

国立公害研究所研究報告 第49号

*Research Report from the National Institute for Environmental Studies, Japan, No. 49, 1984*

# 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究

*The Development and Evaluation of Remote Measurement Methods for Environmental Pollution*

昭和57年度特別研究報告

*Research Report in 1982*

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

## 序

広域における環境状況の把握は、いくつかの地点で測定し、この点情報を基にして地域全体の汚染の2次元又は3次元の分布状況を推算する方法が試みられてきた。しかしながら、対象となる地域には交通が不便であったり、水上に位置したりして近接することが不都合な場所が含まれている。特に上空の大気のような3次元の場合には、その汚染の分布を空間的、時間的に連続して測定することは、實際上、不可能である。そこで、遠隔計測の方法が環境測定の立場からも注目されるようになった。

国立公害研究所では、昭和55年以来、特別研究として「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」を実施してきた。そのうち昭和55年度、56年度の成果は、それぞれ本シリーズの34号、39号として発表した。本報告は前回のものに引き続き第3年度(57年度)の研究成果をまとめたものである。57年度までにレーザーレーダーによる測定手法を改良し、大気汚染のデータが定量的に得られるところまで完成した。

今回の報告書の中には特にレーザーレーダーによる測定を中心にした報文をまとめてあり、このレーザーレーダーを使った大気の混合層の観測と、その構造の解明や自動車排ガスの中に含まれるエアロゾルの拡散に関する観測結果が含まれている。このような測定は遠隔計測以外の方法ではなほだ困難であり、これらの研究成果が、大気汚染の研究者に対して新しい知見を与えるものと期待される。

なお、本報告の中にはレーザーレーダーによる大気汚染計測データの平滑化とその情報によって測定局をどのように配置するのが最適であるかというような研究や、レーザーレーダーデータの画像処理に関する研究も含まれている。

今回はこの57年度中に特別研究として実施した成果のすべてを印刷することができなかったが、それらは最終年次の報告書の中に含まれる予定である。

なお、特別研究は継続実施中であるが、本報告の成果が多くの研究者に注目され、広く環境計測に応用されることを期待している。

昭和59年1月

国立公害研究所  
所長 近藤次郎

## 目 次

### I. 研究の意義と概要

1. 環境汚染研究における遠隔計測の意義…………… 1  
    大喜多敏一
2. 研究の概要…………… 3  
    竹内延夫・大井 紘

### II. 報 文

1. 混合層高度連続測定用簡易型レーザーレーダーの製作 …… 15  
    松井一郎・笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫
2. レーザーレーダーによる混合層高度の連続自動観測 …… 27  
    笹野泰弘・松井一郎・清水 浩・竹内延夫
3. ミー散乱レーザーレーダーによる対流セル構造の観測  
    —画像データのエッジ強調による構造の抽出— …… 39  
    笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫
4. ミー散乱レーザーレーダーによる発達過程の大気混合層の観測 …… 47  
    笹野泰弘
5. 大気混合層高度と遷移層厚きの時間変化モデル …… 77  
    笹野泰弘
6. 自動車排出ガスに含まれるエアロゾルの拡散に関するレーザーレーダー観測 …… 95  
    笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・清水 浩・竹内延夫・功刀正行・溝口次夫
7. NO<sub>2</sub>の分光特性と遠隔計測への応用上の問題点 …… 105  
    杉本伸夫
8. エントロピー評価基準と区分線形変換によるレーザーレーダー画像の強調 …… 123  
    宮本定明・大井 紘・内藤正明・清水 明
9. レーザーレーダー大気汚染計測データの平滑化とこれに基づく測定局の最適化 …… 133  
    甲斐沼美紀子・内藤正明

## CONTENTS

### I . Significance and Outline of the Studies

- 1 . Inportance of Remote Sensing in the Studies of Environmental Pollution ..... 1  
T. OKITA
- 2 . Outline of the Studies ..... 3  
N. TAKEUCHI and K. OI

### II . Papers

- 1 . A Compact Laser Radar for Routine Monitoring of Mixed Layer Heights ..... 15  
I. MATSUI, Y. SASANO, H. SHIMIZU and N. TAKEUCHI
- 2 . Automatic Determination of Atmospheric Mixed Layer Height in Routine  
Measurements by a Laser Radar ..... 27  
Y. SASANO, I. MATSUI, H. SHIMIZU and N. TAKEUCHI
- 3 . Convective Cell Structures Revealed by Mie Laser Radar Observations and  
Image Data Processing ..... 39  
Y. SASANO, H. SHIMIZU and N. TAKEUCHI
- 4 . Mie Laser Radar Observation of the Developing Atmospheric Miwed Layer ..... 47  
Y. SASANO
- 5 . Modelling of the Development of Atmospheric Mixed Layer and Transition  
Layer ..... 77  
Y. SASANO
- 6 . Diffusion of Aerosols in the Exhaust Gases Observed by Laser Radar ..... 95  
Y. SASANO
- 7 . Spectroscopic Properties of  $\text{NO}_2$  in Visible Region and Application to Remote  
Measurements ..... 105  
N. SUGIMOTO
- 8 . Enhancement of Laser Radar Images by a Class of Piecewise Linear  
Transformations of Gray Levels Based on an Entropy Criterion ..... 123  
S. MIYAMOTO, K. OI, M. NAITO and A. SHIMIZU
- 9 . An Optimum Allocation of Air Monitoring Stations Based on Smoothed  
Laser Radar Data ..... 133  
M. KAINUMA and M. NAITO

## I. 研究の意義と概要

### I-1

#### 環境汚染研究における遠隔計測の意義

大喜多敏一 (大気環境部)

今日、環境行政は都市域を中心に大気や水の総量規制、環境影響評価、環境管理計画など、次第に複雑化し、いずれもその政策の立案に当たって広域環境に関する高度な汚染分布情報が要求されている。

大工業地帯や大都市などの大発生源から排出された各種汚染質は、排出源近傍において直接的な汚染をもたらすだけでなく、季節・気象条件及び地域特有の風系構造によって、光化学反応等の化学変化を伴いながら遠距離輸送され、煙源から数10 km離れた地点において大気汚染の被害をもたらすなど、大気汚染の広域化が問題となっており、その実態把握が望まれている。

また、拡散場の表示方法、広域の環境指標、広域環境評価手法の問題、環境監視システムの効率化など、環境汚染把握に関する手法の開発が緊急の課題となっている。

従来、広域環境状況の把握はいくつかの離散的測定点における点情報を基に解析が試みられてきた。しかし、広い対象場の状況を地上付近だけの点情報だけから把握することは原理的に不可能であり、上空を含めた3次元的な広域の汚染分布を空間的・時間的連続情報を基に状況把握することが不可欠である。そのために従来は航空機を利用した観測が実施されてきたが、航空機による測定の場合は飛行高度、飛行可能地域に制約があるだけでなく、汚染質の分布を長時間継続して把握することは困難であった。さらに、航空機観測をひんぱんに実施することは、経費の点から難しい。これらの事情から、現状では、広域大気汚染現象を全体的に把握するまでには至っていない。

他方、遠隔計測技術により、3次元領域の事象を時間的、空間的に連続に近い形で把握することが可能となってきた。現在レーザーレーダーによって、エアロゾルやNO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>等のガスの分布が測定されており、また、測定がなされようとしている。またレーザーレーダーや他の各種のレーダーのデータより、間接的に上空の逆転層高度、風速、風向、気温等の気象要素を把握することも可能となりつつある。さらに今後、長光路光吸収法等を用いたガスやラジカルの遠隔計測、特にその垂直分布の測定、発生源の遠隔測定等が期待されている。

他方、人工衛星等に分光学を利用した検出器を搭載し、それにより植物や水面等地表の状況、大気中の雲、気温、O<sub>3</sub>等の分布の測定がなされつつある。

本特別研究では以上の研究のうち、レーザーレーダーによるエアロゾルや  $\text{NO}_2$  の分布の測定と、それより求められる各種気象現象の把握に焦点が当てられている。また、水質・陸域計測に対しては、人工衛星や航空機に搭載したマルチスペクトルスキャナーを利用した遠隔計測技術を取り上げ、特に SS、透明度等の分布の測定を行っている。その結果 57 年度までに大型レーザーレーダーによる広域汚染分布の測定及び画像データ処理が可能になる等の成果があった。

58 年度は 57 年度までの成果に基づき、広域エアロゾル分布、混合層構造等について継続的な測定を行い、大型レーザーレーダーによる広域汚染計測手法の有効性を実証すること、人工衛星、航空機等によって得られる遠隔計測データを用いた水質推定モデルの定量性の向上を図ること、遠隔計測画像データの処理・解析手法の高度化を図ること等を行う予定である。

## I-2

### 研究の概要

竹内延夫 (大気環境部)・大井紘 (環境情報部)

#### 1. はじめに

本特別研究「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」は、環境汚染計測において遠隔計測技術の活用を図るための技術的、システム的な問題点を検討することを目的として、昭和 55 年度より 4 か年計画で開始された。本報告書は、第 3 年度 (昭和 57 年度) の研究成果をまとめたものである。

遠隔計測技術を用いるならば、3次元領域の事象の状況を時間的及び空間的に連続に近い形で観測することが可能である。しかし、これは新しい技術であり、まだ環境計測分野で十分実用化されるまでには至っていないのが現状である。本研究では環境計測分野での遠隔計測技術の実用化を目指して、基礎技術の開発から、環境行政への適用性の検討までを含めた一連の総合研究を行うことを目標としている。遠隔計測技術としては、大気汚染計測にはレーザーレーダー技術を、水質・陸域計測に対しては、マルチスペクトルスキャナー (MSS) データを用いる方法を取り上げる。

レーザーレーダーは、アクティブリモートセンサーとして、エアゾルや汚染気体成分の 3 次元的な計測に最適な方法である。本研究で扱うのは大型レーザーレーダー (昭和 54 年に建設) と分光型レーザーレーダーであり、前者はエアロゾルによる広域大気汚染の濃度の計測に、後者は局所大気汚染における気体成分の計測に適している。

MSS は陸地、水面などによる太陽光の反射、放射エネルギーを分光計測するパッシブリモートセンサーである。MSS データの分光的解析から、測定対象の状態に関する情報が得られる。水質・陸域の遠隔計測技術としては、現在のところ最も実用化に近いと考えられている。

なお、レーザーレーダー、MSS を用いた環境計測研究の現状のレビューについては初年度報告書の解説 II-1, 2, 3 に述べてある。

遠隔計測技術を用いると、大気汚染質、水質汚濁物質、陸域汚染の空間分布を画像パターン (以下、“パターン”と呼ぶ) としてとらえることが可能となる。これは、従来の“離散点”測定データの集積では得ることが難しい、空間的に連続した情報を有している。この環境汚染の空間的パターン情報を環境行政で使用するには、

- 1) 遠隔計測装置の開発
- 2) 計測手法及びデータ処理手法の開発
- 3) フィールド計測データの収集とそれに基づいたパターンデータの活用法の検討

という一連の段階的な研究が必要である。

このようなことから本研究では、遠隔計測装置の開発というハードウェアの研究から、それによって得られるパターンデータの環境行政施策への適用可能性と適用手法の検討に至る総合的な研究を行う。

## 2. 本研究の構成

本研究は、大気・水域・陸域の環境に関する遠隔計測技術の開発と、その結果として得られる画像パターン情報の環境行政施策への適用性の検討を課題としていることは上述のとおりである。大気汚染に関しては、広域の汚染・移流拡散状況の把握と、大気汚染質の局所的な空間分布状況の把握が二つの重要な研究分野である。一方、大気汚染計測のためのレーザーレーダーは測定原理の面から、ミー散乱方式に基づいて浮遊粒子状物質（エアロゾル）の濃度を測定するものと、分光型といわれるもので大気汚染気体濃度を計測するものとに分類される。国立公害研究所で、大型レーザーレーダーと称するものは、前者に当たる。これは広域の計測が可能なものである。他に、前者に分類されるもので、可搬型のもので、局所的測定に適するものも、本研究所で保有している。後者に当たるものは、局所的な計測に適したものであり、本特別研究で開発しようとする DIAL 型と呼ぶものがこれである。以上の組み合わせの関係は図1のようになる。この図における左の縦に当たる広域の大気汚染の大型レーザーレーダーによる研究を第1サブテーマ（研究課題）とした。第2サブテーマを、図1の右の縦に相当する局所的大気汚染計測の問題とした。これには、DIALの開発(図中左下のコマ)と浮遊粒子状物質による局所汚染の問題点の解明(図中、右上)とに分かれる。

水域及び陸域に関しては、人工衛星及び航空機による MSS データを利用して、水質汚濁分布図、植生分布図などの各種環境質分布を推定することを試みることとし、一つのサブテーマ（第3）とする。

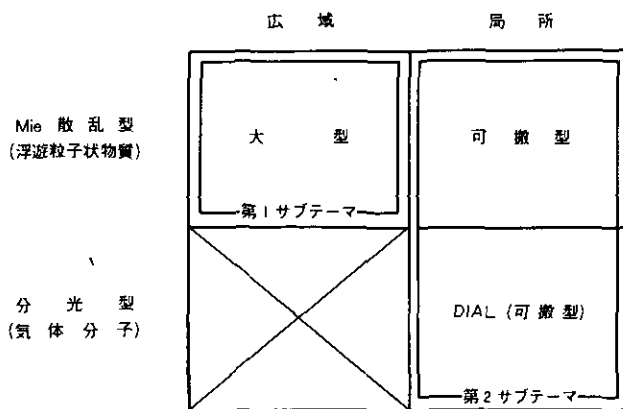


図1 レーザーレーダーによる大気汚染計測の研究テーマの構成



それぞれのサブテーマは、測定装置の開発、計測手法（データ処理手法を含む）の開発、フィールド計測、画像パターンデータの解析と行政施策への適用性の検討という四つの段階に分けられる。測定対象によって設定された三つのサブテーマは、“パターンデータの解析”までは、互いに関連しつつもある程度独立に研究が進められ、“適用性の検討”の段階で一つにまとめられている。それゆえ、最終段階の“適用性の検討”を独立のサブテーマとした。以上の課題の構成を図2に示した。実際のサブテーマ名は以下のとおりである。

1. 大型レーザーレーダーによる広域汚染の計測手法の開発
2. 分光型レーザーレーダーによる汚染質空間分布の計測法の開発
3. 画像データによる水域・陸域汚染情報の定量化
4. 分布パターン情報を用いた環境汚染解析及びその環境施策への適用性の検討

それぞれのサブテーマで取り上げる具体的研究内容は以下のとおりである。

1. 大型レーザーレーダーに関しては基本的な装置部分（ハードウェア部分）が完成している。したがって、装置機能の向上から開始し、高品質画像データを得るためのデータ処理法の開発、広域汚染分布や移流のデータの取得方法の研究を行う。
2. 分光型レーザーレーダーに関しては、装置の開発から開始し、フィールドで局所大気汚染気体の濃度分布プロフィールを計測する手法を開発する。この手法の開発のためには、局所汚染の空間的分布の特徴をとらえることが必要であり、既に開発された可搬型ミューンレーザーレーダーシステムを使用する。分光型レーザーレーダーの種類としては汚染気体の空間分布が容易に測定できる差分吸収方式レーザーレーダー（DIAL）と一定距離の平均濃度を高感度で測定できる長光路吸収方法を採用する。
3. 水域・陸域に関しては、人工衛星及び航空機から得られる MSS 画像データを基に、各種環境質の分布を推定する。特に水質濃度を推定するための統計モデルの開発を行う。
4. 以上の研究成果を基に得られる分布パターン情報を用いて、環境汚染の解析と広域的評価を行う手法を開発し、また、その解析・評価の結果を環境行政施策へ適用する方法を検討する。

以上の研究課題の内容の互いの関係を構造化して表したものが図2である。図の中で、一番下の横長のコマが第4サブテーマに相当する。このコマを除いた、縦の3列のコマが、左から第1、第2、第3のサブテーマに対応している。

### 3. 研究成果の概要

57年度では、大型レーザーレーダーに関しては、カラーグラフィックディスプレイを用いたレーザーレーダー画像表示システムの開発、広域汚染分布計測手法の高精度化のための減衰補正手法の検討と地上測定データとの比較、混合層構造及びエアロゾル鉛直分布の研究、広域風系測定データ解析プログラムの開発などを行った。

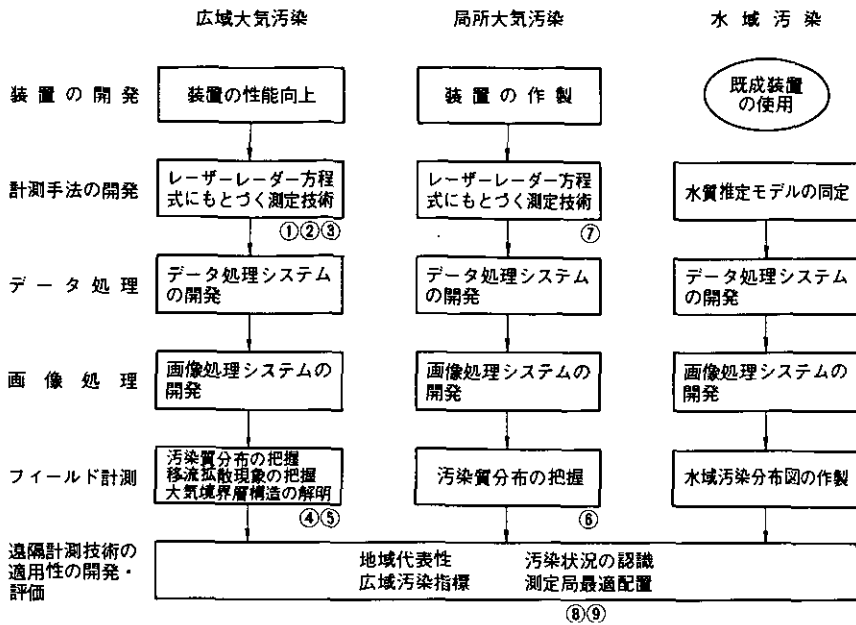


図2 遠隔計測の研究内容の構造 (○印収録報文番号)

分光型レーザーレーダーとしては、YAGレーザー励起色素レーザーを用いたNO<sub>2</sub>測定用DIALシステムについて、室内実験による性能評価を行い、環境濃度測定用のシステム的设计と受光部・信号処理部の製作を行った。赤外半導体レーザーを用いた高感度検出システムについては、9～11μm領域のレーザー素子を用いて性能試験とエチレンの濃度測定を行った。その結果、4MHzの周波数安定度と4×10<sup>-4</sup>Torr・mの最小検出感度を得た。

環境パターン情報の処理解析手法に関しては、霞ヶ浦の航空機マルチスペクトルスキャナー(MSS)データにより水質分布を定量化するために、各種水質要素と水面反射率との回帰分析を行い水質推定モデルを構成した。また、複数時期の画像データを重ね合わせ、変化を抽出することによって植生の動態をモデル化することを試みた。更に画像データの雑音除去方式の開発及びソフトウェアの拡充を図った。

環境認識のためのデータ処理法の開発と手法の実用性の検討としては、レーザーレーダーデータの濃淡レベルの有効な強調と、混合層高度自動決定との画像処理技術を開発した。また、パターンデータを利用した測定局の最適配置法と地上測定局データからパターンデータを生成する手法とを検討した。

本年度の研究成果をサブテーマごとにやや詳しく説明する。

## (1) 大型レーザーレーダーによる広域汚染の計測手法の開発

本研究では、大型レーザーレーダーの機能を拡充し、広域汚染計測手法を確立する。さらに、広域汚染の実態把握並びに、その時間的推移から広域の移流・拡散現象の解明に必要な汚染質空間分布データの蓄積を図ることを目的としている。

前年度までに、装置開発関係では、装置の試験・較正法、メンテナンス法の確立、各種ノイズ対策、装置本体の熱ひずみ影響の防止対策を行ってきた。データ処理関係では、測定・制御プログラム、ミニコン、大型電算機間のデータ伝達システム、データ処理・表示プログラム、データ質チェックプログラムの開発を行った。

57年度においては、画像表示システムの開発、広域風系測定データ解析プログラムの開発を行った。

項目ごとの主要な成果は以下のとおりである

1) 大型レーザーレーダーに付属するミニコンピューターとカラーグラフィックディスプレイを結合し、画像データの蓄積のためのハードウェアシステムを完成した。

2) 広域エアロゾル分布データの信頼性の向上のため、減衰補正手法の検討、地上測定データとの比較、気象条件や発生源との対応の検討を行った。減衰補正に関しては、エアロゾル濃度に比例した減衰係数を用いる方法について検討した。

3) 混合層構造の時間変化を明らかにするとともにエアロゾル鉛直分布に関するデータの蓄積を行った。

4) 広域風系測定データ解析プログラムを開発した。

## (2) 分光型レーザーレーダーによる汚染質空間的分布の計測手法の開発

1) 前年度までに明らかにされた問題点を考慮し、YAGレーザー励起色素レーザーを用いたNO<sub>2</sub>測定用DIALシステムについて、室内実験に基づく性能評価を行った。これにより、レーザー波長の選択、波長幅の決定、2波長切り換えの方式の検討、データ処理法の検討を行った。測定精度の見積りの結果、環境濃度のNO<sub>2</sub>が実用的な精度で測定できるという結論を得た。これに基づき、YAGレーザー励起色素レーザーを用いた新システムの設計を行い、受光部と信号処理部の製作を行った。

2) 前年度は赤外半導体レーザー(PbSSe、発振長4.5~4.7μm)を光源とするCO気体高感度検出システムを試作した。

57年度は、炭化水素、O<sub>3</sub>等多数の大気汚染気体の吸収スペクトルが存在する9~11μm領域で発振する赤外半導体レーザー(PbSnSeTe)を光源とする装置を試作し、システムの動作特性を測定した。エチレンを試料気体とし、レーザー発振周波数を吸収線中心にロックする方式により4MHz(≈10<sup>-4</sup>cm<sup>-1</sup>)の波長安定度を得た。最小検出濃度は4×10<sup>-4</sup>Torr・mであったが、吸収線の選択によりさらに高感度の計測が可能である。

### (3) 環境パターン情報の処理解析手法の開発

人工衛星、航空機を利用した遠隔計測手法により、広域環境情報を抽出するための処理解析手法について検討を行った。

#### 1) 水質分布の推定

広水域の水質分布を定量的に推定することを目的として、データの収集実験、水質の定量化を行った。実験水域として昨年度に引き続き霞ヶ浦を選び、昭和57年10月及び昭和58年1月の2回にわたり、航空機によるマルチスペクトル画像データの収集、グラントルースデータ（水質及び水中、水面での輝度スペクトル）の収集を行った。さらにこれらのデータを基に水質推定モデルを作成した。水質の定量的推定では、(i)大気による影響、(ii)水面反射光による影響、(iii)水質組成の違いによる影響、の評価が不可欠である。ここではまず、遠隔計測により得られた輝度と水面で測定された輝度の回帰分析により、大気の光路輝度及び大気の透過率を、また水中における輝度と水面における輝度の回帰分布により水面反射光強度を推定する方法を開発した。次に、大気及び水面による影響を除去することにより得られた水面分光反射率と各種水質との回帰分析により、水質推定モデルを構成し、水質分布図の作成を行った。

#### 2) 植生変化の把握

時間とともに変化する植生を遠隔計測により計測し、その動態を把握することを試みた。まず複数の時期に得られた遠隔計測データの重ね合わせを行い、植生の変化を抽出する方法について検討した。データは、当研究所実験ほ場及び埼玉県丘陵地帯において航空機により撮影されたマルチスペクトル画像を用いた。特に、実験ほ場におけるデータでは、裸地、草本、木本の変化を遷移確率行列により記述し、植生動態変化をモデル化することを試みた。

#### 3) 画像処理手法の開発

対話型画像処理システム (IPSEN) のソフトウェア拡充を図った。特に、リモートセンサーの電気的雑音に起因する各種の画像雑音について、その除去方式を開発した。また、ソフトウェアシステムの可搬型化について検討を行い、画像処理システムの VAX 11/780 への移行を試みた。

### (4) 分布パターン情報を用いた環境汚染解析及びその環境施策への適用性の検討

本研究では、遠隔計測の一つの利点として得られる汚染濃度のパターン分布を用いて環境汚染状況を把握し解析する手法を開発するとともに、環境施策の立場から、汚染状況を監視しようとする際に遠隔計測技術の果たすべき役割を検討する。

#### 1) レーザーレーダーデータの画像処理

レーザーレーダーにより得られる2次元パターンデータから、画像内の地点間の濃度差が評価しやすく、かつ明確に濃度が認識しやすいように画像処理をする方法を提案し、実データに適用し、方法の有効性を確かめた。この方法は、最小と最大以外の濃淡レベルでは、原データと濃淡レベルが線形の関係を保つように画像強調をしたものである。最小、最大の濃淡レベルに対応する原デー

タ閾値を決定するために画像のエントロピー最大化を行っている。さらに、レーザーレーダーによって得られたエアロゾル鉛直濃度分布の時間変化を表すパターンから、混合層高さを自動決定する画像処理技術を開発し、得られた混合層高さの平滑化法を検討した。また、昨年度に引き続いて、レーザーレーダーによって得られたパターンデータの平滑化法につき検討した。

## 2) 汚染状況把握のためのパターンデータの生成と利用及び地域代表性の検討

上記の平滑化されたデータを基に、測定局の最適配置を行う方法を検討した。また、汚染状況を濃度分布のパターンとして把握しようとするときに遠隔計測技術が果たす役割を明らかにするため、地上測定局データからのパターンデータの生成の手法と局数削減法の有効性を検討した。さらに、地域代表性を持った大気汚染データを取得するための局配置法について検討した。これに加えて、探索理論に基づく、大気汚染の移動測定計画の決定法を開発した。これは、移動遠隔計測の実用的運用のための一つの基礎研究である。

本報告書の報文(II-1~9)が、研究内容の構造のどこに対応するかは、図2の中に示した。報文II-1~5は第1サブテーマに、II-6, 7は第2サブテーマに、II-8, 9は第4サブテーマに対応する。第3サブテーマの研究成果は、とりまとめて来年度(最終年度)の報告書に収める。

各報文の概要は次のとおりである。

### II-1 混合層高度連続観測用簡易型レーザーレーダーの製作

本装置は、無人運転による連続測定が可能である。これにより、長期間にわたり混合層高度の日変化及び季節変化の状態を観測することができるようになった。

### II-2 レーザーレーダーによる混合層高度の連続観測

鉛直上方だけを観測する専用装置を製作し、夏季の13日間にわたるテスト観測を実施した。得られたエアロゾル濃度の高度・時間変化画像に強調操作を施し、混合層高度抽出の自動化を図った。

### II-3 ミー散乱レーザーレーダーによる対流セル構造の観測

大気の大気対流混合層の構造を調べるため、レーザーレーダー画像に強調操作を施し、対流層中のエアロゾル分布構造を抽出した。上層の清浄大気に貫入するセルの明らかにされた構造は、従来の観測結果と類似している。

### II-4 ミー散乱レーザーレーダーによる発達過程の大気混合層の観測

スキャン測定により混合層及び遷移層の空間構造を明らかにした。混合層高度の上昇について、遷移層の厚さは初め増大し、その後、一定値に近づく。対流セルの直径も同様に、増大の傾向を

示す。

#### II-5 大気混合層高度と遷移層厚さの時間変化モデル

最も単純化された0次のジャンプモデルと、遷移層厚さに関する実験式とを組み合わせ、時間変化をシミュレートした。大型レーザーレーダーによる実験値と比較したところ、良い一致を得た。

#### II-6 自動車排出ガスに含まれるエアロゾルの拡散に関するレーザーレーダー観測

直線道路に対して直角で水平の方向に向けて、高時間分解で測定を行った。交通流の間欠性に対応してエアロゾルの高濃度の出現が見いだされた。

#### II-7 NO<sub>2</sub>の分光特性と遠隔計測への応用上の問題点

NO<sub>2</sub>の分光学的性質について概説し、可視域の吸収帯の解析及びけい光寿命の測定について報告する。また計測への応用において、吸収スペクトルの複雑さ、けい光のクエンチングなどから生じる問題点を考察する。

#### II-8 区分線形濃度階調変換とエントロピー評価関数に基づくレーザーレーダー画像の強調

画像の強調問題を、従来の発見的な手法と違って、最適化問題として定式化する。この定式化によって強調のための変換のクラスを区分線形変換に限定することができ、分析者にとって画像の評価がしやすくなった。

#### II-9 レーザーレーダー大気汚染計測データの平滑化とこれに基づく測定局配置の最適化

平滑化された大気汚染濃度分布パターンに対して、これを最も良く再現できる測定点の配置の組合せを求める方法を与える。この方法によりいくつかの地上測定局の最適な配置を決定することができる。

#### 4. 終わりに

本特別研究は、昭和58年度で終了するので、目下、前記の構成に従い研究を完成すべく努力している。

最後に本研究プロジェクトの推進に専門的な面で御協力頂いた外部の多数の研究者の方々、並びに実務的な面での支援を頂いた研究企画官室、総務部さらには環境庁の関係者に深く感謝の意を表す。

## 印刷物・口頭発表のリスト

## 〔印刷物〕

## (サブテーマ1)

- 1) Sasano, Y., H. Hirohara, T. Yamasaki, H. Shimizu, N. Takeuchi and T. Kawamura (1982): Horizontal wind vector determination from the displacement of aerosol distribution patterns observed by a scanning lidar. *J. Appl. Meteorol.*, **21**, 1516—1521.
- 2) Sasano, Y., H. Shimizu and N. Takeuchi (1982): Convective cell structures revealed by Mie laser radar observations and image data processing. *Appl. Opt.*, **21**, 3166—3169.
- 3) Sasano, Y., A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1982): On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser radar and low level radiosonde observation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 889—895.
- 4) 笹野泰弘・松井一郎・清水浩・竹内延夫 (1983): レーザーレーダーによる混合層高度の連続自動観測. *大気汚染学会誌*, **18**, 175—183.

## (サブテーマ2)

- 1) Takezawa, S., N. Sugimoto and N. Takeuchi (1982): Decay times of dispersed NO<sub>2</sub> fluorescence excited in the blue region. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21**, 809—812.
- 2) Sugimoto, N., S. Takezawa and N. Takeuchi (1982): Time-resolved, dispersed laser-induced fluorescence of NO<sub>2</sub>: observation of collision-induced energy transfer effect. *Jpn. Appl. Phys.*, **21**, 1536—1538.
- 3) 杉本伸夫・竹内延夫 (1982): 大気汚染計測——レーザーセンサーによる遠隔計測. *ぶんせき*, **11**, 834—841.

## (サブテーマ3)

- 1) 安岡善文・宮崎忠国 (1982): リモートセンシングによる湖水域の水質分布計測——回帰分析を用いた大気補正と水質推定. *日本リモートセンシング学会誌*, **2**, 51—62.
- 2) 安岡善文 (1982): 環境評価のための画像情報処理. *環境情報科学*, **11**, 42—47.
- 3) Yasuoka, Y., and R. M. Haralick (1983): Peak noise removal by a facet model. *Pattern Recognition*, **16**, 23—29.

## (サブテーマ4)

- 1) 藤原正弘・大井紘・新藤純子 (1982): 大気汚染濃度分布パターンのスプライン法による推定法. *環境技術*, **11**, 643—649.

- 2) 藤原正弘・大井紘・新藤純子 (1982): 大気汚染測定局の最適配置——既存システムの検討。環境技術, 11, 788—794.

〔口頭発表〕

(サブテーマ1)

- 1) 平尾浩二・北村新三・笹野泰弘・竹内延夫 (57.4): 統計的手法を用いたレーザーレーダー画像の画質向上法。JAACE 第26回システムと制御研究発表講演会, 京都。
- 2) Sasano, Y., H. Shimizu and N. Takeuchi (57.6): Cell structure in the atmospheric mixed layer observed by a Mie laser radar. 11th Int. Laser Radar Conf., Madison, Wisconsin.
- 3) 笹野泰弘・竹内延夫 (57.7): Mie 散乱レーダで観測される対流パターン。第8回レーザ・レーダ (ライダー) シンポジウム, 長野。
- 4) 笹野泰弘・竹内延夫 (57.10): 大型レーザーレーダーによる大気混合層発達過程の観測 (III) モデル計算との比較。日本気象学会 1982 年秋季大会, 札幌。
- 5) 笹野泰弘・竹内延夫 (57.11): Mie 散乱レーザーレーダーによるエアロゾル消散係数分布測定。第23回大気汚染学会, 宮崎。
- 6) 笹野泰弘・竹内延夫 (57.12): ミー散乱レーザーレーダーによる消散係数の評価手法について。文部省科学研究費特別研究「環境科学」R-52 遠隔計測班。昭和57年度研究報告会, 東京。
- 7) Nakane, H., Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui, H. Shimizu and N. Takeuchi (57.6): Obtaining high quality image data with the LAMP. 11th Int. Laser Radar Conf., Madison Wisconsin.
- 8) 中根英昭・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・清水浩・竹内延夫 (57.7): LAMP ライダーによる広域エアロゾル分布の測定。第8回レーザ・レーダ (ライダー) シンポジウム, 長野。
- 9) 中根英昭・笹野泰弘・杉本伸夫・松本一郎・清水浩・竹内延夫 (57.11): 大型レーザーレーダーによる広域大気汚染観測 (III) —エアロゾル分布の空間スケール。第23回大気汚染学会, 宮崎。

(サブテーマ2)

- 1) 杉本伸夫・竹沢賛三・飯島弘昭・竹内延夫 (57.4): NO<sub>2</sub> 蛍光の時間分解分光測定。第36回日本物理学会, 横浜。
- 2) 杉本伸夫・竹内延夫 (57.7): NO<sub>2</sub> の分光特性とレーザ・レーダへの応用上の問題点。第8回レーザ・レーダ (ライダー) シンポジウム, 長野。
- 3) 杉本伸夫・竹沢賛三・竹内延夫 (57.10): 青領域における NO<sub>2</sub> の蛍光寿命 (<sup>2</sup>B<sub>1</sub>) の測定。第37回日本物理学会, 札幌。
- 4) 竹沢賛三・杉本伸夫・竹内延夫 (57.10): 青領域における NO<sub>2</sub> 励起スペクトル <sup>2</sup>B<sub>1</sub> ← <sup>2</sup>A<sub>1</sub> の解



析。第 37 回日本物理学会，札幌。

- 5) 竹沢賛三・杉本伸夫・竹内延夫 (58. 3) : NO<sub>2</sub>励起スペクトル (<sup>2</sup>B<sub>2</sub>-<sup>2</sup>A<sub>1</sub>) の解析。第 38 回日本物理学会，東京。
- 6) 杉本伸夫・竹沢賛三・竹内延夫 (58. 3) : NO<sub>2</sub>励起状態の蛍光寿命とエネルギー移動。第 38 回日本物理学会，東京。

(サブテーマ 3)

- 1) 宮崎忠国 (57. 6) : 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発——水域の水質計測。国立公害研究所研究発表会，筑波。
- 2) 宮崎忠国 (57. 7) : 赤潮藻類 *Olisthodiscus luteus* の活性と分光特性。第 21 回計測自動制御学会学術講演会，東京。
- 3) 杉原滋彦・宮崎忠国 (57. 12) : 分光反射率による水中情報の抽出について。文部省科学研究費特別研究会「環境科学」R-52 遠隔計測班，昭和 57 年度研究報告会，東京。
- 4) 安用善文・宮崎忠国 (57. 7) : 遠隔計測による水質の計測—大気による影響の評価。第 21 回計測自動制御学会学術講演会，東京。
- 5) 安岡善文・宮崎忠国 (57. 11) : 遠隔計測による水質の定量と評価。第 8 回リモートセンシングシンポジウム，東京。
- 6) 安岡善文・宮崎忠国・岸野元彰・杉原滋彦・岡見登 (57. 12) : 遠隔計測による水質の定量 回帰分析を用いた水面反射光の評価。日本リモートセンシング学会，第 2 回学術講演会，東京。

(サブテーマ 4)

- 1) 落合美紀子・内藤正明 (57. 5) : 環境モニタリング・ステーション最適配置について。JAACE 第 26 回システムと制御研究発表会講演会，京都。
- 2) 落合美紀子・内藤正明 (57. 11) : レーザ・レーダ大気汚染計測データの平滑化。第 23 回大気汚染学会，宮崎。
- 3) Naito, M. and M. Ochiai (57. 5) : On optimal allocation of air monitoring stations. Semin. Air Qual. Manage. Related Energ. Policies, Seoul.
- 4) Naito, M. and M. Ochiai (57. 5) : Technical and economic assessment of sulfur dioxide control in Japan. Semin. Air Qual. Manage. Related Energ. Policies, Seoul.

## II-1

### 混合層高度連続測定用簡易型レーザーレーダーの製作

松井一郎<sup>1</sup>・笹野泰弘<sup>2</sup>・清水 浩<sup>2</sup>・竹内延夫<sup>2</sup>

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

Ichiro MATSUI<sup>1</sup>, Yasuhiro SASANO<sup>2</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>2</sup>  
and Nobuo TAKEUCHI<sup>2</sup>

#### 要 旨

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

本報告では、この装置の製作に当たったの検討事項、製作した装置の構成を示し、性能評価及び連続測定により得られた結果について述べる。

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

#### Abstract

The present paper describes the construction of a compact laser radar system, which aims at a continuous monitoring of the atmospheric mixed layer development. Confining a target to mixed layer heights, the system could be greatly simplified and made an automatic operation possible. In the present paper the principle and the details of the new system are presented. Signal-to-noise levels of the system are compared with theoretical values. An example of 24 hour-measurement is also presented, which shows that the laser radar system can provide a distinct aspect of the mixed layer development during daytime.

#### 1. はじめに

レーザーレーダーを用いた気象学や大気汚染<sup>1)</sup>の研究は、以前より行われてきた。これらの研究の中で、大気中のエアロゾル（浮遊粒子状物質）分布を基にした混合層高度の測定が、十分実用的で

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

あることが示された<sup>2)</sup>。一般に、上空に安定層がある時、地上からの汚染質の拡散は、安定層により抑制される。このため、安定層より下層は、上層に比べてエアロゾル濃度が高くなっている。いわゆる混合層高度の高さは、この安定層の高さと考えることができる。レーザーレーダーを用いると、この安定層以下すなわち混合層内のエアロゾルの高濃度を検出することにより、混合層高度の決定を行うことができる。

従来、大気汚染などに関連して混合層高度の測定がなされる場合には、通常、低層ゾンデ、カイツーンなどにより、気温の鉛直分布を求め、気温逆転層（安定層）の高度をもって混合層の高度とみなしてきた。しかし、これらの方法では、時間的に連続した測定は困難であり、ルーチン的な測定には適しない。これに対して、レーザーレーダーによる遠隔計測では、エアロゾル濃度の鉛直分布をとらえることから、混合層の高度を直接的に求めることが可能である。また、時間的にも連続して測定可能であることから、その意義は大きい。

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

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

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

## 2. 製作方針

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

- (1) 測定対象を混合層高度に限定する。
- (2) 混合層高度の時間変化を測定できる。
- (3) 全天候型とし、長時間にわたり無人運転ができる。
- (4) 測定した混合層高度をリアルタイムで表示できる。
- (5) コンパクトにする。
- (6) 操作を容易にする。
- (7) 装置の価格を安価にする。

これら条件を満たすために、次のような設計を行った。

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

- (2) レーザー送光部と受光望遠鏡の入射窓を防水型とした。これにより、降雨に際して装置を雨より防護する作業が不要となった。
- (3) レーザーレーダー装置全体を、1台のコンテナに収納した。これにより、観測地点を容易に移動することができる。
- (4) レーザー発振器に安価で、動作の安定なルビーレーザーを使用した。
- (5) 信号処理装置にマイクロコンピュータを使用した。混合層高度の測定には、高速なデータ処理が要求されないため、通常のミニコンピュータに比べて、演算速度の遅いマイクロコンピュータでも十分使用できる。

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

### 3. 装置の構成

先に述べた設計方針に基づき、次のような装置を製作した。装置の外観図を図1に、概要を図2に示す。また基本的な性能を表1に示す。装置全体は、縦1.9m横4m高さ2.5mのコンテナに収納されている。コンテナ内は、エアコンにより空調されている。

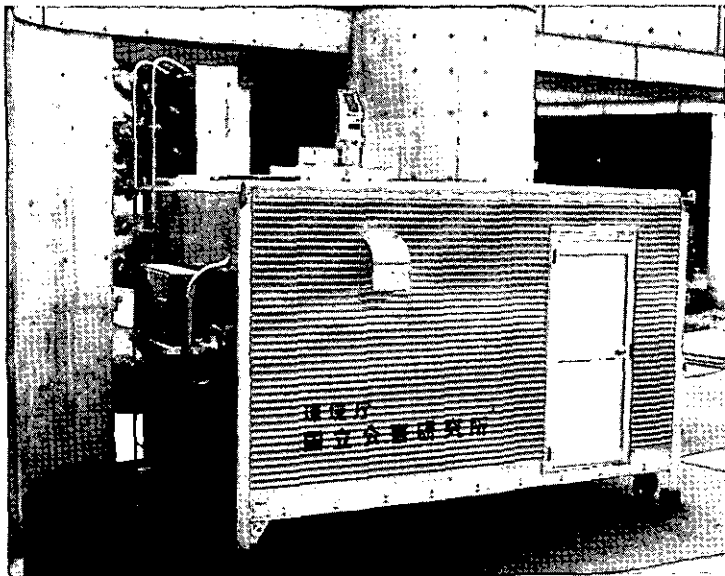


図1 簡易型レーザーレーダー装置の外観図

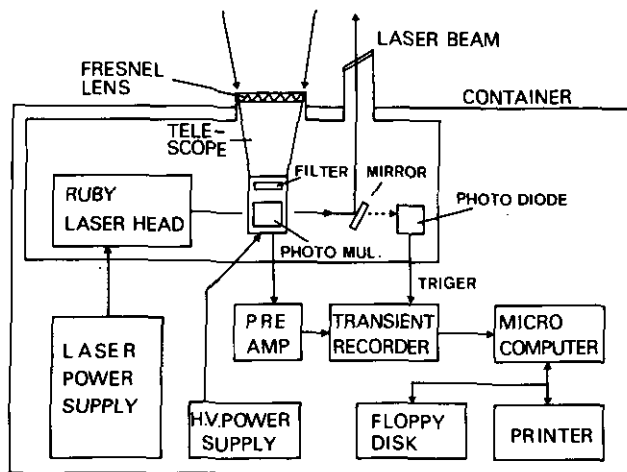


図2 簡易型レーザーレーダー装置のブロック図

表1 簡易型レーザーレーダー装置の性能の概要

レ ー ザ ー	
レーザー媒質	ルビー
波 長	0.6943 $\mu\text{m}$
出力エネルギー	1 J/pulse
パルス幅	20 ns
繰り返し	1 ppm
望 遠 鏡	
形 式	フレネルレンズ型屈折望遠鏡
有効直径	30 cm
黒点距離	80 cm
信 号 処 理	
方 式	トランジェントレコーダによるデジタル方式
最小サンプリングタイム	50 ns/word
分解能	8 bits
演算装置	micro NOVA

ルビーレーザーは1分1パルスの繰り返し発振を行い、パルス幅は約20 ns、出力エネルギーは約1 J/パルスである。レーザーからのパルス光は、光軸調整用ミラーで鉛直上方へ向け、送光窓を通過して大気中に送出される。送光窓は、レーザー光の減衰損失を最小とするために、レーザー光に対してプリユスタ角とした。エコー信号の受信には、直径30 cmのプラスチック製フレネルレンズ型屈折望遠鏡を使用した。

受信された信号光は、視野絞りとし、3 nm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、7102型光電子増倍管（以下PMTと略す）を使用している。

PMT の出力は、エヌエフ社製 Bx-31 型広帯域増幅器で増幅したのち、LOG 変換器に送られる。LOG 変換器には、アナログモジュール社製 LA-90-DC 型を使用した。この LOG 変換器は、立ち上がり 12 ns、入力ダイナミックレンジ 4.5 けたの性能を持っている。

LOG 変換器の出力は、エレクトロニカ製 ME-50 型トランジェントレコーダで高速 A/D 変換する。このトランジェントレコーダの最小サンプリングタイムは 50 ns、精度は 8 bits である。トランジェントレコーダに蓄えられたデータは直ちにデータジェネラル製マイクロ NOVA に送る。マイクロ NOVA は、リアルタイムで混合層高度の解析を行うと同時に、データをフロッピーディスクに蓄える。さらに、マイクロ NOVA は測定データを基に太陽光によるバックグラウンドレベルを求め、D/A 変換器を通して広帯域増幅器のオフセット調整を行っている。

#### 4. 観測・解析ソフトウェア

デジタル処理を行うレーザーレーダーにとって、受信した信号を解析するソフトウェアは、重要な要素の一つである。ここで用いられるソフトウェアは 2 種類ある。一つはデータ収集のためのもので、もう一つは解析処理のためのものである。いずれのプログラムも言語は、FORTRAN を使用した。ただし、トランジェントレコーダ制御の部分のみ、アセンブラ言語で記述している。

データ収集プログラムは、トランジェントレコーダのコントロール、トランジェントレコーダが記録したデータの読み込み、フロッピーディスクへのデータの書き込みを行う。解析処理プログラムは、測定データを基に、混合層高度の決定に必要な各種演算を行う。求められた混合層高度は、プリンター上に表示される。なお、混合層高度の測定原理及び、解析方法についての詳細は Sasano ら<sup>5)</sup>を参照されたい。

