光ファイバを用いた液体識別センサの試作[†]

清水基夫・長井 賢・大木 永光

Optical Fiber Liquid Discriminating Sensor

Motoh SHIMIZU, Masaru NAGAI and Nagamitsu OHGI

An optical fiber liquid sensor for the remote detection of very small amount of liquid leak was developed. The sensor consists of an optical prism and focusing lenses and has the following features.

- (a) long distance, multiple point detection for more than 10 km
- (b) insensitive to water
- (c) safety in explosive or high voltage environment

In this sensor, the optical signal from the input fiber is collimated by a Selfoc lens, and the incident angle to the detection surface of the prism is adjusted to a specific angle which is determined by the refractive indices of the prism and the liquid to be detected. The sensitivity of the sensor was 5 dB against a difference in refractive indices of 0.02, according to the experiment using various kind of liquids. The resulting data of the experiment were well matched to the theoretical value, and indicated that the sensor can discriminate liquids of different refractive indices. The sensitivity against the liquid quantity is also very high as to detect a small spot of kerosine on cloth. An experimental system for long distance leak detection was evaluated using an optical fiber of 1.6 km long. The system works by the same principle to optical fiber fault locator (OTDR), with a range gate circuit controlled by a digital delay circuit to detect sensor distance. A 10 km leak detection system with 17 liquid sensors was estimated to be possible using 1.3 μm wavelength and such system will be suitable for pipe-line or plant maintenance application in chemical industry.

Key Words: optical fiber sensor, liquid sensor leak detection, refractive index difference, distributed sensor

1. はじめに

化学プラントやパイプライン等の漏洩防止上の保全技術は、施設の規模の拡大に伴って、安全面や公害防止・環境保全の面から、また、経済性や、事故時の即応性の面から、より高度な自動監視方式が必要とされている。こうした漏洩検出技術としては、配管中の流量、圧力等の異常や変化（例えば、流入量より流出量が少ない。）から、間接的に検出する方式と、漏出した流体を導電性粉体素子や電気的容量変化によるセンサで直接検出する方式とがある。こうした用途に光を用いる方式では、電気等の方式に比べ安全性が高いこと、電気的雑音妨害を受けにくいこと、化学物質による腐食を受けにくいこと等の特徴があり、クラッド層を特殊なプラスチック構造とした光ファイバオイルリーク検知器¹⁾や、屈曲部のクラッド層を除去することにより液体検知をしようとする研究²⁾が報告されている。

この研究では、通信用の低損失光ファイバを用いることにより、数十 km の広い範囲に分散した対象点を遠隔監視する目的に適した光学式のセンサの試作検討を行った。こうしたセンサの特性としては、先に述べた光学式のセンサ一般の特徴の他に、

- a. 伝送路が低損失であり、長距離の応用に適応できること。
- b. 構造が頑丈であり、設置工事や長期間の屋外環境に耐えること。
- c. 雨滴や地下水による誤動作を防ぐため、対象液体には感応し、水分には感応しないこと。
- d. 管路のひび割れやフランジ部からの微量の浸出しの状の漏洩も検知できること。
- e. 漏洩箇所の位置も検知できること。

[†] 電気学会光量子デバイス研究会 (SICE 協賛) で発表 (昭 58・12)

* 日本電気(株) 横浜市緑区池辺町 4035

* NEC Corp., Yokohama

(Received October 1, 1984)

(Revised March 25, 1985)

f. センサは、再使用可能か、極めて容易に交換可能であること。

等が要求される。これらの要求条件を考慮して、光ファイバ素線を露出する形式や、伝送損失の大きい特殊なクラッド材を用いる方法ではなく、より実用性が高いと考えられる光ファイバを伝送路とし、光学プリズムでセンサを構成する方式について検討した。試作したセンサでは、光学プリズム材料と入射角を選定して、全反射臨界面角を適切に設定することにより、屈折率の異なる二種の液体、例えば水と鉱油を極めて明確に識別することができる。また、その検出に要する液量は布地に付着した油滴程度の極めて微量でよく、その意味でも著しく高感度である。さらに、伝送路として通信用の低損失光ファイバを用いることにより、長距離化および多数のセンサのシリーズ接続が可能であり、設置の柔軟性が向上する。さらに光ファイバコアが小口径の光源として機能するため、対屈折率感度が高められる等の多くの効果が得られた。

