

メタンガス遠隔吸収センサの高感度化のための最適波長変調法の検討 Analysis of optimum wavelength modulation for sensitivity improvement of remote methane gas absorption sensors

椎名達雄 (千葉大学)、小林喬郎 (元 福井大学)

Tatsuo Shiina(Chiba Univ.), Takao Kobayashi(Fukui Univ.)

Abstract

A square-wave modulation method is developed to realize high sensitivity in the weak methane gas absorption detection. In comparison to the conventional second-harmonic detection method with sinusoidal wavelength modulation spectroscopy (2f-detection), the present method exhibits higher signal and reference intensities with maximum absorption around the central frequency of the gas. It was confirmed by the fundamental experiment.

1. はじめに

1970 年以降の都市ガス (メタンガス) の普及は半世紀になり、パイプラインは首都圏だけでも総距離 60,000km に及ぶが、その老朽化や地震や津波などによるガス漏洩による事故や火災などが心配されている。そのため災害に対する耐性強化のため、漏洩ガスの遠隔検知技術の開発が強く求められている。

メタンガスの微弱な吸収を高感度に検出する遠隔的波長変調分光法として、吸収スペクトルの中心に光源波長変調を固定し、周波数 f の制限はで変調しての 2 倍の高調波 ($2f$ 成分) を検出する $2f$ 検波法 [1] が開発され、実用化されている [2]。しかし、ガスの光路長と密度の積として定義される柱密度の算出に用いられる受信出力の各周波数成分 P^{1f} 、 P^{2f} 及びそれらの比 (P^{2f} / P^{1f}) の最適化が必要であり、さらなる高感度化の可能性の検討が必要である。

本研究では、新しい矩形波の波長変調法を提案し、 $2f$ 検波法との特性比較の基礎実験について述べる。

2. 矩形波長変調法

波長の正弦波変調による $2f$ 検波法では、吸収スペクトルの中心に光源波長の中心をおき、吸収スペクトルの半値半幅 γ_L の 0.93 倍の変調周波数振幅 ν_{FM} を与えた場合に比 (P^{2f} / P^{1f}) は理論的に最大感度を得られる。一方で、2 倍高調波成分 P^{2f} の最大感度は $\nu_{FM} = 2.2\gamma_L = 2.2$ の場合である。さらに P^{1f} の値は LD 光源の強度変調成分であり、また吸収スペクトルの非対称性にも依存している。 [3]

そこで、波長変調分光法における最大感度を得るための矩形波での波長変調法の原理を Fig.1 に示す。吸収スペクトルの中心周波数 ν_0 と吸収が無視できる近傍の周波数 ν_2 との間で矩形波変調を行い、この吸収信号を P_2 とする。一方、参照光として、吸収線近傍で同じく吸収が無視できる周波数 ν_1 で ON-OFF の 2 値矩形波振幅変調を行って、この参照光出力を P_1 とする。これらの変調成分の出力比

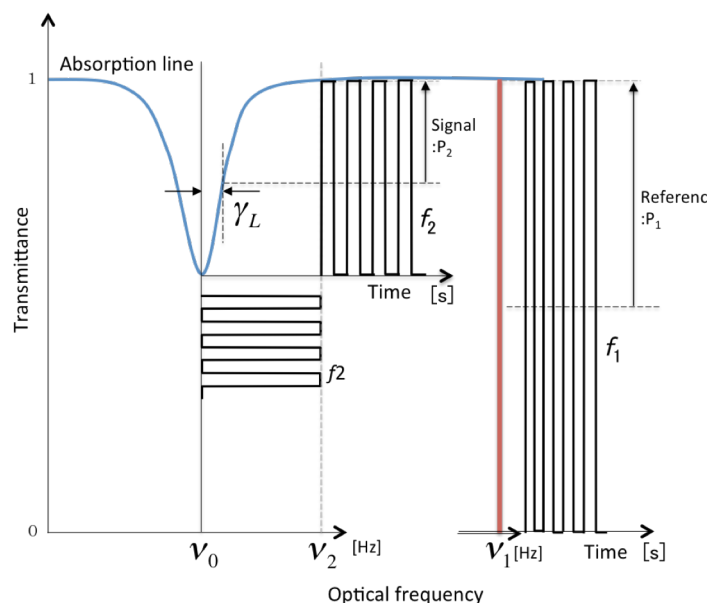


Fig.1 Schematic of the square wave modulation.

