

研究

ミー散乱レーザーレーダーによる都市域における 低層大気構造の連続観測

松井 一郎

国立公害研究所 〒305 つくば市小野川 16-2

(1989年12月2日受付, 1990年4月13日受理)

Observation of the Lower Atmospheric Structures by Mie Scattering Laser Radar in Urban Area

Ichiro MATSUI

The National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba 305

(Received Dec. 2, 1989; Accepted April 13, 1990)

A laser radar which measures aerosol distribution can detect atmospheric structures such as the surface inversion layer, urban boundary layer and convective mixed layer. These atmospheric structures are very closely related to severe air pollution phenomena and must be investigated. The present paper describes the outline and performance of Mie laser radar system developed for continuous measurements and result of measurement. Measurements of the lower atmospheric structures were carried out from Nov. 29 to Dec. 28, 1988 at the central part of Tokyo. The result of measurement showed typical development of convective mixed layer was found in those days when daily total solar radiation was over 9 MJ/m^2 and daily mean wind speed was lower than 3 m/s . (The wind was measured at the height of 74.6 m above the ground.) The number of the days is 5. Daily maximum mixed layer heights were about 1 km . Distinct urban boundary layers were found in 11 nights when daily mean wind was less than 3 m/s . The height of the urban boundary layers were about 200 m .

1. はじめに

遠隔計測技術の一つであるレーザーレーダーの環境計測への応用は、レーザー発振の成功直後より多くの研究グループにより精力的に行われてきた¹⁾。これらの研究のなかで、大気中に浮遊する粉塵(エアロゾル)からのミー散乱を利用したレーザーレーダー観測が、地表面から高度 1000 m 付近までのエアロゾル濃度分布をトレーサーとして大気境界層の構造を捉えるのに有効であり、気象学や大気汚染研究にとって有用であることが示されてきた。とくに、地上付近から排出される汚染質の拡散・移流などの公害問題に関わる大気現象の解明を行ううえで、ミー散乱レーザーレーダーは有用な手段として開発研究が行われてきた²⁾。

近年、大気汚染は、都市域で冬期に発生する二酸化窒

素(NO_2)の高濃度汚染に改善の傾向が見られず問題化している³⁾。原因の一つとして、夜間に発生する都市域特有の都市境界層が NO_2 の高濃度汚染に関係していることが明らかになってきている⁴⁾。都市境界層とは、都市域の建造物による機械的な混合や都市の排熱による熱的な影響で夜間においても混合された大気状態が形成されている層であり、都市特有の現象である。

本研究では、ミー散乱レーザーレーダー(以下、レーザーレーダー)により、都市域の低層大気構造を構成する日中の混合層および夜間の都市境界層に関して各種気象条件における形成の有無および鉛直構造の日変化について観測を行った。レーザーレーダーによる測定は、通常の気象観測では得ることの困難な上空の情報を時間的に連続して、細かい高度分解能で取得することができる。この特徴を用いて、都市域の高濃度大気汚染の解明

に重要な要因の一つである大気構造の連続観測を 1988 年 12 月に 1 カ月間にわたり東京都千代田区大手町の気象庁構内で行った。

本論文では、低層大気構造の観測に使用したレーザーレーダー装置の概要を述べるとともに、都市域における昼夜の低層大気構造の出現と気象条件との関係に着目した解析結果を報告する。現在、東京における高濃度大気汚染発生予測に使用されている低層大気構造の情報は、都心より 50 km 離れた高層気象台 (館野) が毎日午前 9 時と午後 9 時に行われる高層ゾンドの気温分布の観測結果が用いられている。しかし、館野は地理的に郊外であり直接的な利用は困難であるため、低層大気の安定度の指標として用いられるにすぎない。

レーザーレーダー観測により連続的に低層大気構造の観測を行い、気象条件との関連を明らかにすることは、今後の都市域での高濃度大気汚染現象の現象解明および予測を行う上で貴重な情報となる。

2. レーザーレーダーの原理・装置の概要

2.1 レーザーレーダーの原理

ミー散乱レーザーレーダーでは、パルス状のレーザー光を大気中に送信し、大気中を浮遊するエアロゾル (浮遊粒子状物質) より、後方に散乱されてくる光を受信望遠鏡により捉え、パルス発射後の時間応答を記録する。光を送信してから戻ってくるまでの時間から対象までの距離を、受信信号強度よりエアロゾル濃度を求めることができる。ミー散乱は、光の波長と同じ程度の大きさの粒子による散乱の寄与が大きい。散乱光の波長は入射光と同じである。

