

R-16-'80

計測車レーザーレーダーによる 大気汚染遠隔計測

—— 大気環境部 大気物理研究室 ——

Remote Measurement of Air pollution by a Mobile Laser Rader
Atmospheric Environment Division

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立公害研究所



計測車レーザーレーダーシステム

序

レーザーレーダーを用いて、大気の状態を遠隔計測することは、レーザーの応用として従来から実用化の研究が各所で行われている。

この方法は地上の固定点より発射したレーザー光の反射や吸収によって、任意の方向、任意の距離の上空の大気の状態を時々刻々に計測しようとするもので、もしも理想通りに作業すれば大気汚染の観測手段としては最適の方法である。

当研究所においても計測車搭載型のレーザーレーダーを使用して研究、改良を重ねてきたのでその成果をまとめておきたい。

この研究の成果は、昭和54年8月に完成した国立公害研究所のヤグ・レーザーによる固定式遠隔測定装置の設計・計画に用いられたが、計測車に搭載して測定することも今後も続けて行なわれるはずである。データ処理方法など、さらに研究を要するものが少なくない。

一応の成果が得られたので従来の結果を取りまとめて印刷に付する次第である。関心のある方々からの御批判を得られれば幸とするところである。

国立公害研究所

近 藤 次 郎

目 次

序 (近藤 次郎)

I 遠隔計測による大気汚染物質の研究について (奥田典夫)	1
-------------------------------------	---

II 計測車レーザーレーダーの概要と現状 (竹内延夫)	7
-----------------------------------	---

III. 報 文

1. 大気拡散観測用コンピュータ化車載型レーザーレーダー	17
------------------------------------	----

清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・松戸 修・奥田典夫

2. レーザーレーダー方程式における幾何学的効率のフィールド 測定データに基づく測定	33
---	----

笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫

3. 車載型レーザーレーダー測定用プログラムの開発	41
---------------------------------	----

杉本伸夫・松戸 修・清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・
奥田典夫

4. コンピューターによるレーザーレーダーデータの画像表示法	51
--------------------------------------	----

清水 浩・笹野泰弘・安岡善文・松戸 修・竹内延夫・
奥田典夫

5. レーザーレーダーで観測されたエアロゾル層高度と安定層高 度との対応関係について	69
---	----

笹野泰弘・重松明夫・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫

6. レーザーレーダーによる大気境界層の日変化の観測	85
----------------------------------	----

笹野泰弘・清水 浩・杉本伸夫・松井一郎・竹内延夫・
奥田典夫

CONTENTS

Preface

J. KONDO

I. Outline and significance of the studies	1
M. OKUDA	
II. Outline and Present Status of the Mobile Laser Radar.....	7
N. TAKEUCHI	
III. Original papers	
1. A Mobile Computerized Laser Radar System for Observing Rapidly Varying Meteorological Phenomena	17
H. SHIMIZU, Y. SASANO, N. TAKEUCHI, O. MATSUDO and M. OKUDA	
2. Geometrical Form Factor in the Laser Radar Equation: an Experimental Determination	33
Y. SASANO, H. SHIMIZU, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
3. Software Programs for Measurement by a Computerized Laser Radar System	41
N. SUGIMOTO, O. MATSUDO, H. SHIMIZU, Y. SASANO N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
4. Display Methods of Laser Radar Using a Computer System	51
H. SHIMIZU, Y. SASANO, Y. YASUOKA, O. MATSUDO, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
5. On the Relationship between the Aerosol Layer Height and the Mixed Layer Height as Determined by Laser Radar and Low-Level Radiosonde Observations	69
Y. SASANO, A. SHIGEMATSU, H. SHIMIZU, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	

6. Diurnal Variation of the Atmosphere Planetary Boundary Layer

Observed by a Computer-Controlled Laser Radar 85

Y. SASANO, H. SHIMIZU, N. SUGIMOTO, I. MATSUI,

N. TAKEUCHI and M. OKUDA

I. 遠隔計測による大気汚染物質の研究について

奥 田 典 夫 (大気環境部)

1. レーザーレーダーによる大気汚染研究の意義

大気汚染の遠隔計測法には、レーザーレーダーのほか、大気中の温度変化から逆転層の位置を調べる音波レーダーや雲の動きなどから大気汚染の状況を推定する人工衛星写真などが用いられている。

これらの方法のうち、大気汚染物質を直接的に、また定量的に計測できる方法はレーザーレーダーだけである。レーザーレーダーについて多くの制約があるとはいえ、この優れた特徴を生かすことによってレーザーレーダーは大気汚染の遠隔計測法として最もオーソドックスな、最も有力な方法となることができる。

環境大気中の汚染物質の濃度分布、特に大気汚染の機構を解明するために必要な上空の濃度分布に関するインフォメーションの欠けている現在、大気汚染計測用のレーザーレーダーの実用化は極めて重要な課題である。

大気物理研究室において、最も大気汚染計測に適したレーザーレーダーシステムを開発し、レーザーレーダーによる大気汚染の常時モニタリングを可能にするために、昭和51年度より車載型のミー散乱レーザーレーダーの設計製作を開始し、このレーザーレーダーを用いて排煙の拡散、大気境界層の構造など大気汚染に関する諸現象の研究手法の確立に努力している。

このシステムでは、従来多く使用されたルビーレーザーに比して、レーザーパルスの繰り返し数が多く、パルスの安定したYAGレーザーを用いて測定時間を著しく短縮させている。また、ミニコンによって測定データの実時間処理を行って、複雑に変化する大気汚染現象の観測に瞬時に対応できるようにしている。また車載型であるために、振動その他の困難な条件でも安定に作動するように多くの工夫がなされている。

このレーザーレーダーによって、光化学スモッグ発生時などの大気境界層の複雑な構造を観測することに成功した。また、焼却場の排煙を観測して、排煙の中心の変動、煙の断面など排煙の拡散の様子を詳細に分析した。

車載型の小型レーザーレーダーシステムがほぼ完成した昭和54年度から、地上34mの大気汚染物質実験棟の屋上に設置された大型ミー散乱レーザーレーダーがかどうし始めた。本装置は直径100kmの広域における大気汚染の状況を把握し、複雑な広域大気汚染の解明のための研究手法を確立することを目的としている。

大気環境部では大気汚染現象の機構を解明するために、海陸風に支配される臨海地域の大気汚

染物質の移流拡散、太陽光の光化学反応によって極めて複雑な様相を呈する光化学スモッグの生成、消滅過程、道路周辺の NO_x の変質・拡散など種々のタイプの大気汚染について研究を行っている。その中で、レーザーレーダーの研究グループは上記のレーザーレーダーのほか、 NO_2 測定用のDIALレーザーレーダーや、オゾンその他の汚染物質を測定する赤外線半導体レーザーレーダーを開発中であり、逆転層のような大気境界層の観測、排煙のような発生源からの移流の観測、道路周辺の大気汚染物質の濃度分布の計測など多くの分野で遠隔計測の威力を発揮することが期待されている。

米国においても米国環境保護庁の環境科学研究所はスタンフォード研究所の車載型レーザーレーダー (Mark IX) で、火力発電所の排煙のプロファイルを高度1,000m、風下100kmにわたって見事にとらえている (Uthe et al. 1979)。またセントルイス地域のフィールド研究プロジェクト MISTT 計画では、都市プルームの幅を測定するために航空機と協同して車載型レーザーレーダーを利用している (Wilson, 1978)。機動力をもった車載型レーザーレーダーは速やかに変動する大気汚染現象を調査研究するために欠くことのできないものになりつつある。

本報告書では経常研究で行われた車載型レーザーレーダーによってえられた成果について報告した。この研究の重要性を評価されて、レーザーレーダーの製作費に特別の配慮を頂いたことを感謝したい。

2. 大気汚染物質の光学的特性

レーザーレーダーによる大気汚染物質の濃度測定は主として分子分光光学に基礎をおいている。従って、有力なレーザーレーダーを設計するためには、まず分光光学の知識を十分に活用する必要がある。

(1) 差分吸収法

個々の大気汚染物質を測定するためには、その物質特有の吸収波長を利用した差分吸収法 (DIAL 方式) を用いるのが最も普通である。この方法は分子の微細構造をもった吸収率に注目し、大気中のエアロゾルによって後方散乱されて戻ってきた光のうち、分子によって吸収される波長の光の強度と吸収されない光の強度との差から大気汚染物質の濃度を算出する。一般に、大気中のような複雑な混合物ではいくつかの成分が同一の吸収波長をもつので、差分吸収法に用いる波長は一波長ではなくて、数波長用いることが望ましい。この問題を巧妙に解決したのが相関分光法である。

レーザーレーダーの場合、現在試みられているのは NASA などいくつかの報告がある (Browell et al. 1977)。しかし、測定精度を上げるためには色素レーザーのような波長可変レーザーによって数波長の吸収を同時測定する方式を開発しなければならない。

(2) ミー散乱方式

エアロゾルの測定は粒子によるミー散乱を利用しているの、エアロゾルの化学的成分を同定することはできない。

ミー散乱の垂直および平行な直線偏光成分は近似的に

$$I_{\parallel} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} \left| \sum_{l=1}^{\infty} (-i)^l \left({}^e B_l P_l^{(1)}(\cos \theta) \sin \theta - {}^m B_l \frac{P_l^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta} \right) \right|^2,$$
$$I_{\perp} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} \left| \sum_{l=1}^{\infty} (-i)^l \left({}^e B_l \frac{P_l^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta} - {}^m B_l P_l^{(1)}(\cos \theta) \sin \theta \right) \right|^2$$

で表される。ここで、 ${}^e B_l$, ${}^m B_l$ は屈折率と粒径の関数であり、 Q は入射光と散乱光のなす角である。レーザーレーダーのような後方散乱では、エアロゾルが球形で多重散乱がなければ、えられる散乱光の強度は $I_{\parallel}$ だけになる。

従って、平均粒径を求めるためには、2 波長以上の光を用いるか、もしくは 2 個以上の受光器を用いる必要がある。これらについては、トムスクの大気光学研究所の Zuev らの報告がある。Zuev は inversion method を用いて粒径分布を求めている (Zuev, 1978)。

大気汚染物質の発生源に関する information を直接レーザーレーダーのデータから求めようとするならば、エアロゾルの粒径分布ならびに屈折率に関係するパラメーターの測定を行う方向に装置の改良が必要である。

(3) 長光路方式

大気汚染物質のような分子構造の単純な物質について ppb オーダーの低濃度の測定に分光学的方法を用いる場合、分子の吸光係数の小さなことが弱点となる。ランベルト・ベールの法則から試料に吸収される光の強度は $\epsilon c l$ に関係するので、(但し、 ϵ : 分子吸光係数、 c : 濃度、 l : 光路の長さ) ϵ と c が小さければ、 l を大きく取る以外に方法はない。この原理を用いて、レーザーレーダー以外にレーザーの直進性を利用した遠隔計測として、長光路方式が開発されつつある。この方法の欠点は積分方式であるために、光路全体についての平均濃度が分かるだけで、特に、赤外吸収法は分子吸光係数が小さいので、数 100 m の光路を必要とする (Browell, 1977)。しかし、レーザーレーダーよりもはるかに技術的にやさしいので、道路端の自動車排ガスの測定、都市全体の汚染物質量の測定など、種々の有効な利用法がある。

3. 大気汚染用レーザーレーダーの実用化

レーザーレーダーの実用化のために解決すべき問題は技術的には

- i) レーザーの専門家以外の技術者によって操作できるように、レーザー発振を十分に安定させること。
- ii) フィールドに運搬できるようにシステム全体を十分に振動に耐えるようにすること。
- iii) データをコンピューター処理して、フィールドの現場で直ちに結果を見ることができるよう

うにすることである。

また、経済的には地上の測定局の価格以下にコストを下げることであろう。

レーザーレーダーは地上の測定局に対して、多くの利点をもっている。

i) 広範な地域における大気汚染物質の立体分布図を描くことができる。

ii) 上空の大気汚染物質の常時観測を行うことができる。

iii) 実時間観測であるので、大気汚染物質の立体分布の日変化を測定できる。

すなわち、点の観測から、面、立体の観測へ次元を広げることができる。特に、レーザーレーダー以外の方法では観測できない問題に排煙のプロファイルの決定がある。

本報告書では、第4報の中で焼却場の排煙の断面の例を述べている。

従来、レーザーレーダーは大気汚染予測のために逆転層高度の測定に用いられてきたが、逆転層は気温のこう配の逆転を意味するものであって大気中のエアロゾル層とは必ずしも一致しない。第5報では両者の関係を明らかにし、安定層安定度とエアロゾル層上端の濃度こう配との間に相関があることを見いだした。さらに第6報では大気境界層の構造を研究し、従来の Russel のモデルを修正した新しいモデルを提案した。

大気物理研究室が車載型レーザーレーダーの開発、ならびにそれによる観測について、えられた研究成果は以下のように講演ならびに印刷物として公表されている。

研究発表

(講演)

1. 竹内延夫・安岡善文：国立公害研究所におけるレーザーレーダー。第3回レーザーレーダーシンポジウム, 21, 東京. (51. 1).
2. 清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：ラマン散乱を用いる大気温度の遠隔的測定法の比較検討。第4回レーザーレーダーシンポジウム, 5, 東京. (52. 2).
3. 竹内延夫・清水 浩・安岡善文・植田洋匡・奥田典夫：レーザーレーダーによる風向、風速の3次元測定法の開発。第4回レーザーレーダーシンポジウム, 15, 東京. (52. 2).
4. 清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：レーザーレーダーによる大気状態の総合的測定法。第24回応用物理学関係連合講演会, 27a-C-7, 横浜. (52. 3).
5. Takeuchi, N., H. Shimizu and M. Okuda: Synchronous Lidar Observation of Atmospheric Pollution and Meteorology Parameters at NIES. 8th Int. Laser Radar Conf., 23, Philadelphia. (June 1977).
6. Takeuchi, N., H. Shimizu, H. Ueda, Y. Yasuoka, O. Matsudo and M. Okuda: A Method for the Spatial Distribution Measurement of Wind Velocity by Computer-controlled Lidar, ibid., 43.
7. 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・奥田典夫：大気物理状態の総合的観測のためのレーザーレーダーシステムの開発。第18回大気汚染全国協議会大会, 551, 福岡. (52. 11).
8. 竹内延夫・清水 浩・笹野泰弘・植田洋匡・安岡善文・松戸 修・奥田典夫：コンピュータ制御レーザーレーダーによる風向・風速の空間分布測定法。同上, 552.
9. 清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・松戸 修・安岡善文・植田洋匡・奥田典夫：コンピュータ化レーザーレーダーとその風向・風速測定への応用。第3回リモートセンシングシンポジウム, 東京. (52. 11).
10. 竹内延夫：対流圏探査レーザーレーダー。日本分光学会, 環境科学シンポジウム, 東京. (52. 12).

11. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・村野健太郎・奥田典夫：ミュー散乱レーザーレーダーによる大気境界層の観測。第5回レーザーレーダーシンポジウム，23，筑波研修センター。（53. 2）。
12. 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・松戸 修・奥田典夫：国立公害研究所コンピュータ制御レーザーレーダーシステムについて。同上，25。
13. 清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・松井一郎・松戸 修・奥田典夫：車載型コンピュータ制御レーザーレーダーの開発。気象学会，東京。（53. 5）。
14. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：レーザーレーダーによる大気境界層観測。同上。
15. 清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・植田洋匡・安岡善文・山崎哲夫・松戸 修・奥田典夫：レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向・風速の測定法の開発。気象学会，仙台。（53. 11）。
16. 清水 浩・笹野泰弘・松戸 修・竹内延夫・奥田典夫：レーザーレーダーデータの処理法および表示法。大気汚染学会，628，札幌。（53. 9）。
17. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：レーザーレーダーによる排煙流拡散観測。同上，629。
18. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：レーザーレーダーにおける幾何光学的効率の決定。応用物理学会，4 a P 9，大阪。（53. 4）。
19. 清水 浩・笹野泰弘・平尾豊志・松戸 修・竹内延夫・奥田典夫：レーザーレーダーの実時間データ収集・処理システムの開発。第26回応用物理学関係連合講演会，29p T14，東京。（54. 3）。
20. 山崎哲夫*・笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫・河村 武*（*筑波大）：エアロゾルをトレーサーとしたレーザーレーダーによる風向・風速の測定。気象学会，東京。（54. 5）。
21. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：エアロゾル空間濃度分布スケールについて。同上。
22. Sasano, Y., H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda: Experimental Determination of the Geometrical Form factor in the Laser Radar Equation. 9th Int. Laser Radar Conf., Munich. (July 1979).
23. Shimizu, H., Y. Sasano, Y. Yasuoka, N. Takeuchi and M. Okuda: Improved Display Techniques for Laser Radar Measurements. *ibid*.
24. Murakami, Y., O. Yamashita, M. Yamamoto, M. Nishimura and N. Takeuchi: Pattern Recognition of Observed Aerosols by Laser Radar. *ibid*.
25. Takeuchi, N., H. Shimizu, Y. Sasano, A. Matsudo and M. Okuda: A Computerized Laser Radar System and its Application for Monitoring Stack Plumes. *ibid*.
26. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：大気境界層内のエアロゾル濃度分布の時間・空間変動。気象学会，101，福岡。（54. 10）。
27. 清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・飯倉善和・奥田典夫：レーザーレーダー信号処理におけるダイナミックレンジの拡大法。電子通信学会総合全国大会，東京。（54. 3）。
28. 松井一郎・清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫：逆転層観測用簡易型レーザーレーダーの試作。第20回大気汚染学会，531，神戸。（54. 11）。
29. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：都市域における粒子状物質の鉛直分布——レーザーレーダーによる連続測定。同上，530。
30. 清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・飯倉善和・奥田典夫：レーザーレーダー受信信号測定のダイナミックレンジの拡大法。第6回レーザーレーダー（ライダー）シンポジウム，10，p50，伊豆高原。（54. 11）。
31. 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：レーザーレーダーによる風向・風速の測定——大気境界層内エアロゾル分布をトレーサーとして。同上，23，p64。
32. 笹野泰弘・重松明夫・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫：安定層底部高度とエアロゾル層高度の対応関係について。気象学会，東京。（55. 5）。
33. 総合観測グループ（東北大，防衛大，気象研，国立公害研）：大気エアロゾルの光学的特性の総合的測定（Ⅲ）（Ⅳ）。同上。

(印刷)

1. 寺尾 満・竹内延夫 (1976) : 環境汚染計測——レーザー技術の利用. 計測と制御, 15(1), 151—166.
2. 竹内延夫 (1977) : レーザーを用いた大気汚染物質の遠隔計測. 公害と対策, 13(10), 1050—1059.
3. 竹内延夫 (1979) : 大気汚染観測用車載型レーザーレーダー. レーザー研究, 6(4), 364—376.
4. 「環境科学」特別研究「遠隔計測による環境情報の収集に関する基礎研究」研究班 (1979) : レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測研究報告. 「環境科学」研究報告集, B19—R52—1, pp 93.
 - I 竹内延夫: 研究の概要.
 - II—1 近藤次郎: 大気汚染予測.
 - II—3 内藤正明: 環境遠隔計測の実際的な適用について—大気汚染を中心として.
 - III—1 清水浩・松戸修・笹野泰弘・竹内延夫: 車載型レーザーレーダーシステムの開発.
 - III—2 笹野泰弘・清水浩・竹内延夫: レーザーレーダーによる野外観測.
5. Sasano, Y., H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1979) : Experimental Determination of the Geometrical Form Factor in the Laser Radar Equation. Appl. Optics, 18, 3908—3910.
6. Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980) : A Mobile Computerized Laser Radar System for Observing Rapidly Varying Meteorological Phenomena. Optical and Quantum Electronics, 12, 159—167.
7. レーザーレーダーと赤外計測技術による火山噴煙動態のリモート・センシングの総合研究. 昭和54年度研究報告書 (昭和55年3月),
 - (1) 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎: 車載型ミッドレンジレーザーレーダーの概要. 2—5.
 - (2) 杉本伸夫・清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・松井一郎: 噴煙観測用レーザーレーダー測定プログラムの概要. 6—7.
 - (3) 笹野泰弘・清水 浩・杉本伸夫・松井一郎・竹内延夫: レーザーレーダーを用いた煙流拡散の観測. 10
 - (4) 稲場文男・小林壽郎・竹内延夫・清水 浩・佐藤卓蔵・桜井健二郎: ミッドレンジレーザーレーダーによる那須岳および有珠山の火山噴煙動態の観測. 11—19
8. Sasano, Y., H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda (1980) : Diurnal Variation of the Atmospheric Planetary Boundary Layer Observed by a Computer-Controlled Laser Radar, Journal of the Meteorological Society of Japan, 58, 143—148.
9. 清水 浩・笹野泰弘・安岡善文・松戸 修・竹内延夫・奥田典夫: コンピュータによるレーザーレーダーデータの画像表示法. 電子通信学会誌 (投稿中).

引用文献

- Browell, E.V. (1977): Lidar Remote Sensing of Tropospheric Pollutants and Trace Gases—Programs of NASA Langley Research Center. Proceedings of 4th Joint Conference on Sensing of Environmental Pollutants, 395—402.
- Uthe, E.E. and W.E. Wilson (1979): Lidar Observations of the Density and Behavior of the Labadie Power Plant Plume. Atmos. Environ., 13, 1395—1412.
- Wilson, W.E. (1978): Sulfates in the Atmosphere—A progress Report on Project MISTT. Atmos. Environ., 12, 537—548.
- Zuev, V.E. (1978): Remote Sensing of the Atmosphere (Ed., A.L. Fymat and V.E. Zuev). 257—265.

Ⅱ. 計測車レーザーレーダーの概要と現状

竹 内 延 夫 (大気環境部)

1. はじめに

1.1 レーザーレーダーの原理と構成

レーザーレーダー (Laser Radar) はライダー (Lidar: Light Detection and Ranging)とも呼ばれ、レーザー光を光源としたレーダー方式を意味する。3次元的空间分布の情報は次のようにして求められる。パルスレーザー光を大気中に射出し、粒子または気体によって後方に散乱された光を受光望遠鏡によって集光する (汚染物質を対象とした場合を図1に示す)。レーザー光が射出後、戻ってくるまでの時間によって距離を、受光信号光の強度から測定対象に関する情報を得る。レーザー射出方向を掃引することによって3次元パターンデータを得る。典型的なシステム構成のブロック図を図1に示した。大容量のデータを扱うので通常デジタル化してデータ処理を行う。

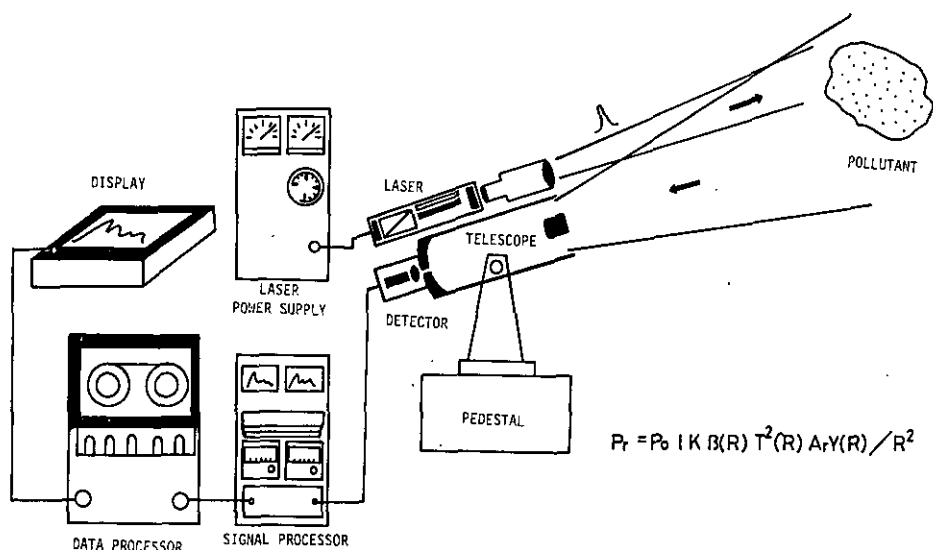


図1 レーザーレーダーの原理と構成

1.2 レーザーレーダー発展の概観

レーザーレーダーは1963年に成層圏のエアロゾル観測 (Fiocco ら, 1963) に初めて用いられて以来、成層圏・対流圏の汚染、大気状態の観測、雲の生長・消滅の観測、排煙拡散の計測などの研究に用いられてきた。レーザーレーダーシステムの発展は基礎技術の開発を主とした第1世代と実用的システムの開発を中心とする第2世代に分けられる。第1世代の代表的システムは繰り返し毎分数回程度のQ-スイッチ動作のルビーレーザーを光源とし、低速掃引架台にマウントされた望遠鏡を受光系とし、光電子増倍管 (フォトマル) で信号光を電気信号に変えてブラウン管上に表示している。ブラウン管上のデータを写真撮影して記録し、手仕事で解析していた。この場合、大量データの処理は困難で、多数回積算による精度向上も望めず、測定対象も排煙、逆転層といった強い信号が得られる現象が中心であった。これを打破して実用化システムの第2世代へ発展させたのがコンピューターの導入によるデジタル処理である。これにより大量データの処理が可能となり、実用的フィールド観測を行う目的で車載型システムが主流となった。さらに精度よく計測を行うため高速測定機能 (レーザーの高速繰り返し、架台の高速掃引) をもったシステムが要求されるようになってきた。この要求にこたえて設計製作されたものが、国立公害研究所 (NIES) 計測車システムである。レーザーレーダーシステムは今後、第2世代として車載型がさらに改良・高度化されるとともに、航空機搭載型による広域測定用の実用システムが発達するであろう。また、数年のうちには気体成分を遠隔計測できるシステムが実用化され、第3世代が始まるであろう。

1.3 応用分野

レーザーレーダーは、大気汚染、水質汚染、気象、成層圏といった広義の環境計測と、range finder や月・人工衛星などの距離計測で代表される測距の二つの分野に分けられる。特に後者の分野ではレーザーレーダーは実用化されたり、標準的な研究手法として確立されている。レーザーレーダーの研究分野は学際的色彩を有し、環境・気象・航空・宇宙・天文・土木といった広い分野にまたがっている。本報告書では、環境計測、その中でも大気汚染について述べる。レーザーレーダーの詳細や他の分野の研究については、Hinkley (1976) や日本気象学会 (1973) などを参照されたい。

1.4 レーザーレーダーの種類

大気汚染の研究に用いられるレーザーレーダーは技術的観点から、粒子状物質の計測 (非分光型) と汚染気体の計測 (分光型) に2大別される。それぞれに属するレーザーレーダーの種類について測定原理 (光と物質の相互作用) に基づいて説明する。

(1) 粒子状物質の計測 (非分光型レーザーレーダー)

〔ミ-散乱レーザーレーダー〕

大気中の浮遊粒子状物質からの強い散乱（ミー散乱：粒径が波長と同程度以上のときに起こる）を利用した方式で、送出光と等しい波長で散乱される（弾性散乱）。後方散乱係数を指標として、逆転層に伴うエアロゾル滞留層や排煙流の空間パターンを容易に把握できる。また複数波長を使用して粒径分布に関する情報を得ることが可能である。

（2）汚染気体の計測（分光型レーザーレーダー）

〔ラマン散乱レーザーレーダー〕

原子・分子が強いレーザー光に照射されたとき、固有の周波数だけ遷移した波長の散乱（ラマン散乱）を示すことを利用して汚染気体の濃度分布を求める手法である。大気汚染気体、特に排煙中の高濃度の成分などは、ラマン散乱によって空間分布を求めることができる。大気の主成分である窒素・酸素・水蒸気のラマン散乱を利用して視程・温度・湿度の空間分布が得られる。

〔けい光散乱レーザーレーダー〕

レーザー光によって励起された原子・分子からの特有のけい光の散乱強度から汚染気体の濃度分布を測定する手法である。大気中では空気分子との衝突によってけい光が弱くなる（消光効果）ので、成層圏や中間圏のように大気圧が低い状態での物質濃度の測定に適している。

