

# 東京西部における DIAL 観測中に出現する夜間大気境界層内の

## CO<sub>2</sub> 濃度増加イベントのソース推定

阿保 真, 柴田泰邦, 長澤親生

東京都立大学システムデザイン学部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

### Source Estimation of CO<sub>2</sub> Increase Events in the Nocturnal Atmospheric Boundary Layer over Western Tokyo Observed by the DIAL

Makoto ABO, Chikao NAGASAWA, and Yasukuni SHIBATA

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

**Abstract:** CO<sub>2</sub> is the primary greenhouse gas emitted through human activities. For the detailed analysis of forest carbon dynamics and CO<sub>2</sub> fluxes in urban areas, vertical CO<sub>2</sub> concentration profiles with high spatial and temporal resolution in the lower atmosphere have been conducted by a differential absorption lidar (DIAL). We have developed the range-resolved DIAL with the 1.6 $\mu$ m wavelength for measurements of the vertical CO<sub>2</sub> concentration profiles. Several vertical profiles of CO<sub>2</sub> concentrations for nighttime and day-time from 0.45 to 2.5 km altitude with range resolution of 300 m and an integration time of 1 hour have been measured. In order to estimate the extraction of information on the origin of the CO<sub>2</sub> masses, one day back trajectories were calculated by using a three-dimensional (3-D) atmospheric transport model.

**Key Words:** DIAL, Boundary Layer, CO<sub>2</sub>

#### 1. はじめに

地球温暖化の影響を予測し適切な政策を立案するためには、温室効果ガスの現状を明らかにすることが必要である。衛星による全球的なカラム量観測や CO<sub>2</sub> 観測ネットワークによる地上観測に加え、CO<sub>2</sub> 鉛直分布も重要なパラメータである。しかし対流圏における CO<sub>2</sub> 鉛直プロファイルの測定は、キャンペーン型航空機や民間航空機利用による限られた空間的・時間的範囲での観測にとどまっている。大気輸送モデルを用いたインバース法により、観測データに基づいて CO<sub>2</sub> 発生源と吸収源を推定することが可能となっており、対流圏の正確な CO<sub>2</sub> 鉛直分布が望まれており、ライダー観測は、温室効果ガスの鉛直分布を観測するための最良の方法の一つと考えられる。我々は、CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直プロファイルを測定するために、直接検波型 1.6  $\mu$  m 差分吸収ライダー(DIAL)を開発し<sup>1,2)</sup>、2015 年から東京西部に位置する東京都立大学において、高度 0.45km から 2.5km までの夜間と昼間の CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直プロファイルを、レンジ分解能 300m、積分時間 1 時間で観測を行っている。2016 年 10 月からは 3 波長 DIAL による気温観測を同時に行い、測定で精度を高めている。さらに 2020 年から自由対流圏における CO<sub>2</sub> 混合比の増加主因と考えられる大陸都市部起源の CO<sub>2</sub> 流入の様子を観測する目的で高高度観測モードを追加し、夜間の CO<sub>2</sub> 観測を行っている<sup>3)</sup>。今回は、晴天時夜間の大気境界層内に出現する CO<sub>2</sub> 濃度増加イベントについて、3 次元大気輸送モデルを用いたトラジェクトリ計算を行い、そのソースに関する推定を行った。

#### 2. CO<sub>2</sub>-DIAL システム

Fig.1 に現在稼働している 3 波長 CO<sub>2</sub>-DIAL システムのブロック図を示す。DIAL では、CO<sub>2</sub> 吸収スペクトルのピークに位置する第 1 波長  $\lambda_{on}$ 、弱い吸収に位置する第 2 波長  $\lambda_{off}$ 、これら 2 波長の間位置する第 3 波長  $\lambda_T$  の 3 波長でレーザパルスを送信する。 $\lambda_{on}$  と  $\lambda_{off}$  の受信強度の差から、CO<sub>2</sub> 密度プロファイルを算出することができる。また、CO<sub>2</sub> 吸収断面積の精度を上げるために、 $\lambda_{on}$  と  $\lambda_T$  を用いて温度の鉛直分布も同時に測定している。

