

CO₂-DIAL を用いた気温・気圧分布の同時測定法の提案

柴田 泰邦, 長澤 親生, 阿保 真
東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Proposal on Simultaneous Measurement Technique of Atmospheric Temperature and Pressure Profiles by CO₂-DIAL

Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA, and Makoto ABO
Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: We have developed a differential absorption lidar (DIAL) with the three-wavelength to measure temperature profiles in the lower troposphere by using a CO₂ absorption spectrum at 1.57 μm . This method needs to assume atmospheric pressure profiles. The discrepancy between the assumed and actual atmospheric pressure is one of the error sources for the atmospheric temperature measurement. Therefore, we propose a four-wavelength CO₂-DIAL for simultaneous temperature and pressure measurements. The four-wavelength CO₂-DIAL has three on-line wavelengths and one off-line wavelength. Three DIAL equations that use pairs of the off-line and each on-line are available. An iterative calculation determines the temperature and pressure at which the standard deviation of the CO₂ densities obtained from the three DIALs is minimized. Iteration errors are less than 0.1 $^{\circ}\text{C}$ and 0.3 hPa, which are less than the 0.4 $^{\circ}\text{C}$ and 0.6 hPa iteration errors obtained by the three-wavelength CO₂-DIAL.

Key Words: DIAL, Temperature, Pressure, CO₂

1. はじめに

下部対流圏の温度分布測定は、高精度な CO₂ 濃度測定だけでなく、境界層や逆転層などの振る舞いを理解する上でも重要である。我々は CO₂ 濃度と同時に気温分布を測定するために、1.57 μm 帯の一つの CO₂ 吸収スペクトルを利用する 3 波長の差分吸収ライダー (DIAL) を開発した^{1,2)}。この 3 波長 CO₂-DIAL では、CO₂ 吸収スペクトルは温度と気圧に依存するため、観測時の気圧分布には観測地点である東京都立大学日野キャンパス上空の客観解析データを用いた。三つの波長はそれぞれ CO₂ 吸収スペクトルの吸収ピーク (λ_{on})、隣り合う吸収スペクトルの谷 (λ_{off})、および λ_{on} と λ_{off} の間に位置する λ_{T} を用いた。二組の DIAL (λ_{on} と λ_{off} のペア、 λ_{on} と λ_{T} のペア) から得られる CO₂ 密度が等しくなる気温が数値計算により決定される。この方式の課題は、用いた気圧と実際の気圧の差が気温測定誤差要因になることである。日野キャンパス上空でのライダー観測においては、気圧の不確実性 0.6 hPa による気温誤差を 0.4 $^{\circ}\text{C}$ 程度まで低減できるが、有意な客観解析データの利用が難しい海上などでの高精度な気温測定を実現するためには、ライダーによる気圧分布の同時測定が有用である。これまで、波長 760 nm 付近の酸素分子の吸収帯を利用した O₂-DIAL による気圧分布測定が提案されているが^{3,4)}、同波長帯に存在する水蒸気による吸収を排除できない問題があり、同時に水蒸気濃度データの取得が求められる。また、温度測定用の 3 波長 CO₂-DIAL と圧力測定用の O₂-DIAL (さらに水蒸気ラマンライダーや水蒸気 DIAL) の複合ライダーは、システムが非常に複雑になるのが欠点である。そこで、隣り合う二つの CO₂ 吸収スペクトルを用いる 4 波長 CO₂-DIAL を新たに提案する。これは三つの On 波長と一つの Off 波長からなる三組の DIAL で構成され、それぞれの DIAL で得られた CO₂ 密度が等しくなる気温と気圧が数値計算によって決定される。本研究では、4 波長 CO₂-DIAL による気温・気圧分布測定の精度を数値シミュレーションにより評価する。

2. 4 波長 CO₂-DIAL による気温・気圧測定原理

CO₂ 吸収スペクトルは熱によるドップラー拡がりや圧力拡がりにより幅を持つ。Fig.1 は HITRAN データベースと U.S. Standard の中緯度モデルを使用した、高度 1 km、3 km、5 km での CO₂ 吸収断面積の例を示す。従来の 2 波長 DIAL では、吸収断面積を決定するために気温と気圧分布を推定し、次式 (いわゆる DIAL 方程式) によって、対象ガスの密度 N を導出する。

$$N(z_1) = \frac{1}{2\Delta\sigma(z_1)\Delta z} \ln \left[\frac{P(z_2, \lambda_{\text{off}}) P(z_1, \lambda_{\text{on}})}{P(z_1, \lambda_{\text{off}}) P(z_2, \lambda_{\text{on}})} \right] \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma(z)$ は差分吸収断面積 ($|\sigma_{\text{on}}(z) - \sigma_{\text{off}}(z)|$)、 Δz は距離分解能 $|z_2 - z_1|$ 、 $P(z, \lambda)$ は波長 λ における受信信号である。4波長 DIALは Fig.1 に示す三つの On 波長と一つの Off 波長を用いる。 λ_{off} (1572.826 nm) は、隣接する二つの CO₂ 吸収スペクトルの谷に位置する。三つの On 波長は、2つの吸収ピーク波長 ($\lambda_{\text{on1}} = 1572.660$ nm, $\lambda_{\text{on3}} = 1572.992$ nm) と吸収スペクトルのスロープ部分 ($\lambda_{\text{on2}} = 1572.973$ nm) に位置する。この 4 波長 DIAL は、三つの On 波長と一つの Off 波長からなる三組の DIAL で構成される。実際の観測ではノイズが含まれるため、各々の DIAL から得る CO₂ 濃度の標準偏差が最小となる気温と気圧が数値計算によって決定される。