〔差分吸収散乱型レーザーレーダー（DIAL: Differential Absorption Lidar）〕

分子の吸収に共鳴・非共鳴の2波長を大気中に射出し、エアロゾルによって散乱させる。等しい帰還時間（等しい到達距離）での2波長の散乱光信号の比をとると、汚染気体による吸収の光路積分量が求まる。この距離微分をとって、濃度の空間分布を求める。可視・紫外領域には NO_2 、 SO_2 、 O_3 の共鳴吸収が存在する。赤外領域にはほぼ全ての分子の振動遷移が存在する。これらの共鳴吸収を利用して DIAL の実験が行われている。

1.5 計測車システム製作の経緯

以上、レーザーレーダーの原理、発展、種類について大気汚染計測の観点から述べてきた。レーザーレーダーによる大気汚染の遠隔計測を手法として確立するには、高い精度でフィールド計測を行って、種々の状況下でのデータの集積をはかり、豊富なデータを解析するという過程を通して、大気汚染の状況を把握することが不可欠である。このためには短時間で変化する現象にも追従でき、大量のデータを容易に処理できるフィールド観測用の実用システムが必要となる。これらの要求を満足するために国立公害研究所（NIES）計測車システムが計画・製作された。

2. 国立公害研究所レーザーレーダーシステム ——計測車システムを中心として

この節では、大気汚染の遠隔計測の手法を開発するために必要なレーザーレーダーシステムを説明し、計測車システムの位置、役割および特徴について述べる。

2.1 大気汚染のスケール

大気汚染のスケールは大別して次の三つに分けられる：

(1) 局所的スケール

道路近傍、小煙突の周囲などの100mから1km程度までの領域で同一の地物的状況（例えば都市）内の一部分に着目したものである。

(2) 中域スケール

コンビナートや中小都市などの地物的条件が類似な単位要素で、数kmから20km程度のスケールである。排煙拡散、大気境界層、ヒートアイランドなどの個々の現象を測定するのに適したスケールである。

(3) 広域スケール

半径50km以上の規模（例えば首都圏）で、複数の現象を総合的に把握する場合、または一地域から他地域への影響を調べる場合に重要となる。

これらのスケールとレーザーレーダーシステムとの関連を次に述べる。

2.2 計測車システムと他のシステム

大気汚染現象を研究するには個々の汚染現象の性質・特徴を明らかにしていくことが第一歩である。そのためにはスケールのには中域を対象とし、現象の起こっている場所へ移動し、近くから、詳細に、正確に観測する必要がある。さらに総合的に研究していくには、広域スケールの汚染現象の観測や、特に注目した現象に焦点をあて、詳細に、また時間的にも連続的に観測していくことが必要となる。また、汚染成分の計測のためにフィールド測定用の分光型レーザーレーダーの開発も必要である。

これらの一連の方針にしたがって、高速応答性など従来の車載型システムになかった機能をもった計測車システムを設計・製作した。20回余にわたるフィールド観測によって、フィールド経験を積むと同時にデータの集積を計ってきた。これらの経験をもとに、広域観測用大型レーザーレーダーの製作や、逆転層の時間変化を連続観測する簡易型レーザーレーダーの試作を行った。これらの仕様の概要を表1に示した。

大型レーザーレーダー（竹内ら、1979）は広域スケールの大気汚染を総合的に研究するために昭和54年8月末に完成した。昭和55年度から特別研究「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」の中心的な計測装置として本格的な研究が開始されたので、本報告書では表1に仕様を述べるにとどめる。

なお分光型レーザーレーダーとしてはNO₂計測用DIALシステムや長光路吸収法システムを開発中である。

表1 国立公害研究所ミ-散乱レーザーレーダーシステムの仕様

	計測車システム	大型システム	簡易型システム
送信系			
レーザー	Nd:YAG レーザー	Nd:YAG レーザーと 第2高調波	ルビーレーザー
波 長	1.06 μm	1.06 μm , 532nm	694.3nm
パルスエネルギー	0.1J/パルス	1J/パルス, 0.4J/パルス	1 J/パルス
パルス繰り返し	最高 毎秒 40回	毎秒 25回	毎分 1回
平均出力	毎秒 4 W	25W, 10W	16mW
受光系			
望 遠 鏡	カセグレン式反射型	カセグレン式反射型	屈折型 (フレネルレンズ)
開 口 径	30cm	1.5 m	30cm
掃 引	高度 — 方位方式	高度 — 方位方式	鉛直のみ
掃引速度	最高 10°/秒	最高 10°/秒	———
検出器(フォトマル)	7102	RCA 7102, RCA 8852	7102
信号データ処理系			
A/D変換 (トランジェントレコーダー)	岩通 DM 901	岩通 DM 902	エレクトロニカ M-50E
ミニコン	NOVA02 (32kW)	TOSBAC 7/40 (96kW)	μ -プロセッサ (8080A)
精 度	8 ビット	8 ビット	8 ビット
最少サンプリング時間	10ns	10ns	50ns
データ収録	磁気テープ	磁気テープ	レコーダー

2.3 計測車レーザーレーダーシステムの特徴

計測車レーザーレーダーシステムは以下の機能をもつように設計された：

(1) 「多目的性」 本システムはフィールドでのレーザーレーダーによる計測手法の開発を行うことを第1の目的としている。したがって、必要に応じて種々の手法を試みることが可能なように改造が容易な構造とし、すべての波長領域のレーザー光源を使用できるように受光系に色収差が問題とならない反射型望遠鏡を用いた。

(2) 「コンパクト性」 必要とされる場所へ移動して測定するためには、システム全体を計測車に搭載して移動できることが要求される。したがって、車載が可能である程度にコンパクトな設計とした。

(3) 「高速応答性」 実時間で測定を行い、排煙のように速く変化する現象に高速で応答するために、レーザーの高速繰り返し、架台の高速掃引、データの高速収録などの機能をもたせた。

(4) 「データのコンピューター処理」 大量の2次元・3次元空間データを迅速に処理して実時間で表示するためにコンピューターによってデータ収録・処理を行う方式とした。

(5) 「自動化・操作性」 種々の測定対象に対して角度を変えながら繰り返し掃引を行うなど複雑な操作を円滑に行い、フィールドにおける操作が容易であるためにコンピューターによって制御を行うことを方針とした。

(6) 「堅牢性・耐環境性」 移動時の振動や、夏季冬季の厳しい温度湿度などの劣悪な環境条件に耐え、観測時に障害なく動作するような対策を施した。

以上の設計指針に基づいて製作されたシステムのブロック図を図2に示した(仕様は表1)。多目的性とコンパクト性は相反する要請であるが、フィールドでの多様な測定に容易に対応できるように、コンパクト性を多少犠牲にしても容易に改造できる構成をとっている。コンピューターの導入によって大量のデータを短時間で処理し、操作の自動化を図っている。さらに高速繰り返しのレーザーと高速掃引架台を採用して、従来の車載型システムにはなかった高速応答性を持たせ、複雑に変化する大気現象の測定に十分対応できる機能を持たせた。

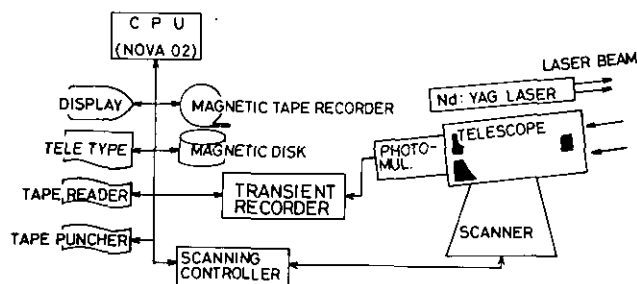


図2 計測車レーザーレーダーのブロック図

3. 外国における車載型システムの現状

レーザーレーダーの研究は十数年の歴史があり、多数のシステムが製作されてきた。その多くは野外での測定を行うために移動可能な構成をしており、専用のコンテナで運搬される例が多かった。国内でもバン、トラックに積載されたシステムが民間、官庁の研究所や大学で製作されている(竹内, 1979)。ここでは第2世代に属する車載型システムのうちから代表的なシステムを選んで NIES 計測車システムとの比較を表2に示した。このうち SRI は民間の研究機関、ヨーク大学はカナダの大学、他は官庁の附属研究機関である。以下に各システムの特徴について述べる。

表2 代表的な車載型レーザーレーダーシステム

事項	機関名	NIES	SRI	NOAA	NASA	ヨーク大	DFVLR
システム呼称			Mark IX		48"ライダー		
車 載 法	計測車	バントラック	バン 2 台	バン 2 台	バントラック	バン	
レ ー ザ ー	Nd:YAG	ルビー	ルビー	ルビー	ルビー	ルビー	
波 長	1.06 μ m	0.694	0.694	0.694	0.694	0.694	
繰り返し (最大)	40pps	0.05	0.1	0.5		2	
パルスエネルギー	0.1J/パルス	1.0	4.5	2		1	
望 遠 鏡	カセグレン	ニュートン	カセグレン	カセグレン	ニュートン	ニュートン	
有効口径	30cm	15cm	70cm	120cm	20cm	20cm	
レーザーマウント法	直接	直接	直接	直接	直接	直接	
掃 引	El-Az	El-Az	El-Az	El-Az	El-Az	El-Az	
データ処理	ミニコン	ミニコン	ミニコン	ミニコン	ミニコン	マイコン	
データ収録	MT	MT	MT	MT	MT	MT	
平均出力×開口面積	2800W・cm ²	8.8W・cm ²	1730W・cm ²	11300W・cm ²	314 W・cm ²	628 W・cm ²	
高 速 応 答 性	○	×	△	△	△	△	
角 度 精 度	○	△	○	○	△	△	
デ ー タ 処 理	○	○	○	○	○	△	
実 時 間 表 示	○	○	△	△	○	○	
機 動 性	○	○	△	△	○	△	
自 走 性	△	○	×	×	○	△	

〔スタンフォード研究所 (SRI)〕

SRI の Mark IX は機動性・実用性を考慮して製作され、現在フィールド観測で活躍しているシステムとして最も著名である。1963年 (Ligda) 以来の歴史と経験に基づいて設計されている。特に排煙拡散を中心に多くの研究がある。レーザーや望遠鏡は小型のものを使用しているが、発電機を搭載して自走しながらの測定が可能である。ハイウェイ沿いに風下 100kmにわたって排煙流を追跡している (Uthe ら, 1979)。データ処理系は、磁気テープヘッド 2 台を備え、データの処理編集が車内でも行えるような工夫が凝らされている。

〔米国海洋大気局 (NOAA)〕

気象状態測定用で、車載型としては大型のシステムである。2 台のバンに分納され、トレーラーで牽引されて移動する。ソーダーを収納したバンとキャラバンを組んで夏季に降雨やたつ巻などの気象状態の長期観測を行っている (Derr ら, 1973)。

〔米国航空宇宙局（NASA）ラングレー研究所（LRC）〕

グローバルな環境計測の観点から成層圏エアロゾルの観測を行っている。120cmの口径の受光望遠鏡を有し、2台のバンに収納され、北米大陸の必要地点での観測が行える。

〔ヨーク大学（カナダ）〕

カナダの環境省からの予算で製作されたもので自走するバントラックにまとめられている。環境省の依頼により排煙の排出状況の監視・計測手法の研究を行っている。受光系はストークスベクトルの4成分が測定できるようになっており、雲の粒状性などでも多くの研究がある。

〔ドイツ航空宇宙研究所（DFVLR）〕

運搬性を考慮して列車用と同じサイズのコンテナにコンパクトに収納してある。地上から高層までの大気状態を測定する目的で製作された。飛行機実験と合わせて排煙観測に用いられている（Werner ら、1977）。

NIES 計測車システムを各国のシステムと比較すると、第2世代のシステムではコンピュータによるデータ処理はどれもほぼ似た機能を有しているが、NIES 計測車システムは複雑な大気汚染現象に対応する高速応答の機能を有しており、一台の計測車にまとめられて、機動性にも富んでいるのが特徴である。

4. 計測車システムの将来

計測車レーザーレーダーシステムによる研究対象としては、

(1) 汚染分布の把握

各種発生源からの汚染状況と周辺への影響が該当する。具体的例としては、道路からの拡散、船舶や港湾における汚染、飛行場・航空路周辺の航空機汚染、大小煙突からの拡散と周辺への影響、工事現場や砕石場からの粉塵の飛散、工場地帯の汚染、都市の汚染、ヒートアイランド現象などが数えられる。

(2) 大気構造の把握

汚染と関連する大気状態の情報としては、逆転層・混合層構造の種々の条件下の測定や、気象要素（風、気温、湿度など：シミュレーションモデルの作成や汚染予測に必要）の空間分布などが含まれる。

(3) 動的挙動の把握

大気の流れ、排煙拡散現象が該当する。

本報告書では大気汚染測定のためには不十分であった従来の車載型の構成を発展させて計測車システムとして完成させるとともに、完成したシステムを用いてフィールド観測を繰り返して、遠隔計測の手法を開発するために基礎的研究を行った。

今後、今までの経験に基づいて、測定レーザー波長の多波長化を図ったり、分光型レーザーレーダーを組み合わせた高性能なレーザーレーダーを開発し、長期間の測定や各種条件下の測定な

どを行ってデータを集積し、大気汚染を総合的に解明していくための実用的システムの開発が必要である。

引用文献

- Carswell, A.I., J.D., Houston, W.R., McNeil, S.R., Pal and S., Sizgoric (1972): Remote probing by laser radar. Canadian Aeronautics and Space J., 18, 335-336.
- Derr, V.E., R.E., Cupp, G.T., McNice, N.L., Abshire, M.J., Post and R.L., Schwiesow (1974): The design and operation of a tropospheric remote sensing system. 6th Int. Nat. Laser Radar Conf., 1-4.
- Fiocco, G., and L.D., Smullin (1963): Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140km) by optical radar. Nature, 199, 1275-1276.
- Hinkley, E.D., edited (1976): Laser Monitoring of the Atmosphere. Topics in Applied Physics, vol. 14. Springer Verlag. 380pp.
- Ligda, M.G.H., (1963): Meteorological observations with pulsed laser radar. Proc. 1st Conf. Laser Technology, San Diego, 63-72.
- 日本気象学会 (1973) : ライダ (レーザー・レーダー) と気象観測. 気象研究ノート, 116号, 149pp.
- Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena, Opt. and Quantum Electronics, 12, 159-167.
- 竹内延夫 (1979) : 大気汚染観測用車載型レーザーレーダー. レーザー研究, 6, 364-376.
- 竹内延夫・清水 浩・松井一郎・笹野泰弘・杉本伸夫・奥田典夫 (1979) : 国立公害研究所広域計測レーザーレーダーシステムについて, 第5回リモートセンシングシンポジウム, 5-8.
- Uthe, E.E., and W.E., Wilson (1979): Lidar observations of the density and behavior of the Labadie power plant plume. Atmosph. Environ., 13, 1395-1412.
- Werner, C., and H., Hermann (1977): DFVLR mobile lidar system. Rev.Sci.Instr., 48, 247-251.

Ⅲ-1

大気拡散観測用コンピューター化車載型レーザーレーダー*

A mobile computerized laser radar system for
observing rapidly varying meteorological phenomena*

清水 浩¹・笹野泰弘¹・竹内延夫¹

松戸 修²・奥田典夫¹

Hiroshi SHIMIZU¹, Yasuhiro SASANO¹, Nobuo TAKEUCHI¹

Osamu MATSUDO² and Michio OKUDA¹

要 旨

変化の速い大気現象をとらえるために、車載型のレーザーレーダーを開発した。この装置は、高速化のために、高速繰り返しレーザー、高速掃引装置および、データ収集とコントロール用のミニコンピューターを備えている。

装置性能のテストは、理論上のS/Nと、測定されるS/Nの比較から行った。結果は両者が良く一致しており、装置がほぼ理想的な形で使用されていることが確かめられた。

この装置の可能性を示すため、煙突からの排煙の測定と、最大測定可能風下距離の検討を行った。その結果、この値として、中規模の廃棄物焼却場を対象とする場合に、約1.4kmという値が得られた。応用上この距離は1km以上であることが望ましく、本装置はこの条件を満たしている。

Abstract

A mobile laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena is described. This system is equipped with a high-repetition laser, a high-speed scanner and a mini-computer for data acquisition and control for high-speed operation.

Signal-to-noise levels of the system are compared with theoretical values, and it is found that

* 本論文の要約は英文にて下記雑誌に発表。

Essence of this paper has been published in English in Optical and Quantum Electronics, 12, 159-167 (1980).

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan.

2. 同 環境情報部

ibid, Environmental Information Division.

they are affected by the shot noise in the system.

An example of the observation of a stack plume and an estimation of the observable downwind distance are presented to show the performance of the system.

For practical application, this distance should be greater than 1 km. The observable distance for this system was found to be 1.4 km, thus meeting this requirement.

1. はじめに

レーザーレーダーの観測は気象学や大気汚染の研究に有用な情報を提供する。特に、ミー散乱を利用するレーザーレーダー装置はこの10年間に非常に精力的に開発されてきた。最初のレーザーレーダーによる観測は Fiocco と Smullin (1964) によりルビーレーザーを使用して行われた。この初期の装置と現在の装置との大きな差異は、データの記録方法である。当時は、レーザーレーダーで受信された信号をオシロスコープの管面に写し出し、それを写真に撮るという方法が使われていた。このような方法は、データの収集と処理に膨大な時間を要するため、レーザーレーダーの応用分野を広げる上で大きな障害となって来た。

この問題を解決するために、データの処理に、ビデオ記録装置を使用したのは Uthe (1975) らが最初であった。このビデオ記録装置はレーザーレーダーデータをリアルタイムで使用することに大いに貢献した。その結果、レーザーレーダーによりエアロゾル分布の時間と空間の変化をとらえる試みが多く成された。しかし、ビデオ記録方式は、記録のバンド幅が狭いため、データの距離についての分解能が低くならざるを得ず、定量的にデータを使用するためには、データの質は十分とは言えなかった。

その後、トランジェントレコーダーとコンピューターシステムを使用したデジタルデータ収集技術が開発されるに至って、レーザーレーダーのデータ収集および処理がかかえていた問題点が一挙に解決することになる。それゆえ、Uthe ら (1975)、McCormick (1976)、Grams ら (1975) など多くの研究者らが、この技術を使用して、装置を構成している。このデジタル方式の利点はデータの収集と表示がリアルタイムで行われること、および大量のデータが容易に得られることである。

従来、このようなデジタル化した装置ではレーザーとしてルビーレーザーや色素レーザーが使われていた。しかし、これらのレーザーは信頼性、出力、寿命、繰返し特性等の点での問題があり、デジタルの処理装置と組み合わせても、その真価を十分に発揮することが出来なかった。しかし、Nd:YAG レーザーにはこれらの問題点が少ない。それゆえ、Nd:YAG レーザーは波長が長いので、検出器の感度が多少低下するという問題点はあるが、デジタルの処理装置の能力を最大限に生かすことが可能である。

ここでは、このような観点から試作した Nd:YAG レーザーと、デジタル処理装置を組み合わせたレーザーレーダーについて述べる。この装置の特徴は、高速でデータの収集と処理が可能であること、小型で堅牢に作り、計測車に搭載可能としたことである。さらに、この装置の性能をテストするための解析の結果と、応用例として煙突の煙の追跡を行った結果について述べる。

2. 装置の構成

この装置は、大気汚染研究用にフィールドで使用されることを目的として作られたものである。この様な装置に要求される性能としては、高速でのデータ収集と処理が可能なこと、実時間での解析と表示が可能なこと。車載型で、どこでも測定が可能であること、などである。しかも、自動的な測定が、簡単な操作で行えることが望ましい。処理の実時間性と、操作の簡便性、自動化はコンピューターシステムを使用することにより可能となる。車載型とするためには、装置を十分小型化することと、防震を施すことである。装置の高速化は、高速繰返し可能なNd:YAGレーザーを使用すること、高速の掃引装置を使用すること、高速動作が可能なミニコンピューターを使用することにより実現される。

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。Nd:YAGレーザーは最大40pps (pulse per second) の繰返しを持ち、パルス幅は約10ns、出力エネルギーは約100mJ/pulseである。レーザーからのパルス光は、光軸調整器を通して大気中に打ち出す。この光軸調整器は2枚のくさび形をしたガラスより成っており、レーザービームは、これらのガラス板を回転させることにより、任意の方向に調整出来る。

表1 コンピューター化車載型レーザーレーダー装置の性能の概要

レーザー		LAY117 (東芝製)
レーザー媒質		Nd:YAG
波長		1.064 μ m
出力エネルギー		0.1J/pulse
パルス幅		10ns
最大繰返し		40pps
望遠鏡		
形式		カセグレン型
有効直径		30cm
焦点距離		179cm
前置増幅器		115型 (PAR製)
バンド幅		DC~50MHz
増幅率		10, 100倍
波形記憶装置		DM901 (岩通製)
AD変換時間		10ns
精度		8bit
記憶容量		1024word/ch
感度		± 50 mV フルスケール

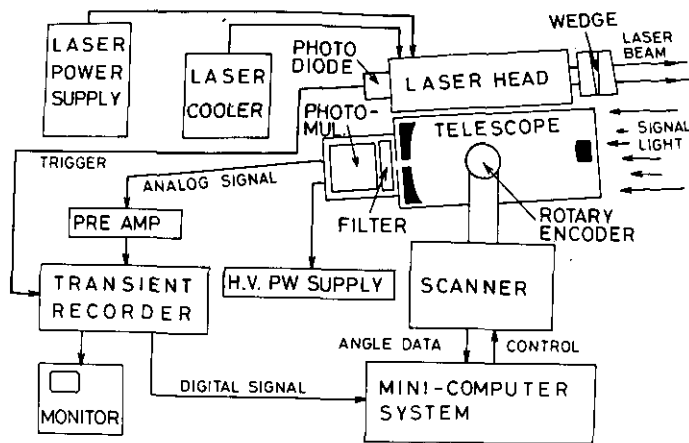


図1 コンピューター化、車載型レーザーレーダー装置のブロック図

レーザーの掃引方式は高度-方位方式で、最大掃引速度は $10^\circ/\text{s}$ である。この速度は、交流サーボモーターでコントロールする。信号の受信には、直径30cmのカセグレン型反射望遠鏡を使用している。受信された信号光は、視野絞りとし、1nmのバンド幅の干渉フィルターを通して、検出器に集める。検出器にはRCA7102型光電子増倍管（以下PMTと略す）を使用している。PMT

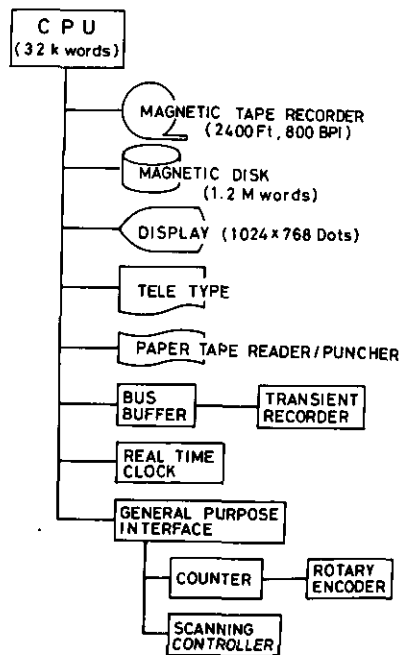


図2 コンピューター部分の構成図

の出力は、PAR (Princeton Applied Research) 社製 115 型広帯域増幅器で増幅した上、岩通製 DM 901 型トランジェントレコーダーで高速 A/D 変換を行う。このトランジェントレコーダーの最小サンプルタイムは 10ns、精度は 8 bits である。トランジェントレコーダーに蓄えたデータは直ちに NOVA - 02 型ミニコンピュータに送る。ミニコンピュータは、リアルタイムで基本的なデータ解析を行うと同時に、データを磁気テープ記録装置に記録する。

ミニコンピュータシステムの構成を図 2 に、その特性を表 2 に示す。ミニコンピュータは

表 2 コンピューター部分の性能の概要

CPU	NOVA 2 (データゼネラル製)
アクセスタイム	1.2 μ s
記憶容量	32k words
ワード長	16bits/word
磁気テープ記憶装置	VD 75 (ビクターデータ製)
記憶密度	800BPI
トラック数	9truck
テープ長	2400ft
始動—停止時間	5.6ms
データ転送速度	60kB/s
磁気ディスク	CD3100 (北辰電機製)
記憶容量	1.2MB
ディスク径	15in
平均待時間	20ms
データ転送速度	781kHz
ディスプレイ装置	4010 (テクトロニクス社製)
ディスプレイ面積	19.1 $\times$ 14.3cm
行数	35lines
字数	74char./line
文字書込速度	1200char./s
点密度	1024 $\times$ 768points
テレタイプ	33 (テレタイプ社製)
テープリーダー	PTR 4001 (リコー社製)
テープパンチャー	TP60P (リコー社製)

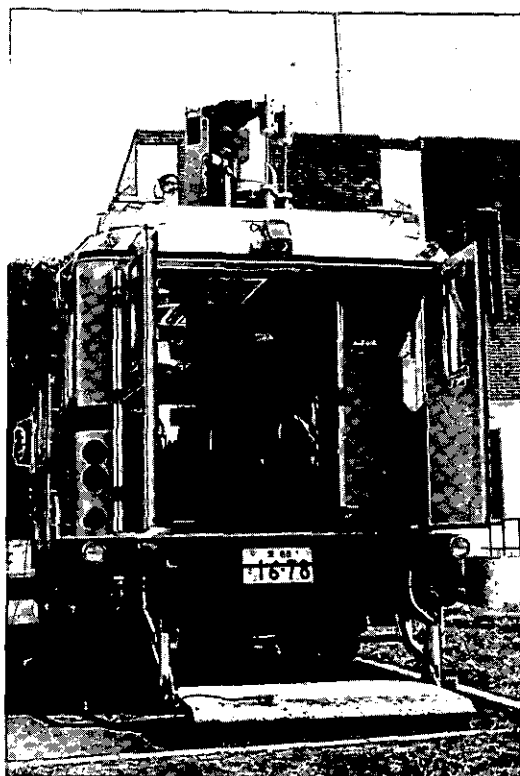


図3 装置全体の写真

(上) 計測車後方から撮った写真(望遠鏡をリフターで上げた状態)

(下) 計測車内部を前方から撮った写真

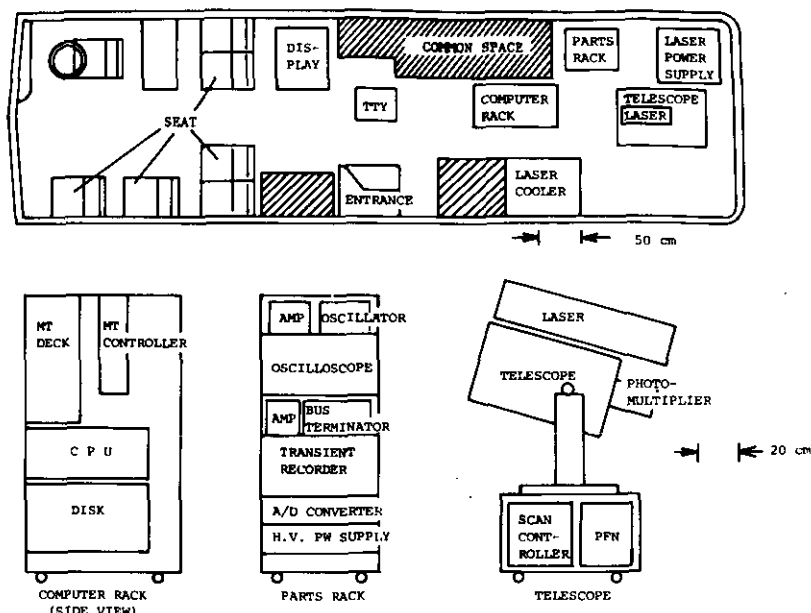


図4 計測車内部の装置の配置図

上記のように、データの収集と解析を行うと同時に、望遠鏡の掃引や角度読取等の装置全体のコントロールを行う。磁気テープ記録装置はレーザーレーダーデータ、望遠鏡の角度データおよびその他の実験パラメータを記憶するために使用している。磁気ディスクはデータ収集と処理のプログラムを格納するために用いている。データを実時間で表示するために、グラフィックディスプレイを使用している。