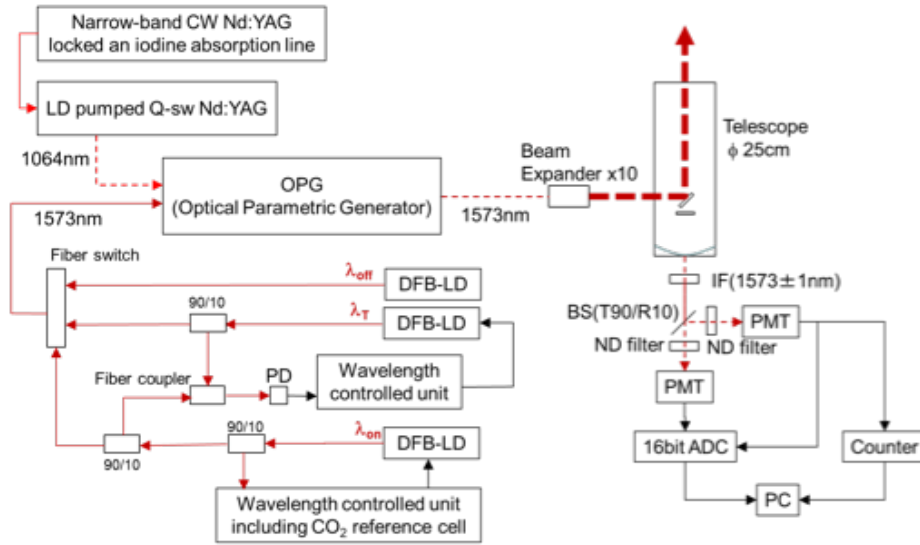


Fig. 1. Schematic diagram of the 3-wavelengths 1.6  $\mu$ m DIAL for measurements CO<sub>2</sub> concentration and atmospheric temperature profiles.

### 3. CO<sub>2</sub>観測とトラジェクトリ解析結果

Fig.2に東京都立大学日野キャンパス（東京都日野市）において夜間から昼間にかけてのCO<sub>2</sub>混合比鉛直分布の連続観測例を示す。晴天時の観測結果からは、日中の境界層内CO<sub>2</sub>混合比が光合成により太陽高度に連動して規則的に増減するが、夜間には緩やかな増加の中に突発的な増加イベントが確認された。しかしこのような大気境界内の夜間CO<sub>2</sub>混合比の増加イベントのソースは不明であった。

そこで数値気象予報メソスケールモデルの各気圧高度面風データを空間解像度 1km×1km、高度解像度 105m、時間間隔 20分に補間し、粒子追跡法による簡易トラジェクトリシミュレーションを実施した。Fig.3に2020年12月8日3時に開始した10高度での後方流跡線解析結果を示す。計算領域は78km×78kmで、×印は工場、+印はライダー観測点の位置を示している。高度500m以下では、ライダー観測点の北側から気塊が来ていることがわかる。

観測点北側に位置する工場から排出されるCO<sub>2</sub>を、次式のブルームモデル式を用いて鉛直・水平方向に分散させ、CO<sub>2</sub>濃度の上昇寄与を3次元時系列として計算した。

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) e\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1)$$

ここで、C(x,y,z)は地点(x,y,z)におけるCO<sub>2</sub>の平均濃度[ppm/m<sup>3</sup>]、xは風下距離[m]、yは水平距離[m]、zは高度[m]、Qは点(x,y,z)におけるCO<sub>2</sub>の排出量[ppm/s]、 $\sigma_y$ および $\sigma_z$ はそれぞれ水平および垂直拡散幅[m]、uは風下における平均風速[m/s]である。

Fig.4は、2020年12月8日3時に開始した10高度での局地3次元流跡線解析の結果である。計算領域は34km×78kmで、-印はライダー観測点である。発生源として2つの工場を設定し、公開データから推定したCO<sub>2</sub>排出量は $4 \times 10^7$ [ppm/s]となった。高度700m以下では、風に流されたCO<sub>2</sub>がライダー観測点上空に到達していることがわかる。

Fig.5は、三次元拡散流跡線解析により算出されたライダー観測点におけるCO<sub>2</sub>混合比の上昇を12高度で示した時間-高度断面図である（2020年12月7日21時～8日13時）。Fig.2の観測結果と比較すると、CO<sub>2</sub>混合比の増加量は時間、高度ともによく一致していることがわかる。

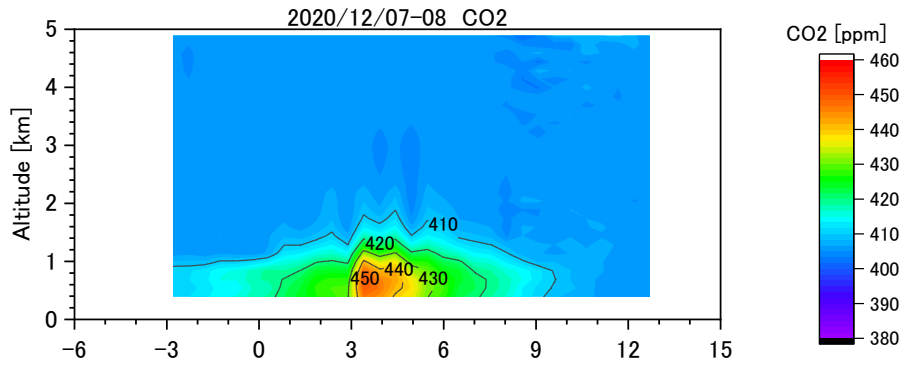


Fig. 2. Time-height cross section of CO<sub>2</sub> mixing ratio at the TMU lidar site (21:00, December 7 – 13:00, December 8, 2020).

