

石英小型ロッドレンズを用いた光圧力センサ

光電子技術研究所 堀本 啓一¹・坂元 明¹・額賀 理¹・奥出 聡²

Optical Pressure Sensor Utilizing a Miniature Silica Rod Lens

K. Horimoto, A. Sakamoto, O. Nukaga & S. Okude

対象物の距離変位を測定する石英ロッドレンズ型変位センサの検討を行い、その応用として光圧力センサを開発した。ロッドレンズによるセンシング方式は、光通信用部品で用いられている技術を採用することで小型かつ高信頼性であり、さらに安価な光部品で装置を構成できるため、低コストの光センシングシステムを実現できる。本稿では、ロッドレンズを用いた圧力センサの原理・特性、および測定精度について検討を行った結果を報告する。

The displacement sensor which utilizes a silica-based rod lens and measures the displacement of an object is studied and the optical pressure sensor is realized utilizing it. The sensing method using the rod lens can achieve small packaging size and high reliability based on optical communication components' technology. Moreover, it can realize low-cost sensing system because it can be build up by inexpensive optical components. In this paper, the principle, the properties and the improvement of the measurement accuracy of the optical pressure sensors are reported.

1. ま え が き

光ファイバを利用した光学式センサは電磁ノイズに強く、高精度の測定が可能であることに加え、遠隔地での測定が容易であることから、電気式センサの代替として様々な分野への応用が進められており、構造物やトンネルの損傷監視や電力・原子力設備などの温度監視、液面検出などが提案されている。センシング方式としては、被測定物理量を反射光の波長に変換して測定する光ファイバグレーティング方式 (Fiber Bragg Grating : FBG)¹⁾ や、光ファイバ中に発生する散乱光の周波数シフトにより測定する誘導ブリルアン散乱方式 (Stimulated Brillouin Scattering : SBS)²⁾ が広く研究されている。しかしこれらの方式はセンシングにおいて非常に高価な測定機器が必要になり、その普及を妨げる要因となっていた。

われわれは、光ファイバ製造技術を応用した石英製の小型ロッドレンズ³⁾⁴⁾ と比較的安価に入手可能な発光ダイオード (Light-Emitting Diode : LED) やフォトダイオード (Photodiode : PD) を用いることで、高精度かつ従来よりも低コストな光ファイバ型センサを実現し、圧力センサへの応用⁵⁾ を検討したので報告する。

2. ロッドレンズセンシング方式

2.1 ロッドレンズセンサの基本原理

ロッドレンズは屈折率分布型レンズ (GRIN レンズ) であり、その屈折率が円柱形状の半径方向へ放物線状に変化したものである。光ファイバから出射する光束をコリメート (平行) 光に変換する作用を利用して、光アイソレータや誘電体多層膜フィルタなどの光部品⁶⁾ に広く利用されている。今回使用したロッドレンズは石英系光ファイバの技術を応用して作製したものであり、石英製であるため光ファイバとの融着接続が可能であり、接着剤で固定する方式に比べ高い信頼性を実現できる。

ロッドレンズはその長さを変化させることにより、発散から収束まで幅広い光伝搬特性を実現できる。図1にロッドレンズ長と光伝搬特性の関係を模式的に示す。コリメート条件でのロッドレンズ長を0.25ピッチと呼び、それよりも短い場合は発散光となる。一方0.25ピッチ以上で0.5ピッチ以下の場合には収束光となり、その焦点距離はピッチ長で調整できる。このロッドレンズを反射ミラーに対向させ、反射光を再び光ファイバに結合するように配置する。このとき結合する反射光の強度はロッドレンズと反射ミラーの距離、および相対角度により変化する。すなわち、反射光の強度を測定することで、反射面の位置変位を計測する変位センサが実現できる。今回われわれは圧力測定用のダイアフラムやベローズに反射面を形成して、圧力センサへの適用を試みた。

