

半導体レーザを用いたSA1W形水検出センサの開発

田門立身^{*1)} 道古隆明^{*1)} 本村幸一^{*1)}
 藤井祥二^{*1)} 西原一寛^{*1)}

1. はじめに

我々の身のまわりには、酒類、飲料水、医薬品、食品等「水」を含む製品が数多く生産、販売されている。これらの製造時の検査工程においては、水および水分の検出に対する多大な需要がある。

従来、これらの用途に対しては「画像処理装置」「重量計」「水分計」などが使用されてきた。しかし、これらの製品は一般に高価であり、取扱いが複雑で耐環境性に乏しい。これらのことが、実際の生産ラインへの導入に際して障害となっており、止むを得ず人間が目視により検査しているケースが多々見受けられる。このような状況において、インラインで水および水分を検出できるセンサの登場が待ち望まれていた。

今回、我々は世界で初めて半導体レーザ（以下LDと記す）を用いて水の検出を可能にした「SA1W形水検出センサ」を開発した。以下にその概要を紹介する。

2. 開発の背景

前述したように水および水分検出に対しては多大な需要がある。具体的には、

- 1) 飲料水
 - ・ミネラルウォーター
 - ・ジュース
 - ・コーヒー
- 2) 酒類
 - ・ウイスキー
 - ・ビール
 - ・ワイン
 - ・日本酒
- 3) 食品
 - ・みりん、醤油等の調味料
 - ・漬物、納豆等のパック入り食品
 - ・アイスクリーム、ヨーグルト等のカップ入り食品
 - ・ラーメンスープ等の袋入り液体食品
 - ・ジャム等の袋入りゲル状食品

- ・ねりからし、練乳等のチューブ入りゲル状食品
- 4) 医薬品
 - ・座薬
 - ・目薬
 - ・点滴剤
 - ・滋養強壮剤等のアンプル入り製品
- 5) 化粧品
 - ・化粧水
 - ・香水
- 6) 洗面用具
 - ・ねり歯磨き
 - ・洗口液
- 7) 文房具
 - ・水溶性糊
 - ・水溶性インク
- 8) その他
 - ・紙おしぼり
 - ・液体洗剤
 - ・シャンプー

等があげられる。その水および水分検出に対する顧客ニーズを分析すると、

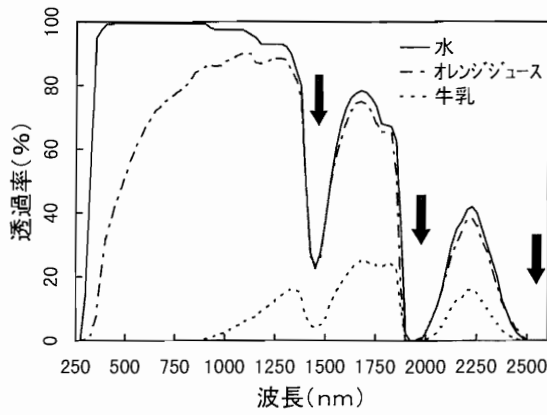
「水分の含有率の詳細な値までを知る必要はなく、水分を含有する物質の有無や、水溶液の有無を検出するだけでよい。何か安上がりで簡単な方法は無いだろうか？」という要求が非常に多い。

これらの用途には、光電センサ、近接センサ、超音波センサなどの既存の汎用センサを用いて対応することが試みられている。しかし、簡単な設置方法で確実な検出を行うことは非常に困難である。

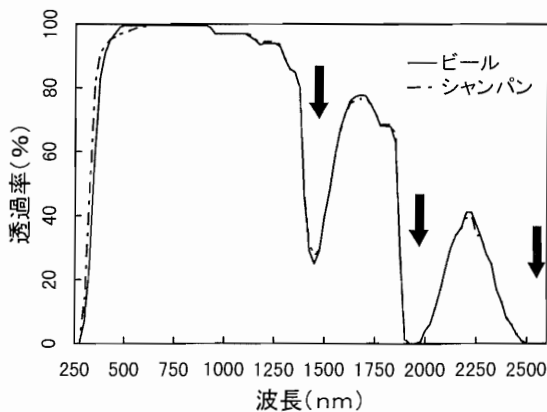
以上の背景のもと、画像処理装置、重量計、水分計等よりも安価で使いやすく、しかも光電センサ、近接センサ、超音波センサ等よりも遙かに確実に検出することを目的にSA1W形を開発した。

SA1W形は、従来から制御機器業界で使用されている汎用光電センサとは全く異なり、マルチメディアネットワーク対応の光ファイバ通信で用いられるデバイスを応用したものであり、水分子に吸収される波長の半導体レーザを光源に用いた世界初の水検出センサである。

