

CO₂-DIAL を用いた気温観測法における誤差解析

柴田 泰邦, 長澤 親生, 阿保 真
東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Error analysis in temperature measurement technique using CO₂-DIAL

Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA, and Makoto ABO
Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Error analysis of the temperature measurement method by the CO₂-DIAL using three wavelengths is discussed. The third wavelength around 1573.04 nm minimizes the temperature error due to the iteration method. The laser fluctuation of ± 10 MHz maintains the temperature error within ± 0.35 °C at 3 km altitude or less. The absorption cross-section is calculated by estimating the atmospheric pressure distribution. The temperature error is about -0.5 °C/hPa for the atmospheric pressure estimation error at around 3 km altitude. We can use high-reliability objective analysis and reanalysis pressure data in areas where radiosonde stations are in high density. Moreover, we conducted a validation experiment at the Tokyo Metropolitan University Hino campus to compare the three-wavelength DIAL measurements with in-situ sensor measurements. This result is within the range of the above temperature error and demonstrates the utility of the atmospheric temperature measurement using CO₂-DIAL.

Key Words: temperature, pressure, DIAL, CO₂

1. はじめに

我々は下部対流圏の気温鉛直分布を連続観測するため、気体分子吸収スペクトル強度の温度依存性を利用する差分吸収ライダー (DIAL: Differential absorption lidar) を開発した^{1,2)}。気温鉛直分布を計測する手段としてラジオゾンデがあるが、1日2回の観測頻度では、CO₂などの微量気体成分の大気混合比の高精度観測や逆転層のような気温の鉛直構造の時系列変動を十分に捉えることはできない。また、客観解析の気温分布データでも鉛直分解能が十分でないため、同様の観測を精度よく行うことは難しい。我々が開発した CO₂-DIAL による気温測定は、時間分解能が 30 分、高さ分解能が 150~300 m と気温鉛直分布の時間変動を捉えるのに十分な時空間分解能を有する。

本手法は 1 つの CO₂ 吸収スペクトルに対し、3 つの波長を用いて 2 組の DIAL を構成し、吸収断面積の温度依存性を利用して、数値計算により気温を求めている。通常の吸収ピーク波長 λ_{on} と吸収の弱い波長 λ_{off} に加え、温度を計測するための λ_T を付加している。この λ_T の位置により数値計算過程で生じる、気温誤差が異なる。講演では、 λ_T の最適化、レーザ周波数揺らぎの影響、および吸収断面積の計算に用いる気圧鉛直分布の推定誤差による影響について報告する。

2. 気温測定における誤差解析

DIAL 技術を使用した温度測定では、気体分子吸収スペクトルの温度依存性が利用される。従来の密度観測に用いる吸収波長 λ_{on} と非吸収波長 λ_{off} に加え、温度測定用の 3 番目の波長 λ_T が吸収スペクトルのエッジ部分に適用される。温度 T は、式(1)の DIAL 方程式と式(2)の λ_{on} と λ_T の信号強度比から求まる。

$$N_{CO_2}(z) = \frac{1}{2\Delta\sigma_{on-off}(z)|z_2 - z_1|} \ln \left[\frac{P_{off}(z_2) P_{on}(z_1)}{P_{off}(z_1) P_{on}(z_2)} \right] \quad (1)$$

$$\frac{P_T(z)}{P_{on}(z)} = \frac{E_T}{E_{on}} \exp \left[-2 \int_0^z \Delta\sigma_{on-T}(z') N_{CO_2}(z') dz' \right] \quad (2)$$

ここで、 $P_i(z)$ は信号強度 (添え字の i は on: λ_{on} , off: λ_{off} , T: λ_T)、 $\Delta\sigma_{on-off}(z)$ は λ_{on} と λ_{off} の吸収断面積の差 ($=|\sigma_{on}(z) - \sigma_{off}(z)|$)、 E_i はレーザ出力、 $\Delta\sigma_{on-T}(z)$ は λ_{on} と λ_T の吸収断面積の差 ($=|\sigma_{on}(z) - \sigma_T(z)|$) である。中心波数 ν_0 [cm⁻¹] の吸収スペクトルにおいて、波数 ν における吸収断面積 $\sigma(\nu)$ は、気温に関するドップラー拡がり (ガウシアン分布 $G(\nu; \gamma_D)$) と圧力によるローレンツ拡がり (ローレンツ分布 $L(\nu; \gamma_P)$) の畳み込みとして得

られる Voigt 関数 $V(v; \gamma_D, \gamma_p)$ を用いて以下の式で表せる。

$$\sigma(v) = \sigma_0(T)V(v; \gamma_D, \gamma_p) = \sigma_0(T) \int_{-\infty}^{+\infty} G(v'; \gamma_D)L(v - v'; \gamma_p)dv' \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_0(T)$ は v_0 における吸収断面積、 γ_D はドップラー拡がり、 γ_p は圧力拡がり、 T は温度であり、 γ_D は T に、 γ_p は T と気圧 p に依存する。Voigt関数から直接的に T を求めることができないので以下の反復計算を行う。①： T と p を仮定し、式(1)の N_{CO_2} を導出、②：①の N_{CO_2} を式(2)に代入し T を導出、③：②の T を式(1)に代入して新たな N_{CO_2} を導出、のステップを繰り返し、前後のステップにおける N_{CO_2} が収束条件を満たせば、その時の T を解とする。

