

半導体レーザーを用いた赤外吸収による H₂O センシング技術の開発 ()

和泉電気㈱ 本村 幸一、田門 立身、稲田 宏治、西原 一寛、藤田 俊弘

Development of H₂O sensing technology by infrared absorption using laser diode (I)

Koichi Motomura, Tatsumi Tamon, Koji Inada, Ikkan Nishihara, and Toshihiro Fujita

IDEC IZUMI Corporation

Abstract: Infrared spectrophotometer is used in many cases for the detection of the water. In conventional infrared spectrophotometers, incandescent lamps are used as light source and components such as grating, prism and filter are being used. Therefore, the device is large, slow in response, expensive and difficult to use. To improve these problems, we paid close attention to the absorption spectrum of the molecule of water, and developed a water detection sensor which light source is a laser diode to realize non-contact water detection in factory lines.

In this paper, we will report the principle and the key technologies of this newly developed sensor.

1. はじめに

現在、F A (Factory Automation)を始めとした産業分野においては、非常に多くのセンサが使われており、その検出対象に応じて、光、音、電界、磁界などの媒体により、何らかの物理量の変化を検出に用いている。

そのなかでも光によるセンシングは応用範囲が広く、またセンサ自体の形態も非常に多彩であり、われわれもこれまでに、物体の有無を検出する光電センサ、物体までの距離を検出するレーザー変位計、物体の色を検出するカラーセンサなど、数々のセンサを開発してきた。^[1-10]

実際、各種の用途に応じた最適なセンサがあれば理想であるが、現実にはすべての検出用途に必ず適したセンサが存在するわけではない。その一つの例が非接触での水および水を含む物質の検出である。ここでは、液体としての水のみならず水分を含む物質に対しても水と記載することとする。

従来、光を用いて水を非接触で検出するには、簡単な光電センサを配置上の工夫を行い利用す

るか、あるいは分光光度計や水分計のように高価で複雑な機器を使用することが多かった。詳しくは後述するが、特に分光光度計や水分計は水分量を精密に測定することはできるが、構造上インラインでの使用は困難であり、水の有無のみを検出したい場合には適当ではない。すなわち従来は、光を用いて非接触で水の有無検出を最適かつ容易に実現できるセンサは存在していない。

一方、高度情報化社会の時代が到来し、インターネットの普及に見られるように、大容量、高速、長距離のデータ通信の必要性から、光ファイバ通信関連の技術は格段の発展を遂げた。光ファイバ通信では、一般に、1300nm 帯や1550nm 帯の発光ダイオード(以下 LED)や半導体レーザー(以下 LD)が使われており、これは伝送路となるガラスファイバの伝送損失がそれらの帯域で 0.5dB/km 以下と非常に小さいことに起因している。^[11]

今回われわれは、水の吸収スペクトルに着目し、光ファイバ通信の LD をセンシングに応

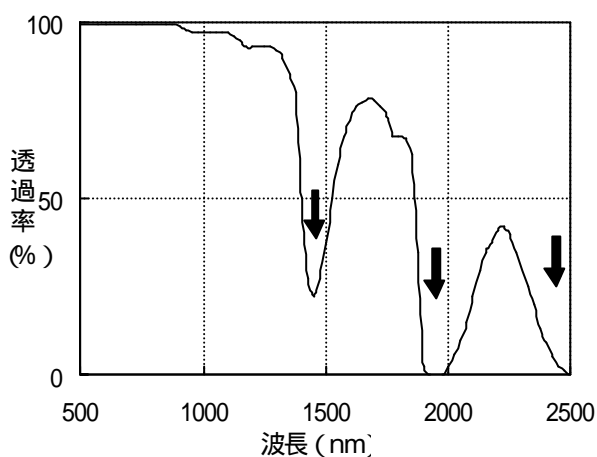


図1 水の光吸収スペクトル

用することで、水の有無を簡単に検出する新たな非接触センシング技術を確立した。本稿では、その原理と要素技術について報告する。

2. 光吸収による水検出の原理

2.1 水の赤外光吸収スペクトル

すべての物質には、それぞれ物質固有の吸収スペクトルがあり、特定波長の光を吸収することが知られている。

図1に水の吸収スペクトル測定例を示す。これは、分光光度計により、透過光路長 0.5mm、波長範囲 500 ~ 2500nm で測定した例である。図から、1450nm、1940nm、2500nm 近傍にそれぞれ吸収のピークが存在することがわかる。^[12]

