携帯型マッピングシステム連動 車載式 LD 分光メタン検出装置

非会員 井関 孝弥 非会員 大喜多 祐司

非会員 小坪 宏則 非会員 田井 秀男 (東京ガス)

非会員 木村 潔 (アンリツ)

Vehicle mounted methane detector by means of LD spectroscopy combined with a mobile GIS

Takaya Iseki, Yuji Ookita, Hironori Kotsubo, and Hideo Tai (Tokyo Gas Co.)
Kiyoshi Kimura (Anritsu Co.)

We have developed a vehicle mounted methane detector by means of 1.65-micron LD (Laser Diode) spectroscopy combined with a mobile GIS (Geographic Information System). The detector is used for high-speed survey of gas leakage from underground pipelines.

The detection limit of the detector is about 70 ppb in optical path length of 1 meter with time constant of 1 second. This high sensitivity is achieved by second-harmonic detection of modulation frequency of the LD the center wavelength of which is stabilized on the center of an absorption line of methane.

The position of the vehicle is determined with accuracy of 1-3 meters by a vehicle positioning machine which is connected to a DGPS (Differential GPS, GPS: Global Positioning System) receiver and a fiber-optic gyroscope. Survey tracks and detection points are displayed and recorded on the mobile GIS which consists of information of pipeline network, streets, buildings and so on.

キーワード：半導体レーザ分光，メタン，ガス漏洩，GIS，DGPS

1. まえがき

都市ガスの主成分であるメタンを高速かつ高感度に検出することは、ガス設備の保安作業の効率化と事故防止に極めて効果的である。特に、微少漏洩を車両上でリアルタイムに検出する速度と感度があれば、埋設ガス管の漏洩検査の大幅な効率化が期待できる。しかし、FID（水素炎イオン化検出器，Flame Ionization Detector）など従来のガス検出器は、メタンだけを選択的に検出することはできない上、速度・感度とも不十分である。またガスクロマトグラフィーなどの分析的手法は分子種選択性と感度には優れているものの、リアルタイム測定ではない。メタンの吸収線に波長安定化したレーザ吸収分光によって初めて十分高速かつ高感度な検出が可能となる。

レーザ吸収分光による気体濃度計測は、(1)分子種選択性に優れ、(2)遠隔計測が可能であり、(3)高速かつ高感度という特長を有している。なかでも、通信用に開発された波長1~2 μm のLDを光源に用いた計測装置は、(4)駆動電流を変調することにより容易に発振波長を変調できる上、(5)LIF（レーザ誘起蛍光，Laser Induced Fluorescence）等の他

のレーザ計測装置に比べ廉価である。さらに、(6)軽量小型で振動に強くポータブル化が可能、(7)光ファイバを利用した遠隔からの計測が可能、(8)ファイバカップラーを組み合わせる複数の気体分子の同時他点計測が可能¹⁾である。

我々は、メタンの $2\nu_3$ 吸収帯に合った波長約1.65 μm のLD（半導体レーザ，Laser Diode）を光源とする「LD分光メタン検出装置」を開発^{2), 3)}して車載走行し、埋設ガス管からの微少漏洩を検出できることを確認した。さらに、測位精度1~3 mの車両測位装置と、埋設ガス管の情報を備えた携帯型マッピングシステム（Mobile GIS, GIS: Geographic Information System）を加え、「携帯型マッピングシステム連動車載式LD分光メタン検出装置」を開発した。この装置は、車両内で埋設ガス管からの微少漏洩を検出し、携帯型マッピングシステム画面上に走行軌跡と検出位置をリアルタイムに表示することができる。

2. メタン高感度検出の方法

2 μm 以下の波長域で、メタンの最も強い吸収帯は1.6~1.7 μm に位置する $2\nu_3$ 帯である。メタン高感度検出の光源に使用したLDは発振波長がこの波長域に設計された

図1 メタンの2v₃帯の吸収スペクトル
Fig. 1. Absorption spectrum of 2v₃ band of methane.

