

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58年度 特別研究報告

Research Report in 1983

大喜多敏一 編

Edited by Toshiichi OKITA

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

## 序

環境の汚染物質を物理化学的な方法で測定するには、直接にその場所に向いて計測を行う必要がある。しかし、そのような観測を地球上の各地点で行い、特に人里から遠く離れたへき地において常時実施することはほとんど不可能に近い。これに対して測定地点から離れた遠隔の地点において計測を行うことをリモート・センシング（遠隔計測手法）と呼んでいる。最近、人工衛星からの地球観測や資源探査の手法の転用に伴ってこのような遠隔計測技術が発達してきた。このほかにも地上からレーザーレーダーなどによって大気汚染の三次元的な広がりを時間的に連続測定する方法がある。

この特別研究「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」は1980年より1983年まで4年計画で実施した。その成果は中間報告としてR-34-'82, R-39-'83, R-49-'84として次々に発表してきたが、今回特別研究の終了に当たり、得られた成果のうち今までに未発表の部分をまとめたものである。

この報告は主として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、分光型レーザーレーダーによる汚染物質の空間分布の計測手法の開発、航空機に搭載した多重分光走査装置による環境パターン情報の処理、解析手法の開発、及び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応性の検討などに関するものである。初めの二つは大気汚染の広域計測に関するもので、あとの二つは水質環境の測定などを含む。

このように環境汚染を時々刻々に三次元的に測定することは汚染の動的な形態を把握することができて、環境行政上も極めて重要であるが、それについては1984年より始まる特別研究で引き続いて行うつもりである。

本研究は遠隔測定という極めて近代的な技術を利用した環境問題の研究であるが、リモート・センシングの専門家のみならず、環境科学、環境行政の方面の多くの方々の興味をひくことができれば甚だ幸いとするところである。

1985年3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 .....	5
竹内延夫・大井 紘	
II. 報文	
1. 大型レーザーレーダーによる遠距離測定における測定誤差の解析とその低減法 .....	33
清水 浩・飯倉善和・笹野泰弘・松井一郎・竹内延夫	
2. 消散係数評価のための二成分レーザーレーダー方程式の解の性質 .....	55
笹野泰弘・中根英昭	
3. レーザーレーダーと光散乱粒子計数器を用いたエアロゾルの 散乱パラメーターの測定 .....	61
中根英昭・笹野泰弘	
4. 大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル濃度分布の定量的測定 .....	75
中根英昭・笹野泰弘・清水 浩・杉本伸夫・松井一郎・竹内延夫・ 浦 慶・北村新三	
5. 差分吸収レーザーレーダーの測定誤差に関する実験的研究 .....	101
杉本伸夫・竹内延夫	
6. 二波長同時差分吸収方式レーザーレーダーシステムの開発 .....	117
齊藤保典・野村彰夫・鹿野哲生	
7. 地上付近での浮遊粉じんの拡散 .....	135
溝口次夫・池田有光・若園 淳	
8. 筑波における大気エアロゾルの高度別分布とシミュレーション .....	147
溝口次夫・刃刀正行・葉山幸雄・藤田真一・溝畑 朗	
9. 遠隔計測による水質の定量 .....	165
安岡善文・宮崎忠国	
10. 高速ラジオスペクトロメータの開発 .....	187
宮崎忠国・清水 浩・安岡善文	

11. 航空機搭載 MSS データによる九十九里平野の土壤水分推定分布図の作成 .....	203
宇都宮陽二郎	
12. 最良線形判別関数による MSS 画像の領域分類 .....	219
飯倉善和・安岡善文	
13. レーザーレーダー画像強調問題の最適化による定式化 .....	231
宮本定明・大井 紘・内藤正明・小林正紀	
14. 移動計測車による最適観測計画に関する一考察 .....	247
甲斐沼美紀子・内藤正明	

## CONTENTS

### I. Significance and Outline of the Studies

1. Importance of Remote Sensing in the Studies of Environmental Pollution ..... 1  
T. OKITA
2. Outline of the Studies ..... 5  
N. TAKEUCHI and K. OI

### II. Original Papers

1. An Error Analysis and Improvement of Accuracy in a Long Range  
Measurement by a Large Scale Laser Radar ..... 33  
H. SHIMIZU, Y. IKURA, Y. SASANO, I. MATSUI and N. TAKEUCHI
2. On the Solution of the Two-component Equation for Quantitative Analysis  
of Laser Radar Signal ..... 55  
Y. SASANO and H. NAKANE
3. Measurement of the Scattering Parameter by Laser Radar and Optical  
Counter ..... 61  
H. NAKANE and Y. SASANO
4. Obtaining Quantitative Aerosol Concentration Distribution for Wide Area  
with Large Laser Radar ..... 75  
H. NAKANE, Y. SASANO, H. SHIMIZU, N. SUGIMOTO, I. MATSUI,  
N. TAKEUCHI, P. QING and S. KITAMURA
5. Experimental Estimation of Errors in Measurement in a Differential  
Absorption Lidar System ..... 101  
N. SUGIMOTO and N. TAKEUCHI
6. Development of a Simultaneous Two-wavelength Operation  
Differential Absorption Laser Radar ..... 117  
Y. SAITO, A. NOMURA and T. KANO
7. Studies on Atmospheric Aerosol Diffusion near the Surface ..... 135  
T. MIZOGUCHI, Y. IKEDA and K. WAKAZONO

8. Measurement and Simulation of Atmospheric Aerosols at Tsukuba .....	147
T. MIZOGUCHI, M. KUNUGI, Y. HAYAMA, S. FUJITA and A. MIZOHATA	
9. Remoto Sensing of Water Quality .....	165
Y. YASUOKA and T. MIYAZAKI	
10. Development of High-speed Spectroradiometer .....	187
T. MIYAZAKI, H. SHIMIZU and Y. YASUOKA	
11. Soil Moisture Mapping in the Kujukuri Coastal Plain with Airborne Multispectral Scanner .....	203
Y. UTSUNOMIYA	
12. Classification of Multispectral Images by the Best Linear Discriminant Function .....	219
Y. IKURA and Y. YASUOKA	
13. Optimization Formulation of Enhancement Problems of Laser Radar Images .....	231
S. MIYAMOTO, K. OI, M. NAITO and M. KOBAYASHI	
14. On Optimal Strategy of Itinerating a Mobile Unit for Air Pollution Monitoring .....	247
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

#### Importance of Remote Sensing in the Studies of Environmental Pollution

大喜多敏一<sup>1</sup>

Toshiichi OKITA<sup>1</sup>

#### 概要

本研究ではレーザーレーダー及び多重分光走査装置 (MSS) による遠隔計測・評価手法を開発した。

試験に用いたレーザーレーダーは3種類のミ-散乱レーザーレーダーすなわち半径 50 km 以上の広い地域のエアロゾルの分布を測定できる大型レーザーレーダー、計測車に搭載し移動測定が可能なレーザーレーダー、簡易で全天候型のレーザーレーダー、及び差分吸収型レーザーレーダー (DIAL) である。これらのレーザーレーダーにつき雑音を除去し、系統誤差対策をたてるとともに、レーザーレーダーのコンピュータ制御プログラムや画像処理プログラムを完成した。

以上のごとく調整したレーザーレーダーを用い、大気中の消散係数の分布を測定した。また上空の風向、風速を求める手法を開発し、気象観測塔における観測結果とほぼ一致することがわかった。

エッジ強調法により混合層上部の対流セル構造を明確にとらえることを利用して、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を明らかにした。

DIAL を用いて排煙中の平均 0.17 ppm の NO<sub>2</sub> を精度よく測定でき、更に低濃度測定可能な装置開発の可能性を検討した。

半導体レーザーを光源として長光路方式で CO の平均濃度測定法を検討したが、レーザー光源自体の特性が精度に大きな影響を与えることが判明した。

人工衛星及び航空機に搭載した MSS により得られた多重分光画像データから、水域の透明度、SS、クロロフィル-*a* の濃度を推定する場合における大気散乱や水面反射光等の雑音による影響を調べた。その結果 MSS により検知される光の 70~90% が大気からの散乱

---

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi,  
Tsuba, Ibaraki 305, Japan.

光であり、また水面直上の上向き放射輝度のうち 40~50%が水面反射光であり、散乱光や水面反射光の影響が大きいことがわかった。それらの影響を補正した MSS データと水質間の回帰モデルが大気の状態に無関係になることが示された。また MSS データから土壌中の水分を推定することを目的として、航空機による MSS データと土壌水分の関係を調べたところ、地表下 5 cm までの土壌水分と MSS データの間に高い相関があることがわかった。

以上の遠隔計測手法を用いて得られた情報を利用して、道路近傍での汚染物質の拡散を記述する正確な方程式の導出が可能となり、モニタリングステーションの最適配置を検討する手法開発の手掛かりが得られた。

### **Abstract**

The objective of this investigation is the development of the techniques for remote measurement of environmental factors using laser radars (lidar) and multispectral scanner (MSS) and their data evaluation.

The lidars under investigation are three different types of Mie-scattering lidars, that is, a large lidar which scans the aerosol distribution within about 50 km horizontally and vertically, a mobile lidar on board a vehicle, and a simplified lidar system which may be operated even in bad weather, and in addition, a differential absorption type of lidar (DIAL) is tested.

With these lidars noise in the measurement is eliminated, and systematic errors are elucidated and controlled. Further, the computer programs of the operation of lidar and of image processing are developed.

Then the lidars are used for the measurement of the distribution of atmospheric volume extinction coefficient due to aerosol. The technique for the measurement of wind direction and speed in the upper air is developed, which gives the data close to those measured on a meteorological tower.

Using the edge enhancement technique of the lidar image the convection cell structure in the upper mixing layer can be clearly imaged. Then from the image the height of mixing layer and temporal variation of vertical and horizontal sizes of the convection cell are determined.

Using the DIAL the concentration of 0.17 ppm of NO<sub>2</sub> in stack plume may be accurately measured and the possibility of the DIAL for the measurement of atmospheric concentration of NO<sub>2</sub> is under study.

The effect of atmospheric scattered light and light reflected at water surface on the estimation of transparency, SS, and chlorophyll-*a* of surface water from MSS image taken on board satellite and aircraft is studied. It is found that 70~90 % of light sensed by MSS is the one scattered in the atmosphere and that 40~50 % of upward radiation on water surface is the light reflected at water surface. It is found that the regression equation between the water quality and response of MSS corrected for the above effects is independent of the atmospheric condition. High correlation is also found between the moisture content of soil within 5 cm under the soil surface and MSS response.

The data obtained from the remote measurements also may be applied for the formulation

of an exact equation for the diffusion of pollutant near a road, and the development of the techniques of optimal allocation of air monitoring stations and sites of remote sensors.

今日、環境問題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における汚染分布情報が要求されている。同時に各種発生源からの汚染物発生を即刻把握することも期待されるであろう。

工業地帯や都市などにある大小の発生源より排出された各種汚染物は、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、一般風や局地風によって光化学反応等の化学変化を伴いながら長距離輸送される。発生源より数十 km、場合によっては更に離れた地点における被害事例に見られるように、大気汚染の広域化が問題となっている。

他方、地表面においても人工的な生態系の改変、例えば森林等の植生の変化、油膜や富栄養化に伴う水面の変化等が進行し、そのために地球のアルベートが変化し気候にも影響を与える恐れがある。

以上数例を挙げた大気、水、植生等に係る三次元的な監視とそれからの環境情報の抽出をいかにして能率的に行うかは環境施策を進める上で重要な課題となっている。

大気常時監視を例にとると、我が国の監視網の密度は世界でも最高の水準であるといわれているものの上空のデータを得ることは非常に困難である。上空のデータを得る場合には、従来は、航空機を用いた観測が行われてきたが、航空機による計測では飛行高度、飛行可能地域に制約があるだけでなく、長時間の継続計測は経費の点から実現性が乏しい。また、気球を用いた観測も飛行機と同様な制約が存在するほか、高空での観測は困難である。

水平方向の気象や汚染物質の分布にしても、例えば光化学オキシダントの予報のように、短時間内の地域的分布を把握する必要がある。また、粒子状物質  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  についても、現行の計測点における値の地域代表性等を含めて、大気中での輸送、拡散、変換のパターンのより詳細な認識に努めるとともに、それらのモデルへの適切な応用が望まれる。

また、土壌、植物等に関する生態系については、研究者がそれぞれの地点へ出向いて細かい調査をすると同時に、短時間内に広範囲の調査を行い、微細な変化を把握するなど長期的な監視が必要である。

遠隔計測技術は現在、光を用いたものが主流を占めているが、マイクロ波、超音波を用いたものもある。光を用いたものとしては、レーザーレーダーによるもの及び航空機、人工衛星搭載の分光検出器が挙げられる。現在、レーザーレーダーによってエアロゾル（粒子状物質）や  $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$  等のガス状汚染物質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。さらに、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。

他方、人工衛星等に分光検出器を搭載し、植物や水面等地表の状況、大気中の雲、気温、 $O_3$ 等の分布の測定がなされつつある。また今後、長光路光吸収法等を用いたガスやラジカルの遠隔計測、各種の方法に基づく発生源の遠隔計測等が期待されている。

最近地球規模の汚染が注目されるようになってきたが、この分野は遠隔計測の応用が特に望まれる分野である。この分野における技術開発や国際協力も今後進展すると思われ、我が国の研究者も大いに貢献する余地がある。しかし、遠隔計測を実施するには多額の経費を要するので、常に経費と実用性の両面に配慮を加えねばならない。また計測手法の開発と同時にデータ処理手法の開発を行い、多くの人々に手近なものにする努力が必要である。

以上に述べてきた関連研究のうち本特別研究「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」では、レーザーレーダーによるエアロゾルや  $NO_2$ 、 $CO$  の分布の計測手法の開発、それらを用いた汚染質の分布と風系等の各種気象現象の把握、並びに航空機等に搭載した MSS による水質の計測、土壌水分の計測等に主眼がおかれた。また、エアロゾルについては、大型レーザーレーダーによる水平的な分布、移動型レーザーレーダーによる境界層構造や排ガス拡散の測定、特に混合層高度の測定が行われた。さらにこれらの計測データの解析手法、特に画像処理についても研究がなされた。

以上の研究の詳しい概要は次節で述べるが、研究の成果は次期特別研究の遠隔計測による動態把握へと発展が期待される。

## Outline of the Studies

竹内延夫<sup>1</sup>・大井 紘<sup>2</sup>Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup> and Ko OI<sup>2</sup>

## 1 はじめに

環境の実態把握・動態把握を行うために、時間的・空間的広がりを持った情報がいかに重要であるか、また、遠隔計測技術が、既存の方法と比較していかに有効にその情報を与えるかについては、I-1に述べたとおりである。また、現在のところ、大気環境の遠隔計測には、アクティブリモートセンサーの一種であるレーザーレーダーが、水・陸域の環境では、パッシブリモートセンサーの多重分光走査装置(MSS)が有効であることにも、I-1で触れた。

本特別研究の目的は、上に明らかにした意義に基づき、遠隔計測技術を環境計測の分野に実際に導入するために必要となる基礎的技術を確立すること、及び、この技術の利用を通じて遠隔計測手法の有効性を確認することであった。特に、本特別研究を遂行するに当たっては、環境の現状を把握することにより、遠隔計測手法が有用であることを示すことに力点が置かれた。そして、その成果は、昭和59年度より開始した次期特別研究「遠隔計測による環境動態の評価手法の開発に関する研究」に受け継がれている。

さて、本特別研究計画策定時において特に必要とされていた環境情報は、大気領域では、広い領域の汚染質分布、混合層(大気境界層)内の汚染質の拡散、排煙中の汚染質濃度分布、及び微量汚染質の濃度であった。なぜならば、大気汚染質は、排出源近傍において直接的な汚染をもたらすとともに、移流・拡散・変質を伴いながら広域大気汚染をもたらすからである。また、水域については、広い領域にわたる水質の定量的・定性的分布特性の把握が求められていた。さらに、陸域の環境についても、地表面についての平面的に広がりを持った情報を得ることが要請されて

- 
1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, 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小野川16番2  
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

いた。

本特別研究では、上記のような目的と背景の下に、次の対象の計測を行うことを具体的な目標として掲げた。

すなわち、大気領域の目標は、

- 1) 広い領域でのエアロゾル濃度分布を定量的に測定すること。
- 2) 混合層の構造と発達過程を観測すること。
- 3) 風向・風速の空間分布を観測すること。
- 4) 大気汚染気体、特に排煙中の  $\text{NO}_2$  の濃度を測定すること。
- 5) 大気中の微量成分を簡便で高感度な方法で測定すること。

であった。

また、水域の環境については、

- 1) SS (浮遊物質) 及び透明度分布を定量的に計測すること。
- 2) アオコなど富栄養化に関する物質を定量的に計測すること。

の2点を目標とした。

さらに陸域の環境については、地表土壌水分を把握することを取り上げた。

そして、これらの測定結果を有効に利用するために、データを目的に合わせて表現する手法の開発を行ったうえで、具体的な利用例として、

- 1) 道路近傍での大気汚染質の拡散を正確に記述するモデルの開発。
- 2) 環境汚染測定系の最適な構成手法の開発。

を取り上げた。

以上の目標を達成するためには過程を踏みながら段階ごとに研究を行う必要がある。これらの過程を包括すると、研究の全体の流れは表1のようにまとめられる。すなわち、大気領域、水・陸域それぞれについて、

- 1) 遠隔計測装置の製作
- 2) 遠隔計測装置の性能評価、
- 3) データ処理手法の開発、
- 4) 環境情報の抽出、に至る一連の過程があり、これらをもとに、

表1 研究の構造

対 象 (センサー)	研 究 内 容				
	計測装置の開発		情報処理手法の開発		遠隔計測データの解析と利用
	計測装置の製作	計測装置の性能評価	データ処理手法の開発	環境情報の抽出手法の開発	
大 気 (レーザーレーダー)	○	○	○	○	○
水・陸域 (MSS)			○	○	

5) 遠隔計測データを利用する手法の開発を行う、という構成となる。

この中で、1)と2)は計測装置の開発に関するもの、3)と4)は情報処理手法の開発に関するものとしてそれぞれひとつにまとめられる。なお、これら四つの過程をひとまとめにして、ここでは遠隔計測手法の開発と呼ぶことにする。

大気領域では、遠隔計測装置（レーザーレーダー）の開発自体が研究段階にあったため、レーザーレーダーの製作が必要であり、1)～4)が研究対象となった。それに対して、水・陸域では既存の多重分光走査装置（MSS）が有効であることから、装置の開発は行わず、研究対象を3)、4)に限定した。

本特別研究では、表1の各項目を埋める形で具体的な研究を行い、全体として研究目標を達成することができた。

以下、本文では、まず、大気、水・陸それぞれの領域について遠隔計測手法の開発に関する過程についての研究成果を概観する。次に、遠隔計測技術の利用手法の開発に関する研究成果について述べる。そして、最後に、本特別研究全体の成果に関する結論及び遠隔計測手法の今後の発展方向について述べてまとめとする。