距離 R における受信信号強度 P は、レーザーレーダー方程式⁵⁾ (1) 式により求めることができる。

$$P(R) = KP_0\beta(R)T(R)^2Y(R)/R^2 + P_B \quad (1)$$

$$T(R) = \exp\left[-\int_0^R \alpha(r) dr\right] \quad (2)$$

ここで、 K はシステムの定数、 P_0 は送信レーザー出力、 β は後方散乱係数、 $T(R)$ は R の地点までの光の透過率、 $Y(R)$ は送信ビームと受信望遠鏡の受光視野との重なりを表す係数、 P_B は背景光雑音パワー、 α は光の消散係数である。

レーザーレーダーの受信信号から (1) 式を変形した (3) 式を用いて後方散乱係数 β に比例する量 $KP_0\beta(R)$ を求めた。

$$KP_0\beta(R) = Y(R)\{P(R) - P_B\}R^2/T(R) \quad (3)$$

以下では、こうして求めた $KP_0\beta(R)$ を相対的なエアロ

ゾル濃度 (以下、エアロゾル濃度 $C(R)$) と呼ぶことにする。ここで $T(R)$ は 1 とした。また P_B は十分遠方のレーザーレーダー信号により求めた。 $Y(R)$ は Sasano ら⁶⁾ の方法により実験的に決めた。 $\beta(R)$ はミー散乱理論によればエアロゾルの粒径分布を重みとして、個々のエアロゾル粒子の後方散乱断面積を粒径で積分した量に等しい。したがって、粒径分布の形、屈折率が空間的に不変とすれば、 $\beta(R)$ はエアロゾルの総数あるいは重量濃度に比例する。

2.2 装置の概要

観測に用いたレーザーレーダーの構成図を Fig. 1 に、おもな装置の仕様を Table 1 に示す。レーザー発振器には、YAG レーザーを使用した。波長は 532 nm

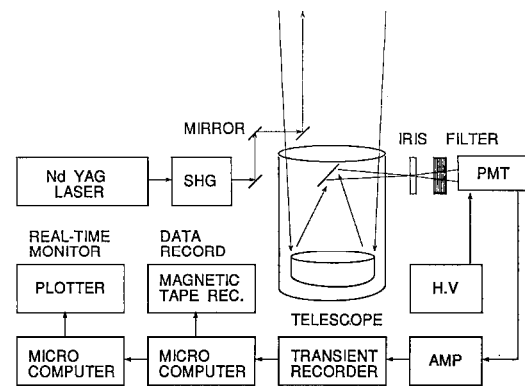


Fig. 1 Schematic diagram of the laser radar system.

Table 1 Specification of laser radar.

Laser	
Material	Nd : YAG + SHG
Wavelength	532 nm
Output energy	50 mJ/pulse
Repetition rate	10 Hz
Receiving telescope	
Type	Newtonian
Diameter	500 mm
Focallength	1.2 m
Photomultiplier tube	
Type	(Hamamatsu R 329)
Transient recorder	
Type	(Autnics S 121)
Min. sample	50 ns/word
Accuracy	10 bits
Data processor	
Computer	(SORD M 343)
MT	(SORD MTU-80)

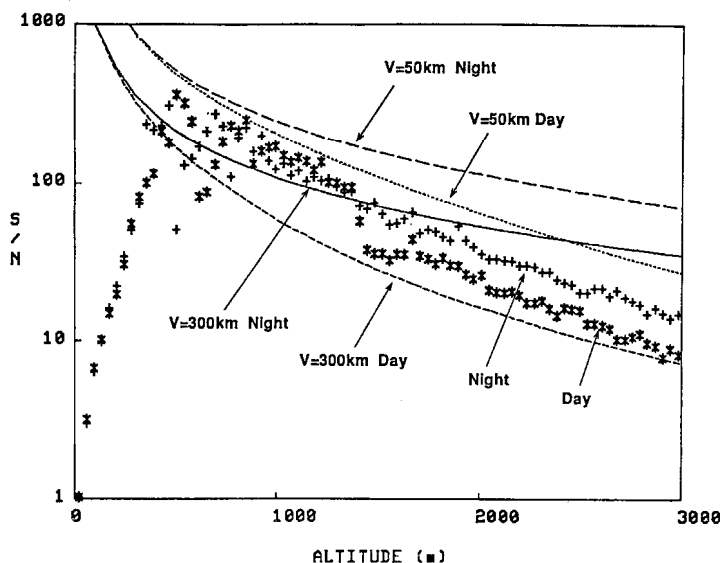


Fig. 2 Comparison of signal to noise ratios (S/N) estimated from the measurement data and from theoretical calculation.

