

7. レーザ 気体分析における レーザ出力のゆらぎが 大気汚染成分の検出限界に及ぼす影響

Effect of Laser Power Fluctuation for the Detection Limit
for Atmospheric Pollutant Analysis

佐野博也 古賀隆治 棚田嘉博

Hiroya Sano, Ryuji Koga and Yoshihiro Tanada

岡山大学 工学部

The School of Engineering, Okayama Univ.

① 序 環境庁の指定する値以下の濃度の酸化窒素を含めた複合有色大気汚染ガスを分析できることを目指して、パルス動作する同調可能色素レーザを用いた共鳴吸収法を採りあげ、これについて報告する。本方式は多くとも数メートル程度の光路長を通過する光の減衰率を波長に関する分布として捕え、これから演算処理によって間接的に濃度を知ろうとするものであるが、測定にあたり採取した試料大気について物理的、化学的前処理を必要としないので測定に要する時間遅れが短いことと、レーザ光のパルスが非常に鋭いので S/N 比の高い信号処理が可能であることから低濃度の酸化窒素を測定できることが特徴である。

② 測定原理 周知の如く分子密度が $n_i [m^{-3}]$ 、吸収断面積が $\sigma_i [m^2]$ である I 種類の有色ガスが存在することが既知である場合、エネルギー $P_0 [J]$ の単発レーザパルス光がこの中を $L [m]$ 通過して $P [J]$ に減衰するがその関係は Lambert-Beer の法則から

$$P(\lambda)/P_0(\lambda) = \exp\left[-L \sum_{i=1}^I \sigma_i(\lambda) n_i\right] \quad (1)$$

とあらわされる。

これとは別に、あらかじめ設定した波長域 $\Lambda = [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ 上で内積

$$(X(\lambda), Y(\lambda)) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} X(\lambda) Y(\lambda) w(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

を定義することにより

$$(\sigma_i(\lambda), \sigma_j^*(\lambda)) = \delta_{ij} \quad (3)$$

なる関係が成立するような関数の組 $\Delta_j^*(\lambda)$, $j=1, \dots, I$; $\lambda \in \Lambda$ を合成できるので、これから

$$n_i = L'(\Delta_i^*(\lambda), \ln[P(\lambda)/P_0(\lambda)]) \quad (4)$$

なる演算から n_i が算出できる。(文献1) この場合、実在する I 種類に更に架空の有色ガスを付け加えて考えると $\Delta_j^*(\lambda)$, $j=1, \dots, I$ が変ることから判るようにこの決め方は一意的でない。従って人為的に変化させて(4)式の演算を有害な干渉を取り除くフィルタとして働かせることができる。

光源としてのレーザは非常に鋭い(半値巾70 n.sec以下)パルス動作をするので光電変換器として用いたショットキー・バリヤー・ダイオードからの出力信号をフーリエ変換を基礎とするアルゴリズムにより設計された電子回路による整合フィルタを通すことにより、この信号変換に際しての S/N 比を非常に高いものとすることが出来た。(文献2) よって以下の取扱いではこの雑音を無視する。図1に装置全体のブロック図を示す。