## 2 研究成果の概要

### 2.1 大気領域における遠隔計測手法の開発

大気領域では、前節に述べた研究目標に基づいて、計測装置の製作から研究を始めた。取り上げた装置は、ミー散乱型レーザーレーダー3種類、DIAL（差分吸収レーザーレーダー）及び長光路吸収方式検出装置各1種類の合計5種類である。

このうち、ミー散乱型レーザーレーダーは大気中のエアロゾルによる散乱、すなわちミー散乱光強度を遠隔的に計測して大気状態に関する情報を取得する装置である。そして、本特別研究では、広い領域を極めて高感度で測定する機能を有する大型の装置（以下これを大型レーザーレーダーと呼ぶ）、計測車に搭載して移動測定が可能な装置（計測車型レーザーレーダー）及び、取り扱いが容易で、全天候型の装置（簡易型レーザーレーダー）の3機種についての技術開発を行った。

DIALは、測定対象となる気体が光を良く吸収する波長と、吸収の少ない波長の2本のレーザー光を用いて、その吸収量の差から、特定の気体の量を計測する装置である。

長光路吸収方式は、送信レーザー光源と受信器を距離を離して設置し、この間を通過するレーザー光が、特定の気体により吸収される量から、その気体の濃度を計測する装置である。この方式はレーザーレーダーのように距離の分解能を持たせることはできないが、比較的簡単な装置で極めて高感度な測定が行えることが特徴である。したがって、大気状態について包括的な情報を得たいという要求に対して、レーザーレーダーと相補的な役割を果たすことが可能である。

本研究においては、前節に掲げた研究目標ごとに使用する装置が異なっている。1)広い領域で

のエアロゾル濃度分布の定量化、2)エアロゾルをトレーサーとした混合層構造の観測、及び 3) 風系の観測についてはミー散乱レーザーレーダーが有効である。4) NO<sub>2</sub> の測定、5) 大気中微量物質の測定にはそれぞれ DIAL 方式と長光路吸収方式が使用される。

以下に、これらの目標達成までの過程を、装置ごとに分類して述べる。

### 2.1.1 ミー散乱型レーザーレーダー

#### a) 装置の製作

レーザーレーダーの測定可能領域は、送信レーザー光のエネルギーと、受信鏡の面積の積に比例する。大型レーザーレーダーはこの積の値が、世界に類を見ない程大きい。本装置の設計に当たっては、最良の感度を得るためのレーザー波長の選択、大型の装置を機械的に精度良く動作させるための新機構の選択、操作を容易にするための集中モニター及びコントロールシステムの導入などに留意した(本特別研究報告 R-34-'82, III-1)。

現在、これと同規模の装置は世界各地で計画がなされており、本装置は、レーザーレーダー装置の大型化に先鞭をつけたと言える。

レーザー装置及びこれを用いたレーザーレーダー装置は光学精度での調整が必要である。計測車型レーザーレーダーは、全国どこへでも移動し、直ちに計測が可能なが要求される。したがって、この装置の設計、製作に当たっては、防振対策に最も重点が置かれた。また、設置面積の限られた計測車に搭載するために、装置全体が小さな容積に納まるよう設計された(R-16-'80, III-1)。

簡易型レーザーレーダーは、計測車及び大型レーザーレーダーを製作した経験に基づき設計された。従来のレーザーレーダーは装置が複雑で、使いこなすためにかなりの知識が必要だった。そのため、作る立場とそれを使う立場の間に大きな溝があり、それがレーザーレーダーの研究の発展を遅らせていたという反省があった。この反省に基づき、専門家でなくても取り扱える装置を目指したのがこの装置である。このような発想は、当時はまだ珍しかったが、今日に至り、このようなレーザーレーダーの必要性が世界中で叫ばれるようになってきた。

さて、この装置は、全体をコンテナに収納し、受信鏡にも防水を施したことにより、全天候型で、あらゆる気象条件下で使用可能となった。装置の動作は、電源スイッチの投入のみで行うことができ、昼夜を問わず連続観測ができる(R-49-'84, II-1)。

ところで、レーザーレーダーは、レーザー光を大気中に送出し、大気中の物質によるその散乱光を受信鏡で集めるというのが基本動作である。実際の測定ではこうして集められた光を光検出器で電気信号に変換したうえ、信号処理を行う。また、平面的あるいは立体的な情報を集める場合には、レーザー光と受信鏡を同時に掃引する。このようにして得られるデータの量は一般に膨大である。しかも、掃引には高い精度が要求される。さらに、全測定が自動化されれば省力化につながる。このような理由から、最近ではレーザーレーダー装置は全体がコンピュータで制御さ

れるのが通例である。ここで製作された装置もすべてにコンピュータが使われている。測定が、正確にしかも効率良く行われるためには、コンピュータを動作させる測定プログラムの完備が必要である。本特別研究では、それぞれの装置ごとに、考え得るすべての測定方法に対応できる測定プログラムを開発した (R-34-'84, III-3)。

#### b) 計測装置の性能評価

ミー散乱型レーザーレーダーの性能を評価するには、イ) 装置の各構成要素の性能評価、ロ) 測定値に混入する雑音の評価、ハ) 測定値に影響を及ぼす系統的な誤差の評価の3点をまず行う必要がある。そして、これらの評価結果が、所期の性能を満足していることを確認した上で、総合評価を行う。

各構成要素についての評価は、それらの要素ごとに評価法を考案し、あるいは評価のための特別な装置も作成した。特に、大型レーザーレーダーについては、レーザーパワー絶対値モニター、光軸モニター等の装置を試作した (R-34-'82, III-2)。

レーザーレーダーは高出力のレーザーパルスを発射して、極微弱な信号光を受信する装置であるから、電氣的な雑音には非常に弱い。レーザーレーダー信号に混入する雑音には、レーザーがパルス発振を行う際に生じるもの、掃引の際に掃引用モーターから発生するものなどが代表的である。これらは、雑音源と信号回路系に各種の雑音対策を施すことで解決を図った (R-34-'82, III-2)。

系統的な誤差は、遠方を測定する際に特に顕著に現れる。しかも、本特別研究で目指した測定距離は、これまでのレーザーレーダーでの測定距離に比べてはるかに遠方である。したがって、この問題は、本特別研究において、初めて大きな問題として取り上げざるを得ず、しかも、解決を迫られる問題でもあった。

系統的誤差には、イ) 光検出器に原因があるもの、ロ) 遠方と近傍を同時に測定する必要上、非常に強弱の激しい信号の検出が要求されることによるもの (R-39-'83, II-1 及び R-39-'83, II-2)、ハ) 地球表面が曲率を持っていることと、空気の屈折率に高度による違いがあることにより、測定位置に誤差が生じるということによるもの、の3点がある。これらには、それぞれに対応した解決法を見いだすことができた。(R-77-'85, II-1)。

レーザーレーダー装置の総合評価は、大型レーザーレーダーについては高層に存在する空気の密度を測定し、その結果得られる測定誤差と理論的に求められた誤差とを比較することにより行った。この方法では絶対的な誤差の評価が可能であることが特徴である。測定の結果、許容される範囲内で理論値と測定値は一致し、この装置が設計どおり動作していることが確認された (R-77-'85, II-1)。

#### c) データ処理手法の開発

レーザーレーダーで得られたデータから環境状態についての有用な情報を引き出すためには、各種のデータ処理手法を用いてデータの変換を行う必要がある。

レーザーレーダーで受信されたそのままのデータは次のような性質を持っている。イ) 距離の2乗に反比例して減衰する。ロ) 太陽光などの背景光に起因する雑音が重畳されている。ハ) 光検出器の性質と、信号光が非常に弱いことのため、ランダムな誤差を含んでいる。これらのうち、イ)、ロ)の扱いに関しては、各種の方法を試みたが、最も遠方の区間からのデータの平均値を信号がゼロの状態と見立てて処理を行う方法が採用された(R-34-'82, III-4)。ハ)は、繰り返し測定による信号の加算あるいは、距離方向のデータのスムージングにより、影響を軽減することができるが、求めるべき情報や測定対象との関連から、加算数、スムージング区間の最適化の手法を検討した(R-39-'83, II-3)。

レーザーレーダーからは1回の測定について、レーザービームの進行方向の一次元データが得られる。だが実用上は水平・鉛直の掃引を行ったりあるいは、長時間測定を繰り返すことによって二次元のデータを得ることが多い。この場合、得られた一組の一次元データを合成して、二次元の画像データに変換する手続きが必要となる。このような画像データはデータ数が非常に大きいため、本特別研究では、効率良く短時間で変換を行うコンピュータプログラムを完成させた(R-34-'82, III-4)。

こうして変換された画像データには、主にレーザーレーダー近傍の障害物、例えば高圧線からの強い散乱によって生じる特異な部分も含まれる。この特異なデータを自動的に検出して取り除く技術いわゆる“ピーク雑音の除去”技術は本特別研究で完成され、まず、MSS画像データに応用し(R-38-'83, II-8)、さらに、レーザーレーダーデータにも適用した(R-39-'83, II-4)。

以上の過程で、雑音を取り除かれ、高精度化されたデータの表示手法の開発も、データ処理においては重要な過程である。それには、得られたデータを目的に応じて使用することを容易にすることと、データの内容を把握し易くすることの二つの意義がある。本特別研究では、コンピュータを用いた汎用のデータ表示法を開発するとともに(R-39-'83, II-5)、データを微分変換することにより(エッジ強調法)、データの特徴を抽出する方法を開発した(R-49-'84, II-3)。

#### d) 環境情報の抽出手法の開発

二次元のレーザーレーダーデータから、本特別研究の研究目標であった、環境情報を求める手続きについて各目標別に述べる。

##### i) 広域エアロゾル濃度分布の定量的測定

エアロゾルによる大気汚染は、直接的な人体影響、視程の低下、直達日射量の減少等を通じて人間生活に影響を与える。このような意味での大気汚染の実態把握を行うためにレーザーレーダー観測を行う場合には、消散係数(エアロゾルによる光の減衰の度合を表す量)によって表さ

れたエアロゾル濃度の絶対値の分布を精度良く測定することが重要である。また、広い領域のエアロゾル濃度分布が短時間の測定で得られることが望ましい。

本特別研究では、まず、レーザーレーダー信号からエアロゾル濃度の絶対値を導き出す手法について検討した。そして、この検討結果に基づいて大型レーザーレーダーの観測結果を解析した結果、良好な条件の下では、東京上空を含む半径 50 km 圏のエアロゾル濃度分布を精度良く求めることが可能なことが明らかになった。

具体的な研究内容は以下のとおりである。

まず、レーザーレーダー信号からエアロゾル濃度を導き出す各種の手法（レーザーレーダー方程式の解法）の検討を行い、消散係数の絶対値が安定に得られる解法を見いだした。この解法によって得られる消散係数の精度は、散乱パラメーター（消散係数と体積後方散乱係数の比）の精度、及び、レーザーレーダー方程式から得られる微分方程式の境界条件の精度に依存する。本特別研究では、この依存性についてシミュレーションを行い、散乱パラメーターの重要性を明らかにした（R-77-'85, II-2）。

次に、レーザーレーダーと光散乱粒子計数器を用いて散乱パラメーターを測定する手法を開発した（R-77-'85, II-3）。

さらに、境界条件を実測データから精度良く決定する方法を開発し、消散係数の分布を定量的に求めることが可能になった。

開発された手法を用いて、東京・千葉上空を含む半径 50 km 圏の二次元エアロゾル濃度分布を求めた。このデータから、東京付近のエアロゾル濃度が周辺地域より高いことや、エアロゾルの発生源、エアロゾルの拡散の様子が容易に読み取ることができる（R-77-'85, II-4）。

本特別研究におけるこの成果は、半径 50 km 圏のエアロゾル濃度分布を定量的に求めた世界で最初の例として重要であることはもちろん、応用上の価値にも計り知れないものがある。

ところで、大型レーザーレーダーによって 50 km 遠方のエアロゾル濃度を測定した場合、地球の曲率のために地上 180 m 上空を観測したことになる。したがって、エアロゾル濃度の鉛直分布の観測を行い、モデル化することが重要である。本特別研究では、エアロゾルの鉛直分布を推定するモデルを開発し、気象研究所の鉄塔を利用した実測との比較を行い、モデルの有効性を確認した（R-77-'85, II-8）。

## ii) 風系遠隔計測

大気汚染質の移流現象の解明にとって、風向・風速の空間分布は欠くことのできない情報である。ところが、従来上空の風向・風速の観測に用いられていたパイロットバルーンでは、時間的・空間的に連続したデータを得ることは困難であることが、実験的に明らかにされた（R-34-'82, III-6）。

そこで、本特別研究では、レーザーレーダーによって得られるエアロゾル分布パターンの移動から風向・風速の空間分布を抽出する手法を提案した（R-34-'82, III-5）。

次に、大型レーザーレーダーを用いた実測データにこの手法を適用した。その結果は、気象研究所の鉄塔に設置した風向風速計のデータと良い一致を示した。これによって、風向・風速の空間分布の遠隔計測にレーザーレーダーが有効であることが確認された (R-34-'82, III-7)。

### iii) 混合層の構造・発達過程の研究

混合層の高さは、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もっている。この混合層は、早朝から日中にかけて発達することがわかっている。そこで、本特別研究では、

- 1) 大型レーザーレーダーを用いて、混合層の構造の時間変化を観測すること、
- 2) 混合層構造の時間変化のシミュレーションモデルを開発し、観測値と比較すること、
- 3) 混合層高度の常時モニタリング手法を開発すること、

を重点に研究を進めた。

1)では、先に述べたエッジ強調法により混合層上部の対流セル構造を明確にとらえられることを利用して、混合層高度及び遷移層中に見いだされる対流セルの鉛直・水平スケールの時間変化を明らかにした。また、同時に気象要素の鉛直分布、地表面熱フラックス、放射収支量の観測を行い、シミュレーションモデルとの比較が可能な一連のデータを得ることができた (R-49-'84, II-4)。

2)では、まず、混合層高度の予測などに利用できる実用面に優れたシミュレーションモデル(バルクモデル)を改良し新しいバルクモデルを開発した。このモデルの重要な特長は遷移層厚さの記述が可能なことである。これによって、混合層高度と遷移層厚さの時間変化について、シミュレーション結果と観測値の比較が可能になった。この結果、両者は良く一致しており、開発されたシミュレーションモデルの妥当なことが明らかになった (R-49-'84, II-5)。

大気汚染のルーチン的な予測に、実時間で混合層高度の情報を導入することにより、より一層の予測の高精度化が期待される。本特別研究では、この目的のために製作された簡易型レーザーレーダーを用いて、夏季に延べ13日間の連続観測を行い、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。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 (R-49-'84, II-2)。

混合層の発達に関するこれら一連の成果は、世界のレーザーレーダー研究の中での先駆的な役割を果たしている。さらに、混合層の発達のシミュレーションモデルの開発と混合層高度常時モニタリング手法の開発を通じて、大気汚染のルーチン的な予測におけるレーザーレーダーの有効性を実証したことは大きな意義をもっている。

#### 2.1.2 DIAL (差分吸収レーザーレーダー)

本特別研究では、DIALをNO<sub>2</sub>測定のために新開発し、その有効性を試すことが目的であった。DIAL方式の原理は、古くから提案されていたが、波長同調可能な高出力の有機色素レーザーの

普及に伴って、現実的に使用可能な技術として注目を集めるようになった。この時期が本特研の開始時とほぼ一致している。

本特別研究の開始に当たり、NO<sub>2</sub>を遠隔的に測定するための方法をいくつか検討した結果、地上付近での測定においてはDIAL方式が最適であることが結論された(R-34-'82, II-2)。

この結論に基づき、色素レーザー自身の開発も含めた装置の製作を行った。色素レーザーは市販のフラッシュランプ励起型のものに改良を加え、波長同調性を向上させ、また出力の安定性も増加させた。

このレーザーを用いて二つの波長を時間的に交互に取り出す方式を採用した。レーザー部分を除くと、レーザーレーダー装置の構成は、計測車型レーザーレーダーとほぼ同じである。

完成した装置の性能評価は、国立公害研究所のボイラー用煙突からの排煙を対象に行った実測に基づいて検討がなされた。その結果、排煙中のNO<sub>2</sub>濃度のピーク値0.17 ppmに対して、0.03 ppmの誤差で測定できることが示された。この結果から排煙のように高濃度NO<sub>2</sub>を計測するには十分な性能を有していることが結論された(R-34-'82, II-8)。さらに、色素レーザーの2波長を同時に発振させる方式を用いたシステムも試作し性能評価を行った(R-77-'85, II-6)。

ごく最近になりヨーロッパ各地では、DIALシステムを用いて煙源からのNO<sub>2</sub>濃度の測定を行う試みが盛んに行われだしたが、本特別研究の成果は、このような動きに先行している。

しかし、日本の環境汚染の現状は、ヨーロッパに比べて格段に良好であり、高濃度の測定が可能な技術ではもはや社会的な要請に応えることができなくなってきた。そこで、これまでの成果を発展させてより高精度でNO<sub>2</sub>の環境濃度の計測が可能なシステムの検討を行った。これに基づき、フラッシュランプ励起色素レーザーより多くの点で高性能であるYAGレーザー励起色素レーザーを導入して基礎的研究を進めた。そのひとつはNO<sub>2</sub>の分光学的性質に関する研究である(R-49-'84, II-7)。

また、YAGレーザー励起色素レーザーを用いたDIALシステムの測定精度に関する研究、すなわちエアロゾル後方散乱係数の時間変化により生じる測定誤差の評価、2波長の消散係数の違いに起因する系統的な誤差の評価などの実験的研究を行った。その結果、DIALシステムの高精度化のためには0.1秒以内に2波長の切替えを行う必要があること、使用する二つの波長の差をできるだけ小さくする必要のあることなどが明らかになった。そして、結論として、10 ppbレベルのNO<sub>2</sub>の測定が可能となる見通しが得られた(R-77-'85, II-5)。

以上に述べたように、DIAL方式に関しては、所期の目的であった煙源からのNO<sub>2</sub>濃度を十分な精度で測定できる性能を有する装置を完成させることができた。そして、新たな要請である、低レベルの環境濃度の計測に応えられる装置開発の可能性の検討も行った。その結果は、次期の特別研究に受け継がれるべきものである。

### 2.1.3 長光路方式モニタリングシステム

本特別研究では、長光路方式の特徴を有効に使用するため、最近発展が著しい半導体レーザーを光源として使用した装置の製作を行った。半導体レーザーは赤から中赤外の波長領域で発振するが、極めて小型でエネルギー効率も良い。しかも量産すれば価格も著しく安価とすることができる。

