

機関番号：82109

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340130

研究課題名（和文） 二酸化炭素の鉛直分布測定のための実用ライダー技術の開発

研究課題名（英文） Development of the practical lidar technique for the carbon dioxide vertical profile measurement.

研究代表者

永井 智広（NAGAI Tomohiro）

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：30343891

研究成果の概要（和文）：大気中の二酸化炭素の鉛直分布を測定するライダーの実用の妨げとなっている2つの技術、高感度の受信部及び高出力の送信レーザーの開発を行った。受信部については、近年開発された高感度の素子を用いた受信部を開発し、固体検出素子を用いた光電子計数法の受信部の実用化の目処をつけた。送信レーザーについては、利得の高い素子を用い、共振器を使用しない光パラメトリック発生器方式を考案して実験用の装置を試作し、大出力を得ながら高い波長安定度を持ち、実用上十分な性能が得られることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Two technical issues for the practical lidar to measure the vertical profile of the atmospheric carbon dioxide (CO₂) are remained. One is the receiving system with high sensitivity and the other is the stable laser with high power output. To solve these issues, two technical development were executed. For the receiving system, the receiver using the highly sensitive new solid state device, which is developed quite recently, are developed and the device are confirmed to be adopted into the lidar receiver. The optical parametric generator laser with out any resonator using the high gain device is newly developed for the transmitter. The experimental system has the very high power output with very high stability. The output power and the stability of the system are confirmed to be usable for the CO₂ lidar system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
21年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
22年度	3,100,000	930,000	4,030,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・降水学

キーワード：二酸化炭素／ライダー／二酸化炭素鉛直分布／地球温暖化／光パラメトリック発生器／差分吸収法/DIAL

1. 研究開始当初の背景

進行する地球温暖化に対し、有効な対策を立て実行することが、社会的に喫緊の課題となっている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）においても、2007年に第4次評価報告書が発出され、温暖化に関する科学的理解

が記述されている。

温室効果気体のうち、フロンや六フッ化硫黄など先進国での工業的発生源が主な成分は、統計的に把握しやすい。しかしながら、温暖化に最も大きなインパクトを持つ二酸化炭素（以後CO₂とする）については、人為的な排出のみでなく自然界でのソース・シン

クも複雑なため、現状把握にすら大きな不確定性があり、予測の信頼性を低下させている。にもかかわらず、CO₂の観測は地上観測に極度に偏在し、鉛直分布の空間的・時間的密度は不十分なのが現状である。

一方、数値モデルの開発が進み、全球大気輸送モデルを用いてその立体的な分布を推定することが行われている。CO₂などの温暖化気体のソース（排出・発生）・シンクを把握する方法として、大気中の分布の測定結果から全球大気輸送モデルを用いて、その強度を推定する方法が開発されてきている（インバース法）。この方法によるソース・シンクの推定には、大気中のCO₂の空間分布を高頻度・広域・高精度で測定する必要があるが、現状では、モデルの拘束条件に不可欠な鉛直方向の情報が決定的に不足している。最近の研究では、鉛直分布の観測結果は、地上観測など比較して非常に少ないにもかかわらず、推定結果には大きな影響を及ぼすことが知られてきている（Stephens et. al., 2007）が、現状で行われている商用航空機やバルーン、高地観測所などの観測のみではモデルの拘束条件としては不十分である。

このように、CO₂の鉛直分布の観測は、はなはだ不十分であるのが現状である。総合科学技術会議の「地球観測の推進戦略」においても、地球温暖化に係る温室効果ガスについて、全球的あるいはアジア・オセアニア域を包括的に観測し、将来予測の不確実性を削減することがうたわれている。このために、地上・洋上観測ネットワーク、民間航空機等による「温室効果ガス高度分布観測ネットワーク」を整備することとされている。さらに、「全球地球観測システム10年実施計画」のなかでも、気候変動の理解や予測などのために、CO₂を初めとする温室効果ガスの「新たな」観測手法の開発が求められている。