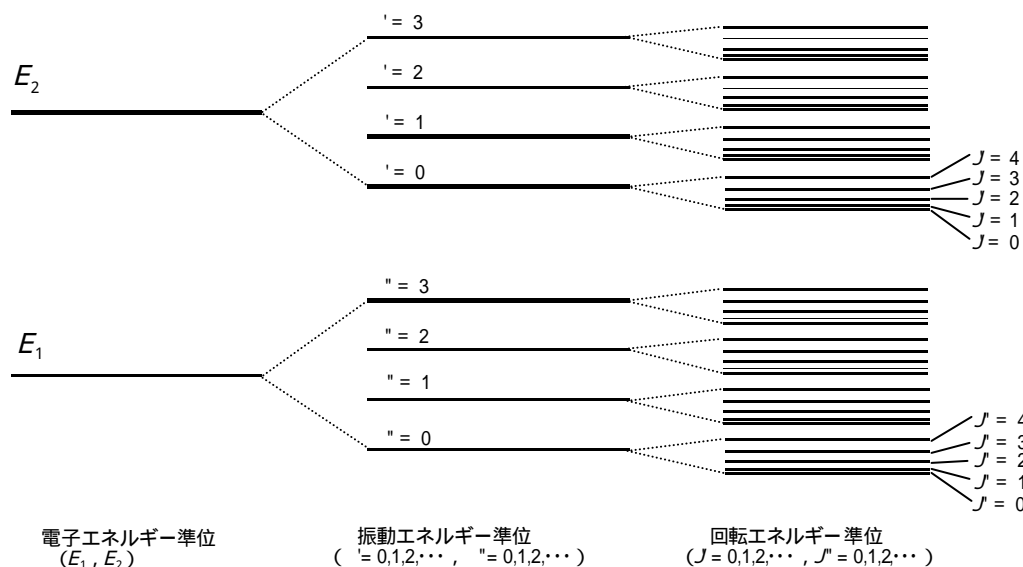


図2 分子のエネルギー

2.2 光吸収の原理

図1の水分子による光吸収が起こる理由について簡単に説明する。

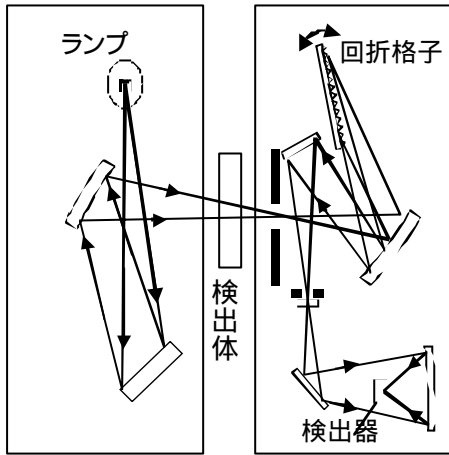
分子のエネルギー準位は、電子エネルギー準位、振動エネルギー準位、回転エネルギー準位からなる。図2に示すように、それぞれの電子エネルギー準位には振動エネルギー準位が、またその振動エネルギー準位には回転エネルギー準位が付随している。これら電子エネルギー準位、振動エネルギー準位、回転エネルギー準位の間隔(バンドギャップ)は大きく異なり、それぞれ遷移を引き起こすために必要な光の波長帯は、紫外可視領域、赤外領域、マイクロ波領域に相当する。従って、図1の測定結果に見られる3つの吸収ピークは、水分子の振動エネルギー準位のバンドギャップに起因している。^[13]

2.3 従来の水検出方式

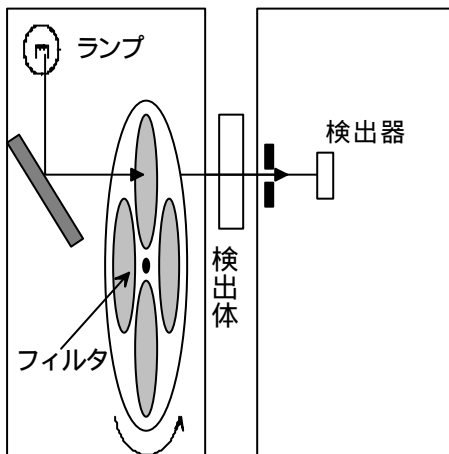
従来の水検出の方法として、図3(a)、(b)に示すような透過形の配置における分光光度計と水分計について説明する。これらの機器では、一般的に光源にはハロゲンランプの様に広帯域な光スペクトルを持つものが使われる。

