

1.6 μm DIAL を用いた CO₂ 濃度測定に関する最適化アルゴリズムの研究 Studies on optimal algorithms on measurements of CO₂ concentration profiles using 1.6 μm DIAL

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

○堂面拓郎, 長澤親生, 柴田泰邦, 阿保 真
○Takuro Domen, Chikao Nagasawa, Yasukuni Shibata and Makoto Abo

Abstract: The comparison studies of two algorithms for the high accuracy CO₂ concentration profiles deduced from 1.6 μm -CO₂DIAL are reported. One is the algorithm using the temperature and pressure measured simultaneously with the CO₂ concentration in the atmosphere using 1.6 μm -CO₂DIAL with five wavelengths. The other is the algorithm using the temperature measured simultaneously with the CO₂ concentration using 1.6 μm -CO₂DIAL and the pressure data provided from GPV-JMA. The results of the error analysis for two algorithms obtained by computer simulation are reported.

1. はじめに

我々は、2007年に波長 1.57 μm 帯の CO₂ 吸収線を利用した直接検波法による DIAL を用いて、測定誤差 1%程度での CO₂ 鉛直濃度分布測定に成功したが、現在、さらに高精度での CO₂ 鉛直濃度分布測定法の開発を行っている[1].

前回、波長 1.57 μm 帯の 2本の CO₂ 吸収線を利用して、CO₂ 濃度と同時に気温・気圧測定を行い、得られた値から反復計算により、CO₂ 濃度測定の精度を高めるという手法を提案した[2].

本稿では、① 前回提案した手法の波長選択の見直しと、今回新たに提案する ② 1本の吸収線だけによる CO₂ 濃度・気温の同時測定と気象データ(GPV)を元にした気圧データから高精度に CO₂ 濃度求める方法の 2つの測定法について、計算機シミュレーションによる測定精度の比較研究結果を報告する。

2. 比較する 2 測定法の概要

まず、提案する 2つの測定法の概要を説明する。

①の CO₂ 濃度測定法

Fig.1 のように 2本の CO₂ 吸収線上に 5 波長を選択する。CO₂ 濃度測定、気圧測定は CO₂ 吸収線のピーク、気温測定では CO₂ 吸収線のウイングを利用する。その他、2本の off 波長を必要とする。

また、1つの吸収線について、気温を固定し気圧を変化させたときの吸収断面積を Fig.2 に示す。Fig.2 から吸収線のウイングに気圧に鈍感な波長が存在することがわかる。この波長を気温測定では用いる。

②の CO₂ 濃度測定法

Fig.3 のように 1本の CO₂ 吸収線上に濃度と気温測定用と off 波長の 3 波長を選択する。気温測定波長は①の測定法と同様の根拠による。気圧の高度分布データは気象データ(GPV)から求める。

----- Temperature and Pressure ——— Density

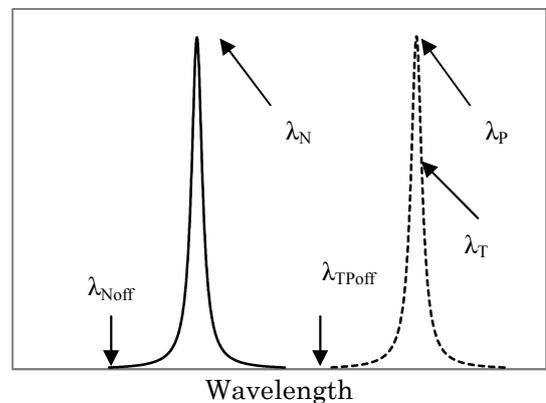


Fig.1 Location of five wavelengths for density, temperature and pressure measurements using with ① method

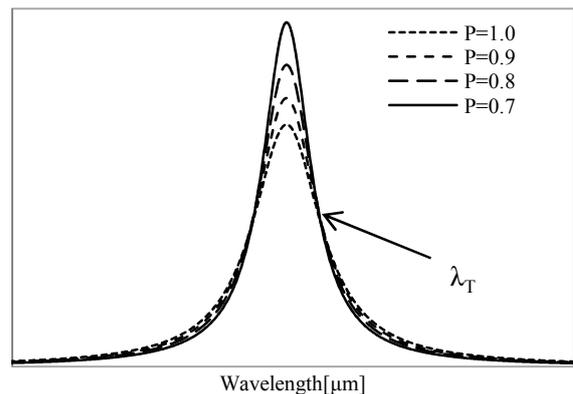


Fig.2 CO₂ absorption spectra for P=0.7, 0.8, 0.9, 1.0 [atm] at T=constant(288.15[K])