光を使ったりリモートセンシングの手法の一つであるライダーは、地上からの遠隔測定により、CO₂の鉛直分布を他の手法では得られない高鉛直分解能で時間的に連続して観測することが可能であり、上記の「温室効果ガス高度分布観測ネットワーク」のなかで有効な測器となる。数値モデルを用いてソース・シンクを推定する際、地上観測や現在行われている鉛直分布観測に加えることで、推定精度の向上に極めて有効に働くと考えられ、緊急に開発を行う必要がある。

2. 研究の目的

二酸化炭素の鉛直分布を遠隔測定するライダーに残されている課題は、大きく分けて、

1. 固体検出素子を用い、量子効率が高く低雑音の光子計数法の受信部
2. レーザーの高出力化

の2つがある。これを解決するため、本研究

課題では、

- ①光子計数法での実用的な受信部の開発のため、高感度である反面、受光面の狭い光子検出用の固体検出素子に、大口径の受信鏡からの微弱な受信光を効率よく導入する技術
- ②波長安定性に優れたレーザーの大出力化のための技術

を開発し、

- ③気象観測用鉄塔や商用航空機による鉛直分布観測等との比較を通じた観測精度の検証

を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、平成19年度までに先行研究で行ってきた基礎開発で培った技術と設備・装置を活用し発展させ、実用化への道筋をつける。実用化に向け、先行研究で残された主な課題は、

1. 受信部：固体検出素子を用い、量子効率が高く低雑音の光子計数法の受信部
2. 送信部：レーザーの高出力化

であり、この課題の解決のため以下のような計画で研究を行う。

(1) 受信部の開発

先行研究において、口径比(F)の小さな明るい主鏡と光ファイバーを用いた高効率の受光系を開発したが、高感度の固体検出素子の制限から、十分な性能を持った受信系の開発はA/D変換を用いた検出法に限られていた。このため、高高度まで十分な精度で観測するために必要な光子計数法のための検出器(InGaAs APD (avalanche photodiode))を用いた受信部については、検出器が小口径であるところから効率や受光視野角が不十分であり、また、APD特有のアフターエフェクトを避けるための電子回路の開発などの課題が残っている。このため、大口径の光ファイバーから小口径の検出器に効率よく受信光を導く特殊な光学系を設計し、これを開発する。

固体検出素子を使用して光子計数法を用いて観測するために必要となる外部回路などを開発し、光子計数法を用いた受信システムを完成させる。

(2) 送信部の開発

送信用レーザーについて高い波長安定性を維持したまま高出力化をはかるため、先行研究で開発した光パラメトリック発振器(Optical Parametric Oscillator : OPO)レーザー装置を用い、高出力に適した発振用結晶の調査・選定、選定した結晶を用いた発振実験を行う。開発した装置を用い、出力特性、波長安定性などを調べる。

開発したOPOレーザーについて、その耐久性や出力の経時劣化など、長期使用時に問

題となる特性を調べる。

(3) DIAL システム構築及び試験観測

独立して開発した送信部及び受信部、及び先行研究で開発した装置を組み合わせ、CO₂ 観測用 DIAL (Differential Absorption Lidar : 差分吸収法ライダー) を構築する。気象研 (つくば) において構築した装置を用いた試験観測を行う。

(4) データ検証

気象研究所が気象観測用鉄塔 (高度 200m) で行っている観測や、環境研究所、気象研究所、日航財団が共同で行っている商用航空機 (JAL) の成田空港を離着陸する際の観測結果などとの比較を行い、観測精度の検証を行う。