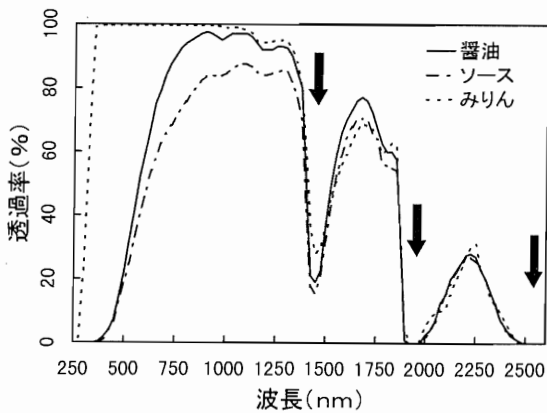
*1) 研究開発部



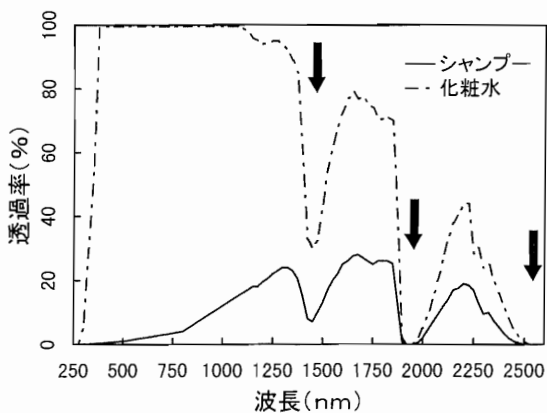
(a) 飲料水



(b) 酒類



(c) 調味料



(d) 化粧水、シャンプー

図1 水、水溶液の吸収スペクトル測定例

3. SA1W形における水検出の原理

3.1 水、水溶液の光の吸収スペクトル

物質にはそれぞれ物質固有の吸収スペクトルがあり、特定の波長の光を吸収する¹⁾。図1(a)~(d)に水および水溶液の光吸収スペクトルの測定結果を示す。これらは、分光光度計により、光の透過率の波長特性をサンプルの光路長5mm、波長250~2600nmの範囲で測定した結果である。(a)は飲料水をサンプルとした場合である。水、オレンジジュース、牛乳のいずれにも、図中に矢印で示したように、1500、2000、2500nm近傍に吸収スペクトルのピークが存在する。(b)の酒類、(c)の調味料、(d)の化粧水、シャンプーのいずれにも、同様に吸収スペクトルのピークが存在する。

3.2 水分子の光吸収

水および水溶液において、共通した特定の波長に吸収のピークが現れる理由について以下に述べる。

3.2.1 分子のエネルギー状態

分子の定常状態のエネルギーは数多くあるが、近似的には電子の運動エネルギー、分子の振動エネルギー、分子の回転エネルギーの和として表すことができる²⁾。しかし、それらは、電子の運動エネルギー \gg 分子の振動エネルギー \gg 分子の回転エネルギーのような関係にあるので、分子中の電子の運動、分子の振動、分子の回転は互いに相互作用せず、別個に取扱うことができる。

3.2.2 分子振動のエネルギー状態と光吸収

分子振動のエネルギー状態における励起と緩和の様子を図2(a)、(b)に示す。通常、分子振動のエネルギー状態は基底状態にある。基底状態にある分子に基底状態と励起状態のエネルギー差 ΔE に一致したエネルギーを持つ光、すなわち

$\Delta E = h\nu$ (h : プランク定数, ν : 光の周波数) を満足する周波数(波長)の光を照射すると、(a)に示すように分子は光のエネルギーを共鳴的に受け入れて、エネルギー状態が基底状態から励起状態へと遷移する。これが「分子の光吸収」である。光を吸収して励起状態に上げられた分子は、(b)のようにただちに熱としてエネルギーを放出して、安定な基底状態へと戻る。これを緩和という。定常的に光が照射される場合には、分子はこの励起と緩和を繰り返す。

3.2.3 水分子の光吸収

前述の基底状態と励起状態のエネルギー差は、分子の種類により異なるため、それぞれの分子、すなわち物質に固有の吸収スペクトルのピークが現れる。また、この

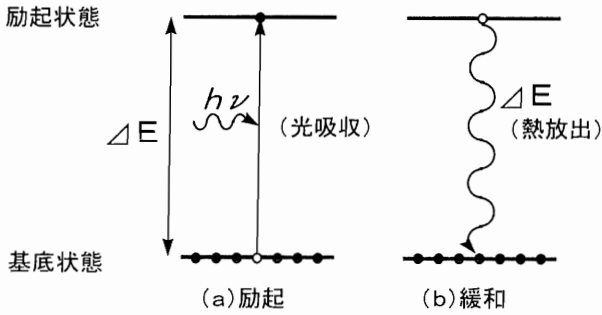


図2 励起と緩和

基底状態と励起状態のエネルギー差に相当する光の波長は赤外領域である^④。この波長領域の光を物質に照射した場合、分子の振動だけでなく回転にも影響を与える。しかし、前述したように分子の振動エネルギー \gg 分子の回転エネルギーであるため、近似的に、分子の回転については無視できる。

したがって、水および水溶液では、水分子の振動エネルギー差に共鳴した赤外領域の波長において、吸収のピークが現れる。

3.3 SA1W形の検出原理

従来の光電センサとSA1W形の比較を図3(a)、(b)に示す。光電センサの場合は、水の分子振動エネルギーと無関係な、すなわち水分子の吸収ピークに一致していない波長の光を利用している。そのため、水溶液に対する透過光量は、図3(a)に示すように、水溶液の色や成分に依存しており、安定した検出は困難である。

これに対し、SA1W形は、水分子の振動エネルギーと共鳴する、すなわち水分子の吸収ピークと一致した波長の光を利用している。したがって、図3(b)に示すように、物質の構造に固有の物理現象を用いているため、色や成分に依存せず、すべての水溶液を安定して検出することが可能である。

