

II-3 エアロゾル分布の時間変動による  
差分吸収レーザーレーダー測定の誤差について  
Experimental Estimation of the Error Due to the Fluctuation of  
Aerosol Backscattering in DIAL Measurements

杉本伸夫<sup>1</sup>・松井一郎<sup>2</sup>・笹野泰弘<sup>1</sup>・清水 浩<sup>1</sup>・竹内延夫<sup>1</sup>  
Nobuo SUGIMOTO<sup>1</sup>, Ichiro MATSUI<sup>2</sup>, Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>1</sup>  
and Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup>

要 旨

エアロゾル後方散乱の時間変動により生じる DIAL 測定の誤差を国立公害研大型レーザーレーダーのデータを用いて定量的に評価した。この結果、大気混合層内の汚染気体を測定対象とする地上ベース DIAL の場合、10pps のレーザーを用いて 2 波長を交互に切り替える方式を用いてもエアロゾル後方散乱の時間変動による誤差は十分に小さいことが示された。

Abstract

The error in DIAL measurements caused by the fluctuation of aerosol backscattering was quantitatively analyzed using the data of the NIES large scale lidar. The alternate, two wavelength method with a 10 pps laser is sufficient for ground-based DIAL in the visible region for measurements of pollutants in the atmospheric mixed layer.

1 はじめに

国立公害研究所では都市域における環境濃度の NO<sub>2</sub> の連続観測を目的とする差分吸収レーザーレーダー (DIAL) システムの開発を行っている (本報告書論文 II-2)。本論文ではこの装置の設計に先だって行った、DIAL 測定の誤差の実験的な評価についてまとめて報告する。特に DIAL 測定における 2 波長切り替えの時間間隔とエアロゾル濃度分布の時間変化から生じる誤差との関係につい

- 
1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番 2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
  2. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番 2  
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

て議論する。この問題については以前の論文(杉本・竹内, 1985; Sugimoto ら, 1985)でも述べたが、本論文では定量的な議論を行い、具体的なシステムにおける測定誤差の評価の方法を考える。

## 2 実験

エアロゾルの変動による DIAL 測定の誤差を評価するために国立公害研究所大型レーザーレーダー(清水ら, 1982; Shimizu ら, 1985)により測定したデータを利用した。大型レーザーレーダーを用いた理由は測定の SN 比が高く、エアロゾルの濃度分布の変動を明りょうに観測することができるためである。以前の論文(杉本・竹内, 1985; Sugimoto ら, 1985)で述べた方法に従い、大型レーザーレーダーの 532nm におけるレーザーレーダー信号のそれぞれのショットを DIAL に測定における on, off の信号と見なして DIAL におけると同様の計算を行い濃度に対応するものを計算した。今の場合、1 波長のレーザーレーダーデータを用いているので、濃度はゼロとなるが、濃度測定における誤差は評価することができる。12.5pps で測定したデータを  $n$  ショットおきに on, off の信号とみなすことにより 2 波長切替時間に対応する量を変化させた。

## 3 結果と考察

DIAL 測定において濃度は次のように計算される。

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma_d L} \ln[F(R)] \quad (1)$$

ここに、 $L$  は測定の距離分離分解能、 $\sigma_d$  は差分吸収断面積、 $F(R)$ 、 $f(R)$  は次のように定義されている。

$$\begin{aligned} F(R) &= f_{\text{off}}(R)/f_{\text{on}}(R) \\ f_i(R) &= P_i(R+L)/P_i(R) \quad (i=\text{on, off}) \end{aligned} \quad (2)$$

$P(R)$  はレーザーレーダー受信信号である。

濃度  $N(R)$  に対する誤差は一次の近似で次のように表される。

$$\begin{aligned} (\Delta N(R)/N(R))^2 &= [1/(2\sigma_d L N(R))]^2 (\Delta F(R)/F(R))^2 \\ &= \text{const} [(\Delta f_{\text{on}}/f_{\text{on}})^2 + (\Delta f_{\text{off}}/f_{\text{off}})^2 - 2(\Delta f_{\text{on}}/f_{\text{on}})(\Delta f_{\text{off}}/f_{\text{off}})] \end{aligned} \quad (3)$$

