

CO<sub>2</sub>濃度と風・気温の鉛直分布同時測定ライダーの開発Development of Lidar System for Simultaneous Measurements of CO<sub>2</sub> Density, Wind and Temperature長澤親生<sup>1</sup>、阿保 真<sup>1</sup>、柴田泰邦<sup>1</sup>、永井智広<sup>2</sup>中里真久<sup>2</sup>、酒井 哲<sup>2</sup>、塚本 誠<sup>3</sup>、誉田高行<sup>3</sup>Chikao Nagasawa<sup>1</sup>, Makoto Abo<sup>1</sup>, Yasukuni Shibata<sup>1</sup>, Tomohiro Nagai<sup>3</sup>,Masahisa Nakazato<sup>2</sup>, Tetsu Sakai<sup>2</sup>, Makoto Tsukamoto<sup>3</sup> and Takayuki Honda<sup>3</sup><sup>1</sup> 首都大学東京システムデザイン研究科、<sup>2</sup> 気象研究所、<sup>3</sup> 英弘精機<sup>1</sup> Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University<sup>2</sup> Meteorological Research Institute, <sup>3</sup> EKO Instruments**Abstract**

We have developed a 1.6  $\mu$  m differential absorption lidar (DIAL) approach to gain high accurate measurements of vertical carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) profiles. High-accurate vertical CO<sub>2</sub> profiles are highly desirable in the inverse method to improve quantification and understanding of the global sink and source of CO<sub>2</sub>, and also global climate change. The DIAL system is constructed from the OPO transmitter and the receiving optics that included a near-infrared photomultiplier tube operating at photon counting mode. We are developing next generation lidar system for simultaneous measurements of CO<sub>2</sub> density, wind and temperature profiles in the atmosphere.

**1. はじめに**

地球温暖化の進行を推定し、また、その対策を考える上で、最も重要な温暖化気体である大気中の二酸化炭素（以下 CO<sub>2</sub>）の分布と時間変化の実態を十分に把握することが重要である。このためには、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度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、直接的な測定については、現状では地上観測がほとんどであり、高度分布の情報が極めて不足している。

また、地球温暖化を精度よく予測するために全地球大気中の CO<sub>2</sub> 濃度分布を推定する数値モデル（全球大気輸送モデル）の開発が進められている。この数値モデルは、実際の観測データからソース（排出源）やシンク（吸収源）を推定する手法（インバース法、逆解法）であるが、モデルの拘束条件として実際の CO<sub>2</sub> 濃度の高度分布の情報が重要であるにもかかわらず、商用航空機やバルーン、高地観測所で行われている観測結果が利用されているに過ぎない。商用航空機やバルーンによる観測は観測頻度が低く、また、高地観測所の観測は、高度方向の観測が1点に限られ、モデルの拘束条件としては不十分である。

我々は、2007年に波長 1.6  $\mu$  m のレーザーを用いた CO<sub>2</sub>-DIAL の開発に成功した。この技術を更に高度化し、CO<sub>2</sub> の濃度測定精度 0.3% を目標として 2008 年度から次世代の CO<sub>2</sub>-DIAL の開発に着手している。高精度の CO<sub>2</sub> 鉛直濃度分布測定を実現するためには、気温と気圧の鉛直分布の同時測定が不可欠である。更に、本研究はこれらの測定に風向・風速を加えた新たなライダー技術の開発を目指したものである。

**2. 開発するシステムの概要**

開発する装置は、鉛直 CO<sub>2</sub> 濃度分布観測での優位性から、引き続き 1.6  $\mu$  m 帯の波長を利用した差分吸収法ライダー（DIAL）をベースに用いる。CO<sub>2</sub> 濃度の測定に使用する CO<sub>2</sub> 分子の吸収線スペクトル形状（吸収線中心の強度や線幅）は、気温・気圧によって変動するが、気温によって吸収強度が不変となる波長（気圧不動点）が存在する。CO<sub>2</sub> 濃度の測定の際、吸収線の中心波長と裾（吸収の少ない波長）に加え、この気圧不動点の波長を追加し、他の波長と強度を比較することで気温の測定が可能である。