次に、気温・気圧分布の測定精度を数値シミュレーションにより評価する。U.S. Standard の中緯度モデルと CO₂ 混合比 400 ppm 一定とした大気モデルを用いて 4 波長のライダー信号を生成する。ここでは理想的な条件での測定精度を検討するため、ライダー信号に統計誤差は含まれていない。次に、 $\Delta\sigma(z)$ の初期値に U.S. Standard の中緯度モデルから +10 °C と +2 hPa 変化させた気温と気圧を用いた。各々の DIAL から得る CO₂ 濃度の標準偏差が最小となる気温と気圧を反復法によって探索した。設定値との誤差を Fig. 2 に示す。温度誤差はほぼゼロとなり、客観解析の気圧データを用いる 3 波長 CO₂-DIAL よりも高精度で温度を測定できることが示された。気圧誤差は 0.2~0.3 hPa であり、客観解析データの気圧誤差 約 0.6 hPa よりも小さくなる。三つの DIAL から得る CO₂ 混合比の平均値と設定値 (400 ppm) との差を CO₂ 混合比誤差とし、その誤差はほぼゼロになった。各 DIAL では CO₂ 混合比が 400 ± 0.2 ppm 以内で測定され、平均をとるとほぼ 400 ppm となった。以上の結果から、4 波長 CO₂-DIAL は、3 波長 CO₂-DIAL に比べて気温と気圧を高精度で測定できることが示された。

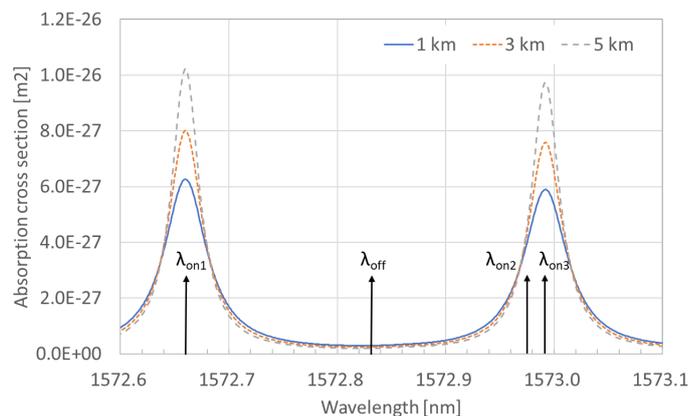


Fig. 1. Absorption cross-section spectra of CO₂ around 1573 nm at altitudes of 1 km, 3 km and 5 km, and locations of four wavelengths (λ_{on1} , λ_{on2} , λ_{on3} and λ_{off}).

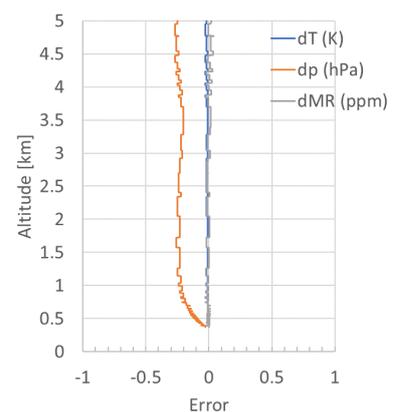


Fig. 2. Temperature error (dT), pressure error (dp) and CO₂ mixing ratio error (dMR).

3. まとめ

客観解析データを用いて気圧分布を仮定することにより、気温を測定する 3 波長 CO₂-DIAL を発展させ、一般的地点で高精度な気温を測定することのできる、気圧を同時測定する 4 波長 CO₂-DIAL を提案した。これは、吸収スペクトルの二つの吸収ピークと勾配に位置する三つの On 波長と、隣接する二つの CO₂ 吸収スペクトルの谷に位置する一つの Off 波長を使用する三組の DIAL で構成される。各 DIAL から得られる CO₂ 密度の標準偏差が最小になる気温と気圧が反復計算によって決定される。この方法の利点は、反復計算に起因する誤差を 3 波長 CO₂-DIAL より小さい 0.1 °C 以下および 0.3 hPa 以下に抑えることができる。

客観解析データはラジオゾンデ観測や地上センサーなどの観測データから各パラメータが計算されるため、観測点が少ない海域や過疎地域の気温・気圧分布を測定するのに 4 波長 CO₂-DIAL は有効なシステムとなる。また、水平方向のスキャン観測を行うことで気温や気圧の局所的な変化を捉え、乱流や竜巻などの発生を予測することが期待される。

参考文献

- 1) Y. Shibata, C. Nagasawa and M. Abo: In EPJ Web of Conferences, EDP Sciences, **237** (2020) 03021.
- 2) 柴田泰邦、長澤親生、阿保真：第 39 回レーザーセンシングシンポジウム (2021) 57-59.
- 3) C. L. Korb, G. K. Schwemmer, M. Dombrowski, and C. Y. Weng: Appl. Opt., **28** (1989) 3015-3020.
- 4) C. N. Flamant, G. K. Schwemmer, C. L. Korb, K. D. Evans, and S. P. Palm: J. Atmos. Ocean. Tech., **16** (1999) 561-574.