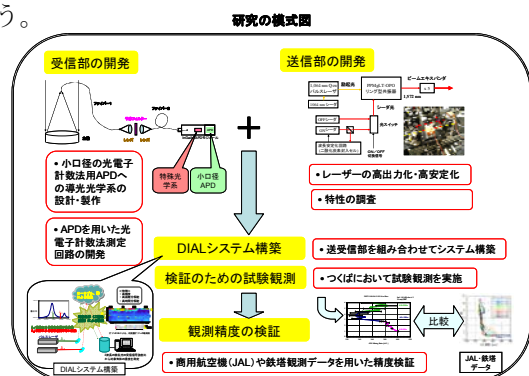


図 1 本研究の模式図

4. 研究成果

(1) 受信部の開発

ライダー受信用として使用が可能な固体検出素子としては、従来より InGaAs APD が使用されていた。しかしながら、アナログ検出では雑音が多く、また光子検出用としても、アフターエフェクトの影響から実効的な感度があげられないなどの問題があり、高感度の光子計数法のライダー受信部に使用することは不可能であった。

本研究では、近年になって (素子によっては本研究開始以降) 入手可能となった自己増幅型の固体検出素子 (Near InfraRed Discrete Amplification Photon Detector : NIRDAPD) について、ライダー受信用としての特性を調べた。表 1 に本研究で入手した固体検出素子 (NIRDAPD と NIRDAPD TEC (Thermo Electric Cooled)) の特性を示す。光電子増倍管 (Photo-Multiplier Tube : PMT) は従来より紫外及び可視の波長域でよく使われる素子であるが、近年、赤外の波長側に感度を持たせた素子が開発されてきているため、比較のために載せてある。これから分かるように、NIRDAPD の量子効率 (Photon Detection Efficiency) は最大 16% と高く、ライダー受信用として十分な感度を持っている。

この素子を用いた受信部を製作し、受信実験を行った。図 2 に開発した装置の写真を示す。NIRDAPD は、リニアモードで動作する

表 1 NIRDAPD と光電子増倍管(PMT)の特性

	NIRDAPD	NIRDAPD TEC	PMT
Manufacturer	Amplification Technologies		Hamamatsu Photonics
Parts Number	NIRDAPD	NIRDAPD TEC	H10330-75
Type	NIRDAPD	Thermo-electrically cooled NIRDAPD	Head on PMT (InP/InGaAs Cathode)
Chip Size	700 × 700 μm		N/A
Active Area	Φ 200 μm		Φ 1.6 mm
Photon Detection Efficiency	8-16 % @ 1550 nm		2 % (available up to 10%)
Response Range	900 - 1700 nm		950 - 1700 nm
Pulse Width (FWHM)	0.7 ns		N/A
Rise Time	N/A		0.9 ns
Fall Time	N/A		1.7 ns
Typical Gain (M)	2 × 10 ⁵	8 × 10 ⁴	1 × 10 ⁶
Excess Noise Factor	< 1.05		N/A
Time Resolution	typ 300 - 500 ns	N/A	N/A
Dark Count Rate	typ. 10 - 60 Mcps	typ. 1 - 10 Mcps	typ. 0.2 Mcps
Operating Bias/Voltage	50 - 60 V		-900 V
Cooling	None	two stage peltiert cooler	Thermoelectric (Forced Air Cooling)
Temperature	N/A	Room to -30 °C	-60 °C
Package (size in mm)	TO-5 (Φ 9.1 × 5.1)	TO-8 (Φ 15.2 × 8.4)	100 × 186 × 150 102 × 131 × 280

APD をアレイにして利得を高めているため、通常、光電子係数方で信号検出をする際の APD の使い方であるガイガーモードで動作させる場合と異なり、アフターエフェクトが極めて小さく、クエンチング回路などの外部回路を必要としないことが大きな特徴である。このため、回路が簡単になるだけでなく、実効的な量子効率の低下もなく、優れた量子効率をそのまま生かすことができる。

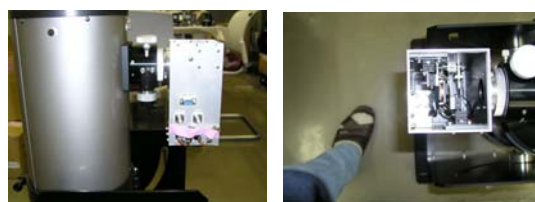


図 2 開発した受信部の外観 (左) 及び 2 次光学系内部 (右)。口径 20cm のニュートン式望遠鏡 (左図左側) の接眼部と交換する形で 2 次光学系を装着する。

