

産業用光ファイバセンサ

三菱電機（株）中央研究所 久 間 和 生

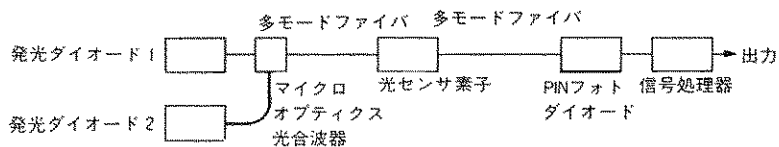
1. はじめに

光による計測は、古くから分光分析、測光・測色、顕微鏡などとして古く使われてきたが、近年、レーザ、光ファイバ、光センサ、イメージセンサなどのオプトエレクトロニクス技術の進歩に伴い、さまざまな光の特質；光強度、位相、周波数（波長）、偏光などを利用した実用的な光計測技術が開発されている。特に光ファイバ（応用）センサは、光ファイバが高絶縁性、無誘導性、低損失広帯域性、安全防爆性、細径可とう性など優れた特徴を有しているため、近年電力系統、工業プラント、医療機器などの分野で注目され、実用化されつつある^{1)~3)}。また、最近では光ファイバの長さ方向の被測定量の分布を測定することを目的として、1本の光ファイバの幹線系に多数のセンサを配置した多点型光ファイバセンサや、光ファイバ中での後方散乱光を利用した分布型光ファイバセンサの開発も盛んである⁴⁾。以下、本稿では、これらの中で

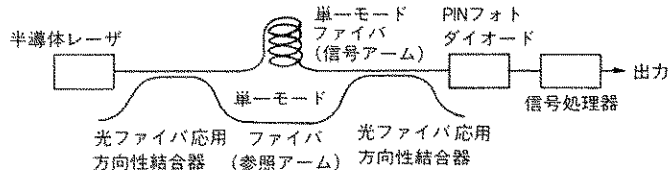
産業への応用も目的とした光ファイバセンサの基本的な原理と開発動向について述べる。

2. 光ファイバセンサの原理と分類

光ファイバには、高純度石英ガラス製の単一モード形、多モード・グレーデッドインデックス (GI) 形、多モード・ステップインデックス (SI) 形がある。このほか、偏波面保存単一モードファイバ、赤外線伝送用ファイバ、プラスチックファイバ、バンドル形、およびマルチコアファイバなどが開発されている。光ファイバセンサでは、目的に応じて上述した種々の光ファイバが利用されている。光ファイバセンサは、基本的に光源、光ファイバ、光センサ素子、光検出器、および光結合器等の光受動素子で構成される。光ファイバの利用形態により光ファイバセンサを分類すると、図1に示すように、光ファイバ以外の光センサ素子と信号伝送路としての光ファイバを利用した“光ファイバ伝送路形センサ”と光ファイバ自身をセ



(a) 光ファイバ伝送路形センサの構成例



(b) 光ファイバ機能形センサの構成例

図1. 光ファイバセンサの基本構成

ンサとして利用する“光ファイバ機能形センサ”に大別できる。光ファイバ伝送路形センサでは、製造技術、応用技術ともすでに確立されている発光ダイオード、多モードファイバ、マイクロオプティックス光受動素子を利用しているため、センサシステムとしての性能は、主に光センサ素子の材料特性や機構に依存する。この方式の光ファイバセンサは、すでに実用化されているもの（例えば、光ファイバ電圧計、電流計、温度計等）も多く、現在の課題は、低価格化のための製造技術とフィールドデータの蓄積にある。一方、光ファイバ機能形センサは、レーザ、単一モードファイバ、光ファイバ応用受動素子を用いて計測対象による光の位相変化を利用したもの（干渉形光ファイバ

センサと呼ぶ）が多い。したがって、本方式のセンサは高感度特性が得られる反面、計測対象以外の外乱による出力信号の不安定性が問題となっている。この問題点を解決するには、センサシステムの安定化技術はもちろん、半導体レーザや光ファイバ等の光コンポーネントの一層の特性改善と共に、新しい光ファイバセンサ用コンポーネントの開発が不可欠であると思われる。

