

B8 ガス漏れ検知用 1.6 μm メタン DIAL の開発

Development of CH₄ leak detection using 1.6 μm DIAL

興 雄司, 生田 光輝, 吉兼 昇, VASA Nilesh, 前田 三男, 津村陽一郎*, 中川 潤*

Oki Y., Ikuta K., Yoshikane N., VASA N., Maeda M., Tsumura Y.*, and Nakagawa J.*

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 was proposed and demonstrated. In preliminary experiment, a mie-scattering lidar echo was observed by using Raman-shifted Ti:sapphire laser and InGaAs PIN-photo diode. And CH₄ leak detection was demonstrated by using the system. Then we analyzed the reduction of echo signal intensity from range of 0~300m with a simulation code that contains a crossover efficiency.

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 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 781nm のレーザーダイオードによるシーディングを行なう。

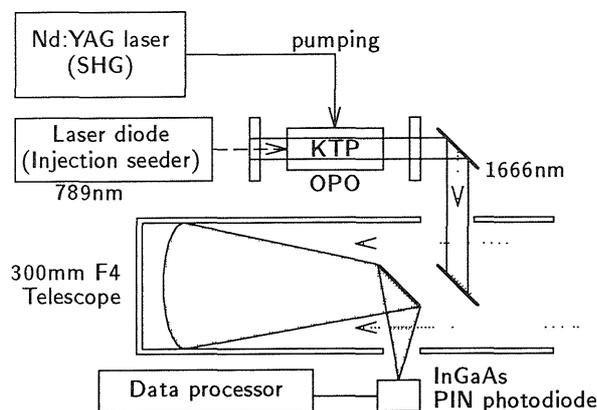


図 1: 開発する DIAL システムの構成図

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 (電子冷却時)	2.32 $\times 10^{-13}$ W/Hz ^{1/2} (4 $\times 10^{-14}$ W/Hz ^{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 InGaAs PIN フォトダイオードを用いている。この仕様をライダー方程式を用いたシミュレーションコードで評価したところ、100ppm 程度の濃度であれば 600m ぐらいまで検知が可能であることなどが示された。²⁾

3 1.67 μm のミーライダーエコー観測

試作した受信システムを用いて行なったメタン漏洩実験の配置図を図2に示す。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。検出器はInGaAs PIN フォトダイオード(浜松ホトニクス, G5821-21)を使用した。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、予備実験ではTi:サファイアレーザー(HOYA Comtinuum 社, TS-60, 100mJ@800nm)の誘導ラマンレーザーを用いた。D₂を充填したラマンセルに通すことで、波長1.67 μm の第2ストークス(S2)光を得ることができる。D₂の圧力を10atmとして、最大出力7.5mJ、ビーム広がり0.8mrad、スペクトル幅0.2cm⁻¹の光源を得ることができた。レーザーが設置されている建物の屋上に望遠鏡を配置し、レーザービームを屋上に導いて、望遠鏡光軸と全く同一軸でビームを送信した。ビームは130m離れた建物の屋上に設置した漏洩装置(口径600mm,長さ4mの筒にメタンガス(窒素希釈10000ppm)を導入したもの)を通過して大気に仰角約10度程度で照射された。得られたエコー信号はプリアンプ(浜松ホトニクス, ACC0014, 感度1×10⁵V/A, 帯域1k~15MHz)を通した後、オシロスコープ(TDS-520C)で観測したが、このときのミー散乱エコー測定では、単発エコーに重畳したノイズが非常に大きく観測された。これは使用したプリアンプの高周波ノイズによるもので検出器自身のNEPに対して2桁以上大きかった。そこで、プリアンプ後にバッファアンプとカットオフ周波数5MHzのアクティブローパスフィルターを挿入してノイズを低減し、エコーの観測を行なった。