(2) 送信部の開発

従来の 1.6μmCO₂ DIAL 用 OPO は PPNgLT 擬位相整合 (QPM: Quasi Phase Matching) 素子を用いてリング共振器を構成し、共振器長制御により DIAL 観測に必要な波長を選択的に発生させているが、精密な共振器制御を必要とするため、十分な安定度を得るためのシステムが複雑になる問題点がある。

そこで高い利得を持つ素子を用いた QPM-OPG (Optical Parametric Generator: 光パラメトリック発生器) では共振器を組まなくても高い出力が得られることに注目し、OPG 方式を考案した。図 3 に LD 励起 Q-Switch Nd:YAG (ネオジウムドープド、イットリウム-アルミニウム-ガーネット: $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) レーザー励起 OPG のブロック図を示す。

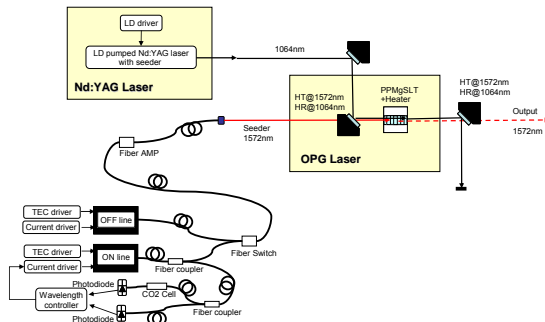


図 3 LD 励起 Q-switch Nd:YAG レーザー励起 OPG のブロック図

OPG は、 CO_2 セルを使って吸収スペクトルの中心 (1752.0178nm) に波長同調した DFB (Distributed Feedback) レーザーを注入同期することにより狭帯域化させている。Nd:YAG レーザーは注入同期により狭帯域化され、最大出力 100 mJ @ 500 Hz, TEM00 モードでビームサイズは $\phi 1.1$ mm である。DIAL 観測におけるシステム誤差の一つとして、吸収スペクトルの中心波長へのレーザー波長同調精度があげられる。そこで、波長 532nm 近傍のヨウ素吸収スペクトルを利用して波長を安定化した Nd:YAG レーザーを用い、QPM 素子はペルチェ素子により $\pm 0.01^\circ\text{C}$ で温度制御した。

図 4 に OPG の波長安定度を示す。On-line (CO_2 の吸収線に同調した波長) である 1752.0178nm に対し、波長計 (Highfinesse WS7-IR) の絶対精度 0.15 pm (40 MHz) 以下の安定度を示した。この安定度は CO_2 密度観測を行ううえで十分な安定度である。

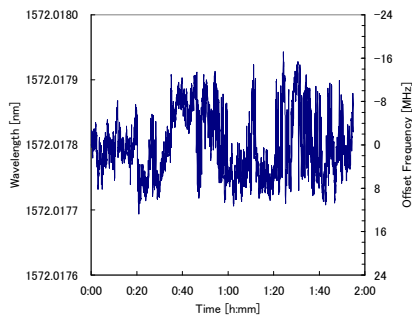


図 4 OPG/OPA の波長安定度

CO_2 DIAL に必要となる高出力化を測るため、図 5 に示すように OPG の後段に OPA

(Optical Parametric Amplifier) を 2 段追加したシステムを開発した。OPA の QPM 素子は OPG 同様ペルチェ素子により $\pm 0.01^\circ\text{C}$ で温度制御を行っている。

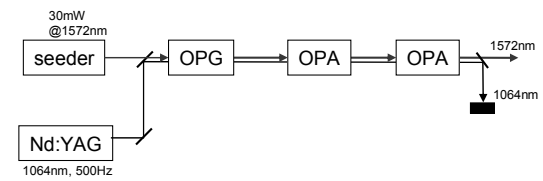


図 5 1.6 μm OPG/OPA システムのブロック図

図 6 に OPG/OPA の入出力特性とビームプロファイルを示す。波長変換効率は 44 % (14.8 mJ @ 1572 nm / 33.6 mJ @ 1064 nm) であった。ビームプロファイルから励起光の Nd:YAG レーザーと同じ TEM00 モードでビームサイズは 1.2 mm \times 1.4 mm であった。

