

## 混合層高度連続観測用簡易型レーザーレーダの製作

正員 松井 一郎<sup>†</sup>      非会員 笹野 泰弘<sup>†</sup>  
正員 清水 浩<sup>†</sup>      正員 竹内 延夫<sup>†</sup>

### A Compact Laser Radar for Routine Monitoring of Mixed Layer Heights

Ichiro MATSUI<sup>†</sup>, Member, Yasuhiro SASANO<sup>†</sup>, Nonmember,  
Hiroshi SHIMIZU<sup>†</sup> and Nobuo TAKEUCHI<sup>†</sup>, Members

あらまし 混合層高度の連続測定を目的とする簡易型レーザーレーダの製作を行った。この装置の特徴は、測定対象を混合層高度のみに限定することにより、装置の構造を簡略化し、更に無人運転による連続測定を可能にしたことである。

本論文では、この装置の製作に当たっての検討事項、製作した装置の構成を示し、性能評価および連続測定により得られた結果について述べる。

連続測定実験の結果、日中に発達する混合層高度の時間変化を明瞭にとらえることができた。

#### 1. ま え が き

レーザーレーダを用いた気象学や大気汚染<sup>(1)</sup>の研究は、以前より行われてきた。これらの研究の中で、大気中のエアロゾル（浮遊粒子状物質）分布をもとにした混合層高度の測定が、十分実用的であることが示された<sup>(2)</sup>。一般に、上空に安定層があるとき、地上からの汚染質の拡散は、安定層により抑制される。このため、安定層より下層は、上層に比べてエアロゾル濃度が高くなっている。いわゆる混合層高度の高さは、この安定層の高さと考えることができる。レーザーレーダを用いると、この安定層以下すなわち混合層内のエアロゾルの高濃度を検出することにより、混合層高度の決定を行うことができる。

従来、大気汚染などに関連して混合層高度の測定がなされる場合には、通常、低層ゾンデ、カイツーンなどにより、気温の鉛直分布を求め、気温逆転層（安定層）の高度をもって混合層の高度とみなしてきた。しかし、これらの方法では、時間的に連続した測定は困難であり、ルーチン的な測定には適さない。これに対して、レーザーレーダによる遠隔計測では、エアロゾル

濃度の鉛直分布をとらえることから、混合層の高度を直接的に求めることが可能である。また、時間的にも連続して測定可能であることから、その意義は大きい。

しかしながら従来、研究用として開発されてきたレーザーレーダ<sup>(3),(4)</sup>は、1台で各種の測定を行うことを目的として製作されているため非常に複雑な構成であり、高価でもあった。また、操作、保守の容易さ、動作の安定性、無人観測の機能などの面で十分とはいえない。そこで、混合層高度の連続測定を目的とする実用的なレーザーレーダ装置の製作を行った。

この装置の特徴は、測定対象を混合層高度のみに限定することにより、装置の構成を簡略化し、更に無人運転による連続測定を可能にしたことである。

本論文では、この装置の製作に当たっての検討事項、製作した装置の構成を示し、性能評価および連続測定により得られた結果について述べる。

#### 2. 製作方針

混合層高度の連続測定を目的とした実用機は、次の条件を満たすことが必要である。

- (1) 測定対象を混合層高度に限定する。
- (2) 混合層高度の時間変化を測定できる。
- (3) 全天候型とし、長時間に亘り無人運転ができる。
- (4) 測定した混合層高度をリアルタイムで表示でき

<sup>†</sup>国立公害研究所，茨城県

The National Institute for Environmental Studies,  
Ibaraki-ken, 305 Japan

る。

- (5) コンパクトにする。
- (6) 操作を容易にする。
- (7) 装置の価格を安価にする。

これら条件を満たすために、次のような設計を行った。

(1) レーザ発振部と受光望遠鏡を送受光部として一体化し、一つの箱に収めた。測定方向が鉛直方向に固定されたことにより、これまでのレーザーレーダの構成上で、複雑な要素の一つであった架台掃引装置が不要となった。

