

漏洩メタン検知に用いる近距離高分解能 $1.67\mu\text{m}$ DIALシステム

生田, 光輝

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻 : 博士後期課程

工藤, 務

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻 : 修士課程

興, 雄司

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻

Vasa, J. Nilesh

Department of Electronic Device Engineering, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

他

<https://doi.org/10.15017/1515803>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 4 (2), pp.199-205, 1999-09-24. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :

漏洩メタン検知に用いる近距離高分解能 $1.67\mu\text{m}$ DIAL システム

生田 光輝*・工藤 務**・興 雄司***・VASA J. Nilesh***・
前田 三男***・中川 潤†

Short Range High Resolution $1.67\mu\text{m}$ DIAL for Methane Leakage Detection

Kouki IKUTA, Tsutomu KUDO, Yuji OKI, Nilesh J. VASA,
Mitsuo MAEDA and Jun NAKAGAWA

(Received June 21, 1999)

Abstract : A differential absorption lidar (light detection and ranging) system is developed as methane leakage detector using $1.67\mu\text{m}$ absorption band. A detection range of various 100m and 1000ppm \cdot m is estimated by numerical calculation, and 30m resolution of detection is demonstrated experimentally. Since amplifier noise and telescope misalignment spoil the sensitivity and the range of the system, solutions are also proposed. Development of a compact optical parametric oscillator for a transmitter injection-seeded by a laser diode is also reported.

Keywords : Laser radar, DIAL, Methane, Optical parametric oscillator

1. はじめに

レーザーを用いたレーダーシステム、いわゆるライダーシステムでは、大気中のエアロゾル分布を短時間で遠隔測定できるミュー散乱ライダーや大気の流れを観測できるドップラーライダーなど様々な応用が報告されている。原子分子の共鳴波長に同調した波長を送信すると、大気中の特定の原子・分子を計測することもできる。この中で、二波長差分吸収ライダー(Differential Absorption Lidar : DIAL)は、同時に2つの波長のレーザーを送信してその波長間での吸収の違いを使い、大気中のミュー後方散乱光を分布したミラーとして用いて、対象となるガスの1次元分布を求める方法である。この方法は大気微量成分の有効な計測法として O_3 ¹⁾や H_2O ²⁾などの報告がなされている他、一カ所から広範囲の測定が可能であるため、これを測定した2次元観測³⁾や、測定精度を上げるため多波長を同時に送信する方法⁴⁾など様々な応用が考えられている。

一方、工場や災害などにおける安全対策の一つとして可燃性ガスの一つである漏洩メタンのモニタリングは重要であるが、従来の化学的検知では広範囲を同時にカバーすることは困難である。我々はこれに着目し、漏洩検知にライダーシステムを適用する研究を行ってきた。

こうした目的にDIALを用いる場合、従来の大気モニタリングに用いるDIALとは幾つかの点で相違点が上げられる。すなわち(1)大気中メタン濃度が1.5ppm程度であるのに対し、メタン漏洩ではその濃度は数1000ppmと高い状態の検知で良いこと、(2)大気観測にくらべ、1 km程度の狭い測定対象距離であるが、同時に10~30mほどの高い空間分解能が要求されること、(3)鉛直方向の測定でなく、地表付近の1気圧下で速い空間スキャンが要求されること、などである。この点からこういったシステムが適しているかを検討し、ライダー方程式を用いた従来の大気観測ライダーの計算コード⁵⁾を元に検知可能範囲を見積った⁶⁾。その結果本研究では、通常大気観測で用いられる $3.39\mu\text{m}$ 帯⁷⁾ではなく、 $1.67\mu\text{m}$ 付近に存在するメタンの $2\nu_2$ バンドの吸収を用いることで、検知対象となるメタン濃度1000ppm程度、測定可能範囲1 km以内、距離分解能を30mという測定システムが実現できることを示した。この波長域ではラマンレーザーや光パラメトリック発振器(OPO)などを用いて比較的簡単に光源を構成することが可能であり、高い距離分解能に必要な高速応答のInGaAsを用いたフォトダイオード(PD)等が室温の条件下で使用可能となる。

本論文では、この検討結果に基づいて試作したプロトタイプ近赤外ライダーシステムと、これによる漏洩メタン検知実験について報告する。さらにこの結果をふまえて、近距離高分解能DIALにおける問題点と性能改善を検討する。さらに、実用機に向けて開発を行っているコンパクトなOPO光源についても報告する。

