

# 1. 6 $\mu\text{m}$ DIAL による下層大気中の CO<sub>2</sub> 濃度と気温の鉛直分布測定

## A 1.6 $\mu\text{m}$ DIAL for high accuracy measurements of vertical CO<sub>2</sub> concentration and temperature profiles in lower-atmosphere

○柴田 泰邦, 長澤 親生, 阿保 真 (首都大学東京)

°Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa and Makoto Abo, Tokyo Metropolitan University

Abstract : A 1.6  $\mu\text{m}$  differential absorption lidar (DIAL) to measure vertical CO<sub>2</sub> profiles in the lower atmosphere have been developed. We proposed a method which improves the accuracy of CO<sub>2</sub> density measurement by using the atmospheric temperature profile measured simultaneously with the CO<sub>2</sub> absorption line. The value of the retrieved CO<sub>2</sub> concentration will be improved remarkably by processing the iteration assignment of CO<sub>2</sub> concentration and temperature profiles measured by the CO<sub>2</sub> DIAL techniques and the pressure profiles provided from objective analysis data. We show that accuracies for CO<sub>2</sub> density measurement can be improved significantly by applying the interactive method to this DIAL technique.

### 1. はじめに

下層大気中の CO<sub>2</sub> 濃度鉛直分布を観測する 1.6 $\mu\text{m}$ OPG (Optical Parametric Generator) を光源とする差分吸収ライダー (DIAL) を開発し、連続観測を行っている<sup>1</sup>。CO<sub>2</sub> 吸収スペクトル分布は濃度・気温・気圧の 3 変数の影響をうける。現在、茨城県館野においてラジオゾンデ観測により得られる気温・気圧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ライダー観測点である首都大学東京日野キャンパス (東京都日野市) 上空の気温・気圧分布が必要となる。吸収線の中心波長 $\lambda_{\text{on}}$ と裾 $\lambda_{\text{off}}$  (吸収の少ない波長) に加え、気圧によって吸収強度が不変となる波長 $\lambda_{\text{T}}$  (気圧不動点) を追加し、 $\lambda_{\text{on}}$  との受信強度を比較することで気温の測定が可能となる。さらに、密度・気温の観測結果とメソ数値予報モデル(MSM)の気圧データから吸収線スペクトル強度が一致するように反復計算によって密度・気温を更新し、各々の測定精度を向上させることが可能であることを示した<sup>2</sup>。今回は様々な気温分布を仮定し、下層大気中において上記の反復計算によって気温と密度の測定精度がどの程度向上するか、検討した。

### 2. 下層大気中の CO<sub>2</sub> 濃度鉛直分布測定の課題

下層、特に境界層内は地上付近の地形や建造物の影響を受け、気温の鉛直分布が場所ごとに異なる。Fig. 1 に茨城県館野で観測されたラジオゾンデの気温鉛直分布と、同時刻に東京都港区の東京タワーで観測された気温の鉛直分布の例を示す。都市域に当たる東京タワー上空の気温は郊外の館野に比べて 2 $^{\circ}\text{C}$ ほど気温が高い。この温度差は CO<sub>2</sub> 濃度に換算して約 $\pm 0.1\%$  ( $\pm 0.4$  ppm) の差となる。Fig. 2 に示すように、ライダー観測点の首都大学東京日野キャンパスは館野から南西に約 80 km、東京タワーから西へ約 34 km 離れているため、館野のラジオゾンデ気温データを用いて日野キャンパス上空の CO<sub>2</sub> 濃度分布を算出すると、 $\sim 1$  ppm 程度の不確定要素を含むと推測される。よって、下層大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を高精度で観測するためには、ライダー観測点上空の気温分布を正確に知る必要がある。現在、我々が CO<sub>2</sub> 濃度観測に用いている波長は、 $\lambda_{\text{on}}$  が 1572.992 nm、 $\lambda_{\text{off}}$  が 1573.152 nm である。これに気圧不動点 $\lambda_{\text{T}}$  (1573.007 nm) を加えた 3 波長で CO<sub>2</sub> 濃度と気温の同時観測を行う。