(2) レーザ送光部と受光望遠鏡の入射窓を防水型とした。これにより、降雨に際して装置を雨より防護する作業が不要となった。

(3) レーザレーダ装置全体を、1台のコンテナに収納した。これにより、観測地点を容易に移動することができる。

(4) レーザ発振器に安価で、動作の安定なルビーレーザを使用した。

(5) 信号処理装置にマイクロコンピュータを使用した。混合層高度の測定には、高速なデータ処理が要求されないため、通常ミニコンピュータに比べて、演算速度の遅いマイクロコンピュータでも十分使用できる。

以上の項目を満たした設計を行った結果、装置全体の価格は、従来のレーザーレーダに比べて約1/3程度にすることが可能となった。

### 3. 装置の構成

先に述べた設計方針に基づき、次のような装置を製作した。装置の概要を図1に示す。また基本的な性能を表1に示す。装置全体は、縦1.9m、横4m、高さ2.5mのコンテナに収納されている。コンテナ内は、エアコンにより空調されている。ルビーレーザは1分1パルスの繰返し発振を行い、パルス幅は約20ns、出力エネルギーは、1J/pulseである。レーザからのパルス光は、光軸調整用ミラーで鉛直上方へ向け、送光窓を通過して大気中に送出される。送光窓は、レーザ光の減衰損失を最小とするために、レーザ光に対してブリュースタ角とした。エコー信号の受信には、直径30cmのプラスチック製フレネルレンズ型屈折望遠鏡を使用した。

受信された信号光は、視野絞りと、1nmのバンド幅の干渉フィルタを通して、検出器に集める。検出器

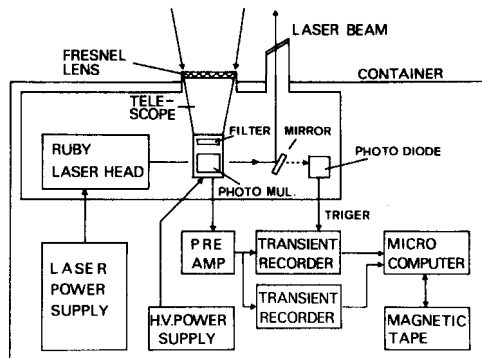


図1 簡易型レーザーレーダ装置のブロック図  
Fig.1 Block diagram of the compact laser radar.

表1 簡易型レーザーレーダ装置の性能の概要

レ		ー	ザ
レ	ー	媒	質
波	長		ルビー
出	力	エ	ネル
パ	ル	ス	幅
繰	返	し	
			1 ppm
望		遠	
鏡			
型	式		フレネルレンズ型屈折望遠鏡
有	効		30 cm
直	径		80 cm
焦	点		
距	離		
信		号	
方		式	
			トランジェントレコーダによるデジタル方式
最	小	サ	ンプ
リ	ン	グ	タイ
ム			50 ns/word
分	解		10 bits
能			
演	算	装	置
			SORD.M-343

には、RCA社製8852型光電子増倍管(以下PMTと略す)を使用している。PMTの出力は、PAR社製115型広帯域増幅器で増幅したのち、オートニクス社製S-121型トランジェントレコーダで高速A/D変換する。このトランジェントレコーダの最小サンプリングタイムは50ns/word、精度は10bitsである。トランジェントレコーダに蓄えられたデータは直ちにソード社製M-343型マイクロコンピュータに送る。M-343は、リアルタイムで混合層高度の解析を行うと同時に、データを磁気テープに蓄える。

### 4. 観測・解析ソフトウェア

デジタル処理を行うレーザーレーダにとって、受信した信号を解析するソフトウェアは、重要な要素の一つ

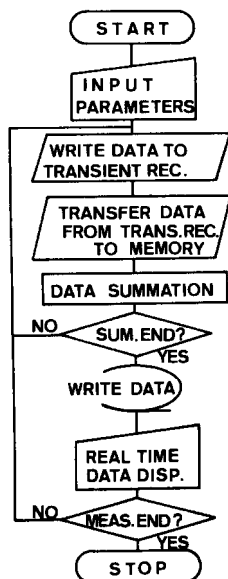


図2 データ処理プログラムのフローチャート  
Fig.2 Flow chart of the data processing system.

