高高度まで測定可能な CO2 観測用ライダー

長澤親生

Lidar Technique for Measurements of CO₂ Concentration Profiles to High Altitudes from Ground

Chikao NAGASAWA

Atmospheric carbon dioxide (CO_2) is presently understood as the most anthropogenic contribution to the greenhouse effect. Knowledge of its spatial and temporal distributions of CO_2 and an understanding of the causes of these variations are essential to predict future CO_2 levels and their effect on climate change. Differential absorption lidar (DIAL) potentially offers several advantages over passive techniques for remote CO_2 sensing. This review describes current lidar techniques on atmospheric CO_2 measurements and our 1.6 μ m DIAL technique that consists of an optical parametric generator transmitter that is excited by an LD pumped Nd:YAG laser with a high repetition rate and receiving optics that include a near-infrared photomultiplier tube with high quantum efficiency operating at the photon counting mode.

Key words: lidar, CO₂, differential absorption lidar (DIAL), carbon dioxide

人為起源の温室効果ガス中で、最も大きな影響を及ぼす 二酸化炭素(CO₂)の地球規模での排出量と吸収量を定量 的に把握することは、地球温暖化現象を解明する上ではき わめて重要であるにもかかわらず、いまだ十分に把握でき ていないのが現状である. 大気科学の研究分野では、この ような CO₂の収支の解明のため、インバース法(逆解法) とよばれる大気中の物質輸送モデルを用いた数値シミュ レーションが行われている¹⁾. インバース法の拘束条件と して、これまでおもに地表近くでのCO2の濃度観測データ が使われてきた。最近では、計算精度の向上をめざし、地 上から太陽光のCO2吸収スペクトルをフーリエ変換分光器 (Fourier transform spectrometer; FTS) により測定し,地 表から上空までのCO2濃度の平均値である気柱平均濃度を 得る観測や、比較的観測データの少ない海洋上や砂漠地帯 のデータを得るために、人工衛星に搭載した FTS による CO₂の気柱平均濃度の観測も行われている²⁻³⁾.さらにCO₂ の高度分布を得る方法としては、航空機を利用したCO2の 高度分布観測が行われている⁴⁾.特に長期間にわたる定期 航空機を用いた CO2 濃度の高度分布の観測データは、CO2

の収支の見積値において従来の結果を大きく書き換えるも のとなっているが、このような定期航空機による観測デー タだけでは前記インバース法の拘束条件としては不十分で あり、航空機観測では測定困難なCO2濃度の高度ごとの比 較的短時間の変動や三次元空間分布などを測定することが 可能な装置の開発が求められている⁵⁾.

このような目的には、レーザーを光源とする能動的リ モートセンシング手法であるライダー(lidar: light detection and ranging)の利用が考えられる.ライダーは先に述 べた FTS のような太陽光を光源とする受動的手法に比 べ、高度分解能を得ることにすぐれ、また光路上のエアロ ゾルの影響が軽減される特徴を有する.しかしながら、 CO₂ は大気中での滞留寿命が長いことから大気中での濃度 変動量が少なく、その測定においては少なくとも1%の測 定精度が求められるため⁶⁾、これまで高度分解能を得るラ イダーより高い測定精度が得やすい気柱平均濃度を測定目 標とするパルスレーザーを用いた長光路差分吸収ライダー (integrated path differential absorption lidar; IPDA-lidar), および連続発振レーザーを用いたレーザー差分吸収分光計

首都大学東京システムデザイン学部(〒191-0065 日野市旭が丘 6-6) E-mail: nagasawa@tmu.ac.jp



図1 DIALの概念図と吸収線における on 波長と off 波長.

(laser differential absorption spectrometer; LAS) が先行し て研究されてきた⁷⁾.

本稿では、ライダー本来の高度分解能をもつ CO_2 濃度観 測用ライダーの国内外の開発状況と、筆者らのグループが 開発した Nd: YAG レーザーの基本波を励起源とした光パ ラメトリック増幅器 (optical parametric amplifier; OPA) を送信源とする CO_2 濃度の対流圏上部までの高度分布観測 を可能にした差分吸収ライダー (differential absorption lidar; DIAL) について概説する⁸⁾.

