光ファイバセンサの現状と動向†

西 沢 紘 一*

Present Status and Trend of Optical Fiber Sensors

by

Koichi NISHIZAWA*

1 ま え が き

光ファイバは本来、光の信号をひずみなく低損失で伝送することを使命としてきた。そのために光吸収の少ない石英という媒体を伝送路として用い、光のパワーをとじこめるために低屈率のクラッドで覆い、かつ側圧の影響を排除するためにケーブル構造に特殊な工夫がほどこされている。しかし光ファイバは伝送路としてすばらしい特性を有する反面、極めて外乱に弱いデリケートな面ももち合せている。

したがって光ファイバという媒体の物理的、光学的特性が外部刺激に対して敏感であるという性質はセンサとして使えることを意味している。しかもたとえ極めて小さな刺激であっても光ファイバのもつ長尺性は、累積効果があり高感度をもたらす。また、光ファイバ

の信頼性、安定性を向上させるため努力されてきたことは、逆説的に言えば、すべて光ファイバセンサの動作原理として利用できる^{1)~5)}のである。

2 光ファイバセンサの原理

光ファイバセンサとは、光ファイバの光学的、物理的性質を利用して外界の物理量を計測するものである。広義に解釈すれば、光信号を単に光ファイバで伝送するというリモートセンシングもその範ちゅうに入る。

図1に光ファイバ自身の示す物理光学的現象をまとめてみた⁶⁾。大別すると光の吸収・発光、散乱、放射、位相変化、偏波面回転、周期数変化に分類できる。また表Iには光のもつ4つの属性、すなわち強度、位相、偏光、周波数に対してどういう物理量が対応しているかを示した⁷⁾。この関係を眺めてみると光ファイバが実

に多様なセンサとして機能しうることがわかる。しかも光ファイバがセンシングと同時にその信号の伝送路としても働くことも大きな特徴である。

ここで光ファイバセンシングシステムの代表例を挙げておきたい。図2にその構成例を示す。(a)は最も単純なもので、対象物理量を電氣的に検知し、E/O変換(電気・光変換)で光信号に換え、光ファイバで計測器までもってくる方式である。(b)の例では、対象物理量から出る光をそのまま伝送してくる方法で分光、発光スペクトルを観測して成分や温度の計測に用いられる。(c)の場合は、計測対象物にプローブ光(参照光)を与え、対象物理量との相互作用の結果、プローブ光が変調され、その信

図1 光ファイバの物理現象

† 原稿受理 昭和63年7月11日 Received July 11, 1988

* 日本板硝子(株)研究開発室 東京都港区新橋, Nippon Sheet Glass Co. Ltd., Shinbashi, Minato-ku, Tokyo

表 I 光の属性と特徴

	強 度	位 相	偏 光	周 波 数
検出対象 (物理量)	透 過 率	干 渉 量	電 気 光 学 効 果	ドップラーシフト
	反 射 率	ひ ず み 量	ファラデー効果	サニャック効果
	発 光 光 量	光 路 長 変 化	ポッケルス効果	ラ マ ン 散 乱
	マイクロバンド	屈 折 率 変 化	光 弾 性 効 果	
	散 乱 損 失			
測定対象 (物理量)	温 度	変 位	電 圧	流 速
	加 速 度	振 動	電 流	角 速 度
	変 位	圧 力	電 界 強 度	流 量
	圧 力	温 度	磁 界 強 度	流 速 分 布
	振 動	音 圧	圧 力	
特 徴	放 射 線 量	屈 折 率	加 速 度	
	マルチモード系	シングルモード系	シングルモード系	シングルモード系
	取 扱 容 易	偏 波 制 御	偏 波 制 御	ドリフト制御
		高 感 度	高 感 度	高 感 度
		取 扱 複 雑	取 扱 複 雑	取 扱 複 雑