InGaAsP-DFB レーザ（分布帰還型レーザ，Distributed Feed Back Laser）であり，その代表的特性は，発振閾電流：15 mA，単一モード最大出力：7 mW，温度による波長変化率：0.07 nm / K，駆動電流による波長変化率：0.003 nm / mA である。

図1はFT-IR（フーリエ変換赤外分光法，Fourier-transform Infrared Spectroscopy）を用いて測定した，メタンの2v₃帯の吸収スペクトルである。最も吸収が強いR(6)線でも，常温大気圧下での吸収係数は高々0.5 atm⁻¹cm⁻¹である。これは，濃度1 ppm光路長1 mあたりの吸収率に換算するとわずか5×10⁻⁴にすぎない。このような微弱な吸収を高感度に測定するためにLDの発振周波数（発振波長）を変調し，ロックイン検波を行った。図2は光路長20 mmの吸収セルで測定した，メタンの2v₃帯のQ枝の吸収スペクトルである。試料はメタン（(a)：0.5%，(b)，(c)：1%）を含む窒素を1 atmで封入したものである。LDは駆動電流を変調して発振波長をf=5.35 MHzで変調し，さらに温度を変えて発振波長の中心を掃引した。(a)，(b)，(c)はそれぞれ，(a)全透過光強度，(b)基本波成分（f信号），(c)2倍高調波成分（2f信号）である。図からわかるように2f信号のオフセットは小さいが，f信号には大きなオフセットが生じている。これは，駆動電流変調によって波長変調と同時に強度変調が生じているためである。したがって，検出（濃度測定）にはf信号ではなく2f信号を用いる方が有利である。

実際のメタン高感度検出の際には，LDの後方射出光を参照メタンセル透過光のf信号から上述のオフセットを差し引いたものを誤差信号として，ヘルチエ素子により温度を制御し，発振波長の中心をメタンの吸収線の中心に安定化している。このとき，被測定領域透過光の2f信号はメタンによる吸収率（濃度と光路長の積）に比例するので，2f信号からメタン濃度を決定することができる。より正

図2 メタンの2v₃帯Q枝のスペクトル
(a) 全透過光強度
(b) 基本波成分（f信号）
(c) 第2高調波成分（2f信号）

Fig. 2. Spectra of Q branch of 2v₃ band of methane.
(a) Overall transmitted light intensity.
(b) Fundamental component. (f signal)
(c) Second harmonic component. (2f signal)

確な濃度が必要でかつ受光光量が吸収以外の要因により変動する恐れがある場合は，f信号で2f信号を規格化する。

なお，「LD分光メタン検出装置」は，LDを変更して波長を他の気体の吸収線にあわせることにより，環境計測⁴⁾などガス漏洩検査以外の用途にも利用できる。

3. LD分光メタン検出装置

図3は「携帯型マッピングシステム運動車載式LD分光メタン検出装置」のうち，メタン検出部に相当する「LD分光メタン検出装置」の構成図である。図に示すように，装置は光学部，光源部，制御・検量回路より構成されている。光源部より光ファイバで導かれたレーザ光は，光学部でメタンによる吸収をうけ，受光強度は制御・検量部へ送られる。光源部はLD，参照メタンセル，ヘルチエ素子からなり，発振波長は制御・検量部によって制御され，R(5)線（約1.65 μm）を中心にf=10 kHzで変調されている。

図4は，濃度×光路長積3.5 ppm-mのメタンを試料としたときの「LD分光メタン検出装置」の2f信号（信号積分時間1秒）である。実験では，光学部においた光路長3.5 mmの吸収セルにメタン100 ppmを含む窒素を注入（a），続いて純窒素でバージ（b）した。このときの出力信号レベルが約50 mV，ノイズレベルが約1 mVであるので，装置の検出限界（S/N=1）は，約0.07 ppm-m（70

図3 「LD分光メタン検出装置」構成
Fig. 3. Components of "Methane detector by means of LD spectroscopy."

ppb-m), 吸収率に換算すると約 10^{-6} となる。

図5は「LD分光メタン検出装置」のメタンの濃度(正確には濃度×光路長積)に対する2f信号とf信号との比(信号積分時間は1秒)をプロットしたものである。実験では、光学部に光路長1.76mのパイプを連結し、濃度の異なるメタンを含む窒素を注入した。実験により、約5000ppm-mまで感度に線形性があることが確認された。

図4 3.5ppm-mメタンの2f信号
Fig. 4. 2f signal of 3.5ppm-m methane.

図5 メタン濃度に対する2f信号/f信号
Fig. 5. 2f signal / f signal vs. methane concentration.

