

CO₂-DIAL で観測される鉛直分布日変動と移流拡散シミュレーションの比較

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)

Comparison of Advection-Diffusion Model Simulations with Diurnal Variations in the Vertical Profiles Observed by the CO₂-DIAL.

Makoto ABO, Yasukuni SHIBATA, and Chikao NAGASAWA

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

Abstract: To formulate the appropriate reduction policies of CO₂ emissions, it is important to accurately determine the CO₂ dynamics in the atmosphere. Especially for the assessment of CO₂ emissions from large factories and urban areas, their statistics and estimates are considered to have uncertainties. For this purpose, inversion analysis has been developed to estimate emissions by assimilating satellite data into a transport model. Since the Differential Absorption Lidar (DIAL) provides temporal variation of the vertical profile, data assimilation of this vertical profile is expected to improve the accuracy of emission estimation. We developed a direct-detection 1.6 μ m DIAL and observed the vertical profiles of daytime and nighttime CO₂ concentrations from 0.5 km to 2.5 km in western Tokyo since 2015. In this study, as a preliminary step for quantitative emission estimation, we attempted to reproduce the characteristic diurnal variations of vertical profiles of CO₂ concentration in the boundary layer observed in the DIAL using a simple advection-diffusion model calculation.

Key Words: DIAL, CO₂, advection-dispersion model

1. はじめに

CO₂は温室効果ガス総排出量の76%を占め、地球温暖化の最も大きな原因となっている。適切な排出削減政策を立案するためには、CO₂排出量を正確に把握することが重要である。特に大規模排出源や都市部からのCO₂排出については、その統計値や推計値に不確実性があることが指摘されており、精度の高い排出量推定が求められている。そのため、衛星データを輸送モデルに同化して排出量を推定するインバージョン解析法が開発されている¹⁾。しかし、衛星から得られる情報は2次元のカラム濃度分布であり、観測時間も限られている。また民間航空機を利用した観測では、鉛直分布は離着陸時に限られ連続的な時間変化を捉えることができない。これに対して差分吸収ライダー(DIAL)は、CO₂濃度鉛直分布の空間的・時間的变化を得ることができ、DIALの観測結果とモデル計算を組み合わせることで、1箇所の観測結果であっても排出量推定の精度を飛躍的に向上させることが期待できる。

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 μ m DIALを開発した^{2,3)}。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。

今までDIALにより晴天時夜間の大気境界層内に観測される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、そのソース推定を試みた⁴⁾。次に森林並びに化石燃料起源の面的ソース/シンクに対して大気汚染物質の環境アセスメント等に用いられ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⁵⁾。今回は、さらに計算領域外のバックグラウンド濃度を加味し、気象モデルの水平風を用いた移流項と拡散係数を用いた拡散項を組み合わせた簡易的な移流拡散シミュレーションを行い、観測結果との比較を行った。

2. 簡易移流拡散シミュレーションの方法

簡略化した移流拡散方程式は、

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - v \frac{\partial C_i}{\partial y} + K_H \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + K_H \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + S_i \quad (1)$$

と書くことができる⁶⁾。ここで、 C_i は各グリッドの CO_2 混合比、 u と v は水平風速、 K_H は水平拡散係数、 K_z は鉛直拡散係数、 S_i はソース項である。この式を3次元グリッドに対して微分を差分に置き換えて計算を行う。

少ない計算資源でシミュレーションを行うために、拡散係数は気象場から求めず、快晴時には鉛直拡散係数は Fig. 1 に示すように夜間一定、昼間は混合層高度の日変化に対応した高度分布モデルを作成し、水平拡散係数は時間、高度によらず一定値とした。

水平風は気象庁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 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 、高度解像度 105m 、時間間隔 20 分に補間して用いた。計算領域は観測点をほぼ中心として関東平野と森林域を含む $111 \times 132\text{km}$ ($138.75 \sim 140.25^\circ \text{E}$, $35.2 \sim 36.2^\circ \text{N}$) である。ソース/シンクは陸域生態系モデル VISIT⁷⁾、化石燃料データ ODIAC2022⁸⁾、並びに大規模排出源の公表データを用い、各地点の標高に対応する気圧面に設定した。計算領域の境界には一定のバックグラウンド濃度を与えている。計算はライダー観測開始時間の 12 時間前から 30 秒刻みで行っている。

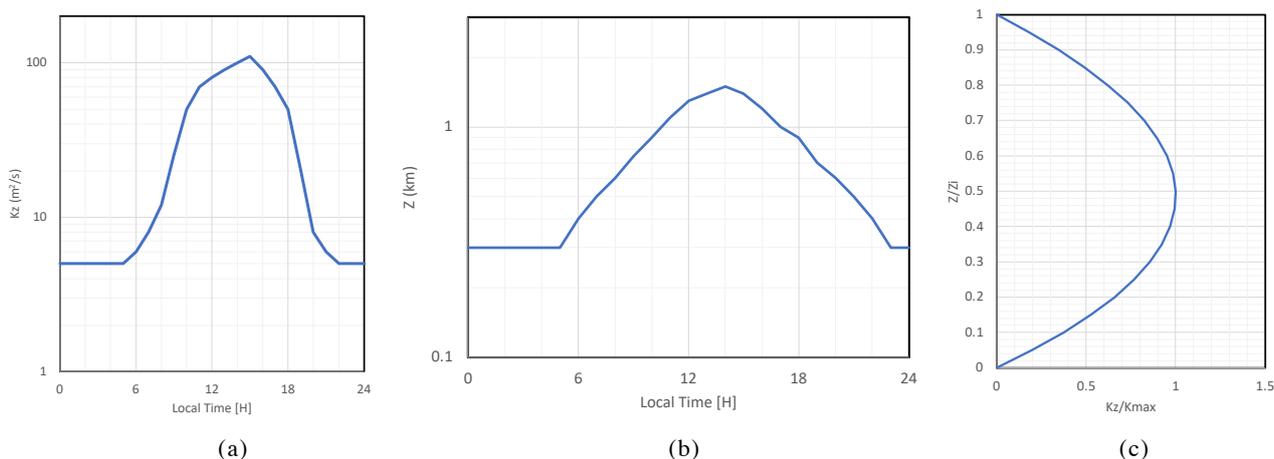


Fig. 1 Diurnal variation of (a) the vertical eddy diffusivity, (b) mixed layer height, and (c) height profile of vertical eddy diffusivity.

