

# 解説

## 光ファイバセンサーの最近の進展

桑原 宏・吉永 淳

三菱電機(株)伊丹製作所光技術プロジェクト 〒661 尼崎市塚口本町 8-1-1

(1987年1月28日受理)

### Recent Research and Development of Optical Fiber Sensors

Hiroshi KUWAHARA and Kiyoshi YOSHINAGA

Itami Works, Mitsubishi Electric Corporation,  
8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661

#### 1. ま え が き

ここ数年光ファイバセンサーの開発の進展は注目すべきものがあり、センシング方式およびその適用分野も多岐にわたってきている。方式の研究開発や、フィービリティスタディも活発に行なわれているが、最近は、実用化に向けての信頼性、安定性の向上のための開発や実証試験に注力されつつある。またすでに実用化、製品化されているものについては、マルチチャンネル化、多重化、あるいは計測システムへの適用形態への拡大といった方向とともに、コストパフォーマンスへの努力がなされるようになってきた。こういった進展状況は、国内、海外とも同様の傾向にある。

このようななかで、ここ1年国内では光ファイバセンサーに関する大きなイベントがあった。一つは光ファイバセンサーに関する国際会議 OFS '86(4th International Conference on Optical Fiber Sensors) が日本(東京, サンシャインシティプリンスホテル)にて開催されたことである。今一つは、通産商工技院の指導の下に、光産業振興協会を中心に大型プロジェクト「光応用計測システムの研究開発」の一環として光センサーの要素技術開発が進められてきた結果、実証システムに組み込んで運転、評価が行なわれたことである。OFS '86においても、このセンサー要素技術や実証試験の成果が発表され注目された。

OFS '86 は昭和61年10月7日から9日にかけて開催され、世界各国より多数の光ファイバセンサー関係者の出席(361人)があり、熱心な講演、討議が展開され

た。論文提出も各国からあり、種別も多岐にわたっている。国別<sup>1)</sup>、種類別を表1、表2に示す。光ファイバセンサーの研究開発は従来より防衛を中心とした米国産業用、医療用を中心とした欧州、日本での動きが活発であったが、今回中国からも多数の論文が寄せられたのをはじめ、各国で研究開発が活発になってきたことがうかがわれる。

OFS '86 でとりあげられた論文に関しては次のような特徴があげられる。

- (1) 光ファイバジャイロに関する発表が多く、実用化へ向けての動きが活発になってきたこと。
- (2) 光ファイバセンサーのシステム適用へ向けて、システムの簡素化、低コスト化を指向し、多重化したシステム、集積化の動向が強まったこと。
- (3) 日本における光大型プロジェクト「光応用計測システムの研究開発」のしめくくりの年であり、この成果発表が多数あり注目されたこと。

こういった状況は、各種の光ファイバセンサーの最近の進展と大きく関連するとともに、今後の展開への影響も大なると思われ、これらを中心に動向を紹介する。

#### 2. 光ファイバジャイロの動向

光ファイバジャイロが1976年に提案されて以来、10年を経過した。現在実用機として使われているものはないが、技術開発、試作試験は各所で進められている。従来のリングレートジャイロが開発期10年を経て実用化されたことから、今後いっそう研究、開発が加速され、実用化へ近づくとと思われる、航空機の慣性航法や、

表 1 OFS '86 論文提出状況

	応募論文数	講演論文数	ポスター掲 示論文数
日 本	61	30	10
アメリカ	28	13	2
イギリス	11	6	3
西ドイツ	5	2	2
フランス	4	2	1
中 国	8	1	1
イタリア	2	0	1
韓 国	2	1	0
デンマーク	1	1	0
ソ 連	1	0	1
カ ナ ダ	1	0	1
そ の 他	3	0	0
計	127	56	22

表 2 OFS '86 講演論文 (センサー種別)

種 別	論文数
光計測技術一般	7
変位, 圧力, 振動	6
音 響	2
電圧, 電流	3
速 度	3
漏れ, 安全	3
化学, ガスセンサー	5
イメージセンサー	1
光源, 検出器など	6
ジャイロスコープ	7
温 度	3
ファイバ, カプラーなど	7