平成11年6月21日受付

* 電子デバイス工学専攻博士後期課程

** 電子デバイス工学専攻修士課程

*** 電子デバイス工学専攻

† 三菱重工(株)

2. システム仕様の設計/試作

先に文献6)において行ったシミュレーション結果から設定したシステムの仕様を Table 1 に、想定されるシステム構成図を Fig. 1 に示す。赤外ライダーにおいて検知感度を制限する背景ノイズは検出器の等価雑音入力 (Noise Equivalent Power : NEP) で決定されると仮定した場合、1000ppm のメタン濃度を数100m に渡り検知するため、送信する光源の出力エネルギーは10mJ、スペクトル幅は 0.2cm^{-1} に設定した。使用する吸収線は $1.67\ \mu\text{m}$ 帯の Q 枝線を採用した。 $1.67\ \mu\text{m}$ 帯の吸収断面積は $3.39\ \mu\text{m}$ の約 2% に過ぎないが、計算の結果から、(1)1000 ppm 程度の濃度では十分な吸収が得られること、(2)大気

に存在する 1.5ppm のメタンの吸収がほぼ無視できるため、 $1\ \text{km}$ ぐらいの範囲では大気による干渉やレーザー光減衰も考慮しなくて良いということも分かった。さらに、 $1.67\ \mu\text{m}$ 帯 Q 枝には60以上の吸収線が重畳しているため⁸⁾、大気圧下測定ではスペクトル幅が $1\ \text{cm}^{-1}$ 程度まで広がっていても中心波長を調整することで実効吸収断面積の低下を40%程度に収めることが可能である。但し後述するように吸収が大きい(ON)波長とそれに近接する吸収が少ない(OFF)波長が離れている場合、OPO 等では光軸の再調整が必要となり、すばやい切り替えが困難になる。

本システムの $1.67\ \mu\text{m}$ 光送信系では、OPO のアイドラー光を利用することとした。通常、市販の OPO は広く可視域をカバーするために Nd : YAG レーザーの第 3 高調波(355nm)を用いるものが多いが、本システムでは赤外域に限定して高効率期待できる Nd : YAG レーザー第 2 高調波(532nm)励起を用いた。この場合、シグナル光波長は約 781nm となるため、同波長で発振する半導体レーザーで OPO をインジェクションシーディングすることで、波長制御が可能となる。開発する OPO レーザーについては後述する。受光システムは口径 300mm のニュートン型望遠鏡を用いて試作した。 F 値は 4 とし、主鏡は放物面 Au コートである。近距離から軸を合わせるため、送信ビームは副鏡裏に設置されたミラーを用いて全く同軸で出射する方式を用いている。検出器には InGaAs の PIN 型大面積フォトダイオード(浜松ホトニクス, G5851-01 及び 03, 受光面 1 および $3\ \text{mm}\phi$)を採用した。後述するシミュレーションでも示されているが、受光面の大きさは視野角の大きさのみならず、近距離からの後方散乱光(エコー)の受光効率にも大きな影響を与え、受光面が小さいと結果として近距離部に大きな測定不能域を作る。よって受光面が小さい雪崩フォトダイオード(APD)等は近距離用にはあまり適さない。なお、 $3\ \text{mm}\phi$ の検出器に対する視野角は 2.4mrad である。検出された信号は増幅器(浜松ホトニクス, ACC-0014)で増幅された後、信号処理を行ってオシロスコープ(Tektronix, TDS-620C)で観測・記録した。

まず実験に先立ち、前述の光源の代替として Ti : Sapphire レーザー励起の D_2 ラマンレーザーを用いた。Ti : Sapphire レーザー(Continuum 製, TS-60)の出力(波長 834nm , 100mJ , パルス幅 $6\ \text{nsFWHM}$)を、 D_2 ガスを充填したラマンセル(長さ 2000mm)に通して 2 次ストークスビームを取り出した。この送信ビームの実効スペクトル幅は、 CH_4 の光音響分光スペクトルの測定からほぼ 0.1cm^{-1} と推定された。ビーム拡がりは約 $1\ \text{mrad}$ であり、両者とも Table 1 で示された仕様を満たしている。この送信ビームを望遠鏡まで導き、最終的に望遠鏡出射時に $3\ \text{mJ}$ の出力を得た。