3. ライダー観測とシミュレーション結果の比較

一例として Fig. 2 に DIAL による快晴時の昼夜間 CO_2 高度分布観測結果、Fig. 3 に移流拡散シミュレーション結果を示す。観測とシミュレーションの CO_2 増加及び減少の時間的なタイミング概ね一致しており、簡易的な移流拡散シミュレーションではあるが、DIAL で夜間に観測された CO_2 濃度の増加と朝と昼の2回の減少を概ね再現出来た。今回解析した夜間の CO_2 増加は、各高度の風が DIAL 観測点近くで収束することにより、前日の昼間に放出された CO_2 が DIAL 観測点周辺に集中したもので、DIAL 観測点が地形的に特異な場所である事が影響していると考えられる。 CO_2 の水平方向の動きを確認すると、朝の CO_2 減少は空気の動きによる移流・拡散、昼の CO_2 減少は相模湾からの海風による低濃度の海上 CO_2 の侵入が原因と考えられる。しかしながら CO_2 鉛直濃度分布のモデルの再現性は不十分である。これは鉛直拡散係数に簡易モデルを導入したことが一因であるが、他に考慮できていない鉛直方向への移流の影響も考えられる。

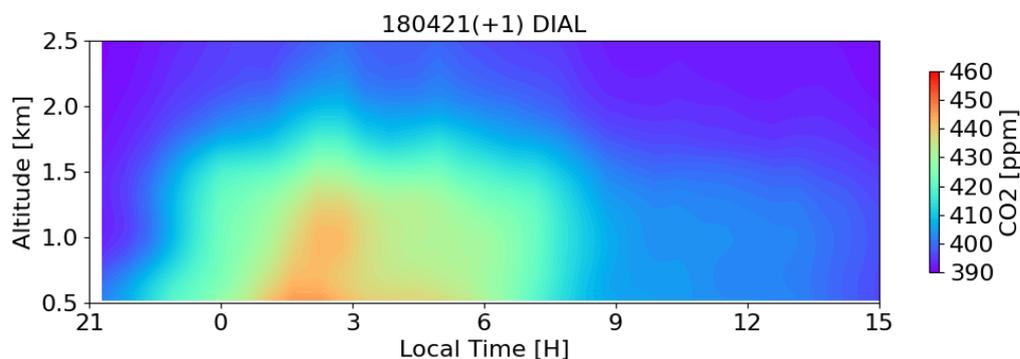


Fig. 2 Observed time-height cross section of CO₂ mixing ratio by DIAL.

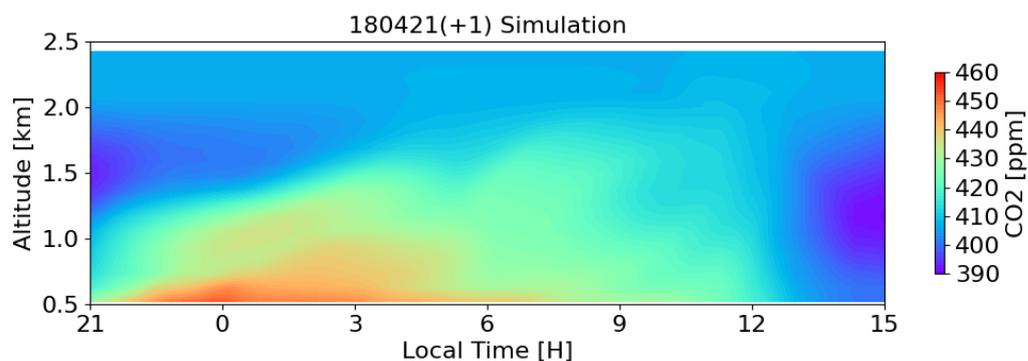


Fig. 3 Time-height cross section of CO₂ mixing ratio by simple transport and dispersion simulations over the DIAL site.

4. まとめ

DIAL で得られる鉛直プロファイルの連続データは、モデル計算と組み合わせることにより、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、地表ソースから自由対流圏への寄与メカニズムの解明にも有用と考えられる。高度方向の濃度分布の再現性が不十分であるが、これは気象場から各格子点の拡散係数を求めていることが一つの要因と考えられ、今後はスーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーションとの比較を計画している。

参考文献

- 1) L. Nayagam et al. : Environ. Res. Lett. **19** (2024) 014031.
- 2) Y. Shibata et al.: Appl. Opt., **56** (2017) 1194.
- 3) Y. Shibata et al.: Sensors, **18** (2018) 4064.
- 4) 阿保真他, LSS40 (2022) E3.
- 5) 阿保真他, LSS41 (2023) E1.
- 6) G. P. Brasseur and D. J. Jacob, Modeling of Atmospheric Chemistry (Cambridge University Press., 2017), Chap 4.
- 7) 伊藤昭彦, doi:10.17595/20210521.001 (2021).
- 8) T. Oda et al., doi:10.17595/20170411.001 (2015).