解説

光ファイバセンサ*

Optical Fiber Sensor

筒井輝明** 山本 哲**

Teruaki TSUTSUI and Satoshi YAMAMOTO

Key words: optical fiber, optical sensor, fiber optic measurement, Raman scattering, optical time domain reflectometry

1. はじめに

最近の光技術及びエレクトロニクス技術の発展とその普及には目覚ましいものがあり、光通信のみならず光ファイバ、光学素子等を用いた光ファイバセンサの分野においても、研究、開発が活発になってきている。光ファイバセンサはセンサ部を絶縁体で構成できることから、

- (1) 耐電磁誘導性に優れ、ノイズに強い。
- (2) 防爆構造が不要で、本質的に安全である。
- (3) 高感度、高精度な検出が可能である。
- (4) 小型、軽量化が図れる。

等の利点をもつ。これらの利点から、光ファイバセンサは耐電磁誘導性が特に重要視される電力分野（発電・変電、架空・地中送電線等）を始めとして、鉄鋼、化学プラント等の計測・設備監視用として広く活用されつつある。

2. 光ファイバセンサの分類

光ファイバセンサを大別すると次の二つに分類できる。

- (a) 光ファイバ伝送路型（変換素子で物理量を検出し、そのまま光ファイバで伝送する方式）
- (b) 光ファイバ機能型（光ファイバ自体をセンサとして用いる方式）

図1に二つのセンサ方式をモデル化して示す。(a)の方式では対象とする物理量から光学量への変換素子

として、光学結晶や半導体を用いられ、変換素子で生ずる光の強度変化、複屈折変化、偏光状態の変化等を光ファイバを通して受光器（検出回路部）に導き、物理量に換算する。従って、この方式における主要センサ部は変換素子であり、センサの特性は使用される変換素子で決定される割合が大きい。また、変換素子の置かれたポイントをセンシングすることになるため、広い領域の物理量分布等を計測する場合には、数多くのセンサが必要となる。(b)の方式では光ファイバがセンサと伝送路の二つの役割を兼ねる。光ファイバの物理的变化としては曲げあるいは光吸収等による損失変化、光ファイバ内で発生する散乱光強度の変化、伝搬光の位相量・偏光状態の変化等が挙げられる。これ

(a) 光ファイバ伝送路型センサ

(b) 光ファイバ機能型センサ

図1 センサ方式の分類

* 原稿受付 昭和62年9月30日

** 日立電線(株) (日立市日高町5-1-1)

表1 光ファイバ伝送路型センサの原理と性能

センサ	原 理	主要素子例	性 能 例	
			測定範囲	精 度
温 度 セ ン サ	吸収端波長の変化検出	GaAs, CaP ルビー	0~300°C	±1°C
	蛍光強度の変化検出	CaAs, YF ₃ Gd ₂ O ₂ S	-30~200°C	±0.5°C
	複屈折変化検出	LiNbO ₃ , SiO ₂ LiTaO ₃	-20~120°C	±0.1°C
	色変化検出	コレステリック 液晶	31~45°C	0.35°C
磁 界 セ ン サ	ファラデー効果検出	鉛ガラス Bi ₁₂ GeO ₂₀ , ZnSe YbIG, YIG Bi ₁₂ SiO ₂₀ , 水晶	10~1 000 Oe (AC)	2.0%
	ポッケルス効果検出	LiNbO ₃ , PLZT Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ Bi ₁₂ GeO ₂₀ Bi ₁₂ SiO ₂₀	10~600 V (AC)	±1.0%
	エレクトロジャイレ ーション効果検出	水晶	—	—
	エレクトロクロミッ ク効果検出	WO ₃	—	—
圧 力 セ ン サ	光弾性効果検出	バイレックスガ ラス エポキシ樹脂	0.01~10 atm	±1.0%

らの物理量に対する感度を増加させるために、特殊な材料や構造(希土類元素のドーブ、コア・クラッド・被覆構造の変更等)の光ファイバを用いた検討が行われている^{1)~3)}。光ファイバ自体をセンサとして用いることから、光ファイバを対象物に巻き付けたり、沿わせたりすることによって、広範囲な領域での物理量を検出することが可能である²⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

3. 光ファイバセンサの原理

3.1 光ファイバ伝送路型センサ

各種の計測を対象とした光ファイバ伝送路型センサについて、検出原理、測定範囲、精度をまとめて表1に示す。表1に示したセンサのうち代表的な検出原理について以下に述べる。

