

# 光学式温度補償圧力センサを用いた水位センサ

光電子技術研究所 坂元 明<sup>1</sup>・堀本 啓一<sup>1</sup>・野口 善清<sup>3</sup>・平船 俊一郎<sup>1</sup>・酒井 哲弥<sup>2</sup>

## Water Level Sensor Utilizing Temperature-Compensated Optical Pressure Sensor

A. Sakamoto, K. Horimoto, Y. Noguchi, S. Hirafune, and T. Sakai

光学式センサは優れた電磁環境耐性、遠隔計測や多数点計測が容易などの利点がある。しかし、測定系が高価なため適用が限定されている。そこで当社では、3心光ファイバアレイを用いた安価で高精度な光学センシング方式を開発し、温度センサと圧力センサを実現した。これらを組み合わせ、温度補償型水位センサを作製し、全温度範囲で精度 $\pm 0.3\%$  F.S.を達成した。

Optical sensors have many advantages, such as complete electromagnetic immunity, ease of remote sensing, and multipoint measurement. These sensors are restricted to special applications due to their expensive measurement systems. We developed an inexpensive and high-accuracy optical sensor utilizing a unique three-fiber array. By combining a temperature sensor and a pressure sensor, we fabricated a temperature-compensated water level sensor with an accuracy of  $\pm 0.3\%$  F.S. for all temperature ranges.

### 1. ま え が き

光ファイバを用いた光学式センサは電気式センサに比べ、優れた電磁環境耐性、遠隔計測や多数点計測が容易であるなどの利点がある。これら光ファイバセンサには、光ファイバブラッググレーティングを用いたもの<sup>1)</sup>、ブリュアン散乱を用いたもの<sup>2)</sup>、ファブリーペロー干渉法<sup>3)</sup><sup>4)</sup>を用いたものなどが提案されている。しかし、これらの方式は測定系が高価なため、特殊な用途に限定されている。

そこで、当社では独自の3心アレイ方式を用いた安価で高精度な光ファイバセンサを開発した。開発した光ファイバセンサは、光ファイバアレイ、発光ダイオード (Light Emitting Diode: 以下LEDと記す)、フォトダイオード (Photo Diode: 以下PDと記す)、および光強度を検出する簡単な電気回路で構成される。この方式を用いた温度センサおよび圧力センサを作製し、これらを組み合わせることで、温度補償水位センサを実現した。

### 2. 動作原理

図1に当社で開発した方式の構成図を示す。センサはLED、PD、および光ファイバアレイから成っている。光

ファイバアレイには、照射用の光ファイバと2本の受光用光ファイバが固定され、照射用光ファイバと受光用光ファイバはある一定の角度だけ傾けて基板に固定されている。当社では、3本の光ファイバを傾けて固定している光ファイバアレイを3心アレイと呼んでいる。3心アレイには、シングルモード光ファイバを用いた。それゆえ、反射面への安定した照射と受光強度の高い空間分解能を得ている。図2は3心アレイの拡大図である。照射光ファイバからの光は特定の広がり角をもった状態で出射され、反射面で反射したのち、2本の受光用光ファイバに結合される。反射光の中心位置はアレイ端面と反射面の距離に依存する。反射面との距離が図2で示している距離 $x_1$ のときに内側の光ファイバに結合する光強度が最大に

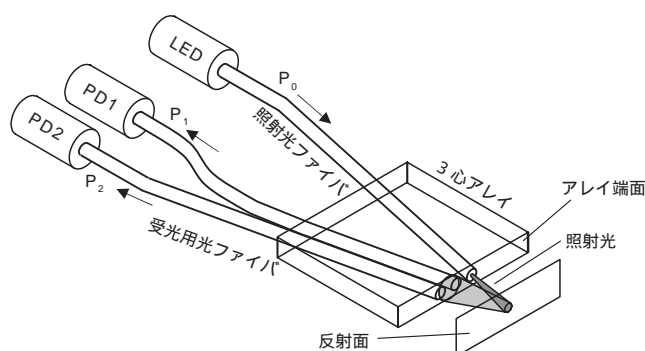


図1 3心アレイセンサ構成図

Fig. 1. Schematic diagram of the three-fiber array sensor.