号光が再び光ファイバで戻ってくる。そして参照光と信号光の強度を比較することにより計測するものである。光センサ部で光の吸収、反射、散乱、偏光回転などにより強度変調された信号光から計測すると言ってよい。(d)、(e)の方式は、光を用いた計測の中でも最も特徴のあるもので、光の干渉効果を利用した高精度計測が可能である。(d)の代表例は、ドップラー速度計と言われるもので、ブルーブ光を光ファイバを通して運動する計測対象物に当て、その周波数シフトを受けた

信号と元の信号を混合しそのビート信号から計測対象物の速度を検出する方式である。(e)の代表例はレーザージャイロスコープと呼ばれているもので、光源から2つに分けられた光を右方向と左方向に入射し、系全体の回転により生じた位相差を干渉法で計測するものである。

光ファイバを用いることによる特徴をまとめてみると表Ⅱのようになる。すなわち光であることが、非接触、非干渉、高信頼性の特徴を与え、ファイバである

図 2 光ファイバ計測系の構成例

表Ⅱ 光ファイバ計測系の特徴

基本特性	物理特徴	使用時の利点
光であること	非接触計測 コヒーレント光(偏光) スペクトル パルス	対象物に外乱を与えない 干渉, 偏光の利用 分光分析 時間多重可能
ファイバであること	細径・軽量 低損失 大容量 センサ機能	狭空間では計測可能, 小型化 長尺, 可能性大 高分解度信号伝送 ファイバセンサ
石英材料であること	耐環境特性 絶縁特性 経済性	高温環境下で計測, 可燃性ガス雰囲気での計測 非接地, 非短絡, 耐電磁ノイズ, 耐雷, 高圧部でも測定可 資源的制約がない

ことが、細径、低損失、高感度なる特徴をもたらす。また光ファイバの主原材料が石英であることが更に耐環境性を向上させている。

3 光ファイバセンシングシステム

光ファイバセンシングシステムについては、いろいろな分類方法が考えられるが、冒頭に述べたように光の4つの属性に従ってその応用例を挙げてみたい。

3・1 光強度変調型センサ

測定すべき対象物理量によって強度変調を受けた光信号を扱うもので、最も基本的なセンサである。

(1) 光路遮へいを利用するもの

図3に示すのは光ファイバ間に置かれた2個の分布屈折率レンズで得られた平行ビームの中へバイメタルととりつけられた遮へい板を挿入する方式で、温度と

図3 光遮へい方式温度センサ

共に透過光量がほぼ直線的に変化するように設計された光ファイバ温度センサの例である。

その他、設定温度に対する ON/OFF 信号を検出するセンサを図4に示す。これはフェライトの遮光ブロックを磁石で引きつけておき、キュリー点以上の温度になると磁性を失って遮光ブロックが平行ビームをさえぎり OFF の状態になるという原理に基づく。この種のセンサは、平行ビームと遮へい板との組合せでどのような応用にも対応できるが、ダイナミックレンジが小さく、精度も低いので適用範囲は限定される。

(2) 光路中の材料の光学変化の利用

半導体の光吸収端の温度変化を利用した温度センサがその代表例である。図5に示すように吸収端波長は温度上昇と共に長波長側にシフトする¹⁰⁾。この原理を応用した温度センサの側を図6に示す。半導体としては GaAs, CdTe を用い、透過光量が変化をうける波長 (たとえば 870 nm) の LED(1) と、変化をうけない波長 (たとえば 1300 nm) の LED(2) を用い、互いの強度比で温度を検出する方法である。このセンサは -20°C ~ 300°C の範囲で $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下の精度で測定が可能であったという。