この研究では、センサ単体の試作評価と共に、多数のセンサを継続接続し、長距離区間に分散した多数の地点を監視する方式についても考察を行い、基本的な実験を行った。

2. センサの構成と感度

2.1 検知面の反射率

光の反射・屈折の関係を示す Fig. 1 において、光が屈折率 n_1 の媒質 1 から n_2 の媒質 2 ($n_1 > n_2$) へ、全反射角以下の角度で入射した場合、入射角 i_1 と屈折角 i_2 の間には、スネルの法則により次式が成立する。

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (2.1)$$

また、入射波に対する振幅反射係数 $r_{p,s}$ および振幅透過係数 $t_{p,s}$ は次式で与えられ、その強度は各々の 2 乗で与えられる。

$$r_p = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2.2a)$$

Fig. 1 Reflection and refraction of light

$$t_p = \frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2.2b)$$

$$r_s = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2.2c)$$

$$t_s = \frac{2 \sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2.2d)$$

但し、添字 p に入射面 (図の紙面) に平行な成分, s は入射面に垂直な成分を表わす。ここで入射角 i_1 が臨界面角に近い部分では、わずかな角度変化で反射率が著しく変化することが知られている。逆に入射角を一定にして、媒質 2 の屈折率を変化させたときの反射率変化を計算した例を Fig. 2 に示すが、同様に、著しい変化を示すことが明らかになった。

ここで縦軸は強度の反射率で p, s 成分については、 r_p^2, r_s^2 であり、無偏光の場合には、 r_p と r_s の電力平均値 $(r_p^2 + r_s^2)/2$ として計算している。このことから、Fig. 3 に示す様に光ファイバとプリズムを用い、入射角を適当に設定すれば、高感度の液体識別センサの実現が期待できる。

2.2 光源の面積の影響

2.1 項の検討では、入射角は「平行光線」として計算しているが、現実のセンサでは、光源は光ファイバの出射端であって、出射光束は最大で a/f だけの角

Fig. 2 Reflection vs refractive index

Fig. 3 Construction of sensor

度の拡りを有する。ここで、 a は光ファイバのコア半径、 f は集光レンズの焦点距離である。この場合の反射率は、Fig. 4 に示すように光ファイバのコア内を多数の区画に分け、それぞれの反射率を累積することによって求めることができる。ただし、方向余弦 (u, v, w) で表わされる直線は、

$$A_x + B_y + C_z + D = 0 \quad (2.3)$$

で表わされる平面と

$$\theta = \pm \sin^{-1} \left\{ \frac{uA + vB + wC}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right\} \quad (2.4)$$

なる角度で交わるが、 θ は光学的には入射角 i_1 に相当する。Fig. 5 は、コア径 $50 \mu\text{m}$ のステップインデックス型光ファイバと、 $1/4$ ピッチの SLW 型セルフフォックレンズ (焦点距離: 2.2 mm) を用いるとして、光ファイバ内を 49 の区画に分けて、合計の反射率を求めたものである。ここで、検知面の屈折率は 1.51 、光源は無偏光であると仮定しており、実線は光量分布を考えたもの、破線は考えない場合のものである。

なお、光ファイバとしてコア径 $100 \mu\text{m}$ のステップインデックス型や、コア径 $50 \mu\text{m}$ のグレーデッドイ

ンデックス型の場合も結果は Fig. 5 とほとんど同一である。これは、一見奇異ではあるが、光ファイバ出力が軸対称のため、全体を積分すればいずれも平均化されるためと考えられる。