なお、SA1W形では、光源としてLDを用い、検出体を透過または反射した光をフォトダイオード（以下PDと記す）で受光する。

4. 構成

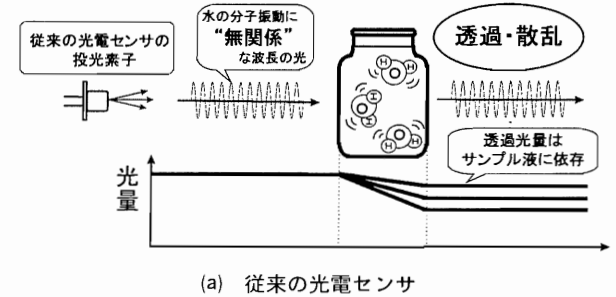
4.1 回路系

図4にSA1W形の回路構成を示す。レーザー駆動回路に接続されたLDから変調された赤外パルス光が投光され、PDで受光される。PDで受光された光信号は電圧信号に変換され、増幅回路、H.P.F（ハイパスフィルタ）、感度調整回路を介してコンパレータ回路に入力される。

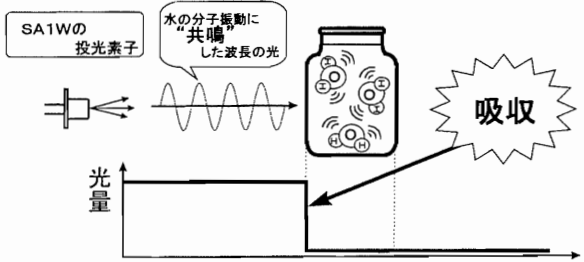
赤外光が水に吸収されると、PDで受光される光信号レベルが極端に減少してしきい値を下まわり、制御出力

がON（ライトオン時）する。

出力のON/OFFに応じて動作表示回路に接続された黄色LEDが点灯/消灯する。受光信号レベルに応じて安定レベル表示回路に接続された緑色LEDが点灯/消灯する。また、検出用スポットマーカ用の赤色光は、LED駆動回路に接続された赤色LEDから投光される。



(a) 従来の光電センサ



(b) SA1W形水検出センサ

図3 SA1W形水検出センサの検出原理

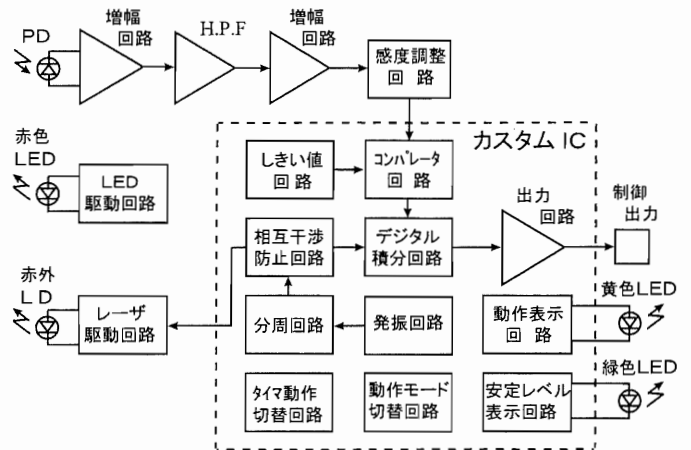


図4 回路構成

4.2 機構系

SA1W形の構造図を図5に示す。今回製品開発にあたって構造面で考慮したポイントは

- 1) 光ファイバユニットの構成
- 2) 操作性の向上
- 3) 組立て易さ
- 4) 機能としてのデザイン

についてである。以下項目別に説明する。

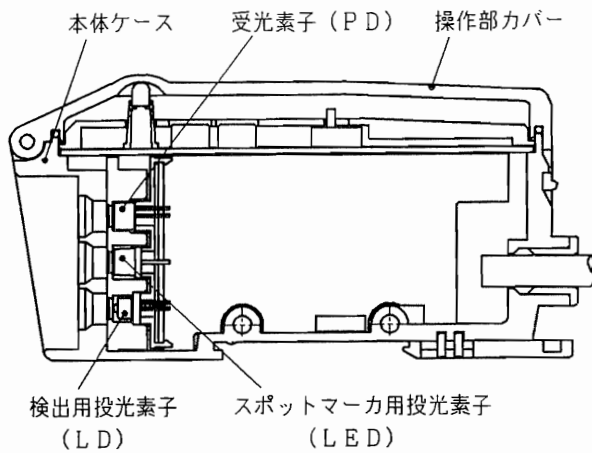


図5 SA1W形の構造図

4. 2. 1 光ファイバユニットの構成

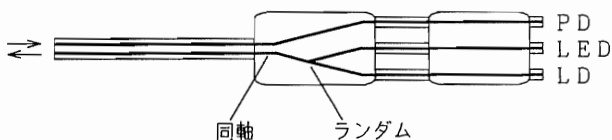
今回は、スペースの狭い場所にも容易に設置できる光ファイバ方式を採用した。その光ファイバユニットの構成を図6に示す。