1 応用電子技術研究部  
2 応用電子技術研究部グループ長  
3 光技術研究部

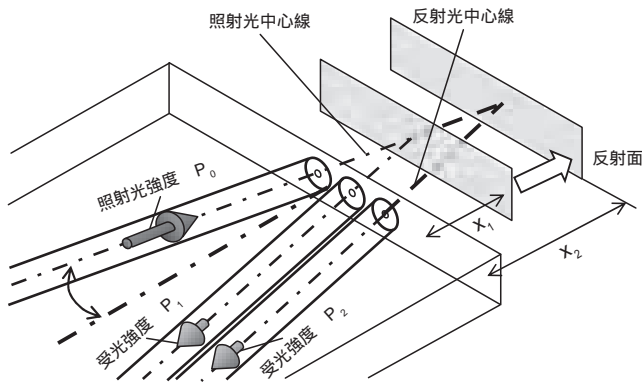


図2 3心アレイ拡大図  
Fig. 2. Magnified diagram of the array head.

なる。同様に、距離が  $x_2$  のとき外側の光ファイバに結合する光強度が最大になる。

図3は3心アレイの光強度と距離の関係を示したものである。菱形の点が内側の光ファイバで受光した光強度 ( $P_1$ ) を示しており、四角の点が外側光ファイバで受光した光強度 ( $P_2$ ) を示している。この3心アレイの場合、内側光ファイバの光強度が最大になる距離は0.52 mmであり、外側光ファイバ光強度が最大になる距離が0.98 mmである。光強度が最大になる位置が外側と内側の光ファイバで異なるため、光強度比  $(P_1 - P_2)/(P_1 + P_2)$  を演算することにより単調変化する曲線が得られる。図3の太線は測定した光強度より計算した光強度比を示している。この3心アレイでは、反射面距離範囲0.6 mmから1.0 mmにおいて光強度比が距離に対して線形に近い形で単調変化する。距離変化に対する高い感度を有している。この範囲の曲線を用いることで、3心アレイ端部と反射面の距離を正確に測定することができる。このように簡単な方式で距離の変化を光強度比の変化に変換できることが、3心アレイ方式の第一の利点である。

第二の利点は、3心アレイ方式では光ファイバ角度 ( ) を変えることにより、測定可能な距離範囲を調整することにある。図4に角度の異なる3心アレイで測定した光強度比の距離依存性を示す。3心アレイの角度が大きくなるにしたがい、小さな距離変化で光強度比の変化が大きくなる。したがって、3心アレイの適切な角度を選択することで、さまざまな測定範囲への適用が可能になる。

第三の利点は、光源の光強度変動による測定値の変動が非常に少ないことである。本方式では2本の受光ファイバに結合した光強度比を利用するので、光源強度の変動が測定値に影響を与えることはない。このため、光源強度の自動制御などの複雑な電気回路が不要となり、光源や受光素子の電気回路が簡単になる。

以上のように、3心アレイ方式は電気回路も含めての簡単な構成、距離測定範囲の自由度、光源の強度変動への高い耐性の3つの特徴を持つため、安価で高精度なセンサの実現に有効な方式である。

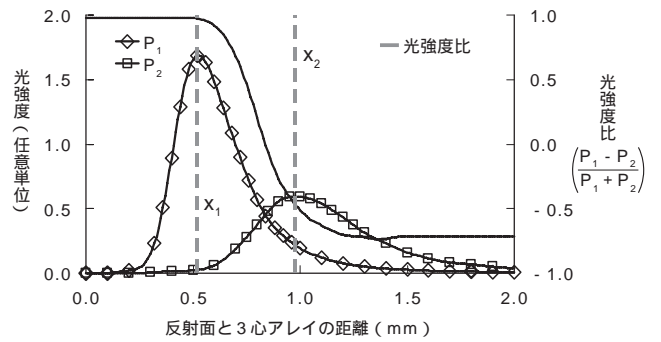


図3 3心アレイでの光強度と光強度比の距離依存性  
Fig. 3. Distance dependence of measured power and power ratio with angled three-fiber array.