1. 差分吸収ライダー (DIAL)

一般にライダーは、パルスレーザーを大気中に発射し、 大気分子や大気中に浮遊するエアロゾルなどの微粒子から の散乱光を受信することにより、その受信信号強度やその スペクトルから散乱体の濃度や物理情報(気温、気圧、風 速など)を得るものである.また、その際同時に送受信信 号の往復時間を元にして、位置情報も得ることができる. ライダーはレーザーと散乱体との相互作用の種類により、 ミー散乱ライダー、ラマン散乱ライダー、差分吸収ライ ダー (DIAL) などに種別されている⁹⁾.ライダーの受信強 度*S*(*R*)は、次に示すようなライダー方程式とよばれる式 により表される.

$$S(R) = \frac{PA\Delta R}{R^2} \beta(R) O(R) \exp\left\{-2\int_0^R \alpha(r) dr\right\}$$
(1)
$$\hbar \tau \tilde{\tau} \mathcal{L}, \quad \alpha(r) = \alpha_{air} + \sigma(T, p) N(r)$$

ここで、Pはレーザー出力、Aは受信鏡面積、 ΔR は距離 分解能、Rは送信点からの距離、 $\beta(R)$ は大気の後方散乱 係数、O(R)は送受信視野の重なり関数、全大気の消散係 数 $\alpha(R)$ は大気分子による消散係数 α_{air} と吸収体の吸収断 面積 $\sigma(T, p)$ 、吸収体の個数密度N(R)である。また、T, pは測定対象域での気温と気圧を示す。

DIALの基本的な原理は、図1に示すように、測定対象 とする分子の吸収線の強い吸収波長(on波長)と弱い吸収 波長(off波長)に同調した2波長のレーザーを同時または



図2 近赤外域における CO₂の吸収線分布.

交互に送信することにより得られる,2波長それぞれの受信光のライダー方程式から,下記のような測定対象の個数 密度 *N*(*R*)を導くことができる.

$$N(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma(T, p)\Delta R} \ln\left(\frac{S_{\rm off}(R + \Delta R)}{S_{\rm off}(R)} \frac{S_{\rm on}(R)}{S_{\rm on}(R + \Delta R)}\right)$$
(2)

ただし、 $\Delta \sigma$ は on, off 2 波長の吸収断面積の差、 $S_{on}(R)$ 、 $S_{off}(R)$ は、それぞれ on, off 各波長におけるライダーの受信信号強度を示す。

2. これまでの経緯

これまで開発されてきた代表的な DIAL としては,成層 圏までのオゾン濃度分布を測定する O_3 -DIAL や,対流圏の 水蒸気濃度分布を測定する H_2O -DIAL がある. O_3 -DIAL は紫外域の O_3 分子の広い連続的な吸収帯を利用するもの で,送信レーザーとして,精密同調を必要としない各種エ キシマーレーザーの組み合わせやラマンレーザーが使われ た^{10,11)}.それに対して H_2O -DIAL は,近赤外の波長 700~ 900 nm 付近の櫛歯状の吸収線が利用された¹²⁾. H_2O の吸 収線は線幅が 10 pm 程度と狭いことから,送信レーザーの 狭帯域化と精密な同調技術が必要であった.したがって, 送信レーザーとしては,色素レーザーや波長可変固体レー ザーが利用された.

 CO_2 分子の吸収帯は、図2に示すように、赤外領域の波 長 1.6 μ m 帯、2.0 μ m 帯、10 μ m 帯に櫛歯状に存在する. この中から上部対流圏まで測定可能な CO₂-DIAL に最適な 波長を選択するには、検討すべきいくつかの課題があっ た.まず、onまたは off 波長周辺に CO₂分子以外の分子の 吸収線がないことが重要である。特に、CO₂分子に比べ大 気中に多量に存在する H₂O の吸収線が存在しない領域 が、CO₂-DIAL の送信レーザーの波長として選択される。



図3 1.6 µm 帯における CO₂ と H₂O の吸収線.

その他の重要な視点としては、高感度な受光センサーの存在と、 CO_2 -DIALの送信レーザーとして利用可能な波長可変レーザーがあげられる. $10 \mu m$ 帯の $CO_2 吸収線は温度依存性が高いため、気温構造の変動が大きい高高度までの<math>CO_2$ -DIALにおいては、測定精度を劣化させる¹³⁾.