車輛の位置評定などへの適用に向けての性能達成への期待がかけられている。

光ファイバジャイロは従来より干渉形の研究開発が主体であったが、最近では新たな構成法として注目されているリング共振形の研究も活発になっている。これまで、各方式に関する研究開発が進められてきているが、その動向を図 1 に示す<sup>2,3)</sup>。航空機の慣性航法用などの比較的高級なジャイロは、高い分解能 (0.01 度/時)、高いゼロ点安定性 (0.01 度/時)、スケールファクタの安定性 (10 PPM) や、広いダイナミックレンジ (6~7 桁) が要求される<sup>2)</sup>。車輛やロボット応用では、分解能等の性能は軽減されるが、ドリフトや温度等に対する安定性、小型化、低コスト化等の問題があり、解決すべき課題は多い。

OFS '86 でも、こういった点をふまえた発表が多くとりあげられた。たとえば、位相変調方式のジャイロのスケールファクタ、ダイナミックレンジの改善方法として、PZT 駆動電圧の振幅を設定した範囲で変化させることにより、sin 項と cosin 項を感度よく検出する方法<sup>4)</sup>、二つの波長で同時にサグナック効果による位相ずれを検出する方法などが提示されている<sup>5)</sup>。またシングルモードファイバを用いたジャイロでは、地磁気によるファラデー効果により、地球の自転と同一周期のドリフトが生じるが、偏波面保存ファイバを用いるとファラデー効果によるドリフトを除去できることが指摘されている。これに対し光ファイバのねじれを例にとり、偏波面保持ファイバによるドリフト現象の低減効果を解析、実験的に確認したことが示された<sup>6)</sup>。

リング共振型光ファイバジャイロは、ファイバ長さ m

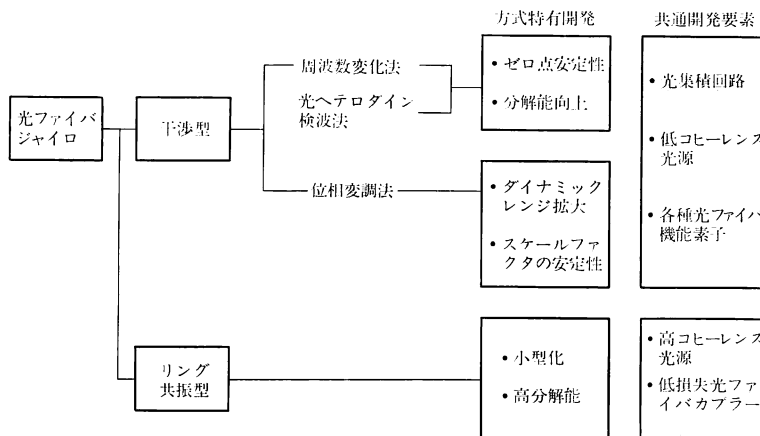


図 1 光ファイバジャイロ開発の動向

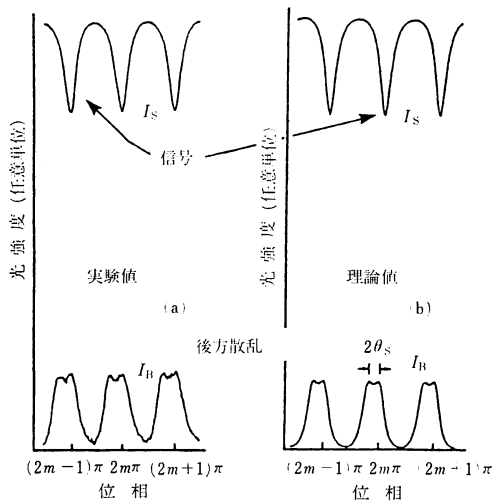


図2 回転時に生じる後方散乱光の共振点分離現象

で巻数が小さく、小型化が可能でしかも高性能が期待できる方式であり、研究開発も活発になってきた。本方式では共振特性の回転による変化から回転角速度を検出するもので、高コヒーレンスの光源を必要とし、光源に関する研究が行なわれている<sup>7)</sup>。またリング共振形ジャイロのノイズ要因として、光源の可干渉性、レイリー後方散乱、カー効果、偏光などがあるが、順方向、逆方向回転光の両者のレイリー散乱光が順方向回転と干渉共振し、この影響によって直線性が10%低下することを、理論的、実験的に示した報告がなされている。図2は、回転入力時の共振特性の実験および理論解析を示してい