4. 車両上からの検出試験

次に、「LD分光メタン検出装置」を車載し、走行しながらの埋設ガス管からの微量漏洩の検出試験を行った。光学部は車両前方バンパー下に装着され、その光路長は76cmである。また、信号積分時間は0.1秒に設定した。これは車両の速度を36km/hとして1m走行する時間に相当する。図6は、実際に微量漏洩が確認されている現場におけるガス検出試験の一例である。図6(a)は従来の漏洩検査法である手押し式FIDにより発見された漏洩位置を示している。また、図6(b)は同じ現場を車載した「LD分光メタン検出装置」により検出試験を行った際の2f信号(メタン濃度に換算)と車両速度である。ここでは、ガス漏洩のないときをメタン濃度(大気中には約2ppmのメタンが存在する)をゼロ点にとっている。細い路地であったため10km/h程度のスピードではあるが、手押し式FIDと同じ地点(①~④)でメタンを検出し、車両上でも手押し式FIDと同等以上の検出性能を有することが確認された。なお、この現場には1927年敷設の老朽管が埋設されていたが、試験後速やかに新しい管と取り替えられた。

5. 車両測位装置

「LD分光メタン検出装置」を搭載した車両に測位装置を加えれば、ガス検出情報と同時に位置情報を得ることができる。ガス検出情報は進行方向に1m(信号積分時間0.1秒、車両速度36km/hの場合)の距離分解能を有するので、車両測位装置も同程度以上の測位精度を有することが望ましい。しかし、通常のカーナビゲーション等に用いられるGPS(Global Positioning System)では、測位精度は100m程度であり、マップマッチング(車両位置を道幅の大きい道路に限定する)によって精度の悪さを補っている。我々の車両測位装置は、キャリア位相DGPS(Differential GPS)を使用することによってマップマッチ

図6 車両上でのガス漏洩検出試験結果
(a) 漏洩地点 (1～4)
(b) 検出メタン濃度と車両速度

Fig. 6. Result of detection of gas leakage on a vehicle.
(a) Detection point. (1～4)
(b) Detected methane concentration with vehicle speed.

ングなしで1～3 mという高精度を実現した。

DGPS測位は、GPS衛星との距離から測位計算する点では単独GPS測位と同じであるが、衛星との距離が既知である基地局から移動局（車両）へ距離の補正値を送ることによって測位精度を上げている。DGPS測位では、移動局と基地局に共通な誤差要因は全て除去されるが、高精度化に最も寄与するのは選択利用性⁵⁾ (SA: Selective Availability) に起因する誤差の除去である。また、DGPS測位は(1)コード位相測位と(2)キャリア位相測位に分類される。これは、GPS衛星から受信した信号のコード (1.023 MHz) 位相を検知するか、キャリア (1.575 GHz) 位相まで検知するかによる。精度は(2)キャリア位相測位の方が高い。我々の車両測位装置には精度40cmのキャリア位相DGPS測位

の受信機 (Ashtech 製 GG12 GPS Receiver) を使用した。GPS衛星からの信号と基地局からの補正値が良好に受信できるとき、DGPS測位のみで正確な測位 (衛星航法) が可能である。

ビルの谷間や路地などGPS衛星からの信号が良好に受信できないとき、車両測位装置は光ファイバジャイロと車速パルスによって自走する (自立航法)。我々の使用した光ファイバジャイロ (日立電線製 HOPG-1) は高感度 (角速度検出感度 0.01 deg./秒) かつ高精度 (角速度直線性 ± 0.5%以下) なものであり、位置と方位の初期値が衛星航法のデータによって正しく設定できれば、500～1000 m 自立走行できる。

我々の車両測位装置は、衛星航法と自立航法の加重平均をとって車両の現在位置を決定している。ただし、自立航法での誤差が累積して、決定した位置がDGPS測位位置から閾値以上ずれたときには、現在位置 (自立航法の位置の初期値) をDGPS測位位置で初期化するようにしている。さらに、GPS衛星位置の関数である精度低下率¹¹⁾ (DOP: Dilution Of Precision) によってデータのマスキングを行い、精度の高いDGPS測位データのみを採用している。