本稿で述べる、主として光ファイバ伝送路型センサに属する産業用光ファイバセンサの原理を表1にまとめておく。

3. 光ファイバ伝送路形センサの例

(1) バンドル光ファイバプローブ形変位・振動計

表1 光ファイバセンサの原理

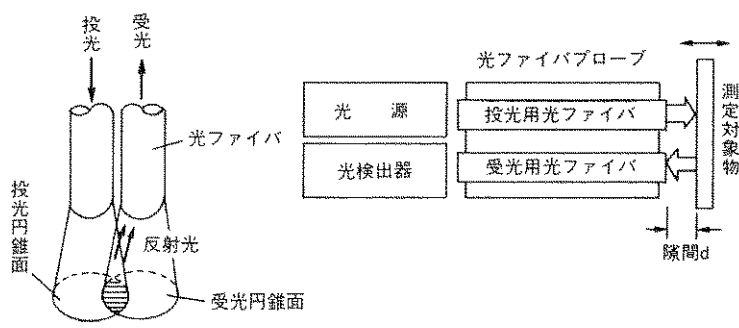
計 測 量	光の変調	原理（光学現象）
電 流 ・ 磁 界	偏 光	光ファラデー効果
電 圧 ・ 電 界	偏 光	ポッケルス効果、カー効果
	光 強 度	フランツケルディッッシュ効果、エレクトロルミネセンス
温 度	光 強 度	遮へい板による光路遮断 半導体の透過率変化、蛍光放射、液晶の光散乱係数の変化
	光 強 度	フォトルミネセンス
	光 ス ペ ク ト ル	発熱体の放射（黒体放射）
	偏 光	複屈折の変化
	位 相	ファブリ・ペロー共振器の透過特性の変化
変 ひ ず み 力 動 圧 振	光 強 度	反射強度変化（ダイヤフラムなど） ピエゾ吸収効果 遮へい板による光路遮断 液晶の光散乱係数の変化
	偏 光	光弾性効果
速 度 流 速	光 強 度	スベックルの移動
	周 波 数	ドブラ効果
レ ベ ル	光 強 度	光路遮断、光吸収
表 面 形 状	光 強 度	剛体の反射率変化、光の回折
放 射 線	光 強 度	放射線ルミネセンス
イ メ ー ジ	光 強 度	イメージファイバ
ガ ス	光 強 度	分子吸収スペクトル
	周 波 数	ラマン散乱
その他化学量	光 強 度	各種液体、粒子の光吸収、光散乱特性

光ファイバは固有の開口数NAによって決まる投光角および受光角をもっている。図2にバンドルファイバプローブ形変位・振動計（ホトニックセンサと呼ばれている）の構成図を示す。このように投光・受光を1本のバンドルファイバで行うとき、測定面でこれらの投光、受光円の重なり合った部分からの反射光のみが受光される。この重なり合った部分の面積は、プローブ端と測定面との距離によって変化するため、受光強度から測定面の位置を測定できる。プローブの投光用、受光用

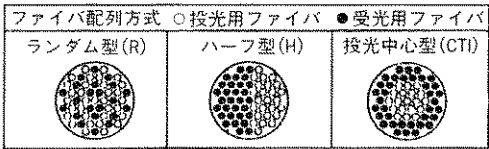
ファイバの配列は (b) 図に示すようなものが用いられている。測定面とプローブの距離（間隙）と出力電圧との関係を (c) 図に示す。変位測定の特性は、0～100 μm の直線性は $\pm 5\%$ 、最大分解能は0.014 μm 、使用温度は $-75\sim 150^{\circ}\text{C}$ である。また、振動測定に対する周波数応答性は、DC～200kHzである。

(2) 光ファイバ温度センサ

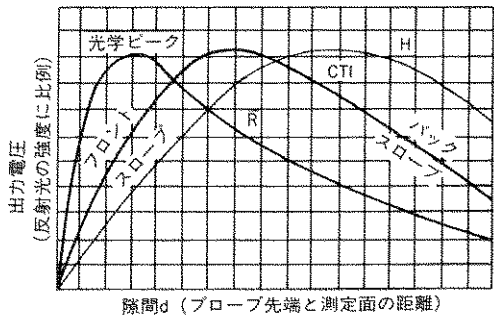
図3 (a) に半導体 (GaAs) の光物性を利用した光ファイバ温度計の原理図を示す。半導体は光



(a) バンドル光ファイバプローブ形変位計の原理図



(b) 投光・受光用ファイバの配列法



(c) 測定面とプローブの距離d と出力電圧の関係

図2. バンドル光ファイバプローブ形変位・振動計の原理と構成図

学的基礎吸収端波長 λ_g をもち、 λ_g よりも端波長の光に対する光吸収は急激に増加する、また λ_g は温度上昇と共に長波長側に移行するので半導体からの透過光強度は温度上昇と共に減少する、図3 (b), (c)は、この原理を利用した光ファイバ温度計の構成図である。本装置では、光コネクタや光ファイバの伝送損失などによる測定誤差を除去するために、温度によって透過光強度が変化する信号光(光源: AlGaAs系LED, $\lambda_1=0.87\mu\text{m}$)と温度に依存しない参照光(光源: InGaAsP系LED, $\lambda_2=1.3\mu\text{m}$)を用いた2波長方式が採用されている。本装置の温度測定範囲は、 $-20\sim 150^\circ\text{C}$ 、測定精度は $\pm 0.5\%$ である。また、温度センサ部の寸法は、 $1.8\text{mm}\phi\times 30\text{mm}$ 程度である。この装置は、すでに、動作状態にある変圧器内部の巻線や送電線の温度計測などに実用化され、これらの電力設備の負荷状態、電気的接点の良、不良、機器の劣化などのモニタや設計最適化に役立っている。