2.0 µm 帯は光検出器として用いる InGaAs の PIN フォト ダイオードの雑音等価電力 (noise equivalent power; NEP) が大きいため、受信系としてはヘテロダイン (heterodyne)検波方式をとる必要がある¹⁴⁾. ヘテロダイン検波方 式においては、コヒーレント効率を維持するために受信鏡 径が10 cm 程度以下に制限されるため、精度の高い観測は エアロゾルによる強いミー散乱信号強度が期待できる対流 圏下部に制限される. この方式により, NASA の Koch ら が CO₂-DIAL を開発しているが、測定高度は 500 m 程度で ある¹⁵⁾、送信レーザーとしては、Tm, Ho:LuLiFをLDで 直接励起した固体レーザーが光源として用いられているた め,90 mJ/pulse と比較的高出力が得られているが,2.0 μm帯のCO。吸収線の多くはDIALにとって吸収断面積が 大きすぎるため, on 波長を選択する際, 吸収線のピーク 波長から少しずらした波長に設定する必要がある.また, 繰り返し周波数が5Hzと低速なため、大気中のエアロゾ ル変動の影響を受けやすいものと思われる。同様の手法 で、仏国の Gibert らが高度 2 km 程度までの測定を試みて いる16)

3. 高高度観測用 CO₂-DIAL の開発

 CO_2 の波長 1.6 μ m の吸収帯では、図3に示すように、 H₂O の吸収線を避けて CO₂-DIAL の on/off 波長を設定する ことが可能であり、吸収断面積も 2.0 μ m 帯に比べ小さい ことから、高高度までの測定に適合することが考えられ る。受光センサーに関しても、これまで量子効率の低い光 電子増倍管(photomultiplier tube; PMT)しか入手できな かったが、最近可視域の PMT と遜色のない量子効率をも つ PMT が入手可能になったことから, PMT を用いた光子 計数法を使った直接検波方式が近赤外 DIAL に有効と考え られる. 直接検波方式は, ヘテロダイン検波方式では難し い大口径の受信鏡の利用が可能であり, 高高度まで観測可 能な CO₂-DIAL 開発には好都合である. しかしながらこの 波長域では, CO₂-DIAL の送信器に適したナノパルス出力 と波長同調性にすぐれたレーザーが見当たらなかった.

われわれは1.6 μm帯のCO₂-DIALの送信光源として、擬 似位相整合 (quasi phase matching; QPM) デバイスである PPMgLT (periodically-poled Mg-doped LiTaO₃) を用いた OPO (optical parametric oscillator) のシグナル光を利用 し、出力は5 mJ/pulse, 繰り返し周波数 100 Hz (平均出力 0.5 W)を得た⁸⁾. この段階の CO₂-DIAL ではフラッシュラ ンプ励起 Nd: YAG レーザーでポンプした OPO を用いてい たが、最近では、LD (laser diode) 励起の Nd: YAG レー ザーポンプ光を使用し、OPO に換えて ramp-and-fire 技 術¹⁷⁾による波長安定化手法をとる必要のない OPA (optical parametric amplifier)を用いることにより送信出力を得て いる. ramp-and-fire 技術は、共振器のレーザー媒質がポ ンプ光のエネルギーによって加熱された結果、共振器長が 変化することにより発生する縦モード変動を補償する技術 であるが、CO₂-DIALのような高い波長制御の精度を要求 するシステムの場合,難しい技術であった。一方, OPA は共振器をもたないため、容易にシーダー光による波長制 御および狭帯域化が可能である. OPA のシグナル光を DIALの送信レーザー光とするためには、CO2吸収スペク トルの中心波長ヘシグナル光を精度よく同調させることが 重要である。シグナル光を波長制御するために、ポンプ光 のパルスNd: YAG レーザーとシグナル光の OPA にそれぞ れ波長安定化したシーダー光が使われる.パルスNd: YAG レーザーのシーダー光として,Nd:YAG レーザーの 第二高調波である波長 532 nm 近傍のヨウ素吸収線を利用 して波長安定化した波長1.06 μmのCW Nd: YAG レーザー を用いている.パルスNd:YAG レーザーの出力は最大 100 mJ/pulse, 繰り返し周波数は 500 Hz, ビームは TEM₀₀ モードである.