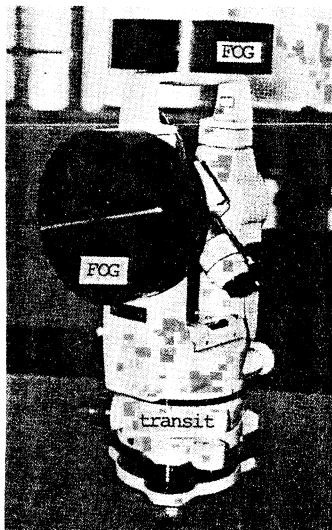


図3 光ファイバジャイロを応用したトランジットシステムの例

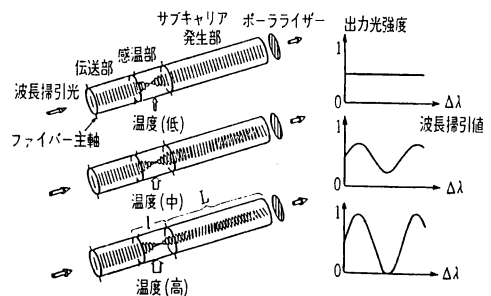
る。この対策として、左右両回りの光を共振点に固定させるための入力光へのFMを両回り光に対してそれぞれ異なる周波数で行ない、PSDで分離する方法が提案されている<sup>8)</sup>。

こういった基本的な解析、方式開発と並行して、ジャイロの小型、集積化への試みも行なわれている。たとえば、偏波面保存光ファイバの細径化、光学系の小型化、信号処理回路の集積化を図り、直径60mm、高さ50mmの位相変調方式のジャイロを試作し、最小検出角度0.0002度/秒、ドリフト0.0037度/秒/時間の性能が得られている<sup>9)</sup>。

光ファイバジャイロの応用の一つとして、測量器の試作も報告されている。図3は、光ファイバジャイロ2組と天体望遠鏡を組み合わせた精度よいトランジットの試作を行なったものである<sup>10)</sup>。

### 3. 光大プロ成果例ほか各種センサー

従来より行なわれている半導体吸収端波長、蛍光特性などを利用した温度センサーは、すでに製品化され、実用センサーとして使用されている。温度センサーの研究は、パイロメーター、干渉応用などが多いが、光大プロ関係で、波長を連続的に変化(掃引)できる光源を用いた、波長掃引形温度センサーが報告されている<sup>11)</sup>。波長掃引レーザーを出た光は光ファイバを経て感温部に導かれる。計測部は、偏波面保持ファイバを組み合わせて構成されており、温度が変化すると、光学主轴の位相差が変化することを利用しており、図4に動作原理を示す。図のように、伝送部の出力端に、感温部として長さ $l$ 、その後方にサブキャリア用の長さ $L$ の偏波面保持ファイバを取り付け、さらにポラライザーを付加する。これらの光学主轴はおのおの $45^\circ$ 回転して接続される。伝送部より振動面をもつ光を入射すると感温部では主轴に対し $45^\circ$ の角度をもつ直線偏波となるが、温度が変化する



トランスデューサー内部の偏波状態 サブキャリアの変調度の変化

図4 波長掃引形温度センサーの原理

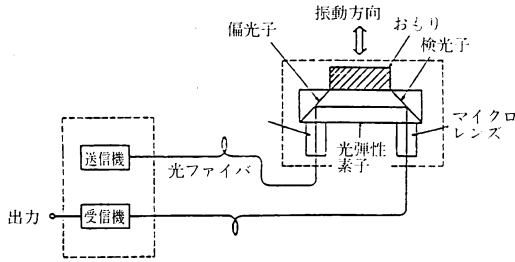


図5 光弾性方式振動センサーの構成

と感温部出口では直線、楕円、円と偏光状態が変り、次のキャリア部では光学主軸の伝播速度差により、直線偏波となる部分が発生する。ここで光源の波長を変えると直線偏波の縞模様が変わり、結果的に光強度変化となる。波長掃引光源として、分布帰還形 (DFB) 半導体レーザーにより、波長を  $0.5 \sim 1 \text{ nm}$  変化することを試みている。

