

B1 波長 1.6 μm によるメタン漏洩検知 DIAL

DIAL for CH₄ leak detection with wavelength of 1.67 μm

興 雄司, 生田 光輝, 津村陽一郎*, 中川 潤*, 川田 則幸*, 前田 三男

Oki, Y., Ikuta, K., Tsumura, Y.*, Nakagawa, J.*, Kawada, N.*, and Meada, M.

九州大学大学院システム情報科学研究科・*三菱重工広島研究所

Graduate school of I.S.E.E., Kyushu University, *MHI

Differential absorption lidar (DIAL) system as a CH₄ leak detector using 1.67 μm absorption band is proposed and its performances are analyzed. A new high-power tunable device using optical parametric oscillation and a high-performance InGaAs photodiode detector are available in the proposed system. Analytical simulation shows that a compact methane DIAL system can be constructed with a detectable range of 600m and a sensitivity of 100ppm in a spatial resolution of 30m. In preliminary experiment, a mie-scattering lidar echo was observed by using raman-shifted Ti:sapphire laser and InGaAs PIN-photo diode.

1 はじめに

工場、化学プラントおよびガスパイプラインなどの施設における広範囲な可燃性ガスの漏洩検知にライダー観測を適用することは、遠隔測定で距離分解能を有することや in situ 計測が可能などの点で非常に有用である。大気中の CH₄ ガスの検知についてはその濃度が 1ppm と低いため、波長 3.39 μm の吸収帯を利用したものがこれまで主に研究されてきた。しかし、CH₄ の漏洩検知の場合は濃度 100~1000ppm 程度の検知で十分であること、観測範囲が 500m~1km で分解能が数 10m という短距離高分解能が要求されること、より簡単に可変波長光源が得やすく、高性能な検出器も利用可能なことなどから、波長 1.67 μm 吸収帯を利用した DIAL システムに着目し、CH₄ 検知システムの開発を行なっている。

2 概要

図 1 に開発するシステムの構成図を、表 1 に仕様一覧を示す。構成としては標準的な DIAL システムであり、1.67 μm の光源としては Nd:YAG レーザーによる光パラメトリック発振器を用いる。レーザーを狭帯域化するため、波長 782nm のレーザーダイオードによるシーディングを行なう。

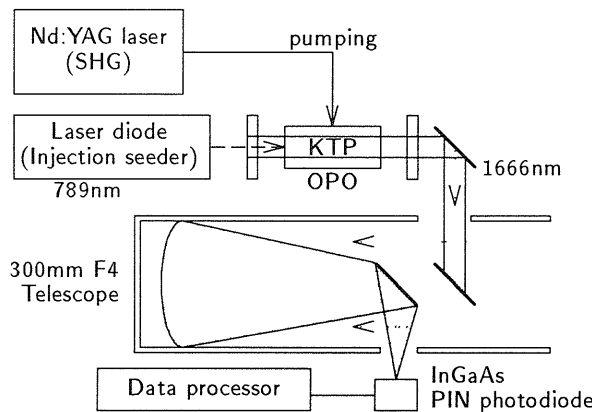


図 1: 開発する DIAL システムの構成図

表 1: 開発する DIAL システムの仕様

送信波長 (ON 波長)	6004.293 cm^{-1}
スペクトル幅	0.2 cm^{-1}
レーザーエネルギー	10mJ/pulse
繰り返し周波数	10Hz
積算ショット数	50 ショット
受信望遠鏡	F4, 口径 300mm
受光器	InGaAs PIN
等価雑音入力 NEP	2.32 $\times 10^{-13}\text{W}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$
(電子冷却時)	(4 $\times 10^{-14}\text{W}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$)
放射感度	1.08A/W
受光面積	1 mm^2
量子効率	80%
光学系の全効率	50%

光パラメトリック発振器の出力は 10mJ/pulse, スペクトル幅は 0.2 cm^{-1} と仮定した。受信望遠鏡として口径 300mm, $F=4$ の Au コート反射望遠鏡を用い、光検出器は浜松ホトニクス製の InGaAs PIN フォトダイオード (G-5821-21) を用いている。DIAL システムの距離分解能を 30m と仮定す