図3(a)に示す分光光度計では、ランプからの光を測定対象に照射し、透過した光を回折格子

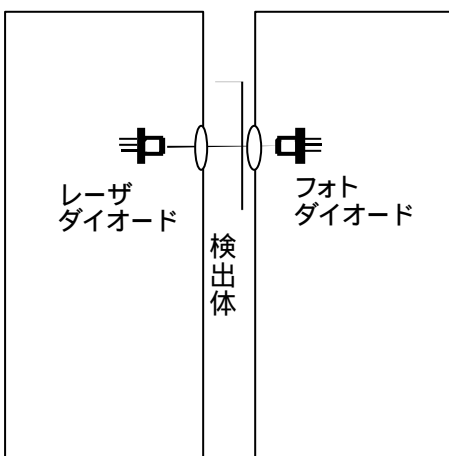
によって分光して吸収スペクトルを順次測定する。そのため、高い波長分解能をもつが、測定対象を透過した光を分光し順次吸収率を測定す



(a)分光光度計



(b)水分計



(c)水検出センサ

図3 各種の水検出方式の光学系比較

る光学系の構造上、非常に複雑でありリアルタイム性に乏しくインラインで水の有無を測定するには適していない。

一方、図3(b)に示す水分計は赤外スペクトルにおける水の吸収波長に対応した光学フィルタによって、光源から水に吸収される波長と吸収されない波長を複数取り出し、測定物に照射し透過光量を測定することで、吸収帯域と非吸収帯域の透過光量の比から吸光度を算出する。この吸光度は測定物の水分量に応じて変化するので、あらかじめ作成しておいた検量線をもとに、水分量を知ることができる。この方式では、選択した波長に限定して計測しているため、インラインでの水検出も可能であるが、光学フィルタを高速で切り換える機構が複雑である。また、あらかじめ検量線を作成しておけば水分量をかなり正確に測定する事ができるが、水の有無を検出する目的では、応答速度や価格面で最適であるとはいえない。

2.4 新しい水検出方式

われわれが想定している新たな水センシング方式の目的は、非接触で簡単に水の有無を検出することである。つまり、分光光度計や水分計のように広帯域のスペクトルや水の含有率まで測定するのではなく、水の有無のみを容易に検出する技術の確立である。

そこで、光ファイバ通信のLDならびにLEDの波長が、水の赤外線吸収スペクトルの1つの吸収帯に非常に近いことに着目し、光吸収をセンシングに応用することで、容易に非接触で水を検出することを可能にした。具体的には、水の吸収ピーク波長と一致する光源を用いると、水の有無により測定対象を透過する前後の光量に大きな差ができるので、その差を利用してきわめて容易に水の有無検出が可能となる。今回提案する水検出センサの構成を図3(c)に示す。

この方式の場合、光源の波長が1つの吸収スペクトルの波長帯に合致していればよく、LDやLEDなどの半導体発光素子が使用できる。ラン

プの寿命は数千時間であるが、半導体素子を使用することで光源の寿命は10万時間程度と長くでき、また複雑な光学系を必要としないため構造がきわめて簡単にできるという利点を持つ。

3. 水検出センサ

光を応用したセンサの光源としては、LD と LED が一般的であるが、水の有無検出という用途に限った場合、どちらがより適しているか検討する必要がある。

ここでは、実際に測定した各種の結果をもとに、光源としての性能比較を行う。

3.1 水検出センサ光源の検討

3.1.1 光源

水検出センサの光源に応用できる LD と LED はどちらも InGaAsP 系の - 族化合物半導体により構成されており、特に LD は、光ファイバ通信における Er (エルビウム) をドーピングした光ファイバ増幅器^[14]に使われるポンプ用の LD の波長が 1480nm であるため、その組成を変更することにより実現したものである。

3.1.2 LD と LED の比較

図 4 に、水の吸収スペクトルならびに LD と LED の発光スペクトルを示す。なお、LED のスペクトルがわかり易くなるように出力を約 7 倍に拡大し表記している。