CO₂-DIALの送信レーザーのシステムの概要を図4に示 す.OPAのシーダー光として,CO₂セルを使って吸収線 のピークに同調したon波長用のDFBレーザーと,off波長 用のDFBレーザーを用いている.on波長とoff波長のシー ド光は,光ファイバースイッチにより1ショットごと(250 Hz)という速い切り替え速度を実現し,エアロゾルや大 気分子の変動の影響を抑制している.また,OPAの後に 出力を増幅させるために,増幅段を加えている.この結



図4 TMU-CO₂-DIAL の送信系のブロック図. HT: 高透過, HR: 高反射.

表1 TMU-CO₂-DIALの諸元.

	初期 CO2-DIAL	次世代 CO ₂ -DIAL
レーザー出力	5 mJ/pulse	20 mJ/pu1se
パルス線り返し	100 Hz	500 Hz
on/off切替速度	5 s	2 ms
周波数安定度	$\pm 40~\mathrm{MHz}$	$\pm 10~\mathrm{MHz}$
望遠鏡直径	35 cm	60 cm
干渉フィルター (半値全幅)	10 nm	0.5 nm
量子効率	2.5%	8.0%

果, on 波長(1572.018 nm)で最大出力 20 mJ/pulse, 平均 出力 10 Wを得ており, OPO に対してパルス当たりで4倍, 平均出力で 18 倍の高出力化を実現し,対流圏上部まで測 定可能な CO₂-DIAL に目途を付けた.表1に初期のシステ ムとの諸元の比較を示す.波長安定度は on 波長に対し, 波長計(HighFinesse WS7-IR)の絶対精度 0.15 pm (40 MHz)をしのぐ安定度を示した.この安定度は CO₂-DIAL 観測を行う上で十分な安定度である.

TMU-CO₂-DIAL の受信望遠鏡で集光された散乱光 は,近赤外域で 2%および 8%の量子効率をもつ PMT (H10330A-75: HAMAMATSU)と、光子計数処理装置によ り処理される。半値全幅 0.5 nm の干渉フィルターを用い ることにより、背景光が大幅に除去され、昼間の観測も可 能となっている。受信信号のダイナミックレンジを広げる ために、上層 (high mode)は直径 60 cm のナスミス型反 射望遠鏡を、下層 (low mode)は直径 20 cm のマクストフ カセグレン型反射望遠鏡を用いている。

現在, TMU-CO₂-DIAL を用いた試験的な観測実験を 行っている.レーザーはきわめて安定しており,昼夜の連 続観測も可能である.ただ,長時間の観測に用いる際に は,耐久性を考慮して,レーザー出力を半分程度に抑えて いる.on 波長と off 波長の受信信号からバックグラウンド



図5 各高度からの on 波長と off 波長の受信強度例.



図 6 CO₂-DIAL を用いた CO₂ 濃度の観測例.

ノイズを差し引いたデータ例を図5に示す.on/off 波長は 2 ms (1ショット) ごとに切り替えながら,7.5 mの距離分 解能で,5分間の積算したものを元データとし,図5は 6 ファイル積算したものである.この図で,高度1~2 km および高度3~4 km の突起は,大気中のエアロゾル層に 起因するものである.このデータからCO₂濃度の高度分布 を式(2)を用いて導いた結果を図6に示す.受信系のダ イナミックレンジを維持するために,受信望遠鏡の大きさ を変えることによって,低高度用と高高度用にデータを分 けることができる.図6は高高度用の測定結果である.観 測時間は32分程度を要している.さらに時間を積算する ことにより,高度10 km くらいまでの測定は可能である. 図6に示した観測例の高度分解能は900 m であるが,高度 2 km 以下の測定では高度分解能を100 m,時間分解能を 15分程度で,測定精度を劣化させずに測定が可能である.