Table 1 System specification

Transmitter	
On wavelength	6002.56cm^{-1}
Off wavelength	6002.10cm^{-1}
Bandwidth	0.2cm^{-1}
Pulse energy	10mJ
Beam divergence	1mrad
Repetition rate	10pps
Receiver	
Telescope	$300\text{mm}\phi$, $F = 4$
Efficiency	50%
Number of Averaging	256shots
PD sensitivity	$4.91 \times 10^{11}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$
NEP	$1.81 \times 10^{-13}\ \text{W}/\text{Hz}^{1/2}$
Bandwidth	$>5\text{MHz}$
Backward scattering ratio ($\beta_{\text{aer}}/\beta_{\text{air}}$)	24.0

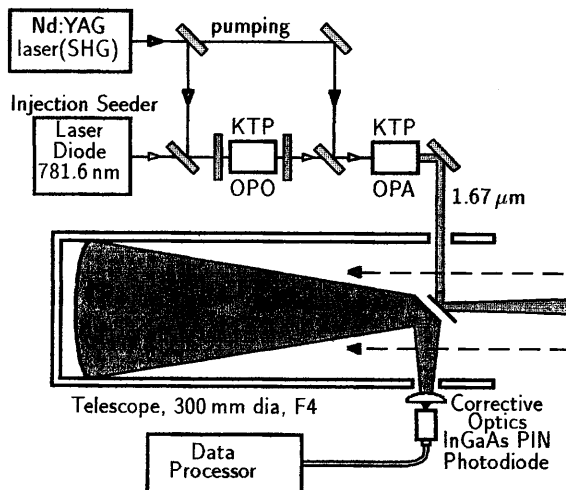


Fig. 1 Schematic of DIAL system

この出力を用いて送信・受信系より約100m離れた場所では人為的にメタン高濃度域を作製する装置を試作し、これを検知する実験を行った。送信レーザーの繰り返しは10ppsで、ON/OFF波長切り替えはTS-60の波長切り替えに依存するため数10秒必要であった。Fig. 2は実験で得られたエコーの一例である。ON/OFF波長にはそれぞれ、6002.56/6002.10cm⁻¹を用いた。得られた波形にはエコー強度の10倍近くの電気ノイズが重畳していたため、一旦距離分解能15mに合わせたゲート(100ns)の中で時間的に波形を平均化し、さらに256ショットの積算・平均化を加えてノイズ除去を図った。なお、PDの面積を1mmφ(G5851-01)とした場合、特に近距離のエコー強度が大きく減少したため、ここでは3mmφ(G5851-03)を用いて実験を行った。ガスの漏洩は130mから4mに渡り、6~8000ppm・mの漏洩規模であり、大気の流れなどで大きく影響されたため、測定に前後して吸収法を用いて測定・較正を行った。Fig. 2については7200ppm・mの較正值が測定されている。この図よりライダー方程式を用いて得られたガス分布の計算結果をFig. 3に示す。これより、130~169mの区間に渡り、6000ppm・mの漏洩規模が示されており、漏洩規模はほぼ正しく測定できていると同時に、距離分解能についても30mが達成できて

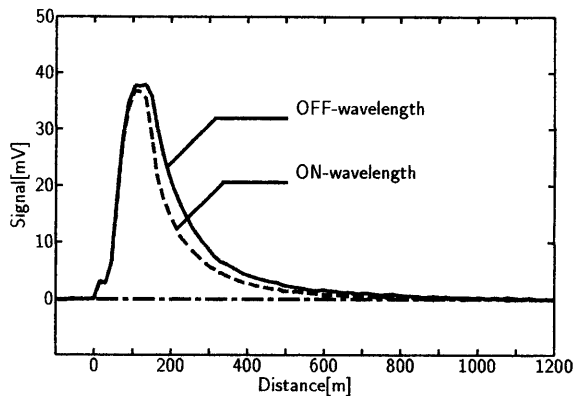


Fig. 2 Waveform of Mie scattering echo

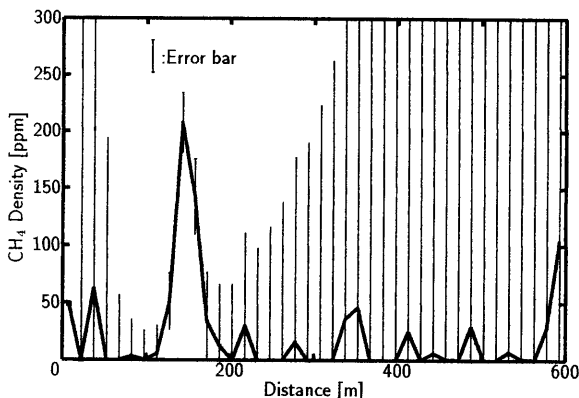


Fig. 3 Observed distribution of methane gas at leakage experiment

いる。一方、0~100mに関してはエラーバーが大きく、測定可能範囲の再検討および、問題の分析を行うことが必要となった。

3. 受信システムの問題点及び改善法

前節の結果から分かる試作システムの問題は主に以下の2つであった。

1. 近距離域のエコー強度が小さく、近距離の死角が広い。
2. シミュレーションで考慮されなかった検知器の増幅器が発生する電気ノイズがフォトダイオードのNEPより1桁以上大きい。