すなわち、 $N(R)$  に対する誤差の波長切替時間間隔への依存性は  $\Delta f(R)$  の自己相関関数によって表される。以前の論文(杉本・竹内, 1985; Sugimoto ら, 1985)にいくつかの観測データを用いて計算した  $\Delta f(R)$  の自己相関関数が示されている。ここでは  $\Delta f(R)$  の自己相関関数に関数形を当てはめて定量的な議論を行う。ここでは自己相関を表す関数  $S(\Delta t)$  を次式で定義する。

$$S(\Delta t) = \overline{\Delta f(t) \Delta f(t - \Delta t)} / \bar{f}^2 \quad (4)$$

図1に示すように関数  $S(\Delta t)$  の  $\Delta t = 0$  の部分以外は  $b \exp[-a \Delta t]$  の関数で非常によく表現できることが分かった。 $\Delta t = 0$  の部分にはショットノイズなどのランダムな雑音成分が含まれている。

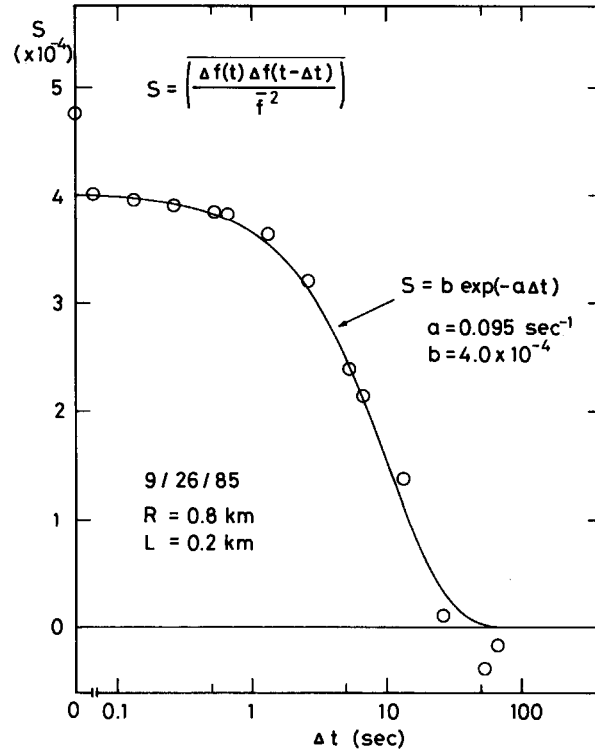


図 1 実験的に求めた関数  $S$  の一例

Fig. 1 An example of the experimentally obtained  $S$  as a function of  $\Delta t$

いろいろな測定条件の測定データから求めた  $a$ ,  $b$  の値の例を表1にまとめて示す。表1中でエアロゾルと示したものは日中の大気混合層内のエアロゾルに対する代表的な値，その他のものは観測の一例である。この結果から言えることは，エアロゾル変動の時間スケールはいずれの場合も同じ程度であるが，変動の絶対値は非常に異なるということである。エアロゾルの変動の時間スケールが散乱の対象に依存しないのは少し意外であるが，これは観測されたエアロゾルの変動の時間スケールがレーザーレーダー測定の距離分解能に依存しているためであると考えられる。すなわち，レーザーレーダー測定では距離分解能に相当する区間のエアロゾル濃度分布を平均したものが測定される。非常に速い時間変動を示す対象はその空間スケールも小さいと考えられるので，速い時間変動は空間分布の平均により打ち消されてしまうものと考えられる。

表 1 いくつかの測定例における係数  $a, b$  の値  
Table 1 Coefficients  $a$  and  $b$  for several examples

	$a$ (sec <sup>-1</sup> )	$b$
aerosol	0.095	$4.0 \times 10^4$
light plume	0.10	$3.5 \times 10^2$
cloud	0.11	3.0

関数  $S(\Delta t)$  を用いてエアロゾル変動による DIAL 測定の誤差は次式で評価することが可能である。

$$\left(\frac{\Delta F(R)}{F(R)}\right)^2 = 2 \times [S(0) - S(\Delta t)] \quad (5)$$

ここで  $\Delta t$  は 2 波長切替の時間間隔である。

具体的な DIAL システムにおける誤差の評価は次のようにして行うことができる。測定誤差は次式のように受信信号強度  $P$  に対する依存性の異なる項に分けて表される。

$$\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 = C_0 + C_1/P + C_2/P^2 \quad (6)$$

