

CO₂-DIAL における地表から光軸交差高度までの CO₂ カラム量の導出

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)

Derivation of column CO₂ abundance between the ground surface and the received signal height by CO₂-DIAL

Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA, and Makoto ABO

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

Abstract: We have developed a ground based 1.6 μm DIAL to measure vertical CO₂ mixing ratio profiles from 0.4 to 2.5 km altitude. The goals of the CO₂-DIAL are to produce atmospheric CO₂ mixing ratio measurements with much smaller seasonal and diurnal biases from the ground surface. In the ground based lidar, the field of view (FOV) of the telescope must be wide to receive the return signals as near as possible from ground. While the return signals from the far distance are very weak, the FOV must be narrow enough to suppress the sky background light. To solve this problem, we propose a total column measurement method between the ground surface and the overlap height. Instead of strong signals from thick clouds such as the IPDA, the proposed method uses atmospheric return signals from the overlap area.

Key Words: DIAL, column CO₂, overlap area

1. はじめに

我々は CO₂ 濃度鉛直分布測定のための 1.6 μm 差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) を開発し、対流圏上部まで鉛直分布観測を行っている^{1,2)}。近年、対流圏下部において CO₂ 混合比の連続観測に重点を置いており、高度 1km 以下において CO₂ 混合比分布の時間変動の様子が観測されている³⁾。しかしながら、高度 400m 以下はダイナミックレンジと光軸交差の関係上、有効なデータを得ることができず、人為的起源の CO₂ の影響を受けやすい境界層内の CO₂ 混合比変動は未だ良く分かっていない。そこで、我々は距離分解を持って観測が困難な高度 400m 以下において、地表からの CO₂ カラム量を CO₂-DIAL で測定する手法を提案し、その実現性について検討した。

2. CO₂-DIAL による地表からのカラム量測定

距離分解を持つ DIAL やカラム量を計測する IPDA (integrated path differential absorption) は 2 波長のレーザを用い、一方の波長は CO₂ 吸収スペクトルのピーク波長 λ_{on} に同調し、もう一方の波長は吸収の弱い波長 λ_{off} に同調する。2 波長における受光信号強度の差が大気中の CO₂ 分子による吸収に依存することを利用して濃度を計測する。距離 R からのライダー信号 $P(R)$ は次式のライダー方程式で与えられる。

$$P(R) = P_0 \eta \left(\frac{A}{R^2} \right) \Delta R \beta(\lambda, R) Y(R) \times \exp \left[-2 \int_0^R \{ \alpha(\lambda, r) + n_g(r) \sigma_g(\lambda, r) \} dr \right] \quad (1)$$

ここで、 P_0 はレーザエネルギー、 η は受信系効率、 A は受光面積、 ΔR は距離分解能、 $\beta(R)$ は後方散乱係数、 $Y(R)$ は送受信の重なり関数、 $\alpha(r)$ は大気の消散係数、 N_g は対象ガスの濃度、 σ_g は対象ガスの吸収断面積である。DIAL 観測において、気体密度 $n_g(R)$ は次式で求めることができる。

$$n_g(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left\{ \frac{P_{off}(R + \Delta R)}{P_{off}(R)} \frac{P_{on}(R)}{P_{on}(R + \Delta R)} \right\} \quad (2)$$

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 λ_{on} , λ_{off} における値を示す。式(1), (2)より 2 波長が近接する DIAL では、システムパラメータや $\beta(R)$ がキャンセルされる。

Fig.1 に我々が開発した CO₂-DIAL による CO₂ 混合比鉛直分布の観測例を示す。CO₂-DIAL は 1 ショットごとに λ_{on} と λ_{off} のシード光をファイバースイッチで切り替え、光パラメトリック発生器 (OPG) の発振波長を制御している。 λ_{on} と λ_{off} は同一の OPG

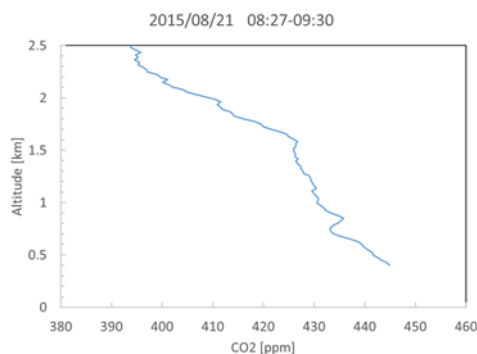


Fig.1 Example of CO₂ mixing ratio profiles.