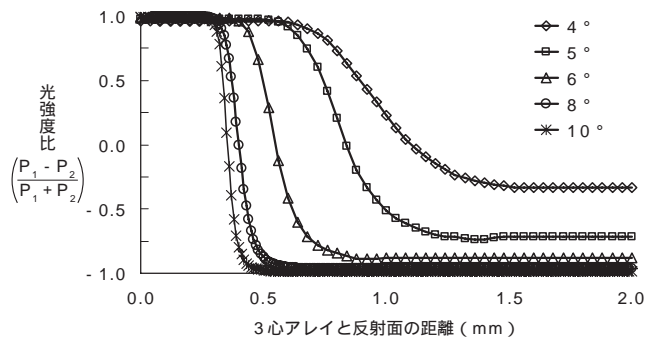


図4 角度の異なる3心アレイでの光強度比の距離依存性  
Fig. 4. Distance dependence of measured power ratio for various angled three-fiber arrays.

### 3. 実験結果

#### 3.1 光源

本センサでは光源として安価に入手可能なLEDを採用した。LED光源は温度により発光中心波長や光強度が変化する。そこで、LEDの温度変化が測定結果に与える影響を調査した。図5では実際に光源として使用しているLED発光スペクトルの温度依存性を示す。LEDは電流一定制御で駆動している。-10 から55 への温度変化により中心波長が長波長側に移行し、光強度は小さくなる。このようにLEDは大きな温度特性を持っているが、3心アレイ方式は、強度比による測定であるため、光源強度変化の影響を受けない。また、光カップラなど大きな波長依存性を有する部品を使用していないため、中心波長の変化に対しても測定値変動が小さい。

図6に、LED光源の中心波長および光強度の温度依存性と、その際に3心アレイで測定された光強度比の変動を示す。中心波長が30 nm、光強度が10 dB程度変化しているにもかかわらず3心アレイで測定された強度比は±0.5%以下の変動であることが確認された。このため、安価なLEDを光源に採用しても複雑な制御回路などを用いずに高精度を実現することができる。なお、実際の製品では、光強度が低くなりすぎるとノイズが大きくなるため、LEDが所定の温度範囲になるように温度制御している。

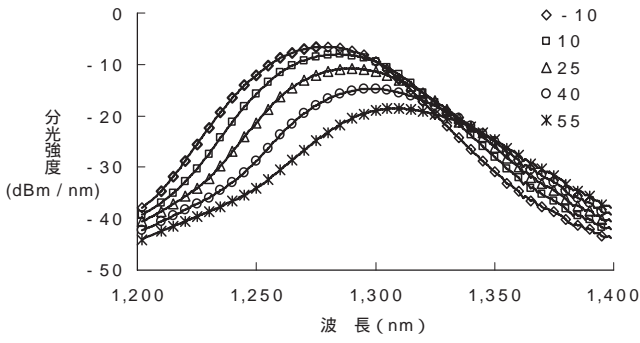


図5 異なる温度でのLED発光スペクトル

Fig. 5. Emission spectra of LED at different temperatures.

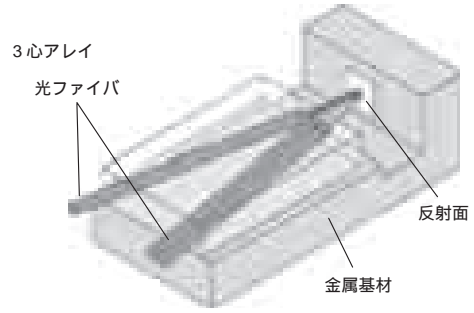


図7 3心アレイを用いた温度センサ概要図

Fig. 7. Structure of temperature sensor with angled three-fiber array.

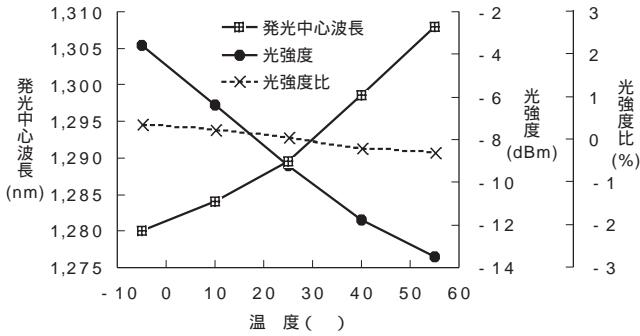


図6 LEDおよび光強度比の温度依存性

Fig. 6. Temperature dependence of LED and power ratio.