本特別研究ではCOを測定対象として選び、これを実測することにより、長光路方式の有効性を実証することを目的とした。

機器の製作においては良好な出力特性の半導体レーザーを選ぶことと、信号の検出法にどのような方式を選択するかがポイントであった。半導体レーザーについては機器の設計段階ではホモ接合構造の鉛-イオウ-セレン化合物を材質とするレーザーが最適であった。信号検出法には2波長差分吸収法、周波数変調一次導関数法、同二次導関数について理論的検討を行い、二次導関数が最も優れていることを確認した。

試作した装置を用いた動作実験の結果、レーザー出力と、レーザー波長の安定性など、レーザー光源自体の特性が、精度に最も大きく影響を与えることが判明した。これについては、レーザーに周波数安定化回路を取り付けることなどの対策により解決を図ることができた(R-39-'83, II-7)。

ここで得られた成果は、現在、特別研究「バックグラウンド地域における環境汚染物質の長期モニタリング手法の研究」に受け継がれ、本格的な実用化を目指した機器として完成しつつある。

## 2.2 水域・陸域の遠隔計測手法の開発

水域、陸域の遠隔計測は、通常、地表面や水中から反射、散乱された太陽光の波長特性から対象の状態を推定することにより行われる。光の波長特性を計測するためには、波長をいくつかの帯域に分割して、その帯域での光のエネルギーを計測する多重分光走査装置(MSS)が使用されることが多い。MSSにより得られたデータから有効な環境情報を抽出するためには、各種雑音の除去手法の開発、分布図作成のためのデータ処理手法の開発などが必要となる。本節では、MSSデータを利用して、水域、陸域における環境情報を抽出するための情報処理手法について得られた成果を概説する。

### 2.2.1 湖沼の水質分布計測

この研究では、人工衛星(LANDSAT)及び航空機に搭載したMSSにより得られたマルチスペクトル画像データから、水域の透明度、SSの濃度、クロロフィル-aの濃度を推定し、水質分布図を作成することを目的とした。その結果、MSSデータから水質を推定するための統計的モデルの開発、水質推定に及ぼす大気散乱光や水面反射光など雑音による影響の評価、等に成果を得た。

水中に入った太陽光は、水中の物質や水自身によって、吸収されたり散乱されたりするが、こ

これらの仕方(分光特性)は、物質によって異なるため、水中に入って再び水面上に出てきた光は、水中の物質に関する情報を含む。水質の遠隔計測では、この水面に出てきた光の分光特性を MSS などの遠隔計測装置を用いて計測し、その特性から水中の物質の組成、量などを推定することにより行われる。

そこで、水質の遠隔計測を行うためには、第一歩として、水面に出てきた光の分光特性と水質との関係を定量的に調べなければならない。本特別研究では、このためにまず、野外において高速で対象の分光特性を計測するための高速ラジオスペクトロメータを設計、製作した(R-77-'85, II-9)。

さらに、このスペクトロメータを用いて、水域において、水の分光特性(水面直上における上方向放射輝度)を計測し、水質との関連を調べた。各波長における水面直上の上方向放射輝度と水質(SS 透明度、クロロフィル-*a*)との回帰分析を行った結果、特定の波長において、水面直上での光の分光特性と水質との間に相関関係がみられ、水の遠隔計測の可能性が示された。

次に人工衛星、航空機に搭載した MSS により得られるデータと水質との関係を、回帰分析により調べた。この結果、透明度と SS については、人工衛星、航空機 MSS のデータと、クロロフィル-*a* については航空機 MSS のデータと高い相関を有することが示され、水質推定のための統計モデルを作成した。これによって、遠隔計測データから水質分布を推定することが可能となった。

しかしながら、数回の実験を通じて、水質と MSS データの間に相関関係が示されたものの、実験ごとに水質推定モデルが異なる(回帰式の回帰係数が異なる)ことが判明した。これは、MSS で検知される光には、水中からの光(信号光)の他に大気からの散乱光や水面での反射光などが雑音として加わるため、時期、水域が異なると、大気や水面の状態が変わると回帰モデルも変化してしまうためと考えられた。

そこで、本特別研究では水質推定モデルに及ぼす、(i) 大気散乱光の影響、(ii) 水面反射光の影響、(iii) 水質組成の違いによる影響、を定量的に評価することを行った。

まず、MSS により検知される輝度エネルギーと水面直上において計測された上方向放射輝度との回帰分析を行い、大気の透過率及び光路輝度(散乱光輝度)を推定した。この結果、MSS により検知される光の 70~90%は大気からの散乱光であり、この影響が極めて大きいことが示された。また、大気の透過率や光路輝度の推定値を用いて補正した MSS データと水質との間の回帰モデルが大気の状態によらず安定する傾向があることが示され、補正効果が実証された。

次に、水面直上における上方向放射輝度と水面直下における上方向放射輝度の回帰分析を行い、水面反射光の強さを推定した。この結果、水面直上の上方向放射輝度のうち、40~50%が水面反射光であり、水面反射光の影響が大きいことが示された。

以上の結果、遠隔計測による水質の定量においては、大気散乱光や水面反射光による影響が大きく、これらの除去が不可欠であることが判明した。しかしながら、これらの除去方式については、開発の余地が大きく今後の課題である。

本特別研究ではさらに、水域における水質特性の違いを定性的に把握するために、統計的な分類方法(クラスター分類, 最尤法分類)を用いて、水域を分割する手法の開発を行った。LANDSAT データに適用した結果、流況や水質組成の違いといった水域の定性的なパターン特性が計測されることが示された (R-39-'83, II-9, R-77-'85, II-10)。

#### 2.2.2 土壌水分の計測

土壌水分の分布は、地盤沈下や植生環境の状態を知る上で有効な情報となる。地表の土壌水分の量は、地表温度と密接な関係にあることが知られており、人工衛星や航空機に搭載した MSS の熱赤外チャンネルデータから地表の温度分布を計測することにより、間接的に、土壌水分量を推定することが可能と考えられる。

本特別研究では、航空機 MSS データ及び地表における土壌含水量、地表面温度データの収集を行い、これらのデータを基に、MSS データと地表 5 cm までの土壌含水地との間に高い相関があることを確かめた。さらに、この結果に基づき、MSS データから土壌水分を推定するモデルを作成した (R-77-'85, II-11)。

#### 2.2.3 MSS 画像の領域分割

MSS 画像を利用して、土地利用分類、植生分類を行うことは、遠隔計測の重要な目的の一つである。従来、MSS 画像の分類には、最尤法、線形判別法などが利用されてきた。後者は、計算も簡単であり、前者に比較しデータに対する頑健性を有しているが、各カテゴリーの分散が等しくなければならない、という仮定が必要であるため、実際のデータへの適用は困難であった。本特別研究では、各カテゴリーの分散が異なった場合の線形判別関数を提案した。MSS データの分類に適用し、良好な結果を得た (R-77-'85, II-12)。

#### 2.2.4 ピーク雑音の除去

遠隔計測によって得られた画像には、走査線雑音、粒状雑音などのピーク状雑音が含まれることがある。ここでは、ピーク状雑音を対象として、これを統計的に検出し、除去する方法を開発した。この方式は、画像が小領域において多項式近似モデルに従うと仮定し各画素がその近傍領域において推定された画像モデルから著しく外れているか否かを統計的に検定することによりピーク度を判定する。航空機により収集された走査性雑音を有する MSS データの画像に、本方式を適用し良い結果を得た (R-39-'83, II-8)。

### 2.3 遠隔計測データの解析と利用

遠隔計測は、対象領域の環境状態を二次元的に計測することを可能にする。レーザーレーダーや MSS によって、大気中のエアロゾルの分布や水中のクロロフィルの分布などが計測されるこ

とは、先に述べたとおりである。これらの二次元データが、従来の観測点における測定点データと比較し、膨大な情報を我々に提供することはいうまでもない。しかしながら、これらの情報を、現象解明さらには環境施策へ活用していくためには、効果的なデータ表示手法をはじめとして、データの解析手法やモデル化手法の開発が不可欠である。本節では、これらの手法について研究の成果を概説する。

### 2.3.1 画像強調問題の最適化による定式化

レーザーレーダー画像を始め、汚染濃度分布を表す画像から、観察者が適切に情報を取り出すためには、濃度階調変換による画像強調を行わなければならない。観察の目的が濃度の比較を含めたものとなることから、変換のクラスは区分線形変換に限られる。本研究では、まず、ヒストグラム平坦化による画像強調を検討した。次に、区分線形変換のクラスに限られた画像強調問題を画像のヒストグラムのエントロピーの最大化として定式化した。さらに、エントロピーと密接な関連を持つ最適量子化基準を導入し、この画像強調問題を考えるのに適した最適化問題の族を構成した。画像の観察者は、この問題の族の中から自分の観察目的に最も良く適合したものを選び出して、画像強調をすることができることとなった。大型レーザーレーダーによる画像に、これらの方法を適用して比較検討したところ、良い結果が得られた (R-39-'83, II-6, R-49-'84, II-8, R-77-'85, II-13)。

### 2.3.2 道路近傍での汚染物質の拡散を記述する正確な方程式の導出法

大気汚染物質の拡散を記述する正確な方程式は、大気汚染予測やアセスメントにとって欠くことのできない基本的なものである。これまで、排煙のように定常的に排出される汚染源については、多くの研究成果が得られており、実用に供されているものも少なくない。しかしながら、道路上の車両から排出される汚染物質は、交通量や、信号によって排出量が時間的に変動する。このことは道路近傍におけるレーザーレーダーを用いたエアロゾルの観測によって明らかにされたとおりである (R-49-'84, II-6)。このような場合については、基礎データの不足もあって、これを正確に記述することは困難であり、従来、平均交通量などをもとにして作られた方程式を使用していた。

一方、レーザーレーダーで測定された鉛直断面での汚染分布データを用いれば、汚染物質の時間的変動を正確に記述することができる。本特別研究では、まず、道路周辺での汚染ガス気体とエアロゾル分布のシミュレーションモデルを作成した (R-77-'85, II-7)。

さらに、このモデルとレーザーレーダーによって得られたエアロゾル分布を結合して、道路近傍での汚染物質の拡散を記述する正確な経験式を得た (R-34-'82, II-4)。この経験式が従来のものと異なる点は、交通量の変動による生ずる汚染物質の最大値と最小値が求められる点にある。この結果は、汚染物質による生体影響を論ずる際に、影響が最大値で効くのか平均値で効くのか、

といった議論に対しての基礎資料を与える点で有効と考えられる。

### 2.3.3 大気汚染測定網の性能評価

地上の汚染濃度を測定するのに、レーザーレーダーがどの程度有用であるかを検討するために、これと競合する関係にある大気汚染測定局網の性能評価の検討をした。まず、大気汚染測定局網から得たデータから、空間的に連続した汚染分布を推定する方法を与えた。次に、経済性向上のため既存の測定局網の見直しをする手続きを与えた。技術比較は、それぞれの技術を最も効率良く運用した状態でなされるべきであり、本研究では、遠隔計測技術の実用性の評価の基礎となる (R-39-'83, II-10)。

### 2.3.4 遠隔計測データによる地上局配置

大気汚染地上測定局の配置を決定するために、レーザーレーダーデータを用いる方法を与えた。この研究では、まずレーザーレーダーデータを平滑化し、縮約する方法を検討した。次に、平滑化によって得られた分布パターンを、補間法によって最も良く再現できる測定点の組を、コンプレックス法による最適化計算により求めた。こうして得られた測定局の組は離散的な地上観測局の配置に対応すると考えられる (R-49-'84, II-9)。この研究はレーザーレーダーを地上測定局網の計画や診断に用いるという方向を示したものである。

### 2.3.5 大気汚染の最適移動計測計画

移動計測車で、鉛直上方の大気汚染を観測することは、本特別研究を発展させた新しい特別研究の一つの課題である。本研究では、観測を効率良くするために、移動計測車を用いるときの最適観測計画について考察して、対象全域の観測誤差分散の総和を最小にするような計測車の巡回スケジュールの決定法を、探索理論を用いて与えた。この手法は、システムモデルや評価関数を適当に修正することによって、より現実的で複雑な状況に対しても、容易に拡張される (R-77-'85, II-14)。

## 3 まとめ

本特別研究の目的は、遠隔計測技術を環境計測分野へ導入することの可能性を探ることであった。そのために、環境分野への利用上有用な目標をあらかじめ定め、この目標の実現のために必要な一連の研究を行った。

遠隔計測技術は、従来の一点の測定法に比べて、時間的、空間的広がりを持つ情報を与えるという特長を有していることはこれまで強調してきたとおりである。このように大きな特長を持つ一方で、遠隔計測技術を実用的な段階にまで引き上げるためには解決しなければならない多くの問題を抱えていた。装置について言えば、ポイントサンプリングの測定装置に比べて複雑化せざ

るを得ず、設計、製作が難しいことはもとより、システム全体の性能の評価にも、詳細な検討が必要である。また、得られたデータが、そのまま有用な結果とはならず、高度な情報処理過程と、情報抽出の過程を通さなければならない。本特別研究ではこのように、一連の互いに結びついた研究をもれなく行った結果、遠隔計測技術は初めて実用的な技術として使用できるようになった。

本文では、レーザーレーダー技術と MSS 技術の双方について研究の過程を述べてきた。本特別研究の結果、大気領域では、半径 50 km の領域でエアロゾル濃度分布が正確に求められ、風向、風速の遠隔測定が可能となり、大気境界層の構造が把握できるようになった。また、排煙中の NO<sub>2</sub> 濃度など、大気汚染気体そのものの濃度分布も求められるようになった。

水域では、SS、透明度、クロロフィル-*a* など水質汚濁の重要な要因となる量が、人工衛星や航空機に積んだ MSS により測定可能であることが示された。

また、陸域では土壌水分が MSS により求められることが明らかになった。

こうして得られた情報を目的に合った表現法で表示する手法を開発したうえで、道路近傍での汚染物質の拡散を記述する正確な方程式の導出が可能となり、モニタリングステーションの最適配置を検討する手法が開発され、遠隔計測による測定の最適化を行うことができるようになったことを述べた。

今後、ここで得られた成果は、時代の要請に応じて動的な環境状態を把握する技術や、より広範囲に広がる環境汚染の実態を計測する技術へと発展させる必要がある。また、日本全国へ、遠隔計測技術による観測網を広げて地域ごとの環境保全に役立つ精度の高い環境情報を提供するための方策を探る努力も行っていくべきである。

最後に前 3 か年の研究報告の題目と本特別研究に関する印刷物、口頭発表のリストをまとめて掲載する。

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所内外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、地方自治体の関係者に深く感謝の意を表す。

## 研究報告 既刊リスト

昭和 55 年度特別研究報告、第 34 号、(R-34-'82)  
「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」

### 報 文

- III-1. 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
2. 大型レーザーレーダーの性能試験
3. 大型レーザーレーダーにおける測定用ソフトウェアプログラムの開発
4. レーザーレーダー画像データ処理表示手法の開発

5. レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向・風速の遠隔的計測法
6. 単経緯儀法によるパイバル観測により得られる大気境界層中の風向・風速値の時間・空間代表性
7. スキャニング・レーザーレーダー観測による空間相関法を用いた水平風ベクトルの決定
8. 差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中の NO<sub>2</sub> 濃度分布の測定

昭和 56 年度特別研究報告, 第 39 号, R-39-'83  
「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」

報 文

- II-1. 白色雑音を利用した AD 変換器分解能改善法
2. レーザーレーダー信号の高精度収集法
3. レーザーレーダー信号の積算平均による S/N 比改善
4. 大型レーザーレーダーによる広域観測画像の修復法
5. 大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布の計測  
—— 高品質画像データの収集のための測定方法, データ処理法の検討 ——
6. 大型レーザーレーダーによる画像の強調と雑音除去
7. 中赤外半導体レーザーを用いた汚染気体の高感度計測装置の基本特性
8. リモートセンシング画像におけるピーク雑音の除去
9. 遠隔計測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 ——
10. 大気汚染測定系の総合評価のための基礎的研究  
—— 地上測定展開の評価と構成 ——

昭和 57 年度特別研究報告, 第 49 号, R-49-'84  
「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」

報 文

- 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
2. レーザーレーダーによる混合層高度の連続自動観測
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 ——
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
5. 大気混合層高度と遷移層厚さの時間変化モデル
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
7. NO<sub>2</sub> の分光特性と遠隔計測への応用上の問題点
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
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

# 成果発表一覧

## 印刷発表

〔大気領域〕

昭和55年度

発表者	題目	掲載誌	巻(号)	ページ	発行年
笹野泰弘・清水 浩・ 杉本伸夫・松井一郎・ 竹内延夫・奥田典夫	コンピューター制御されたレーザー レーダーによる大気境界層の日変化 の観測	文部省「環境科学」特別 研究「遠隔計測」による 環境情報の収集に関する 基礎研究 研究班、遠隔 計測による環境情報の収 集と解析		180-188	1981
清水 浩・笹野泰弘・ 竹内延夫	レーザーレーダーを用いた空間相関 法による気体速度の遠隔的測定法	レーザーレーダーと赤外 計測技術による火山噴煙 動態のリモートセンシ ングの総合的研究、文部省 科学研究費補助金総合研 究 (A) 研究成果報告書		28-35	1981
清水 浩・杉本伸夫・ 松井一郎・笹野泰弘・ 竹内延夫	計測車搭載型コンピュータ化レー ザーレーダーの開発	文部省「環境科学」特別 研究「遠隔計測」による環 境情報の収集に関する基 礎研究」研究班、遠隔計 測による環境情報の収集 と解析		168-179	1981
H. Shimzu, Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo, M. Okuda	A mobile computerized laser rader system for observing rapid- ly varying meteorological pheno- mena	Opt. Quantum Electron.	12	159-167	1980
杉本伸夫・竹内延夫	差分吸収レーザーレーダーによる排 煙中の NO <sub>2</sub> 濃度の測定	遠隔計測による環境情報 の収集と解析、文部省「環 境科学」特別研究「遠隔 計測」による環境情報の収 集に関する基礎研究」研 究班		189-196	1981

昭和56年度

清水 浩・笹野泰弘・ 安岡善文・植田洋匡・ 竹内延夫・奥田典夫	レーザーレーダーを用いた空間相関 法による風向、風速の遠隔的測定	応用物理	50	616-620	1981
清水 浩・竹内延夫・ 笹野泰弘・杉本伸夫・ 松井一郎・奥田典夫	広域大気汚染観測用レーザーレー ダーの設計と製作	応用物理	50	1154-1164	1981
清水 浩・笹野泰弘・ 安岡善文・松戸 修・ 竹内延夫・奥田典夫	コンピューターによるレーザーレー ダーデータの画像表示法	電子通信学会論文誌	J64-C (4)	242-249	1981
清水 浩・飯倉善和・ 笹野泰弘・竹内延夫	ディザ信号の重畳による A-D 変換 器分解能の改善法	電子通信学会論文誌	J64-A	963-969	1981
杉本伸夫・竹内延夫・ 奥田典夫	差分吸収レーザーレーダーによる排 煙流中の NO <sub>2</sub> 濃度分布の測定	応用物理	50(9)	27-32	1981

