

大気拡散シミュレーションによる DIAL で観測される CO₂ 濃度変動のソース推定

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 CO₂ Variations in DIAL Observations by Atmospheric Dispersion Simulation

Makoto ABO, Chikao NAGASAWA, and Yasukuni SHIBATA

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

Abstract: The inverse method using an atmospheric transport model makes it possible to estimate CO₂ sources and sinks based on observed data. Differential absorption lidar (DIAL) observations are the best way to continuously obtain accurate vertical profiles of CO₂ in the troposphere. We have developed a direct-detection 1.6- μm DIAL to measure the vertical profile of CO₂ concentration. Since 2015, we have been observing vertical profiles of CO₂ during the day and night at an altitude of up to 2.5 km at TMU, located in western Tokyo. We have also estimated the sources of CO₂ concentration increase events that appear in the atmospheric boundary layer during clear nights by trajectory analysis of large-scale sources (thermal power plants, steel mills, and cement factories) using a 3D atmospheric transport model. In this study, we attempted to estimate the source of increased nocturnal CO₂ concentration performing atmospheric dispersion simulations for areal sources/sinks of forest and fossil fuel origin.

Key Words: DIAL, CO₂, biogenic source, fossil fuel source

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 CO₂ 観測ネットワークによる地上観測に加え、CO₂ 鉛直分布も重要なパラメータである。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 CO₂ 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 CO₂ 鉛直分布が連続的に得られるライダー観測は、最良の観測手段と考えられる。我々は、CO₂ 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 μm 差分吸収ライダー(DIAL)を開発した^{1,2)}。2015 年からは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 CO₂ 濃度鉛直プロファイルを、高度分解能 300m、積分時間 1 時間で晴天時を中心に昼夜間測定している。2016 年 10 月からは 3 波長 DIAL による気温観測を同時に行い、測定精度を高めている。さらに 2020 年から自由対流圏における CO₂ 混合比の増加主因と考えられる大陸都市部起源の CO₂ 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 CO₂ 観測を行っている³⁾。また、晴天時夜間の大気境界層内に出現する CO₂ 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大規模ソース(火力発電所、製鉄所、セメント工場)のトラジェクトリ解析を行い、そのソース推定を行った⁴⁾。今回は、森林並びに化石燃料起源の面的ソース/シンクに対する大気拡散シミュレーションを行い、ライダーで観測される夜間 CO₂ 濃度増加のソース推定を試みた。

2. 大気拡散シミュレーションの方法

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 \times 1km、高度解像度 105m、時間間隔 20 分に補間し、簡易大気拡散シミュレーションを実施した。解析領域はライダー観測点 (139.37E, 35.66N) をほぼ中心として関東平野と森林域を含む 111 \times 132km (138.75 \sim 140.25E, 35.2 \sim 36.2N) である。Fig. 1 に解析領域の標高地形図を示す。ライダー観測点は関東平野の西端に位置しており、西側には標高 1000m 以上の山地があるのがわかる。

森林のソース/シンクは陸域生態系モデル VISIT⁵⁾の

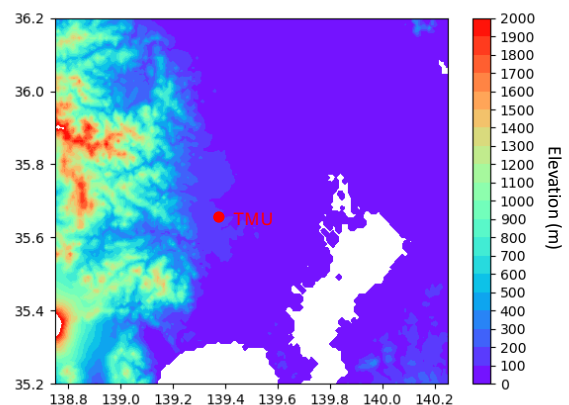


Fig. 1 Topographic map of the analysis Area.

各月の総光合成量並びに生態系呼吸量に日変化を考慮し、土地被覆分類の森林領域に設定した。Fig.2 に解析領域の 2010 年 8 月の生態系呼吸量の設定値並びに純生態系交換量 (NEE) の各月の日変化を示す。夜間は呼吸のみとなるため正の放出, 昼間は光合成が加わるため負の吸収となっている。森林領域は主に観測点の西側に広く分布しているのが分かる。

化石燃料起源のソースは ODIAC2022⁶⁾ の化石燃料データを用いた。Fig.3 に解析領域の 2019 年 8 月の化石燃料放出量の設定値並びにスケールファクタの日変化を示す。化石燃料のソースは観測点の東側に位置する都心並びに京浜・京葉工業地帯に集中しているのがわかる。