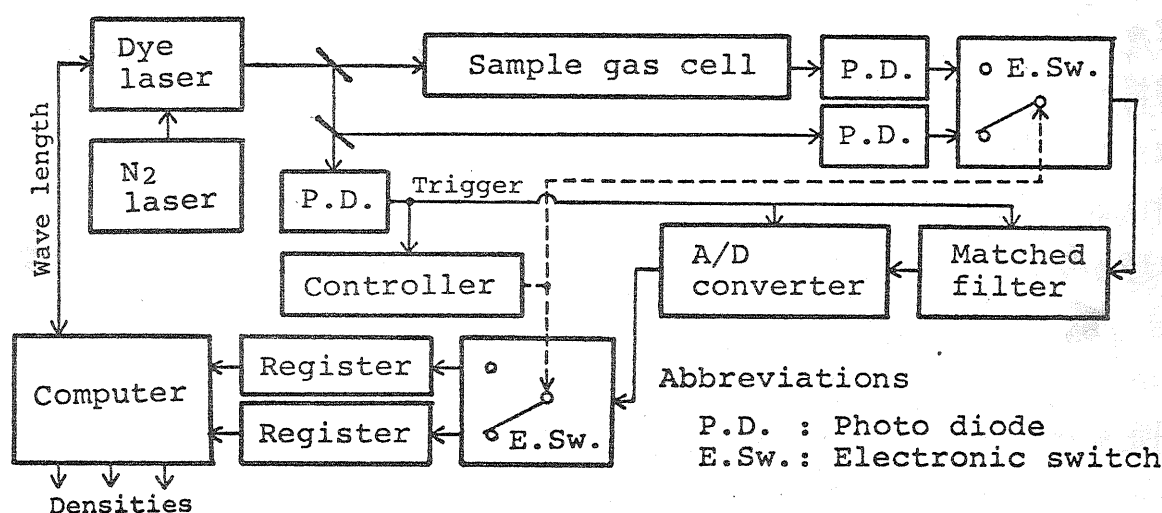


図1. 装置のブロック図

③ レーザ出力のゆらぎ 用いたレーザはMolelectron社製のもので N_2 レーザ励起により10~50 Hz のパルス動作をし、約0.7 mJ/pulse の出力を持つ。各パルス毎のエネルギーをデジタルメモリ(8 bit/word, 1024 word)に記録し、それをアナログ値で再生したものを図2に示す。図中にはある時点を中心とする通算50発の平均値 $\bar{P}_0$ を取ったものをも示す。この図からもわかるようにダイレーザの出力のゆらぎは N_2 ガスの流量変動に起因すると思われるゆ、くりした変動と1発毎の互いに相関の無い変動とに分けられる。後者の成分についてウォルシュパワースパクトルと自己相関関数などを算出して検討した結