ると、光検知器の時間分解能は 200ns 程度必要であるが、使用する InGaAs PIN フォトダイオードの帯域は 40MHz と十分な速さを持っている。放射感度は 1.08A/W と InSb などの赤外検出器と遜色ない。一方赤外線ライダーで主なノイズ元となる検出器の等価雑音入力 (NEP) についても、ペルチェによる二次電子冷却時で $4 \times 10^{-14} \text{W/Hz}^{-1/2}$ と従来の赤外線半導体検出器と同等である。

3 シミュレーション

まずレーザーのスペクトル幅及び中心波長に対する CH₄ 吸収断面積の算定を行なった。本システムは地上での大気圧のみを考慮すればよい。図 2 はレーザーの中心波長をパラメータとし、レーザースペクトル幅に対する吸収断面積をプロットしたものである。スペクトル幅が 0.1cm^{-1} 以下では圧力拡がりのため吸収断面積がほとんど変わらない。また、隣接する吸収帯の影響で、 $0.2 \sim 1 \text{cm}^{-1}$ にかけての減少はスペクトル幅の変化に比べて小さく、スペクトル幅 $1 \sim 2 \text{cm}^{-1}$ にかけてはほとんど変わらない。中心周波数については 1cm^{-1} 付近をのぞき、6 本の大きな吸収線が重畳している 6002.56cm^{-1} の方が、より吸収線が密接している 6004cm^{-1} 付近より大きな吸収断面積を示している。このことから、レーザースペクトル幅は 0.2cm^{-1} 程度で十分であり、仮に $1 \sim 2 \text{cm}^{-1}$ 程度でも 50% 程度の吸収断面積低下で抑えられることが分かった。

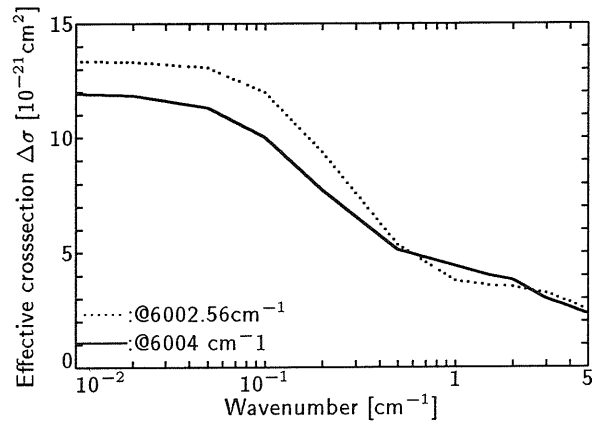


図 2: レーザースペクトル幅に対する実効吸収断面積

次に測定可能感度及び距離をライダー方程式を用いたシミュレーションコードを作成して見積もった。エラー率 η の算出には以下の式を用いた。¹⁾

$$\eta = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta RN_m\sqrt{m}} \times \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left(\frac{n_{ri}(R_j) + n_b + n_d}{n_{ri}^2(R_j)} \right) \right] \quad (1)$$

ここで n_r は受信光子数で添字 $i = 1, 2$ はそれぞれ on, off 波長に対応する。 n_b, n_d はそれぞれ背景光、検出器雑音による受信光子数を示す。 R_j は距離分解能 ΔR で区切られた j 番目の領域からの距離、 $\Delta\sigma$ は on, off 波長での吸収断面積の差、 m は積算パルス数である。計算に用いた CH₄ 分布モデルは 1ppm の背景分布中に 10m に渡り高濃度メタンが分布しているものを仮定し、高濃度ガスが分布している領域の誤差率が 10% 以下となる濃度・距離領域を検知可能とした。結果の例を図 2 に示す。