各時間の CO₂ 放出量はライダー観測日の月平均データ (データベースの経年変化は無視している) を日変化させ、領域内の各地点の標高に対応する気圧面に設定している。拡散は各気圧面の風により、上下並びに水平方向へ拡散させ CO₂ 濃度の増加分を 3 次元時系列として計算した。大気拡散プログラムはライダー観測開始時間の 12 時間前から走らせている。

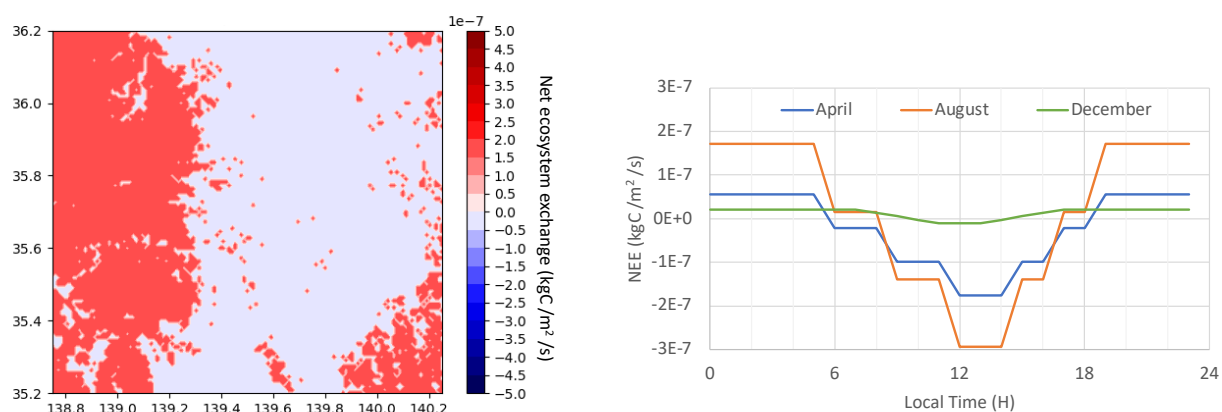


Fig.2 Nighttime NEE(Net Ecosystem Exchange) map in August, 2010 and diurnal variation of NEE for each Month.

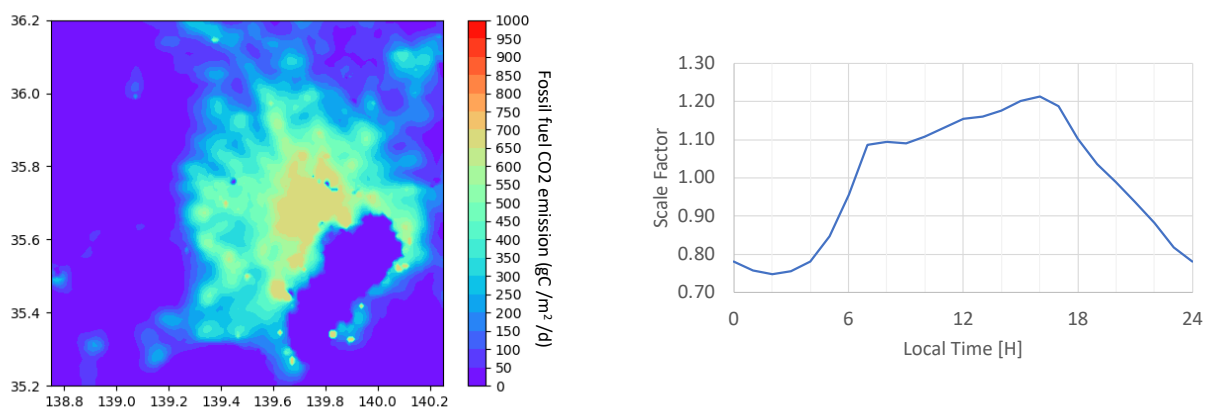


Fig.3 Fossil fuel CO₂ emission map in August, 2019 and diurnal variation of scale factor.

3. ライダー観測結果と大気拡散シミュレーション結果の比較

ライダー観測と大気拡散シミュレーションの比較結果の 1 例を示す。Fig.4 は、東京都立大学日野キャンパス (東京都日野市) において夜間濃度増加時のライダーによる CO₂ 高度分布観測結果, Fig.5 は森林起源 CO₂ の増減量 (夜間は増加) 並びに化石燃料起源 CO₂ の増加量である。観測とシミュレーション結果の絶対値はまだ合わないが、増加のタイミングと高度分布は概ね一致している。

