

NO₂ 計測用 LED センサの開発

上小倉 駿, 柴田 泰邦

首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Development of a NO₂ gas sensor using LED light sources

Shun KAMIKOKURA and Yasukuni SHIBATA

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

Abstract: NO₂ gas generated by indoor fires has a significant impact on human health. Especially smokeless fire may not be detected with a fire alarm. We propose an LED sensor that measures a column density of NO₂ gas by differential optical absorption spectroscopy (DOAS). In this paper, the measurement accuracy of this LED sensor is discussed. Furthermore, we made a prototype sensor and conducted an experiment on its performance evaluation.

Key Words: LED, Sensor, NO₂, Trace gas

1. はじめに

光を用いた大気環境計測技術として、試料の空間分布や、大気成分の濃度分布などを測定する研究が盛んに行われている。また、大気中の試料に光を照射し、透過光または反射光の強度を計測する事で吸収分子の濃度の空間分布を求める差分吸収法などの手法がある。これらの手法で使用される光源は LD (Laser Diode) が多く使用され、単一の波長で、位相が揃い、指向性が高いという特徴をもつ。また、近年の半導体技術の発展により、低価格で多種多様な出力や波長の LED (Light Emitting Diode) が生産されているが、LED のスペクトル幅は 10nm 程度と LD よりも広く、大気計測にはあまり使用されていない。LED を用いる大気環境計測が可能となれば、計測装置の小型化、低コスト化が期待できる。

火災が起きたときに有毒ガスが発生するが、煙や炎を出さない場合もある。そのような場合、火災報知器で検知されず、有毒ガス発生認識が遅れ、人に被害を及ぼす可能性が非常に高い。そこで、我々は LED を用いて、室内で発生する有毒ガスの空間平均濃度を差分吸収分光法 (differential optical absorption spectroscopy; DOAS) により測定するセンサを提案する。本研究では、測定対象のガスの選定とその測定制度の検討、および、製作した試作機の性能評価実験について報告する。

2. 測定ガスの決定

LED を光源として用いることから測定対象は以下の条件に当てはまるものとする。

- ・火災で発生し人体に有毒なガス
- ・350nm~670nm で光の吸収をする

この条件を踏まえた結果、二酸化窒素(NO₂)、塩化水素(HCl)、シアン化水素(HCN) が測定試料の候補となった。この候補の中で、光の吸収が最も大きく、火災発生時に計測に十分な量のガスの発生が見込まれる NO₂ を測定対象とする。NO₂ は窒素酸化物の中でも最も広範囲に存在し人体に有害であり、火災他には工場からの排煙や自動車の排気ガスが主な発生源である。NO₂ の労働衛生上で決められている許容濃度を Table1 に、健康への影響を Table2 に

示す¹⁾。

Table1. Permissible concentration of NO₂ gas

Category	Concentration [ppm]
TWA (USA)	3
STEL (USA)	5
JAPAN	Under review

Table2. Health effects of NO₂ gas

Concentration [ppm]	Damage of health
5	Feeling a strong odor
10~25	Mild respiratory disorder
50	Respiratory discomfort occurs in 1 minute
80	Chest pain occurs in 3 to 5 minutes
200 or more	Half of the rats die in 15 minutes

3. NO₂ 濃度計測シミュレーション

3.1 本研究における NO₂ 測定法

NO₂ センサの製品化は進んでおり、その方式は電気化学式がほとんどである。最近ではグラフェンを利用した新原理のセンサも開発されている。これらのセンサは設置箇所の点情報しか得られないが DOAS 法により空間の平均濃度分布計測が可能である。DOAS 法は対象ガスの、光の吸収における波長依存性を利用し、透過率と吸収断面積の各波長における極大値と極小値の差を求めることにより、大気微量気体成分の濃度および大気エアロゾルの消散係数の算出ができる。本研究における NO₂ ガスセンサの概要図を Fig.1 に示す。

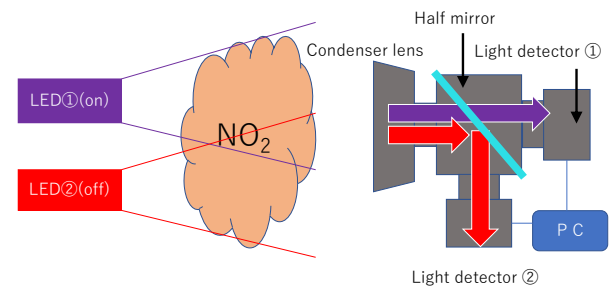


Fig.1 Out line of NO₂ measurement system

吸収が大きい波長を on 波長, 小さい波長を off 波長とする. on 波長及び off 波長における光路長 l で観測される受信信号強度 I はそれぞれ

$$I_{on} = T(\lambda_{on}) * F(\lambda_{on}) * P(\lambda_{on}) \quad (1)$$

$$I_{off} = T(\lambda_{off}) * F(\lambda_{off}) * P(\lambda_{off}) \quad (2)$$

で求められる. ここで, λ : 波長 [nm], $T(\lambda)$: 透過率スペクトル, $F(\lambda)$: バンドパスフィルタ (以下, BPF と呼ぶ) スペクトル, $P(\lambda)$: LED 光スペクトルとする.

