

レーザーオリジナル

環境濃度NO₂ 測定用差分吸収レーザーレーダーの
設計と製作杉本伸夫*・松井一郎*・笹野泰弘*
清水 浩*・竹内延夫*

(1987年2月14日 受理)

A Differential Absorption Lidar System for Measuring NO₂
in the Urban AtmosphereNobuo SUGIMOTO*, Ichiro MATSUI*, Yasuhiro SASANO*, Hiroshi SHIMIZU*,
and Nobuo TAKEUCHI *

(Received February 14, 1987)

The design and construction of a differential absorption lidar (DIAL) system for measuring NO₂ in the urban atmosphere are described. Two-wavelength laser beams in the blue region generated by a dye laser pumped by a Nd:YAG laser are used as the light source for the DIAL measurement. The wavelengths are switched alternately with the pulse repetition rate of 10 pps. The minimum detectable NO₂ concentration (signal-to-noise ratio = 5) for the DIAL system is 10 ppb for a 10-minute measurement.

1. はじめに

差分吸収レーザーレーダー (DIAL) はミュー散乱レーザーレーダーとガスの吸収測定を組合せた方法で、大気中のガス状汚染物質を遠隔計測する最も有効な測定法のひとつである。DIALの測定原理は Schotland¹⁾ により1964年に提案され、現在までにNO₂, SO₂, O₃, H₂O, HCl等を測定対象として数多くの開発研究が行われてきた²⁻²⁶⁾。本論文では環境濃度のNO₂の測定を目的とする、YAGレーザー励起色素レーザーを光源としたDIALシステムの設計と製作について報告する。NO₂, SO₂などを測定対象としたDIALシステムはこれまでもいくつかの研究機関で開発され、主に排煙流を対象とした測定実験が行われてきた^{4-9), 16-24)}。本論文

で報告するDIALの特徴は、排煙などの局所的な高濃度のNO₂ではなく、都市域の大気境界層内のNO₂を測定対象としている点である。このような測定はDIALの測定感度、距離分解能、時間分解能を考慮した場合、最も有効な応用のひとつである。DIAL測定では、ガス状物質の分布と同時にエアロゾル分布が得られるので、大気境界層の構造とNO₂分布を同時に観測することができる。また、DIALによるNO₂の鉛直分布と、風向風速のデータを合わせて解析すれば、汚染気団の移流に関する情報を得ることも可能となる。本論文ではDIALの設計と製作および測定例について報告する。

2. DIALシステムの設計

差分吸収レーザーレーダーは、ガスの吸収の

*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16-2)

*National Institute for Environmental Studies (16-2, Onogawa, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305)

大きい波長 (λ_{on}) と小さい波長 (λ_{off}) の 2 波長を用いてレーザーレーダー信号を記録する。このとき、ガスの吸収の大きい波長のレーザー信号は吸収の少ない波長に比べて速く減衰する。ある距離までの減衰の比をとることによりその距離までのガスによる吸収がわかり、これをさらに距離について微分すれば各距離におけるガスの濃度が得られる²⁷⁾。2 波長のレーザーレーダー測定を行なう方式には、2 波長の測定を同時あるいは数百マイクロ秒程度の短時間のうちに行う方式と、2 波長の測定を交互に行なう方式が考えられる。2 波長同時方式では通常 2 台のレーザーを必要とするので、装置のコストは 2 波長切替え方式のほぼ倍近くになる。一方、2 波長切替え方式の場合、2 波長の測定の間時間間隔が大きい場合には、その時間内にエアロゾルの分布が変化することにより誤差を生じる可能性があり^{15, 27-31)}、この誤差の大きさを評価しておく必要がある。

ここで製作した DIAL では 2 波長切替え方式を採用した。製作した DIAL の主な仕様を Table I に示すが、次節で設計に先立って行なったエアロゾルの時間変動による誤差の大きさの評価について述べる。

2.1 エアロゾル後方散乱の時間変動による DIAL 測定誤差の評価

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^{32, 33)}により測定したエアロゾル分布のデータを利用した。大型レーザーレーダーの 532 nm 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 における同様の計算を行い濃度に対応するものを計算した。この場合、1 波長のデータを用いるので、濃度はゼロとなるが、濃度測定の誤差は評価することができる。12.5 pps 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 波長切替え時間に対応する量を変化させた。この方法については著者らの以前の論文でも述べた^{28, 29)}。

Table I Specification of the NO₂ DIAL system.