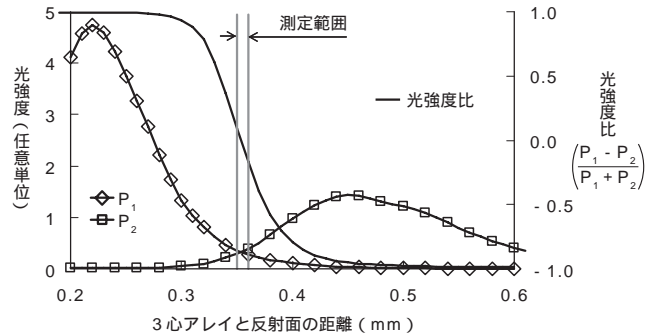


図8 温度計用3心アレイでの光強度と光強度比の距離依存性

Fig. 8. Distance dependence of measured power and power ratio with angled three-fiber array for temperature measurement.

### 3.2 温度センサ

3心アレイ方式を用いた温度センサを作製した。温度センサは、3心アレイを金属基材に固定してあり、金属基材の熱膨張による反射面までの距離を検知し、温度に換算する。構造の概要図を図7に示す。金属基材の熱膨張による反射面の移動距離は数 $\mu\text{m}$ 程度と小さいため、3心アレイの距離変化に対する感度を高くするために、光ファイバ角度( )を図2で示したアレイより大きくした。

図8に温度測定用3心アレイの光強度と距離の関係を示す。作製した温度センサでは、図8に示す範囲を用い測定を行った。図9は温度センサの測定結果である。温度と光強度比は直線的な関係があり、-10 から60の広い範囲で、誤差1 未満という結果が得られた。

この結果から、3心アレイと金属基材という簡単な構成で、誤差1 未満の高い精度が得られることが確認された。

### 3.3 圧力センサ

次に、3心アレイ方式を用いた圧力センサを作製した。反射面が取り付けられたダイヤフラムに対向して3心アレイを配置し、圧力変化による反射面の移動距離を測定する。構造の概要図および測定結果を図10に示す。印加された圧力と光強度比  $(P_1 - P_2)/(P_1 + P_2)$  にほぼ直線的な関係があり、圧力センサとしての動作が確認できる。

### 3.4 温度補償圧力センサ

図11には、温度センサと圧力センサを組み合わせた温度補償圧力センサを示す。圧力センサ部の環境温度を温

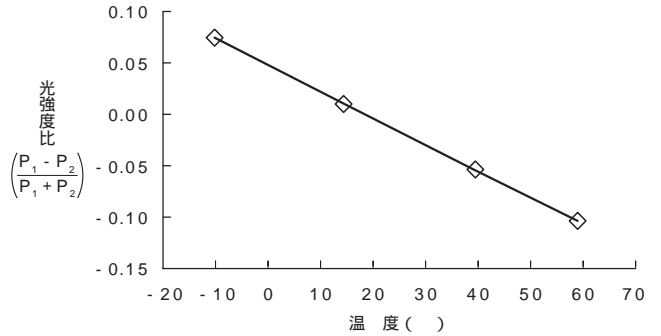


図9 金属ベース上に固定された3心アレイの光強度比の温度依存性

Fig. 9. Temperature dependence of power ratio with angled three-fiber array fixed on metal base.

度センサで測定することで、圧力センサでの温度の依存性を補償することが可能となる。-10 ~ 55 の温度範囲で測定した温度補償後の圧力計測結果を示す。圧力センサの温度依存性が温度測定結果に基づく簡単な計算で完全に補償されており、温度範囲 -10 ~ 55 において圧力測定精度  $\pm 0.3\%$  F.S.を達成している。

この結果より、圧力センサおよび温度センサを組み合わせた3心アレイ方式の温度補償圧力センサを用い、広い温度範囲において高精度な測定が可能であることを確認した。

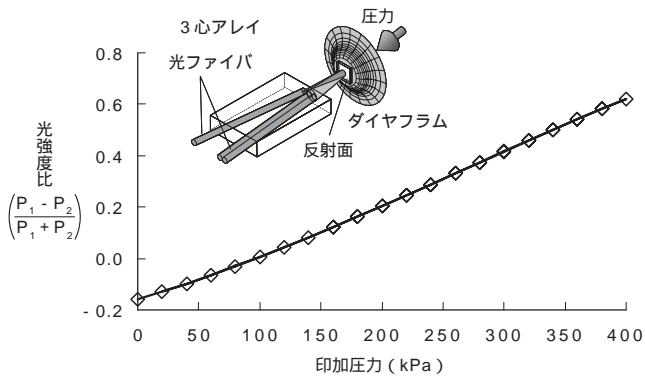


図10 3心アレイとダイヤフラムを用いた光強度比の圧力依存性  
Fig. 10. Pressure dependence of power ratio with angled three-fiber array and diaphragm.

