

屋内空間の CO₂ 濃度測定用 LD センサーに関する研究

徐 坤元, 柴田 泰邦

東京都立大学 (〒191-0065 東京日野市旭が丘 6-6)

Study on LD Sensors for Indoor CO₂ Concentration Measurement

Kunyuan XU and Yasukuni SHIBATA

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

Abstract: Indoor air quality and proper ventilation are increasingly important, with the Ministry of Health recommending CO₂ levels below 1000 ppm. Traditional non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ sensors, using the 4.2 μm absorption band, measure concentrations only at specific points, limiting spatial accuracy. We have developed a prototype LD-based CO₂ sensor using differential optical absorption spectroscopy (DOAS) with a 2.0 μm absorption band to address this. This extends the optical path to several meters, allowing for the measurement of average CO₂ concentrations over larger indoor areas. Our study presents initial experimental results using this prototype in a controlled environment.

Key Words: DOAS, CO₂, 2μm, Sensor

1. はじめに

近年, 人々は屋内空気の汚染および適切な換気の必要性に対してますます注意を払うようになってきた。CO₂濃度は室内の空気流動性を観測する指標の一つとなっており, 厚生労働省は室内の CO₂濃度をできるだけ 1000ppm 以下に保つことを推奨している。

公共施設や商業施設などで使用されている多くの CO₂センサーは, 非分散型赤外線吸収法 (non-dispersive infrared; NDIR) 方式を採用している¹⁾。このセンサーは, 比較的吸収の強い波長 4.2μm の CO₂吸収帯を利用し, 数センチの光路長での光吸収量から CO₂濃度を測定している。しかし, これらのセンサーは大型商業施設やオフィスなどの広い空間内の, センサー設置場所における CO₂濃度情報しか得ることができず, 面的・立体的な CO₂濃度を取得することが難しい。複数の CO₂センサーを多点設置して面的・立体的な濃度情報を取得する手法は, 設置場所の制約, 信号処理の煩雑さ, コスト面で課題が残る。

そこで, 我々は差分吸収分光法 (differential optical absorption spectroscopy; DOAS) を利用した LD センサーを提案している^{1), 2)}。このセンサーは 4.2μm 帯より吸収強度の小さい 2.0μm 帯の CO₂吸収帯を用いることで, 光路を数メートル単位に延長し, 室内全体の CO₂平均濃度の測定を可能にする。複数の受信システムを屋内に配置し, 送信光をスキャンすることで, 複数の光路上の CO₂平均濃度を測定し, 室内全体の状況を把握することができる。本研究では, 波長 2 μm の LD を光源として使用し, 一定の大きさの閉鎖空間内での CO₂濃度を DOAS 法に基づいて測定する基礎的な実験結果を報告する。

2. 測定方法

本研究で開発している CO₂ センサーの概要図を Fig.1 に示す。光源として赤外線レーザーダイオード (LD) を使用し、レンズを用いて平行光にしたのち屋内に照射する。LD に接続された電流制御装置 (Driver) によって出力波長を制御する。受光部はフォトダイオード (PD) とオシロスコープ (OSC)、パーソナルコンピュータ (PC) で構成され、受信した光信号を観測および分析する。

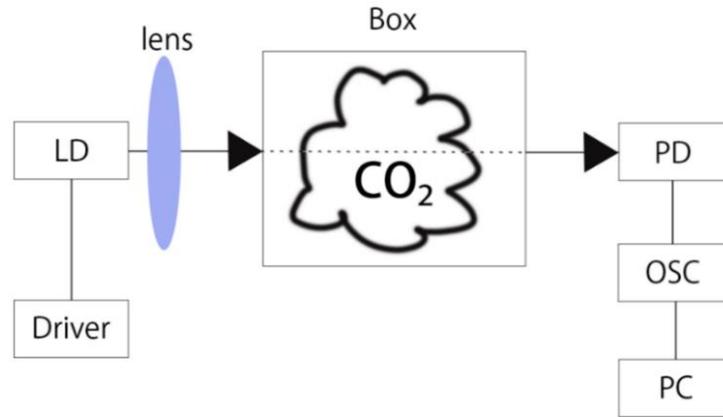


Fig.1: Block diagram of the LD sensor for CO₂ concentration measurement

波長 λ における光路長 l [m]で観測される受信信号強度 $P(\lambda)$ は以下の式で求められる。

$$P(\lambda) = T(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 $T(\lambda)$: 透過率, $S(\lambda)$: 光源のスペクトルである。吸収される光の強さと分子濃度の間にランベルト・ベールの法則が成り立つ。 $\alpha(\lambda)$: 吸収係数[m], N : 個数密度[m³], $\sigma(\lambda)$: 吸収断面積[m²]とすると、 $\alpha(\lambda)$ は

$$\alpha(\lambda) = N \cdot \sigma(\lambda) \quad (2)$$

で求められる。透過率 $T(\lambda)$ は

$$T(\lambda) = \exp \{-\alpha(\lambda) \cdot l\} \quad (3)$$

で求めることができる。

また、 $T(\lambda)$ は送信出力 $P_0(\lambda)$ と受信強度 $P(\lambda)$ の比 R_r を用いて

$$T(\lambda) = R_r = \frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda)} \quad (4)$$