果、ほぼ完全なガウス型雑音とみなせることが判った。またそのヒストグラムにガウス分布をフィットした結果、平均値で正規化した値について標準偏差が5%であった。

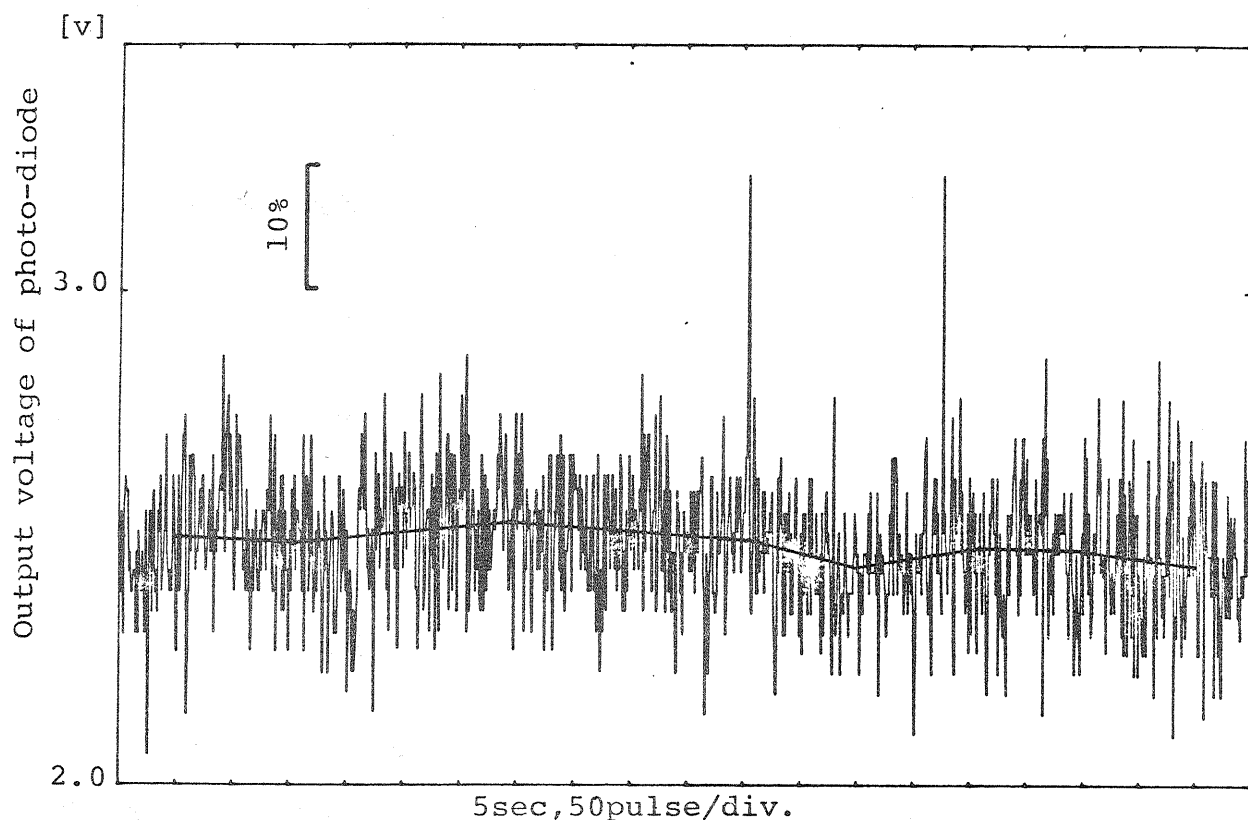


図2. レーザ光パルスのエネルギー P_0 の変動とその区間平均値.

4 レーザ出力のゆらぎが検出結果に及ぼす影響

図1に示した構成においては、パルス列に対し入力光エネルギーと透過光エネルギーに対応する量を各パルス毎に交互に測定する。図1では電子スイッチ E.Sw. がその機能をし、整合フィルタは一台を共通に用いるので温度ドリフトの影響を軽減されている。フィルタの出力は A/D 変換された後、それぞれ別個に設けたレジスタに 100 パルス分だけ蓄積される。その値を $\bar{P}_0$ 及び $\bar{P}$ とする。この結果 $\bar{P}_0$, $\bar{P}$ は更に小型計算機 YHP Model 21A に送られ $\bar{P}_0/\bar{P}$ が算出される。この過程を通ることにより図2に見られるような P_0 の遅い変動は補正される。また、レジスタの使用により、 $\bar{P}_0$ と $\bar{P}$ は P_0 と P の 100 pulse に亘る平均値に相当するのでその標準偏差は 0.5% 程度にまで圧縮される。この程度のゆらぎも他の原因による変動に比べ優越的であるので以下ではこの値を用いて検出限界を検討する。

実機では複数の波長において測定し、(4)式を用いて濃度 n を算出するがここでは簡単のため単一波長のみを用いる場合を考える。いま100回の積算値であるレーザ出力 $\bar{P}_0$ と透過光エネルギー $\bar{P}$ のゆらぎを $\delta\bar{P}_0$ 及び $\delta\bar{P}$ とすれば、(4)式を用いて n_i を算出した結果に対するゆらぎ δn_i は

$$\delta n_i = \frac{1}{\alpha_i(\lambda)L} \frac{\delta\bar{P}_0 - \delta\bar{P}}{\bar{P}_0} \quad (5)$$

となるのでその標準偏差 $\sigma(\delta n_i)$ は $\delta\bar{P}_0$ と $\delta\bar{P}$ が独立であるから

$$\sigma(\delta n_i) = \frac{\sqrt{2}}{\alpha_i(\lambda)L} \sigma(\delta\bar{P}_0/\bar{P}_0) \quad (6)$$

を得る。

波長 $4000\text{ \AA}$ の光を用いるとすれば酸化窒素は断面積 $\alpha_i = 6.6 \times 10^{-23} [\text{m}^2]$ を持つので $L = 1.0 [\text{m}]$, $\delta\bar{P}_0/\bar{P}_0 = 5 \times 10^{-3}$ を代入して

$$\sigma(\delta n_i) = 1.59 \times 10^{20} [\text{m}^2]$$

となる。この値は約5 ppmに相当し、1つの検出限界と考えることができる。すなわち標準偏差100%でこの値を得る。またこの値にはレーザ出力のゆらぎに基づく成分が大部分で、試料の温度ゆらぎ、光学系の機械的振動、電子回路の雑音は僅少である。従って $P/\bar{P}_0$ を各パルス毎に算出する電子回路を用い、さらに(4)式の関係を採用すれば検出限界はこの1/100程度まで引き下げられることを見込んでいる。

参考文献

(1)佐野博也、古賢隆治、棚田嘉博、常広隆司：レーザ気体実時間分析における新しい逆フィルタ補正、昭和51年度電気関係学会関西支部連合大会G2-32。

(2)佐野博也、棚田嘉博、古賢隆治、小野龍宏：レーザ大気汚染検出のための汎用パルス光計測法、照明学会誌掲載予定(1977)。