この2点の原因の特定及び分析を行うため、シミュレーションコードを改善し、実験の結果を再現するとともに、特性改善の方法を検討した。

(a) ノイズの検討

実験ではシミュレーションで推定されていたPD(G5851)のNEPよりも100倍以上の振幅をもつノイズが重畳していた。これは主に外部増幅器(ACC-0014)の電気ノイズに起因している。電気ノイズが支配的であるため、検出器受光面の1mmφから3mmφへの増大によるNEPの増大はこの実験では全く問題とならなかった。これまでのシミュレーションや濃度計算ではこうした増幅器自身による等価雑音入力NEP_Aを考慮していなかったため、次のような式を用いてノイズの影響を取り込んだ⁹⁾。

$$NEP_A = \sqrt{\frac{8\pi kTB^2CN}{S^2}} \quad (1)$$

ここで、 k (J/K)はボルツマン定数、 T (K)は温度、 S (A/W)は検出器感度、 B (Hz)は帯域である。 N はN/S比で実際の信号波形から得た。Fig. 3に用いられたエラーバーもEq. 1により補正されている。この式より、距離分解能を上げるための広帯域化が増幅器ノイズを大きく増大させることが分かる。同時に受光面積の増大による検出器容量の増大も問題である。この式を用いて検出器による雑音光子数 n_a を $\sqrt{NEP^2 + NEP_A^2}/h\nu$ と定義して、次の誤差式を用いて測定可能範囲を再計算した^{10),11)}。

$$\frac{\delta N_m}{N_m} = \frac{1}{2n_m\sigma L\sqrt{m}} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left(\frac{n_{ri}(R_j) + n_b + n_a}{n_{ri}^2(R_j)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

計算された検知可能範囲をFig. 4に示す。なお、この結果は後述する近距離の測定不能域も考慮されているため、近距離にも測定不能域が存在している。検知可能域と不可能域の境界はエラー50%を用いている。ノイズが増大することにより、検知可能距離は漏洩規模5000ppm・mで60~340mとなり、感度や測定可能域がかなり悪化し

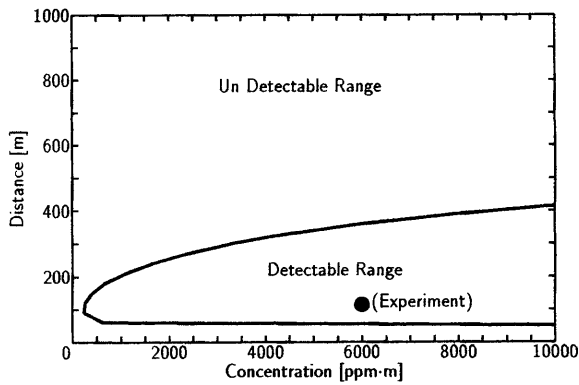


Fig. 4 Theoretical detectable range considering amplifier noise

ていることが分かる。

帯域 B を維持しつつノイズの低減を図るには増幅器の低温化・検出器容量 C すなわち受光面の小面積化、積算数の増大が考えられるが、増幅器ノイズが非常に大きいことから、Eq. 1 における N/S 比自体を低減すべきである。

これについては検出器に増幅器を内蔵させ、帯域やゲインを仕様合わせたカスタムの検出器が必要である。Table 2 に従来の PD および、検討中の増幅器内蔵型 InGaAsPIN フォトダイオード (CD30646E CD2837) の仕様を示す。このように増幅器を検知器内部に集積化することで、ノイズを NEP 換算で $1 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下のレベルまで低減することが期待できる。こうした低ノイズ化を図れば検出器自身の NEP 自身が無視できないこと、さらにこうした内蔵増幅器の帯域から PD の接合容量・短絡抵抗値が制限されることから、結果的に検出器の受光面は $1 \text{ mm}\phi$ 以下である必要があった。これにより生じる問題については次節で論じる。

