

赤外線レーザーによる汚染気体測定

Pollutant Monitoring by Infrared Laser

梅野正義

延原裕之

松生香正

Masayoshi UMENO

Hiroyuki NOBUHARA

Hidemasa MATSUO

名古屋工業大学 工学部

Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

現在、大気汚染気体濃度測定にはレーザー光と気体分子との相互作用(ラマン散乱、蛍光散乱、ミー散乱、共鳴吸収など)を利用したレーザー・レーダシステムが数多く試みられているが、このうち微量汚染気体の検出には、大気圧下で吸収係数の大きい共鳴吸収が適している。またレーザー光源としては、近年実用段階に達しつつある鉛化合物半導体レーザー(PbSnTeなど)が有望である。そこで本稿では、鉛化合物半導体レーザーのパルス発振による差分吸収散乱法ライダの最小検出濃度の試算結果を報告することにする。

2. 測定原理

半導体レーザー及び半導体光検出器による大気汚染気体濃度の測定システムを図1に示す。

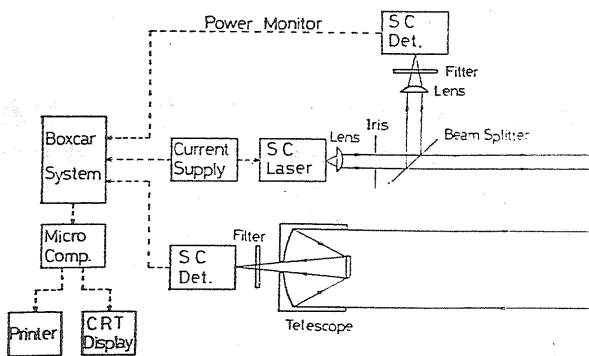


図1. 測定システムブロック・ダイアグラム

差分吸収散乱法ライダのレーザー・レーダ方程式は(1)式のようになる。

$$P_r(\lambda_i, R) = P_0(\lambda_i) \cdot K(\lambda_i) \cdot \beta(\lambda_i, V) \cdot L \cdot T^2(\lambda_i, R) \cdot Y(R) \cdot A_r / R^2 \times \exp[-2\sigma_i \int_0^R N(R) dR] + P_B \quad (1)$$

尚、式中の記号の意味は次の通りである。 λ_i : 被測定気体の共鳴吸収が極大となる波長を λ_1 、極小となる波長を λ_2 とする($i=1,2$), σ_i : 波長 λ_i での被測定気体の吸収係数, R : レーザビームの片道光路長, $P_0(\lambda_i)$: 半導体レーザーの出力パワー, $K(\lambda_i)$: 送受信光学系の効率, A_r : 受光望遠鏡の有効面積, $T(\lambda_i, R)$: 大気の透過率, $Y(R)$: 視野重なり係数, $N(R)$: 距離 R における被測定気体の濃度, P_B : 背景光パワー, $P_r(\lambda_i, R)$: 信号用半導体光検出器の入射光パワー, $\beta(\lambda_i, V)$: ミー体積後方散乱係数, V : 視程, L : 空間分解能、またモニタ用半導体光検出器の入射光パワーを $P_e(\lambda_i)$ とすると

$$P_e(\lambda_i) = P_0(\lambda_i) \cdot \epsilon(\lambda_i) \quad (2)$$

となる。ここに $\epsilon(\lambda_i)$ はモニタ用光路での光学系の効率である。(1)式と(2)式から

$$\frac{1}{P} = K \cdot \beta \cdot T \cdot \exp[-2\sigma \int_0^R N(R) dR] \quad (3)$$

$$N \approx \frac{1}{R} \int_0^R N(R) dR = \frac{1}{2\sigma R} \ln(K \cdot \beta \cdot T \cdot P) \quad (4)$$

