



磁性流体を用いた磁界分布測定

大河 正志・石山 和彦*・関根 征士・安東 滋

新潟大学工学部電気電子工学科 〒950-21 新潟市五十嵐2の町 8050

(1992年5月6日受付, 1992年10月20日受理)

Measurement of Magnetic Field Distribution Using Magnetic Fluid

Masashi OHKAWA, Kazuhiko ISHIYAMA,* Seishi SEKINE and Shigeru ANDO

Department of Electrical and Electric Engineering, Faculty of Engineering,
Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata 950-21

(Received May 6, 1992; Accepted October 20, 1992)

The feasibility of measurement for distributions of intensity and direction of a magnetic field using a magnetic fluid film is discussed. Because of birefringence of the magnetic fluid, two linearly polarized lightwaves exist and propagate with different phase velocities in the fluid. Both waves passed through the fluid film suffer the phase difference which depends on the intensity of the field. The difference causes a change in output light intensity by the conventional polarimetric interferometer using two crossed polarizers. When the polarizers are rotated, the output intensity sinusoidally changes. A direction of the field is found from the rotation angle at which the output intensity has a minimum. In the experiment, distribution of the magnetic field was measured using the fluid film placed at the gap between electromagnets. The intensity of the field was measured up to 10 kA/m and the experimental results agreed well with the theoretical ones.

1. はじめに

科学技術の高度化, 精密化に伴ってセンサー技術の重要性が高まり, センサーヘッドをはじめセンシングシステム, インテリジェント化等の研究が幅広く行われている。これまでに多くの計測技術が実用化されているが, 中でも無誘導性, 防爆性等の優れた特徴を有する光波利用センシングへの関心は非常に高く, 高感度, 高精度が期待されている¹⁾。無誘導性とは光波と電磁気との間に相互作用がないと言うことであるが, 間接的な作用を利用することができれば, 光応用センサーの特徴は電磁気量の計測に適しており, 有望な測定対象の一つと言える。

磁界計測の分野では, 高感度測定に利用される SQUID

(超伝導量子干渉素子)²⁾, 汎用の半導体磁気センサー³⁾等のさまざまなセンサーが実用化され, 測定可能範囲は非常に広いものとなっている。光応用磁界センサーにおいては, 光ファイバーを利用した干渉計測で SQUID に匹敵する特性が報告され^{4,5)}, センサーの高感度化が進んでいる。一方, このような高感度計測とは異なるが, 磁性流体を用いた比較的構成の簡単な磁界センサーも報告されている⁶⁾。磁性流体は水や有機溶媒などの液体中に強磁性の微粒子を安定に分散させたもので, 大きな磁気光学効果を有する反面, 光波の伝搬損失も非常に大きい。そのため, センサーをはじめ光スイッチ, 光双安定等の光エレクトロニクスへの応用において, 流体は通常薄膜にして使用される⁷⁻⁹⁾。

われわれは磁性流体薄膜を用いることによるセンサー構成の単純化と薄膜の二次元性に着目し, その面内の磁界分布を測定することを試みた。光波は優れた並列性を有しており, コリメート光を流体面に入射し, 出力光信号を2次元データとして取り込み, 処理すれば, セン

* 現在: 中国セルラー電話(株) 〒730 広島市中区東千田町 2-9-1

Present address: Chugoku Cellular Telephone Co.,
2-9-1, Higashisenda-cho, Naka-ku, Hiroshima 730

サーを移動させることなく磁界分布測定を行えるものと期待される。

磁界分布測定においては、磁界強度だけでなく方位の測定も重要となる。これまでの磁性流体を用いた磁界計測は強度を対象としたもので、方位も含めた磁界測定の試みはないように思われる。そこで、われわれは磁界強度、方位とも測定可能な方法を考案し、この方法を用いた分布測定の可能性および問題点を明らかにすることとした。

本論文では、まず、磁性流体を用いた磁界強度および方位の測定原理について述べる。次に、実験により得られた磁界強度と出力光強度の関係を示し、磁界強度分布の測定に必要な基本的な特性を明らかにする。さらに、レーザー光の入射位置を移動させて磁界強度と方位の分布測定を行ったので、それらの結果を示し、計算値との比較および考察を行う。