石油プラント等における設備機器の状態監視、異常診断などを目的として、光弾性方式の振動センサーが報告されている<sup>12)</sup>。これは光弾性素子が振動に応じた応力によって複屈折性を呈することを応用したものである。構造は図5に示すように光弾性素子の両端に、誘電体多層膜を蒸着して、偏光子、検光子を合成するとともに、光弾性素子に  $1/4$  波長板を除き一体構造としている。温度範囲  $-25^\circ\text{C} \sim 65^\circ\text{C}$ 、周波数範囲  $10 \text{ Hz} \sim 3 \text{ kHz}$ 、分解能  $0.03 \text{ G}$ 、精度  $\pm 5\%$  が得られており、実用化に近いことが示されている。

光ファイバを応用した化学センサーは、石油、化学プラントにおけるヤード監視、プロセスラインセンサー、あるいは大気中の汚染、水や油の不純物測定、人体の状態検知など、種々のフィールドでの適用が期待される。これは光ファイバを通じ光を伝送しセンシングを行なう、本質的に安全な遠隔測定が可能であること、光ファイバの細径性が有用なためである。たとえば光を分光分析計に光ファイバを通じて導き、遠隔測定が行なわれる。たとえば近赤外 ( $0.9 \mu\text{m}$ ) の光をファイバに入力、30 コアのバンドルファイバに分けて  $1 \text{ km}$  遠方に伝送してガス検出セルに導き、検出セルで光吸収された光を再度ファイバを通して検出器に導くことにより 30 点の遠隔測定を行なった報告がなされている<sup>13)</sup>。

石油精製における水素添加による改質プロセス等に適用可能なセンサーとして、水素ガス検出センサーがある。水素ガスをパラジウム (Pd) 上に導くと、パラジウムは周囲から水素ガスを吸収する特性を有している。図

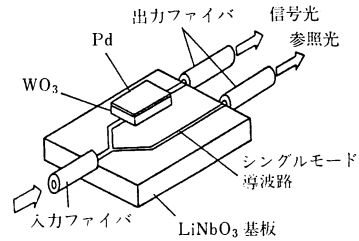


図6 導波路形水素センサーの素子の構造

6は導波路形水素センサーの例である。LiNbO<sub>3</sub>基板上にシングルモードの導波路を形成し、導波路上にWO<sub>3</sub>とPdの薄膜を蒸着した構造となっている。水素ガスをセンサー部に導き、Pd層でH<sup>+</sup>とe<sup>-</sup>に吸着解離させ、さらにWO<sub>3</sub>膜へ注入しH<sub>2</sub>WO<sub>3</sub>なる化合物に変化させる。この結果吸収係数が増加したことになり、伝播出力光量が低下することを利用して水素ガスを検知する<sup>14)</sup>。

#### 4. 光ファイバセンサーの多重化

最近、光ファイバ計測システムの簡素化、低コスト化を目的とし、一本のファイバ幹線に多数の光ファイバセンサーを多重化した計測システムや、分布計測システムの研究が進められている<sup>15)</sup>。

多重化の方法としては、光スイッチを用いて光源からの出射光、センサーからの出力信号を時系列で検出器に導く時分割多重化法 (TDM)、光源の周波数を変調して信号識別を行なう周波数多重化法 (FDM)、光源の波長を変えて信号の識別を行なう波長多重化法 (WDM)、あるいは、光源の可干渉性を応用した可干渉多重化法 (CM) などがある<sup>16)</sup>。OTDR (optical time domain reflectometry) を利用したセンサーも研究も盛んであるが、これは上記の TDM の一手法とみなされる。具体的な例として次のようなものがある。

(1) OTDR を用いた温度センサー: OTDR は本来光ファイバの損失分布や障害点を測定する目的で使われていた<sup>17)</sup>が、近年その遠隔計測性、分布計測性を応用した研究がなされ、計測対象とする物理量や化学量によって生じる光ファイバの諸パラメータ (損失、レイリー散乱など) の変化を OTDR 法で測定するものである。

図7に OTDR を応用した光ファイバ温度センサーの構成例を示す<sup>18)</sup>。光ファイバには、レイリー散乱係数の大きな Ge ドープ石英ファイバを用い、Al をコートして耐熱性を高めている。図8は、Ge のドープ量を変えたときの散乱光量の温度特性を示したものである。Ge