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	発行年
竹内延夫	レーザーレーダーで大気を探る	化学の領域	35(6)	39-44	1981
竹内延夫	レーザーレーダーの現状	分光研究	30(3)	185-186	1981
竹内延夫	半導体レーザの分光・計測への応用	電子科学	31(6)	37-44	1981

昭和57年度

Y. Sasano, H. Hirohara*, T. Yamasaki*, H. Shimizu, N. Kawamura* (*Univ. Tsukuba)	Horizontal wind vector determination from the displacement of aerosol distribution patterns observed by a scanning lidar	J. Appl. Meteorol.	21	1516-1521	1982
Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takeuchi	Convective cell structures revealed by Mie laser radar observations and image data processing	Appl. Opt.	21	3166-3169	1982
Y. Sasano, A. Shigematsu*, H. Shimizu, N. Takeuchi, M. Okuda (*Univ. Tsukuba)	On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser radar and low level radiosonde observations	J. Meteorol. Soc. Jpn.	60	889-895	1982
笹野泰弘・松井一郎・清水 浩・竹内延夫	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	1983
S. Takezawa*, N. Sugimoto, N. Takeuchi (*Gumma Univ.)	Decay times of dispersed NO <sub>2</sub> fluorescence excited in the blue region	Jpn. J. Appl. Phys.	21	809-812	1982
N. Sugimoto, S. Takezawa*, N. Takeuchi (*Gumma Univ.)	Time-resolved, dispersed laser-induced fluorescence of NO <sub>2</sub> : observation of collision-induced energy transfer effect	Jpn. J. Appl. Phys.	21	1536-1538	1982
杉本伸夫・竹内延夫	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	1982
竹内延夫	環境計測と光学	光学	11(1)	107-113	1982

昭和58年度

植田洋匡・笹野泰弘	レーザーレーダーで観測された大気混合層の構造	文部省「乱流現象の解明と制御」研究成果報告書	2	11-14	1983
笹野泰弘・松井一郎・清水 浩・竹内延夫	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(2)	175-183	1983
Y. Sasano, H. Nakane	Significance of the extinction backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation	Appl. Opt.	23(1)	11-13	1984
N. Takeuchi, H. Shimizu, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui, H. Nakane	Wide-area air pollution measurement by the NIES large lidar	Optical and Laser Remote Sensing, Springer Series in Optical Science Vol. 39 (D. K. Killinger, A. Mooradian, ed., Springer-Verlag)		364-373	1983

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	発行年
竹内延夫・清水 浩・ 杉本伸夫	レーザーレーダーによる大気状態の 測定	応用物理	52	644-656	1983
S. Takezawa*, N. Sugimoto, N. Takeuchi (*Gumma Univ.)	Rotational analysis of the ${}^2B_1$ ( $K'=0$ ) $\rightarrow$ ${}^2A_1$ ( $K''=1$ ) band with $\nu_2=6, 7$ and $10$ in the excitation spectrum of $\text{NO}_2$	Chem. Phys. Lett.	97(1)	77-80	1983
杉本伸夫	「差分吸収レーザーレーダー」汚染気 体の濃度分布の遠隔測定	分光研究	32(4)	265-267	1983
N. Sugimoto, S. Takezawa*, N. Takeuchi (*Gumma Univ.)	Rotational analysis and radiative lifetime measurement on the ${}^2B_1$ ( $K'=0$ ) excited state of $\text{NO}_2$ with $\nu_2=6, 7, 8,$ and $9$	J. Mol. Spectrosc.	102	372-383	1983

〔水域・陸域〕

昭和55年度

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	発行年
宮崎忠国・清水 浩・ 安岡善文	多用途高速スペクトロメータの設計	「環境科学」研究報告集 B62-R52-2 遠隔計測の 基礎手法に関する研究		13-21	1980
宮崎忠国・清水 浩・ 安岡善文	多用途高速ラジオスペクトロメータ	「環境科学」研究報告集 B91-R52-3 遠隔計測に よる環境情報の収集と処 理		3-14	1981
岡見 登**・岸野元彰**・ 宮崎忠国 *(理化研)	霞ヶ浦湖水の光学的特性と水質	「環境科学」研究報告集 B91-R52-3 遠隔計測に よる環境情報の収集と解 析		267-281	1981
安岡善文・宮崎忠国	リモートセンシングによる霞ヶ浦の 水質計測	日本国土海洋総合学術診 断昭和54年度技術報告集 JAFSA RS REPORT 802003		31-38	1980
安岡善文・宮崎忠国	対話型環境画像処理システムー IPSEN一の試作	「環境科学」研究報告集 B52-R52-2 遠隔計測の 基礎手法に関する研究		147-156	1980
安岡善文・宮崎忠国・ 宇都宮陽二郎・土屋巖・ 奥野忠一	水産物生産力の調査ー湖沼に関する 研究	昭和54年度ランドサット 等人工衛星データ利用実 証総合研究		44-48	1980
高橋正征**・安岡善文・ 宮崎忠国・松生 治**・ 愛甲敏***・市村俊英* (筑波大) **(東京水産大) *** (造船振興財団)	遠隔計測による伊豆大島沖の湧昇性 冷水塊の計測	「環境科学」研究報告集 B91-R52-3 遠隔計測に よる環境情報の収集と処 理 302-313		302-313	1980
Y. Yasuoka, M. Tamura, T. Miyazaki	Regional extraction and classifi- cation of multispectral images by entropy index	「環境科学」研究報告集 B62-R52-2 遠隔計測の 基礎手法に関する究		180-186	1980

昭和56年度

発表者	題目	掲載誌	巻(号)	ページ	発行年
宮崎忠国	ランドサットからみた霞ヶ浦	水	24-2(322)	28-33	1982
M. Takahashi*, Y. Yasuoka, M. Watanabe, T. Miyazaki, S. Ichimura* (*Univ. Tsukuba)	Local upwelling associated with vortex motion off Oshima island, Japan	Coastal upwelling (Francis A. Richards, American Geophysical Union)		119-124	1981

昭和57年度

宇都宮陽二郎	熱赤外データによる土'含水比の定量的推定に関する予察的研究	日本国土海洋総合学術診断 昭和56年度技術報告集—国土関係— (日本造船振興財団, 日本国土海洋総合学術診断委員会, 155p)		95-109	1981
宇都宮陽二郎	霞ヶ浦における LANDSAT 3号の MSS データより推定した透明度の分布	地理学評論	55	707-714	1982
宇都宮陽二郎	熱赤外データによる土'水分の計測手法に関する実験的研究	写真測量とリモートセンシング	21(2)	15-25	1982
岡見 登*・岸野元彰*・ 宮崎忠国 (*理化研)	霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質	日本リモートセンシング学会誌	2(1)	21-31	1982
宮崎忠国・安岡善文・ 宇都宮陽二郎・奥野忠一	閉鎖性水域の水質調査法	昭和56年度科学技術振興会「リモートセンシング技術の利用実証に関する研究」—研究成果集—		68-72	1982
安岡善文・宮崎忠国	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(3)	51-62	1982
安岡善文	環境評価のための画像情報処理	環境情報科学	11(2)	42-47	1982
Y. Yasuoka, R. M. Haralick* (*Virginia Polytechnic Inst, and State Univ.)	Peak noise removal by a facet model)	Pattern Recognition	16(1)	23-29	1983

昭和58年度

宮崎忠国・安岡善文	閉鎖性水域における水質調査法	昭和57年度科学技術振興調整費「リモートセンシング技術の利用実証に関する研究」研究成果集		76-80	1983
安岡善文	リモートセンシングの湖沼汚濁監視への応用	環境技術	12	317-322	1983
安岡善文	リモートセンシングによる環境監視	月刊地球	5	668-672	1983
榊 広計*・奥野忠一** 安岡善文 (*東京大,**東京理科大)	リモートセンシングにおけるデータ解析—回帰モデルの適用に関して—	日本リモートセンシング学会誌	3(4)	31-43	1983

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	発行年
安岡善文	宇宙からみた地球環境診断	保健の科学	26(1)	39-42	1984
安岡善文	画像情報による環境の評価	Computrol	(5)	74-81	1984

〔遠隔計測データの解析と利用〕

昭和56年度

内藤正明・落合美紀子	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	934-940	1981
溝口次夫	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シンポジウム講演論文集	3	224-227	1981

昭和57年度

藤原正弘*・大井 紘・新藤純子 (*大阪湾広域臨海環境整備セ)	大気汚染濃度分布パターンのスプレイン法による推定法	環境技術	11	643-649	1982
藤原正弘*・大井 紘・新藤純子 (*大阪湾広域臨海環境整備セ)	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	1982

口 頭 発 表

〔大気領域〕

昭和55年度

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	年 月
笹野泰弘・広原寿英*・清水 浩・竹内延夫 (*筑波大)	スキヤニングレーザーレーダーで観測されるエアロゾル分布パターンの歪み補正について	日本気象学会1980年度秋季大会	京 都	55. 10
笹野泰弘・清水 浩・杉本伸夫・松井一郎・平井伸夫*・竹内延夫・奥田典夫 (*筑波大)	レーザーレーダーによる大気混合層立体構造の観測	第6回リモートセンシングシンポジウム	東 京	55. 11
笹野泰弘・清水 浩・杉本伸夫・松井一郎・竹内延夫・奥田典夫	レーザーレーダーによる混合層高度の連続測定	第21回大気汚染学会	浦 和	55. 11
笹野泰弘・重松明夫*・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫 (*筑波大)	安定層底部高度とエアロゾル層高度の対応関係について	日本気象学会	東 京	55. 5
笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫	ミー散乱レーザーレーダー(2波長)による大気混合層発達過程の観測	第7回レーザーレーダー(ライダー)シンポジウム	浜 松	56. 2
Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takeuchi, M. Okuda	On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height as determined by laser radar and low-level radiosonde observations	10 th Int. Laser Radar Conf.	Maryland	55. 10

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	年 月
清水 浩・竹内延夫・ 笹野泰弘・杉本伸夫・ 松井一郎・奥田典夫	大気汚染監視用大型レーザーレーダーの設計、製作上の諸問題	第27回応用物理学関係連合講演会	山 梨	55. 4
H. Shimizu, Y. Iikura, N. Takeuchi, M. Okuda	Dynamic range improvement in the digital processing of laser radar signals	10 th Int. Laser Radar Conf.	Maryland	55, 10
清水 浩・笹野泰弘・ 杉本伸夫・松井一郎	レーザーレーダー平面データの表示法に関する定量的考察	第41回応用物理学学会学術講演会	名 古 屋	55. 10
清水 浩・松井一郎・ 笹野泰弘・杉本伸夫・ 竹内延夫・奥田典夫	レーザーレーダーデータよ高感度、高精度収集法	第21回大気汚染学会	浦 和	55. 11
清水 浩・松井一郎・ 杉本伸夫・笹野泰弘・ 竹内延進・奥田典夫	大型レーザーレーダーの測定感度に関する考察	第 7 回レーザーレーダー(ライダー)シンポジウム	浜 松	56. 2
杉本伸夫・清水 浩・ 笹野泰弘・松井一郎・ 竹内延夫・奥田典夫	コンピュータ化レーザーレーダーにおける効率の良いデータ収集法	第21回大気汚染学会	浦 和	55. 11
杉本伸夫・竹内延夫・ 斎藤保典*・野村 彰*・ 鹿野哲生* (*信州大)	PROBE 法による大気汚染物質濃度分布測定の検討	第41回応用物理学学会学術講演会	名 古 屋	55. 10
杉本伸夫・竹内延夫・ 奥田典夫	2 波長同時発振 DIAL システムによる NO <sub>2</sub> 測定	第 7 回レーザーレーダー(ライダー)シンポジウム	浜 松	56. 2
杉本伸夫・村山慎二郎*・ 竹内延夫・奥田典夫 (*日本大)	差分吸収 LIDAR (DIAL) による排煙流中の NO <sub>2</sub> 濃度の測定	第27回応用物理学関係連合講演会	山 梨	55. 4
N. Sugimoto, N. Takeuchi, M. Okuda	DIAL measurment of NO <sub>2</sub> concentration in a stack plume	10 th Int. Laser Radar Conf.	Maryland (U.S.A)	55. 10
竹内延夫	半導体レーザーの分光・計測への応用	応用物理学学会量子エレクトロニクス研究会	東 京	56. 1
竹内延夫	赤外線領域の大気汚染計測について	赤外線技術研究会	筑 波	55. 8
正道之男**・北村新三**・ 村上吉繁**・竹内延夫 (*神戸大学) (**大阪大学)	レーザーレーダーによる大気汚染観測結果の画像データベースの開発	第24回システムと制御研究発表講演会	東 京	55. 5
N. Takeuchi, H. Shimizu, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui, M. Okuda	LAMP lidar for wide-area air pollution monitoring	10 th Int. Laser Radar Conf.	Maryland (U.S.A)	55. 10
竹内延夫・笹野泰弘・ 清水 浩・松井一郎・ 杉本伸夫・奥田典夫	大型レーザーレーダーによる広域大気汚染観測 (I)	第21回大気汚染学会	浦 和	55. 11
松井一郎・清水 浩・ 笹野泰弘・杉本伸夫・ 竹内延夫・奥田典夫	レーザーレーダーシステムの性能評価法	第21回大気汚染学会	浦 和	55. 11

発表者	題目	学会等名称	開催都市名	年月
松井一郎・清水 浩・ 杉本伸夫・笹野泰弘・ 竹内延夫・奥田典夫	大型レーザーレーダーの性能評価法	第7回レーザーレーダー (ライダー) シンポジウム	浜 松	56. 2

昭和56年度

広原寿英・笹野泰弘・ 清水 浩・竹内延夫・ 奥田典夫・河村 武・ (*筑波大)	スキャニングレーザーレーダーによる水平 の平均風速ベクトルの測定	日本気象学会	東 京	56. 5
平井伸治・笹野泰弘・ 清水 浩・竹内延夫・ 奥田典夫・河村 武・ (*筑波大)	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	日本気象学会	東 京	56. 5
笹野泰弘・清水 浩・ 竹内延夫・奥田典夫	レーザーレーダーで観測される混合層の構 造	第22回大気汚染学会	秋 田	56. 10
笹野泰弘・竹内延夫	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 (II)	日本気象学会1981年度秋季 大会	名 古 屋	56. 12
清水 浩・笹野泰弘・ 松井一郎・竹内延夫・ 奥田典夫	A/D変換器の統計的誤差を利用した測定 の高精度化	第28回応用物理学関係連合 講演会	小 金 井	56. 4
清水 浩・松井一郎・ 杉本伸夫・笹野泰弘・ 竹内延夫・奥田典夫	大型レーザ・レーダの性能試験	昭和56年度電子信学会総合 全国大会	東 京	56. 4
竹内延夫	レーザーレーダーによる大気汚染計測の問 題点	光と電波の境界領域第130 委員会	東 京	56. 9
竹内延夫・松井一郎・ 清水 浩・奥田典夫	大型レーザーレーダー用航空機探知レーダ ーの製作	第42回応用物理学会学術講 演会	福 井	56. 10
竹内延夫・笹野泰弘・ 清水 浩・松井一郎・ 杉本伸夫・奥田典夫	大型レーザーレーダーによる広域大気汚染 観測 (II) -ローカルスケールの観測	第22回大気汚染学会	秋 田	56. 10
N. Takeuchi, N. Sugimoto, S. Takezawa,* M. Okuda (*Gumma Univ.)	Remote measurement of the NO <sub>2</sub> con- centration profile using a tunable laser	9th Int. Conf. Atomic Spectrosc. and 22nd Colloq. Spectrosc. Int.	Tokyo	56. 9
佐藤平道・竹内延夫・ 奥田典夫・新井敏弘・ (*筑波大)	赤外半導体レーダーを用いた多重光路吸収 システムの製作	第42回応用物理学会学術講 演会	福 井	56. 10
佐藤平道・竹内延夫・ 新井敏弘・ (*筑波大)	波長変調法による CO 濃度測定装置の特性	応用物理学関係連合講演会	東 京	57. 4
杉本伸夫・竹内延夫・ 奥田典夫	2波長同時発振 DIAL による NO <sub>2</sub> 濃度の 測定	第28回応用物理学関係連合 講演会	東 京	56. 4
杉本伸夫・竹内延夫・ 奥田典夫	地上ベース 角光法レーザーレーダーによ る成層圏 NO <sub>2</sub> 測定の検討	第42回応用物理学会学術講 演会	福 井	56. 10
杉本伸夫・竹内延夫・ 奥田典夫	NO <sub>2</sub> 測定用車載型差分吸収レーザーレー ダーシステム	第22回大気汚染学会	秋 田	56. 10

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	年 月
竹沢賛三・丹野直弘** 早川 浩***・杉本伸夫・ 竹内延夫 (*群馬大, **山形大, ***筑波大)	450~550 nm 域の NO <sub>2</sub> 蛍光の分光測定	日本物理学会	新 潟	56, 10
杉本伸夫・竹沢賛三・ 飯島弘昭**・竹内延夫 (*群馬大, **日本大)	NO <sub>2</sub> 蛍光の時間分解分光測定	日本物理学会昭和57年春季 年会	横 浜	57, 3
竹内延夫・笹野泰弘・ 松井一郎・杉本伸夫・ 平尾浩司・北村新三・ (*神戸大)	レーザ・レーダによる広域エアロゾル分布 データ収集における問題点	第7回リモートセンシング シンポジウム	東 京	56, 11
竹内延夫	レーザーレーダーによる大気環境の計測	昭和57年レーザー学会学術 講演会第2回年次大会	和 光	57, 1
N. Takeuchi, H. Shimizu, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui, H. Nakane	Wind-area air pollution measurement by the NIES large lidar	Workshop on Optical and Laser Remote Sensing	Monterey (U. S. A.)	57, 2
N. Takeuchi	Remote sensing of atmospheric environ- ment	Jpn. Seminar Remote Sensing Appl.	Tokyo	57, 3
竹内延夫・杉本伸夫・ 桜井捷海* (*東京大)	擬似ランダムパルス変調 CW ライダー I 概要	応用物理学関係連合講演会	東 京	57, 4
松井一郎・清水 浩・ 杉本伸夫・笹野泰弘・ 竹内延夫・奥田典夫	広域汚染測定用大型レーザーレーダーの性 能評価	春季応用物理学学会連合講演 会	東 京	56, 4
松井一郎・笹野泰弘・ 杉本伸夫・清水 浩・ 竹内延夫・奥田典夫	混合層高度モニター用レーザーレーダーの 理論計算	第22回大気汚染学会	秋 田	56, 10
松井一郎・笹野泰弘・ 清水 浩・竹内延夫	エアロゾル(浮遊粒子状物質)鉛直分布連 続測定のための簡易型レーザーレーダーシ ステムの開発一設計と製作一	昭和57年レーザー学会学術 講演会第2回年次大会	和 光	57, 1