である。ここで用いられるソフトウェアは2種類ある。一つはデータ収集のためのもので、もう一つは解析処理のためのものである。いずれのプログラムも言語は、BASICインタプリタを使用した。データ処理プログラムのフローチャートを図2に示す。

データ処理プログラムは、トランジェントレコーダの制御、トランジェントレコーダが記録したデータの読み込み、データの積算処理、磁気テープへのデータの書き込みを行う。解析処理プログラムは、測定データをもとに、混合層高度の決定に必要な各種演算を行う。求められた混合層高度は、プリンター上に表示される。なお、混合層高度の測定原理および、解析方法についての詳細はSasanoら<sup>(5)</sup>を参照されたい。

### 5. 動作試験

製作した装置の動作特性の検討を、(1) 測定感度、(2)  $Y(R)$  関数、(3) A/D変換器のダイナミックレンジ拡大、(4) 連続測定実験について行った。

#### 5.1 測定感度評価

レーザーレーダの測定感度を評価するために、理論的な  $S/N$  式と、装置の動作試験から得られた  $S/N$  式との比較を行った。

理論的な  $S/N$  式はレーザーレーダ方程式<sup>(3)</sup> を使用して次のように求められる。

$$n(R) = n_0 L K \beta T^2(R) A_r Y(R) \eta / R^2 \quad (1)$$

$$S/N = \sqrt{M} n(R) / \sqrt{\mu(n(R) + 2n_b)} \quad (2)$$

$$\alpha = 3.91/V \quad (3)$$

$$\beta = \alpha/100 \quad (4)$$

$$T(R) = \exp[-\alpha R] \quad (5)$$

ここで、 $n(R)$  は  $R$  の距離から散乱された信号光により照射される PMT の光電面から飛出す光電子の数、 $n_0$  はレーザーパルス当たりの光子数、 $L$  は距離分解能、 $K$  は光学システムの全効率、 $\beta$  はミーム体積後方散乱係数、 $T$  はレーザービームの大気中での透過率、 $A_r$  は望遠鏡の有効面積、 $Y(R)$  は送信ビームと望遠鏡の受信視野との重なりを表す関数、 $\eta$  は PMT の量子効率、 $M$  は測定時間内に発射したレーザーパルスの数、 $n_b$  は PMT

表2  $S/N$  の計算に用いたパラメータ

記号	定義	値
$n_0$	光子数	$1.75 \times 10^{29}$ photons / pulse
$L$	距離分解能	7.5 m
$K$	光学系の効率	0.133
$A_r$	望遠鏡の有効面積	$0.07 \text{ m}^2$
$\eta$	光電子増倍管の量子効率	0.3 %
$n_b$	背景光の量	昼 417 夜 0 electrons/gate time
$M$	測定積算数	5

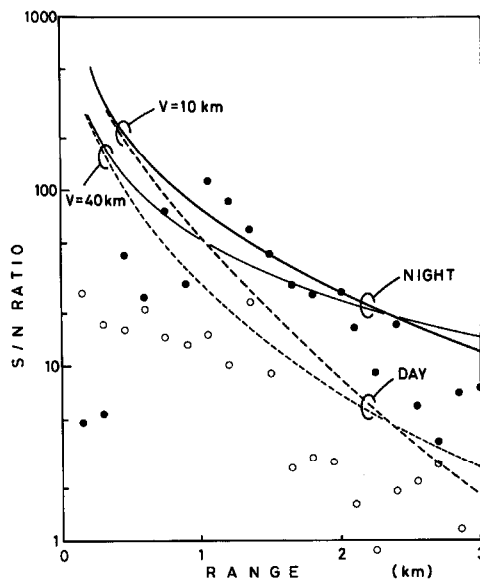


図3  $S/N$  の理論値と実験値：○昼；●夜  
Fig.3 Measured and calculated  $S/N$  of the system：○ day；● night.