また光ファイバと接触する媒質との間で生ずる屈折率差により全反射条件が変化することを利用したセン

図4 磁石式 ON/OFF 温度センサ

図5 半導体の吸収端特性

図6 半導体光温度センサを用いた温度測定装置

図7 全反射を利用したファイバ液位計

サもよく知られている¹¹⁾。図7に示すようなプリズムやU字管型光ファイバの全反射を利用する液面計がある。

いずれも屈折率の高い液体が裸のコア部に触れると

コア中の光が漏れだし、透過光量が減少する。したがって液面の上下により透過光量が変化するため、液面のモニター用として用いることができる。

液面計としてユニークな光センサにクロストーク型

図8 光ファイバクロスストーク型センサ

図9 蛍光センサプローブ

がある。これは図8に示すような簡単な構造をもって
いる。すなわち1組の多モード光ファイバの一部のク
ラッド部を取り去り、わずかな間げきを設けて互いに
接触させる。光ファイバを伝搬する光はこの部分で一
部が外に漏れ出して他方に入りクロスストークが生ずる。¹²⁾
このクロスストーク量は、間げきの大きさや、間げきに
入った媒質により変化する。間げきを一定に保った状
態ではクロスストーク量は媒質の屈折率で決まる。した
がって図の光ファイバIに光を入力すれば、検出器
 D_1 、 D_2 の差動量により媒質の屈折率を高精度で求め
ることができる。

もう1つの例は蛍光スペクトルによるセンサである。
図9に示すようにセンサ部の先端に蛍光物質が充てん
されている。紫外線照射により可視蛍光を発しこの蛍
光の温度依存性を利用すれば、これらの間の相対蛍光
強度比から温度を計測しうる。このセンサの測定範囲
は $-50 \sim 200^\circ\text{C}$ で 0.1°C の精度をもち応答速度は1秒
以下といわれている。¹³⁾

(3) 光ファイバ自身の損失の利用

光ファイバ自身が外界の変化に対して損失を生じる
ことを利用したもので代表例としてマイクロベンドが
ある。これは光ファイバの光軸と直角の方向に微小な
曲がりを加えると導波モードが一部放射モードに変換
し伝送損失が増加する現象である。図10はマイクロベ
ンドを利用した圧力センサの例である。¹⁴⁾ $\text{NA}=0.2$ の
マルチモード光ファイバを用いた時 $1\mu\text{Pa}$ で42 dB、
 $\text{NA}=0.04$ の光ファイバを用いた時は $1\mu\text{Pa}$ で15 dB
の検出感度が得られた。このようにファイバと局所的
に大きな曲率を与えるように小ピッチの凹凸のある2
枚の板を対向させると圧力の他に変位、温度、振動な

図10 マイクロベンド損失を利用した光圧センサ

ど種々の物理量が測定できる。

光ファイバにNi、Alなどの金属膜をコートしたもの
を用いて磁界や電界との相互作用で生ずるひずみを
マイクロベンドとして検出する方法もある。また放射
線により損失が増加することを利用したセンサもこの
範ちゅうに入る。

3・2 位相変調型センサ

光ファイバの屈折率変化や長さの変化を位相シフト
として検出する方法を位相変調型センサとよぶ。この
位相シフト量の計測には通常干渉計を用いるが、最近
は光ファイバで干渉計を構成したものが現れて来た。
図11にその代表例を示す。^{15), 16)} (a)はマッハツェンダ型で、

2本の単一モード光ファイバを用いて干渉計が構成されている。一方のファイバ（センサーアーム）に測定すべき物理量（圧力，温度）を作用させると，ファイバの長さや，屈折率が変化しその結果伝搬光の位相に遅れが生じ，レファレンスアームを伝搬した光との間の干渉しまの変化が表れる。この干渉しまの変化量に

より圧力や温度を計測することができる。長さ1mのコイル状光ファイバの場合，干渉しま1フリンジの変化は，圧力では $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度では $7.5 \times 10^{-2} ^\circ\text{C}$ ，ひずみでは $7.27 \times 10^{-3} \text{ mm}$ に対応している。光ファイバ同士のカップリングには，光ファイバ素子が用いられる。

(a) マッハツェンダ型

(b) マイケルソン型

(c) ファブリーペロー型

(d) リング型

(e) 偏光型

S …… 単一モードファイバ
M …… 多モードファイバ
P …… 偏光保持ファイバ
C …… ファイバカップラー

図11 総ファイバ干渉計

(b)はマイケルソン干渉計で、同じく2本の光ファイバをカプラで結合したものである。光ファイバの先端にAl膜をコートし、一方の先端を他方よりLだけ長くして互いに密着させておくことで差動型センサが構成できる。一方の光ファイバセンサ部に温度変化を加えるとこのアームからの反射光の位相が変化し、他方のアームからの反射光との干渉で生じる干渉縞の強度変化から温度変化を計測しうる。

