

レーザレーダによる広域メタンガス漏洩検知技術の開発

Development of Large Area Remote Sensing System for Methane Gas Leakage Using Laser Radar

技術本部 中川潤*¹ 津村陽一郎*²
機械事業本部 勝俣賢二*³
九州大学大学院 前田三男*⁴ 興雄司*⁵

化学プラント等の保安システムへの適用を目指し、メタンの漏洩（えい）を遠隔検知可能な差分吸収レーザレーダ（ライダ、DIAL: Differential Absorption Lidar）を開発した。理論シミュレーションコードを作成し、現実的な設計パラメータから、ライダの感度と検知領域を見積った。この結果を基に、プロトタイプ機を試作し、実際にメタン漏洩検知試験を実施した結果、130 m離れた位置から6 000 ppm・mの漏洩量が検知できた。このときの検知下限は1 000 ppm・m以下である。半導体レーザ注入同期簡易型OPO（オプティカルパラメトリック発振器）レーザを試作し、OPA（オプティカルパラメトリック増幅）システムと組み合わせることによって、実機に必要な性能が得られることが分かった。

A differential absorption lidar (DIAL) for remote sensing methane leakage was developed to help prevent disasters in chemical plants. Given appropriate design parameters, a theoretical simulation was conducted to evaluate the DIAL's sensitivity and detectable range. Based on the simulation, a prototype was constructed and methane gas leaked 130 m away from the DIAL was detected at a concentration of 6 000 ppm・m. The detection limit was better than 1 000 ppm・m at this distance. A diode laser injection seeded optical parametric oscillator(OPO) was built and, combined with an optical parametric amplifier(OPA), this laser was confirmed to have sufficient performance to use the DIAL in the field.

1. ま え が き

化学プラントや石油、天然ガス等の備蓄基地、パイプラインなど、広い面積を占有する施設から漏洩（えい）したメタン等の可燃性ガスを検知し、その発生場所を特定するセンシング技術の開発は、防災の見地から極めて重要である。波長可変レーザを用いたレーザ分光法をこの検知システムに適用した場合、従来の半導体センサシステムにはない遠隔検知可能というメリットがある。さらに、レーザレーダ技術を適用すれば、特定ガス成分の空間分布を広範囲にわたって、一地点から監視可能なシステムを構築できる。そのため、レーザを用いたガス漏洩検知に関する研究が種々のグループ¹⁾で実施されている。しかし、装置規模、簡便性、コストなど実機に適用するには不十分な状態である。

本報では、化学プラントや備蓄基地の保安システムへの適用を目指して実施した、レーザレーダの一種であるメタン差分吸収ライダ（DIAL: Differential Absorption Lidar）の開発結果について報告する。

2. 差分吸収ライダ（DIAL）と漏洩検知シミュレーション

2.1 DIALの概要

DIALの概念を図1に示す。時間幅10 ns程度の短パルスレーザ光を監視対象空間に照射し、空気やエアロゾルによって散乱される後方散乱光を集光用望遠鏡で集光し、光検知器で検知する。その際、レーザ光の波長を漏洩監視対象ガスの吸収波長に共鳴させた場合と、非共鳴の場合の両者を計測、比較する。また、太陽光等の外乱を除去するため、レーザ光の波長だけを透過するバンドパスフィルタや分光器を検知器の前面に設置する。共鳴と非共鳴で得られる、検出信号の各時間に対する減衰状態の違いから、各散乱位置での漏洩ガス濃度を導出する。

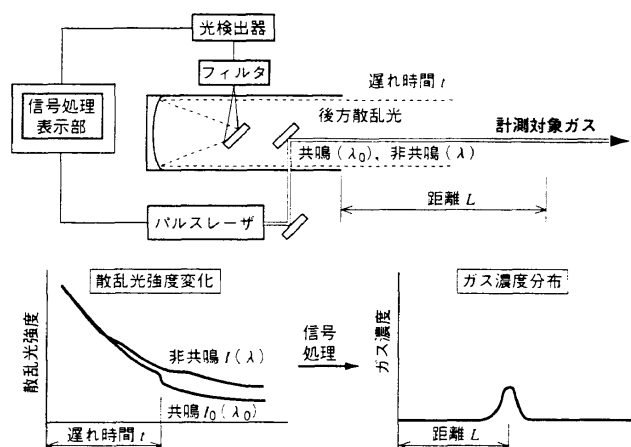


図1 差分吸収ライダ（DIAL）システム概念
Schematic diagram of differential absorption lidar (DIAL) system