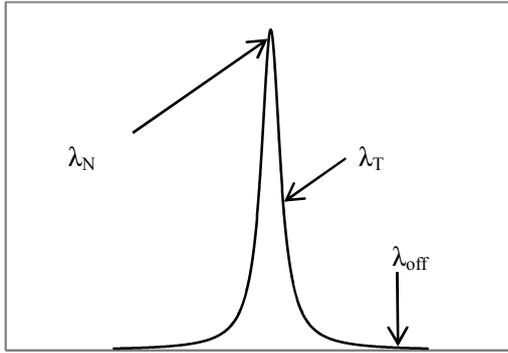


Fig.3 Location of three wavelengths for density and temperature measurements using with ②method

3. 反復計算による高精度化

CO₂DIAL で用いる CO₂ 吸収スペクトルは、CO₂ 濃度、気温、気圧の変数となる。そこで、3つの連立方程式を作り、それぞれの解を求める。その時に用いる手法が反復計算である。

反復計算の順序としてはまず、気温と気圧の値を適当な値に仮定し、式へ代入し CO₂ 濃度の仮の解を求める。次に今求めた CO₂ 濃度の値と先に仮定した気圧の値から気温の仮の解を求める。そして、CO₂ 濃度、気温の仮の値から気圧の仮の解を求める。反復計算は、収束するまでこれを繰り返す。その流れを Fig.4 に示す。

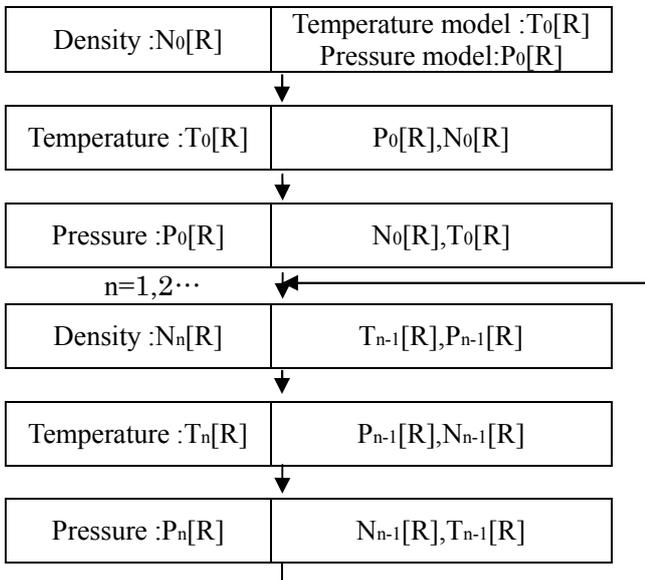


Fig.4 Process of an iteration method

4. 収束条件

上記の反復計算は選択する吸収線によっては結果が発散してしまう可能性がある[3]. 反復計算を用いて測定精度を高めるためには再計算する前と後で誤差が小さくならなければならない。

波長 λ での吸収断面積 σ の気温 T と気圧 P に対する変化率を以下に示す。

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial T} = \frac{\sigma(\lambda, P, T) - \sigma(\lambda, P, T + \Delta T)}{\Delta T \sigma(\lambda, P, T)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial P} = \frac{\sigma(\lambda, P, T) - \sigma(\lambda, P + \Delta P, T)}{\Delta P \sigma(\lambda, P, T)} \quad (3)$$

各測定誤差の相互関係を気温及び気圧の変化率を用いて以下の式に近似する。

$$\begin{aligned} N\sigma(T, P, \lambda) &= (N + \Delta N)\sigma(T + \Delta T, P + \Delta P, \lambda) \\ &\cong (N + \Delta N)(\sigma(T, P, \lambda) + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \Delta T \\ &\quad + \frac{\partial \sigma}{\partial P} \Delta P) \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式から各波長での測定誤差を求める。そしてそれぞれの測定誤差を時、反復計算の収束条件が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_n}{\Delta T_{n-1}} &= \left| \frac{1}{\frac{\partial \sigma}{\partial T}} \left\{ \frac{\partial \sigma(\lambda_N)}{\partial T} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\frac{\partial \sigma(\lambda_T)}{\partial T} - \frac{\partial \sigma(\lambda_P)}{\partial T} \right) \right\} \right| < 1 \end{aligned} \quad (5)$$

上記の収束条件は①CO₂ 濃度、気温、気圧の同時測定における気温の収束条件である。

②CO₂ 濃度、気温の同時測定における収束条件は上式とは異なり、

$$\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{n-1}} = \frac{\frac{\partial \sigma(\lambda_N)}{\partial T}}{\frac{\partial \sigma(\lambda_T)}{\partial T}} \quad (6)$$

となる。上記の収束条件を満たさない場合には、値が発散せずに発散してしまう。また、実際に計算機シミュレーションで計算する場合、CO₂ 濃度、気温、気圧のランダム誤差を加味して反復計算を行う。