Laser	
Type :	Nd:YAG pumped dye laser (JK lasers HY 750, Quanta-Ray PDL 1)
Output energy:	20mJ/pulse
Wavelength :	$\lambda_{on}=448.1 \text{ nm}$ $\lambda_{off} = 446.6 \text{ nm}$
Telescope	
Type :	Newtonian
Diameter:	50 cm
Focallength :	1.2 m
Field of view :	0.7 mrad
Filter	
Type :	Interference filter
Bandwidth :	1.5 nm
Photomultiplier tube	
Type :	(Hamamatsu R329)
Transient recorder	
Type :	(Autnics S121)
Clock rate :	20 MHz
Accuracy :	10 bits

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 は測定の距離分解能、 σ_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。

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

$P(R)$ 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。

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

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 $\Delta f(R)$ の自己相関係数によ

って表される。ここでは、 $\Delta f(R)$ の自己相関を表わす関数 $S(\Delta t)$ に関数形をあてはめて定量的な議論を行う。 $S(\Delta t)$ は次式で定義する。

$$S(\Delta t) = \left(\frac{\Delta f(t) \Delta f(t-\Delta t)}{\bar{f}^2} \right) \quad (4)$$

Fig. 1 に観測データを用いて求めた $S(\Delta t)$ の例を示した。Fig. 1 に見られるように関数 $S(\Delta t)$ の $\Delta t = 0$ 以外の部分は $b \exp[-a\Delta t]$ の関数で非常によく表現できることがわかった。 $\Delta t = 0$ の部分にはショットノイズなどの不規則な雑音成分が含まれている。

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 Table II にまとめて示す。Table II 中でエアロゾルと示したものは日中の大気混合層中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、エアロゾル変動の時間スケールはいずれの場合も同程度であるが、変動の絶対値は非常に異なる。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

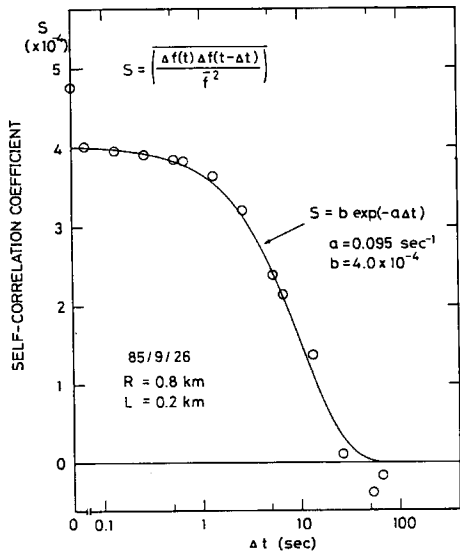


Fig. 1 Auto-correlation of Δf .

Table II Coefficients a and b for several examples.

	a (sec ⁻¹)	b
aerosol	0.095	4.0×10^{-4}
light plume	0.10	3.5×10^{-2}
cloud	0.11	3.0

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消されてしまうものと考えられる。

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できる。

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

ここで Δt 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。

$$(\Delta F/F)^2 = C_0 + C_1/P + C_2/P^2 \quad (6)$$

第一項はエアロゾルの変動などによる項、2 項めはショットノイズ、3 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きさを考察すれば良い。

Table I に示した仕様を用いて理論的に評価した測定誤差の大きさを Fig. 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。Fig. 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後方散乱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返し数について示した。波長は 1 ショットごとに切替えるものとしている。

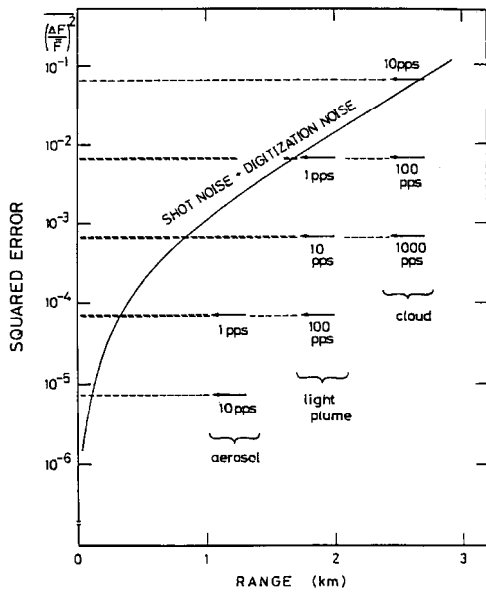


Fig.2 Estimation of errors in the NO₂ DIAL system.

エアロゾルの変動による誤差は測定距離に依存しない。

Fig.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。Fig.2 よりシステムにおけるそれぞれの誤差の大小関係を評価することができる。このとき、実際の測定では通常データの積算処理を行なうので、それぞれの誤差がデータの積算回数に対してどのように依存するかを調べておく必要がある。ショットノイズなど不規則誤差については積算回数の平方根に比例して減少する。一方、エアロゾル変動による誤差のように、 P_{on} 、 P_{off} の変動の間に相関のある場合は、誤差の積算回数に対する依存性はデータの積算の方法に依存する。筆者らの以前の論文^{28, 29)} で報告したように、実際の測定では交互に測定した P_{on} 、 P_{off} それぞれについて積算を行ない、その結果を用いて濃度を計算する方法が現実的であるが、この場合エアロゾル変動による誤差は積算回数の平方根に比例して減少することが示された。従って、積算を行う場合も Fig.2 を用いて誤差の大小関係を議論することができる。