Fig. 1に高度1 km, 3 km, 5 kmにおけるCO₂吸収断面積スペクトル（中心波長1572.992 nm）の例を示す。高度が上がると気温と気圧の低下により γ_D と γ_p が小さくなり、スペクトル幅が狭くなる。また、 $\sigma_0(T)$ は大きくなる。したがって、 λ_T の位置、つまり式(2)中の $\Delta\sigma_{on-T}(z)$ の取り扱いと、各波長の安定性が気温測定にとって重要である。

2.1 λ_T の位置に起因する気温誤差

反復計算過程の②では、気温を刻んで式(3)を満たす条件を決定する。したがって、 λ_T の位置によっては N_{CO_2} が収束条件を満たしても、求めた T が実際の気温と大きく異なる場合がある。Fig. 2に N_{CO_2} の収束条件を0.01%、 T の刻みを0.01°Cとした場合における λ_T に対する気温解析誤差 ΔT_{ana} を、高度1 km, 3 km, 5 kmについて示す。赤枠で囲った1573.04 nm前後に λ_T を設定すると、各高度における ΔT_{ana} が0.05°C以下と、反復計算に起因する気温解析誤差を小さくできる。

2.2 レーザ周波数安定性に起因する気温誤差

CO₂-DIALの光源はヨウ素安定化パルスNd:YAG (1064 nm)で励起したOPG (Optical Parametric Generator) で、スペクトル幅は280 MHz、周波数揺らぎは10 MHz以下である。Fig.3にレーザ周波数揺らぎに起因する気温誤差を示す。高度が上がると吸収スペクトルの幅が狭くなり、 λ_T における吸収スペクトルの傾きが大きくなるため、気温誤差が大きくなる。

2.3 気圧推定誤差に起因する気温誤差

吸収断面積の計算では、気圧を仮定している。気圧推定誤差1.0 hPaあたりの気温解析誤差をシミュレーションした。US standardの気温、気圧モデルを用いた結果、高度1 kmで-0.42°C/hPa、高度3 kmで-0.52°C/hPa、高度5 kmで-0.64°C/hPaとなる。したがって、トータル気温誤差を1°C以下に抑えるためには、少なくとも1 hPa以下の精度で気圧を推定する必要がある。中央ヨーロッパにおいて再解析データとラジオゾンデ観測データの指定気圧における高度を20年分比較したSzot等の論文では、850 hPa(1500 m相当)と700 hPa (3000 m相当)で平均二乗誤差6~7 mであると述べており、気圧誤差に換算すると約0.6 hPaである³⁾。このように日本や欧米など、ラジオゾンデステーションが密にある場所では客観解析及び再解析データの気圧精度は高い。以上のことから、我々のライダー観測点においては客観解析または再解析の気圧データを利用することで、CO₂-DIALによる温度測定が可能である。しかし、海上など客観解析データの信頼性が劣るところでは、第4

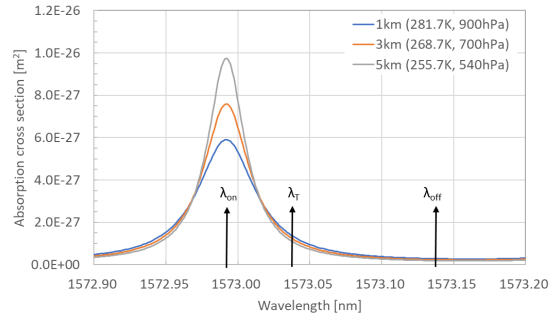


Fig. 1 Absorption cross-section spectra of CO₂ around 1573 nm at altitudes of 1 km, 3 km, and 5 km.

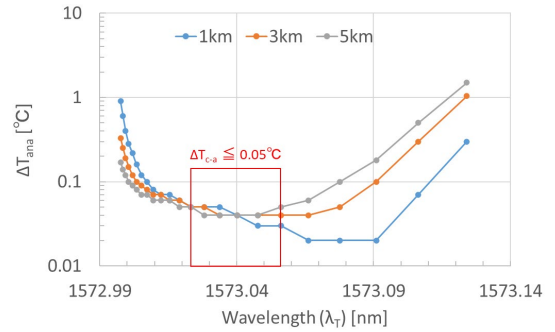


Fig. 2 Temperature analysis error ΔT_{ana} due to iteration method at altitudes of 1 km, 3 km, and 5 km, respectively.