2.2 DIALの方程式

大気中に照射されたレーザ光は、分子やエアロゾル等の粒子によって散乱され、また、吸収される。吸収される波長は粒子の種類によって決まっているため、監視したい粒子に共鳴する波長のレーザ光を照射した場合は、非共鳴の場合と比べて、大気中を伝ばするにつれて粒子の吸収によりその強度が減衰する。

光源及び検知部から距離 R だけ離れた位置からの散乱光強度は、式(1)に示すレーザレーダ方程式で与えられる⁽²⁾。

$$P(R) = \frac{P_0 I K(R) T^2(R) \beta(R) A_r Y(R)}{R^2} \quad (1)$$

ここで、

P_0 : パルス光の出力 (W)

$l = c\tau/2$: レーザパルス空間長の半分 (m)

*1 広島研究所主管 理博

*2 広島研究所機械プラント研究推進室

*3 化学プラント技術センター管理グループ主務

*4 システム情報科学研究科教授 工博

*5 システム情報科学研究科助教授 工博

τ : レーザパルス時間幅 (s)

c : 光速 (m/s)

$K(R)$: 収差を含む, R の位置での送・受信光学系の全効率 (—)

$T(R)$: 対象分子を含む大気の透過率 (—)

$\beta(R)$: 散乱体の体積後方散乱係数 ($\text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

A_r : 受信光学系の開口面積 (m^2)

$Y(R)$: 送信光と受信視野の重なりを示すパラメータ

式(1)のうち, $T(R)$ 以外の項は共鳴, 非共鳴のレーザ光波長がほぼ同じなので, 非常に良い近似で等しいと見なせる。

また, $T(R)$ の共鳴, 非共鳴時の差違は, 各々の吸収断面積, $\sigma_{\text{on}}, \sigma_{\text{off}}$ の差と対象分子密度に依存する。

距離 $R \sim R + \Delta R$ の間にある平均の分子密度 $n(R)$ は, 時間 $t \sim t + \Delta t$, 及び $t + \Delta t \sim t + 2\Delta t$ の間に検知器に到達する光子 Ph の比として式(2)のように定義される $I(t)$ から, 式(3)で与えられる。

$$I(t) = \frac{Ph_{\text{on}}(t) \cdot Ph_{\text{off}}(t + \Delta t)}{Ph_{\text{off}}(t) \cdot Ph_{\text{on}}(t + \Delta t)} = \exp \left[-2(\sigma_{\text{off}} - \sigma_{\text{on}}) \int_R^{R+\Delta R} n(R) dR \right] \quad (2)$$

$$\therefore \int_R^{R+\Delta R} n(R) dR = \frac{1}{2(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}})} \ln I(t) \quad (3)$$

ここで,

$$R = c(t + \Delta t/2)/2, \Delta R = c\Delta t/2$$

したがって, 共鳴及び非共鳴の吸収断面積が既知であり, かつ, t と $t + \Delta t$ での信号が精度良く得られれば, $R \sim R + \Delta R$ 間の平均密度 $n(R)$ が求まる。

また, メタン各遷移の吸収断面積は Rothman らによって HITRAN データベース⁽³⁾の一部としてまとめられている。

2.3 シミュレーション

大気中に漏洩したメタンの濃度分布を計測する際, 現状入手できるレーザ光源, 光検知器等のハード, 天気, 夜間, 昼間等の外部条件によってどの程度の信号が得られるか, また逆に, どの程度までの濃度であれば計測可能かを計算機シミュレーションによって検討した。その概要を以下に述べる。

シミュレーションには式(1)~(3)中の定数以外に, ノイズに関する情報が必要となる。ライダ計測のゲート時間 Δt 間に検知系から出力される光電子数は, ライダ信号によるもの n_r , 背景光によるもの n_b , 検知系の雑音によるもの n_d の和と考えられる。

$$n = n_r + n_b + n_d \quad (4)$$

検知系ノイズ n_d は, アンプ系までを含めた等価雑音入力 NEP ($\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$) によって式(5)のように与えられる。

$$n_d = \left(\frac{\sqrt{B} \text{NEP}}{h\nu} \eta \Delta t \right)^2 \quad (5)$$

ここで,

B : 検出器の帯域幅 (Hz)

