

DOAS 法による屋内空間の CO₂ 濃度測定

水庭 彰吾, 柴田 泰邦

東京都立大学(〒191-0065 東京日野市旭が丘 6-6)

CO₂ mixing ration measurement in indoor space by DOAS method

Shougo MIZUNIWA, Yasukuni SHIBATA

Tokyou Metropolitan University, 6-6, Asahigaoka, Hino, Tokyo, 191-0065

Abstract: The indoor ventilation state is currently monitored by non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ sensors to reduce the risk of infection with COVID-19. The NDIR CO₂ sensor uses the CO₂ absorption band near the wavelength of 4.2 μm to measure the light absorption within several centimeters. Therefore, we may ignore the high CO₂ concentration mass where the sensor is not installed. We propose a new CO₂ sensor that measures the mean CO₂ concentration within several meters by a differential optical absorption spectroscopy (DOAS) method. This study reports on appropriate near-infrared CO₂ absorption bands and light sources that enable CO₂ concentration measurement.

Key Words: DOAS, CO₂, Near infrared

1. はじめに

現在, COVID-19 感染防止対策として, 屋内の換気が十分に行われているかを確認するため, センサによる CO₂ 濃度のモニタリングが提唱されている. 屋内 CO₂ 濃度を 1000 ppm 以下に維持することが厚生労働省から推奨されている.

使用されている CO₂ センサの多く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⁾. このセンサは, 比較的吸収の強い波長 4.0 μm 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. したがって, これらのセンサは設置箇所の点情報しか得られない. オフィスや店舗などの比較的広い室内では小型の CO₂ センサを複数個配置して, CO₂ 濃度の空間情報を得ている. そのため, 設置環境や場所によっては, 部屋内の正確な CO₂ 濃度値を示していない場合がある.

そこで, 光路長を数メートル単位とした屋内全体の CO₂ 平均濃度を差分吸収分光法 (differential optical absorption spectroscopy; DOAS) を用いた手法により測定するセンサを提案する^{1,2)}. 受信系を複数配置し, 送信光をスキャンすることで複数光路上の CO₂ 平均濃度が計測でき, 屋内全体を見渡すことが可能となる. 本研究では, DOAS 法によって数メートル区間の CO₂ の平均濃度測定を可能とする適切な吸収帯と光源の検討結果について報告する.

2. 測定方法

DOAS 法は対象ガスの光吸収の波長依存性を利用し, 光吸収量の大きい波長と小さい波長での吸収量の差を求めることにより, 大気微量気体成分の濃度を計測する手法である. 本研究における CO₂ センサの概要図を Fig.1 に示す. 吸収が大きい波長を on 波長 (λ_{on}), 小さい波長を off 波長 (λ_{off}) とする. 受信光はビームスプリッターで分割され, off 波長用のバンドパスフィルタ (BPF) を通過してフォトダイオード 1 (PD1) で, on 波長用の BPF を通過してフォトダイオード 2 (PD2) でそれぞれ受光される.

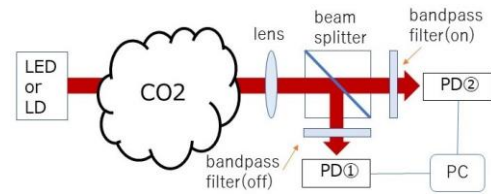


Fig. 1: Out line of CO₂ measurement system using a DOAS technique

波長 λ における光路長 l [m] で観測される受信信号強度 I は下の式で求められる.

$$I(\lambda) = T(\lambda) * F(\lambda) * P(\lambda) \quad (1)$$

ここで, $T(\lambda)$: 透過率, $F(\lambda)$: バンドパスフィルタ (BPF) スペクトル, $P(\lambda)$: 光源のスペクトルとする. $F(\lambda)$, $P(\lambda)$ の最大値は 1.0 とする. $\sigma(\lambda)$: 吸収断面積 [m²], N : 個数密度 [/m³], $\alpha(\lambda)$: 吸収係数 [/m] とすると, $\alpha(\lambda)$ は

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

で求められる. また, 透過率 $T(\lambda)$ はランベルト・ベールの法則より

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

で求めることができる. 受信信号強度比を R_r とすると,

$$R_r = \frac{I(\lambda_{on})}{I(\lambda_{off})} = \exp(-\Delta\sigma \cdot N \cdot l) \quad (4)$$

と表せる. ここで $\Delta\sigma$ は $\sigma(\lambda_{on})$ と $\sigma(\lambda_{off})$ の差である.

したがって, $I(\lambda_{on})$ と $I(\lambda_{off})$ から光路上の分子個数密度を求めることができる. さらに, 大気分子個数密度が既知であるので CO₂ 混合比を得ることが可能である¹⁾.