### 昭和57年度

平尾浩司*・北村新三・ 笹野泰弘・竹内延夫 (*神戸大)	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	57, 5
Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takeuchi	Cell structure in the atmospheric mixed layer observed by a Mie laser radar	11 th Int. Laser Radar Conf.	Madison, Wisconsin (U. S. A.)	57, 6
笹野泰弘・竹内延夫	Mie 散乱レーザーレーダーで観測される 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	57, 7
笹野泰弘・竹内延夫	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	57, 10
笹野泰弘・竹内延夫	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	57, 11
笹野泰弘・竹内延夫	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	57, 12

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	年 月
杉本伸夫・竹沢賛三・ 飯島弘昭**・竹内延夫 (*群馬大, **日本大)	NO <sub>2</sub> 蛍光の時間分解分布測定	第36回日本物理学会	横 浜	57. 4
杉本伸夫・竹内延夫	NO <sub>2</sub> の分光特性とレーザー・レーダへの応用 との問題点	第 8 回レーザー・レーダ (ラ イダー) シンポジウム	長 野	57. 7
杉本伸夫・竹沢賛三・ 竹内延夫 (*群馬大)	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	57. 10
竹沢賛三・杉本伸夫・ 竹内延夫	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	57. 10
竹沢賛三・杉本伸夫・ 竹内延夫 (*群馬大)	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	58. 3
杉本伸夫・竹沢賛三・ 竹内延夫 (*群馬大)	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	58. 3
H. Nakane, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui, H. Shimizu, N. Takeuchi	Obtaining high-quality image data with the LAMP lidar	11 th Int. Laser Radar Conf.	Madison, Wisconsin (U. S. A)	57. 6
中根英昭・笹野泰弘・ 杉本伸夫・松井一郎・ 清水 浩・竹内延夫	LAMP ライダーによる広域エアロゾル分 布の測定	第 8 回レーザー・レーダ (ラ イダー) シンポジウム	長 野	57. 7
中根英昭・笹野泰弘・ 杉本伸夫・松井一郎・ 清水 浩・竹内延夫	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	57. 11

### 昭和58年度

笹野泰弘・中根英昭	レーザーレーダーによるエアロゾルの体積 消散係数鉛直分布の計測	日本気象学会昭和58年秋季 大会	仙 台	58. 10
笹野泰弘	レーザーレーダーによる大気境界層構造の 観測と混合発達モデリング	第 9 回レーザー・レーダ (ラ イダー) シンポジウム	栃木県 鬼怒川温泉	58. 11
笹野泰弘・中根英昭	レーザーレーダーによる大気的光学的厚さ 計測に関する諸問題	第 9 回リモートセンシング シンポジウム	東 京	58. 11
笹野泰弘・中根英昭	大型レーザーレーダーによる広域大気汚染 観測 (IV) 二成分レーザーレーダー方程式 の解による消散係数の定量化	第24回大気汚染学会	四 日 市	58. 11
竹内延夫	アクティブ・リモート・センシングにおけ る雑音除去の手法-ライダ計測における実 際例-	電子通信学会分科会	横 浜	58. 10
竹内延夫・馬場浩司・ 桜井捷海・佐藤家郷・ 石河直樹・ (*東京大, **明星電気)	可搬型 RM-CM ライダーの製作と動作特 性	第 9 回レーザー・レーダ (ラ イダー) シンポジウム	栃木県 鬼怒川温泉	58. 11
竹内延夫	半導体レーザーを光源とする可搬型擬似ラ ンダム変調 CW ライダーの開発	第24回大気汚染学会	四 日 市	58. 11

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	年 月
中根英昭・笹野泰弘・ 清水 浩・杉本伸夫・ 松井一郎・竹内延夫	大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布の計測	エアロゾル科学・技術研究 討論会	筑 波	58. 8
中根英昭・笹野泰弘	レーザーレーダーとパーティクルカウンターによるエアロゾル体積消散係数の測定	第9回レーザ・レーダ(ライダ)シンポジウム	栃木県 鬼怒川温泉	58. 11
中根英昭・笹野泰弘	エアロゾルによる光消散係数の時間・空間変化の測定	第24回大気汚染学会	四 日 市	58. 11
樋口隆一・藤本哲知*・ 斎藤保典*・野村彰夫*・ 鹿野哲生*・杉本伸夫・ 竹内延夫 (*信州大)	差分吸収式レーザ・レーダ(DIAL)用光源	第44回応用物理学学会学術講演会	仙 台	58. 9
杉本伸夫・竹沢賢三*・ 飯島弘昭**・竹内延夫 (*群馬大, **筑波大)	NO <sub>2</sub> の近光スペクトルの解析( <sup>2</sup> B <sub>1</sub> , $\nu_2 = 6, 7, 8, 9$ )	日本物理学会1983年秋の分科会	岡 山	58. 10
竹沢賢三*・杉本伸夫・ 竹内延夫 (*群馬大)	NO <sub>2</sub> 励起スペクトル( <sup>2</sup> B <sub>2</sub> )における強度と振動準位	日本物理学会1983年秋の分科会	岡 山	58. 10
野村彰夫*・樋口隆一*・ 斎藤保典*・鹿野哲生*・ 杉本伸夫・竹内延夫 (*信州大)	同時二波長共振フラッシュランプ励起色素レーザを用いたDIALシステム	第9回レーザ・レーダ(ライダ)シンポジウム	栃木県 鬼怒川温泉	58. 11
杉本伸夫	差分吸収レーザーレーダーの測定誤差評価の実験的研究と信号処理手法の検討	第9回レーザ・レーダ(ライダ)シンポジウム	栃木県 鬼怒川温泉	58. 11
松井一郎・笹野泰弘・ 清水 浩・竹下俊二・ 竹内延夫	混合層高度連続観測用簡易型レーザーの試作(II)	第9回レーザ・レーダ(ライダ)シンポジウム	栃木県 鬼怒川温泉	58. 11
松井一郎・笹野泰弘・ 清水 浩・竹内延夫	混合層高度モニター用レーザーレーダーによる大気構造連続測定	第24回大気汚染学会	四 日 市	58. 11

〔水域・陸域〕

昭和55年度

岡見 登*・岸野元彰*・ 宮崎忠国 (*理化研)	霞ヶ浦湖水の光学特性と水質	文部省〔環境科学〕特別研究	東 京	55. 10
岡見 登*・岸野元彰*・ 宮崎忠国 (*理化学研究所)	霞ヶ浦の光学特性と水質	文部省、環境科学〕特別研究	米 沢	56. 2
Y. Yasuoka, T. Miyazaki	IPSEN-An image processing system for environmental analysis and evaluation	5th international conference on pattern recognition	Miami Beach	55. 12

昭和56年度

宮崎忠国・清水 浩・ 安岡善文	多用途高速スペクトロメータの開発	第7回リモートセンシングシンポジウム	東 京	56. 11
宮崎忠国・岡見 登*・ 岸野元彰* (*理化研)	霞ヶ浦湖水の分光特性と水質	第7回リモートセンシングシンポジウム	東 京	56. 11

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	年 月
安岡善文 R. M. Haralick* (*ヴァージニア科州大)	リモートセンシング画像における走査線雑音, 粒状雑音の除去	第7回リモートセンシングシンポジウム	東 京	56. 11
Y. Yasuoka, T. Miyazaki	Assessment and evaluation of water quality by remote sensing	Int. Symp. Man's Impact Ecosystem Dyn.	Tokyo	56. 12

### 昭和57年度

宇都宮陽二郎	航空機リモートセンシングによる土'含水比の定量的推定に関する研究—特に熱赤外データにもとづく考察—	日本地理学会1982年度春季学術大会	八 王 子	57. 4
宇都宮陽二郎	リモートセンシングによる土'含水比の測定—航空機搭載の MSS データと地上野外施設における実験データによる結果の比較	日本写真測量学会昭和57年度年次学術講演会	東 京	57. 5
宮崎忠国	赤潮藻類 <i>Olithodiscus luteus</i> 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	57. 7
杉原滋彦*・宮崎忠国 (*理化研)	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」R52遠隔計測班	東 京	57. 12
安岡善文・宮崎忠国	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	57. 7
安岡善文・宮崎忠国	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 (計測自動制御学会)	東 京	57. 11
安岡善文・宮崎忠国・岸野元彰*・杉原滋彦*・岡見 登* (*理化研)	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	57. 12

### 昭和58年度

安岡善文・可知直毅・鈴木啓祐* (*流通経済大)	リモートセンシングによる植生遷移の解析 (推移行列の抽出)	第22回計測自動制御学会学術講演会	北 九 州	58. 7
安岡善文・花泉 弘* (*東京大)	航空機 MSS における雑音の除去	第9回リモートセンシングシンポジウム	東 京	58. 11
安岡善文・可知直毅・鈴木啓祐* (*流通経済大)	植生生態遷移のリモートセンシング—遷移確率行列の算出—	日本リモートセンシング学会第3回学術講演会	東 京	58. 12

### 〔遠隔計測データの解析と利用〕

#### 昭和56年度

藤原正弘*・大井 紘・新藤純子 (*厚生省)	補間法による大気汚染濃度分布の推定と測定局の最適配置	京都大学環境衛生工学研究会第3回シンポジウム	京 都	56. 8
---------------------------	----------------------------	------------------------	-----	-------

### 昭和57年度

発表者	題目	学会等名称	開催都市名	年月
落合美紀子・内藤正明	環境モニタリング・ステーションの最適配置について	日本自動制御協会第26回システムと制御研究発表講演会	京都	57. 5
落合美紀子・内藤正明	レーザー・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	57. 11

### 昭和58年度

宮本定明*・大井 紘・内藤正明・清水明** (*筑波大, **千葉工大)	エントロピー評価関数を用いた区分線形濃度階調変換によるレーザーレーダ画像の強調	第27回システムと制御研究発表講演会	京都	58. 5
溝口次夫・池田有光*・宮本義男** (*京都大, **東洋情報システム)	粒子状物質の大気中拡散シミュレーション	土木学会環境問題シンポジウム	東京	58. 8

## 国立公害研究所研究発表会

### 〔大気領域〕

#### 昭和55年度

竹内延夫	レーザーレーダーによる広域汚染遠隔計測について	55. 6
------	-------------------------	-------

#### 昭和56年度

竹内延夫	環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発—大型レーザーレーダーによる水平移流のベクトルの測定—	56. 6
------	--	-------

### 〔水域・陸域〕

#### 昭和57年度

宮崎忠国	環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発—水域の水質計測	57. 6
------	---------------------------	-------

II-1 大型レーザーレーダーによる遠距離測定における  
測定誤差の解析とその低減法

An Error Analysis and Improvement of Accuracy in a Long Range Measurement  
by a Large Scale Laser Radar

清水 浩<sup>1</sup>・飯倉善和<sup>2</sup>・笹野泰弘<sup>1</sup>  
松井一郎<sup>3</sup>・竹内延夫<sup>1</sup>

Hiroshi SHIMIZU<sup>1</sup>, Yoshikazu IIKURA<sup>2</sup>, Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>  
Ichiro MATSUI<sup>3</sup> and Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup>

要 旨

広い領域の大気汚染状態を測定する目的で大型レーザーレーダーを製作した。この装置はレーザー光源として波長 1.06  $\mu\text{m}$  で平均出力 30 W の Nd: YAG レーザーと、その第二高調波 (波長 532 nm, 平均出力 10 W) を使用し、繰り返し同波数は 1 秒間に 25 回で動作させている。また、受信望遠鏡には有効直径 1.5 m のカセグレン型を使用している。

広い領域を測定する場合、測定精度を低下させる三つの要因がある。ここでは、これらの要因を取り除いて精度を向上させる方法について述べる。

雑音の解析から、この装置の測定誤差は理論的な限界と一致していることが判明し、設計どおり動作していることが確認された。

Abstract

A large-scale laser radar was constructed to measure the air pollution in a wide area. It is composed of a high power Nd: YAG laser whose average output energy is 30W (at 1.064  $\mu\text{m}$ ) and 10W (at 532nm) with the repetition rate of 25pps, a large receiving telescope whose

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environment Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 総合解析部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Systems Analysis and Planning Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
3. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

effective diameter is 1.5m.

It is pointed out that there are three problems which degrade the accuracy of the measurement. Discussion is made how to improve the accuracy.

The noise analysis shows that shot noise limit the signal to noise ratio of the present laser radar system.

## 1 はじめに

国立公害研究所に設置された大型レーザーレーダーは、設計値として、半径 50~60 km の範囲に存在するエアロゾルからの散乱強度を受信できる能力を有しており、世界で最も大きな装置に属する<sup>1-3)</sup>。この装置が、設計値どおりの性能を発揮し、かつ応用上、有用な情報を得ることができるには、各構成要素が所期の特性を有していることを確認した上で<sup>4)</sup>、1) 測定値に与えるシステムティックな誤差を十分に小さくすること、2) 設計値どおりの信号量を得ること、3) 得られた生のデータから、応用上使用可能な情報を引き出すためのアルゴリズムを確立することの3点が必要である。このうち、3) については、本報告書のII-4において詳しく述べられている。本文では、1) と 2) について行った検討の結果を述べることを主な目的としたい<sup>5,6)</sup>。

## 2 装置の概要

図1にシステム全体のブロック図を示す。この装置は送信用のパルスレーザー、信号受信の望遠鏡、受信光学系、信号処理装置、データ処理装置、掃引装置及び全体を制御するコントローラーから構成されている。この装置全体は8階建ての建屋の7階と8階に設置されている。図2に建屋全体の外観を示す。8階の上には開閉と回転が可能なドームが取り付けられている。8階にはレーザーヘッド、望遠鏡、受信光学系及び掃引装置が置かれているが、その全体の写真を図3に示す。また7階には、図4に示すように信号処理、データ処理及びコントローラー関係の主な部分が設置されている。装置全体の特性を表1に示す。レーザーには、1,064  $\mu\text{m}$  で発振するYAGレーザーとその第2高調波(波長 532 nm)を使用している。その平均出力はそれぞれの波長で 30 W と 10 W である。受信望遠鏡には有口径が 1.5 m のカセグレン型望遠鏡を使用している。レーザーレーダーで測定可能な範囲はレーザー出力と受信望遠鏡の有効面積に比例するが、本装置では、この値が世界でも最大の規模を持っている。

## 3 レーザーレーダーを用いて遠距離を測定する際に生じるシステムティックな誤差とその低減対策

この装置の目的は広い領域の測定を可能とすることである。しかも、大気汚染測定の目的に使用するために、昼間も測定が行われる。このような目的の測定で生じるシステムティックな誤差が2種類ある。一つは信号の検出に関すること、もう一つは測定対象の位置決めである。ここで

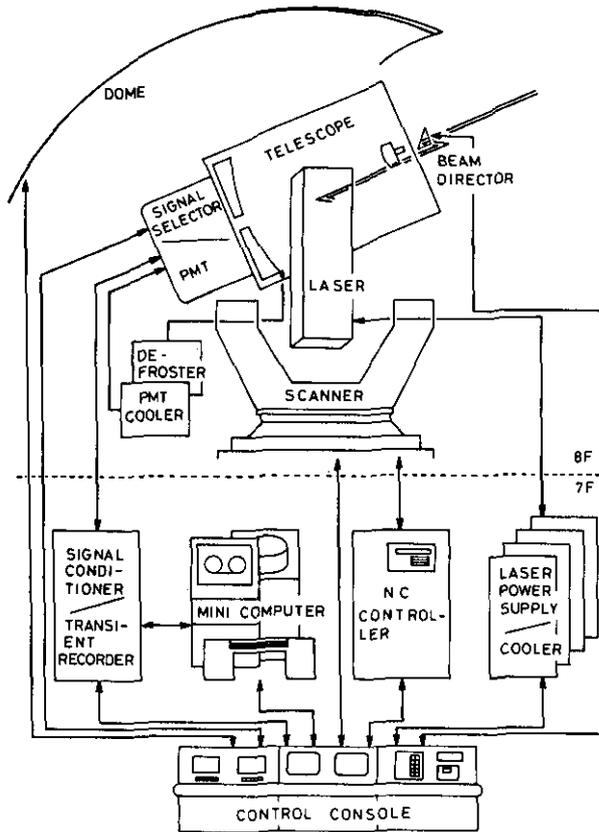


図 1 大型レーザーレーダー全体のブロック図

Fig. 1 Schematic diagram of the whole system

はこれらの問題点を指摘するとともに、その解決の方法について述べる。

これまで、成層圏の測定のためのレーザーレーダーでは、信号処理にフォトンカウンティングが使用されることが多かった<sup>6)</sup>。フォトンカウンティングでは、強い入力信号に対しては出力が飽和するという大きな欠点があるので、測定のダイナミックレンジが狭く、しかも昼間のバックグラウンドが大きい状態での測定はできない。したがって、本装置では信号の検出に直接法を用いることが必須となる。直接法を用いて、広い領域をレーザーレーダーで測定するとき生じる測定上の問題が二つある。また、広い領域で、水平方向の変化を測定する際に、地球の曲率や空気の屈折率を考慮しなければ位置決め誤差が生じるという新たな問題も生じる。

### 3.1 強い入力信号に対して光電子増倍管で発生する雑音

Huntら<sup>7,8)</sup>は光電子増倍管(以下PMTと略)に強い入力があったとき、その出力は信号が消え



図 2 大型レーザーレーダー装置が設置されている建物の外観

Fig. 2 Outside view of the building in which the laser radar system is located

た後も存在し、いわゆる尾を引くということを報告している。すなわち、信号自体が雑音源となるということである。この現象は広い領域の測定を行っていくうちに、大きな問題となることが分かった。この現象は遠い距離において、近い距離から返ってくる信号による尾と実際の信号が重なり合って、信号強度が見かけ上強くなるという形で表れる。この現象は、視程が悪くて信号の減衰が激しいときや、成層圏を対象にした測定で、大気密度の減少によって、距離に対する信号の減少が著しいときに顕著に表れる。この現象は、受信された信号に距離2乗の関数をかけたうえで、対数をとることにより明りょうに確認できる。図5(a)、(b)はこの現象が著しく現れている例である。この例はエルチチョン火山の爆発後、成層圏に滞留しているエアロゾルを観測する目