$h\nu$: 光子エネルギー

η : 量子効率

疑似的に実際に検知される信号を求めるため, Δt 秒間に検知される光強度を光子数に変換し, さらに, 検知器の量子効率から光電子数 n_r, n_b, n_d を導出する。

DIAL 計測のように比較的検知光子数が少ない場合には, 光電子数の分布はポアソン分布に従うと考えられるので, この光電子数を基にし, 乱数を発生させてポアソン分布に対応した検知信号強度を導出することができる。

さらに, 逆に, この模擬的な検知信号から式(3)を用いて, メタン濃度分布を求め, 視覚的にどの程度の分布が検知可能か判断できる。

2.4 シミュレーションによる検知可能領域の検討

2.3 節で述べた視覚的な分布検知判断では全体的な検知可能領域を求めるのが困難である。そこで, S/N 比をベースにして検知可能領域を検討した。測定電子数をポアソン分布に従うとすれば, 標準偏差は全検出光電子数の期待値の平方根で与えられる。S/N 比はライダ信号の期待値/標準偏差と定義されるので,

$$S/N = n_r / \sqrt{n_r + n_b + n_d} \quad (6)$$

DIAL で計測された分子密度の相対誤差 $\delta N/N$ は誤差伝ば則から式(7)のように与えられる。

$$\frac{\delta N}{N} = \frac{1}{2N\sigma\Delta R\sqrt{m}} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left(\frac{n_r(R) + n_b + n_d}{n_r^2(R)} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

ここで,

$\sigma = (\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}})$: 実効吸収断面積

m : 積算ショット数

i : 共鳴, 非共鳴波長

j : R と $R + \Delta R$ での信号

S/N が 2 以上あれば検出は可能と考えられるので, 式(7)の値が 50 % 以下を検知可能領域とした。

図 2 に 3 章で述べるプロトタイプ機と改良システムでの検知可能領域を示す。特に, 検出アンプ系とレーザ発振器を改良した改良システムでは 1500 ppm·m のガスを 550 m 以内の領域で, また, 500 ppm·m では 300 m 以内の領域での検知が可能となる。この値はメタンの大気との爆発下限値が 5 % (50 000 ppm) であることから, 暴発を防止するための保安システムに対して要求される検知濃度約 5 000 ppm を十分検出可能である。

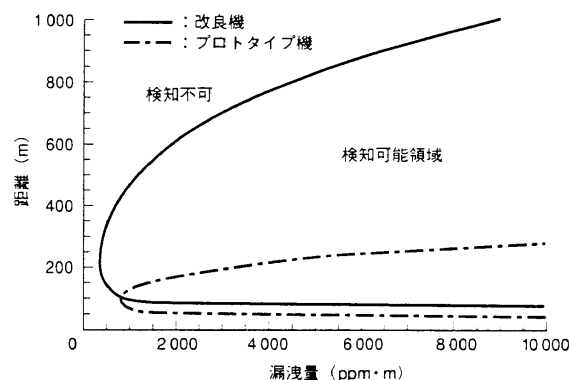


図 2 DIAL システムの検知可能領域
Estimated detectable range of DIAL system for prototype system and improved one

3. プロトタイプ機によるガス漏洩検知試験

DIAL システムの性能を実証するため, プロトタイプ機を試作し, 実際にメタンガスを漏洩させた検出実験を行った。図 3 に実験装置の構成を示す。

DIAL システムはレーザ光発生, 出射部と集光, 検知部の 2 つの部分で構成されている。波長可変レーザ光源は, Nd:YAG レーザ二倍高調波励起チタンサファイアレーザ光を重水素ガス中に照射して発振させたラマンレーザを用いた。数本あるラマンレーザ発振線のうち第 2 ストークス光がメタンの吸収波長である 1.67 μm 近傍で発振する。レーザ出力は約 7 mJ/pulse, 発散角は 1 mrad 以