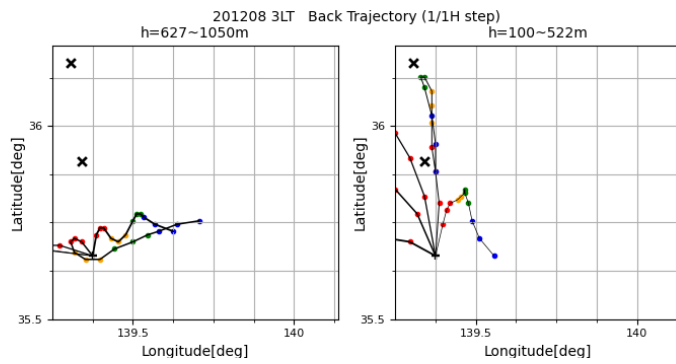


Fig. 3. Backward trajectory analysis at 10 altitudes, start of run at 3:00, December 8, 2020.

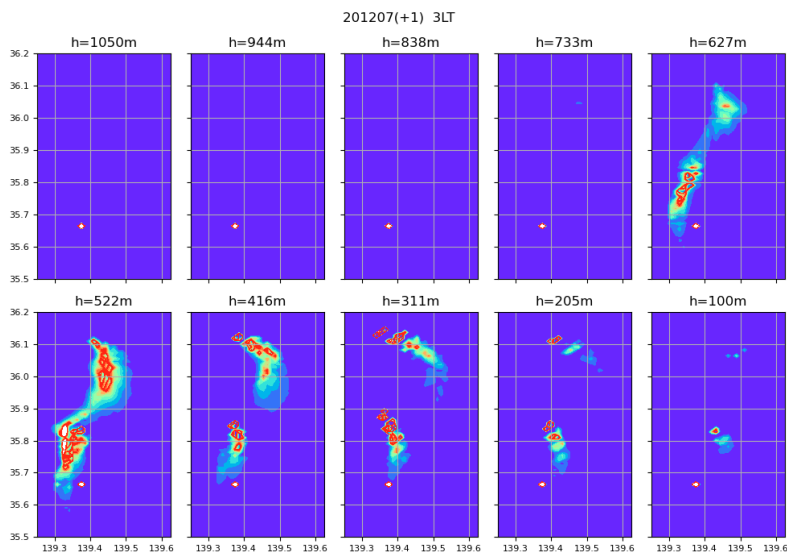


Fig. 4. Three-dimensional dispersion trajectory analysis at 10 altitudes, start of run at 3:00, December 8, 2020. Map area is 34kmx78km and • mark is lidar site. Two factories were set up as sources. It can be seen that the dispersed CO<sub>2</sub> had reached above the lidar site.

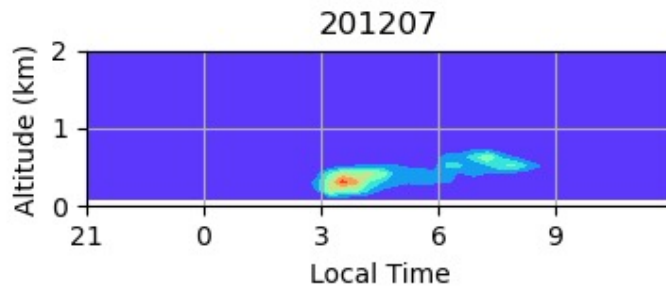


Fig. 5. Time-height cross-section of the increase in the CO<sub>2</sub> mixing ratio at the TMU lidar site calculated by local three-dimensional dispersion trajectory analysis at 12 altitudes (21:00, December 7 – 13:00, December 8, 2020).

#### 4. まとめ

局地三次元流跡線解析により、夜間の下層における CO<sub>2</sub> 混合比の急激な上昇を再現した。この CO<sub>2</sub> の発生源は観測地点の北側にある工場と推定され、夜間の局所的な風の収束により高濃度の CO<sub>2</sub> がライダー観測点に運ばれてきたと考えられる。Cong (2021)<sup>4)</sup>は国勢調査等の統計データをもとに、東京都の 8 セクター（発電所、ごみ処分場、航空機、船舶、道路、商工業施設、住宅、農耕地）からの化石燃料起源 CO<sub>2</sub> 排出量をボトムアップ手法を用いて推定している。この解析結果から、ライダー観測点半径 7km 範囲の平均 CO<sub>2</sub> 排出量を求めると 13.7 [Gg km<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>]となる。一方今回排出源として想定した工場の推定 CO<sub>2</sub> 排出量は 2,425 [Gg year<sup>-1</sup>]であり 2 桁大きい。ライダーで観測された夜間の CO<sub>2</sub> 増加イベントは、夜間の風が弱い時に上空の CO<sub>2</sub> があまり拡散せずライダー観測点まで高濃度のまま到達し、観測点周囲の地表排出源をソースとした夜間増加に上乘せされてイベント的に観測されたものと考えられる。このように CO<sub>2</sub>-DIAL は、CO<sub>2</sub> 発生源の特定や CO<sub>2</sub> 排出量のモニタリングに有用であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo: Appl. Opt., **56** (2017) 1194.
- 2) Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino: Sensors, **18** (2018) 4064.
- 3) 柴田泰邦他, LSS38, (2020) E2.
- 4) R. Cong et al.: Research Square, DOI: 10.21203/rs.3.rs-17565/v4 (2021).