を用いているがビーム広がり角が λ_{on} と λ_{off} で若干異なり、結果として、 λ_{on} と λ_{off} の重なり関数 $Y(R)$ の分布が若干異なる。受信視野を広げることで $Y(R)$ が 1 となる下限高度を下げることはできるが、昼間観測時は太陽光による SN の悪化が問題となる。また、ダイナミックレンジの兼ね合いから、現状、高度 400 m 以下の CO₂ 濃度計測が実現できていない。そこで、IPDA の計測法を応用し、Fig. 2 に示すように地表から高度 400 m までの CO₂ カラム量を CO₂-DIAL システムで測定する手法を提案する。

IPDA から距離 R までの平均濃度 N_g は、次式で表せる⁴⁾。

$$N_g = \int_0^R n_g(r) dr = \frac{1}{2\Delta\sigma_w} \left[\frac{d}{dR} \ln \left\{ \frac{P_{on}(R)}{P_{off}(R)} \right\} \right] \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\sigma_w$ は高度ごとの気温、気圧を考慮して重み付された差分吸収断面積である。通常、IPDA は雲や地表などのハードターゲットからの反射光を利用して、IPDA とハードターゲット間の平均濃度を計測する。我々は $Y(R)$ が 1 となる高度 400 m からの DIAL 信号を利用し、地表から高度 400 m の間の平均濃度を計測する。これにより、地表から高度 400 m まではカラム量を、それ以上の高度は距離分解能を持って CO₂ 混合比の分布を得ることが可能となる。

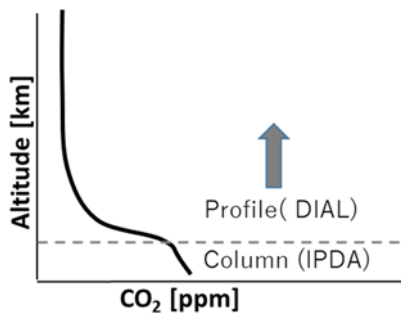


Fig.2 Measurement area of the DIAL technique and the IPAD technique.

3. CO₂ カラム量の測定精度

式(3)で示したように、IPDA 方式では 2 波長間のレーザ出力はキャンセルされない。よって、常にレ

ーザ出力をモニターしておく必要がある。2 波長のレーザ出力比の計測誤差が CO₂ カラム量にどの程度影響するか、数値シミュレーションを行った。地表から高度 400 m まで CO₂ 混合比を 420 ppm 一定とし、レーザ出力比の計測誤差が 0.1% であると仮定する。この場合、CO₂ カラム量は ± 5.2 ppm の誤差を持つ。よって、16 bit の AD コンバーターを用いてレーザ出力比の揺らぎを 0.02% 以下で計測できれば、CO₂ カラム量を 1 ppm 以下で計測可能である。

次に、統計誤差について検討した。 λ_{on} と λ_{off} の SN 比をそれぞれ SNR_{on} 、 SNR_{off} とおくと、統計誤差 ε は

$$\varepsilon = \frac{-1}{\ln\{P_{on}(R)/P_{off}(R)\}} \left(\frac{1}{SNR_{on}} + \frac{1}{SNR_{off}} \right) \quad (4)$$

で表せる。これまでの CO₂-DIAL の観測データ (1 プロファイル 30 分積算) から高度 400 m における 2 波長の SN 比を用いると、エアロゾルの希薄な場合の統計誤差 ε は約 1.2 ppm、エアロゾルが濃い場合は約 0.4 ppm で計測可能であることがわかった。

4. まとめ

現状では DIAL 観測が困難な地表から光軸交差高度に相当する高度 400 m の間の CO₂ 混合比を計測するため、IPDA 手法を適用する方法を提案した。使用する CO₂-DIAL の特性上、地上から光軸交差高度までの CO₂ 分布を得ることができないが、DIAL 信号を用いてカラム量の取得が可能となる。地表付近では人為起源の CO₂ が多く存在するため、IPDA 手法と DIAL 手法を組み合わせることで地表からの CO₂ 分布を取得できる点において、シンク・ソースの解明に大きく寄与するものと考えられる。出力モニター装置を製作し、実際に地表から光軸交差高度までのカラム量計測を行う予定である。

参考文献

- 1) D. Sakaizawa, et al., *Appl. Opt.*, 48, 748-757, 2009.
- 2) Y. Shibata, et al., *Appl. Opt.*, 56, 1194-1201, 2017.
- 3) 柴田他, 第 35 回レーザセンシングシンポジウム, D-4, 2017.
- 4) J. B. Abshire, et al., *Tellus B*, 62, 770-783, 2010.