両者ともにその発光波長のピークは、ほぼ水

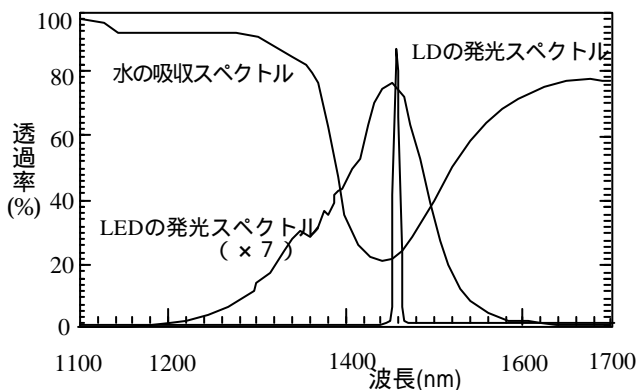


図 4 水の吸収スペクトルと LD、LED の発光スペクトル

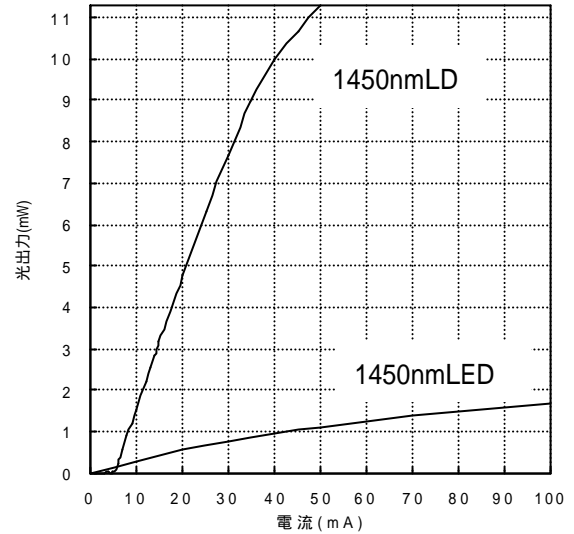


図 5 LD と LED の光出力 - 駆動電流特性

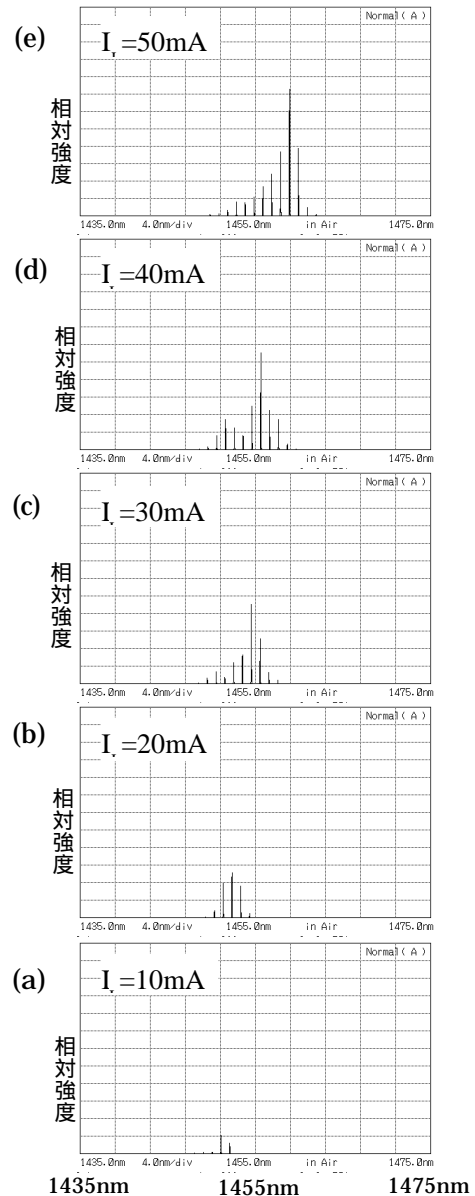


図 6 1450nmLD の発振スペクトル - 駆動電流特性

の吸収波長のピークと一致していることがわかる。ただし、発光スペクトル幅は大きく異なり、半値全幅で LD が 10nm 以下、LED が約 110nm である。

水の吸収スペクトルと比較すると、LD の発光スペクトルは水の吸収ピーク付近の帯域に含まれているのに対し、LED の発光スペクトルは大きく広がっており、その裾は 1200 ~ 1600nm まで及んでいる。このあたりでは水の光吸収ピークに比べ吸収率はかなり小さく、特に 1200 ~ 1350nm の帯域では約 80% 以上の透過率になっており、この帯域ではほとんどの光が透過してしまう。これは水の有無に依らず光が透過するので、水の有無検出能力が低くなることを指す。

また、図 5 に光出力 - 駆動電流特性を示す。図から明らかなように、同じ駆動電流であっても LD の方がはるかに高い光出力を得ることができる。例えば、どちらも 40mA で駆動した場合、LD は LED の約 10 倍の光出力となる。光出力が大きいと受光信号の S/N 比が大きくなり、より安定した検出が可能である。

