

半導体レーザーによる高感度メタン 濃度測定装置の開発

東京ガス(株)インフォメーションテクノロジー研究所

田井秀男

Development of High Sensitive Methane Detector using a Diode Laser

Hideo Tai

Tokyo Gas Co., Ltd.

Information Technology Research Institute

Abstract

High sensitive methane detector was developed using a room-temperature-operation 1.66- μm diode laser. The detection limit of the detector was 0.07ppm-m for a signal averaging time of 1 s. The detector was mounted on a vehicle for high speed survey of gas leakage. It is confirmed that it could be used even for small leakage from underground pipelines.

1. はじめに

都市ガスの主成分であるメタンを遠隔からリアルタイムで検出することは、ガス設備の保全作業の効率化や事故防止のために極めて効果的である。また、大気中のメタンの増加は地球温暖化の一要因ともいわれ、メタンの高感度遠隔検出は、地球上のメタン濃度の分布や時間変動を調べる上でも重要な手段となるであろう。メタンの検出装置として従来から用いられている水素炎イオン化検出器(FID)や接触燃焼式検出器等では、メタンだけを他のガスと区別して検出したり遠隔から検出することはできない。直進性と単色性に優れたレーザー光の吸収現象を利用することにより初めてこのような検出が可能となる。今回、軽量小型で機械振動にも強い半導体レーザーを光源として用いたポータブルなメタン濃度測定装置を開発し^{1)、2)}、車載走行試験を行ったので紹介する。

2. 半導体レーザー分光

レーザー吸収分光による気体濃度計測には、ガスクロ等の他の計測法に比べ、(1)気体分子種の選択性に優れ、(2)遠隔からの非接触・非破壊計測も可能であり、しかも(3)高感度で高速応答という特長を有している。

近年、通信用として開発された1~2 μm 帯の半導体レーザーを光源として用いれば、さらに、(4)軽量小型で振動にも強い操作性が飛躍的に向上し、(5)装置のポータブル化も可能となる等の利点が生じる。また(6)光ファイバーが利用できるため、遠隔からの計測や、ファイバーカップラーをうまく組み合わせての(7)複数の気体分子の同時他点計測等も可能³⁾となる。さらにLIF等のレーザー計測装置に比べ、(8)かなり廉価であるということも本計測装置の将来性が期待される要因の一つである。

今回我々が開発した装置はメタンの高感度計測用であるが、前述の通りレーザーの発振波長を変更することにより各種気体の計測装置とし

て利用することができる^{31)~51)}。表1は、この装置で計測可能な分子種の一例とその検出感度を示している。検出感度は、我々が実現した吸収率 10^{-6} に対応した数値で示している。

表1 半導体レーザー分光により計測可能な主な分子とその検出限界(吸収率 10^{-6})。

Molecule	Wavelength (μm)	Detection Limit (ppm-m)
CH ₄	1.651	0.07
O ₂	0.76	10.0
H ₂ O	1.365	0.006
CO	1.567	3.6
CO ₂	1.573	4.7
NH ₃	1.53	0.04
C ₂ H ₂	1.53	0.05
NO ₂	0.83	0.2

3. メタンの高感度測定

今回開発したメタン濃度測定装置についてその詳細を述べる。2 μm 以下の波長領域で、メタンの最も強い吸収帯は1.665 μm に中心をもつ2 ν_3 バンドである。この波長帯のInGaAsP-DFB半導体レーザーの代表的特性は、発振閾電流:約15mA、単一モード最大出力:約7mW、温度ならびに駆動電流による波長変化率:それぞれ約0.1nm/ $^{\circ}\text{C}$ 、0.001nm/mAである。

図1(a)は、この半導体レーザーの温度を変えて波長掃引して測定した、メタンの2 ν_3 バンドQ枝の吸収スペクトルである。Q枝の中ではQ(6)線が最も強いが、この線の大気圧での吸収係数は $0.4\text{atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$ であり、メタンの強い吸収がある3.3 μm (ν_3 バンド)の吸収線の約25分の1にすぎない。