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

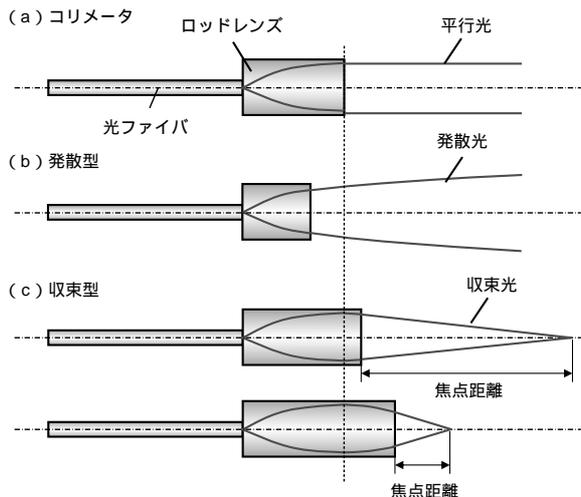


図1 ロッドレンズ長と出射ビームの広がり
Fig. 1. Relation between rod lens length and divergence of emitted beam.

2.2 ロッドレンズのセンシング特性

ロッドレンズの基本的なセンシング特性を図2に示す構成で評価した。ロッドレンズから出射した光はミラーで反射され再び光ファイバに結合する。このとき、反射光強度は反射ミラーの位置および相対角度の関数になる。

図3に反射率の (a) 距離依存性、(b) 角度依存性を示す。Pはピッチ長を示す。距離依存性は入射角度が0°での結果、また、角度依存性は反射率が最大になる距離での結果を示している。なお、グラフの縦軸の反射率は測定範囲内の最大値で規格化した値である。

コリメート条件 (P=0.25) からピッチを長くするにしたがい、最大反射強度が得られる距離が短くなるとともに、ピーク位置前後での距離変化に対する反射率変化が大きくなる。これは、ピッチ長が長くなるにしたがい焦点距離が近くなるとともに、焦点深度が浅くなることに対応する。一方、角度に対する感度はコリメート条件で一番高く、特性は急峻に変化し、ピッチ長が長くなるにしたがい鈍くなっていく。

このように、センシング感度の距離依存性と角度依存性は相反する関係にあるため、センシング対象の変位変形の特徴にあわせて最適なロッドレンズ長を選択することが重要である。例えば、距離変化の大きな対象を測定する場合は、ピッチ長をコリメート条件に近くして焦点深度を深くすると良いが、角度変化に敏感になるため角度方向の変動を抑制した構造が必要になる。逆に、小さな距離変化を測定する場合は、ピッチ長の長いロッドレンズを使用しないと高い測定感度が得られない。このとき角度依存性は小さくなるため、角度変化による測定誤差を小さくすることが可能となる。

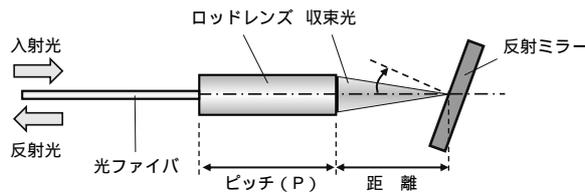
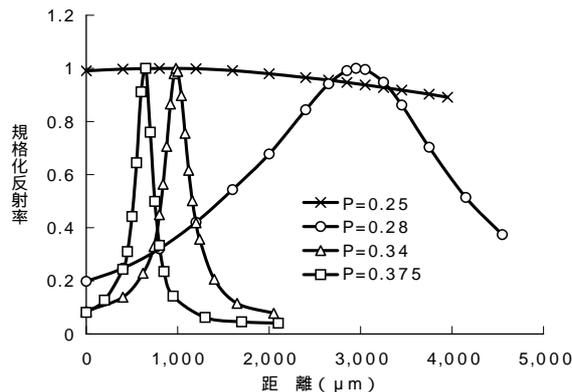
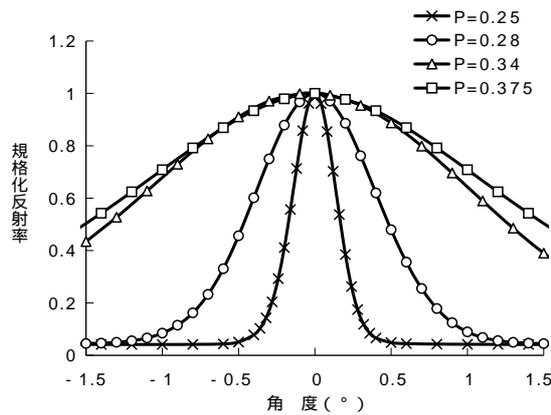


図2 ロッドレンズの光学特性測定系
Fig. 2. Measurement setup for optical properties evaluation of rod lens.