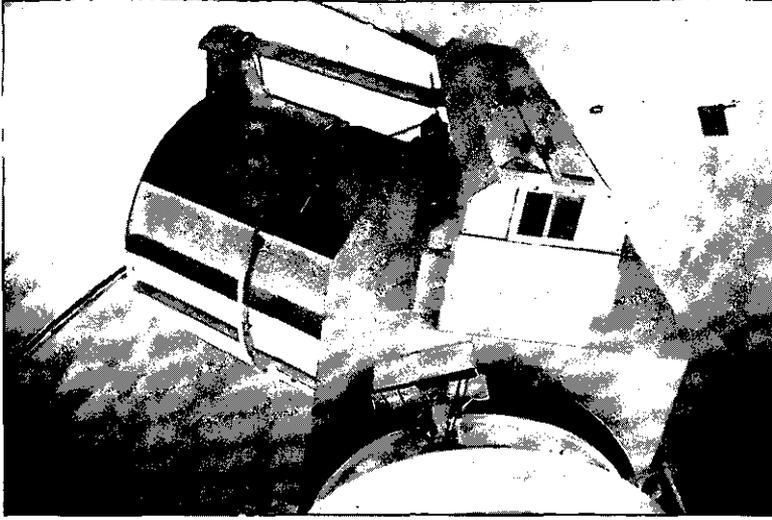


図 3 8階に設置された装置の全体写真

Fig. 3 Whole system in 8th floor



図 4 7階に設置された装置の全体写真

Fig. 4 Whole system in 7th floor

表 1 装置の性能

Table 1 The specification of the whole system

Laser		
Material	Nd: YAG KD*P(SHG)	
Average output power	30W	10 W
Output energy/pulse	1.2J	0.4 J
Repetition rate	25 pps	
Pulse duration	15 nsec	
Beam divergence	0.3 mrad	
Receiving telescope		
Type	Cassegrain	
Effective aperture	1.67 m <sup>2</sup>	
Focal length	8 m	
Spot size on focus	1 mm	
Scanner		
Scan type	Azimuth-elevation	
Scan rate	600~0.25 deg/min	
Accuracy of aiming	1 min (0.3 mrad)	
Accuracy of scan	1 min (0.3 mrad)	
Light transmission	Semi-Coude	
Receiving optics		
Field of view	0.15~4.8 mrad	
Monochromation	If filters and double monochromator	
Band width of filters	0.7~1.5 Å	
Transmittance of filters	12~24%	
Focal length of monochromator	30 cm	
Signal processor		
Type	Digital processing	
Min. sample rate	10 nsec	
Accuracy	8 bits	
Memory	2 ch : 2048 words/ch	
Data processor		
Type	Mini computer-large computer combined system	
Mini computer	TOSBAC 7/40	
Large computer	HITAC M-180	

的に測定したもので、仰角 20° で測定している。図 5(a) は測定結果に何も処理を施していないもので、いわゆる A スコープ波形である。この波形に距離の 2 乗の関数をかけ、しかも対数をとったのが図 5(b) である。すなわち、図 5(a) を  $Y = P(H)$  とすると図 5(b) は

$$Y = \ln\{P(H) H^2 \operatorname{cosec}^2 \theta\} \quad (1)$$

を示している。ここで  $H$  は高度、 $\theta$  は仰角である。図 5(b) には US 標準大気9)の表から求めた空気密度を示している。エアロゾルが存在しなくなる 25 km より上の高度では、レーザーレーダー信号波形は、密度の高度分布と一致すべきであるが、図 5(b) では大きくずれている。このずれが、

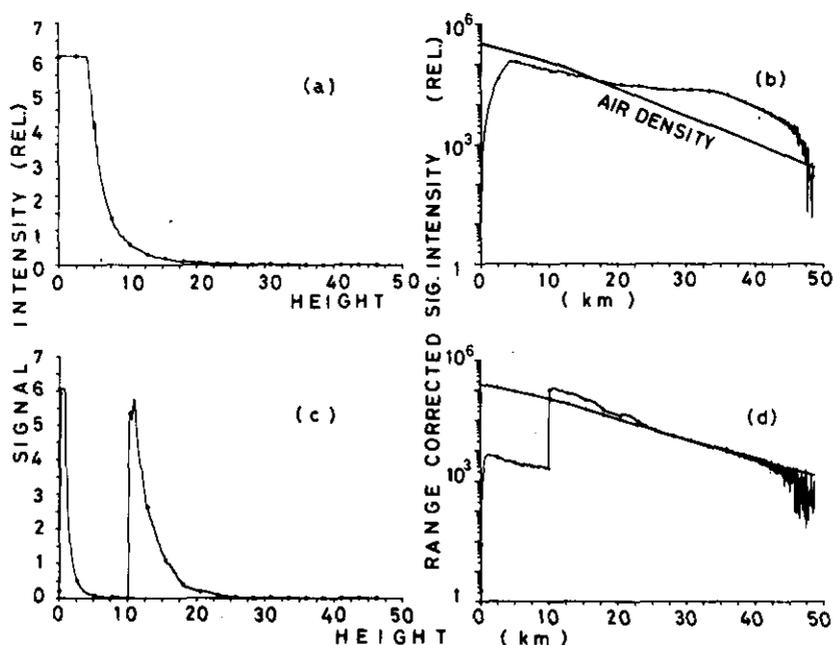


図 5 PMT の出力の尾の影響とゲインスイッチング回路を用いた効果

Fig. 5 Observed signal of the tale of a PMT and the effect of the gain switching circuit

PMT の尾の影響で、数 km 以内の近傍からの強い信号の尾が、遠方からの信号に強く影響を与えているのが明らかである。この効果の原因は、信号光により PMT 内に発生した電子が、一定の時定数を持って PMT 内に停まるためであると言われている。したがって、この影響から逃れるためには、PMT の第一ダイノード以前で、強い信号を取り除けば良い。そのための手段として、高速の機械的シャッターを用いることがまず考えられる。より簡易な方法として、PMT の光電面と第一ダイノード間の電圧を on-off して、PMT の増幅度を急激に変える方法が考えられる。ここではこの目的のために、浜松フォトニクス製 C-1392-01 型のスイッチング回路を採用した。

このスイッチング回路の効果を図 5(c) (d) で示す。図 5(c) は高度 10 km (距離 60 km) までスイッチを off 状態とし、それより遠い距離では on とした場合の A スコープ信号である。このスイッチング回路は、off の状態では  $10^{-4}$  の光の遮断が可能である。高度 5 km 程度まで見えている信号は、遮断の不完全さから来るものである。10 km より遠いところでは、図 5(a) の信号と一見似ている。図 5(d) は図 5(c) に距離補正した後、対数をとったものである。この図によると、25 km 以下でエアロゾルの存在の影響のあるところでは、空気密度の線ともちろんのこと一致していないが、それ以上の高度では良く一致している。なお、40 km 以上での不一致は信号の 0 レベルの設定において、45 km の地点での信号を 0 と仮定していることによるもので、PMT の影響によるものではない。このようにスイッチング回路を用いることにより、PMT の尾の問題は解決でき

る。

### 3.2 A-D 変換誤差の問題

広い領域を測定するレーザーレーダーでは、広いダイナミックレンジの信号を同時に受信する必要がある。例えば、20 km から 50 km の区間を同時に測定する場合、視程を 50 km とすると、20 km の地点と 50 km の地点の信号光強度比は約 770 倍となる。もし、50 km の地点での測定誤差を 4% とするならば、この地点での信号の分解能は 25 段階必要となる。したがって、20 km の地点では 19250 段階の分解能を必要とする。PMT 信号を直接検出し、コンピュータに記録するための高速 A-D 変換器の分解能は、通常 8 bit (256 digit) で 10 bit のものが最近になって売り出されている。いずれにしても、1 台の A-D 変換器で、この広いダイナミックレンジの信号をカバーすることはできない。

この問題を解決する方法として、次の 3 点が考えられる。

- 1) PMT や増幅器に時間とともに感度や増幅度が変わる回路を取り付ける。
- 2) PMT からの信号を二つ以上に分離し、各々を感度の異なる A-D 変換器に同時に入力させ、出力を合成する。
- 3) 多数回の測定を行い、その結果を積算することにより 1 digit 以下の変動をとらえる。

このうち、1) は古くから多くの方法が考えられてきた<sup>10)</sup>。しかし、アナログ的な信号に非線型な変換を行うことは、システムティックな誤差を生み易く、信頼性のある方法とは言えない。したがって本装置では、2) と 3) の方法を使用してきた。2) の方法のブロック図を図 6 に示す。実際には入力に 2 チャンネルを持つトランジェントレコーダーを使用し、その各々に同時に信号を入れる。トランジェントレコーダーの入力の感度を互いに異なる値として測定するのみで目的が達せられる。本装置のトランジェントレコーダーは分解能が 8 bit なので、最も遠い地点での分解能を 25 としたければ、二つの入力間の感度を約 10 倍 ( $=256/25$ ) 変えて使用し、約 2560 ( $=10 \times$

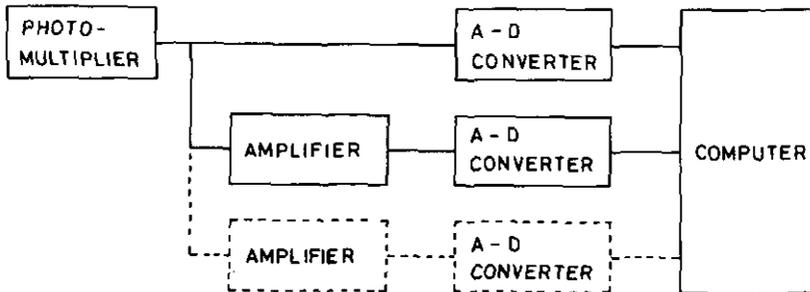


図 6 複数の A-D 変換器を使用する方法のブロック図

Fig. 6 Schematic Diagram of the method which uses multiple A-D converters

256)の分解能まで得ることができる。図7にその測定例を示す。これはPMTの印加電圧を1050 Vとし、トランジェントレコーダーの二つの入力チャンネルの感度をそれぞれ0.5 Vと0.05 Vに設定し、同時に測定を行った例である。図7(a)はそれぞれのチャンネルで得られた生のデータである。これらのデータに距離の2乗の関数をかけ、高度3 kmの地点で信号強度を規格したのが図7(b)である。なお、図7(a), (b)において、0.05 Vに感度を設定して得た波形は、縦軸の原点をずらしてある。図7(b)の二つの波形を比較すると、0.05 Vに感度を設定したものについて、信号が飽和していない2.6 km以上の領域と、0.5 Vに設定したものにおいて、信号強度がトランジェントレコーダーの分解能の影響を受けていない3.0 km以下の領域で、両者の信号は良く一致している。したがって、この領域より近傍では図7(b) (感度0.5 V) の信号を使用し、遠方では図7(a) (感度0.05 V) の信号を使用すれば、ダイナミックレンジの広い測定が行える。なお、トランジェントレコーダーの分解能については以下で議論する。

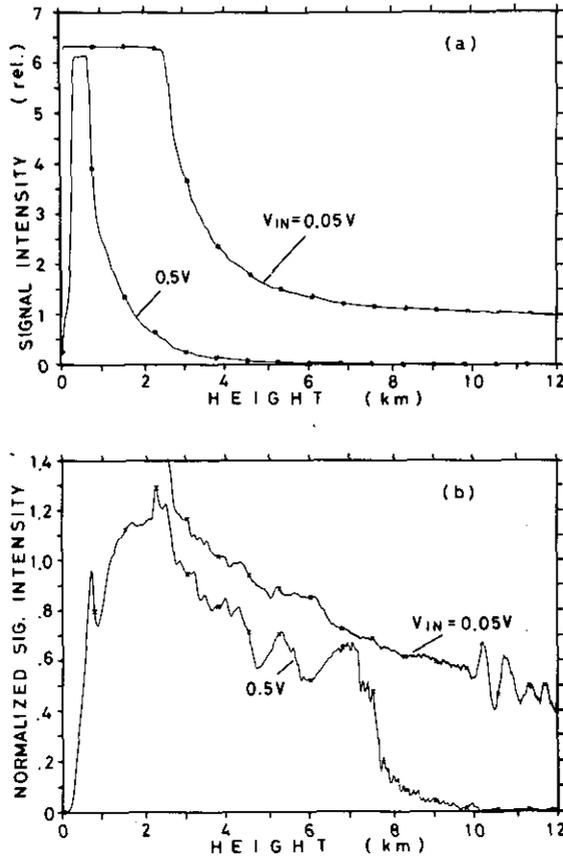


図 7 複数の A-D 変換器を使用する方法で得られた信号の波形

Fig. 7 Measured signal form by using the multiple A-D converters method

3)の方法も広く一般的に使用されている。これは、入力信号に適当な大きさのランダムな雑音が混入しているという条件の下で、繰り返し測定した信号の積算を行うと、雑音の不確定さの作用で、分解能以下の変動が測定できるという原理である。だが、この方法の理論的計算がなされたことがなかったように思えるので、我々はランダム雑音の性質をガウシアンと仮定して、計算と実験を行い、この方法の裏付けを行い、既に発表している<sup>11)</sup>。この論文でも示されているが、得られる最小の分解能は雑音の標準偏差の大きさに依存する。測定回数が十分に大きいものと仮定したときのこれらの関係を図8に示す。レーザーレーダーを用いた実際の測定では、PMTの量子雑音、レーザーのふらつき、増幅器などの電気回路で発生する雑音の総和が標準偏差を与える。PMTの量子雑音は本来、ポアソン分布に従い、他の雑音も必ずしもガウシアンに従うとは限らない。したがって図8の結果をそのままレーザーレーダーの測定に応用することはできないが、図8を参考にすることは可能である。繰り返して行う測定の効果を図9に示す。ここでは $\sigma_n$ を平均入力強度がA-D変換器の最小分解能(1 digit)と一致するときの雑音の標準偏差と定義している。図9(a)はトランジェントレコーダー信号入力の感度を変化させて測定したAスコープ波形である。すなわち感度を変化させるということは、トランジェントレコーダーのA-D変換器の1 digitの大きさに対して、 $\sigma_n$ を相対的に変化させることに相当する。この測定は仰角 $0.5^\circ$ で行い、PMTの感度は15 kmの距離までoff状態に設定してある。PMTはRCA 8852を使用し、印加電圧

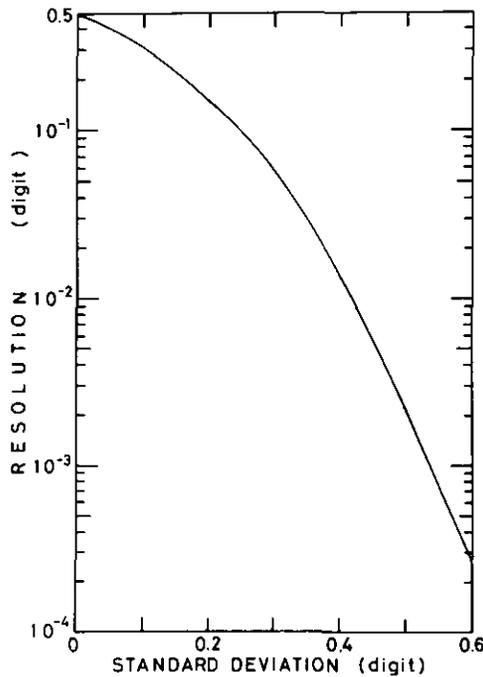


図 8 ランダムな雑音の標準偏差に対する最小の分解能

Fig. 8 Standard deviation of random noise vs the minimum resolvable signal intensity

1950 V に設定した。測定は 1000 回の繰り返し測定を行った。 $\sigma_d$  が 1 digit よりも大きいとき、A スコープ波形は距離とともになめらかに変化する。 $\sigma_d$  が小さくなるに従い、入力信号強度が、1, 2, 3……digit のところで階段状に変化を始める。階段状の変化は  $\sigma_d$  が最も小さい 0.14 digit のときに最も顕著に表れている。この信号波形から  $\sigma_d$  がある程度大きければ、1 digit 以下の強度の信号が分解できるということが分かる。しかし、 $\sigma_d=0.4$  と 0.6 digit の場合には信号が正確に分解できるかどうかはこの図から判断することは困難である。そこで、図 9(b) に示すように A スコープ波形に距離 2 乗の関数をかけ、対数をとると、1 digit 以下の分解能力が明りようになる。図 9(b) より、 $\sigma_d$  が 1.4 と 1.0 digit の場合、信号の形状は入力信号強度が 1 digit 以下でも完全に一致する。だが、 $\sigma_d$  が 0.6 digit の場合には、入力信号強度が 1 以下のとき  $\sigma_d=1.0$  あるいは 1.4 の信号とわずかながら不一致が見られる。 $\sigma_d$  がより小さい場合には、不一致がさらに大きくなる。以上

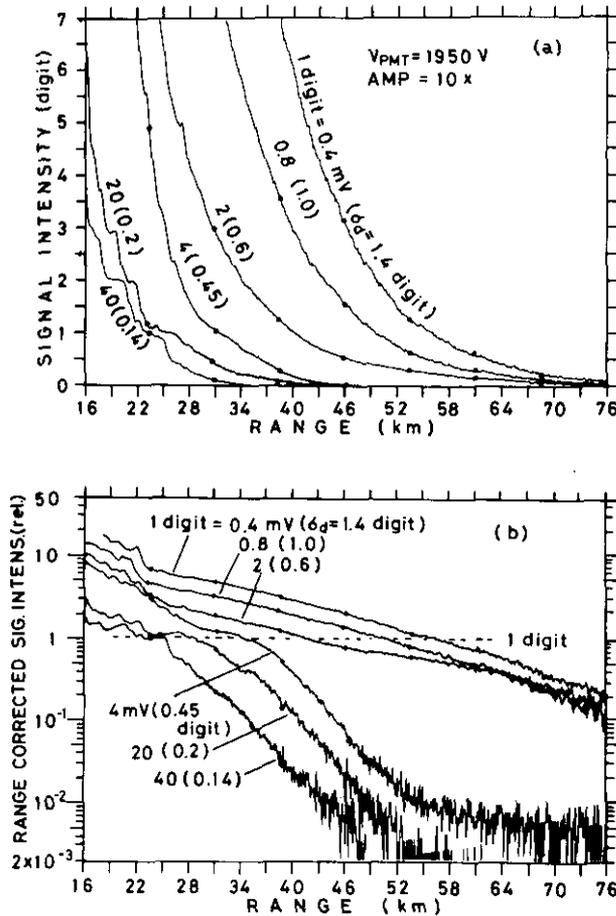


図 9 繰り返し測定の効果

Fig. 9 Effect of iterative measurement method

のことより、本装置における雑音の性質を考慮すると、雑音の大きさは  $\sigma_d=1$  digit 以上で使用すれば、入力信号強度が 1 digit 以下であっても正確に分解できることになる。

### 3.3 位置決め誤差の問題

レーザーレーダーで、水平方向で長い距離の測定を行う際、位置決め誤差を与えるいくつかの要因がある。一つは装置自体の性能にかかわることで、レーザーのビーム広がりや掃引装置の位置決め精度に基づくものである。本装置の場合、ビーム広がりが  $0.3$  mrad で、掃引装置の位置決め精度も  $\pm 0.3$  mrad である。