ただし、 $P_B = 0$, $\sigma \equiv \sigma_1 - \sigma_2$

$$P \equiv \frac{P_r(\lambda_2, R) / P_e(\lambda_2)}{P_r(\lambda_1, R) / P_e(\lambda_1)} = \frac{P_n(\lambda_2)}{P_n(\lambda_1)} \quad (5)$$

$$K \equiv \frac{K(\lambda_1) / \epsilon(\lambda_1)}{K(\lambda_2) / \epsilon(\lambda_2)}, \quad \beta \equiv \frac{\beta(\lambda_1, V)}{\beta(\lambda_2, V)}, \quad T \equiv \frac{T^2(\lambda_1, R)}{T^2(\lambda_2, R)}$$

である。ここで、 $\sigma > 0$, $P \geq 1$, $K \approx 1$, $\beta \approx 1$, $T \approx 1$ であるから、(4)式より

$$N \approx \frac{1}{2\sigma R} \ln P \quad (6)$$

両辺を R で微分して

$$N(R) \approx \frac{1}{2\sigma} \cdot \frac{d}{dR} \ln P \approx \frac{1}{2\sigma} \frac{dP}{dR} \quad (7)$$

を得る。(6)式からは光路長 R での平均汚染気体濃度 N が求まり、(7)式からは距離 R での汚染気体濃度 $N(R)$ が近似的に求まる。厳密には、 K , β , T 及び P_B の補正を行なう必要がある。(7)式

による汚染気体濃度 $N(R)$ の求め方を図2に模式的に示す。

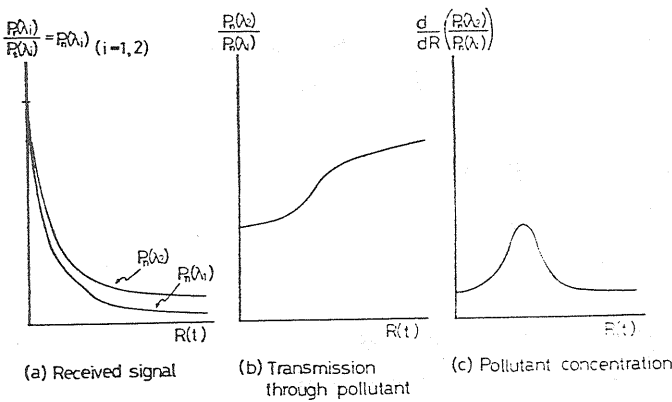


図2

3. 測定誤差と最小検出濃度

汚染気体の理論的最小検出濃度の算出は、半導体光検出器内部で発生する雑音が測定誤差の最大要因であると考えて行なうのが妥当である。そこで、(4)式に「誤差波及の法則」を適用して標準相対偏差の形で表わすと

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{1}{2N\sigma R}\right)^2 \left[\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 \right] + \left(\frac{1}{2N\sigma R} \cdot \frac{\Delta P}{P}\right)^2 \quad (8)$$

ただし、記号「 Δ 」は標準偏差を表わし、記号「 $-$ 」は平均値を表わす。 $\Delta \sigma$, ΔK , $\Delta \beta$, ΔT は ΔP に比べて十分小さいことから(8)式は

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{2N\sigma R} \cdot \frac{\Delta P}{P} \quad (9)$$

となる。また(5)式にも誤差波及の法則を適用し

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 = \left(\frac{\Delta P_r(\lambda_1, R)}{P_r(\lambda_1, R)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_r(\lambda_2, R)}{P_r(\lambda_2, R)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_e(\lambda_1)}{P_e(\lambda_1)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_e(\lambda_2)}{P_e(\lambda_2)}\right)^2 \quad (10)$$

$\Delta P_r(\lambda_i, R) \geq \Delta P_e(\lambda_i)$, $P_r(\lambda_i, R) \ll P_e(\lambda_i)$ であるから

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 = \left(\frac{\Delta P_r(\lambda_1, R)}{P_r(\lambda_1, R)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_r(\lambda_2, R)}{P_r(\lambda_2, R)}\right)^2 = 2 \left(\frac{\Delta P_r(\lambda_1, R)}{P_r(\lambda_1, R)}\right)^2$$

