

研究

2波長発振 He-Ne レーザーを用いた メタンの定量遠隔検知

田井 秀男*・田中 弘明*・上原喜代治**

* 東京ガス(株)技術研究所 〒105 東京都港区芝浦 1-16-25

** 慶應義塾大学理工学部物理学科 〒223 横浜市港北区日吉 3-14-1

(1989年9月11日受理)

Quantitative Remote Sensing of Methane by Means of a Dual-Wavelength He-Ne Laser

Hideo TAI,* Hiroaki TANAKA* and Kiyoji UEHARA**

* Research and Development Institute, Tokyo Gas Co., Ltd.,
1-16-25, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105

** Faculty of Science and Technology, Keio University,
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223

The 3.392- μm emission of the He-Ne laser is strongly absorbed by methane while the 3.391- μm emission of the same laser is absorbed only weakly. This property of methane is utilized in methane sensing by differential absorption laser radars. A dual-wavelength He-Ne laser developed recently emits the two lines simultaneously whose intensities are modulated with equal amplitudes and opposite phases to each other. To achieve the quantitative remote sensing of methane in the air the double modulation method has been introduced, in which the intensity of the dual-wavelength He-Ne laser is further modulated by a mechanical chopper. The light reflected from a target is focused on a detector and the ratio of the outputs of two lock-in amplifiers synchronized to each modulation frequency gives the methane concentration-pathlength product. By using a target at a distance of 2.5 m, methane of 40 ppm·m was detected with a signal-to-noise ratio of 7 at an averaging time of 3 s.

1. 序論

He-Ne レーザーの 3.392 μm 発振線 ($\text{Ne } 3\ \text{s}_2 - 3\ \text{p}_4$ 遷移) はメタンに強く吸収され、一方、3.391 μm 発振線 ($\text{Ne } 3\ \text{s}_2 - 3\ \text{p}_2$ 遷移) はメタンにはあまり吸収されないことが知られている¹⁾。この二つの波長のレーザー光を用いた差分吸収レーザーレーダ (differential absorption laser radar : DIAL) により空気中のメタンの遠隔検知、したがってメタンを主成分とする都市ガスの漏洩の遠隔検知が可能となる²⁾。しかし、それぞれの波長で発振する2台のレーザーを用いる検知システムでは、装置全体が大きくなるばかりでなく、2波長の合波のための繁雑な光学系とその精密な調整が必要となる欠点がある。

最近、この問題点を解決するため、同振幅、逆位相で強度変調された2波長の光を同一直線上に出力する2波長発振 He-Ne レーザーが開発された³⁾。われわれは、このレーザーによってメタンの濃度・光路長積を定量遠隔測定するために、二つのセンサーを用いる方式と2重変調による方式の二つを案出し、それぞれの方式により良好な結果を得た⁴⁾。さらに応用例の一つとして、2重変調方式のレーザーレーダーシステムを車載し、走行しながらのメタン検知試験を行った。

本論文では2波長発振 He-Ne レーザーの特性について簡単に論じた後、メタンの定量測定のための2重変調法について述べ、最後に、車載レーザーレーダーシステムの走行試験の結果を報告する。

2. 2 波長発振 He-Ne レーザー

2 波長発振 He-Ne レーザーの構成を Fig. 1 に示す。動作原理については他に詳しく述べた^{3,4)}ので、ここでは簡単な説明にとどめる。通常の He-Ne レーザーでは、 $3.392 \mu\text{m}$ 線が発振しているときは $3.391 \mu\text{m}$ 線は発振しない。これは、両者が上準位を共有しており、前者の遷移強度が後者に比べてはるかに大きいからである。しかし、レーザー共振器内に $3.392 \mu\text{m}$ 発振線（以後波長 λ_1 で表す）に対しては損失となるが、 $3.391 \mu\text{m}$ 発振線（以後波長 λ_2 で表す）にはほとんど影響を及ぼさない低圧のメタンセルを挿入すると、2 波長の出力をほぼ等しくすることができる。そうしたうえで、共振器