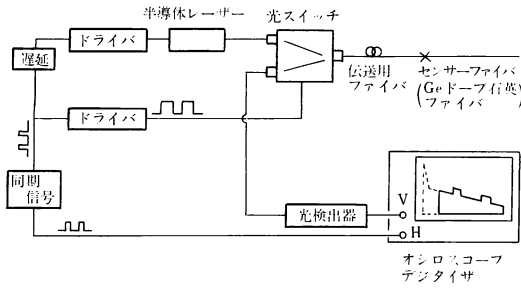


図7 OTDRを応用した分光型光ファイバセンサーの構成例

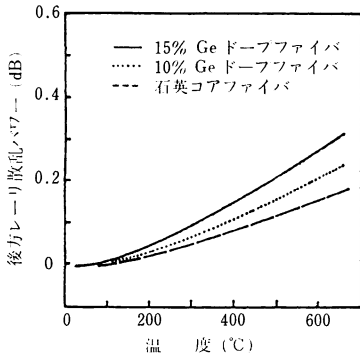


図8 Geドープ光ファイバにおける後方レイリー散乱パワーの温度依存性

のドープ量により後方散乱光量は増加するが、ドープ量が15%で飽和する。また、ドープ量15%でも、温度変化に対する光量変化は0.5 m dB/°Cと小さい。そのため、高精度な温度計測は困難であるが、25~600°Cの広い温度計測範囲が得られる。

(2) 周波数多重化センサーの構成例：次に、図9に示すように、 $n$ 個の強度変調型センサー  $SE_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) を並列に接続した非干渉型 FDM 法による多重化センサーを紹介する<sup>19)</sup>。ここで、光源(LED)を角周波数  $\omega$  の正弦波で強度変調すると、この出射光はおおののセンサーを通過することにより位相シフト  $\omega\tau_j$  ( $\tau_j$ : 光源から光検出器に至る伝播時間) を受けるとともに、

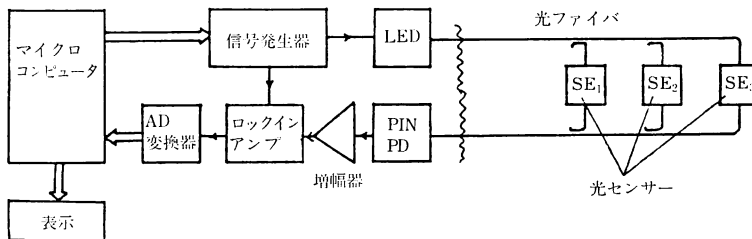


図9 非干渉型周波数多重化センサーの構成例

計測対象により  $M_j$  なる強度変調をうける。したがって、光検出器における光強度  $R$  は、次式で与えられる。

$$R = \sum_{j=1}^n M_j \cos(\omega\tau_j) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

次に、 $n$ 種類の角周波数  $\omega_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) の正弦波を電氣的に多重化した信号で光源を駆動し、検出信号からおのおのの周波数成分の信号を分離すれば、 $M_j$  を未知数とする次の ( $n \times n$ ) の連立方程式が得られる。

$$R_i = \sum M_j \cos(\omega_i\tau_j) \quad (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

上式はマトリックス表示で  $[R]=[A] \cdot [M]$  と表示できる。ここで、 $[R]$  は検出信号の列マトリックス、 $[A]$  は  $\omega_i, \tau_j$  で決まるネットワークマトリックス、 $[M]$  は計測情報(各センサーでの変調度)を表す列マトリックスである。したがって、 $[M]=[A]^{-1} \cdot [R]$  を計算することにより、計測情報  $[M]$  を求めることができる。

3個の簡単な強度変調型センサーと多モードファイバを用いた実験結果例を図10に示す。強度変調  $M_j$  は、対向するファイバの間隔を変化して模擬、光源の駆動周波数は、2, 3, 4 MHz、各ファイバ長は20, 40, 45 mとしている。ロックインアップで検出信号の周波数を選別、A/D変換後CPUで処理される。光源の周波数  $\omega_i$  と各センサーの伝播遅延時間  $\tau_j$  を適切に設定し、各センサーの出力信号間のクロストークを小さくしており、1%以下のクロストーク、検出信号のドリフト0.5%以下の