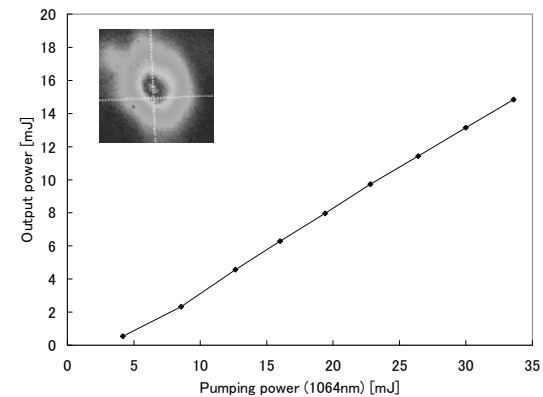


図 6 OPG/OPA システムの入出力特性

(3) DIAL システム構築及び試験観測

(1) で開発した受光部と開発中であった送信用レーザーを組み合わせるライダ装置を構築し、受信実験を行った。観測結果を図 7 に示す。

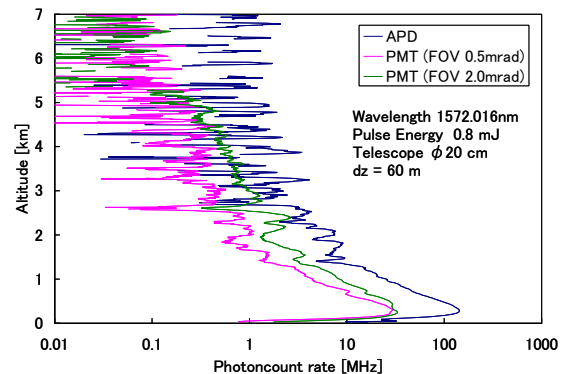


図 7 NIRDAPD と PMT を使った観測例
観測例からわかるように、NIRDAPD は PMT より高感度で、低高度域においてはよりよい

観測結果が得られている。しかしながら、素子自体の発する雑音は PMT よりも NIRDAPD の方が多いため、高高度域では PMT の方が S/N 比が高くなっている。これについては、冷却型の NIRDAPD を用いることで改善できる。

さらに、太陽光散乱による背景光雑音が多く、従来は直接検波方式の光子計数法でのライダー観測が困難であった昼間も、透過波長幅 0.5nm の誘電体多層膜フィルターを用いて背景光を減らすことにより観測を可能にした。低高度領域と高高度領域を一つの受信系で測定するのはダイナミックレンジの関係から困難であるため、受信系を低高度領域用に口径 20cm の望遠鏡を、高高度領域には口径 50cm の望遠鏡を用いて同時受信することにより測定高度領域を拡大した装置を試作した。図 8 にブロック図を示す。

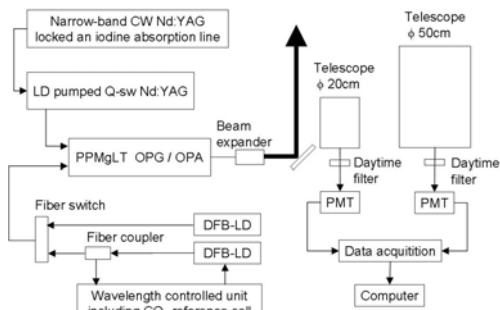


図 8 試作した CO₂ DIAL 観測システムのブロック図

また、DIAL 観測では観測対象やエアロゾルなどの大気条件の時間変化の影響を避けるため、吸収波長と非吸収波長の切り替え時間は出来るだけ短くすることが望ましいため、送信用レーザーの発信波長を 500Hz で 1 shot ごとに 2 波長を切り替えた観測を行った。