(P_2/P_1) より柱密度が算出できる。理論的検討より、従来の $2f$ 検波法と比較して、吸収信号成分では感度は約2.2倍になり、かつ、矩形波変調とすることで約1.27倍のロックインアンプ出力の増強が得られ、全体として約3倍の感度向上が期待される。

3. 基礎的分光実験

矩形波波長変調法によるメタン吸収の基礎実験を行った。Fig. 2 に実験の構成を示す。温度制御したペルチエ素子により、LD 波長はメタンの $2\nu_3$ 帯 R(3)線（中心波長 1560.88nm）に波長安定化を図った。実験で得られた吸収線スペクトルを Fig. 3 に示す。波形はそれぞれ基準メタンガス（200Torr@25°C）ならびに都市ガスである。半値半幅は 0.017nm であった。本実験では、中心周波数を ν_0 、吸収が無視できる周波数 ν_1 ならびに参照光周波数 ν_2 を同じく、1650.93nm に設置した。また、測定での LD 出力光はフィルターで減衰させて、出力 $1\mu W$ 以下に減衰させた。

矩形波変調法によって得られる受信信号波形の各周波数成分比（ P^{2f}/P^{1f} ）は、ランベルト・ベールの法則から、吸収係数と柱密度との積を表す。今、メタンの $2\nu_3$ 帯 R(3)線の中心における吸収係数を $\alpha_0 = 3.8 \times 10^{-5} [ppm \cdot m]$ として柱密度ならびにガス濃度を導出する。

まず、CH₄ 基準ガスセル（200torr@25°C）24.1% (241,000ppm)を用いた。矩形波変調法により、 $P^{2f}/P^{1f} = 0.683$ の比を得た。この比によって得られる柱密度は、 $1.8 \times 10^4 [ppm \cdot m]$ 、ガス濃度は $2.4 \times 10^5 [ppm]$ と算出され、規定値の0.53%の誤差であった。

次に、都市ガス（メタン混合比 89.6%）を空气中希釈した試料によっても測定を行った。Fig. 3 に示した都市ガス測定値は基準ガスセルの1/3以下になっている。基礎実験ではこのガスを空气中希釈し、柱密度 $10-100 [ppm \cdot m]$ の試料でも安定して計測できることを確認した。同様の試料を

$2f$ 検波法で計測を試みたが、半値半幅 γ_L の0.93倍の変調周波数振幅 ν_{FM} を利用した計測では、基準ガスセルを用いた測定では、ほぼ等しい柱密度が得られたものの、不安定性が見られた。

4. まとめ

吸収スペクトルの最大吸収量を利用する新しい矩形波変調法を検討した。基礎実験を通して、メタン基準ガスの柱密度測定を行い、誤差の少ない安定した計測が実現できた。また、都市ガスを希釈した低濃度ガス（ $10 [ppm \cdot m]$ ）でも安定した計測が行えることを確認した。

参考文献

- [1]J. Reid and D. Labrie, Applied Physics B, Vol.26, pp.203-210(1981)
- [2]K. Uehara and H. Tai, Applied Optics, Vol.31, pp.809-814(1992)
- [3]井関、田井、レーザー研究 pp.142-146(2001)

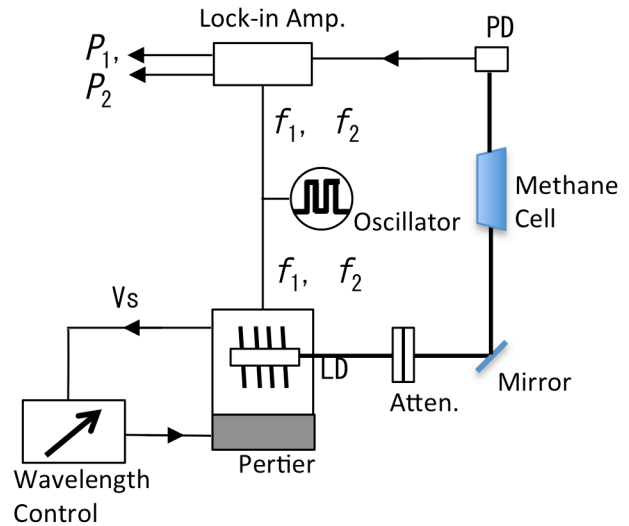


Fig.2 Arrangement of the experimental system.

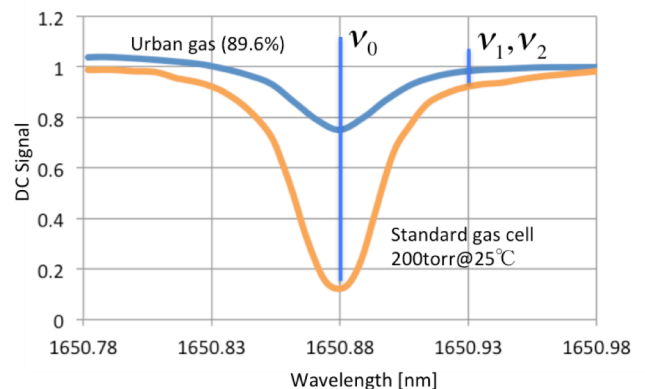


Fig.3 Absorption spectrum of Methane $2\nu_3$ R(3) line.