(b) 近距離の測定不能域の検討

このエコー波形をみると $0 \sim 200\text{m}$ の範囲ではエコー

Table 2 Characteristics of Infra-Red detectors

	G5851-01	G5851-03	CB30646E
Sensor diam. [mm]	1	3	1
Pre amplifier	ACC-0014		CD2837 (Internal)
Total sensitivity [kV/W]	108	110	150
Detector NEP [$\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$]	0.18	0.11	—
Total NEP [$\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$]	—	—	0.18
Bandwidth [MHz]	10.0	3.0	3.6

が $1/R^2$ 曲線にのらず、 50m 以内の区域では非常に感度が悪くなっていることが分かる。InGaAs フォトダイオードのように受光面が小さい検出器では、遠距離エコーの焦点位置に検出器を合わせるため、近距離からの後方散乱光は焦点距離の違いにより検出器にはエコーの一部の光しか入らない。こうした Geometrical Factor に起因する問題は、送信及び受信軸の重なりの問題と共に様々な検討がなされている^{12),13)}。本システムでは受信部と送信部が完全に同軸であるため、送信部が副鏡で遮蔽される以外には後者の問題はほとんどない。しかし、赤外検出器受光面の大面積化が困難であるため、近距離の信号の減少は大きな問題となる。そこで Geometrical Factor の影響を考慮したシミュレーションコードを開発し、特に近距離における影響を検討した。計算した結果を Fig. 5 に示す。Geometrical Factor については従来の方法では実験結果と合わないため、ビームの強度分布や主鏡精度による収差も考慮にいれ、精度を向上させた。

Fig. 5 では Fig. 2 とほぼ同じエコーパターンを再現できており、受光面積が $1 \text{ mm}\phi$ になった場合の近距離域エコーの減少についても良い一致を見せた。解析により、近距離の測定不能域はエコーの集光位置のずれによるものが支配的であり、受光面のサイズは近距離域の死角を大きく左右することが分かった。このシミュレーションコードを用い、現在同軸で送信しているビームを望遠鏡外部から送信する方法も検討された。しかし、これは副鏡の遮蔽を避けることに効果があるのみで、焦点距離のずれは解消できないため、測定不能域を低減できないことも確認できた。

前述したように受光面積は $1 \text{ mm}\phi$ 程度に抑えることが、ノイズの低減などの面から必要である。そこで、受光面を小さくすると同時に補正光学系を検出器前面に挿入する効果を検討した。本研究で使用した受光系の主鏡精度は 0.2mm 程度で、C30646E CD2837 の受光面よ

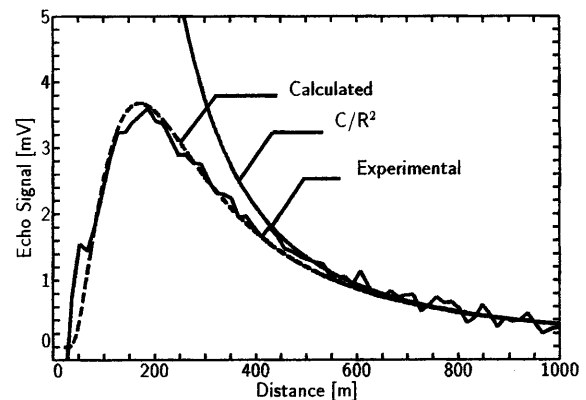


Fig. 5 Theoretical Mie scattering echo waveform considering the effect of the secondary mirror and defocusing

り充分小さい。この場合、レンズのような補正光学系を挿入することで、擬似的に受光面を 3 mm ϕ 相当に大きくすることが期待できる。この効果を評価するため、前述のシミュレーションコードにさらに光線追跡(レイ・トレース)のコードを組み込んで、レンズの球面収差なども考慮した計算が行えるようにした¹⁴⁾。理想的なレンズであると思われる ZnSe メニスカス型レンズ(曲率半径 $r=36.0, 13.1\text{mm}$)および入手しやすい石英(SQ)の両凸レンズ(曲率半径 $r=23.0\text{mm}$)について計算を行った結果、ZnSe では距離 100m からのエコーをほぼすべて 1 mm ϕ の検出器に集光でき、SQ レンズでもほぼ同等の改善が見られることが分かった。ZnSe のメニスカスレンズは高いフレネル反射のため無反射コートが必要になるなど、扱いが困難で高価であるため、SQ レンズが実用的であると思われる。補正光学系を考慮した計算例として、上記の SQ レンズを挿入した場合のエコー波形を Fig. 6 に示す。受光面を 1 mm ϕ にしても、Fig. 2 のピークの 40% ぐらいの強度が得られ、近距離の受信効率が改善されていることが分かる。