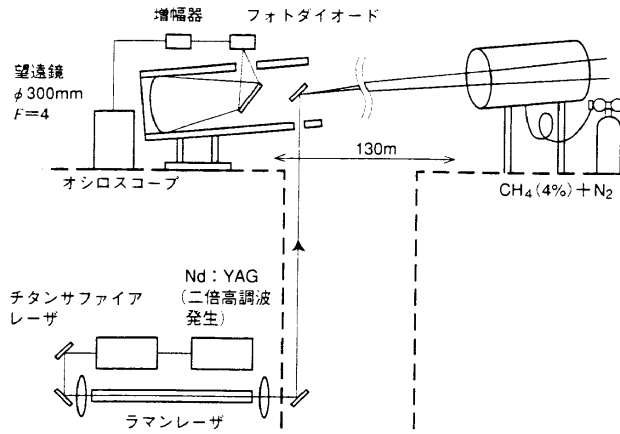


図3 試作プロトタイプ機と試験装置

Prototype DIAL system constructed and experimental setup

下、波長幅(半値全幅)が 0.1 cm^{-1} 、繰返し10 ppsの性能がある。このレーザ光を鏡により後方散乱受光用望遠鏡の光軸と同軸となるように設置した望遠鏡内の鏡に導き、大気中に照射する。

受光望遠鏡は口径300 mm、焦点距離1200 mmのニュートンタイプである。望遠鏡の集光部に $1.67\text{ }\mu\text{m}$ 近傍の波長を透過するバンドパスフィルタを前面に取付けた受光面積 $\phi 1\text{ mm}$ のInGaAs-PINフォトダイオードを設置し、この検知器出力を前置増幅器で増幅した後、オシロスコープにより計測した。

メタンの共鳴、非共鳴波長への同調は別に設けたメタン充てん光音響セル内にレーザ光を導入することによって確認した。

望遠鏡から約130 m離れた位置に設置した、直径0.6 m、長さ4 mのマイラフィルム、アルミの棧で作った両端開放管内に4%メタン混合窒素ガスを漏洩させた。レーザ光が管壁に当たらないよう漏洩管中心を通るように調整し、後方散乱光を計測した。

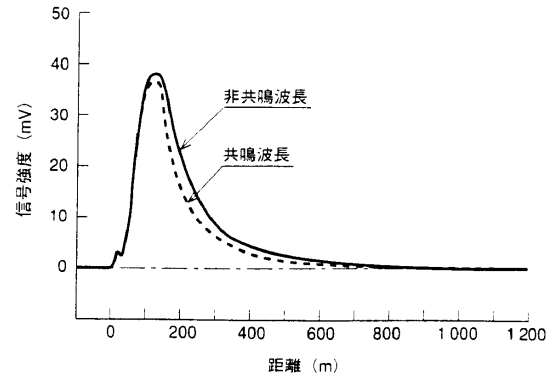
計測結果を図4(a)に示す。本計測はオシロスコープの高分解能モードを使用したものであり、通常の計測と比較し、シングルレーザ光ショットの計測で数十点の時点の積算をしたことに相当する。さらに、S/Nを向上させるため、256ショットの積算を実施した結果である。

本計測結果から、共鳴、非共鳴波長照射間で明らかな差違が130 mの漏洩地点の後に見られる。この信号を処理し、各地点での濃度の計算結果を図4(b)に示す。時間分解能100 nsでの計測であるので、空間分解能は15 mに相当する。図4(b)で誤差棒は式(7)から計算したもので、検出系ノイズ n_d はオシロスコープ上の実測信号から見積ったものである。図4(b)から、本実験条件での全メタン漏洩量は $6000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ であるとの結論が得られる。この濃度は別途実施した漏洩管後方に散乱板を置いて計測した長光路吸収法での計測結果と一致している。

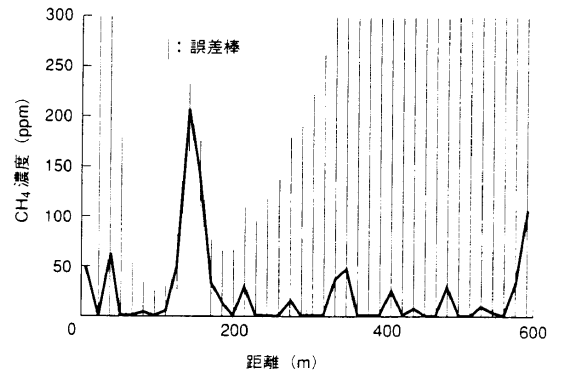
また、図2に示したように、本プロトタイプシステムで130 m位置で $1000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ の検出濃度下限値が得られる。