出力は 50 mJ/pulse である。受信望遠鏡は、ニュートン型 (口径 500 mm) である。光電子増倍管 (PMT) で受けた信号は、トランジェントレコーダーで変換し磁気テープ (MT) に記録される。同時に、リアルタイムでの出力も行っている。トランジェントレコーダーは最小サンプリング時間 50 ns/word (空間分解能 7.5 m/word に相当)、分解能 10 bits/word である。この装置では、低高度からの測定を目的としているため、送信光を受信望遠鏡の鏡筒と副鏡との中間位置より送信し、送信光と受信望遠鏡の視野を近距離から一致させている。装置全体は、縦 2 m、横 4.3 m、高さ 2.5 m のコンテナに納められてある。

2.3 性能評価

製作した装置の性能を理論的な S/N 比と実測データから得られた S/N 比との比較により検討した。S/N の理論値は、装置の仕様 (Table 1) によって決定される受信信号強度と PMT のショット雑音、および積算回数で求められる。実測データからの S/N の値は、相対的なエアロゾル濃度の高度分布をもとに一定高度区間中のエアロゾル濃度の平均値と標準偏差により求めた。

Fig. 2 に昼・夜の理論値と実験値を示す。理論値は、視程 50 km の場合とほとんどレーリー散乱だけであると仮定した場合の視程 300 km について求めた。実験値は、エアロゾル濃度の高度分布が比較的一様な日を選びだし、積算 600 回のデータから高度区間 45 m における平均値と標準偏差より求めた。

昼・夜とも実験値は、理論値の視程 50 km のミー散乱による散乱が比較的大きい領域から、視程 300 km のレーリー散乱の卓越する領域内に分布している。このことから、装置が所定の性能を有していることが確認できる。実験値が理論値より一部小さい原因は、エアロゾルが大気中では一定に分布していないときに、これが誤差として評価されてしまうためである。

3. 低層大気構造の検出

地上付近の排出源から排出されたエアロゾルは乱流によって上空まで拡散・輸送されるが、大気中に形成された温度逆転のために拡散が抑制されると、エアロゾル濃度の高度分布に顕著な構造が現れる。レーザーレーダーでは、観測されたエアロゾル濃度の高度分布において濃度の急激に減少する高度を求めることにより、低層大気構造内での日中の混合層高度および夜間の都市境界層高度を求めている。

エアロゾル濃度が急激に減少する高度を検出する方法として、Sasano ら⁷⁾ は、レーザーレーダーで観測されたエアロゾル濃度の鉛直勾配に対して、局所的な濃度で正規化した濃度勾配を求め、これが一定の値を越える高度をもってエアロゾル層上端の高度と定義している。高度ごとの濃度で基準化された濃度勾配 (NCG; normalized concentration gradient) は、(4)式により求めることができる。

$$\text{NCG}(R) = - \{ \Delta C_i / \Delta R_i C(R) \} \times 100\% \quad (4)$$

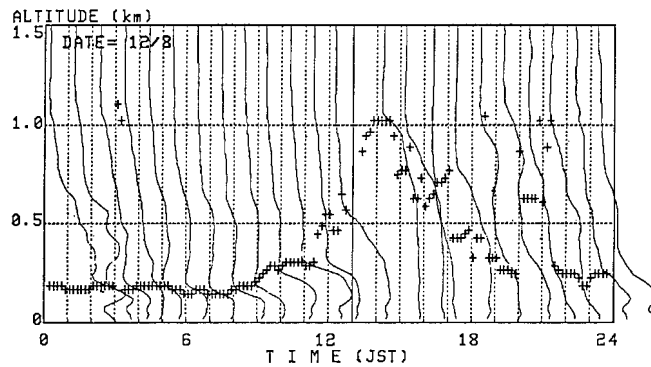


Fig. 3 Vertical distribution of aerosol concentration and the heights of convective mixed layer and urban boundary layer determined from NCG.

