

1.6 μm DIAL による CO₂ 濃度と気温の同時観測

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 by 1.6 μm 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. As the spectra of absorption lines of any molecules are influenced basically by the temperature in the atmosphere, it is important to measure them simultaneously so that the better accuracy of the DIAL measurement is realized. Laser beams of three wavelengths around a CO₂ absorption spectrum is transmitted alternately to the atmosphere. Moreover, the value of the retrieved CO₂ concentration will be improved remarkably by processing the iteration assignment of CO₂ concentration and temperature, which measured by these DIAL techniques.

Key Words: DIAL, CO₂, atmospheric temperature, iteration

1. はじめに

我々は CO₂ 濃度鉛直分布測定のための 1.6 μm 直接検波法による CO₂ 差分吸収ライダー (DIAL) を開発し、対流圏上部まで鉛直分布観測を行ってきた。CO₂ 吸収スペクトル強度は濃度・気温・気圧の3変数の影響を受ける。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。実際の気圧鉛直分布と測高公式で得られる気圧鉛直分布はほぼ一致するが、気温鉛直分布は逆転層などが頻繁に生じるため、気温減率だけで近似することができない。そこで、DIAL によって密度と気温を同時に観測する¹⁾。

一般的に DIAL では、吸収線の中心波長 λ_{on} と裾 λ_{off} (吸収の少ない波長) の2波長を用い、受信信号の差分から対象期待の濃度を求める。この2波長に温度観測用の波長 λ_T を追加し、 λ_{on} との受信強度を比較することで密度分布と同時に気温分布測定を行う。さらに、DIAL 観測で得られる密度・気温から吸収線スペクトル強度が一致するように反復計算を行い、密度・気温を更新することで各々の測定精度を向上させる。本講演では、最適な3波長の組み合わせについて数値計算により明らかにする

2. 気温観測の原理

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。

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

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。我々は気圧鉛直分布に測高公式を用いている。館野のラジオゾンデ観測と館野の地上気温・気圧から測高公式で求めた気圧鉛直分布は高度 3 km 以下においておおむね 0.2 %以内で一致する。このことから、気温鉛直分布のみ実測できれば、より精度の高い CO₂ 濃度測定が可能となる。次に、CO₂ 濃度と気温を同時測定するための波長の組み合わせを考える。Fig.1 に高度ごとの CO₂ 吸収スペクトルを示

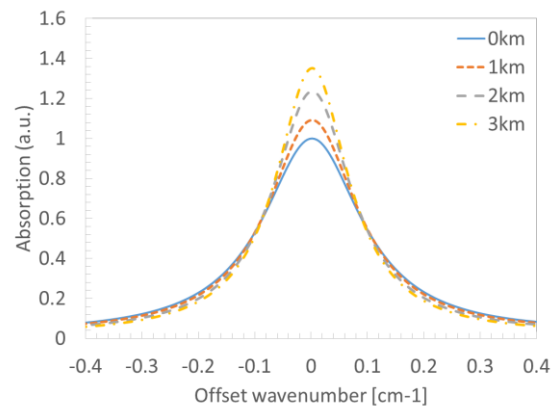


Fig.1 CO₂ absorption spectrum at various altitudes.

す。ここで、吸収の中心波長は 1572.992 nm、気温・気圧鉛直分布は U. S. Standard を用いた。吸収強度が高度（気温・気圧）にほぼ依存しない波長 λ'_{on} が存在する。この λ'_{on} と λ'_{off} を用いると、気温・気圧の影響をあまり受けずに CO₂ 濃度を計測できる。また、温度感度が最大の吸収のピーク波長と λ'_{on} の受信信号強度を比較することで、気温を求めることができる。従来法は吸収断面積が気圧に依存しない波長（気圧不動点）を追加する方式を提案していたが、気圧不動点が高度に依存する問題があった。さらに、DIAL 観測で得られる密度・気温から吸収線スペクトル強度が一致するように反復計算を行い、密度・気温を更新することで各々の測定精度を向上させる。