長をわずかに変えるとそれぞれの波長成分の強度および全強度は Fig. 2 のように周期的な変化をする。

そこで、PZT を用いて共振器長を、たとえば A と B の間に振動させると、 λ_1 の強度と λ_2 の強度は逆位相で変化する。2 波長の強度変調が常に同振幅、逆位相となるためには、Fig. 1 の帰還ループにより全強度出力の変調周波数成分がゼロとなるよう自動的に振動の中心を制御すればよい。制御方式には、振動等による速い変動に対応し、かつ温度変化など緩やかだが大きな変動にも対応するように PI 制御を採用する。

これまで長さ 50 cm の放電管を用いたとき、変調周波数 1 kHz で各波長の変調振幅 0.7 mW_{p-p}、全強度の変調周波数成分の残留振幅 0.25 μW_{p-p} を信号平均時間

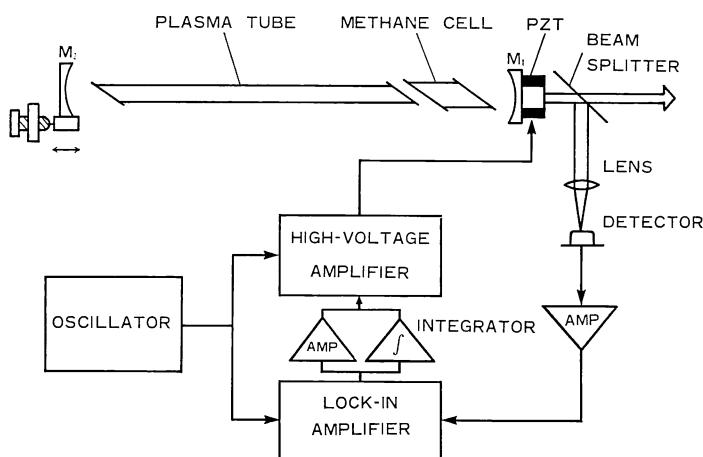


Fig. 1 Schematic diagram of the intensity-modulated dual-wavelength He-Ne laser. Mirror M_1 is manually translatable by $\pm 3 \text{ mm}$ for getting the optimum modulation. Cavity length : 68 cm, plasma length : 50 cm, methane cell length : 4.2 cm.

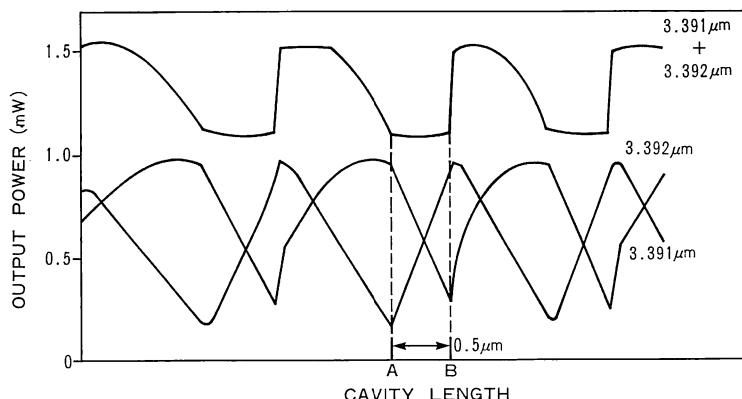


Fig. 2 Variation of the measured output power of the individual emissions and the sum of both vs. the cavity length. One cycle of the variation corresponds to a $\lambda/2$ change in the cavity length. Note that the total power is nearly equal at A and B while the individual emissions change appreciably.

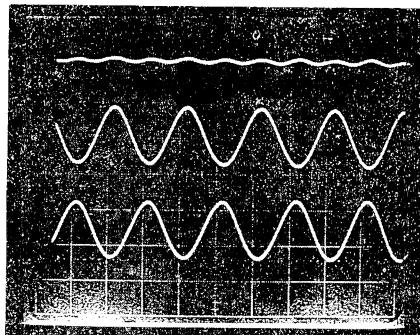


Fig. 3 Waveforms of the intensity of the total output (upper trace), the 3.392-μm line (middle trace), and the 3.391-μm line (lower trace). Note that the total output is modulated principally at twice the modulation frequency.