(a) 距離依存性
(a) Distance dependence of reflectance.



(b) 角度依存性
(b) Angle dependence of reflectance.

図3 ロッドレンズの反射光学特性
Fig. 3. Optical reflection properties of rod lenses.

3. ロッドレンズ方式による圧力センサ

3.1 圧力センサ構成

圧力と変位の変換機構として、変位量が1,000μm @300kPaの溶接ペローズを用いて圧力センサを実現した。図4に構成を示す。LED光源からの光は光カップラにより2つに分岐される。一方の光はロッドレンズから出射され、ペローズ底面で反射しロッドレンズに再入射した後に、再び光カップラを通過してフォトダイオードPD1によってその強度を電流として測定する。またもう一方は、光源の強度変動を補正するため、別のフォトダイオードPD2によりその強度(電流)を測定する。PD1,2で検出された電流は、

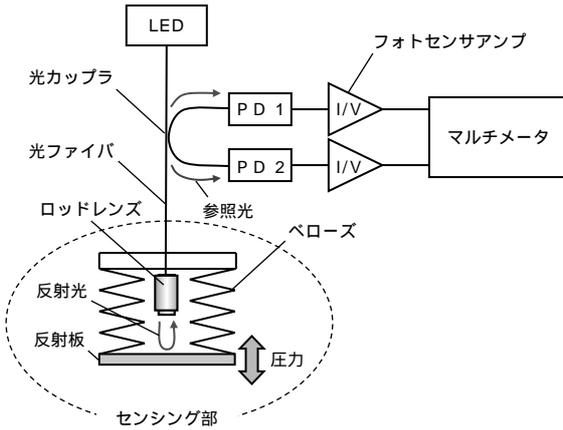


図4 光圧力センサの構成

Fig. 4. Apparatus of the optical pressure sensor.

フォトセンサアンプにより電圧信号に変換した後、デジタルマルチメータで測定する。このようにして測定した反射光強度により、ベローズ底面に印加する圧力と反射光強度の関係を評価した。

3.2 圧力センシング特性

前述のとおり、使用するロッドレンズのピッチ長を変えることで、同一のベローズ（ダイヤフラム）であっても異なるセンシング感度が得られる。今回使用したピッチ長0.28, 0.34のロッドレンズにおける、規格化反射率の距離依存特性を図5に示す。P=0.28の場合、測定に用いる反射率の範囲（0.4～0.8）は900 μmの距離変動に対応し、これは今回使用したベローズでは270kPaの圧力変化に相当する。一方、P=0.34の場合、同じ反射率の範囲に対応する距離変動は140 μmであり、これは42kPaの圧力変化に相当する。図6にそれぞれの場合の圧力測定結果を示す。いずれのロッドレンズの場合でも、圧力の上昇とともに規格化反射率は増加し、ピッチ長を変えることでセンシング感度が変化していることがわかる。

次に測定再現性の評価を行った。図6に示した圧力測定を10サイクル繰り返した場合の測定偏差（ばらつき）を図7に示す。ここで測定偏差とは各圧力における測定値の平均からの差を測定レンジのフルスケールで割った値である。それぞれの測定偏差の最大幅は、P=0.28のとき0.57%、P=0.34のとき0.47%程度であった。これら測定偏差の要因としては、周囲の温度変化によるセンシング部の変動やベローズが持つヒステリシスが考えられる。また、P=0.28の場合の偏差が若干大きい結果となったが、これは、ピッチが小さい方が角度依存性が大きく、ベローズの変形に伴う角度変動による影響⁷⁾を受けやすかったためと考えられる。

4. 温度特性の改善

4.1 温度補償構造

図4に示した圧力センサの構造では、環境温度の変化に

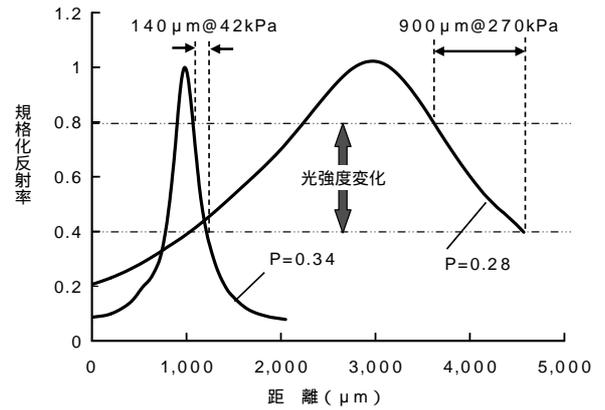


図5 各ロッドレンズにおける測定範囲

Fig. 5. Measurement range of rod lenses.