図 9 に昼間に行った観測の例（背景光を差し引いた生データ）を示す。この時のレーザー出力は 6.5mJ@500Hz で、1 shot ごとに吸収波長と非吸収波長を切り替えている。

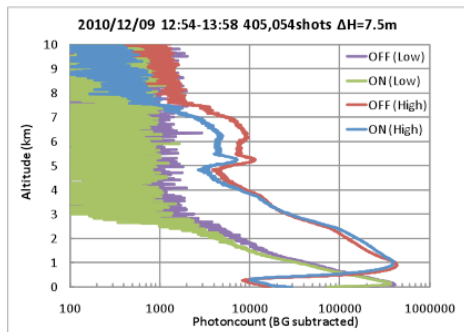
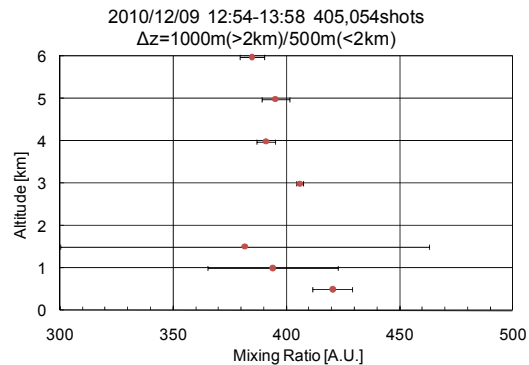


図 9 昼間の観測例

図 10 に CO₂ の鉛直プロファイルを示す。高度 2km 以下は低高度受信系で高度分解能

500m、高度 2km 以上は高高度受信系で高度分解能 1000m、時間分解能（積算時間）は約 1 時間である。昼夜間問わず CO₂ の高度プロ



ファイルを得ることに成功した。

図 10 CO₂ の鉛直プロファイル

(4) データ検証

ライダーによる測定データの妥当性を検証するために、ビルの屋上に CO₂ 測器 (LICOR LI-7500) を設置し同時比較観測を行った。結果を図 11 に示す。比較高度は完全には一致していないが、両者は同様な時間変化を示しており、ライダーデータの妥当性が検証された。

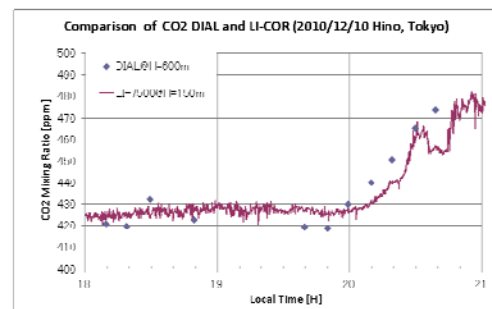


図 11 ビルの屋上に設置した CO₂ 測器とライダーとの同時比較観測結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

① Daisuke Sakaizawa, Chikao Nagasawa, Tomohiro Nagai, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Masahisa Nakazato, 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, 査読有 Appl. Opt., 48, 2009, 748-757.

〔学会発表〕 (計 39 件)

① 阿保 真、長澤 親生、柴田 泰邦、直接検波方式 1.6 μ m DIAL による CO₂ 鉛直分布観測－昼間観測と波長切替の高速化－、第 58 回応用物理学関係連合講演会、2011 (神奈川工

科大学)。

② Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, Makoto Tsukamoto, Takayuki Honda, An advanced ground-based 1.6 μ m DIAL for daytime measurements of vertical CO₂ concentration profiles in the atmosphere, AGU 2010 Fall Meeting, 2010 (米国)。

③ Makoto Abo, Chikao Nagasawa, Yasukuni Shibata, Development of the 1.6 μ m OPG/OPA system wavelength-controlled precisely for CO₂ DIAL, AGU 2010 Fall Meeting, 2010 (米国)。

