

CO₂ 差分吸収ライダーのデータ解析における新手法の提案

A new method on data analysis of CO₂ differential absorption lidar

橋本英介, 柴田泰邦, 長澤親生
Eisuke Hashimoto, Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa

首都大学東京 システムデザイン研究科
Tokyo Metropolitan University

Abstract: In the differential absorption lidar (DIAL), the noise affects strongly the results, because the DIAL equation contains the differentiation. This error due to the noise is a serious problem for measurements of atmospheric minor constituents for example CO₂. In this paper we present a new deriving method of DIAL not containing the differentiation in order to increase the accuracy of measurements under low signal to noise ratio.

1. はじめに

差分吸収ライダー (DIAL) は, 二酸化炭素 (CO₂) やオゾン (O₃) といった大気中の微量気体の濃度測定に広く用いられている. DIAL の計算式には微分が含まれ, 実際には差分に置き換えて計算される. 微分は高周波通過フィルタであり, 受信信号に含まれる雑音が計算結果の精度に大きく影響する. これは DIAL による微量気体の濃度測定において深刻な問題である. 本研究では差分を用いずに微分係数の値を求める手法を提案し, CO₂ 差分吸収ライダー (CO₂-DIAL) への適用をシミュレーションによって検討した.

2. 新手法の提案

DIAL のデータ解析において, 微分係数を差分に置き換えることなく解析的に近似する手法が Kovalev[1]により提案された. その論文では Klett 法[2]が用いられたが, 本研究では Klett 法を用いることなく数値計算を実行できるように改良した新手法を提案する.

一般に DIAL では, 次の関係式が用いられる.

$$\frac{S_{\text{off}}(r)}{S_{\text{on}}(r)} = \exp \left[2 \int_0^r K(r') dr' \right] \quad (1)$$

ここで, 距離 r , off 波長, on 波長における受信光子数をそれぞれ $S_{\text{off}}(r)$, $S_{\text{on}}(r)$, CO₂の吸収による減衰係数を $K(r)$ とする. また, 次式の定義を行う.

$$T(r) = \left[\frac{S_{\text{off}}(r) S_{\text{on}}(r_0)}{S_{\text{on}}(r) S_{\text{off}}(r_0)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで, r_0 は観測されたデータの最小距離とする. (1)式と(2)式より, 次の式が得られる.

$$T(r) = \exp \left[\int_{r_0}^r K(r') dr' \right] \quad (3)$$

DIAL におけるデータ解析では, 観測データから得られる $T(r)$ を用いて減衰係数 $K(r)$ の分布を求めることが目的である. $K(r)$ を解析的に近似するにあたり, 次式で定義される新たな関数 $K^*(r)$ を導入する.

$$T(r) = \left[\frac{K^*(r)}{K^*(r_0)} \right]^{\frac{1}{a}} \cdot \exp \left[\int_{r_0}^r K^*(r') dr' \right] \quad (4)$$

ここで, a は任意の定数とする. (3)式と(4)式について両辺の自然対数を取ることで, 次の関係が得られる.

$$\int_{r_0}^r K(r') dr' = \int_{r_0}^r K^*(r') dr' + \frac{1}{a} \ln \left[\frac{K^*(r)}{K^*(r_0)} \right] \quad (5)$$

(5)式の両辺を r について微分すれば, 次式を得る.

$$K(r) = K^*(r) + \frac{1}{a} \cdot \frac{d}{dr} [\ln K^*(r)] \quad (6)$$

よって,

$$\frac{d}{dr} [\ln K^*(r)] \ll a \quad (7)$$

の条件の下で, $K^*(r)$ は $K(r)$ の近似となる. さて, $K^*(r)$ を求めることを考える. (4)式の両辺の自然対数を r について微分して整理すれば, $K^*(r)$ が次の微分方程式を満たすことが分かる.

$$\frac{d}{dr} K^*(r) - a \left\{ \frac{d}{dr} [\ln T(r)] \right\} K^*(r) = a [K^*(r)]^2 \quad (8)$$

(8)式は非線形微分方程式である. しかしながら, ベルヌーイ型微分方程式であるので解析的に解けることが知られている. したがって, (8)式を解けば次式の形で解を得る.

$$K^*(r) = \frac{[T(r)]^a}{\frac{1}{K^*(r_0)} + a \int_{r_0}^r [T(r')]^a dr'} \quad (9)$$

(9)式によって $K^*(r)$ を求めることで減衰係数 $K(r)$ を近似する手法を本研究では提案する.

3. パラメータの最適化

(9)式には任意のパラメータ定数 a が含まれている. 計算機シミュレーションの結果から, $K^*(r)$ の計算結果が a の値によって大きく変動することが明らかとなった. したがって, a の最適値を考える必要がある. $K(r) \approx K^*(r)$ と近似ができている場合, (3)式より次式の関係が得られる.

$$\ln T(r) \approx \int_{r_0}^r K^*(r') dr' \quad (10)$$

よって、本研究では(10)式の関係で、観測データとの誤差の和を最小にする a を採用した。すなわち、

$$a = \arg \min_a \sum_{i=0}^n \left| \int_{r_0}^{r_i} K^*(r') dr' - \ln T(r_i) \right| \quad (11)$$