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、ショットノイズや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。Fig.2 より、10 pps の繰返しの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わかる。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。

以上の見積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たが、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不規則雑音のほかに非常に速い大気のゆらぎの影響が含まれる可能性もある。そこで、大型レーザーレーダーのデータについて、 Δf 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、完全に不規則な誤差の大きさを見積り、これと $\Delta t = 0$ における誤差の大きさとの差をとることにより速いゆらぎの成分の大きさを推定した。大気の速いゆらぎの影響は受光望遠鏡の口径などに依存する可能性があるが、仮に大型レーザーレーダーの結果をそのまま用いるとすると、10 pps 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っても、混合層のデータでは 5×10^{-5} 、薄い煙の場合でも 5×10^{-3} 程度以下であるという結論が得られる。従って速いゆらぎの影響があるとしても、先に述べた結論には大きな変化はないと考えられる。以上のような考察に基づき本装置では 10 pps のレーザーを交互に切替える方法を採用した。

エアロゾル変動による誤差の大きさとショットノイズの大小関係は、装置に依存するものである。従って、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ゆらぎ等

に対してより厳しい対応が必要となる。

2.2 DIALの測定感度の理論的評価

製作したDIALについて理論的に見積った測定感度を Fig. 3 に示す。ここでは混合層内の測定を考え、その中でエアロゾル分布は一様であるとした。Fig. 3 に見られるように、距離分解能を適宜設定すれば、10分の測定で3 kmまでの距離において10ppbのNO₂を誤差±2 ppbで測定できる。

3. DIALシステムの製作

本装置の構成を Fig. 4 に示す。装置全体はコンテナに収納されている。Fig. 5 にコンテナ内の配置を示す。送光部と受光部は振動によりアラインメントが狂わないように一つの光学台の上に設置されている。次に各部分の詳細を述べる。

3.1 送光部

レーザーは YAG レーザー-励起色素レーザー

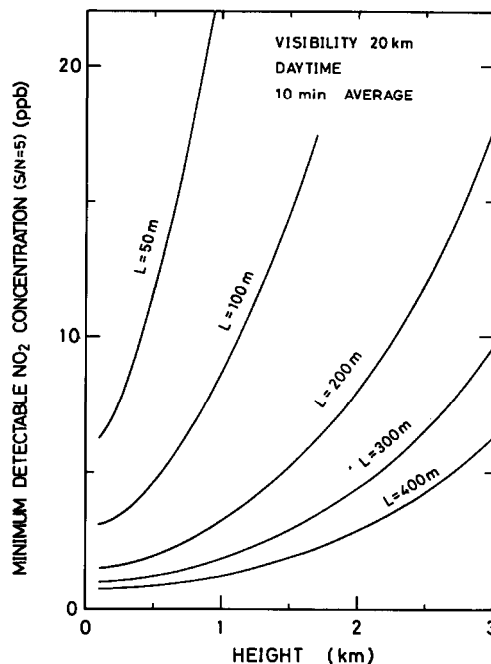


Fig. 3 Calculated minimum detectable NO₂ concentration.

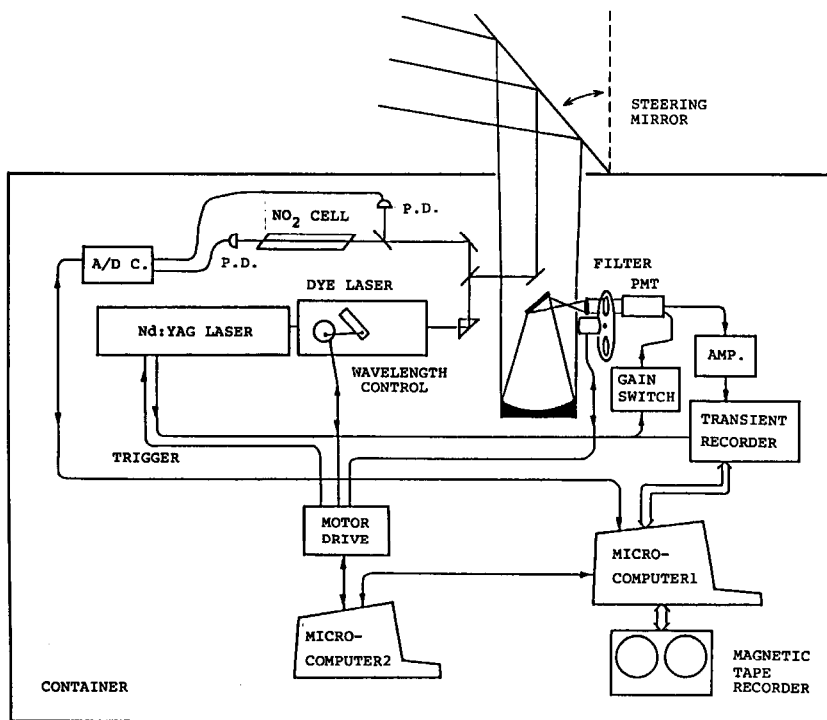


Fig. 4 Block diagram of the NO₂ DIAL system.