#### 5. 動作試験

製作した装置の動作特性の検討を、(1)測定感度、(2)  $Y(R)$ 関数、(3) LOG 変換器、(4)連続測定実験について行った。

##### 5.1 測定感度評価

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

理論的な S/N 式はレーザーレーダー方程式<sup>6)</sup>を使用して次のように求められる。

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

$$S/N = \sqrt{M} n(R) / \sqrt{\mu (n(R) + 2 n_0)} \quad (2)$$

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

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

$$T(R) = \exp[-\alpha R] \tag{5}$$

ここで、 $n(R)$ は  $R$  の距離から散乱された信号光により照射される PMT の光電面から飛び出す光電子の数、 $n_0$ 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、 $\beta$  はミー体積後散乱係数、 $T$  はレーザービームの大気中での透過率、 $A_r$  は望遠鏡の有効面積、 $Y$  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、 $\eta$  は PMT の量子効率、 $M$  は測定時間内に発射したレーザーパルスの数、 $n_b$ は PMT から放出される背景光による雑音電子数である。本装置におけるパラメータの値を表 2 に示す。また、体積後散乱係数  $\beta$  と消散係数  $\alpha$  については、(3) 及び(4)式より視程  $V$  (km) の関数として求めた。レーザービームの大気中での透過率  $T$  は(5)式より求めた。 $S/N$  はこれらの値を(1)及び(2)式に代入することにより求められる。理論値は  $V$  が 10 km と 40 km について計算した。実験値は高度方向に 75 m 間の信号の平均値と分散の平方根の比より求めた。図 3 に  $S/N$  の理論値と実験値を示す。理論値と実験値の間には、良い一致が見られる。日中の  $S/N$  の実験値が理論値より若干、低くなっている原因として、日中の背景光の増大による LOG 変換器のダイナミックレンジの低下が影響していると考えられる。レーザーレーダー信号は背景光の上に重畳して得られる。日中は背景光が大きくなるため、LOG 変換器に入力される信号も、常に背景光が増大されてくる。この結果 LOG 変換器の特性上、有効なダイナミックレンジが低下し、結局はトランジェントレコーダーの A/D 変換器に対して量子化誤差となって現れてくる。この A/D 変換器の量子化誤差の増大が、 $S/N$  の低下の原因となる。

表 2  $S/N$  の計算に用いたパラメータ

信号	定 義	値
$n_0$	光 子 数	$1.75 \times 10^{29}$ photons/pulse
$L$	距離分解能	7.5 m
$K$	光学系の効率	0.133
$A_r$	望遠鏡の有効面積	0.707 m <sup>2</sup>
$Y_r$	幾何光学的効率の補正関数	1
$\eta$	光電子増倍管の量子効率	0.3%
$n_b$	背景光の量	昼 417 electrons/gate time 夜 0
$M$	測定積算数	5

### 5.2 $Y(R)$ 関数

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

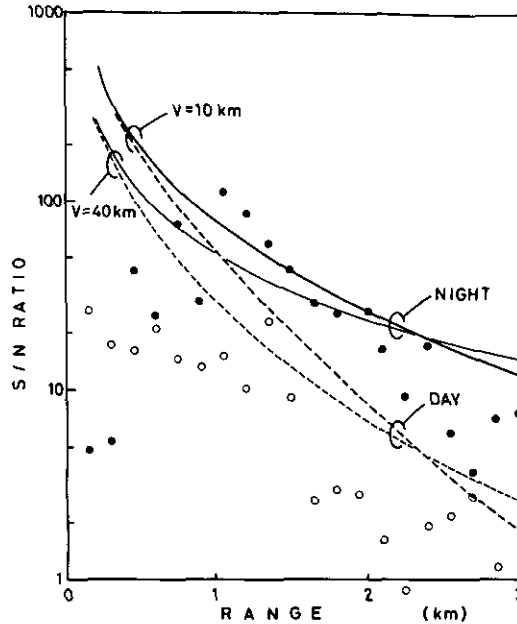


図3 S/Nの理論値と実験値

- 昼の実験値
- 夜の実験値

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

### 5.3 LOG変換器の効果

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

A/D変換器の量子化誤差による影響をモデル計算により求めた。その結果を図5に示す。ある一定の濃度分布(一点鎖線)を仮定したとき、受信々号 $P(R)$ (実線)は、距離 $R$ の2乗に反比例して得られる。ここで、8 bitsのA/D変換器を用い、距離が1つまり1ワード目でフルスケールになるように調整した。A/D変換されたデータは、●で示すデジタル信号として得られる。この値を基に、距離2乗補正を行い、求められる濃度分布は、▲で示す値となる。この結果、距離9以上では



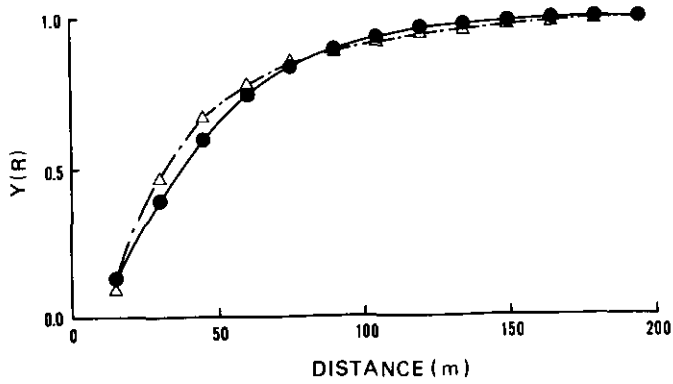


図4  $Y(R)$ の理論値と実験値

- 実験値
- △ 理論値

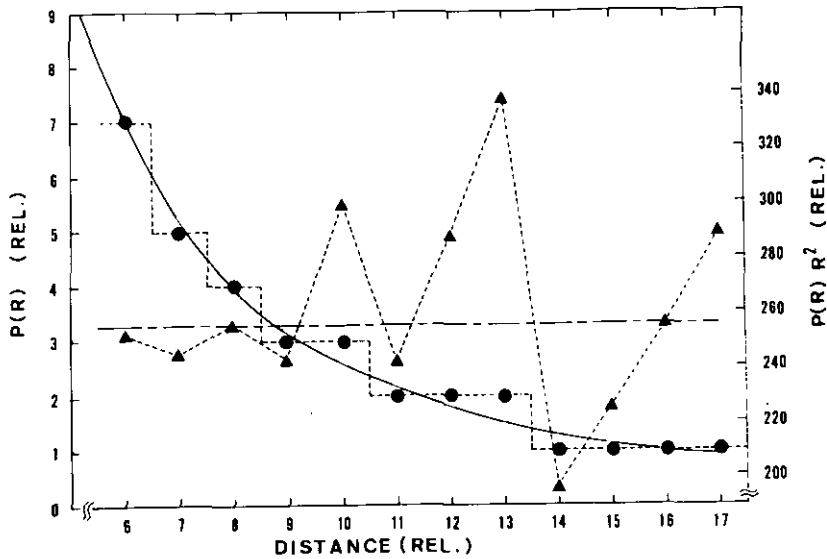


図5 A/D変換器の量子化誤差のモデル計算

- (実線) 受信々号  $P(R)$
- - - (一点鎖線) 仮定した濃度  $P(R)R^2$
- A/D変換されたデジタル信号
- ▲ 求められる濃度

量子化誤差により、求められる濃度の誤差が大きくなることがわかる。

これに対して、いくつかの解決方法が提案されている。例えば、繰り返し数の大きいレーザーを用いることができれば、積算平均により、A/D変換の分解能を改善<sup>8)</sup>できる。しかし、本装置の場合1分1パルスの繰り返しのため、この方法を用いることができない。また、複数のA/D変換器を用いる方法も有効な方法ではあるが、安価な装置の開発という観点から採用し難い。そこで、幾何光学的効率を調整する方法と、LOG変換による方法を併用することとした。

LOG変換器は入力信号に対して、対数変換された信号を出力するもので、ダイナミックレンジの圧縮が可能である。LOG変換器使用時に得られる効果についてモデル計算を行った。その結果を図6に示す。図5と同様に、ある一定の濃度分布(一点鎖線)より得られる信号は、LOG変換により変換され、A/D変換器に(実線)入力する。

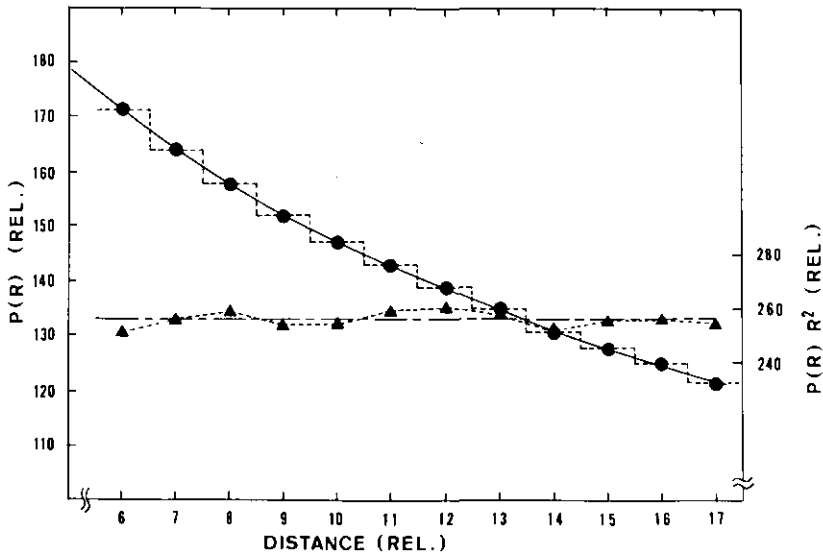


図6 LOG変換器を用いたときのA/D変換器による量子化誤差のモデル計算

- (実線) 受信信号  $P(R)$
- - - (一点鎖線) 仮定した濃度  $P(R)R^2$
- A/D変換されたデジタル信号
- ▲ 求められる濃度

A/D変換されたデジタル信号は、●で示す値となる。求められる濃度を▲で示す。この結果より、LOG変換器による圧縮の効果がA/D変換器による量子化誤差の改善に有効であることがわかる。

実際にLOG変換器を用いた実験結果を示す。LOG変換器未使用時の結果を図7(a)に示す。また、LOG変換器使用時の結果を図7(b)に示す。いずれも、信号をエアロゾル濃度に変換して表して

いる。LOG 変換器未使用の時、高度 500 m 以上では、A/D 変換器の量子化誤差の影響が大きく生じてくる。LOG 変換器を使用した時は、高度 1.5 km まで量子化誤差の影響をあまり受けずに測定可能であることがわかる。すなわち、LOG 変換器を用いることによって、測定距離を高度 500 m より 1.5 km まで向上させることができた。

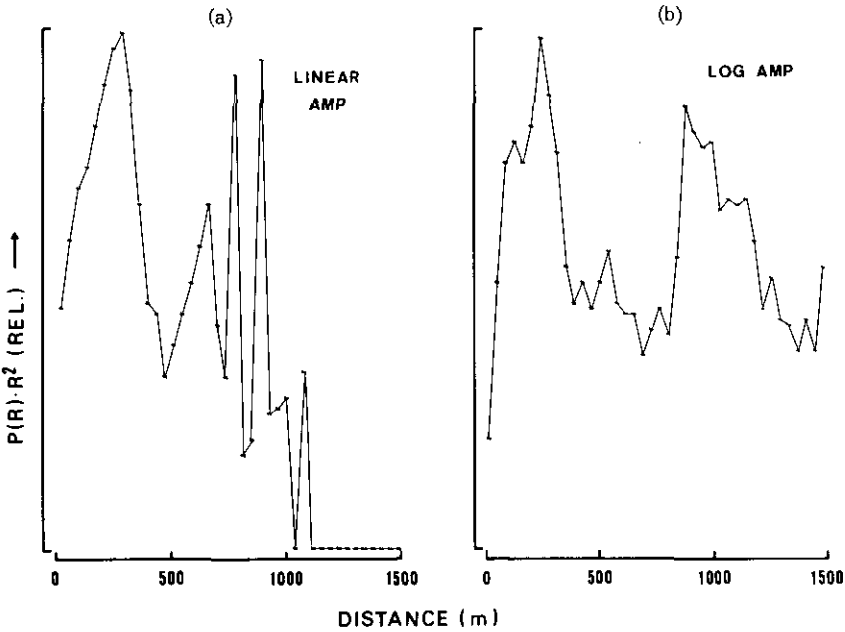


図7 LOG 変換器未使用時と使用時の実験結果

- (a) LOG 変換器未使用時
- (b) LOG 変換器使用時

#### 5.4 連続測定実験

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

これまで、本装置は国立公害研究所構内に設置し、延べ30日間にわたって動作実験を行ってきた。当初は装置全体はコンテナに収納せず、送受光部を建物屋上に設置していたため、送受光部が強い日射を受けて高温になるとレーザーの発振が停止するなどの異常がみられた。その後、本報告で述べたように、コンテナに収納し、空調化を図ったことにより、その問題は解決した。

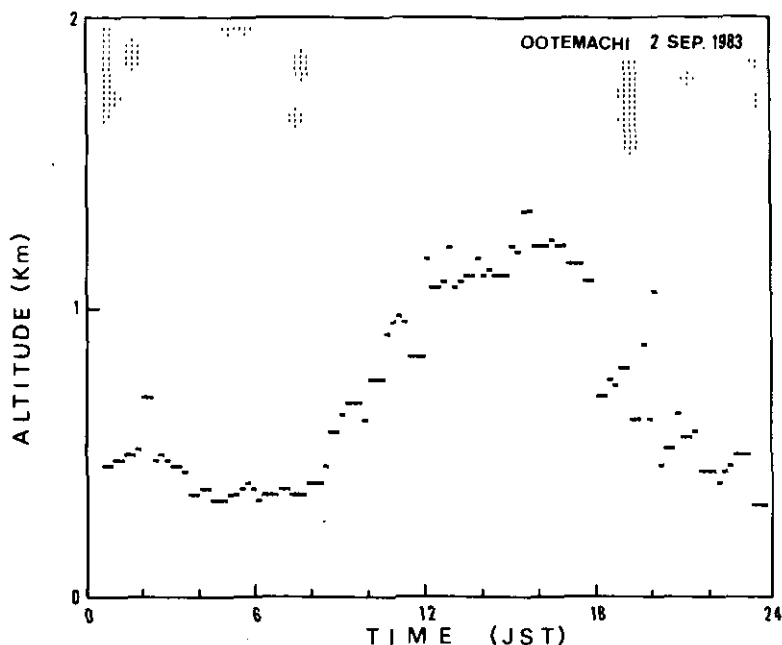


図8 本装置により測定された混合層高度の日変化例

## 6. まとめ

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

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

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

### 引用文献

- 1) 稲場文男ほか (1973) : ライダー (レーザーレーダー) と気象研究ノート, 第 116 号
- 2) Sasano, Y., H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda (1980) : Diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer revealed by a computerized laser radar. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **58**, 143-148.
- 3) 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. Electr.*, **12**, 159-167.
- 4) 木村博一・嶋田隆司 (1981) : 大気汚染観測用全自動レーザーレーダーシステム. 電通学会誌, **J64-C**, 405-412.
- 5) Sasano, Y., A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1982) : On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser radar and low level radiosonde observation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 889-895
- 6) 笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫 (1983) : レーザーレーダー信号の高精度収集法. 国立公害研究所研究報告, 第 39 号, 27-45.
- 7) 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.
- 8) 清水 浩・飯倉善和・笹野泰弘・竹内延夫 (1981) : ディザ信号の重畳による AD 変換器分解能の改善法. 電通学会論文誌, **J64-A**, 963-969.

II-2

レーザーレーダーによる混合層高度の連続自動観測\*

笹野泰弘<sup>1</sup>・松井一郎<sup>2</sup>・清水 浩<sup>1</sup>・竹内延夫<sup>1</sup>

**Automatic Determination of Atmospheric Mixed Layer Height  
in Routine Measurements by a Laser Radar**

Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>, Ichiro MATSUI<sup>2</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>1</sup>  
and Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup>

**要 旨**

混合層高度を連続的にモニターするためのミー散乱レーザーレーダーを製作し、夏季に13日間にわたるテスト観測を行った。その結果、晴天下の日中に発達する混合層高度の時間変化を明りょうにとらえることができた。

本装置は、混合層高度モニターの専用装置として、鉛直上方だけを測定対象とした単機能型となっている。混合層内は上層の自由大気に比べてエアロゾル濃度が高く、混合層の上端で濃度が急減しているケースが多い。レーザーレーダーは、このエアロゾル濃度の鉛直分布を測定するもので、演算により濃度の急減する高度を求めることにより、混合層の高度を推定することができる。

本研究では、局所的な濃度で正規化した濃度の鉛直こう配を指標として、客観的にエアロゾル濃度の急減高度を求めている。

**Abstract**

Present paper describes the newly-constructed laser radar for routine monitoring of the atmospheric mixed layer height and shows the results of thirteen-day experiments in the summer season, which revealed the growth of the mixed layer on sunny days.

This laser radar was designed to function as a routine monitor of the mixed layer height and to point upward only. Vertical profiles of aerosol distribution usually have distinct structures, that is, the aerosol density is higher in the mixed layer than in the free atmosphere above and the abrupt change of aerosol density exists between them.

\* 本論文の要旨は、大気汚染学会誌, 18(2), 175-183 (1983). に発表した。

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, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
The National Institute for Environmental Studies, Engineering Division.

This means the mixed layer height can be inferred from the aerosol density profile. The laser radar detects this aerosol density profile and the height of abrupt change in the aerosol density profile through data processing.

In the present study, the height of the abrupt change in the aerosol density profile is determined objectively from aerosol density gradients normalized by local aerosol density.

## 1. はじめに

大気混合層高度を時間的に連続して測定することはルーチンの大気汚染予測や環境アセスメントなどの実用的な観点から極めて有用であるだけでなく、大気境界層の気象学的研究にとっても貴重な情報を提供することになる。従来は、低層ゾンデ、カイツーンなどによる温位鉛直分布の観測から、安定層の底部高度として混合層の高度を求めてきた。しかし、これらの方法では経費、労力の問題から、時間的に連続して測定することは、現実には難しい。

これに対して遠隔計測の方法は、比較的、連続した測定が可能で、また自動観測の可能性を持っており、ルーチン測定機器として最も有望と考えられる。大気境界層構造の研究には、音波レーダーが最もよく用いられている<sup>1)</sup>。音波レーダーは大気中の温度場の乱れを検出するもので<sup>2)</sup>、乱れ場の鉛直構造から混合層高度が推定される<sup>3)</sup>。また、最近、電波と音波を共用して気温、風の鉛直分布を測定する装置が提案され実験されている<sup>4)</sup>。

レーザーレーダーで観測される大気低層のエアロゾルの鉛直分布は、混合層が発達しているとき、混合層の構造を良く反映していると考えられる。一般に混合層上端の安定成層（逆転層）を境界として、その上部と下部（混合層内）とではエアロゾル濃度に顕著な差があるのが通常である。これを利用して、レーザーレーダー観測から混合層の状態をとらえる試みが多くなされている<sup>5)</sup>。レーザーレーダーの場合、指向性の強いレーザーが使われ、また、散乱効率の大きい粒子を検出対象とするので、比較的、高い高度まで測定が可能である<sup>3)</sup>。

しかし、従来の多くの研究では、測定された濃度の鉛直分布から濃度の急激に減少する高度を主観的に決めていた。これに対して Sasano ら<sup>6)</sup>は、局所的濃度で正規化したエアロゾル濃度の鉛直こう配の大きさを指標として、大気境界層中のエアロゾル高濃度層の高度が客観的に把握でき、これが温位分布の安定層底部高度に一致することを示した。これによれば、レーザーレーダーで観測されるエアロゾル濃度の鉛直分布データに対して簡単な演算を施すだけで、自動的に混合層高度を評価できることを意味している。

これらの知見に基づき、エアロゾル濃度の鉛直分布を連続測定し、混合層高度を自動モニターすることを目的にして、単機能簡易型レーザーレーダーを開発した。

本報告では、混合層高度決定の方法、製作した装置の概要と性能、及び、これを用いて行った夏季13日間にわたる、混合層高度連続観測の実験結果について述べる。

本装置は高度2 km程度までのエアロゾル濃度の鉛直分布を十分な精度(S/N比, 10以上)で観

測でき、混合層高度の日変化を自動的にとらえることができる。本装置は、ルーチンのリアルタイムでの混合層高度の変化を把握することが可能で、大気汚染濃度の短時間的な予測や、混合層高度の年間的な動向の把握に用いることができる。

## 2. 混合層高度決定の方法

晴れた日の日中には混合層が発達し、一般に混合層内では温位が一定で、混合層上端には安定層が存在する。エアロゾル等の大気汚染質は、混合層内で濃度が一律に高く、混合層より上の自由大気では濃度が低い。レーザーレーダーは、この高濃度のエアロゾル層を検出することが可能で、これから混合層の高度を推定することができる。このためレーザーレーダーで測定されたエアロゾル層と混合層（安定層の高度）との対応関係は、古くから注目されてきた。しかし、エアロゾル層高度の決定に際して、従来の研究では、濃度の鉛直分布プロファイルから、濃度が高度とともに急激に減少する高度として、主観的に決めることが多かった。

これに対して Sasano ら<sup>6)</sup>は、レーザーレーダーで測定されたエアロゾル濃度の鉛直こう配に対して、局所的な濃度で正規化した濃度こう配を求め、これが一定のしきい値を超える高度をもってエアロゾル層高度（TAL；Top of Aerosol Layer）を定義している。単純な濃度こう配をとるのではなく、局所的な濃度で割った濃度こう配を用いているために、この方法はエアロゾル濃度の大小に関係なく、分布の構造だけを抽出するのに好都合である<sup>6,7)</sup>。

Sasano ら<sup>6)</sup>で示されているように、この定義により決定したエアロゾル層高度は、温位分布から決めた混合層高度にほぼ一致する。これを利用して、エアロゾル層高度を計算機で自動的に検出することにより、混合層高度の自動モニターをすることが可能である。

具体的な方法は以下のとおりである<sup>6)</sup>。今、適当な時間間隔、 $T$  で平均したエアロゾル濃度の鉛直分布を作る。このとき、高さ方向には、 $\Delta Z$  の高度間隔で濃度を求め、地表から  $j$  番目の高度のエアロゾル濃度を  $C_j$  と書く。正規化した濃度こう配  $G_j$  は、

$$G_j = -\frac{(C_{j+1} - C_{j-1})}{\bar{C}_j(2\Delta Z)} \times 100 \text{ (\%/m)}$$

ただし、 $\bar{C}_j$  は  $C_{j+1}$ 、 $C_j$ 、 $C_{j-1}$  の平均値を表す。Sasano ら<sup>6)</sup>では  $T=10$  分、 $\Delta Z=20$  m として、 $G_j$  が 40 m 以上にわたって 50%/100 m を超えるような濃度の急こう配層のうち、極大の  $G_j$  を与える高度を、エアロゾル層高度と定義している。

計算機で自動的にエアロゾル層高度を求めるために、ここで述べた定義を、そのままプログラム化することができる。レーザーレーダー受信々号からエアロゾル濃度に換算する方法については、他で報告しているので、文献<sup>8)</sup>を参照されたい。

混合層高度を自動モニターするためのレーザーレーダーとしては、鉛直上方だけが空間分解能 20 m 程度、10 分間程度の平均のエアロゾル濃度の鉛直分布が測定できればよい。次章では、この方針で製作した装置について述べる。



### 3. 簡易型レーザーレーダーの概要

これまで、多くのレーザーレーダー装置が製作され、大気境界層の観測、成層圏エアロゾルの観測などがなされてきた。しかし、いずれの装置も研究観測用として製作されており<sup>9,10)</sup>、操作、保守の容易さ、動作の安定性、無人観測の機能などの面では十分とはいえない。

混合層高度をルーチ的に、連続で自動モニターするための専用装置を設計・製作する上で、次のことが必要である。

- ・全天候で運転が可能なこと
- ・無人運転が可能なこと
- ・データ処理・表示がリアルタイムで行えること
- ・操作が容易で、メンテナンスが簡単なこと

さらに、実用的に大気汚染予測システムの一部として利用されるためには安価であることも重要な要素となる。

これらの条件を満たすために、本装置では、レーザー発振部と受光望遠鏡を送受光部として一つのきょう(筐)体に収め、防水型として屋外に設置可能とした。レーザーには、安価で動作の安定なルビーレーザーを使用した。データ処理はデジタル方式<sup>9)</sup>とし、トランジェントレコーダーとマイクコンピュータを組み合わせて、データの収集、演算、表示を行わせる。主な仕様を表1に示した。装置開発の詳細については、別に報告する。

表1 簡易型レーザーレーダーの仕様

レーザー	
種類	Ruby レーザー
波長	0.6943 $\mu\text{m}$
出力	1 J/pulse
パルス幅	20 ns
ビーム広がり	9 mrad
最大繰返し	1 ppm
受信望遠鏡	
形式	フレネルレンズ屈折望遠鏡
有効径	30 cm
焦点距離	80 cm
信号処理装置	
処理方法	デジタル方式
最小サンプリング時間	50 ns
精度	8 bit
記憶容量	1024 word
CPU	Micro NOVA

なお、本論文で示す観測結果については、データ処理・表示手法の検討を効率よく行うために、

HITAC M-180 大型計算機を用いてオフラインでデータ処理を行った。このデータ処理の方法をオンラインリアルタイム処理のため本装置の Micro-NOVA に移行することは容易である。

表 1 に示した装置の構成要素に基づいて理論的な受信々号の S/N 比が計算される。計算の方法は Shimizu ら<sup>10)</sup>と同様で、次式による。

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

$$n_s(R) = \frac{\eta}{h\nu} P_o L K \beta(R) T^2(R) A_r Y(R) / R^2$$

$$n_b = \frac{\eta}{h\nu} N_\lambda \frac{2L}{c} K \Delta\lambda \Omega A_r.$$

ここで、記号の意味は表 2 に示している。また、同表に計算に必要な値を示している。体積後方散乱係数  $\beta$  と消散係数  $\alpha$  については、次のように視程  $V$  (km) の関数として与える<sup>11)</sup>。すなわち、

$$\alpha = 3.91/V, \quad \beta = \alpha/100.$$

ここで、 $V$  は 10 km と 40 km について計算した。また、背景光輝度については、 $N_\lambda = 0.0$  及び  $9.0 \times 10^{-2} \text{W/m}^2/\text{nm}/\text{sr}$ <sup>12)</sup> の 2 とおりを夜、昼の条件として用いた。

表 2 S/N 比の計算に用いたパラメータ

記号	意味	パラメータの値
$M$	積算回数	5
$n_s$	フォトマルから射出される信号の光電子数	—
$n_b$	フォトマルから射出される背景先の光電子数	—
$\mu$	フォトマルの雑音指数	2
$\eta$	フォトマルの量子効率	0.3%
$h$	プランクの定数	$6.626 \times 10^{-34}$
$\nu$	レーザーの発振周波数	$4.32 \times 10^{14}$
$L$	測定の距離分解能	7.5
$K$	装置全体の光学効率	0.133
$\beta$	体積後方散乱係数	
$T$	大気透過率	
$T(R) = \exp \left[ - \int_0^R \alpha(r) dr \right]$ ここで、 $\alpha$ は体積消散係数		
$A_r$	受光望遠鏡の有効面積	0.707
$Y$	幾何光学的効率	1.0
$R$	レーザーレーダーからの距離	—
$\Delta\lambda$	干渉フィルターのバンド幅	$3.0 \times 10^{-9}$
$\Omega$	測定の立体角	$3.14 \times 10^{-4}$
$c$	光速	$3.0 \times 10^8$

(単位は MKS)

計算結果は背景光雑音の大きさと視程をパラメータとして、図1に示している。これによると、背景光雑音の大きな日中でも約2 kmの距離でS/N比が10程度の精度で信号が受信できることが示されている。同図には、後で示す観測実験データから求めたS/N比の実測値を示している。これは、エアロゾル濃度の鉛直分布が一様な分布であるとみなして、高度方向に75 m間(データ数は10個)の信号の平均値と分散の平方根の比から求めたものである。実際のエアロゾル分布は一様でないために、S/N比は過少評価されているが実測によるS/N比は理論値と、ほぼ一致している。夜間の1 km以下の不一致は、濃度分布が鉛直方向に構造を持つためと考えられる。日中のS/N比の実測値が全般に理論値より低いのは、AD変換器の量子化誤差のためと考えられる。

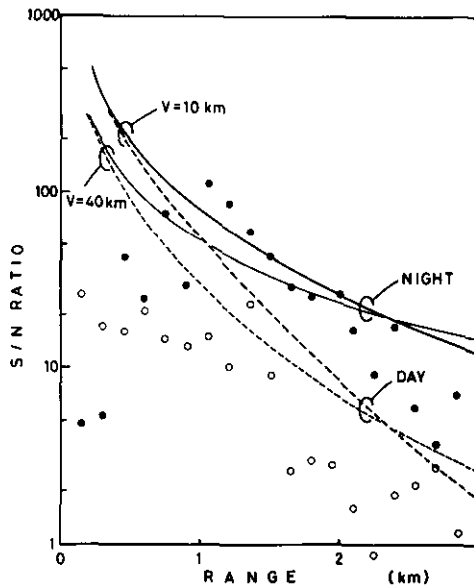


図1 簡易型レーザーレーダーのS/N比の理論計算値と実測値の比較

#### 4. 混合層高度の連続測定

本装置を用いたテスト観測を1982年7月22日から8月10日にかけて、延べ13日間にわたって行った。装置は、国立公害研究所の3階建の建物の屋上に設置し、制御部、データ処理部は3階の室内に置いた。

観測実施日と、観測日の気象条件を表3に示した。気象データは国立公害研究所内の大気モニター棟で収集された一時間値をもとにしている。7月25日は日中は雨、8月5日、8日には、日中、一

表3 簡易型レーザーレーダー観測日の気象条件

年月日	風速 <sup>a)</sup>	日射量 <sup>b)</sup>	相対湿度 <sup>c)</sup>	dh/dt <sup>d)</sup>
1982.7.22 *	2.8	444.4	54.2	93
23 *	2.9	410.9	51.8	180
24 *	3.3	325.4	54.2	—
25	2.1	109.3	79.9	—
27	4.1	223.3	65.7	—
28	1.8	262.0	62.3	—
29	2.6	165.0	73.3	—
8.4 *	2.5	389.9	52.6	240
5 *	2.0	378.7	45.3	253
7 *	3.0	336.7	29.6	80
8	1.1	253.1	66.8	—
9 *	2.7	407.8	52.8	147
10 *	3.1	412.1	48.9	173

a) 日中(7時—18時)の平均(m/s)

b) 日合計(cal/m<sup>2</sup>)

c) 日中(7時—18時)の平均

d) 平均(9時—12時)の混合層発達速度(m/h)

時的に降水があった。

レーザーレーダーによる観測は高度分解能7.5 mで、高度3.75 kmまでデータを収集している。また、受信々号は5パルス分を計算機内で積算してから、フロッピーディスクに記録した。データ処理においては、 $\Delta Z=20$  m、 $T=12$ 分とした。

観測結果及びデータ処理の一例として、図2(a), (b), (c)に、それぞれ(a)8月7日におけるエアロゾル濃度の高度・時間変化(THI: Time to Height Indicator), (b)局所濃度で正規化した濃度こう配のTHI, (c)混合層高度の時間変化を示している。エアロゾル濃度のTHI表示では、濃度レベルを10段階に分割し、印字濃度を変えて表現している。濃度こう配は、50%/100 mを越える急な濃度こう配のみを表示している。混合層高度は2節で述べた方法で決定されたもので、地表に最も近いエアロゾル層高度を示している。

通常、混合層高度は時間に対して単調な増加または減少を示すと期待され、図2(c)の6時前、15時頃の一時的な急な混合層高度の上昇は現実のものでないと考えられる。それぞれ100 m、500 m付近の正規化されたエアロゾル濃度こう配が一時的に小さくなったために、それより上空のエアロゾル層の高度をとらえたことによる。

このようにして決定した混合層高度が、従来の温位分布における安定層底部高度と対応関係をもつことは、Sasanoら<sup>6)</sup>で示されているが、今回の観測結果についても同様の比較を行った。図3は、低層ゾンデによる温位の鉛直分布から求めた地表に最も近い安定層底部高度(ただし、温位こう配が、0.6°C/100 mを越える高度で定義する)と、レーザーレーダー観測から決定された混合層高度の関係を示している。安定層底部高度の決定に±100 m程度の誤差があることを考慮すれば、両者

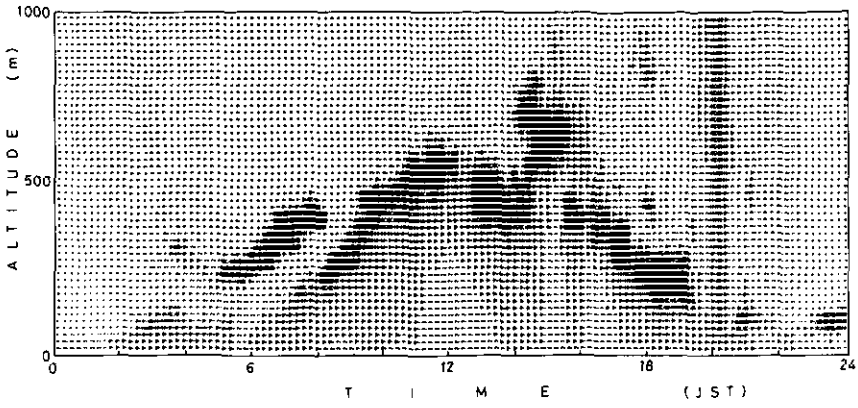


図 2(a) エアロゾル濃度の時間・高度変化図

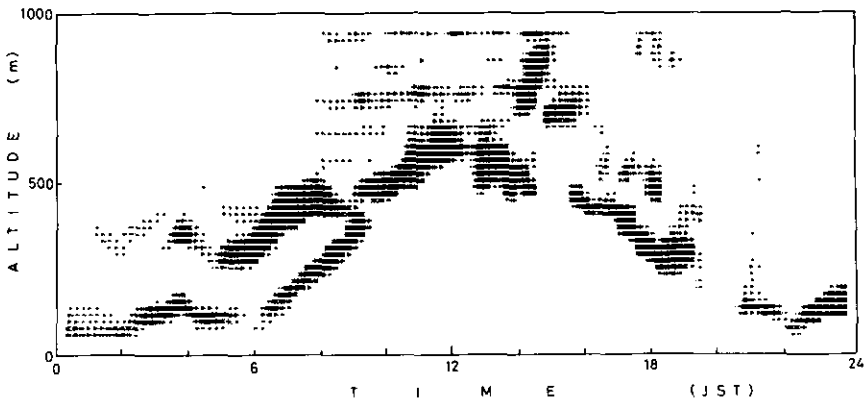


図 2(b) (a)に対する NCG の時間・高度変化図

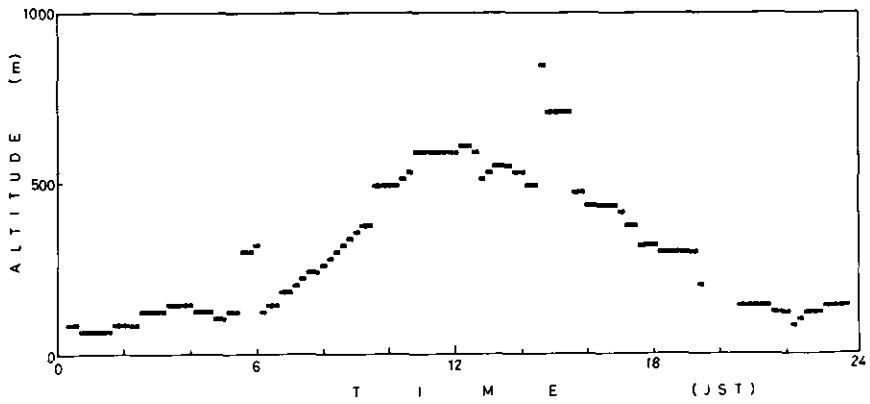


図 2(c) 自動的に決定された混合層高度の時間変化

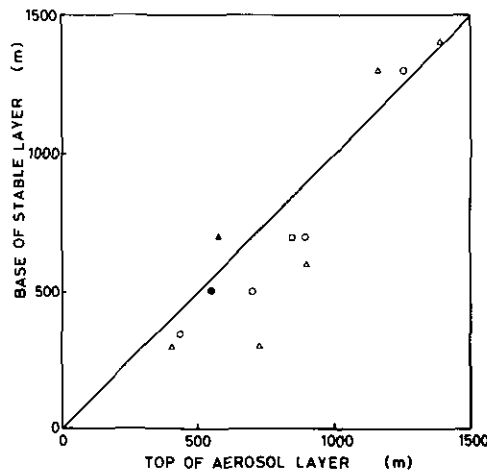


図3 温位分布から決められた混合層高度とエアロゾル濃度分布から自動的に決められた混合層高度の比較

の間には良い相関が見いだされ、ここで求めた混合層高度の妥当性を示している。

図4には、混合層高度の時間変化を、曇天日を除いた8日間(表3に\*で示した)について示した。

これによると、いずれの日にも午前中にエアロゾル層(混合層)高度の顕著な上昇が見られる。しかし、午後には、エアロゾル層の高度は時間的に大きくばらつくことが多い。これは、混合層内外の濃度こう配が日中には小さくなり、顕著なエアロゾル層高度として検出できないためと考えられる。

7月24日に見られる混合層高度の大きな変動は、混合層高度の実際の変化ではない。この日は8日間のうちでも最も日射量は少なく、風が強いため、顕著な混合層の発達がなかったものと考えられる。

いずれの日も21時前後から、接地逆転層の形成に対応すると考えられる低高度のエアロゾル層が観測されている。特に、7月22日から23日、23日から24日、8月4日から5日、9日から10へかけて、低高度のエアロゾル層が早朝まで持続し、6時頃からの混合層の発達へとつながっている。

7月24日を除く7日間について、平均的な混合層高度の上昇率を図4から求めた。これによると、9時から12時までの上昇率は表3の最右欄の値となり、80~253 m/hの範囲に入り、平均は約170 m/hとなる。混合層高度の上昇率は、混合層上部の安定度、地表からの熱流入量、混合層上端のエントレインメント率に依存するので、そのときどきの条件に大きく依存する。しかし、ここで示した値は、蒲生<sup>19)</sup>が求めた7月、8月の平均的な混合層高度の変化図から読み取った値、195 m/hにほぼ一致している。

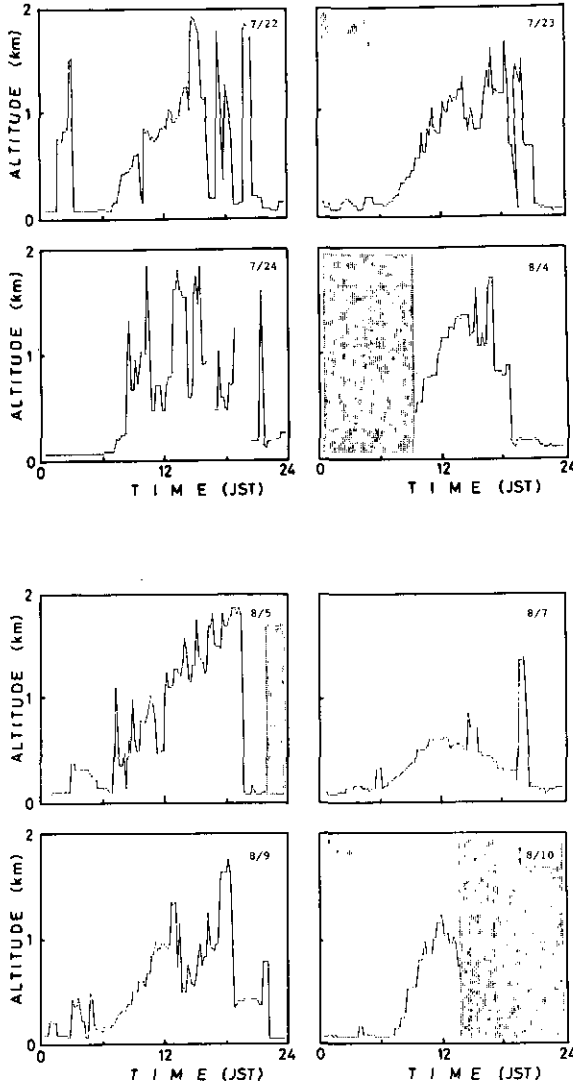


図4 混合層高度時間変化

### 5. まとめ

本論文では、混合層高度の連続自動観測を目的にして製作した簡易型レーザーレーダー装置について、装置の概要、データ処理の方法（混合層高度決定の方法）、及びテスト観測の結果を述べた。

延べ13日間にわたる夏季の連続観測の結果、晴天日に発達する混合層の高度時間変化を明りょうにとらえることができた。また、9時から12時にかけての晴れた日の混合層の平均の発達速度は約170 m/hと見積もられた。

送受光部きょう体内の温度が強い日射を受けて異常に高温になると、レーザーの発振が停止する

という事態が若干の観測日に発生した。しかし、この問題を解決するにはきょう体の空調化を図るだけでよく、技術的な困難はない。

本論文で提出したデータの解析結果は、大型電算機で処理したものであるが、データ処理プログラムを本装置のマイクロコンピュータシステムに移行することで、全く同様の処理をリアルタイムで行うことが可能である。

本装置は、全天候型、無人連続運転可能な実用的なレーザーレーダーとしては初めて開発されたものである。また、簡単なデータ処理によって混合層高度を自動的に検出することが可能で、混合層高度をルーチ的にモニターすることができる。

大気汚染のルーチ的な予測に、リアルタイムで混合層高度の情報を導入することで、より一層の予測の高精度化が期待される。また、混合層高度の出現高度頻度の通年観測など、実用的な利用が可能である。

#### 引用文献

- 1) Russell, P. B. and E. E. Uthe (1978) : Acoustic and direct measurements of atmospheric mixing at three sites during an air pollution incident. *Atmos. Environ.*, **12**, 1061—1074.
- 2) McAllister, L. G. (1968) : Acoustic sounding of the lower troposphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1439—1440.
- 3) Browning, K. A., D. Beran, M. J. S. Quigley and C. G. Little (1973) : Capabilities of radar, sodar and lidar for measuring the structure and motion of the stably stratified atmosphere. *Boundary Layer Meteorol.*, **5**, 195—200.
- 4) 福島 圓 (1982) : 音波電波を利用した晴天大気のリモートセンシング. *気象研究ノート*, **144**, 85—200.
- 5) Sasano, Y., H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda (1980) : Diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer revealed by a computerized laser radar. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **58**, 143—148.
- 6) Sasano, Y., A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1982) : On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser radar and low-level radiosonde observation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 889—895.
- 7) Sasano, Y., H. Shimizu and N. Takeuchi (1982) : Convective cell structures revealed by Mie laser observations and image data processing. *Appl. Opt.*, **21**, 3166—3169.
- 8) 笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1982) : レーザーレーダー画像データ処理表示手法の開発. 国立公害研究所研究報告, 第34号, 125—142.
- 9) 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.
- 10) 木村博一・嶋田隆司 (1981) : 大気汚染観測用全自動レーザーレーダーシステム. *電通学会誌*, **J64/C7**, 405—412.
- 11) Collis, R. T. H. and P. B. Russell (1976) : Lidar measurement of particles and gases by elastic



backscattering and differential absorption. In: Laser monitoring of the atmosphere, ed. E. D. Hinkley, Springer-Verlag, New York, pp. 71-151.

12) Zuev, V. E. (1982): Laser beams in the atmosphere. Consultants Bureau, New York.

13) 蒲生 稔 (1981): 混合層の季節変化. 公害, 16, 42-51.

## II-3

### ミー散乱レーザーレーダーによる対流セル構造の観測\* ——画像データのエッジ強調による構造の抽出——

笹野泰弘<sup>1</sup>・清水 浩<sup>1</sup>・竹内延夫<sup>1</sup>

#### Convective Cell Structures Revealed by Mie Laser Radar Observations and Image Data Processing

Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>1</sup> and Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup>

#### 要 旨

大気の大気対流混合層の構造をミー散乱レーザーレーダー観測により調べるため、PPI及びRHIモードのスキャン測定で得られる2次元の画像データにエッジ強調の操作を施し、対流層中のエアロゾル分布構造を抽出することを試みた。これにより明らかにされた、上層の清浄大気に貫入する対流セルの構造は、ソーダー、レーダー、FM-cwレーダーなどで、これまでに観測されてきたセル構造と極めて類似している。

#### Abstract

Mie scattering laser radar has been used to study the structure of the convective mixed layer in optically clear air. Two-dimensional image data obtained by scanning measurements (PPI and RHI modes) have been processed using edge-enhancement techniques to display distinct structures within the convective layer. The structures of convective cells penetrating into upper clean air were very similar to those obtained previously by sodar, radar, and FM-cw radar.