から放出される背景光による雑音電子数である。本装置におけるパラメータの値を表2に示す。また、体積後方散乱係数 $\beta$ と消散係数 $\alpha$ については、(3)式および(4)式より視程 $V$  (km)の関数として求めた。レーザービームの大気中での透過率 $T$ は(5)式より求めた。 $S/N$ はこれらの値を(1)および(2)式に代入することにより求められる。理論値は $V$ が10 kmと40 kmについて計算した。実験値は高度方向に75 m間の信号の平均値と分散の平方根の比より求めた。図3に $S/N$ の理論値と実験値を示す。理論値と実験値の間には、良い一致が見られる。日中の $S/N$ の実験値が理論値より若干、低くなっている原因は、エアロゾル分布が高度方向に対して一様に分布していないためと考えられる。

5.2  $Y(R)$  関数

レーザーレーダのレーザー送信光と受信光学系の視野は、ある距離より遠方では完全に重なり、近傍では重なりが不十分である。この近距離のレーザーレーダデータを正しく解釈するためには、補正をしなければならない。この補正係数は、幾何光学的効率の補正関数と呼ばれ、通常 $Y(R)$ で表されている(1)式)。

$Y(R)$ の理論値を、レーザー光の拡がり角、受光望遠鏡の視野角、およびレーザー光と受光望遠鏡の間隔より求めた<sup>(6)</sup>。さらに、実験値より $Y(R)$ の値を求めた<sup>(7)</sup>。実験値はエアロゾル濃度が十分均一となっている日中のデータを用いた。図4に、 $Y(R)$ の理論値と実験値を示す。両者は、良く一致しており、装置の送光と受光の光軸が十分に平行になっていることがわかる。また、この補正により、地上7.5 mの低高度からの測定が可能となる。

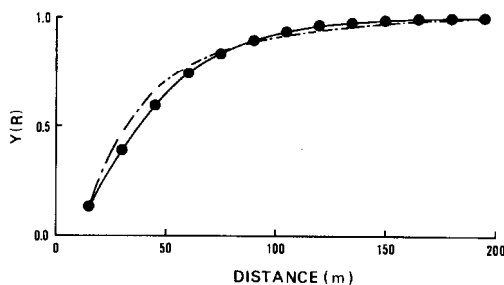


図4  $Y(R)$ の理論値と実験値  
Fig.4 Measured and calculated  $Y(R)$  of the system.

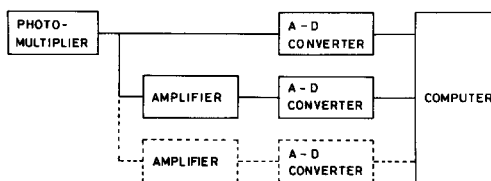


図5 複数のA/D変換器をもちいる方法の概念図  
Fig.5 Schematic diagram of the method which uses multiple A/D converters.

5.3 A/D変換器のダイナミックレンジ拡大

レーザーレーダ信号の測定には、非常に大きなダイナミックレンジが必要である。しかし、通常使用されているトランジェントレコーダのA/D変換器は、分解能に制約がある。このため、A/D変換器の量子化誤差の影響により、測定精度に誤差を生じさせている。

ダイナミックレンジの拡大法には次のような方法がある。

- (1) LOG変換器を用いてダイナミックレンジの圧

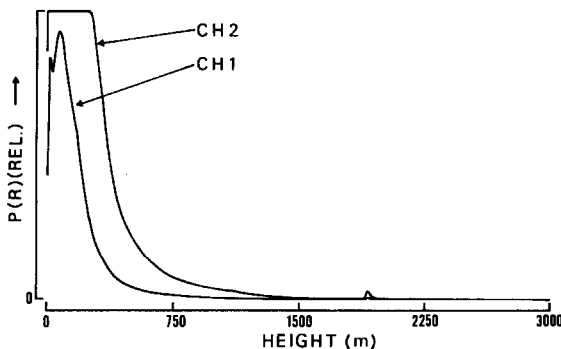


図6 2台のトランジェントレコーダで得られたAスコープ波形例  
Fig.6 A-scope profiles which were obtained by two transient recorders.