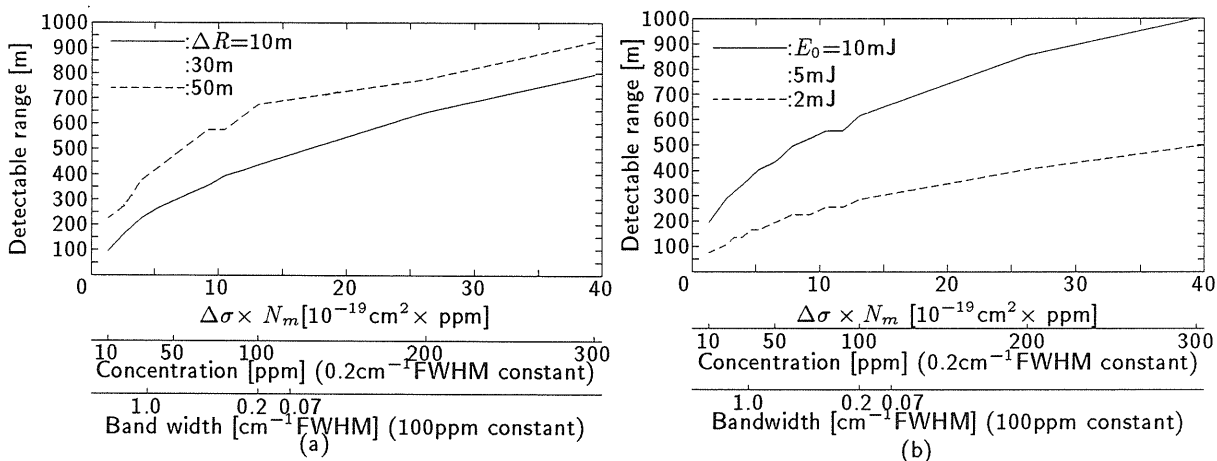


図 3: シミュレーションによる検出可能濃度・距離の見積り

パラメーターを簡素化するため、高濃度 CH₄ ガスの濃度とレーザースペクトル幅で決定される吸収断面積の積を横軸に用いている。図 3(a) はレーザー出力 E_0 を 10mJ に固定し、距離分解能をパ

レーザーにした場合をしめしている。この図より距離分解能 30m に着目すると、レーザースペクトル幅 0.2cm^{-1} のとき、100ppm、300ppm のガス濃度についてそれぞれ 600, 1000m まで検知できることがわかる。式 1 でも分かるように従来の大気観測ライダーでは距離分解能を下げることで大きく感度を改善できるが、図 3(a) によるとあまり改善が見られない。これは高濃度ガスの分布範囲が 10m と観測分解能に比べ小さく、分解能を大きくするとみかけ上 CH_4 濃度が減少するため、分解能 30m と 50m で検知可能距離が逆転しているのも同様の原因である。また、光源として予定されている光パラメトリック発振器であるが、シーディングを用いればスペクトル幅を 0.1cm^{-1} 以下にすることは容易であるが、技術的に高い信頼性を持っているとは言い難い面もある。しかし図 3(a) によると、スペクトル幅が 0.2cm^{-1} から 0.07cm^{-1} に改善しても検知可能距離はほとんど伸びず、逆に 1cm^{-1} まで低下しても 150~200m 程度の検知可能距離の低下ですむことがわかる。

一方図 3(b) を見ると、レーザー出力を 10mJ から 5mJ, 2mJ に減じた場合、検知可能距離はそれぞれ 50~80%, 40~50% 程度に低下している。この低下の割合は検知濃度が低いほど大きい、絶対距離としては高濃度域程差が大きい。 $E_0=10\text{mJ}$, スペクトル幅 0.2cm^{-1} のレーザーであれば 200ppm のガスを 900m 近くまで測定できるが、出力が 2mJ まで低下すると到達距離は 400m 以下となる。また、スペクトル幅を狭帯域化した場合の効果も、10mJ 出力の方がより高い効果が期待できる。従って、レーザーの出力を高めることは測定可能距離を伸ばすのに重要である。出力の不足は、積算ショット数 m を増やすことで補うこともできるが、その場合の誤差の改善は式 1 より \sqrt{m} に逆比例する。