なお、半導体の吸収特性を利用した温度計のほかに、半導体エピタキシャル薄膜や各種蛍光体のフォトルミネセンス、発熱体の黒体放射を利用した放射温度計なども、同様の目的で使用されている。

(3)光ファイバ利用ガスセンサ

低損失光ファイバを利用したガスセンサの構成図を図4に示す。図において、LED等比較的スペクトル幅の広い光源からの出射光は多モードファイバで観測用ガス容器に導かれる。この容器に被測定ガスが充たされていると、入射光の中で被測定ガスの吸収スペクトル成分のみが吸収される。したがって、ガス容器からの出射光を多モードファイバで受光部に導きスペクトル分析器で分光分析すれば、ガスの種類や濃度を測定できる。

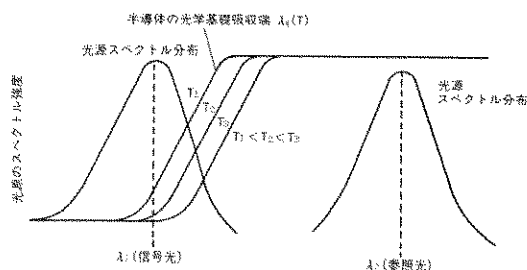
現在までに、 NO_2 、 NH_3 、 CH_4 、 C_3H_8 ガス等の測定例が報告されている。光ファイバを利用したガスセンサの特徴は、

(i) 光ファイバの低損失性により極めて長距離遠隔計測(例えば、 CH_4 ガスに対しては20km以上)が可能なこと、

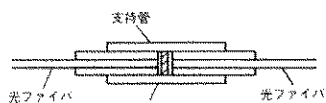
(ii) 発光スペクトル幅の広いLEDや白色光源を利用できるため、1つの光源で容易に2波長方式、差分吸収方式を適用できる、ことである。

(4)光ファイバ電圧センサ・電流センサ

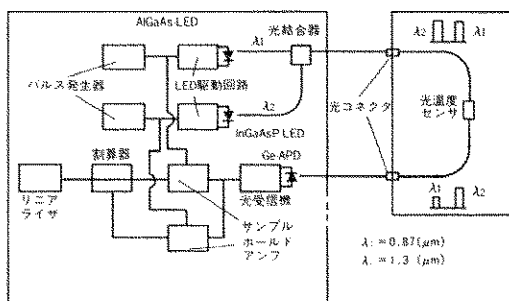
図5 (a)にポッケルス効果を用いた光ファイバ電圧センサの構成例を示す。LEDからの出射光は多モード光ファイバで光センサ部に導かれる。偏光子を通過した直線偏光波の偏光面がポッケルス



(a) 半導体を用いた光温度センサの原理図



(b) 光温度センサの構成図



(c) 光ファイバ温度センサの原理と構成図

図3. 光ファイバ温度センサの原理と構成図

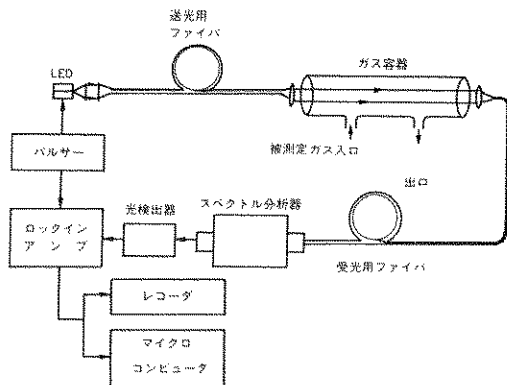


図4. 光ファイバガスセンサの構成図

素子の二つの主軸に対して45°となるように設定しておくことと印加電圧による複屈折効果により、ポッケルス素子からの出射光はだ円偏光波に変換される。このだ円偏光波は、光学バイアス用1/4波長板を介して検光子で印加電圧に比例した光強度に変換され、光ファイバで光受信機に導かれる。

ポッケルス素子としては、自然複屈折がなく温度特性に優れた $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO)、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)等の等軸性酸化物単結晶が用いられる。これらの結晶を用いた光電圧センサでは、数～300Vの範囲で0.5%以下の非直線性が得られ、温度特性も-20～85℃の範囲で±0.5%以下と安定している。一方、 LiNbO_3 や LiTaO_3 等の1軸性結晶をセンサ材料に用いると、自然複屈折に起因する温度依存性が大きいので、実用化のためには精密な温度補償が必要である。