とする。ここで、 r_0, r_1, \dots, r_n は観測データの各距離である。

4. シミュレーション結果

CO₂-DIAL への提案法の適用を計算機シミュレーションによって検討した。初めに雑音を含まないデータに対する提案法の適用結果を Fig.1 に示す。ここで距離分解能を10m(2km 未満)と50m(2km 以上)に設定し、 $K^*(r_0)$ にはモデルの真値を使用した。Fig.1 より、5km 以上の高度において計算結果が真値から大きくずれるのは、その領域において選択した a の値が(7)式を十分に満たさなくなっていることが原因と推察される。

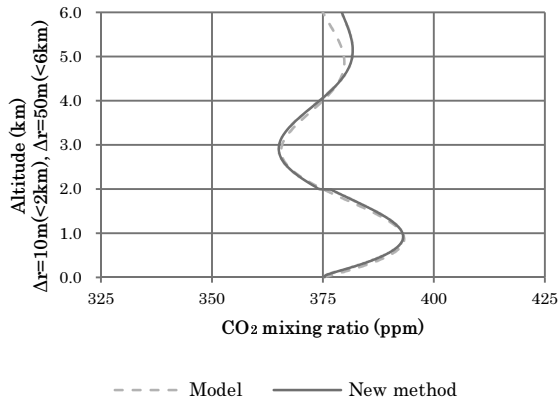


Fig.1 The model profile and the profile that obtained with the new method for the data without noise.

次に雑音を含むデータに対して提案法を適用する。Fig.2 にシミュレーションに用いたデータの SN 比を示す。シミュレーションにおいて、低高度では SN 比が大きいことを想定して高度分解能 10m (2km 未満)、それ以上の高度では高度分解能 50m とした。また、SN 比は実際の測定データの値を参考にして決定した。雑音を含むデータに対する提案法と従来法の比較を Fig.3 に示す。Fig.3 のグラフから計算した相対誤差を Fig.4 に示す。Fig.4 より、明らかに従来法に比べて提案法では高度 5km までの範囲で相対誤差が小さく抑えられていることがわかる。

5. まとめ

DIAL による微量気体濃度の測定では、DIAL の計算式が含む微分によって、受信信号に含まれる雑音が計算結果に大きく影響する。そこで、本研究では差分を用いずに濃度を導出する手法を、数値計算上の安定性を伴った形で提案し、CO₂-DIAL への提案法の適用をシミュレーションによって検証した。その結果、雑音が含まれるデータに対して従来法より良い結果が期待できることがわかった。提案

法はその計算式に含まれるパラメータが計算結果と密接に関係している。今後はパラメータの最適値を決めるための基準について検討を行っていく必要がある。

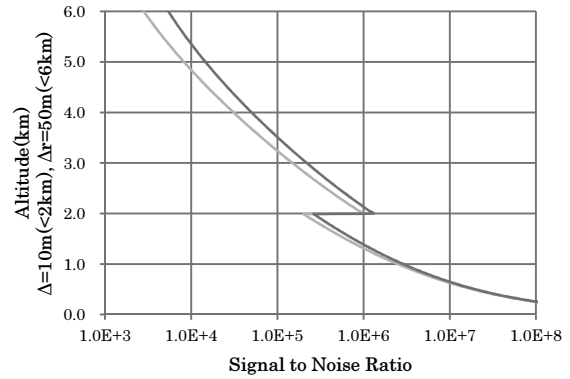


Fig.2 The signal to noise ratio of simulated data.

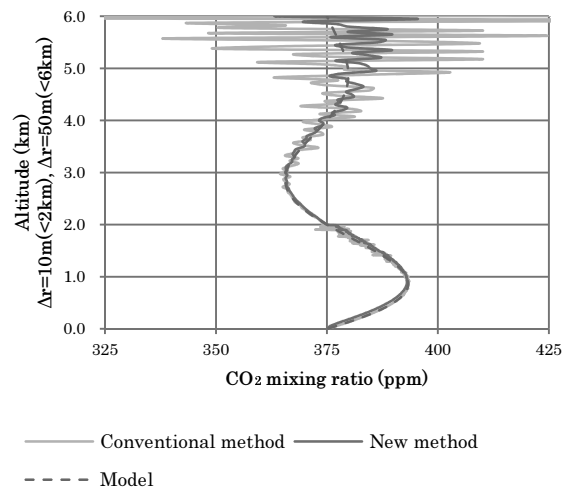


Fig.3 The model profile and the profile that obtained with the new method compared with the conventional procedure.

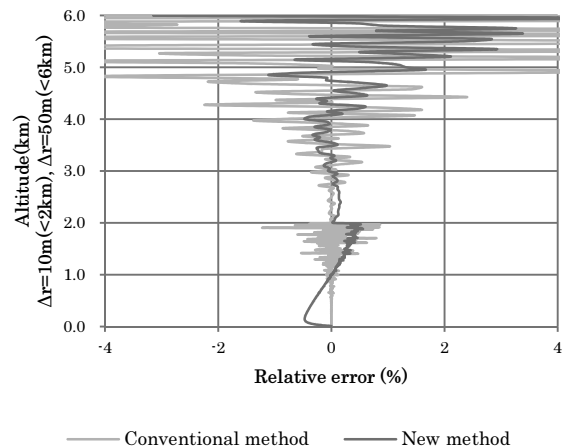


Fig.4 The relative error of the retrieved concentration with the new method compared with the conventional method.

参考文献

- [1] Vladimir A. Kovalev, "Analytical differentiation of the differential-absorption-lidar data distorted by noise," Appl. Opt. 41, 1156–1162 (2002).
- [2] James D. Klett, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns," Appl. Opt. 20, 211–220 (1981).