4. 簡易型 OPO 発振器の開発

光学パラメトリック発振器(以下、OPOと称す)は広帯域の波長可変コヒーレントな光源として有用であり、幾つかのレーザメーカが市販している。OPOでは、共振器内に置いた非線形光学結晶にポンプレーザ光を照射することにより、結晶の非線形効果でエネルギー保存則、位相整合条件を満足するように、シグナル、アイドラと称する2つの異なる波長の光が発振する。共振器にはシグナル光、アイドラ光、又は、その両者の波長に対する



(a) 実測エコー信号



(b) 濃度分布導出結果

図4 共鳴、非共鳴時の実測検知信号と濃度分布導出結果

Mie scattering echos for on- and off- wavelength, and methane distribution derived by signals

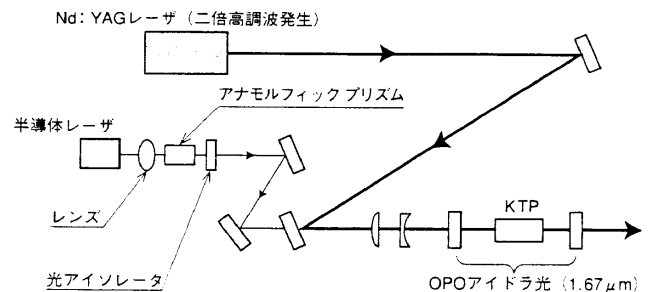


図5 簡易型 OPO システム

Schematic diagram of simplified OPO system

フィードバック制御をかけ、必要出力を得る方式である。OPOシステムの利点は低い入力しきい値で発振し、変換効率が高く、かつ、全固体化が可能であるので、コンパクトにできることである。

一般的にはOPOシステムでの波長掃引は結晶軸とレーザ光軸の角度を動かすか、結晶の温度を変え、位相整合条件を変化させることによって行われている。しかし、この方法では波長掃引制御が複雑であり、また、遅いという欠点がある。さらに、DIAL測定に利用するには波長幅を狭くする必要があり、そのためには、エタロン、グレーティング等の高分散波長選別素子やその制御系が必要となる。

これに対し、本研究で開発した簡易型OPO発振器は、単一モード半導体レーザ光をOPOに注入同期し、発振波長をメタンの吸収帯近傍に特定することによって、共鳴、非共鳴波長の制御を簡単にし、システムをコンパクトにしたものである。

図5に開発した簡易型OPOの概念を示す。Nd:YAG共振器内

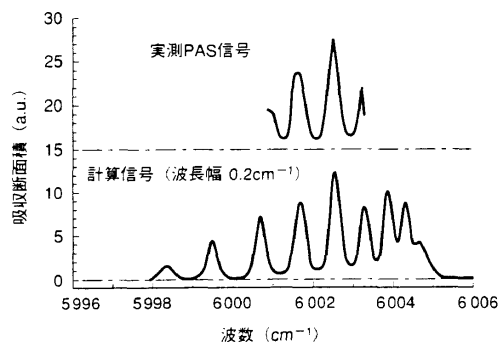


図6 簡易型 OPO を用いて計測したメタン光音響スペクトル
Observed PAS signal using simplified OPO system

にエタロンを挿入し 0.5 cm^{-1} 程度の波長幅とした、Q-スイッチ Nd:YAG レーザの二倍高調波をポンプ光として用いた。OPO 非線形光学結晶としては、3 波長全部に対し無反射コーティングを両端面に施した KTP (KTiOPO_4) を使用した。注入同期用半導体レーザはシグナル光に相当する 781 nm の単一モードレーザで、OPO からの戻り光による不安定性を防御するため、光アイソレータを挿入している。OPO 共振器はアイドラ光に対する単一共振 (SRO) 構成としている。これらの構成からメタンの吸収波長に対応する $1.67 \mu\text{m}$ のアイドラ光が得られる。

半導体レーザによる注入同期がない場合、シグナル光の帯域幅は非常に広く、フリースペクトルレンジ (FSR) 0.5 cm^{-1} のファブリー・ペロ干渉計による計測では干渉じまが得られなかった。注入同期をかけた場合、同じ干渉計で明りょうな干渉じまが得られ、そのときの波長幅は 0.2 cm^{-1} 程度に狭帯域化された。

実際にメタン DIAL 計測に必要なアイドラ光の波長幅を、メタン Q-枝の吸収帯を計測することによって求めた。図 6 に光音響分光法 (PAS) によって計測した結果を示す。上部が実測スペクトルで、下部がレーザ波長幅 0.2 cm^{-1} としたときの計算スペクトルである。レーザ波長の掃引は注入同期半導体レーザの温度を変化させることによって実施した。両者の一致度から、アイドラ光の波長幅は約 0.2 cm^{-1} と計測できた。この間、OPO 結晶軸の角度は固定しており、結晶を回転させなくとも十分な波長範囲が取れることが確認できた。