計測車に搭載した装置全体の写真を図3に示す。この計測車は電動のリフターを備えており、測定中には望遠鏡と、レーザーヘッドは計測車の天井より上まで持ち上げることが可能である。図4には、各装置の計測車内部での配置図を示す。

3. コンピュータソフトウェア

コンピュータソフトウェアの開発はデジタル処理を行うレーザーレーダーの開発においては最も重要な過程の一つである。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。データ収集のプログラムは、サブルーチンプログラムをアセンブラとフォートラン言語の両方を使用して作成し、これらを1本のメインプログラムとして編集している。メインプログラムは、NOVA Real-time Disc Operating Systemを使用して構成している。また、解析処理プログラムはフォートランを用いて作成している。

データ収集プログラムの詳細は、本報告書の別稿に記載してあるのでここでは触れない。

解析・処理の過程は図5に示す。その内容は次の通りである。

- a) レーザーレーダー信号からの DC 成分の除去。
- b) 距離に関する補正。すなわち、レーザーレーダー信号は距離の2乗に反比例して減衰すると同時に、近距離においては、レーザービームと、受信視野が100%重ならないために減衰する。従って、これらの減衰を補正することによって、正確な受信光強度を求める。
- c) 座標変換、対数変換などの各種演算。
- d) 精度を向上させるための平均化やスムージング。
- e) コンピューターの周辺機器への結果の出力あるいは表示。

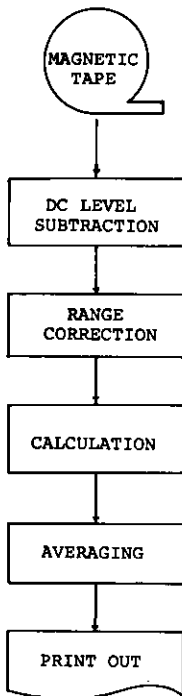


図5 信号処理の過程

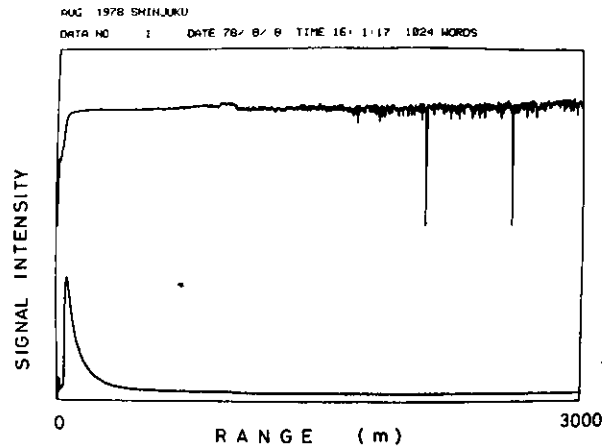


図6 レーザーレーダーによる測定結果を実時間で表示した例
(上) 距離補正と対数変換を施した結果
(下) A スコープ表示

結果の表示例を図6に示す。図6はグラフィックディスプレイに表示したAスコープ(下図)と、これに距離補正をした上で対数変換を施した結果(上図)である。同図において、横軸は距離、縦軸は高度を示している。上図の2000mと2800m付近の鋭い負のスパイク状の線は、対数変換を行う時に基準とした0の値である。この図は、実時間の表示である。すなわちデータ収集と同時に表示を行ったものである。

ここで開発した測定プログラムを用いる場合、最大のレーザーの繰返しは、コンピューターの処理時間で制限される。処理の過程ごとに処理時間を求めたのが表3である。この表によると、

表3 データ処理時間

ジョブ	処理時間
データ書き込みルーチン	4.5ms
データ転送ルーチン	2.0ms+2.5 μ s/word
平均化ルーチン	1.8ms+15.6 μ s/word
MT 出力ルーチン	20.5ms+37.5 μ s/word
表示のための計算時間	4.0ms/word

1 レーザーパルス当たりに収集するデータの数(ワード数; w)により処理時間が異なる。

本装置を使用する場合、データの加算平均を行った後記録する場合と、加算平均を行わずに記録する場合とがある。表3より、ワード数と、コンピュータの処理時間 T_c の関係を求めると、加算平均を行う場合と行わない場合の各々について、それぞれ次式のようになる。

$$T_{c(SUM)} = 8.3 + 18.1 \times 10^{-3} w \text{ (ms)} \quad (1)$$

$$T_{c(NO SUM)} = 27 + 40 \times 10^{-3} w \text{ (ms)} \quad (2)$$

4. 装置の解析

レーザーレーダーの性能を評価するための最良の方法は、理論的な S/N 式と、装置の動作試験から得られる。実験的な S/N を定量的に比較することである。

理論的な S/N 式(清水ら1977)はレーザーレーダー方程式(日本気象学会1968)を使用して、次のように求められる。

$$n(R) = n_0 L K \beta T^2 A_r Y_r \eta / R^2 \quad (3)$$

$$S/N = \sqrt{M n(R)} / \sqrt{[n(R) + 2(n_0 + n_i)]} \quad (4)$$

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 の光電面から飛び出す光電子の数、 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、 β はミーム体積後方散乱係数、 T はレーザービームの透過率、 A_r は望遠鏡の有効面積、 Y は送信ビームと望遠鏡の受信視野との重なりを表す係数、 η 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_0 、 n_i はそれぞれ、PMT から放出される背景光と熱雑音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4に示す。 S/N はこれらの値を式(3)および(4)に代入することにより求められる。計算の結果を図7に示す。パラメータの値は誤差を含んでいるため、理論的な S/N は不確定さを持っている。図7で斜線を施した部分の範囲が、理論的な (S/N) を示している。図7には S/N の実験値も同様に点線で示されている。この実験は、レーザーの繰返し2pps、平均回数20回で行い、これを60回繰返している。それゆえ、測定時間は10分である。

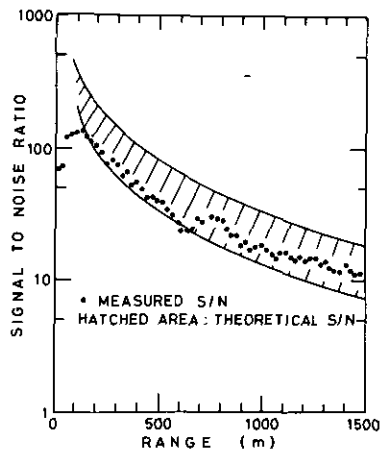


図7 S/N の計算値と測定結果

表4 感度の理論的計算に用いた数値

記号	定義	値
n_0	光子数	5.4×10^{11} photons/pulse
L	距離分解能	1.5m
K	光学系の効率 (レンズ系の透過率; 0.5, 望遠鏡の 反射率; 0.7, フィルターの透過率; 0.4)	0.14
A_r	望遠鏡の有効直径	0.059m^2
Y_r	重なる割合	1
η	光電子増倍管の量子効率	0.05%
β	ミ一体積後方散乱係数	$4 \times 10^{-6} \text{m}^{-1} \text{sr}^{-1} (V=10\text{km})$
n_b	背景光の量	4.1 electrons/gate time
n_t	熱雑音の量	0.27 electron/gate time

図7によると、理論的な値と測定結果の間には良い一致が見られる。ただし、600m付近でのわずかな違いがあるが、これは大気状態が変化して起こったものと考えられる。この結果から、この装置では S/N はショットノイズで限定されており、理想に近い形で動作していることが確認された。

ところで、この装置の感度を測定条件に応じて計算して置くことは、応用上有用である。レーザーレーダーの感度を決定する条件は装置の定数の他に、距離分解能 L 、測定距離 R 、 S/N 、レーザーパルス数 M および測定対象の密度である。これらのうち、 S/N は通常の測定においては3以上であることが望ましい。また M は本装置の目的が高速動作ということであるため、1回と仮定する。このような条件の下で測定対象の密度変化すなわち視程の変化に対して、分解能をパラメータとする測定可能距離の最大値を計算する。

(3)および(4)式に装置のパラメータを代入し、体積後方散乱係数 β と、視程 V との関係を、

$$\beta = \frac{3.91}{10^3 V} \quad (5)$$

と仮定する(清水ら1977)。さらに $S/N = 3$ を用いると、 $R_{\max}$ が次式で求められる。

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{6.1 \times 10^7 L}{V n(R)}} \quad (6)$$

ただし、

$$n(R) = \frac{9 + \sqrt{81 + 314.6L}}{2} \quad (7)$$

以上の結果から L を 1.5m とすると、

$$R_{\max} = 2.37 \times 10^3 / \sqrt{V}$$

となる。

5. 装置の応用例

本装置の有用性を証明するために、次のような排煙の測定を行った。

測定対象に、表5に諸元を示すような廃棄物焼却工場の煙突を選んだ。レーザーレーダーはこの煙突から900mの距離の所に設置した。測定は、風下距離約40mの位置の煙の断面を風向とはほぼ直角に掃引する形で行った。また、掃引速度は $1^\circ/\text{s}$ 、レーザーの繰返しは20ppsで、1回の掃引で200回のパルスを発射した。従って1回の測定時間は約10秒である。図8にその測定例を示す。この図は、磁気テープに記録したデータを大型コンピューターで処理し、XYプロッターに描かせたものである。この図において、煙のパターンは、透視図法の手法で表示したもので、煙の強度と形状が、目で見て確認し易くすることを目的としている。

表5 測定に用いた煙突のパラメータ

パラメータ	定義	値
施設名		廃棄物焼却炉
高さ	z	40m
出口半径	r_c	0.75m
ばいじんの排出量	m	$0.2\text{g}/\text{m}^3$
ばいじんの粒径(半径)	r	$0.5\mu\text{m}$
ばいじんの比重	c_1	2
ばいじんに含まれる水分による粒径の増加の割合	c_2	2
煙突中の煙の速度	v_0	20m/s
光の散乱効率	K_s	2

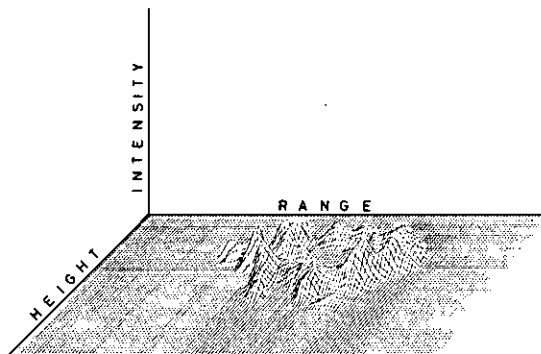


図8 透視図法で表示した煙の断面の測定結果

筆者らは、煙の拡散現象を観測するため、このような測定を数秒の時間間隔で連続的に行っている。このような測定から得られる情報は煙の重心位置、煙の拡散とそれらの時間変化等である。この種の情報は拡散の研究に非常に重要であるが、実験的にデータを得るには、ここで開発したような高速レーザーレーダーを使用する以外に方法はない。

ここで、本装置を上記のような測定に応用する際の測定可能距離の限界について考察を行う。排煙の観測の場合、測定の限界を決める条件は、1) 測定時間、2) 排煙の濃度とバックグラウンドの関係、3) レーザーレーダーの測定感度である。

1) 測定時間

乱流理論によると (Lumely, 1964), 乱流場の時間スケール t_i は最小でも次式の値をとる。

$$t_1 = z/v_w \quad (8)$$

ここで、 z は煙突高度、 v_w は風速である。

Pasquill (1974) の拡散理論によると、風下距離 $D(m)$ に対する平均的な煙の位置の移動の最大値 L_s は、

$$L_s = 0.4D \quad (9)$$

である。また、Hinze (1975) によれば、瞬時的な煙の直径の最大値 D_s は、

$$D_s = 0.1D \quad (10)$$

の値を持つ。(9)、(10)式で与えられる領域が、レーザーレーダーで測定すべき領域である。 L_s および D_s をレーザーレーダーの距離分解能 L で割った値が、それぞれ測定に必要なワード数 w 、およびレーザーパルス数 P である。 w ワードの測定に必要な時間は(2)式の t_c で求めることができる。従って、測定領域を1回測定するために必要な時間 t_2 は次式で与えられる。

$$t_2 = P \times t_c = \frac{0.1D}{L} \left(27 + \frac{0.016D}{L} \right) \text{ (ms)} \quad (11)$$

t_1 と t_2 を等しいとおいた時の D の値が測定時間を条件とする D の最大値 $D_{\max}$ である。

$$D_{\max} = \frac{-2.7L + \sqrt{7.29L^2 + 0.0064zL^2/v_w}}{0.0032} \quad (12)$$

2) 排煙の濃度とバックグラウンドの関係

この条件では、バックグラウンドのエアロゾル量と、排煙濃度が等しい場合が測定の限界を与える。

煙突の出口での排煙のミー散乱断面積 σ_m は次式で与えられる。

$$\sigma_m = \frac{3K_s C_1^2 m}{4rC_2} \quad (13)$$

ここで、 m ; ばいじんの排出量、 r ; その粒径、 C_1 ; その比重、 C_2 ; それに含まれる水分による粒径の増加の割合、 v_0 ; 煙突中の煙の速度、 K_s ; 光の散乱効率(清水ら, 1978)である。

排出された煙が風速 v_w で拡散される場合、風下距離 D でのミー全散乱断面積 σ_{mD} は次式となる。

$$\sigma_{mD} = \left(\frac{r_c}{0.05D} \right) \frac{\sigma_m v_0}{v_w} \quad (14)$$

ここで、 r_c は煙突の半径である。

視程 V とミー全散乱断面積 σ との関係はほぼ、

$$V = -(\ln 0.02) \sigma \quad (15)$$

であるから、バックグラウンドのエアロゾル量と、排煙濃度の等しい条件は(14)式および(15)式より $\sigma_{mD} = \sigma$ で与えられる。これより D の最大値 $D_{\max}$ は次式から求められる。

$$D_{\max} = \frac{\sigma_c \sigma_m V}{(-\ln 0.02) \times 0.5 \left(\frac{v_0}{v_w} \right)} \quad (16)$$

3) レーザーレーダーの測定感度

本レーザーレーダーの最大測定可能距離 $R_{\max}$ は(6)式で与えられている。(6)式の V の値に(14)および(15)式から得られる減衰係数の値を代入すると、 $R_{\max}$ と D の関係が求められる。

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{3.05 \times 10^4 L D}{(-\ln 0.02) n(R) r_c \sigma_m \left(\frac{v_w}{v_0} \right)}} \quad (17)$$

排煙測定の際、 $R_{\max}$ は(9)式の L_s にレーザーレーダーの不感距離(本装置では約 50m)を加えたものに等しい。すなわち

$$R_{\max} = 50 + L_m = 50 + 0.4D \quad (\text{m}) \quad (18)$$

(17)、(18)式の等しい条件が、レーザーレーダーの測定感度から決められる $D_{\max}$ である。

$$D_{\max} = \frac{-(40 - C) + \sqrt{(40 - C)^2 + 1600}}{0.32} \quad (19)$$

ここで C は

$$C = \frac{3.05 \times 10^4 L}{(\ln 0.02) n(R) r_c \sigma_m \left(\frac{v_w}{v_0} \right)} \quad (20)$$

である。

以上のように、測定の限界を定める条件は3点ある。これらの条件から求められる三つの $D_{\max}$ の値の最小値が、実質的な $D_{\max}$ である。表5に示す煙突において、風速 10m, 視程 50km とす

る時、距離分解能 L が 1.5m の場合、 $D_{\max}$ の値は条件 1) ~ 3) について、それぞれ 1.42km, 2.9km, 1.43km である。従ってこの場合の最大測定可能風下距離は条件 1 で限定され、1.42km となる。 L を 3m とする場合には、 $D_{\max}$ の値はそれぞれ、2.84km, 2.9km, 1.62km となり、条件 3 で限定される。

排煙拡散を研究するに当って必要な最も重要なパラメータとして拡散係数が挙げられるが、これをレーザーレーダーで測定する場合、風下距離 1 km までの測定が可能であれば実用上十分であると考えられる(総量規制マニュアル, 環境庁編)。従って、本装置は、この要求を満たしている。

上の例で示された様に、このレーザーレーダーシステムは瞬時的なエアロゾルの空間分布を測定することが出来る。この性能を使えば、エアロゾル分布をトレーサーとして多くの種類の野外での応用測定に利用することが出来る。それらの応用には次のようなものが挙げられる。

- a) 煙突、自動車、飛行機、船、地上からのちり、海水の飛沫等の多くの発生源からのエアロゾルの拡散現象。
- b) 雲や霧の 3 次元的な構造やその移動。
- c) 風向、風速。(Takeuchi et al, 1977)
- d) 逆転層や内部重力波などの大気境界層内の気象学的現象。

この装置は関東近辺で約 10 回以上のフィールド実験に使用している。その結果、移動の際の耐震性や、気温・湿度に対する耐候性等にも優れていることが証明された。

6. 結 論

ここでは、我々が開発した 3 次元のエアロゾルの分布を測定するための、高速繰返し可能なレーザーレーダーについて述べた。この装置は最大掃引速度 $10^\circ/\text{s}$ で数 km の範囲の測定が可能である。

この装置の開発の目標は、グラフィックディスプレイを備えたミニコンピューターを使用することによる実時間でのデータ収集と処理をすることであった。またこの装置の能力は車載型とすることにより大きく拡げられた。それに加え、装置の自動化により、装置に不慣れな人にとっても容易に使用可能となった。

この装置を用いた測定の目標は主に、速く変化する現象の把握にある。そのために、ここでは排煙拡散の例について示した。そして理論的計算より、この装置はこのような測定に一般的に使用可能であることが示された。今後このような装置の応用分野がますます広がることが期待される。

引用文献

- Fiocco, G. and G. W. Grams (1964): Observation of the aerosol layer at 20 km by optical radar. *J. Atmos. Sci.*, 21, 323-324.
- Grams, G.W., E.M. Patterson and C.M. Wyman (1975): *Opt. Quant. Elect.*, 7, 187-191.
- Hinze, J.O. (1975): *Turbulence* 2nd ed., McGraw Hill, New York, 538.
- Lumley, J.L. and H.A. Panofsky (1964): *The structure of atmospheric turbulence*. Wiley Interscience, New York, 170.
- McCormick, M.P. (1976): *Remote sensing energy related studies*. ed. T.N. Vezzeroglu, Hemisphere Press, Washington, 113-218.
- 日本気象学会 (1973): 気象研究ノート116号, ライダ(レーザー・レーダー)と気象観測. 149pp.
- Pasquill, F. (1974): *Atmospheric diffusion*, D. Van Nostrand, London.
- 竹内延夫 (1979): 大気汚染観測用車載型レーザーレーダー・レーザー研究, 6, 364-376.
- 竹内延夫・清水 浩・松井一郎・笹野泰弘・杉本伸夫・奥田典夫 (1979): 国立公害研究所広域計測レーザーレーダーシステムについて. 第5回リモートセンシングシンポジウム, 5-8. 第5回
- Takeuchi, N., H. Shimizu, H. Ueda, Y. Yasuoka and M. Okuda (1977): A method for the spatial distribution measurement of wind velocity by a computer - controlled lidar. 8th International Laser Radar Conference, Philadelphia, Pennsylvania.
- Uthe, E.E. and R.J. Allen (1975): A digital real-time lidar data recording, processing and display system. *Opt. Quant. Electr.*, 7, 121-129.

III-2

レーザーレーダー方程式における幾何光学的効率の
フィールド測定データに基づく決定*

Geometrical Form Factor in the Laser Radar Equation :
An Experimental Determination*

笹野泰弘¹・清水 浩¹・竹内延夫¹・奥田典夫¹

Yasuhiro SASANO¹, Hiroshi SHIMIZU¹, Nobuo TAKEUCHI¹
and Michio OKUDA¹

要 旨

この論文では、レーザーレーダー方程式における幾何光学的効率の補正関数を決定するための実際的な方法について述べる。レーザーレーダー方程式と、エアロゾル空間分布の統計的な一様性に基づいて、補正関数はレーザーレーダーによるフィールド観測データから計算される。補正されたいくつかの例を示す。

Abstract

This paper describes a practical method for determination of the geometrical form factor in the laser radar equation. Based on the laser radar equation and the statistical homogeneity in the spatial aerosol distribution, the factor can be calculated from the field observations by laser radar. Some examples of correction by this factor are also presented.

1. はじめに

レーザーレーダーは大気汚染や気象学の分野における研究に対して有効な測定手段であると認識されており (Collis and Russell, 1976), エアロゾルは比較的容易に検出できるところから、特に研究が進められている。エアロゾルの空間分布やその動きは、大気汚染や大気境界層問題においては、地上から高度2~3 kmの範囲について把握する必要がある。ところが、これまでレーザー送信ビームと受信光学系の視野の重なり係数が十分に知られていないという理由で、近距離の測定データは解析に供することが出来なかった。ビームと視野の重なりは、図1に模式的に描い

* 本論文の要旨は英文にて下記雑誌に発表。

Essence of this paper has been published in English in; Appl. Opt., 18, 3908-3910 (1979).

1 国立公害研究所 大気環境部 千305 茨城県筑波郡谷田部町
The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environmental Division, Tsukuba, Ibaraki 305.

たように、ある距離より遠くで完全に重なり、レーザーレーダー近傍では重なりは不十分となっている。

この近距離のレーザーレーダーデータを正しく解釈するためには、ビームと視野の重なりについて補正しなければならない。この補正関数がいわゆる幾何光学的効率の補正関数 (Halldórsson and Langerholc, 1978) である。この論文では幾何光学的効率の補正関数を決定するための実際的な方法について述べる。この方法はレーザーレーダーシステムのコンピューター化 (Shimizu et al., 1980) によって可能になったものである。

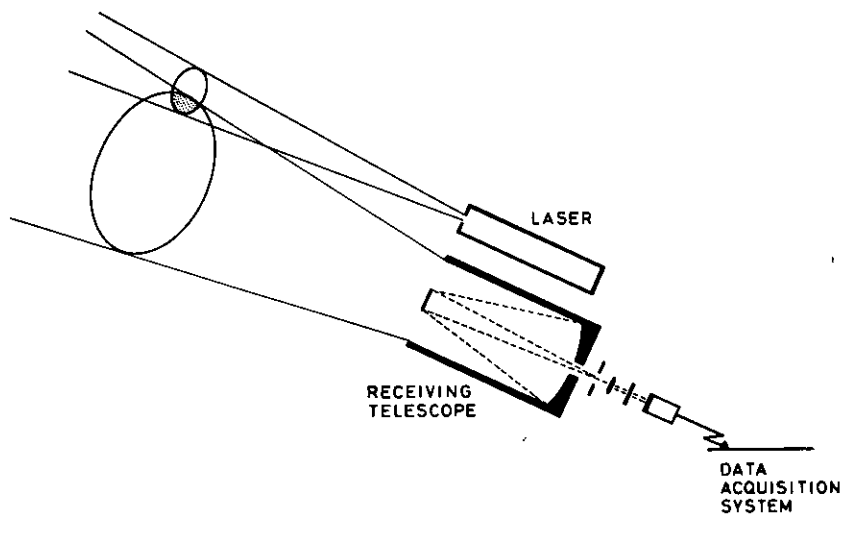


図1 レーザービームと受信光学系視野の重なりを示す幾何光学的効率の概念図

幾何光学的効率の補正関数は通常 $Y(R)$ として、よく知られたレーザーレーダー方程式に含めて次のように表現できる。

$$P_r(R) = P_t L \beta(R) A Y(R) R^{-2} T^2(R) \quad (1)$$

ここで、 $T(R) = \exp\left[-\int_0^R \sigma(r) dr\right]$ 、その他の記号は Collis (1970) に従った。受信電力 $P_r(R)$ に距離の二乗を掛けた量は、光学系の幾何的配置から一意的に決まる $Y(R)$ と、体積後方散乱係数 $\beta(R)$ 、大気の透過率 $T(R)$ とに依存して変化する。後の二者は、大気状態を反映して変化する。

$Y(R)$ を理論的に計算で求めることは、光学素子の特性と幾何学的な配置が既知であれば、もちろん可能である。Harms et al. (1978) は、 $Y(R)$ の関数形を利用して、レーザーレーダーの受信信号のダイナミックレンジを抑える可能性について理論計算に基づいて論じている。しかし、 $Y(R)$ の関数形を理論的に正確に求めることは、(1) レーザービーム断面内の光強度分布、(2) 入射角に依存する干渉フィルターの透過特性などの不確定な要素のために、かなり難しい。

さらに、送信レーザービームと受信光学系の光軸を平行にしたり、決められた角度に設定したりすることは極めて困難な作業であり、とりわけ、車載型の移動タイプのレーザーレーダーの場合、実験地点で調整することは難しい。

Halldórsson and Langerholm (1978) は、 $Y(R)$ は光学系のミスアライメントに非常に影響を受けることを数値的に示した。したがって、理論計算によるのではなく、その他の方法で $Y(R)$ を決定できることが望まれる。

2. 原理

レーザーレーダー方程式 ((1) 式) によれば、距離の二乗を掛けた受信電力 $P_r(R)R^2$ は、大気の透過率を 1 と仮定すれば、体積後方散乱係数 $\beta(R)$ と幾何光学的効率の補正関数 $Y(R)$ に比例する。今、 $Y(R_*) = 1$ となるような適当な距離を R_* とすれば、 $Y(R)$ は次式で表される：

$$Y(R) = [P_r(R)R^2 / P_r(R_*)R_*^2] \times [\beta(R_*) / \beta(R)] \quad (2)$$

右辺の第一項は測定値から計算される。第二項の $\beta(R_*) / \beta(R)$ の値は、大気状態に依存してエアロゾル分布が変わるとき変化する。もし、エアロゾル分布が平均状態として空間的に一様であるとみなすことが出来れば、すなわち、

$$\overline{\beta(R)} / \beta(R) = 1 \quad (3)$$

($\overline{\quad}$ は時間平均を表す) であれば、 $Y(R)$ は次式で求められる。

$$Y(R) = \overline{[P_r(R)R^2 / P_r(R_*)R_*^2]} \quad (4)$$

図 2 には $P_r(R)R^2 / P_r(R_*)R_*^2$ の値の時間変化を描いている。これは $\beta(R) / \beta(R_*)$ と、未知な値 $Y(R)$ の積に等しい。ここでは、 $R_* = 300\text{m}$ 、 $R = 50\text{m}$ とおいている。図 2 のデータは国立公害研レーザーレーダーを用いたフィールド観測に基づくものである。(レーザーレーダーシステムの仕様を表 1 に示した。その他の詳細については文献 (Shimizu et al. 1980) を参照されたい)。フィールド観測は、1978 年 8 月 9 日から 12 日まで、東京の新宿で行った。測定は毎日、朝 4 時から 20 時までの間、およそ 30 分ごとに行った。図 2 のひとつの黒丸は、5 パルス/秒の繰り返しで約 5 分間、320 パルスの平均値を表している。この平均操作により、十分な S/N 比を持った平均分布を得ることが出来る。

図 2 に示されたように比の値はかなり大きな範囲で変化する。しかし、斜線を施した時間帯 (10～19 時) に限れば、比の値はほとんど一定値をとり、ばらつきは小さい。この時間帯は大気の下層では自由対流が活発な大気条件に当たっている。このとき、エアロゾルの鉛直濃度分布はほ