1) 温度センサ

代表的な例として、半導体の吸収端波長が温度に依存して変化することを利用し、透過光強度の変化から温度を検出するセンサがある。その構成例を図2に示す⁴⁾。本センサに用いられ

る半導体は光学的基礎吸収端波長 λ_g をもち、 λ_g より短波長の光はほとんど吸収される。また、 λ_g は温度上昇と共に長波長側に移行する。従って、 λ_g が光源のスペクトル内にあるような半導体等の材料を選び、この素子と発・受光素子を光ファイバでつなげば、透過光強度は温度上昇と共に減少するので、温度センサとして用いることができる。センサにはGaAs($\lambda_g \sim 900$ nm:室温)が最も多く用いられており、ほかにGaP($\lambda_g \sim 550$ nm:室温)やルビーガラスを使用した例がある⁵⁾⁶⁾。なお、図2の構成例のように、 λ_g より十分長い波長帯の光源と λ_g 付近の光源を用い、両波長の透過光強度の比をとることにより光源、伝送用光ファイバの損失変動の影響を避ける工夫もされている。

2) 磁界センサ

鉛ガラス、BSO(ビスマスシリコンオキシド)、ZnSe、磁性ガーネット等の結晶に直線偏光を入射すると出射端では磁界の大きさに比例して、偏光面が回転するファラデー効果が生ずる。このファラデー回転角度は一般的に式(1)で示される。結晶によってベルデ定数 V_e は異なり、 V_e の大きいものほど高感度であるといえる。

$$\theta = V_e HL \quad (1)$$

である。ここで、 θ :ファラデー回転角度、 V_e :ベルデ定数、 H :磁界、 L :ファラデー素子の長さ。

(a) 光ファイバ温度計の構成図

(b) 光温度センサの構成図

図2 光ファイバ温度センサ⁸⁾

図3 磁界センサの構造⁷⁾

図3に示すように、光源から出た光をマルチモードファイバで偏光子に導き、直線偏光にした後、ファラデー素子と検光子を透過させる。検光子透過後の光強度は偏光面の回転角度に比例して変化するので、この値から磁界が求まる⁷⁾。センサとしては検光子の2軸成分から磁界を求める2ビーム式と1軸成分のみを用いる1ビーム式がある⁸⁾。

3) 電圧センサ

BGO（ビスマスゲルマニウムオキシド）、BSO（ビスマスシリコンオキシド）等の結晶では複屈折性を持ち、屈折率差が電界に比例して変化する（ポッケルス効果）。従って直線偏光を入射した場合、透過光は結晶の二つの光学軸に対して、電界に比例した位相ずれを起こし、このずれ量から電界（電圧）が求まる⁸⁾⁹⁾。なお、図4に示すように、センサ部では、偏光子透過後の直線偏光を1/4波長板で円偏光に変換し、ポッケルス素子および検光子透過後の光強度から電界（電圧）が求められている。

4) 圧力センサ

エポキシ樹脂、パイレックスガラス等の光弾性素子では圧力を印加すると複屈折性が変化する。従って、3) で示した電界センサと同様な光学素子(1/4 波長板、

図4 電圧センサ⁸⁾

偏光子，検光子)を用いて圧力センサを構成できる⁸⁾。なお，同様な原理で加速度や振動を検出するセンサの検討も行われている¹⁰⁾。

3.2 光ファイバ機能型センサ

光ファイバ機能型センサに
ついて、検出原理、測定範囲、

精度等をまとめて表2に示す。光ファイバ伝送路型センサに比べると、まだ研究段階のものが多く、光ファイバ自体をセンサとして用いる場合、光信号の検出法としては光ファイバの透過光強度変化をそのまま検出する方法以外に、干渉計を用いて、光の位相量や偏光状態の変化を検出する方法がある¹¹⁾。更に、光パルスを入射し、ファイバ内で発生する散乱光パルスを反射光として検出するOTDR法(Optical Time Domain Reflectometry)がある。

1) 温度センサ

光ファイバ機能型の温度センサには数多くの研究例がある。これらの内で、適用効果の大きいと考えられる代表的な分布形温度センサを図5に示す。図5はラマン散乱光の温度依存性を利用したセンサについて、その構成と特性を示したものである¹²⁾。