3. 光源の検討

CO₂ は 2.0 μm, および, 4.2 μm 付近に強い吸収帯を持つ. NDIR 方式を利用した CO₂ センサは, 数センチ単位でも CO₂ の吸収が大きくみられる 4.2 μm の吸収帯を利用している. しかし, 数メートル単位での計測には CO₂ の吸収が強すぎる恐れがあるため, 4.2 μm より吸収の弱い 2.0 μm 付近の吸収帯ととも

に検討した。光源の種類は LED, LD を想定し比較を行った。LD は、単一の波長で指向性が高いという特徴をもつ。一方、LED は低価格で多種多様な出力や波長のものがあるが、発光スペクトル幅が数十 nm と広く、吸収断面積の実効値が小さくなる。また、光源を選定する際、光源の発光波長領域内の水蒸気の影響を考慮しなければならない。Fig.2 は 2.0 μm, 4.2 μm 付近の CO₂ と H₂O の吸収断面積と LED の発光スペクトルを表したものである。ここで、吸収断面積は HITRAN データベースを用いている^{2,3)}。受光部では LED からの入射光を BPF を利用して on 波長と off 波長に分割する。それぞれ、LED (2.0 μm) の BPF には、on 波長用 2020 nm ± 10 nm と 2051 nm ± 10 nm, off 波長用 2115 nm ± 10 nm, LED (4.0 μm) の BPF は、on 波長用 4200 nm ± 20 nm, off 波長用 3900 nm ± 20 nm を想定した。LD の光源は 1 つの吸収線よりもスペクトル幅が狭く、LED よりも効率的に CO₂ を吸収してしまう。数 m の光路長でも適切に測定できる吸収線として 2008 nm を on 波長として検討を行う⁴⁾。

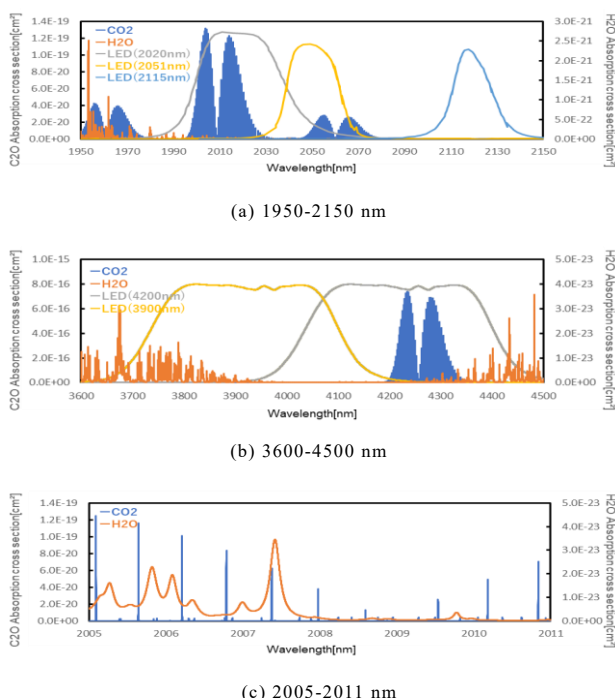


Fig.2: Absorption cross sections of CO₂ and H₂O, and BPF spectra

Fig.2 で示したように、LED の光源のスペクトル幅は発振波長を中心に数十 nm ~ 数百 nm の幅を持つ。そのため、吸収断面積の値は発光スペクトルを考慮した吸収断面積の実効値を使用する必要がある。吸収断面積の実効値は次式であらわされる^{2,3)}。

$$\sigma_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\lambda) F(\lambda) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} F(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

各光源と波長において、CO₂ 平均濃度が 400 ppm, 1500 ppm の際の透過率を算出し適切な光源を検討する。室温 20 °C, 湿度 50 % として、シミュレーションをした。測定場所は多人数が利用するオフィスや店舗などの比較的広い室内を想定した。各波長

における実効吸収断面積を Table.1 に示す。ここで LD のスペクトル幅は吸収スペクトルよりも十分狭いものとした。

Table 1: Effective absorption cross section

Wavelength(on)[nm]	σ [cm ²]
2020 (LED)	3.34×10^{-22}
2051 (LED)	6.99×10^{-23}
4200 (LED)	8.81×10^{-19}
2008 (LD)	3.78×10^{-20}

Table.2 に CO₂ 平均濃度を 400 ppm と 1500 ppm, 光路長を 1 m と 10 m とした場合の各光源で計算される受信信号強度比 R_r のシミュレーション結果を示す。

Table 2: Received signal strength ratio

Wavelength(on) [nm]	Optical path length 1 m		Optical path length 10 m	
	CO ₂ mixing ration			
	400 ppm	1500 ppm	400 ppm	1500 ppm
2020	99.96%	99.87%	99.66%	98.74%
2051	99.99%	99.97%	99.93%	99.74%
4200	16.60%	0.12%	0.01%	0.00%
2008	92.56%	74.91%	68.04%	23.59%

LED の on 波長が 2020 nm, 2051 nm の場合、光路長 1 m, 10 m いずれも 400 ppm と 1500 ppm の透過率は 100% に近く、CO₂ 濃度の計測には不向きである。また、LED の on 波長が 4200 nm の場合、吸収が強すぎて CO₂ を正確に測定することは不可能である。LD の on 波長が 2008 nm の場合はいずれの条件でも適度な透過率となり、本研究を満たす結果を得た。

4. まとめ

屋内空間における CO₂ 平均濃度を DOAS 法により測定するための最適な光源を検討した。2.0 μm 帯および 4.2 μm 帯の LED と、2008 nm の LD について、光路長を 1 m と 10 m, CO₂ 平均濃度を 400 ppm と 1500 ppm とした条件で透過率のシミュレーションを行った。2.0 μm 帯の LED を用いる場合、実効吸収断面積が小さいため透過率がほぼ 100% となり、計測には適さない。4.2 μm 帯の LED を用いる場合、実効吸収断面積が大きいため、光路長 10 m では透過率が 0% となり、計測には適さない。一方、2008 nm の LD はいずれの条件下でも適度な透過率が確保できることが示された。今後は、これらの結果を利用して 2008 nm の LD を用いた測定器の試作、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) 小上倉駿, 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) A.Hangauer, et, al., Conf. Laser and Electro-Optics, Optica Publishing Group, JThB3 (2010).