

磁歪効果を利用した光ファイバ磁界センサ

Optical fiber magnetic field sensor by using magnetostrictive effect

藤井陽一*・森敬雄*

Yoichi FUJII and Takao MORI

1. はじめに

磁界の計測に光を応用しようとする試みは、著者の一人によって、以前から行われており、しかるべき結果を得ている¹⁾。この方法は、ファラデー効果を用いるものであって、材料としては、当初は、鉛ガラスのような安定な反磁性体、その後、希土類ガラスのような常磁性体、あるいは赤外光用として、ガーネット系のフェライトが用いられるようになってきている。これらの方法は、いずれも、原理は、磁界による偏波面の回転を検出するものであって、極めて簡単であり構造も十分に実用的なものであるようになってきているが、比較的感度の高い常磁性体によっても、検出に適当な磁界は、 $10^2 \sim 10^4$ A/m と大きく、大電流、強磁界の検出には、誠に適当なものであるが、弱い磁界のセンサとしては、無理な点が多かった。

これに対し、ファラデー回転の材料として、光ファイバを使おうとする試みが、著者ら²⁾も含めて各所で研究されている。普通の光ファイバは、鉛ガラスに比べて、ファラデー回転の能率は、約10分の1であり良いとは言えないが、その性質上、極めて長いセンサが得られるから、全体としての感度を高くできると考えられる。しかし、実際上は、ファイバが完全な円断面でないために、偏波の伝送がランダムになりやすく、あまりファイバを長くできないために、所期の成果をあげていない。

これに対して、光ファイバは、機械的な歪みのために起きる、光の伝送位相のずれに対して極めて敏感である。この効果を利用して、すでに知られた磁歪効果により磁界を機械的歪みに転換し、光の位相のずれとして測定しようとするのが、本報告における磁歪型光ファイバ磁界センサの原理である。

これは当初、Yariv 教授³⁾の提案にかかるものであって、極めて弱い磁界の計測 (10^{-6} Oe) が可能であるという大きな特徴がある。

2. 測定原理

このセンサは、ファイバに磁歪材料を被覆して、ファ

イバに磁歪による歪みを与え、コアに応力を与えることによって、ファイバ中を伝搬する光の位相変化や伝送損失を計測し、磁界が測定できる。光の位相変化の測定方法として、マッハツェンダ(Mach-Zehnder)干渉法を利用した。ここで作成した被覆ファイバの断面図を図1に示し、センサの外観を図2に示す。

ファイバに被覆した磁歪材料には、ニッケル棒を用い、ファイバにニッケル棒を束ね、そして $200^\circ \sim 300^\circ$ C に加熱することによって、センサ部のファイバの二次被覆をやわらかくして、ニッケルとファイバを密着することにより作成した。

そして、光の分散を無視すると、ファイバの被覆部の長さ L における位相変化 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda} 0.92\epsilon_3 [\text{rad}] \quad (1)$$

となる。ここで、 n は屈折率、 λ は光の波長、 ϵ_3 はニッケルの長さに対する相対的伸びである。また、位相が 180° 変化すると、干渉計出力における干渉波形が1つ移動するから、この移動数を N とすると、

$$N = \Delta\phi \times \frac{1}{\pi} \quad (2)$$

となる。これから波形の移動数をカウントすることにより磁界の変化分が測定できる。

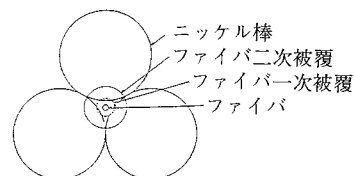


図1 被覆ファイバの断面図

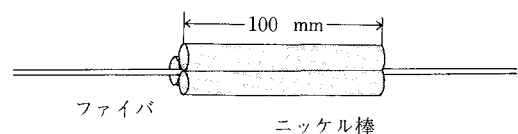


図2 センサの概観

*東京大学生産技術研究所 第3部

3. 実験装置および実験方法

光の位相変化の測定方法として、マッハツェンダ干渉法を利用している。これは、測定ブランチと参照ブランチ間の位相差のために干渉し、光出力が変化することで、この変化から磁界が測定できる。この光ファイバ磁界センサに関する実験は、図3に示す測定系で実験を行った。

図3の測定系において、波長が $0.6328 \mu\text{m}$ の He-Ne レーザを使って、光を干渉させる。そして、これをフォトダイオードを使って、電気信号に変換する。

