

3 波長 DIAL を用いた境界層中の CO₂ 濃度と気温分布の同時観測

柴田 泰邦, 長澤 親生, 阿保 真

首都大学東京 システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Simultaneous measurements of CO₂ concentration and temperature profiles in the lower atmosphere using tree-wavelength DIAL

Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA, and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: We have developed a 1.6 μm CO₂ DIAL system for simultaneous measurements of the CO₂ concentration and temperature profiles in the lower-atmosphere. Conventionally, we have obtained the CO₂ absorption spectrum profile using the atmospheric temperature profile by the objective analysis near the lidar site. Therefore, the difference between the actual temperature and the objective analysis temperature deteriorates the accuracy of the CO₂ mixing ratio. For example, the temperature dependence of the CO₂ mixing ratio obtained by DIAL measurement is 1.5 ppm/K at 500 m altitude (280 K). Then, we have developed a new CO₂ 1.6 μm DIAL system with three wavelengths for simultaneous measurement of atmospheric temperature and CO₂ density profiles. We report simultaneous measurement results of temporal atmospheric temperature and CO₂ mixing ratio profiles and discuss results of the measurement accuracy improvement of the CO₂ mixing ratio by actual temperature measurement.

Key Words: DIAL, CO₂, atmospheric temperature

1. はじめに

我々は CO₂ 濃度鉛直分布測定のための 1.6 μm 光パラメトリック発生器 (OPG: Optical Parametric Generator) を光源とする差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) を開発し, 対流圏上部まで鉛直分布観測を行っている^{1,2)}. CO₂ 吸収スペクトル強度は濃度・気温・気圧の3変数の影響をうける. 現在, DIAL 観測の結果は, 客観解析データによって得られるライダー観測地点近傍の気温鉛直分布および測高公式によって求まる気圧鉛直分布を用いて吸収スペクトル強度を算出しているが, 測定精度をさらに上げるためには気温・気圧の同時観測が必要となる. そこで, DIAL によって CO₂ 密度と気温を同時に観測する手法を新たに提案した³⁾. 本講演では, CO₂ 混合比と温度プロファイルの同時観測結果について報告する.

2. CO₂ DIAL における気温同時観測の必要性

DIAL は 2 波長のパルスレーザを用い, 一方の波長は CO₂ 吸収スペクトルのピーク波長 λ_{on} に同調し, もう一方の波長は吸収の弱い波長 λ_{off} に同調する. 2 波長における受信信号強度の差は, 大気中の CO₂ 分子による吸収に依存する. DIAL 観測において, 高度 z における気体密度 $N(z)$ は次式で求めることができる.

$$N(z) = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta z} \ln\left(\frac{P_{off}(z+\Delta z)}{P_{off}(z)} \frac{P_{on}(z)}{P_{on}(z+\Delta z)}\right) \quad (1)$$

ここで, $\Delta\sigma$ は λ_{on} と λ_{off} の差分吸収断面積, Δz は距離分解能, $P(z)$ は受信信号強度で, 添え字の on, off はそれぞれ $\lambda_{on}, \lambda_{off}$ における値を示す. また, 吸収断面積は温度と気圧に依存する. DIAL による密度測定では, 推定した気温・気圧を用いて $\Delta\sigma$ を推定するため, 気温・気圧の推定値と真値との差が無視できない.

我々は DIAL 観測点近傍の客観解析データを利用して, 吸収スペクトルを計算していたが, CO₂ 濃度の吸収スペクトルによる温度依存性は, 高度 500 m において 0.25 %/°C である. また, CO₂ 濃度は一般に混合比によって評価され, 大気密度は温度に依存することから実際の気温と客観解析データの気温の差が CO₂ 混合比にも影響する. CO₂ 混合比の温度依存性は, 高度 500 m において 0.13 ppm/°C である. 特に下層大気の DIAL 測定精度を向上させるには, DIAL 観測地点上空の温度プロファイルを知ることが重要である. そこで, 我々はもう 1 つの波長 λ_T を加えた 3 波長 1.6 μm DIAL システムを開発し, CO₂ 混合比と温度プロファイルを同時に測定する方法を提案した³⁾.

3. CO₂ 混合比と気温の同時測定時の精度検証

CO₂ 混合比と気温の同時測定時の精度を検証するため, 首都大学東京 日野キャンパス内において in-site センサーを用いた検証実験を行った. Fig. 1 に検証実験の配置図を示す. DIAL は 4 号館 4 階の実験室に設置され, OPG 送信光は屋上 (5 階相当) のドームからミラーで折り返して 2 号館上空へ出射して

いる。DIAL から直線距離で約 200 m 離れた 2 号館屋上 (10 階相当) にオープンパス CO₂ センサー (LI-COR, LI-7500) と温度センサー (T&D, TR-72Ui) を設置した。DIAL は Fig. 1 に示すように、センサーを挟んだ青線の 60m 区間平均値を測定している。Fig. 2 に CO₂ 混合比と気温の時間変化を示す。DIAL の積算時間は 10 分で、LI-7500 は 2 秒ごとのデータを、TR-72Ui は 30 秒ごとのデータを 10 分間平均値で示している。DIAL と各センサーの測定値はエラーバー (CO₂: ±2.1 ppm, 気温: ±0.28°C) 内で概ね一致し、DIAL とセンサーの平均値の差は、CO₂ 混合比が -0.01 ± 2.1 ppm, 気温が -0.10 ± 0.28 °C であった。気温のバイアスは、DIAL の測定高度が TR-72Ui の設置高度より約 9 m 高いことに起因すると考えられ、気温減率を考慮すると両者の値は概ね一致する。以上の結果から、3 波長 1.6 μm DIAL による CO₂ 混合比と気温の同時測定は DIAL のエラーバー内で測定されていることが実証された。