6. 携帯型マッピングシステムとの連動

車載した「LD分光メタン検出装置」はガス管の漏洩検査のうち、ガス検出作業を大幅に効率化しうるものであった。図7に示す「携帯型マッピングシステム連動車載式LD分光メタン検出装置」は、ガス検出情報に位置情報を加えて携帯型マッピングシステム (Mobile GIS) と連動し、検査軌跡とガス検出位置を表示・記録することにより漏洩検査をさらに効率化するものである。我々の使用した携帯型マッピングシステム (東京ガス開発 TUMSYBOY¹²⁾) はガス管以外に道、建物などの情報を保有しており、漏洩位置を特定するのに非常に有用なものとなっている。

図8は実際に(a)公道、(b)漏洩試験場を走行したときの携

図7 「携帯型マッピングシステム連動車載式LD分光メタン検出装置」構成

Fig. 7. Components of "Vehicle mounted methane detector by means of LD spectroscopy combined with a mobile GIS."

図8 携帯型マッピングシステム上の検査軌跡と検出地点
(a) 公道 (b) 試験場

Fig. 8. Survey tracks and a detection point on a mobile GIS.
(a) Public road. (b) Test field.

携帯型マッピングシステム画面上に現れた検査軌跡およびガス検出位置である。画面描き換えの頻度は通常2~3秒毎であるが、車両測位装置は0.1秒毎の測位データを保有しており、ガスを検出した際は最短0.1秒間隔で検出マークを表示する。したがって、検出マークの表示に関する進行方向の分解能は約1 m (車両速度36 km/hの場合)である。図8(a)の検査軌跡から1~3 mの測位精度が実現され

ていることがわかる。これは、通常のカーナビゲーション等で正確に測位されない路地等の漏洩検査を行う際にも十分な測位精度である。また、図8(b)には、試験場に人為的に作り出した漏洩ポイントに、正しく検出マーク(X)が表示されている。

7. むすび

メタンの2v₃帯に合った波長約1.65 μmの半導体レーザを光源とする「LD分光メタン検出装置」を開発した。装置の検出限界は、信号積分時間1秒のとき、光路長1 mに対して約70 ppbであった。

「LD分光メタン検出装置」を車載し、埋設ガス管からの微小漏洩を検出することができた。車両上での検出性能は従来の手押し式FIDと同等以上であった。

さらに、DGPSを利用した車両測位装置を搭載し、携帯型マッピングシステムと連動させた。これにより、精度1~3 mで検査軌跡および検出地点を表示することができた。

(平成 9年 9月25日受付)

文献

- 1) H.Tai, K.Yamamoto, M.Uchi da, S.Osawa, and K.Uehara, Long-distance simultaneous detection of methane and acetylene by using diode lasers coupled with optical fibers, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 4 pp.804-807. (1992)
- 2) K.Uehara and H.Tai, Remote detection of Methane with a 1.66-μm diode laser, *Applied Optics*, 31 pp.809-814. (1992)
- 3) 田井秀男, 上原喜代治, 1.7 mm 半導体レーザによるメタンの遠隔検出, *レーザ研究* 19 p.889. (1991)
- 4) K.Uehara, H.Tai, and K.Kimura, Real-time monitoring of environmental methane and other gases with semiconductor lasers: A review, *Sensors and Actuators B* 38-39 pp.136-1400. (1997)
- 5) 高精度衛星測位システムに関する調査研究会, 高精度GPSの展望 (日刊工業新聞社), pp.7-8.

井関 孝弥

1970年9月23日生まれ。95年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程を修了。同年東京ガス(株)入社。半導体レーザを用いたメタン検出装置の研究開発に従事。現在、同社基礎技術研究所研究員。

大喜多 祐司

1970年8月5日生まれ。95年京都大学大学院工学研究科衛生工学専攻修士課程を修了。同年東京ガス（株）入社。携帯型マッピングシステム「TUMSYBOY」の開発に従事。現在、同社情報通信部マッピングセンターに所属。

小坪 宏則

1960年5月11日生まれ。87年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程修了。同年東京ガス（株）入社。90年から、同社情報通信部マッピングセンターに所属。以来、携帯型マッピングシステム「TUMSYBOY」の開発に従事。

田井 秀男

1958年9月22日生まれ。83年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程を修了。同年東京ガス（株）入社。レーザ計測技術の研究に従事。93年東京大学より博士号取得。現在、同社基礎技術研究所主幹研究員。

木村 潔

1949年2月23日生まれ。71年信州大学工学部通信工学科を卒業。同年アンリツ（株）入社。半導体レーザを用いたメタン検出装置の研究開発に従事。現在、同社研究所開発部員。