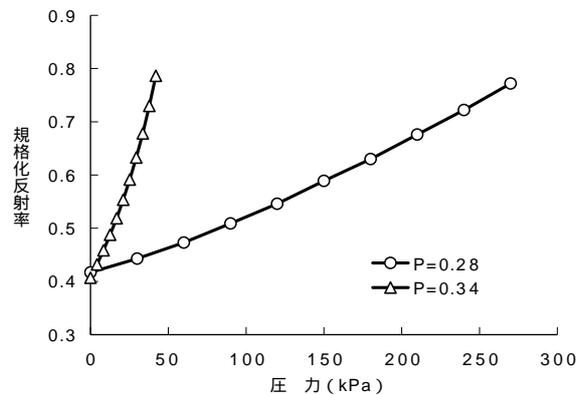


図6 各ロッドレンズにおける圧力特性

Fig. 6. Pressure sensing properties of rod lenses.

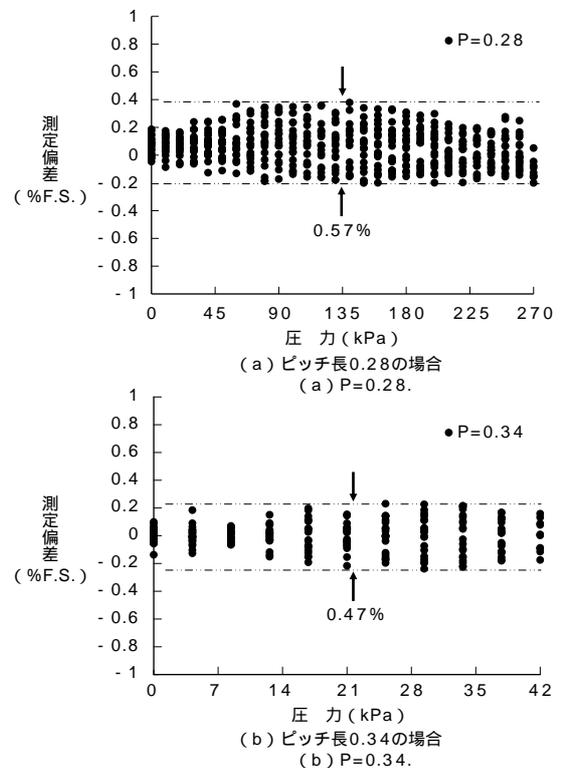


図7 各ロッドレンズにおける測定偏差

Fig. 7. Deviation of measured value.

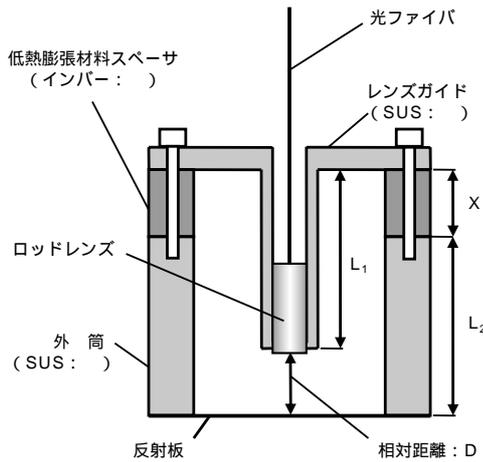


図8 センシング部の温度補償構造

Fig. 8. Temperature compensated structure of pressure sensor.