4 ライダーシステムの開発・予備実験

観測系については表 1 及び図 1 に示した仕様・構成に基づいて作成した。観測望遠鏡はニュートン型反射望遠鏡とし、口径 300mm, F 値 4 の金コート反射鏡を使用し、直径 100mm の副鏡を用いて光検出器に導いた。光検出器は InGaAs PIN フォトダイオード (浜松ホトニクス, G5821-21) を使用している。光源については予定している光パラメトリック発振器は現在開発中であるため、予備実験を行なうために Ti:サファイアレーザーの誘導ラマン散乱光を用いた。

レーザーは HOYA Continuum 社の TS-60(100mJ@800nm) を使用し、波長 834nm のレーザー出力光を D_2 を充填したラマンセルに通すことで、波長 $1.67\mu\text{m}$ の第 2 ストークス (S2) 光を得ることができる。最大変換効率を得るためラマンセル内に集光するレンズの焦点距離やラマンセル長、ラマンガス圧力を最適化した。基本波出力は波長 834nm で 104mJ であった。ラマンセル内の D_2 圧力を変えた場合のラマンセル出力エネルギーを図 4 にしめす。このときラマンセル長は 2m、集光レンズの焦点距離 f は 1500mm である。S2 の出力に注目すると、 D_2 圧力 3atm 付近から出力が出始め、10atm で最大出力 7.5mJ となり、その後ゆるやかに減少している。この条件で得られた出力が $1.67\mu\text{m}$ 光の最大出力であった。シミュレーションで使用した 10mJ に若干及ばないが、ほぼ同じレベルの出力を得ることができた。