さらに、以上の解析を確かめるために、実際に無コート SQ レンズと G5851-01 を用いてエコー波形を観測した結果を Fig. 6 に実線で示した。ここでも計算と同様に近距離のエコー改善が確認できた。但し、実験では 100~400m にかけても信号が若干強く観測された結果 $1/R^2$ 則からはずれており、この原因については調査中である。

補正光学系によるもう一つの効果は擬似的に受光器面積が大きくなることによる受信系視野角の増大である。送信系の拡がり角が 1 mrad 程度であるとする、視野角は 50% 増の 1.5mrad 以上あることが望ましい。1 mm ϕ の受光面では視野角は 0.83mrad であるが、補正光学系を入れると計算では 1.56mrad 程度まで改善できることが分かった。

最後に、(a), (b) の両検討により、本システムの検知

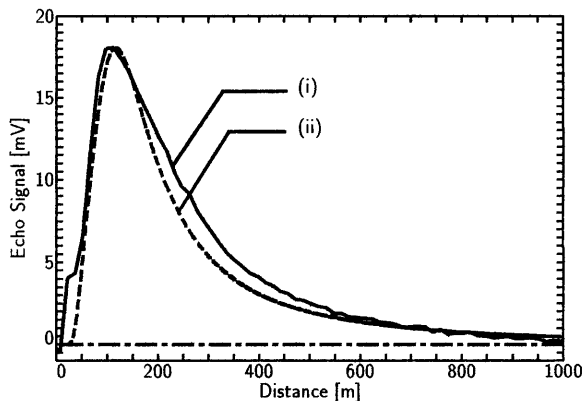


Fig. 6 Mie scattering echo waveform with a corrective optic, (i) Experimental, (ii) Theoretical

可能範囲や感度がどの程度まで改善可能かを計算した結果を Fig. 7 に示す。検出器および増幅機のノイズ低減と補正光学系による実効受光面拡大により、誤差 10% でも、1000ppm $\cdot\text{m}$ の漏洩規模を 60~825m の範囲で検知可能になる。これまでの検討結果より、受光システムの性能を改善するには、増幅器内蔵型の低雑音 InGaAs PIN フォトダイオード(C30646, CD2837)と補正光学系を組合わせたものが有効であると結論できる。現在、C30646E, CD2837 を実際に使用した検証実験を準備中である。

4. 送信用光パラメトリックシステムの開発

実用的なメタン検知用 DIAL としては車やヘリコプターに積める程度の可搬型システムを想定している。そのため、レーザー光源の小型化が必要である。Fig. 8 にそのために開発している光パラメトリック発振器(OPO)の概要を示す。1.67 μm 光を得るため、励起に Nd:YAG レーザーの第二高調波を用い、781nm のシグナル光を半導体レーザーでインジェクションシーディングして波長を制御する。通常、OPO の励起源となる Nd:YAG レーザーシステムでは励起パルスの空間プロファイルの改善や、スペクトル狭帯域化のため、レーザーダイオードによるインジェクションシードを行う。これまで、本システムの送信部でもインジェクション