ここで、 $\Delta C_i = C(R + \Delta R_i/2) - C(R - \Delta R_i/2)$, ΔR_i は高度区間である。Sasano ら⁷⁾によれば、エアロゾル層上端高度を NCG (R) 値が高度差 40 m 以上にわたって 50%/100 m を越えるとき、低層ゾンデで求めた温度逆転層とよい一致を示している。今回の解析では、都市境界層も含めた大気構造の日変化の様子を捉えるため、NCG (R) 値を 30%/100 m に設定し、やや緩やかな勾配によって求めた。このようにして求められたエアロゾル層上端の高度をもって、以下では、混合層高度および都市境界層高度と定義している。

実測データをもとに、NCG により検出された混合層高度および都市境界層高度とエアロゾル濃度の高度分布の様子を示す。Fig. 3 はエアロゾル濃度の濃度・高度分布を時間軸をずらして表した結果である。毎正時、10 分間の平均値を求めている。+印は(4)式で求められた混合層高度および都市境界層高度を示しており、エアロゾル濃度の急激に減少するいちばん下位高度の点を検出していることがわかる。

4. 低層大気構造の観測結果

4.1 連続観測の結果

観測は 1988 年 11 月 29 日から 12 月 28 日までの、雨天などを除く 28 日間行った。測定データは、磁気テープに記録し、後日、大型計算機によって、先に述べた処理を行った。

12 月中の低層大気構造の観測結果を Fig. 4 に示す。日により低層大気構造を構成している混合層高度および都市境界層高度の日変化の様子に大きな違いがあることがわかる。

4.2 エアロゾル濃度の日変化

いくつかの高度 (高度 100, 200, 500 m) におけるエ

アロゾル濃度の日変化と、NCG により検出された混合層高度および都市境界層高度との関係について調べた。例として、典型的な混合層高度および都市境界層高度の日変化が現れている日、海風の吹込みによる日変化が顕著に現れている日、混合層高度および都市境界層高度の検出できなかった日について示す。

Fig. 5 (a) は、NCG により混合層の日変化が典型的に現れている日 (12 月 8 日) を示す。夜間、エアロゾル濃度は高度 100 m で濃度が高く、高度 200 m と 500 m では、ほぼ同程度の濃度を示している。9 時頃に、高度 200 m での濃度が高度 100 m と同じ濃度となりよく混合されている。その後、混合がさらに進み、13 時には高度 500 m にまで達していることが、エアロゾル濃度からもわかる。この時点で、弱い海風が吹き込んできていることが、気象データより確認されている。17 時頃から、高度 500 m でのエアロゾル濃度に大きな変化が見られずに、高度 200 m 以下でエアロゾル濃度が再び高くなり始めることから、高度 200 m 以下で都市境界層の形成が始まっていることがわかる。

Fig. 5 (b) は海風の吹込みによる影響が顕著に現れている日 (12 月 9 日) を示す。東京では、一般風が弱く晴れた日中に海岸地域特有の気象現象である海風 (日中に海岸方向から吹いてくる風) が起きる。この日は、未明より高度 100 m と 200 m のエアロゾル濃度が高濃度の状態にあり、12 時前に高度 100 m と 200 m のエアロゾル濃度が減少し、高度 500 m のエアロゾル濃度と同濃度に変化している。17 時まで、高度 500 m のエアロゾル濃度と等しい状態が続き、18 時には高度 100 m と 200 m は朝方と同じ高濃度のエアロゾル濃度に急激に変化している。12 時から 17 時までの間の高度 100 m と 200 m のエアロゾルの低濃度は、海風の吹込みにより、