森林ソースは標高の高い場所にあるため、高高度 (概ね 1.5km まで) まで CO₂ の増加に寄与しているが、

化石燃料ソースは標高の低い場所にあるため、低高度（概ね 1km 以下）の CO₂ 増加にしか影響を及ぼしていないことが分かる。

Fig. 6 及び Fig. 7 に、ライダー観測において CO₂ 濃度が全高度領域で高くなった 2018 年 4 月 22 日 3 時の高度 100~2000m に対応する各気圧面における、森林起源並びに化石燃料起源 CO₂ 増加量のマップに風ベクトルを合わせて表示した図をそれぞれ示す。各ソースの CO₂ が各高度の風の収束により、ソースの位置は異なるが結果としてライダー観測点周辺に集中している様子が確認できる。このような風の収束は常に見られるわけではないが、晴天時夜間にはしばしば見られる。

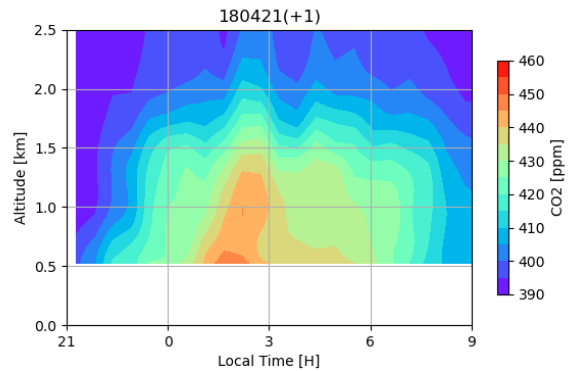


Fig. 4. Observed Time-height cross section of CO₂ mixing ratio at the TMU lidar site (21:00, April 21–9:00, April 22, 2018).

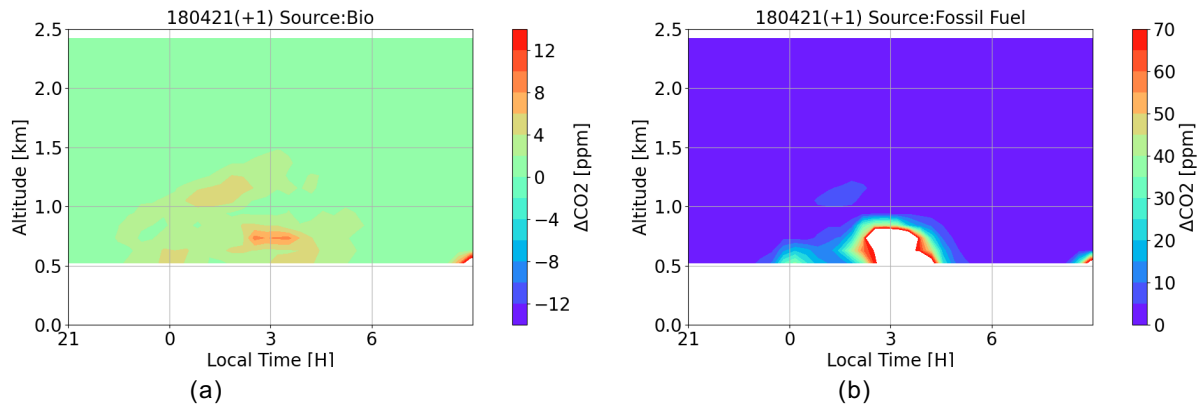


Fig. 5. Time-height cross-section of the increase in the CO₂ mixing ratio at the TMU lidar site calculated by local three-dimensional dispersion trajectory analysis for (a) biogenic source, (b) fossil fuel source.