このような微弱な吸収を感度よく測定するためには位相敏感検波を導入する必要がある。ここでは、周波数変調法を利用した。図1(b)と(c)は、電流を周波数 $f = 5.35\text{MHz}$ で変調したときの、Q枝の基本波検波信号(f 信号)と2倍波検波信号(2 f 信号)である。2 f 信号のオフセットは小さいが、 f 信号には強度変調に起

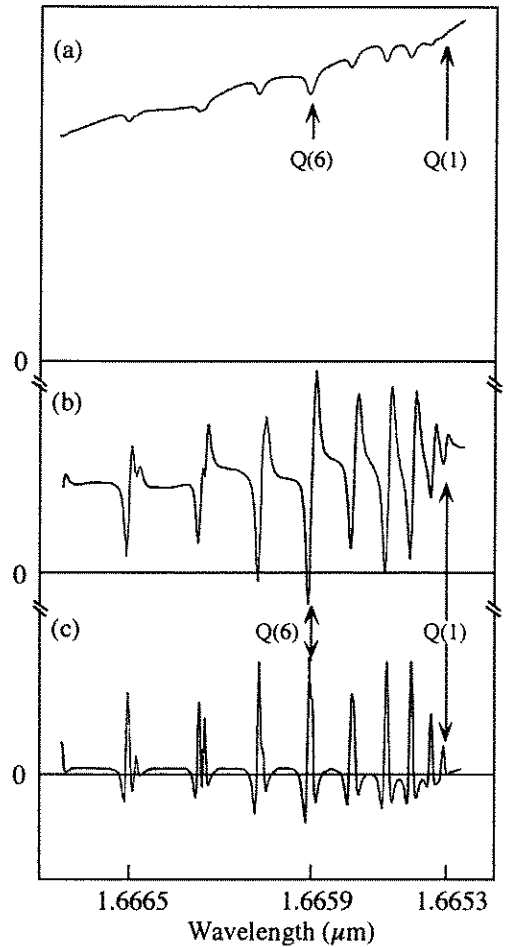


図1 メタンの2 ν_3 バンドQ枝の半導体レーザーにより測定されたスペクトル。(a)直接吸収信号、(b)5.35MHzの変調に対する1 f 信号、(c)同じく2 f 信号。

因する大きなオフセットが重なっている。そこで2 f 信号を検出に用いる方が有利であることがわかる。そしてレーザーの発振周波数を吸収線の中心と一致させておけば2 f 信号から実時間でメタンを検出することができる。そのためにはレーザー光の後方出射光を参照メタンセルに通し、その透過光の 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、ペルチエ素子により温度を制御しレーザーの発振周波数を吸収線の中心に安定化する。

このように吸収線に安定化したレーザー光を

被測定領域に向け射出し、その透過光を直接光検出器で受光し、その $2f$ 信号からメタン濃度を測定する。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には、レーザーの強度変調成分に対応する $1f$ 信号を同時に検出し、受光光量の規格化を行う。

4. メタン検出実験結果

図2は、光路長35mmの吸収セルに100ppmのメタンを流入させ、続いて窒素ガスでそれを追い出した時の $2f$ 信号である。この実験では、R(5)線に波長の合った $1.65\mu\text{m}$ のレーザーを周波数 $f=10\text{kHz}$ で変調している。この場合メタンの濃度は1mの光路長に換算すると 3.5ppm ($3.5\text{ppm}\cdot\text{m}$) となる。また、信号積分時間は1秒である。このときの出力信号レベルがおよそ 50mV 、そしてノイズレベルがおよそ 1mV であるので、検出限界は約 $0.07\text{ppm}\cdot\text{m}$ (SN比1の時) となる。これは吸収率に換算すると約 10^{-8} となる。

図3は、各種濃度のメタンに対する $2f$ 信号の出力の関係を調べたものである。 $500\text{ppm}\cdot\text{m}$ で一度プリアンプのゲインを切り替えている。図3より、およそ $5000\text{ppm}\cdot\text{m}$ まで線形な出力が得られることがわかる。