図5(b)に光ファラデー効果を利用した光ファイバ磁界(電流)センサの構成例を示す。光ファラデー素子内を伝搬する直線偏光波の偏光面が外部磁界に比例して回転することを利用している。偏検光子の相対角度を45°に設定しておくこと、光磁界センサからの出射光強度は印加磁界に比例する。

光ファラデー材料としては、本質的に温度特性に優れた鉛ガラス、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 単結晶等の反磁性体や温度安定化された $(\text{Tb}_{0.19}\text{Y}_{0.81})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 単結晶や $(\text{YSmCuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ エビタキシヤ

ル薄膜等の強磁性体が用いられる。反磁性体材料を用いたセンサは、数Oe～数KOeの広い磁界計測ができるのが特徴である。一方、強磁性体材料は数百Oe以上の磁界で飽和磁化特性による非直線性が問題になるが、センサを小形化できる利点がある。光ファラデー材料、偏検光子、またそれらの実装法の改善により、上述したいずれの材料を用いても、-20～85℃程度の広い温度範囲内で±1%以下の測定精度が得られている。

(5)酸素飽和度センサ

レーザ計測の高空間分解能性および光ファイバの細心性、無誘導特性、化学的安定性、可とう性、生体への安定性等の特徴を生かして、生理学分野や医療分野への応用を目的とした光計測技術の開発も活発である。

血液中の赤血球の酸素飽和度は、循環器系、呼吸器系の障害を調べるために広く測定されている。酸素飽和度は、赤血球中のヘモグロビンに含まれる酸素量の、その飽和酸素量に対する比で定義される。正常な人間の動脈血、静脈血の酸素飽和度は、それぞれ95%、75%程度である。

光ファイバ酸素飽和度センサの原理図と構成図を図6に示す。ヘモグロビンの酸素飽和度により、光の波長に対する反射率が異なることを利用している。すなわち、反射率の酸素飽和度依存性の大きな波長($\lambda_1=620\sim650\text{nm}$)光を信号光に用い、また酸素飽和度依存性の小さな波長($\lambda_2=800\sim850\text{nm}$)