2.3 感度

通常のマルチモード光ファイバを用いたセンサの場合、Fig. 5 から液体の屈折率に対する感度は、損失増加の立上り部分では、 0.02 の屈折率変化に対して約 5 dB の変化を示すことがわかる。このことから、センサの検出閾値を 3 dB とすれば、 0.02 程度の屈折率差しかない二種の液体の識別が十分可能である。したがって、このセンサが水 (屈折率 1.33) を検知せずに他の高い屈折率の液体を検出するためには、入射角 θ を約 63° 以上にすればよい。なお、検知面での検出光スポットの空間分解能も、SLW セルフフォックレンズの場合、直径で約 0.95 mm (半値幅) であり、極めて小さいものである。

3. センサの試作

前項の考察に基づき、いくつかの基本的な構造のセンサを試作し、その特性を評価した。

3.1 1回反射

最初に Fig. 3 の構成で、プリズム材料として BK 7 (屈折率 1.515)、SF 6 (屈折率 1.786) の光学ガラスを用い、入射角はそれぞれ 62° 、 50° の 2 種のセンサを試作した。これらの試作センサの各種の液体に対する特性の測定結果 (無偏光) を Fig. 6 に示す。なお、液体の屈折率は、アッペの屈折率計を用いて測定した。図中に光ファイバ内の光量分布を考慮した計算値を示すが、実験値と計算値は、特に BK 7 の場合に極めて良く一致することが確認された。SF 6 の場合のデータと計算値の不一致はやや大きい、この差異の原因は単に入射角 i_1 の誤差ではなく、プリズムの屈折率の誤差や内部散乱も含まれていると考えられる。また、BK 7 の場合、プリズムの屈折率に近い屈折率 1.497 のシダー油に対して、光出力レベルは最も減衰し、約 30 dB の値を示したが、屈折率 1.333 の水には全く影響を受けず、水と油が共存する場所での油検出センサとして、適用が十分可能と考えられる。また、対象の液体に近い屈折率の材料によるセンサが液体の屈折率差に対する感度が高く、液体識別センサとして適している。なお、試作したセンサ自体の挿入損失は $2.2 \sim 2.5 \text{ dB}$ であった。

3.2 多数回反射型センサ

つぎに、検出反射面で光を複数回反射させれば、反射回数に応じて損失量差が増大し、センサの液体識別

Fig. 4 Incident angle

Fig. 5 Reflection of non-point optical source

Fig. 6 Experimental data (one reflection)

Fig. 7 Construction of sensor with double reflection

Fig. 8 Experimental data of double reflection method

Fig. 9 Principle of compact sensor

感度が向上する。Fig. 7 に示す 2 回反射型センサを試作し、Fig. 8 の評価結果を得た。計算値との差異はやや大きいものの、1 回反射型センサと比較して、dB 表示で約 2 倍の感度を有することを確認した。なお、このセンサの挿入損失は 2.9 dB であった。

3.3 小型化の検討

一般にセンサの実用化を考える場合、できるだけ小型で経済的であることが重要である。改良品として、Fig. 9 に示す様な入出力のレンズを 1 個で共用し、小形化したセンサを試作し評価した。このセンサは入出力の光ファイバの間隔 d とレンズの焦点距離 f に対して、検知面と第 2 の反射面のなす角 β を適切に設定して、出力側光ファイバに光が効率良く結合できるよう構成している。

試作したセンサは 1 個のセルフフォーカスレンズ (SLW ϕ 2, 0.24 ピッチ) とガラスプリズム (BK 7) からなり、プリズムの寸法は、長さ 15 mm, 幅 8.6 mm, 厚さ 3 mm, $i_1=62^\circ$ で、反射面は金蒸着である。コア径 50 μ m (グレーデッドインデックス) の光ファイバを用い、挿入損失は約 4 dB, 水 (屈折率 1.333) に対する感度は 0.1 dB, アセトン (屈折率 1.356) に対する感度は 6.9 dB, 鉱油 (屈折率 1.441) に対する感度は 20.7 dB であった。また、外型寸法は長さ 57 mm, 幅 12 mm, 厚さ 8.5 mm で、重さ約 12 g となり、3.1 項のものに比べ体積で約 40%, 重さは約 30% に小型化されている。