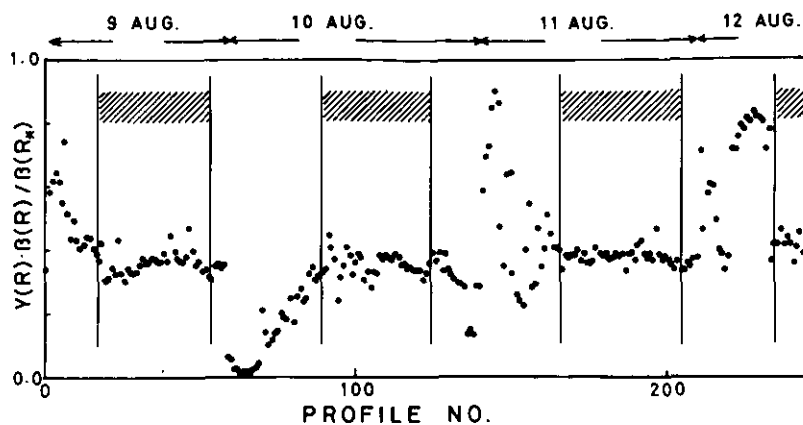


図2 $R = 50\text{m}$, $R^* = 300\text{m}$ としたときの距離自乗補正された信号光の比。すなわち、 $Y(R) \cdot \beta(R) / \beta(R^*)$
斜線は $10^h - 19^h$ の時間帯を示す。

表1 使用したレーザーレーダーシステムの仕様

レーザー	LAY117 (東芝)
種類	Nd: YAGレーザー
波長	$1.064\mu\text{m}$
出力エネルギー	0.1J/パルス
パルス幅	10ns
最大繰返し	40 パルス/s
受信望遠鏡	
型式	カセグレイン
口径	30cm (直径)
焦点距離	179cm
前置増幅器	Model 115 (PAR)
バンド幅	DC~50MHz
増幅率	10 倍, 100 倍
トランジェントレコーダー	DM901 (岩通)
最小サンプリング時間	10nsec
精度	8bit
メモリー	1024WORD/ch
チャンネル	2
感度	50mV フルスケール

とんど一様になっていると考えることができる。したがって、(3)式が成立し、(4)式から $Y(R)$ が求められる。 $R^* = 300\text{m}$ が適当であるかどうかは後で示される。図2の斜線を施した時間帯のデータから計算すると、高い精度で $Y(50\text{m}) = 0.366$ となる。

上述の方法を各々の距離について適用することにより、距離 R の関数として $Y(R)$ を求めることが出来る。図3にその結果を示す。縦の実線は標準偏差を表している。関数 $Y(R)$ は単調増加で、およそ 250m の距離で1に近づく。したがって $R^* = 300\text{m}$ とおくことは合理的と考えられる。大気の透過率を1とおく仮定は、この程度の近距離では、濃い霧や特に汚れた空気のように極端な場合を除いて十分に満足される。

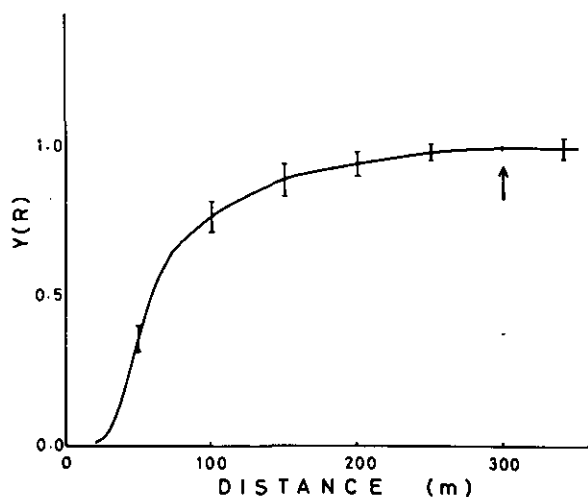


図3 (4)式から決定された幾何光学的効率の関数
縦線は標準偏差を表す。

ここで述べた方法の基本的な仮定は、平均化が適当になされたエアロゾル分布は、空間的に一様とみなすことができ、体積後方散乱係数 $\beta(R)$ の空間分布もまた一様になるという点にある。このような状態は対流混合の盛んな日中の測定のと看満足される。

この一様性の条件はレーザーレーダーを水平方向に向けて行う測定によっても満たされる。すなわち、水平方向のエアロゾル分布の時間平均はまた一様と見なすことが出来る。

3. 適用例

図4に、1978年8月11日の午前から午後にかけてのエアロゾル(体積後方散乱係数)の鉛直分布が描かれている。実線は前節で決定した幾何光学的効率の補正関数を用いて補正した鉛直分布を示している。破線は補正をする前の分布である。この例の場合、エアロゾルの鉛直分布に顕著な特徴は見られない。

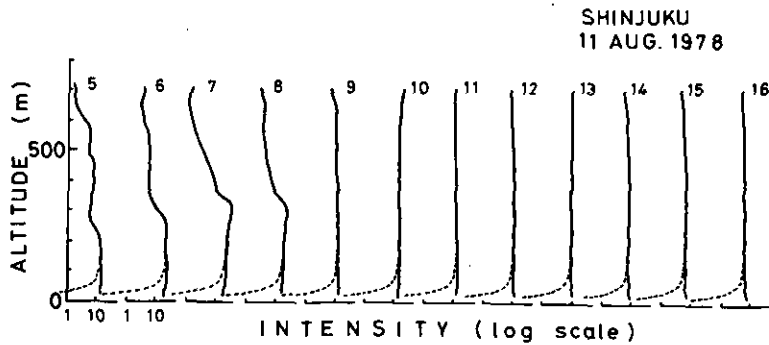


図4 エアロゾル(体積後方散乱係数)の鉛直分布時間変化
破線は $Y(R)$ の補正をしていない。測定は、1978年8月11日に新宿で行った。曲線につけられた数字は日本標準時。

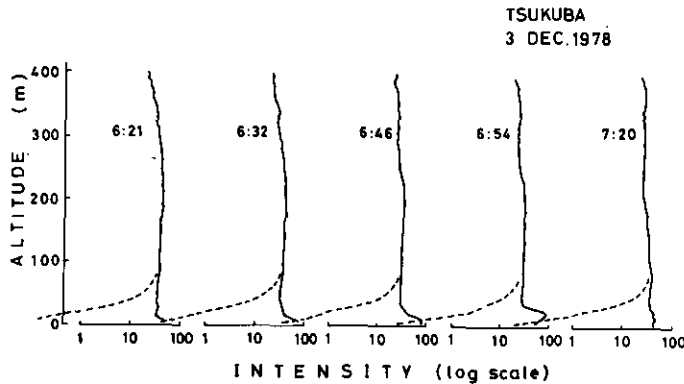


図5 図4と同じ
測定は1978年12月3日、筑波で行った。数字は時分を表す。

図5には、別の例が示されている。この測定は、1978年12月3日に、筑波学園都市内において行われた。レーザーレーダー送受信光学系のアライメントは実験ごとに違っているので、この例の補正関数は図3に示したものと異なる。図5では、幾何光学的效率について補正を施すことにより、地表付近のエアロゾル分布に顕著な時間変化があることが示されている。

4. 結 論

幾何光学的效率の補正関数は近距離からのレーザーレーダー受信信号を正しく解釈する上で、極めて重要である。理論的にこの補正関数を求めることも必要ではあるが、フィールド観測データだけに基づいて実験的に補正関数を決めることは有用かつ必須のことである。特に、レーザー

ビームと受信光学系の光軸の方向をフィールド観測ごとに調整しなければならないような場合には、この方法を採用する他はない。

ここで述べた方法は、レーザーレーダー方程式とフィールド測定データの統計的平均操作とにのみ基礎をおいており、理論計算を困難にする不確定な要素、たとえば、レーザービーム断面内の強度分布や干渉フィルター透過率の入射角依存性などを必要としないという利点を持っている。

大量の測定データの平均化操作を含むこの方法は、コンピューター制御のデジタルデータ収録方式を採用することによって可能になったものである。

これまで幾何光学的動率の補正関数を正しく求めることが出来なかったために解析の対象から除かれていた近距離からのレーザーレーダーデータは、この論文で提案した方法を採用することにより、正しく解釈することが可能となった。

引用文献

- Collis, R.T.H. (1970): Lidar. Appl. Opt., 9, 1782-1788.
- Collis, R.T.H. and P.B. Russell (1976): Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption. Laser monitoring of the atmosphere, E. D. Hinkley, Ed. (Springer-Verlag, Berlin) 380 pp.
- Halldórsson, T. and J. Langerholc (1978): Geometrical form factors for the lidar function. Appl. Opt., 17, 240-244.
- Harms, J., W. Lahmann and C. Weitkamp (1978): Geometrical compression of lidar return signals. Appl. Opt., 17, 1131-1135.
- Riegl, J. and M. Bernhard (1974): Empfangsleistung in Abhängigkeit von der Zielentfernung bei optischen kurtstrecken - Radargeräten. Appl. Opt., 13, 931-936.
- Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. Opt. Quantum, Electron., 12, 159-167.

III-3

車載型レーザーレーダー測定用プログラムの開発

Software programs for measurement by a computerized laser radar system

杉本伸夫¹・松戸 修²・清水 浩¹・笹野泰弘¹・
竹内延夫¹・奥田典夫¹

Nobuo SUGIMOTO, Osamu MATUDO, Hiroshi SHIMIZU, Yasuhiro SASANO,
Nobuo TAKEUCHI and Michio OKUDA

要 旨

国立公害研究所コンピューター化レーザーレーダーシステムは大気汚染をはじめ大気諸現象の観測を目的に設計、製作されている。その測定用ソフトウェアプログラムは、(1) デジタル化された大容量の空間分布データを高速で処理、収録すること、(2) 測定対象に応じた複雑な測定動作をコンピューターにより制御すること、さらに、(3) 取得したデータのリアルタイムの処理表示を行うこと、等の特徴を持っている。

Abstract

The mobile, computerized laser radar system at the National Institute for Environmental Studies was designed and constructed for field observations of air pollution and the atmospheric structure. The software measurement program is capable of 1) high-speed processing and storage of a large amount of spatial distribution data, as a standard computerized laser radar system, 2) computer control of the sophisticated steps required for measurement, and 3) realtime display of measured laser-radar data.

1. はじめに

1960年代初めにレーザーレーダーによる最初の観測 (Fiocco and Smullin, 1963) がなされて以来、これまで数多くのレーザーレーダー装置の開発が行われてきた。データ処理の手法に着目すると、初期のレーザーレーダー装置は、手操作、写真解析を行うものが主であった。新しい技術

-
1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町
The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environmental Division,
Tsukuba, Ibaraki 305
 2. 同 環境情報部 (現 分子科学研究所)
Environmental Information Division (Present address: Institute for Molecular Science)

の開発に伴ってアナログ処理方式 (Uthe ら, 1975), デジタル処理方式と, より高精度, 高速度のデータ収集の可能なレーザーレーダーシステムが開発されてきた。最近では, コンピューターを用いてデジタル方式によってデータ処理を行うレーザーレーダーの開発が多くなされている (Uthe ら, 1975; McCormik, 1976; Grams ら, 1975; Shimizu ら, 1980 など)。

国立公害研究所においては, 大気汚染をはじめ大気諸現象の観測を目的に, コンピューター制御車載型レーザーレーダーシステムの開発を行ってきた (Shimizu ら, 1980)。車載型システムは速い現象に高速で応答することを考慮して設計され, ソフトウェアプログラムは次のような特徴を持っている。

- 1) 高速でデータ処理収録が行えること。
- 2) 測定対象に応じた複雑な測定動作をコンピューターによって制御すること。
- 3) 測定に応じて適宜にリアルタイムのデータ処理表示を行うこと。

本論文では大気諸現象の観測に要求されるレーザーレーダーシステムの機能について述べ, どのような考察に基づいて設計された国立公害研究所コンピューター制御車載型レーザーレーダーシステムのために行った測定用ソフトウェアプログラムの開発について報告する。

2. レーザーレーダーシステムの機能

コンピューター制御レーザーレーダーシステムの開発においては, 大気諸現象の測定に要求されるシステムの機能の考察に基づいて, ハードウェアおよびソフトウェアの開発を行うことが重要である。

コンピューター制御レーザーレーダーシステムの行う機能は大きく分けて, 自動測定機能とデータ処理・表示機能の二つである。自動測定機能には, 測定対象に応じて, 架台のスキャン, データ取得速度, 測定の繰り返し等の異なるいくつかの測定モードが必要となる。また, データ表示においてもデータ量 (データ取得速度) に応じた適切な処理が要求される。

表1 レーザーレーダー測定対象の例と, 測定に要求されるレーザーレーダーの機能

測 定 対 象	測 定 動 作		データ表示
	ス キ ャ ナ	データ取得速度	
A 時間変化…混合層	THI	低	リアルタイム
B 速い現象…排煙拡散	RHI, PPI マルチ RHI, PPI	高	セミリアルタイム
風の測定	RHI, PPI	高	セミリアルタイム
C 空間分布…分布構造	RHI, PPI マルチ RHI, PPI	高	セミリアルタイム
汚染分布	RHI, PPI マルチ RHI, PPI	高	セミリアルタイム

レーザーレーダーによる測定対象としては例えば次のものが考えられる。混合層の時間変化の測定、排煙拡散の測定、空間相関法による風測定、エアロゾル分布構造の測定、汚染分布の測定などである。表1にこれらの測定に必要なレーザーレーダーの機能をまとめて示した。以下にこれらの機能について説明する。

一般的なレーザーレーダーの測定動作は THI, RHI, PPI である。THI (Time to height indication) は、架台を鉛直方向に固定し、エアロゾル一次元分布の時間変化を測定するモードである。RHI (Range to height indication), PPI (Plane to position indication) は架台を水平面あるいは鉛直面内でスキャンし、エアロゾルの二次元分布を測定するモードである。

これらに加えて、エアロゾル分布構造等、三次元データの取得を行う場合は、RHI を方位角を変えて繰り返すマルチ RHI, PPI を仰角を変えて繰り返すマルチ PPI を自動的に行う機能が必要となる。また、これらのスキャンの速度は、測定対象である大気現象の速度により、場合によっては可能な限りに高速が要求される。

レーザーレーダー測定はデータ量が非常に多いため、一般に測定データは磁気テープ等の外部記憶装置に記憶され、測定終了後、これを大型計算機にかけて解析する場合が多い。詳細なデータ解析は大型計算機で行う必要があることは言うまでもないが、測定データのモニターという観点から、収集したデータのリアルタイムの表示はシステムに要求される重要な機能である。現在のミニコンシステムの能力を考慮すると、高速のデータ収集が必要な測定においては、データ収集と同時に処理、表示を行うことは、処理時間の点から不適当であると考えられる。この場合は測定終了後、MT をプレイバックして処理を行うセミリアルタイム処理が適当である。一方、混合層の時間変化の測定の場合のようにデータ取り込み速度が比較的遅く、測定が長時間にわたって連続するような場合にはリアルタイムモニターは不可欠であり、ミニコンの能力としてもデータ取得と同時に目的に応じたいくつかの処理、表示を行うことが可能である。

表1に示したように、一般にスキャンを行う測定はデータ収集速度が速く、セミリアルタイム表示が適当であり、一方、THI 測定ではリアルタイム表示が可能である。後に述べるように、スキャン用の測定プログラムとリアルタイム表示を含む THI 測定用プログラムの二つのタイプのプログラムの作成を行った。

3. レーザーレーダーシステムの自動制御

(1) ハードウェア構成

前章で述べたシステムの機能は、レーザーレーダーシステムの個々のハードウェアの制御を行うことにより達成される。次に国立公害研究所車載型レーザーレーダーシステムのハードウェア構成の概要を述べる。図1に車載型レーザーレーダーの制御系統図を示す。

CPU は NOVA-02 である。コンピューター制御される機器は基本周辺機器 (コンソールタイプライター、ディスク、MT) の他にトランジェントレコーダー、架台、レーザー発振器、グラフィックターミナルである。

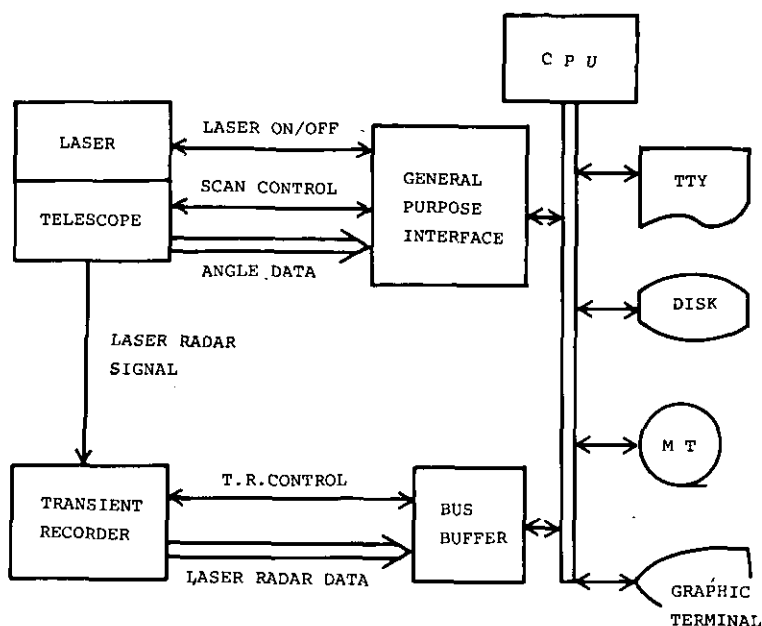


図1 国立公害研車載型レーザーレーダー制御系統図

トランジェントレコーダーは岩通 DM901 でゲートタイム最高 10ns で、最大 1024 WORD のデータを精度 8 bit で取得できる。トランジェントレコーダーに対しては、コンピューターから、パラメータ設定、データの取り込み、CPU メモリへのデータの DM 転送 (Direct Memory Access) の制御を行っている。コンピューターから設定するパラメータは取得データの WORD 数、チャンネルモード (CH1, CH2, DUAL), CLOCK RATE (ゲートタイム), DELAY, FULL SCALE LEVEL, である。

架台およびレーザーに対する制御信号は、General Purpose Interface (GPI) ボードより入出力される。架台についてコンピューター制御される項目はスキャン方向の設定、スキャン速度の設定、スキャンの START, STOP である。スキャン方向の設定は、UP, DOWN および CW, CCW である。スキャン速度は最高 10deg/s で 6 段階に切り換えられる。

またスキャナからは角度のデータが GPI ボードより 14bit のデータとしてコンピューターに取り込まれる。レーザーについての制御項目は、レーザー発振の ON, OFF である。レーザー繰り返し数については、マニュアルで設定を行っている。

(2) ソフトウェア構成

コンピューターシステムは NOVA -02, RDOS (Real-time Disk Operating System) によりプログラム管理されている。測定プログラム等のファンクションプログラムは実行形式のファイルで、DISK に格納しておくことにより必要に応じてコンソールタイプライタから機動をかけることができる。また、RDOS は Real-time clock を持っており測定プログラム内で測定時間の記録、測定

の実時間管理を行うことが可能である。

(3) 測定プログラム

前章で述べたように測定対象に応じて、MT へのデータの記録のみでなくリアルタイム表示を行う場合と、MT にデータを記録するのみで、測定終了後に別のプログラムで MT をプレイバックしてセミリアルタイム表示を行う場合の二つがあるため、このような二つのタイプの測定プログラムを開発した。

表 2 に現在までに作成したプログラム名およびその機能をまとめた。なお LIDAR 5 以前のは、SOS (Stand-alone Operating System) 等で作成されているのでここでは省略する。これらのプログラムは実際のフィールド観測により改良を重ねて来たものであり、現在、LIDAR 6D と、LIDAR 8 ですべての機能が可能である。

表 2 現在までに開発した測定プログラムとその機能

機 能 プログラム名	THI	RHI PPI	マルチ PHI マルチ PPI	時間管理 繰り返し	リアルタイム 表 示
LIDAR 6	○	○			
LIDAR 7	○	○		○	
LIDAR 6D	○			○	○
LIDAR 8	○	○	○	○	

測定プログラムの行う処理の主な項目は次のものである。

- トランジェントレコーダーのパラメータ設定
- トランジェントレコーダーへのデータ取り込み
- トランジェントレコーダーから CPU メモリへのデータ転送
- レーザー発振の ON, OFF
- スキャン方向、スキャン速度の設定
- スキャンの START, STOP
- 測定時間の読み込み
- スキャナ角度データの読み込み
- データの積算
- CPU メモリ上のデータの MT への出力
- CPU メモリ上のデータのディスプレイ

測定プログラムはこれらの処理を行うサブルーチンをメインプログラムから呼び出す形で構成されている。プログラム言語はトランジェントレコーダー、スキャナー、レーザー等の機器制御

のサブルーチンはアセンブラ，測定メインプログラムは FORTRAN IV で書かれている。表 3 にこれらのうちの主な処理ルーチンの処理時間をまとめて示す。レーザーレーダー測定におけるデータ取り込み速度はこれらの処理時間より制限を受ける。データ取り込み速度の最大値は，1 レーザーパルス当たりにトランジェントレコーダーに取り込む WORD 数および何回の積算を行って MT に出力するかによって大きく異なる。表 4 に実際の測定における測定パラメータの典型的な例を示す。このうち LIDAR 8 の例はシステムのデータ取り込み速度の限界に近い。

表 3 主な処理ルーチンの処理時間

処 理	処 理 時 間
データ書き込み	4.5ms
データ転送	$2\text{ms} + 2.5\mu\text{s} \times \text{WORD 数}$
データ積算	$1.8\text{ms} + 15.6\mu\text{s} \times \text{WORD 数}$
MT への出力	$20.5\text{ms} + 37.5\mu\text{s} \times \text{WORD 数}$

表 4 測定における典型的なパラメータ

	測定動作	レーザー繰り返し数 (pps)	積算回数	WORD 数
LIDAR 6D	THI	2	120	1024
LIDAR 8	RHI, PPI マルチ RHI マルチ PPI	20	1	512

測定データのリアルタイム，セミリアルタイム表示については章を改めて述べるので，ここでは高速スキャン用プログラム LIDAR 8 について概説する。図 2 に LIDAR 8 のフローチャートを示す。このプログラムは THI をはじめ RHI，PPI，マルチ RHI，マルチ PPI データの取得を自動的に繰り返し行う機能を持っている。スキャンにおけるスキャナーの制御はデータ取得カウント数を優先して行っている。すなわち，指定したカウント数のデータ取得をもって，1 スキャンを終了している。なお各データ取得ごとにスキャナ角度を読み込み，データと共に MT に記録している。以下にプログラムの動作をプロセスを追って説明する。

1) テレタイプから測定パラメータの入力を要求する。パラメータとして，スキャンモード (THI, RHI, PPI)，スキャンを行う面の数 (フローチャート中の COUNT 4)，スキャン面間のなす角度，それぞれのスキャン面内でのスキャン回数 (COUNT 3)，1 スキャンにおけるデータ取得回数 (COUNT 2)，積算回数 (COUNT 1)，次のスキャンまでの時間間隔，トランジェントレコーダーのパラメータ等を入力する。

- 2) 測定パラメータを MT に出力する。
- 3) スキャナのスタート点の角度を記憶する。
- 4) レーザーを発振させスキャンを開始する。
- 5) トランジェントレコーダーからデータを CPU メモリに転送し、必要な積算 (COUNT 1) を行ったデータを MT に出力する。
- 6) 指定した数のデータ (COUNT 2) を取得すると 1 スキャンを終了し、スキャン回数 (COUNT 3) を終了していれば、次のスキャンのための位置決めを行う。
- 7) 指定した時間間隔において次のスキャンを開始する。
- 8) すべてのスキャン面でのスキャンを終了した後、スキャナをスタート点に復帰する。

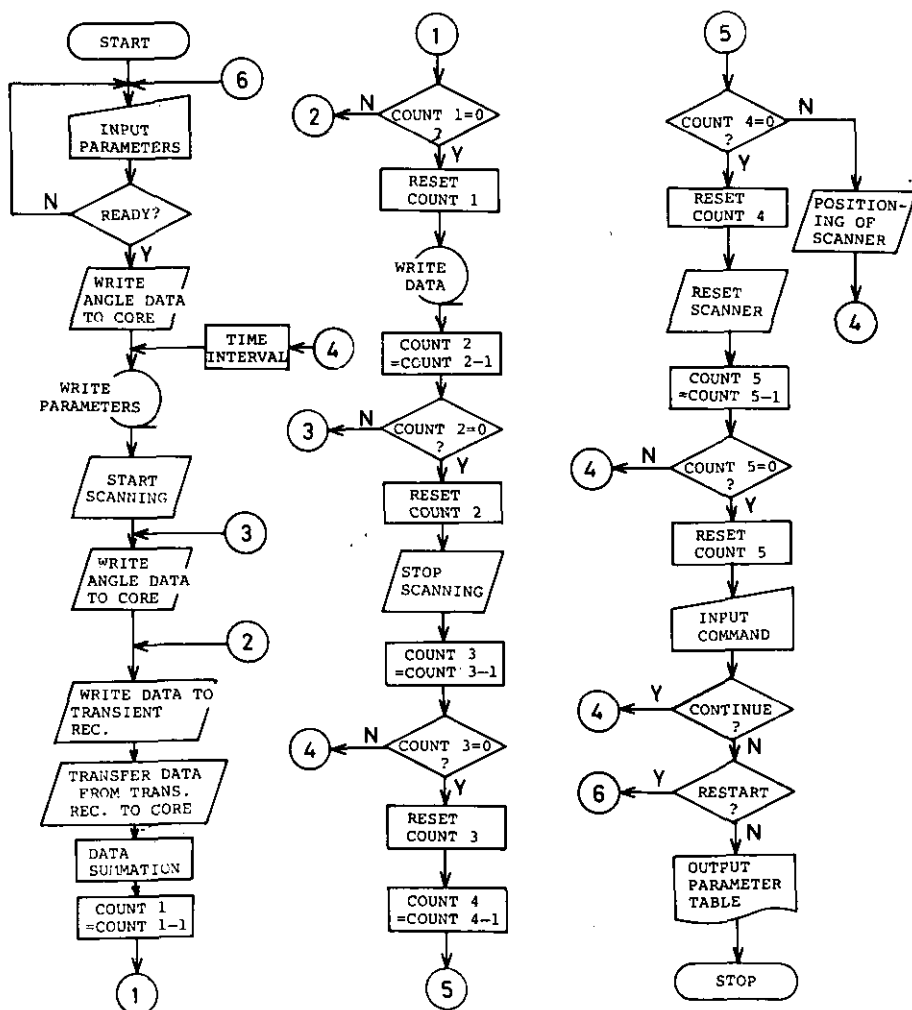


図2 プログラム LIDAR 8 のフローチャート

- 9) 以上の測定サイクルを指定回数 (COUNT 5) 繰り返す。
 - 10) テレタイプからのコマンド入力を要求する。オペレータは同一パラメータで測定を継続するか、パラメータを変更するか、測定を終了するか の指示を入力する。
 - 11) プログラムを終了する時、テレタイプ上に測定パラメータテーブルを打ち出す。
- 図 3 に LIDAR 8 による測定でのスキャナ動作の例を示す。

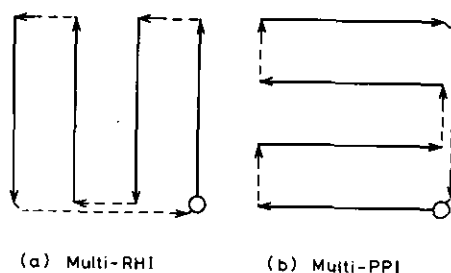


図 3 LIDAR 8 によるスキャナ動作の例
(a), (b) とも COUNT 3 = 1, COUNT 4 = 4 の場合。

4. リアルタイム表示

測定データのモニタという観点から収集したデータのリアルタイム表示はシステムの重要な機能である。既に述べたように測定プログラム中でリアルタイムの処理表示を行う場合と MT をプレイバックして別のプログラムによりセミリアルタイムの表示を行う場合がある。