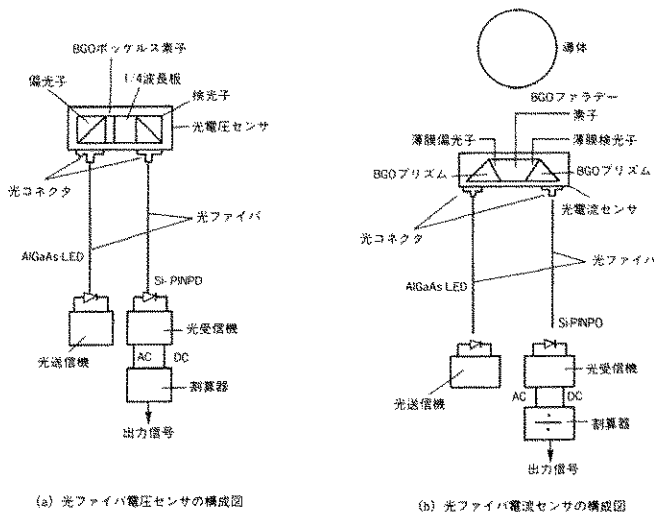


図5. 光ファイバ電圧センサ・電流センサの構成図

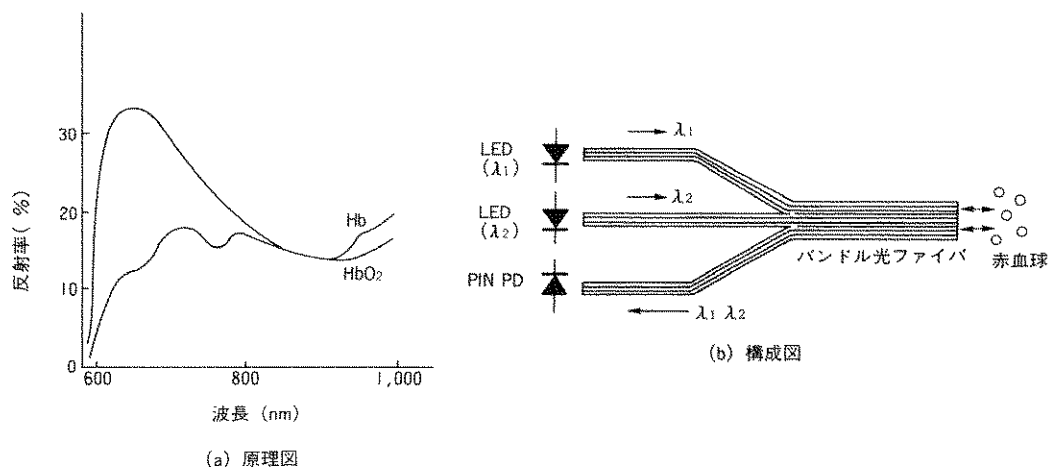


図6. 光ファイバ酸素飽和度センサの原理図と構成図

の光を参照光に用い、前者の信号出力を後者の参照出力で電気的に規格化することにより、酸素飽和度を高精度に測定している。光源に2つの波長の異なるLEDを、また光ファイバとして計測器側で3分岐されたバンドルファイバを用いた光ファイバ酸素飽和度センサの構成例を(b)図に示してある。このほか、光源に白色光源を利用することもできる。

同様のセンサ構造と計測原理を利用して、血液中に注入された色素(Indocyanine Green)の濃度を計測するセンサも開発されている。Indocyanine Greenは波長805nmの光を強く吸収し、900nm以上の長波長域の光に対して透明であること、また805nmの光の赤血球による反射係数は赤血球の酸素飽和度に依存しないことを利用して、それぞれ信号光、参照光に用いている。光ファイバは、前述した構造と同様で、3分岐されたバンドルファイバを利用しており、2本を投光用に他の1本を受光用ファイバに使用する。

(6) 光ファイバ圧力センサ

生体内の圧力(特に心内血圧)を正確に測定することは、医用計測で重要である。図7に血圧計測用光ファイバカテーテルの構成例を示す。(a)図の液晶型では、圧力によって液晶の光散乱係数が増加することを利用している。コレステリック液晶を1/3、ネマチック液晶を2/3混合した液晶を用いたとき、0~300mmHgの圧力を直線性よく

計測できる。一方、(b)図のダイヤフラム型では、バンドルファイバを2分岐し、その一端から入射された光がダイヤフラムで反射され受光用ファイバに結合するとき、結合効率が圧力によって変形されたダイヤフラムの位置によって変化することを利用している。約100本のバンドルファイバを直径1.8mmφに束ね、厚さ15μmのステンレスはくをダイヤフラムに用いて、-50~200mmHgの範囲の圧力を計測できる。また(c)図の圧力センサでは、チューブ側方のダイヤフラムに圧力が印加されると、その変位に応じてカンチレバーが変動し、反射強度が変化することを利用している。このセンサでは、センサ部の残りのスペースを利用して、前述した酸素飽和度も同時に測定できる構造になっている。

4. 光ファイバ機能形センサの例

——光ファイバレーザドップラ速度計——

レーザ光のドップラー効果を利用したLDV(Laser Doppler Velocimeter)は、光学系の構成法により、参照光形と差動形の2方式に分類される⁵⁾。

プロセス工業で実用化されている光ファイバLDVの基本構成表を図8に示す。ここでは、右側の差動型LDVについて述べる。図において、ビームスプリッタで2分岐され、光ファイバプローブ1、2に結合されたレーザ光は交差角 θ で被測定体に向け射出され、それらの散乱光は光ファイバプローブ

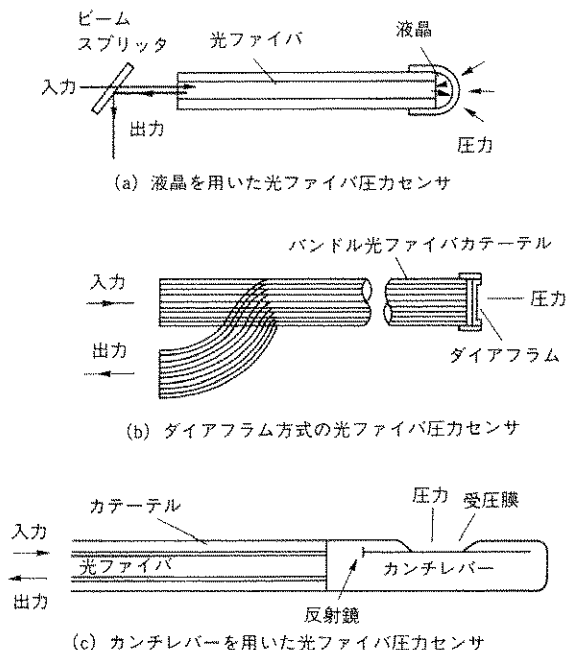
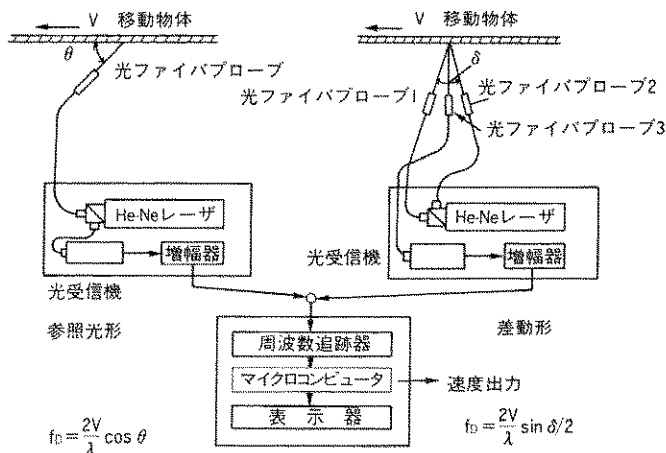