#### 1. はじめに

最近、ソーダー、レーダー、レーザーレーダーなどの遠隔計測技術を用いて、大気の構造を解明する試みが多くなされている。ソーダーは、大気中の温度の変動を検出することから、安定層や熱プルームの構造を観測することができる<sup>1,2)</sup>。狭ビームレーダーやFM-cwレーダーは大気中の、主として湿度の変動に起因する屈折率の乱れを検出するので、湿潤な熱プルームの構造を観測す

\* 本論文の要旨は、Appl. Opt., 21, 3166-3168, (1982), に発表した。

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,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

ることができる<sup>3-6)</sup>。ミ-散乱レーザーレーダーは大気中に浮遊する粒子(以後、エアロゾルと呼ぶ)を散乱体としており、エアロゾルの分布をトレーサーとして、大気混合層の時間的発達を調べる試みが多くなされてきた<sup>7-9)</sup>。

これらの計測機器のうちで、ソーダー、FM-cw レーダー、レーザーレーダーなどは、主として THI (time to height indication) モードにより、鉛直構造の時間変化を求める測定に使われてきた。一方、レーダー観測では、PPI (plan-position indication) モードや RHI (range-height indication) モードなどの方位角方向、高度角方向のスキャン測定により、空間分布構造の測定がなされ、逆 U 字構造、ドーナツ構造などの対流セル構造が明らかにされた<sup>3,4)</sup>。

この報告では、ミ-散乱レーザーレーダーを用いた RHI, PPI モードのスキャン測定と、画像データ処理(エッジの強調)の結果について示し、エアロゾルの空間分布をトレーサーとして対流セル構造をとらえることの可能性を議論する。

これまで、レーザーレーダーデータは、エアロゾル分布の 2 次元パターンとして表示され、分布の特徴的な構造の抽出は人間の判断によって行われてきた。例えば、Kunkel ら<sup>10)</sup>は、対流プルームの動きと、出現頻度等の解析をその方法により行った。しかし、画像データからの判別では、画像出力の方法によって人間の受ける印象が変わるなど、客観的に構造を抽出することは容易ではない。そこで、本研究では、エッジの強調の処理を施すことにより、人間の判断を容易に、かつ客観的に行えるようにした。この種の処理は、Endlich ら<sup>11)</sup>により、濃度の鉛直こう配をとるという方法で、混合層高度の自動決定の際に用いられている例があるが、本研究では濃度こう配を局所的な濃度で割るという新しい方法を提案する。

## 2. データの収集

観測に用いたレーザーレーダーは、広域の大気汚染現象の測定を目的にして建設されたもので、高出力のレーザー(YAG レーザー、1.2 J/pulse, 25 pps)と、大口径の受光望遠鏡(カセグレイン型、直径 1.5 m)を備えている。スキャンは 0.3 mrad の精度で行える。詳細は文献<sup>12)</sup>を参照されたい。

光電子増倍管に入った受信々号光は電気信号に変えられ、最終的には AD 変換器でデジタル信号に変換された後、磁気テープに記録される。また、必要に応じてリアルタイムモニターとして、オーバープリンティングの手法でラインプリンター上に、エアロゾルの分布パターンが表示される。レーザーレーダーシステム全体はミニコンピューターで制御されており、データの収集、スキャン及びレーザー発振の制御、データのリアルタイム処理が行われる。多くの計算時間と記憶容量を必要とするデータ処理は、大型計算機を用いてオフラインモードで実行する。

ここで示す観測例は、混合層構造に関する観測の際(1981年11月12日、筑波研究学園都市内)に得られたもので、観測にかかわるパラメータを表1に示した。観測波長は 0.532  $\mu\text{m}$  である。観測期間中、気温、湿度、風向、風速の鉛直分布がカイツーン、低層ゾンデ、パイロットバルーン等に

より測定されていた。この日は、良く晴れて風が弱く、混合層の発達が見られた。

表1 測定パラメータ

測定モード	方位角 (deg)	高度角 (deg)	時間分解能 (ns)	サンプリング ワード	平均時間 (s)	スキャン速度 (deg/min)
RHI	-80	0 to 8.9	100	2048	2	6
PPI	-63 to -123	1.9	100	2048	2	14

### 3. データ処理

磁気テープに収録されたデータは、HITAC M-180 大型コンピュータにより処理を行った。基本処理として、直流成分の除去、距離自乗の補正を行うことで、体積後方散乱係数に比例する量を得る。比例係数はレーザーレーダーの較正定数と大気の透過率による。簡単化のために、比例係数のかかった体積後方散乱係数をエアロゾル濃度と呼ぶことにする。エアロゾル濃度  $C(R)$  は次式で表される。

$$C(R) \equiv P(R) R^2 = K \cdot \beta(R) \cdot \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(r) dr \right]$$

ここで、 $P(R)$ 、 $\beta(R)$ 、 $\alpha(R)$  は距離  $R$  に対応する受信信号、体積後方散乱係数、体積消散係数である。また、 $K$  は較正定数、指数関数の項は大気の透過率を表している。エアロゾル濃度を求めるのに、ここでは、大気の透過率の補正は行わない。しかし、後で示すように、エッジ強調の処理を施すので問題とはならない。

スキャン測定を行うと、極座標系上で等間隔にデータが収集される。データ処理の便宜上、これは  $xy$  直角座標系上のメッシュデータに変換される。ここで示す処理例では、変換された画像メッシュデータは表2の画素を持っている。更に画像データの解析・表示に当たっては、メッシュサイズ ( $M, N$ )、空間分解幅 ( $\Delta X, \Delta Y$ ) は必要に応じて任意に変更される。

表2 画像データの構成

	PPI モード	RHI モード
メッシュ数 ( $M \times N$ )	100 × 100	200 × 250
空間分解能	$\Delta X = \Delta Y = 20$ m	$\Delta X = 50$ m, $\Delta Y = 8$ m

エアロゾル濃度の空間分布はメッシュデータとして、 $C(i, j)$  で表される。ここで、 $i = 1, 2, \dots, M$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$  である。メッシュ幅 (分解幅)  $\Delta X, \Delta Y$  はそれぞれ  $i$  方向,  $j$  方向に対応する。このとき、正規化した濃度こう配は、濃度こう配を局所的な濃度で割ることによって次式で定義される。

$$G_1(i, j) = [C(i+1, j) - C(i-1, j)] / (2 \cdot \Delta X \cdot \bar{C}_3)$$

$$G_2(i, j) = \{ [C(i+1, j) - C(i-1, j)]^2 / (2 \cdot \Delta X)^2 + [C(i, j+1) - C(i, j-1)]^2 / (2 \cdot \Delta Y)^2 \}^{1/2} / \bar{C}_5$$

ここで、 $\bar{C}_3$ は、 $C(i+1, j)$ 、 $C(i, j)$ 及び $C(i-1, j)$ の平均値、 $\bar{C}_5$ は、 $C(i+1, j)$ 、 $C(i, j)$ 、 $C(i-1, j)$ 、 $C(i, j+1)$ 及び $C(i, j-1)$ の平均値である(図1参照)。 $G_1$ は1次元、 $G_2$ は2次元を考慮したこう配となっており、いずれも局所的な平均の濃度 $\bar{C}_3$ 、 $\bar{C}_5$ で割って正規化している。この正規化によって、濃度の地域的、時間的な濃度の変化、したがって濃度こう配の絶対値の変化はキャンセルされ、濃度分布の空間変化の局所性だけが相対的に強調され、取り出される。この操作によれば、レーザーレーダーシステムの較正定数を知る必要がないという利点をも有している。Endlich<sup>11)</sup>らの研究では、濃度こう配の絶対値を用いており、正規化は行っていない。

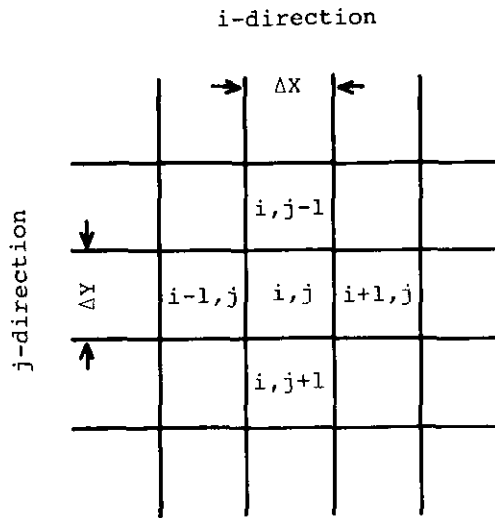


図1 画像データメッシュの構造

厳密にレーザーレーダーデータから定量的な議論をしようとする、大気透過率の補正は不可欠である。また、広範囲に渡るエアロゾル濃度の分布パターン画像では遠方側で透過率が1より小さくなっていくため、パターンとして表示した場合に、見かけ上、濃度が低く表され、濃度分布パターンから構造を抽出することが困難となる。しかし、透過率を空間の関数として評価し、その補正を加えることは容易ではない。ここで提案した正規化した濃度こう配により構造を抽出する際には、この透過率補正の必要はない。すなわち、エアロゾル濃度の空間的な変化は極めて局所的で、透過率の空間変化に比べて大きいという理由による。

$G_1$ の操作は RHI モードで取得された鉛直断面のデータに、 $G_2$ の操作は PPI モードの平面データに適用される。2次元の画像データの表示は、カラーグラフィックディスプレイ装置、又はラインプリンター上に出力される。

#### 4. 結果

図2, 3にエアロゾル濃度と正規化した濃度こう配の例を示している。図2(a)は鉛直断面内のエアロゾル濃度分布パターンである。大気透過率の補正を施していないので遠方側で見かけ上、濃度が低くなっている。この例では、地上400 m くらいまでの範囲の濃度が高い。すなわち、400 m 程度の高度まで混合層が発達していると考えられる。混合層と上部の清浄大気との境界をなす遷移領域の構造は、極めて複雑になっている。この構造は、図2(b)にした  $G_1$ 画像に、より明瞭に示されている。混合層のエッジが強調され、その形態は、レーダー、ソーダー、FW-cw レーダーなどで見い

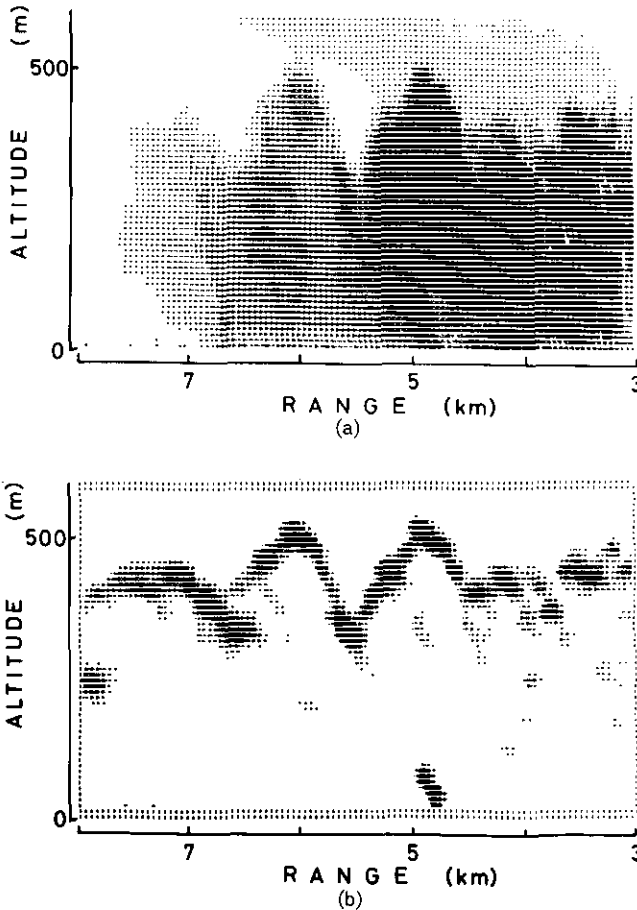


図2 エアロゾル濃度(a)及び強調されたエッジ構造(b)の RHI モード表示

だされたドーム状の構造<sup>2-6)</sup>に類似している。これらの測器では、温度や湿度の乱れ場を検出するので、対流プルーム等の外縁構造がパターンとしてとらえられる。したがって、エッジを強調した  $G_1$  画像が、これらの観測と同様の結果をもたらすのは合理的で、混合層から上層へ貫入しようとする対流セル構造を示していると考えられる<sup>3,4)</sup>。

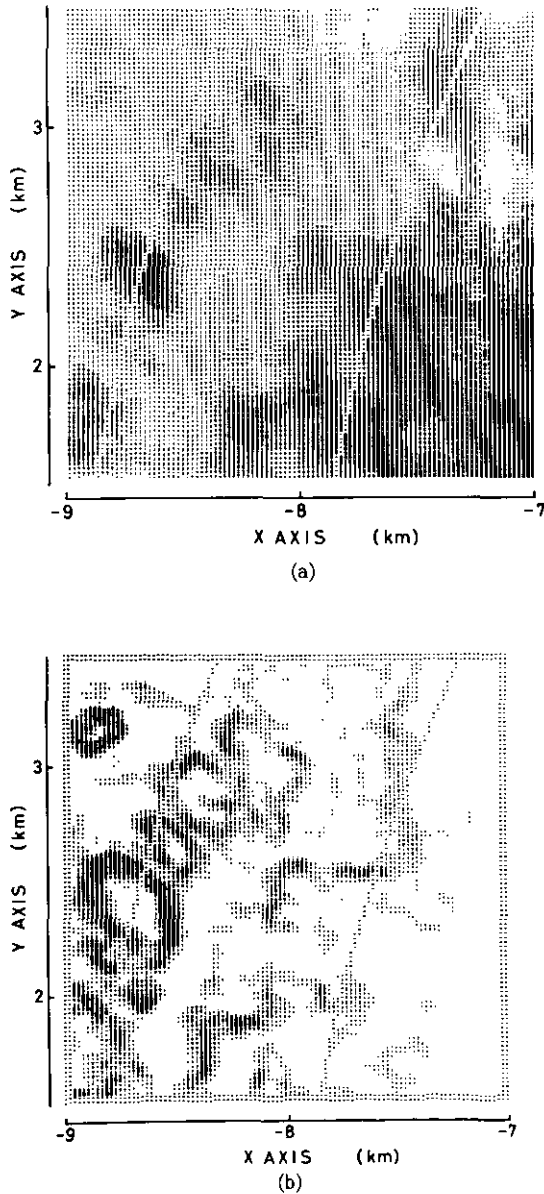


図3 エアロゾル濃度(a)及び強調されたエッジ構造(b)の PPI モード表示  
図中の円弧は距離 8 km, 9 km を表している。

図3(a)は、高度角 $1.9^\circ$ のPPIモードのスキヤン測定で得られたエアロゾル濃度の分布パターンを示している。図3(b)は、これに対応する $G_2$ 画像である。エアロゾル濃度は、約8 kmの距離より近距離側で高く、遠方側で低くなっている。9 kmを示す円弧の付近に、高濃度を示すパッチ状の部分が見られる。これらは、上層の清浄大気に入入する対流セルの断面に対応していると考えられる。図3(b)の $G_2$ 表示では、これはドーナツ状の構造として明りょうに見いだされ、湿潤な対流セルの外縁構造と同様の形態となっている。

## 5. まとめ

本報告では、ミ-散乱レーザーレーダーによる観測とエッジ強調の手法により明らかにされた対流セル構造の例を示した。エッジ強調では、局所的な濃度で正規化した濃度こう配をとることにより、エアロゾル濃度の分布構造の抽出を可能にした。この方法は、大気透過率及びシステム較正定数の評価が不要であるという特長を持っている。

混合層及び、上層との遷移領域における観測された大気構造は、これまでレーダー、ソーダー等で観測されたものと類似の形態を示し、対流セル構造を示しているものと考えられる。

## 引用文献

- 1) McAllister, L. G. (1968) : Acoustic sounding of the lower troposphere. *J. Atmos. Terr. phys.*, **30**, 1439-1440.
- 2) Nater, W. and H. Richner (1977) : Thermal plumes detected by an acoustic echo sounder. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 986-989.
- 3) Hardy, K. R. and H. Otterstem (1969) : Radar investigation of convective patterns in the clear atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 666-672.
- 4) Konrad, T. G. (1970) : The dynamics of the convective process in clear air as seen by radar. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1138-1147.
- 5) Richter, J. H., D. R. Jensen, R. A. Pappert and V. R. Noonkester (1973) : New developments in FM-cw radar sounding. *Boundary-Layer Meteorol.*, **4**, 179-199.
- 6) Noonkester, V. R. (1976) : The evolution of the clean air convective layer revealed by surface-based remote sensors. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 594-606.
- 7) 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.
- 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. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **58**, 143-148.
- 9) Uthe, E. E. and P. B. Russell (1974) : Experimental study of the urban aerosol structure and its relation to urban climate modification. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **55**, 115-121.



- 10) Kunkel, K. E., E. W. Eloranta and S. T. Shipley (1977) : Lidar observations of the convective boundary layer. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 1306—1311.
- 11) 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.
- 12) 清水浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫 (1981) : 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作. *応用物理*, **50**, 1154—1164.

## II-4

### ミー散乱レーザーレーダーによる発達過程の大気混合層の観測

笹野泰弘<sup>1</sup>

#### Mie Laser Radar Observation of the Developing Atmospheric Mixed Layer

Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>

##### 要 旨

本報告では国立公害研究所大型レーザーレーダー観測を中心として実施した、大気境界層(特に混合層及び遷移層)の立体構造に関する観測結果を示している。大型レーザーレーダーはRHI及びPPIモードのスキャン測定を行い、得られた2次元画像データに対して縁辺強調の画像処理を施すことにより、混合層、遷移層の構造の抽出を行った。

この観測により、混合層高度及び遷移層中に見いだせる対流セルの鉛直・水平スケールの時間変化が明らかになった。これによれば、日の出後、徐々に上昇し始めた混合層高度は9時~10時頃に急激に上昇し、13時頃に極大に達する。また、混合層高度の上昇速度は8時~12時の間で、およそ100 m~300 m/hの値を取る。遷移層の厚さは、午前中は増加の傾向を示し、その後、ほぼ一定値を取る。ばらつきは大きいですが、平均的に見て、9時で200 m、11時以後400 m程度の厚さとなる。遷移層厚さと混合層高度の比の値は、午前中、はじめは、1程度であるが、その後は減少し、日中には0.2~0.3となる。

遷移層に顕著に見いだせる対流セル構造の水平スケールは、PPI及びRHIデータから読み取ることができる。これによれば、平均的に見て、9時で300 m、10時で500 m、11時で700 m程度の直径を有するセル構造であることが分かる。セル直径と混合層高度との比(アスペクト比)は、はじめ2~3程度であるが、日中には1程度の値に近づく。

##### Abstract

The present paper describes the observation results on the spatial structure of atmospheric planetary boundary layer (especially, mixed layer and transition layer), in which the NIES large laser radar was used along with other meteorological measurements. The laser radar was operated in the PPI and RHI scanning mode and the image data obtained were analysed after edge enhancement processing for spatial structures of mixed and transition layers.

The results show the time variation of the mixed layer height and the vertical and

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,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

horizontal scales of convective cells in the transition layer.

The mixed layer height reaches its maximum at about 13h, which follows the sudden rise at 9-10h after the gradual rise during the early morning. The rising speed is 100-300m/h in the period of 8-12h. The thickness of the transition layer increases in the morning hours and takes a constant value thereafter. It takes about 200m at 9h and 400m at 11h. The ratio of the thickness of the transition layer to the mixed layer height is about 1 in the early morning, and it decreases to 0.2-0.3 around noon.

The horizontal dimension of the convective cell structures in the transition layer can be observed from the PPI and RHI data, which shows the average diameter of the cell is about 300m at 9h, 500m at 10h and 700m at 11h. The aspect ratio (the ratio of the diameter to the mixed layer height) is about 2~3 in the early morning and reaches about 1 as the mixed layer develops.

## 1. はじめに

良く晴れた風の弱い日の日中、大気低層(地上から約2000mくらいまで)には、混合層と呼ばれる上下混合の盛んな層が形成される。これは太陽放射で暖められた地面からの熱フラックスで大気が加熱される結果、熱的な不安定を生じて形成されるもので、混合層より上層は、通常、安定な成層でおおわれている。混合層と安定層との間には遷移層(あるいはエントレイメント層)と呼ばれる領域が存在する。ここでは混合層内の空気と上層の空気が混在し、ここを通して熱、運動量などが混合層内に取り込まれて(エントレインされて)いる。

混合層内では鉛直拡散が盛んで、温位、風速等の物理量は比較的一様な分布をしている。また、エアロゾルや、その他の大気汚染物質についても同様に、混合層内で一様な分布を呈することが多く、遷移層領域を越えて上層に運ばれることは少ない。このため、混合層は大気低層の気象状態を支配し、また、熱、運動量等の鉛直輸送を通じて大気大循環の下端条件として重要な役割を果たしている<sup>1)</sup>。大気汚染現象に関連しても、混合層高度は汚染質の希釈体積を規定する重要なファクターとして汚染濃度予測モデルに組み込まれている<sup>2)</sup>。このように、気象学あるいは大気汚染の問題に関連して、大気の混合層のふるまいを明らかにすることの重要性は大きく、これまで多くの研究者の関心をひいてきた。

こういった混合層に関する研究は、理論、室内実験、野外観測などをとおして総合的に進められるべきものであるが、中でも、野外観測の重要性は大きい。何よりもまず、現実の大気中で起こっていることを忠実に把握することが必要であり、また、理論解析、室内実験の結果は現実の大気にあてはめて、その妥当性を検討しなければならないからである。

大気境界層に関する大規模な野外観測実験については、例えば、1967年のWangara実験、1973年のMinnesota実験、1974、1975年のAMTEX実験などが行われた。これらの実験では、大気境界層に関する多くの新しい情報を提供している<sup>3)</sup>。その他の小規模な観測実験でも、カイツーン、タワー、航空機等を利用して、混合層の構造、特に、温位、湿度、風速などの平均量の鉛直分布、あ

るいは、これらの変動量に関する2次の相関量などの統計量の測定が精力的に行われてきた<sup>4)</sup>。

これらの観測データは、混合層相似則<sup>3)</sup>をフレームとして整理され、多くの成果を上げてきている。しかし、混合層相似則は混合層高度と地表面熱フラックスを主要なスケリングパラメータとして混合層内の諸量の鉛直分布を記述するものであって、混合層高度そのもののふるまいを理解することは、また別の問題として取扱わなければならない。また、遷移層については混合層内に比べると、これまで研究の対象とされることが少なく、その構造や混合層の発達に大きく関与するエントレイメントの構造など十分には理解されていない。その理由の一つは、現実大気中での観測の困難さに求められる。高度が1000 m~2000 mに達するような混合層の上部の構造は、これまで航空機あるいは大容量係留気球による他は観測の方法がなく、十分な情報が得られていない。

また、係留気球を用いた Rayment と Readings<sup>5)</sup>や Palmer ら<sup>6)</sup>などイギリスのグループの観測などで示されているように、遷移層では対流セルが上部安定層との間で相互作用を及ぼしあい、エントレイメントを引き起こしており、比較的、組織化された構造を有している。したがって混合層内の諸量に対するのと同様の単純な乱流場としての統計的取り扱いだけでは不十分であり、空間的な組織構造の把握が必要である。

ソーダー、レーザーレーダー等の遠隔計測によれば、これらの空間構造をパターンとしてとらえることが可能であり、混合層、遷移層の研究に対して全く新しい知見を与えることができる。この意味で、本研究では、レーザーレーダーを用いた混合層、遷移層の立体構造の把握をねらいとしている。特に、本研究で用いるレーザーレーダーシステムはスキャン測定可能で、しかも、測定可能距離が大きいことから、ソーダーあるいは従来のレーザーレーダーでは得ることのできない広い範囲の空間分解精度の高いデータの収集が可能である。

本報告では、大型レーザーレーダー観測によるスキャン測定データの解析を中心に述べる。この観測は、混合層が発達すると期待される気象条件を選んで実施し、混合層高度の発達、遷移層の構造に関する情報を得ることを目的とした。総合観測では大型レーザーレーダーの他に、低層ゾンデ、パイバル、カイツーン、放射収支、地上気象などの観測を実施し、計測車レーザーレーダー観測も合わせて行った。

大型レーザーレーダーの RHI, PPI モードによるスキャン測定で得られたエアロゾル濃度空間分布をトレーサーとして、混合層及び遷移層の構造を明らかにする。また、遷移層中に見いだせる対流セル構造の鉛直、水平スケールの時間変化を論じる。第2節では、主として総合観測実験についてその概要を記す。第3節においては総合観測実験を中心に、混合層高度及び遷移層厚さに関する観測結果について議論する。また、第4節においては、遷移層における対流セル構造の水平スケールについて議論する。

## 2. 観測実験の概要

本節では、1980年10月22日~24日、1981年11月9日~12日に実施した総合観測を中心に、観

測実験の概要を述べる。

### 2.1 観測地点の概況

観測に大型レーザーレーダー<sup>7)</sup>を用いる関係上、測定領域の選定は国立公害研究所(茨城県筑波郡谷田部町)を中心とする半径10~20 km以内に限られる。このうち、高層建築物等のあるレーザー発射禁止領域を除き、太陽光による背景光雑音の小さい方向を測定対象とした。レーザーレーダー観測はRHI, PPIの両モードで行い、種々の角度範囲をスキャン測定した。

この地域一帯は関東平野の一部をなしており、地形は平坦で、標高差は20 m以内である。レーザーレーダー地点の東側10 km以遠には霞ヶ浦が広がり、北側20 kmには標高876 mの筑波山がある。また観測地点の周辺は田畑、松林、高層建築物等の混在する地域であるが、レーザーレーダーの測定領域は、おおむね田畑、松林の卓越する地域となっている。

### 2.2 観測項目及び観測の方法

総合観測では、大型レーザーレーダーの観測の他に、表1に示すような気象観測を実施した。カイツーン、低層ゾンデ、パイバル等の観測は国立公害研究所構内又は高層気象台、気象研究所構内で行った。超音波風速温度計による乱流量及び放射収支の測定は、気象研究所構内の気象観測鉄塔下の芝地で行った。大型レーザーレーダー観測の諸元(スキャンスピード、積算回数、サンプリングゲート幅など)の決定においては、観測目的に応じた時間・空間分解能を保証した上で測定精度を高めることを考慮することが必要である。本観測で設定した諸元は、笹野ら<sup>8)</sup>の解析結果によれば、空間分解能30 m、距離9 km以内で、十分なSN比(≥10)を与える。

表1 大型レーザーレーダー観測日及び気象観測の一覧

年月日	大型レーザーレーダー	地表面熱フラックス	放射収支	低層ゾンデ	パイバル	カイツーン I	カイツーン II	全天カメラ
1980. 8.11	○	—	○	3	—	—	—	—
12	○	—	○	3	—	—	—	—
13	○	—	○	1	—	—	—	—
10. 4	○	—	○	—	—	—	—	—
6	○	—	○	—	—	—	—	—
8	○	—	○	—	—	—	—	—
9	○	—	○	—	—	—	—	—
22	○	○	○	9	10	○	○	—
23	○	○	○	13	13	○	○	—
24	○	○	○	12	12	○	○	—
1981.11. 9	○	○	○	6	11	○	○	○
10	○	—	○	6	11	○	○	○
11	○	○	○	5	11	○	○	○
12	○	○	○	3	10	○	○	○

カイツーン (I) は容量  $3 \text{ m}^3$  の小型機を用い、主として連続的に昇降を繰り返し、気温、湿度、風向、風速、気圧の連続測定により、これらの鉛直分布を測定した。リアルタイム出力結果から混合層高度 (接地逆転の崩壊した高度) を読み取り、カイツーン (II) の停留高度を決定した。

カイツーン (II) は容量  $30 \text{ m}^3$  のもので、気温、湿度、風速、気圧信号がデジタル多重送信される<sup>9)</sup>。本機は、最初、接地逆転層より上層に停留させ一定高度で連続的にデータを収録する。日の出後、接地逆転の崩壊、混合層の発達に伴って、混合層の上端部分が本機の高度を通過し始める。時間の経過とともに混合層は上昇し、本機は混合層の内部に位置するようになると、再び本機を上昇させ、カイツーン (I) で求めた混合層高度より上層へ移動させ、停留観測を行い、同様にして、混合層上端の通過に伴う諸量の変動を記録する。データの収録にはデジタルデータレコーダ (TEAC DR-2000) を使用した。

81年11月の総合観測期間中には、計測車レーザーレーダーによる THI 観測を同時に実施した。観測の方法は Sasano ら<sup>10)</sup>の方法と同様である。

総合観測日以外の観測では、一般地上気象観測と放射収支量の観測のみが、全観測日に実施されている。観測に用いた機器の一覧を表 2 に示した。

### 2.3 観測日の天気概況

観測日の一覧は表 1 に示されている。このうち、1980年10月22日～24日、1981年11月9～12日は総合観測期間に当たる。

総合観測期間中、1980年10月22日、24日及び1981年11月9日は、曇りの天気であり、また、1980年10月24日は風が強かったため、これらの日々のデータは解析の対象外とした。また、1981年11月11日の大型レーザーレーダーデータは、雑音が多く含まれ、解析が困難である。

その他の観測日は、おおむね晴れで、風の弱い条件であった。表 3 に、8時から14時までの積算放射収支量、平均風速を示す。

総合観測期間中の写真記録及び雲量測定によれば、雲の状況は次のとおりであった。

(1980年10月23日) 早朝、最下層はもやがかかっていた。8時頃まで Ac 2～6、9時以後、Ci系の雲が少し出たが、快晴であった。

(1981年11月10日) 早朝、最下層はもやっていた。7時頃まで、Cu、Stが少し出たが、その後、11時まで快晴であった。11時以後、Cu系の雲が広がった。

(1981年11月11日) 早朝、最下層はもやっていた。その後、終日、快晴であった。

(1981年11月12日) 10時頃まで、Acが広がっていたが、その後、快晴となった。

### 2.4 地表面熱フラックスの評価

地面から大気に入る顕熱フラックスは通常、超音波風速温度計などの乱流計測器を用いて渦相関法により求められることが多い。本章で述べる総合観測期間中も、気象研究所構内において超音波

表 2 気象観測機器一覧

地表面熱フラックス		
超音波風速温度計	海上電機	PAT311
データレコーダ	TEAC	DR-1000
放射収支量		
放射収支計	英弘精機産業	CN-11
打点記録計	千野製作所	
低層ゾンデ		
低層ゾンデ	日本環境機器	JNL-77PTH
受信機	日本環境機器	SRN-77
記録計	東亜電波	
	横河電機	
自記気圧計	いすず製作所	アネロイド型
	佐藤計量器	アネロイド型
アスマン乾湿計	いすず製作所	電動通風型
パイロットバルーン		
気球	気球製作所	20 g
測風経緯儀	玉屋	JMA-58J
カイツーン I		
カイツーン	AIR 社	3 m <sup>3</sup>
係留ゾンデ	AIR 社	TS-1 A-1
プリンター	ヒューレットパッカード	HP 97
テープレコーダー	SONY	TCA-5000
カイツーン II		
カイツーン	計測科学研究所	30 m <sup>3</sup>
係留ゾンデ	計測科学研究所	
データレコーダ	TEAC	DR-2000
全天撮影		
カメラ	オリンパス	OM 2-N
魚眼レンズ	オリンパス	FISHEYE 8 mm

風速温度計による観測を実施した。しかし、測器、記録計（データレコーダ）等の故障のため、比較的良好にデータが収集できたのは、1981年11月9日、11日、12日のみであった。また、その他の期間中の地上乱流データは得られていない。

これらの乱流データの得られていない期間中についても、地表面熱フラックスを評価するために、放射収支量から推算することを試みた。解析に主に利用するのが午前中の時間帯であることを考慮して、午前中の乱流データの得られた1981年11月9日、12日について渦相関法で求めた地表面熱フラックスと放射収支量の相関を調べた。測定はいずれも、気象研究所構内（気象観測タワー下）で行い、10分間値を求めた。

表3 観測日の気象条件

年月日	風速 <sup>a)</sup>	日射量 <sup>b)</sup>
1980. 8.11	2.2	569
12	2.2	532
13	1.9	535
10. 4	1.1	436
6	2.3	331
8	1.4	299
9	2.0	388
22	4.3	362
23	1.3	366
24	1.9	225
1981.11. 9	1.1	145
10	1.5	284
11	1.8	277
12	1.4	272

a) 平均 (8時-13時) (m/s)  
 b) 積算 (8時-14時) (cal/cm<sup>2</sup>)

図1に両者の相関関係をプロットしている。両日とも熱フラックスと放射収支量の比は約0.55となっている。この比の値は地表面条件, 気象条件により変わり得る<sup>3)</sup>ものであるが, ここでは一定値とみなして放射収支の観測量から地表面熱フラックスを推定するのに用いる。

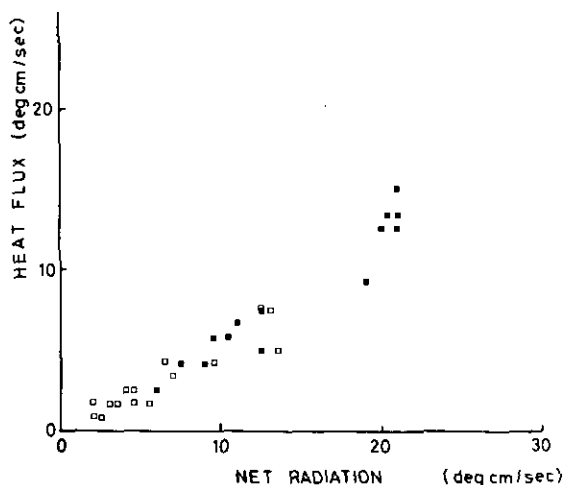


図1 熱フラックスと放射収支量の関係

ここで, □, ■はそれぞれ1981年11月10日午前中, 12日午前中のデータを表している。



### 3. 混合層高度と遷移層厚さの解析

大型レーザーレーダーは主として RHI モードで測定し、大気鉛直断面内のエアロゾル濃度分布を得た。この鉛直断面内のエアロゾル分布データをもとに混合層及び遷移層が定義される。本節では、混合層高度及び遷移層厚さの時間変化について議論する。

#### 3.1 混合層高度及び遷移層の定義

レーザーレーダーの RHI モードスキャン測定により、鉛直面内のエアロゾル空間分布が画像データとして得られる<sup>11)</sup>。図2は、そのようにして得られた画像データの一例である。ここで、横軸はレーザーレーダーからの水平距離、縦軸は高度である。また、印字濃度はエアロゾル濃度に対応させている。

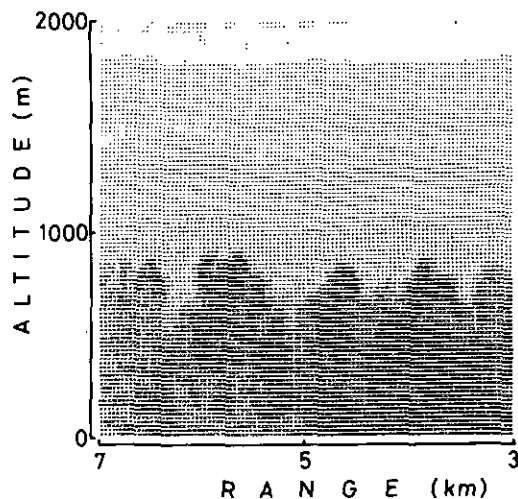


図2 RHIモード測定による混合層の鉛直断面構造

この図によれば、高度900 m以上は上部の比較的、エアロゾル濃度の低い層であり、600 m以下は、濃度が高い混合層に相当する。この間の600 mから900 mは、混合層内の高濃度と上空の低濃度の空気の混在する領域で、遷移層と名付けることができる（混合層、遷移層の厳密な定義はすぐ後で述べる。）。

図2に示した例で水平距離4 km, 5 km, 6 kmにおける局所的な濃度の鉛直分布は図3に示されている。混合層内部（二点鎖線より下部）と、上部大気（一点鎖線より上部）との濃度の差が顕著である。また、混合層内の濃度は鉛直方向にほぼ一様になっていることが分かる。

次に、図2に示した画像において、濃度を水平方向の全領域にわたって平均したときの、濃度の平均鉛直分布を図4に示す。同図には平均値のまわりの濃度の標準偏差の幅も示している。平均鉛

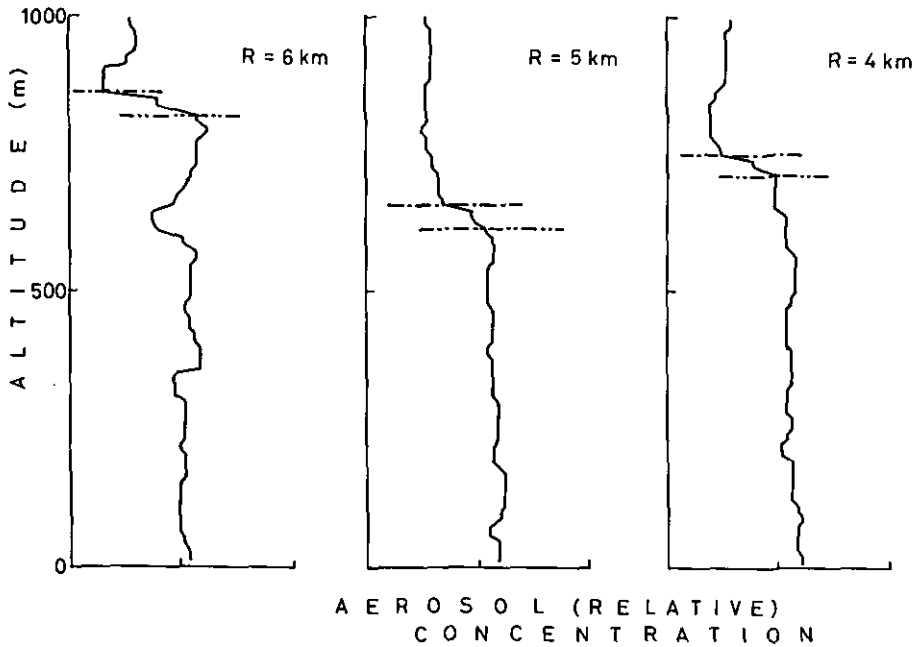


図3 水平距離4 km, 5 km, 6 km 地点における局所的なエアロゾル濃度の鉛直分布

ここで、一点鎖線、二点鎖線はそれぞれ上部大気、混合層の局所的な境界を示している。

直分布からも、エアロゾル分布が三つの層に分けられる。すなわち、上部の低濃度で標準偏差が小さい層、下部の高濃度で標準偏差の小さい層、そして中間部における濃度が減少し標準偏差の大きい層である。

ここで混合層高度及び遷移層は平均の鉛直濃度分布を基に次のように定義する。すなわち混合層高度としては、下層のほぼ一定の高濃度が減少し始める高度とし、遷移層の範囲は、混合層高度から、濃度が減少して上空の低濃度に一致する高度までとする。図4の例では、二点鎖線の高度が混合層高度、遷移層の上限高度に対応する。レーザーレーダー観測によれば若干の事例において、混合層上端付近で濃度の極大を示す場合が見られた(1981年8月12日)。明らかに雲が観測されている場合とともに、濃度の極大を示すケースは、ここでの解析の対象から除外している。大部分は、図4に示したように遷移層内での濃度変化は単調減少になっている。

通常、温位の鉛直分布から決められる混合層高度としては、温位こう配が正に転じる最低の高度で定義されることが多い<sup>4,12-14)</sup>。あるいは、温位が急激に増加する高度<sup>15)</sup>、温位こう配が $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ を越える高度<sup>16,17)</sup>などと定義される。しかし、いずれの定義にせよ、空間的に粗い分解能の測定値を基にした鉛直分布データから決められるために、ある程度の不確定さは避けられない。エアロゾ

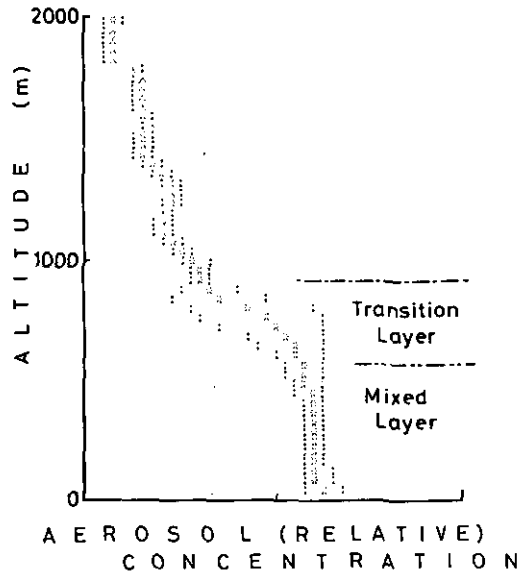


図4 水平方向に平均したエアロゾル濃度の鉛直分布

標準偏差の大きさを同時に示している。図中の一点鎖線，二点鎖線はそれぞれ，遷移層の上端，下端を示している。

ル濃度と温位との違いはあるが，これらの定義は，本節のエアロゾル濃度分布における混合層高度の定義と本質的に同一である。一方，Deardorff<sup>18)</sup>，Lenschow<sup>19)</sup>などでは，熱フラックスが極小の負値をとる高度で混合層を定義しており，前者に比べて1～2割，高度が高くなる。

Deardorffら<sup>20)</sup>は，流体の可視化実験により，混合層上部のエントレイメント層の構造を詳しく調べている。エントレイメント層は，負の熱フラックスの領域で，混合層内の流体塊が到達する最高の高度と，混合層内の流体が90—95%を占めるような高度との間に相当する。また，熱フラックスの極小の高度はエントレイメント層の中央に位置する。本項で定義した遷移層の範囲は，Deardorffら<sup>20)</sup>が定義したエントレイメント層の範囲と一致しており，遷移層は負の熱フラックスの範囲に一致すると考えられる。

混合層内の流体塊が，どの高度まで対流運動により到達しているかは，図2に示したRHI画像，あるいは，これにエッジエンハンスメントの操作<sup>21)</sup>を施した図5から読み取ることができる。このエッジの存在する高度範囲は，すなわち，図5で言えば高度600 m～900 mの範囲は，混合層内部と上部の空気の共存する領域で，遷移層，あるいはエントレイメント層と考えることができる。

平均の濃度鉛直分布から決めた遷移層の上端の高度  $H_u$ ，下端の高度（混合層高度） $H_l$ と，エッジの存在する範囲の上限高度  $Z_u$ ，下限高度  $Z_l$ との関係を図6に示す。 $H_u$ ， $Z_l$ については，エッジの下端高度  $Z_l$ の読み取りが難しい（混合が十分なされ，顕著なエッジが形成されない）ために，相関が

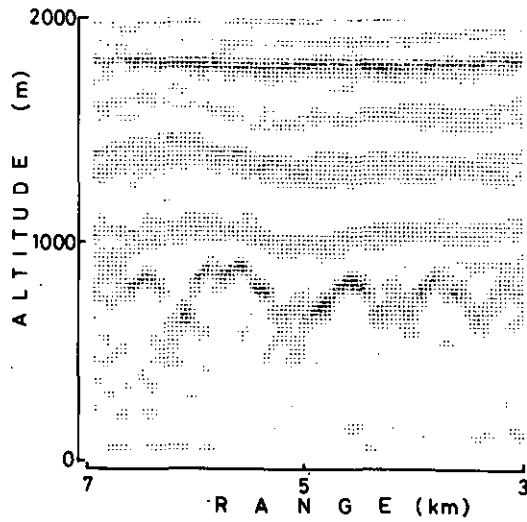


図5 図2の画像に対して鉛直方向の縁辺強調操作を施した

多少悪くなっており、 $Z_l$ の方が大きく読み取られているが、全体として両者の一致は良い。

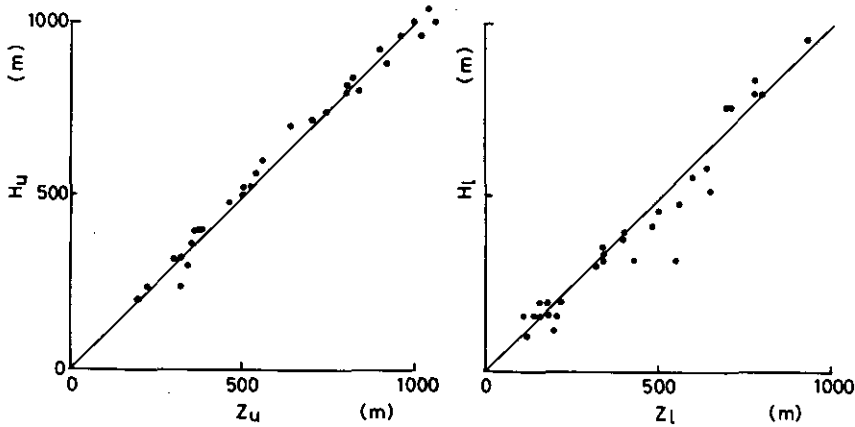


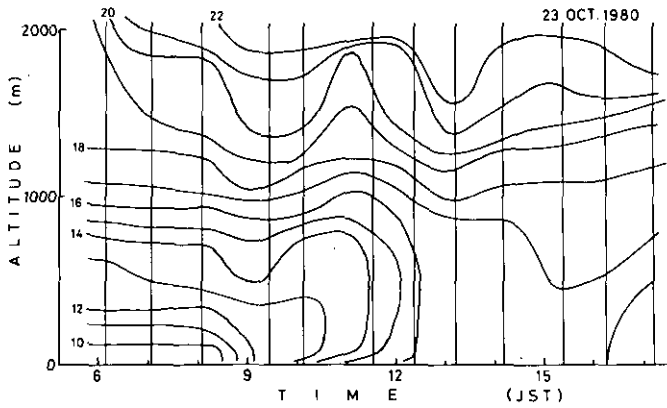
図6 遷移層上下端高度  $H_u$ ,  $H_l$  とエッジの存在範囲  $Z_u$ ,  $Z_l$  の関係