④ 永井 智広、中里 真久、酒井 哲、長澤 親生、阿保 真、柴田 泰邦、二酸化炭素鉛直分布測定用 1.6 μ m 帯 DIAL 用固体検出素子の性能評価、日本気象学会 2010 年度秋季大会、2010 (京都テルサ)。

⑤ 長澤 親生、阿保 真、柴田 泰邦、永井 智広、中里 真久、酒井 哲、塚本 誠、菅田 高行、CO₂ 濃度鉛直分布観測用次世代ライダーの開発 (2)、日本気象学会 2010 年度秋季大会、2010 (京都テルサ)。

⑥ 柴田 泰邦、永井 智広、長澤 親生、阿保 真、1.6 μ m CO₂-DIAL 用固体光検出器の性能評価、2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会、2010 (長崎大学)。

⑦ 長澤 親生、阿保 真、柴田 泰邦、永井 智広、中里 真久、酒井 哲、塚本 誠、菅田 高行、1.6 μ m-OPG/OPA レーザーによる CO₂-DIAL、2010 年秋季 第 71 回 応用物理学会学術講演会、2010 (長崎大学)。

⑧ Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Tomohiro Nagai, Masahisa Nakazato, Tetsu Sakai, Makoto Tsukamoto, Development of a 1.6 μ m DIAL for nighttime and daytime measurements of vertical CO₂ profiles in the atmosphere, 25th International Laser Radar Conference (ILRC), 2010 (ロシア)。

⑨ Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa, Makoto Abo, QPM-OPG based high power 1.6 μ m laser transmitter for CO₂-DIAL, 25th ILRC, 2010 (ロシア)。

⑩ Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Tomohiro Nagai, Masahisa Nakazato, Tetsu Sakai, Makoto Tsukamoto, Daisuke Sakaizawa, Development of a ground-based differential absorption lidar for high accurate measurements of vertical CO₂ concentration profiles, European Geosciences Union General Assembly 2010, 2010 (オーストリア)。

⑪ 柴田 泰邦、長澤 親生、阿保 真、永井 智広、直接検波方式の 1.6 μ mCO₂DIAL による昼間観測の検討、2010 年春季 第 57 回 応用物理学関係連合講演会、2010 (東海大学)。

⑫ Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Tomohiro Nagai, Masahisa Nakazato, Tetsu Sakai, Makoto Tsukamoto, Daisuke

Sakaizawa, Development of ground-based DIAL techniques for high Accurate Measurements of CO₂ concentration profiles in the atmosphere, AGU 2009 Fall Meeting, 2009 (米国)。

⑬ 永井 智広、中里 真久、酒井 哲、長澤 親生、阿保 真、二酸化炭素鉛直分布測定用 1.6 μ m 帯 DIAL 受信部の開発、日本気象学会 2009 年秋季大会、2009 (アクロス福岡)。

⑭ Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Tomohiro Nagai, Masahisa Nakazato, Tetsu Sakai, Makoto Tsukamoto, Daisuke Sakaizawa, Development of a 1.6 μ m differential

⑮ Chikao Nagasawa, Daisuke Sakaizawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Tomohiro Nagai, Masahisa Nakazato, Tetsu Sakai, Measurement of the vertical CO₂ profile using 1.6 μ m DIAL, 24th ILRC, 2008 (米国)。

⑯ Daisuke Sakaizawa, Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Tomohiro Nagai, Development of a 1.6 μ m CO₂ DIAL transmitter using the QPM-OPO, 24th ILRC, 2008 (米国)。

6. 研究組織

(1)研究代表者

永井 智広 (NAGAI Tomohiro)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：30343891

(2)研究分担者

長澤 親生 (NAGASAWA Chikao)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授
研究者番号：80145664

(3)連携研究者

酒井 哲 (SAKAI Tetsu)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：00377988

阿保 真 (ABO Makoto)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授
研究者番号：20167951

柴田 泰邦 (SHIBATA Yasukuni)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教
研究者番号：10305419

(4)研究協力者

中里 真久 (NAKAZATO Masahisa)

気象庁・観測部・主任技術専門官

(H20→H22.8:連携研究者)