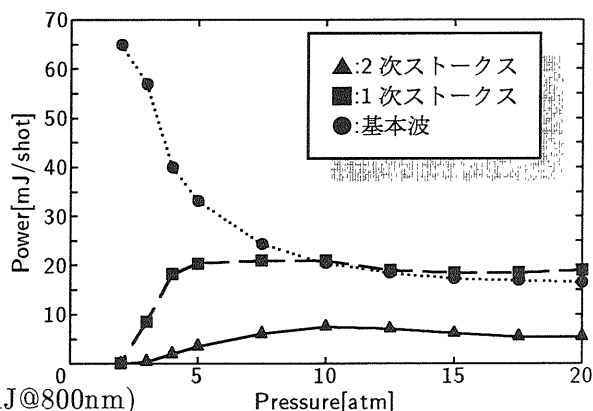


図 4: Ti:サファイアレーザーの D_2 誘導ラマンの出力特性

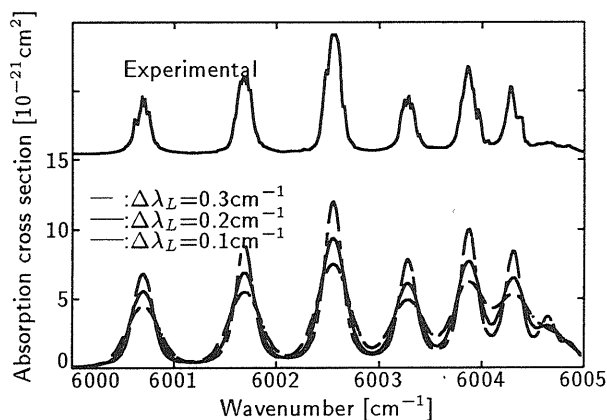


図 5: S2 光と PAS 法による CH_4 ガス Q ブランチのスペクトル

次にこの方式での光源スペクトル幅を評価するため、光音響分光 (PAS) 法によって CH_4 のスペクトル測定を行なった。S2 出力光をプリズムで分離して光音響セル (PAS セル) に入射した。PAS セルには N_2 で 10% に希釈した CH_4 を 1atm 充填し、PAS 信号はプリアンプ付き高感度マイクロフォン (小野測器製, MI-221, MI-3210) で測定し、アンプ (小野測器製, SR100) を通して BOXCAR 積分器で積算処理を行なった。得られたプロファイルを図 5 に示す。上部が得られた Q ブランチスペクトル、下部はレーザーのスペクトル幅を $0.1, 0.2, 0.3\text{cm}^{-1}$ と仮定して計算したプロファイルである。計算では CH_4 吸収線のスペクトル幅をローレンツ型と仮定しているが、実験による吸収スペクトルよりも裾の持ち上がりが大きくなっている。プロファイルの比較により、TS-60 レーザーの実効的なスペクトル幅は 0.2cm^{-1} 以下と推測された。これらの結果より Ti:サファイアレーザーのラマンレーザーでシミュレーションで使用した仕様に近い光源が得られることが分かった。

次に予備的な実験として、ラマンレーザーより得られた送信光を屋外に設置した望遠鏡に導き、図 1 のように望遠鏡光軸と同軸で送信光を空に送信してミー散乱エコーを観測した。ラマンレーザー出力は 6.5mJ であったが、4 枚の Au ミラーで送信光を望遠鏡に導いた結果、望遠鏡から送信直後の送信光強度は 3mJ であった。ビーム幅を 100m 離れたターゲット上のレーザースポットで測定したところ、 0.7mrad が得られ、望遠鏡視野角の 0.83mrad に抑えられていることが確認できた。次に送信光の波長を 6002.56cm^{-1} に設定してエコーの観測を行なった。

得られた波形例を図 6 に示す。波形は積算数 256 で平均化されたものを用いているが、図を見ると分かるようにかなりノイズが重畳していることがわかる。波形を平均化しなかった場合、更に大きい白色ノイズがエコー波形に重畳していたため、平均化してもこうした白色ノイズが完全に除去できていないものと思われる。こうしたノイズは実際にエコーを解析する際に大きな雑音となるため、かなり低減する必要があると思われる。一方、エコー強度は $0\sim 200\text{m}$ にかけて上昇し 200m 付近でピークになってのち、 300m 地点付近より $1/R^2$ でエコーが減少している。これは、副鏡裏側より送信光を出射しているため、副鏡によりエコーの遮蔽が起こっているためであった。こうしたエコーパターンはシミュレーションに光路トレースを組み込むことで数値計算的にも再現できている。エコー信号は距離 600m 程度まで十分確認できた。この範囲で積分を行ない、戻ってきた受信光子数を見積もると 9×10^5 となった。上記の副鏡の影響を考慮した計算によるエコー波形について同様な積分を行なったところ 4.8×10^5 が得られ、先の受信光子数が妥当な値であることが分かった。

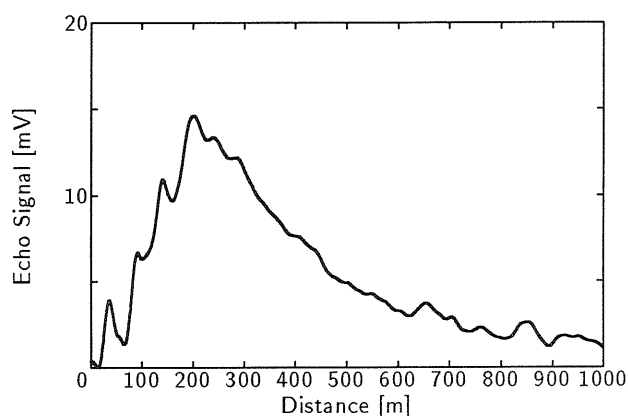


図 6: Ti:サファイア・ラマンレーザーによるミー散乱エコー波形例

5 今後の計画

副鏡の影響を組込んだシミュレーションコードによる再計算を行ない、これに基づいた感度及び測定可能距離の見積りを行なう。また、観測系における電気ノイズが現在大きく SN 比を制限しているため、この低減を行なって実際の検知感度をシミュレーションの感度に近づける。

参考文献

- [1] 内海通弘・前田三男・村岡克紀・内野修：レーザー研究 **21**(1993) 1031.