次に、この原理を検証するための CO₂ 濃度と気温の測定精度をシミュレーションする。Fig.2(a)に CO₂ 濃度分布モデル（真値）、Fig.2(b)に 2015 年 8 月 21 日に館野のラジオゾンデ観測で得られた気温・気圧鉛直分布（真値）と、吸収断面積を算出するために仮定した気温・気圧鉛直分布の初期値を示す。気温分布の初期値は気温減率のみ考慮し、気圧鉛直分布は測高公式により求めている。Fig.3(a)に CO₂ 濃度の真値とシミュレーション結果の差分を、Fig.3(b)に気温の真値とシミュレーション結果の差分を示す。図中の 1st, 2nd, ... は、反復計算回数を示す。Fig.3(a)から、CO₂ 濃度は反復回数が 3 回目で収束した。残差は気圧の真値と測高公式から得る初期値の差分が影響しているが、0.2 ppm 以下の精度で測定が可能である。気温は 1 回目の値は大きくずれるが、3 回目で収束し、0.1 K 以下の精度で測定可能である。

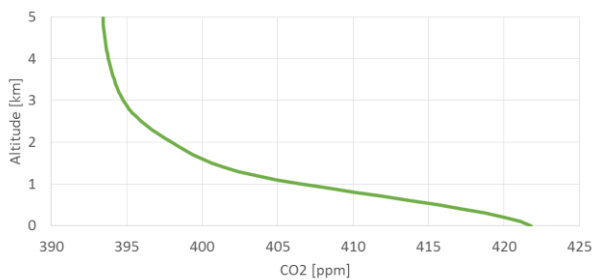


Fig.2(a) The vertical profile of CO₂ concentration model.

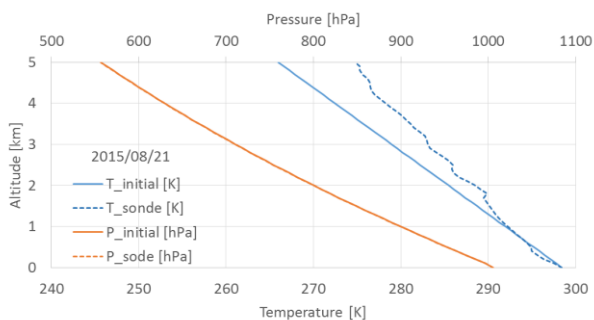


Fig.2(b) Temperature and pressure profiles.

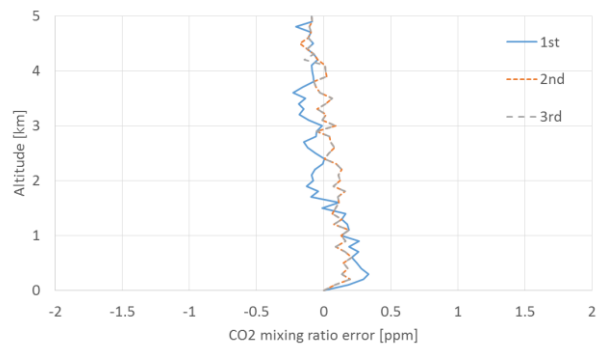


Fig.3(a) The iteration analyses of CO₂ error.

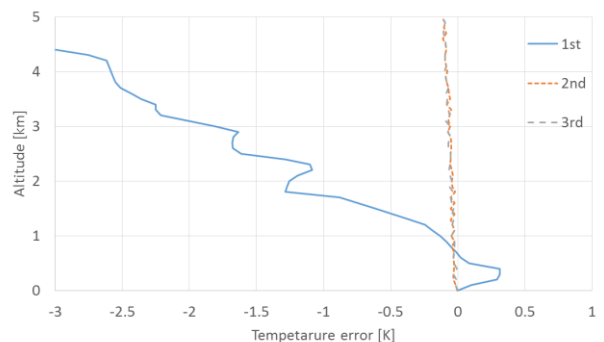


Fig.3(b) The iteration analyses of temperature error.

3. まとめ

DIALによってCO₂濃度の鉛直分布を測定する際、観測点上空の気温鉛直分布の取得が必要となる。吸収強度が高度にほとんど依存しない波長で密度分布観測を、吸収のピーク波長で気温分布観測を行うことで、より精度の高い観測が期待できる。また、2015年8月21日のラジオゾンデ観測データを用いたシミュレーションにより、反復計算を行うことでCO₂濃度を気圧の真値と測高公式から得る値の差分に相当する0.2 ppm以下で、気温を0.1 K以下で測定可能であることを示した。今後、他のラジオゾンデ観測日のデータを用いた解析を行い、本手法の有効性を確認する。また、実際に3波長を用いたCO₂濃度と気温の鉛直分布を測定する準備を進めており、進捗状況について講演で報告する。

参考文献

- 1) 柴田他, 第33回レーザーセンシングシンポジウム, 50-51, 2015.