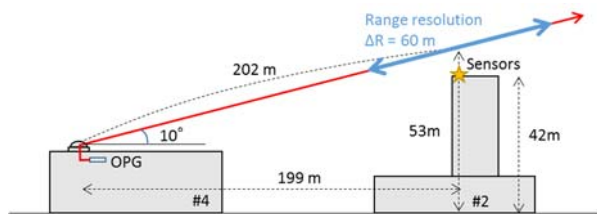


Fig. 1 Experimental site set-up during the verification of CO₂ concentration and atmospheric temperature measurements from the CO₂ DIAL and in-situ sensors.

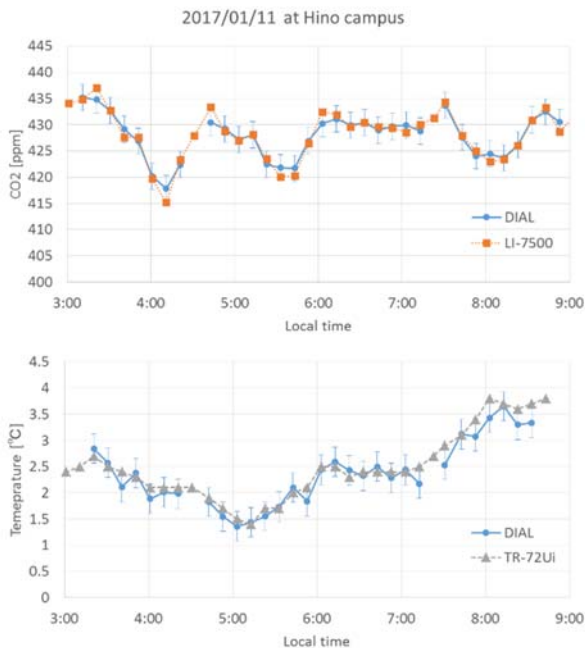


Fig.2 Comparison of CO₂ concentration and atmospheric temperature measurements from the CO₂ DIAL and in-situ sensors at 10 min average intervals.

4. CO₂ 混合比と気温分布の同時観測結果

2016 年 11 月 30 日に CO₂ 混合比と温度プロファイルの連続観測を行った。結果を Fig. 3 に示す。高度 1.4 km 付近に逆転層が見られ、逆転層より低い高度において CO₂ 混合比が 410 ppm 前後と、高度 2 km 付近の 390 ppm より高い濃度を示した。また、逆転層以下の高度において、日の出時刻 (6:31) 以降に CO₂ 混合比の増加が見られた。なお、客観解析データの気温プロファイルは逆転層が不明瞭で、高度 500 m における気温の DIAL 観測値との差は 4.5 °C, CO₂ 混合比で 6.8 ppm の差となり、観測点上空の気温鉛直プロファイルを取得することの重要性が確認できた。

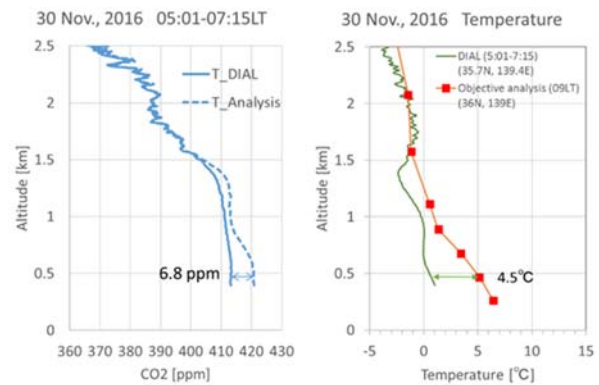


Fig. 3 CO₂ mixing ratio and temperature profiles on 30 Nov., 2016.

5. まとめ

気温観測用ライダーとして、CO₂ 吸収スペクトル分布の温度依存性を利用した 3 波長 CO₂-DIAL を開発した。3 波長 CO₂-DIAL と in-situ センサーとの検証実験を 5 時間半にわたって行い、気温は -0.10 ± 0.28 °C, CO₂ 混合比は -0.01 ± 2.1 ppm と DIAL のエラーバー範囲内で一致した。また、高度 0.4~2.5 km までの CO₂ 混合比と気温分布の同時観測を行い、高度 1.5 km 以下で観測点近傍の客観解析データの気温分布と最大 4.5°C 異なることを示した。この温度差は CO₂ 混合比に換算して 6.8 ppm となる。この結果から、観測点上空の気温鉛直分布を取得することで CO₂ 濃度の動態をより正確に把握することが可能であることが実証された。今後、さらにデータを蓄積することで CO₂ の動態を気温分布との関係から議論する事が可能になる。

参考文献

- 1) D. Sakaizawa, et al., Appl. Opt. 48, 748-757, 2009.
- 2) Y. Shibata, et al., Appl. Opt., 56, 1194-1201, 2017.
- 3) 柴田他, 第 34 回レーザーセンシングシンポジウム, 154-155, 2016.