

Ⅲ－5

光干渉型差圧計マイクロセンサーの試作と評価

東北大学大学院 学生員 ○石丸 真 正会員 仙頭紀明 正会員 風間基樹
東北大学大学院 橋本 智 新妻弘明

1. はじめに

複雑な地下環境中の水の流れや水圧を把握するためには、観測点を増やし網羅的に計測することも必要である。本研究では、小型で大量生産が可能な光干渉型差圧マイクロセンサーの開発について述べる。このセンサーは電気回路を使用しないため、長期的に安定かつ高感度の計測が期待できる。ここでは、プロトタイプとして試作した差圧センサーのプロセス、及びその特性評価について述べる。

2. センサーの計測原理と基本設計

製作した差圧センサーの基本構造を図-1に示す。センサー内部を水で満たすための穴をそれぞれ2つずつ両面に開けている。ダイヤフラム両面に作用している圧力に差が生じるとダイヤフラムが変形し、ダイヤフラム中央部付近の変位量は作用した圧力差に応じて増減する。

2.1 計測原理 ダイヤフラムの変位量を検出する機構としては、図-2に示すようなファブリ・ペロー干渉計(F・P干渉計)の原理を用いる。これは、2枚の平行に置かれたミラー間での光の多重反射による干渉現象を利用したものである。反射光の光強度 I_r は入射光強度を I_i とした場合、次のようになる。

$$I_r = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n d / \lambda)}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n d / \lambda)} I_i \quad (1)$$

ここに、 R_1, R_2 ：ハーフミラー、全反射ミラーのエネルギー反射率(境界面での媒質を考慮)、 n ：ミラー間の媒質の屈折率、 d ：ミラー間の距離(ギャップ長)、 λ ：入射光

の波長である。光強度で計測する場合には、ギャップ長の変化に対して反射光強度が直線的に変化する部分を利用し、波長可変レーザー(LD)の中心波長をこの部分のほぼ中央(動作点)に合わせておく。圧力差によりダイヤフラムが変位するとギャップ長が変化し、反射光強度の変化となって現れる。一方、光計測系にはこのほかに広帯域の光源(LED)を用いて、反射光を光スペクトルアナライザーで表示させ、反射光のピーク波長(反射光強度が極小となる波長)の変化量を計測する方法もある。(1)式より反射光のピーク波長の変化量 $\Delta\lambda$ は次式で表わされる。

$$\Delta\lambda = (2n/m)\Delta d \quad (2)$$

ここに、 m ：ピーク次数($m=1,2,\dots$)である。 $\Delta\lambda$ を測定すれば、(2)式よりギャップ長の変化量 Δd を求めることができる。前者の計測方法は短期・動的な計測に適しているが、反射光強度の直線部分が計測可能範囲や感度に大きく影響するという欠点がある。一方、後者の計測方法は動的な計測には不向きだが、計測可能範囲が広いという利点がある。

2.2 センサーの基本設計 今回は10～500Paの差圧を計測対象とした。これにより、例えばセンサーの圧力計測点の距離を5cmとした場合、 $\pm 1/50 \sim \pm 1$ の動水勾配が計測可能となる。まず、ピーク波長の変化量を測定する方法を用いて、静的な計測を正確に行うことを目標とした。センサーの設計においては、用いる計測方法において設定した差圧レンジが計測可能となるように、ダイヤフラムの面積・厚さなどの力学的諸量と、F・P干渉計におけるギャップ長・ミラーの反射率などの光学的諸量を

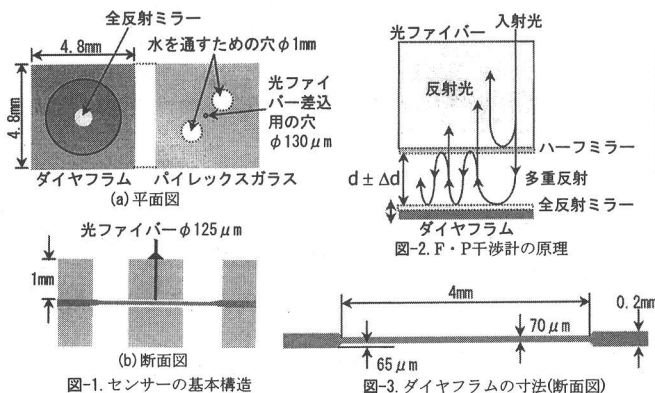


図-1. センサーの基本構造

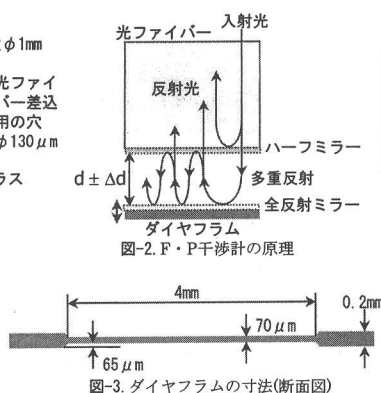
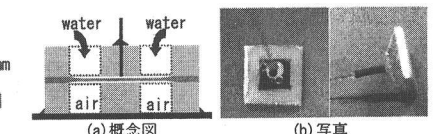
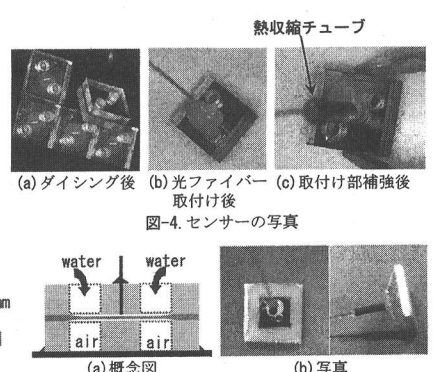