光ファイバ中では、入射光の一部が散乱される。その多くはレーリ散乱であるが¹³⁾、一部は入射光の波長とは異なるラマン散乱となり、両者とも温度の関数となる。またこれらの散乱光のさらに一部は入射側へ戻ってくるので、光分岐器を通して受光、解析すると、ファイバに沿った各位置での温度が計測できる。

2) 湿度センサ

石英コア表面に二酸化けい素の多孔質層を形成した特殊な光ファイバを用いて、湿度センサに応用する検討が行われている¹⁴⁾。このセンサでは、光ファイバの損失が相対湿度の上昇と共に大きくなることを利用し、透過光強度変化あるいは後方散乱光強度変化から相対湿度を求めるものである。

3) ガスセンサ

光が全反射して進む場合、反射界面を越えて進む成分があり、これをエバネシエント波と言う。光ファイバではコアとクラッド界面を越えて、クラッド部にエバネシエント波が存在する。ここで、クラッドを大気とした場合、エバネシエント波は大気中にまで及ぶことになり、これを利用して分光特性からガス検出を行うことができる。すなわち、対象とするガスがこの光ファイバ近傍に存在すると、特定波長の伝搬光

表2 光ファイバ機能型センサの原理と性能

センサ	原 理	光ファイバ例	性 能 例	
			測定範囲	精 度
温度センサ	光路長の変化検出 (干渉計)	SM ファイバ 偏波保持ファイバ	20~50°C	—
	複屈折変化検出	偏波保持ファイバ SM ファイバ	20~120°C	±2.0°C
	散乱光変化検出 (レーリ, ラマン)	液体コアファイバ 金属コートファイバ GI ファイバ	19~212°C (液体コア)	1.0°C
	吸収損変化検出	希土類ドーブファイバ	0~800°C	—
磁界センサ	ファラデー効果検出	SM ファイバ 偏波保持ファイバ	50~1200 A (光 CT)	0.24%
	磁歪効果検出	Fe ₃ B ₂₀ Ni ₄₆ 48 パーマロ イコート SM ファイバ	3.3×10~ 0.10 Oe	—
電圧センサ	カー効果検出	SM ファイバ, ニトロベン ゼンコアファイバ	—	—
	電歪効果検出	P (VDF, TFE) (ポリふっ 化ビニリデンテトラフルオ ルエチレン) に埋め込んだ SM ファイバ	—	—
圧力センサ	光弾性効果検出	SM ファイバ 偏波保持ファイバ	~50 psi	—
	マイクロベンド損失 検出	GI ファイバ	0~10 N	—
湿度・ 液体検知センサ	吸着による損失変化 検出(湿度)	SiO ₂ 多孔質層クラッドフ アイバ	—	—
	エバネシエント波 を介した損失変化検 出(液体)	偏心コアファイバ	—	—
	吸収損変化検出	露出コアファイバ	—	—
ガスセンサ	エバネシエント波 を介した吸収損変化 検出	極細コア (1.8 μm) ファ イバ	5~100% (CH ₄)	1.0%

SM ファイバ: シングルモードファイバ

GI ファイバ: グレーデッドインデックスファイバ

(a) センサの構成

(b) センサによる検出例

図5 ラマン散乱光を利用した分布型温度センサ¹²⁾

はエバネシエント波を介して吸収・減衰を受け、透過光強度の変化からガス濃度が求められる¹⁵⁾。エバネシエント波の割合を高めるために光ファイバ径を細くしたり、コアを偏心させる等の工夫が考えられている。なお、このセンサは液体検知センサとしても利用可能である³⁾。

4) 圧力センサ

光ファイバに微小な曲げを加えると損失が発生する(マイクロベンド損失)、従って、光ファイバに加わる圧力をマイクロベンド損失に変換し、圧力を求めるセンサが考えられている¹⁶⁾。また、シングルモードファイバ等の光弾性効果を利用し、圧力を伝搬光の位相量変化として、干渉計で計測する検討も行われている。なお、ニッケル等の磁歪効果を持つ物質を光ファイバにコーティングして、同様な原理で磁界検出を行った研究もある¹⁷⁾。

4. 光ファイバセンサの応用

計測・制御を目的として多くのセンサが用いられており、特に機械設備の自動化、遠方監視の発展に欠くことのできないものとなっている。現在、用いられているセンサの大部分は電気信号を主体としたものであり、一般の環境下ではその機能を十分発揮する。しかし、電磁環境の下では障害を受けやすいので、その使用範囲に制限を受けることになる。この点、光ファイバセンサは耐電磁誘導特性