図7. 血圧計測用光ファイバカテーテル（光ファイバ圧力センサ）の構成図



ブ3で受光され、光検出器で光ヘテロダイン検波される。この時、光ヘテロダイン検波して得られるビート周波数 f_D は、

$$f_D = |f_{D1} - f_{D2}| = \frac{2V}{\lambda} \sin \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

となる。ここで f_{D1} 、 f_{D2} は、それぞれ2本の入射照射光に対する散乱光のドップラ周波数を表す。現在市販されている工業計測用光ファイバLDVでは速度測定範囲1～2000m/分、測定精度±0.2%が得られている。上式より f_D を測定することにより V を知ることができる。また、超音波光変調器等を

用いて、入射光の一方の周波数をあらかじめシフトしておけば、速度Vの方向を知ることできる。

光ファイバLDVは、このように、広い速度測定範囲、高精度、非接触計測という特徴があり、鉄工、非鉄金属などでの圧延ラインやフィルム、遷移等の製造ラインで実用化されている。ただし、測定誤差は、レーザ光の被測定体への照射角 θ 、 ϕ に依存する。また、LDVはレーザ光の散乱現象を利用しているので、被測定体の色彩、光沢、表面粗さ、温度、材質等により、また被測定体が粒子の場合は粒径や形状により、検出感度が異なるため使用上注意を要する。

5. 多点型・分布型光ファイバセンサ

(1)光ファイバセンサの多重化法⁴⁾

光ファイバセンサの多重化法は、つぎの4通りに大別できる。

- (a) 時分割多重化 (TDM : Time Division Multiplexing)
- (b) 周波数多重化 (FDM : Frequency Division Multiplexing)
- (c) 波長多重化 (WDM : Wavelength Division Multiplexing)
- (d) 干渉多重化

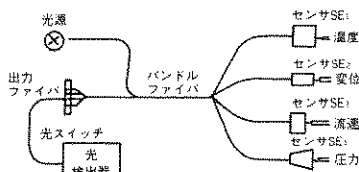
これらの多重化法の基本構成を図9 (a) ~ (d)

に示す。

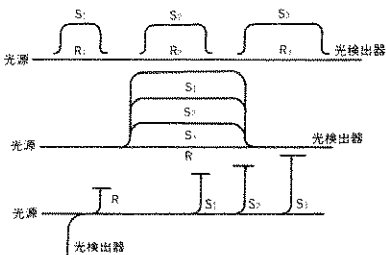
図9 (a) に示すTDM法では、光スイッチを用いて、1つの光源からの出射光を時系列に個別のセンサ (たとえば、温度変位、流量、圧力センサなど) へ導いたり、個々のセンサ出力信号を時系列で光検出器へ導くことによりセンサの多重化を図る。(a) 図はTDM法の最も基本的な構成例であるが、この分類に属するより高度な例として、OPDR(Optical Time Domain Reflectometry)法を用いた多重化法も提案されている。OTDR法を用いたセンサは5. (2)で詳細に解説する。

(b) のFDM法は光源と光ファイバセンサの種類により、干渉形と非干渉形多重化法に分けられる。(b) 図は干渉形多重化法の構成例で、上段は単一モード光ファイバで構成されたMach-Zehnder干渉計を直列に接続した方式、中段は並列方式、下段はMichelson干渉計の直列方式である。いずれも光源の周波数を適当に変調しておけば、長さの異なる信号光アーム S_1 、 S_2 および S_3 により位置の識別がなされ、各干渉計における干渉信号を独立に検出できる。

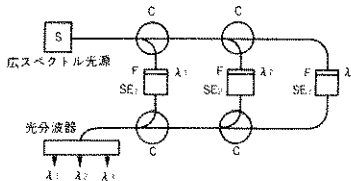
(c) 図はWDM法の構成を示したものである。上部はスペクトル幅の広い光源を用いた例で、光センサ部 SE_1 、 SE_2 、 $\dots$ 、 SE_n には中心波長 λ_1 、 λ_2 、 $\dots$ 、 λ_n のバンドパスフィルタが挿入されている。おのお