図-3. ダイヤフラムの寸法(断面図)



決定した。図-3 にダイヤフラムの寸法を示す。なお、光学的な設計については、東北大学大学院地球工学専攻新妻研究室の仕様¹⁾になった。

3. プロセスとケーシング

3.1 プロセス 半導体集積技術を応用したマイクロマシニング技術²⁾を用いて、シリコン基板を図-3 のように加工し、片面に全反射ミラーとなる金を成膜した。次に、シリコン基板と穴あけ加工を施したパイレックスガラスを陽極接合(加熱した状態で電圧を加える)した。なお、この過程までは 2cm 四方のシリコン基板とガラス基板から、同時に同じものを 9 個製作することができる。その後、基板をダイシング(切断)し、全反射ミラー側のガラス基板に先端にハーフミラーのついた光ファイバーを取付け、F・P 干渉計を構成した。光ファイバーを取付ける作業は、光スペクトルアナライザーで干渉特性を確認しながら行ったが、ギャップ長の調整が難しく、今回は同一の干渉特性をもつセンサーを製作することは出来なかった。製作したセンサーの写真を図-4 に示す。

3.2 ケーシング プロトタイプセンサーの性能評価用として、今回は F・P 干渉計と反対側のガラス基板の穴を塞ぐことにより絶対圧計を作成した。絶対圧計は一方が大気圧の場合の差圧計と考えることができる。作成した絶対圧計を図-5、及びそれに用いたセンサーの干渉特性を図-6 に示す。

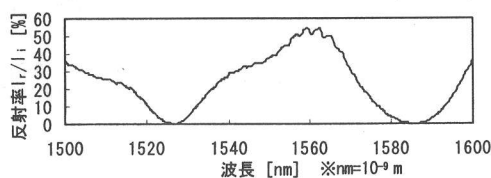


図-6. 実験に用いたセンサーの干渉特性(ギャップは空気)

4. センサーの性能評価実験

製作したセンサーの性能を評価するために、図-7 に示すような簡易実験を行った。実験では、水深 5~35cm の間で 5cm 間隔で水深を変化させ、その都度、光スペクトルアナライザーに表示される反射光のピーク波長の変化量を測定した。なお、表面張力によりセンサー内部に水が入らない恐れがあったため、実験前に注射器を用いて強制的にセンサー内部に水を入れた。この際、干渉特性が図-6 に示したものよりもわずかにシフトしたが、この原因はミラー間の媒質の変化と、温度の影響によるギャップ長の変化と思われる。実験結果を図-8 に示す。図より、水圧とピーク波長は線形的に変化していることがわかる。最小二乗法により近似曲線を求め、その傾きからセンサーの感度を求めると、0.003nm/Pa(1 回目, 2

回目における傾きの絶対値の平均値)であった。実験に使用した光スペクトルアナライザーの波長分解能は 0.01nm であるため、今回の実験に使用したセンサーの圧力分解能 $P_{\min}$ は、 $P_{\min} = 0.01/0.003 \approx 3\text{Pa}$ である。

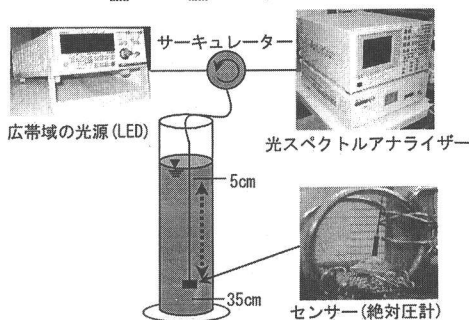


図-7. LEDを用いた実験の概要

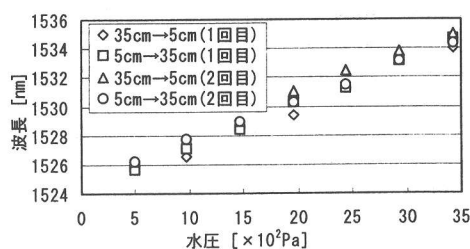


図-8. 実験結果

5. まとめ及び今後の研究展望

今回、プロトタイプとして製作したセンサーで達成できた点を以下にまとめる。(A)静的な計測方法で、圧力の変化に対してピーク波長が線形的に変化することを確認した。(B)目標とした差圧レンジ(10~500Pa)が計測可能であることを確認した。

次に、今後の研究において課題となる事項について述べる。(a)同一の干渉特性をもつセンサーを製作するためには、光ファイバーの取付けプロセスを改善する必要がある。(b)短期・動的な計測に対応できるように、光強度による計測方法にも適した設計を行う必要がある。(c)設計段階からケーシングについても考慮する必要がある。(d)長期的に安定した計測を行うには、温度変化の影響、及びセンサー内部の媒質を考慮する必要がある。

今後、今回試作したセンサーを用いて、まず実験室レベルでその性能仕様を検討し、現場への適用につなげていく予定である。

参考文献: 1)橋本智,鈴木学,浅沼宏,新妻弘明,江刺正喜:光干渉型マイクロハイドロホンの試作と特性評価,第104回物理探査学会春季学術講演会論文集,pp.109-112,2001. 2)江刺正喜,藤田博之,五十嵐伊勢美,杉山進:マイクロマシニングとマイクロメカトロニクス,培風館,1992.