1秒で達成した。このときの各波長成分と全出力の波形を Fig. 3 に示す。この値より、雑音がレーザーのゆらぎのみで決まる理想的な条件のもとでの検出限界メタン濃度・光路長積は 0.2 ppm·m と見積もられる。

3. 2 波長発振 He-Ne レーザーによるメタンの定量遠隔測定法

3.1 2 波長発振 He-Ne レーザーによるメタン検知
大気中のメタンを検出するため、2 波長発振 He-Ne レーザーからのレーザー光を大気中に射出し、道路面や壁などの標的で反射させたのち検出器に集光し、電気信号に変換する。

2 波長 λ_1 と λ_2 の反射光の受光強度に対する電気信号出力をそれぞれ I_1 と I_2 、そして全出力を I とすると、それらは PZT にかける変調周波数 f_1 の 2 次以上の高調波成分を無視して、

$$I_1 = A(\alpha_1 - \sin 2\pi f_1 t)u_1 \quad (1)$$

$$I_2 = A(\alpha_2 + \sin 2\pi f_1 t)u_2 \quad (2)$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$= A \{ \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + (u_2 - u_1) \cdot \sin 2\pi f_1 t \} \quad (3)$$

と表される。ここで、 α_1 および α_2 はそれぞれ λ_1 、 λ_2 の強度出力の変調成分に対する直流成分の比である。また、 u_1 、 u_2 は

$$u_1 = \exp \{-2\alpha_1(cL+CR)\} \quad (4)$$

$$u_2 = \exp \{-2\alpha_2(cL+CR)\} \quad (5)$$

であり、 α_1 および α_2 はそれぞれ λ_1 と λ_2 に対するメタンの吸収係数 ($\alpha_1 = 9.9 \pm 0.1 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ 、 $\alpha_2 = 0.79 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$)⁵⁾、 cL は検知すべき漏洩メタンの濃度・光路長積、 C は常時大気中に存在する雲霧気メタンの濃度 (通常 2 ppm 程度)、 R は標的までの距離を表している。また A はレーザー光の反射の条件に依存する定数である。

I のうちロックインアンプで f_1 成分のみを位相敏感検波した出力を ΔI とすると、 ΔI は、

$$\Delta I = A(u_2 - u_1) \quad (6)$$

となり、漏洩メタンの検知が可能となるが、定数 A が係数としてかかっているため、定量測定は行えない。

そこで、メタンの定量測定を可能にする二通りの方法を案出した⁴⁾。一つは二つの検出器により二つの波長の光を区別して検出する方式、もう一つは 2 重変調法である。ここでは実際に車載システムに応用した 2 重変調法について述べる。

3.2 2 重変調法によるメタンの定量遠隔測定

Fig. 4 のように、各波長成分が周波数 f_1 で強度変調されている 2 波長発振 He-Ne レーザーの出力をさら

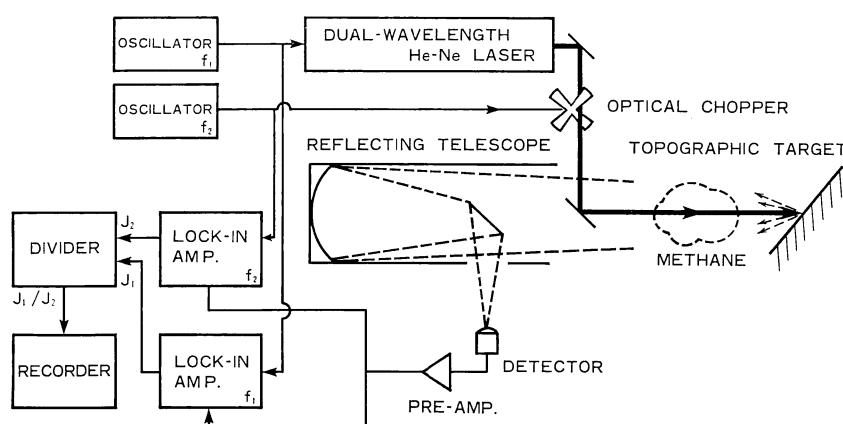


Fig. 4 Set up for the quantitative remote methane sensing by the double-modulation method.