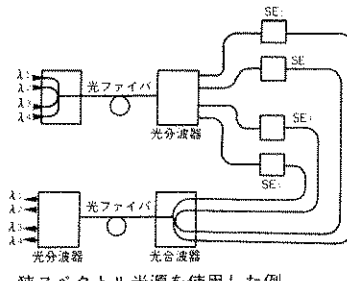
(a) 時分割多重化



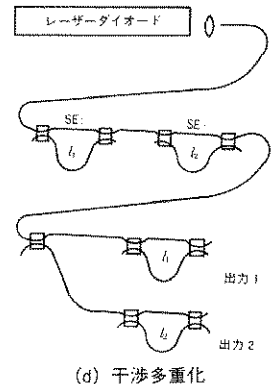
(b) 周波数多重化
(S : 信号光アーム, R : 参照光アーム)



広スペクトル光源を使用した例



狭スペクトル光源を使用した例
(c) 波長多重化



(d) 干渉多重化

図9. 光ファイバセンサの多重化法

ののセンサで計測された光情報は再び1本の幹線ファイバに入射し、光分波器へ導かれる。光分波器では、 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ の波長の光を分離・検出することにより、各センサの情報が独立に得られる。下段はスペクトル幅の狭い複数の光源を用いた例である。波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ の n 個の光源からの光は1本の幹線ファイバで光分波器に導かれ、波長分離される。おのおのの波長の光はセンサ $SE_1, SE_2, \dots, SE_n$ において計測対象で変調された後、再び合波されて幹線ファイバ光分波器へと達する。この方式の多重化センサでは、クロストークや挿入損失の小さな光合波器が必要である。

(d) 図は干渉多重化の構成例である。これは光源の可干渉長以上の光路長差を有する光ファイバ干渉計を複数個接続する方法である。(d) 図において、2つのセンサ用干渉計の光路長差 l_1, l_2 は光源可干渉長 l_c 以上に構成されているためセンサ用干渉計のみでは干渉出力は生じない。そこで l_1, l_2 を補償するような干渉計を受信側に設けることにより、干渉出力が得られる。位置の識別は $l_1 \neq l_2$ とすることにより可能である。

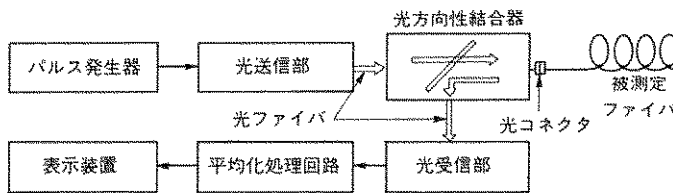
(2) OTDRとその応用

OTDRは、光ファイバにパルス光を入射したときに、ファイバ中で生じる後方レレー散乱光を観

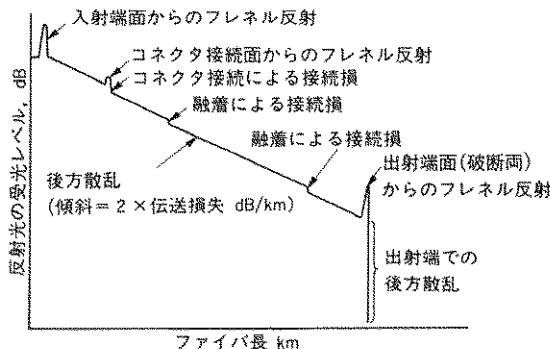
測し、その強度の時間変化から損失分布や障害点などのファイバの特性を測定する装置である。図10 (a) にOTDRの基本構成を示す。光送信部からのパルス光をファイバに入射し、ファイバから戻ってくる後方散乱光を光方向性結合器で分岐し、光受信部で光電変換した後、表示する。光電変換された電気信号は、光受信部で生じる雑音や、散乱光中に含まれる雑音を低減し、SN比を改善するため、通常、平均化処理される。図10 (b) に観測される反射散乱光の受信レベルの光ファイバ長(距離)依存性を示す。縦軸は対数変換された受信レベル、横軸はファイバ長である。

図において、受信レベルの傾きより、光ファイバの損失分布を、また、不連続な受信レベルの段差より、ファイバの接続損失を測定できる。さらに後方散乱光の消失する位置よりファイバの長さ、または破断点までの距離がわかる。距離分解能はパルス幅で決まり、たとえば、5 nsのパルス幅で50cmの分解能が得られる。

OTDRの本来の目的は、前述したように光ファイバの損失分布や障害点を測定することである。しかし、近年、その遠隔計測性、分布計測性を生かし、これを分布形または多点のセンサに応用した研究がなされている。その原理は、計測対象と



