測定部までの光の経路に偏波面保存光ファイバPMFを用いて測定を行った。

図7に光学系を示す。STZLからの2直線偏光はアイソレータを通過後、屈折率分布型レンズで集光されて1本の偏波面保存光ファイバPMF (PANDA型ファイバ, 長さ10m) に入射される。入射光の偏光面と

PMFの偏光軸を合わせれば偏光は保持され、出射光も2直線偏光となっている。この出射光はビームスプリッタBSで2分岐され、透過光はミラーにより磁性流体を往復で2回透過するので、2倍の位相変化を受け同一光路を戻る。この戻り光はBSで反射され、検光子を透過することにより干渉され、ビート信号としてマルチモードファイバMFで光強度伝送される。一方、反射光は検光子を透過することにより干渉され、参照信号としてMFで光強度伝送される。ミラーで反射された戻り光のうちBSを透過した光はPMF中を戻るが、アイソレータによりレーザ側へは戻らずレーザの安定度は保たれる。MFで伝送された干渉ビート信号はそれぞれフォトディテクタPD1, PD2で光電変換される。PD2の出力信号を参照信号とし、磁性流体で生じた位相変化の情報をもったPD1の出力信号を検出信号として位相計1で位相検出する。

偏波面保存光ファイバを用いた干渉計では、ファイバが測定対象以外の外乱(温度、ストレスなど)の影響を受け易い。図7に示す光ファイバを用いた干渉計では、光がPMFを伝播した後にビームスプリッタで分岐し、その一方が参照光となるようにしているため外乱によってPMFの固有モード間に生じる複屈折位相差を補償できる。そこで温度補償効果を検証するために、PMFの一部をコイル状にしてプレート状のヒーターに載せ、その温度変化に対する位相計1の出力を測定した。同時に温度補償のない場合と比較するために、PMFを伝播した光の干渉ビート信号とSTZLの安定制御に用いる基準信号とを位相計2で位相検出しその出力を測定した。

4. 2 結果と考察

図8に光ファイバを用いたときの磁場強度と位相差との関係を示す。前章で明らかにしたとおり、2直線偏光の偏光面と磁場の方位が一致したときに複屈折位相差は最大値を示す。したがって未知磁場を測定する際には測定部を一体化し、その測定部を回転して最大位相差値を示す角度を測定すれば、磁場の方位が検出

Fig.7 Experimental arrangement using optical fiber for the sensing of magnetic field.

Fig.8 Relation of magnetic field and phase difference with fiber sensing. (Sample No.2)

(a)With temperature compensation

(b)Without temperature compensation

Fig.9 Effect of temperature compensation.

できる。そのときの磁場強度は図8の関係から求めることができる。

温度補償効果の実験結果を図9 (a), (b)に示す。図9はプレートの温度が24.5°Cのときに測定し始め、38.1°Cまで6分間測定を行ったことを表している。

(a)は温度補償のある場合、(b)は補償のない場合の結果である。補償のない場合の位相変化は 30π 以上の著しい増加が見られるのに対し、補償のある場合の位相変化は安定している。この実験結果より、周囲の温度変化に対する光ファイバ中で生じる複屈折位相差の補償効果が確認された。

5. 結 論

横ゼーマンレーザを光源とした光ヘテロダイン干渉法により、磁性流体の磁気複屈折に起因する位相差を検出し、磁場のセンシングを行った。

- (1) 磁気複屈折による位相差を光のストークスパラメータを用いて算出することにより、磁場の方位が位相差に及ぼす影響を抑えた。
- (2) 光学系に直交2周波用の光アイソレータを導入し、反射型測定を行ったところ、2倍の感度で磁場をセンシングできることが確認された。この測定範囲は直線範囲で12mT、感度は0.01mTとなり、ルックアップテーブルを用いると25mTまで測定可能である。
- (3) 同じ原理による測定法を利用して、偏波面保存光ファイバ、およびマルチモード光ファイバを用いた測定を行い、外乱除去型の光ファイバ磁場センシングが可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) Y. Skibin, V. Chekanov and Y. Raizer: Birefringence in a Ferromagnetic Liquid, Sov. Phys. JETP, 45, 3, (1977) 496.
- 2) S. Taketomi: Magnetic Field Sensor Using an Anomalous Pseudo-Cotton Mouton Effect of a Magnetic Fluid Thin Film, Proc. 3rd. Sensor Symposium, (1983) 175.
- 3) N. Umeda, M. Tsukiji, and H. Takasaki: ^3He - ^{20}Ne Transverse Zeeman laser, Appl. Opt., 3, 19, (1980) 442.
- 4) 吉澤, 北島: 磁性流体の光学的特性に関する研究, 精密工学会誌, 53, 7, (1987) 1117.
- 5) 吉澤, 大谷, 国部: 磁性流体を用いた磁場センサーに関する研究, 応用物理学会春季講演会, 28p-C17, (1990)
- 6) 高崎: 結晶光学, (森北出版, 1975) 137.
- 7) N. Umeda and H. Takasaki: New Ellipsometry Realized by the use of a Two-frequency Laser, Surface Science, 96, (1980) 141.