

ヘテロダイン方式による光ファイバ力・歪センサ

Heterodyne Fiber-Optic Sensor of Force and Strain

芳野俊彦*・小瀬輝次*

Toshihiko YOSHINO and Teruji OSE

1. はじめに

光ファイバセンサは、本質的に防爆安全で耐環境性の優れたセンサとして多種多様な測定対象・方式が提案・検討されている。著者らは、いくつかの新しい光ファイバセンサ方式について発表してきたが、ここでは、単純な方法で力・歪を検出できるファイバセンサについて述べる。

2. 検出原理

単一モードファイバは、光の平面波を長距離にわたって低損失で伝達できる。単一モードファイバには、等方性ファイバと複屈折性ファイバとがある。前者はコアおよびクラッドが軸対称構造をもっており、したがって、偏光に関しては縮退している。この等方性ファイバに、ファイバ軸と直角な方向に応力を加えると、ファイバコアに光弾性効果による複屈折性が誘起される。この複屈折性を測定すれば、応力、したがって外力を測定できる。一方、複屈折性ファイバは、クラッドの構造を楕円形にすることによって低温（室温）においてコアに残留応力による内部歪を発生させ、コアに複屈折性をもたせている。これによりファイバモードは、直交直線偏光となる。ファイバモードの伝播定数 k_0 , k_{\perp} は異なるのでファイバ長を L とすると $\Gamma = (k_0 - k_{\perp})L$ のリターデーションを生じる。このリターデーションは、ファイバに新たに生じさせた歪や温度によって変化し、一般に

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_F + \Gamma_T \quad (1)$$

と表される。ここに Γ_0 , Γ_F , Γ_T はそれぞれ、残留初期応力、外力、温度変化によるリターデーションである。したがって、 Γ_F や Γ_T の測定によって外力や温度を求めることができる。

筆者らは、リターデーションの測定に、ヘテロダイン検出方式を導入した。ファイバの直交した偏光軸に、等強度の2つの周波数 f_1 , f_2 のレーザ光を入射させる。ファイバの出力端から出てくるレーザ光を、ファイバの

偏光軸に対して 45° の方位の直線偏光子を通してから2乗検波する。検波出力は、

$$\begin{aligned} I &= \left| \frac{1}{2} e^{i(2\pi f_1 t + k_{\parallel} L)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} e^{i(2\pi f_2 t + k_{\perp} L)} \right|^2 \\ &= \frac{1}{2} (1 + \cos(2\pi \Delta f t + \Gamma)) \end{aligned} \quad (2)$$

となる ($\Delta f = f_1 - f_2$)。すなわち、検波出力には周波数 Δf のビート信号が含まれるので、その位相の測定を行えば Γ が求められる。このヘテロダイン検波方式によれば位相信号が、(1)実時間・高速、(2)レーザ光源の出力変動やファイバの曲げ損失に不感、(3)動作点によらない、で求められるので測定精度が高い。実験に用いた光源は、周波数の安定化した横ゼーマンレーザ ($\lambda = 633 \text{ nm}$ 出力 2 mW) で、 $\Delta f \approx 200 \text{ kHz}$ である。この光源は、直交直線偏光した2つの周波数で発振するので本センサ方式の光源としては最適である。

3. 実験

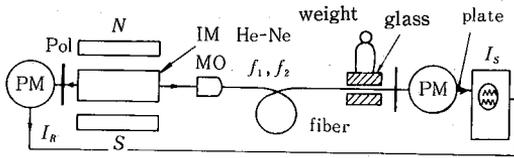
3.1 等方性ファイバを利用する場合 Fig. 1(a)に、等方性単一モードファイバ（コア径 $4 \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125 \mu\text{m}$ ）による荷重センサを示す。全長 2 m のファイバの出力端部近くにおいて、一部（ 65 mm 長）のナイロンジャケットの保護被覆を除去し、クラッドを露出させ、荷重 F を加えた。ファイバはV溝に入れ、加重時に回転しないようにした (Fig. 1(b))。ヘテロダイン出力信号から荷重 F と誘導されたリターデーション Γ_F の関係を求めた。実験結果を Fig. 1(c) に示す。 F と Γ_F の間により直線関係が見られる。ファイバが垂直方向に単純圧縮応力を受けたと仮定すると短形近似の下では光弾性の計算から、誘導リターデーションは

$$\Gamma_F = \frac{\pi n^3}{\lambda} (p_{11} - p_{12}) (1 - \mu) F / (d_1 E) \quad (3)$$

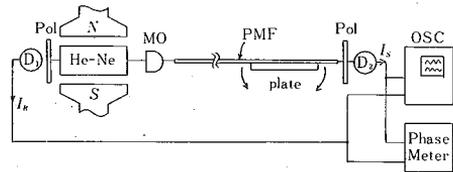
で与えられる。ここに、 $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$ (光弾性定数), $\mu = 0.17$ (ポアソン比), $n = 1.46$ (石英コアの屈折率), $d_1 = 125 \mu\text{m}$ (クラッド径), $E_1 = 7.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ (石英の