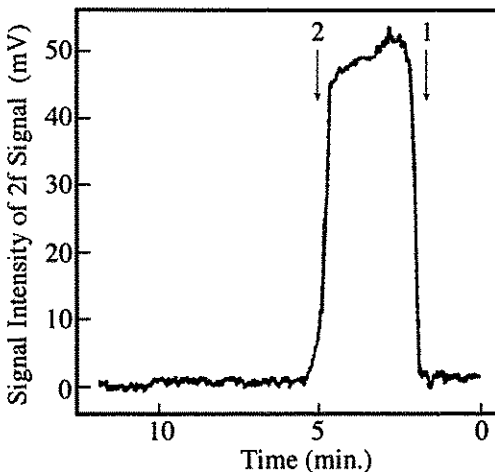


図2 3.5 ppm-m のメタンに対する $2f$ 信号。35mmの吸収セルに、1で100ppmのメタンを注入し、2で窒素ページした。信号積分時間は1秒である。

2f Signal (mV) v.s. Methane Concentration (ppm-m)

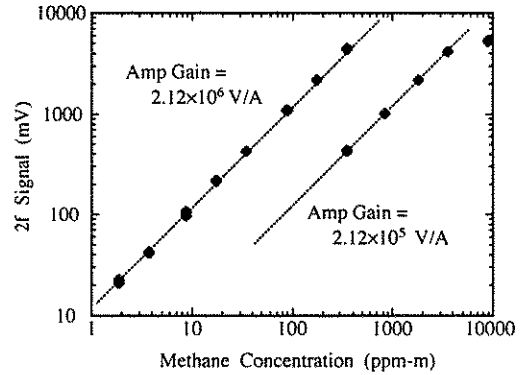


図3 各種メタン濃度に対する $2f$ 信号の出力電圧。1.75mの吸収セルに各種濃度のメタンと窒素を繰り返し置換して測定した。アンプ利得を $2.12 \times 10^6 \text{V/A}$ と $2.12 \times 10^5 \text{V/A}$ の2段階に切り替えた。

5. 車載走行メタン検出

このような原理に基づいたメタン濃度測定装置を車載し、埋設ガス管からの微少な漏洩メタンの走行検出実験を行った。車載装置の構成図を図4に示す。図4(a)の通り装置は検量部と光学部から構成される。検量部はレーザーモジュール、レーザー波長安定化回路、検出用位相敏感検波回路、出力表示回路により構成されている。検量部からのレーザー出力は光ファイバーにて光学部に導かれる。光学部は送光部と受光部から構成されており、それぞれ1mの光学ベンチの両端に固定されている。その光路長は76cmである。受光部には、光検出器からの信号を増幅するプリアンプが組み込まれている。プリアンプ出力はBNCケーブルにて検量部と接続されている。図4(b)の通り検量部は車両の後部座席に固定し、光学部は前方バンパー下部に取り付けた。さらに地表面直上の空気を光学部に効率よく導入するための簡易なダクトも作成した。

図5は実際に埋設管からの微少漏洩が確認されている現場における走行試験の一例である。図5(a)はFID調査により発見されたある

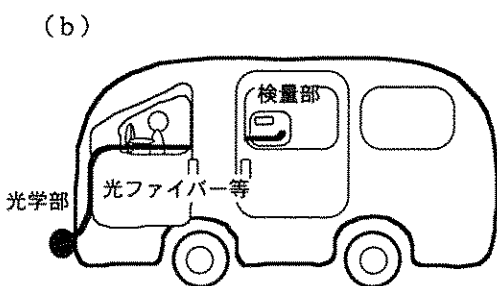
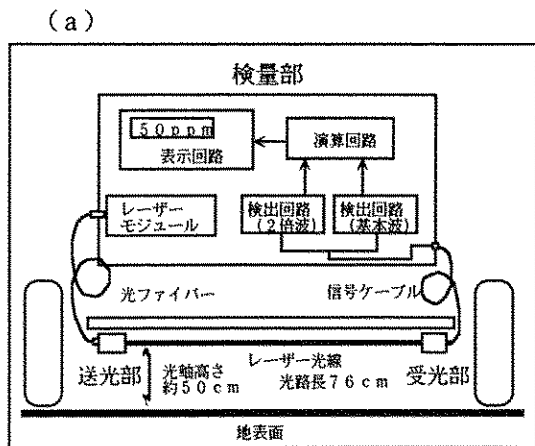