反射形においては、検出用投光LDとスポットマーカ用投光LEDからの素線束をランダムに編み、その束の周りに同軸状に受光素子へつながる素線を配置した。

透過形においては、検出用投光LDに結合されたファイバの周りに、スポットマーカ用投光LEDからの素線を同軸状に配置した投光部を構成した。

この構成にすることで、検出ポイントが視認できるだけでなく、透過形においては光軸調整が容易になった。

・反射形



・透過形

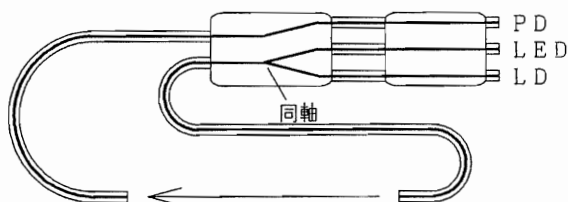


図6 ファイバユニット構成図

4. 2. 2 操作性の向上

製品の上面全てを操作面とし、大きくて見やすい操作部とした。また、製品のDINレールへの取付け、ファイバユニットの着脱、操作部カバーの開閉をいずれもワンタッチで簡単に操作できるユーザフレンドリな構造とした。

4. 2. 3 組立て易さ

図7に示すとおり、今回の組立て方法は光学キットにプリント基板を組付け、この組付けた光学ユニットを本体ケースに挿入し、操作部カバーで蓋をするものである。この方法であると、光学ユニットの組立て段階で電気的・光学的スペックに対する検査を行うことができ、最終組立て後の修正工数を減少させることが可能である。

この結果、組立工数を短縮するだけでなく、信頼性の高い製品を提供することが可能となった。

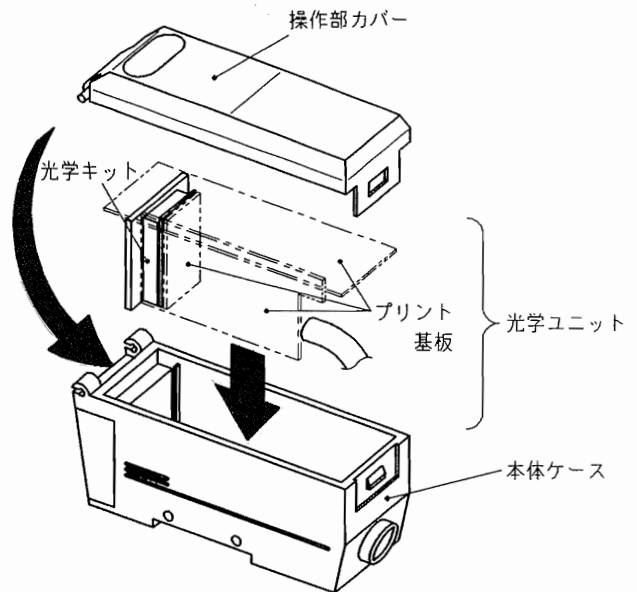


図7 組立て図

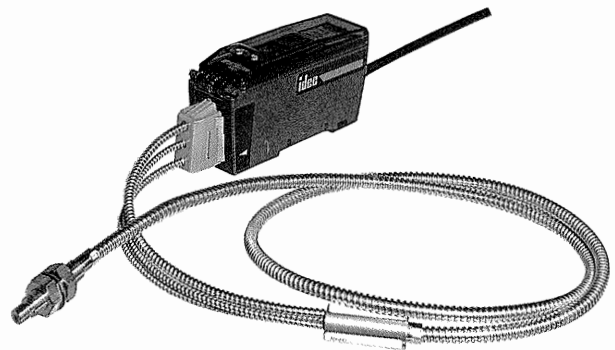


図8 SA1W形水検出センサの外観図

4. 2. 4 機能としてのデザイン

最近、工業製品においてもデザインの重要性が増しており、デザイン自体が機能のひとつだと考えられる傾向が強くなってきた。それはデザインがその製品のイメージを与え、印象深い形は自然と人々の記憶に刻み込まれるからである。

今回SA1W形水検出センサにおいてデザイン面で考慮したポイントを列記する。

- ・本体色は黒で、表面には梨地処理を行い重厚感を出す。
- ・当社のセンサでは初めての流線型の形状を採用し、また側面にはラインを刻み込み、高速感を出す。
- ・小物部品は、ダークグレー色でアクセントをつけ高密度感を出す。
- ・操作部のパネル色はアイデックブルーを採用し、側面にはアイデックロゴの銘板を貼付け、アイデックらしさを出す。

5. 性能仕様と特長

5.1 特長

SA1W形の仕様を表1に、外形寸法図を図9に示す。アンプユニットの機種構成はNPN出力タイプとPNP出力タイプの2機種である。

ファイバユニットの機種構成は透過形および反射形の2機種である。透過形ファイバユニットの定格動作距離は100mmであるが、別売のレンズアタッチメントを取付けることにより、定格動作距離を800mmまで延ばす事ができる。