図 6(a) ~ (e) には、駆動電流を変化した場合の LD の発光スペクトルを示す。LD の発光スペクトルは図の様に縦モードがマルチモードで発振しており、また駆動電流が 10mA から 50mA に変化することで、発光ピーク波長が約 8nm シフトしていることが観察できる。しかしながら、LD の発光スペクトルの包絡線の広がりも小さく、また駆動電流の変化による発光ピーク波長のシフト

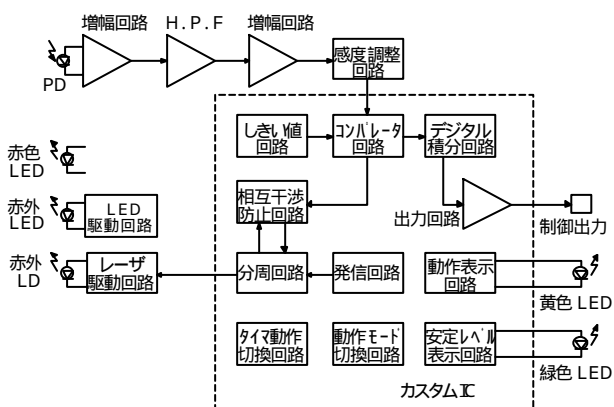


図7 水検出センサの回路構成

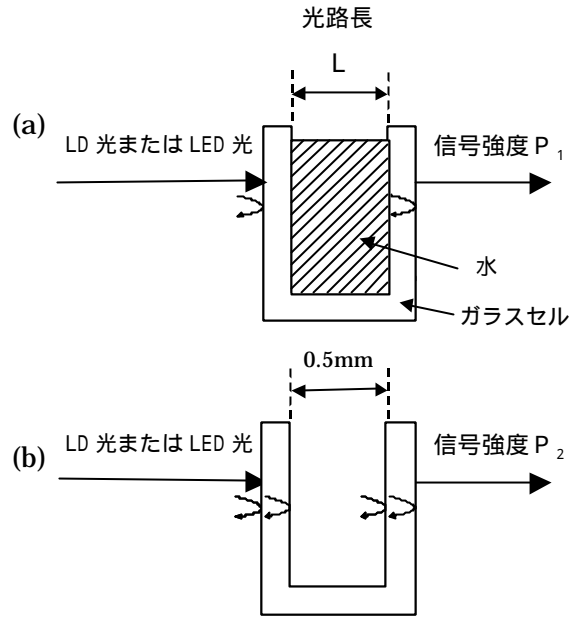


図 8 実験光学系の概略図

とも水の吸収帯域に対し十分に小さい変化であるため、水の検出に及ぼす影響は無視できると考えられる。

以上のことから、水検出センサの光源として使用する観点で評価すると、発光スペクトル幅、駆動電流、および光出力のいずれの点でも LED に比べ LD の方が適しているといえる。

3.2 水検出性能の確認

前項で検討した内容を実際に LD、LED 光源に用い図 7 の回路構成で水検出性能の測定を行った。^[15-18]

この構成において発振回路で生成された信号は分周回路を経てレーザ駆動回路により LD をパルス駆動している。その後フォトダイオード(以下 PD)での受光信号は増幅回路、ハイパスフィルタ、感度調整回路を経てコンパレータへ入力される。コンパレータはしきい値以上の受光信号があったときに信号を出力する。

図 8 に水検出性能評価のための実験光学系の概略図を、また図 9 に受光信号強度の透過光路長依存性を示す。L=0.5、1、2、5、10mm の 5 種類のガラスセルを用いて、実際に水を透過させた場合の信号強度の光路長依存性を測定した。なお、図 8 (b) に示すような 0.5mm のガラスセル