に周波数 f_2 ($\neq f_1$) のメカニカルチョッパーにより強度変調し、反射光を集光光学系で受け検出器で電気信号に変換する。この場合検出器の出力を J とすると、

$$\begin{aligned} J = & A \{ a_1 u_1 + a_2 u_2 + (u_2 - u_1) \cdot \sin 2\pi f_1 t \\ & \times (b_1 + b_2 \sin 2\pi f_2 t + f_2) \text{ の } 2 \text{ 次以上} \\ & \text{の高調波成分} \} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで b_1, b_2 はチョッパーの形状によって決まる定数である。

$f_1=175$ Hz, $f_2=694$ Hz の場合の J の波形の例を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) は光路中にメタンが存在しない場合で、周波数 f_2 でのみ変調されている。Fig. 5(b) は光路中のメタンにより λ_1 成分のみが完全に吸収されたときの波形で、周波数 f_1 と f_2 で 2 重に変調されているのがわかる。

J のうち、周波数 f_1 で位相敏感検波した出力電圧を J_1 、周波数 f_2 で位相敏感検波した出力電圧を J_2 とする。

$$J_1 = Ab_1(u_2 - u_1) \quad (8)$$

$$J_2 = Ab_2(a_1 u_1 + a_2 u_2) \quad (9)$$

となる。その比は、

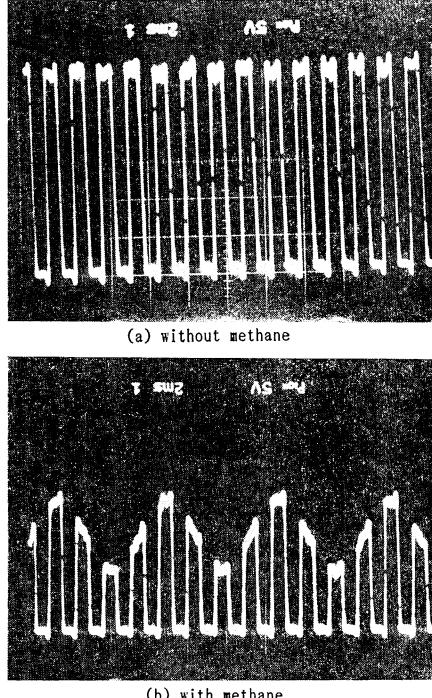


Fig. 5 Detected wave forms of the double-modulated laser output (a) without methane and (b) with methane along the optical path. $f_1=175$ Hz, $f_2=694$ Hz.

$$J_1/J_2 = \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{1-u}{a_2 + a_1 u} \quad (10)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} u &= u_1/u_2 \\ &= \exp \{-2\Delta\alpha(cl+CR)\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (12)$$

である。 $\alpha_1, \alpha_2, b_1, b_2$ は反射の条件に無関係の定数であるので、 J_1/J_2 は一定の u に対し一定の値を取る。 $\Delta\alpha (cl+CR) \ll 1$ をみたす低メタン濃度・光路長積の範囲では、

$$J_1/J_2 = \frac{2b_1\Delta\alpha}{b_2(\alpha_1+\alpha_2)} \times (cl+CR) \quad (12)$$

となり、 J_1/J_2 はメタンの濃度・光路長積に比例する。

本方式の有効性を確認するために、反射率の異なる各種標的を用いて、メタン検知のシミュレーション実験を行った。標的までの距離を 2.5 m、レーザー光の標的への入射角を垂直にし、模擬的な漏洩として望遠鏡と標的との間に設置した長さ 10 cm のセルにメタンと窒素の混合ガス（全圧 1 気圧）を流した。使用した標的は、反射率の高い順に、石灰を表面に塗付した木板、そのままの木板、灰色の厚紙の 3 種類である。また、レーザー光の変調周波数は 175 Hz、チョッパーの周波数は 625 Hz とした。集光鏡として直径 10 cm、焦点距離 60 cm のニュートン式望遠鏡を用いた。検出器は液体窒素冷却の InSb (受光面積 $2 \times 2 \text{ mm}^2$) である。