THI 連続測定用に開発した LIDAR 6D は測定データのリアルタイム表示機能を持った測定プログラムである。このプログラムは THI データを指定回数積算の後 MT に出力する他、1 分ごとにその時点での最新データをグラフィックターミナル上に表示する。表示は A スコープ表示または、距離 2 乗補正して対数を取った A スコープ表示で、座標軸をずらして 1 画面に 30 本描かれる。30 分間で画面が一杯になると自動的にハードコピーを行う。図 4 に LIDAR 6D による A スコープ表示の例を示す。このプログラムにより、測定状況のチェックおよびデータの簡単な解析を行いながら、長時間にわたって THI 測定を行うことができる。

セミリアルタイム表示用には現在 3 種類のプログラムを用意している。これらを表 5 にまとめて示す。DISP 1 は 1 画面に 1 個のデータを A スコープ表示と、距離 2 乗補正して対数を取った A スコープ表示の両方で表示するものである。DISP 2 は距離 2 乗補正して対数を取った A スコープ表示を一画面に 30 本行うものである。DISP 3 は距離 2 乗補正したデータを 8 段階の濃淡表示したもので、距離軸は 1024 WORD を 64 WORD に圧縮し、一画面に 30 個のデータを表示している。表示は一画面分 (30 個) のデータ処理を終えた後、一画面内の最大値で正規化して 8 段階のレベルに分けて行っている。濃淡は文字を重ね書きすることにより表現している。DISP 3 による表示の例を図 5 に示す。

UPWRA JULY 79 REP 2, DLY -100, UPM 850, VFILL 0.1, TAU 20, AMP 10
 DATA NO 211 - 240 DATE 79/ 8/ 2 TIME 5:35:36 1024 WORDS

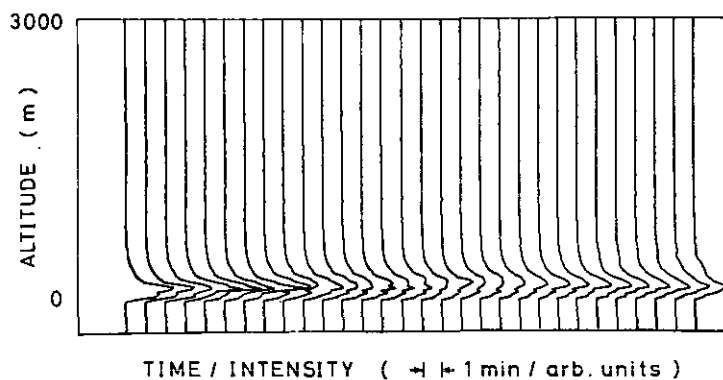


図4 LIDAR 6Dによるリアルタイム A スコープ表示の例

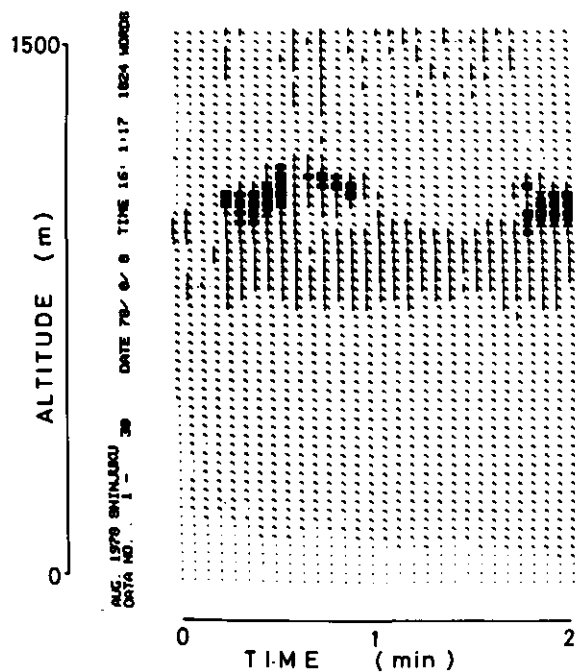


図5 DISP 3による散乱強度濃淡表示
 (セミリアルタイム) の例

表5 開発したセミリアルタイム処理プログラムとその機能

	一画面に表示される データ数	表 示 内 容
DISP 1	1	A スコープおよび R^2 補正した A スコープ
DISP 2	30	R^2 補正した A スコープ表示
DISP 3	30	散乱強度濃淡表示

まとめ

本論文では、大気諸現象の観測において要求されるレーザーレーダーの機能についての考察を述べ、これに基づいて行った、国立公害研究所車載型レーザーレーダーシステムのための測定用ソフトウェアプログラムの開発について述べた。レーザーレーダーシステムの行う機能は、データの自動測定および表示である。システムの測定動作については、測定対象に応じて、THI, RHI, PPI, マルチRHI, マルチPPI等のモードで測定を行う。表示については、データ取得速度に応じてリアルタイム処理またはセミリアルタイム処理を行う。

一般にスキャンを行う測定はデータ取得速度が速いためセミリアルタイム処理が適当であり、一方 THI 測定にはリアルタイムによる処理表示が不可欠である。このため二つのタイプのプログラムを開発した。

これらの測定プログラムにより、車載型レーザーレーダーシステムは測定対象に応じて有効に機能を発揮している。

引 用 文 献

- Fiocco, G. and L. O. Smullin (1963): Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60–140 km) by optical radar. *Nature*, 199, 1275–1276.
- Grams, G.W., E.M. Patterson and C.M. Wyman (1975) Airborne laser radar for mapping two-dimensional contours of aerosol concentration. *Opt. Quant. Elect.*, 7, 187–191.
- McCormick, M.P. (1976). Remote sensing energy related studies, ed. T.N. Vezzeroglu, Hemisphere Press,
- Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. *Opt. Quant. Elect.*, 12, 159–167.
- Uthe, E.E. and R.J. Allen (1975): A digital real-time lidar data recording, processing and display system. *Opt. Quant. Elect.*, 7, 121–129.

III-4

コンピューターによるレーザーレーダーデータの画像表示法

Display method of laser radar data using a computer system

清水 浩¹・笹野泰弘¹・安岡善文²

松戸 修²・竹内延夫¹・奥田典夫¹

Hiroshi SHIMIZU¹, Yasuhiro SASANO¹, Yoshihumi YASUOKA²,

Osamu Matsudo², Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

コンピューター化されたレーザーレーダーで取得した二次元データを、コンピューターの周辺表示装置で画像表示するための有効な方法を検討することにより、データ処理の高速化、高効率化が果たせる。

本文では、レーザーレーダーデータを表示するための方法として、カラーレベルスライス、グレイレベルスライス、点密度法の3種類の密度法および、等値線法、透視図法の計5種類を選び出し、カラーグラフィックディスプレイ装置に出力表示を行い、精度、効率等を検討した。

さらに、カラーグラフィックディスプレイ、グラフィックターミナル、ラインプリンター、XYプロッターの4種類のデータ表示装置について、表示装置の違いによる表示方法の特徴を比較した。

1画面に含まれるデータ量、表示効率等の定量的な比較においては密度法が優れていることが明らかとなった。実際の応用上は、密度法を第一義に考え、その他の方法は目的、内容、使用する表示装置等により使いわけることが重要であると考えられる。

Abstract

In computerized laser radar data processing, one important step to achieving high speed and high performance is to use a good data display technique.

-
1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町
The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan
 2. 同 環境情報部 (現 分子科学研究所)
ibid, Environmental Information Division (Present Address: Institute for Molecular Science)

This paper describes the two-dimensional data display methods using the peripheral systems of a computer.

There are five methods, in all. Color level slicing, grey level slicing and dot density belong to the density method category. The remaining two, the contour and perspective methods and the former three methods are compared to each other for accuracy, efficiency, etc., using color graphic display data.

The four peripheral systems which are compared are color graphic display, graphic terminal, line printer and XY plotter. The characteristics of each system are shown for use in laser radar data display.

Quantitative estimation, such as data amount per display and output efficiency, shows that the density method is the best. In the application of these methods, it is best to select the density method, and use the others as auxiliary methods.

1. はじめに

レーザーの発明以来、レーザーレーダーによる計測技術の進歩は著しく (Fiocco et al., 1964), レーザー発振器を中心とするハードウェア技術の開発 (Northend et al., 1966) と同時に、気象、環境分野における応用技術の開発 (Barrett et al., 1967) が急速に進められて来た。

特に、コンピュータを利用したレーザーレーダーのコントロール、およびデータ収集処理法 (Shimizu et al., 1980; Uthe et al., 1975; McCormick et al., 1976; Grams et al., 1975) が開発されて以来、長時間の、複雑な操作を要していたデータ収集の能力が大幅に改善された。これに伴い、大気状態の2次元的变化を画像データとして容易に得ることが可能となった。

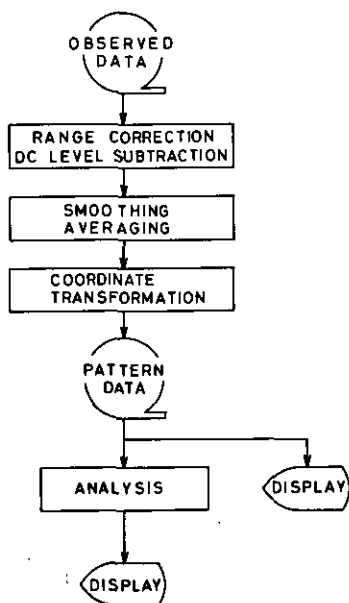


図1 レーザーレーダーデータ処理の過程

以上のような状況の下で、レーザーレーダーを、より有効に使用するためには、データの処理と解析の過程も大幅に高速化、簡易化する必要が出てくる。

ここで、レーザーレーダーデータ処理の過程を概括すると、図1に示すごとくである。すなわち、まず、収集されたデータに、レーザーレーダー特有の、距離に関する補正等を加える。それから、補間、平滑化などの数値処理を行う。さらに、レーザーレーダーデータは極座標平面でデータが収集されるので、これを使用が容易な直角座標に変換する。このように前処理されたデータを基本データとして、目的とする結果を得るため、統計的あるいは物理的解析を加える。

このような処理における各過程の能力それぞれを向上させることはもちろん必要であるが、中間データあるいは結果を有効に表示することも重要である。なぜなら、画像データは一般に1画面の中に多くの情報を含むために、その内容の把握の容易さ、表示の容易さが、結果の良否に大きく依存するためである。

そのために、過去において、画像データを表示するための方法が多くの応用分野で盛んに行われている。古くは地図や、各種統計資料の表示を行うための研究が進められ、最近ではリモートセンシングデータの表示の分野での進歩が著しい。これらの分野におけるデータと比較して、レーザーレーダーにより得られるパターンデータの特徴としては、

- 1) データ量が大量であること、
 - 2) 連続的に変化するデータであること、
- などが挙げられる。また、応用上の要求としては、
- 1) 極めて短時間に変化する現象を捉える必要があること、
 - 2) データ収集後、短時間のうちに結果が要求される場合があること、
- などがある。また、表示の内容は、
- 1) 平面データの個々の値、
 - 2) 同一状態の空間的広がり、
 - 3) 画面に含まれる状態量の全量、
 - 4) 画面内での状態変化、
- 等が挙げられる。

これらの性格を持つレーザーレーダーデータの表示には、他の分野における表示と比較して、著しい高速性と、内容の理解の容易さが要求される。従って、レーザーレーダーの表示法について、定量的および、目的に応じた定性的な考察が必要であると考えられる。

しかしながら、過去において、レーザーレーダーにより得られる画像データの表示法そのものに着目して、定量的あるいは定性的な比較や、詳しい解析等が行われたことはなかった。

本論文では、以上のようなレーザーレーダーデータ表示の応用上の重要性にかんがみ、その表示法について系統的な検討を行うことを目的としている。

ここでは、まず、コンピューター画像データを表示するために使用されて来た表示法 (Smith, 1975; Gray et al., 1975; Thomson et al., 1978; Davis et al., 1975) のうちから、レーザーレーダ

ーデータ表示が可能な方法 (Endlich et al., 1979; Hoff et al., 1979; Werner, 1977) を選び出し、それらの特性を実際のデータ表示例を示しながら比較を行う。また、表示装置の違いによる表示法の比較、検討を行う。

2. レーザーレーダーの構成とデータ収集法

使用したレーザーレーダーはフィールドでの大気汚染や気象状態を観測するために開発されたもので、ミー散乱方式のものである。(詳細は本報告書のレーザーレーダーのハードウェアの項参照)。この装置は、特に、速い速度で変化する現象、たとえば、排煙の拡散等を測定するために、高速繰返し可能なレーザーと、高速のデータ収集装置および、高速スキャナーを備えている。また、フィールドでの測定のために計測車に搭載している。

この装置は現在世界のすう勢となっている、コンピューターコントロールされたレーザーレーダーとほぼ同一の形式を持つ。すなわち、レーザーレーダー受信信号はトランジェントレコーダーを使用して、高速 A/D 変換を行い、そのデータはミニコンピューターの記憶装置に貯えるという形式である。

データの収集は、コンピュータープログラムの管理の下で自動的に行われる。得られたデータの簡単な計算と実時間での表示はミニコンピューターで行い、データの解析と表示は大型コンピューターとその周辺機器で行われる。

3. レーザーレーダーデータの表示に適した表示法と、その比較

従来、コンピューターによる画像データを表示するために使用されて来た方法は数多くある。それらを大別すると以下の通りである。

1) 色の濃淡あるいは色調の違いで表示するもの。ここでは、これらを総称して密度法と呼ぶことにする。

2) 線で囲まれた領域で表示するもの。この中には地図の等高線を示すためなどに使用される等値線法、立体的な状態を示すために良く用いられる透視図法が含まれる。

3) 図形の形状や大きさで表示する方法。これは統計的な量を示す時などに良く使用されるが、円の大きさ等で状態を表示する場合などに良く見受けられる。

4) 図の中に記入された数値の大きさで表示するもの。

等である。これらの方法は一般に、連続的なデータを表示するか、離散的なデータを表示するかにより使いわけが成されている。すなわち、ここで述べた前二者の方法は連続的データの表示に、後二者は離散的データの表示に便利である。

ところで、レーザーレーダーでは逆転層と関連する混合層内のエアロゾル密度の観測 (Viezee et al., 1969)、排煙監視 (Hamilton et al., 1979)、気象観測 (Shimizu et al., 1977) (Takeuchi et al., 1978)、雲の観測、降雨量の観測など多くの測定が行われている。これらは信号強度の平面的変化あるいは、空間と時間の変化の 2 次元的な連続データとして得られる。それゆえに、レーザーレ

ーダーデータの表示には、密度法、等値線法、透視図法等が有効である。

3.1 密度法 (Density Method)

密度法はXY座標系のXY座標軸に空間あるいは時間の軸をとり、濃淡あるいは色調の違いで信号の強さを表現する。密度法は使用する表示装置により、さらに細かく分けられる。それらはカラーレベルスライス (Color level slice)、グレイレベルスライス (Grey level slice)、点密度法 (Dot density) である。カラーレベルスライスは色の種類と明度により信号強度を表示するもので、グレイレベルスライスはモノクロームのブラウン管の明度により表示するものである。さらに点密度法はラインプリンタ (以下LPと略す) やXYプロッターなどの様に、濃淡レベルが1種類しかない装置を使って濃淡の違いを表示する方法で、単位面積当たりに塗りつぶされた面積の大きさが明度に相当する。LPなどを用いて行うオーバープリンティングはこの範ちゅうに入る。

3.2 等値線法 (Contour Method)

等値線法は平面データで値の等しいものを線でつなぐものである。XY座標の座標軸には空間あるいは時間の軸をとる。等値線法においては、しばしば値の大小の関係が不明瞭なことがある。これを改善するために、シャドウイングの技術や、線の太さを変える技術なども開発されている (Davis et al., 1975) が、ここでは基本的な等値線法を検討の対象とする。

3.3 透視図法 (Perspective Method)

透視図法は平面に座標軸を3軸用意し、二つの次元は空間あるいは時間の座標に用い、他の1軸でデータの値を表示する。この技法は、コンピューターによる表示で、立体的な状態を表す際に用いられる。

透視図法には次節で述べる、座標軸を2軸としたものや、hidden lineを消去しないものなど、簡易型のものもあるが、ここではperspective blockdiagramまたはfishnet plotと呼ばれている (Davis et al., 1975) 通常用いられている方式を比較の対象とする。

3.4 各方式によるレーザーレーダーデータの表示例

ここでは、レーザーレーダーデータの典型的な例を2種類取り上げ、各表示法に従って表示した結果を示す。これらの例は、すべて、筆者の1人が開発したカラーグラフィック処理装置 (安岡, 1979) で処理と表示を行わせたものである。表示には512×512個のピクセルを持ち、赤、緑、青のそれぞれのレベルを256レベル持つカラーグラフィックディスプレイ装置を使用している。

図2から図6は逆転層高度の時間的変化を捉える目的で測定したデータを表示したものである。これらの表示に使用したデータは、128個×128個のデータ数と、256レベルの信号強度の値を持つが、各表示例においては、それぞれ適当に間引いてある。図2はカラーレベルスライスで表示した例である。この例では1データ当たり16ピクセル用いて、128×128個のデータを表示して

いる。また強度レベル数は10レベルとし、最も強い値を暗い赤で表し、最も弱い値を明るい青で表示している。図3はグレイレベルスライスで表示した例で、データ数、強度レベルともにカラーレベルスライスと同じである。強度は強くなるほど黒く表してある。図4は点密度法の表示例である。この例ではグレイレベルスライスとの比較のため、 43×43 個のデータを9レベルに分割して表示している。図5は等値線法の例である。ここでは 128×128 個のデータを5レベルに分割している。図6は透視図法の例である。この表示では 32×32 個のデータを20レベルに分割している。等値線法および透視図法では、線の重なりが生じるために、データ数あるいはレベル数を余り増やすことは出来ない。(図2、図7は論文末に掲載)。

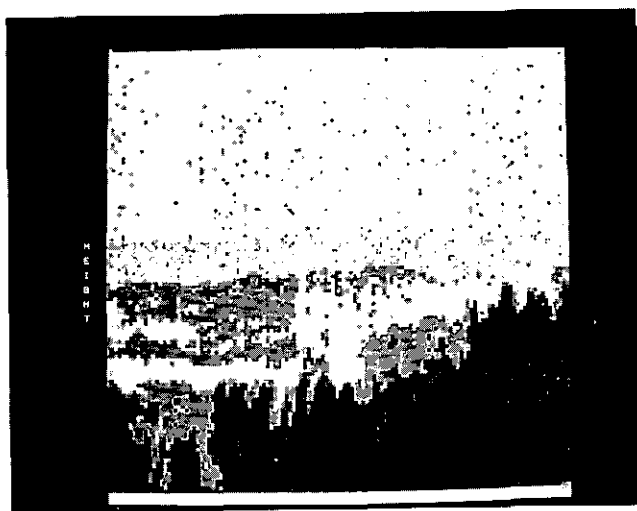


図3 グレイレベルスライスの表示例 (エアロゾル空間分布の時間変化)

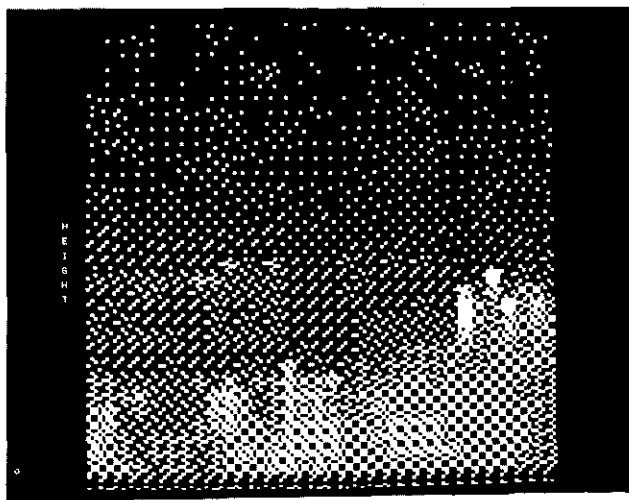


図4 点密度法の表示例 (エアロゾル空間分布の時間変化)

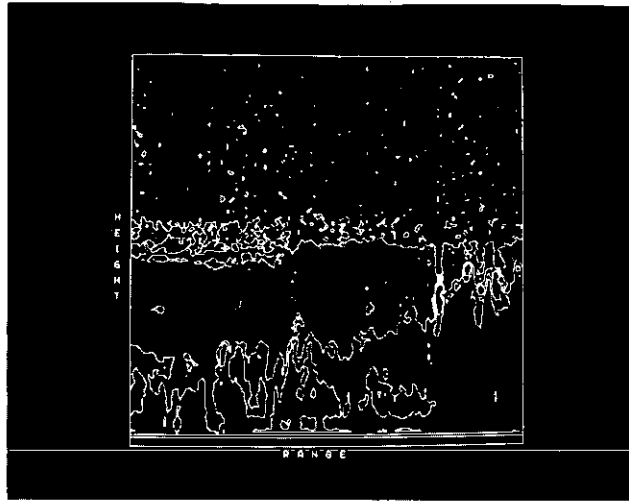


図5 等値線法の表示例 (エアロゾル空間分布の時間変化)

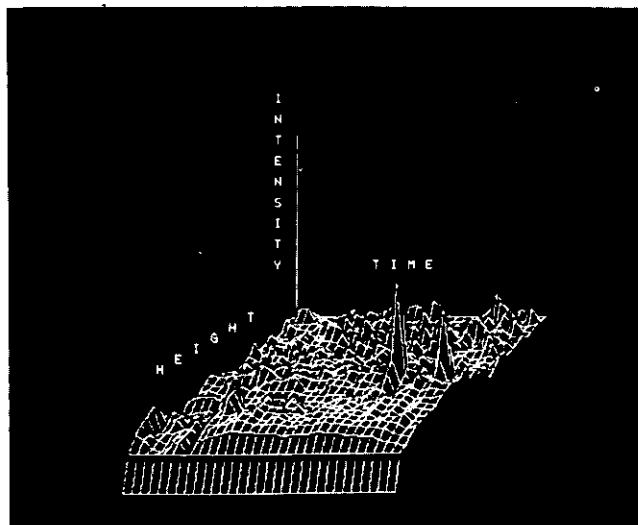


図6 透視図法の表示例 (エアロゾル空間分布の時間変化)

図7から図11までは、排煙の拡散を測定する目的で、その断面を測定したデータを、図2から図6までと同様に5種類の方法で比較した例である。各図のデータ数とレベル数は、図7；124×64データ、10レベル、図8；124×64データ、10レベル、図9；43×24データ、9レベル、図10；128×64データ、5レベル、図11；64×32データ、20レベルである。

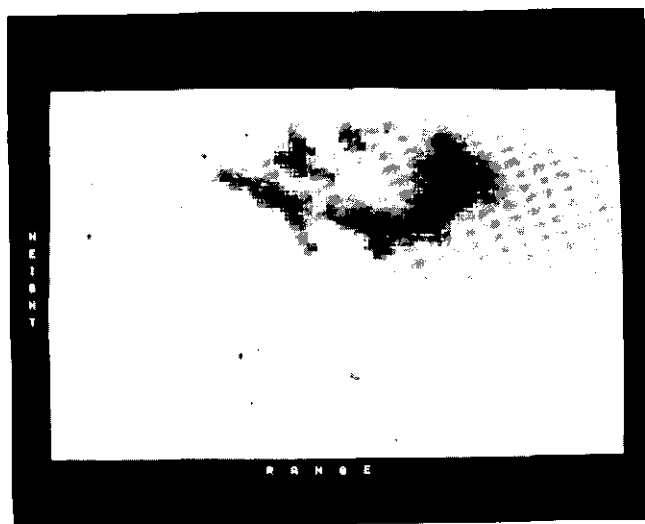


図8 グレイレベルスライスの表示例（排煙の断面）

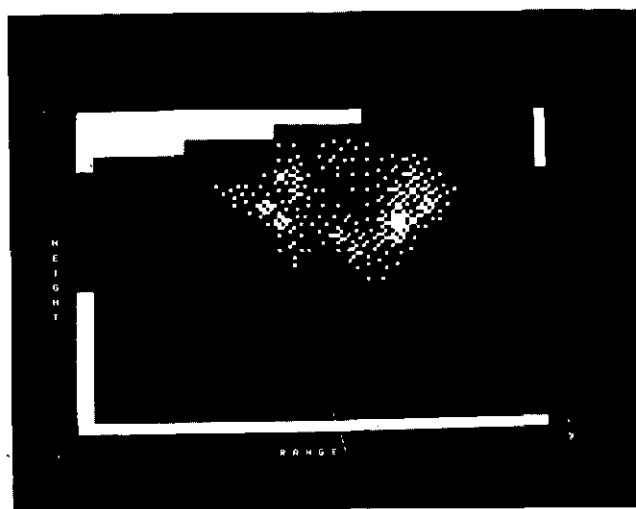


図9 点密度法の表示例（排煙の断面）

3.5 内容の理解の容易さの比較

各方式の内容の理解の容易さを決定する尺度は数多くあるが、ここでは人間の感覚的なものから来る、いわゆる human interpretation の容易さと、定められたスペースの中にどれだけのデータが盛り込めるかという、情報量を検討の対象とする。情報量はデータの数と、個々のデータの値の変化がどれだけのレベルで表示可能かの二つの量に依存する。各方式について、これらの値を求めた結果を表1に示す。表1は、図2から図11の表示に使用したディスプレイ装置を使用する

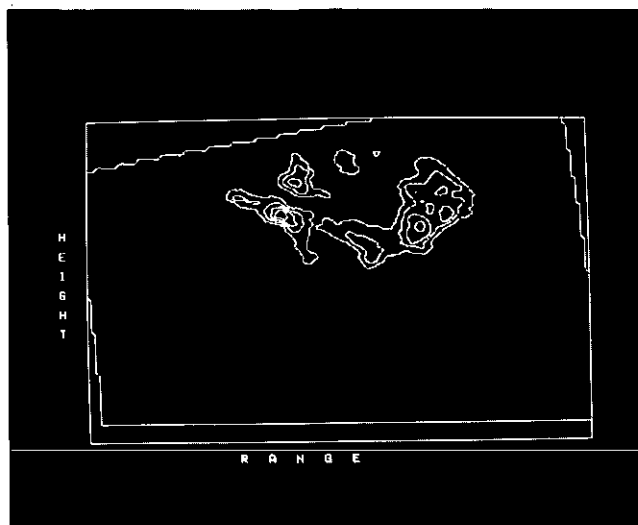


図10 等値線法の表示例（排煙の断面）

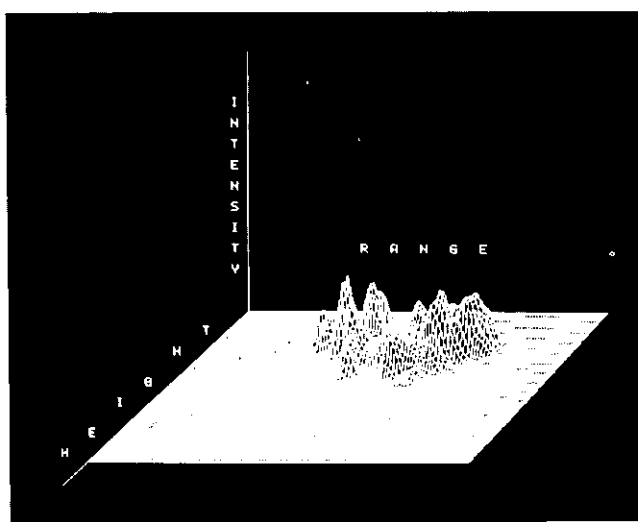


図11 透視図法の表示例（排煙の断面）

場合について計算したものである。

表1において、一つのデータポイントを表示するために必要とされるピクセルの数は次の通りである。まず、カラーレベルスライス、グレイレベルスライスでは最低1ピクセルで表示可能である。点密度法では強度レベルと等しい数のピクセルが必要である。すなわち、強度レベルを9レベルとすると、9個のピクセルが必要となる。等値線法、透視図法では隣接する2本の線が重ならないためには最低 2×2 ピクセル必要である。しかし、透視図法で実際にデータを表示して

