

2波長同時発振DIALシステムによるNO₂測定 Two-wavelength Lasing DIAL System for NO₂ Measurement.

杉本 伸夫、竹内 延夫、奥田 典夫
N. Sugimoto, N. Takeuchi and M. Okuda
国立公害研究所
National Institute for Environmental Studies

1. はじめに

著者らは、大気汚染気体のうち特に重要なもののひとつであるNO₂の濃度分布を遠隔計測することを目的に、フラッシュランプ励起色素レーザーを用いた差分吸収レーザーレーダー(DIAL)の開発を行ってきた。排煙流を対象に行なった測定実験の結果、2波長を1ショットごとに取り換えた方法で、60回(4分間)の積算により、距離分解能120mで、500mの距離までで0.03ppm以上の精度を得た。これは高濃度の領域におけるNO₂濃度の測定には十分な精度である。しかし、2波長を交互に取り換えた方法においては、誤差の主な原因は、波長切り換えの間におこるエアロゾルの変化によるもので、測定精度をさらに向上させるためには2波長同時測定が有効であると考えられることが示された。このため、色素レーザーの2波長同時発振化を行ない、基礎的な実験を行なった。

2. NO₂測定用DIALシステムの概要

表にシステムの仕様を示す。NO₂の吸収の極大 $\lambda_{on} = 463.1 \text{ nm}$, $\sigma_{on} = 4.7 \times 10^{-23} \text{ m}^2$, および極小 $\lambda_{off} = 465.8 \text{ nm}$, $\sigma_{off} = 2.3 \times 10^{-23} \text{ m}^2$ の2波長を用い、DIAL測定を行なう。波長選択は2波長交互に取り換えた場合、共振器中のエタロン角度をステップモーターを用いて調節することによって行なう。2波長同時発振については後に述べる。

送信系	NEC SL-269 型 色素レーザー 励起 ; 同軸フラッシュランプ (Phase-R DL-15Y) 色素 ; C1Hクマリン ($1.5 \times 10^{-4} \text{ Mol/l}$ アルコール溶液) 発振波長 ; 463.1 nm, 465.8 nm スペクトル巾 ; $\sim 0.1 \text{ nm}$ 出力エネルギー ; $\sim 100 \text{ mJ}$ 繰り返し ; 0.5 PPS パルス巾 ; 600 nsec
受光系	30 cm カセグレン型 望遠鏡 光電子増倍管 ; HTV R-376
信号処理系	トランジエントリコーダー ; 普通DM-901 x 2台 (8bits, 1024 segments, ゲート14 10nsec)
制御系	CPU ; NOVA 02

3. DIALによる排煙流の測定

国立公害研エネルギーセンターからの排煙を対象にDIALシステムの測定実験を行なった。これは、波長を交互に取り換えて測定したものである。Fig. 1に測定された2波長における受信信号の比、およびこれより計算されたNO₂濃度分布を示す。濃度分布は排煙付近でピークを示し、ピーク値は $\sim 0.17 \text{ ppm}$ であった。Fig. 1に見られるように測定誤差は遠距離よりむしろピーク付近で大きくなっていることがわかる。

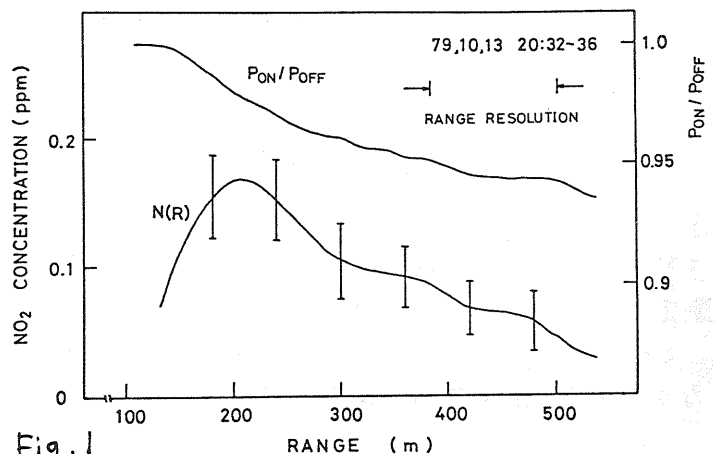


Fig. 1

4. 測定誤差の検討

DIAL測定では濃度 $N(R)$ は、 $\sigma_d = \sigma_{on} - \sigma_{off}$ とおき、受信光強度を P_{on}, P_{off} 、距離分解能を ΔR とすると