 CO_2 -DIAL により高精度に CO_2 濃度を導出するには,下 記のような 2 つの主要な課題がある.ひとつは,式(1) でわかるように, DIAL で求められるものは単位体積中の CO_2 分子の個数密度であり,先に述べたインバース法で用 いている混合比 (ppm)とは異なるものである.したがっ



図7 CO₂吸収スペクトル. T=248.15, 268.15, 288.15, 308.15 [K], p=1.0 [atm].

て、ppm に変換するには、観測時の大気密度を必要とす る. これまでは、便宜的に DIAL の観測点付近でほぼ同時 に観測されるバルーンゾンデ観測により得られる気温,気 圧を用いて ppm への変換処理を行っている。吸収強度が 気温にできるだけ鈍感なCO2分子の吸収線を選択しても, 図7に示すように、吸収曲線のプロファイルは気温によっ ても変化する。CO2観測濃度の精度をさらに上げるために は、気温・気圧との同時観測も必要である。われわれは、 CO2の吸収線の広がりの気温依存性を利用した気温の同時 観測を行う予定である。もうひとつは、一般に DIAL にお いては, on 波長と off 波長の同時観測は難しい. したがっ て大気の散乱体であるエアロゾルや大気分子の変動の影響 を無視するためには, on 波長と off 波長のできるだけ速い 切り替えが必要である。鉛直上方の観測だけであれば、わ れわれのような 250 Hz の切り替え時間の速さで十分であ るが、観測方向を水平に近づけるにつれて、水平風による 散乱体の速い動きが問題となる. そのような場合に対処す るためには、送信レーザーのon/offパルスペアの時間間隙 を 200 µs 程度に短くしたダブルパルスの送信システムが 必要になるものと思われる.

最近, NASA の Abshire などは,将来の人工衛星搭載を めざし,航空機からの波長 1.6 μ m 帯の OPO を利用した IPDA-lidar により CO₂の気柱平均濃度測定の実験に成功し ている¹⁸⁾. 日本の JAXA なども,波長 1.6 μ m 帯における連 続レーザーを用いた LAS による CO₂の気柱平均濃度の観 測に成功している^{19,20)}.

このように、ライダーを用いた CO₂濃度測定ライダーは 航空機や衛星搭載を目的とした気柱平均濃度の観測用ライ ダーに重点が置かれ、われわれの開発した CO₂-DIAL のよ うな高度分解能や距離分解能をもつライダーは次世代の CO₂-DIAL と考えられているが,地上から高高度までの CO₂ 濃度分布の観測には十分その威力が実証できたものと 考えている.

CO₂-DIAL はまだ開発途上にあり,解決すべき課題は多 く残っているが,バックグラウンド大気中のCO₂濃度を測 定時に汚染することなく濃度分布の時間的推移を連続して 観測することができることや,CO₂排出源の近傍の空間的 分布の観測など,他の手法ではなし得ない観測データの取 得が可能である.これらのデータの蓄積は地球温暖化の予 測精度を上げることに貢献するものと思われ,なお一層の 実用的な CO₂-DIAL の開発が望まれる.

本文をまとめるにあたり,資料作成などにご協力いただ いた首都大学東京の阿保真教授,柴田泰邦助教に深謝しま す.なお,首都大学東京のCO₂-DIALシステムの開発は, 文部科学省「地球観測システム構築推進プラン」および, 科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業」に より行われた.