(c)はファブリーペロー型干渉計で、ファイバエタロンを用いた温度センサ等がある。ファイバエタロンの光路長が温度により増加し、それに対応して透過光量が周期的に変化する。これにより温度が測定できる。この方式はレファレンスアームを必要とせず、簡単な構成であるため高感度の信号が得られるが、レーザの安定性確保が重要である。

(d)のリング型干渉計はサニヤック効果を利用した光ファイバジャイロスコープに利用される基本型である。リング干渉計は左右両回りの光の2光束干渉計で、角速度、回転角センサとして現在実用化が進んでいる。

(e)の偏光分割型干渉計の例で、単一モードファイバ中を伝搬する光の直交した偏光モードの一方を信号光他方をレファレンス光としたものである。直交偏光モードの伝送用としては、前述した偏波保持光ファイバが用いられる。直交偏光モード間で生じた位相差を介して圧力、ひずみ、温度などを計測することができる。

3・3 偏光変調型光センサ

光のもつ偏波面の回転量、偏光度の測定により、電

界、磁界、圧力などの物理量を測定する方式のセンサである。偏波面の回転は強度や位相変化に変換して前述の3・1、3・2で計測することになるが、偏光変調の部分は光センサ独特の原理を用いており、ここにとりあげてみた。

(1) ファラデー効果

ベルデ定数の大きいガラス（たとえば鉛ガラス）や結晶（たとえばYIG）を磁界の中に入れると偏波面の回転が生ずる。これをポラライザとアナライザを用いて光の強度変化に変換すると磁界強度を求めることができる。図12に基本構成を示す。¹⁷⁾ 光源としてLEDを用いた時 $H=10(\text{Oe})$ で40 dB以上の感度が得られたという報告がある。

(2) ポッケルス効果

図13に示すように電圧、電界により生ずる結晶の複屈折を利用した光センサである。ポッケルス素子としては、BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)、CdTe、ZnS、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 などがあ¹⁸⁾る。固有複屈折がない等軸性結晶であるBSOは温度特性がよいと言われている。実際の試作例では5～1000 Vの範囲で $\pm 3\%$ の精度が測定できたという。

(3) 光弾性効果

エポキシ、 LiNbO_3 、カルコゲナイドガラスなどの¹⁹⁾材料は、外部から応力が加えられると複屈折を生ずる。この性質を用いた加速度センサが試作されている。図14のように光弾性透明材料を平行ビームの中に挿入しその上に荷重がのせられている。被測定物の振動、加

図12 鉛ガラスを用いた光電流磁界センサ

図13 ポッケルス効果を用いた光電圧電界センサ

図14 光弾性方式加速度センサ

図15 参照光型光ファイバレーザドップラー速度計

速度運動に比例した応力により生じた偏光度の変化を前の例と同じような方法で測定する。これは0.1～50 Gまでの直線性があり3 kHz位まで40 dB以上の感度をもっている。

以上外部物理量により偏光面の回転や複屈折が生じる事を利用したセンサの種類と特徴について述べた。

3・4 周波数変調型光センサ

光を対象物に照射した時に生ずる周波数の変化または光ファイバ中で生ずる周波数の変化を検出し、物体の運動状態を測定する方式である。

(1) ドップラー効果

レーザ光を移動物体に照射するとその散乱光の周波数はドップラーシフトを受ける。その量は移動物体の速度に比例しているため、このシフト量を計測すれば物体の移動量を計測することができる。図15に基本構成を示す。この例は参照光型光ファイバレーザドップラー速度計と呼ばれ、レーザ光の周波数 f_0 からドップラーシフトをうけた後散乱光の周波数、 $f_0 + \Delta f_0$ を同じ光ファイバを介して受光し、元の周波数 f_0 とのビート信号をヘテロダイン検波する方法である。この時の移動物体の速度は、 $f_0/2\cos(\theta)/\lambda$ で表わすことができる。 θ 、 λ は各々入射光と方向と移動物体の方向との間の角度、および用いたレーザ光の波長を表わしている。この方法は $\pm 0.5\%$ 以下の高精度測定が可能となり、測定範囲も 10^{-2} m/sec～ 10^3 m/sec と広いダイナミックレンジをもっている。