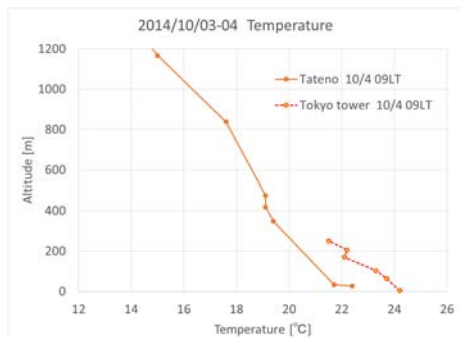


Fig. 1 Temperature profiles at Tateno and Tokyo tower.



Fig. 2 Location map.

### 3. 気温・濃度測定精度の検討

DIAL による気温測定は、次式で表す $\lambda_{\text{T}}$ と $\lambda_{\text{off}}$ の受信信号の比から求めることができる。

$$\frac{S_{\text{T}}(z)}{S_{\text{off}}(z)} = \frac{E_{\text{T}}\beta_{\text{T}}}{E_{\text{off}}\beta_{\text{off}}} \exp \left[ -2 \int_0^z N(\sigma_{\text{T}} - \sigma_{\text{off}}) dZ \right]$$

ここで  $E$  はレーザー出力、 $\beta$  は後方散乱係数、 $N$  は CO<sub>2</sub> 気体密度、 $\sigma$  は吸収断面積である。 $\sigma$  は気温  $T$  と気圧  $p$  の関数なので、 $\lambda_{\text{on}}$  と  $\lambda_{\text{off}}$  の DIAL 観測で得られる  $N$  と MSM の気圧データを用いて  $T$  を求めることができる。さらに、求めた  $T$  と  $p$  から  $N$  を求め、 $N$  と  $p$  から  $T$  を求める。このような計算を繰り返し、気温と密度を決定する。

下層大気中の CO<sub>2</sub> 濃度鉛直分布の DIAL 測定精度について、以下に示す条件を用いて反復計算手法により求め

た。仮定した CO<sub>2</sub> 濃度分布は Fig.4 上図の実線で示すような、境界層内で高濃度となるモデルを用いた。気温の真値 (Temperature model) は Fig.3 に示す①U. S. Standard から-5.0 K、②接地逆転層モデル、③沈降性逆転層モデルを仮定した。反復計算における気温鉛直分布の初期値は U. S. Standard の値を用い、MSM の気圧誤差は GOSAT データ解析に準じて各高度 2.0 hPa とした。ライダー信号には、出力 2 mJ、望遠鏡直径 25 cm、PMT 量子効率 8%、距離分解能 100m、観測時間 30 分のアナログモードで日中に実測したランダムノイズを付加している。ライダー信号から算出した密度・気温と MSM の気圧データから吸収線スペクトル強度が一致するように反復計算によって密度・気温を更新した。Fig.4~6 に各気温モデルにおける気温と濃度の反復計算結果 (1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> は反復計算回数) を示す。気温モデル①~③すべてにおいて、反復計算回数 3 回以上で気温と濃度の値は真値に対してそれぞれ 0.2 K 以下、0.2 ppm 以下に収束することが示された。以上の結果から、3 波長用いた CO<sub>2</sub> 濃度・気温の同時観測を行うことによって、境界層内の CO<sub>2</sub> 濃度鉛直分布をより正確に得ることが可能である。