### 3.2 総合観測期間データの解析

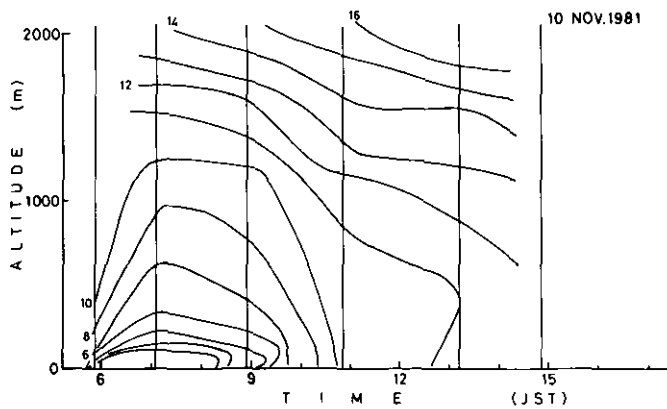
本項では総合観測期間のうち、条件の良かった1980年10月23日、1981年11月10日、12日のデータについて解析した結果を述べる。この3日間は、既に述べたように少し雲が出たが、ほぼ快晴で混合層の発達を観測された。

毎正時のパイバル観測から風の変化に見られる特徴は次のとおりである。1981年10月23日は、5時—10時の間、300—800 mの間で東風領域、13時—14時の間の西風から東風への変化、11時—13時、700—800 m以上の強風域の存在である。1981年11月10日は、7時—9時の間の150 m以上の強風域が接地逆転層上部に存在する。1981年11月12日は、8時まで、150—500 m間に強風域、9時以降は東風で弱い。1000 m（6時）～1250 m（10時）を境界として、上下で風向が逆転している。

温位の変化は、1981年11月10日、12日の両日は、上層で全般的な昇温が見られる他は、3日間とも、通常、よく見られる接地逆転層の崩壊、混合層の発達が観測されている（図7）。

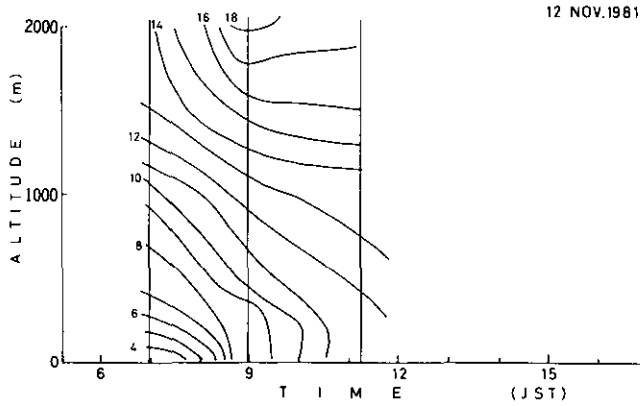


(a) 1981年10月23日



(b) 1981年11月10日

図7 総合観測期間中の温位の高度時間変化



(c) 1981年11月12日

図7 (つづき)

図8, 9, 10は混合層及び遷移層の高度の時間変化を示している。遷移層の範囲は前項で定義した方法から決定したもので、図中の曲線は遷移層の上・下限を滑らかに結んだものである。定義によれば混合層高度は遷移層の下限高度に等しい。これによれば、3日間とも、午前中に混合層高度が上昇し、高度800m程度に達する様子が示されている。また、遷移層の厚さの変化は比較的、小さい。

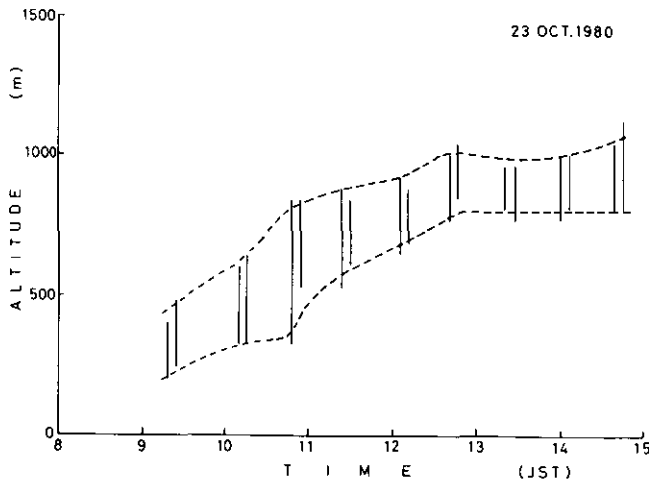


図8 遷移層範囲  $H_u$ ,  $H_l$ の時間変化 (1980年10月23日)

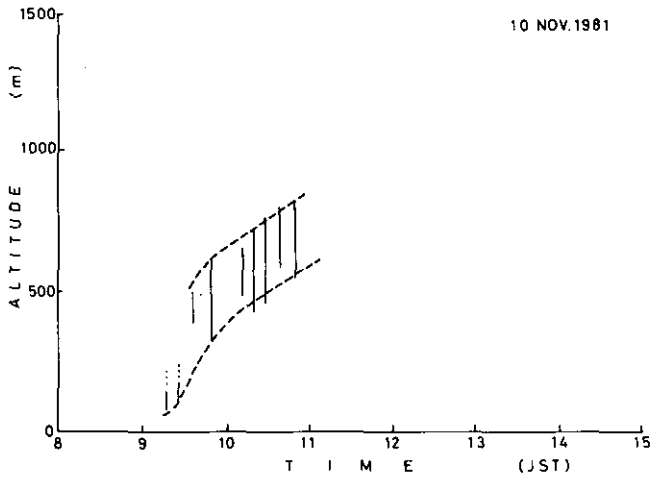


図9 遷移層範囲  $H_u$ ,  $H_l$ の時間変化 (1981年11月10日)

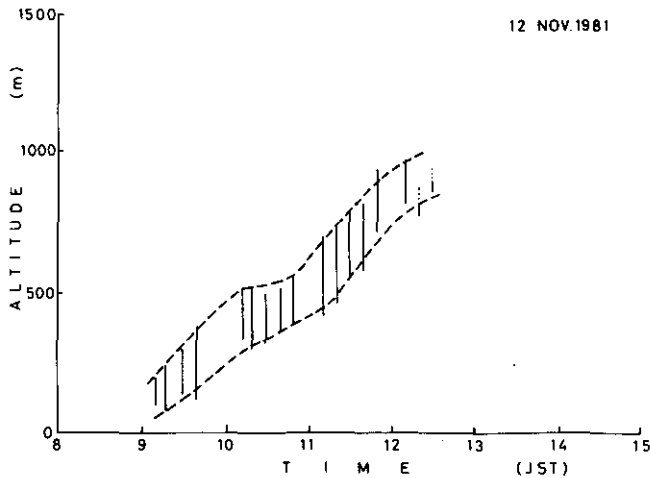


図10 遷移層範囲  $H_u$ ,  $H_l$ の時間変化 (1981年11月12日)

図11には、1981年11月12日について遷移層の範囲とともに、カイツーン(I)で観測した温位こう配から求めた混合層の高度、比湿分布の変化する遷移領域の範囲、カイツーン(II)で得た混合層上部(遷移層)の通過時間、及び計測車レーザーレーダのTHI観測で得た混合層高度の時間変化が示されている。

ここでカイツーン(I)の測定例を図12に示す。カイツーン(I)は、連続的に降下(50 cm/s)させながら乾湿球による気温、湿度の観測を行うもので、図12には温位、比湿に換算して示してい

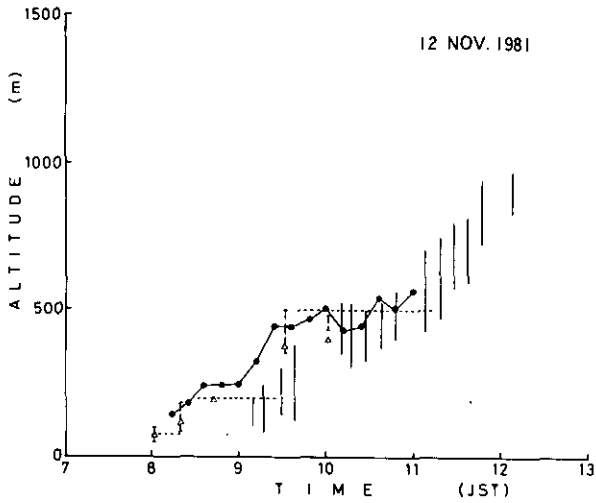


図 11 混合高度、遷移層高度の時間変化

ここで、縦実線は、大型レーザーレーダーによる遷移層の範囲、●印は計測車レーザーレーダーによる混合層高度を示す。△は、温位分布から決めた混合層高度、破線は比湿分布から決めた遷移層の範囲、点線はカイツーン (II) で観測された遷移層の通過時間帯を表している。

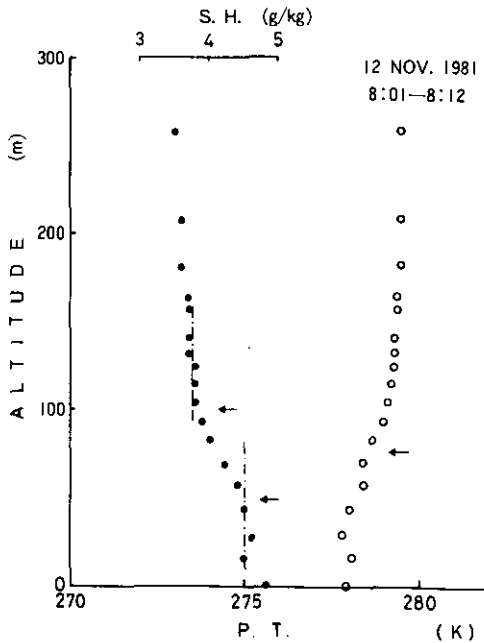


図 12 カイツーン (I) による温位 (○), 比湿 (●) の鉛直分布



る。その他の時刻の測定データでも同様であるが、比湿の分布は、混合層内で様に高く、上空で低くなっており、この中間域は滑らかな減少を示す。これに対して、温位の分布は混合層内で低く、上空で高い。しかし、比湿の分布に比べると混合層内の温位のばらつきが大きく、また、混合層上端で滑らかな変化を示さない。この理由の一つは、乾湿球センサーの時定数の違いにあると考えられる。

図 12 に矢印で示したように、比湿分布からは比湿が滑らかに減少する範囲を遷移層とみなし、また、温位分布については温位こう配の大きいところを混合層高度とみなすことができる。また、このようにして得た混合層高度、遷移層高度が図 11 に示されている。

カイツーン (II) による温位、比湿の連続測定を図 13 に示す。カイツーン (II) は定高度に停留させて連続的に測定を行うもので、混合層上端 (遷移層) の通過に伴う気温、湿度の変化が記録される。図 13 に示したような混合層上端の通過に伴う気温、比湿等の変動の記録は、Rayment と Readings<sup>5)</sup> や Palmer ら<sup>6)</sup> などでも示されている。また、Farmer<sup>22)</sup> は海洋混合層について、同様の観測結果を示している。すなわち、比湿を例にとれば、初め、混合層より上空に測器が位置する間は、乾燥した状態であるが、混合層の上昇とともに、混合層内の湿潤な空気が時々、測器の高度へ到達しはじめる。更に混合層が上昇するにつれて湿潤空気が頻繁に観測されはじめ、ついには逆に、時々、上空の乾燥した空気が測器の高度に運ばれるのみとなり、最終的には混合層内の湿潤空気に取り囲まれる。その後は、混合層の上昇につれて、混合層内の比湿が全体として低下する。

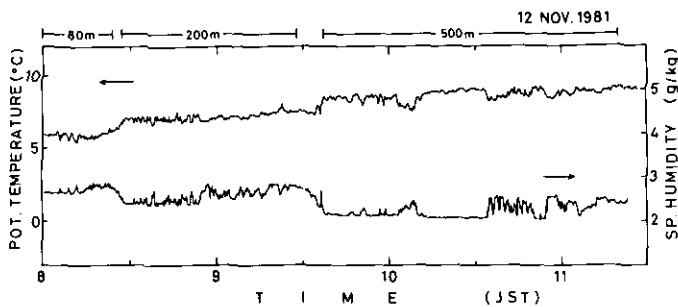


図 13 カイツーン (II) による温位 (上)、比湿 (下) の時間変動の記録

これを図 13 に合わせて解釈すると次のようになる。カイツーン (II) は 8 時に、上部安定層内の 80 m の高度に設定した。すると 8 時 5 分頃より間欠的に混合層内の気塊の到達が観測されはじめ、8 時 20 分頃には完全にカイツーン (II) は混合層内に位置することとなった。次に、高度 200 m にまで上昇させたところ、再び、混合層上部の安定層に達したが、すぐに、混合層内の気塊が到達することとなった。この高度では、8 時 55 分前後を境として、安定層側の気塊と混合層内との存在の

割合が逆転している。次に、高度 500 m に上昇させたところ、再び安定層内に位置した。この高度では 10 時前後に混合層内の気塊の到達が観測されてくるが、その後、しばらくの間、静穏で、気塊は到達していない。10 時半すぎに、再び気塊が到達しはじめ 11 時 15 分頃には、カイツーン (II) は混合層内に位置することとなった。

混合層上部の遷移層に相当する領域を航空機で水平に横断して気温、比湿等を観測した例は、Richter ら<sup>23)</sup>、Jensen と Lenschow<sup>24)</sup>、Mahrt<sup>25)</sup>などに見られる。これらでも、混合層内外の空気の性質の違いが図 13 と同様にのこぎり波状の変化として観測されている。

一定の高度で連続観測あるいは水平飛行したときに得られる、このような諸量の変動の様子は、図 2 に示したような混合層の立体構造 (特に、遷移層の構造) の反映であると考えられる。すなわち、遷移層に相当する高度での水平飛行観測によれば、間欠的に、混合層内の空気塊を横切ることになり、のこぎり波状の変動を観測する。同様にカイツーンによる定位置観測は、風で移動する遷移層の立体構造が時間変動として観測される。

図 11 に示した計測車レーザーレーダー観測データは、Sasano ら<sup>17)</sup>に述べた方法で混合層高度を求めた。本章で定義した混合層高度に比べると、多少高めに評価され、むしろ遷移層の範囲に入ると考えられる。しかし、図 11 によれば、9 時から 10 時までは計測車レーザーレーダーで求めた混合層高度は遷移層の範囲よりもなお高い。このくい違いの一つとして、観測地点の違いが考えられる。すなわち、計測車は公害研究所構内であるのに対して、遷移層高度を求めた大型レーザーレーダースキャンデータは公害研究所より西へ 3 km から 7 km の範囲を対象領域としている。したがって、特に朝方の混合層高度の低い間は地表面条件等の違いにより混合層の発達速度に顕著な差が出たものと考えられる。

計測車レーザーレーダー、カイツーン (I)、カイツーン (II) はいずれも公害研究所構内で互いに 500 m と離れていないので、これらのデータ間にはよい一致が見いだせる。また、10 時すぎの混合層高度の一時的な低下は図 11 で示したカイツーン (II) の変動記録と矛盾しない。

### 3.3 混合層高度及び遷移層厚さの時間変化について

総合観測日以外について、図 8 と同様に遷移層の範囲の時間変化をプロットすることができる。混合層高度 (遷移層の下限高度) を滑らかな曲線で結び、毎正時の高度を読み取ったものを表 4 にまとめて示した。また、同様に、対流速度  $W_*$ 、混合層発達速度、 $dH_i/dt$  を示している。対流速度  $W_*$  は、

$$W_* = \left( \frac{g\beta}{T_0} Q_s H_i \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

で定義される<sup>26)</sup>。ここで、 $g$  は重力の加速度、 $\beta$  は空気の膨張率、 $T_0$  は平均気温、 $Q_s$  は地表面温度フラックス、 $H_i$  は混合層高度である。

表 4 混合層高度, 対流速度, 混合層発達速度の時間変化  
a) 混合層高度 (m)

年月日	時刻	8	9	10	11	12	13
1980. 8. 11		—	—	—	550	550	550
	12	—	—	—	—	—	—
	13	200	250	600	800	—	—
10. 4		—	170	230	580	580	—
	6	—	—	—	—	1,150	1,230
	8	—	—	200	410	520	600
	9	100	200	480	1,000	1,080	1,170
	23	—	—	300	450	660	790
1981. 11. 10		—	—	380	600	—	—
	12	—	80	230	420	750	—

b) 対流速度 (m/s)

年月日	時刻	8	9	10	11	12	13
1980. 8. 11		—	—	—	1.62	1.62	1.62
	12	—	—	—	—	—	—
	13	0.94	1.14	1.63	1.85	—	—
10. 4		—	0.87	1.04	1.47	1.47	—
	6	—	—	—	—	1.71	1.73
	8	—	—	0.94	1.14	1.21	1.24
	9	0.58	0.90	1.32	1.76	1.79	1.70
	23	—	—	1.11	1.33	1.49	1.51
1981. 11. 10		—	—	1.10	1.34	—	—
	12	—	0.30	0.76	1.18	1.43	—

c) 混合層発達速度 (m/h)

年月日	時間帯	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
1980. 8. 11		—	—	—	0	0
	12	—	—	—	—	—
	13	50	350	200	—	—
10. 4		—	60	350	0	—
	6	—	—	—	—	80
	8	—	—	210	110	80
	9	100	280	520	80	90
	23	—	—	150	110	130
1981. 11. 10		—	—	220	—	—
	12	—	150	190	330	—

図 14 に混合層高度の変化だけをまとめて示している。図 14 によれば、9 時~10 時頃から急激に混合層高度が上昇し、13 時前後に極大に達している。

混合層の上昇発達速度は、8 時~12 時の間では 50 m/h~520 m/h の範囲にばらつくが、およそ 100~300 m/h の範囲に入っている。

遷移層の厚さの時間変化を図 15 にまとめて示している。1980 年 8 月 11~13 日、10 月 4、6、

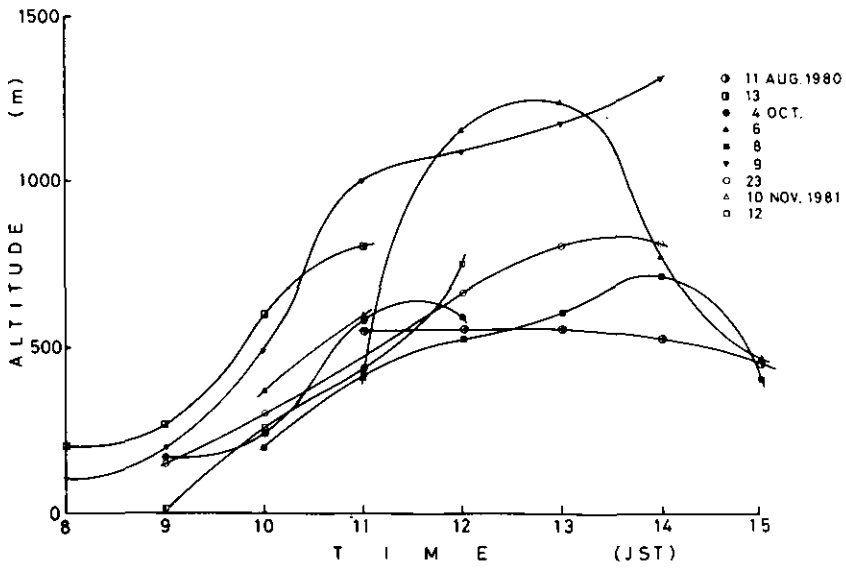


図 14 混合層度  $H_i$  の時間変化のまとめ

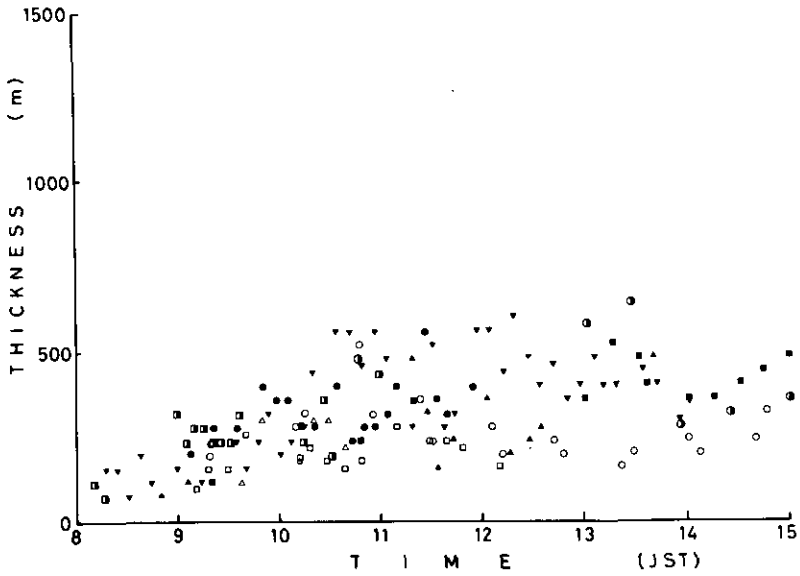


図 15 遷移層厚さの時間変化のまとめ

記号の意味は図 14 と同様。

8, 9日は、総合観測期間に比べて遷移層の厚さが大きい。全体としては、午前中に厚さはやや増加し、その後、ほぼ一定の厚さをとり続ける。ばらつきは大きいが平均的には、9時で約200 m, 11時以降400 m程度の厚さとなっている。

他の研究者によれば、遷移層の厚さは例えば50~100 m<sup>24)</sup>, 150~200 m<sup>25)</sup>, ~100 m<sup>27)</sup>などが報告されている。レーザーレーダーによる観測値は、これらに比べると大きな値となっている。また、Noonkester<sup>28)</sup>は、混合層高度が高くなると、遷移層厚さが大きくなることを示しており、本観測結果の傾向と一致する。

遷移層の厚さと混合層高度との比の値を、混合層高度に対してプロットすると図16となる。ここでは、総合観測期間中のデータのみプロットしている。また、実線は $H_u - H_i = 200$  mとおいたときの比の値を意味する。午前中の遷移層が、やや増加傾向にある他は、ほぼ一定値の回りにばらつくために、比の値は最初、1程度であるが、混合層高度の増加とともに減少し、0.2~0.3程度となる。遷移層厚さと混合層高度の比について、例えば、Yamamotoら<sup>28)</sup>の熱フラックス分布の飛行機観測によれば、~0.5, Stull<sup>29)</sup>のモデル計算では、午前中、時間とともに減少し、日中で~0.2を示している。

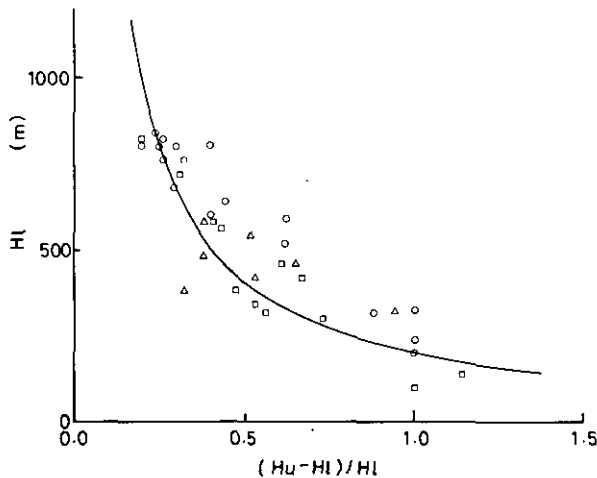


図16 相対的な遷移層厚さと混合層高度の関係

記号の意味は図14と同様。実線は遷移層厚さ200 mに対応する。

Deardorffら<sup>29)</sup>が示したように、遷移層の厚さは負の熱フラックスの領域に相当する。したがって、熱フラックス分布の形を仮定すると、遷移層厚さと混合層高度との比が分かれば、最大の負の熱フラックスの大きさ(エントレイメントパラメータ)を見積もることができる。

#### 4. 対流セルの水平スケールについて

前節では、混合層高度とともに遷移層厚さの時間変化について調べた。本節では遷移層内の水平方向の構造に着目し、対流セル構造の水平スケールの時間変化を調べる。

##### 4.1 PPI 画像に見られる対流セル構造

図2に代表されるような遷移層内のエアロゾル濃度の分布構造、あるいはエッジの構造は、混合層内下層から立ち上がってきた対流セルが上部の安定層に貫入している状況を表していると考えることができる。これは、レーザーレーダーによるPPI スキャン測定データに見られるセル構造からも確かめることができる。

図17は、仰角 $1.9^\circ$ でPPI スキャンモードで測定したもの（1981年11月12日、9時0分）で、エッジエンハンスメントの操作<sup>21)</sup>を施している。表示領域はレーザーレーダー地点から西へ1 km から9 km、北へ3 km から南へ5 km の正方形の領域である。仰角を $1.9^\circ$ にとっているために、図の中央付近で高度230 mに当たる。また、1メッシュ(1 km 四方)の東西方向の高度差は33 mに相当する。

図の中央付近より右側(東側)はエアロゾル濃度分布画像によれば、混合層内の高濃度部分に対応する。そして、図17のドーナツ構造は混合層上端(遷移層領域)の個々のセル構造を輪切りにした状態に対応していると考えられる。濃度分布図で見れば、高濃度のパッチ状になっている。

ここに見られるドーナツ状構造は、Konrad<sup>20)</sup>、Hardy と Ottersten<sup>21)</sup>などのレーダー観測で見いだされたものと同様である。レーダー観測では屈折率の乱れた部分を散乱体としており、これは湿度の変動の大きい部分に相当する。湿潤で温かい対流セルは、セルの表面で周囲との湿度差が大きいため、レーダー観測ではセルの表面(エッジ)に相当する部分の構造が検出される。エアロゾル分布データに対してエッジエンハンスメントの操作を施して得られる対流セルのドーナツ構造と、レーダー観測で得られるセル構造との類似性は、このことから理解できる。

図17によれば、ドーナツ構造は高度にして、200 m から300 m の範囲に見いだせる。遷移層内にあるセルのどの高度の部分を観測しているかによって、セルの直径は小さいものもあり得るが、最大で約400 m のものが見いだせる。

図18は、同じ日の10時2分の観測データである。領域はレーザーレーダーから西へ4 km から13 km、北へ4 km、南へ5 km の正方形領域である。9時に比べると、対流セルの存在域は260 m から360 m の高度範囲に上っている。また、最大直径は前と同様に400 m 程度となっている。9時と10時を比べると、10時の方がセルの出現個数は多い。

図19は10時6分の観測で、仰角を $5.9^\circ$ にとっている。表示領域は西方向へ1 km から6 km、北へ2.5 km、南へ2.5 km の正方形で、高度範囲は東端で約140 m、西端で約650 m である。セル構造は約400 m から550 m の高度範囲に見いだせる。セルの直径は、最大で約400 m 程度である。

図18と図19を比較すると、ほとんど同時刻の観測であるにもかかわらず、セル構造の見いだせ

高度範囲に差があり、仰角を上げて測定した方が、高度範囲は高い。この時間前後の RHI モードデータ (図 20) を見ると、西方 8 km 付近を境として、8 km 以遠と 8 km 以内とでは混合層高度の発達に大きな違いが見られる。エッジエンハンスされた画像で見ると、遷移領域の範囲は、8 km 以遠では 200~300 m、以内では 300~500 m に存在する (これは、地表面状態の違いに由来すると考えられる)。遷移層範囲の違いが図 18 と図 19 の PPI 画像におけるセル構造の存在範囲の違いとして現れている。

対流セルは一つ一つが孤立したものではなく、多くのセルが重なりあっていることが、これらの図から読み取ることができる。

#### 4.2 RHI 画像から読みとられる対流セルの水平スケール

対流セルの水平スケールの大きさ (直径) は、RHI 画像からも求めることができる。RHI 画像におけるセル構造の出現状態を図 21 に模式的に示している。一つ一つの対流セルは上に凸な山型となっているが、隣り同士のセルが重なり合った部分ではセルの境界が明りょうではなくなっている。したがって、観測された RHI スキャンデータのエッジエンハンスされた画像は、図の実線で示したような形状を示す。平均のエアロゾル濃度の鉛直分布は図中に実線で、遷移層の範囲は鎖線で示している。エッジエンハンス画像で得られた対流セルのエッジを結ぶ曲線について、模式図に点線で示したようにセルの形状を推定し、遷移層の下端 (混合層高度) におけるセルの直径を読み取ることができる。

実データでは、すべてのセル構造について上述の作業をすることは容易ではなく、顕著な構造についてのみ行うことになるのはやむを得ない。1 枚の RHI 画像から、このようにして、複数個のセル構造の直径を読み取り、平均したものを、その時刻の平均の直径と見なすことにする。このようにして得られたセルの直径は、真の平均を意味していない。もし、同一の直径を持つ半球状のセルが同一高度にランダムに分布しているとする、真の直径はここで述べた方法で求めた平均直径に比べて 27% だけ大きい<sup>15)</sup>。しかし、現実には顕著なセル構造にのみ着目する結果、比較的大きいセル構造が平均操作の対象とされることから、過少評価の問題は多少、緩和される。

図 22 は、このようにして得られた対流セルの平均直径について、その時間変化を示している。これによると、セルの平均直径は時間とともに増大する。観測日によって、ばらつきはあるが、平均的には、9 時で 300 m、10 時で 500 m、11 時で 700 m 程度の大きさになっている。一方、前項で見たように PPI 画像から読み取られたセルの直径は約 400 m であった。これは、RHI 画像から求めた値とも良く一致している。午後については、データが少ないために、その傾向を判断することは難しい。

対流セルの直径については、飛行機あるいは定高度カイツーンによる気温・湿度の観測により調べられている。混合層上端付近のデータに限ると、例えば、高度 550 m で直径 600 m<sup>27)</sup>、200~300 m<sup>24)</sup>、320~370 m<sup>22)</sup> などとなっている。また、Konrad<sup>30)</sup> のレーダー観測では 500~2000 m の間で時

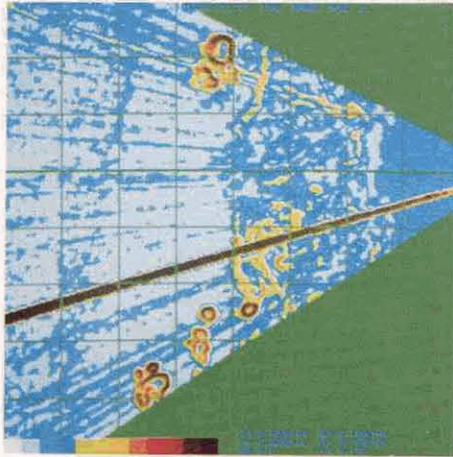


図17 P P Iモード測定による水平面内  
（仰角 $1.9^{\circ}$ ）構造  
1981年11月12日9時00分。

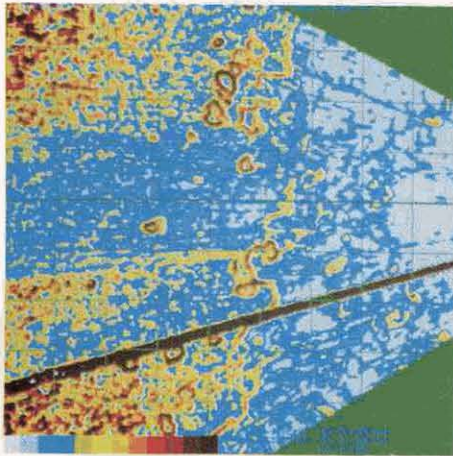


図18 P P Iモード測定による水平面内  
（仰角 $1.9^{\circ}$ ）構造  
1981年11月12日10時02分。

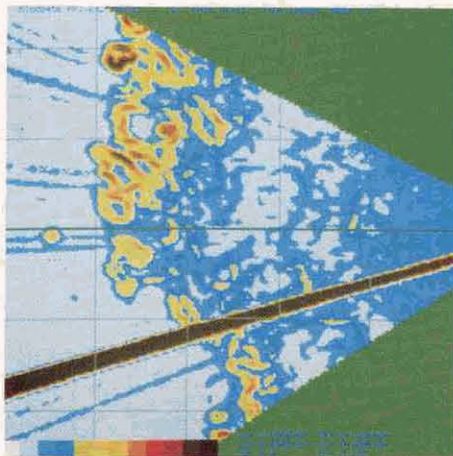


図19 P P Iモード測定による水平面内  
（仰角 $5.7^{\circ}$ ）構造  
1981年11月12日10時06分。



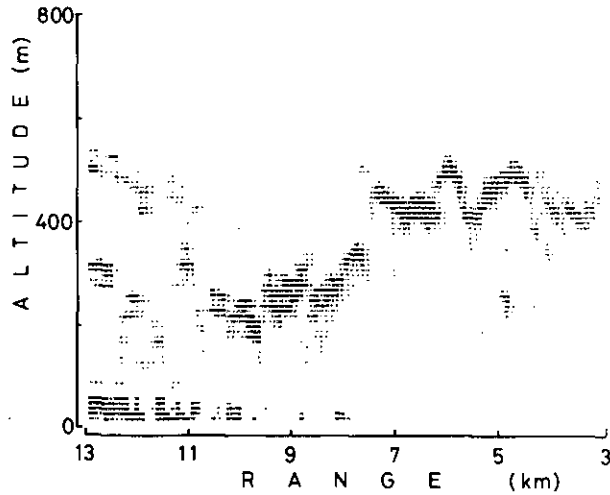


図 20 RHI モード測定による鉛直断面構造  
1981年11月12日10時12分。

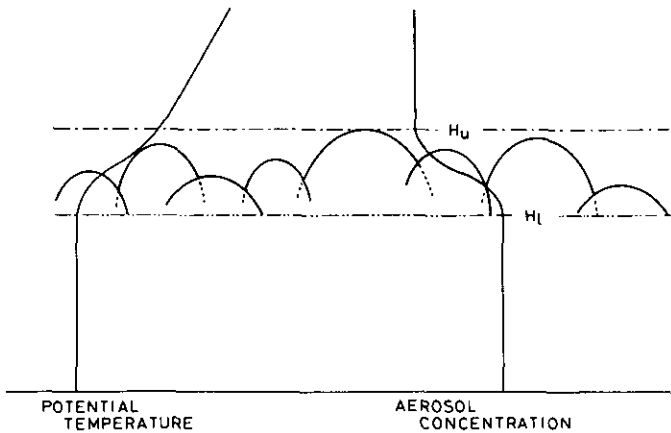


図 21 混合層，遷移層構造の模式図

一点鎖線，二点鎖線はそれぞれ混合層の上端，下端を示している。

間とともに増加している。Hardy と Ottersten<sup>31)</sup>の観測でも 1～3 km が報告されている。また、Kunkel ら<sup>33)</sup>によるレーザーレーダー観測では 600～1500 m の範囲に入っている。

セルの直径と混合層高度の比(アスペクト比)を混合層高度に対してプロットしたのが図 23 である。これによると、アスペクト比は混合層高度が低い(200～300 m)間は、2～4 と大きい、混合層高度の上昇とともに減少し、1～2 の範囲に入る。

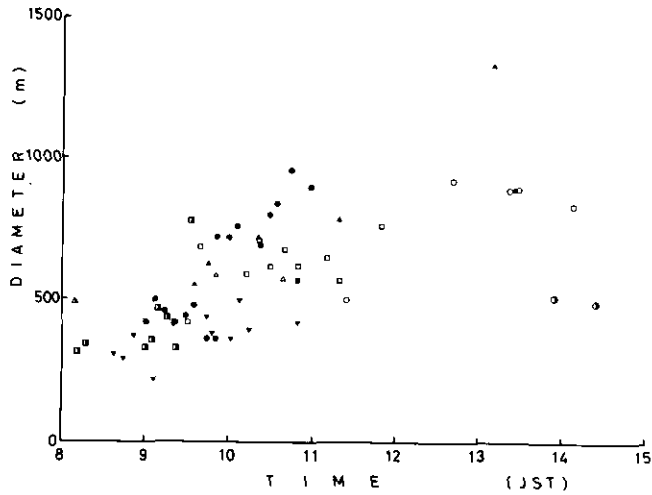


図 22 対流セルの平均直径の時間変化  
記号の意味は図 14 と同様。

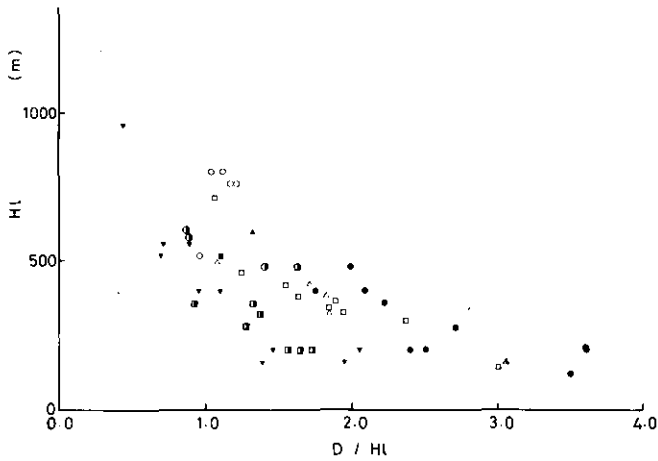


図 23 対流セルのアスペクト比  
記号の意味は図 14 と同様。

アスペクト比は、Brownigs ら<sup>27)</sup>による観測では 1.1 程度、Kunkel ら<sup>33)</sup>では 0.5~1.5 が示されている。ただし、後者の場合、混合層高度ではなく、セルの頂部高度との比をとっているため、ここでの定義に則せば、これより大きな値となる。Kaimal ら<sup>34)</sup>などは、鉛直風速乱流スペクトルのピーク波長と混合層高度の比が 1.5 程度であることを示している。これらの値は、いずれも、図 23 で示した観測値の範囲に入る。

混合層高度が低い間、アスペクト比が大きいことはベナール・レイリー型対流との対比から理解

することができる。ペナル・レイリー対流では熱的不安定を増していき、レイリー数が限界値を越えると対流運動が発現する<sup>35)</sup>。このとき理論計算によれば、アスペクト比は2~3の間にある。さらに不安定を増大(レイリー数を増加)させると、卓越する対流運動のアスペクト比は小さい方へ移行していくことが示される<sup>36)</sup>。このような、不安定の増大に伴うアスペクト比の減少として、観測結果は定性的に解釈される。

## 5. まとめ

レーザーレーダーのスキャンモード測定によると、エアロゾル濃度の空間分布を画像データとして収集することができる。本報告では、RHIモード、PPIモードによるスキャン測定で得られたエアロゾル濃度空間分布をトレーサーとして混合層及び遷移層の構造を明らかにした。また、遷移層中の対流セル構造の平均的な鉛直、水平のスケールの時間変化、及び混合層高度に対する比を求めた。

第2節では大型レーザーレーダーを中心とする観測実験について、その概要、観測日の気象条件を述べた。

第3節では、RHIモード測定による鉛直断面内のエアロゾル濃度分布データに基づいて、混合層及び遷移層を定義した。また、低層ゾンデ、カイツーン、計測車レーザーレーダー観測などを同時に実施した総合観測期間中のデータを示し、混合層発達時に観測されるエアロゾル分布パターンと、比湿、温位等の鉛直分布、時間変化との関係を論じた。さらに、総合観測日以外の観測データも合わせて、混合層高度及び遷移層厚さの時間変化を示した。これによれば、日の出後、徐々に上昇しはじめた混合層高度は9時~10時頃に急激に上昇し、13時頃に極大に達する。また、混合層高度の上昇速度は8時~12時の間で、およそ100 m~300 m/hの値をとる。遷移層の厚さは、午前中は増加の傾向を示し、その後、ほぼ一定値をとる。ばらつきは大きいですが、平均的にみて、9時で200 m、11時以後400 m程度の厚さとなる。遷移層厚さと混合層高度の比の値は、午前中、はじめは1程度であるが、その後は減少し、日中には0.2~0.3となる。

第4節では、遷移層中に見られる対流セル構造についてPPI画像データ、RHI画像データからその水平スケール(平均的直径)を読み取り、その時間変化、混合層高度に対する比(アスペクト比)を調べた。遷移層に顕著に見いだせる対流セル構造の水平スケールは、平均的にみて、9時で300 m、10時で500 m、11時で700 m程度の直径を有することが分かる。セル直径と混合層高度との比(アスペクト比)は、はじめ2~3程度であるが、日中には1程度の値に近づく。

## 引用文献

- 1) McBean, G.A. (1979) : The planetary boundary layer. WMO Tech. Note, No. 165, WMO, Geneva, 201pp.

- 2) 環境庁 (1975) : 総量規制マニュアル.
- 3) 竹内清秀・近藤純正 (1981) : 大気科学講座 1, 地表に近い大気. 東京大学出版会, 226 pp.
- 4) Wyngaard, J. C. (1979) : Boundary layer physics and turbulence—observational aspects. *Rev. Geophys. Space phys.*, **17**, 1792—1797.
- 5) Rayment, R. and C.J. Readings (1974) : A case study of the structure and energetics of an inversion. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, **100**, 221—233.
- 6) Palmer, S. G., S. J. Caughey and K.W. White (1979) : An observational study of entraining convection using balloon-borne turbulence probes and high-power Doppler radar. *Boundary-Layer Meteorol.*, **16**, 261—278.
- 7) 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫 (1981) : 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作. *応用物理*, **50**, 1154—1164.
- 8) 笹野泰弘・竹内延夫 (1983) : レーザーレーダー信号の積算平均による S/N 比改善. 国立公害研究所研究報告, 第 39 号, 39—45.
- 9) 宮坂和久・堀越倉治・川上公一 (1981) : 係留気球による上空の粉じん測定装置について. 第 22 回大気汚染学会予稿集, 524.
- 10) 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.
- 11) 笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1982) : レーザーレーダー画像データ処理・表示手法の開発. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 125—141.
- 12) Yokoyama, O., M. Gamo and S. Yamamoto (1977) : On the turbulence quantities in the atmospheric mixing layer. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **55**, 182—192.
- 13) Crane, G., H.A. Panofsky and O. Zeman (1977) : A model for disperison from area sources in convective turbulence. *Atmos. Environ.*, **11**, 893—900.
- 14) Coulter, R.L. (1979) : A comparison of three methods for measuring mixing-layer height. *J. Appl. Meteorol.*, **18**, 1495—1499.
- 15) Lenschow, D.H. and P.L. Stephens (1980) : The role of thermals in the convective boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **19**, 509—532.
- 16) 斉藤直輔 (1977) : マクロに見た大気境界層 (南関東大気環境調査から). *天気*, **24**, 431—447.
- 17) Sasano, Y., A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1982) : On the relationship between the aerosol layer height and mixed layer height determined by laser radar and low-level radiosonde observations. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 889—895.
- 18) Deardorff, J.W. (1974) : Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **7**, 81—106.
- 19) Lenschow, D.H. (1974) : Model of the height variation of the turbulence kinetic energy budget in the unstable planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 465—474.
- 20) Deardorff, J.W., G.E. Willis and B.H. Stockton (1980) : Laboratory studies of the entrainment zone of a convective mixed layer. *J. Fluid Mech.*, **100**, 41—64.
- 21) Sasano, Y., H. Shimizu and N. Takeuchi (1982) : Convective cell structures revealed by Mie laser radar observation and image data processing. *Appl. Opt.*, **21**, 3166—3169.
- 22) Farmer, D. M. (1975) : Penetrative convection in the absence of mean shear. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, **101**, 869—891.
- 23) Richter, J.H., D.R. Jensen, V.R. Noonkester, T.G. Konrad, A. Arnold and J.R. Rowland (1974) :

- Clear-air convection ; a close look at its evolution and structure. *Geophys. Res. Lett.*, **1**, 173—176.
- 24) Jensen, N.O. and D.H. Lenschow (1978) : An observational investigation of penetrative convection. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1924—1933.
- 25) Mahrt, L. (1981) : Circulations in a sheared inversion layer at the mixed layer top. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **59**, 238—241.
- 26) Deardorff, J.W. (1970) : Convective velocity and temperature scales for the unstable planetary boundary layer and for Rayleigh convection. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1211—1213.
- 27) Browning, K. A., J. R. Starr and A. J. Whyman (1973) : The structure of an inversion above a convective boundary layer as observed using a high-power pulsed Doppler radar. *Boundary-Layer Meteorol.*, **4**, 91—111.
- 28) Noonkester, V.R. (1974) : Convective activity observed by FM-CW radar. Tech. Rep., **1919**, Naval Electronics Lab. Center.
- 29) Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama (1977) : Airborne measurements of turbulent heat flux. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **55**, 533—545.
- 30) Stull, R.B. (1976) : Mixed-layer depth model based on turbulent exchange. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1268—1278.
- 31) Konrad, T.G. (1970) : The dynamics of the convective process in clear air as seen by radar. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1138—1147.
- 32) Hardy, K. R. and H. Ottersten (1969) : Radar investigation of convective patterns in the clear atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 666—672.
- 33) Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama (1982) : Observational study on the fine structure of the convective atmospheric boundary layer. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 882—888.
- 34) Kunkel, K.E., E.W. Eloranta and S.T. Shipley (1977) : Lidar observations of the convective boundary layer. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 1306—1311.
- 35) Kaimal, J.C., J.C. Wyngaard, D.A. Haugen, O.R. Cote, Y. Izumi, S.J. Caughey and C.J. Readings (1976) : Turbulence structure in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2152—2169.
- 36) Chandrasekhar, S. (1961) : Hydrodynamic and Hydromagnetic stability. Clarendon Press, Oxford.
- 37) Sheu, P.-J., E.M. Agee and J.J. Tribbia (1980) : A numerical study of physical processes affecting convective cellular geometry. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **58**, 489—499.