縮を行う。

(2) 積算平均により、A/D変換の分解能を改善する<sup>(8)</sup>。

(3) 複数のA/D変換器を用いる<sup>(9)</sup>。

ここで、(1)の方法は、レーザレーダ信号は背景光の上に重畳して得られる。日中は背景光が大きくなるため、LOG変換器に入力される信号も、常に増大されてくる。この結果LOG変換器の特性上、有効なダイナミックレンジが低下し、結局はトランジェントレコーダのA/D変換器に対して量子化誤差となって現れてくる。(2)は、繰返し数の大きいレーザを用いることができれば、積算平均により、A/D変換の分解能を改善できる。しかし、本装置の場合1分1パルスの繰返しのため、この方法を用いることができない。

そこで、(3)の複数のA/D変換器を用いる方法とした。

この方法の概念図を図5に示す。ここでは、2台のトランジェントレコーダを使用した。1台目のトランジェントレコーダは、入力感度を十分大きな値に設定し、入力信号が飽和しない状態でデータをサンプリングする。2台目のトランジェントレコーダは、入力感度を小さい値に設定し、遠方の小さい信号をサンプリングする。2台のサンプリングされたデータは、磁気テープに記録されデータ解析時に合成される。

実際に2台のトランジェントレコーダにより、ダイナミックレンジの拡大を行った実験結果を図6、7に示す。図6は、データのAスコープ表示を行ったものである。1台目のトランジェントレコーダの波形がCH1、2台目がCH2に対応している。CH1は、近距離においてもデータが飽和することなくサンプリングされており、地上付近のエアロゾル構造をとらえている。CH2は、地上300m付近までデータが飽和している。図7(a)は、1台目の入力レンジが大きいトランジェントレコーダのデータ、(b)は、2台目の入力レンジが小さいトランジェントレコーダのデータ、(c)は、2台のデータを合成した結果を、それぞれ距離二乗補正を行い、エアロゾル濃度に変換したものを示している。CH1は、高度1500mより遠方で量子化誤差の影響が現れている。ここで、使用したトランジェントレコーダの入力感度は、1台目に対して、2台目が10倍の感度であった。

この結果より、近距離より遠方までの信号を飽和することなく、十分なダイナミックレンジで測定できることがわかる。

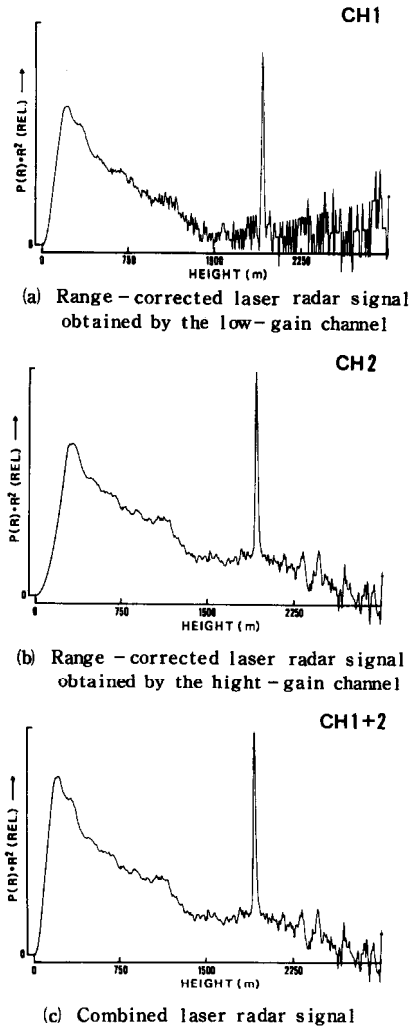


図7 2台のトランジェントレコーダの使用によるダイナミックレンジ拡大の例  
Fig.7 Dynamic range improvement by using two transient recorders.

#### 5.4 連続測定実験

この装置を用いて、混合層高度の連続測定を行った。測定例を図8に示す。図8は、混合層の高度・時間変化を示している。混合層高度は、測定されたエアロゾル濃度の鉛直分布より、局所濃度で正規化した濃度勾配を求め、これを指標として決定される。混合層高度は、一般に、この図に見られるように、午前中に上昇し、午後1~2時頃、最高高度に達することが多い。

これまで、本装置は国立公害研究所構内に設置し、延べ30日間にわたって動作実験を行ってきた。当初、

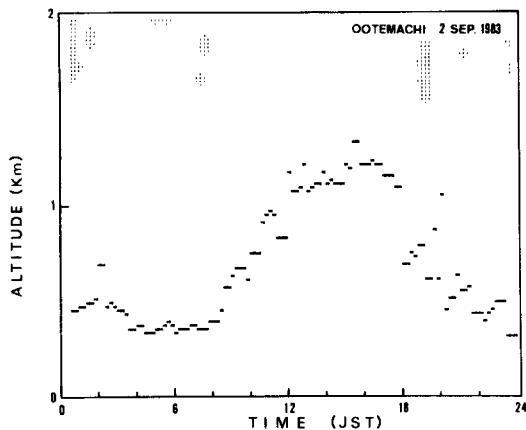


図8 本装置により測定された混合層高度の日変化例  
Fig.8 Diurnal variation of the mixed layer height obtained by the compact laser radar.