SA1W形の特長としては以下のことがあげられる。

表1 仕様

(a) アンプユニット

項目	形番	SA1W-FN3F	SA1W-FP3F
検出体		水または水分を含む物	
電源電圧		DC12~24V (使用電圧範囲: DC12~24V±10%)	
消費電流		100mA以下	
制御出力		NPNオープンコレクタ DC30V 100mAmax. 電圧降下 1.5V以下 短絡保護機能付	PNPオープンコレクタ DC30V 100mAmax. 電圧降下 1.5V以下 短絡保護機能付
動作形態		ライトオンまたはダークオン (動作モード切替スイッチにて選択)	
応答時間		0.5ms以下	
表示灯		動作表示 : 黄色LED 安定レベル表示: 緑色LED	
オフディレイタイム		40ms (オフディレイタイム選択スイッチにてタイム機能を入/切) ※1	
応差		20%以下 (反射形ファイバユニットSA9W-DD81において)	
感度調整		1回転ボリューム (粗調整用+微調整用)	
投光素子		検出用 : 赤外LD ※2 検出スポットマーカ用: 赤色LED	
受光素子		ホトダイオード	
使用周囲温度		0~+45℃ (ただし氷結しないこと)	
保存温度		-20~+70℃ (ただし氷結しないこと)	
使用周囲湿度		35~85%RH (ただし結露しないこと)	
使用周囲照度		太陽光10000lx以下、白熱ランプ3000lx以下 (受光面照度にて)	
絶縁抵抗		20MΩ以上 (DC500Vメガにて) (充電部-非充電部間)	
耐電圧		AC500V 1分間 (充電部-非充電部間)	
耐振動		耐久 10~55Hz 片振幅0.75mm X、Y、Z各方向2時間 (非通電時)	
耐衝撃		耐久 100m/s ² (約10G) X、Y、Z各方向5回 (非通電時)	
保護構造		IP66 (IEC Pub.529)	
接続方式		ケーブル引出し方式 (3芯ビニルキャブタイヤコード2m、0.2mm ² 、φ5.4mm)	
材質		本体ケース: PBT、操作カバー: PAR	
相互干渉防止		2台まで密着取付可能	
付属品		感度調整用ドライバ、製品取付金具	
外形寸法		28W×48H×94Dmm (外形寸法図参照)	
質量		約200g	

※1 オフディレイタイム時間の実力値は40~80ms。

※2 クラス1レーザを使用。

(b) ファイバユニット

項目	形番	SA9W-TS31	SA9W-DD81
検出方式		透過形	反射形
動作距離		100mm	30mm ※
材質		検出ヘッド: ステンレス ファイバ : ガラスファイバ 外装 : ステンレス-重山ラセン管	
使用周囲温度		-30~+80℃ (ただし氷結しないこと)	
使用周囲湿度		35~85%RH (ただし結露しないこと)	
許容曲げ半径		外装部R25以上	
質量		約200g	約100g

※動作距離は標準検出体 (50×50mm白面用紙) を使用した場合の値。

(c) レンズアタッチメント

項目	形番	SA9Z-F21
適合ファイバユニット形番		SA9W-TS31 (透過形ファイバユニット)
動作距離		800mm
材質		本体 : アルミ レンズ: 光学ガラス
使用周囲温度		-30~+80℃ (ただし氷結しないこと)
使用周囲湿度		35~85%RH (ただし結露しないこと)
質量		約2g

- ・水分子に吸収される波長の赤外LDを検出用投光素子に採用することにより、透明な水を検出可能。
- ・高出力LDにより、ビール瓶などの着色透明瓶内の液面レベルも検出可能。
- ・検出スポットマーカで検出エリアが容易に確認可能。
- ・狭いスペースにも取付け可能なファイバ方式。
- ・光源のレーザー出力はクラス1（IEC規格）であるため、本質的に目に安全。

5. 2 主な機能

次にSA1W形の主な機能について説明する。図10に操作パネル部を示す。①の動作表示灯により出力のON/OFFを表示し、②の安定レベル表示灯により受光信号レベルの余裕度を表示する。③、④に示すように粗調整用と微調整用の2つの1回転ポリウムにより感度調整を行う。多回転ポリウムのように何回転もポリウムを回す必要がないため、容易に調整を行うことができる。⑤の動作モード切替スイッチにより、ライトオンとダークオンの切替えが可能である。⑥のオフディレイタイム選択スイッチにより、出力に40msのオフディレイを与えることが可能である。

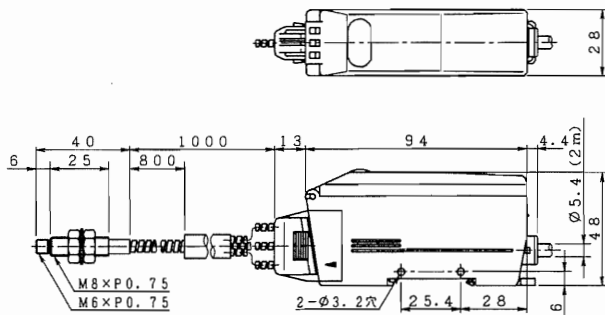


図9 外形寸法図

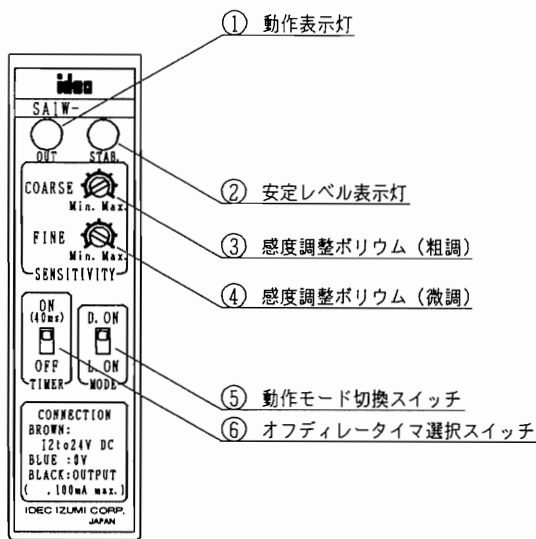


図10 操作パネル部

6. アプリケーション

6. 1 透過形ファイバユニットのアプリケーション
透過形ファイバユニットを用いたアプリケーションを以下に紹介する。

- ・飲料水、酒類などのレベル検出（図11参照）
- ・目薬の注入レベル確認（図12参照）
- ・点滴液のレベル検出（図13参照）
- ・ガラス管内の液面レベル検出（図14参照）