5. 波長選択

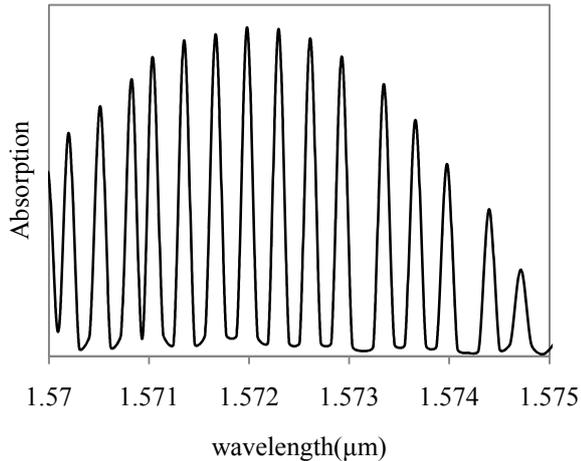


Fig.5 CO₂ absorption lines around 1.57μm wavelength

Fig.5 に 1.57μm 帯の CO₂ 吸収線を示す. 1.57μm ~ 1.575μm では強い吸収線は 15 個ある. この 15 個の吸収線から考える全ての組み合わせのシミュレーションを行い, その測定精度を検証した.

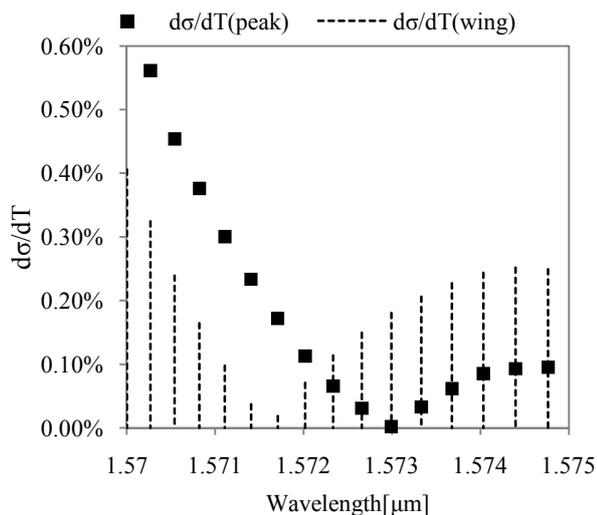


Fig.6 Temperature dependency of CO₂ absorption cross sections ($\Delta T=1[K]$)

また, Fig.6 に吸収断面積の気温依存性を示す. 気温のランダム誤差は各吸収断面積の気温依存に関係がある. また, 吸収断面積の気温依存は反復計算の条件式(5), (6)に関係がある.

6. 測定誤差のシミュレーション

計算機シミュレーションでは

- i. CO₂ 濃度, 気温, 気圧のランダム誤差,
 - ii. レーザの同調精度,
 - iii. 圧力シフトに起因する誤差,
- の 3 つを考慮した. 発振レーザの同調精度は今回のシミュレーションでは 2MHz とした. 圧力シフト係数には不確実性が存在し, HITRAN 2008 のデータを利用したがその不確実性を 2% とした. また, 計算機シミュレーションを行うに当たっ

て用いたライダのシステムパラメータを Table.1 に示す.

Table.1 Assumed system Parameters of CO₂ DIAL

Energy per pulse	20mJ
Repetition rate	100Hz
Quantum efficiency	16%
Optical efficiency	60%
Receiver diameter	80cm
Altitude resolution	500m
observation time	2hours

①の CO₂ 濃度・気温・気圧の同時測定, ②の CO₂ 濃度・気温の同時測定, の波長の組み合わせに関しては, 計算機シミュレーション結果から CO₂ 濃度, 気温, 気圧のランダム誤差に加えて, 収束条件が良い波長を組み合わせることが最終的な CO₂ 濃度誤差の縮小に繋がる事が判明した. つまり, 収束条件の $|\Delta T_n / \Delta T_{n-1}| < 1$ を満たせば, 値は収束するが, $|\Delta T_n / \Delta T_{n-1}|$ の値が小さければ小さいほど良い結果になるということである. したがって, 今回は, この値ができるだけ小さいものを用いた.

Fig.7 に①の測定法の従来の測定波長と今回計算機シミュレーションによって示された CO₂ 濃度測定誤差が一番小さい波長の $\Delta T_n / \Delta T_{n-1}$ を示す.