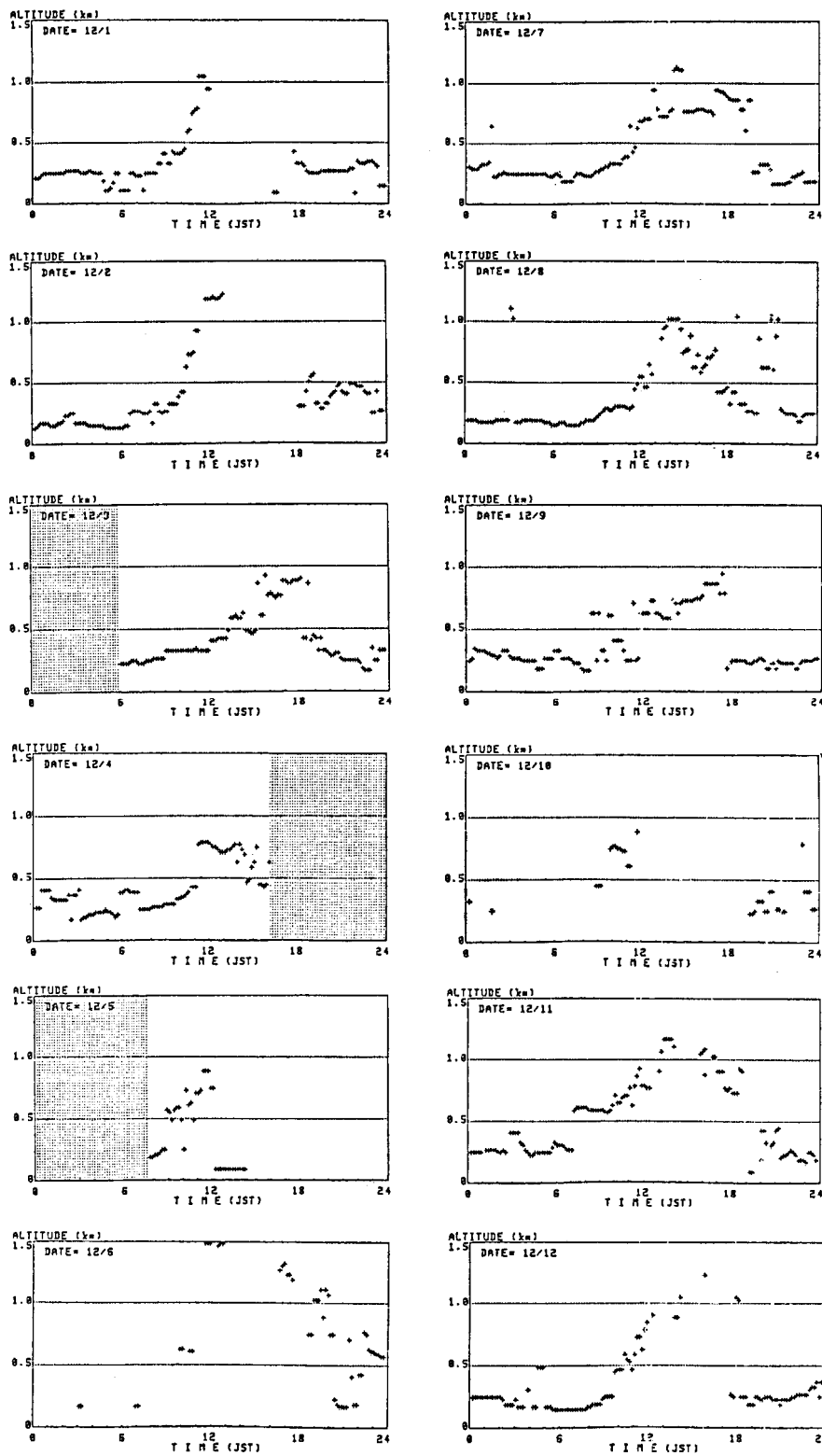
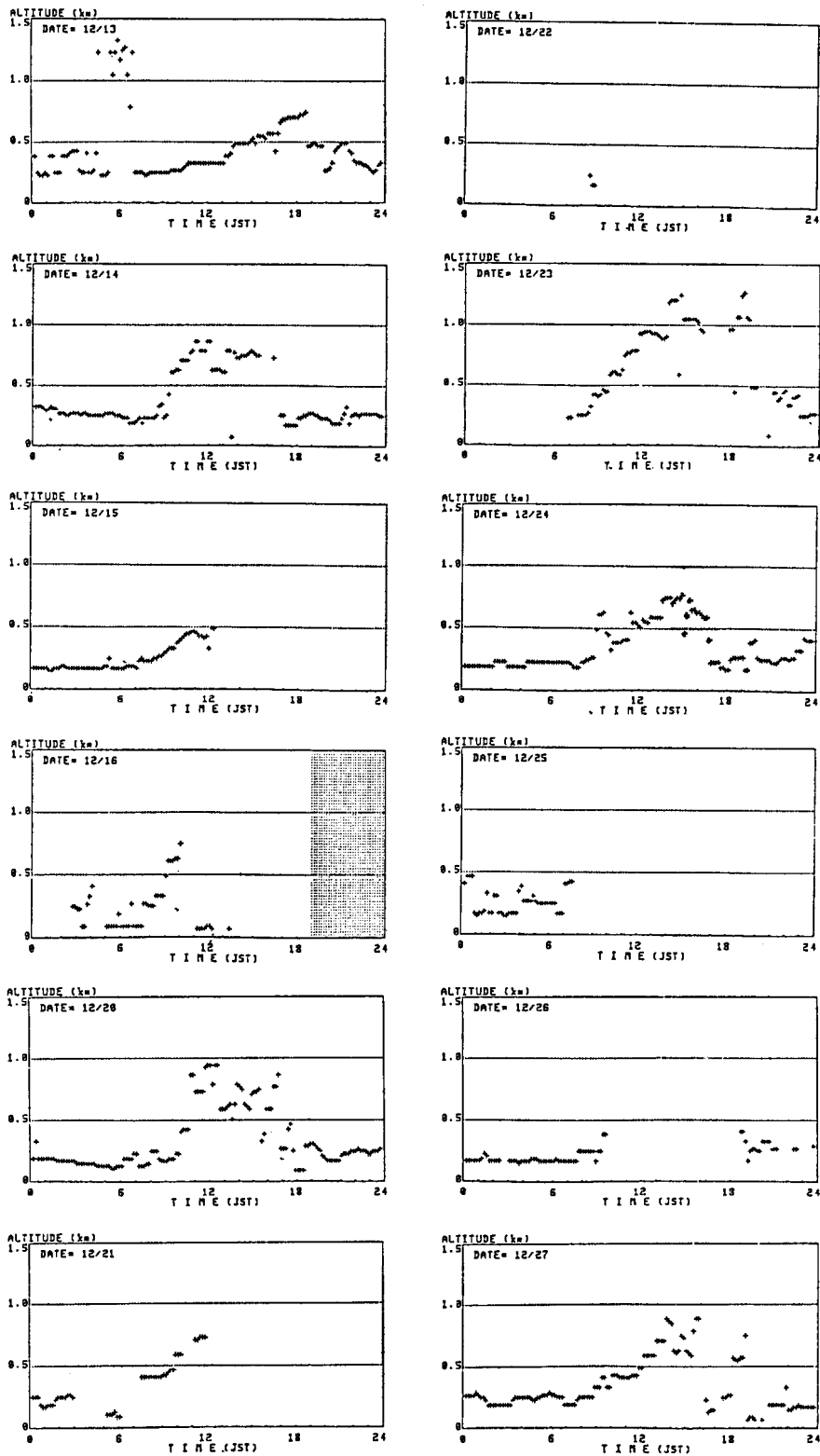