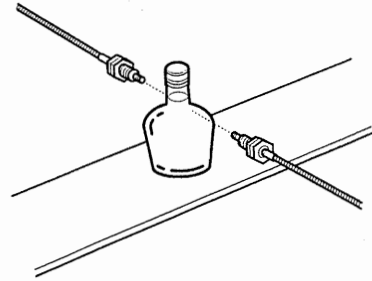


図11 飲料水、酒類などのレベル検出

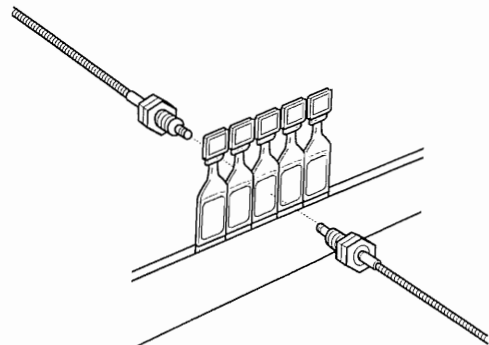


図12 目薬の注入レベル確認

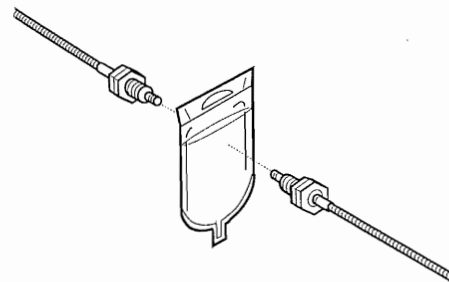


図13 点滴液のレベル検出

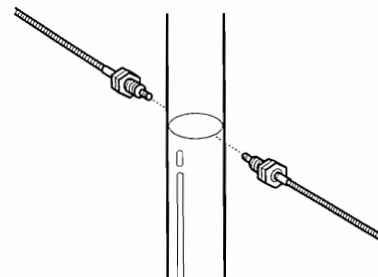


図14 ガラス管内の液面レベル検出

6. 2 反射形ファイバユニットのアプリケーション

反射形ファイバユニットを用いたアプリケーションを紹介する。

- ・紙おしぼりの水分有無検出 (図15参照)
- ・ゼリー (アイスクリーム、プリン等) の注入確認 (図16参照)
- ・チューブ式歯磨き粉の漏れ検出 (図17参照)
- ・水溶性糊の検出 (図18参照)

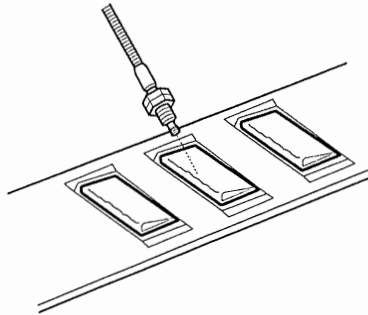


図15 紙おしぼりの水分有無検出

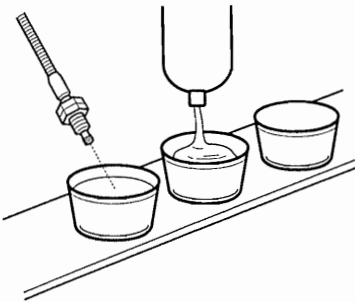


図16 ゼリー (アイスクリーム、プリン等) の注入確認

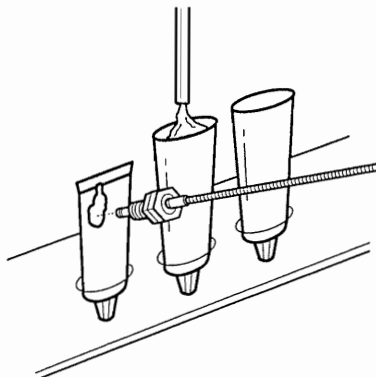


図17 チューブ式歯磨き粉の漏れ検出

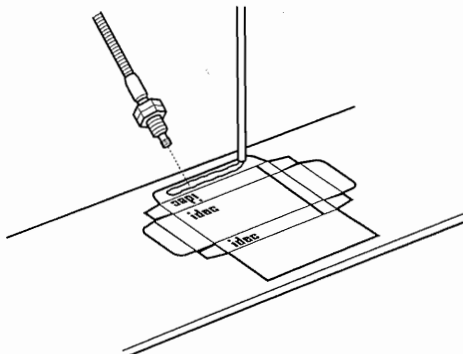


図18 水溶性糊の検出

7. 各種センサ・計測器との比較

7. 1 光電センサとの比較

図19に容器内の液面レベル検出におけるSA1W形と光電センサとの比較を示す。液体が透明な場合、通常の光電センサの投光ビームは透過してしまうため検出不可能である。通常の光電センサで透明な液体を検出するには、屈折率の差によるビームの偏角を利用している。ただし、その検出方法では、僅かな泡やラインのブレ、すなわち振動が生じて誤検出してしまう。SA1W形の場合、液体中の水分子による光吸収を利用しているため、表2に示すように泡やブレ、容器の形状や色等の影響を受けにくく、安定した検出が可能である。