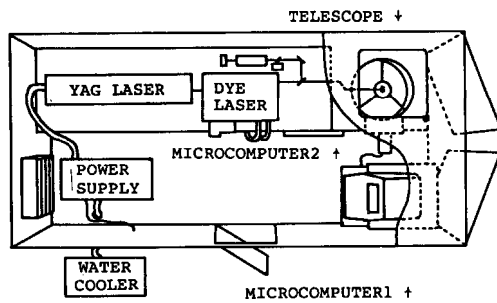


Fig. 5 Layout inside the container.

を用いている。YAG レーザーの 3 倍高調波を用いて色素レーザーを励起し、青色領域のレーザー光を得ている。YAG レーザーは JK レーザー社の HY750 型で 355nm の出力は 170mJ/pulse である。また、繰返し数は 10pps、パルス幅は約 10 ns である。色素レーザーは Quanta-Ray 社 PDL1 型を用いた。クマリン系の色素を用い、青色領域の出力は最大で約 20 mJ である。また、波長幅は 0.3 cm^{-1} である。

波長切替装置

色素レーザーの波長は特別に製作した波長切替え装置により、2 波長のレーザー光が交互に得られるようにした。この装置の構造を Fig. 6 (a) に示す。ステップモーターに取付けられたカムにより色素レーザーの回折格子のサインバーを振動させる構造になっている。振動の振幅およびバーの振動の中心の位置はねじで微調節され、任意の 2 波長を交互に取出すことができるステップモーターはマイコン (SHARP MZ 80) で制御され、レーザーの発射および後に述べる受光系のフィルター切替え装置と同期をとって動作する。

送光光学系、校正装置

色素レーザーの出力は 10 倍のコリメータでビームを拡大した後、ミラー系でレーザー光出射窓に導かれ、大気中に発射される。送信光のビーム広がり率は約 0.3 mrad である。受光望遠鏡の光軸とレーザー光の光軸の位置関係は同軸とした。一方、レーザー光の一部はビームスプリッターにより校正装置に導かれる。校正装置は DIAL 測定と同時に、濃度を正確に設定した

NO₂ セルの吸収を測定して DIAL 測定の校正を行うために用いられる。校正装置は NO₂ を封入したセルと、セルの前後に配置した 2 つのレーザーパワーモニター装置 (ANALOG MODULES LEM100) からなる。レーザーパワーモニター装置からの信号は A/D 変換されデータ収集用マイクロコンピュータ (SORD M 343) に読込まれる。校正装置はレーザー波長切替装置の波長設定にも用いられる。

3.2 受光部

受光光学系

受光望遠鏡は 50 cm のニュートン型を用いた。焦点距離は 1.2 m である。望遠鏡の視野の方向は鉛直上方のみで東西南北 5 度までの微調節が可能のように設計された。受光望遠鏡で集光された光はレンズで平行にされた後、干渉フィルターを通して光電子増倍管に入射される。干渉フィルターのバンド幅は 1.5 nm で、レーザー波長と同期して 2 枚を切替える。2 枚の干渉フィルターをレーザー波長の切替と同期して切替えるためのフィルター切替装置の構成を Fig. 6 (b) に示す。干渉フィルターの取付けられた円板はステップモーターにより駆動され、レーザー波長切替装置と同じマイコンにより制御される。

3.3 ステファン測定用ミラー

DIAL の視野の方向は鉛直方向に固定されているが、コンテナの天井に取りつけた大型のミラーを用いて鉛直方向の他に仰角 $0 \sim 30$ 度までの測定を行うことができる。角度の設定は手動で行う。

3.4 信号処理部

トランジェントレコーダー

レーザーレーダー信号はトランジェントレコーダー (オートニクス社 S121 型) により記録される。最小サンプリング時間は 50 ns、精度 10 bit である。トランジェントレコーダーで A/D 変換されて記録されたデータは、1 ショット毎にマイコンに転送される。トランジェントレコ