Fig. 4 Variations of convective mixed layer



height and urban boundary layer height.

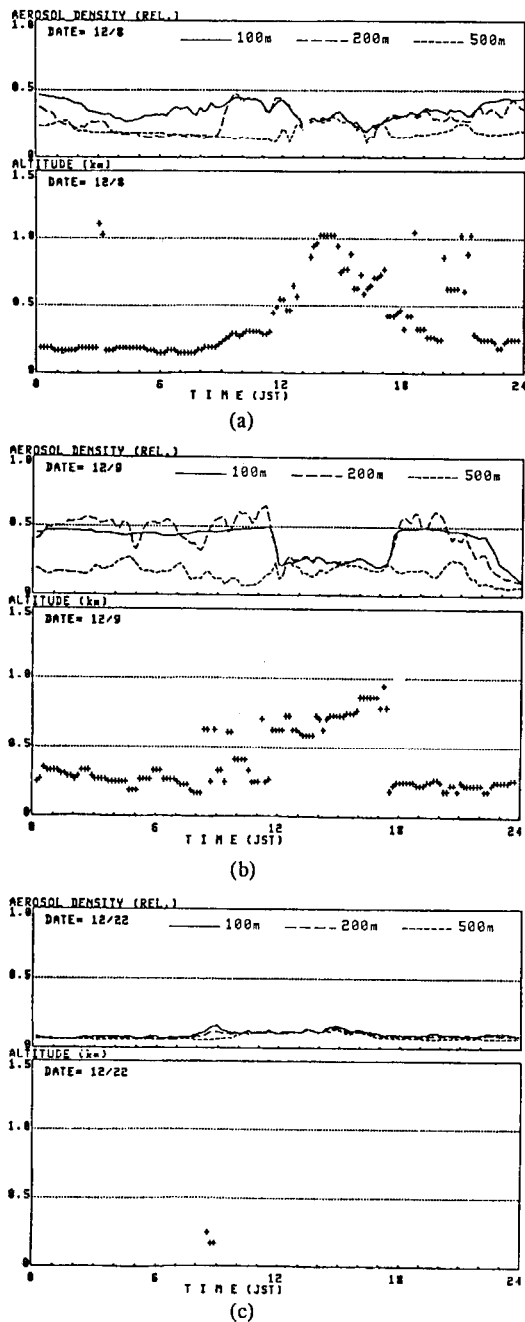


Fig. 5 Variation of aerosol concentration at 100 m, 200 m and 500 m heights, and of convective mixed layer and urban boundary layer heights. (a) Typical case of convective mixed layer development, (b) Typical case of sea breeze penetration, (c) Typical case with strong wind.