通常の光電センサ

SA1W形

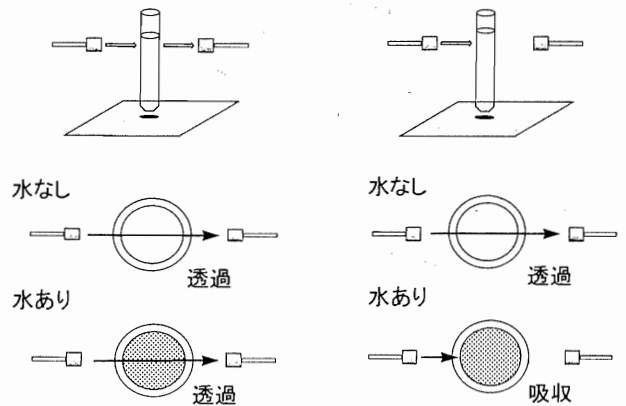


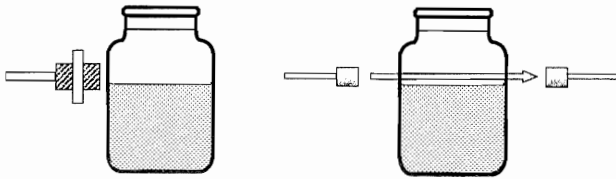
図19 光電センサとの比較

表2 光電センサとの比較表

	光電センサ (透過形)	SA1W形 (透過形)
泡・ブレの影響 受ける	×	○ 受けにくい
容器の 形状・色 の影響 受ける	×	○ 受けにくい

7. 2 近接センサとの比較

図20に容器内の液面レベル検出におけるSA1W形と静電容量形近接センサとの比較を示す。静電容量形近接センサの場合、液体の誘電率の変化を利用して液体の有無を検出している。したがって、表3に示すように検出距離が短い、検出スポット径が大きい、繰り返し精度が悪い、温度特性が悪い等の欠点があり、液面レベル検出にはあまり使われてない。SA1W形の場合、検出距離が長い、検出スポットが小さい等の利点があり、液面検出に適している。



静電容量形
近接センサ

SA1W形

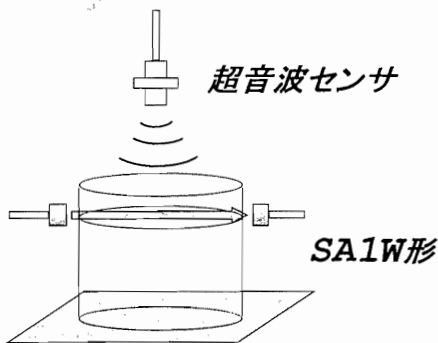
図20 近接センサとの比較

表3 近接センサとの比較表

	静電容量形 近接センサ	SA1W形 (透過形)
検出距離	✕ 短い	◎ 長い
検出 スポット径	✕ 大きい	◎ 小さい
繰り返し 精度	✕ 悪い	◎ 良い
温度特性	✕ 悪い	◎ 良い

7. 3 超音波センサとの比較

図21に容器内の液面レベル検出におけるSA1W形と超音波センサとの比較を示す。超音波センサの場合、表4に示すように応答速度が遅い。したがって、ラインスピードの速い飲料水のレベル検出等のアプリケーションでは、応答速度の速いSA1W形の方が適している。



超音波センサ

SA1W形

図21 超音波センサとの比較

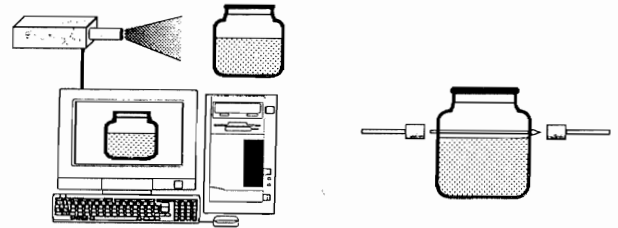
表4 超音波センサとの比較表

	超音波 センサ	SA1W形 (透過形)
応答速度	✕ 遅い	◎ 速い
泡の影響	✕ 受ける	◎ 受けにくい

7. 4 画像処理装置との比較

図22に容器内の液面レベル検出におけるSA1W形と画像処理装置との比較を示す。画像処理装置の場合、表5

5に示すように応答速度が遅い。したがって、ラインスピードの速い飲料水のレベル検出等のアプリケーションにおいては、SA1W形の方が適している。



画像処理装置

SA1W形

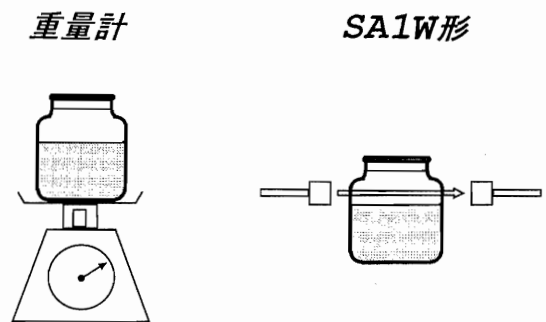
図22 画像処理装置との比較

表5 画像処理装置との比較表

	画像処理 装置	SA1W形 (透過形)
コスト	✕ 高い	◎ 安い
応答速度	✕ 遅い	◎ 速い
容器の 形状、色 の影響	✕ 受ける	◎ 受けにくい
取付け スペース	✕ 大きい	◎ 小さい
操作性	✕ 難しい	◎ 簡単