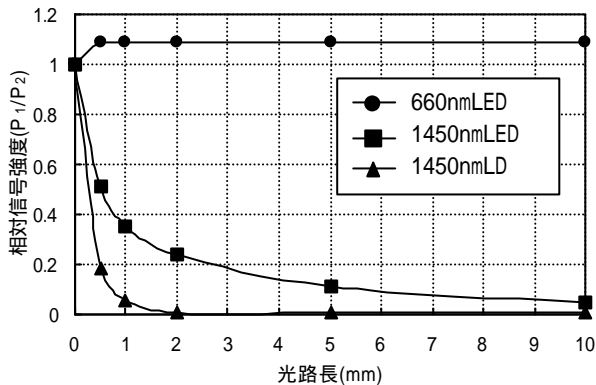


図9 信号強度の光路長依存性

に水がない場合の信号強度実測値を P_2 とし、図9に示す相対信号強度は、受光信号強度 P_1 を P_2 で正規化して P_1/P_2 として示している。

図9に示すように、波長660nmの赤色LEDを用いた場合、透過光路長が0.5mmから10mmまで長くなっても信号強度は全く変化しない。すなわち透明な水の検出を可視光で行うことは困難であることを示している。なお、この相対信号強度 P_1/P_2 が1.0を越えているのは、図8(a),(b)に比較して示すようにガラスセルに水が満たされることにより、セル内面でのガラスと水との屈折率差が極めて小さくなり、フレネル反射がほとんど無くなるためである。

一方、波長が1450nmであるLDとLEDは、光吸収の効果により、どちらも透過光路長が長くなるに従って信号強度は減少している。しかし、波長は同じでありながら、LDの方がLEDよりも透過光路長の変化に対する信号強度の変化が急激であることがわかる。また、光源がLDの場合、透過光路長が0.5mmで約80%以上吸収されているのに対し、LEDでは約50%程度しか吸収されていない。

以上のことから、光源の波長が1450nmであるLDを用いた方が、波長が1450nmであるLEDを用いるよりも水による吸収が大きく、水の有無による信号強度の変化が大きくなる。特に、LDは透過光路長が短い場合でも吸収が大きく、3.2項で検討した結果を実験からも裏付けることができた。[15-18]

4. おわりに

今回われわれは、水の吸収スペクトルに着目し、光ファイバ通信用のLDをセンシングに応用することで、水の有無を簡単に検出する、新たな非接触センシング技術を確立した。

世の中には水を含む製品は多数存在し、ここで報告した技術は応用の範囲が非常に広い。今後はさらにこの技術を展開し、社会に貢献できるように研究開発を進める所存である。

参考文献

- [1] 和泉電気株式会社：<http://www.izumi.com/>
- [2] 落合誠士、岡本炳人、西原一寛、近松良知、中原裕二：「レーザー測長システムの開発」、IDEC REVIEW、和泉電気株式会社、1988年、p.18~33
- [3] 岡本炳人：「レーザー測長システム」、センサ技術、1991年、p.95~98
- [4] 檀上和正：「1チップマイコンを搭載した超音波アナログ距離センサ」、自動化技術、1992年、p.67~71
- [6] 西原一寛、錦朋範：「MX1A/1B レーザ変位計について」、IDEC REVIEW、和泉電気株式会社、1991年、p.50~58
- [7] 庄司克博：「SA1D形アナログ距離センサの開発について」、ジョイテック、1991年、p.40~45
- [8] 飯塚一行、庄司克博、道古隆明、鷹尾健：「SA1L形測距光電スイッチの開発」、IDEC REVIEW、和泉電気株式会社、1994年、p.30~36
- [9] 野村光俊：「3色(赤・緑・青)LEDを搭載したカラーセンサ 使いやすさの追求」、ファクトリ・オートメーション、日本工業出版、1996年、p.33~37
- [10] 藤井祥二、本村幸一：「SA1M形レーザーマークセンサの開発」、IDEC REVIEW、和泉電気株式会社、1996年、p.54~61
- [11] 末松安晴、他編集委員会：「光ファイバ応用技術集成」、日経技術図書株式会社、1986年、p.119~140
- [12] 田中誠之、寺前紀夫：「赤外分光法」、共立出版、1993年、p.1~19
- [13] 尾崎幸洋、河田聡：「近赤外分光法」、日本分光学会、1998年、p.1~9、p.21~30
- [14] 木村康朗、中沢正隆：「エルビウム添加光ファイバ増幅器」、光通信技術の最新資料集、オプトロニクス社、1995年、p.147~196
- [15] 田門立身、道古隆明、本村幸一、藤井祥二、西原一寛：「半導体レーザーを用いたSA1W形水検出センサの開発」、IDEC REVIEW、和泉電気株式会社、1997年、p.71~79
- [16] 田門立身、西原一寛：「各社が注力する光センサー 半導体レーザーを用いたSA1W形水検出センサ」、オプトロニクス、1997年 No.183、p.129~132
- [17] 本村幸一：「非接触液面レベル検出の最新動向」、計測技術、日本工業出版、1999年
- [18] 下村剛弘、田門立身、稲田宏治、本村幸一、藤田俊弘：「半導体レーザーを用いた赤外吸収によるH2Oセンシング技術の開発()」、第16回センシングフォーラム論文集、1999年