2. 理 論

2.1 磁界測定の方法

Fig. 1 は磁性流体を用いて磁界測定を行うための基本構成である。磁性流体は数 μm のギャップを介して重ね合わされた2枚のガラス板の間に封入され、直交ニコル構成の偏光子の間に置かれる。磁界は流体面に平行に、光の進行方向に垂直に印加され、その方位は流体全面で一定とする。磁性流体は磁界が加わっていないときには等方性の媒質であるが、磁界が印加されると、磁気光学効果により屈折率が磁界強度に応じてわずかに変化し異方性となる⁶⁾。このとき、磁界方位の方向とそれに直交する方向が磁性流体の主軸となり、主軸に対して45度傾いた方向にポライザの偏光方向を合わせる。このような構成のもとでレーザー光をポライザに入射すると、流体では主軸方向に偏光した二つの固有モードが等強度で励振され、互いに独立にそれぞれ異なる屈折率 n_x, n_y に対応した速度で伝搬する。したがって、流体通過後の両光波の位相差は次のようになる。

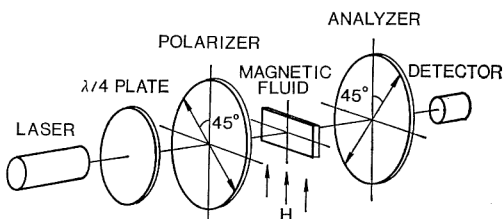


Fig. 1 A scheme for measuring magnetic field distribution using magnetic fluid.

$$\Delta\phi = k_0 L (n_x - n_y) \quad (1)$$

ここで、 L は流体の厚さ、 k_0 は真空中での光波の波数である。位相差 $\Delta\phi$ に応じて透過光の偏光状態が直線偏光、楕円偏光あるいは円偏光と変化する。この光波をアナライザーに通し、ポライザの偏光方向に対し直交した偏光成分を取り出す。これにより、位相差は光強度変化に変換され、これらの関係は次式で表される。

$$I_o = I_i \exp(-\alpha L) \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2)$$

ここで、 I_i は磁性流体への入射光強度、 α は磁性流体の減衰係数で、光波の偏光方向および磁界強度に依存しないものとした。以上のことから、Fig. 1 の構成において、出力光強度が磁界強度に対応した変化をすることがわかる。

2.2 磁界方位の測定法

前項で述べた測定方法では、あらかじめ磁界の方位を知っておく必要がある。しかし、一般に磁界分布測定を行うとき、その方位を前もって知ることは困難である場合が多く、さらに一方向を向いているとは限らない。そこで、この項では、磁界の強度とともに方位の測定も行える方法について述べる。

いま、Fig. 2 に示すように、ポライザの偏光方向および磁性流体への印加磁界の方位がそれぞれ y 軸に対して角度 θ, θ_0 だけずれているものとする。また、ポライザとアナライザの偏光方向は互いに直交している。このとき、アナライザからの出力光強度は次のようになる。

$$I_o = I_i \exp(-\alpha L) \sin^2\{2(\theta - \theta_0)\} \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (3)$$

これより、 θ が θ_0 に等しいとき出力光強度が最小で、その差が45度のとき最大となり、式(3)は式(2)と一致することがわかる。したがって、ポライザとアナライザの偏光方向を直交させた状態で両偏光子を回転させて、出力光強度が最小となる角度を調べることにより、磁界の方位を知ることができる。さらに、出力光強

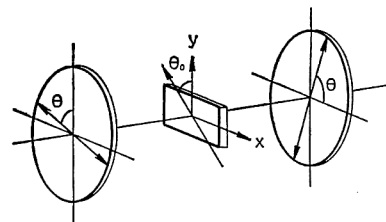


Fig. 2 Arrangement of a polarizer, an analyzer and a magnetic fluid thin film.