図4 車載式レーザーメタン検出装置の構成

(a) 詳細構成図、(b) 搭載位置

路地における微小漏洩位置を示している。150 m程度の区間に4カ所の漏洩が発見されている。図5 (b)はこの路地を車載式メタン検出装置により走行試験を行った際のメタン検出信号である。一方通行の細い路地であったため時速10 km程度のスピードではあるが、4カ所の漏洩箇所に対応する検出信号が確認された。なお、この現場には昭和2年敷設の老朽管が埋設されていたが、この後速やかに新しい管と取り替えられた。

この現場を含め既に数百kmで走行試験を行っており、FIDによる徒歩での漏洩調査と比較しても十分な漏洩検出能力を有していることが現在までに確認されている。今後さらにGPSと連動した自動漏洩位置表示システムを開発する等さらに操作性を上げ、実用化を目指していく予定である。

6. 終わりに

半導体レーザーを用いたメタン濃度測定装置を開発した。感度は約0.07ppm-mである。

直線性も5000ppm-m程度まで確認できた。

本装置を車載し、埋設ガス管からの漏洩メタ

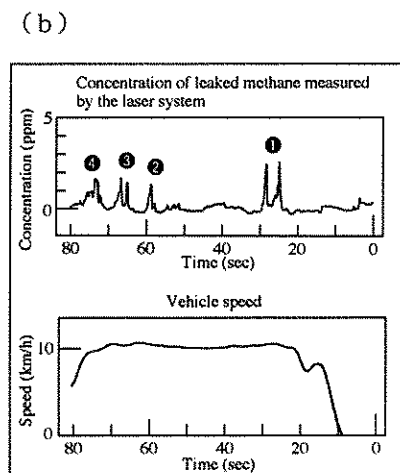
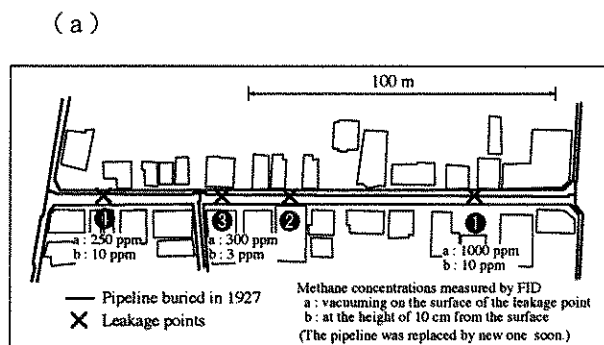


図5 車載走行試験結果の一例。

(a) FIDの調査により既に4カ所の漏洩が発見されているフィールド

(b) 車載式メタン検出装置によるメタン検出結果。下図はその際の車速を示している。

ンの走行検出実験を行った。現在までに得られた試験結果にり、本車載式メタン検出装置は実用上十分な性能を有していることが確認された。

その他、地球環境計測用の高感度濃度測定や燃焼火炎の分光分析など、本装置の応用分野はさらに広がっていくものと思われる。

参考文献

- 1) K. Uehara and H. Tai, Remote detection of Methane with a 1.66-um diode laser, *Appl. Opt.*, 31 (1992) 809-814.
- 2) 田井秀男、上原喜代治、1.7 μ m 半導体レーザーによるメタンの遠隔検出、*レーザー研究* 19 (1991) 889.
- 3) H. Tai, K. Yamamoto, M. Uchida, 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 (1992) 804-807.
- 4) H. Tai, R. Toriumi, and K. Uehara, Real-time simultaneous monitoring of atmospheric methane and carbon dioxide by using diode laser, *Digest of the Optical Remote Sensing of the Atmosphere Topical Meeting, Salt Lake City, USA, Mar. 8-12, 1993*, pp.184-187.
- 5) K. Uehara, H. Tai, and K. Kimura, Realtime monitoring of environmental methane and other gases with semiconductor lasers: A review, *Sensors and Actuators B*, in press.