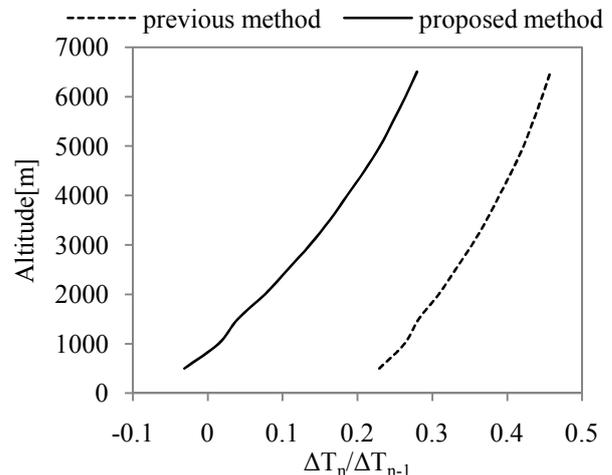


Fig.7 Convergence condition for previous and proposed methods

Fig.7 より従来選択していた波長よりも今回提案する波長は, $|\Delta T_n / \Delta T_{n-1}|$ が小さい.

Table.2 に波長の組み合わせを示し, ①は今回提案する波長での CO₂ 濃度・気温・気圧の DIAL 測定, ①'は従来選択していた波長での CO₂ 濃度・気温・気圧の DIAL 測定, ②は気圧は気象データ (GPV) から求め, CO₂ 濃度・気温は DIAL 測定す

る場合、の3手法での誤差計算の結果を Fig.8 に示す。なお、気象データ(GPV)による各高度における気圧・気温の誤差は、GOSAT データの解析に準じて、各高度 2.0[hPa], 2.0[K]とした[4]。

Table.2 Wavelengths for density, temperature and pressure measurements

method	$\lambda_N[\mu\text{m}]$	$\lambda_T[\mu\text{m}]$	$\lambda_p[\mu\text{m}]$
①	1.571708	1.573347	1.573332
①'	1.572018	1.573347	1.573332
②	1.572992	1.572992	

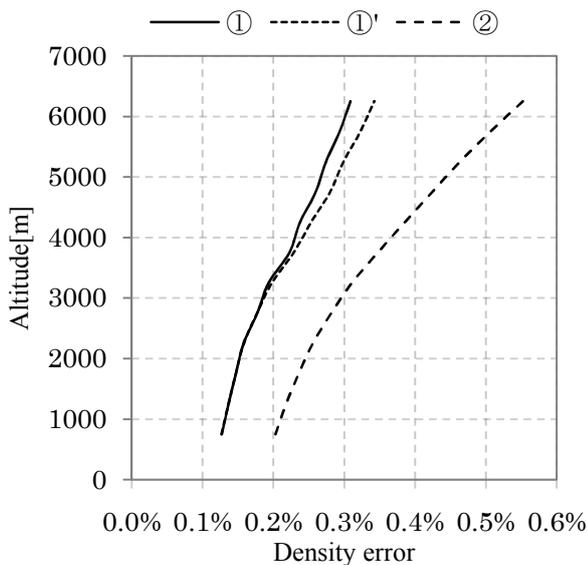


Fig.8 Calculated each density error profiles considering random errors

7. まとめ

Fig.8 から①方式の CO₂ 濃度・気温・気圧の DIAL 測定では高度 6000m における CO₂ 濃度の測定誤差が約 0.3%, ①'方式の CO₂ 濃度・気温・気圧の DIAL 測定では高度 6000m における CO₂ 濃度の測定誤差が約 0.34%, ②方式の CO₂ 濃度・気温の DIAL 測定と気圧の GPV データ利用の場合では、高度 6000m における CO₂ 濃度の測定誤差は約 0.56%である事がわかった。

①, ①'方式では、5 波長を必要とするが、②方式では 3 波長で済むことから、この程度の誤差であれば、②方式も十分に実用化の価値があるものと思われる。

また、反復計算を利用して測定をする場合、吸収断面積の気温や気圧の感度だけを考慮するのではなく、収束条件を注意深く適用して波長を選択することが重要であることがわかった。

今後の展開としては、吸収線のスペクトル形

状のモデル関数として、これまで voigt 関数を用いてきたが、より複雑な Garatry 関数などを用いることによる有意性を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Daisuke Sakaizawa, Chikao Nagasawa, Tomohiro Nagai, Makoto Abo, Yasukuni Shibata, Masahisa Nakazato, and tetsu Sakai, "1.6 μm Differential absorption lidar using the photon counting detection for the vertical Carbon dioxide profiles" Submitted to Applied Optics(Apl. Opt.) 2008
- [2] 大城雄一他, 第 56 回応用物理学会学術講演会予稿集, 30p-ZM-12/III, pp1172
- [3] 松田景一他, 第 27 回レーザセンシングシンポジウム予稿集, G-3, p60-p63
- [4] 横田達也, 青木忠生, 江口菜穂, 太田芳文, 吉田幸生, セルゲイ オフシェコフ, アンドレイ ブリル, ラファエル デビアン, 森田勇, GOSAT 搭載温室効果ガス観測センサ (TANSO-FIS)短波長赤外バンドのデータ処理手法, 日本リモートセンシング学会誌, Volume 28 Number 2 April 2008 pp.133-142