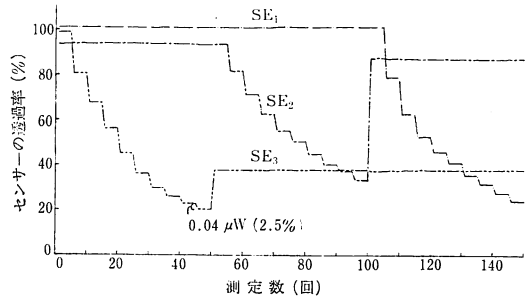


図10 非干渉型周波数多重化センサーの特性例(3個のセンサー  $SE_1, SE_2, SE_3$  を用いた例)

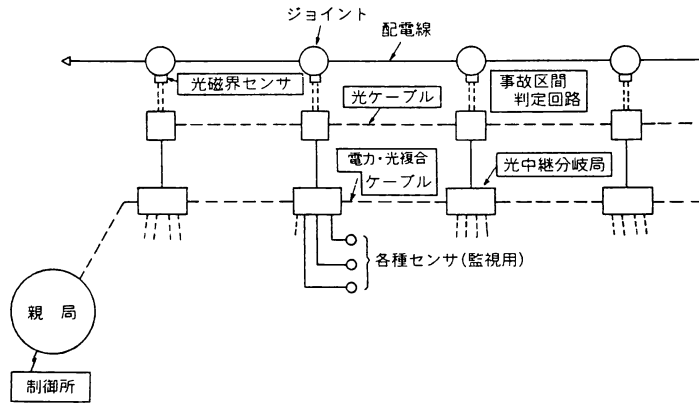


図 11 電力系統における事故区間検出および設備監視システム<sup>20)</sup>

良好な特性が得られている。

### 5. システムへの適用

ポッケルス効果を利用した、電界/電圧センサー、ファラデー効果を利用した磁界/電流センサーをはじめ、半導体吸収端波長変化を利用した温度センサーなど、製品化された各種光センサーは、電力、工業分野における計測制御やモニタシステムの要素デバイスとして適用が広がりつつある。電力分野においては、ファイバの高絶縁性、耐電気ノイズ性の点から、光ファイバセンサーの