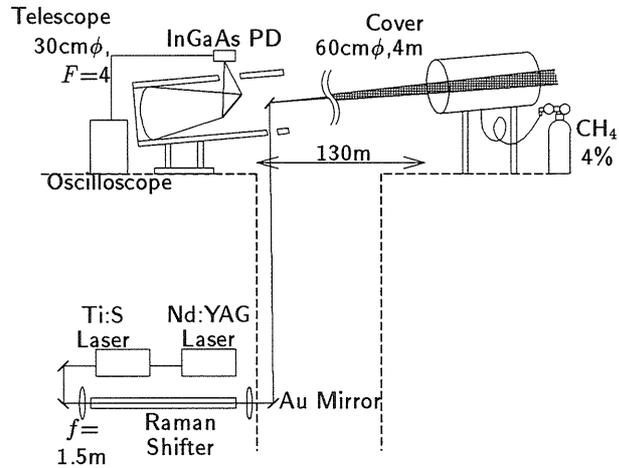


図2:メタンガス漏洩検知実験の構成図

図3に、実験で得られたエコー波形を示す。

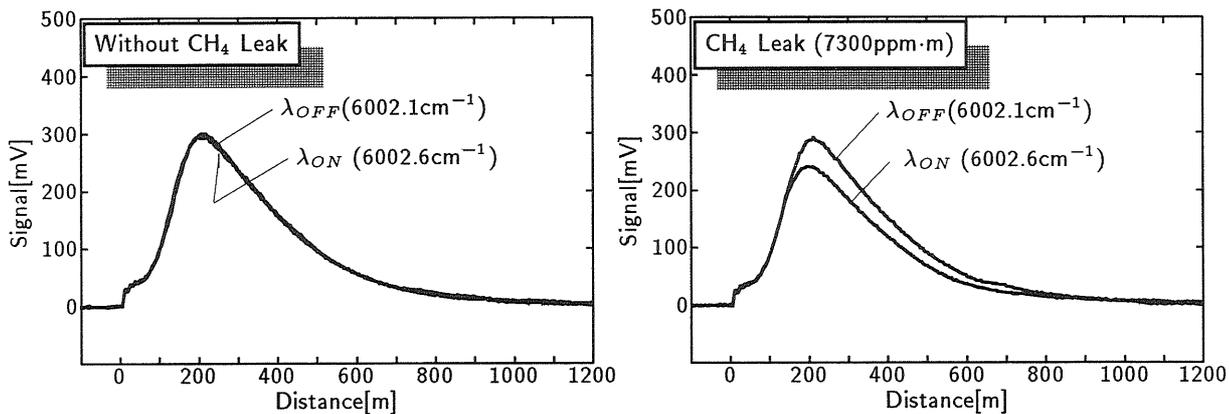


図3:メタンガス漏洩検知実験によるエコー波形

on 及び off 波長は波長 6002.56 と 6002.1cm⁻¹ を用い、ガスを漏洩させた場合とさせない場合について、on 波長 off 波長でそれぞれ 256 ショットのエコーを積算している。図3より、ガス漏洩時には漏洩地点である 130m 付近から差異が確認できている。望遠鏡から送信直後の送信光強度は 3mJ であった。ライダーエコーは近距離では‘けられ’によって受信効率が減少するが、ここでは 0~300m の範囲でそうした減少が見られている。こうした近距離域の受信光減少は予測していたものより大きく、近距離域に大きな「検出不可能域」ができる可能性が出てきたため、これについては後述するように‘けられ’による受信効率減少をシミュレーションコードに組み込んで検出可能領域を再度見積る必要が生じた。

図4に図3から計算した濃度分布を示す。これより求められるCH₄漏洩規模は4000ppm・mであった。漏洩装置後部に散乱体を固定し、透過した観測用ラマンレーザーの吸収率を算定した結果、漏洩規模は7300ppm・mであったため、DIALによる算定規模は若干これより小さい値となっている。風など影響で漏洩装置内部のメタン濃度は簡単に変化するため、この程度のずれはあっても当然といえる。

図4をみると、検出された漏洩範囲が広がっていることである。on波長とoff波長のエコー強度比でも、100~200mにゆっくりと変化が起きており、バッファアンプ及び周波数フィルターの影響で、応答が遅くなっている為こうしているのではないかとと思われる。