* 東京大学生産技術研究所 第1第

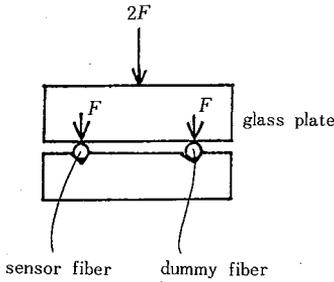
研究速報



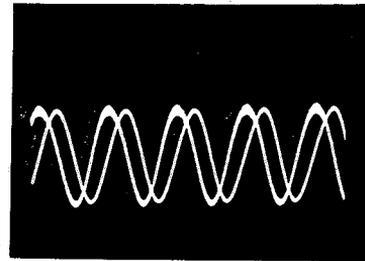
(a)



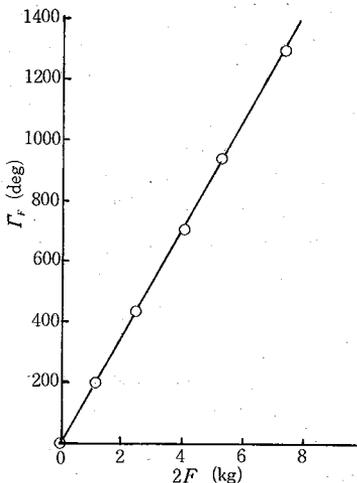
(a)



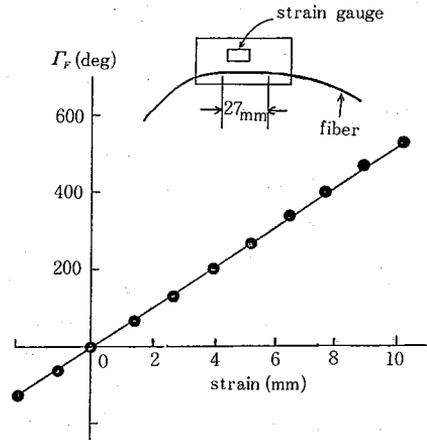
(b)



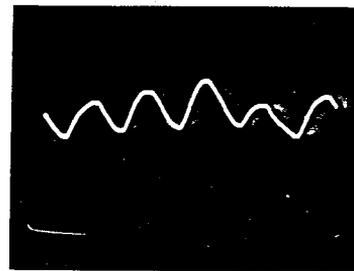
(b)



(c)



(c)



(d)

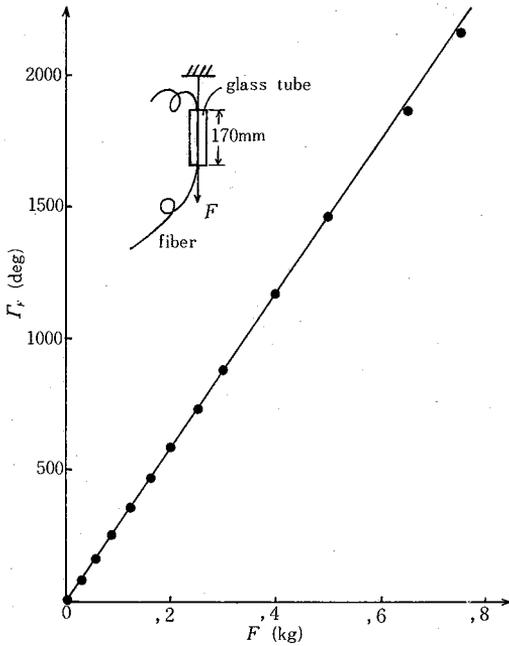
Fig.1 Fiber-optic heterodyne weight sensor using isotropic monomode fiber. (a) sensor scheme, (b) sensing part, (c) mechanically-induced retardation Γ_F vs. weight $2F$

ヤング率)であることを考えると、(3)は、 $\Gamma_F = 112^\circ F$ ($[F]=\text{kg}$)となり、測定値 $\Gamma_F = 81^\circ F$ とモデルの近似的範囲内でよい一致がみられる。しかし、このタイプのセンサ方式では、出力信号がファイバの微小な振れに敏感であることや裸のファイバが破損しやすい事実が分かり、さらに実用性にやや問題があると思われる。

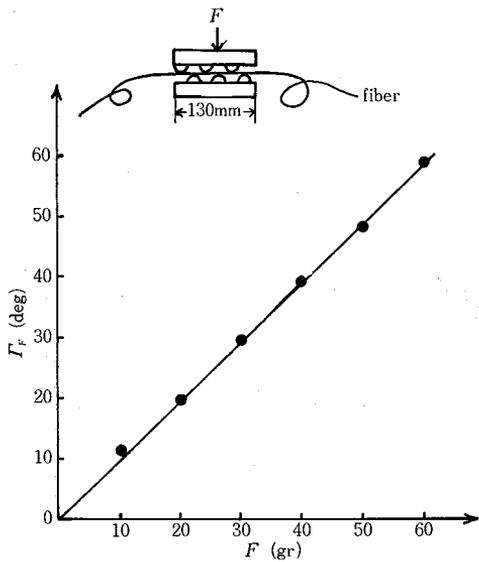
3.2 複屈折性ファイバを利用する場合

Fig. 2 (a)は、複屈折ファイバを用いた歪計の測定配

Fig. 2 Fiber-optic heterodyne strain sensor using birefringent monomode fiber (a) sensor scheme, (b) typical heterodyne signal with and without strain (period = $4 \mu\text{s}$), (c) induced retardation vs. strain, (d) phase meter output under vibrating strain (5 ms/div.).