で表せる。したがって、対象ガスの個数密度 N は式(2)から式(4)を用いて次式から求めることができる。

$$N = \frac{1}{\sigma(\lambda) \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda)} \right) \quad (5)$$

これにより、測定された P_0 と P を用いて N を計算することで、室内の気体中の CO₂の個数密度を求めることができる。さらに、大気の子分子個数密度は、気温と気圧から求まるので CO₂混合比を得ることが可能である¹⁾。

市販の CO₂検出器は一般的に 4.2 μ m の吸収帯を使用しているが、CO₂は 2.0 μ m および 4.2 μ m 付近にも強い吸収帯を有している。数メートル単位の測定においては、4.2 μ m の吸収が強すぎるため、本研究では 2.0 μ m 付近の吸収帯を選択した。

3-1. 試作機概要

Fig.2は、HITRAN データベースによる波長範囲 2004~2008nm における CO₂吸収断面積のスペクトル図である³⁾。横軸は波長[nm]、縦軸は CO₂の吸収断面積[cm²/molecule]である。

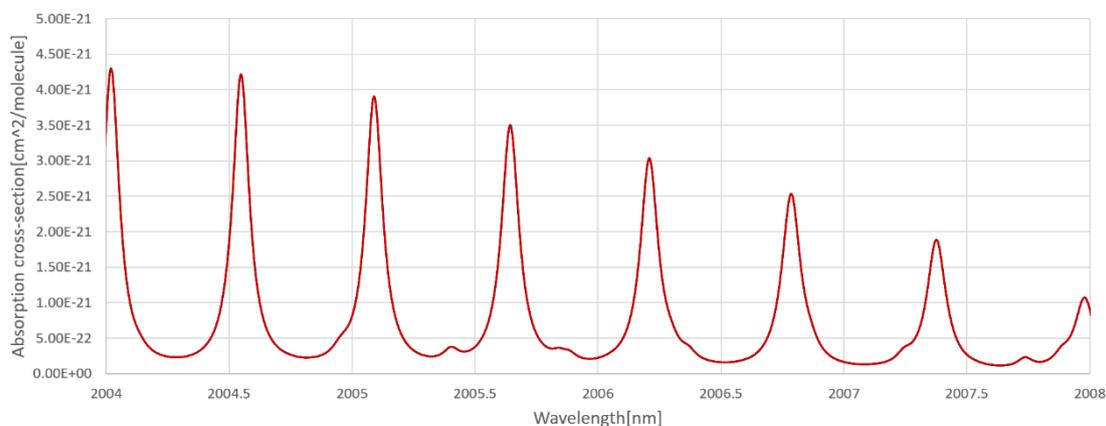


Fig.2: CO₂ absorption cross-section around 2004 nm

光源には 2005nm を中心に電流制御で±3nm の波長可変の VCSEL 光源(VL-2004-1-SE-A4, 1mW)を選択した。また、光検出器として、凹面反射鏡付きプリアンプ内蔵 PD (波長感度 1.65-2.35μm) を選択した。

3-2. 性能評価実験

試作機の信号雑音比が良くなかったため、適切な吸収係数を確保するため、室内空気ではなくドライアイスを含ませた CO₂ガスを Fig.1 で示した BOX (光路長 13cm) に封入した。Fig.3 に示すように、光源への注入電流を三角波状にすることで発振波長を 2002~2008nm の間で周期的に変化させ、吸収スペクトルを計測した。なお、波長 2μm に対応する波長計がないため、電流係数約 0.6 mA/nm を用いて電流値を波長に換算している。