この要因のほかに重要な二つの点がある。一つは、地球が曲率を持っていること。もう一つは、大気の屈折率の影響である。

まず、曲率の問題について考える。レーザーレーダーの仰角を  $\theta$  として、 $R$  の地点を測定したとき、もし、地球が平面と見なせるならば、測定地点の高度  $H_0$  は

$$H_0 = R \sin \theta \quad (2)$$

となる。しかし、実際の高度  $H_c$  は

$$H_c = \sqrt{(R \cos \theta)^2 + (r_0 + R \sin \theta)^2} - r_0 \quad (3)$$

となる。ここで  $r_0$  は地球の半径 (6371 km) である。もし、水平距離が十分短ければ  $H_0$  と  $H_c$  はほぼ一致する。しかし、大型のレーザーレーダーで遠距離を測定する際にはかなりの差が出る。

次に大気の屈折率の影響を見る。地上及び高さ  $z$  における屈折率をそれぞれ  $n_0$  及び  $n$  とし、レーザービームの仰角を  $\theta_0$  とするとき、 $z$  の高さにおけるレーザービームの仰角  $\theta$  は次式の light-ray equation によって表される<sup>12)</sup>。

$$r_0 n_0 \cos \theta_0 = (r_0 + z) n \cos \theta \quad (4)$$

レーザービームの光路長  $R$  と高さ  $H_c$  の間には

$$R = \int_0^{H_c} \frac{dz}{\sin \theta} \quad (5)$$

の関係がある。(3)式と(4)式より

$$R = \int_0^{H_c} \frac{n(r_0 + z) dz}{\sqrt{n^2 (r_0 + z)^2 - n_0^2 r_0^2 \cos^2 \theta}} \quad (6)$$

となる。(6)式に高さごとの屈折率の値  $n$  を代入して積分を行うと、 $R$  と  $H_c$  との関係が得られる。なお、(6)式において  $n=n_0$  とおくと(3)式が導出される。

レーザーが発射されてから信号が受信されるまでの時間  $t$  と光路長  $R$  との間には

$$t = \frac{2nR}{c} \quad (7)$$

の関係がある。(7)式を(6)式に代入すると次式が得られる。

$$t = \frac{2}{c} \int_0^{H_c} \frac{n^2(r_0+z) dz}{\sqrt{n^2(r_0+z)^2 - n_0 r_0^2 \cos^2 \theta}} \quad (8)$$

(8)式の積分方程式を解くことにより得られる高度  $H_c$  が、地球の曲率と大気屈折率を考慮した実際の測定点の高度ということになる。

水平方向と鉛直方向の測定距離に対する測定高度の誤差 ( $H_c - H_0$ ) を、位置決め誤差と名付け、 $\Delta H$  で定義する。 $\Delta H$  を、仰角をパラメーターとして計算を行った。仰角が小さいときの水平距離に対する位置決め誤差の関係を、図 10(a) に示す。また、仰角が大きいときの測定高度に対する位置決め誤差の関係を、図 10(b) に示す。ここで、屈折率は水平方向に一樣であるとし、屈折率を求めるための空気分子密度は、US 標準大気表<sup>9)</sup>を用いた。

同図から明らかなように、位置決め誤差は水平距離に依存して大きくなる。また、位置決め誤差に与える曲率と屈折率の影響は、曲率の方が数倍大きい。例えば、仰角  $20^\circ$  で 25 km の高度を測定するとき、曲率による誤差は 369 m で、屈折率による誤差はマイナス 62 m である。結局、双方を考慮した誤差は 307 m になる。

現実の測定データについて、位置決め誤差の影響を眺めてみたい。図 10 の計算結果によると、位置決め誤差は仰角が大きくなる程顕著に表れる。図 11(a) に仰角を変えて 19 km から 28 km の高度まで測定した例を示す。同図の縦軸は、生の信号に距離補正を加え、対数をとったものである。また縦軸の原点は、1 本のデータごとに 0.05 ずつずらしてある。同図で 20 km, 22 km, 27 km 付近にそれぞれ存在するピークは、エルチチョン火山の爆発による成層圏に滞留しているエアロゾルである。図 11(a) は  $\Delta H$  の影響を考えていない場合である。すなわち、横軸には(2)式の  $H_0$  がとってある。同図によると、それぞれのピークの高度は仰角が小さくなるに従い、あたかも高い位置に存在するように測定されている。これに対して、(8)式を用いて補正を行った結果を図 11(b) に示す。この図においては、それぞれの仰角についてのピークの高度が良く一致している。この結果から、位置決め誤差の影響は無視できないことが明らかである。

#### 4 誤差の評価

本装置が真価を発揮するには、前節で述べたようなシステムティックな誤差の発生要因を取り除くことがまず重要である。さらに、電気回路系に混入するシステムティックな雑音を見積もって置く必要がある。レーザーレーダーにおいて問題となるこの種の雑音は、レーザーの発振に伴

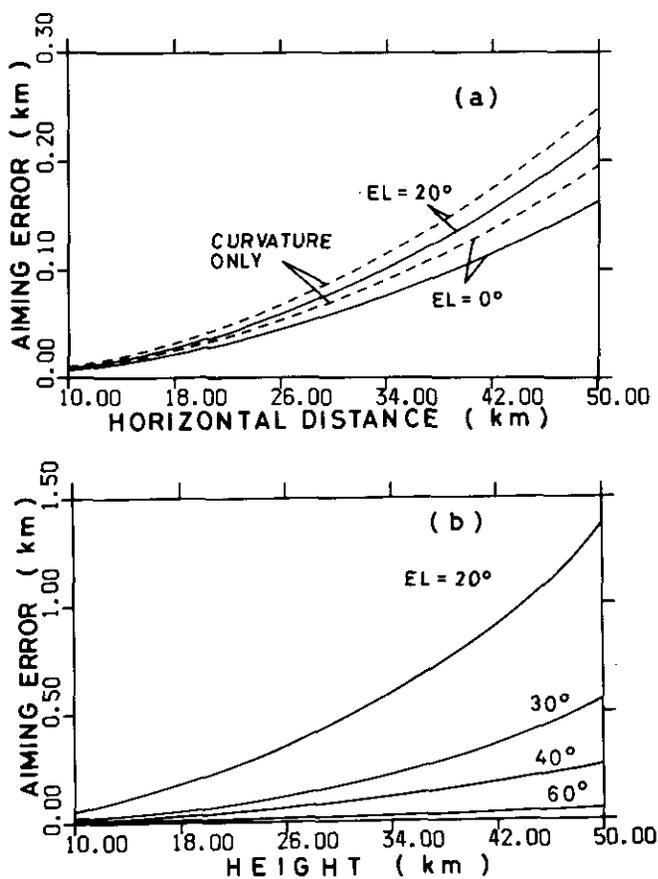


図 10 位置決め誤差の大きさ  
Fig. 10 Values of aiming error

うものである。ポッケルセルを用いた Q スイッチ方式の固体レーザーで発生する雑音で最も振幅の大きいものは、Q スイッチングの雑音である。しかし、この雑音はレーザー発振後、短時間のうちに減衰してしまうので、レーザーレーダーの信号とは時間的に分離ができる。むしろ重要なのは、フラッシュランプ用のコンデンサーバンクから放電した際の、電流のバックラッシュである。これはフラッシュランプの点灯が終わった後、フラッシュランプの点灯時間 (100 $\mu$ s) 程度続くために重要である。このような雑音はシールドやアース線の分離など、電子回路技術の雑音低減処置を駆使することにより、実用上問題のないレベルにまで小さくすることができた。

もし、レーザー発振に伴うシステムティック雑音を十分小さくできたとすると、測定精度を決定するのはランダムな雑音のみである。ランダム雑音の種類には、1) レーザーパワーのふらつき、2) 増幅器などの電気回路系で発生あるいは混入する雑音、3) PMT で発生するショット雑音の 3 種類である。

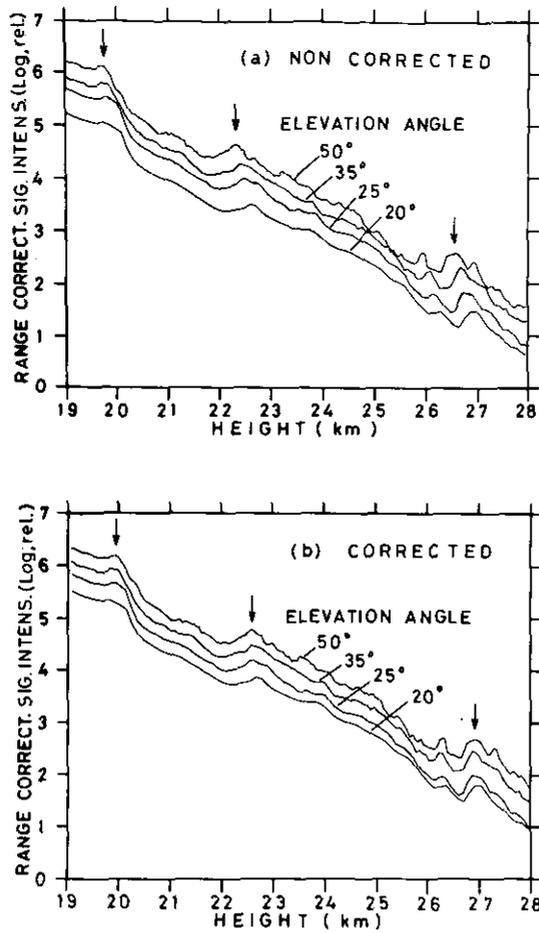


図 11 位置決め誤差を含む信号を、誤差の影響を取り除いた信号の形状  
 Fig. 11 Measured signal form with and removed aiming error

ここでは、まず、レーザー発振に伴うシステムティックノイズの大きさについて述べる。また、ランダムな三つの発生源からの雑音の大きさも評価したい。

#### 4.1 レーザー発振に伴うシステムティックな雑音の大きさ

レーザー発振に伴うシステムティックな雑音の大きさは、測定可能な状態にレーザーレーダーをセットし、PMTの高圧電圧をかけない状態で、レーザーをフラッシュさせ、トランジェントレコーダーに記録される電圧の変動を測定し、長時間の平均値を求めれば良い。図12にこうして測定した例を示す。横軸の最大値は、距離にして150 kmに相当する。この測定は、トランジェントレコーダーの入力レベルを最大感度に設定して行ったもので、200発のレーザーパルスの平均値

をとっている。この図より、レーザー発振に伴うシステムティックノイズの大きさは、測定的全領域にわたって  $\pm 10\mu\text{V}$  である。

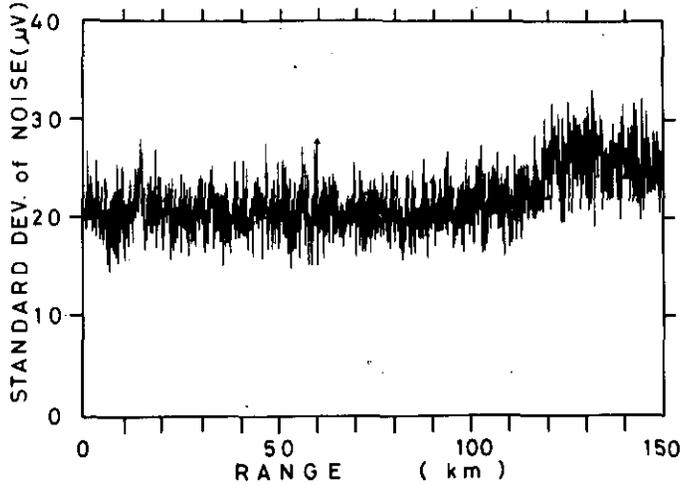


図 12 レーザー発振に基づき生じるシステムティックな電氣的雑音の強度

Fig. 12 Systematic electronic noise caused by a laser oscillation

#### 4.2 レーザーの出力のふらつき

レーザー出力のふらつきは、パワーモニターの出力を A-D 変換し、平均値と標準偏差を求めることによって測定した。10 分間 (15,000 ショット) について計算した結果、平均値に対する標準偏差は 12 となった。このことは、レーザー 1 ショットについて  $\delta_L = 8.3\%$  の誤差を生むということである。実際の測定においては、積算回数を  $m$  とすると、レーザー出力のふらつきにより生ずるレーザーレーダー信号の誤差は  $\delta_L / \sqrt{m}$  となる。

#### 4.3 電気回路で発生するランダムな雑音

電気回路で発生するランダムな雑音は、4.1 で述べたシステムティック雑音を測定するのと同じの方法で行うことができる。ただし、測定は平均値と標準偏差の両者を測定する必要がある。図 13 にレーザーのパルス数を 200 回としたときの測定の結果を示す。この結果より、電気回路で発生するランダムな雑音の標準偏差は、 $30\mu\text{V}$  以下ということになる。

#### 4.4 PMT で発生するショット雑音

4.3 までに述べてきた雑音は、理論的に扱うことは困難であったが、PMT で発生するショット

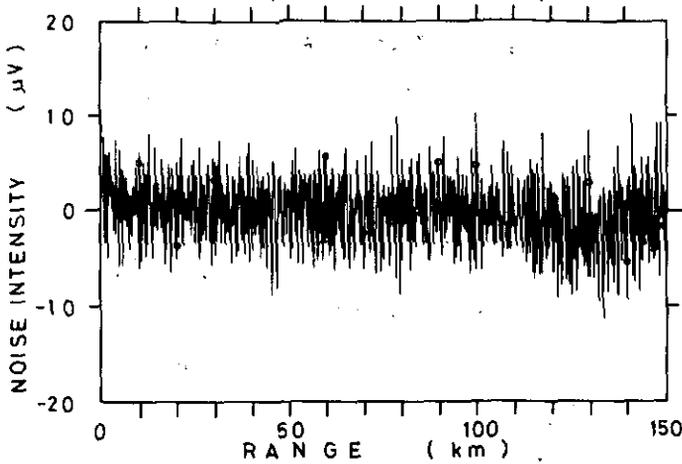


図 13 ランダムな電氣的雑音の強度

Fig. 13 Random electronic noise

雑音は定式化が可能である。

レーダーレーダー方程式をPMTから発生する信号パルス数の形で表現すると次式となる<sup>2)</sup>。

$$n(R) = n_0 L K \beta T^2 \eta A_r Y_r / R^2 \quad (9)$$

ここで  $n(R)$  は  $R$  の距離から受信される信号パルス数、 $n_0$  はレーザー1発当たりの光子数、 $L$  は距離分解能、 $K$  はレーザーレーダーの光学的効率、 $\beta$  は体積後方散乱係数、 $T$  は  $R$  の地点までの光の透過率、 $\eta$  はPMTの量子効率、 $A_r$  は受信望遠鏡の有効面積、 $Y_r$  はレーザービームと受信視野の重なり割合である。(9)式に装置の定数と、測定対象の条件を代入すると、レーザーレーダーで受信される信号量が求められる。(9)式を用いて信号のS/Nは次式で表される。

$$S/N = \frac{n(R) \sqrt{m}}{\sqrt{\mu (n(R) + n_B + n_T)}} \quad (10)$$

ここで、 $\mu$  はPMTの量子効率、 $m$  は測定に使用するレーザーのパルス数、 $n_B$ 、 $n_T$  はそれぞれ背景雑音と、PMTで発生する熱雑音の量である。

(9)、(10)式において、 $L$ 、 $A_r$ 、 $Y_r$ 、 $m$ 、 $R$  は正確に決められる値であるが、 $n_0$ 、 $K$ 、 $\eta$ 、 $\mu$ 、 $n_B$ 、 $n_T$  を精度良く求めることは困難で多少の誤差がある。表2にこれらについてもっともらしい値と、その誤差の範囲を示す。なお、同表の値は  $L=75\text{m}$  としたときの場合である。 $\beta$  と  $T$  の値は測定対象に依存する量である。 $\beta$  の値で最も確からしいのは、地上25 km以上の大気からの散乱である。この領域では、散乱の大きさはほとんどが空気分子によるものと考えて良く、その散乱強度は正確に見積もれる。また  $T$  の値は、仰角を変えて測定した2方向でのレーザーレー

表 2 S/N 計算に用いたパラメーターの値

Table 2 The value of parameters to be used for the calculation of S/N

Parameters	Values
Laser photon number/pulse; $n_0$	$1.08 \times 10^{18} \pm 10 \%$
Range resolution; $L$ (m)	75
Efficiency of optics; $K$ (%)	$0.6 \pm 10 \%$
Rayleigh backscattering coef; $\beta$ ( $m^{-1}$ )	$0.156 \times 10^{-5*}$
Transmittance of air; $T$	$0.54 \pm 20 \%^{**}$
Effective receiving area; $A_r$ ( $m^2$ )	1.67
Geometric form factor; $Y_r$	1
Quantum efficiency of a PMT; $\eta$ (%)	$0.08 \pm 10 \%$
Noise figure of a PMT; $\mu$	$2 \pm 10 \%$

\* The value of the ground surface.

\*\* The value at the 25km height.