(a) 強い磁界での測定

図3の(a)の測定系にて、実験を行う。磁界の変化は、ソレノイドに流れる AC 電流の量を変えることにより、磁界を変化させている。そして、それぞれの磁界におけるフォトダイオードからの電気信号をメモリスコープによって波形を観測し記録する。また、理論から 180° の位相変化から波形が1つ移動するはずである。また、この信号はデジタルメモリを使って処理した。入力されたアナログ信号波形を、アナログーデジタル変換器によりデジタル化(2進数値)して、信号の時間的変化を順次半導体メモリに記憶させ、パソコンにより信号波形の演算処理を行い、プロットにて波形を描く。

(b) 弱い磁界での測定

図3の(b)の測定系にて、実験を行う。ソレノイドに直流バイアス磁界を印加し、各バイアスにおいて、交流磁界を印加したときの波形の振幅電圧の大きさをロックインアンプにて測定する。また、このとき、バイアス磁界は交流磁界より十分大きくして測定する。

4. 実験結果

(1)と(2)式において、波長を He-Ne レーザの波長 $0.6328 \mu\text{m}$ 、屈折率 n を 1.46 として計算した値を理論値

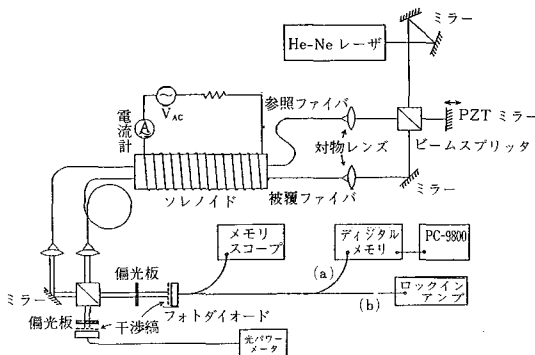


図3 測定系

として用いた。また、その結果を図4に示す。

(a) 強い磁界の測定結果

ファイバに束ねたニッケルが3本の場合と4本の場合の2通りの測定を行った結果を図5に示す。また、ニッケル3本の場合のプロットで書いた磁界に対する干渉波形を図6の(i)~(iv)に示す。

図5のグラフにおいて、ニッケル3本と4本を比べてみると、3本で作成したほうが感度が良いことがわかる。これは、3本のほうがファイバとよりよく機械的に密着しているためだと考えられる。しかし、理論値と比べてみると、かなり感度が悪い。また低い磁界での位相変化は、あまり見られない。この原因として考えられることは、ニッケルの磁歪の変化は、正しく変化しているのだが、この変化がファイバに伝わらず、ファイバの一次被覆や二次被覆が、弾性体のクッションとして働いて、ニッケルからの歪み力の一部だけが、一次被覆や二次被覆を介してファイバに伝わったと考えられる。また、低い

