九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

漏洩メタン検知に用いる近距離高分解能1.67μmDIAL 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院 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1.67µmDIAL 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 μ 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 1.67μ m absorption band. A detection range of various 100m and 1000ppm·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、大気のミー 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 O₃¹や H₂O² 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。この点からどういったシステ 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3.39µm帯⁷⁾ではなく,1.67µm付近に存在する メタンの2 v2 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 タイプの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 μ m 帯の Q 枝線を採用した。1.67 μ m 帯の吸収断面積は 3.39 μ m の約 2 %に過ぎないが、計算の結果から、(1)1000 ppm 程度の濃度では充分な吸収が得られること、(2)大気

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

Table 1 System specification



Fig. 1 Schematic of DIAL system

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 km ぐらいの範囲では大気による干渉やレーザー 光滅衰も考慮しなくて良いということも分かった. さら に、1.67µm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 cm⁻¹程度ま で拡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1.67µm 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が期待できる 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 In-GaAs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 mm ()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 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 D₂ 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 nsFWHM)を, D₂ ガスを充 塡したラマンセル(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, CH₄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 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 mJ の出力を得た.

この出力を用いて送信・受信系より約100m離れた場 所で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 1 mm (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3 mm (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, 大気の流動な 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 の較正値が測定されている. 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1 mm ϕ から3 mm ϕ 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.

$$NEP_{A} = \sqrt{\frac{8\pi k TB^{2}CN}{S^{2}}}$$
(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 $n_a \epsilon \sqrt{NEP^2 + NEP_A^2} / hv$ 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}.

$$\frac{\delta N_m}{N_m} = \frac{1}{2n_m \sigma L \sqrt{m}} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left(\frac{n_{ri}(R_j) + n_b + n_d}{n_{ri}^2(R_j)} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(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 インを仕様に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 In-GaAsPIN 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 pW/ \sqrt{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 mm¢ 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

	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 [pW/Hz ^{1/2}]	0.18	0.11	—
Total <i>NEP</i> [pW/Hz ^{1/2}]			0.18
Bandwidth [MHz]	10.0	3.0	3.6

 Table 2
 Characteristics of Infra-Red detectors

このエコー波形をみると0~200mの範囲ではエコー

が1/R²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 mm *d* 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 mm 4 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 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, 13.1mm)および入手しやすい石英(SQ)の両凸 レンズ(曲率半径 r=23.0mm)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 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 程度であるとすると,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・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.1.67µm 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, <0.3cm⁻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 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, 1.67µm 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-SRO(Singly Resonant Oscillator)を採用 した。出射鏡反射率は83%@1.67µm 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(50mmø, 40dB)を通して OPO 共振器に入射した。 OPO には KTP 結晶(KTiOPO₄, 4×4×15mm³)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60MW/cm²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

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 出力をメタンを充塡した光音響セ 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 μ 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. 9 Output energy of OPO corresponds to the injection power



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.
- 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.
- Toriumi, R., Tai, H. and Takeuchi, N.: Opt. Eng., 35, 8 (1996), 2371-2375.
- 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.
- 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.
- Prasad, N. S. and Geiger, A. R.: Opt. Eng., 35 (1996), 1105.
- 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).

- 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.
- 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.*.
- 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.