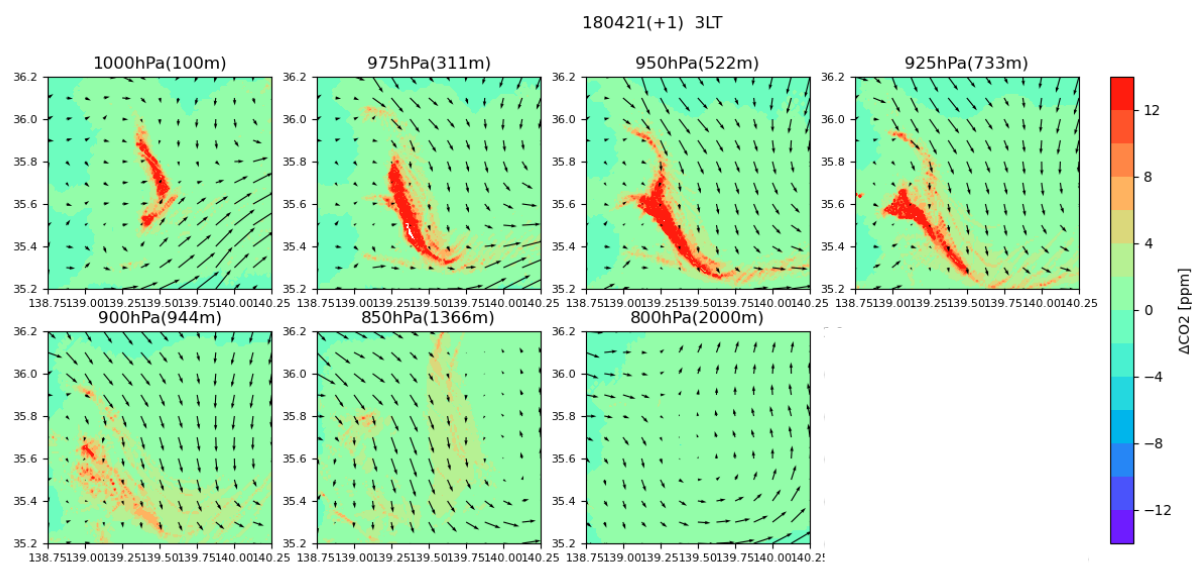


Fig. 6 Height cross sections of CO₂ concentration variations due to biogenic source and wind vector map for each altitude at 3:00AM on April 22, 2018.

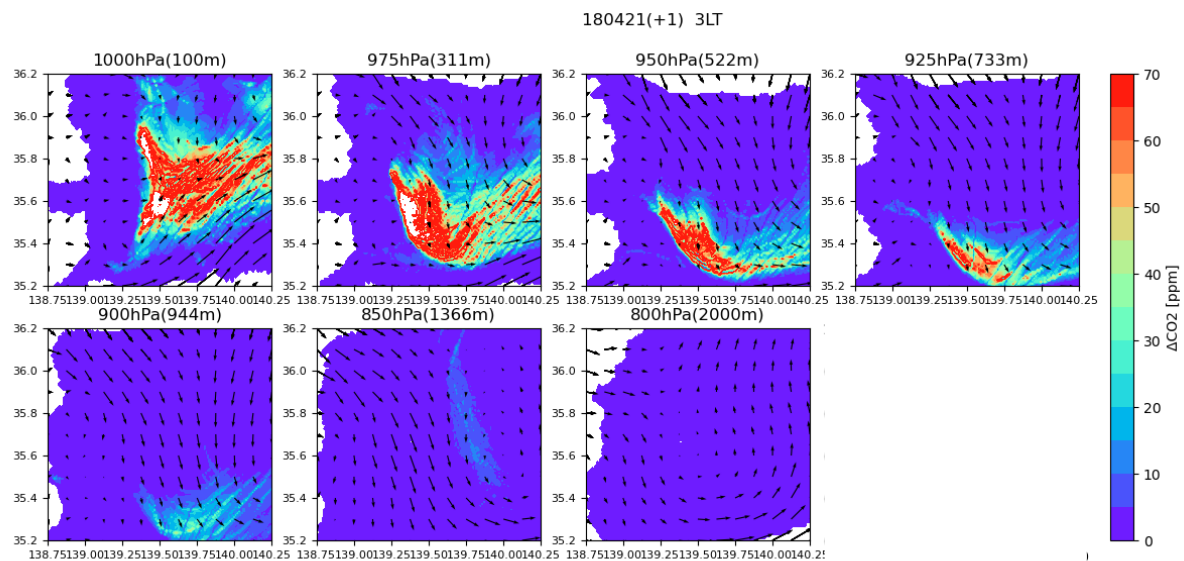


Fig. 7 Height cross sections of CO₂ concentration variations due to fossil fuel source and wind vector map for each altitude at 3:00AM on April 22, 2018.

4. まとめ

簡易的な大気拡散シミュレーションにより、晴天時夜間にライダーで観測された CO₂ 濃度増加について、CO₂ 混合比高度プロファイルの増減を概ね再現することが出来た。今回解析した夜間の CO₂ 増加は、各高度の風がライダー観測点近くで収束することにより、異なるソースの CO₂ がライダー観測点周辺に集中したもので、地形的に観測点の特異な場所である事も影響していると考えられる。今後解析事例を増やすとともに、現状のシミュレーション結果と観測結果では定量的な一致までは議論できていないが、今後鉛直拡散係数を時間並びに高度毎に調整することにより再現性が高まると考えている。ライダーでは地上観測、タワー観測、衛星観測、航空機観測では得られない鉛直プロファイルの連続データが得られるため、ライダー観測とモデル計算を用いることにより、一か所の観測でも CO₂ のソース/シンクの特特定やモニタリングが可能であることが確認できた。

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) 阿保真他, LSS40 (2022) E3.
- 5) 伊藤昭彦, doi:10.17595/20210521.001 (2021).
- 6) T. Oda et al., doi:10.17595/20170411.001 (2015).