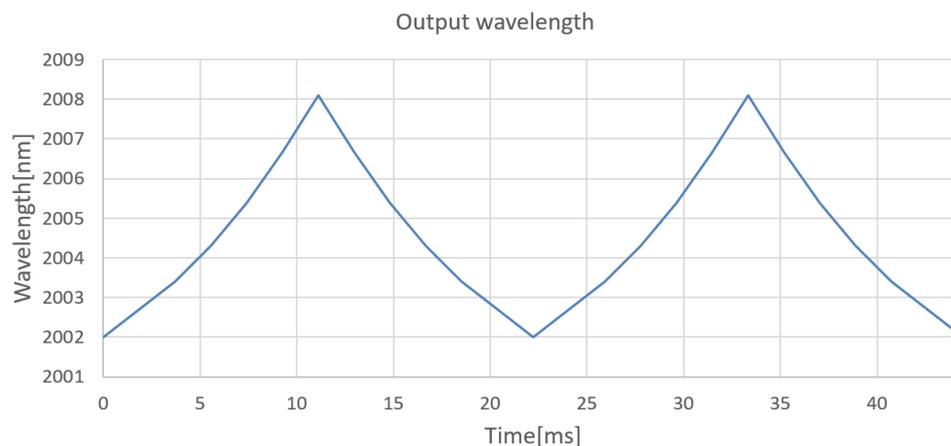


Fig.3: Output wavelength as a function of time

Fig.4 に示した橙色の線は実験で得られた受信信号強度比 R_r を示す。青線は Fig.2 のスペクトルデータを用いて最小二乗法により計測値とフィッティングさせた理論値を示す。青線と橙色の線は全体的な形状が非常に似ており、いくつかの明確な吸収ピークが見られる。特に 2005.6 nm および 2006.8 nm 付近では吸収ピークの位置がほぼ一致する。2005.1nm の吸収ピーク波長が計測値と理論値でずれているが、注入電流から波長への換算係数が非線形であることが原因と考えられる。

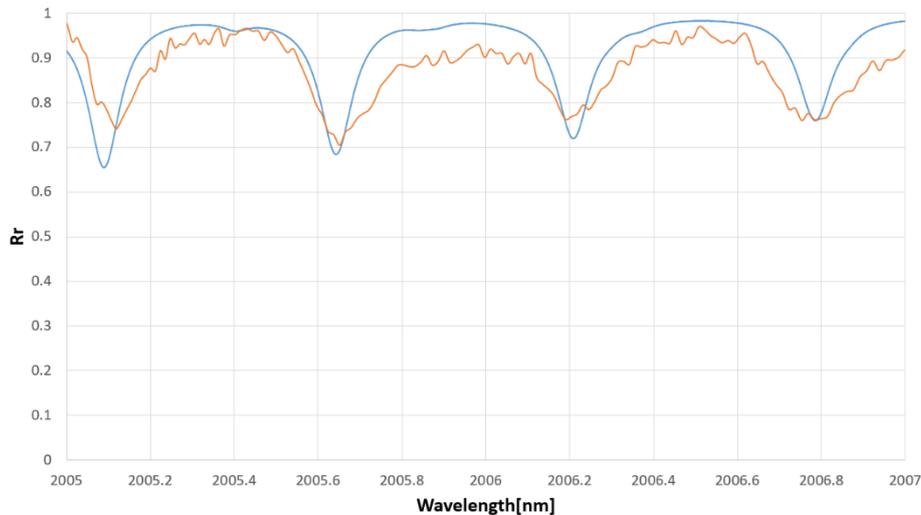


Fig.4: Comparison of CO₂ transmittance between experimental values and theoretical values

Fig.4 中の 3 か所の吸収ピーク波長 (2005.65 nm, 2006.19 nm, 2006.78 nm) において導出された CO₂ 混合比を Table 1 に示す. 波長 2005.65 nm では CO₂濃度 N の実験値と理論値の誤差は 3.52% である. 同様に, 波長 2006.19 nm では, CO₂濃度 N の誤差は 3.5% である. 波長 2006.78 nm では, CO₂濃度 N の誤差は 0.8% である. アメリカ環境保護庁 (EPA) の連続排出モニタリングシステム (CEMS) に関する規定によれば, 市場に出回っている CO₂濃度センサーは, 誤差が $\pm 5\%$ 以内である必要があり, それによって関連基準を満たすことができる⁴⁾. 試作機はセンサーとして EPA の基準を満たすことが示された.

Table 1: Comparison of CO₂ concentration between measurements and theory

λ [nm]	Measurement		Theory	
	R_r [%]	N [ppm]	R_r [%]	N [ppm]
2005.65	70.48	299,750	69.38	310,677
2006.19	76.23	299,800	75.43	310,677
2006.78	76.16	308,182	76.07	310,677

4. まとめ

波長 2 μm の LD を光源として使用し, 一定の大きさの閉鎖空間内での CO₂濃度を測定するための試作機を制作した. LD の発振波長が 2002 nm から 2008 nm の間で周期的に変化するようにし, 吸収スペクトルを計測した. 実験データを基に, 透過率を計算し, シミュレーションで得られた理論値と比較すると, その誤差は 5% 以内となり, 300,000ppm を超える高濃度 CO₂の濃度測定が実証された. 今回は光路長 13cm と短い区間での性能評価実験であったが, 10m の光路長に換算すると CO₂濃度は約 4500ppm となるため, 実際の屋内利用には課題が残る. 今後, 光路長や CO₂濃度を調整し, より低い濃度やより長い距離での吸収曲線の測定実験を行っていきたい.

参考文献

- 1) 柴田 泰邦: レーザーセンシング学会誌 **2** (2021) 67-74.
- 2) 上小倉 駿, 柴田 泰邦: レーザー研究 **48** (2020) 609-613.
- 3) HITRAN データベース <https://www.cfa.harvard.edu/hitran>
- 4) [Performance Specifications and Other Monitoring Information | US EPA](#)