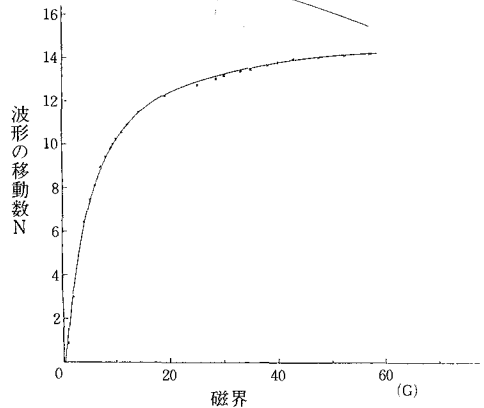


図4 理論値

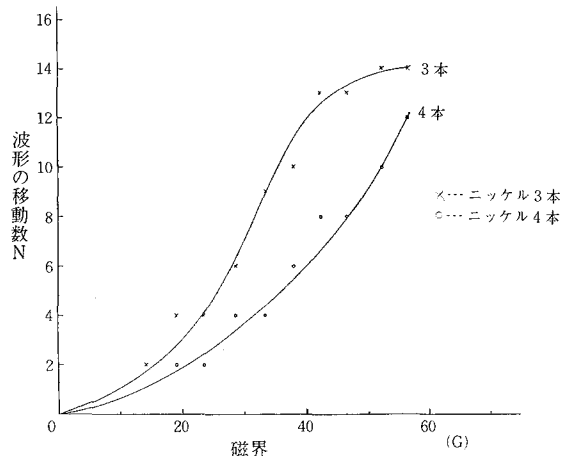


図5 磁界に対する移動

研 究 速 報

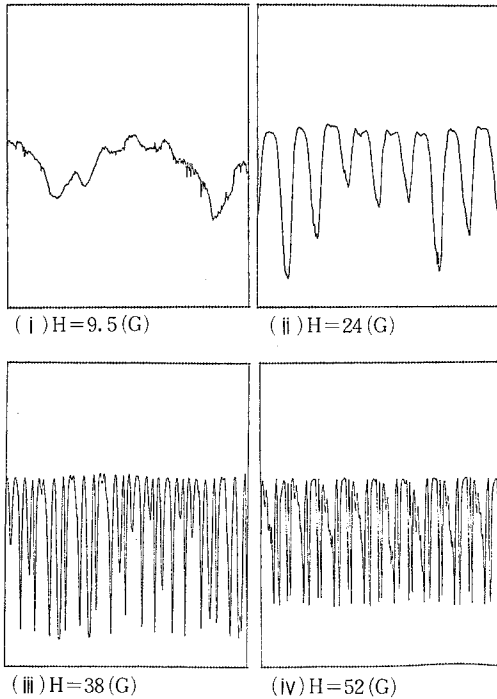


図 6 磁界に対する出力波形

磁界では、位相の変化をメモリスコープで観測することが困難であった。この原因として考えられることは、温度変動や周囲の振動による干渉縞の移動および、環境中の 50 Hz 雑音の影響を受けているためだと考えられる。

(b) 弱い磁界の測定結果

バイアス磁界 H_0 に、交流磁界 H_1 ($H_0 > H_1$) を加えて変化したときの出力電圧の大きさのグラフを図 7 に示す。

このグラフから、バイアス磁界一定で、交流磁界を大きくしていった場合、出力振幅が大きくなり、比例していることがわかる。これから、低磁界においても正しく測定できていることがわかる。

5. 結 論

ここで作成したセンサには、まだ多くの欠点があり、現段階では、実用にむいていないが、ファイバにニッケル被覆をしたセンサによっても磁界が検出できるということが確かめられた。

そして、次の点が改良されることにより、感度が改善されることが期待される。

- 1) ファイバに直接ニッケルを被覆する。
- 2) ビームスプリッタの代わりにファイバカップラを使用する。
- 3) 参照用ファイバと被覆ファイバの長さを正確に等

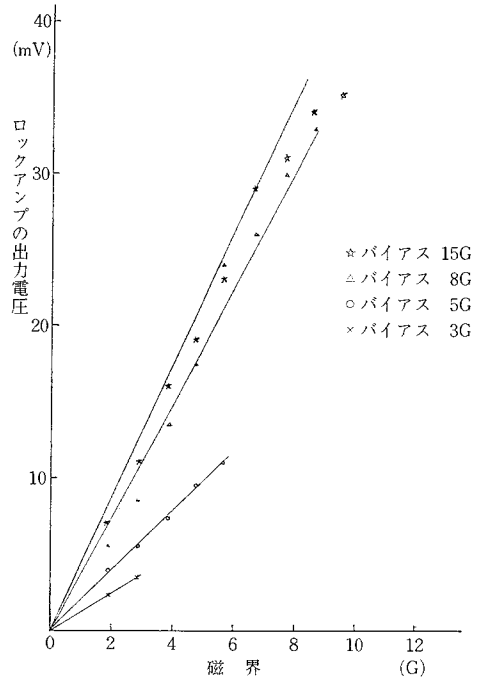


図 7 バイアス磁界 H_0 に、交流磁界 H_1 を加えて変化したときの出力電圧の大きさ

しくする。

- 4) 干渉縞を止めるフィードバック回路を作る。など、このような改善がなされるとすれば、Yariv の理論³⁾どおりに

$$(H)_{\min} = 1.6 \times 10^{-8} (G) = 1.6 \times 10^{-12} (T)$$

まで測定できるようになれば、現在 SQUID (超伝導量子干渉計) で測定している小さな磁界が検出可能となり、生体磁気信号のピックアップ、たとえば、心臓電流の作る磁場を検出し心電図に対応する心磁図を測定する心磁計や脳 (磁) 波などが測定可能となる。そしてこれは、SQUID に比べて、小型で安価に作ることができるであろう。

(1986 年 1 月 27 日受理)

参 考 文 献

- 1) 斉藤, 藤井, 濱崎, 横山: “レーザによる電力用電流電圧測定装置に関する基礎的研究”, 生研報告, Vol. 28, No. 5, pp. 226-264, 1980 年 3 月
- 2) 斉藤, 藤井, 横山, 大林: “光ファイバによるレーザ CT”, 昭和 52 年電気学会全国大会, 1428, 1974 年 4 月
- 3) A. Yariv and H. V. Winsor: “Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers”, Opt. Lett. Vol. 5, No. 3, pp. 87-89, 1980