装置全体をコンテナに収納せず、送受光部を建物屋上に設置していたため、送受光部が強い日射を受けて高温になるとレーザーの発振が停止するなどの異常が見られた。その後、本論文で述べたように、コンテナに収納し、空調化を図ったことにより、その問題は解決した。

## 6. む す び

本論文では、混合層高度の連続測定を目的とする簡易型レーザーレーダについて、実用機として必要な条件の検討、製作した装置の構成、各種の動作特性試験の結果を述べた。

この装置の特徴は、無人運転による連続測定を可能にしたことである。また、装置の製作費も実用機としては重要な要素である。この装置では、できるだけ安価となるように、レーザー発振器等の選択など各所に工夫を行った。その結果、これまでのレーザーレーダに比べて約1/3の製作費となった。

現在、この装置は東京に移動し、都市域での混合層高度の連続測定を行っている。また、レーザー発振器に使用している光学部品やフラッシュランプの信頼性、寿命についてのデータもあわせて取得している。その結果をもとに、今後長期運転における問題点について検討を行う。

## 文 献

(1) 稲場文男：“ライダー(レーザーレーダ)と気象観測”，気象研究ノート，第116号，pp.349-367 (1973)。

(2) Y. Sasano, H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda：“Diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer revealed by a computerized laser radar”，J. Meteorol. Soc. Jpn., 58, pp.143-148 (1980)。  
 (3) H. Shimizu, Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda：“A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena”，Opt. Quant. Electr., 12, pp.159-167 (1980)。  
 (4) 木村，島田：“大気汚染観測用全自動レーザーレーダシステム”，信学論(C)，J64-C，7，pp.405-412 (昭56-07)。  
 (5) Y. Sasano, A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda：“On the relationship between the aerosol layer height and mixed layer height determined by laser radar and low level radiosonde observation”，J. Meteorol. Soc. Jpn., 60, pp.889-895 (1982)。  
 (6) 笹野，清水，竹内：“レーザーレーダ信号の高精度収集法”，国立公害研究所報告，第39号，pp.27-45 (1983)。  
 (7) Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda：“Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination”，Appl. Opt., 18, pp.3908-3910 (1979)。  
 (8) 清水，飯倉，笹野，竹内：“ディザ信号の重畳によるAD変換器分解能の改善法”，信学論(A)，J64-A，12，pp.963-969 (昭56-12)。  
 (9) 清水，飯倉，笹野，松井：“遠距離測定用レーザーレーダによる高精度測定のための誤差の解析とその低減法”，日本リモートセンシング学会誌，4，3，pp.233-244 (1984-06)。

(昭和60年11月20日受付)

### 松井 一郎



昭53八戸工大・工・電気卒。昭54国立公害研究所入所。以来、大気汚染測定用レーザーレーダ装置の開発に従事。

### 笹野 泰弘



昭50東北大・理・地球物理卒。昭52同修士課程修了。同年、国立公害研究所入所。以来、レーザーレーダを用いた大気汚染、気象の研究に従事。理博。



清水 浩

昭45 東北大・工・応用物理卒。昭50 同博士課程単位取得退学。昭51 国立公害研究所入所。現在に至る。この間、各種のレーザレーダ装置の開発とその応用技術の開発に従事。工博。



竹内 延夫

昭38 東大・理・物理卒。昭43 同大学院博士課程了。同年東大物性研助手。レーザ分光・非線型光学の研究に従事。昭46～50 米国コロンビア大学、カナダNRCに留学。昭50より環境庁国立公害研究所入所。レーザレーダによる大気汚染の遠隔計測の研究に従事。現在、大気環境部大気物理研究室室長。理博。