

CO₂-DIAL における逆問題アルゴリズムの研究

A study of inverse problem algorithm on CO₂-DIAL

茂木 洋二、柴田 泰邦、長澤 親生

Yohji Motegi, Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa

首都大学東京

Tokyo Metropolitan University

Abstract: We have developed the 1.6 μ m differential absorption lidar (DIAL) for measurements of the carbon dioxide (CO₂) profiles in the atmosphere. Conventionally, the difference approximation is used for the density derivation of the DIAL. However, the retrieval method using the difference approximation is sensitive to the noise component included in the received signal of the DIAL. We conduct the retrieval method of the DIAL which resolves the inverse problem of the integral equation instead of the difference approximation. The remarkable decrease of the measurement errors under the random noise is reported by computer simulating and applying to actual data of the DIAL.

1. はじめに

地球温暖化の要因として、大気中の人為的二氧化碳(CO₂)の増加が挙げられる。地球温暖化の進行具合や解決策を探る上で、高精度での CO₂ 濃度の鉛直分布測定が求められている。その一つの手法として差分吸収ライダー(DIAL)がある。

本研究では、DIAL の受信信号から CO₂ の濃度を導出する際の逆問題アルゴリズムの研究を行った。従来、受信信号から対象物質濃度の導出には、距離方向の差分近似が用いられてきた。本研究では、そこに受信信号に雑音が多く含まれる場合の誤差要因があると考え、差分近似を用いずに積分のまま逆問題を解く方法を導入した。この手法の計算機シミュレーションと実測値への適用において、測定精度が大きく改善されることを示した。

2. 差分吸収ライダー

DIAL における地上からの CO₂ 濃度の鉛直分布観測では CO₂ の吸収の大きな波長 (on 波長) と小さな波長 (off 波長) の異なる 2 つ波長のパルスレーザー光を鉛直方向に送信し、それぞれの散乱光から濃度分布を導出する。

DIAL での観測において、測定対象物質の高度 R₁ から高度 R₂ までの平均密度 n は以下の(1)式によって表せる。

$$n = \frac{1}{2\Delta\sigma(R_2 - R_1)} \ln \left[\frac{S_{on}(R_1)S_{off}(R_2)}{S_{on}(R_2)S_{off}(R_1)} \right] \quad (1)$$

(1)式において $\Delta\sigma$ は on, off 波長時の吸収断面積

の差、(R₂-R₁) は距離分解能 ΔR を表している。また、S は on, off 各波長における、高度 R₁、R₂ の受信信号強度を表している。S はライダー方程式と呼ばれる以下の(2)式によって求められる。

$$S(R) = \frac{(E\lambda/hc)A\eta\beta Qc\Delta t}{2R^2} \exp -2 \int_0^R \alpha dR \quad (2)$$

(2)式において、E はレーザーの出力、 λ はレーザー波長、h はプランク定数、c は光速、A は受信鏡の面積、 η は検出器の量子効率、 β は後方散乱係数、Q は全光学効率、 Δt は受信時間分解能、R は高度、 α は消散係数を表している。

3. 逆問題解法

DIAL での濃度算出において、従来は(1)式が一般的に用いられてきた。本研究では、Stelmaszczyk et al.(2000)が提案しているような逆問題解法の適用を検証する。まず、(2)式より変形し、(3)式の積分方程式を得る。

$$\frac{S_{on}}{S_{off}} = \frac{E_{on}}{E_{off}} \exp(-2 \int_0^R N_{co2} \Delta\sigma_{co2} dR) \quad (3)$$

ただし、(3)式導入の過程において、(2)式の導出と同様に、後方散乱係数、消散係数は on 波長、off 波長において同一と近似した。

受信信号から(3)式の左辺の on と off の 2 波長の信号強度比が決定される。その後、右辺の値と左辺の値が一致する N_{CO_2} の値を求めるために逆問題を解く。

4. モデル計算による検証

4.1 システムパラメータの仮定

モデル計算に使用する DIAL のシステムパラメータは、我々が開発した CO_2 -DIAL を基本にしている。その諸元を Table.1 に示す。

この時の CO_2 濃度分布モデルは、高度 2000m 以下は単調に増加し、2000m 以上では 400ppm で一定の濃度分布を仮定した。また、高度分解能は 100m とし、(2)式を用いて得られた受信信号にランダムノイズを付加した。なお、このランダムノイズはコンピュータの乱数機能にて得たものを用いた。

Table.1 Assumed system parameters of CO_2 DIAL

E	6 [mJ]
λ on	1572.018[nm]
λ off	1572.15[nm]
A	0.09π [m ²]
η	8[%]
Q	60[%]