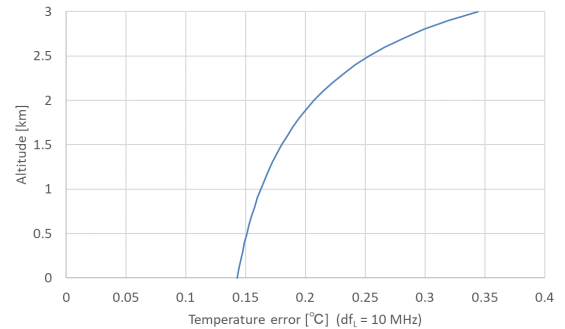


Fig. 3 Temperature measurement error using the OPG transmitter with spectrum width of 280 MHz and frequency stability of 10 MHz.

の波長を追加して同時に気圧も測定する工夫が必要となる。

3. 検証実験

首都大学東京 日野キャンパス内において in-site センサーを用いた検証実験を行った。Fig. 4 に検証実験の配置図を示す。4号館4階の実験室に CO₂-DIAL は設置され、OPG 送信光は屋上（5階相当）のドームからミラーで折り返して2号館上空へ出射している。CO₂-DIAL から直線距離で約 200 m 離れた2号館屋上（10階相当）に温度センサー（T&D, TR-72Ui）とオープンパス CO₂ センサー（LI-COR, LI-7500）を設置した。気圧は LI-7500 内蔵のセンサで CO₂ 混合比とともに記録される。CO₂-DIAL は Fig. 4 に示すセンサーを挟んだ青線の 60m 区間平均値を測定した。Fig. 5 に気温測定結果を示す。CO₂-DIAL の積算時間は 10 分で、TR-72Ui は 30 秒ごとのデータを 10 分間平均値で示している。CO₂-DIAL のエラーバーは ±0.19°C である。これは、2.1 および 2.2 で述べた気温誤差（±0.05°C, ±0.14°C）と気圧推定誤差に起因する気温誤差を 0°C とした総和である。CO₂-DIAL と TR-72Ui の測定値はエラーバー内で概ね一致し、オフセットは -0.10°C であった。このオフセットは、DIAL の測定高度が TR-72Ui の設置高度より約 9 m 高いことに起因すると考えられ、気温減率を考慮すると両者の値は一致する。以上の結果から、CO₂-DIAL を用いた気温測定における誤差は、想定した範囲内であることが実証された。

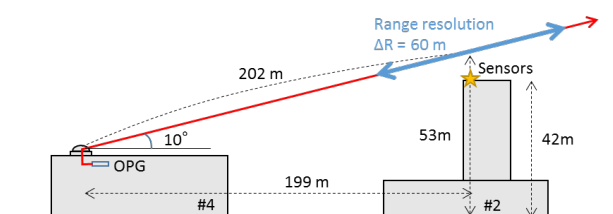


Fig. 4 Experimental site set-up during the verification of CO₂ concentration and atmospheric temperature measurements from the CO₂ DIAL and in-situ sensors.

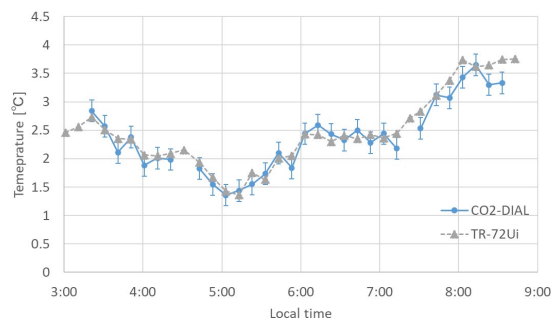


Fig. 5 Comparison of temperature measurements from the CO₂-DIAL and in-situ sensor (TR-72Ui) at 10 min average intervals.

4. まとめ

吸収波長 λ_{on} と非吸収波長 λ_{off} に加え、第3の波長 λ_T を用いる CO₂-DIAL による気温測定法の誤差解析を行った。反復計算過程で生じる気温誤差が最小となる 1573.04 nm 前後が λ_T に適していることを示した。また、レーザ周波数揺らぎの影響が高度 3km 以下では ±0.35°C 以内であることを示した。本気温計測法は気圧分布を推定して吸収断面積を計算しており、高度 3km 以下で -0.5°C/hPa 前後の気温誤差になることが分かった。ラジオゾンデ観測点が密にある場所では信頼度の高い客観解析や再解析の気圧データを利用できる。気圧推定誤差を文献3を参考に ±0.6 hPa と仮定すると、今回検討した気温誤差の合計は、高度 1 km で ±0.46°C、高度 3km で ±0.70°C となる。In-situ センサーを用いた検証実験では、今回検討した気温誤差を含んだエラーバー内で一致し、CO₂-DIAL を用いた気温測定におけるシステム誤差が想定した範囲内であることが実証された。また、洋上などの客観解析データの気圧精度が得にくい地点においては、同時に気圧も計測するための4波長方式を導入することで、気温誤差の抑制を図る必要がある。

参考文献

- 1) Y. Shibata, et al., *Appl. Opt.*, **56** (2017) 1194-1201.
- 2) 柴田, 長澤, 阿保, 第37回レーザセンシングシンポジウム (2019) 1-2.
- 3) S. Szot, et al.: In Proceedings of the International Scientific Conference Environmental Changes and Adaptation Strategies, Skalica, Slovakia (2013) 9-11.