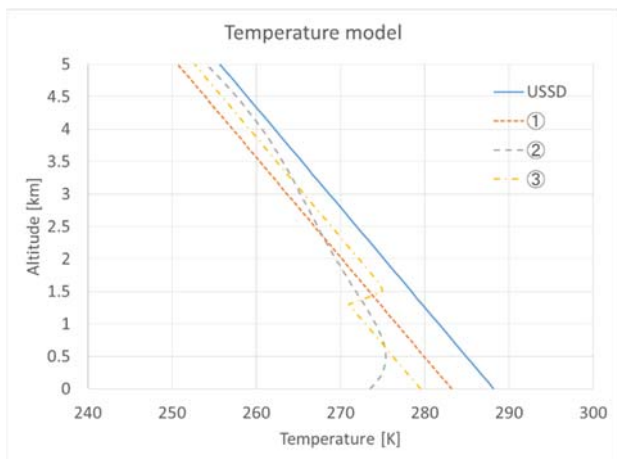


Fig.3 Temperature models. (USSD: U. S. Standard, ① USSD-5.0K, ②Ground inversion layer, ③Precipitated inversion layer)

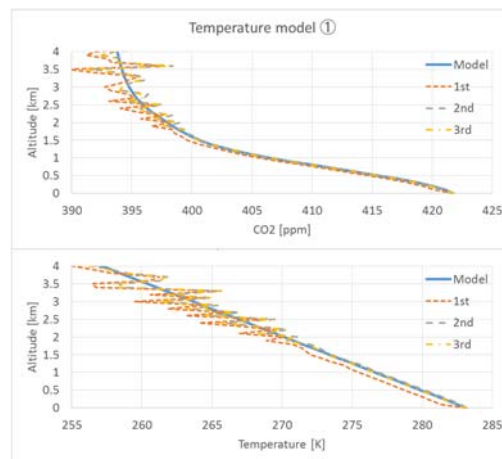


Fig.4 The retrieval analyses of CO<sub>2</sub> density and temperature profiles using temperature model ①

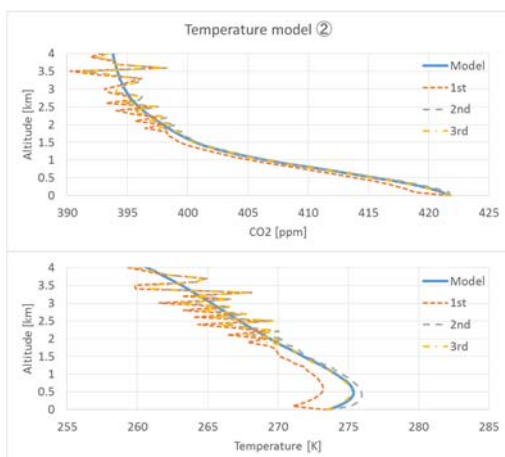


Fig.5 The retrieval analyses of CO<sub>2</sub> density and temperature profiles using temperature model ②.

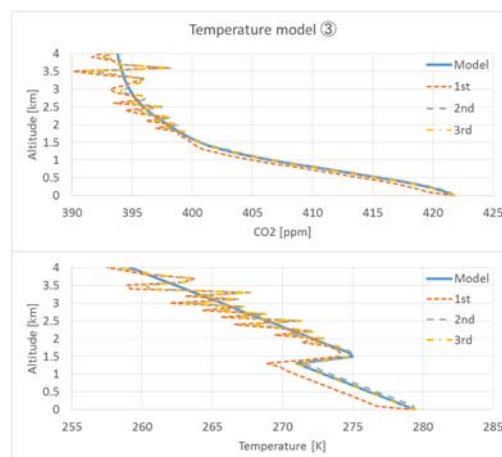


Fig.6 The retrieval analyses of CO<sub>2</sub> density and temperature profiles using temperature model ③.

#### 4. まとめ

DIAL によって CO<sub>2</sub> 鉛直分布測定を行う場合、観測点上空の気温鉛直分布の取得が重要である。気温鉛直分布の初期値を U.S. Standard とした反復計算法により、気温・CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直分布をそれぞれ 0.2 K 以下、0.2 ppm 以下になることを示した。この手法はラジオゾンデ観測点から離れた場所での移動観測においても、効果を発揮する。

**謝辞**：本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発プログラム」により行われた。

#### 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 (本講演)、2015.
2. 長澤他、第 27 回レーザーセンシングシンポジウム、174-177、2009.