4 特性改善の検討

CH₄ 検知実験から明らかになった問題点は

- 近距離エコーの‘けられ’が予想以上に大きかった、
- InGaAs 用広帯域アンプの高周波ノイズが大きく、ノイズと帯域のトレードオフの問題が生じた、

の2つである。そこで、この2点の解決に向けて検討を行なった。

検出器の特性改善

周波数フィルターによる帯域制限では距離分解能に影響が出たため、バッファアンプと周波数フィルターを用いずに、擬似的に信号積算数を増やしてノイズを減少させる手法を用いた。この方法はエコーのサンプリングを距離分解能に合わせた時間刻みでのみ行ない、各時間刻み内においては、信号の積算・平均化を行なう方法である。これにより、擬似的に積算数を10倍以上にすることができるようになり、ノイズを相対的に1/3以下にすることができた。

図5に改善後のエコーとの比較を示す。改善後のエコーは15mの距離分解能に合わせてサンプルされたものであり、共に積算数は256ショットである。改良によって若干エコーの立ち上がりが速くなり、距離分解能毎の微弱なエコー強度変化も現れていることより応答速度が充分であることが分かる。遠距離におけるノイズの大きさは0.1mVp-p程度で、周波数フィルターを用いた場合より5倍程度まだ大きい、256ショット程度の積算である程度のノイズ除去が可能であることが分かった。今後、この受信系でメタン検知実験を再度行なう予定である。さらに、ノイズをさらに低減するには現在の検出器とプリアンプの分離型ではなく、アンプ内蔵のものを用いることが考えられる。仕様のにはこうした方法でアンプノイズを現在から1/20~1/50程度まで減少させることも可能である。

シミュレーションコードの改良

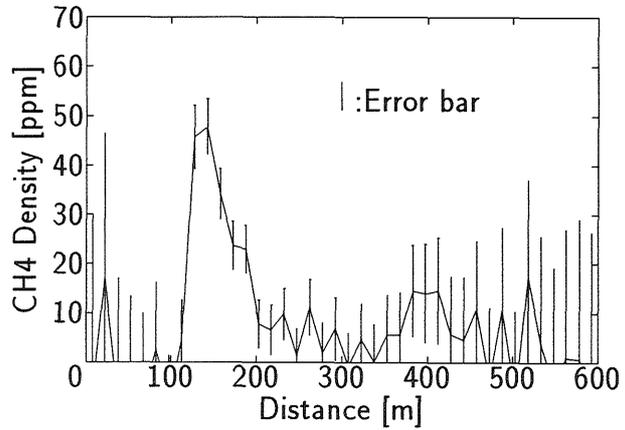


図4:メタンガス漏洩検知実験によるメタン濃度分布

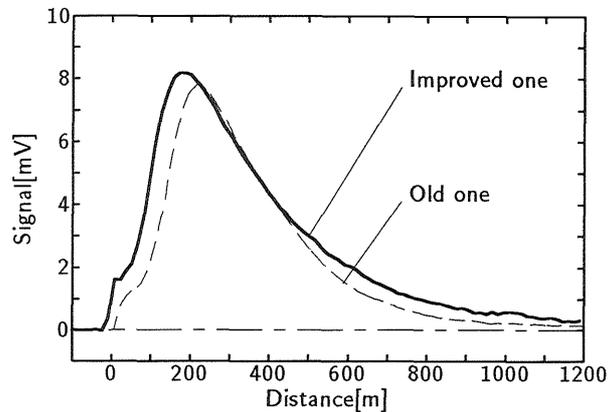


図5:検出器の特性改善によるエコー波形

近距離域での受信効率低下の原因となる‘けられ’の状態を把握するため、その受信効率低下をシミュレーションコードに組み込んだ。図6はその新しいシミュレーションコードによるエコー波形の計算例を示している。「けられ」は焦点距離のずれ(焦点ぼけ)および副鏡による遮蔽と、検出面との位置関係を考慮し、送信ビームはガウスビームであると仮定して数値計算した。その結果、実験で得られたエコーと非常に良く合致する結果を得ることができた。そこで、このコードを用いて以下の3点について近距離での受信エコー改善を検討した。