文 献

- K. R. Gurney, R. M. Law, A. S. Denning, P. J. Rayner, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y. H. Chen, P. Ciais, S. Fan, I. Y. Fung, M. Gloor, M. Heimann, K. Higuch, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, K. Masarie, P. Peylin, M. Prather, B. C. Pak, J. Raanderson, J. Sarmiento, S. Taguchi, T. Takahashi and C. W. Yuen: "Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport model," Nature, **415** (2002) 626– 630.
- 2) H. Ohyama, I. Morino, T. Nagahama, T. Machida, H. Suto, H. Oguma, Y. Sawa, H. Matsueda, N. Sugimoto, H. Nakane and K. Nakagawa: "Column-averaged volume mixing ratio of CO₂ measured with ground-based Fourier transform spectrometer at Tsukuba," J. Geophys. Res., **114** (2009) D18303.
- A. Kuze, H. Suto, M. Nakajima and T. Hamasaki: "Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring," Appl. Opt., 48 (2009) 6716– 6733.
- 4) H. Matsueda, T. Machida, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirotani, H. Ikeda, N. Kondo and K. Goto: "Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask air sampling of JAL airline observations," Papers in Meteorol. Geophys., **59** (2008) 1–17.
- 5) B. B. Stephens, K. R. Gurney, P. P. Tans, C. Sweeny, W. Peters, L. Bruhwiler, P. Ciais, M. Ramonent, P. Bousquet, T. Nakazawa, S. Aoki, T. Machida, G. Inoue, N. Vinnichenko, J. Lloyd, A. Jordan, M. Heimann, O. Shibistova, R. L. Langenfelds, L. P. Steele, R. J. Francey and A. S. Denning: "Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂," Science, **316** (2007) 1732–1735.
- P. J. Rayner and D. M. O'Brien: "The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversion," Geophys. Res. Lett., 28 (2001) 175–178.
- 7) 長澤親生: "大気中の CO₂ 濃度観測用ライダー開発の現状", レーザー研究, **39** (2011) 585-589.
- 8) D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M.

Nakazato and T. Sakai: "Development of a 1.6 μ m differential absorption lidar with a quasi-phase-matching optical parametric oscillator and photon-counting detector for the vertical CO₂ profile," Appl. Opt., **48** (2009) 748–757.

- 9) 日本リモートセンシング学会編:基礎からわかるリモートセンシング(理工図書, 2011) pp. 16-18.
- O. Uchino, M. Maeda, J. Kohno, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hirono: "Observation of stratospheric ozone layer by a XeCl laser radar," App. Phys. Lett., 33 (1978) 807–809.
- M. Nakazato, T. Nagai, T. Sakai and Y. Hirose: "Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide," Appl. Opt., 46 (2007) 2269–2279.
- E. V. Browell, T. D. Wilkerson and T. J. Mcllrath: "Water vapor differential absorption lidar development and evaluation," Appl. Opt., 18 (1979) 3474–3483.
- 13) A. M. Robinson, M. Parameswaran and S. Ghufran: "Temperature variation of linewidth of the CO₂ laser P(16) transition," Appl. Opt., **25** (1986) 3843–3845.
- 14) G. J. Koch, B. W. Barnes, M. Petros, J. Y. Beyon, F. Amzajerdian, J. Yu, R. E. Davis, S. Ismail, S. Vay, M. J. Kavaya and U. N. Singh: "Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂," Appl. Opt., **43** (2004) 5092–5099.
- 15) G. J. Koch, J. Y. Beyon, F. Gibert, B. W. Barnes, S. Ismail, M. Petros, P. J. Petzar, J. Yu, E. A. Modlin, K. J. Davis and U. N. Singh: "Side-line tunable laser transmitter for differential absorp-

tion lidar measurements of CO_2 : Design and application to atmospheric measurements," Appl. Opt., **47** (2008) 944–956.

- 16) F. Gibert, P. H. Flamant, J. Cuesta and D. Bruneau: "Vertical 2-μm heterodyne differential absorption lidar measurements of mean CO₂ mixing ratio in the troposphere," J. Atmos. Oce. Technol., **25** (2008) 1477–1497.
- 17) G. J. Koch, M. Petros, J. Yu and U. N. Singh: "Precise wavelength control of a single-frequency pulsed Ho:Tm:YLF laser," Appl. Opt., 41 (2002) 1718–1721.
- 18) J. B. Abshire, H. Riris, G. R. Allan, C. J. Weaver, J. Mao, X. Sun, W. E. Hasselbrack, S. R. Kawa and S. Biraud: "Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric CO₂ column absorption," Tellus, **62B** (2010) 770–783.
- 19) D. Sakaizawa, S. Kawakami, M. Nakajima, Y. Sawa and H. Matsueda: "Ground-based demonstration of CO_2 remote sensor using a 1.57 μ m differential laser absorption spectrometer with direct detection," J. Appl. Remote Sens., **4** (2010) 043548.
- 20) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa and M. Nakajima: "Performance improvement and analysis of a 1.6 μ m continuous-wave modulation laser absorption spectrometer system for CO₂ sensing," Appl. Opt., **50** (2011) 1560–1569.

(2011年11月14日受理)