さらに、この CO<sub>2</sub> 濃度の観測では、使用する CO<sub>2</sub> の吸収線幅が非常に狭いことから、レーザーの

波長同調の精度は非常に高精度であることが要求される。この精度は、散乱体が大気の流れ、すなわち風とともに移動することから発生する散乱光のドップラーシフト量に比べて十分に良いことから、受信した波長のドップラーシフトを検出することで風速を測定することができる。本研究では、十分に安定したエッジフィルターを用い、エッジフィルターを通過させた受信光の強度が、波長の変化に従い増減することを利用して波長変化を検出するインコヒーレントドップラー方式を用いる。

本研究では、 $1.6\mu\text{m}$  帯の波長のレーザー光を精密に制御し、 $\text{CO}_2$ の吸収線に同調させることでこれらの成分の濃度を検出すると同時に、吸収スペクトル形状の変化を用いて気温を、また、ドップラーシフトを検出することで風向・風速を、同時に測定する装置の開発を目指す。Fig.1 にシステムの概念図を示す。

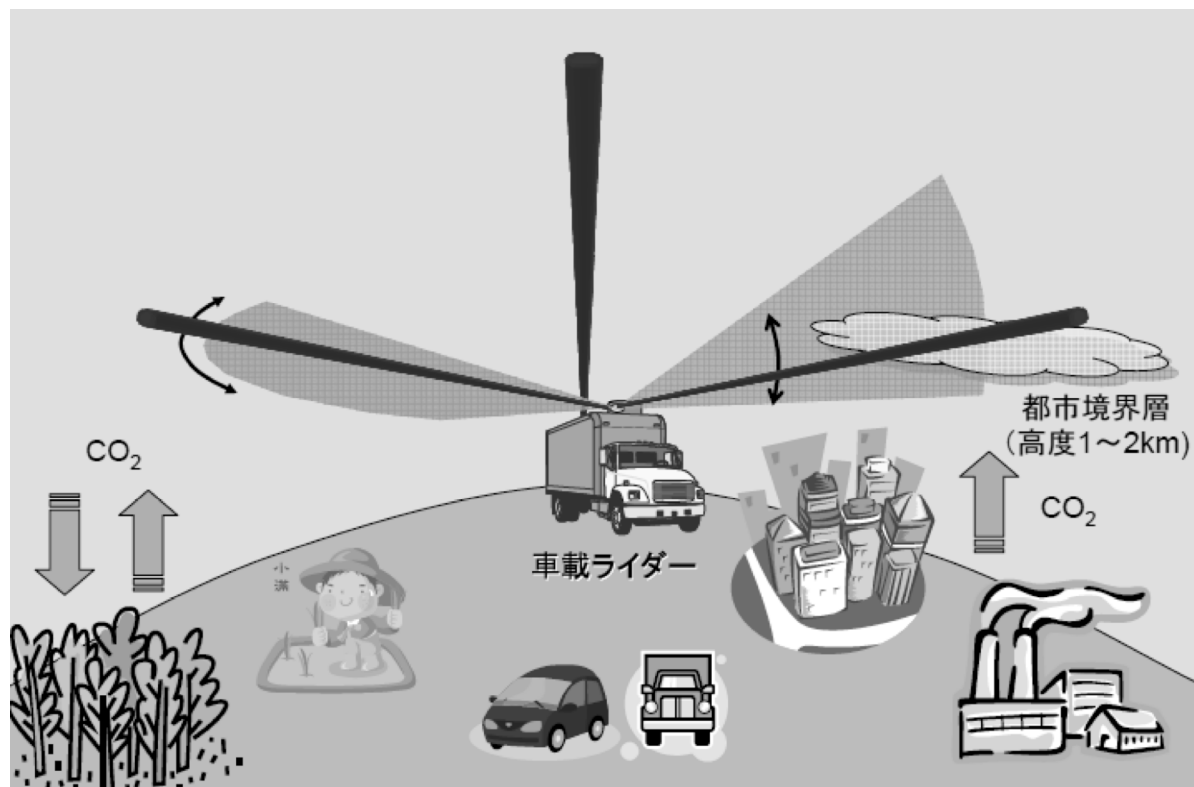


Fig.1 Schematics of the lidar system for simultaneous measurements of  $\text{CO}_2$  density, wind and temperature.