停滞していた高濃度エアロゾルに代わってエアロゾル濃度の低い空気塊が入ったために生じていると考えられる。12 時頃に風向が北から南南西に変化していることから、海風が吹き込んでいることがわかる。また、この日の海風が吹き込んでいる層の上端の高度は 700 m 付近であることが、NCG により検出できる。

Fig. 5(c) は大日中 NCG からは混合層高度および都市境界層高度を検出できなかった日 (12 月 22 日) を示している。この日は、日平均風速が 6.2 m/s と非常に風速の強い日である。各高度でのエアロゾル濃度は低く、またほぼ一日中同じ濃度で推移している。

Fig. 5 の結果より、NCG による低層大気構造の検出が適正であることが改めて確認された。また、日の出後、大気混合が進むにつれて混合層上端高度までエアロゾル濃度が高くなり、混合により層内のエアロゾル濃度は、ほぼ均一の濃度となることがわかる。さらに、海風が進入するとエアロゾル濃度に急激に変化が見られ、混合層の発達が抑制されていることが明らかになった。海風の進入は、沿岸に位置する大都市において高濃度大気汚染現象を解明する上で重要な要素であることがわかる。

4.3 低層大気構造の日変化

低層大気構造を構成する混合層高度および都市境界層高度の日変化は、気象条件である風速と日射量に大きく依存していると考えられる。そこで、レーザーレーダー観測期間中の日平均風速と日積算全天日射量との関連性を検討した。期間中の日平均風速と日積算全天日射量を整理した結果を **Table 2** に示す。Table 2 に示した測定値は、レーザーレーダー観測地点と同じ敷地内にある東京管区気象台 (観測点高度地上 74.6 m) の地上気象日原簿 (以下、気象データ) より求めた。とくに、レーザーレーダーにより求めた混合層高度の日変化 (Fig. 4) と、日平均風速と日積算全天日射量を比較すると、風速が弱く日射量の大きい日に混合層がよく発達していることが確かめられる。また、日平均風速の弱い日に夜間の都市境界層が持続して形成されている。

以下では、昼間の日射による大気混合を伴う低層大気構造の変化と夜間の日没後の低層大気構造の変化について、昼間は日射量と平均風速をもとに、夜間は平均風速をもとにそれぞれ検討を行った。

4.3.1 昼間の低層大気構造

晴れた日の日中は、日の出後の日射によって地面が昇温した結果生じる熱対流により、一般に混合層が発達していく。混合層が発達する条件は、風速が弱く、日射量

Table 2 Meteorological conditions.

Daily mean wind speed (m/s)

8.0												
7.0												
6.0						12/25					12/22	
5.0										12/28		
4.0						12/21	12/26			12/17		
3.0		12/13				12/ 3	12/10	12/ 5	12/23	12/18	12/ 1 12/ 6 12/16	
2.0					12/ 9	12/27	12/15 12/19	12/ 4 12/20	12/14 12/24	12/ 7 12/ 8 12/11 12/12	12/ 2	
1.0												
0.0												
	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0
	Total solar radiation (MJ/m ²)											

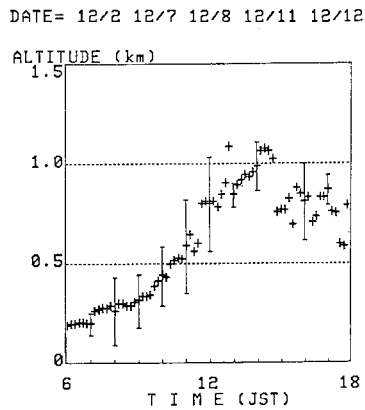


Fig. 6 Diurnal variation of averaged convective mixed height for daytime. The vertical bars show the magnitudes of standard deviation.