第一項はエアロゾルの変動などによる項、二項目はショットノイズ、三項目は量子化誤差、背景光雑音などである。実際の DIAL システムにおける誤差の評価ではこれらの誤差の大小を考察すれば良い。

例として国立公害研究所において開発した NO<sub>2</sub> 測定用の DIAL システムにおける誤差の評価を行う。このシステムの主な仕様を表 2 に示す。この仕様を用いて理論的に評価した測定誤差の大きさを図 2 に示す。実線がショットノイズと量子化誤差を加えたものである。図 2 中に矢印で示したのは散乱するものが混合層内のエアロゾルの場合、薄い煙の場合、雲の場合についてのエアロゾルの変動による誤差の大きさである。それぞれについて、いくつかのレーザー繰り返し数について示した。波長は 1 ショットごとに切り替えるものとしている。エアロゾルの変動による誤差は測定距離に依存しない。

図 2 は 1 ショットの測定における誤差の大きさを示している。以前の論文で報告したように積算を行った場合、エアロゾル変動の誤差も積算回数平方根で減少する。したがって、積算を行う場合も図 2 の縦軸のスケールが変化するだけでそれぞれの誤差の大小関係に変化はない。

図 2 より、10pps の繰り返しレーザーを用いる場合、混合層内の通常の観測ではエアロゾルの変動による誤差はショットノイズと量子化誤差の和に比べて小さく、ほとんど問題にならないことが分かる。また、薄い煙のある状況でも実用上問題ないことが結論される。

表 2 国立公害研究所 NO<sub>2</sub> DIAL の主な仕様

Table 2 Specification of the NIES NO<sub>2</sub> DIAL system

Laser	
ND :	YAG pumped dye laser
Output energy :	20 mJ/pulse
Wavelength :	$\lambda_{on}=448.1$ nm
	$\lambda_{off}=446.6$ nm
Telescope	
Diameter :	50 cm
Transient recorder	
Accuracy :	10 bits
Clock rate :	50 ns

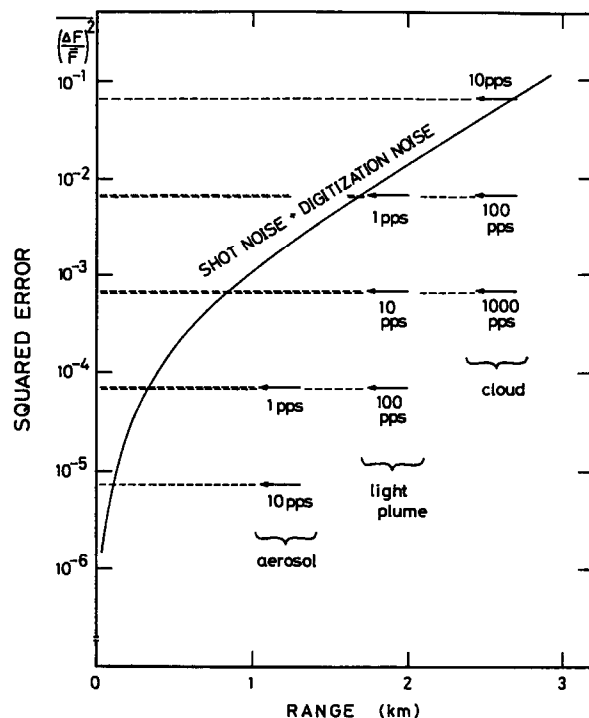


図 2 国立公害研究所 NO<sub>2</sub> DIAL システムにおける誤差の評価

Fig. 2 Estimation of errors in the NIES NO<sub>2</sub> DIAL system

以上の見積もりではエアロゾルの時間変動が  $b \exp[-a \Delta t]$  の関数で表されるものと仮定している。しかし自己相関係数の  $\Delta t = 0$  の近傍ではショットノイズなどのランダム雑音のほかに非常に速い大気のゆらぎの影響が含まれている可能性がある (Schotland, 1974; Menyuk & Killinger, 1981, 1983)。そこで、大型レーザーレーダーのデータについて、 $\Delta f$  の自己相関係数を距離分解能  $L$  をゼロに外挿した値などを用いて、ショットノイズなど完全にランダムな誤差の大きさを見積もり、これと  $\Delta t = 0$  における誤差の大きさととの差をとることにより速いゆらぎの成分の大きさの推定を行った。この結果 10pps のレーザーを用いて DIAL 測定を行う場合、大気の速いゆらぎを含めた誤差の大きさは大きく見積もっても、混合層のデータでは  $5 \times 10^{-5}$ 、薄い煙の場合でも  $5 \times 10^{-3}$  程度以下であるという結論を得た。したがって、先に述べた結論には大きな変化は無いと思われる。