(a) OTDRの基本構成



(b) 反射光の受信モデル

図10. OTDRの基本構成と原理

する物理量や化学量（温度、圧力、電界、磁界、ガスなど）によって生じるファイバの諸パラメータ（損失、レーリ散乱、ラマン散乱、偏光状態など）の変化を、OTDR法を用いて測定することに基づいている。したがって、光ファイバに沿った計測対象の分布を、遠隔分布計測できる特長がある。

OTDRを応用したセンサのなかで、現在まで最も多く提案されているのは温度センサである。温度センサの構成方法としては、ファイバそのものをセンサとして用いる方法と、ファイバに感温素子を取り付ける方法に分類される。

以下、光ファイバ内部で発生するラマン散乱現象の温度依存性を利用したOTDR応用センサについて述べる。ラマン散乱光には、波長が短波長へシフトするストークス光と、長波長側へシフトするアンチストークス光があり、ストークス光のアンチストークス光に対する強度比 $R(T)$ は、次式で与えられる。

$$R(T) = \left[\frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right]^4 \exp \left[\frac{h\nu}{kT} \right] \quad (2)$$

ここで、 λ_s , λ_a はアンチストークス光、ストークス光の波長、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 T はファイバの絶対温度、 ν はラマン散乱による周波数シフト量の絶対値である。式より、光源の波長とファイバの材質が一定であれば、 $R(T)$ は温度 T のみの関数となることがわかる。したがって、 $R(T)$ を測定することにより、温度の絶対測定ができる。実験装置は、図11に示されているように、通常のOTDRの光検出器の前に分光器をつけた構成になっており、ラマン散乱光をアンチストークス光とストークス光に分光し検出するようになっている。実験の結果、5 m以下の距離分解能が得られ、5 K以下の測定精度が得られている。この方式の長所は、検出信号 $R(T)$ がストークス光とアンチストークス光の光強度比であるためレーザー光のパワー変動やレーリ散乱、損失の温度変化などにまったく影響を受けないことである。

参考文献

- 1) 久間, 布下: 「光ファイバセンサ (基礎と応用)」 情報調査会, 1986年発刊
- 2) 大越, 西原, 岡本, 久間, 大津, 保立: 「光

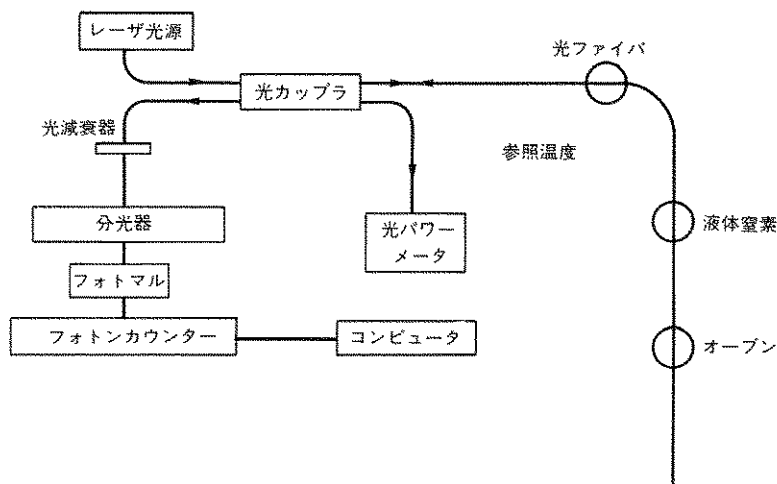


図11. ラマン散乱を用いた分布型光ファイバ温度センサ

ファイバセンサ」オーム社、1986年発刊

- 3) 久間, 布下: 「光ファイバセンサの現状と応用」
電子通信学会誌, Vol.67, No.5, pp.554~551,
昭和59年
- 4) 田井, 高橋, 久間, 浜中: 「分布形光ファイバ
センサ」計測と制御, Vol.26, No.4, pp.331~336,
昭和62年
- 5) 久間, 中嶋: 「レーザの工業計測への応用」レ
ーザ研究, Vol.13, No.1, pp.6~17, 1985

〔著者紹介〕



久間 和生(キュウマ カズオ)
三菱電機㈱中央研究所・基礎研
究部第1グループマネージャ

①略歴

昭和47 東京工大工学部電子
工学科卒業

昭和52 東京工大大学院博士
課程電子物理学専
攻終了(工学博士)

同年 三菱電機㈱入社 以
来中央研究所勤務

昭和60年8月から1年間 米
国カリフォルニア工
科大学客員研究員

昭和62年より現職

②研究内容

光ファイバセンサ, 半導体レ
ーザ, 光スイッチ素子, 非線形
光学, ニューロコンピュータ等

③著書

「光ファイバセンサ」オーム
社 昭61年

「電気・電子材料ハンドブッ
ク」朝倉書店 昭62年など