Fig. 6 は、模擬漏洩用セル内に各種濃度のメタン・窒素混合ガスと窒素ガスを交互に流したときの位相敏感検波出力 J_1, J_2 およびその比 J_1/J_2 のペントレコーダによる記録である。ロックインアンプの信号平均時間はいずれも 3 秒である。反射率の異なる各標的ごとにメタンの濃度・光路長積を 200, 160, 120, 80, 40 ppm·m と順次変化させている。

Fig. 7 は J_1 および J_1/J_2 を各メタン濃度・光路長積に対しプロットしたものである。Fig. 7(a) のとおり、 J_1 はメタン濃度・光路長積にほぼ比例した直線になっており、その傾きは標的の反射率に依存している。一方、 J_1/J_2 は Fig. 7(b) のとおり標的の反射率に無関係にはほぼ一定の傾きを示している。すなわち J_1/J_2 の値によりメタンの濃度・光路長積を定量的に知ることができる。

反射率の低い厚紙を標的とした場合、80 ppm·m のメタンに対し SN 比（信号対雑音比）は約 3、また反射率の高い石灰を塗付した板を標的とした場合には、40 ppm·m を SN 比 7 で検出することができた。したがつ

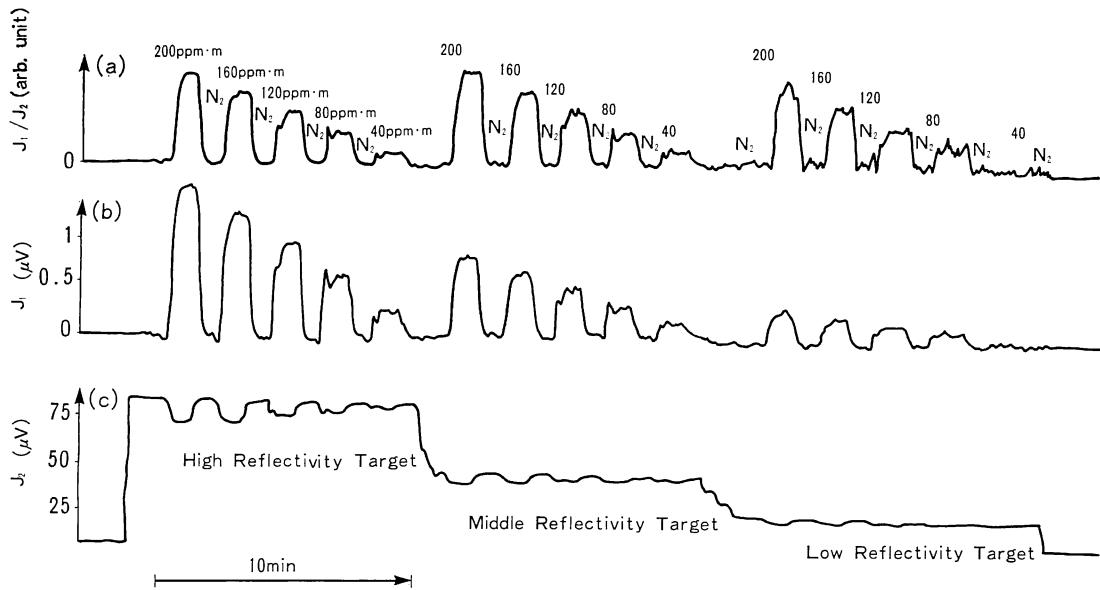


Fig. 6 Recorded signals of the quantitative remote methane sensing. Three targets with high, middle and low reflectivities are used in turn. Methane-nitrogen mixtures of the methane concentration-pathlength product of 200, 160, 120, 80, 40 ppm·m are flowed inside a cell for each target. N₂ means a pure nitrogen gas. (a) J_1/J_2 output, (b) J_1 output, (c) J_2 output.