4.2 ランダムノイズによる影響

DIAL において、検出器のノイズや太陽光等による背景光が大きな測定誤差の要因となる。背景光のようなランダムノイズを含む受信信号に対して、計算機シミュレーションにより従来手法と新手法の比較検証を行った結果を Fig.1 に示す。結果として、従来手法では、高高度になるほど S/N が悪くなることに起因し、導出される濃度の振動が発生するため誤差が大きくなるが、新手法では誤差が極めて小さくなる事が分かる。

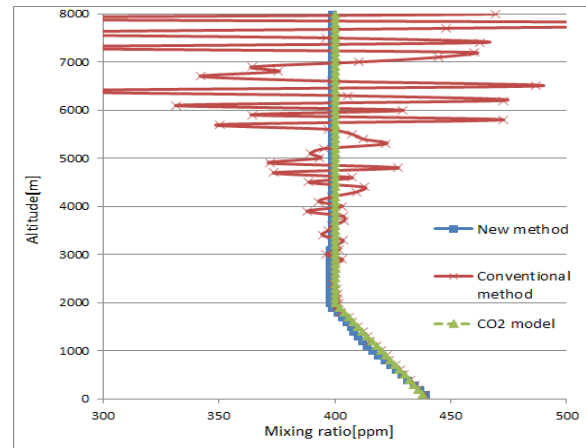


Fig.1 Comparison of CO_2 mixing ratio profiles retrieved by the conventional and new methods under the influence of random noise.

4.3 初期値設定

逆問題の解法においては、 CO_2 濃度の初期分布を仮定する必要がある。ここでは、 CO_2 モデル分布と初期分布の関係を検証する。

まず、全高度の CO_2 濃度を 400ppm としたモデルを用いた場合の逆問題解法によるシミュレーション結果を Fig.2 に示す。この時、濃度の初期値を各高度 350ppm と設定し、濃度分解能を 0.1ppm として計算を行った。そこから (3)式の左辺と右辺の値が最も近い分布を求めて、徐々に設定濃度を増やすことにより、計算を繰り返した。その結果、誤差 1%以内で真値に収束することが分かった。

続いて、濃度分布が高度ごとに変化するモデルを使用し、シミュレーションを行った。その際、新手法における初期値を各高度一定に 350ppm とし、濃度分解能を 1ppm として計算を行った結果を Fig.3 に示す。その結果、導出された濃度が真値から大きくずれてしまった。

そこで、Fig.1 に示したように S/N の大きいところでは、従来法においても測定精度を上げることができるので、S/N の大きい高度 2000m 以下では、従来手法で得られた値を初期値に用い、2000m 以上の高度では、ランダムノイズによる振動の平均値をとり、それを初期値分布として新手法の計算を行った。その結果を Fig.4 に示す。従来手法の場合、高度 3000m 地点から導出濃度に大きな振動が発生していたが、新手法では高度 6000m 付近まで誤差 1%以内での測定が可能であることが分かった。それ以上の高高度部分では

S/Nが悪くなり、新手法においても3%程度の誤差が発生している。

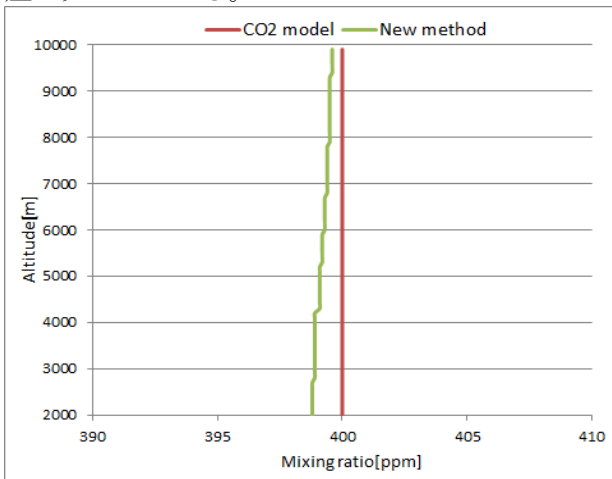


Fig.2 CO₂ mixing ratio profiles retrieved by the new method vs the constant profile model. ($\Delta R=100\text{m}$)