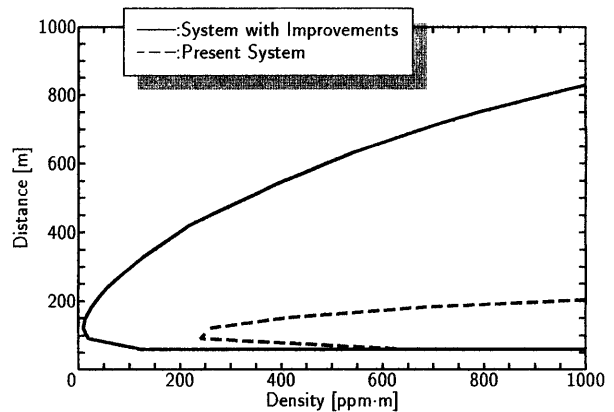


Fig. 7 Theoretical detectable range with smaller amplifier noise

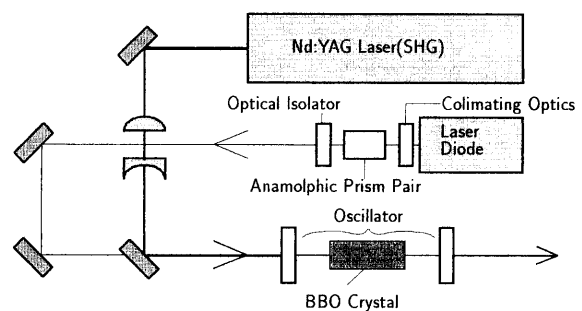


Fig. 8 Schematic of the developing OPO system

シーダー付 Nd:YAG レーザー (Spectra Physics, GCR-290-10, 330mJ@532nm, $<0.3\text{cm}^{-1}$) を励起システムとして用い、インジェクションシーダーは波長788nm で代替して実験を行ってきた¹⁵⁾。しかし、本システムのコンパクト化のため、より安価で小型な単一共振器型 Q スイッチ Nd:YAG レーザー (Continuum, Surelite-I-10, 160mJ@532nm, $>1\text{cm}^{-1}$) で励起するシステムの実験を行った。励起光のスペクトル幅を狭くするため、Nd:YAG レーザー共振器に固定エタロンを挿入し、スペクトル幅を 0.5cm^{-1} 程度まで狭帯域化した。出力は 130 mJ@532nm 程度まで減少したが、充分 OPO を励起できる。OPO の共振器はファブリーペロー型で、 $1.67\mu\text{m}$ 光での Q 値を高くし、532, 781nm では低 Q 値となるようなアイドラー-SRO (Singly Resonant Oscillator) を採用した。出射鏡反射率は $83\% @ 1.67\mu\text{m}$ である。シード用レーザーには 781nm で発振するシングルモードレーザーダイオード (シャープ, LTO24PD, 781.6nm) を使用し、アナモルフィックプリズムペアおよび光アイソレーター ($50\text{mm}\phi$, 40dB) を通して OPO 共振器に入射した。OPO には KTP 結晶 (KTiOPO₄, $4\times 4\times 15\text{mm}^3$) を用いた。

Fig. 9 にインジェクションパワーと OPO 出力の関係を示す。共振器に入射するポンプ光強度は発振しきい値の $60\text{MW}/\text{cm}^2$ とし、インジェクションパワーを変えて OPO 出力を測定した。インジェクションパワーが 1.5 mW 以下では発振は不安定で狭帯域化もされていないが、2 mW を越えると出力が安定すると同時に狭帯域化も確認された。また、これより、2.5mW 程度で充分なインジェクションシードが掛ることが分かる。しかしながら、この時、励起光エネルギー 27mJ に対してシグナル光とアイドラー光出力は合計でも 2 mJ に過ぎず出力が目標値に達していない。よって、さらに KTP 結晶を用いた光パラメトリック増幅器 (OPA) を構成し、励起用レーザーの残ったエネルギーを用いてアイドラー光を増幅す

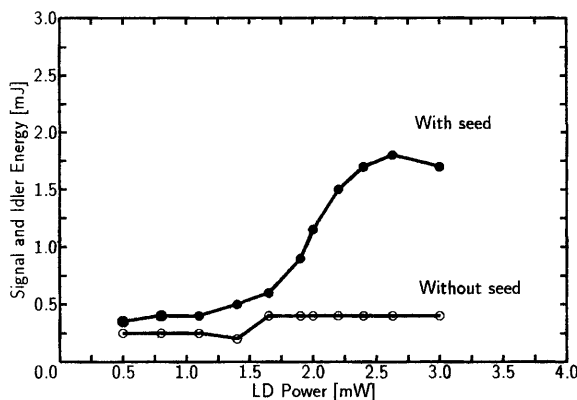


Fig. 9 Output energy of OPO corresponds to the injection power

る必要があることがわかった。次に OPO の発振スペクトルを評価した。OPO 出力をメタンを充填した光音響セルに導き、レーザーダイオードの波長を掃引して得られたメタン Q 枝の光音響スペクトルを Fig. 10 (A) に示す。Fig. 10(B) はスペクトル幅を 0.2cm^{-1} として計算されたスペクトルプロファイルで、良い一致を示している。(A) において波長掃引域が限られているのはレーザーダイオードのモードホップなどによる制限であるが、スペクトル幅が 0.2cm^{-1} 程度であるので、波長 6002.56cm^{-1} を ON 波長、そのサイド 6002.10cm^{-1} を OFF 波長とすることができる。ON-OFF 波長が近接している場合、KTP 結晶位相整合角度を再調整することなしに波長変更ができるため、高速に ON-OFF の切り替えを行える。現在、最終的なアイドラー出力を 10mJ 程度まで増加するために、KTP 結晶による OPA を追加し、この光源を用いたメタン検知の実験を進めている。