7. 5 重量計との比較

図23に容器内の液面レベル検出におけるSA1W形と



重量計

SA1W形

図23 重量計との比較

表6 重量計との比較表

	重量計	SA1W形 (透過形)
コスト	✕ 高い	◎ 安い
容器底面 の厚みの 影響	✕ 受ける	◎ 受けない
取付け スペース	✕ 大きい	◎ 小さい
操作性	✕ 難しい	◎ 簡単

重量計との比較を示す。断面の形状にばらつきのある成形された容器に同じ量の液体を充填しても、液面レベルに差が生じてしまう。充填された液量を測定する場合には重量計が適している。しかし、見た目の液量、つまり液面レベルを検出するのであれば、表6に示すように、重量計では不可能であり、SA1W形の方が適している。

7.6 水分計との比較

図24に検出物体に水分が含まれているかどうかを調べる場合の水分計との比較を示す。紙おしぼりに何パーセントの水分が含まれているかを調べるには、水分計が適している。しかし、紙おしぼりの水分の有無のみを検出をするのであれば、表7に示すように、コストが安く、取扱い易いSA1W形の方が適している。

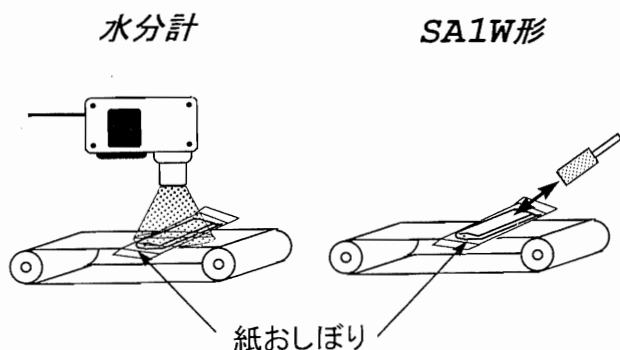


図24 水分計との比較

表7 水分計との比較表

	水分計	SA1W形 (透過形)
コスト	✗ 高い	◎ 安い
取付け スペース	✗ 大きい	◎ 小さい
操作性	✗ 難しい	◎ 簡単

8. 使用に際しての留意点

SA1W形を使用するにあたり特に留意すべき点について述べる。

- 反射形ファイバユニットを取付ける際、図25(a)のように、ファイバ端面からの直接反射光による誤検出を避けるため、光軸が検出体表面の鉛直方向に対して約20°傾くよう取付ける。ただし、検出体表面が拡散面（光沢のない面）の場合は、必ずしもセンサを傾けて取付ける必要はない。
- (b)に示すように、検出体の移動方向に対してファイバを傾ける方向が直角になるよう取付ける。
- 検出体の表面が光沢面で角度変動が大きい場合は、角

度変動の影響をある程度軽減させるため、傾斜角度をより大きくする。

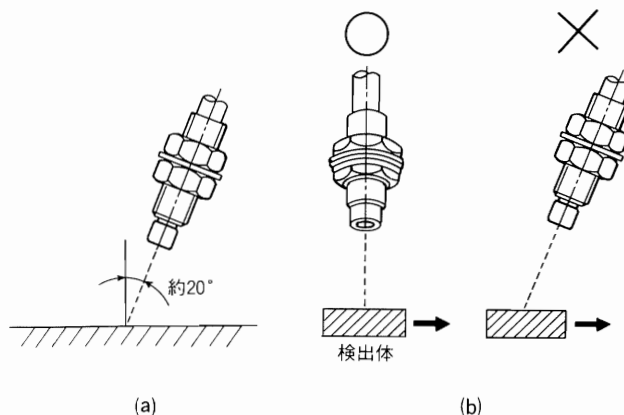


図25 反射形ファイバユニットの取付け方

9. おわりに

以上述べてきたように、SA1W形は水に吸収される波長の光を利用した世界初の「水検出センサ」であり、従来非常に困難であった透明な水を非接触で極めて簡単に検出することや、水溶液のみならず糊や食品等の水分を含む製品を確実に検出することを可能にした画期的な製品である。このようなアプリケーションに対して、今後ますますSA1W形の需要は増えていくものと確信している。

現在のSA1W形はファイバ方式という一つの形態にすぎず、検出用途に応じて、例えばレンズタイプなど別のスタイルの要求がでてくると思われる。今後は、さらに多様なニーズに対応できるようバリエーションを展開し、ますますSA1W形の適用範囲が拡大されていくよう開発を進めていく所存である。

謝辞

最後に、開発を進めるに当たり、ご支援頂いた当社品質保証センター関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Robert M.Silverstein, G. Clayton Bassler : 有機化合物のスペクトルによる同定法, 第2版, (株)東京化学同人, 1975年, P. 65-66
- (2) 田中誠之, 寺前紀夫 : 赤外分光法, 初版, 共立出版(株), 1993年, P. 7-9
- (3) 大木道則 : 赤外線スペクトル, 初版, (株)東京大学出版会, 1967年, P. 1-5