技術的な開発要素として、送信部においては、波長幅が非常に狭い  $\text{CO}_2$ の吸収線にレーザーの発振波長を同調させる技術とその自動化、レーザーの高出力化等の開発を行う。2007年に開発した  $1.6\mu\text{m}$  DIALでのレーザー出力は  $10\text{mJ}@200\text{Hz}$  (2W)であったのに対しその5倍である  $20\text{mJ}@500\text{Hz}$  (10W)の実現を目指す。受信部においては、 $\text{CO}_2$ 濃度と気温についての鉛直方向の観測では、昼夜を問わない観測を目指すため、微弱な散乱光を検出するための大口径高精度の受信望遠鏡や高感度の検出器、また、昼間の観測を行うための受信帯域の狭帯域化のための開発をおこなう。また、風向・風速については、風ベクトルを検出するため、 $\text{CO}_2$ と気温の観測と兼用する大口径の望遠鏡に加え、鉛直方向から傾斜させたスキャニング型受信部の開発を行う。ドップラーシフト量の検出のためには、開発実績のあるFBG (Fiber Bragg Grating)等を使用した直接検波方式とする。Fig.2に現段階におけるシステムブロック図を示す。最終的には、高度6kmまで $\text{CO}_2$ 濃度精度0.3%の測定を目指すものである。

また、インテグレーションしたライダー装置の精度検証について、他の観測装置により CO<sub>2</sub> 濃度や気象観測が多く行われていて商用航空機による CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直分布観測が行われている成田国際空港近くに位置する気象研究所において試験観測を行い、他の測器との比較を通じて精度の検証を行う。