対してロッドレンズと反射面の距離が変化するため、測定精度が劣化することが予想され、また実験においても確認された。これを改善するため、パッシブに温度補償を行う方式の検討を行った⁸⁾。今回検討を行った温度補償構造を図8に示す。ロッドレンズはレンズガイドに固定し、反射板(ダイヤフラム)を有する外筒に固定される。圧力測定時に、センシング部の温度が変化すると、レンズとダイヤフラムの相対距離Dは圧力による変化に加え、レンズガイドと外筒の熱膨張による変化の影響を受けるため測定誤差が生じる。これを抑制するため、レンズガイドと外筒を同一材料のSUS(線膨張係数 $\sim 17.3 \times 10^{-6}$)とし、その間に極低熱膨張材料のインバー(線膨張係数 $\sim 0.5 \times 10^{-6}$)のできたスペーサを挿入する構造を採用した。温度変化Tが生じた場合の相対距離変化量Dは以下の式で表される。

$$D = T \{ (L_2 + X) - L_1 \}$$

ここで $L_1 = L_2$ とすると $D = T \cdot X$ となり、 $\sim 10^{-7}$ 程度であるためDを非常に小さくすることが可能となる。

4.2 温度補償特性

温度補償特性を確認するために、圧力を印加しない状態でセンシング部の温度を変化させた場合の光強度変動を測定した。結果を図9に示す。従来構造の場合、60の温度変動に対して測定偏差は $\pm 1.2\%$ であったが、温度補償構造を適用し $L_1 = L_2$ とすることで1/10の $\pm 0.12\%$ 以下になることを確認した。この場合でもわずかに温度依存性が認められるが、これはロッドレンズ自身も屈折率の温度依存性の影響と考えられる。この影響を考慮し、 $L_1 = L_2$ の長さを調整すると測定偏差はさらに抑制でき、最終的に $\pm 0.03\%$ 以下を達成した。

5.むすび

石英製小型ロッドレンズを使用した変位センサを提案

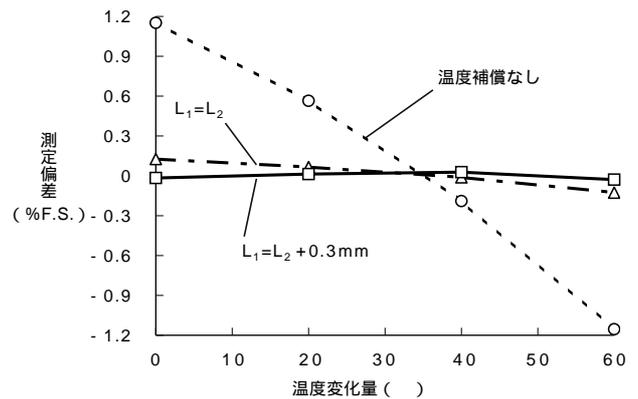


図9 センシング部の温度依存性

Fig. 9. Temperature dependence of measurement error.

し、その応用として圧力センサの開発を行った。ロッドレンズを用いることで小型、低コストかつ高信頼性の圧力センサが実現でき、また、測定精度の点においても、温度補償構造を採用することで高い測定精度が得られることを確認した。本方式では、ロッドレンズの長さを調整することで様々な測定範囲に対応可能であり、いろいろな分野での応用が期待される。

参考文献

- 1) E. Udd, et al. : Usage of fiber grating sensors to perform critical measurements of civil infrastructure, OFS-16, SS-3, pp.496-499, 2003
- 2) Kazuo Hotate : Recent progress in Brillouin based fiber sensor technology - correlation-based continuous-wave technique, OFS2002, WC1, 2002
- 3) Kenji Oda, et al. : Subminiature fiber collimator using quartz rod lens, ECOC2003, We4, p.59, 2003
- 4) Kenji Nishiwaki, et al. : Subminiature gain flattening filter using micro quartz-rod lens collimators, OECC2003, 16A-3-6, 2003
- 5) 坂元明, 西脇賢治, 野口善清, 奥出聡 : 小型ロッドレンズを用いた圧力センサ, OFT, 2004-125, pp.47-50, 2005
- 6) 百津仁博, 小田研二, 野口善清, 西脇賢治, 浅野健一郎, 細谷英行 : 石英ロッドレンズを用いた小型光部品, フジクラ技報, 第104号, pp.6-9, 2003
- 7) 堀本啓一, 坂元明, 額賀理, 奥出聡 : ロッドレンズを用いた光ファイバ圧力センサの検討, 電子情報通信学会技術研究報告, OPE2005-13, pp.31-35, 2005
- 8) 堀本啓一, 坂元明, 額賀理, 奥出聡 : 石英ロッドレンズを用いた温度補償型圧力センサ, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-13-27, 2005