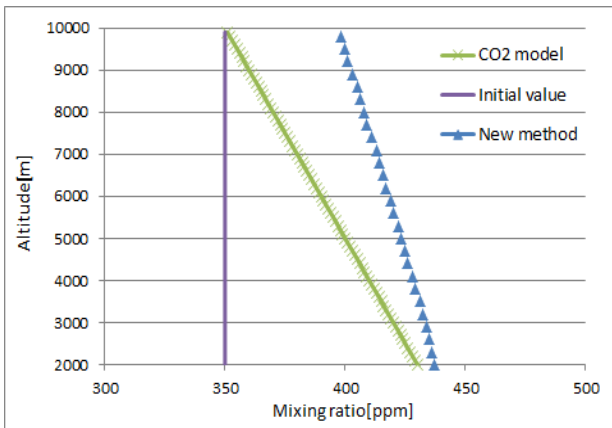


Fig.3 CO₂ mixing ratio profiles retrieved by the new method using the 350ppm initial value vs the gradient profile model. ($\Delta R=100\text{m}$)

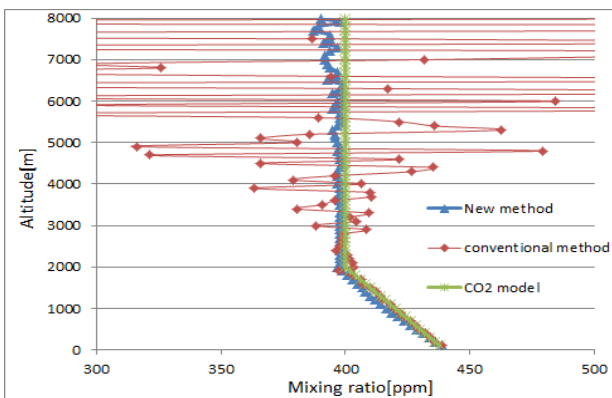


Fig.4 CO₂ mixing ratio profiles retrieved by the new method that a part of the concentration profile retrieved by the conventional method is used for the initial profile.

5. 実測データからの濃度算出

本章では、実際の DIAL から得られた受信信号に逆問題解法を適用する。

先ず従来手法で CO₂ 濃度分布を求めた上で、統計誤差が小さく、ランダムノイズの影響が最も少ない高度の濃度を、新手法の初期値として用いる。したがって、初期値として高度 4000m地点の CO₂ 混合比を 430ppm と設定した。それ以外の高度領域の初期値は、誤差分散の平均値を用いた。新手法を適用した実際の受信信号を Fig.5 に、その計算結果を Fig.6 に示す。

また、従来手法では 2 高度間の受信信号値によって濃度を導出するため、Fig.7 に示すような、高度間でエアロゾル等による受信信号に急激な変化があった場合の濃度導出では、大きな誤差が発生した。しかし、新手法では単一の高度の on/off 波長の受信信号比のみから濃度を求める事ができるため、多層のエアロゾルによる受信信号強度の高度変化が大きくても、高精度な濃度導出が可能であることが分かる。その計算結果を Fig.8 に示す。なお、新手法の初期値として、高度 4800 m地点の CO₂ 混合比を 394ppm とした。

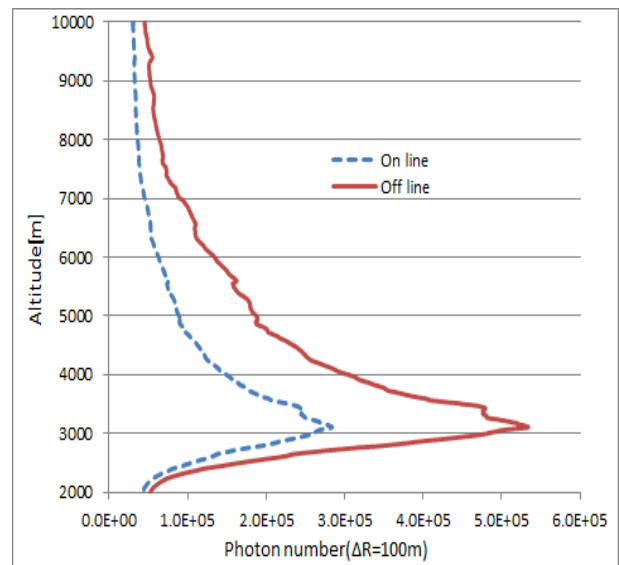


Fig.5 Lidar signals. ($\Delta R=100\text{m}$)