## II-5

### 大気混合層高度と遷移層厚さの時間変化モデル

笹野泰弘<sup>1</sup>

#### Modelling of the Development of Atmospheric Mixed Layer and Transition Layer

Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>

##### 要 旨

混合層高度及び遷移層厚さの時間変化に関するシミュレーションモデルについて述べる。ここでは、0次のジャンプモデルと、遷移層厚さに関する Deardorff らの実験式とを組み合わせ、さらに熱フラックスの鉛直分布をモデル化することにより、新しいバルクモデルを提案した。このモデルでは、混合層上端におけるエントレインメントの大きさを記述するパラメータが変数の一つとして、その他のバルク量で表現される。

このモデルを用いて大気混合層発達シミュレーションを行い、大型レーザーレーダーによる混合層高度、遷移層厚さの実測値と比較したところ、いずれも計算値と実測値とよい一致を示し、モデルの妥当性を示している。

##### Abstract

A new model is presented for simulating the development of atmospheric mixed layer. Combining the zeroth order jump model and an empirical relationship on the transition layer thickness, the model is constructed where a heat flux profile is also newly proposed. In this model, the entrainment parameter, which is defined as the maximum downward heat flux to the upward heat flux at the surface, is expressed by other bulk quantities as one of the variables.

Comparison of the simulation results with the observations by the NIES large laser radar shows good agreement in the mixed layer height and the transition layer thickness.

##### 1. はじめに

混合層高度は、地表付近の排出源から排出された大気汚染質の鉛直方向への拡散の及ぶ範囲を規定するため、大気汚染濃度に極めて深いかかわりを持っている。また、気象学的にも混合層高度は

---

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,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

大気境界層内の諸量の鉛直分布を記述する相似則における主要なスケーリングパラメータの一つであり、混合層高度の時間変化など、そのふるまいを知ることの重要性は大きい。

混合層構造の時間変化を表現するモデルは、これまで多く提出されてきた。その手法を大別すると、(1)K-理論によるもの、(2)高次乱流モデル(クロージャモデル)、(3)バルクモデルとに分けられる。いずれも運動量、熱の保存式に基づくものであるが、乱流拡散項の取り扱いが異なっている。

すなわち、K-理論では乱流拡散係数を風速、温位こう配等の関数として表現し、方程式系を閉じさせる。高次乱流モデルは、乱流拡散項に関する新たな方程式を導入し、3次相関項、あるいは4次相関項について適当な仮定のもとに方程式系を閉じさせる。この方法は、変数、方程式の数が非常に多くなるほか、仮定のおき方に問題は残るが、乱流拡散項、輸送項などの高次相関量の変化についてもシミュレートできるという利点を有している。バルクモデルは、混合層の存在を *a priori* に仮定するもので、混合層内の乱流拡散のタイムスケールが無限小に小さいと仮定する。つまり、混合層内の風、温位などの分布は鉛直方向には一様であると仮定する。したがって他の二つの方法に比べて計算式が極めて簡略化され、混合層高度の予測など実用的な面で優れている。

バルクモデルは種々のものが提案されている(図1)が、基本的には、混合層上端におけるエントレイメントの取り扱いに違いがあるのみである。すなわち、エンクローチメントモデル<sup>12)</sup>ではエントレイメントは全くないと考えるもので、熱フラックスは直線的な分布で混合層上端で0とおく。0次のジャンプモデル<sup>3-8)</sup>は、混合層の上端に温位のジャンプがあり、熱フラックスはそこで負値とする。1次のジャンプモデル<sup>9)</sup>では、混合層上端に強い安定層が存在し、熱フラックスは負の極大値をとる。さらに、一般化されたモデル<sup>10)</sup>では現実の温位の平均鉛直分布に近い形を導入し、熱フラックスについても同様に滑らかな分布形を考える。これらのモデルは後に述べたものほど未知量が増し、複雑になっている。エントレイメントによる負の熱フラックスの大きさをいかに、その他の既知の量で表現するかという点で、種々の考え方が出されている<sup>11)</sup>。ここでは、バルクモデルの一つである0次のジャンプモデルを採用する。これは、混合層上端からのエントレイメントを考慮したモデルの中で最も単純化したモデルであるという理由による。

一方、Deardorffら<sup>12)</sup>は、水槽実験に基づいて遷移層厚さに関する実験式を提出している。この実験式と、0次のジャンプモデルを組み合わせることで遷移層厚さの時間変化を記述することが可能になる。さらに、熱フラックスの鉛直分布形をモデル化するとエントレイメントによる負の熱フラックスの大きさを、遷移層厚さと混合層高度の比から評価することが可能となる。すなわち、エントレイメントパラメータ(負の熱フラックスの大きさと地表面熱フラックスの大きさの比)を変量としてモデルに組み込むことができる。

本報告では、ここで述べたように、0次のジャンプモデルと Deardorff ら<sup>12)</sup>の実験式を組み合わせたい新しいバルクモデルを提案する。また、熱フラックス鉛直分布形をモデル化することで、エントレイメントパラメータを変量として扱うモデルを提案する。これらのモデルシミュレーション結果を、大型レーザーレーダーによる混合層高度及び遷移層厚さの実測値<sup>13)</sup>と比較し、モデルの妥当性を

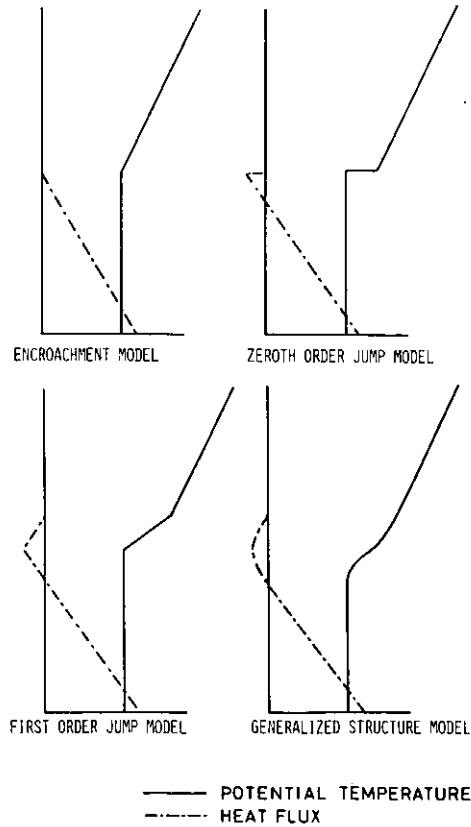


図1 各種のジャンプモデルにおける温位（実線），熱フラックス（一点鎖線）の分布

検討する。

本報告の構成は次のとおりである。第2節では0次のジャンプモデルについて概説し，方程式系を導入する。また，これに Deardorff ら<sup>12)</sup>の実験式を組み合わせ (MODEL 1)，混合層高度，遷移層厚さの時間変化に関する定性的な議論を行う。さらに，熱フラックスの鉛直分布を仮定し，0次のジャンプモデルに修正を加える (MODEL 2)。第3節は，レーザーレーダー観測日を対象として，シミュレーション (MODEL 1 及び MODEL 2) を行い，計算値と実測値との比較を行う。また，ここで仮定した熱フラックス鉛直分布の意味を述べる。

## 2. 0次のジャンプモデルと遷移層厚さに関する実験式の結合

本節では，まず，0次のジャンプモデルについて方程式系を示し，次に遷移層厚さに関する Deardorff ら<sup>12)</sup>の実験式を組み合わせ，混合層高度及び遷移層厚さの時間変化を表現するモデル



を作る。さらに、熱フラックス鉛直分布形をモデル化し、エントレイメントパラメータに関する式を導く。これにより、エントレイメントパラメータを変量とするモデルを提案する。

### 2.1 混合層バルクモデルについて

まず、混合層の0次のジャンプモデルについて方程式系を導入する。ただし、熱的不安定による対流混合層を対象として、温位の鉛直分布に関する式のみを考える。

モデルの主な仮定は以下のとおりである。まず、混合層内で温位は一様とする。したがって、熱フラックスの鉛直分布は一次式で表される。水平方向には一様な場を考え、大規模スケールの沈降、移流は無視する。接地層は十分に薄くて、その効果は小さい。混合層上端の逆転層は無限小に薄く、風速のジャンプはない。これらを模式的に表すと図2の実線で示すようになる。

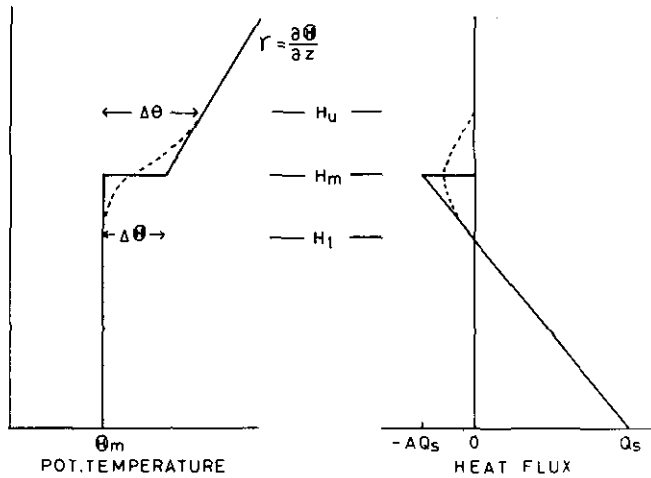


図2 0次のジャンプモデル概念図(実線)

点線は、より現実的な分布を示している。

このとき、混合層の発達に関与する変量  $\theta_m$  (混合層内の温位)、 $\Delta \theta$  (逆転層の温位差)、 $H_m$  (混合層高度)、 $\gamma$  (上部安定層の温位こう配)、 $Q_s$  (地表面熱フラックス)、 $Q_h$  (混合層上端の熱フラックス) の関係は次式で表される。ただし、以下の式の中では熱フラックスは温度フラックスと読み替えるものとする。

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{1}{H_m} (Q_s - Q_h) \tag{1}$$

$$\frac{d(\Delta \theta)}{dt} = \gamma \frac{dH_m}{dt} - \frac{d\theta_m}{dt} \tag{2}$$

$$Q_h = -\Delta \theta \frac{dH_m}{dt} \quad (3)$$

ここで、 $t$ は時間を表す。

上の3式を組み合わせると、

$$\frac{d}{dt}(H_m \Delta \theta) = \gamma H_m \frac{dH_m}{dt} - Q_s \quad (4)$$

を得る。今、 $\gamma$ が高さによらないとすると上式は積分されて、

$$H_m \Delta \theta - H_{mi} \Delta \theta_i = \gamma \left( \frac{1}{2} H_m^2 - \frac{1}{2} H_{mi}^2 \right) - \int_0^t Q_s(t') dt' \quad (5)$$

となる。ただし、添字  $i$  は  $t=0$  における値を意味する。

この式を用いて、次の二つの特殊な場合を考えよう。まず、地表面から流入する熱フラックスのみで混合層が静かに加熱され、混合層より上層からの熱の取り込み（エントレイメント）のない場合を考える。このとき、

$$\Delta \theta = 0 \quad (6)$$

とおけば、

$$\frac{1}{2} H_m^2 = \frac{1}{\gamma} \int_0^t Q_s(t') dt' + \frac{1}{2} H_{mi}^2 \quad (7)$$

となる。これは、最も単純化された混合層発達モデル（エンクローチメントモデル）と考えることができる。この関係式は、Gamo と Yokoyama<sup>1)</sup>などで採用されている。

次に、地表面からの熱フラックスがなく、機械的な混合がなされる場合には、

$$Q_s = 0, H_{mi} = 0 \quad (8)$$

とすれば、次式を得る。

$$H_m \Delta \theta = \frac{1}{2} \gamma H_m^2 \quad (9)$$

この場合、時間変化の情報は含んでいない。

地表面熱フラックスが主要な働きをする対流混合層の発達においては、通常、次の仮定を置いて方程式を閉じることができる。すなわち、

$$Q_h = -A Q_s \quad (10)$$

とおいて、混合層上端の熱フラックス流入量を、地表面フラックスの  $A$  倍とするものである。この方法は Carson<sup>5)</sup>, Tennekes<sup>6)</sup>らによって提案されている。ここでは、 $A$  はエントレイメントパラメー

タと呼ばれ、定数と考えている。

式(10)を式(1)~(3)と組み合わせることにより、 $\Delta \theta$ 、 $H_m$ 、 $\theta_m$ は解析的に解くことができ (ただし、 $\gamma$ は高度によらないとする)。

$$\Delta \theta = \gamma \frac{A}{1+2A} H_m + \left(\frac{H_{mi}}{H_m}\right)^{\frac{1+A}{A}} (\Delta \theta_i - \gamma \frac{A}{1+2A} H_{mi}) \quad (11)$$

$$\theta_m - \theta_{mi} = \gamma (H_m - H_{mi}) + \Delta \theta_i - \Delta \theta \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma \frac{A}{1+2A} H_m^2 - A \left(\frac{H_{mi}}{H_m}\right)^{\frac{1}{A}} (H_{mi} \Delta \theta - \gamma \frac{A}{1+2A} H_{mi}^2) \\ = A \left[ \int_0^t Q_s(t') dt' + \frac{1}{2} \gamma H_{mi}^2 - H_{mi} \Delta \theta \right] \end{aligned} \quad (13)$$

を得る<sup>14)</sup>。

$H_m \gg H_{mi}$ において、十分な精度で

$$\Delta \theta = \gamma \frac{A}{1+2A} H_m \quad (14)$$

$$\theta_m = (\theta_{mi} + \Delta \theta - \gamma H_{mi}) - \gamma \frac{1+A}{1+2A} H_m \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} \gamma H_m^2 = (1+2A) \left[ \int_0^t Q_s(t') dt' - (H_{mi} \Delta \theta_i - \frac{1}{2} \gamma H_{mi}^2) \right] \quad (16)$$

となる。

上部の温位こう配 $\gamma$ が高さ $z$ の関数である場合には、 $\gamma$ が一定とみなせる層に区切って上の解を適用するか、あるいは数値積分により解を求めることができる。

その他、式(1)~(3)とエネルギー保存式を組み合わせることにより、エントレイメントパラメーターを評価する試みも多い。

## 2.2 遷移層厚さに関する実験式の結合

ところで、現実の温位の分布は図2の点線で示したように滑らかな曲線を描いており、遷移層の存在を考えるのが妥当である。遷移層の範囲は Deardorff ら<sup>12)</sup>の水槽実験によれば熱フラックスの鉛直分布における負のフラックスの範囲に相当する。彼らは遷移層の厚さと混合層高度の比について、次の実験式を提出している。すなわち、遷移層厚さを $\Delta h$ 、混合層高度を $h_0$ とすると、相対的な遷移層の厚さ $C$ は、

$$C \equiv \frac{\Delta h}{h_0} = 0.21 + \frac{1.31}{Ri^*} \quad (17)$$

ここで、 $Ri^*$ はリチャードソン数で次式で与えられる。

$$Ri^* = \frac{g\beta \Delta \theta h_0}{W_*^2} \quad (18)$$

$$W_* = [g\beta Q_s h_0]^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

なお、 $g$  は重力の加速度、 $\beta$  は熱膨張係数、 $\Delta \theta$  は  $\Delta h$  間の逆転の強さ、 $W_*$  は対流速度のスケールである。

これを図 2 にあてはめて考えると、(遷移層の上端、下端の高度を  $H_u$ ,  $H_l$  とすると)

$$\Delta h = H_u - H_l \quad (20)$$

$$h_0 = H_l \quad (21)$$

に相当する。また、Deardorff ら<sup>12)</sup>によれば、負の最大の熱フラックスは遷移層の中間に位置するので、

$$H_m = \frac{H_u + H_l}{2} \quad (22)$$

である。

したがって式(17)は

$$C \equiv \frac{H_u - H_l}{H_l} = 0.21 + \frac{1.31}{Ri^*} \quad (23)$$

$$Ri^* = \frac{g\beta \Delta \theta H_l}{W_*^2} \quad (24)$$

$$W_* = [g\beta Q_s H_l]^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

と表される。

ここで、 $C$  を求めるには  $\Delta \theta$ ,  $H_l$  の値が必要であるが、これは  $C$  と温位こう配  $\gamma$  の関数であり、反復的に解かなければならない。そこで、近似的に

$$\Delta \theta = \Delta \theta, H_l = H_m \quad (26)$$

と置き換えて、 $C$  を求めることとする。すなわち、混合層高度  $H_m$ , 温位ジャンプ  $\Delta \theta$ , 及び地表面熱フラックス  $Q_s$  の関数として  $C$  が与えられる。方程式(1), (2), (3), (23), (24), (25), (26)で記述されるモデルを MODEL 1 と呼ぶことにする。

MODEL 1 の解のふるまいを定性的に理解するために、式(14)~(16)において初期値に依存する量を無視した次の解を考える。すなわち、

$$H_m = \left[ \frac{2(1+2A)}{\gamma} I(t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$\Delta \theta = \frac{\gamma A}{1+2A} H_m \quad (28)$$

ここで、

$$I(t) = \int_0^t Q_s(t') dt' \quad (29)$$

である。

今、地表面熱フラックスが時間とともに直線的に増加すると仮定すると

$$Q_s(t) = \frac{t}{T} Q_0 \quad (30)$$

と書ける。すると、解は

$$H_m = \left[ \frac{(1+2A) Q_0}{\gamma T} \right]^{\frac{1}{2}} t \quad (31)$$

$$\Delta \theta = \left[ \frac{\gamma A^2 Q_0}{(1+2A) T} \right]^{\frac{1}{2}} t \quad (32)$$

となり、いずれも時間に比例して増加する。

このとき、遷移層の相対的な厚さに関する式は、

$$C = 0.21 + \frac{1.31}{(g\beta)^{1/3}} \left( \frac{1+2A}{\gamma A^3} \right)^{\frac{1}{3}} t^{-\frac{1}{2}} \quad (33)$$

と書ける。

典型的なケースとして、 $\gamma = 0.5 \times 10^{-2} \text{C/m}$ 、 $T = 5 \text{ h}$ 、 $Q_0 = 0.15 \text{C}\cdot\text{m/s}$ 、 $A = 0.2$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $\beta = 3.41 \times 10^{-3} / \text{C}$ としたときの、 $H_m$ 、 $C$  及び  $H_u - H_l$  の変化を図3に実線で示している。これに

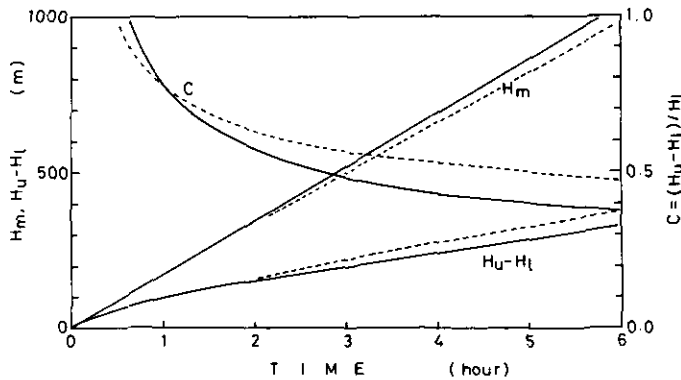


図3 0次ジャンプモデル (実線: MODEL 1, 点線: MODEL 2) による計算例  
ただし、初期条件として一定の温位こう配、境界条件として時間に比例して増加する地表面熱フラックスを与えた。

よれば、遷移層の相対的な厚さ  $C$  は時間とともに減少し、6時間後に0.4程度まで小さくなる。遷移層の厚さ ( $H_u - H_l$ ) は時間とともに増加するが増加率は小さく、2時間目で150 m、6時間目で330 mの厚さになる。

また、 $Q_0/T$  が2倍に大きくなったとすると、 $H_m$ 、 $H_u - H_l$  は各々1.41倍になるが、 $C$  に変化はない。エントレイメントパラメータ、 $A$  の変化は  $H_m$  に対しては大きな効果を持たない<sup>15)</sup>が、 $C$  は  $A$  の逆数にほぼ比例する。

ここで示したように、混合層高度、遷移層厚さは共に時間の経過とともに大きくなるが、遷移層厚さの増加率は比較的小さい。このため、混合層高度に対する相対的な遷移層の厚さは、時間とともに小さくなるという傾向を示す。

### 2.3 混合層モデルの修正

MODEL 1ではエントレイメントパラメータは定数と置いているが、現実には混合層の発達につれて変化すると考えるのが妥当である。エントレイメントは混合層内の熱プルームが上層の安定層に貫入しようとするとき、上昇流の反流として上層の空気を混合層内に取り込んだり、プルームの表面での小さなスケールの乱流作用で空気の混合作用をもたらすと考えられる。したがって、熱対流の強さ、上部安定層の安定度、あるいは混合層上端の逆転の強さに依存してエントレイメントパラメータは変化すると考えられる。

エントレイメントパラメータのフィールド測定結果は、例えば、0.5<sup>5)</sup>、 $\sim 0.1$ <sup>16)</sup>、0.25<sup>17)</sup>、0.25<sup>18)</sup>、0.2 $\sim$ 0.4<sup>19)</sup>、0.2 $\sim$ 0.3<sup>20)</sup>などが報告されている。また、室内実験では0.05 $\sim$ 0.08<sup>21)</sup>、0.18<sup>22)</sup>が、数値モデルでは、0.12 $\sim$ 0.21<sup>23)</sup>、0.2 $\sim$ 1.0<sup>7)</sup>、0.15<sup>24)</sup>、0.04 $\sim$ 0.07<sup>25)</sup>などが示されている。Stull<sup>26)</sup>のまとめでは、エントレイメントパラメータは0.1 $\sim$ 0.3の範囲にある。

ArtazとAndre<sup>27)</sup>はエントレイメントパラメータに関して、フィールド、室内実験の結果をとりまとめている。これによると、ばらつきは大きいのが、対流の強さが大きくなるほどエントレイメントパラメータは小さくなる。Dubosclard<sup>28)</sup>の観測でも、地表面熱フラックスが増大すると、エントレイメントパラメータが減少することを示している。また、Garret<sup>29)</sup>は、エントレイメントパラメータが季節により変化する(冬に小さく、夏大きい)ことを示唆している。

ここに列挙した数値は、必ずしも熱的不安定による自然対流だけに関するものではなく、風速シア等による効果も含まれているので、その程度によって値がばらつくことがあり得る。しかし、エントレイメントパラメータを一定値と置く必然性はない。

ここでは、熱フラックスの鉛直分布をモデル化することにより、遷移層の厚さをエントレイメントパラメータの大きさに関係づけるを試みる。既に述べたように、Deardorffら<sup>12)</sup>の水槽実験の結果によれば、遷移層の範囲は負の熱フラックスの範囲と一致し、しかも、負のフラックスの極大の位置は遷移層の中央に位置する。したがって、妥当な熱フラックス分布が仮定されるならば、エントレイメントパラメータが評価できる。

熱フラックス分布について、次の分布形を仮定しよう(図4)。すなわち、地表から混合層高度  $H_i$  までは直線的に減少し、 $H_i$  でフラックスは 0、また高度  $H_i$  から  $H_u$  の間は 2 次曲線で表されるものとする。ただし、高度  $H_i$  で、フラックス分布は滑らかに接続し、高度  $H_m$  で極小値をとるものとする。ただし、 $H_m$  は  $(H_u + H_i)/2$  に等しい。このとき、遷移層内の熱フラックス分布は

$$\frac{Q(z)}{Q_s} = \frac{(2+C)^2}{4C} \left( \frac{z}{H_m} - 1 \right)^2 - \frac{C}{4} \quad (34)$$

で表される。ただし、 $C = (H_u - H_i)/H_i$  である。

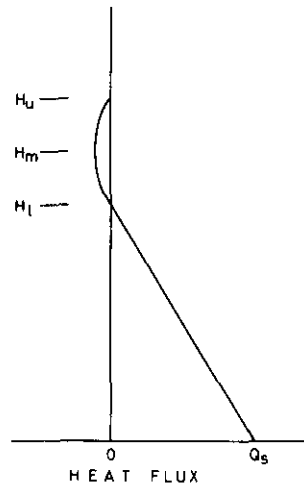


図4 熱フラックス分布のモデル

高度  $H_m$  における熱フラックス、すなわち負の極大値を  $Q_h$  とすると、

$$Q_h = -\frac{C}{4} Q_s \quad (35)$$

となり、エントレイメントパラメータ、 $A$  は

$$A = \frac{C}{4} \quad (36)$$

で与えられる。

前述の、MODEL 1 の単純な計算結果によると、遷移層の相対的な厚さ  $C$  は、時間とともに減少する。したがって、式(36)から、エントレイメントパラメータも同様に時間とともに小さくなることが示される。

MODEL 1 の方程式系に式(23)、(36)を組み合わせ、エントレイメントパラメータを定数ではなく変量として扱うことができる。この改良されたモデルを MODEL 2 と呼ぶことにする。この

MODEL 2を用いて、先と同様に単純な計算を行ってみる。ただし、MODEL 2では数値的に解を求める。初期条件として、高さ1 m、温位ジャンプ0.005°Cという混合層を与え、その他の条件は前と同様である。

図3の点線で示したのがMODEL 2の計算結果である。これによると、混合層高度の増加はMODEL 1に比べて、やや小さい。相対的な遷移層厚さはMODEL 1に比べると、初め、小さいが1時間を過ぎた頃からは逆に大きくなり、6時間後で0.5（エントレイメントパラメータAは0.125）程度となる。遷移層厚さそのものも、MODEL 2の方が少し大きい。

### 3. 混合層バルクモデル計算結果と実測データの比較

混合層バルクモデルは、温位分布に関する初期条件と、地表面熱フラックスの時間変化（境界条件）を与えると、時間積分できて、混合層の発達を記述することができる。本節では、大型レーザーレーダーによる混合層構造の総合観測<sup>13)</sup>を実施した、1980年10月23日、1981年11月10日、同じく11月12日の3日間についてモデル計算を行い、混合層高度と遷移層厚さについて実測値と比較する。

温位分布の初期値として、低層ゾンデで測定したデータを与える。放球時刻は、それぞれ9時20分、8時50分、9時00分である。境界条件としての地表面熱フラックスは放射収支量に比例するものとして、放射収支の実測値に一定の比例係数(0.55)を掛けた値を与えた<sup>13)</sup>。熱フラックスは10分ごとの値を与えた。

連立微分方程式は時間ステップを10分として数値的に解いた。MODEL 2では、エントレイメントパラメータの値は前のステップで得られた混合層高度、温位ジャンプの計算値を用いて求めた。シミュレーションは、ゾンデの放球時刻から13時までについて計算を行った。

混合層高度の計算値と実測値の比較において、実測値は遷移層の下端高度であることを考慮して、計算値は次の変換を行う。

$$H_i(\text{calc}) = \frac{C}{2+C} H_m(\text{calc}) \quad (37)$$

ただし、Cは遷移層厚さと混合層高度の比で、式(23)で計算される。

MODEL 1では、エントレイメントパラメータはA=0.2とおいた。

#### 3.1 混合層高度の比較

混合層高度の毎正時の計算値と実測値の比較を図5、6に示している。MODEL 1とMODEL 2との差はほとんどなく、実測値とは、いずれも相関係数0.9程度の一致度を示している。

個々の日について見ると、1980年10月23日のケースが最も一致度がよい。本来、この種のモデルは、混合層高度より上層の状態は初期値で与えたものが持続するという仮定のもとに成立するものである。10月23日の温位の高度・時間変化<sup>13)</sup>を見ると、この日はこの仮定が成り立っており、モ



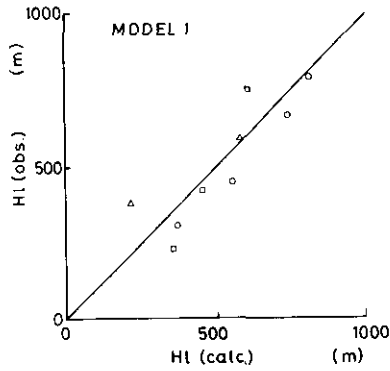


図5 混合層高度（毎正時値）の計算値（MODEL 1）と実測値の比較  
○、△、□はそれぞれ1980年10月23日、1981年11月10日、12日を表している。

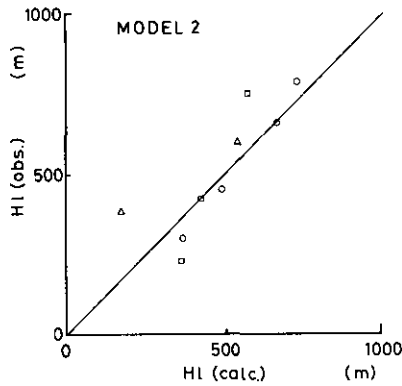


図6 混合層高度（毎正時値）の計算値（MODEL 2）と実測値の比較  
記号の意味は図5と同じ。

デル計算と実測との一致が良いものと考えられる。

一方、1981年11月10日、12日については、温位変化を見ると、一般的に昇温しており、上で述べた仮定が成立していない。

### 3.2 遷移層厚さの比較

図7に、混合層高度を縦軸に、相対的な遷移層厚さを横軸にして実測値とMODEL 1の計算値の比較を示している。ここで、計算値は10分ごとの値を実線で結び、毎正時の値に記号をつけてい

る。また、破線は遷移層の厚さを一定 (200 m) としたときの関係を示している。

実測された遷移層の厚さは、ほぼ一定の値のまわりにばらついているが、モデル計算の結果でもこの傾向が示されており、モデルの妥当性を示している。また、水槽実験で得られた実験式が大気混合層についても適用できるということは非常に興味深い。

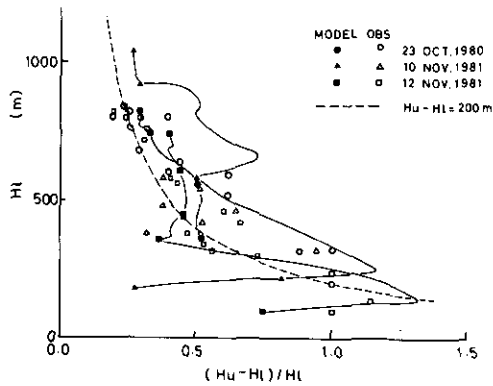


図7 相対的な遷移層厚さと混合層高度の関係に関する計算値 (MODEL 1) と実測値の比較

図8には、MODEL 1とMODEL 2の計算結果の違いを示している。図に見られるように、両者の差はあまり大きくない。実測値のばらつきが大きいために、いずれのモデルが実測値により良く一致するかを判定することは難しいが、MODEL 2の結果は実測値と矛盾することはない。

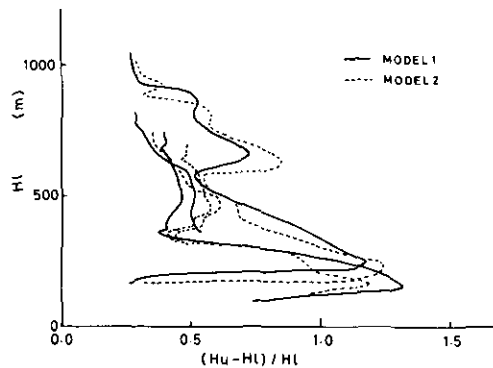


図8 相対的な遷移層厚さと混合層高度の関係に関する MODEL 1 と MODEL 2 の計算値の比較

MODEL 2 によれば、エントレイメントパラメータの大きさは、混合層の低い間は 0.3 程度で、混合層の発達とともに減少する。13 時頃には 0.1~0.15 程度の大きさとなる。これらの値は、これまでに報告されてきた値の範囲に入っている。

ところで、ここで提案した熱フラックスの分布モデルについて考察を加えよう。

遷移層内の分布形は式(34)で記述される。これを、相対的な遷移層厚さ  $C$  をパラメータとして図 9 に実線で描いている。ただし、ここでは地表面熱フラックス  $Q_s$  と、遷移層の中央の高さ  $H_m$  (負の熱フラックスの極大となる高さ) で無次元化している。これによると、無次元化された熱フラックス分布は、 $C$  の大きさによって関数形が異なる。大気における観測、室内実験、あるいは数値モデルなどで得られる熱フラックス分布データの整理において、負の熱フラックスの極大となる高度で無次元化しても、分布形は相似とはならず、データのばらつきの原因の一つとなると考えられる。

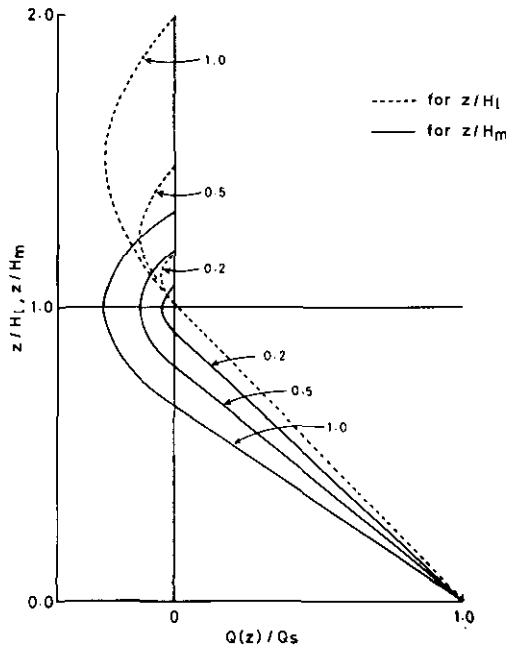


図 9 熱フラックスの無次元化鉛直分布

図中の数字は  $(H_u - H_i)/H_i$  の大きさを意味する。

一方、混合層高度 (遷移層下端高度)  $H_i$  で無次元化するならば、図 9 に点線で示したように、少なくとも混合層内の熱フラックス分布は一本の直線にまとまり、データの整理において相似形として取り扱うことが可能であると期待される。

前者の ( $H_m$  による) 無次元化は、例えば、Lenschow<sup>16)</sup>, Caughey と Kaimal<sup>30)</sup>, Caughey と

Palmer<sup>19)</sup>などの大気観測データの整理に見られる。また、Willis と Deardorff<sup>21)</sup>の室内実験データの整理に用いられている。しかし、Willis と Deardorff<sup>21)</sup>のデータでも明らかなように、負の熱フラックスの範囲は条件によって異なるために、無次元化による整理の意味を失っている。 $H_i$  (すなわち、熱フラックスが0となる高度) での無次元化は Yamamoto ら<sup>31)</sup>によりなされているのみである。

この高度の無次元化の適切さは、熱フラックス分布に限らず、その他の混合層内の統計量を相似則によって整理しようとするとき、極めて大きな問題であるにもかかわらず、これまで、あまり注意が払われていなかった。今後、検討を要する課題である。

#### 4. まとめ

本報告では、混合層バルクモデルの一つである0次のジャンプモデルにより混合層及び遷移層厚さの時間変化をシミュレートし、大型レーザーレーダーによる実測値<sup>13)</sup>と比較した。

この種のジャンプモデルでは混合層上端におけるエントレイメントの大きさをいかに表現するかということが一つのポイントになっている。最も単純には、エントレイメントパラメータは一定値と置かれる。本章のMODEL 1では0.2と置いている。

一方、Deardorff ら<sup>12)</sup>による実験結果によると混合層上端の遷移層の範囲は負の熱フラックスの範囲と一致し、熱フラックスの負の極大は遷移層の中間高度に位置する。そこで、熱フラックスの鉛直分布について、式(34)で示されるような分布形を仮定すると、式(36)のようにエントレイメントパラメータの大きさは遷移層厚さと混合層高度の比で表される。遷移層厚さ、混合層高度はMODEL 1で計算されるので、この計算値を用いてエントレイメントパラメータを求めることができる。このようにして、エントレイメントパラメータを変量として扱う新たなモデルをMODEL 2とした。

第3節では、これらのモデルを用いて大型レーザーレーダーによる総合観測期間中の3日間についてシミュレーションを行い、大型レーザーレーダー実測値と比較した。これによると、いずれのモデルでも混合層高度の1時間ごとの値は、実測値と予測値の間で相関係数0.9程度的一致を示し、モデル間の差はあまりない。モデル計算された遷移層厚さの時間変化の様子も、実測値をよく表現しており、モデルの妥当性を示している。実測値のばらつきが大きいので、いずれのモデルがよりよく実測値に一致しているかを判定することは難しい。今後、エントレイメントパラメータの実測を含めた、より詳細な観測が必要とされる。

#### 引用文献

- 1) 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.
- 2) 竹内精秀・近藤純正 (1981) : 大気科学講座 1, 地表に近い大気. 東京大学出版会, 226 pp.
  - 3) Lilly, D. K. (1968) : *Models of cloud-topped mixed layers under a strong inversion*. Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 94, 292—309.
  - 4) Betts, A. K. (1973) : *Non-precipitating cumulus convection and its parameterizaion*. Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 99, 178—196.
  - 5) Carson, D. J. (1973) : *The development of a dry inversion-capped convectively unstable layer*. Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 99, 450—467.
  - 6) Tennekes, H. (1973) : *A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer*. J. Atmos. Sci., 30, 558—567.
  - 7) Stull, R. B. (1976) : *Mixed-layer depth model based on turbulent exchange*. J. Atmos. Sci., 33, 1268—1278.
  - 8) Zeman, O. and H. Tennekes (1977) : *Parameterization of the turbulent energy budget at the top of the daytime atmospheric boundary layer*. J. Atmos. Sci., 34, 111—123.
  - 9) Betts, A. K. (1974) : *Reply to comment on the paper "Non-precipitating cumulus convection and its parameterizaion"*. Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 100, 469—471.
  - 10) Deardorff, J. W. (1979) : *Predicion of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure*. J. Atmos. Sci., 36, 424—436.
  - 11) 中村晃三・浅井富雄 (1981) : 大気混合層モデルについて. 海洋科学, 13, 470—477.
  - 12) Deardorff, J. W., G. E. Willis and B. H. Stockton (1980) : *Laboratory studies of the entrainment zone of a convective mixed layer*. J. Fluid Mech., 100, 41—64.
  - 13) 笹野泰弘 (1983) : ミー散乱レーザーレーダーによる発達過程の大気混合層の観測. 国立公害研究所研究報告, 第 49 号, 47—75.
  - 14) Tennekes, H. and A. G. M. Driedonks (1981) : *Basic entrainment equations for the atmospheric boundary layer*. Boundary-Layer Meteorol., 20, 515—531.
  - 15) Driedonks, A. G. M. (1982) : *Sensitivity analysis of the equations for a convective mixed layer*. Boundary-Layer Meteorol., 22, 475—480.
  - 16) Lenschow, D. H. (1974) : *Model of the height variation of the turbulence kinetic energy budget in the unstable planetary boundary layer*. J. Atmos. Sci., 31, 465—474.
  - 17) Rayment, R. and C. J. Readings (1974) : *A case study of the structure and energetics of an inversion*. Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 100, 221—233.
  - 18) Kloppe, M., G. Stilke and C. Wamser (1978) : *Experimental investigations into variations of ground-based inversions and comparisions with results of simple boundary-layer models*. Boundary Layer Meteorol., 15, 135—145.
  - 19) Caughey, S. J. and S. G. Palmer (1979) : *Some aspects of turbulence structure through the depth of the convective boundary layer*. Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 105, 811—827.
  - 20) Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama (1982) : *Observational study on the fine sturcture of the convective atmospheric boundary layer*. J. Meteorol. Soc. Jpn., 60, 882—888.
  - 21) Willis, G. E. and J. W. Deardorff (1974) : *A laboratory model of the unstable planetary boundary layer*. J. Atmos. Sci., 31, 1297—1307.
  - 22) Heidt, F. D. (1977) : *The growth of the mixed layer in a stratified fluid due to penetrative convection*. Boundary-Layer Meteorol., 12, 439—461.
  - 23) Deardorff, J. W. (1974) : *Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a*

- heated planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **7**, 81—106.
- 24) Andre, J. C., G. De Moor, P. Lacarrere, G. Therry and R. Du Vachat (1978) : Modeling the 24-hour evolution of the mean and turbulent structures of the planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1861—1883.
- 25) Sun, W.-Y. and Y. Ogura (1980) : Modeling the evolution of the convective planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1558—1572.
- 26) Stull, R. B. (1976) : The energetics of entrainment across a density interface. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1260—1267.
- 27) Artaz, M.-A. and J.-C. Andre (1980) : Similarity studies of entrainment in convective mixed layers. *Boundary-Layer Meteorol.*, **19**, 41—66.
- 28) Dubosclard, G. (1980) : A comparison between observed and predicted values for the entrainment coefficient in the planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **18**, 473—483.
- 29) Garret, A. J. (1981) : Comparison of observed mixed-layer depths to model estimates using observed temperature and winds, and MOS forecasts. *J. Appl. Meteorol.*, **20**, 1277—1283.
- 30) Caughey, S. J. and J. C. Kaimal (1977) : Vertical heat flux in the convective boundary layer. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, **103**, 811—814.
- 31) Yamamoto, S., M. Gamo and O. Yokoyama (1972) : Airborne measurements of turbulent heat flux. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **55**, 533—545.

## II-6

### 自動車排出ガスに含まれるエアロゾルの拡散に関するレーザーレーダー観測

笹野泰弘<sup>1</sup>・杉本伸夫<sup>1</sup>・松井一郎<sup>2</sup>・清水 浩<sup>1</sup>

竹内延夫<sup>1</sup>・功刀正行<sup>3</sup>・溝口次夫<sup>3</sup>

#### Diffusion of Aerosols in the Exhaust Gases Observed by Laser Radar

Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>, Nobuo SUGIMOTO<sup>1</sup>, Ichiro MATSUI<sup>2</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>1</sup>,  
Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup>, Masayuki KUNUGI<sup>3</sup> and Tsuguo MIZOGUCHI<sup>3</sup>.

#### 要 旨

この報告では、ミー散乱レーザーレーダーを用いた道路からの自動車排出ガスの拡散パターンの観測について述べている。道路に対して直角で、水平(地上高3.5m)に向けたレーザーレーダーで連続観測(空間分解能1.5m, 時間分解能0.5秒)を行ったところ、風下方向に輸送されるエアロゾルの高濃度の時間変化パターンがとらえられた。この高濃度域は、信号間隔周期で決まる自動車の交通流の間欠性に一致して現れる。エアロゾルに限らず、その他の排出ガス成分も瞬間的な濃度は長時間の平均濃度に比べて、数倍、高濃度となることが予想される。反応・拡散シミュレーションモデルの作成等において、交通流の間欠性を考慮することが必要である。

#### Abstract

A Mie laser radar was used for observing diffusion of exhaust gases from motorcars running on a straight road over a flat terrain. Pointing the laser radar horizontally to the road at a right angle, time-range distribution patterns of aerosol concentration were obtained, which showed downwind transport of aerosols. This aerosol distribution pattern reflects the traffic flow intervals which is controlled by traffic lights at the intersections. Because of the intermittency, instantaneous concentrations of exhaust gases, including aerosols, are possibly some times higher than those averaged over long time. It is necessary to take into account the traffic intermittency when constructing models for simulating diffusion and reaction processes of exhaust

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, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
The National Institute for Environmental Studies, Engineering Division.
3. 国立公害研究所 計測技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
The National Institute for Environmental Studies, Chemistry and Physics Division.

gases.