国立公害研究所 NO<sub>2</sub> DIAL では以上の結果に基づいて 10pps のレーザーを交互に切り替える方法を用いている。

#### 4 おわりに

本論文ではエアロゾル濃度の時間変動により生じる DIAL 測定の誤差の評価法について述べた。実際のシステムの設計において重要なことは、エアロゾル濃度の時間変動による誤差が、ショットノイズ、あるいは量子化誤差と比較してどの程度の大きさであるかを評価することである。すなわち、エアロゾルの変動による誤差がショットノイズ等と比較して十分小さくなるように 2 波長の測定の時間間隔を設定すれば十分である。本研究により、YAG レーザー励起色素レーザーを光源とする NO<sub>2</sub> 測定用 DIAL の場合は 10pps のレーザーを交互に切り替える方法で十分であることが示された。しかし、例えばもっと大きな出力のレーザーや大口径の受光望遠鏡を用いる DIAL の場合、あるいは長光路差分吸収方式の場合などシステムのショットノイズが低いレベルにある場合にはエアロゾル濃度変動や大気の屈折率のゆらぎ等に対してより厳しい対応が必要となる。

本文における議論は一波長のライダー信号を用いた議論であるので、波長に依存する効果は全く考慮していない。可視から紫外領域では細かい構造を持つようなエアロゾルの散乱係数の波長依存性は見られないと考えられる。したがって NO<sub>2</sub> の測定ではこのことは考慮しなくて良いと考えられる。しかし、赤外領域の DIAL 測定では散乱係数の波長依存性は重要である。最近、赤外領域ではエアロゾルの散乱係数が波長に細かく依存する構造を持つことが話題になっており、また、Menyuk & Killinger (1981, 1983) の実験でも波長に依存する効果が顕著に見られている。

一方、紫外領域の O<sub>3</sub> の測定ではエアロゾルの空間分布より生じる誤差が Browell ら (1985) によって議論されている。紫外領域の O<sub>3</sub> の測定では用いる 2 波長の波長間隔が大きいため、2 波長におけるミー散乱とレイリー散乱の比がかなり異なる。このためエアロゾルの散乱係数の空間的な分布が波長に依存し、これによって濃度の値に誤差が生じる。Browell らは  $\lambda_{\text{off}}$  から得られるエアロゾルプロファイルを用いてこの誤差を補正する手法を開発し、良い結果を得ている。NO<sub>2</sub> などの測定では 2 波長の間隔が小さいのでこの誤差の影響は無視できると考えられる。

## 引用文献

- Browell, E.V., S. Ismail and T. Shipley (1985) : Ultraviolet DIAL measurements of O<sub>3</sub> profiles in regions of spatially inhomogeneous aerosols. *Appl. Opt.*, **24**, 2827-2836.
- Menyuk, N. and D.K. Killinger (1981) : Temporal correlation measurements of pulsed dual CO<sub>2</sub> lidar returns. *Opt. Lett.*, **6**, 301-303.
- Menyuk, N. and D.K. Killinger (1983) : Assesment of relative error sources in IR DIAL measurement accuracy. *Appl. Opt.*, **22**, 2690-2698.
- Schotland, R.M. (1974) : Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 71-77.
- 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫(1982) : 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作. 国立公害研究所研究報告, 第34号, 61-81.
- Shimizu, H., Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, I. Matsui and N. Takeuchi (1985) : Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area. *Appl. Opt.*, **24**, 617-626.
- 杉本伸夫・竹内延夫(1985) : 差分吸収レーザーレーダーの測定誤差に関する実験的研究. 国立公害研究所研究報告, 第77号, 101-116.
- Sugimoto, N., I. Matsui, H. Shimizu and N. Takeuchi (1985) : Experimental estimation of the error due to the fluctuation of aerosol backscattering in DIAL measurements. First International DIAL Data Collection and Analysis Workshop, Virginia Beach, USA.