すなわち

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{2} \cdot \frac{\Delta P_r(\lambda_1, R)}{P_r(\lambda_1, R)} \quad (11)$$

となる。ここで半導体光検出器の信号電圧、雑音電圧をそれぞれ V_s , V_n とすれば

$$\frac{V_s}{V_n} = \frac{P_r(\lambda_1, R)}{\Delta P_r(\lambda_1, R)} = \sqrt{2} \cdot \frac{P}{\Delta P} \quad (12)$$

検出器の比較検出率 D_λ [$\text{cm Hz}^{\frac{1}{2}} \text{W}^{-1}$] を用いると

$$\frac{V_s}{V_n} = \frac{D_\lambda \cdot P_r(\lambda_1, R) \sqrt{A}}{\sqrt{\Delta f}} \quad (13)$$

ただし、 A は検出器の受光面積、 Δf は実効雑音帯域幅である。(9)式に(12)式、(13)式を代入して

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{\Delta f}}{\sqrt{2} N \sigma R D_\lambda P_r(\lambda_1, R) \sqrt{A}} \quad (14)$$

を得る。 $\Delta N/N = 1$ なる濃度を最小検出濃度 N_{min} と定義すると、ボックスカー積分器による S/N 比改善率 B を付け加えることにより

$$N_{min} = \frac{1}{B} \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \sigma} \cdot \frac{\sqrt{\Delta f}}{D_\lambda \sqrt{A}} \cdot \frac{R}{P_0 K \beta \cdot L \cdot A_r \cdot T^2 \cdot Y} \quad (15)$$

が得られる。

NO_2 の $6.2 \mu\text{m}$ 帯の共鳴吸収を利用した場合の最小検出濃度の計算結果を図3に示す。

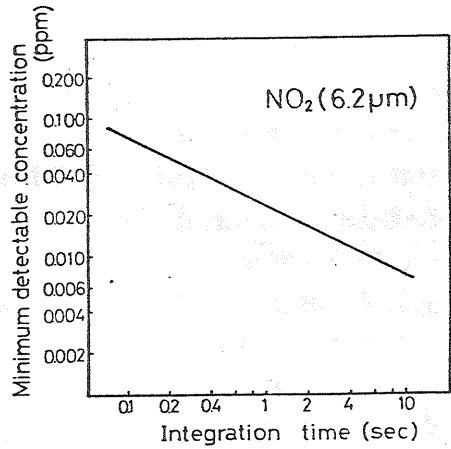


図3. 積分時間 - 最小検出濃度

この計算に用いた数値は以下の通りである。

$B = 2.24 \times 10^3 \times \sqrt{t_s}$, t_s [sec]; 積分時間

$\sigma = 5 \times 10^{-4}$ [ppm $\cdot\text{m}^{-1}$], $\Delta f = 0.22$ [Hz]

$D_\lambda = 1 \times 10^{10}$ [$\text{cm Hz}^{\frac{1}{2}} \text{W}^{-1}$], $A = 0.5 \times 10^{-2}$ [cm^2]

$P_0 = 1$ [$\mu\text{J}/\text{pulse}$], $K = 0.25$,

$\beta = 1.9 \times 10^{-7}$ [$\text{m}^{-1} \text{Sr}^{-1}$] (視程 10 km)

$L = 3$ [m], $R = 20$ [m], $A_r = 0.06$ [m^2]

$T = 0.9$, $Y = 0.5$

図3より積分時間 5 [sec] で、現在定常観測に使われている化学的分析法による測定精度 0.01 [ppm] と同じ精度を得ることができると考えられる。

4. まとめ

半導体レーザーを用いた測定システムによって、短時間高精度の汚染気体濃度検出が可能であることが計算から明らかとなった。今後は、このシステムを道路上で移動しながら測定可能な方式にし、実験的に検証することが課題である。