$$N(R) = (2\sigma_d \Delta R)^{-1} \{ \ln [P_{on}(R)/P_{on}(R+\Delta R)] - \ln [P_{off}(R)/P_{off}(R+\Delta R)] + B + T \} \dots (1)$$
 で算出された。B, Tはエアロゾル後方散乱係数 β が、 $\lambda_{on}, \lambda_{off}$ で等しい場合は0である。
 また、 $N(R)$ の標準偏差は $\Delta N(R)^2 \approx (4\sigma_d^2 \Delta R^2)^{-1} \left[\sum_{i=on, off} (\Delta P_i(R)^2 / P_i(R)^2 + \Delta P_i(R+\Delta R)^2 / P_i(R+\Delta R)^2) \right] \dots (2)$
 と表わされた。ここに、 $P_{on}(R)$ と $P_{off}(R)$ の相関の項は省略した。 $P(R)$ に対する誤差の原因としては、
 レーザパワーの変動、ショットノイズ、デジタル化ノイズ、エアロゾル後方散乱係数 β の変動などが考え
 られる。このうちレーザパワーの変動は(1)式において打ち消すので直接には誤差の原因にならない。
 従って $(\Delta P/P)^2 \approx (h\nu/\eta T)(1/\beta) + (\text{const}/P)^2 + (\Delta\beta/\beta)^2 \dots (3)$ と表わすことができた。第一項はショットノイズ
 二項はデジタル化ノイズ、三項はエアロゾルの変動である。今、測定データより $(\Delta P/P)^2$ を見積りため、 $F(R)$
 $= P_{off}(R+\Delta R)/P_{off}(R)$ に対する標準偏差を計算し、fig. 2に示した。 $(\Delta F/F)^2 \approx (\Delta P(R)/P(R))^2 + (\Delta P(R+\Delta R)/P(R+\Delta R))^2$
 と考えられるので $1/2 (\Delta F/F)^2$ をプロットしてある。また、ショットノイズ、デジタル化ノイズにつ
 いて、 P の測定値を用いて見積った値をfig. 2に示した。fig. 2でわかるように、 $(\Delta P/P)^2$ において
 ショットノイズ、デジタル化ノイズは小さく、 $(\Delta\beta/\beta)^2$ がほとんどであると考えられる。 $(\Delta\beta/\beta)^2$ は β の値
 あるいはエアロゾル濃度に依存していると考えられ、濃度の高い排煙付近で大きくなっている。
 次に、(1)式を用いて計算された $N(R)$ の標準偏差をfig. 2のBに示した。 $(\Delta P/P)^2$ と比較するために(2)
 式の[]内の $1/4$ に相当する量 $\sigma_d^2 \Delta R^2 \Delta N(R)^2$ をプロットした。このデータでは、2波長を交互に
 (2秒ごとに)切り換えて測定を行なった。 $\beta_{on}(R)$ と $\beta_{off}(R)$ の間に相関がなければBはAと一致するは
 ずであるが、長周期のエアロゾル変化があるため、(1)式中で $\Delta\beta_{on}, \Delta\beta_{off}$ がキャンセルしてBはAよ
 り小さくなっている。詳細には β の変化の周波
 数成分を調べる必要があるが、DIAL測定に
 おいて $\Delta\beta$ による誤差を除くためには(1)式中で $\Delta\beta_{on}$
 $\Delta\beta_{off}$ が打ち消すように2波長を同時に測定す
 るか、 β の変化が無視できる時間内に波長を切り
 換えて測定する必要がわかる。

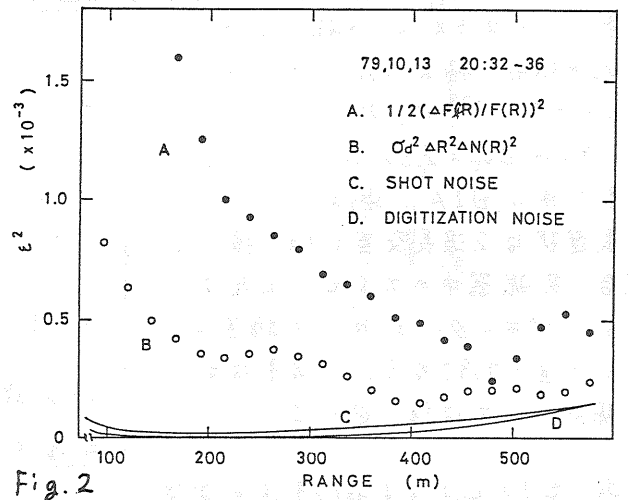


Fig. 2

5. 2波長同時発振DIALシステム

同軸フラッシュランプ中に2本の色素セルを
 通し、2つの独立した共振器を構成すること
 により、色素レーザーの2波長同時発振化を行なった。
 (Phase-R, 2C-2Dアダプタを使用)。出力エネ
 ルギーは、2波長合わせて $\sim 80 \text{ mJ}$ が得られた。
 また、DIAL測定において重要な2波長発振のタイミングは
 fig. 3に示すようによく一致しており、タイミングおよび波型の
 バラツキについてもよい結果を得ている。

受光系はハーフミラーおよび2枚の干渉フィルター(スペクトル巾
 $\sim 3 \text{ \AA}$)を用い、2本の光電子増倍管により2波長を検出する。
 また、信号処理には2台のトランジエントレコーダ(岩通DM-901)
 を用い、ゲートタイム 10 nsec で2チャンネルのデータを取得する。
 測定データはミニコンを用いて記録、処理、表示が行なわれた。

このシステムにより、さらに高精度の NO_2 濃度測定が可能と
 なり、各種の測定実験に応用できるものと考えている。

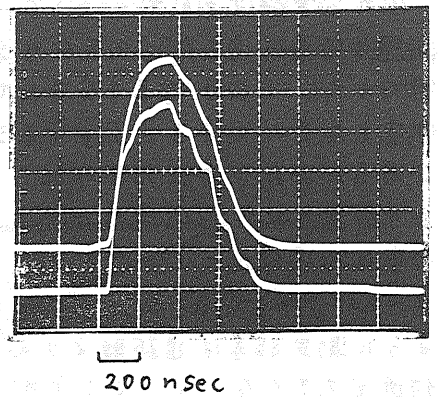


Fig. 3