(2) サニャック効果

図16に示すように角速度 Ω で回転している光ファイ

図16 光ファイバジャイロ基本構成図

バのループ(内面積 A)を光が時計および反時計方向に一周すると両方が出力端で位相差 $\Delta\phi = (8\pi f/c^2)A \cdot \Omega$ を生ずる現象である。原理としては前述した位相変調型光センサに分類できるが、周波数変化法としてサニャック効果による位相変化を光の周波数変化で補償する検出法(零位法)があり、周波数変調型とも考えられる²¹⁾。この方式はスケールファクターが光量に依存せず、リニアな出力が得られる。検出可能な回転角速度としては $0.1^\circ/\text{h} \sim 10^\circ/\text{h}$ が得られている。

4 あとがき

光ファイバセンサとは、種々の物理現象を利用して測定対象を非接触、高感度、低ノイズで計測しうる優秀な道具である。しかもその測定原理は極めて多様で数多くのアイデアが提案されている。また光ファイバをはじめマイクロオプティックスなどセンシングシステムを組上げるための要素部品もそろって来た。今後は具体的な応用に対してコストミニマムのシステムをいかに構成するかが課題となろう。「光でもできる」

から“光でしかできない”という光センサのニーズを掘り起すことも必要である。光ファイバジャイロスコープなどは光の特徴を最もうまく利用したもので、コストが下がれば航空機のナビゲーションから自動車やロボットなどへも応用されるであろうと言われている。光ファイバセンサは材料開発の時代がようやく終り、産業応用へ向って大きく展開しはじめたと言える。

参 考 文 献

- 1) 根本俊雄, 本田辰篤, 森川滝太郎, 岩崎 俊, 遠藤道幸, 電子通信学会技報, DQE 78, 124 (1979).
- 2) 保立和夫, 光学技術コンタクト, 18, 8 (1980).
- 3) 松村宏善, 日経エレクトロニクス 7 月 6 日号, 154 (1981).
- 4) 保立和夫, 光学, 12, 340 (1983).
- 5) 光産業技術に関する内外動向調査報告書Ⅳ—光応用計測の技術動向—(1984) 光産業技術振興協会.
- 6) 芳野俊彦, 光学技術コンタクト, Vol. 24, No. 3, 3 (1986).
- 7) 藤井陽一, 光ファイバ利用技術, p. 137 (1985) アグネ社.
- 8) 石川重大, 昭和53年電子通信学会光電波部門大会, p. 229.
- 9) 吉田 進, オプトホニクス, Vol. 1, No. 1, 36 (1982).
- 10) 久間和生, 電気学会研究会資料, OQD 81-9 (1981).
- 11) K. Spenner, 1st OFS London, 9b (1983).
- 12) 藤村貞夫, 光応用技術Ⅲ-6, 日本オプトメカトロニクス協会, p. 102 (1988).
- 13) J. A. Bucas and T. R. Hickman, Appl. Opt., 18, 938 (1979).
- 14) J. N. Field, C. K. Asawa, O. G. Ramer and M. K. Barmski, J. Acoust. Soc. Am, 67, 816 (1980).
- 15) 大塚喜弘, 光学技術コンタクト, Vol. 24, No. 3, 27 (1986).
- 16) 藤村貞夫, 光応用技術Ⅲ-6, 日本オプトメカトロニクス協会, p. 91 (1988).
- 17) A. Papp, Appl. Opt., Vol. 19, No. 22, 3279 (1980).
- 18) Y. Hawazaki, Electron Lett., Vol. 16, No. 11, 406 (1980).
- 19) 田井修市, 昭和56年応用物理学会予稿集89-N-7 (1980).
- 20) 久間和生, 計装, Vol. 24, No. 8, 37 (1981).
- 21) D. E. Thompson, Appl. Phys. Lett., 33, 940 (1978).