## 1. はじめに

自動車から排出されるガス成分等による道路周辺での汚染のメカニズムの解明、モデリングを推進するためには、拡散・反応等を含む汚染現象の正確な把握が必要である。しかし、従来から行われてきた計測方法は、主としてポイントサンプリングであり、また、時間的にも分解能が低い場合が多い。このため、測定値の空間代表性や、サンプリング（平均化）時間と平均値の関係など、解明すべき問題も多く残されている。

一方、拡散反応のモデリングにおいて、計算時間の節約のために、定常連続線源拡散モデルに反応モデルを組み込むことが行われている<sup>1)</sup>。このとき、反応モデルを簡略化するために、反応係数をパラメータ化する必要がある。例えば、NO、O<sub>3</sub>の濃度に対して、ある時間で平均化された濃度を用いる場合、平均量に対する反応係数の導入が必要になる。実際には、信号間隔周期に対応して交通流は間欠的であり、道路端での濃度は、高濃度、低濃度が交互に現れるため、平均濃度は平均化時間に依存し、また、反応係数のパラメータ化においては信号周期間隔も考慮することが、本来、必要である。しかし、これまでのところ、高時間分解能、空間分解能での計測の困難さのために、これらの問題に対する検討が十分に加えられていないのが現状である。

そこで、本研究では、ミー散乱レーザーレーダーを用いたエアロゾルの拡散の観測により、排出ガス量の間欠性と、その拡散状況の把握を試みた。レーザーレーダーは、距離分解能 1.5 m、時間分解能 1 秒以下という高分解性をもって、エアロゾルの分布パターンの測定が可能であり、他の測定器で得ることのできない情報が収集できるという特長を持っている。

## 2. 観測

### 2.1 対象道路の選定

レーザーレーダーによる道路からの自動車排出ガス拡散の観測においては、単純化された条件を設定するため、対象道路としては平坦な地形上の直線道路とし、道路の周辺に高層建築物等の少ない場所を選ぶ必要がある。さらに、排出ガス拡散パターンの把握が容易に行えるように排出ガス中のエアロゾル濃度が十分に高い交通量の多い道路とする。

また、今回のレーザーレーダー観測では道路から直角方向への排出エアロゾルの拡散を調べる。このため、道路に対して直角方向にある程度の見通しのきく空間が広がっていることが必要である。これらの条件を考慮して選定した対象道路は、図 1 に示すように、幅が約 36 m、片側 3 車線（合計 6 車線）、中央に約 15 m の幅の分離帯を持つ。これに対して、ほぼ直角に建設中の道路があり、見通しが良い。周辺は、2 階建て以下の建物が散在するのみである。

この道路の日中の交通量は 3000~4000 台/h である。交通流パターンの一例として、図 2 に交通量調査の結果を示している。



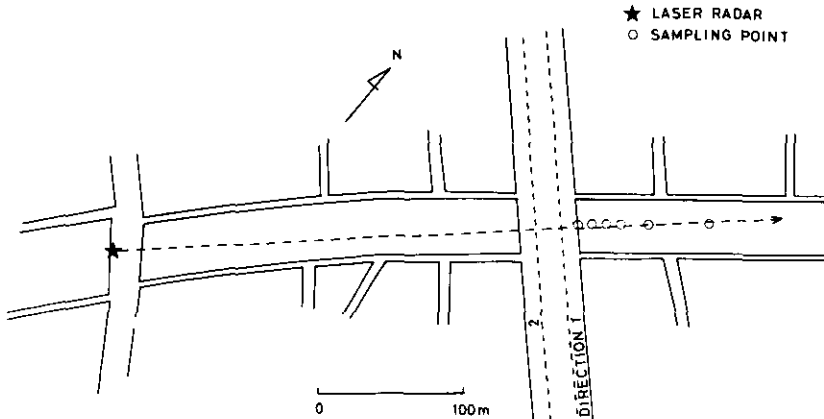


図1 観測地点周辺の地図

星印はレーザーレーダーを搭載した計測車の設置場所。破線の方角に向けて観測を行った。○印は、バッグサンプリングの場所で、道路端から、0 m、10 m、20 m、30 m、50 m、90 m の距離に位置する。

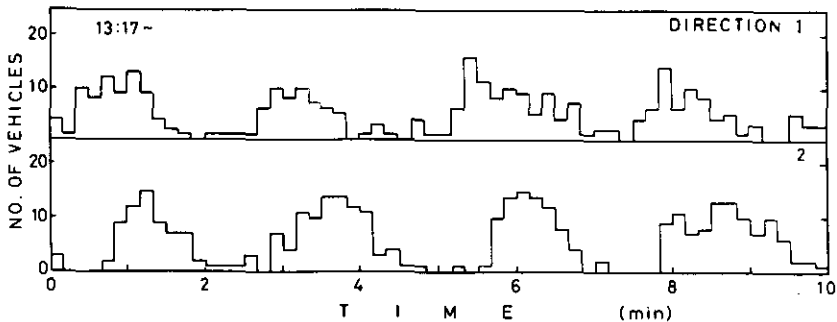


図2 交通量（走行台数）調査の結果

10秒ごとの走行台数を上下車線に分けて示している。

## 2.2 観測方法

レーザーレーダー<sup>2)</sup>は計測車に搭載して図1に示した地点に設置し、地上高3.5mの高さで水平かつ、図中の矢印の方角に向けて測定を行った。

レーザーの発振繰り返し周波数は20パルス/sで、連続的にデータの収集を行った。レーザーレーダーデータは、10パルス分の受信信号の積算をしてから磁気テープに収録した。なお、測定にかかるパラメータは表1に示した。レーザーレーダー観測に合わせて、計測車の屋根に立てたポールに取り付けた風向・風速計（地上高5m）により、風向風速の連続測定を行い、ペンレコーダーに記

録した。また、全天日射計により、日射量の測定を行った。

表1 レーザーレーダー測定にかかるパラメータ

ワード数	1000
ディレイ	-500
サンプリング幅	10 ns (1.5 m に相当)
方向	対象道路に直角, 水平
積算数	10 パルス
発振繰り返し	20 パルス/s

自動車排出ガスについては、道路端から風下方向へサンプリング点を6点(図1)展開し、サンプリングバッグに空気を採集し、計測車内に用意したNO<sub>x</sub>計、CO計により、NO、NO<sub>2</sub>、COの濃度を求めた(約3分の吸引空気試料を分析した)。

レーザーレーダー観測は1981年7月21日、13時15分から約2時間連続して行った。この日の天気は、12時から13時頃まではよく晴れていて日射は強かったが、13時すぎから曇り始め、雨は降らなかったものの一面が雲に覆われた。風向は13時15分までは南東から南南東よりで対象道路に平行に近かったが、それ以後は南西に変わり、対象道路に直角に吹いた。風速は3~5 m/sであり、15時前後にやや弱くなった。図3に風向・風速の連続記録を示す。なお、本報告では、風が対象道路に対して、ほぼ直角に吹いていた14時以降の観測結果を示す。

### 3. レーザーレーダーデータ処理について

#### 3.1 レーザーレーダー方程式

パルスごとに対応するレーザーレーダー受信信号は次のレーザーレーダー方程式で表される。

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

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

ここで、 $P(R)$ は距離 $R$ からの受信信号パワー、 $K$ はシステムの効率定数、 $P_0$ はレーザー出力、 $\beta(R)$ はエアロゾルなどによる体積後方散乱係数、 $T(R)$ は光の透過率、 $P_B$ は背景光雑音パワー、 $\alpha$ は光の消散係数である。

データ処理は最終的には $\beta$ の空間分布を求めることが目的となるが、ここでは $\beta$ の相対的な分布を考えることとし、 $K\beta(R)$ を求める。また、測定対象の距離範囲が狭いので、透過率は $T(R) = 1$ と置くことができる。

背景光の大きさは、種々の条件により変化するので、通常は遠方からの受信信号の平均値を用いて決定することが多いが、今回の観測では遠方に歩道橋等の障害物があるため、この方法で背景光レベルを決めることが難しい。そこで、レーザー発振前に相当する受信信号レベルを用いて背景光

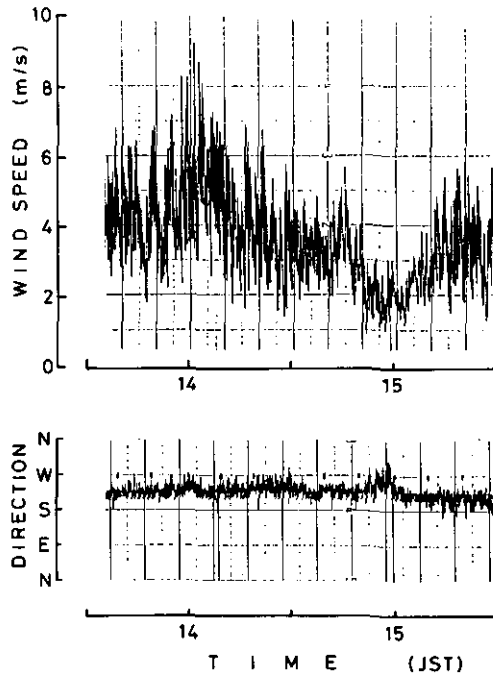


図3 計測車屋上に設置した風向風速計の連続観測記録

パワーとした。

### 3.2 自動車反射信号

今回のレーザーレーダー観測で問題となるのは、地上高 3.5 m で水平方向にレーザーパルスを出してレーザー光の通過する光路上のエアロゾル分布を得ようとしているために、時として自動車本体からの反射光が信号として混入するという点にある。このとき、自動車反射信号及び、その遠方側の信号は異常値となり使用できない。信号処理の過程で、時間的・空間的な平均化操作をすることがあるが、それ以前に、これらの異常値の除去を行う必要がある。

自動車反射信号の発見と除去は、データ処理をすべて大型電算機で行うことを考慮すると、異常値の検出としてソフト的になされるのが望ましい。ここでは、次の方法によった。

一般に、自動車からの散乱光はエアロゾルなどからの散乱光に比べると非常に強く、また、自動車反射信号の現れる位置は、レーザーレーダーから 300 m ~ 350 m の範囲に限られている。そこで、自動車反射信号の現れない範囲におけるエアロゾルによる信号強度の平均値と変動の大きさ、 $\bar{S}$ 、 $\sigma$  を求めておき、次式で定義される  $T$  値、

$$T_i = |S_i - \bar{S}| / \sigma$$

の値が、300 m～350 m の範囲で、一定のしきい値を越えるならば、これを自動車の反射信号とみなして、異常値として、以後の処理からは除外することとした。なお、ここで

$$S_i = \{P(R_i) - P_B\} R_i$$

であり、 $\bar{S}$ 、 $\sigma$  は  $S_i$  の平均値、標準偏差である。判定の基準となるしきい値は、ここでは経験的に決定し、10 と置いた。

### 3.3 レーザーパワーの変動の規格化

レーザーレーダー方程式から明らかなように、レーザー出力パワーの大きさが変動すると、受信信号もこれに対応して変動する。この影響を少なくする為に、ここでは、上で定義した  $\bar{S}$  の大きさがレーザーパルスによらず一定となるよう受信信号の大きさを規格化した。

以上に述べた方法により、レーザーレーダーデータはエアロゾルによる体積後方散乱係数に比例する量、 $K\beta(R)$  に換算される。これ以後、この量をエアロゾル濃度と呼ぶことにする。

今回のレーザーレーダー観測によれば、道路に直角な直線上のエアロゾル濃度の時間変化がとらえられる。距離方向の分解精度は 1.5 m、時間方向には 0.5 秒ごとのデータが時間・空間の 2 次元パターンデータとして得られることになる。このパターンデータは画像として表示される<sup>3)</sup>。

## 4. 結果と考察

### 4.1 交通流パターン

3 節で述べたレーザーレーダーデータ処理において、自動車反射信号の除去を行わないと、自動車の車体からの反射光の信号があたかもエアロゾル高濃度であるかのような形に混入した濃度分布の時間変化画像が得られる。その一例を図 4 として示した。ここで、横軸は観測時刻で左から右へ時間が進行しており、図の範囲は 6 分間に相当する。また、縦軸はレーザーレーダーからの距離に対応し、ここでは 250 m から 400 m の範囲が出力されている。これによると、300 m～350 m くらいの範囲に上り車線（右側）、下り車線（左側）に対応する自動車群からの反射信号が明りょうに現れている。また、この図から信号周期は約 2.5 分であることが分かる。これは、図 2 に示された交通量の実測データとも一致する。

エアロゾルの拡散パターンの把握には、自動車反射信号は雑音となるので、3 節の方法で除去する。レーザーレーダー信号は 0.5 秒ずつ（10 パルスずつ）平均してから磁気テープに収録している。したがって、この間に自動車からの強い反射信号があるとき、0.5 秒間に相当する欠測になる。以下に示すエアロゾル拡散パターンの画像データでは、時間の分解能を 3 秒として描いている。このとき、欠測値が 3 秒以上続く場合には、図では点線で示されている。

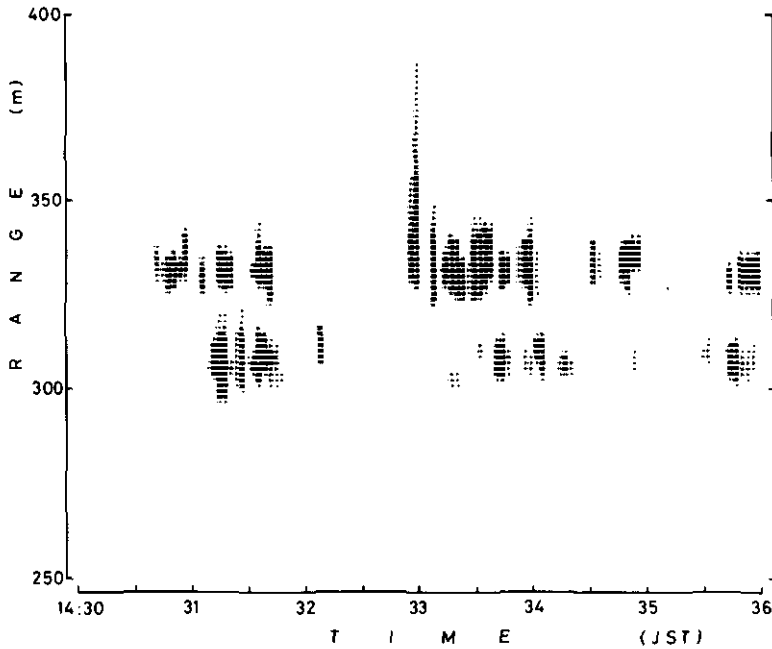


図4 レーザーレーダーデータに見いだせる自動車からの反射信号の例

#### 4.2 拡散パターン

自動車反射信号が除去された、エアロゾル濃度の空間・時間の2次元パターンは、レーザーパルス光路上のエアロゾル濃度プロファイルの時間変化を表している。図5は、その一例で、図4と同様に横軸は時間（6分間）、縦軸はレーザーレーダーからの距離（250 m から 400 m）に相当する。また、図5は図4と同一の時間帯であり、図4に示された交通流（自動車群の通過）に伴うエアロゾル高濃度の出現が見られる。

この図で代表されるように、自動車から排出されるエアロゾルの拡散パターンは、当然のことながら自動車交通流（信号間隔）に大きく支配されている。したがって道路沿道におけるエアロゾル濃度は自動車流の周期に応じて変化する。また、CO、NO<sub>x</sub>等の排出ガス成分についても同様と考えられる。このように、信号間隔によって支配される交通流の間欠性があるとき、これを連続定常線源とみなして平均濃度で扱おうとすることは、現実と大きくはずれる。特に、全交通量の他に信号間隔、すなわち交通流の間欠性に依存して、平均濃度レベルが決まってくるため、この間欠性を無視したモデルでは、統一的な記述は難しい。

自動車流に対応した高濃度域の出現率を調べてみる。風上側をバックグラウンドの濃度レベルと考え、ここでの濃度の平均的な変動の大きさを $\sigma$ とすると、道路付近での平均のエアロゾル濃度は1

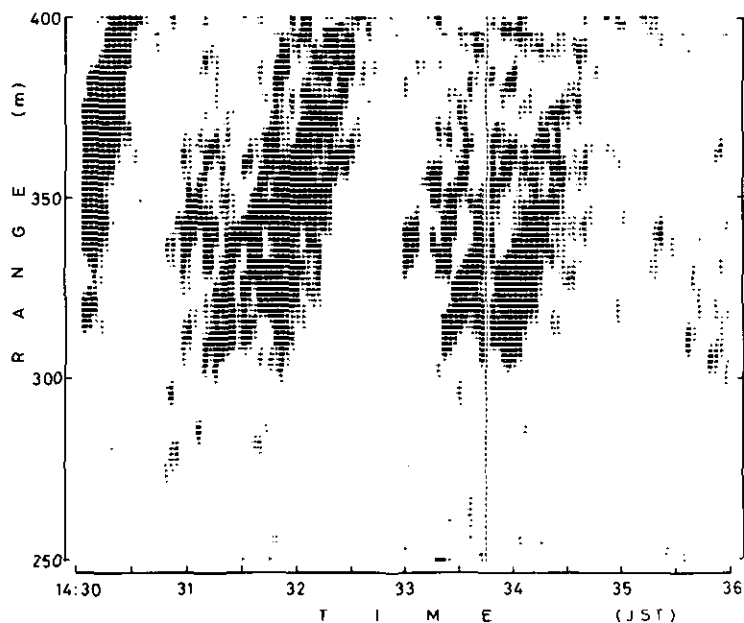


図5 エアロゾル濃度の時間・空間変化パターンの例  
自動車反射信号は除去されている。出力範囲は図4と同じである。

～2 $\sigma$ 程度となっている。これに対して風下側(300 m～400 m 範囲)でエアロゾル濃度が4 $\sigma$ を超えるような高濃度の出現率は、全部の観測時間を平均すると13%、3 $\sigma$ を超えるのは20%となり、短い時間の中に、高濃度が出現していることがわかる。

ところで、図5に示されているように、高濃度部分の右上がりのパターンは、高濃度部分が風によって風下側へ運ばれている状況を表している。したがって、このとき、拡散パターンの傾きからエアロゾルの輸送される平均的な速度を見積もることができる。図5と同様に画像出力されたエアロゾル拡散パターンの顕著なものについて、そのパターンの傾きから求めた輸送速度を図6に示した。同図で○印は計測車の地点(地上5 m)における平均風速を図3のチャートから読み取って示している。

エアロゾル拡散パターンから求めた輸送速度は、風速計の値の約半分になっているが、時間変化の傾向は一致している。風速と輸送速度の違いの大きな理由は、測定高度が、5 mと3.5 mで違うこと、風上側と風下側とで条件が違う(自動車群の影響を受ける)こと、測定の方法が違うことなどが考えられる。

図7に、バックサンプリングで測定されたNO<sub>x</sub>(NO+NO<sub>2</sub>)とCOの濃度について、風下距離に対して描いている。これによると道路端では例えばNO<sub>x</sub>は150～200 ppbで、バックグラウンド値を差

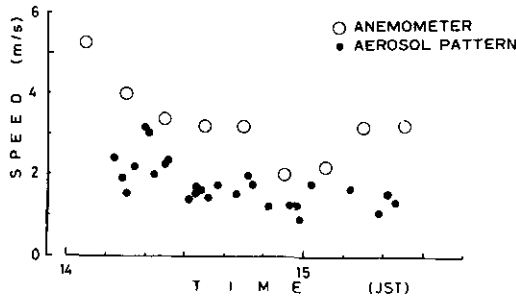


図6 エアロゾル濃度の時間・空間変化パターンから見積もられた輸送濃度（・印）と風速計から測定された平均風速の比較

し引くと、50~100 ppbを示している。しかし、これはバックサンプリングによる平均値であって、エアロゾルの分布パターンにみられるような間欠性を考慮すると、交通流に対応して、この3~5倍程度の高濃度が出現していると考えられる。これと類似の現象は例えば、溝口<sup>4)</sup>による化学発光法によるNO<sub>x</sub>、定電位解法によるCOの道路端における連続測定においても見いだされている。

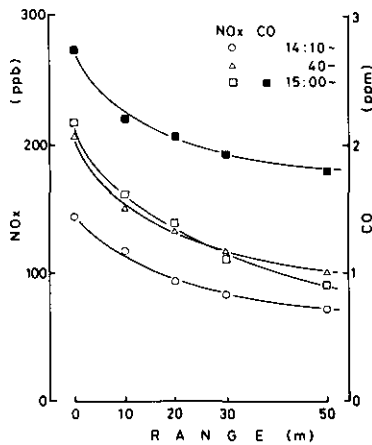


図7 バックサンプリングにより求めたNO<sub>x</sub>、COの濃度分布

### 5. まとめ

本論文では、レーザーレーダーを用いたエアロゾル分布の時間連続測定により、道路からの自動車排ガス拡散の実態把握の試みについて述べた。これによると、高い空間分解、時間分解能をもってエアロゾルの拡散状況の測定が可能であり、自動車交通流に対応した間欠的な高濃度の出現の様子がとらえることができた。このように、レーザーレーダー観測は、自動車排ガスの反応拡散モデルの精密化、道路近傍における急性の濃度影響の検討などにおいて、他の方法では得られない情

報を提供できるものと考えられる。

#### 謝 辞

本観測の実施に当たり、計測技術部分析室の皆様のご協力を頂いたので、ここに記して感謝の意を表します。

#### 引 用 文 献

- 1) 環境庁 (1982) : 窒素酸化物総量規制マニュアル。
- 2) Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980) : A mobile computerized laser radar system for observing rapid varying meteorological phenomena. *Opt. Quantum Electron.*, **12**, 159—167.
- 3) 笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1982) : レーザーレーダー画像データの処理・表示法の開発。国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 224—227.
- 4) 溝口次夫 (1981) : 道路近傍の自動車排出ガスの挙動と測定。京都大学環境衛生工学研究会第 3 回シンポジウム講演論文集, 224—227.



## II-7

### NO<sub>2</sub>の分光特性と遠隔計測への応用上の問題点

杉本伸夫<sup>1</sup>

#### Spectroscopic Properties of NO<sub>2</sub> in Visible Region and Application to Remote Measurements

Nobuo SUGIMOTO<sup>1</sup>

##### 要 旨

NO<sub>2</sub>の分光学的性質について概説し、本研究所で行ったNO<sub>2</sub>の可視域の吸収帯の解析、及び radiative lifetime の測定について報告する。また、吸収、けい光など分光的性質を用いたNO<sub>2</sub>の遠隔計測への応用において、吸収スペクトルの複雑さ、吸収係数の温度依存性、けい光のクエンチングなどから生じる問題点を具体的に考察する。

##### Abstract

Spectroscopic properties of NO<sub>2</sub> were studied. Several absorption bands of NO<sub>2</sub> in blue region (<sup>2</sup>B<sub>1</sub>-<sup>2</sup>A<sub>1</sub>, <sup>2</sup>B<sub>2</sub>-<sup>2</sup>A<sub>1</sub>) were rotationally and vibrationally analyzed by means of time gated excitation spectrum and fluorescence spectrum. Also the radiative lifetimes of these identified levels were measured. The absorption and fluorescence properties of NO<sub>2</sub> are discussed in connection with the application to differential absorption lidar and fluorescence lidar.

##### 1. はじめに

NO<sub>2</sub>は重要な大気汚染物質の一つとして、その濃度分布の立体的な測定が望まれている。地上付近では、NO<sub>2</sub>はそれ自体有害物質である他、光化学スモッグの原因物質として重要である。また成層圏では、NO<sub>x</sub>によるオゾンの消滅過程においてNO<sub>2</sub>は触媒的な役割を果たすため、この過程の大きさを知る上でその濃度測定が重要である。

本論文では、差分吸収レーザーレーダー、けい光法レーザーレーダーなどにより、いろいろな条件下でNO<sub>2</sub>を遠隔計測する際に必要となるNO<sub>2</sub>の分光特性に関する研究と応用上の問題点について報告する。NO<sub>2</sub>はその分光学的性質が非常に複雑で、可視域のスペクトルに関係する励起状態の

---

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,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

構造、緩和の動力学などについて現在でもまだ十分に理解されていない。第2節では、これまでに行われてきたNO<sub>2</sub>の分光学的研究の概要を述べ、3節では筆者らが行った可視域の吸収帯の振動、回転の解析について述べる。第4節では、遠隔計測への応用上の問題点について考察する。

## 2. NO<sub>2</sub>の分光学的研究の概要

NO<sub>2</sub>は3原子分子であるにもかかわらず、その分光学的性質は極めて複雑である。これまで、NO<sub>2</sub>の分光学的性質について注目されてきたことは、1.吸収スペクトルが非常に複雑であること、2.けい光スペクトルに連続的な構造 (continuum) が見られること、3.けい光寿命 (radiative lifetime) が異常に長いこと、4. Hanle 効果で求めた coherence lifetime が radiative lifetime と異なること、などである<sup>1)</sup>。以下に、これらについて行われてきた研究について簡単に述べる。

NO<sub>2</sub>は、低エネルギー域に四つの電子状態 (<sup>2</sup>A<sub>1</sub>, <sup>2</sup>B<sub>2</sub>, <sup>2</sup>B<sub>1</sub>, <sup>2</sup>A<sub>2</sub>) を持ち、可視域における吸収は、<sup>2</sup>B<sub>1</sub>→<sup>2</sup>A<sub>1</sub>, <sup>2</sup>B<sub>2</sub>→<sup>2</sup>A<sub>1</sub>の二つの遷移から成る。これらの遷移は、同じ波長帯に重なっている上、<sup>2</sup>B<sub>1</sub>, <sup>2</sup>B<sub>2</sub>はそれぞれ<sup>2</sup>A<sub>2</sub>, <sup>2</sup>A<sub>1</sub>により摂動されており、吸収スペクトルは極めて複雑である。図1にNO<sub>2</sub>のポテンシャル曲線を示す。また、表1にそれぞれの電子状態にある分子の分子定数を示す。

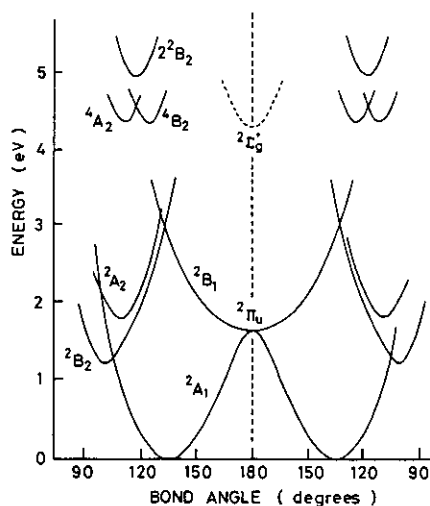


図1 NO<sub>2</sub>のポテンシャル関数  
Gillispie らから引用<sup>2)</sup>。

図1、表1は Gillispie らによって行われた理論計算<sup>2)</sup>によるものである。基底状態については microwave の実験や、レーザー励起けい光スペクトルの測定により実験的にかなり正確に分子定数が求められているが、励起状態についてはまだ不明確な点が多い。図2にNO<sub>2</sub>の低分解能の吸収スペクトルを示す。吸収スペクトルは、多数の吸収帯が重なって、ほとんど連続的に見える。高分解

表1 Ab initio の計算による NO<sub>2</sub>の分子定数  
Gillispie ら (1975) による。

State	Te(ev)	Re(A)	$\theta_e$ (deg)	$\omega_1$ (cm <sup>-1</sup> )	$\omega_2$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_e$ (D)
$\tilde{C}^2A_2$	1.84	1.27	110	1360	798	0.05
$\tilde{B}^2B_1$	1.66	1.20	180	1192	960	0.00
$\tilde{A}^2B_2$	1.18	1.26	102	1461	739	0.46
$\tilde{X}^2A_1$	0.00	1.20	134	1351	758	0.37

能吸収スペクトルでは回転構造が分解されるが、多数のバンドが重なっており、解析は困難である。これまでに遷移が同定されているのは、Douglas と Huber によって回転の解析が行われた三つの<sup>2</sup>B<sub>1</sub>バンド(Douglas—Huber バンドと呼ばれる)と、Stevens—Zare や Brand らによって解析されたバンドオリジンに近いいくつかの<sup>2</sup>B<sub>2</sub>バンドと、その他、Ar レーザー、He—Cd レーザーなどに同調した遷移のみで、これらは可視域のスペクトルのごく一部分にすぎない。

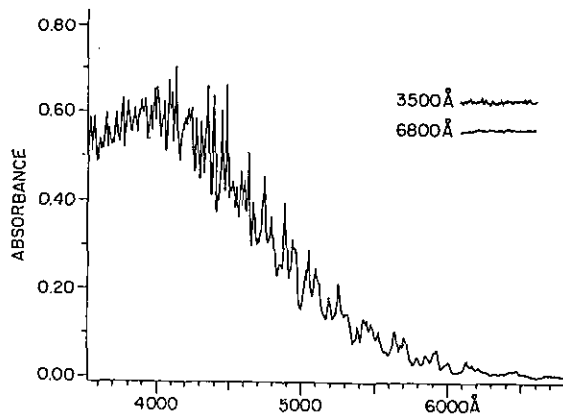


図2 NO<sub>2</sub>の低分解能吸収スペクトル  
文献1による。

<sup>2</sup>B<sub>1</sub>状態は最初 Douglas と Huber によって電子状態が同定され、青色—紫外域の三つのバンドの回転の解析が行われた<sup>3)</sup>。後に Hardwick と Brand によってこれらのバンドの振動の帰属が行われた<sup>4)</sup>。<sup>2</sup>B<sub>1</sub>バンドは<sup>2</sup>B<sub>2</sub>に比べると比較的規則性の良いふるまいをしている。しかしながら、これまで回転の解析が行われたバンドはいずれも励起状態の回転量子数  $K'$  が 0 である。 $K' > 0$  の遷移は He—Cd レーザーに同調した吸収線が観測されているのみである<sup>5)</sup>。

一方、<sup>2</sup>B<sub>2</sub>状態については、Stevens—Zare<sup>6)</sup>によっていくつかのバンドの回転の解析が行われた。さらに、Smalley らによる超音速分子ビームを用いた励起スペクトルの測定<sup>7)</sup>などにより、振電遷移

のバンドオリジン及び ${}^2A_1$ 状態による摂動の様子が明らかにされてきた。 ${}^2B_2$ 状態の振電遷移は、その波長が本来あるべき位置からずれているほか、強いバンドの回りに多数のサテライトバンドが見られる。このことは、 ${}^2B_2$ 状態と、 ${}^2A_1$ の高位の振動レベル( $\nu_3$ モードの奇数の量子数を持つ振動レベル)とのレベルミキシングによって半定量的に理解されている<sup>8)</sup>。

$NO_2$ のけい光スペクトルにおいては、基底状態の振動準位へのバンドの構造に重なって、連続的な構造 (continuum) が見られる。図3に時間分解けい光スペクトルを示す<sup>9)</sup>。図に見られるように continuum の decay はバンドの decay より遅く、また励起波長からの波長シフトが大きいほど遅くなっている。このことは、continuum が励起状態の緩和の機構と関係していることを示す。励起状態の緩和の機構については、Donnelly ら<sup>10)</sup>によって次のようなモデルが提案されている。すなわち、まず励起状態から基底状態の高位の振動準位へエネルギー移動が起こり、その後、基底状態の振動準位間でステップ的な緩和が起こるというモデルである。これまでに得られたけい光 decay の実験結果はこのモデルで定性的に説明できる。

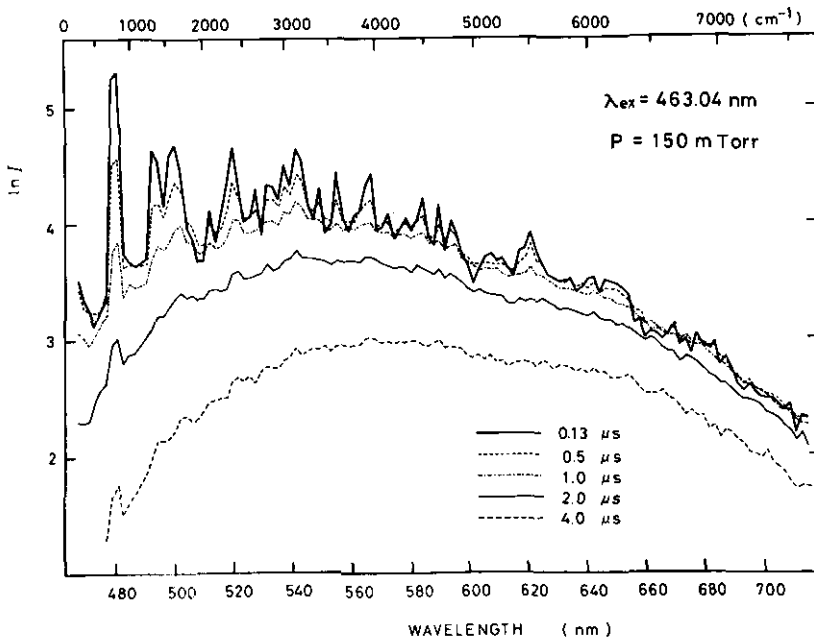


図3 時間分解けい光スペクトル

一方  $NO_2$  は、けい光寿命が異常に長いということでも古くから注目されてきた<sup>11)</sup>。実験的に得られた  $NO_2$  のけい光寿命は、吸収係数から見積もった値 (数  $\mu s$ ) に比べて一けた以上も長い。この現象もやはり、励起状態と基底状態 ( ${}^2A_1$ ) の高位の振動レベルのレベルミキシングによると考えられている。

最近、Hanle の効果 (磁場によるけい光の depolarization) の測定で求めた coherence lifetime

( $\tau_c$ )が同じ励起準位の radiative lifetime より約一けた短いことが見いだされた<sup>12)</sup>。Hanle 効果で得られた  $\tau_c$ が吸収係数から見積もったけい光寿命と同程度であるため、レベルミキシングの機構と関係があるのではないかというようなことも考えられたようであるが<sup>1)</sup>、納得のいく説明はいまだなされていない。

次節では、本研究所において行った NO<sub>2</sub>の分光学的研究について述べる。

### 3. NO<sub>2</sub>けい光励起スペクトルの解析とけい光寿命の測定

#### 3.1 時間分解けい光励起スペクトルの解析

前章で述べたように、NO<sub>2</sub>の吸収スペクトルは非常に複雑であるが、筆者らはけい光励起スペクトルを特定のけい光バンドをモニターして測定することにより、スペクトルを単純化して解析を行った。吸収スペクトルには、<sup>2</sup>B<sub>1</sub>—<sup>2</sup>A<sub>1</sub>、<sup>2</sup>B<sub>2</sub>—<sup>2</sup>A<sub>1</sub>の遷移が寄与しているが、それらの励起状態からのけい光スペクトルは Frank—Condon ファクターの違いにより異なった構造を持っている。例えば、<sup>2</sup>B<sub>1</sub>からのけい光は、 $\nu_2$ バンドが強く、<sup>2</sup>B<sub>2</sub>では  $\nu_1$ バンドが強い。したがって、適当なけい光バンドのみをモニターして励起スペクトルを測定することにより、<sup>2</sup>B<sub>1</sub>、<sup>2</sup>B<sub>2</sub>の寄与を分離することができる。このような方法で、新たに<sup>2</sup>B<sub>1</sub>の二つのバンド ( $\nu_2=6, 7$ ) と、<sup>2</sup>B<sub>2</sub>の二つのバンド (463.0, 474.0 nm)の回転の解析を行った。また、Douglas—Huber バンドについてもこの方法で回転量子数  $N$  の低い状態にアサインメントを拡張することができた<sup>13,14)</sup>。図4に、474.0 nm 付近の吸収スペクトルと  $3\nu_2$ 及び  $\nu_1$ バンドでモニターした励起スペクトルを示す。励起スペクトルは吸収スペクトルに比べて著しく単純化されている。 $3\nu_2$ でモニターしたスペクトルは<sup>2</sup>B<sub>1</sub>の寄与が大きく、図に示したようにアサインできる (<sup>2</sup>B<sub>1</sub>,  $\nu'_2=7, K'=0$ )。一方  $\nu_1$ でモニターしたものは<sup>2</sup>B<sub>2</sub>の寄与が大きい。

同様の方法で<sup>2</sup>B<sub>1</sub>  $\nu'_2=6, 8, 9$ の解析を行った (図5, 6)。

基底状態のエネルギーレベルを、回転定数 ( $A''=8.0012, B''=0.4343, C''=0.4098, D''_1=2.812 \times 10^{-7}, D''_{JK}=1.904 \times 10^{-5}, D''_K=2.516 \times 10^{-3}, D''_1=3.089 \times 10^{-8}, D''_2=1.036 \times 10^{-6}, D''_3=1.316 \times 10^{-9} \text{cm}^{-1}$ ) を用いて計算し、測定された遷移エネルギーに加えて励起状態の term value を求めた。これより次式を用いて、バンドオリジン及び回転定数  $B_v, D_v$  を求めた。

$$T(N') = \nu_0 + \bar{B}'N'(N'+1) - D'N'^2(N'+1)^2$$

<sup>2</sup>B<sub>1</sub>の四つのバンドについて得られたバンドオリジンと回転定数を表2に示す。また、 $B_v$ を  $v=0$  に外挿した  $B_0$ より、<sup>2</sup>B<sub>1</sub>状態の N—O 結合距離 ( $r_0$ )が求められる(図7)。Douglas—Huber による  $\bar{B}_{12}$ 、Brandら<sup>15)</sup>による  $\bar{B}_0$ も表2中に記した。これらの  $B_v$ の値から最小2乗法により  $\bar{B}_0=0.370 \text{cm}^{-1}$ が得られた。これは  $r_0=1.19 \text{\AA}$ に対応する。Hardwick—Brand<sup>9)</sup>は  $r_0=1.23 \text{\AA}$ を報告しているが、この違いは  $\bar{B}_8, \bar{B}_9$ の評価の違いによっている。これらのバンドについては筆者らの方が  $N'$ の低いレベルまで解析に含めているので、より正確であると考えられる。筆者らの値は Gillispie らによる ab initio の計算値  $1.2 \text{\AA}$ に近い。また、筆者らの値は基底状態の結合距離の実験値  $1.195 \text{\AA}$ に非常に近

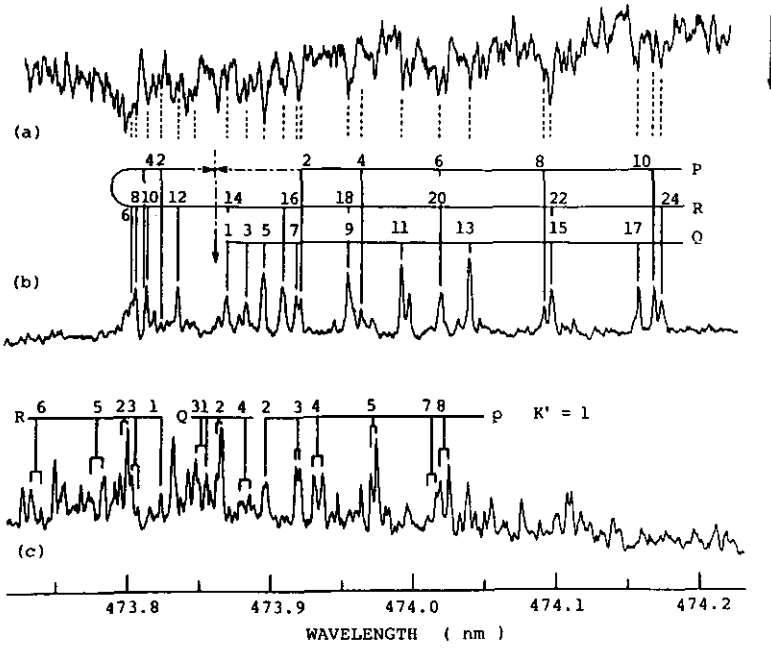


図4 474 nm 付近における透過スペクトルと、 $3\nu_2$ 及び $\nu_1$ でモニターした励起スペクトル  
 $\text{NO}_2$ : 100 mTorr, Time gate: 0-0.5  $\mu\text{s}$  (励起スペクトル)。

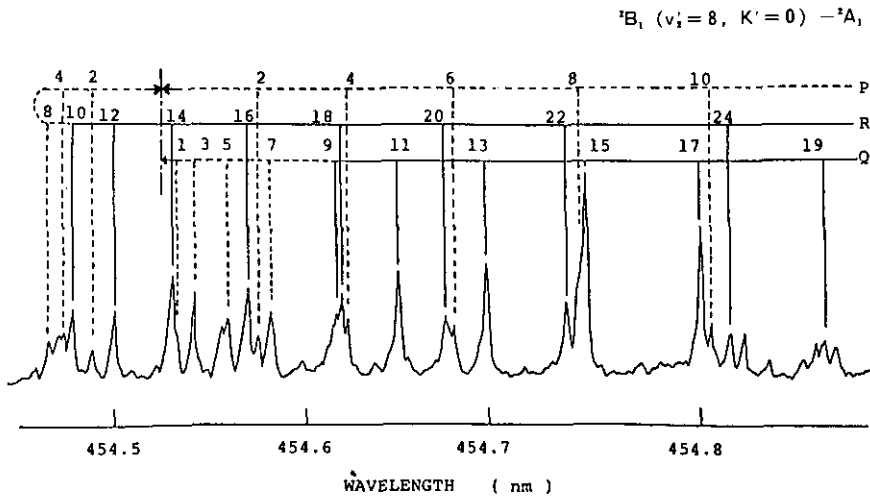


図5 454.5 nm 付近における $3\nu_2$ でモニターした励起スペクトル  
 $\text{NO}_2$ : 100 mTorr, Time gate: 0-0.5  $\mu\text{s}$ 。

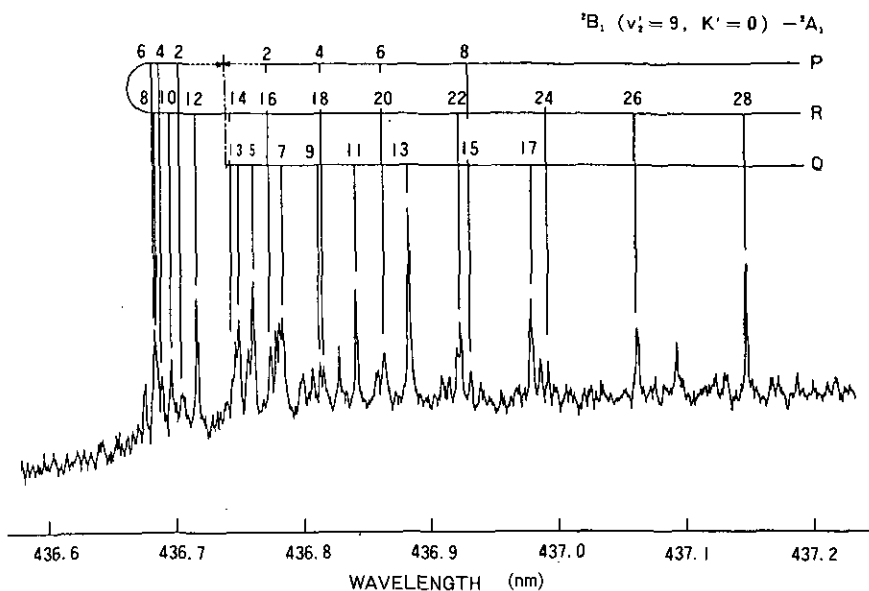


図6 436.9 nm 付近における  $2\nu_2$  でモニターした励起スペクトル  
 NO<sub>2</sub> ; 100 mTorr, Time gate : 0 - 0.5  $\mu$ s.