5. ま と め

高速な InGaAs 検知器が使用可能な差分吸収ライダーにより大気中のメタンガス漏洩検知システムを開発することを目標とし、プロトタイプシステムを試作して評価実験を行った。InGaAs フォトダイオードと D₂ ラマンレーザーを用いた場合、距離分解能 30m で数 100m に渡り 6000ppm·m の漏洩規模が検知できることを確かめた。さらに近距離に生じる観測不可領域について検討し、補正光学系の挿入で大幅な感度向上が可能になることを示した。一方で、光パラメトリック発振器を用いて波長 $1.67\mu\text{m}$ のコンパクトな光源の開発を行い、スペクトル幅に関して充分な結果を得た。今後は受光システムの雑音低減による測定感度の向上及び測定範囲の拡大などを目指すと同時に、開発した光パラメトリック発振器と増幅システムを組合わせてライダーの実験を行う。

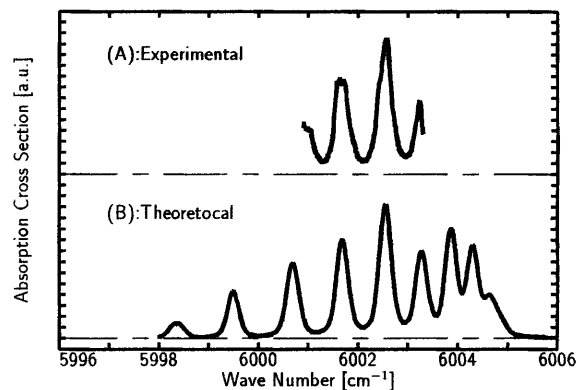


Fig. 10 Absorption spectrum (Q-branch) of methane gas obtained by OPO output

参 考 文 献

- 1) Uchino, O., Maeda, M. and M. Hirono, : *IEEE J. Quantum Elect.*, **15**, 10 (1979), 1094-1107.
 - 2) 内海通弘, 前田三男, 村岡克紀, 内野修: レーザー研究, **21**, 10 (1993), 1031-1039.
 - 3) Toriumi, R., Tai, H. and Takeuchi, N.: *Opt. Eng.*, **35**, 8 (1996), 2371-2375.
 - 4) Fukuchi, T., Goto, N., Fujii, T. and Nemoto, K.: *Opt. Eng.*, **38**, 1 (1999), 141-145.
 - 5) 内海通弘, 前田三男: レーザー研究, **22**, 6 (1994), 448-459.
 - 6) 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**, 1 (1997), 157-162.
 - 7) Prasad, N. S. and Geiger, A. R.: *Opt. Eng.*, **35** (1996), 1105.
 - 8) Rothman, L. S., Camache, R. R., Goldman, A., Brown, L. R., Toth, R. A., Pickett, H. M., Poynter, R. L., Flaud, J. M., Carny-Peyret, C., Barbe, A., Husson, N., Rinsland, C. P. and Smith, M. A. H.: *HITRAN Molecular Absorption Parameters Database*, Air Force Geophys. Lab. (1991).
 - 9) Der, S., Redman, B. and Chellappa, R.: *Appl. Opt.*, **36** (1997), 6869-6874.
 - 10) Schotland, R. M.: *J. Appl. Meteor.*, **13** (1974), 71.
 - 11) Uchino, O., Maeda, M., Kohno, J., Shibata, T., Nagasawa, C. and Hirono, M.: *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978), 807.
 - 12) Halldórsson, T. and Langeholc, J.: *Appl. Opt.*, **17**, 2 (1978), 240-244.
 - 13) Sasano, Y., Shimizu, H., Takeuchi, N. and Okuda, M.: *Appl. Opt.*, **18**, 23 (1979), 3908-3918.
 - 14) Ikuta, K., Kudo, T., Yosikane, N., VASA, N. J., Oki, Y. and Meada, M.: *Opt. Rev.*.
 - 15) 中田芳樹, 生田光輝, 東畠三洋, 興雄司, 岡田龍雄, 前田三男: 九州大学大学院システム情報科学研究科報告, **3**, 2 (1998), 233-238.
-