度の最大値から磁界強度が求められる。このとき、ポラライザーを任意の角度に設定しても、透過光強度が変化しないように円偏光の光波を入射する必要がある。ところで、磁界の方位が θ_0 および $\theta_0 + 90$ 度ときの出力光強度の変化はともに同じであるので、測定結果のみから磁界の方位を決定することができず、磁極の位置関係等の考慮が必要となる。

3. 実験

3.1 基本特性

まず、Fig. 1, Fig. 3 の構成を用いて、磁性流体への印加磁界強度に対する出力光強度の変化を測定した。測定では、直線偏光のレーザー光を 1/4 波長板を通し円偏光とし、ポラライザーを任意の角度に設定しても磁性流体に入射する光強度が一定になるようにした。磁界を発生させるため Fig. 4 のような間隙を有する電磁石を作成し、その巻線に流す電流量を調節することにより、磁界強度を変化させた。磁性流体を封入したガラス板を電磁石の間隙に置き、レーザー光の入射位置を間隙の中央に合わせた。磁性流体の厚さは約 $5 \mu\text{m}$ で、流体には松

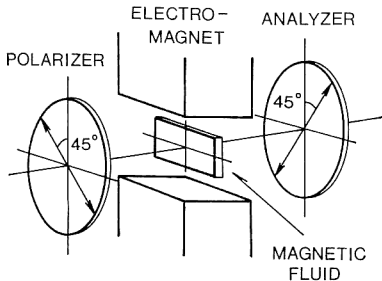


Fig. 3 Basic experimental set-up with an electromagnet which applies a magnetic field to the film.

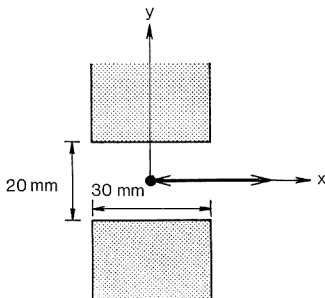


Fig. 4 Illustration a gap between electromagnets. The arrow along the x direction shows the line on which the magnetic field distribution is measured.

本油脂製薬製マーボマグナ FNC-50 を用いた。光源には波長 633 nm の He-Ne レーザーを使用した。Fig. 5(a) は測定結果で、磁界強度 1 kA/m 以上において、出力光強度との間に比例関係があることがわかる。さらに、式(2)を使って出力光強度を位相差に換算した。換算において、アナライザーの偏光方向をポラライザーに一致させたときの出力光強度を $I_i \exp(-\alpha L)$ の値として用いた。Fig. 5(b)に磁界強度と位相差の関係を示す。実線は、位相差が磁界強度の $1/2$ 乗に比例するものと仮定し、最小2乗法により求めた結果である。磁界強度の弱いところを除けば実験値と実線はよく一致しており、測定した範囲で、位相差は磁界強度の $1/2$ 乗に比例するものと言える。

3.2 磁界強度分布の測定

次に、レーザー光の入射位置を電磁石の間隙の中央から x 方向に Fig. 4 の矢印に沿って移動させ、磁性流体面上の磁界強度分布を測定した。試作した磁性流体の厚さが不均一であったため、測定値がばらつき、各部分の厚さの違いを考慮に入れなければ磁界分布の測定が不可能であった。これは、磁性流体の損失および磁気光学効果が非常に大きく、わずかな膜厚の変化でも出力光強度に影響するためである。

そこで、まず、レーザー光を波長板、偏光子を介さず、直接磁性流体に入射し、その減衰量から各部分の膜

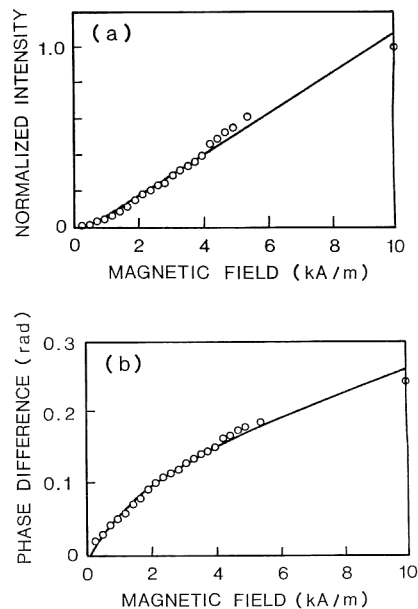


Fig. 5 (a) Relation between magnetic field and normalized output intensity. (b) Relation between magnetic field and phase difference.