1. 検出器の位置変更(近距離からのエコーの焦点位置に移動)
2. レーザー送信位置の変更(望遠鏡外からの送信)
3. 検出器の検出面積の増大(1mmφ→3mmφ)

図7に測定可能範囲の計算例を示す。1案については200m地点からのエコーの焦点に検出面を合わせた場合の測定可能範囲を示している。1案により遠距離の受信効率が減少することが予測されたが、近距離の改善以上に遠距離の測定可能域が減少しており、効果はほとんど期待できないことが分かる。次に2案についてであるが、出射位置を変えることで近距離域を50~70m近く改善でき、その結果検出不可能領域についても、図7に用いた条件下では望遠鏡位置から1及び2区間(距離分解能30m)のみが検知不能となるだけであることがわかる。遠距離からのエコーにおいては原理的にも影響がないため、この方法によって十分に近距離の受信効率を改善することが期待できる。3案による結果では、遠距離の測定可能域が減少しているが、これは検出器のダークノイズや背景ノイズが大きくなるためである。しかしながら、後述するように検出器のプリアンプの電気ノイズが支配的な状況であれば、こうした問題は出てこない。一方、近距離においては「焦点ボケ」の問題が緩和されるため最も大きく近距離域の改善がなされている。さらに、検出器の検出面積を大きくすることで、望遠鏡の視野角を大きくすることができる。現在開発中のOPO光源のビーム広がり1mrad以上になる可能性があることや、装置自体の安定性、軸合せの容易さなどの点から見ても、3案にはメリットがある。これらのことから、2案と3案を併用するのが有効であると思われる。検出器面積の増大で検出器自身のダークノイズは増大するが、これがプリアンプのノイズより充分小さい範囲では検出面面積のサイズを大きくしていく方法が有効であろう。

現在、こうした特性改善を行なった受信光システムと開発されたOPO光源によってメタン検知実験を行なう準備を進めている。

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.
- [2] 興雄司・生田光輝・前田三男・内海通弘：九州大学大学院システム情報科学研究科報告 **2** (1997) 157.

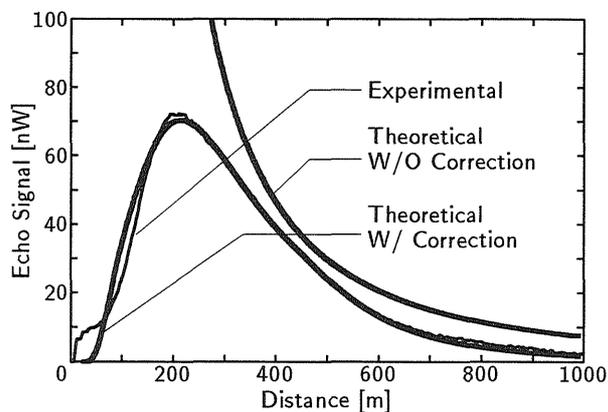


図6:近距離域のけられを考慮したエコー計算波形

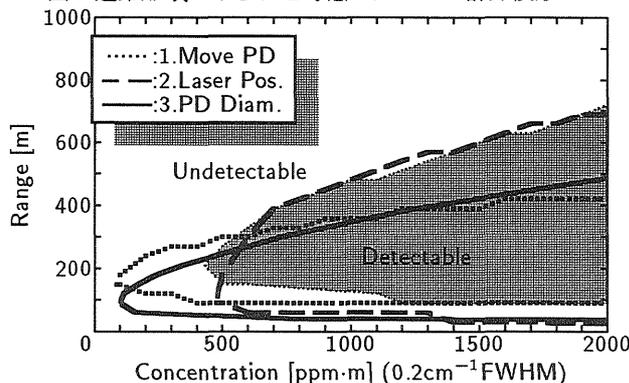


図7:近距離の受信感度の改善の見積もり