の大きい日であることはよく知られており、連続観測結果と気象データの比較からも確かめられる。Table 2 から、そのような混合層がよく発達している日として日積算全天日射量が 9 MJ/m² 以上で、日平均風速が 3 m/s 以下である日に該当する 12/2, 7, 8, 11, 12 日を選び、これらの日の日中の混合層高度データを平均値と標準偏差で表した結果を Fig. 6 に示す。典型的な昼間の混合層高度を示している。朝方、日の出とともに日射により地表面の温度が上昇すると、大気混合が盛んになり、混合層高度が上昇していく。14 時頃に日最大混合層高度

に達しており、12 月の日最大混合層高度が 1000 m 付近であることがわかる。日最大混合層高度に達した後は、大気の混合が弱まり地上付近のエアロゾルが上空まで拡散・輸送されにくくなるために、エアロゾル層の上端の高度は徐々に低下していくものと考えられる。

4.3.2 夜間の低層大気構造

晴れて風の弱い日の夜間は郊外では、地表面の放射冷却が進み、地表面付近で気温が下がり、上空ほど気温が高いという温度逆転の現象が起きる。しかし、都市域では、建物が密集し大量のエネルギーが消費され排出されているために、地表での放射冷却が起きず夜間においても機械的、熱的に混合された状態になっている。このような夜間に混合の起きている状態は、都市域に特有な現象であることから都市境界層と呼ばれている。

都市境界層が形成されていることは、Fig. 2 に示したエアロゾル濃度の高度・時間分布から確認することができる。Fig. 2 において 0 時から 6 時までのエアロゾル濃度の分布は、いずれも地上から高度 200 m 付近までほぼ均一した高い濃度の層が形成されている。この現象は、大気の混合が夜間においても起きていることを示しており、都市境界層であることが確かめられる。

夜間の平均的な都市境界層高度を、日平均風速 3 m/s 以下の日に該当する 12 月 2, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 20, 24, 27 日のデータから求めた平均値と標準偏差で表した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より都市境

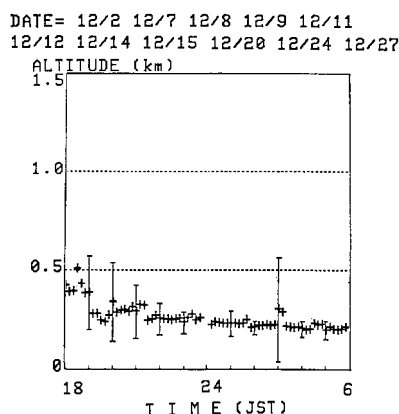


Fig. 7 Variation of averaged urban boundary layer height during night. The vertical bars show the magnitudes of standard deviation.

界層の上端が高度 200 m 付近であること、19 時頃から早朝 7 時頃まで持続していることがあきらかになった。

5. ま と め

本文では、低層大気構造の連続観測を目的としたミー散乱レーザーレーダー装置の概要、性能試験、連続観測結果について述べた。観測結果から、これまでの気象測定器では困難であった、時間的に連続した大気構造の状態を長期間にわたり捉えることが可能であることを示した。観測結果から次のことが結論づけられる。1) 晴れた日の日中には混合層が発達し、日最大混合層高度は約 1000 m である。2) 晴れた日の夜間は都市境界層が形

成され、その高度は約 200 m である。

現在、冬期に都市域で発生する高濃度大気汚染と低層大気構造との関連をレーザーレーダーによって得られた観測結果と大気モニター局での大気汚染濃度測定結果をもとに検討を行っている⁸⁾。

レーザーレーダー観測に際し便宜を図っていただいた気象庁大気汚染予報センターに感謝いたします。

文 献

- 1) T. Kobayashi: "Techniques for laser remote sensing of the environment," *Remote Sens. Rev.*, **3** (1987) 1-56.
- 2) 笹野泰弘: "大気汚染研究におけるレーザーレーダー利用の現状", *レーザー研究*, **17** (1989) 81-90.
- 3) 環境庁大気保全局: 昭和 61 年度一般環境大気測定局測定結果報告 (1987).
- 4) 鶴野伊津志, 若松伸司, 植田洋匡: "夜間の都市境界層と大気汚染質の動態", *大気汚染学会誌*, **23** (1988) 103-114.
- 5) R. T. H. Collis and P. B. Russel: "Lidar measurement of particles and gases," *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Topics in Applied Physics, Vol. 14, ed. E. D. Hinkley (Springer-Verlag, New York, 1976) pp. 76-78.
- 6) Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda: "Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination," *Appl. Opt.*, **18** (1979) 3908-3910.
- 7) Y. Sasano, A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda: "On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser radar and low-level radiosonde observations," *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60** (1982) 889-895.
- 8) 松井一郎, 笹野泰弘: "レーザーレーダーで観測される都市域の夜間低層大気構造と高濃度大気汚染", *環境科学会誌*, 投稿中.