表1 レーザーレーダー表示法の1画面当りに表示可能なデータ数、密度の比較

表示法 比較項目	密 度 法			等値線法	透視図法
	カラー レベルスライス	グレイ レベルスライス	点密度法		
データポイント数/画面	$2^{18}(512 \times 512)$	$2^{18}(512 \times 512)$	$\sim 2^{15}(170 \times 170)$	$2^{16}(256 \times 256)$	$2^{14}(128 \times 128)$
同上 (実用的上限)	2^{18}	2^{18}	$\sim 2^{15}$	2^{14}	2^{12}
強度レベル数	2^{24}	2^8		2^7	2^8
同上 (実用的上限)	100	10	9	10	64
データ量/画面	2^{42}	2^{26}	2^{18}	2^{23}	2^{22}
同上 (実用的上限)	2^{25}	2^{21}	2^{18}	2^{17}	2^{16}

(ピクセル数 512×512 , 強度レベル数 2^8 , 色調 RGB 3 色のカラーグラフィックディスプレイ装置)

みると、図6および図11からも分かる通り、 512×512 ピクセル内に 32×32 あるいは 64×64 データ程度が、隣接する2本の線を明瞭に分離して表示可能なデータ数の限界と考えられる。

1画面の中に表示可能なレベル数は次の通りである。まず、カラーレベルスライス、グレイレベルスライスでは表示装置の明度の分解能と同じレベル数の分解が可能である。しかし、実用的には人間の目で見て容易に判別可能なレベルはグレイレベルスライスでは10レベル程度である。カラーレベルスライスでは色調は3原色使用可能であるが、これら3原色を使用すると却って強度の違いの判別が困難となるため、2種類にとどめる必要がある。そして各色10レベル程度の判別が可能であるから、全体として100レベル程度の判別は容易である。等値線法では512ピクセルを一つのデータポイントで割った256レベルまでの判別が可能であるが、実用上は隣接するレベル間の線の重なりを防ぐため、10レベル程度が実用上の限界と考えられる。透視図法でも等値線法と同じ理由で、64レベル程度が限界である。

表1と前述した表示例から、各表示法の内容の理解の容易さが明らかとなる。1画面に盛り込むことが可能なデータ量の点から見ると、レベルスライスの方法が最大である。また、human interpretationの容易さについては、データの内容、目的等により大きく異なるため、図2から図11に示した典型的な例を参考にして決定されうるものである。一般的には次のようなことが言える。

- 1) エアロゾル密度の観測、気象状態の観測などで、状態の時間的あるいは空間的な変化の把握には密度法が良い。
- 2) 気象状態観測、排煙の濃度観測などで、データポイントの絶対的な値の把握には、密度法、透視図法が良い。
- 3) 排煙の拡散など、状態の広がりをパターンとして捉えるには等値線法が優れている。
- 4) 排煙の全量や、汚染質の全量など、画面内に含まれる情報の量的な把握には透視図法が有利である。

3.6 各方式の表示効率

各方式の表示の容易さを表示効率という言葉で表すとする、表示効率はプログラミングの容易さ、プログラムのステップ数、計算スピード、表示スピードにより規定される。これらはデータ、コンピューター、システムソフトウェアの違い等により大きく異なるので定量的な比較は難しい。大よその目安として、図2から図11までを表示するために必要としたプログラムのステップ数と計算スピードを求めると、表2に示す通りであった。ここで用いている計算機は HITAC 8450 である。この結果では、密度法が最も優れていることが分かる。なお、表示スピードはカラーグラフィックディスプレイ装置を使用する場合には、表示法、内容にかかわらず15秒であるが、次節で述べるように、表示装置の違いにより大きく異なる。

表2 レーザーレーダーデータ表示法の表示効率の比較

	密 度 法			等値線法	透視図法
	カラー レベルスライス	グレイ レベルスライス	点密度法		
プログラムのステップ数	98	98	85	154	132
計算速度 (CPU 時間)	60"	60"	55"	4'14"	3'13"

4. レーザーレーダーデータ表示に適した表示装置とその比較

コンピューター周辺のデータ表示装置は数多くあるが、平面的なデータの表示にはカラーグラフィックディスプレイ、モノクロームグラフィックディスプレイ、LP、XYプロッタ等が有効に使用出来る。これらの表示装置の違いにより、前節に述べた表示方法の選択法や特性が変わってくる。ここでは、表示装置の性能、特徴を述べるとともに、各表示装置によるデータの表示結果を示し、各装置の比較、検討を行う。

4.1 データ表示装置の性能上の比較

ここでは、LP、XYプロッター、グラフィックターミナル、カラーグラフィックディスプレイ装置についての性能上の比較を行う。比較に用いた各装置の型名はそれぞれ、HITACHI-H-8246-12、FACOM-F-6201-D、TECTRONIX-4010、GRAPHICA-M-508である。

表3に、これらの装置の性能の概要を示す。表示面積はグラフィックターミナル、カラーグラフィックディスプレイ等のブラウン管を用いた装置では管面の大きさにより決定される。LP、XYプロッタでは1ラインの幅は紙の幅により決まるが、長さ方向は理論的には無限大の長さになる。表示容量はカラーグラフィックが色の変化と明度の変化を表せるので最大である。空間的な密度はXYプロッターが最大である。信号レベルの分解能はカラーグラフィックディスプレイのみが8 bitsのレベルを持ち、他は2レベルである。以上の特性は情報量の違いに関することである。

表3 表示装置の特性

	ラインプリンター HITACHI H-8246-12	XYプロッター FACOM F-6201-D	グラフィックターミナル TELECTRONIX 4010	カラーグラフィック GRAPHICA M-508
表示面積	325 (cm/line)	27 (cm/line)	19.1×14.3 (cm ² /frame)	25×25 (cm ² /frame)
表示容量	132 (char/line)	2700 (step/line)	74×34(char/frame) 1024×780(dot/frame)	512×512 (piccell/frame)
レベル分解能	2	2	2	2 ⁸
長さ分解能	2 (mm/char.)	0.1 (mm/dot)	2.6(mm/char.) 0.2(mm/dot)	0.5 (mm/dot)
表示速度	10 (line/s)	400 (step/s)	1200(char./s) 400(dot/s)	0.67 (frame/s)
機能	キャラクタ	グラフィック	キャラクタ&グラフィック	キャラクタ&グラフィック

表示速度はカラーグラフィックディスプレイが最も速く、XYプロッターが最も遅い。表3の最下欄の機能の欄は各装置における有効な表示機能を示したものである。LPは文字を書くのに適している。XYプロッターは線を描くのに適している。ブラウン管を用いる装置ではそのどちらにも適している。

以上の性能上の違いの他に、各装置にはそれぞれに特徴・欠点がある。それらは表4にまとめてある。

表4 表示装置の利点・欠点

装 置	利 点	欠 点
ラインプリンター	コンピューターの周辺装置として最も一般的であるため、ユティリティが豊富でプログラミングが容易	データ表示密度が小さい
X Y プロ ッ タ ー	分解能が高い	表示速度が遅い
グラフィックターミナル	軽量・堅牢で持ち運び自由	表示容量が小さい
カラーグラフィック	あらゆる表示機能を持つ	機器が高価

4.2 データ表示装置によるレーザーレーダーデータ表示例

先に述べたデータ表示装置を用いてレーザーレーダーデータを実際に表示した例を示し、各装置の特徴を検討する。

図12はLPを用いた表示例である。この表示は点密度法に属するオーバープリンティング(重ね打ち)の方法で表示したものである。データは図2から図6までを表示したものと同一である

が、データポイントの数は132×398である。LPを用いる表示法ではオーバープリンティングの
みが実用的である。

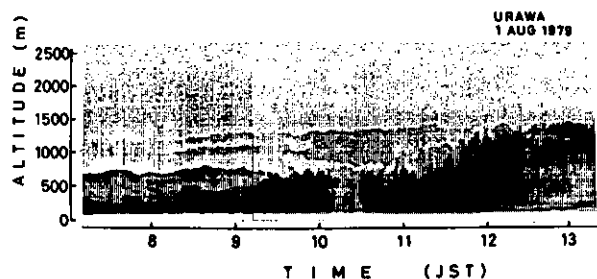


図12 ラインプリンターを用いた点密度法（オーバープリンティング）の表示例

図13はXYプロッターを用いて表示した透視図法の例である。図13は図11と同じ内容を表示しているが、XYプロッターは高密度の表示が可能であるため、1本1本の線が明瞭に分離されている。なおこの表示には30分の時間を要している。

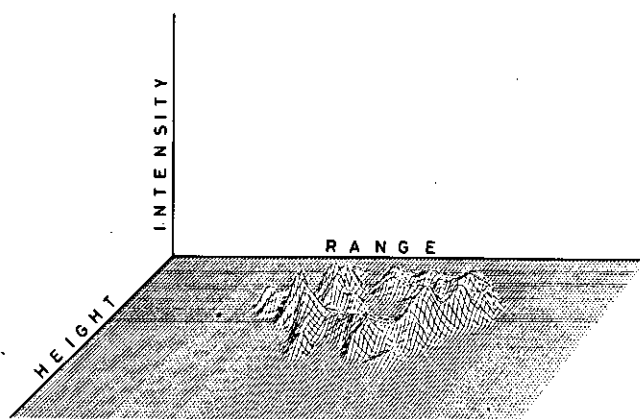


図13 XYプロッターを用いた透視図法の表示例

図14、図15はいずれもグラフィックターミナルを使用した例である。グラフィックターミナ
はキャラクターおよびグラフィックの両方の機能を持つが、図14はキャラクタの機能を生かして
表示したオーバープリンティングの例である。図15はグラフィックの機能を生かした例である。
この表示では縦軸に高度、横軸に強度をとり、時間の経過とともに強度の0レベルを等間隔だけ
移動させている。この表示は時間と高度の関係を表す線は省略しており、簡易型の透視図法と言
うことが出来る。

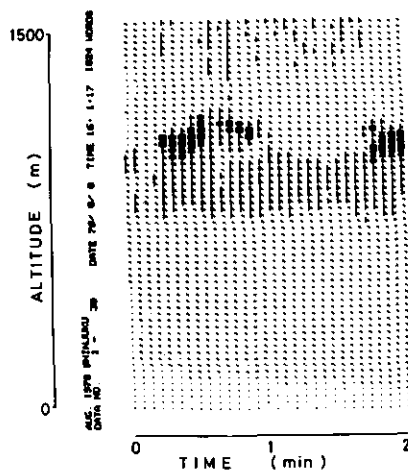


図14 グラフィックターミナルを用いた点密度法（オーバープリンティング）の表示例

ALC. 1978 SHIMAZU
DATA NO. 1 38 DATE 78/8/8 TIME 16:1:17 1624 WORDS

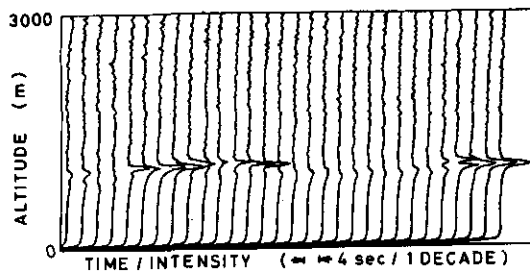


図15 グラフィックターミナルを用いた透視図法（簡易型）の表示例

表5 表示装置の違いによるデータ表示法の可否

	密 度 法			等値線法	透視図法
	カラー レベルスライス	グレイ レベルスライス	点密度法		
ラインプリンター	×	×	○		
X Y プロッター	×	×		○	○
単色グラフィック	×	○	○	○	○
カラーグラフィック	○	○	○	○	○

以上の例よりも明らかなように、表示機器の違いによっても、表示法を選択する必要がある。ここで、その関係を示すために、表5に表示装置の違いによるデータ表示法の可否をまとめて示す。同表において、○印が各表示法を用いて表示可能な表示法であり、×印が不可能なものである。ブランクは不可能ではないが実用的でないものである。この表より、密度法に属する表示法ではキャラクタの機能を持つ表示機器を使い、等値線法、透視図法ではグラフィックの機能を持つ機器を使用するのが良いという結論が得られる。

5. まとめ

本文では、レーザーレーダーの2次元的数据をコンピューターの周辺機器を用いて有効に表示を行うことにより、データ処理が高速化、簡易化されるとの観点から、表示法についての研究を行った結果を示した。ここでは数多くの表示法の中から、とくに密度法、等値線法、透視図法を選び出し、実際の表示例を示しながら比較・検討を行った。また、4種類の周辺装置を用いてこれらの表示法の性格の違いを比較した。

その結果、定量的な比較、とくにレーザーレーダーデータ処理には高速性が要求されるとの立場からは、密度法に属する方法が最良であるとの結論が得られた。それゆえに、密度法を使用しても内容の理解が十分に行い得るような目的の場合にはこの方法を使うことが効率の良いデータ処理に結びつく。しかし、密度法はキャラクタ的な表示法であるため、使用目的や表示の内容、使用する表示装置の違いによっては、グラフィック的な表示も有効である。従って、各表示法の特徴を認識した上で使い分けることが、最良の方法のように思われる。

本文では、検討の対象をレーザーレーダーデータのものに限定したが、同種類のデータが得られるソーダーやマイクロ波レーダーのデータ表示にも本論文の結果は応用が可能である。

引用文献

- Barrett, E.W. and D. Ben-Dov (1967): Application to the lidar to air pollution measurements. *J. Appl. Meteor.*, 6, 500-515.
- Davis, J.C. and M.J. McCullagh (1975): Display analysis of spatial data. John Wiley & Sons, London.
- Endlich, R.M., F.L. Ludwig and E.E. Uthe (1979): An automatic method for determining the mixing depth from lidar observations. *Atmos. Environ.*, 13, 1051-1056.
- Fiocco, G. and G.W. Grams (1964): Observation of the aerosol layer at 20km by optical radar. *J. Atmos. Science*, 21, 323-324.
- Grams, G.W., E.M. Patterson and C.M. Wyman (1975): Airborne laser radar for mapping two-dimensional contours of aerosol concentration. *Opt. Quantum. Electron.*, 7, 187-191.
- Grays, G.R., R.J. Scrafijn, D. Atlas, R.E. Rinehart and J.J. Bayajian (1975): Real-time color Doppler radar display. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 56, 580-588.
- Hamilton, P.M. (1979): Application of pulsed-light range finder (lidar) to the study of chemistry plumes. *Roy. Soc. London Phil. Trans.*, A265, 153-172.
- Hoff, R.M. and F.A. Froude (1979): Lidar observation of plume dispersion in northern Alberta. *Atmos. Environ.*, 13, 35-43.

- McCormic, M.P. (1976): Remote sensing energy related studies. ed. T.N. Vezzeroglu, Hemisphere Press, Washington, 113-218.
- Northend, C.A., R.C. Honey and W.E. Evans (1966) Laser radar (lidar) for meteorological observations. *Rev. Scient. Instr.*, 37, 393-400.
- Smith, E.A. (1975): The McIDAS system. *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, GE-13, 123-136.
- Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena, *Opt. Quantum. Electron.*, 12, 159-167.
- 清水 浩・小林喬部・稲場文男 (1977) : 対流圏大気の多元情報測定および処理のためのレーザーレーダーシステム, 電子通信学会論文誌, 60-C, 162-169 .
- Takeuchi, N., H. Shimizu, H. Ueda, Y. Yasuoka and M. Okuda (1977): A method for the spatial distribution measurement of wind velocity by a computer-controlled lidar, paper presented in 8th International Laser Radar Conference, June 7-9th, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A.
- Thomson D.W. and J.P. Scheib (1978): Improved display techniques for sodar measurements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 59, 147-152.
- Uthe, E.E. and R.J. Allen (1975): A digital real-time lidar data recording, processing and display system. *Opt. Quantum. Electron.*, 7, 121-129.
- Viezee, W. and J. Oblanas (1969) Lidar-observed haze layers associated with thermal structure, *J. Appl. Meteorol.*, 8, 369-375.
- Werner, C. (1977): Assess II lidar experiments. paper presented in 8th International Laser Radar Conference, June 6-9th, Philadelphia Pennsylvania, U.S.A.
- 安岡善文・宮崎忠国 (1979) : 環境画像情報システム-EPSEN の試作. 第5回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 45-48, 1979年11月東京.

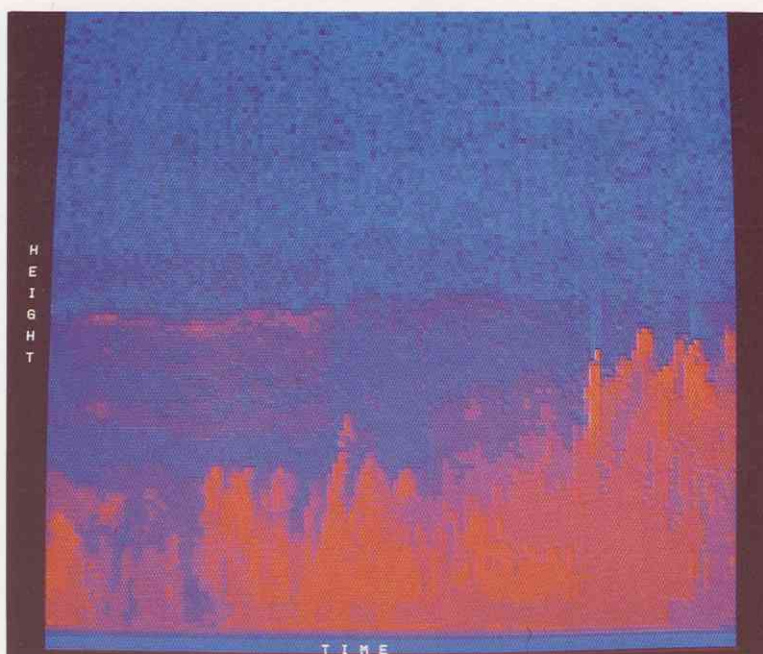


図2 カラーレベルスライスの表示例
(エアロゾル空間分布の時間変化)

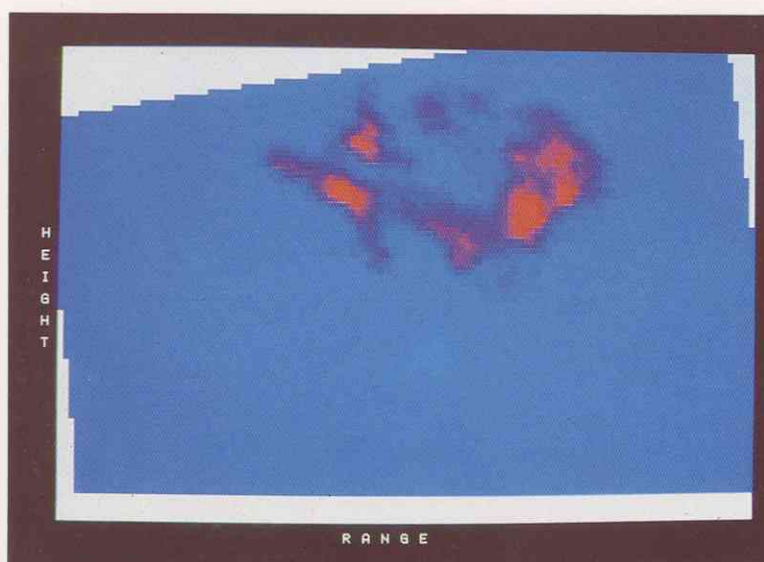


図7 カラーレベルスライスの表示例 (排煙の断面)

III-5

レーザーレーダーで観測されたエアロゾル層高度と
安定層高度との対応関係について

On the Relationship between the Aerosol Layer Height
and the Mixed Layer Height as Determined by
Laser Radar and Low-Level Radiosonde Observations

笹野泰弘¹・重松明夫²・清水 浩¹・
竹内延夫¹・奥田典夫¹

Yasuhiro SASANO¹, Akio SHIGEMATSU², Hiroshi SHIMIZU¹,
Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

大気中のエアロゾル層構造が安定成層の存在にどのように関係しているかを調べる
目的で、全部で54回の低層ゾンデ観測とレーザーレーダー観測とに基づいて、予
備的な解析を行った。レーザーレーダーで観測されたエアロゾル鉛直分布と、低層
ゾンデによる温位鉛直分布データとから、一定の基準に従って決定されたエアロゾ
ル層高度と安定層底部高度との関係を客観的な方法で調べた。また、これらの関係
の安定層安定度と濃度こう配への依存性等について検討した。

主な結果は次の通りである。

- (1) 選り出されたエアロゾル層と安定層とは、必ずしも互いに一対一の対応を
示すものではない。
- (2) 日中の混合層構造に着目すれば、最下段に位置する安定層のほとんどは、最
下段に位置するエアロゾル層に対応づけられる。(15例中13例)
- (3) また、このとき、安定層安定度とエアロゾル層上端の濃度こう配の間には正
の相関が見られる。

-
1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町
The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division,
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan
 2. 筑波大学大学院環境科学研究科 〒305 茨城県新治郡桜村
The Graduate School of Environmental Sciences,
The University of Tsukuba, Niihari, Ibaraki 305 Japan

Abstract

A preliminary investigation of the relationship between the aerosol layers and stable layers in the atmosphere using low-level radiosonde data (54 releases) and laser radar data was conducted. The relationship between the height of the top of the aerosol layer and the base of the stable layer, both of which were determined by laser radar and low-level radiosondes according to arbitrary but reasonable criteria, was examined. Also, this relationship's dependency on the stable layer stability and the vertical gradient of aerosol concentration was discussed. It was found that:

- (1) A one-to-one correspondence between the aerosol layers and the stable layers does not necessarily exist.
- (2) When considering the mixed layer structure in the daytime, the lowest-level stable layers generally correspond to the lowest aerosol layer tops (13 out of 15).
- (3) There is a positive correlation between the stable layer stability and the vertical gradient of aerosol concentration at the aerosol layer top.

1. はじめに

レーザーレーダーは、1960年代初めに最初の大気状態の観測がなされて以来、主としてミュー散乱レーザーレーダーの技術の開発が進められ、フィールドでの観測実験も多く積み重ねられてきた (Fiocco and Smullin, 1963; Collis et al., 1964; Viezee and Oblanas, 1969; Naito et al., 1968; Collis and Uthe, 1972; Uthe, 1972; Spangler and Dirks, 1974; Russell et al., 1974)。特に、エアロゾル層の検出にその有効性を発揮するとされ、大気汚染問題との関連において、混合層高度検出の可能性が多く指摘されてきた。

一般に、地表付近で排出された汚染質は乱流拡散あるいは熱対流によって鉛直方向に運ばれるが、上部に安定層があるとこれらの輸送が抑制される結果、安定層より下に高濃度が達成され、安定層より上では濃度が低いという状況が生じる。特に、晴れた日の日中などには、上部を安定層でふたをされた形の混合層が発達し、混合層内に高濃度が達成される。レーザーレーダーは、この安定層以下あるいは混合層内のエアロゾル高濃度を検出するものと考えられている。これまで、この観点から、気温の鉛直分布、すなわち安定層の存在との関連でエアロゾル層の観測と解析がなされ、安定層高度とエアロゾル層高度の対応関係が報告されている (Collis et al., 1964; Naito et al., 1968; Viezee and Oblanas, 1969, Spangler and Dirks, 1974; Russell et al., 1974)。

このように、レーザーレーダーはエアロゾルの空間分布の測定から直接的に混合層高度が推定でき、その他の直接測定の方法 (例えば、低層ゾンデやカイツーン等のように、測器を測定しようとする地点まで持っていく必要のあるもの) による気温鉛直分布の測定に比べて、空間分解能、時間的連続性の点で、連続的モニターの方法として有利であると考えられる。しかし、現在までの所、実用的なレベルでレーザーレーダーが使用されるまでには至っていない。この理由としては、ハード部分のメンテナンスの問題、信号処理の問題、そして、これらに関連して、測定実験に基づく応用研究が不十分な点にあると思われる。

レーザーレーダーのハード上の問題点とは、レーザーレーダーの専門技術者ではないユーザー

が必要に応じて、比較的容易な操作で観測を実施することが難しいという点である。すなわち熟練を要する微妙なレーザーヘッドの調整が必要であったり、大がかりな装置であるために運用に人員を要するというように、簡易な測定機器とは呼び難い面があった。このため、これまで十分な量のデータ蓄積がなされてきていない。

レーザーレーダー信号の解析の問題点は、従来の多くのレーザーレーダーシステムでは受信信号をオシロスコープの画面に表示し、これを写真にとって信号波形を読みとり解析するという方法をとっていたため、解析に極めて多くの労力を要するだけでなく、精度が低いという点にある。したがって、安定層とエアロゾル層の対応についても、特徴的なレーザーレーダー信号の構造にのみ着目する結果、顕著なエアロゾル層や強い安定層のみが議論されることが多かった。このため、どの程度の安定度を持つ安定層にエアロゾル層が対応するのか、あるいは安定層の存在が常にエアロゾル層を伴うものであるのか等、定量的な把握が不十分であった。

このように、特徴的な構造については、初期の実験的研究で明らかにされ、混合層高度の推定の可能性が示されたものの、その後、実用レベルで使用されるところまで、解析的研究は進展していないのが現状である。

近年、レーザーレーダーのシステム化が進められ、ハード上の問題は改善されつつある。また、信号処理の面においては、コンピューターを導入した、データのデジタル処理方式が用いられるようになり、処理能力の点で非常な進歩を示している (Uthe and Allen, 1975)。また、かなり定量的な取扱いあるいは客観的な解析が行われるようになってきている (Coulter, 1979; Sasano et al., 1979; Endlich et al., 1979)。著者らの所属する国立公害研究所でも、こうした最近の技術的な進歩をふまえて、コンピューター制御のデジタルデータ収録処理方式を用いた車載型レーザーレーダーシステムを製作し (Shimizu et al., 1980) フィールド実験を行ってきた (Sasano et al., 1980)。

この論文では、国立公害研レーザーレーダーによるエアロゾル鉛直分布の測定データを用いてエアロゾル層の高度分布を決定し、同時に低層ゾンデ観測から求めた安定層の高度分布との関係を調べ、その安定度、濃度こう配への依存性等について論じる。エアロゾル層高度、安定層高度は、妥当と考えられる一定の基準に従って客観的に決定した。

2. データの収集

この節では、レーザーレーダーの原理と測定に使用したレーザーレーダーシステムについて簡単に触れた後、レーザーレーダー観測と低層ゾンデ観測の方法について述べる。

レーザーレーダーは送信レーザーパルス光の、浮遊エアロゾルからの後方散乱成分を、空間分解能をもって測定し、エアロゾル濃度の空間分布を求めるものである。後方散乱光の強さは、測定体積 (空間分解距離とレーザーパルスの直径で決まる) 内にある個々のエアロゾルの微分後方散乱断面積を、粒径分布の重みをつけて積分した量に比例する。したがって、粒径分布の関数形と個々のエアロゾルの光学的性質が空間的に変わらないものとすれば、測定された後方散乱光強

度はエアロゾル数密度に換算される (Collis and Russell, 1976)。一般に、単波長を用いるミ-散乱レーザーレーダーのみの観測では、粒径分布関数やエアロゾルの光学的性質を決めることはできないので、これらを空間的に変わらないものとみなして、エアロゾル数密度分布を求める。以後、これをエアロゾル濃度分布と呼ぶことにする。

測定に使用した公害研レーザーレーダーシステムはNd: YAGレーザーの基本波 ($1.06\mu\text{m}$, 0.1J/pulse) を光源とするミ-散乱レーザーレーダーで、高速 A/D コンバーター、ミニコンピュータを備えたデジタルデータ収録処理方式を採用している。A/D コンバーターの最小サンプリングタイムは 10ns 、信号強度分解能は 8 bit を有している。詳細については文献 (Shimizu et al., 1980) を参照されたい。

今回の解析に用いたレーザーレーダー観測データはすべて、エアロゾルの鉛直濃度分布データである。観測実験の一覧を表 1 に示した。観測地点は図 1 に示した。図 1 の色の濃い部分は都市域を表している。九十九里 (Ku), 相模 (S) 観測実験地点は、それぞれ東南、南を海に面しており、海岸から内陸へ 4 km および 50m の地点であった。霞ヶ浦 (Ka) 地点は湖畔で、すぐ西を湖に接し