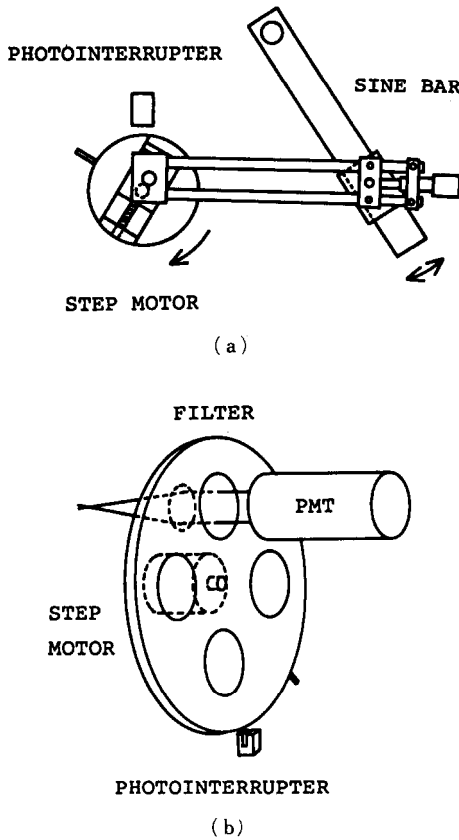


Fig. 6 (a) Laser wavelength switching device.
(b) Filter switching device.

ードーはパラレルインターフェイスを用いてマイコンに接続された。

データ収集用マイクロコンピュータ

トランジェントレコーダーで記録された1024セグメントのレーザーレーダーデータは1ショット毎にデータ収集用マイコンに取込まれ、on, off それぞれの波長について積算処理された後、磁気テープに記録される。データ収集用マイコンはこの他、異常の検知などシステム全体の管理を行う。

4. 測定用プログラム

DIAL 測定制御データ収集用コンピュータシステムのハードウェアの構成を Fig. 7 に示す。システム全体は先に述べた2台のマイクロコン

ピュータから構成され、マイコン1ではデータ収集と測定全体の制御、マイコン2では波長の制御が行われる。これらのマイコンシステムは互いにタイミングを取りながら動作する。システム全体の動作のタイミングはマイコン2から出力される信号で決定されている。データ収集用のマイコン1はマイコン2からのステータス信号とレーザートリガ信号を用いてタイミングを合わせて動作する。

4.1 波長制御

波長制御用マイコン (マイコン2) は、レーザー波長およびフィルターの切替については、Fig. 6 に示した装置のステップモーターのドライブ用のパルスの出力、位置センサーからの信号の入力、および正常な回転を確認するためのパルスの出力を行う。フォトインタラプターを用いた位置センサーからは特定の位置でパルスが出力される。この信号は初期の位置設定に用いられる他、測定時に正常な回転を確認するために用いられる。波長切替装置、フィルター切替装置のステップモーターの一周期は400 ストップである。波長 λ_{on} はアドレス1、波長 λ_{off} はアドレス201 に対応する。マイコン2はこれらの2つの位置でレーザートリガ用のパルスを

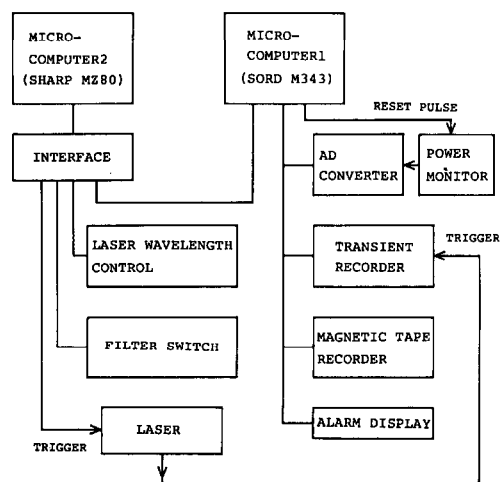


Fig. 7 Block diagram of the measurement control and data acquisition system.

出力する。また、発射したレーザー波長が λ_{on} であるか λ_{off} であるかをマイコン1に知らせるための信号を出力する。これらの信号はマイコン2の主メモリー上にあらかじめ用意された400バイトのデータを順次出力することによって発生させる。

マイコン2に用いるプログラムには通常のDIAL測定モードとレーザー波長切替装置をゆっくり回転させて波長をスキャンするモードの2種類を作成した。

4.2 データ収集および測定の制御

DIAL測定用プログラムのフローチャートをFig.8に示す。測定回数、積算回数を設定した後、マイコン2のステータスを読み、波長切替装置が正常に動作していることを確認する。正常であれば測定動作に入る。測定動作は、積算のループと積算を終った後のデータをMTに書込んで次の積算を開始するループの大小2つのループから構成される。測定の基本動作は、ト