厚を見積った。次に、Fig. 1, Fig. 3 に示した測定系を構成して、電磁石の巻線に流す電流量を一定とし、レーザー光の入射位置を移動させて出力光強度を測定した。その光強度を式(2)により位相差に換算した後、磁性流体内で生じる位相差が膜厚に比例するものと仮定して、膜厚の補正を加えた。このとき、式(2)の $I_i \exp(-\alpha L)$ には、前項と同様の方法で測定した出力光強度の値を代入した。さらに、位相差を Fig. 5(b) に示した最小2乗近似曲線に従って磁界強度に換算した。Fig. 6 はその結果であり、ここでは計算値との比較のため、間隙中央での値が1となるように正規化してある。横軸は間隙中央からの移動距離で、15 mm のところが電磁石の端となる。実線は等角写像法で計算した磁界強度である。両者はよく一致しており、レーザー光を掃引することにより、磁界分布の測定が可能であると言える。

3.3 磁界方位分布の測定

2.2 で述べた方法により、Fig. 7 に示した点A, B における磁界方位の測定を行った。ポラライザーとアナライザーを直交させたまま、ポラライザーの偏光方向を y 軸に一致させた状態から5度間隔で180度回転させ、出力光強度の変化を測定した。Fig. 8 に測定結果を示す。丸印は実験値で、実線は実験値を最小2乗法により

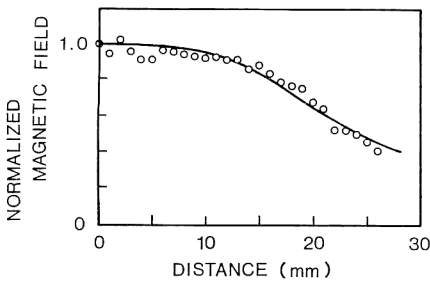


Fig. 6 Distribution of the magnetic field measured along the arrow shown in Fig. 4.

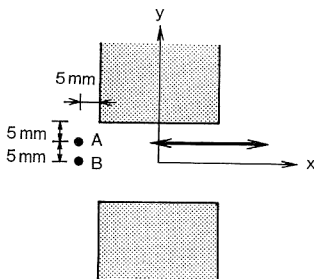


Fig. 7 A gap between electromagnets. Points A and B and arrow show the incident position of the probe lightwave for measuring direction of magnetic field.

定数項を加えた周期 90 度の三角関数で近似した結果である。磁極と測定点との位置関係から、回転角 0 度付近において出力光強度が最小となる角度方向が磁界の方位と言え、最小 2 乗近似曲線からその方位を求めた。これより点 A, B における磁界の方位は y 軸方向に対しそれぞれ -19.8 度、 0.6 度傾いていると言える。ただし、角度の符号については反時計方向を正とした。実験値の二つの山の高さに違いがみられるもののデータのばらつきは小さく、本方法により磁界の方位を精度よく測定できるものと期待される。ところで、方位測定では偏光子の偏光方向と流体の主軸方向の一致が測定の基本となっており、膜厚には無関係で、前項で述べたような膜厚の補正を行う必要はない。

次に、電磁石に流す電流量を一定とし、レーザー光の入射位置を移動させ磁界の方位分布の測定を試みた。掃引する位置は間隙の上部から 5 mm 下方とし、レーザー光を中央付近から x 方向に Fig. 7 の矢印に沿って移動させた。Fig. 9 はその結果で、縦軸に磁界方位をとり、 y 軸方向とのなす角を、反時計方向を正として表している。丸印は実験値で、実線は数値計算により求めた結果である。ただし、ここでは、得られた計算結果を縦軸および横軸方向にそれぞれ -2.5 度、 2.0 mm だけ平行移動させ図示した。両結果はほぼ一致しており、磁界強度と同様にその方位分布の測定も比較的精度よく行えるものと期待される。 $x=0$ mm 付近で磁界の方位が y 軸と