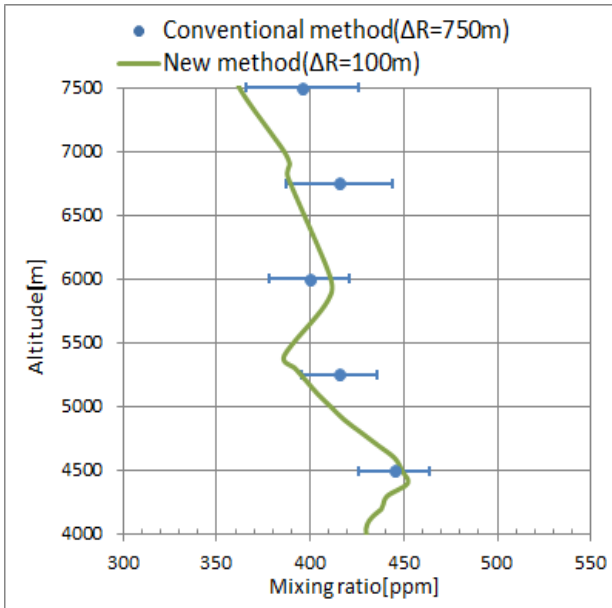


Fig.6 Comparison of CO₂ mixing ratio profiles retrieved by the conventional and new methods.

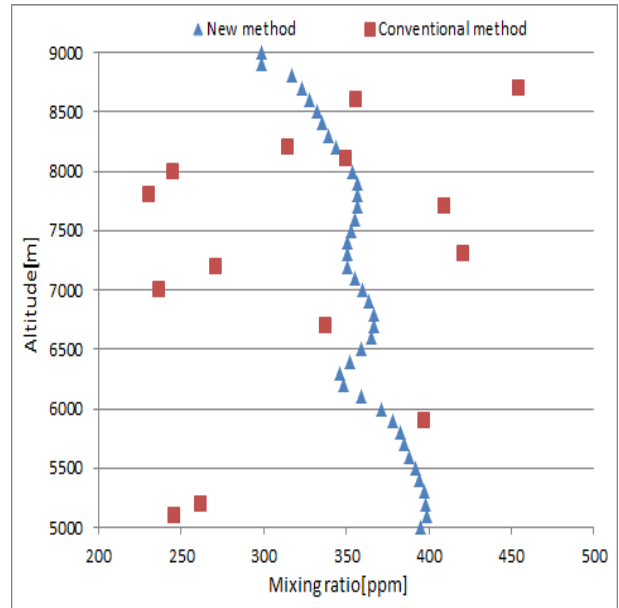


Fig.8 CO₂ mixing ratio profile retrieved by the new method. ($\Delta R=100m$)

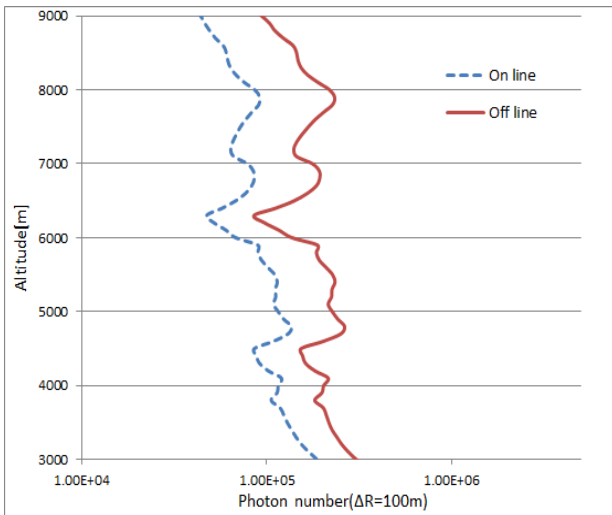


Fig.7 Lidar signals. ($\Delta R=100m$)

6. 結論

CO₂-DIAL における S/N の小さい受信信号に対しては、従来手法で導出した CO₂ 濃度に大きな誤差が発生することが知られている。

本論文では、CO₂-DIAL の濃度導出に Stelmaszczyk et al.(2000)の提案する逆解法の有用性を検証した。

逆解法は、初期値の設定により収束しないことがあるため、我々は初期値分布に受信信号の S/N の大きい部分から従来法で導出した濃度分布を逆解法の初期値の一部に用いることで、容易に真値に収束し、飛躍的に導出濃度誤差を減少させることができることを計算機シミュレーションで検証し、実際のデータに適用することにより示した。

[参考文献]

- [1] HITRAN データベース 2008
- [2] U.S.Standard Atmosphere, U.S.Govement Office(1976)
- [3] K.Stelmaszczyk, A.Czyzewski, A.Szymanski, A.Pietruczuk, S.Chudzynski,K.Ernst, T.Stacewicz”New method of elaboration of the lidar signal” Appl.Phys.B 70,295-299(2000).