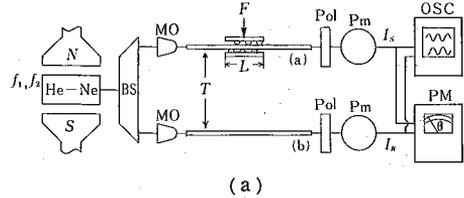
(a)



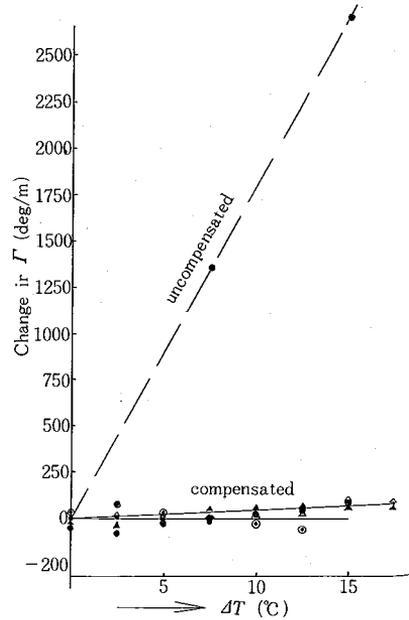
(b)

Fig.3 Some practical schemes of fiber-optic force sensor

置である。横ゼーマンレーザからの2つの周波数をそれぞれファイバの偏光軸に一致させて入射させる。全長1.5mのファイバの一部27mm長をアルミニウムの薄板(厚さ3mm)に接着テープで固定する。アルミニウム板に歪を生じさせた場合の測定信号 I_s と参照信号 I_R を Fig. 2 (b) に示す。位相差は位相計で測定する。Fig. 2



(a)



(b)

Fig.4 Differential fiber-optic heterodyne force meter (a) system, (b) experimental results for temperature effect compensation.

(c)は歪対リターデーションの測定結果を示す。歪は通常のストレインゲージで校正した。歪と出力信号の間により直線があることがわかる。歪は正・負とも、交流的な場合でも測定できる。Fig. 2 (d)は、振動物体にファイバを接合した場合の位相計出力波形である。ファイバに歪を与える方法は種々の方式が考えられる。Fig. 3 (a)に示すように、ファイバを長手方向に引張る場合、Fig. 3 (b)に示すように、ファイバを波形(山数7)の表面をもつ2板の金属板で挟むやり方などがある。Fig. 2の実験結果から求められる歪感度は、1m長のファイバに換算して $1.9 \text{ deg}/\mu\text{m}$ である。ファイバに引張り荷重 F を加えると、軸歪は $\epsilon_t = F / (E_1 S_1 + E_2 S_2) = 8.4 \times 10^{-3} F$, $E_2 = 5.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ (ナイロンジャケットのヤング率), $S_2 = 0.52 \text{ mm}^2$ (ナイロンジャケットの断面積) ($[F] = \text{kg}$) であるので、軸荷重感度は $1.6 \times 10^4 \text{ deg/kg}\cdot\text{m}$ となる。これは、Fig. 3 (a)の実験結果とよく一致している。使用した複屈折性ファイバの屈折率差 Δn は $2.5 \times$

研 究 速 報

10^{-4} ($T=20^{\circ}\text{C}$)である。この屈折率に対応する光弾性効果から計算される歪感度は $\Gamma_F \sim 0.05 \text{deg}/\mu\cdot\text{m}$ となり、実験値と比較して約 40 倍小さい。これは、複屈折ファイバの歪特性は、ファイバの残留応力の印加メカニズムに非常に影響されるためであると考えられる。複屈折性ファイバのリターデーションは温度によっても変化する。したがって、測定中に大きな温度変化が生じるような場合には、温度効果の補償が必要となる。Fig. 4 (a) は差動法によって温度効果を補償する方式を示している。測定用ファイバ、参照用ファイバをセンサ部以外 ($L=13\text{cm}$) では、平行に並べてエンパイヤチューブ等の中におさめる。こうすることにより周囲温度の変化があっても、測定用、参照用ファイバの両方が同じ温度効果を受けるの

で、原理的には温度補償が行われることになる。Fig. 4 (b) には、1 m 長のファイバの場合についての温度補償の効果を見たもので、温度変化による影響が約 1/100 程度減少していることがわかる。

4. ま と め

一本のファイバによる単純な力・歪センサについて述べた。複屈折 (偏光面保持) ファイバを用いたものは、偏光も安定し、測定感度も適当であるので実用性は十分あると思われる。本実験に協力して下さった東京電力株式会社の黒沢潔氏、山越明生氏、御園生金哉氏、鈴木肇氏に感謝します。 (1982 年 12 月 13 日受理)