表 1 観測実験一覧表

地 点	期 間	低層ゾンデ観測数	地 域	図の記号
九十九里	78. 9.18~19	27	海 岸	$\triangle^{(a)} \blacktriangle^{(b)}$
相 模 湾	78.11. 9~10	8	海 岸	●
霞 ヶ 浦	79. 2.18, 20	6	湖 畔	□
浦 和	79. 7.31~ 8. 2	13	都市域	○

a : a地点, b : b地点

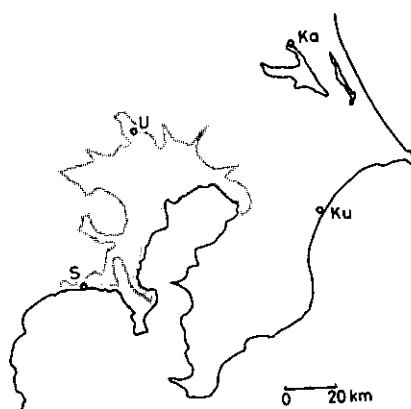


図 1 観測地点を表す関東地域の地図

図中の色の濃い部分は都市部を表している。Ku, S, Ka, U はそれぞれ、九十九里、相模、霞ヶ浦、浦和の観測地点を指している。

ている。いずれの地点も、風向によって風の吹送してくる地面の条件あるいは汚染発生源等の条件は非常に異なったものとなる。浦和(U)地点は、東京都市部中心から約20km北東に位置し、都市域に分類できる。

4回のレーザーレーダー観測実験のうち、浦和観測で連続的な測定を行った他は、いずれも間欠的なデータ収集である。データ収録は、1.5～3mの距離分解能で、地表から1500～3000mの高度範囲について行った。これを、解析の過程で平滑化して高度20mごとの値として求め、鉛直分布データとした。また、実験ごとにデータ収集の時間間隔や積算回数が異なるので、いずれも10分間隔で時間を区切り、各々の10分間に収集された測定データの平均値として取り扱った。

低層ゾンデによる気温鉛直分布の測定は、4回の観測実験期間中に全部で54回行った。低層ゾンデの放球は、浦和、霞ヶ浦ではレーザーレーダー観測地点で行い、相模地点ではレーザーレーダー地点から東へ約1kmの海岸で行った。九十九里では、海岸地点(a地点)と、海岸から内陸へ約9km入った地点(b地点)とで行った。

低層ゾンデは原則として、上昇速度200/minに調節して放球し、気温、気圧信号を地上で受信し、ペンレコーダーに記録した。記録の読みとりは、地上から1500～2000mの範囲について、100mごとと特異点について行った。気温の測定にはタングステン温度計を用いている。

なお、観測期間中の天気は、相模湾観測の11月10日が大体曇りであったのを除いて、いずれも晴れまたは快晴であった。

3. 解析の方法

この節では、安定層とエアロゾル層の定義を行い、これらの定義に基づいて選び出された安定層とエアロゾル層の対応づけの方法について述べる。

予備的な解析結果を考慮して、安定層を次のように定義する。まず、低層ゾンデで測定された気温を温位に換算し、高度20mごとの値に内外挿して温位の鉛直分布とする。そこで、0.6℃/100m以上の温位こう配を持ち、かつ、上下の温位差が0.6℃以上となる層を安定層と定義する。ただし、厚さが20mなら、温位差が0.4℃以上であれば安定層と判別する。図2に安定層の決定方法を模式的に描いている。次に、安定層底部(BSL; Base of Stable Layer)を定義する。これは、上述の方法で決定された安定層の下端高度(図2の1, 3, 4)と、さらに上方へ向かってより安定へと変化する高度(図2の2)で定義する。

安定層の安定度は、BSL高度直上の温位こう配(℃/100m)で与え、一つの安定層に、複数のBSLが存在するとき(図2の1, 2)には、それぞれのBSLについて安定度を定義する。

エアロゾル層は、レーザーレーダーで観測されたエアロゾル濃度の10分間平均の鉛直分布データから、次のように定義する。今、濃度の鉛直分布を $\bar{C}(Z)$ とすると、次式

$$NCG(Z) = -\frac{100}{\bar{C}(Z)} \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta Z}$$

によって、高度ごとの濃度で規準化された濃度こう配 (NCG; Normalized Concentration Gradient) を求める。NCG(Z) の値が、高度差 40m 以上に渡って引き続いて、50%/100m を越えるとき、これをエアロゾル層の上端 (TAL; Top of Aerosol Layer) とみなし、特に NCG(Z) の極大を与える高度をエアロゾル層高度と定義する。ここで用いた基準はやはり、予備解析の結果、決めたものである。この方法によれば、ひとつのエアロゾル鉛直濃度分布において、複数個のエアロゾル層高度が定義され得る。図 3 は、NCG(Z) の時間変化パターンを時間高度表示 (THI 表示) したもの

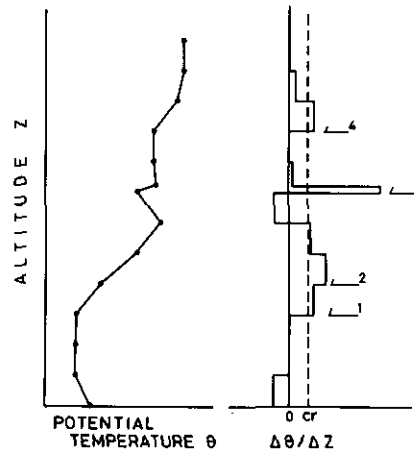


図 2 安定層および安定層底部の定義を表す模式図

$\Delta\theta/\Delta Z$ の基準値 cr を越えた部分が安定層と定義され (破線より右に出る部分), 矢印で示した高度が安定層底部である。

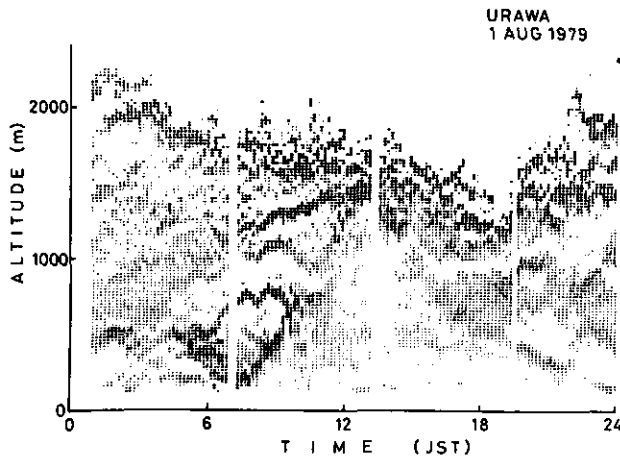


図 3 基準化された濃度こう配 NCG の高度・時間 (THI) 変化パターン
図中の色の濃い部分が大きな濃度こう配を示している。

で、図で濃度の高い部分が NCG の大きな所に当たる。この図から分かるように、多くの時間帯でエアロゾルは多重層をなしている。

以上で述べた定義による安定層底部 (BSL) 高度、エアロゾル層上端 (TAL) 高度の決定例を図 4 に示す。ここで、エアロゾルの鉛直濃度分布は、浦和観測の 8 月 1 日 9 時 50 分から 10 分間の平均値を用い、温位の分布は 9 時 50 分放球の低層ゾンデデータを用いている。図の中央の棒状グラフは規準化された濃度こう配 NCG を表している。実線は温位の鉛直分布を示す。右向き、左向きの矢印は、定義に基づいて選び出された TAL 高度、BSL 高度を指している。

ところで、安定層の存在が、常にエアロゾル層を伴うものであるかどうかは、言うまでもなく a priori に明らかなことではなく、また、エアロゾル層の上端が常に安定層に抑えられているとも限らない。図 4 で示されたような TAL と BSL の空間分布の状況において、どの BSL とどの TAL が物理的な因果関係で結ばれているかを、この測定結果だけから判断することはできない。

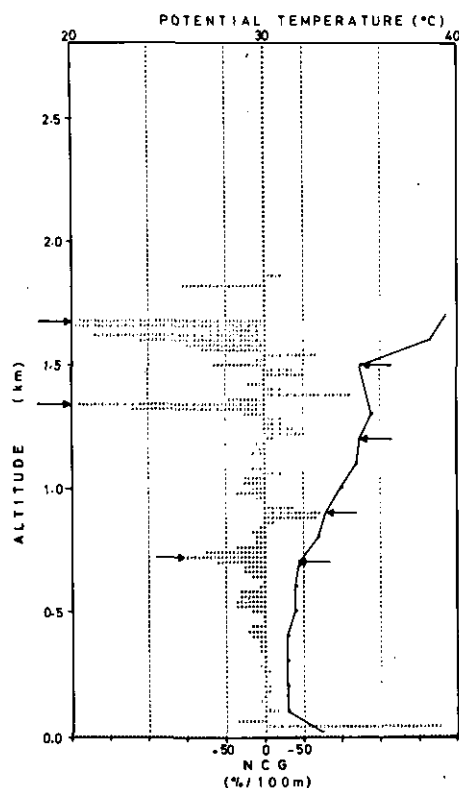


図 4 エアロゾル層上端高度 (右向きの矢印) と、安定層底部高度 (左向きの矢印) の決定例

図中央の棒状グラフはエアロゾル濃度の基準化された濃度こう配 NCG を表し、実線は温位の鉛直分布を表している。

この理由から、ここでは便宜的な方法として、同一時刻の測定から決定された BSL と TAL の対応づけを次の方法で行った。BSL 高度を基準にして、各々の TAL 高度との差を考え、最も高度差の小さい組み合わせを対応する BSL と TAL の組とする。もし異なる BSL に対して、同一の TAL が選ばれた場合には、その 2 組の高度差を比較して、より小さい高度差を持つ方を対応する組として選ぶ。要するに、この対応づけの方法は、近いもの同士が物理的因果関係を有している可能性が高いという仮説に基づいている。

なお、高度 100m 以下のエアロゾル濃度分布の構造は原則として今回の解析の対象からは除いた。これは、レーザーレーダー光学系の幾何光学的効率の補正関数を実験的に決定する (Sasano et al., 1979) に足るだけの十分な量の日中のデータが各観測実験ごとに揃っていないという理由による。

4. 解析結果

表 1 に示した合計 54 回の低層ゾンデ観測と、低層ゾンデ放球時刻を含む前後 10 分間平均のエアロゾル濃度鉛直分布データとから、安定層、安定層底部 (BSL)、エアロゾル層 (TAL) を決定した。これらについて対応づけを行った結果をまとめて表 2 に示す。

表 1 によれば、203 の BSL のうちの約半数に、対応する TAL が存在する。一方、142 の TAL のうち約 7 割は、対応する BSL が存在する。一つの安定層の中に複数の BSL が定義されているとき、この BSL のひとつにでも対応する TAL があれば、この安定層は TAL と対応していると

表 2 安定層とエアロゾル層の対応づけの結果のまとめ

	安定層の数	安定層底部の数	エアロゾル層の数
対応づけの できるもの	85	97	97
できないもの	60	106	45
合 計	145	203	142

表 3.1 安定層の選別基準を変えたとき、対応づけのできる安定層底部の数の全体に対する割合 (単位 %)。

$(\Delta\theta/\Delta Z)_{cr}$ NCG_{cr}	0.6	0.8	1.0	($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)
50	48	51	47	
100	37	40	37	
200	26	28	29	
(%/100m)				

表 3.2 エアロゾル層の選別基準を変えたとき、対応づけのできるエアロゾル層の数の全体に対する割合 (単位 %)

$(\Delta\theta/\Delta Z)_{cr}$ NCG_{cr}	0.6	0.8	1.0	($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)
50	68	53	37	
100	73	57	39	
200	63	51	39	
(%/100m)				

みなすことにすれば、145の安定層のうち約6割の安定層に対応する TAL が見い出せる。対応づけの際に、安定層とエアロゾル層の定義における閾値を変えてみても、選ばれる層の数は増減するが、そのうち対応づけのできるもの、できないものの割合に大きな差は生まれない(表3.1, 3.2)。

表 2 に示した結果のうち、安定度別の BSL の出現頻度について、TAL と対応づけられるものと対応づけのできないものとに分けて描いてみても (図 5)、それらの間に系統的な違いは見い出

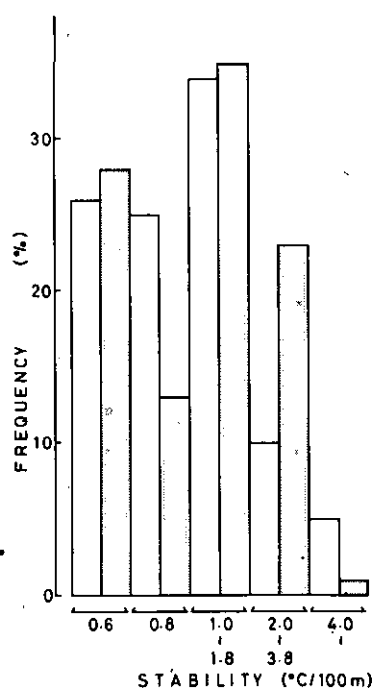


図 5 安定度別の安定層底部の出現頻度分布

白ぬきはエアロゾル層に対応づけられた安定層底部、色つきはエアロゾル層に対応づけられない安定層底部を表している。

せない。逆に言うと、対応づけの可否は、ほとんど安定度に依存していないことが分かる。同じことが、TALの濃度こう配別の出現ひん度についても言える。

これらの事実は、強い安定層あるいは大きな濃度こう配を持つエアロゾル層に限定しても、高い割合で対応づけができるとは限らないことを意味している。

対応づけられた97組のBSLとTALについて、その高度間の関係を図6に描いた。高度間の関係に系統的な偏りは見られず、原点を通る傾き45°の直線の回りに散らばる。これら97組のBSLの安定度とTALの濃度こう配の間には顕著な相関はない。

TAL高度とBSL高度の差のひん度分布は、図6から推察できるように、ほとんど高度差0mを中心として分布する。安定度別、濃度こう配別に高度差分布を調べると、さほど大きな差異は見られないが、安定度が $0.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以下のとき、あるいは濃度こう配が $100\%/100\text{m}$ 以下のとき、大きな高度差が比較的現れやすい。

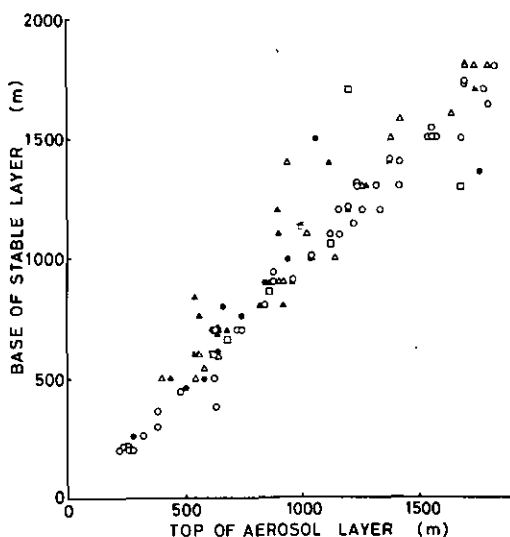


図6 対応づけられたエアロゾル層と安定層底部の高度間の関係
記号の意味は表1に示している。

いわゆる混合層構造は、日中、地表面が日射により熱せられることにより生じ、地表に最も近い安定層でその高度が定義され得る。そこで、レーザーレーダーで混合層高度を検出する可能性を調べるために次の解析を行う。

日中8時から18時までの間のデータのうち、地表に一番近いTALと、それに対応するBSLとの対応関係だけを抜き出して図7に示す。(但し、すでに記したように、100m以下の構造は考察の対象とできないので、100m以下に安定層があるケースはこの解析からは除いている。そのような例は、日中のデータ19例中の4例である。) 図において、実線はひと続きの安定層を意味す

る。破線で結ばれているのは個別の安定層で、図の2例はいずれも、下から3番目のBSLが最下段のTALに対応していることを意味している。この2例を除けば、日中の最下段のTALはすべて、地表に最も近い安定層またはBSLに対応している。

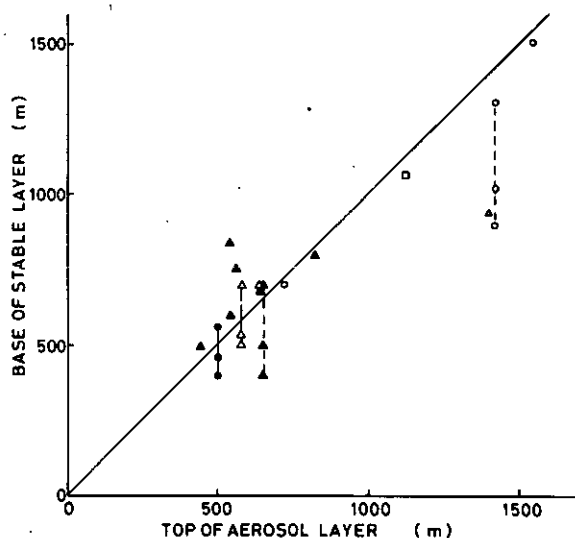


図7 図6に示した関係のうち、地表に一番近いエアロゾル層と、それに対応する安定層底部との関係を抜き出して描いている
実線はひと続きの安定層を、破線は個別の安定層を意味する。

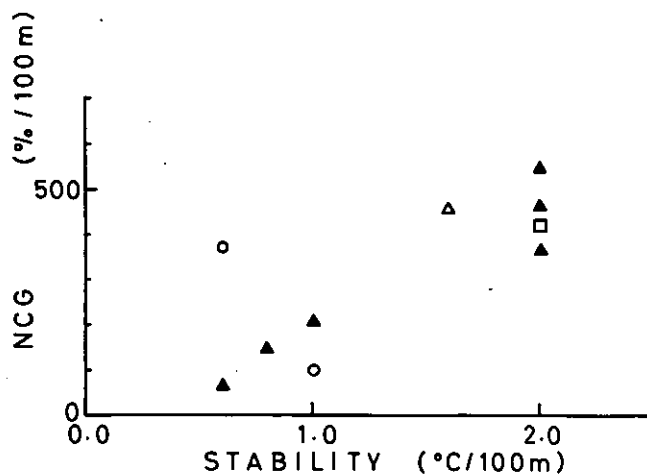


図8 安定層安定度とエアロゾル層上端の濃度こう配との関係

図7に示された対応関係のうち、最下段の安定層底部に対応づけられたものについてのみプロットした。

図7に描いたBSLとTALについて、その安定度と濃度こう配の関係を見ると(図8), サンプル数は少ないが正の相関がある。一次式を最小自乗法であてはめると、直線はほぼ原点を通り、相関係数は0.78となる。

5. 考 察

エアロゾルの鉛直濃度分布に顕著な構造があるとすれば、その成因としては、(1)発生源に近く、十分に混合拡散されていない、あるいは、(2)拡散、対流輸送の能力に鉛直方向の差がある、(3)風系に鉛直多重層構造があり、異なる濃度を持つ、性質の異なる空気が接している、などの事情が考えられる。特に、上空に安定成層がある場合、鉛直拡散や対流輸送が安定成層で抑制される結果、よく晴れた日の日中には、いわゆる混合層が形成され、濃度の鉛直分布に顕著な構造を示すと考えられる。また、安定層を境として、風向に鉛直シアーを持つことが多い。これらの事情は、温位構造(安定層)とエアロゾルの鉛直濃度分布構造との間に、何らかの相関関係を期待させる。

観測事実は表2に示した通り、定義から決定されたすべての安定層底部(BSL)とエアロゾル層(TAL)についてその対応関係をみるならば、BSLの約半分は対応するTALを持たず、TALの約3割に対応するBSLが見い出せない。しかし、日中のデータに限るならば、15例のうち13例までが最下段のTALと地表に最も近い安定層が対応づけられ(図7)、レーザーレーダーによる混合層高度の推定が可能である。図4によれば、8時頃に高度200m付近にあった最下段のエアロゾル層上端は時間とともに上昇し、12時間後には1200m付近にまで到達したことが分かる。これは、混合層の発達過程を表していると考えられる。

TALのうちでBSLに対応しないものは、(1)発生源の近くで、分布状態に安定層の存在の影響を受けていない、(2)温位分布には安定成層構造はないが、異なる性質の空気が接している(風系の鉛直構造)、等の理由によるものが含まれていると推測される。

また、TALに対応づけられないBSLの一部は、次のように説明できるであろう。すなわち、地表近くの発生源から排出されたエアロゾルが上方へ拡散輸送されるとき、下方に存在する安定層のために鉛直拡散が抑制され、それより上部へは運ばれない結果、上にある別のBSLには直接関連のあるTALが存在しないという状況が生じる。図8に示したような最下層のTALとBSLの濃度こう配と安定度の関係に見られる正の相関は、鉛直拡散に対する安定層の役割を示唆している。

以上のように、対応のつかない構造のうち、一部は物理的な説明が可能であろう。しかしその他に、方法上の問題がないわけではない。その一つは、測定方法上の問題であり、他の一つは機械的な対応づけの方法に起因する。以下、これらについて述べていく。

エアロゾルの鉛直分布は間欠的に行われた測定の10分間の平均的分布であるため、仮に実際には鋭い濃度こう配を持つ構造であっても、時間的に平均することにより構造が平滑化され、顕著な濃度こう配は消失する。この事情は図9に示した鉛直濃度分布の時間変化の例からも容易に推察される。高度300m付近の鋭い濃度こう配(一つの鉛直分布は4秒平均で得た)は、わずか90秒

ほどの間にも、100mあまりの下降を示し、これらの時間平均の結果は、なめらかな濃度こう配となるであろう。時間的に連続するレーザーレーダーデータが得られるならば、Endlich et al., (1979)が行ったようにパターン認識の手法を適用して、エアロゾル層を時空間的に連続する構造として抽出することができるので、変動するエアロゾル層高度を正しく評価することができると考えられる。

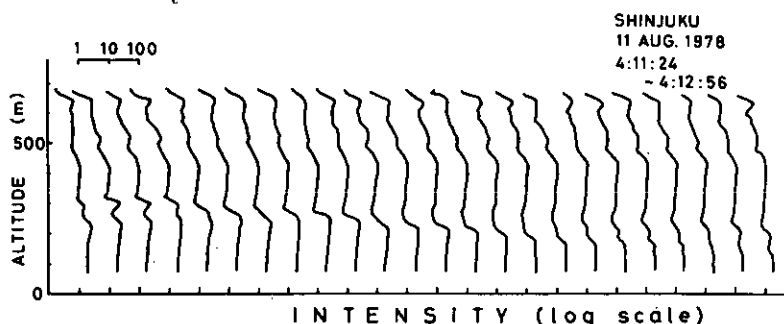


図9 エアロゾル濃度鉛直分布の短時間変動の例

横軸は濃度の相対値を対数目盛りで描き、4秒ごとに原点をひと目盛りずつ右にずらしている。

一方、温位の鉛直分布の測定は、上昇速度200/minに調節された低層ゾンデでなされるため、それぞれの高度では、かなり瞬間的な温位を測定する。したがって、ときとして小さなスケールの温位構造をとらえる可能性を有している。これら測定方法上の相違のために、対応づけに困難をきたす場合があると考えられる。

近接するBSLとTALを機械的に結びつけるという方法のために、物理的に意味のない組み合わせがなされたり、本来、有意な構造の組み合わせが除外されるという危険性を有している。例えば、浦和観測データに限って、対応するBSLを持たないTAL 11例を詳細に調べてみると、主観的な判断を加えて対応づけを試みることによって、そのうち3例については、対応づけのできていなかったBSLの中から対応するBSLを見出すことができる。

対応する構造が見い出せない場合であっても、安定層やエアロゾル層の決定基準をゆるめることにより、新たな構造が定義されて、対応づけが可能となることがある。例えば、浦和データ11例のうち、付近に弱いながらも安定層を持つものが2例存在する。もっとも、前節で示したようにBSL、TALの決定基準を変えても、対応関係が全般的に改良されるわけではなく、浦和の改善例は一般的に言えることではない。

今回の解析では、その上端で濃度が急激に減少する層をエアロゾル層と定義して、安定層との対応関係を調べた。濃度が高度とともに急激に増加するようなエアロゾル層構造を含めて、同様の解析を行う必要がある。

次に、対応づけのなされた BSL と TAL の組み合わせについて議論していこう。

図 6 に示した高度間の関係を見ると、ほぼ一対一の直線にのっている。しかし、それぞれ複数個ずつ存在する BSL と TAL について、近接するもの同士を機械的に対応づけるという方法をとっている以上、これは当然の結果と言える。Hicks et al., (1977) がソーダーエコーの解析で行ったように、unambiguous single layer についてのみ解析する必要がある。もっとも、今回の解析に使用した 54 組の鉛直分布データのうち、single layer であった例は非常に少なく、ほとんどの場合は、一つの鉛直分布に複数個の構造が存在していた。

図 6, 7 の中で、大きな高度差を示すいくつかの対応関係は、やはり機械的な対応づけの結果であると考えられる。これらの例は、それぞれの鉛直分布構造のうち最上段に位置する BSL, TAL であるものが多く、物理的な因果関係はなくとも、ただ隣りあうというだけの理由で大きな高度差を持ちながらも対応づけられたものである。

最下段の構造については、このような対応づけの方法上の問題は比較的少ないと思われる。図 7 と同様の解析結果が最近、Coulter (1979) によって示されている。Coulter は、レーザーレーダーデータの時間高度変化パターンから混合層高度を主観的に決定して、ソーダー、温位分布から決められた混合層高度との対応関係を示している。温位分布による混合層高度の定義は、本研究の方法とは異なり、中立から安定へ初めて変わる高度としている。したがって温位分布から決められる混合層高度は本研究に比べて低めに出る点を考慮すれば、本研究の結果とおおよその傾向は一致する。

仮に、物理的に意味のある対応づけが完全に出来たとしても、ある程度の高度差のばらつきは避けられない。その理由の一つは、距離分解能の違いによるもの、他は、測定方法に関連して測定データの代表性に起因する。すなわち、実際の気象構造は対流エレメントの貫入や、wave-like motion のために空間・時間的に変化しており (Rayment and Readings, 1974; Noonkester, 1976)、高度差のばらつきは、気象構造の空間スケールと測定量の平均化時間の幅に依存していると考えられる。さらに、温位構造 (安定層) とエアロゾル層の現実の空間的位置関係の反映と考えることもできる。

6. まとめ

安定層とエアロゾル層が、どういう空間的位置関係にあるか、あるいは安定度や濃度こう配がこれにどう関係するかということを明らかにすることは、現実の気象条件のもとでの乱流拡散や対流混合の現象を理解する上で、貴重な情報を提供する。詳細な空間構造の把握のためには、レーザーレーダーの方位角方向、高度角方向の組み合わせにより、立体的なエアロゾル分布の測定と、より空間・時間分解能に富んだ気象要素の測定が要請される。

本研究では、エアロゾル鉛直濃度分布データと、低層ゾンデ観測による温位鉛直分布データとに基づいて予備的解析を行った。その結果、次のことが見い出された。

定義に従って選び出されたすべての安定層とエアロゾル層を対象とすると、必ずしもそのす

べてに対応関係を見い出すことはできない。しかし、日中の混合層構造に着目して、最下段に位置する安定層とエアロゾル層の関係を見るならば、15例中13例までが互いに対応づけられる。すなわち、晴れた日の日中、レーザーレーダーで観測される最下段のエアロゾル層高度は、ほとんどの場合、温位から求められる混合層高度に対応づけられる。さらに、このときの安定層安定度とエアロゾル層上端の濃度こう配との間には正の相関がある。

謝 辞

本研究に当たり、大気環境部杉本伸夫研究員ならびに技術部松井一郎技官にはレーザーレーダー野外観測において多大の協力を得た。

ここに謝意を表する。

引 用 文 献

- Collis, R.T.H., F.G. Fernald and M.G.H. Ligda (1964): Laser radar echoes from a stratified clear atmosphere. *Nature*, 203, 1274-1275.
- Collis, R.T.H. and E.E. Uthe (1972): Mie scattering technique for air pollution measurement with lasers. *Opt. Quantum. Electron.*, 4, 87-99.
- Collis, R.T.H. and P.B. Russell (1976): Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption. *Laser monitoring of the atmosphere*, E. D. Hinkley, Ed. (Springer-Verlag, Berlin), 380 pp.
- Coulter, R.L. (1979): A comparison of three methods for measuring mixing-layer height. *J. Appl. Meteorol.*, 18, 1495-1499.
- Endlich, R.M., F.L. Ludwig and E.E. Uthe (1979): An automatic method for determining the mixing depth from lidar observations. *Atmos. Environ.*, 13, 1051-1056.
- Fiocco, G. and L.D. Smullin (1963): Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140 km) by optical radar. *Nature*, 199, 1275-1276.
- Hicks, R.B., D. Smith, P.J. Irvin and T. Mathews (1977): Preliminary results of atmospheric acoustic sounding at Calgary. *Boundary-Layer Meteorol.*, 12, 201-212.
- Naito, K., I. Tabata and Y. Yokota (1968): The vertical distribution of aerosol in the lower atmosphere observed by a lidar. *Papers in Meteorology and Geophysics.*, 19, 615-625.
- Noonkester, V.R. (1976): The evolution of the clear air convective layer revealed by surface-based remote sensors. *J. Appl. Meteorol.*, 15, 594-606.
- Rayment, R. and C.J. Readings (1974): A case study of the structure and energetics of an inversion. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 100, 221-233.
- Russell, P.B., E.E. Uthe, F.L. Ludwig and N. A. Shaw (1974): A comparison of atmospheric structure as observed with monostatic sounder and lidar techniques. *J. Geophys. Res.*, 79, 5555-5566.
- Sasano, Y., H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1979): Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination. *Appl. Opt.*, 18, 3908-3910.
- Sasano, Y., H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda (1980): Diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer observed by a computer-controlled laser radar. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 58, 143-148.
- Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. *Opt. Quantum. Electron.*, 12, 159-167.