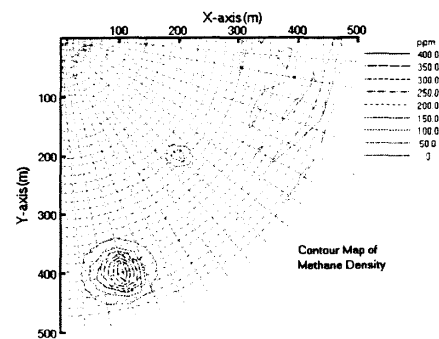
現状の OPO システムだけでも 8 mJ/pulse の出力が得られているが、オプティカルパラメトリック増幅 (OPA) システムと組合せることで、より高出力のレーザ光が得られることを、別途色素レーザ光を注入同期光として使用することによって確認している。

また、半導体レーザは電流を変化させることによって、 μs オーダのスピードで波長掃引が可能であるので、共鳴、非共鳴波長の高速切替えが可能となるとのメリットもある。

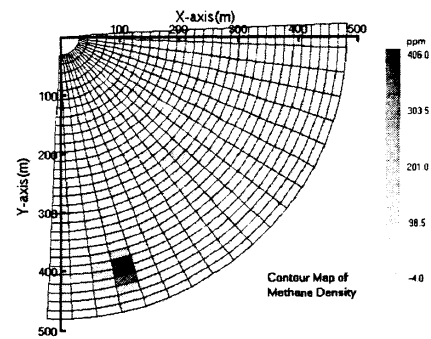
5. 実機 DIAL システム構成

実機として構想している広域メタンガス漏洩検知システムはプロトタイプ機に、以下のような改良を加えたものである。

- ① レーザ発振器には本研究で開発した簡易型 OPO 発振器を用いる。
- ② 検知系をプリアンプ基板上に半導体検知器を組込んだ構造とし、検知系ノイズを低減する。
- ③ 検知器出力をデータ処理用コンピュータに入力し、濃度分布の計算、表示をする。
- ④ 線検知から面検知 (必要なら体検知) とするために、レーザ光軸をスキャンする機構を付加する。
- ⑤ 光軸スキャンや、レーザ波長変更の制



(a) 二次元等高線表示



(b) メッシュによる濃度表示

図7 二次元メタン濃度分布表示
Representation of methane concentration in two dimensional map

御は ③ のデータ処理用コンピュータで行う。

データ処理部は、レーザ光軸角度データと測定された DIAL 信号から濃度分布を表示するソフトを有する。例として、図 7 に $x=100 \text{ m}$, $y=400 \text{ m}$ の位置を中心として、半径 20 m の範囲内に 400 ppm , $x=200 \text{ m}$, $y=200 \text{ m}$ を中心に半径 10 m の範囲内で 150 ppm のメタン漏洩があるフィールドで、 90° の範囲を 5° おきにレーザでスキャンし計測した模擬信号を処理した分布を示す。二次元等高線として分布表示する場合と、測定領域をメッシュに分け分布を濃淡で表す 2 種類のソフトが整備されている。

6. ま と め

メタンガス漏洩検知用レーザレーダシステムを開発した。

- (1) レーダ方程式を基礎としたシミュレーションコードを作成し、ハードの性能、天候等の外部条件から検知信号や検知可能領域の見積り可能とした。
- (2) プロトタイプ機を試作し、メタンガス漏洩検知試験を実施した。その結果、漏洩位置、漏洩濃度共に良好に検出できることを確認した。
- (3) 半導体レーザ光を OPO 共振器内に注入同期することにより、メタンの差分吸収ライダに特化した簡易型 OPO 発振器を開発した。OPA 増幅器と組合せることによって、実機に必要な出力、性能が得られる。
- (4) 実機化に向けて、検出信号から二次元濃度分布を面表示するソフトを開発した。

参 考 文 献

- (1) Ikuta, K. et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38 (1999) pp. 110-114
- (2) Ismail S. et al., Appl. Opt. Vol. 28 (1989) pp. 3 603-3 616
- (3) Rothman, L. S. et al., HITRAN data base 1996.