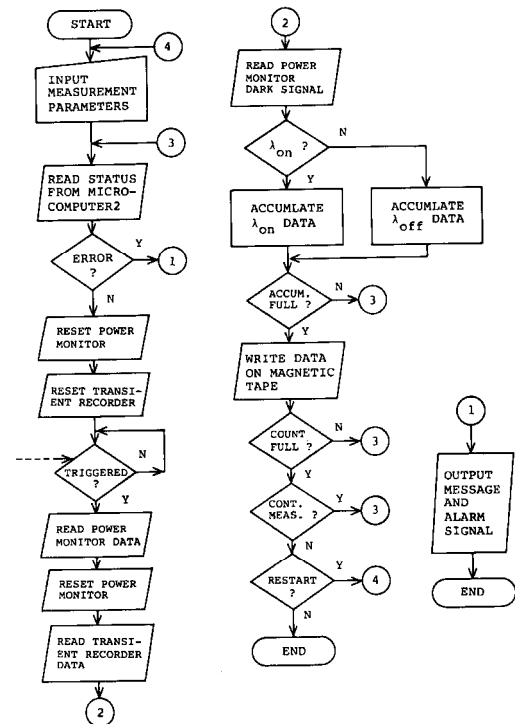


Fig.8 Flow chart of the program for DIAL data acquisition.

ランジェントレコーダーとパワーモニター装置をリセットした後、レーザーを発射し、トランジェントレコーダーのトリガを待つ。トリガされた後、パワーモニター装置とトランジェントレコーダーのデータを読み込む。また、マイコン2のステータスを読み、波長がon, offのいずれであるかを判断する。on, offのレーザーレーダーデータはそれぞれ別々に積算される。それぞれについて設定した回数の積算が終了した後、次の測定に進む。設定した数の測定を終了した場合はメッセージを出力して、次の動作のコマンドの入力を要求する。波長切替装置、フィルター切替装置に異常が生じた場合はアラーム信号を出力して測定を終了する。DIAL測定用プログラムはアセンブラ言語で作成した。これにより、最高で約15 ppsまでの測定に対応できる。

5. DIAL システムの動作試験

5.1 波長切替装置

波長切替装置の動作特性を調べるために次の2つの動作試験を行った。ひとつは、スキャンモードによる校正用セルの吸収スペクトルの測定で、これにより、設定波長の絶対値の確認を行った。もうひとつは、分光器とダイオードアレイを用いた波長測定で、これにより波長の再現性を調べた。

Fig.9に波長スキャンモードにより測定したNO₂セルの吸収スペクトルの例を示す。

Fig.9の横軸はステップモーターのアドレス、

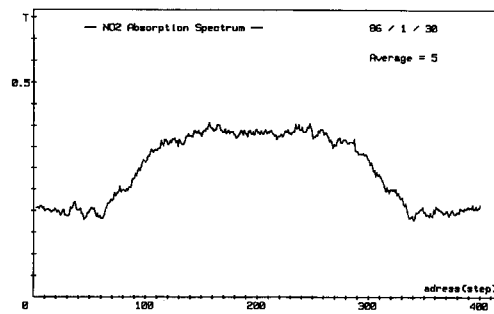


Fig.9 Transmission spectrum of a standard NO₂ cell.

縦軸は透過率である。アドレス1とアドレス201がそれぞれ波長 λ_{on} , λ_{off} に対応する。すなわち、アドレス1が448.1 nm アドレス201が446.6 nmである。Wilkersonらによる NO_2 の吸収スペクトル³⁵⁾ と比較すると、正しい2波長が得られていることがわかる。ここで用いた校正セルは NO_2 7 Torr + N_2 750 Torr, セル長10cm のものである。

次に10pps で波長切替装置を動作させた場合の波長の再現性を測定するために、レーザー光を1 mの分光器に入射させて写真乾板面上に取りつけたフォトダイオードアレイを用いて波長を測定した。Fig. 10 はこれにより記録したスペクトルである。写真では λ_{on} , λ_{off} それぞれ80ショットずつが露光されている。記録されたレーザー光のスペクトルの幅から、波長の1ショットごとのバラツキは0.5 Å以内であることがわかった。この再現性は NO_2 の測定においては十分である。

5.2 システムの動作試験

DIAL システムを測定モードで動作させて2波長のレーザーレーダー信号を測定した例をFig. 11 に示す。測定は鉛直方向で、筑波において行ったものである。この図では λ_{on} , λ_{off} それぞれについて3000回の積算を行ったレーザーレーダー信号 (P_{on} , P_{off}) とその比 P_{on} / P_{off}

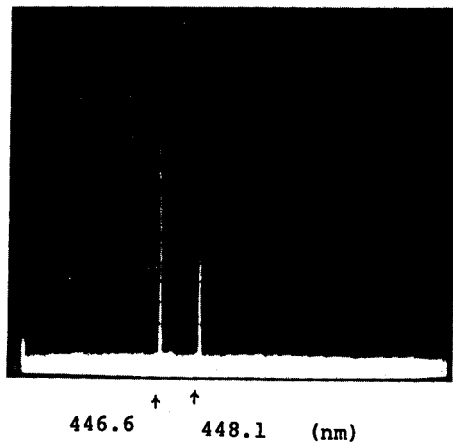


Fig. 10 Spectrum of the dye laser output. (80 pulses for each wavelength).