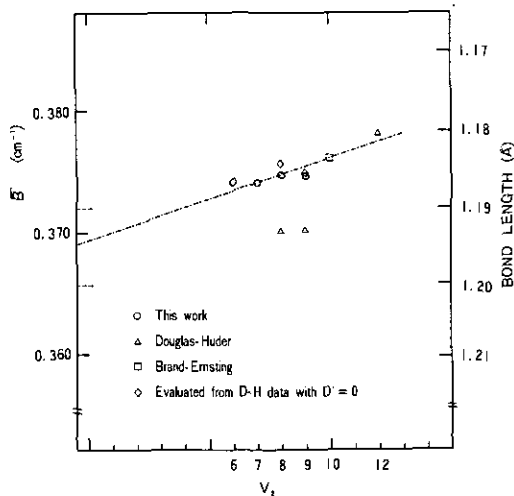


図7 回転定数  $\bar{B}$  の  $\nu_2$  依存性

表2 解析された ${}^2B_1$ 状態 ( $K=0$ ) のバンドオリジンと回転定数  $\bar{B}=(1/2)(B+C)$ 

$V_2$	$\nu_0$ (cm $^{-1}$ )	$\bar{B}$ (cm $^{-1}$ )
6	20 205.0	0.3741
7	21 104.4	0.3740
8	22 001.9	0.3746
	22 002.5*	0.370*
9	22 898.0	0.3745
	22 898.1*	0.370*
10	23 791.**	0.376**
12	25 574.0*	0.378*

\* Douglas-Huber (1965) <sup>3)</sup>\*\* Brant Ernsting (1982) <sup>15)</sup>

く、これは ${}^2B_1$ ,  ${}^2A_1$ が直線分子の ${}^2\Pi_v$ 状態から Renner-Teller 効果によって生じていることを考えると妥当である (表1 参照)。一方、 ${}^2B_2-{}^2A_1$ バンドについては図4に示した474.0 nm バンドの他に、463.0 nm のバンドを解析した。図8に463.0 nm 付近の吸収スペクトルと $\nu_2$ 及び $\nu_1$ でモニターした励起スペクトルを示す。 $\nu_2$ で測定した励起スペクトルの主なラインについては、高分離能けい光スペクトルを測定し、電子状態及び回転量子数  $N'$  の同定を行った。高分解能けい光スペクトルは、P, R-line が強く Q-line は小さい。したがって、励起電子状態は ${}^2B_2$ であることがわかる。また、P, R-line のエネルギー間隔から励起状態の  $N'$  が求められる。このバンドは、励起スペクトルの Q ブランチが見られず、また  $N'$  の偶数の線が見られないので  $K'$  は0である。一方  $\nu_1$  で観測されたスペクトルも ${}^2B_2-{}^2A_1$ バンドである。このバンドの励起状態はけい光スペクトルの強度分布が $\nu_2$ で観測された励起状態とは異なるので励起状態の異なる振動レベルに属すると考えられる。同様にして、474.0 nm 付近の ${}^2B_2$ バンドについても回転のアサインメントを行った。以上の解析で得られた回転定数を表3に示す。表に示した振動のアサインメントは Frank-Condon ファクターの計算から推定したものである。

表3 解析された ${}^2B_2$ 状態のバンドオリジンと回転定数  $\bar{B}=(1/2)(B+C)$ 

$(\nu_1, \nu_2, \nu_3)$	$\nu_0$ (cm $^{-1}$ )	$\bar{B}$ (cm $^{-1}$ )
(2, 12, 0) $K=1$	21 104.8	0.392
(3, 11, 0) $K=0$	21 591.6	0.415

### 3.2 けい光スペクトル及びけい光寿命

前項で解析を行ったバンドについて、低分解能けい光スペクトル及びけい光寿命の測定を行った。図9に474.0, 454.5, 436.9 nm で励起した ${}^2B_1$ の三つの振動準位からのけい光スペクトルの $\nu_2$



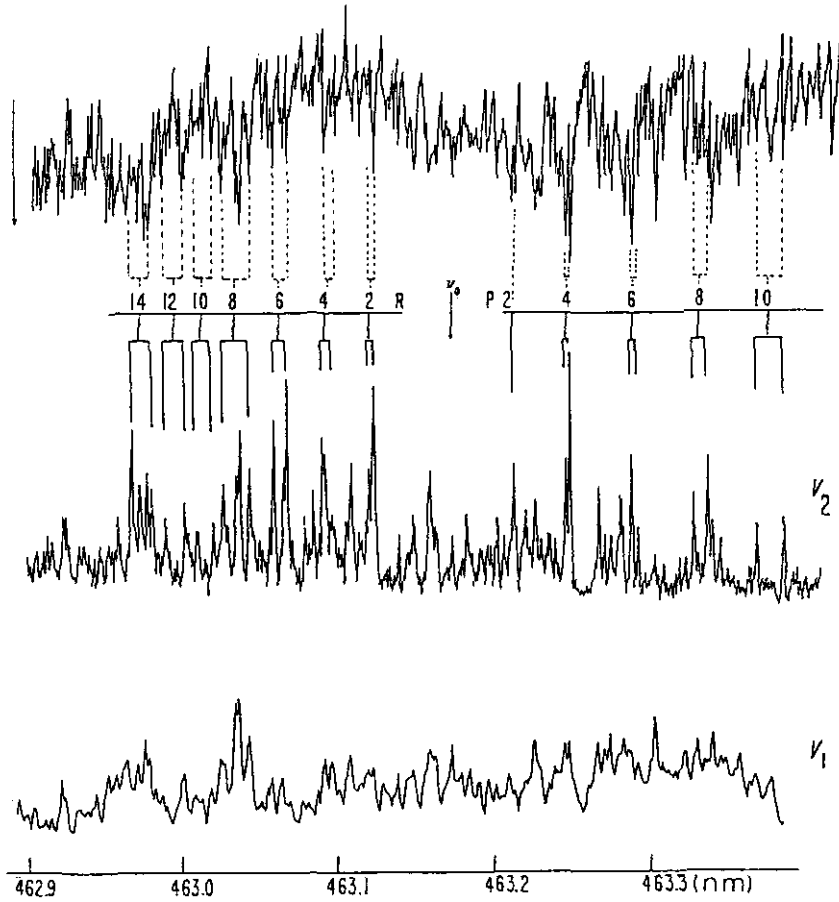


図8 463 nm 付近における透過スペクトルと、 $v_2$ 及び $v_1$ でモニターした励起スペクトル  
 NO<sub>2</sub> ; 100 mTorr, Time gate : 0-0.5  $\mu$ s (励起スペクトル)

progression の強度の測定結果を示す。図では、分光器の感度の補正を行い波数の4乗で割ってある。縦軸の単位はそれぞれ任意である。筆者らは、Renner-Teller の理論的取扱いでこのデータを再現することを試みた。その結果、Gillispie らによるポテンシャル関数に近い関数を用いて、図9のけい光強度を大体再現することができた。

けい光は biexponential な decay をする。このうち速い方の decay は励起された準位から基底状態の高振動レベルへのエネルギー移動、遅い方は基底状態の振動レベル間のステップ的な緩和によると思われる。したがって、速い方の decay time の圧力依存性を測定し、 $P=0$  に外挿すれば励起した準位の radiative lifetime が求められる。速い方の decay time に対する  $1/\tau-P$  plot は直線的であった。図10に  $v_2=6, 7, 8, 9$  の  $1/\tau-P$  plot を示す。表4に、実験で得た<sup>2</sup>B<sub>1</sub>の radiative

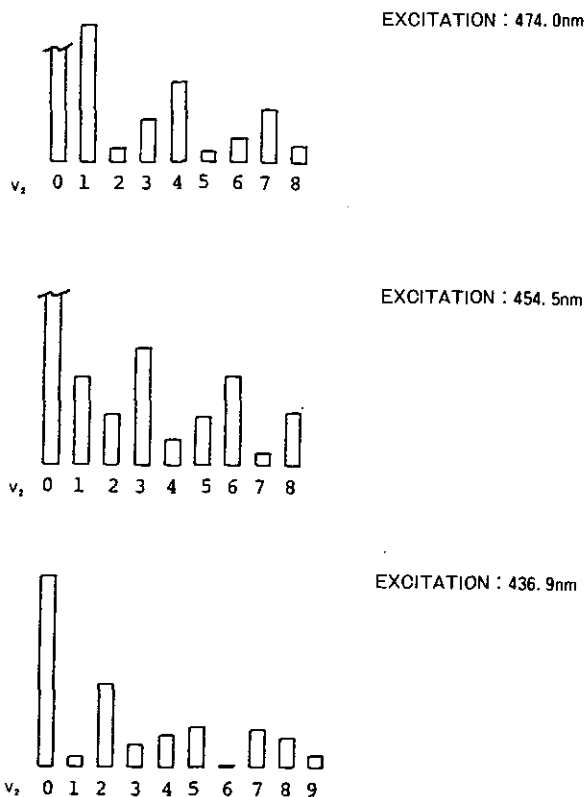


図9 474.0, 454.5, 436.9 nm で励起した<sup>2</sup>B<sub>1</sub>状態からのけい光スペクトルの  $u_2$  progression の相対強度

表4 <sup>2</sup>B<sub>1</sub>状態の radiative lifetime とエネルギー移動の係数

$\lambda_{ex}(nm)$	excited level	$\tau_0(\mu s)$	$k(Torr^{-1}s^{-1})$
494.9	$K=0, v_2=6, N=9$	$25 \pm 5$	$1.7 \times 10^7$
474.0	$v_2=7, N=13$	$34 \pm 4$	$2.0 \times 10^7$
454.5	$v_2=8, N=13$	$25 \pm 4$	$2.5 \times 10^7$
436.7	$v_2=9, N=13$	$40 \pm 10$	$2.2 \times 10^7$
420.5	$v_2=10$	$28 \pm 5$	

lifetime ( $\tau_0$ ) と速いクエンチングの係数を示す。図 11 に  $\tau_0$  を  $v_2$  の関数として plot した。一方、理論的に求めた遷移強度を用いて、これらのレベルの radiative lifetime を見積もったものを図 11 中に示した。理論的には、励起波長が短くなるに従って radiative lifetime が短くなる傾向を示すのに

対して、実験値はむしろ逆に短波長で多少長くなる傾向を示している。このことは、<sup>2</sup>B<sub>1</sub>は  $K=0$  でもなんらかの摂動を受けていて、短波長側で摂動が強いことを示している。

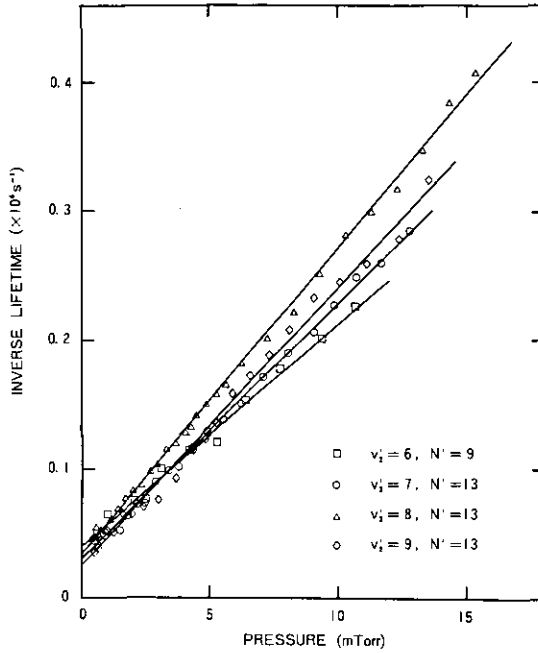


図 10 <sup>2</sup>B<sub>1</sub>状態  $v_2 = 6, 7, 8, 9$  の  $1/\tau - P$  plot

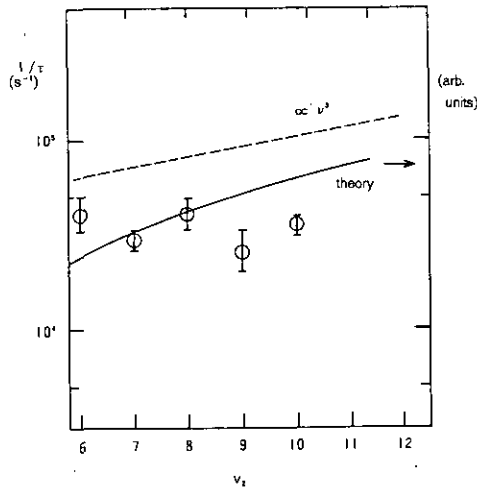


図 11 radiative lifetime の  $v_2$  依存性

一方、 ${}^2B_2$ 状態の三つのバンドについて行った  $\tau_0$  の測定結果を表 5 に示す。2 節で述べたように  ${}^2B_2$  は  ${}^2A_1$  の高振動準位によって摂動されており、けい光寿命は振動レベルによって  $\sim 30 \mu\text{s}$  から数  $100 \mu\text{s}$  の範囲にわたっている。ここで測定を行ったバンドはいずれも摂動の比較的小さい、すなわち吸収強度の大きいバンドである。

これまでに測定したいずれのバンドにおいても、以前に報告例のあった短い lifetime ( $0.3 \sim 3 \mu\text{s}$ ) を持つ準位は見いだされなかった。

表 5  ${}^2B_2$  状態の radiative lifetime とエネルギー移動の係数

$\lambda_{\text{ex}}$ (nm)	excited level	$\tau_0$ ( $\mu\text{s}$ )	$k$ ( $\text{Torr}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
593.4	$K=1, N=19$	$33 \pm 5$	$2.2 \times 10^7$
474.0	$K=1, N=4$	$39 \pm 5$	$2.1 \times 10^7$
463.0	$K=0, N=9$	$33 \pm 4$	$2.4 \times 10^7$

以上の研究により、 ${}^2B_1$  状態のポテンシャル関数については実験的にかなり明確にすることができた。今後、このような方法で  $K > 0$  の準位についても解析が拡張できるものと考えられる。一方、 ${}^2B_2$  状態についても吸収の大きなバンドすなわち摂動の小さなバンドの振動、回転の解析を行うことにより、ポテンシャルの概形を知ることができる。これにより、電子状態間の相互作用についてさらに詳細に理解できるであろう。

#### 4. 遠隔計測への応用

前節では  $\text{NO}_2$  の分光学的性質について基礎的な事項について述べた。本節では、 $\text{NO}_2$  を遠隔計測する手法と分光学的性質の関係について述べる。以下に差分吸収レーザーレーダー、けい光法レーザーレーダーについて、 $\text{NO}_2$  の分光特性から生じる問題点を論ずる。差分吸収レーザーの原理等については文献 16), 17) を参照されたい。

##### 4.1 差分吸収レーザーレーダーへの応用

###### 4.1.1 吸収スペクトルの圧力依存性とレーザー波長、波長幅の選択

図 2 に示したように  $\text{NO}_2$  は可視域  $\lambda < 600 \text{ nm}$  に吸収帯を持っている。差分吸収レーザーレーダーでは吸収線に同調した波長と、吸収の少ない近接した波長の 2 波長を必要とする。 $\text{NO}_2$  の場合は吸収線が非常に密に存在するために、一本の吸収線のみを選択して用いることはできない。図 12 に、 $463 \text{ nm}$  付近の高分解能吸収スペクトルを示す。分解能は  $0.05 \text{ cm}^{-1}$  である。図 12 の上図は真空中に  $\text{NO}_2$  を  $10 \text{ Torr}$  入れた場合、下図は  $\text{NO}_2$  を  $10 \text{ Torr}$  と窒素を  $752 \text{ Torr}$  入れ、合計で大気圧になっている場合である。真空中の  $\text{NO}_2$  の場合でも、吸収線が重なり合って連続的な back ground を持っていることがわかる。さらに大気圧になると、吸収線の衝突広がりにより、スペクトルは連続

的になっている。したがって、大気圧中の NO<sub>2</sub> の測定では、吸収線に同調した波長幅の狭いレーザーを用いる利点はあまりない。可視域ほぼ全域における大気圧中の NO<sub>2</sub> の高分解能吸収スペクトルは Wilkerson らによって測定されている<sup>18)</sup>。このデータを用いて表 6 に差分吸収測定に用いられる代表的な波長の吸収断面積を示す。波長幅に対する依存性は  $\Delta\nu < 1 \text{ cm}^{-1}$  ではほとんどない。

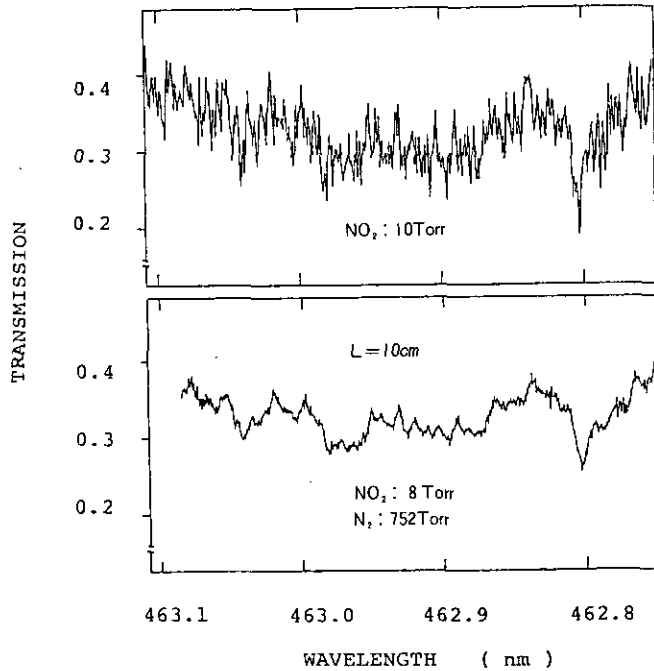


図 12 高分解能透過スペクトルの気圧依存性

表 6 差分吸収レーザーレーダーに用いられる代表的な波長における吸収断面積

波長 (nm)	吸収断面積 (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_a$ (cm <sup>2</sup> )
448.0	$7.02 \times 10^{-19}$	$3.43 \times 10^{-19}$
446.5	$3.59 \times 10^{-19}$	
447.9	$7.17 \times 10^{-19}$	
463.0	$5.18 \times 10^{-19}$	
465.7	$1.87 \times 10^{-19}$	$3.31 \times 10^{-19}$
488.0	$2.79 \times 10^{-19}$	
514.5	$1.59 \times 10^{-19}$	$1.20 \times 10^{-19}$

#### 4.1.2 吸収スペクトルの温度依存性

差分吸収法で排出源のモニターを行う場合など高温において  $\text{NO}_2$  を測定する場合には、吸収スペクトルの温度依存性が重要になる。一般に吸収係数の温度依存性は吸収線の line shape と基底状態の熱分布による依存性から成る。 $\text{NO}_2$  の場合のように吸収線が重なっている場合には、熱分布による依存性のみを考えればよい。一般には、遷移が同定されていれば温度依存性を計算できるが、 $\text{NO}_2$  の場合は多数の吸収線が重なっているため事情が異なる。また実際の測定では波長幅の広い光源を用いることも多い。

図 13 に差分吸収測定に用いられる波長における吸収の温度依存性を示す。波長分解能は 0.3 nm でこれはフラッシュランプ励起色素レーザーの波長幅を想定している。いずれの波長でも低温側で吸収が小さくなっているのは、セル中で  $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4$  の平衡が成り立っていて、低温で  $\text{N}_2\text{O}_4$  が増えるためである。通常の大気中では  $\text{NO}_2$  濃度が低いためほとんどが  $\text{NO}_2$  であると考えてよい。10 Torr のセルの場合、 $100^\circ\text{C}$  以上では 99.9% 以上が  $\text{NO}_2$  になっているので、 $100^\circ\text{C}$  以上の吸収の温度変化は、吸収係数の温度変化によると考えられる。分解能 0.3 nm で観測された吸収は実際には多数の回転振動電子遷移から成っており、それぞれの遷移が基底状態のエネルギーに応じて異なった温度依存性を持っている。図 13 の実線は、観測された吸収の基底状態のエネルギーが一つの値  $E_0$  で代表されると仮定し、分布関数が  $T_0/T \exp(-E_0/kT)$  で表されるとして実験値にフィットしたものである。フィットは  $100^\circ\text{C}$  以上で行った。大雑把に言えば、吸収の大きな波長では温度が上がると吸収は減る傾向にあり、吸収の小さい波長では逆に吸収の増える傾向にある。したがって、差分吸収測定では温度が高くなると濃度が低くなる方向に影響を受けることになる。図 13 の例では、 $100^\circ\text{C}$  の温度変化は差分吸収測定に対して、448 nm では約 2 割、463 nm では約 1 割の誤差をもたらす。排煙中など高温での測定では吸収係数の温度補正が必要である。 $\text{SO}_2$  に関する同様の考察は Marx<sup>19)</sup> によってなされている。

#### 4.2 けい光法レーザーレーダーへの応用

けい光法レーザーレーダーは成層圏  $\text{NO}_2$  の測定に有効であると考えられる。また、地上付近の測定でも高濃度の  $\text{NO}_2$  を高空間分解能で測定する必要がある場合には有効であろうと考えられる。地上付近の測定で困難な事は、エアロゾルがけい光を発するためこれと  $\text{NO}_2$  のけい光を分離する必要があることである。この点は、 $\text{NO}_2$  の吸収係数の異なる 2 波長の励起光を交互に用いることで解決される。それよりも重要なことは大気中ではクエンチングのため  $\text{NO}_2$  のけい光スペクトルが、数十 nm にわたる連続構造のみでバンド構造が見られなくなることである。これは 3 章で述べたように励起準位の radiative lifetime が 20–40  $\mu\text{s}$  と長いことと、励起された準位から基底状態の高振動準位への衝突によるエネルギー移動が非常に早く起こるためである。けい光の量子収率は全けい光を合わせれば 1 に近いが、けい光法レーザーレーダーの場合全波長を受光することは背景光の関係で

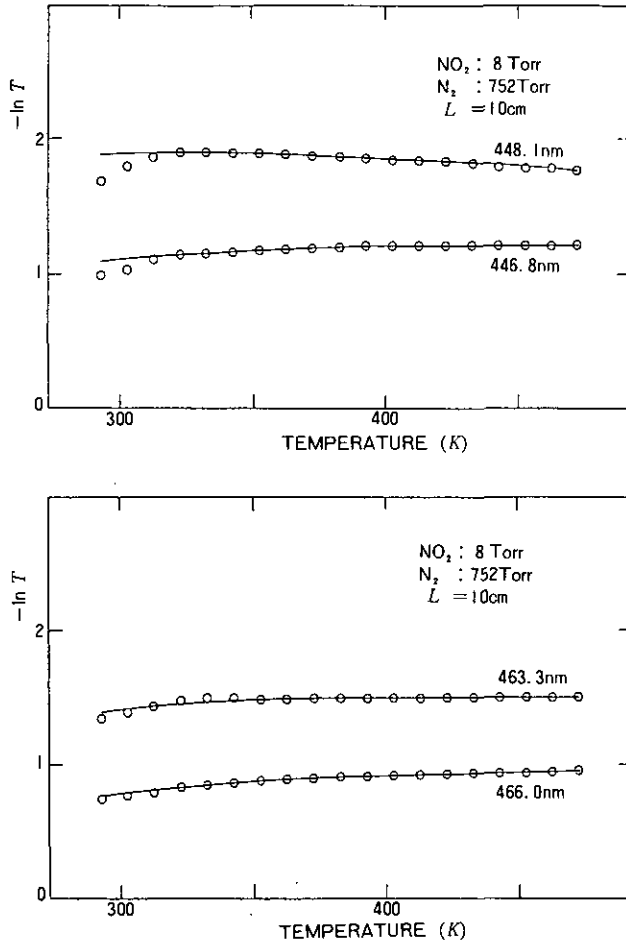


図 13 レーザーレーダーに用いられる波長における吸収の温度依存性

不可能である。したがって、けい光法レーザーレーダーでは背景光をどこまで押さえられるかということが重要なポイントになる。

全けい光断面積は次式のように表される。

$$(d\sigma_t/d\Omega) = 1/4 \pi \sigma_a \eta Q$$

ここに  $\sigma_a$  は吸収断面積、 $\eta$  は量子収率、 $Q$  は全けい光に対するクエンチングファクターである。 $Q$  は次式で表される。ここに  $\tau_0$  は励起状態の effective な radiative lifetime、 $k$  はクエンチング係数である。

$$Q = (1/\tau_0) / (1/\tau_0 + kP)$$

大気中の NO<sub>2</sub> について行った全けい光微分面積の測定値は励起波長 435 nm において  $1.3 \times 10^{-24}$

cm<sup>2</sup>/str であった。435 nm で  $\sigma_a = 5.4 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup> であるので、 $\eta = 1$  とすると  $Q = 3 \times 10^{-5}$  が得られた。 $\tau_0 = 30 \mu\text{s}$  とすると  $k = 1.46 \times 10^{-6}$  Torr<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> である。

次にこれらの値を用いて、地上ベースけい光法レーザーレーダーによる成層圏 NO<sub>2</sub> の測定の可能性を示す。評価に用いたパラメータを表 7 に示す。図 14 (a) の実線は、仮定した NO<sub>2</sub> のプロファイル、点線は観測される信号を示す。Q が高度依存性を持つのでプロファイルは変形している。図 14 (b) に測定誤差の評価の結果を示す。観測時間は 5 時間としている。一方、同じ出力のレーザーを用いて差分吸収測定を行う場合、20–40 km の全 NO<sub>2</sub> の測定に対しても誤差は 40% に達する。また、けい光法レーザーレーダーの場合、S/N は背景光で制限されているため、S/N はレーザー出力に比例して良くなる。この見積もりでは背景光として地上光の反射光などを考慮していないため、都市域における測定では S/N はさらに悪くなる。しかし、あと 10 倍程度はレーザーパワーを上げることも可能であるので測定の可能性は十分あると考えられる。

表 7 地上ベースけい光法レーザーレーダーによる成層圏 NO<sub>2</sub> 測定の評価に用いたパラメータ

大気モデル	U. S 標準大気, スケールハイトを仮定したエアロゾル分布 (地上の視程 10 km)。
NO <sub>2</sub> 分布	図 14-(a) の実線に示す。
NO <sub>2</sub> けい光	励起波長 435 nm, $\sigma_a = 5.4 \times 10^{-19}$ cm <sup>2</sup> , $\eta = 1$ , $\tau_0 = 30 \mu\text{s}$ , $k = 1.46 \times 10^{-6}$ Torr <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
レーザー光源	$\lambda = 435$ nm, 出力 20 mJ/pulse, 繰り返し 10 pps, パルス幅 10 ns。
受光系	望遠鏡直径 1.5 m, 視野角 0.5 mrad, 受光波長帯幅合計 40 nm で全けい光の 10% を受光できるものとする。受光系の効率 0.5, 光電子増倍管の量子効率 $\eta_{\text{PMT}} = 0.16$ 。
背景光	夜間の背景光強度 $3.8 \times 10^{-9}$ W/m str nm

## 5. おわりに

以上、NO<sub>2</sub> の分光特性について述べてきた。スペクトルの複雑さは遠隔計測への応用においても多少不利な材料を与える。しかしながら、大気低層の環境濃度の NO<sub>2</sub> の測定を対象とする差分吸収レーザーレーダーについて言えば、表 6 に示した波長の一つを用いて十分な測定が可能である。差分吸収レーザーレーダーの測定感度を理論的に見積もった例を図 15 に示す。用いたパラメータは表 8 に示した。図 15 の結果は、環境濃度の NO<sub>2</sub> の鉛直分布の測定などに十分な感度を示している。

一方、実際の差分吸収レーザーレーダーシステムの誤差を決めるもうひとつの重要なファクターとして 2 波長切り換え時間内のエアロゾル濃度の変動がある。筆者らは、2 波長測定の間隔と測定誤差の関係などについてレーザーレーダーデータを用いて検討を行ってきた。これらについては、別の論文で報告する予定である。



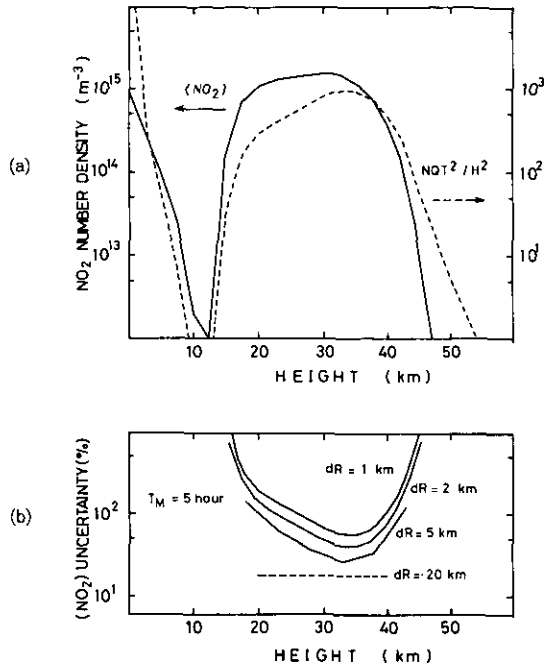


図 14 けい光法レーザーレーダーによる成層圏 NO<sub>2</sub>の測定の見積もり

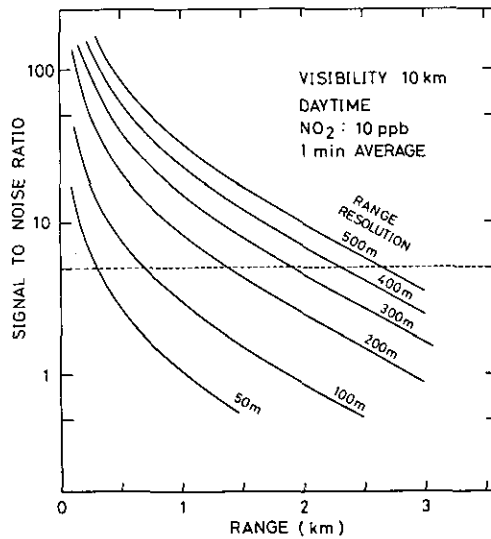


図 15 差分吸収レーザーレーダーによる NO<sub>2</sub>測定の見積もり

表 8 差分吸収レーザーレーダーによる NO<sub>2</sub> の  
測定の評価に用いたパラメータ

$\lambda_{on}, \sigma_{on}$	447.9 nm, $7.17 \times 10^{-23} \text{m}^2$
$\lambda_{off}, \sigma_{off}$	446.5 nm, $3.59 \times 10^{-23} \text{m}^2$
レーザー出力	20 mJ/pulse
パルス幅	10 ns
繰り返し	10 pps (pulses per s)
望遠鏡直径	50 cm
望遠鏡視野角	1 m rad
光学系の効率	0.2
PMT 量子効率	0.2
背景光強度	$8 \times 10^{-2} \text{W/m}^2 \text{ nm str}$

### 引用文献

- 1) Summerrized in the book : Hsu, D. K., D. L. Monts and R. N. Zare : Spectral Atlas of Nitrogen Dioxides, (Academic Press, New York, 1978).
- 2) Gillispie, G. D. and A. U. Khan (1975) : J. Chem. Phys., **65**, 1624—33.
- 3) Douglas, A. E. and K. P. Huber (1965) : Can. J. Phys., **43**, 74—81.
- 4) Hardwick, J. L. and J. C. D. Brand (1973) : Chem. Phys. Lett., **21**, 458—461.
- 5) Senum, G. I. and S. E. Schwartz (1977) : J. Mol. Spectrosc., **64**, 75—85.
- 6) Stevens, C. G. and R. N. Zare (1975) : J. Mol. Spectrosc., **56**, 167.
- 7) Smalley, R. E., L. Wharton and D. H. Levy (1975) : J. Chem. Phys., **63**, 4977.
- 8) Douglas, A. E. (1966) : J. Chem. Phys., **45**, 1007—15.
- 9) Sugimoto, N. S. Takezawa and N. Takeuchi (1983) : Jpn. J. Appl. Phys., **21**, 1536—38.
- 10) Donnelly, V. M., D. G. Keil and F. Kaufman (1979) : J. Chem. Phys., **71**, 659—73.
- 11) Neuberger, D. and A. B. F. Duncan (1954) : J. Chem. Phys., **22**, 1693—96.
- 12) H. Figger, D. L. Monts and R. N. Zare (1977) : J. Mol. Spectrosc., **68**, 388—98.
- 13) Takezawa, S. N. Sugimoto and N. Takeuchi (1983) : Chem. Phys. Lett., **97**, 77—80.
- 14) Sugimoto, N. S. Takezawa and N. Takeuchi (1983) : J. Mol. Spectrosc., **102**, 372
- 15) Brand, J. C. D. and N. P. Ernsting (1982) : J. Mol. Spectrosc., **91**, 389—403.
- 16) Hinkley, E. D. : Laser Monitoring of Atmosphere, (Springer Verlag 1976).
- 17) 杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫 (1981) : 応用物理, **50**, 923.
- 18) Wilkerson, T. D., B. Ercoli and F. S. Tomkins (1974) : University of Maryland Technical Note BN—748.
- 19) Marx, B. R., K. P. Birch, R. C. Felton, B. W. Jolliffe, W. R. C. Rowley and P. T. Woods (1980) : Opt. Commun., **33**, 287—91.

II-8

エントロピー評価基準と区分線形変換による  
レーザーレーダー画像の強調

宮本定明<sup>1</sup>・大井 紘<sup>2</sup>・内藤正明<sup>3</sup>・清水 明<sup>4</sup>

Enhancement of Laser Radar Images by a Class of Piecewise Linear  
Transformations of Gray Levels Based on an Entropy Criterion

Sadaaki MIYAMOTO<sup>1</sup>, Ko OI<sup>2</sup>, Masaaki NAITO<sup>3</sup> and Akira SHIMIZU<sup>4</sup>

要 旨

大気観測用レーザーレーダーの画像から、大気汚染の状態を観察するためには、濃度階調変換による画像強調が必要である。ヒストグラム平坦化のような従来の方法では、非線形の階調変換が行われる。ところが、レーザーレーダーなどの場合、画像に非線形性があると、異なった地点における濃度の比較などの判断が困難になる。この報告では、区分線形変換を用いて画像強調を行う方法を考察する。強調の問題はヒストグラムのエントロピー評価関数を最適化する問題として定式化される。制御変数は1変数あるいは2変数であるので、アルゴリズムは簡単になる。レーザーレーダー画像をこの方法によって処理し、ヒストグラム平坦化による結果と比較する。

Abstract

Images of laser radars for meteorological observations need enhancement by gray scale transformations to see the status of the air pollutions clearly. Existing methods of the enhancement such as the histogram flattening use nonlinear transformations. The laser radar images, however, prefer linear transformations, since the comparison

1. 昭和55～57年度 国立公害研究所客員研究員 (筑波大学電子・情報工学系 〒305 茨城県新治郡桜村)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies.  
Present Address: Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba, Sakura, Niihari, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
The National Institute for Environmental Studies,  
Environmental Information Division, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
3. 国立公害研究所 総合解析部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
The National Institute for Environmental Studies, Systems Analysis and Planning Division
4. 昭和56, 57年度 国立公害研究所客員研究員 (千葉工業大学経営工学科 〒275 千葉県習志野市)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies.  
Present Address: Department of Industrial Management,  
Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275, Japan.

of the pollution levels at different spots in an image is difficult in the presence of the nonlinearities. The present paper is concerned with an optimization method for the enhancement with a criterion of a histogram entropy in a class of piecewise linear transformations. The number of the control parameters is one or two, therefore the optimization requires no complicated algorithms. Two images by a laser radar are processed and the results are compared with those by the histogram flattening. Although the present method is developed for the laser radar images, it is applicable to many other pictures of the measurements in science and engineering.

### 1. はじめに

画像処理の一つの目的として、画像を解析するものにとってわかりやすい出力を与えるということがある。このため、しばしば、画像の強調という操作が行われる。画像のコントラストを高めるためのグレイ・スケール変換やヒストグラム変換は、これらの操作に含まれる。中でも、ヒストグラム平坦化は基本的な手法として、有用性が認められている。

ヒストグラム変換は、画素信号をいくつかの出力濃度レベルに量子化するとき、量子化のための閾値を不等間隔にすることによって、出力画像のヒストグラムの形状を変える手法である<sup>1,2)</sup>。特に出力画像のヒストグラムが一様分布をもつような変換をヒストグラム平坦化と呼ぶ。

ヒストグラム変換などの強調手法は、画像を見やすくする上で有効であるが、変換には非線形性を伴うため、しばしばその効果が減じられることがある。ことに、レーザーレーダー画像のような、計測の結果生じる画像は、専門家によって分析されるため、原信号に非線形の操作を加えることは、出力画像をゆがめ、特徴をかえってわかりにくくさせる原因となる。そのため、通常の計測画像の処理では、信号の、ある区間を出力濃度の最小値から最大値までに線形に対応させ、残りの区間は一定濃度で表すような区分線形変換を行う(図1実線部分)。この場合、線形に表示する区間は経験的に決められる。

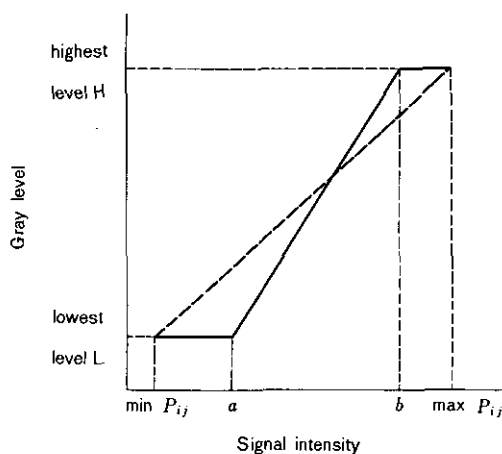


図1 入力信号から出力濃度レベルへの線形変換及び区分線形変換

本稿では、ヒストグラム変換による画像強調を考えるが、非線形性のもたらす欠点を考慮して、変換は、上に述べた区分線形変換に限定する。このとき、表示する区間を自動的に定めるため、強調の問題を最適化問題として定式化する。ヒストグラム平坦化が画像のエントロピーの最大化に対応していることから、最適化すべき評価関数として、エントロピーを採用する。

さらに、この方法をレーザーレーダー画像に適用し、もたらされる効果について述べる。

## 2. エントロピー最大化による画像強調

画素信号を画像として出力する場合、信号から出力画素濃度への対応を定めなければならない。この対応を図1のように表してみよう。今、画素の集合を  $\{(i, j), 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$  とし、入力画素信号強度を  $P_{ij}$  としよう。言い換えれば、入力信号は2次元配列  $(P_{ij}), 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$  で表される。

最も単純な変換は信号の最小値  $\min_{ij} P_{ij}$  を出力濃度の最小値  $L$  に対応させ、信号の最大値  $\max_{ij} P_{ij}$  を出力濃度の最大値  $H$  に対応させる線形変換 (図1の破線部分) であるが、このような変換では、有用な出力画像を得られないことが多いので、一般に、信号のある区間  $[a, b]$  を出力レベルに線形に対応させる区分線形変換がよく用いられる。このとき、区間を表すパラメータ  $a, b$  を決定する問題が生じる。従来の方法では、 $a, b$  は経験的に決められることが多い。

本稿では、レーザーレーダー画像に対する応用を主として、画像処理の手法を考察している。レーザーレーダーの場合、パラメータ  $a, b$  の決定に任意性、あるいは、様々な選択の可能性があることを考慮すると、次の問題が生じる。すなわち、何らかの基準に基づいて、パラメータ  $a, b$  を自動的に決定することはできないか？

ここで、ヒストグラム平坦化に立ち戻って考えてみよう。先に、平坦化は非線形変換を用いるため、有用でない、と述べたが、この方法のもっている最適性、すなわち、画像の情報量を最大にする性質<sup>2)</sup>はここでの考察にとって重要である。

問題を定式化するには、入力信号レベルが連続で、出力濃度レベルが離散的であると仮定するのがよい。今、入力信号が、上述の  $(P_{ij})$  で与えられるとし、一方、出力レベルを  $(1, 2, \dots, K)$  で表す。 $c = (c_1, c_2, \dots, c_{K-1})$  を、信号を出力レベルに対応させるための閾値の集合とする。すなわち、入力信号から出力レベルへの写像  $T$  は  $c_{k-1}$  と  $c_k$  の間にはいる信号をレベル  $k$  に移す：

$$T(P_{ij}) = \begin{cases} 1 & (P_{ij} < c_1) \\ k & (c_{k-1} \leq P_{ij} < c_k, k = 2, \dots, K-1) \\ K & (P_{ij} \geq c_{K-1}) \end{cases}$$

この変換によって得られた画像のヒストグラム<sup>1)</sup>を  $(h_1, h_2, \dots, h_K)$  としよう。 $h_k$  は出力レベル  $k$  をもつ画素の数である。ヒストグラムは閾値に依存するので、一般に、 $h_k = h_k(c)$  と表す。

そこで、 $c$  を制御変数とする最適化問題を考えよう。まず、許容制御の集合として、次の三つを考える。

(i) 単調変換

$$M = \{c \mid c_1 < c_2 < \dots < c_{k-1}\}$$

(ii) 両端以外一定間隔の閾値

$$M_1(a, b) = \{c \mid c_1 = a, c_{k-1} = b, c_2 - c_1 = c_3 - c_2 = \dots = c_{k-1} - c_{k-2} > 0\}$$

(iii) 片端以外一定間隔の閾値

$$M_2(a) = \{c \mid c_1 = a, c_2 - c_1 = c_3 - c_2 = \dots = c_{k-1} - c_{k-2} = \max_{ij} P_{ij} - c_{k-1} > 0\}$$

クラス  $M_1(a, b)$  に対応する変換が、図1の実線に対応しているのは明らかである。また、クラス  $M_2(a)$  は、図1において  $b$  が  $\max P_{ij}$  に一致している場合を表す。クラス  $M$  においては、各々の閾値  $c_k$  をほぼ独立に変化させることが可能であるが、 $M_1(a, b)$ 、 $M_2(a)$  の場合、動かせるパラメータはそれぞれ二つあるいは一つしかない。さらに、比較のために、図1の破線に対応する最も単純な等間隔のしきい値を次式で表しておく。

$$(0) \quad c_1 - \min_{ij} P_{ij} = c_2 - c_1 = \dots = c_9 - c_8 = \max_{ij} P_{ij} - c_9 > 0$$

式(0)ではしきい値  $c$  は一意に決まり、変換は行われぬ。

一方、評価関数はヒストグラムのエントロピー

$$H(c) = - \sum_{k=1}^K \frac{h_k(c)}{h} \log \frac{h_k(c)}{h}$$

である。ここで、 $h$  は画素の総数  $h = h_1 + \dots + h_k$  である。従来から、ヒストグラムのエントロピーは、画像を濃淡で表現したときの情報量に相当するとされている<sup>2)</sup>。

したがって、この評価関数  $H(c)$  に、先の許容制御の集合(i), (ii), (iii)を対応させれば、考察する最適化問題は次の3種類となる。

$$(1) \max_{c \in M} H(c)$$

$$(2) \max_{c \in M_1(a, b)} H(c)$$

$$(3) \max_{c \in M_2(a)} H(c)$$

(1)の解はヒストグラム平坦化にほかならない。エントロピーは  $h_1(c) = h_2(c) = \dots = h_k(c)$  のとき最大値をとるからである<sup>2)</sup>。(2)は、図1の実線で表した区分線形変換による情報量の最大化である。また、(3)は常に高濃度部分を線形に表すような変換に対応しており、大気汚染の観測に有効であると予想される。

### 3. レーザーレーダー画像への応用

次の二つの例は国立公害研究所の大型レーザーレーダー<sup>3)</sup>による水平画像に上の方法を適用したものである。画像に写し出されている様々な像についての説明は、ここでは省略する。

図2では10の出力レベルを用いて出力を行っている。ここでは、等間隔のレベル付け(0)によっている。



図2 10の出力レベルをもつ画像一例1 (等間隔レベル(0)による原画像)

図3, 図4はこれに, (2), (3)の最適化を行った結果を示す。最適化の方法は, 格子点の総当たり探索による。すなわち,  $M_1(a, b)$ の場合, 領域

$$\{(a, b) \mid \min P_{ij} < a < \max P_{ij}, \min P_{ij} < b < \max P_{ij}, a < b\}$$

を1辺  $l = (\max P_{ij} - \min P_{ij}) / 20$  の小正方形に分割し, 格子点上を探索した。 $M_2(a)$ の場合,  $\min P_{ij} < a < \max P_{ij}$ の区間を20等分した点を探索した。

図5はヒストグラム平坦化による結果である。図3の結果と図5の間には大きな違いは認められない。これに対して, 図4では, 高濃度部分の詳細が見えていて, 他の図にない特徴を持っている。

図6は, 図2とは異なる例を示している。この図では, しきい値(0)を用いているが, 特に図の下半分では, 濃淡の変化がほとんどみられない。

この図に, (2), (3)の最適化を行った結果を図7, 図8に示す。図8の結果から, この例では, 前例と違って, (3)の最適化はあまり有効であるようには思われない。

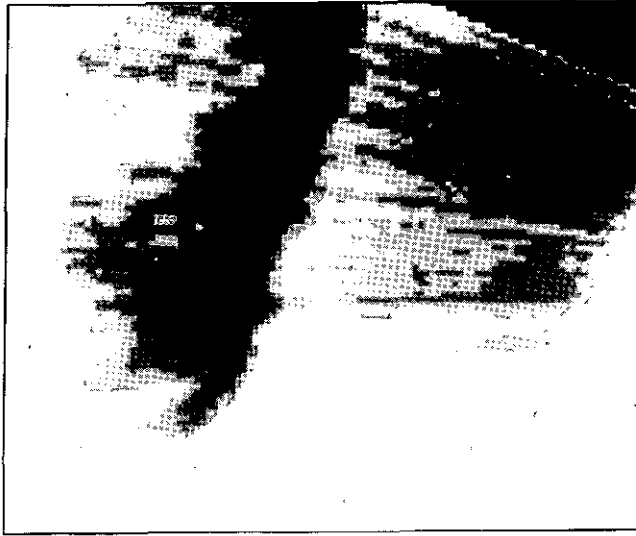


図3 例1に対し  $M_1(a, b)$  による最適化(2)を行った結果

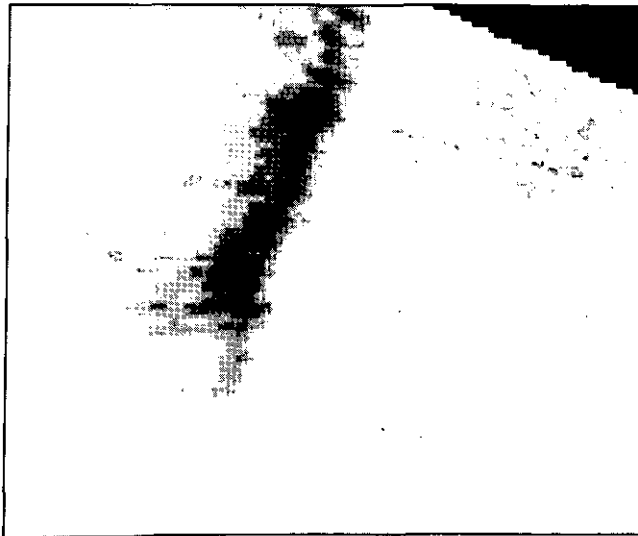


図4 例1に対し,  $M_2(a)$  による最適化(3)を行った結果





図5 例1に対し、ヒストグラム平坦化を行った結果

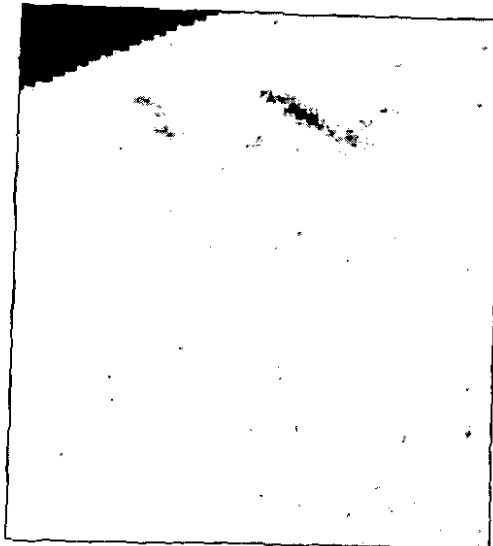


図6 等間隔レベルによる原画像一例2



図7 例2に対し,  $M_1(a, b)$ による最適化(2)を行った結果

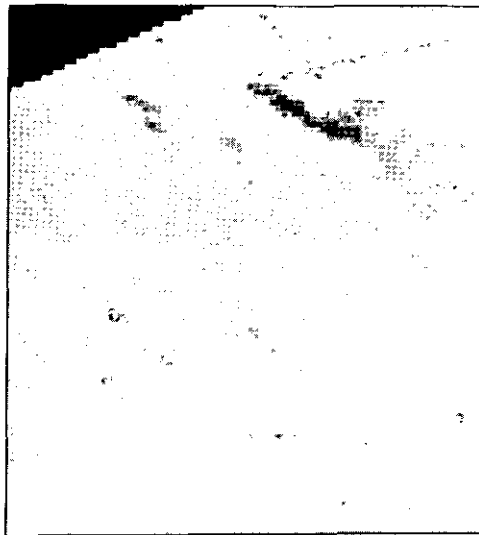


図8 例2に対し,  $M_2(a)$ による最適化(3)を行った結果



図9 例2に対し、ヒストグラム平坦化を行った結果

図9は、ヒストグラム平坦化の結果である。図7、図9を対照してみてもわかるように、この二つの例では、ヒストグラム平坦化と最適化(2)は見たところほとんど異ならない出力をもたらすといえる。このことから、区分線形変換を用いたエントロピー最大化は、レーザーレーダー画像の強調方法として、効果的であると考えられる。

#### 4. おわりに

要約すると、上述の方法は、次のような考察によって導き出されたといえる。

- (A) レーザーレーダー画像のような計測による画像では、区分線形変換が望ましい。
- (B) ヒストグラム平坦化の方法は、非線形変換のクラスにおいて、ヒストグラムのエントロピーを最大化する。
- (C) したがって、区分線形変換のクラスにおいて、エントロピー最大化を考える必要がある。

図1にみられる区分線形変換は、一般的であり、一方、最適化(2)、(3)は比較的簡単な処理を用いている。したがって、上述の方法は適用が簡単であり、応用範囲も広いと思われる。

計算は、すべて国立公害研究所の HITAC M 180 を用いた。ヒストグラム平坦化の際、SPIDER<sup>4)</sup>のサブルーチンを利用した。

#### 謝 辞

この研究をすすめるにあたって、適切な助言を預いた、国立公害研究所大気環境部竹内延夫博士、

笹野泰弘氏，中根英昭博士，同環境情報部安岡善文博士，宮崎忠国氏に謝意を表す。また，計算を手伝っていただいた山下昭彦氏，片垣寿也氏に感謝する。

#### 引用文献

- 1) 宮本定明・大井紘・内藤正明 (1983) : 大型レーザーレーダーによる画像の強調と雑音除去. 国立公害研究所研究報告, 第 39 号, 77-92.
- 2) Rosenfeld, A. and A. C. Kak (1982) : Digital Picture Processing. Academic Press, New York, 2nd ed.
- 3) 国立公害研究所 (1983) : 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究. 国立公害研究所研究報告, 第 39 号.
- 4) スパイダー作業グループ (1982) : 画像処理サブルーチン・パッケージ, SPIDER User's Manual. 協同システム開発, 東京.