4. システム検討

試作した液体識別センサは、低損失光ファイバと組み合わせることによって、広域遠隔監視システムを構成できる。システム構成として、光源と光レベルモニタの間に多数のセンサを接続した簡易な透過型システムと漏洩箇所的位置検出の可能な反射型システムについて、それぞれ、簡単な検討を行った。

4.1 透過型システム

Fig. 10 に示す様に多数のセンサを 1 本の光ファイバで縦続接続し、液漏れの危険箇所、例えば、タンクの周囲やパイプラインの接続部等に沿って取り付ければ、各センサの検出面に漏液が接

触した場合、反射率が低下し検出光量が減少することから液漏れを検知できる。送信光は、回路上のドリフトや外来の迷光の影響を避けるために約 3 kHz の変調を行ない、光レベルモニタ側ではフィルタを用いている。実験では、多数の光センサの代わりに 1 個のセンサと可変光減衰器を用いて鉱油 ($n \approx 1.441$) を検知する実験を行った結果、許容最大挿入損失として、約 40 dB の値が得られた。

4.2 反射型システム

長距離、多地点に対し、漏洩位置測定を含めた検知を行うためには、センサ内で後方反射を発生するようにして、光ファイバ・フォールトロケータ³⁾のような光パルスレーダ型の装置でこの反射を監視しておき、漏洩があった場合には、反射パルスが消滅するように構成すればよい。ただし、通常のフォールトロケータで用いられる CRT による波形観測ではなく、無人監視に適した **Fig. 11** の構成を検討した。図の右下に示したように、このセンサでは光入力側の光ファイバ、レンズ、プリズムの間にはシリコン接着剤を注入して反射をなくし、逆に、出力側は反射が残るように境界面を残しておく。このようにすれば、正常時には時間軸上のこの点に対応する位置に反射パルスが観測され、検知対象の液体がプリズムに接触すれば、パルスが消滅あるいはレベル低下するので漏洩位置を知ることができる。反射式の場合は、光はセンサプリズム内を 1 往復する形となるので、透過型の場合に比べ検出感度は dB 値で 2 倍となる。

つぎに、図のシステム構成では、繰返し 2.5 kHz、パルス幅 100 ns のパルス光を発生している。各センサでの反射信号は光方向性結合器を経て光検出器に結合される。ここで、光検出器の出力は、レンジゲート回路により目的とするセンサまでの光の往復時間に対応してサンプリングされて、基準電圧 V_{ref} と比較してレベル低下があれば、アラーム出力を出す構成となっている。この方式のセンサの距離分解能 d は、およそ光パルスのパルス幅 T_p またはレンジゲート時間幅 T_g のいずれか大きい方で決定され、ここで実験した装置では、 $T_g = 100$ ns であって分解能 $d \approx 10$ m である。

反射型システムの基本的な特性について、光ファイ

Fig. 10 Transmittance monitoring method

Fig. 11 Reflective method

バフォールトロケータを **Fig. 11** の構成に改造して実験を行った。ゲート回路の遅延時間の設定とゲート時間はフォールトロケータのデジタルディレイトリガ信号を用い、出力信号としては、ピークホールド回路により、リレーの接点出力を得ている。実験では、1.6 km のグレーデッドインデックス型光ファイバの一端に、センサを取り付けて動作を確認した。**Photo. 1** に実験の状況を **Photo. 2** に受信波形を示す。上の波形が検知対象(この場合は鉱油)が付着していない状態、中央の波形が鉱油の付着した状態を示す。反射の変化幅は約 12 dB であり、十分実用可能なものと判断される。