が表示されている。測定に要した時間は約10分である。 P_{on} / P_{off} の傾きが NO_2 の濃度に対応する。この結果では約1 kmまでの高度で NO_2 濃度は3 ppb 以下である。筑波上空の NO_2 濃度は非常に低いと思われるので、この結果は妥当である。また、逆にこの結果から装置の系統的な誤差の大きさが大きく見積っても3 ppb 程度であることが推定できる。

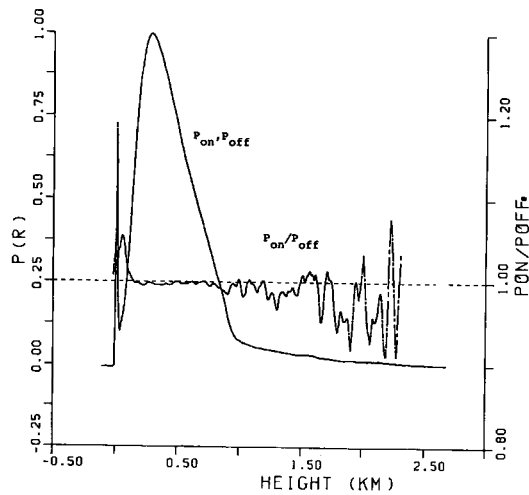


Fig. 11 Example of received lidar signal.

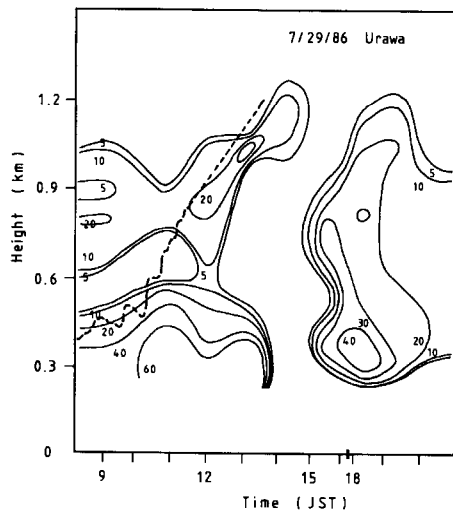


Fig. 12 NO_2 vertical distribution observed by the DIAL. Concentration is indicated in ppb. Broken line shows the mixed layer height obtained from aerosol profile.

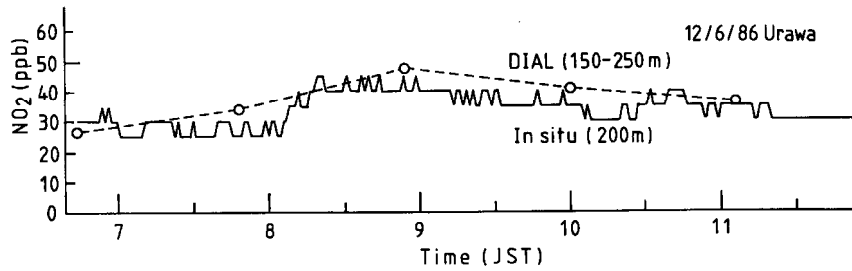


Fig. 13 NO₂ concentration measured by the DIAL and an In-situ method.

6. DIALによる大気界層内のNO₂の観測

Fig. 12は86年夏に埼玉県浦和市において行なったNO₂の鉛直分布の日変化の観測の結果の一例である。Fig. 12ではNO₂の濃度が等高線表示されている。図中の数値はppb単位で表わしたNO₂の濃度である。NO₂濃度測定の高分解能は、高度200mで100m、高度1.2kmにおいて330mである。どの高度においても同じSN比でNO₂濃度が得られるように距離分解能を高度の2/3乗に比例して、上空に行くほど粗くとしている。図中に破線で示したのは、DIALで同時に観測されたエアロゾル分布から推定した混合層の高度である。混合層の構造とNO₂の分布の間に相関が見られる。

Fig. 13はDIALによるNO₂の測定とNO_x計による測定を比較した例である。NO_x計による測定では、大型のカイツーンを用いて上空の大気をテフロンチューブで地上まで引込む方法を用いた。Fig. 13の例では200mの高度におけるNO₂濃度が測定されている。一方、DIALにより測定されたNO₂濃度は150mから250mまでの平均値である。両者の測定結果は良く一致している。

今後、大気境界層の構造とNO₂の分布の関係、NO₂の移流などを対象に観測を続ける計画である。

7. おわりに

本文ではNO₂測定用DIALシステムの設計と製作について報告し測定結果の一例を示した。測定実験により、環境濃度のNO₂が十分な精

度で測定できることが示された。DIALは上空のNO₂とエアロゾルの分布を地上から連続的に観測できるため、大気汚染の研究あるいは監視において非常に有力な手段となると期待される。