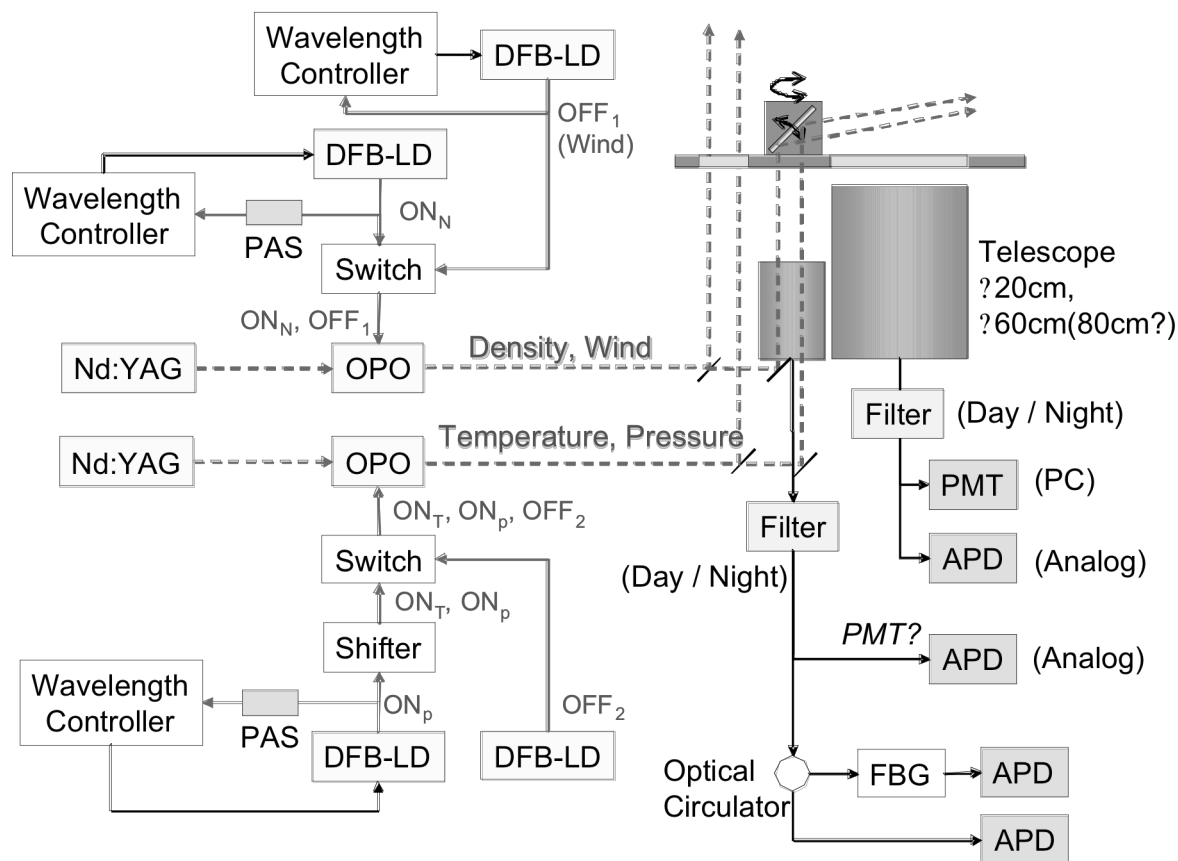


Fig.2 Block diagram of the lidar system for simultaneous measurements of CO<sub>2</sub> density, wind and temperature.

### 3. まとめ

本研究では、地球温暖化の理解・予測のために必要とされている CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直分布の観測について、高精度で連続観測が可能で実用的な DIAL を、世界に先駆けて開発することを目指している。DIAL による観測は、鉛直分布を連続して観測することが可能という点で、航空機観測などでは得られないデータが得られ、地球温暖化に関する研究をより推進することになる。

地球規模の CO<sub>2</sub> 濃度のカラム量の測定は、2008 年 12 月に打ち上げられた衛星搭載センサー The Greenhouse Gases Observing Satellite : GOSAT (日本、JAXA/NIES/MOE) で観測が行われているが、これらのデータの精度の検証や解析アルゴリズムの開発のために、本研究で開発する装置による観測は寄与できるものと思われる。

本研究では、CO<sub>2</sub> 濃度と同時に、気温と風向・風速の鉛直プロファイルの測定を行うことが可能であるのがもう一つの特徴である。この観測を行うことで CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直フラックスが推定出来る。このような観測を高高度まで連続で行うことはこれまでの観測手法では不可能であり、気象分野の新たな研究に繋がることを期待できる。

さらに、CO<sub>2</sub>の非吸収波長を用いることで、付随的にエアロゾルや雲の測定を行うことができる。エアロゾルや雲は、直接的な放射効果やいわゆる間接効果を通じ気候・大気環境に大きな影響を及ぼしている。これらの鉛直分布の詳細な観測は、ライダーを用いて主に可視あるいは近赤外（約 1 μm まで）で行われているが、より長い波長での観測を行うことで、放射効果の精密な評価が期待できる。また、上記の GOSAT の観測データから CO<sub>2</sub>濃度を算出する際には、エアロゾルや雲の存在が大きな影響を及ぼす。これらの衛星観測では、観測波長として 1.6 μm 付近を使用しており、同じ波長でエアロゾルや雲のプロファイルの測定が可能となると、解析アルゴリズムの高度化にも寄与できる。

#### <謝辞>

本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業」により行われている。

#### 参考文献

D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato, T. Sakai, Development of a 1.6 um differential absorption lidar with a quasi phase matching OPO and photon-counting detector for the vertical CO<sub>2</sub> profile, Applied Optics, 48(4), 748, 2009