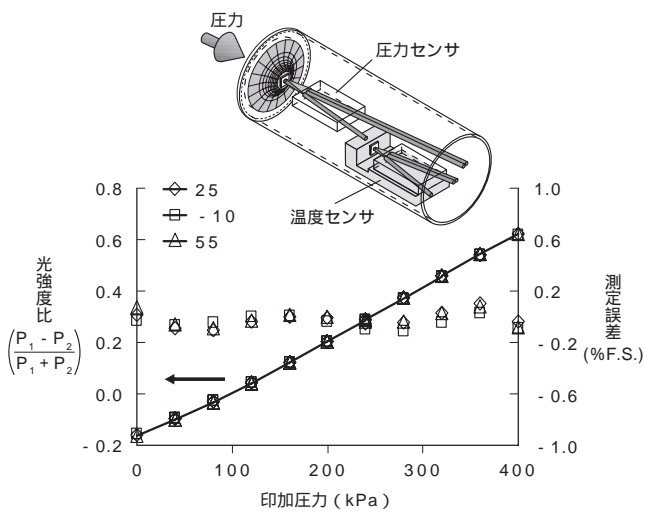


図11 温度補償圧力センサの光強度比の圧力依存性  
Fig. 11. Pressure dependence of power ratio with temperature-compensated pressure sensor.

#### 4. 水位センサへの適用

今回報告した3心アレイ方式を用いた温度補償圧力センサは、水位センサ（投込圧力式）に適用され、JFEアドバンテック株式会社より販売されている（図12参照）。この水位センサは、3心アレイ方式により圧力測定を行うため、水位を検出するために水に沈められる部分（検出部）には電子部品が一切ない。このため、耐雷性と耐電気ノイズ性が非常に高く、電池なども不要である。また、検出部からの信号伝送に光ファイバを使用するため、数kmにおよぶ長距離の信号伝送が可能である。その上、これまで述べたように単純な構造のため信頼性が高い。さらに、分光器や光学フィルタなど高額部品が不要であり、電気回路も簡単な構成のため、従来の光学式センサに比べ十分な価格競争力を持つ。温度センサによる温度補償により、-5 から 55 までの範囲での精度保証が可能であり、電気式水位計と同様な ± 0.3 %F.S.（測定範囲：0 - 10 m, 0 - 40 m）を実現している。

#### 5. むすび

当社では、独自の3心アレイ方式を用いた光学式センサを開発した。本センサの光源には、安価なLEDを用いても高精度であることを確認した。使用する3心アレイの角度（ ）を適切に選択して温度センサおよび圧力センサを作製し、実用十分な精度が得られることを確認した。さらに、温度センサと圧力センサを組み合わせた温度補償圧力センサでは、-5 から 55 の温度範囲で ± 0.3 %F.S.の高精度を達成した。この温度補償圧力センサは水位計に適用され、JFEアドバンテック株式会社から発売されている。



図12 3心アレイが適用された水位計カタログ  
Fig. 12. Water level gauge employing three-fiber array.

参 考 文 献

- 1) Marc R-H Voet, Alain Nancey, and Johan Vlekken: Geodetect: a new step for the use of Fiber Bragg Grating technology in soil engineering, 17 th International Conference on Optical Fiber Sensor (OFS-17) pp.214-217, 2005
- 2) Hiroshi Naruse, Koji Komatsu, Kazuhiko Fujihashi, and Masaru Okutsu: Telecommunications tunnel monitoring system based on distributed optical fiber strain measurement, 17 th International Conference on Optical Fiber Sensor (OFS-17) pp.168-171, 2005
- 3) Anish Saran, Don C. Abeysinghe, and Joseph T. Boyd: Microelectromechanical system pressure sensor integrated onto optical fiber by anodic bonding, Applied Optics, Vol. 45, No. 8, pp.1737-1742, 2006
- 4) Juncheng Xu, Xingwei Wang, Kristie L. Cooper, and Anbo Wang: Miniature all-silica fiber optic pressure and acoustic sensors, Optics Letters, Vol.30, No.24, pp.3269-3271, 2005