- Spangler, T.C. and R.A. Dirks (1974): Meso-scale variation of the urban mixing height. *Boundary-Layer Meteorol.*, 6, 423-441.
- Uthe, E.E. (1972): Lidar observations of the urban aerosol structure. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 53, 358-360.
- Uthe, E.E. and R.J. Allen (1975): A digital real-time lidar data recording, processing and display system. *Opt. Quantum. Electron.*, 7, 121-129.
- Viezee, W. and J. Oblandas (1969): Lidar-observed haze layers associated with thermal structure in the lower atmosphere. *J. Appl. Meteorol.*, 8, 369-375.

III-6

レーザーレーダーによる大気境界層の日変化の観測

Diurnal Variation of the Atmospheric Planetary Boundary
Layer Observed by a Computer-Controlled Laser Radar*

笹野泰弘¹・清水 弘¹・杉本伸夫¹
松井一郎¹・竹内延夫¹・奥田典夫¹

Yasuhiro SASANO¹, Hiroshi SHIMIZU¹, Nobuo SUGIMOTO¹,
Ichiro MATSUI¹, Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

コンピューター制御されたデジタルデータ収録機能を持つミッドレンジレーザーレーダーを用いて、典型的な夏の都市域における大気境界層の日変化を観測した。観測された粒子状物質濃度のTHIパターン表示は、時間変化の様子を明瞭に示し、これから大気境界層の構造を推定することが出来る。今回の観測結果は、Russell et al. (1974)の提案した大気境界層日変化における三つのregimeの他に、混合層が最大高度に達した後の午後のふるまいを、第4のregimeとする必要性を示唆している。

Abstract

This paper reports on the diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer observed by a computerized digital data acquisition laser radar system (NIES mobile laser radar) at a coastal urban area during typical summer days in 1979. The observation results, displayed as THI concentration patterns, clearly showed the temporal changes of concentration distribution and suggest the

* 本論文の大意は英文にて下記雑誌に発表。

Essence of this paper has been published in English in: J. Meteorol. Soc. Jpn., 58, 143-148 (1980)

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Yatabemachi, Tukuba, Ibaraki 305 Japan

possibility of determining the structure of the atmospheric planetary boundary layer using the particulate concentration pattern as a tracer.

The present observation suggests the need of introducing another regime for the mid-afternoon period after the mixed layer is fully developed to its maximum depth in addition to three regimes proposed by Russell et al (1974), which characterized the diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer.

1. はじめに

大気境界層の構造を理解することは、大気大循環の境界条件を決定するためだけでなく、地域的な大気汚染を予測するためにも、極めて重要である。特に、混合層の深さは大気汚染問題にとって重要な役割を果たしている。混合層は自由対流、強制対流による混合が活発な領域として定義され、一般に、一定の温位分布と上部の逆転層で特徴づけられる。混合層の深さは、地表付近の排出源から排出された汚染質の鉛直方向への拡散を制限するため、大気汚染予測において混合層深さを予測することは不可欠なものとなっている。

これらの問題に対してこれまで、理論・観測の両観点から多くの研究がなされてきている（例えば、Tennekes, 1973; Yamamoto et al., 1977）。大気境界層の観測は主として、計器を搭載した航空機、ラジオゾンデ、係留気球、気象観測タワーなどを用いてなされてきた。これらの手法の欠点は、空間的・時間的なサンプリングが粗いメッシュであること、到達高度に制限があることであり、そのために大気境界層を十分に理解するだけの観測は必ずしも満足になされてきていない。

しかしながら、レーダー、ソーダー、レーザーレーダーなどのリモートセンシングの手法は広い範囲にわたる、密度の高いデータを提供し得るところから、これまで熱心に関開発が進められてきた。とりわけレーザーレーダーは、光散乱を通じて大気中の粒子状物質の分布そのものを検出するので、汚染質の拡散状況の測定から直接的に混合層深さを推定することが出来るものと有力視されている。

レーザーレーダーを用いた大気境界層の観測は1960年代の初めから多くなされてきている。気温の鉛直分布と粒子状物質の分布との関係については古くから注目され、多くの報告で、気温の逆転層より下に汚染質が滞留することがレーザーレーダー観測により明らかにされている(Collis et al., 1964; Collis, 1966; Masterson et al., 1966; Barret and Ben-dov, 1967; Naito et al., 1968; Collis, 1969; Viezee and Oblanas, 1969; Collis, 1970; Fernald et al., 1972; Anforssi et al., 1974; Spangler and Dirks, 1974)。しかし、いずれの観測においても、レーザーレーダーデータの解析はオシロスコープの信号波形を手で処理するもので、データ処理量に限度があり、高い精度で時間的・空間的变化を詳細に追うことは出来なかった。スタンフォード研究所(SRI)では磁気ディスクビデオレコーダーの採用(Allen and Evans, 1972)、さらに、デジタルデータ処理システムの導入(Uthe and Allen, 1975)により、データ処理能力を飛躍的に向上させ、境界層構造の時間的変化、空間変化の詳細な観測を行ってきた。彼らによって、内

陸地方の St. Louis における典型的な夏の日の境界層構造日変化の観測報告がなされている (Uthe, 1972; Russell et al., 1974; Uthe and Russell, 1974)。また、最近、混合層高度の客観的決定法として数値判別の手法を適用し、その可能性を示した (Endlich et al., 1979)。

この報告では、内陸地にある St. Louis における SRI の観測に対して、臨海域の東京隣接都市における詳細な連続測定結果を示し、予備的な解析を行う。観測には、国立公害研究所車載型レーザーレーダー (デジタルデータ収録システム) を使用した (Shimizu et al., 1980)。

2. 観 測

臨海工業地帯に隣接する都市域における大気境界層のふるまいを明らかにする目的で、レーザーレーダー観測を行った。これは、国立公害研究所の「環境大気中の光化学大気汚染物質の生成機構」に関する1979年夏の特別観測中に実施されたものである。国立公害研車載型レーザーレーダーシステムは、典型的な都市域として選ばれた、浦和市内に設置して観測を行った。ここは東京湾岸工業地帯の北西約20kmに位置し、東京に隣接している。

レーザーレーダーは1979年7月31日夕から8月2日朝まで連続的に運転し、データ収録を行った。測定のパラメータは表1に示している。固定点において鉛直方向に向けて連続的に測定すると、レーザーレーダーは粒子状物質濃度の時間-高度変化データを与える。これから、大気境界層の日変化状態が導かれる。

観測データは、リアルタイムモニターとしてグラフィックディスプレイに表示され、同時に磁気テープに収録される。風速、風向、気温、湿度等の気象要素は埼玉県公害センター (埼玉県浦和市) の屋上 (地上高、約25m) で測定された。

表1 国立公害研レーザーレーダーシステムによる測定

パルス繰り返し周波数	2 パルス/s
平均化時間	1 min
空間分解能	3 m
測定高度角	90° (鉛直上方)
測定範囲	地表から 2,650 m

3. データ処理および表示

磁気テープに収められたデータは国立公害研へ持ち帰り、精密なデータ処理をHITAC8450 コンピューターで行った。データ処理においては、距離自乗補正、幾何光学的効率の補正 (Sasano et al., 1979) と感度較正のみを行い、大気の透過率は簡単化のため1とした。

濃度は離散的に等間隔で10レベルに分け、オーバープリンティングの手法でラインプリンター

用紙にTHIマップとして表示した (Shimizu et al., 1980)。粒子の組成や粒径分布関数に変化しなければ、この手続きによって粒子濃度の空間・時間変化の相対的な比較が可能となる。

4. 結果と考察

観測期間中の気象状態は、おおむね夏型の気圧配置で晴れであった。地上気象要素の時間変化は図1に示されている。日中の風は南寄りで3～4 m/sであったが、夜間には風は弱く、風向も変化しがちであった。8月1日は、最低気温は午前6時に、最高気温は午後2時に現れた。8月2日朝の最低気温は、前日に比べて少し高いが、相対湿度は両日の朝とも高い。

レーザーレーダーで観測された大気境界層内の粒子状物質濃度分布の時間変化が図2(a)～(f)に描かれている。

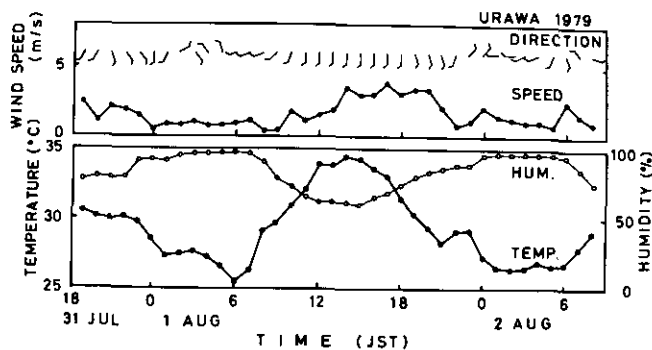
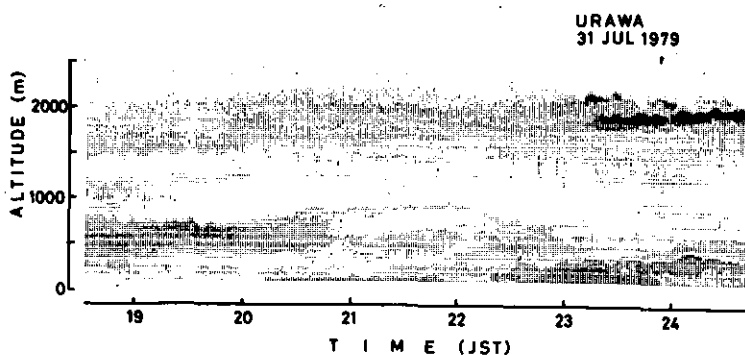


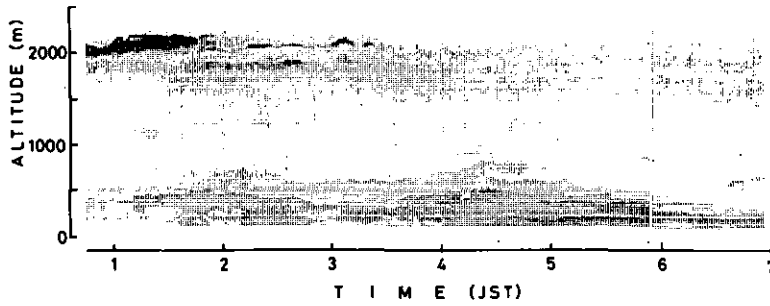
図1 レーザーレーダー観測地点における気象要素の時間変化



(a)

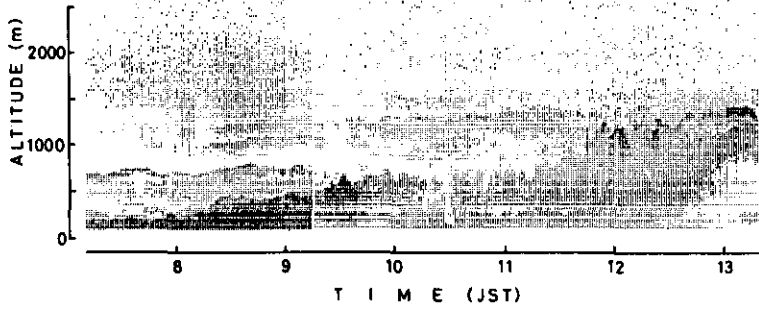
図2(a)～(f) レーザーレーダーで観測された粒子物質濃度のTHI濃度変化表示

URAWA
1 AUG 1979



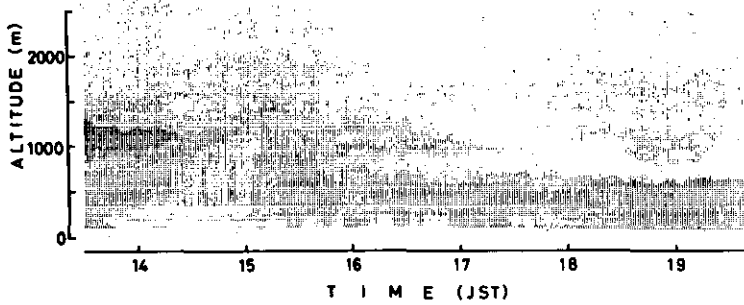
(b)

URAWA
1 AUG 1979



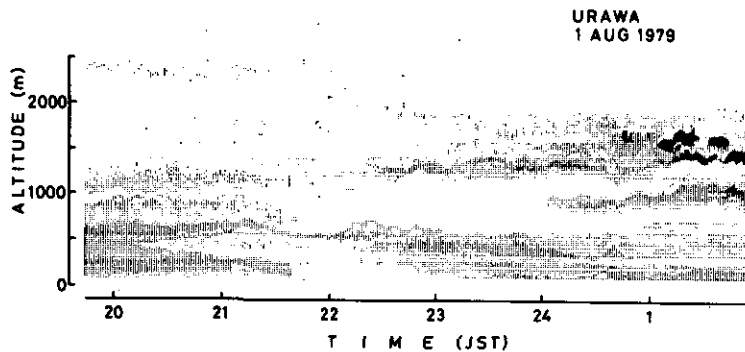
(c)

URAWA
1 AUG 1979

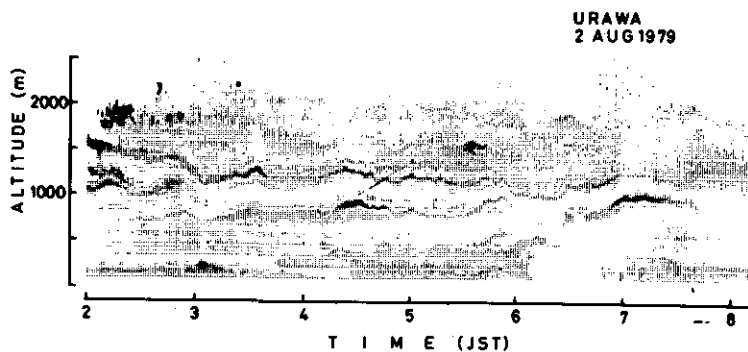


(d)

図2 (つづき)



(e)



(f)

図2 (つづき)

7月31日21時ごろ、高度500m付近にあった高濃度層が消失したあと、22時半ごろより地表近くに高濃度層が形成され始めた。この高濃度層は、ほとんど夜の間ずっと存在し、その厚さを時間とともに増して、日の出時刻(4時46分)ごろには結局、500~600mの厚さにまで達した。その後、この層の厚さは徐々に薄くなっていくが、6時半ごろから600~700m付近に新たな高濃度層が現れ、多重層構造となっていく。

7時以降、最下層の高濃度層は再び、その厚さを増して、8時には300m、9時には500m、10時には700mにまで達した。また、このとき、6時半から続いていた600~700mの層と一体化した。8時には、高度1,000mと1,300mに新たな高濃度層が見い出される。厚みを増していた最下層の高濃度層は9時半から11時にかけて、一定の厚さのままであるが、11時すぎから再び層の上端高度は上昇し、12時半ごろには、この日の最大高度1,400mにまで達した。THI変化パターンから判断して、この間、対流ブリュームによって混合層が発達したものと推定される。混合層の深さは、11時には750m、11時半には1,100m、12時に1,300m、12時半には1,400mに達した。

11時から12時にかけて混合層が発達している間、混合層内の粒子状物質濃度の鉛直分布はほとんど一様になっている。12時半以降、混合層内の濃度は下方から徐々に下がりはじめ、濃度の低下は下から上へと伝わっていったため、1,000 m 付近に高濃度部分が残されて、これより下では濃度が低いという状態となった。最終的には15時ころ、地表から1,600 m 付近までが一様な、低い濃度分布が一時的に達成された。

15時以降、濃度のやや高い部分（地上から1,200 m）は2層に分かれ、一つは1,000 m 付近に留まり、他の一つは次第に、その高度を下げていった。

夜半から再び地表付近に形成され始めた高濃度層は前日に比べて、層は浅く、また濃度も低い。8月2日朝の高濃度層の上昇する状況も前日の状況と異なっている。これらの相違は、放射性的接地逆転形成に対する雲の条件が違ふことや、2日朝の一時的な風速の強まり、風向の変化に起因するものと考えられる。

8月2日早朝には、上空に複数の雲層が見られ、これらは互いに同位相で上下動を繰り返している。

THI マップとして表示された濃度空間分布パターンから、濃度が高度とともに急激に減少する高度を読みとって、図3にその時間変化を示した。図3では8月1日の全日について示しているが、多くの時間帯で多重層を構成していることが分かる。また、午前中に混合層が発達し、午後にはその高度を下げていく状況が明瞭に示されている。

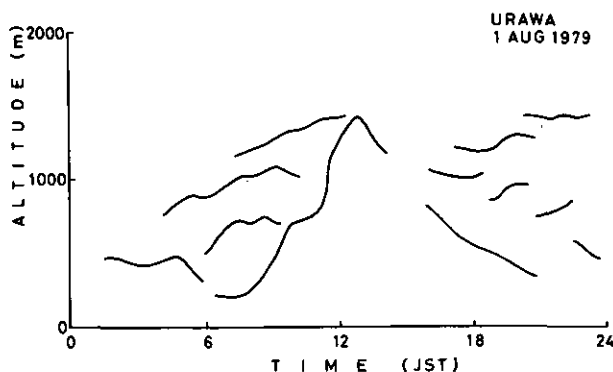


図3 エアロゾル濃度急減高度の時間変化

Russell et al. (1974) によれば、大気境界層の日変化は三つの regime に分けられる。それらは、(1)放射性的接地逆転層の下に粒子物質が抑えられている早朝、(2)混合層が発達しつつある日中の時間帯、そして、(3)接地逆転層が再形成されようとする時間帯である。Noonkester (1976) は、混合層は発達して、地上最高気温の出現する2時間前に、最大高度に達すると報告している。混合層日変化における、こういった特徴は本観測結果にも見出すことが出来る。

さらに、混合層が最大高度に達したあと、高濃度を示す混合層はその高度を時間とともに下げている。この現象は St. Louis での SRI の観測でも見られるが、あまり注意は払われていない (Russell et al., 1974)。この時間帯の境界層の構造は、第4の regime として、詳しく研究する余地があると思われる。

混合層高度の上昇速度は、それが高度 700 m に達するまでは 200 m/h であり、そこで、しばらくの間、停滞する。11時以降、混合層は再び成長を始め、上昇速度は 600 m/h となる。そして 8月1日の最大高度である 1,400 m にまで達する。混合層の成長は熱的な自由対流によって引き起こされるという簡単なモデル (Gamo and Yokoyama, 1979) を考えると、混合層の成長速度は地表面熱フラックスと気温こう配に依存する。熱フラックスは今の場合、連続的に増加したと考えられるから、成長速度の不連続的な変化は上空の気温こう配の違いに因ると考えることができる。この気温分布の鉛直構造は粒子物質の鉛直分布に反映しており、高度 700 m と 1,400 m に境界を持つ3層構造となっている。前者は6時半に、後者は8時半に初めて出現し、その後まで持続している。

夜間の接地層の粒子状物質濃度は比較的高く、日中は、混合層が成長するとともに混合層内の濃度は徐々に減少していく。粒子状物質濃度の変化は、粒子の生成、消滅、移流、拡散等の複雑な過程が組み合わさって起こると考えられるので、簡単に記述することは難しい。しかし、これまでの経験に因れば、相対湿度とレーザーレーダーで測定される粒子状物質濃度との間に高い相関が見られる。おそらく、その理由は高湿度下で粒子径が成長して光散乱係数を増加させたり、あるいはその逆の現象が起こるからであろう (MacKinnon, 1969)。日中に観測された粒子状物質濃度の減少は、低湿度となったことと、混合層高度の増大と12時以降の風速の増加とに依る換気効果とに起因すると考えられる。

Russell et al. (1974) は対流の効果が減少してくると、粒子物質濃度を決めるのに、移流の効果が重要になることを示した。この移流効果は風向に変化があるとき、明瞭に見ることができる。この変化は例えば、7月31日の20時から21時の間、8月1日の1時から4時、22時から23時、8月2日の0時から1時、6時から7時のそれぞれの間に起こっている。このとき、風向の変化に対応して、THI 濃度変化パターンには特徴的な濃度分布の時間変化を見い出すことができる。

5. 結 語

この報告では、国立公害研車載型レーザーレーダー(デジタルデータ収録システム)によって観測された大気境界層の日変化を詳細に示した。観測は典型的な夏の条件下で、臨海域の都市域(埼玉県浦和市)において行った。観測結果はTHI 濃度変化パターンとして表示した。これによって、濃度分布の時間変化は明瞭に把握され、粒子状物質濃度の分布パターンをトレーサーとして大気境界層の構造を推定することが可能であることを示した。

Russell et al. (1974) は、大気境界層の日変化が三つの regime に区分されることを示したが、今回の観測結果はさらにもう一つの区分(混合層が最大高度に達したあと、新たな接地逆転

層が形成されるまでの午後の時間帯)が必要であることを示唆している。

謝 辞

レーザーレーダー観測のための場所提供その他の便宜をはかって頂いた、埼玉県衛生研究所ならびに、気象データを提供して頂いた埼玉県公害センターに感謝致します。

引 用 文 献

- Allen, R.J. and W.E. Evans (1972): Laser radar (lidar) for mapping aerosol structure. *Rev. Sci. Instrum.*, **43**, 1422-1423.
- Anfossi, D., P. Bacci and A. Longhetto (1974): An application of lidar technique to the study of the nocturnal radiation inversion. *Atmos. Environ.*, **8**, 537-541.
- Barrett, E.W. and O. Ben-Dov (1967): Application of the lidar to air pollution measurements. *J. Appl. Meteorol.*, **6**, 500-515.
- Collis, R.T.H., F.G. Fernald and M.G.H. Ligda (1964): Laser radar echoes from a stratified clear atmosphere. *Nature*, **203**, 1274-1275.
- Collis, R.T.H. (1966): Lidar: a new atmospheric probe. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **92**, 220-230.
- Collis, R.T.H. (1969): Lidar for routine meteorological observations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **50**, 688-694.
- Collis, R.T.H. (1970): Lidar. *Appl. Opt.*, **9**, 1782-1788.
- Endlich, R.M., F.L. Ludwig and E. E. Uthe (1979): An automatic method for determining the mixing depth from lidar observations. *Atmos. Environ.*, **13**, 1051-1056.
- Fernald, F.G., B.M. Herman and J.A. Reagan (1972): Determination of aerosol height distribution by lidar. *J. Appl. Meteorol.*, **11**, 482-489.
- Gamo, M. and O. Yokoyama (1979): Growth of the mixing depth and the diurnal variation of vertical profiles of temperature and turbulence characteristics in the mixing layer. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **57**, 159-172.
- MacKinnon, D.J. (1969): The effect of hygroscopic particles on the backscattered power from a laser beam. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 500-510.
- Masterson, J.E., J.L. Karney and W.E. Hoehne (1966): The laser as an operational meteorological tool. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **47**, 659-701.
- Naito, K., I. Tabata and Y. Yokota (1968): The vertical distribution of aerosol in the lower atmosphere observed by a lidar. *Papers in Meteorol. Geophys.*, **19**, 615-625.
- Noonkester, V.R. (1976): The evolution of the clean air convective layer revealed by surface-based remote sensors. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 594-606.
- Russell, P.B., E.E. Uthe, F.L. Ludwig and N.A. Shaw (1976): A comparison of atmospheric structure as observed with monostatic sounder and lidar techniques. *J. Geophys. Res.*, **79**, 5555-5566.
- Sasano, Y., H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1979): Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination. *Appl. Opt.*, **18**, 3908.
- Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. *Opt. Quantum. Electron.*, **12**, 159-167.
- Spangler, T.C. and R.A. Dirks (1974): Meso-scale variations of the urban mixing height. *Boundary-Layer Meteorol.*, **6**, 423-441.
- Tennekes, H. (1973): A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 558-567.
- Uthe, E.E. (1972): Lidar observation of the urban aerosol structure. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **53**, 358-360.

- Uthe, E.E. and P.B. Russell (1974): Experimental study of the urban aerosol structure and its relation to urban climate modification. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 55, 115-121.
- Uthe, E.E. and R.J. Allen (1975): A digital real-time lidar data recording, processing and display system. *Opt. Quantum Electron.*, 7, 121-129.
- Vieze, W. and J. Oblas (1969): Lidar-observed haze layers associated with thermal structure in the lower atmosphere. *J. Appl. Meteorol.*, 8, 369-375.
- Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama (1977): Airborne measurements of turbulent heat flux. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 55, 533-545.

国立公害研究所特別研究成果報告

第1号 陸水域の富栄養化に関する総合研究—霞ヶ浦を対象域として. (1977)

第2号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究—昭和51/52年度研究報告. (1978)

(敬 称)

国立公害研究所研究報告

第3号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)

第4号 スモッグチャンバーによる炭化水素—窒素酸化物系光化学反応の研究—昭和52年度中間報告. (1978)

第5号 芳香族炭化水素—窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究—昭和51/52年度研究報告. (1978)

第6号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(II)—霞ヶ浦を中心として. (1979)

第7号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)

第8号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和52/53年度研究報告. (1979)

第9号 スモッグチャンバーによる炭化水素—窒素酸化物系光化学反応の研究—昭和53年度中間報告. (1979)

第10号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究—昭和51/53年度特別研究報告. (1979)

第11号 Studies on the Effects of Air Pollutants on Plants and Mechanisms of Phytotoxicity. (1980)

第12号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)

第13号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)

第14号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究—昭和53, 54年度特別研究報告. (1980)

第15号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和54年度研究報告. (1980)

第16号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測. (1980)

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

No. 16

国立公害研究所研究報告 第16号
(R-16-'80)

昭和55年11月8日発行

編集・発行 国立公害研究所
茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

印刷 株式会社イセブ印刷
茨城県新治郡桜村天久保2丁目11-20

Published by The National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
November, 1980