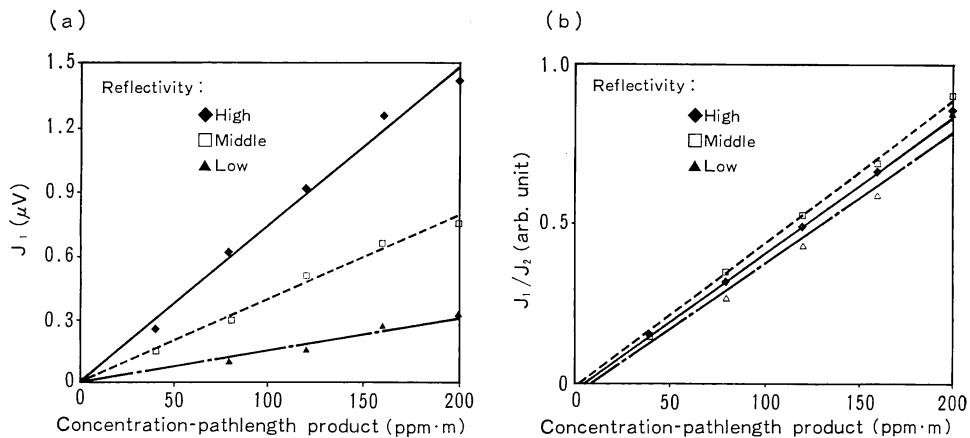


Fig. 7 Plots of the recorded signals in Fig. 6. (a) J_1 vs. methane concentration-pathlength product. (b) J_1/J_2 vs. methane concentration-pathlength product.

て検出可能な最小メタン濃度・光路長積は、それぞれ約30 ppm·mと6 ppm·mと計算される。標的の反射率が高い場合には、標的をさらに遠ざけるか、あるいは検出の信号平均時間を短縮することができる。

4. 車載システムによるメタン検知実験

今回報告したメタンの定量遠隔測定の応用として、上述の2重変調式レーザーレーダーシステムをワゴン車に搭載し、走行中の車からメタン検知実験を行った。

車載したレーザーレーダーシステムの仕様は以下のとおりである。

レーザー: 2波長発振 He-Ne レーザー
出力 2 mW

各波長変調強度 0.2 mW_{rms}

変調周波数 1.23 kHz

チヨッパ周波数 1.79 kHz

検出器: HgCdTe (受光面積 1×1 mm²)
動作温度 -70°C (電子冷却)

集光鏡：直径 200 mm
焦点距離 450 mm

測定系時定数：30 ms

また、振動の影響を軽減するため本システムを遮断周波



Fig. 8 Photograph of the vehicle-mounted laser radar

数 5 Hz の防振台に乗せた。

車載したシステムを **Fig. 8** に示す。Fig. 8 のようにレーザー光はワゴン車の後部から地表にほぼ垂直に射出する。またシステム全体の供給電源として発電機をワゴン車のボンネットの上に設置した。また車速は、小野測機社製非接触車速計を用いて記録した。

模擬的なメタン漏洩として、石英でつくった高さ 10 cm、車の走行方向に沿う長さ 1 m のセルを地表に設置し、そのセル内に 1% または 0.3% のメタン（それぞれ濃度・光路長積で 1000 ppm·m、または、300 ppm·m となる）を封入した。ワゴン車の速度が時速 10 km/h のとき、セルを横切るのに要する時間は 0.3 s である。

Fig. 9(a) はセル内に 1% のメタンを封入した場合の J_1/J_2 の変化（上図）と、その際の車速（下図）である。また **Fig. 9(b)** は同様に 0.3% のメタンの場合である。Fig. 9 のとおり、12 km/h の速度で、走行方向 1 m にわたる 1000 ppm·m のメタンを SN 比約 10 で、また、300 ppm·m のメタンを SN 比約 3 で検出することができた。このことより、本システムの 12 km/h での検出限界は約 100 ppm·m となる。