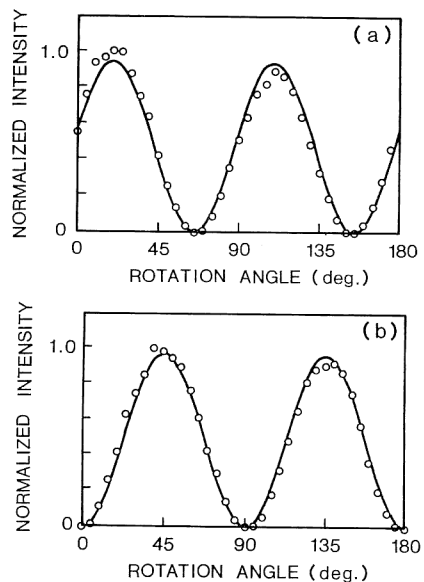


Fig. 8 Changes in output intensity with angular rotation at the points A(a) and B(b).

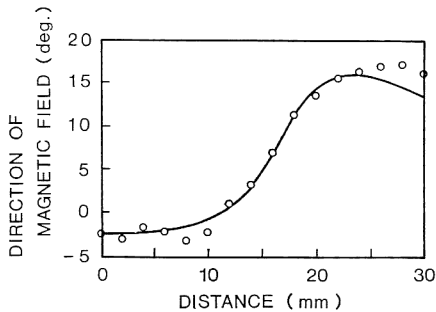


Fig. 9 Distribution of direction of the magnetic field measured along the arrow shown in Fig. 7.

平行になっていないのは、電磁石が傾いていたためと考えられる。また、磁界の方位角が最大となる位置がずれているのは、計算で仮定した磁石の形状、透磁率等の条件が実際の測定条件と違ったためと考えられる。

4. おわりに

磁性流体面上でレーザー光の入射位置を移動させて、その面上の磁界強度および方位の測定を試みた。実測した磁界強度は 0~10 kA/m 程度と比較的狭い範囲であったが、実験値と計算値の間にはよい一致がみられ、本方法により磁界分布の測定が可能であると言える。ただし、磁性流体中で生じる光波の減衰は磁界強度および偏光方向に依存することが知られており、比較的大きな磁界の測定においてはこの影響に対する考慮が必要となる。

磁界強度の分布測定では、磁性流体の膜厚が不均一であることが問題となり、その影響を補正する必要があった。このような補正は測定およびデータ処理を複雑にするため好ましいものではなく、厚さの均一な磁性流体薄

膜の作成が重要と言える。磁界方位の測定において、実験結果としてその方位のみしか取り上げなかったが、出力光強度の最大値から磁界強度も知ることができる。ただし、磁界強度に関しては、今後膜厚の補正のほかに測定データの処理方法についても検討を行う必要がある。

以上の結果から、磁性流体にコリメート光を入射し、CCD カメラ等で出力光強度を 2 次元データとして取り込み、処理することができれば、磁性流体の 2 次元性と光の並列性を生かした磁界分布測定が可能になるものと期待される。

文 献

- 1) 田中俊一編著：光波利用センシングの基礎と応用（オーム社，1990）。
- 2) M. B. Ketchen and J. M. Jaycox: "Ultra-low-noise tunnel junction DC SQUID with a tightly coupled planar input coil," *Appl. Phys. Lett.*, **40** (1982) 736-738.
- 3) H. P. Baltes: "Integrated semiconductor magnetic field sensors," *Proc. IEEE*, **74** (1986) 1107-1132.
- 4) D. M. Dagenais, F. Bucholtz, K. P. Koo and A. Dandridge: "Detection of low-frequency magnetic signals in a magnetostrictive fiber-optic sensor with suppressed residual signal," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-7** (1989) 881-887.
- 5) H. Okamura and Y. Fujii: "Lorentzian force type fiber-optic AC magnetic sensor realising frequency-independent sensitivity," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 1090-1091.
- 6) S. Taketomi: "Magnetic fluid's anomalous pseudo-cotton mouton effects about 10^7 times larger than that of nitrobenzene," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22** (1983) 1137-1143.
- 7) 吉澤 徹，北島雅一: "磁性流体の光学的特性に関する研究"，*精密工学会誌*，**53** (1987) 1117-1122.
- 8) 武富 荒，近角聡信: 磁性流体—基礎と応用—(日刊工業新聞社，1988)。
- 9) 神山新一: 磁性流体入門 (産業図書，1989)。