4.3 遠隔漏洩検知システムへの応用 (考察)

この光ファイバを用いた液体識別センサは、単独のセンサとしてだけではなく、光ファイバの低損失特性や本質安全性を生かした長距離の遠隔監視システムへの応用に特に適している。特に石油等の化学プラント内の漏洩監視等への適用や、長距離のパイプラインや地中埋設の超高圧の OF (Oil Filled) 型送電ケーブルの保守等の用途では一つの監視区間が数十にわたるため、最も適した応用と考えられる。

いま、光ファイバ損失を 0.8 dB/km (波長 1300 nm)

Photo. 1 Experiment of refractive method

Photo. 2 Signal wave-form

Fig. 12 Number of sensors vs fiber length

液体センサの片道挿入損失を 0.5 dB, また, 透過型の最大許容損失を 40 dB, 反射型の最大許容損失は光ファイバフォルトロケータの例から片道 25 dB と仮定したときの透過型の場合および反射型の場合の光ファイバ長とセンサの数関係を Fig. 12 に示す. この場合, 光ファイバ長が 10 km の場合, 透過型では 64 個, 反射型では 17 個のセンサを中間に挿入することができる. ここで, センサの反射率は 4% 程度とし, 挿入損失は, 今後の改良により到達が可能なレベルを

想定している. また, 透過型では光源として LED, 受光系として PIN-PD を用いたごく簡単な方式によっており, 必要であれば改良によりセンサ数の大幅な増加が可能である. 反射型についても, 光源の大電力化, センサの改良等によりセンサ数の増加等の改良は可能と考えられる. なお, 多数のセンサを用いた反射型システムで, 主要な妨害信号成分として, 二重反射により主信号の近傍に発生する偽反射パルスレベルについて考えると, 主信号に対し, 28 dB 程度低いものとなり, 実用上の障害とはならない.

5. む す び

光学プリズムの全反射臨界角を利用した液体識別センサを試作し, 広域の漏洩監視システムへの応用について検討した. 試作したセンサでは, 対象液体の屈折率差によりセンサの出力光量の変化を検出する感度はマルチモードファイバを用いた場合で, 0.02 の屈折率差に対し 5 dB で, 検知対象の液体は極めて微量でよい. この感度は, 反射型では往復で光量が増加するから, 0.02 の屈折率差に対し, 10 dB の光量差が得られ, プラントやパイプライン等の保守用に用いる場合に通常問題となる雨滴や地下水の影響を受けないセンサを容易に構成することができる. 光ファイバフォルトロケータを改造した装置により, 各対象点毎の監視が可能であることを示し, この試作実験からの試算では, 17 個のセンサを有する 10 km の区間を監視可能であることを明らかにした. もちろん漏洩監視システムとしては, 10 km の区間で 17 点という監視点は必ずしも十分大きなものといえず, 今後改良する必要があるが, 現実の配管の漏洩箇所は, 国内の製油プラントでの例を見ると 85% までがフランジ部やバルブ部等で発生しているといわれる⁴⁾ことから, ここで述べたプリズム式の局所検出方式でも実用性は高いと考えられる.

謝辞 本研究の実施に当り御協力いただいた日本電気航空宇宙システム(株)辻敏尚氏に感謝します.

参 考 文 献

- 1) 田中: オイルリーク検知器のタンクパイプラインへの応用, 計装, **23-8**, 23/27 (1980)
- 2) R. J. Baunbick and J. Alexander: Fiber Optics Sense Process Variables, Control Engineering, **75/77** March (1980)
- 3) Y. Ueno and M. Shimizu: Optical Fiber Fault Location Method, Applied Optics, **15-6**, 1385/1388 (1976)
- 4) 島田耕司: タンク配管における漏洩検出技術, 配管技術, **25-5**, 103/111 (1983)