時定数が 30 ms と小さいため、実験室でのシミュレー

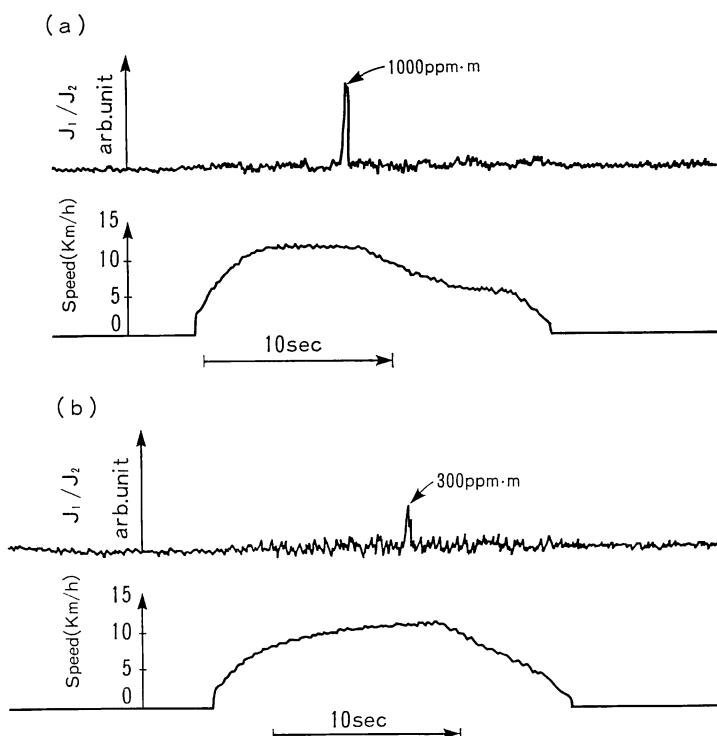


Fig. 9 Recorded signals of the methane sensing by the vehicle-mounted laser radar.
(a) 1000 ppm·m methane, (b) 300 ppm·m methane.

ションと比べ、集光鏡が大きいにもかかわらず SN 比は悪くなっている。また走行時の雑音レベルが静止時に比べ大きくなっているのは、道路面のランダムな反射率変化の影響と考えられる。変調周波数をより高くすればこの影響は小さくすることができるであろう。

5. 結 論

本論文では、2波長発振 He-Ne レーザーの特性とそれを用いた2重変調法によるメタンの定量測定法について説明した。標的までの距離 2.5 m, 信号平均時間 3 秒で 40 ppm·m のメタンを SN 比最大 7 で検出することができた。検出限界メタン濃度・光路長積は約 6 ppm·m と計算される。

またその応用例として、車載レーザーレーダーシステムによるメタン検知の実験を行った。約 12 km/h の速度で、走行経路に分布する 300 ppm·m のメタンを SN 比 3 で検出することができた。検出限界メタンは 100 ppm·m となる。

今後は変調周波数をさらに高くすることなどにより SN 比を改善し、実用化へ向けて開発を進めていく予定である。

文 献

- 1) C. B. Moore: "Gas-laser frequency selection by molecular absorption," *Appl. Opt.*, **4** (1965) 252-253.
- 2) W. B. Grant: "He-Ne and CO₂ laser long-path systems for gas detection," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 709-719.
- 3) K. Uehara: "Alternate intensity modulation of a dual-wavelength He-Ne laser for differential absorption measurement," *Appl. Phys. B*, **38** (1985) 37-40.
- 4) 田井秀男, 山本和成, 安部 健, 植木 孝, 田中弘明, 上原喜代治: "2 波長発振 He-Ne レーザーを用いたメタンの定量遠隔測定," *計測自動制御学会論文集*, **24** (1988) 452-458.
- 5) V. A. Balakin, I. P. Konovalov, A. I. Ocheretyanyi, A. I. Popov and E. D. Protsenko: "Switching of the emission wavelength of a helium-neon laser in the 3.39 μm region," *Sov. J. Quantum Electron.*, **5** (1975) 230-231.