また, $\sigma(\lambda)$: 吸収断面積 [m^2], N : 個数密度 [m^{-3}], $\alpha(\lambda)$: 吸収係数 [m^{-1}] とすると, 吸収係数 $\alpha(\lambda)$ はで求められる.

$$\alpha(\lambda) = N \cdot \sigma(\lambda) \quad (3)$$

また, 透過率 $T(\lambda)$ はランベルト・ベールの法則より

$$T(\lambda) = e^{-\alpha(\lambda) \cdot l} \quad (4)$$

で求められる.

3.2 測定誤差の検討

測定誤差のシミュレーションに用いたパラメータを Table3 に示す. 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.

Location	Large room
Room temperature	20°C
Humidity	50%
Barometric pressure	1 atmosphere
NO ₂ gas concentration	3.0 ppm
Light path length	10m

また, 目標精度は空間平均濃度を求めることから 10% とする. Table3 の条件と式 (4) から得た NO₂ および H₂O の透過率を Fig.2 に示す. ここで, ガスの吸収断面積は HITRAN データベース²⁾ を用いている.

LED のスペクトル幅 (半値全幅) を 20nm, on 波長は 392.0nm, off 波長は 624.0nm とした. また, BPF を半値全幅 10nm, ピーク透過率 100% とした. 式(1), (2)の強度比 I_{on}/I_{off} より求めた, NO₂ 濃度が 3.0 ppm であるときの SN 比に対する測定誤差を Fig.3 に示す. ここで, 水蒸気の影響が考えられるが, LED 発光波長領域内において吸収量が NO₂ よりも十分小さいため影響はないとした. Fig.3 より, 今回の精度の目標である測定誤差 $\pm 10\%$ に必要な SN 比は約 29.2 であることがわかった.

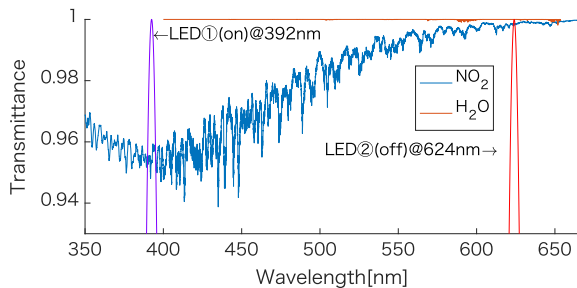


Fig.2 Transmittance function NO₂ and H₂O

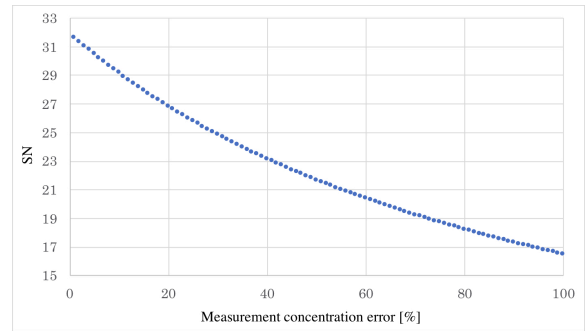


Fig.3 SN ratio required for measurement error

4. 試作機の性能評価

NO₂ ガスセンサの試作機を製作した. 光源の LED は 3mm 砲丸型を用いて, 出力 66mW@392nm (紫) を 24 個, 出力 44mW@624nm (赤) 12 個をアレイ状に配置した.

受信部は口径 7.5cm の望遠鏡を用い, ビームスプリッターで 1:1 に分け, 392nm の光は中心波長 390nm, 半地全幅 10nm の BPF を通過しフォトダイオード 1 で, 624nm の光は中心波長 620nm, 半地全幅 10nm の BPF を通過しフォトダイオード 2 でそれぞれ受光される. また, 受信信号はオシロスコープで記録される. Fig.4, 5 に LED 光源と受信部を示す.

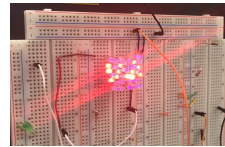


Fig.4 LED light source

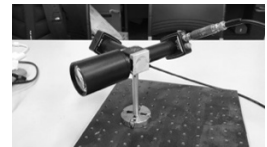


Fig.5 Receiver

NO₂ ガスが存在しない, 表 3 の条件に合わせた屋内空間において光源から 10m 先に受光部を置き, 2 波長の受信信号強度を計測した. 各波長とも 600 点 (1ms 間) の平均値を用いて SN を計算した.

計測の結果, SN は約 28.8 であり, 図 3 より測定誤差は約 14% であり, 目標値の 10% に近い値であった. 今後はさらに SN を向上させるために, LED の高出力化や, 送信部にレンズを配置し集光の高効率化を目指す.

5. まとめ

LED を用いた DOAS 法による NO₂ ガスセンサを提案し, センサの測定精度を計算機でシミュレーションした. その結果, NO₂ 濃度 3.0 ppm, $\pm 10\%$ で計測するためには SN が約 29.2 必要であると算出された. また, NO₂ センサの試作機を製作し, SN を距離別で算出した. その結果, 送受信間距離 10m において測定誤差は約 14% と算出され, 前述の目標値に近い値であるとわかった. 今後は, LED の高出力化や光学的手法により, さらなる SN の向上に取り組む予定である.

6. 参考文献

- (社) 日本火災学会 「はじめて学ぶ建物と火災」 (2007) 共立出版.
- HITRAN データベース, <https://www.cfa.harvard.edu/hitran>