図6 光 PCT (変圧変流器) への応用⁷⁾⁹⁾

に優れており、厳しい電磁界条件の下でもその機能を維持できる。このような特徴から光ファイバセンサは、まず、高電圧、大電流の下でのセンシング、すなわち電力設備の計測、制御に適用されている。以下に、簡単にその応用例を紹介する。

高電圧印加部の電圧・電流検出用として、電圧センサ、磁界センサを組み込んだ光式 PCT (変圧・変流器) の構造例を図 6 に示す⁹⁾。光ファイバの絶縁性という特長によって、高電圧部に取り付けられたセンサと接地側の検出回路部とを光ファイバでそのまま結べるために絶縁構成が大幅に簡素化され、かつ経済性に優れたものが可能となる。図 7 はガス絶縁遮断器 (GIS) の監視用として、電圧・電流センサを組み込んだ構成例であり、電圧・電流の計測に加え、これらセンサからの信号によって機器の異常を診断することも可能である¹⁸⁾。これらのほかにも車両用変圧器内の巻線温度監視を行うために光ファイバ温度センサが取り付けられた例がある¹⁹⁾。

5. お わ り に

光ファイバセンサは電気式のセンサにない数々の特長をもち、既に一部は実用化されている。しかし、まだ開発途上のものも多く、今後、光デバイスの高性能化、高機能化が進むにつれ、多種多様の光ファイバセンサが計測・制御に活用されるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) E. Snitzer et al.: Fiber Optic Rare Earth Temperature

図7 GIS (ガス絶縁遮断器) への応用⁷⁾⁹⁾

- Sensors, OFS 83, (1983) 79.
- 2) A. H. Hartog: A Distributed Temperature Sensor Based on Liquid-Core Optical Fibers, J. Lightwave Tech., **LT-1**, 3, (1983) 498.
- 3) Y. Ohono et al.: Distributed Oil Sensor Using Eccentrically Cladded Fiber, OFS 86, (1986) 105.
- 4) K. Kyuma et al.: Fiber-Optic Instrument for Temperature Measurement, IEEE J. Quantum Electron., **QE-18**, 4, (1982) 676.
- 5) 服部 肇ほか: 光ファイバ温度センサ, センサ技術, **4**, 2 (1984) 107.
- 6) E. Theocharous: Differential Absorption Distributed Thermometer, OFS 83, (1983) 10.
- 7) 筒井輝明ほか: 磁界センサへの応用, 日本応用磁気学会第 48 回研究会資料 (1987) 61.
- 8) 久間和生ほか: 最近の光ファイバ計測センサとその検出原理, 計装, **27**, 4 (1984) 17.
- 9) K. Kanemaru: Fiber Optic Current/Voltage Sensor, OFS 86 Informal Workshop, (1986) V 1.
- 10) Y. Ida et al.: Fiber-Optic Vibration Sensor Using Photoelastic Substance, OFS 86, (1986) 31.
- 11) 武者利光ほか: 光ファイバ干渉温度センサ, 第 4 回センサの基礎と応用シンポジウム, AI-3 (1984) 7.
- 12) 小川勝徳ほか: ラマン散乱光による分布形温度センサ, 第 5 回光ファイバセンサワークショップ, WOFS 5-16 (1987) 117.
- 13) 小川勝徳ほか: 地中送電線の保守監視を目的とした光ファイバ型温度センサの検討, 電気学会全国大会 (1987) 1428.
- 14) 小川勝徳ほか: 湿度センサ用光ファイバの基礎検討, 第 5 回光ファイバセンサワークショップ, WOFS 5-21 (1987) 153.
- 15) 芳野俊彦ほか: 光ファイバエバネッジメント波によるメタン検知, 第 1 回光ファイバセンサワークショップ, WOFS 1-2 (1985) 9.
- 16) O. B. Wright et al.: Optical Differential Pressure Sensor Based on Waveguide Curvature, OFS 86, (1986) 27.
- 17) A. Dandridge et al.: Optical Fiber Sensors, Electron. Lett., **16**, (1980) 408.
- 18) M. Kanoi et al.: Optical Voltage and Current Measuring System for Electric Power System, IEEE Trans. Power Delivery, **PWRD-1**, 1, (1986) 91.
- 19) 久間和生ほか: 光ファイバ応用計測, 計測技術, **2** (1984) 258.