II-9

レーザーレーダー大気汚染計測データの  
平滑化とこれに基づく測定局の最適化

甲斐沼美紀子<sup>1</sup>・内藤正明<sup>1</sup>

An Optimum Allocation of Air Monitoring Stations  
Based on Smoothed Laser Radar Data

Mikiko KAINUMA<sup>1</sup> and Masaaki NAITO<sup>1</sup>

要 旨

大気汚染観測局の適正配置について検討する場合、これまでは大気汚染濃度の2次元分布の真値は不明であり、通常各種の数学モデルを介して2次元分布を推定し、これを真値の代用としてきた。しかし、レーザーレーダーによりエアロゾルの2次元分布が直接計測されるようになったので、ここではまず、レーザーレーダーデータを用いたデータの平滑化と縮約について検討し、次に、分布パターンを最も良く再現できる測定点の組をComplex法により求めた。こうして求めた測定点の組は離散的な地上観測局の最適な配置に対応すると考えられる。

Abstract

It is so difficult to monitor the spatially distributed air pollution that mathematical models have usually been utilized to estimate it. Recently it has become possible to measure the spatial air pollution distribution by virtue of the remote sensing techniques.

This work is concerned with an optimum allocation of air monitoring stations in order to estimate the air pollution concentrations so as to minimize the residual sum of squares over an objective area. Firstly the data obtained by the laser radar are smoothed by a least squares fitting with a piecewise bicubic polynomial of class  $C^1$ . Then a nonlinear optimization method, so called the complex method, is applied to the smoothed data in order to find the optimum locations of air monitoring stations. It is found that once a laser radar data becomes available, an optimum allocation of sampling stations is readily evolved through the proposed method.

---

1. 国立公害研究所 総合解析部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町  
The National Institute for Environmental Studies, System Analysis and Planning Division, Yatabe,  
Tsukuba, Ibaraki 305

## 1. はじめに

最近、レーザーレーダーによる測定で大気汚染の空間分布を測定することが可能になってきた。このような画像データを基に種々の興味ある解析が可能になるが、その一つとして、測定点の配置を考えることができる。これまでは、大気汚染濃度の2次元分布の真値は不明であり、各種の数学モデルを介して2次元分布が推定されてきたが、レーザーレーダーによって実測データを用いて配置を考えることが可能になってきた。

ここではまず、レーザーレーダーデータの平滑化を行い、次に分布パターンを最も良く再現できる測定点の組をComplex法により求めた。

データ平滑化の方法はいくつか提案されており<sup>1,2)</sup>、大型レーザーレーダーにより得られた画像の質を向上させるためにも適用されてきた<sup>3)</sup>。本報では、画像に含まれるランダムな計測誤差の除去を目的とし、市田らの提案した区分的な関数を用いる方法を適用した<sup>4,5)</sup>。区分的な関数でデータを近似する場合には、平滑化の結果は節点の数と位置によって大きな影響を受けるが、ここでは、信号の2次微分を利用して節点の良い位置を求め、情報量基準AICを用いて節点の適切な数を決定している。また、この方法はデータの縮約にも有効である。次に、得られた分布パターンを基に、地上測定局の適正配置について検討した。

測定局の適正配置についてはこれまで内外で多くの検討がなされてきたが<sup>6)</sup>、既存の大気汚染測定網から取り除くことが可能である測定局を選定する方法や<sup>7)</sup>、新たに測定網の設定を目的とした種々の方法がある。ここではレーザーレーダーにより一度2次元分布が測定された領域で測定局の適正配置を求める方法を検討する。配置の最適性の評価関数として、実測値と推定値の差の2乗を用い、分布パターンを最も良く再現できる測定点の組をComplex法により求めた。2次元分布の推定値を有限の離散的なデータから求める方法には、荷重平均、多項式近似、三角形分割による平面近似、スプライン近似等<sup>8,9)</sup>があるが、本報では拡散方程式を有限要素法により解いて推定値とした。大気汚染分布を支配するのは拡散現象なので、この方法は他の非物理的な内挿方法より大気汚染濃度の分布の推定に適していると思われる。測定局の数が少ない場合高濃度地点に集中し、増設に当たっては順次濃度の低い所に向けて設置していくのが分布パターン再現という意味では望ましいという結果が得られたが、これは直感的にも妥当なものである。

## 2. データの平滑化と縮約

2次元分布するデータを平滑化し、その結果を縮約するために、地形のデータ処理等で利用されている区分的3次関数、すなわちB-スプラインを適用することの可能性と有効性について検討した。スプライン関数は多項式を何らかの連続条件を満たすように接続した区分的多項式であり、スプライン関数のつなぎ目を節点と呼ぶ。スプライン関数にはカーディナル・スプライン、直交スプライン等いくつかの表現があり、そのうちの一つであるB-スプラインには、数値的に安定に計算

できる特徴がある。

データは図1に示すように、 $(x, y)$  平面内の矩形領域  $R = [a, b] \times [c, d]$  上の格子点で与えられており、

$$\Phi_{tu} = \phi(x_t, y_u) + e_{tu} \quad (t = 1, \dots, K; u = 1, \dots, L) \quad (1)$$

と表せるものと仮定する。ここに  $\phi(x_t, y_u)$  は未知関数、 $\Phi_{tu}$  は測定値、 $e_{tu}$  は平均値が0で未知分散が  $\sigma^2$  の正規分布に従う誤差で、互いに独立であるとする。

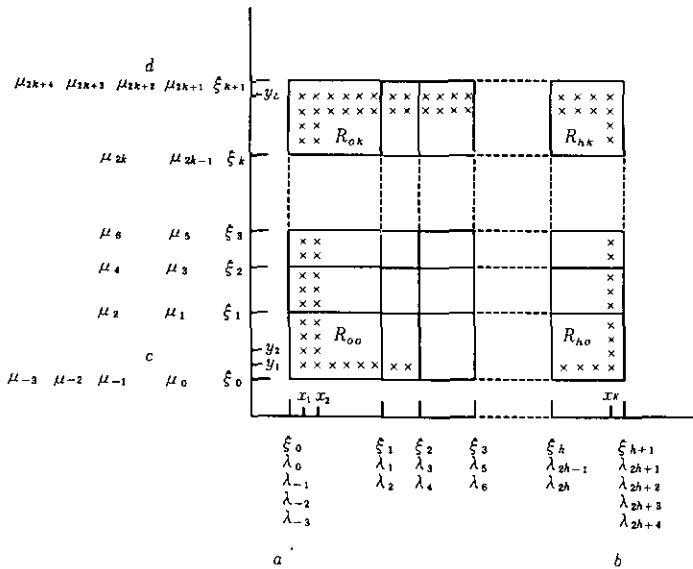


図1  $\xi_m, \eta_n$  ( $m = 0, \dots, h+1; n = 0, \dots, k+1$ ) によって  $R_{mn}$  に分けられた対象領域  $\lambda_i, \mu_j$  ( $i = -3, \dots, 2h+4; j = -3, \dots, 2k+4$ ) は節点。

図1に示すように、領域  $R$  を格子状の小領域  $R_{mn}$  ( $m = 0, 1, \dots, h; n = 0, 1, \dots, k$ ) に分けて、各小領域で別々の近似関数を用いる。ただし、近似関数を滑らかにするために小領域の継ぎ目で関数と1次微分を連続にする。この時、関数  $\phi(x_t, y_u)$  の近似関数は、

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^{2h+4} \sum_{j=1}^{2k+4} \gamma_{ij} M_i(x) N_j(y) \quad (2)$$

と表現される。ここに、 $M_i(x), N_j(y)$  は正規化された3次のB-スプラインであり、その係数  $\gamma_{ij}$  は次式で定義される残差の2乗和

$$Q = \sum_{t=1}^K \sum_{u=1}^L \{ S(x_t, y_u) - \Phi_{tu} \}^2 \quad (3)$$

を最小とするように与えられる。データ総数は  $KL$  であり、小領域の数が  $x$  軸方向に  $(h+1)$ 、 $y$  軸方向に  $(k+1)$  のとき、パラメータ  $y_{ij}$  の総数は  $(2h+4) \times (2k+4)$  となる。あてはめ基準として情報量基準  $AIC$  を採用すれば<sup>10)</sup>、

$$AIC = KL \log Q + 2(2h+4)(2k+4) \quad (4)$$

であり、 $AIC$  の値が最小となる分割がよい近似関数を与える。またこのとき、誤差分散の不偏分散推定量  $\delta$  は、

$$\delta = Q / \{ KL - (2h+4)(2k+4) \} \quad (5)$$

で与えられる。

画像に含まれている測定誤差の除去とデータ縮約にこの方法が有効であるかどうかを調べるため、この方法を大型レーザーレーダーで昭和57年2月8日に測定されたエアロゾル分布のデータに適用した。その結果、データが複雑な関数形をしていてもこの方法はデータの平滑化と縮約に有効であることがわかった。B-スプラインによる平滑化の結果の良否は節点の数と位置によって影響を受けるので、まず節点のよい数と位置を知るために、小領域の数を増加していった時の情報量基準の値を求めた。このときの変化を図2に示す。参考のため不偏分散推定量を同じグラフ上に示した。不偏分散推定量はパラメータ数の増加とともに単調に減少するが、情報量基準は小領域数を

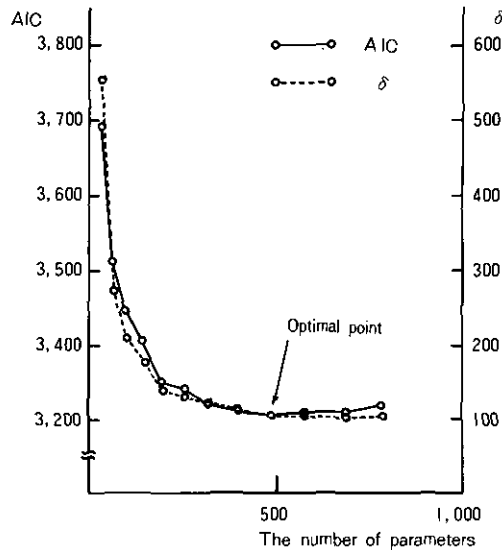


図2 パラメータ数が増加したときの情報量基準 (AIC) と不偏分散推定量 ( $\delta$ ) の変化



100 (10×10), すなわちパラメータ数を 484 としたとき最小となり, それ以上パラメータを増やすと再び増加するので, 484 が最適なパラメータ数と判明した。図 3(a)はオリジナルデータの等値線を, 図 3(b)は全体を四つの小領域に分けた時の等値線を, 図 3(c)は 25 の小領域に分けた時の等値線を,

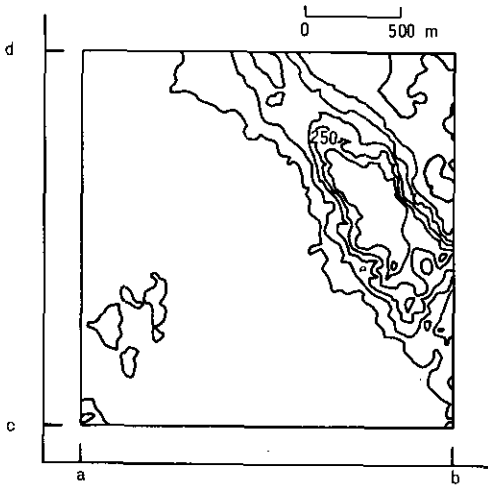


図 3(a) オリジナルデータの等値線図

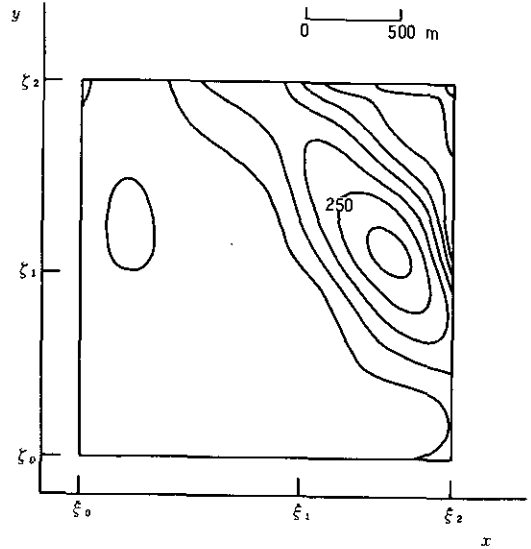


図 3(b) 対象領域を 4 領域に分割したときの平滑化結果

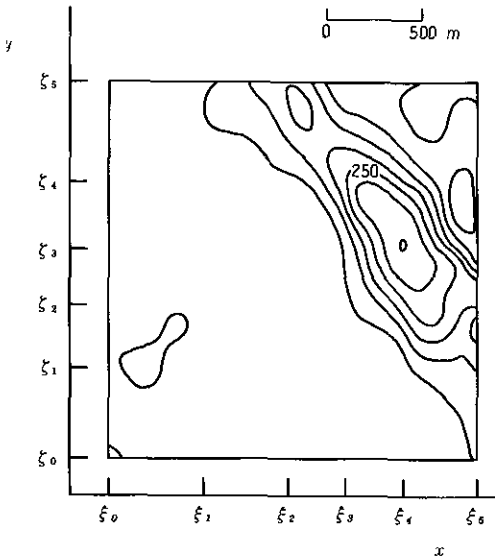


図 3(c) 対象領域を 25 領域に分割したときの平滑化結果

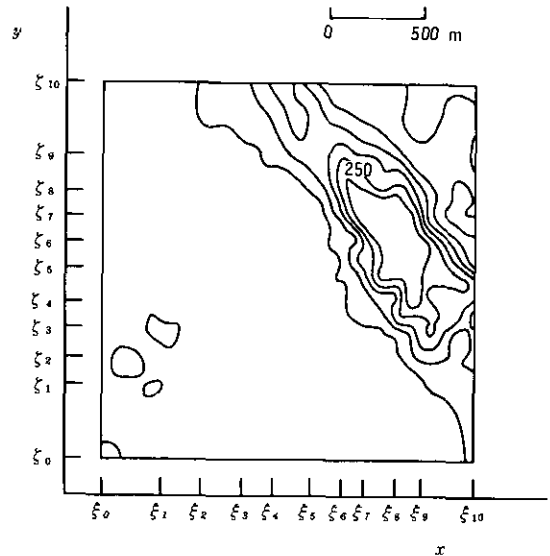


図 3(d) 対象領域を 100 領域に分割したときの平滑化結果

を、図3(d)は100の小領域に分けたときの等値線を示す。この結果から、情報量基準の値が最小となる図3(d)は、オリジナルデータ(図3(a))の平滑化の結果として十分であるといえよう。一方、図3(b),(c),(d)を再現するのに必要なデータは元のデータのそれぞれ、1.4%、5.5%、18.6%であり、したがってこの方法はデータの縮約にも有効であることが認められた。

なお平滑化については、分析者に有用な情報を強調し、画像の利用を容易にするような視覚特性に対応した画像強調の立場からの平滑化があり、この種の平滑化による雑音除去には、平滑化フィルター、最適フィルター、ベイズ推定法等による雑音除去があるが、本報では、画像に含まれるランダムな計測誤差の除去を情報量基準により行った。また縮約についても、高周波成分をカットすることによる方法があるが、これではピーク値の再現が十分に行えないなどの欠点があるので、本方法を採用し、その有効性が一応確認された。

### 3. Complex 法による測定点の最適配置

観測点データから間接的にパターンを推定する数学的な手法については数多く提案されているが、これらはリモートセンシングによってパターンを直接計測するのとは異なり、観測点がどのように配置されていたかによって推定結果が異なるため、観測点の配置が重要な問題となる。ここでは、リモートセンシングによって得られた2次元画像の平滑化後のパターンを真値とし、これを数点での観測データから再現するのに最適な観測点の配置を求めるにはどのような方法が適切かを検討する。この種の最適配置については、従来からいろいろな立場で検討されている。

表1に従来の研究目的、手法について分類してそれぞれの代表的なものを要約して示すが、ここに見られるように観測点位置の適正化の評価基準の一つとして「対象とする地域全体の平均汚染レベルをできるだけ正確に把握する」というのが想定されている。この場合、地域的な汚染分布の様子や、高濃度地点の把握ということは第一義的な目的としては考えられていない。もう一つは、「特定の地点、例えば最大濃度を示す地点のみを対象として、これをとらえること」を目的とした考察とか、また、「環境基準を越える地点の検出確率をできるだけ高くする」ような観測点配置を考えた例もある。さらに幾分特殊なモニタリング目的と考えられるのは、「大気場の汚染計測データをもとに排出源を推定しよう」という、いわゆる逆推定のカテゴリーに入るものである。

さてこれら過去の検討例における多様な目標の中で最も代表的で、かつ他の目的をも包含しうるものとしては、「対象地域全体の場所的汚染分布の状態を、限られた観測点によってできるだけ正しく把握する」ものである。この目的のための合理的な測定点配置の解析もまた以下のように大きく二つのカテゴリーに分けられよう。すなわち、

i) 既存の測定点のデータを基に、その間の類似性(その判定尺度にはいくつか異なるものが定義されるが)を調べ、近いものを統合して一つにまとめていくもの。

この方法は、実際の測定データを基にして解析するため、現実の状況をよく反映しうるものといえよう。しかし一方、これでは既存の測定点が重複している場合に統合削減する方向に向うに

表1 モニタリングシステムの適正化に関する研究例の分類

行政目的	モニタリングの目的	分析手法	研究者
環境計画	全域の平均値把握	※平均値を与える測定点の組を任意に拾い上げる ※誤差とサンプル数の関係を確率論より決定	Keagy <sup>11)</sup> 数理計画 <sup>12)</sup>
	全域の分布パターン把握	※実測パターンを最もよく再現する測定点の組を拾い出す	落合・内藤 <sup>13)</sup> 中森ら <sup>14)</sup>
環境基準適合度	特殊地点濃度の把握		
	—最大濃度地点	※シミュレーションにより高濃度点を予測し、ここに置く	Noll <sup>15)</sup>
	—基準超過地点	※基準超過を見逃す確率を最小とする最適配置	Leeら <sup>16)</sup>
汚染被害推定	—人口稠密地点	(現実の配置)	(特になし)
発生源規制	発生源特性把握	※ Non-welpose の放物型偏微分方程式の逆推定 ※ 放物型偏微分方程式のパラメータ推定の為の実験計画	榎木ら <sup>17)</sup> Seinfeld <sup>18)</sup>
	バックグラウンドレベル把握		
測定点数の削減		※測定データ間の相関係数を取り、近いものを集約する	Goldstein <sup>19)</sup> Takamatsu <sup>20)</sup> Elsom <sup>21)</sup>
		※シミュレーション結果得られた汚染分布について濃度の近いものをまとめる	数理計画 <sup>12)</sup>
		※ Source-Receptor 係数に応じて近いものを集約	乙間・内藤 <sup>22)</sup>

は役立つが、もし測定点が不足しているため新たにどこかへ追加することが必要とされる場合、それをどこに置くべきかという指針を得るには不適當である。

ii) 何らかの手法 (シミュレーション計算など) により対象地域全体の汚染分布を推定し、この結果に基づいて、地域代表性を有する点を選んでここに配置する。

この方法では汚染分布をまず推定するわけであるが、従来はどのような手法を用いるにせよ、その精度に限界があることが問題であった。しかし、リモートセンシングにより汚染分布を直接求めることが可能になりつつある。そこでもし分布パターンがある必要精度を満たす程度に推定されたとすれば、後はそれを再現するためにどの地点に観測点を置くべきかを何らかの基準を設けて見いだしていけばよい。

「対象地域全体の汚染分布の状態を限られた観測点によって把握する」方法のカテゴリー ii) が適切であるとし、配置の最適性の評価関数として、実測値と推定値の差の2乗を用いると、 $n$  個の測定点  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, \dots, n$ ) の最適配置を求める問題は次のように定式化される。

評価関数：

$$J(u) = \int_R (\phi(x, y) - \hat{\phi}(x, y | u))^2 dx dy \quad (6)$$

不等号制約：

$$\begin{aligned} a \leq x_i \leq b & \quad i=1, \dots, n \\ c \leq y_i \leq d & \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (7)$$

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$$

のもとで  $J(u)$  を最少とする観測点ベクトル  $u^* = (x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n)^T$  を求める。ただし、 $\phi(x, y)$  は  $(x, y)$  点での実測値を表し、 $\hat{\phi}(x, y | u)$  は観測点ベクトル  $u$  に対応する観測点  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, \dots, n$ ) での実測値が与えられた時の  $(x, y)$  点での推定値である。観測点での実測値から全体のパターンを求める手法はいくつか提案されているが、ここでは定常状態の拡散方程式を用い、測定点での汚染濃度を保つような何らかの発生源要因があるものとして、全域の濃度を推定した。この方法は他の非物理的な多くの内挿方法よりは、大気汚染濃度分布の推定に適していると思われる。大気中での汚染物質の拡散現象は3次元であるが、3次元拡散方程式から導かれる解の精度と計算の実用性を比較して、鉛直方向については平均濃度を用いることにより、3次元拡散の問題を2次元拡散の問題として取り扱った。

定常状態の2次元拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y}) - (\frac{\partial}{\partial x}(u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(v\phi)) + Q = 0 \quad (8)$$

ここに、 $K_x, K_y$  はそれぞれ  $x, y$  方向の拡散係数である。 $Q$  は単位空間当たりの汚染物質の発生量 ( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) であり、対象域内に流入する場合を正とする。 $u, v$  はそれぞれ  $x, y$  方向の風速 ( $\text{m}/\text{s}$ ) である。境界条件は二つの異なる形で表される。境界の濃度  $\phi_B$  が既知であれば、第1種境界条件、

$$\phi = \phi_B \quad (9)$$

であり、移流  $h(\phi_B - \phi_\infty)$  による汚染物質の流入あるいは流出があれば、

$$K \text{ grad} \phi|_B + h(\phi_B - \phi_\infty) = 0 \quad (10)$$

と表される。ここに  $K$  は拡散係数、 $h$  は移流係数、 $\phi_B$  は境界での濃度(未知) ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )、 $\phi_\infty$  はバックグラウンド濃度(既知) ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) である。

拡散方程式は有限要素法<sup>23,24)</sup>を用いて解析した。要素関数は図4に示すような2次元三角形要素に関する最も簡単な関数

$$\phi^{(e)} = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (11)$$

を用いた。節点条件

$$x = X_l, y = Y_l \text{ で } \phi^{(e)} = \phi_l \text{ (} l = i, j, k \text{)} \quad (12)$$

を(11)式に代入し、各節点に対応する形状関数で書き直すと、

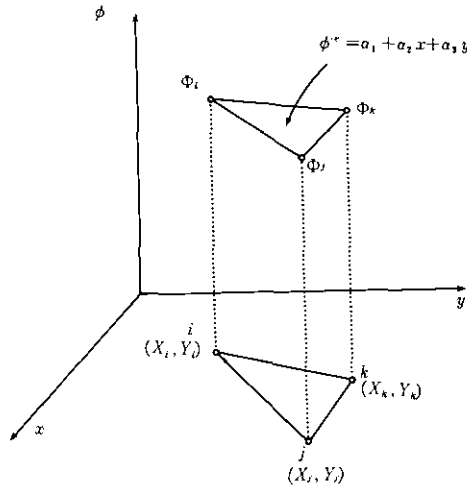


図4 2次元シンプレックス要素

$$\phi^{(e)} = N_i^{(e)} \phi_i + N_j^{(e)} \phi_j + N_k^{(e)} \phi_k \quad (13)$$

となる。ここで、

$$N_i^{(e)} = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \quad \text{及び} \quad \begin{cases} a_i = X_j Y_k - X_k Y_j \\ b_i = Y_j - Y_k \\ c_i = X_k - X_j \end{cases}$$

$$N_j^{(e)} = \frac{1}{2A} (a_j + b_j x + c_j y) \quad \text{及び} \quad \begin{cases} a_j = X_k Y_i - X_i Y_k \\ b_j = Y_k - Y_i \\ c_j = X_i - X_k \end{cases}$$

$$N_k^{(e)} = \frac{1}{2A} (a_k + b_k x + c_k y) \quad \text{及び} \quad \begin{cases} a_k = X_i Y_j - X_j Y_i \\ b_k = Y_i - Y_j \\ c_k = X_j - X_i \end{cases}$$

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix}$$

であり、要素  $e$  の外での  $\phi^{(e)}$  の値は零である。全体領域での関数  $\phi$  は各要素の和として表される。

$$\phi = \sum_{e=1}^E \phi^{(e)} = \sum_{i=1}^M N_i \phi_i \quad (14)$$

ただし、 $E$  は要素の個数、 $M$  は節点の個数、 $\phi_i$  ( $i=1, \dots, M$ ) は節点  $i$  での値を表す。また

$$N_i = \sum_{e=1}^E N_i^{(e)}$$

である。有限要素法にガラーキン法を適用し、近似関数で表現したときの(8)式の誤差と形状関数  $N_i$  ( $i=1, \dots, M$ ) とが直交するように

$$\iint_R N_i \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \phi}{\partial y}) - \left( \frac{\partial}{\partial x} (u\phi) + \frac{\partial}{\partial y} (v\phi) \right) + Q \right\} dx dy = 0 \quad (i=1, \dots, M) \quad (15)$$

節点での濃度を推定した。

濃度既知の節点の組合せについては、(6)式を最小とする節点を採用した。(6)式を最小とする測定点の組合せを求める手法はいくつかあるが、ここでは Complex 法<sup>25,26)</sup>を適用して最適解を求めた。1962年に Spendley, Hext 及び Himsforth らによって Simplex 法が開発され、1965年に Box はこれを修正し、不等号制約条件を有する非線形最適化問題を取扱うことのできる Constrained Simplex 法すなわち Complex 法を開発した。Complex 法は  $k$  個の頂点をもつ複体を用い、各頂点での目的関数の値が減少するように複体を変形していくものである。 $k$  個の頂点における目的関数のもっとも大きな点を  $u_r$ 、残りの頂点の重心を  $u_o$  とする。 $u_o$  と  $u_r$  を結ぶ線分では目的関数の値は減少すると考えられるので、この線分上で適当な点を取り、 $u_r$  を  $u_{or}$  にかえて複体を形成する。

$$u_{or} = (1 + \alpha) u_o - \alpha u_r \quad (16)$$

ここで  $\alpha > 1$  とする。もし  $u_{or}$  における目的関数値が最大であれば、点  $u_{or}$  と点  $u_o$  の中間点を改めて  $u_{or}$  とする。また  $u_o$  が(7)式の制約条件を侵すならば、点  $u_{or}$  をこの境界上の点に置きかえる。

以上の計算手順を用いて最適な観測点の配置を求めた。ここでは  $\alpha = 1.3$ 、 $k = 4n$  とした。データは図3(d)を使用し、境界の値は既知とし、風速は零( $u = v = 0$ )とした。 $n = 3$  のとき、出発点として(7)式の制約条件を満たす3点からなる12組のランダムな観測点ベクトルを求めた。この12組のランダムな測定点の組み合わせを図5に示す。目的関数を最も大にするような測定点の組合せからなる複体の頂点を順次移動して、次第に目的関数の値を減少させる。目的関数の値の最も大きな複体の頂点を残りの頂点の重心の方向に移動させても残りの頂点での目的関数の値より小さくならない場合は、その頂点を計算対象からはずし、残りの頂点からなる複体について同様の計算を行った。残りの頂点で単体を構成できなくなった時点で、取り残していた点を加えて再度頂点の移動を行い、どの頂点を移動させても目的関数の値に改良がみられなくなったところで計算を打ち切る。図6は移動後の頂点の組合せの図である。目的関数の収束の状況を図7に示す。130回で収束し、これ以上目的関数の減少が見られなかったため、このときの観測点ベクトルをもって最適観測地点とする。この結果から最適点が高濃度地点に集中していることがわかる。最適点でのデータを用いて内挿した結果を図8に示す。レーザーレーダ測定によるデータと内挿後の分布とを比べると、分布パターンの形が十分よく似ているといってもよいであろう。

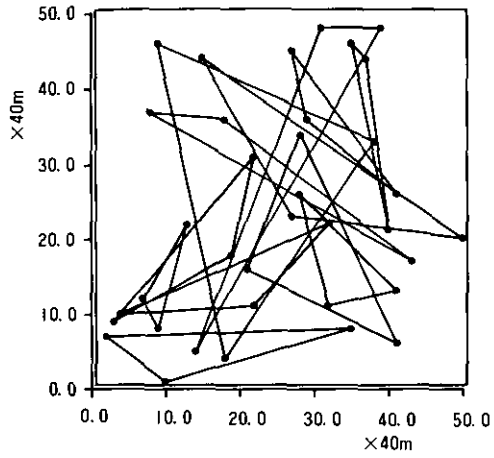


図5 測定局のランダムな配置図 (3局)

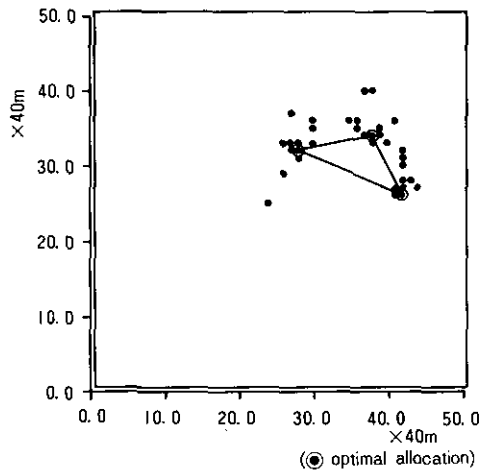


図6 測定局の最適配置 (3局)

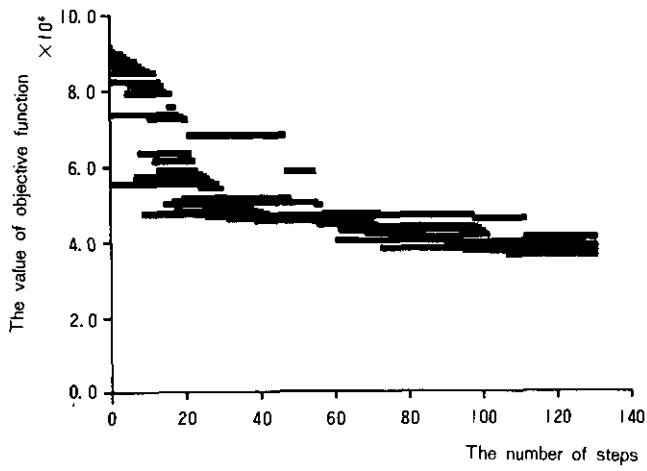


図7 目的関数の収束状況

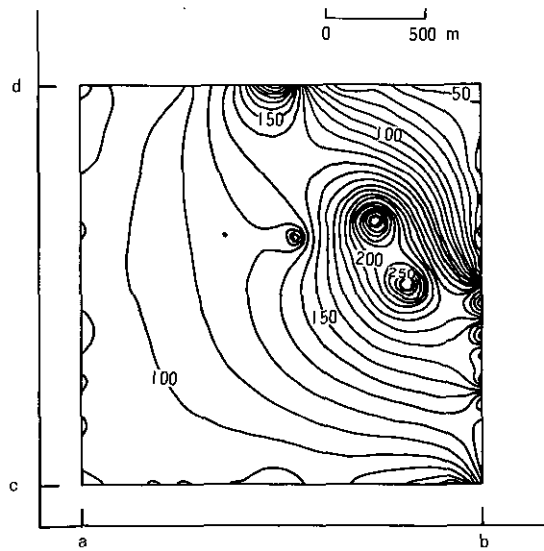


図8 最適点でのデータによる推定濃度分布

測定局の総数を3局、5局、10局としたときの最適配置図を図9に示す。3局のときは濃度の高い所に測定局が配置されたが、局の数が増えるに従って周辺にも配置されていくのがわかる。



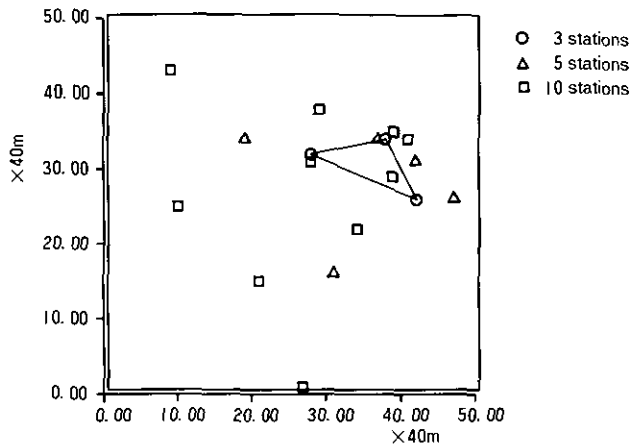


図9 測定局の最適配置

#### 4. おわりに

レーザーレーダーによるエアロゾルの水平分布パターンを用いて、地上測定局の適正配置について検討した。離散的データから2次元パターンを推定する方法は数多く提案されているが、拡散方程式を用いた内挿が大気汚染分布推定に有効であることがわかった。さらに地上測定局の数を増やしていったとき、最適配置の測定局は濃度の高い所から周辺に向けて増やしていくのが分布パターン再現という意味では望ましいことがわかった。ここでは地形や風の影響を内挿に入れていないが、本法ではこれらの影響を必要に応じて加味することも可能である。

#### 引用文献

- 1) 長尾真訳(1978): デジタル画像処理, 近代科学社.
- 2) 土井康弘・安藤繁(1981): 画像処理論, 昭晃堂.
- 3) 宮本定明・大井紘・内藤正明(1983): 大型レーザーレーダーによる画像の強調と雑音除去, 国立公害研究所研究報告, 第39号, 77-92.
- 4) 市田浩三・吉本富士市(1979): スプライン関数とその応用, 教育出版.
- 5) 吉本富士市・市田浩三・清野武(1977): 区分的3次関数を用いた2次元データの平滑化の自動的方法, 情報処理, 18(2), 128-134.
- 6) 内藤正明・落合美紀子(1981): 環境モニタリングステーションの適正配置について, 公害と対策, 17(10), 40-46.
- 7) 大井紘・新藤純子・藤原正弘(1983): 大気汚染測定系の総合評価のための基礎的研究—地上測定網の評価と構成—, 国立公害研究所研究報告, 第39号, 145-167.

- 8) 落合美紀子・内藤正明(1977): 広域汚染の指標に関する検討(その1). 公害と対策, 13(9), 58—64.
- 9) 篠原正則・内藤正明(1980): スプラインによる大気汚染2次元分布の推定. 環境情報科学, 9(4), 62—64.
- 10) 赤池弘次(1976): 情報量基準 AIC とは何か. 数理科学, (153), 5—10.
- 11) Keagy, D.M. *et al.* (1961): Sampling Station and Time Requirements for Urban Air Pollution Survey. J. APCA, 11(6), 270—280.
- 12) 数理計画(1975): 東京都大気汚染測定網再配置計画のための適正化配置検討委託報告書.
- 13) 落合美紀子・内藤正明(1978): 広域汚染の指標に関する検討(その2). 公害と対策, 14(9), 69—76.
- 14) Nakamori, Y. *et al.* (1979): Design of Air Pollution Monitoring System by Spatial Sample Stratification. Atmos. Environ., 13, 97—103.
- 15) Noll, K.E. *et al.* (1977): On Objective Air Monitoring Site Selection Methodology for Large Point Sources. Atmos. Environ., 11, 1051—1059.
- 16) Lee, T.D. *et al.* (1978): A Procedure for Air Monitoring Instrumentation Location. Manage. Sci., 24, 1451—1461.
- 17) Ikeda, S. *et al.* (1974): Identification Method in Environmental Systems and Its Application to Water Pollution. Int. J. Syst. Sci., 5(8), 707—723.
- 18) Seinfeld, J.H. (1972): Optimal Location of Pollutant Monitoring Stations in Airshed. Atmos. Environ., 6, 847—858.
- 19) Goldstein, I.F. and L. Landovitz (1977): Analysis of Air Pollution Patterns in New York City. Atmos. Environ., 11, 47—52.
- 20) Takamatsu, T. and M. Naito (1973): A Practical Approach to River System Management. IFAC/ UNESCO Workshop, 357. Zakopane, Poland.
- 21) Elsom, D.M. (1978): Spatial Correlation Analysis of Air Pollution Data in an Urban Area. Atmos. Environ., 12, 1103—1107.
- 22) 乙間末広・内藤正明(1974): 大気汚染マトリクスの提案とその利用. 環境技術, 3(8), 1—5.
- 23) Zienkiewicz, O. C (1977): The finite element method, McGraw-Hill.
- 24) 川井忠彦訳(1978): 応用有限要素法解析, 丸善.
- 25) 高松武一郎(1978): プロセスシステム, 日刊工業新聞社.
- 26) Box, M.J, D. Davies and W.H. Swann (1969): Non-linear optimization techniques, Oliver & Boyd.

## 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——昭和51年度。(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)

(改称)

## 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)  
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属9種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 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、——昭和53年度。(1979)
- 第7号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)  
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- 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)  
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第12号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)  
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第13号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)  
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.  
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.  
(多摩川に発生するユスリカの研究  
——第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係  
——第2報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について)
- 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 特別研究報告 (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)
- 第17号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果——臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究

—昭和53/54年度 特別研究報告。(1980)

- 第18号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)  
(環境標準試料「リョウブ」の調製, 分析および保証値)
- 第19号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(III)——霞ヶ浦(西浦)の湖流——昭和53~54年度。(1981)
- 第20号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(IV)——霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響——昭和53~54年度。(1981)
- 第21号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(V)——霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価——昭和53~54年度。(1981)
- 第22号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(VI)——霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量——昭和53~54年度。(1981)
- 第23号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(VII)——湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究——昭和53~54年度。(1981)
- 第24号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(VIII)——富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関する研究——昭和53~54年度。(1981)
- 第25号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(IX)——*Microcystis*(藍藻類)の増殖特性——昭和53~54年度。(1981)
- 第26号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X)——藻類培養試験法によるAGPの測定——昭和53~54年度。(1981)
- 第27号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(XI)——研究総括——昭和53~54年度。(1981)
- 第28号 複合大気汚染の植物影響に関する研究——昭和54/55年度 特別研究報告。(1981)
- 第29号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)  
Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.  
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.  
(多摩川に発生するユスリカ類の研究  
——第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科 Orthoclaadiinae 各種の記載と、その分布の下水汚染度との関係について  
——第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載——)
- 第30号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究——昭和54/55年度 特別研究報告。(1982)
- 第31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55年度 特別研究報告。(1981)
- 第32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——環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1)——昭和54年度 特別研究中間報告。(1982)
- 第33号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究——大気運動と大気拡散過程のシミュレーション——昭和55年度 特別研究報告。(1982)
- 第34号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究——昭和55年度 特別研究報告。(1982)
- 第35号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究。(1982)
- 第36号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究——昭和55, 56年度 特別研究報告。(1982)

- 第37号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究。(1982)
- 第38号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)  
(環境標準試料「池底質」の調製, 分析及び保証値)
- 第39号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究——昭和56年度 特別研究報告。(1982)
- 第40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56年度 特別研究報告。(1983)
- 第41号 土壌環境の遠隔計測と評価に関する統計学的研究。(1983)
- 第42号 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究。(1983)
- 第43号 Studies on chironomid midges of the Tama River, (1983)  
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June with description of 15 new species.  
Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded from the main stream in the June survey.  
Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.  
(多摩川に発生するユスリカ類の研究  
——第5報 本流に発生するユスリカ類の分布に関する6月の調査成績とユスリカ亜科に属する15新種等の記録——  
——第6報 多摩本流より6月に採集されたユリユスリカ亜科の各種について——  
——第7報 多摩本流より3月に採取されたユスリカ科の各種について——)
- 第44号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素化合物系光化学反応の研究。——昭和54年度 特別研究中間報告——環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究2)。(1983)
- 第45号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究——研究総括——昭和53~55年度。(1983)
- 第46号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究——特別研究報告 第1分冊——昭和54~55年度。(1983)
- 第47号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究——特別研究報告 第2分冊——昭和54~55年度。(1983)
- 第48号 水質観測の適正配置に関するシステム解析。(1983)
- 第49号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究——昭和57年度 特別研究報告。(1984)

## Report of Special Research Project the National Institute for Environmental Studies

- No. 1\* Man activity and aquatic environment—with special references to Lake Kasumigaura—Progress report in 1976. (1977)
- No. 2\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants—Progress report in 1976-1977. (1978)

(Starting with Report No. 3, the new title for NIES Reports was changed to :)

## Research Report from the National Institute for Environmental Studies

- No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1977. (1978)
- No. 5\* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells—Research report in 1976-1977. (1978)
- No. 6\* Man activity and aquatic environment—with special references to Lake Kasumigaura—Progress report in 1977-1978. (1979)
- No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- No. 8\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1977-1978. (1979)
- No. 9\* Smog chamber studies on photochemical of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1978. (1979)
- No. 10\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants—Progress report in 1976-1978. (1979)
- No. 11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No. 12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No. 13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
  - Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
  - Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No. 14\* Studies on the effects of organic wastes on the soil ecosystem—Progress report in 1978-1979. (1980)
- No. 15\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1977-1978. (1980)
- No. 16\* Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar. (1980)
- No. 17\* Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes—Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region—Progress report in 1978-1979. (1980)
- No. 18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- No. 19\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Lake current of Kasumigaura (Nishiura)—1978-1979. (1981)

- No. 20\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Geomorphological and hydrometeorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment—1978-1979. (1981)
- No. 21\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura—1978-1979. (1981)
- No. 22\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura—1978-1979. (1981)
- No. 23\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Applicability of trophic state indices for lakes—1978-1979. (1981)
- No. 24\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Quantitative analysis of entrophication effects on main utilization of lake water resources—1978-1979. (1981)
- No. 25\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Mycrocystis*—1978-1979. (1981)
- No. 26\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Determination of argal growth potential by algal assay procedure—1978-1979. (1981)
- No. 27\* Comprehensive studies on the entrophication of fresh-water areas—Summary of researches—1978-1979. (1981)
- No. 28\* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Progress report in 1979-1980. (1981)
- No. 29 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)  
 Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.  
 Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- No. 30\* Entrophication and red tides in the coastal marine environment—Progress report in 1979-1980. (1982)
- No. 31\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1980. (1981)
- No. 32\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1979—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). (1982)
- No. 33\* Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region—Simulation of atmospheric motions and diffusion processes—Progress report in 1980. (1982)
- No. 34\* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1980. (1982)
- No. 35\* Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic. (1982)
- No. 36\* Studies on the method for long term environmental monitoring—Progress report in 1980-1981. (1982)
- No. 37\* Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy.  
 —The evaluation laboratory of Man-environment Systems. (1982)
- No. 38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
- No. 39\* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental

- pollution—Research report in 1981. (1983)
- No. 40\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants  
—Research report in 1981. (1983)
- No. 41\* Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of  
soil. (1983)
- No. 42\* Experimental studies on the physical properties of mud and the characteristics of mud  
transportation. (1983)
- No. 43 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1983)  
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June,  
with description of 15 new species.  
Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main  
stream in the June survey.  
Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
- No. 44\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system  
—Progress report in 1979—Research on the photochemical secondary pollutants formation  
mechanism in the environmental atmosphere (Part 2). (1983)
- No. 45\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—Outlines of special research  
project—1978-1980. (1983)
- No. 46\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—Research report in 1979  
-1980, Part 1. (1983)
- No. 47\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—Research report in 1979  
-1980, Part 2. (1983)
- No. 48\* Study on Optimal Allocation of Water Quality Monitoring Points. (1983)
- No. 49\* The Development and Evaluation of Remote Measurement Method for Environmental  
Pollution.—Research report in 1982. (1984)

\* in Japanese



RESEARCH REPORT FROM  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

No. 49

国立公害研究所研究報告 第49号

(R - 49 - '84)

---

昭和59年1月31日発行

編集 国立公害研究所編集委員会

発行 環境庁 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 勝美印刷株式会社

文京区小石川1-3-7

Published by the National Institute for Environmental Studies

Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

January 1984