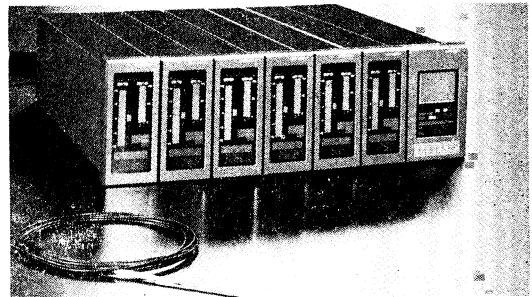


図 12 光ファイバ温度調節計の例

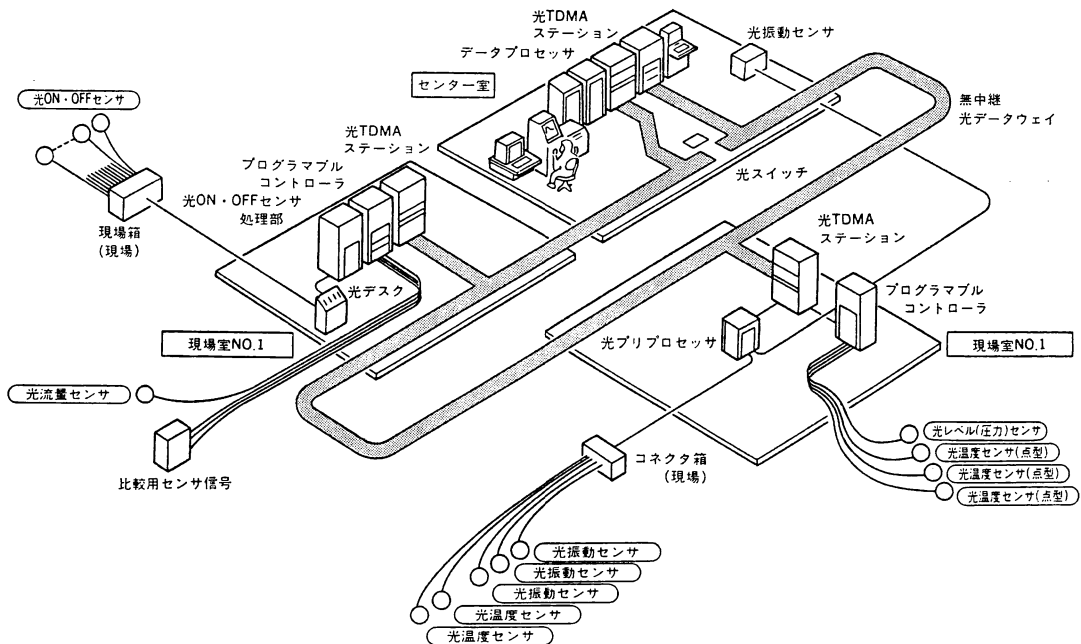


図 13 光大プロ実証システム構成図例<sup>21)</sup>

適用が注目されている。

図 11 は電力系統における配電線故障検出, 設備監視を目的として各種光センサーを使用するシステム例で, 現在一部試作, 試験が進められている<sup>20)</sup>。同様に変電所内機器モニターシステム等も検討が進み, 実フィールドで適用されている。これに対し, 光ファイバセンサーの出力形態や機能も, システム適用に適したものへの開発が進んでおり, 多チャンネル化, 調節機能, RAS 機能付加などが行なわれている。図 12 は, 調節機能, オートチューニング機能を有し, プログラムコントロールを行なえる形とした光ファイバ温度センサーの例であり, 今後システム適用に応じた多機能化が進むものと思われる。

工業分野への適用に関し, 前述の光大型プロジェクトで研究開発された光センサーを組み入れた光計測システムの実証試験が行なわれた<sup>21)</sup>。光ファイバセンサーとしては, 振動, 温度, レベル, 画像などの各種センサーが, 石油プラント(日本鉱業株式会社水島製油所)のモーター, 配管, タンクなど各所に配置され, これらの計測信号を光通信システムに導入して集中的に監視, 制御する光計測システムとなっている。システムの一例を図 13 に示す。この試験は稼働中の石油精製プラント現場という厳しい環境の中でのセンサー, システムの実証運転であり, 光計測システムの有効性を確認するきわめて意義の大きいものである。

以上, 最近の光ファイバセンシングの最近の動向を中心に記述した。今後さらに各方面への適用, システム化が進展してゆくことを期待する。

## 文 献

- 1) T. Okoshi: Post-Deadline Papers Technical Digest, (1986) pp. 1-3.
- 2) 保立和夫: 第4回光ファイバセンサワークショップ講演論文集, WOFS 4-15 (1987).
- 3) 久間和生, ほか: 第4回光ファイバワークショップ講演論文集, WOFS 4-18 (1987).
- 4) N. J. Frigo: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 181.
- 5) A. D. Kersey, *et al.*: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 185.
- 6) K. Hotate and K. Tanabe: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo, (1986) p. 189.
- 7) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 201.
- 8) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3916.
- 9) 西川 満, ほか: 第4回光ファイバワークショップ講演論文集, WOFS 4-16 (1987).
- 10) T. Yoshino: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 197.
- 11) H. Ibe, *et al.*: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 231.
- 12) K. Yoshinaga, *et al.*: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 31.
- 13) Y. Arakawa, H. Fukunaga and H. Inaba: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) pp. 135-138.
- 14) K. Nishizawa, *et al.*: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 131.
- 15) 大越孝敬, ほか: 光ファイバセンサ(オーム社, 東京, 1986).
- 16) R. Kist: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo, (1986) p. 209.
- 17) S. D. Personik: *Bell Syst. Tech. J.*, **56**, No. 3 (1977).
- 18) 塩田孝夫, ほか: レーザ学会第118回研究報告, RTM-86-3 (1986) p. 9.
- 19) J. Mlodzianowski, *et al.*: *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) p. 51.
- 20) 桑原 宏, ほか: パワーコントロールアンドコミュニケーションシリーズ, 光ファイバ通信技術(電気書院, 東京, 1986) p. 187.
- 21) 佐藤 轟, 本田辰篤: “光大プロ実証システムにおけるセンサ技術”, *O plus E*, No. 84 (1986) 56.

1) T. Okoshi: Post-Deadline Papers Technical Digest,