参考文献

- 1) R.M. Schotland: Proc. 3rd Symp. Remote Sensing of the Environment, Univ. of Michigan, Ann Arbor (1964) 215.
- 2) R.M. Schotland: Proc. 4th Symp. Remote Sensing of the Environment, Univ. of Michigan, Ann Arbor (1966) 273.
- 3) T. Igarashi: Proc. 5th Conf. Laser Radar Studies of the Atmosphere, Williamsburg (1973) 57.
- 4) H. Inomata and T. Igarashi: Jpn. J. Appl. Phys. **14** (1975) 1751.
- 5) K.W. Rothe, U. Brinkmann and H. Walther: Appl. Phys. **3** (1974) 115.
- 6) K.W. Rothe, U. Brinkmann and H. Walther: Appl. Phys. **4** (1974) 181.
- 7) W.B. Grant, R.D. Hake, Jr., E.M. Liston, R.C. Robbins and E.K. Proctor, Jr.: Appl. Phys. Lett. **24** (1974) 550.
- 8) W.B. Grant and R.D. Hake, Jr.: J. Appl. Phys. **46** (1975) 3019.
- 9) J.M. Hoell, W.R. Wade and R.T. Thompson: Int. Conf. Environmental Sensing and Assessment, Las Vegas, 1975, Paper 10-6.
- 10) E.R. Murray, J.E. van der laan and J.G. Hawley: Appl. Opt. **15** (1976) 3140.
- 11) E.R. Murray, R.D. Hake, J.E. van der Laan and J.G. Hawley: Appl. Phys. Lett. **28** (1976) 542.
- 12) E.V. Browell, T.D. Wilkerson and T.J. McIlrath: Appl. Opt. **18** (1979) 3474.
- 13) R.S. Adrain, D.J. Brassington, S. Sutton and R.H. Valey: Opt. and Quantum Electron. **11** (1979) 60.
- 14) K. Asai, T. Itabe and T. Igarashi: Appl. Phys. Lett. **35** (1979) 60.
- 15) 杉本伸夫, 竹内延夫, 奥田典夫: 応用物理 **50** (1981) 923.

- 16) J.G. Hawley: *Laser Focus*, March (1981) 60.
- 17) K. Fredriksson, B. Galle, K. Nystrom, and S. Svanberg: *Appl. Opt.* **20** (1981) 4181.
- 18) E.V. Browell, A.F. Carter, S.T. Shipley, R.J. Allen, C.F. Butler, M.N. Mayo, J.H. Siviter, Jr., and W.M. Hall: *Appl. Opt.* **22** (1983) 522.
- 19) A.-L. Egeback, K.A. Fredriksson, and H.M. Hertz: *Appl. Opt.* **23** (1984) 722.
- 20) K.A. Fredriksson and H.H. Hertz: *Appl. Opt.* **23** (1984) 1403.
- 21) K.A. Fredriksson: *Appl. Opt.* **24** (1985) 3297.
- 22) B.W. Jolliffe, R.C. Felton, N.R.W. Swann and P.T. Woods: *Proc. 12th Int. Laser Radar Conf, Aix-en-Provence* (1984) 267.
- 23) A. Marzorati, W. Corio, E. Zanzottera: *Proc. 12th Int. Laser Radar Conf. Aix-en-Provence* (1984) 259.
- 24) W. Staehr, W. Lahmann, and C. Weitkamp: *Appl. Opt.* **24** (1985) 1950.
- 24) C. Weitkamp, H.J. Heinrich, I. Eck, and W. Michaelis: *Proc. 12th Int. Laser Radar Conf. Aix-en-Provence* (1984) 303.
- 26) H.J. Heinrich, C. Weitkamp, R. Baumgart, H.O. Boie, S. Kohler, and W. Michaelis: *Proc. 12th Int. Laser Radar Conf, Aix-en-Provence* (1984) 287.
- 27) R.M. Schotland: *J. Appl. Meteor.* **13** (1974) 71.
- 28) 杉本 典夫, 竹内 延夫: *国立公害研究所研究報告* **77** (1985) 101.
- 29) N. Sugimoto, I. Matsui, H. Shimizu, and N. Takeuchi: *Proc. 1st Int. DIAL Data Collection and Analysis Workshop, Virginia Beach* (1985).
- 30) N. Menyuk and D.K. Killinger: *Opt. Lett.* **6** (1981) 301.
- 31) N. Menyuk and D.K. Killinger: *Appl. Opt.* **22** (1983) 2690.
- 32) 清水 浩, 竹内延夫, 笹野泰弘, 杉本伸夫, 松井一郎, 奥田典夫: *国立公害研究所研究報告* **34** (1982) 61.
- 33) H. Shimizu, Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, I. Matusi, and N. Takeuchi: *Appl. Opt.* **24** (1985) 617.
- 34) T.D. Wilkerson, B. Ercoli, and F.S. Tomkins: *University of Maryland Technical Note BN-748* (1974).