ダー信号強度の比から求められる<sup>13)</sup>。この場合、光の減衰に最も寄与するエアロゾルの濃度は、水平方向に様に分布しているものと仮定する必要がある。すなわち、 $T$  を減衰係数の平均値  $\bar{\sigma}$  を用いて表すと

$$T = \exp(-\bar{\sigma} R) \quad (11)$$

となる。もし、2 方向の測定において  $\bar{\sigma}$  が同一であると仮定できれば、

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{R (\operatorname{cosec} \theta_2 - \operatorname{cosec} \theta_1)} \ln \frac{n(H, \theta_1) \operatorname{cosec}^2 \theta_1}{n(H, \theta_2) \operatorname{cosec}^2 \theta_2} \quad (12)$$

が得られる。ここで、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  はもとに仰角  $H$  は測定高度である。

図 14 に測定された信号とその誤差、及び理論値の計算結果をまとめて示す。測定は仰角  $20^\circ$  で行い、1 回の測定には、200 パルス使用している。そして、これを 50 回繰り返した上でその標準偏差を求め、誤差と実験値を求めた。図 14(a) は測定された信号の A スコープ波形とその標準偏差を示している。図 14(b) は図 14(a) から求めた S/N である。すなわちこの S/N は図 14(a) に示された二つの量を高度ごとに割算したものである。したがってこの S/N は、信号のショットノイズによるもの以外に、電気回路で発生する雑音やレーザー出力のふらつきの影響も受けている。図 14(b) には計算で求められたショットノイズによる S/N の上限と下限も示している。この計算で、(11) 式の  $T$  の値は  $\theta_1 = 20^\circ$ 、 $\theta_2 = 15^\circ$  として測定した二つの A スコープ信号から、(12) 式を用いて求めている。なお、地上から、25 km までの平均の  $\sigma$  の値は  $1.2 \times 10^{-5} m^{-1}$  であり、高度 25 km での  $T^2$  の値は 0.54 であった。こうして求められた  $T^2$  の値の誤差は、混合層高度の場所による違いなどにより生じ<sup>14)</sup>、20% 程度と見積もられる。地上での、レイリー体積後方散乱係数は、 $0.156 \times 10^{-5} m^{-1}$  としてある<sup>15)</sup>。図 14(b) によると、実験値の S/N は理論的に求められた S/N の上限と下限の間に入っており、この装置が設計どおり動作していることの大きな目安となっている

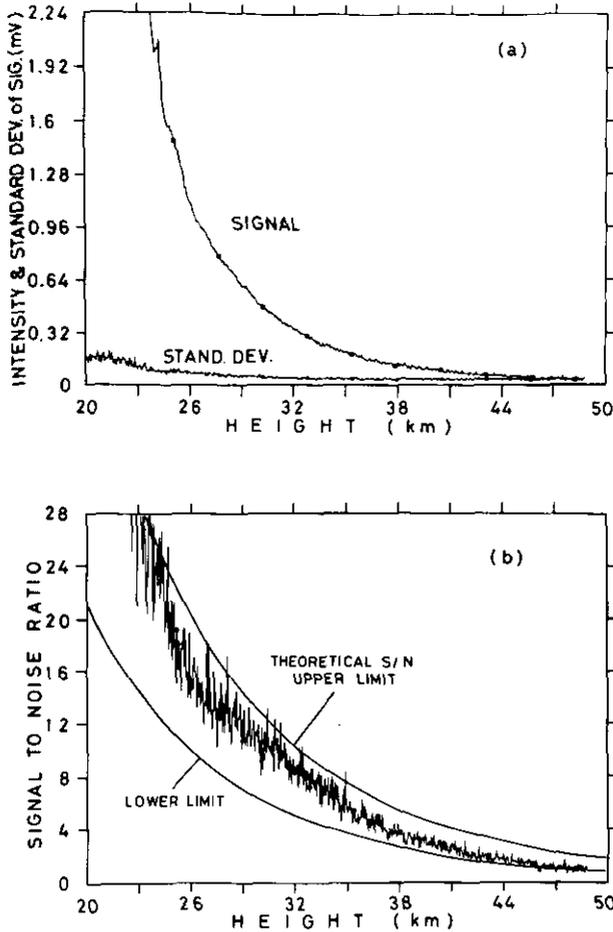


図 14 システムの S/N の測定値と計算値  
 Fig. 14 Measured and calculated S/N of the system

る。ここで、25 km 以下においては、実験値の S/N が理論値の上限に近い値を示しているのは、この領域には空気分子のみならずエアロゾルも存在し、それによる散乱により、信号強度が空気分子のみの場合よりも大きくなっているためである。また 40 km より高い高度で、下限に近い値を示しているのは、実験値の S/N には、図 12 で示したような電気回路系で発生する雑音がわずかに影響しており、それが、S/N の値の小さな領域で顕著に表れているためであると考えられる。なお、この測定は夜間行ったものであり、(9)式の  $n_B$  と  $n_T$  は  $n(R)$  に比べて十分に小さい。

## 5 まとめ

レーザーレーダー技術の発展と、測定対象の広域化に伴い、今後、増々レーザーレーダー装置

が大型化することが予想される。その場合、レーザーレーダー装置のハードウェアの構成において、十分な高精度と高信頼性が要求される。さらに重要なことは、測定上も多くの注意点が必要であるということである。すなわち、ここで述べたようにデータの収集において、PMTとA-D変換器の性質を十分理解しておくことが必要であることが第一点である。さらに位置決め誤差も忘れてはならない点である。

測定誤差の評価の結果、この装置は、設計どおりの性能を発揮できることが明らかになった。現実に設計どおりの性能を得たのは、信号系に混入する各種雑音の対策を十分に施したことの結果である。それには、この装置が完成してから、かなりの時間を要したことは事実である。

現在、この装置は1日平均4時間運転されており、大きなトラブルは発生していない。

### 引用文献

- 1) 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
- 2) Takeuchi, N., H. Shimizu, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui and H. Nakane (1983): Wide-area air pollution measurement by the NIES large lidar. In: Optical and Laser Remote Sensing, D. K. Killinger and Mooradian (eds.), Springer-Verlag, 364-373.
- 3) 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫(1982): 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, 国立公害研究所研究報告, 第34号, 61-81.
- 4) 清水 浩・松井一郎・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫(1982): 大型レーザーレーダーの性能試験, 国立公害研究所研究報告, 第34号, 83-106.
- 5) Shimizu, H., Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, I. Matsui and N. Takeuchi: A large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area. Appl. Opt. (to be published).
- 6) 清水 浩・飯倉善和・笹野泰弘・松井一郎: 遠距離測定用レーザーレーダーによる高精度測定のための誤差の解析とその低減法, 日本リモートセンシング学会誌 (印刷中).
- 7) Hunt, W. H. (1975): Measurements of signal-induced noise in photomultipliers in a lidar system. 7th International Laser Radar Conference Abstract, Menlo park, California, U.S.A.
- 8) Hunt, W. H. and S. K. Poultney (1975): Testing the linearity of response of gated photomultipliers in wide dynamic range laser radar systems, IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-22, 116-120.
- 9) Standard U. S. Atmosphere (1976): by NOAA, NASA and U.S. Air Force (NOAA-S/T 76-1562).
- 10) Allen, R. J. and W. E. Evans (1972): Laser radar (lidar) for mapping aerosol structure. Rev. Sci. Instr., **43**, 1422-1435.
- 11) 清水 浩・飯倉善和・笹野泰弘・松井一郎・竹内延夫(1981): デリザ信号の重畳によるA-D変換器分解能の改善法, 電子通信学会誌, J64-A, 963-969.
- 12) Kondratyef, K. Ya. (1969): Radiation in the Atmosphere. Academic Press, 163p.
- 13) Sandford, M. C. W. (1967): Laser scatter measurements in the atmosphere and above. J. Atmos. Terr. Phys., **29**, 1657-1665.
- 14) Sasano, Y., H. Shimizu and N. Takeuchi (1984): Convective cell structure revealed by Mie laser radar observation and image data processing. Appl. Opt., **21**, 3166-3169.

- 15) Penndorf, R. (1957) : Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering between 0.2 and 20.0  $\mu$  and their application to atmospheric optics. J. Opt. Soc. Am. **47**, 176-182

II-2 消散係数評価のための二成分レーザー  
レーダー方程式の解の性質\*

On the Solution of the Two-component Equation for  
Quantitative Analysis of Laser Radar Signal\*

笹野泰弘<sup>1</sup>・中根英昭<sup>1</sup>

Yasuhiro SASANO<sup>1</sup> and Hideaki NAKANE<sup>1</sup>

要 旨

空気分子とエアロゾルの二成分を考慮したレーザーレーダー方程式の安定な解法が、最近、提案された。本報告では数値シミュレーションにより、この解の性質を調べた結果を述べる。

二成分方程式解は、散乱パラメーター（消散係数と後方散乱係数の比）と境界条件の二つを与える必要があり、比較的、清浄な大気の場合には、これらのパラメーターの設定誤差が解に大きな影響をもたらすことが示される。一方、混濁大気の場合には、これらの影響は小さくなる。

Abstract

Numerical simulation was carried out to examine characteristics of the algorithm recently proposed for solving the two-component laser radar equation. Solution of the two-component laser radar equation requires a scattering parameter (ratio of volume extinction coefficient to volume backscattering coefficient) and a boundary value. It is shown that these parameters should be given accurately to obtain a reasonable solution in a relatively clear atmosphere. Errors due to the inaccuracy of the parameters can be reduced for a solution in a turbid atmosphere.

---

\* 本論文の大要は、Appl. Opt., **23**, 11-13, (1984)で発表した。

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

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

### 1 はじめに

レーザーレーダーの分野において、受信々号の定量的な解析は長年にわたって解決され得ない問題であった。この原因は、レーザーレーダー受信々号には、粒子による後方散乱の寄与と、消散の寄与の両者が関与しているため、これらを分離することの困難にあった。これに対して、種々の解析方法が提案されてきたが、いずれも満足のものではなかった<sup>1)</sup>。

最近、レーザーレーダー観測から消散係数の絶対値のプロファイルを求める有力な方法として、Klett<sup>2)</sup>が混濁大気に対する安定な解法を提案した。これは境界条件を遠方側におくことで解の発散を防ぐことができるという特長を有している。また、これに関連して、Fernald<sup>3)</sup>は、より一般的表現として、空気分子とエアロゾルの二成分の存在を考慮したレーザーレーダー方程式の解を示している。

この研究では、この二成分方程式の解について、その性質を調べ、特に、解に含まれるパラメーター（消散係数と後方散乱係数の比、以下では散乱パラメーターと呼ぶ） $S_1$ 、及び境界条件として与える境界値の誤差の影響について、モデル計算により調べる。

### 2 Fernald の解法

二成分方程式の解は次のように表現できる<sup>3)</sup>。

$$a_1(z) = -\frac{S_1}{S_2} a_2(z) + \frac{X(z) \exp\left\{2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} a_2(z) dz\right\}}{a_1(z_c) + \frac{S_1}{S_2} a_2(z_c) + 2 \int_z^{z_c} X(z) \exp\left\{2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} a_2(z') dz'\right\} dz} \quad (1)$$

ここで  $a_1$ 、 $a_2$  はエアロゾルによる消散係数、空気分子による消散係数を表している。また、 $S_1$ 、 $S_2$  はそれぞれエアロゾル、空気分子に関係する散乱パラメーターである。 $X(z)$  は距離自乗補正されたレーザーレーダー受信々号の大きさ、 $z_c$  は境界条件を与える距離である。一般に空気分子に関する量は適当な気象観測又は標準大気モデルを導入すれば既知と考えることができる。

Klett の解<sup>2)</sup>と呼ばれているものは、(1)式中の散乱パラメーター  $S_1$  を空気分子の散乱パラメーター  $S_2$  に等しいとおいた特別のケースに相当している（ただし、Klett の解の仮定である消散係数と後方散乱係数の関数関係のべき乗を 1 とおいたもの）。散乱パラメーターは、エアロゾルの粒径分布、複素屈折率等に依存する量で、種々の条件によりおよそ 10~100 の間の値をとる<sup>4)</sup>が、一般には未知の量のため、適当な推定値を用いざるを得ない。さらに、境界、 $z_c$  での値  $a_1(z_c)$  を何らかの方法、例えば slope method<sup>5)</sup>、で推定することが必要である。

二成分方程式の解の特徴について、Fernald<sup>3)</sup> は定性的な説明を試みている。それによれば、混

濁大気では(1)式右辺第2項の分母のうち、第1項(境界値項)が第2項に比べて相対的に小さくなり、境界値の与え方にあまり依らない解が得られる一方、清浄大気では、境界値の影響を受けやすく、また、散乱パラメーターを正しく与えることが必要となる。

### 3 数値シミュレーション

以下では、散乱パラメーター  $S_1$ 、及び境界条件  $\alpha_1(z_c)$  の設定誤差の、解  $\alpha_1(z)$  の誤差への影響をモデル計算により調べる。ここでは、水平方向のレーザーレーダー測定を念頭において、空気分子による消散、後方散乱係数をそれぞれ一定値  $\alpha_2=0.1331 \times 10^{-4}$ 、 $\beta_2=0.1560 \times 10^{-5}$  (レーザー波長は  $0.532 \mu\text{m}$ ) とした<sup>6)</sup>。エアロゾルの分布モデルとしては、

$$\hat{\alpha}_1(z) = T_1 \cdot \alpha_2 \cdot \left(1 + \sin \frac{2\pi z}{L}\right)$$

$$\hat{\beta}_1(z) = \hat{\alpha}_1(z) / \hat{S}_1$$

で与えた。ここで  $T_1$  は大気混濁の程度を表すパラメーター、 $L$  はエアロゾル分布の水平スケールである。また、大気モデルに関する量を  $\hat{\quad}$  の記号で示している。これらを真の分布として作られるレーザーレーダー受信々号を(1)式に代入し、解  $\alpha_1(z)$  を求める。このとき、境界条件は  $z_c = 10\text{km}$  において、 $\alpha_1(z_c)$  を与える。また、 $\Delta z = 10\text{cm}$  とし、Fernald の与えた漸化式<sup>3)</sup> で解を求める。

モデル計算の例を図1に示す。この例では、モデル大気として、 $S_1 = 50$ 、 $T_1 = 10.0$  を与え、解を求める際のパラメーター  $S_1$  が 90 の場合と、8.53 ( $S_1 = S_2$  のケース) の場合について、真の分布とともに(1)式による計算値を示している。境界条件としては真値を与えている。この図でも分かるように、解を求める際のパラメーター  $S_1$  の値が小さい(大きい)とき、計算値の分布の振幅を小さく(大きく)する働きをしている。Klett の解は真の分布よりもなだらかな分布を与えることになる。

種々の  $S_1$ 、 $T_1$  の組み合わせで与えられるモデル分布に対して、解のパラメーター  $S_1$  及び境界条件の値を変えて解を求め、真の分布との差について以下の式

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\alpha_1(z_i) - \hat{\alpha}_1(z_i)\}^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\alpha}_1(z_i)} \quad (N=1000)$$

で相対的な誤差を評価する。

モデル分布は次の条件を与えた。

- a) 大気混濁度： $T_1 = 5, 10, 20, 50$
- b) 散乱パラメーター： $S_1 = 10, 20, 30 \dots, 90$

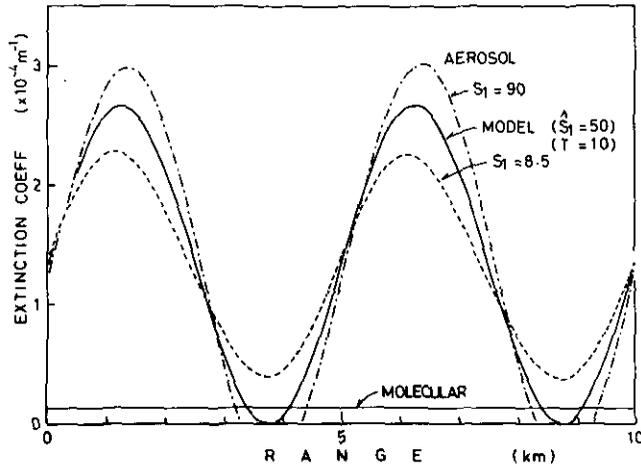


図 1 エアロゾルによる消散係数のモデル分布と、レーザーレーダー方程式に基づく解  
 モデル大気は  $\hat{S}_1=50$ ,  $T=10$  とした。解は  $S_1=90$  と  $8.5 (=S_2)$  の二通りのパラメーターで求めた。境界条件は真値を与えた。

Fig. 1 Aerosol extinction coefficient profiles  
 Model profile with  $S_1=50$  and  $T=10$ ; solution profiles with  $S_1=90$  and  $8.5 (=S_2)$ .  
 Boundary values are correctly given.

また、解を求めるに当たっては次の散乱パラメーター、境界条件を与えた。

- c) 散乱パラメーター： $S_1=8.53$  及び  $10, 20, 30, \dots, 90$
- d) 境界条件： $a_1(z_c)/\hat{a}_1(z_c)=0.2, 0.4, 0.6, \dots, 2.0$

#### 4 結果と考察

相対誤差  $\epsilon$  は上のすべての組み合わせについて計算したが、そのうちの一部を図 2 ( $T=5$ ) に等値線の形で示した。各々の図の 4 組の等値線図は、上から  $S_1=8.5$  (Klett の解),  $30, 60, 90$  に対応する。また、それぞれの等値線図は、横軸に境界条件の真値に対する比、縦軸に  $S_1$  の値をとって描いている。また図中の数字は相対誤差を示している。

これから、次のことが結論される。清浄な大気 ( $T_1=5$ ) のときは、比較的、混濁した大気 ( $T_1=20$ ) のときに比べると、 $S_1$  あるいは境界条件の誤差の影響は大きい。たとえ、境界条件を正確に与えても、 $S_1$  に誤差があると、解の誤差は大きい。逆に混濁大気の場合は、 $S_1$ 、境界条件にあまり依らず、誤差は小さくなり、誤差の小さい、範囲が広がる。このことは、Klett の解(すなわち、 $S_1=S_2$  とおくこと)が混濁大気においてのみ有効であることを意味している。

等値線全体の右下がりの傾向は次のことを意味する。すなわち  $S_1 < \hat{S}_1$  のとき境界条件は過大

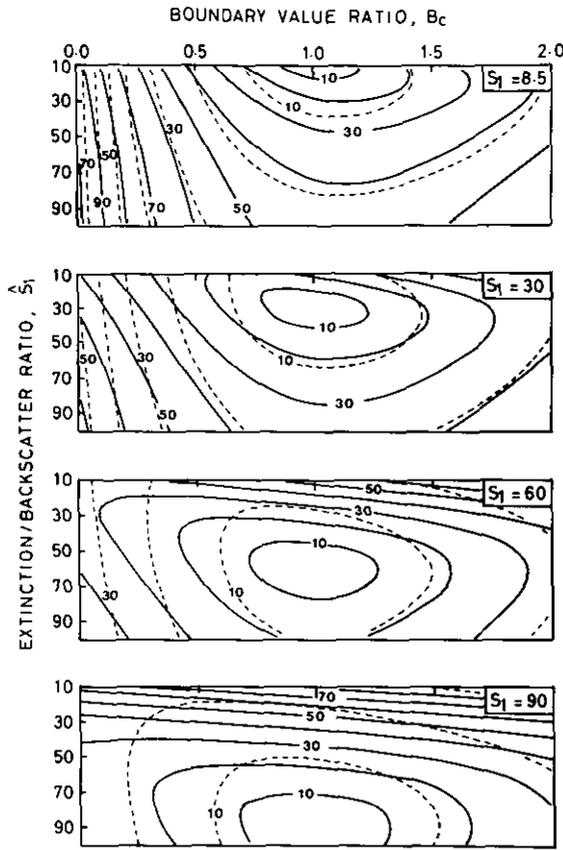


図 2 再現誤差（相対誤差，%）の等値線図

実線は  $T=5$ 、点線は  $T=20$  に対するもの。また、上から下へ、それぞれ  $S_1=8.5, 30, 60, 90$  とおいて解を求めた。各等値線図の縦軸はモデル大気の散乱パラメーター  $S_1$  を表し、横軸は境界条件をして与えた値を真値との比で表している。

Fig. 2 Reconstruction errors for the cases of  $T=5$  (solid curve) and  $T=20$  (dotted curve)

From the top to the bottom, the contour maps represent the results corresponding to the conditions that  $S=8.5$  (Klett's solution), 30, 60, 90. The abscissa is the ratio of the assumed boundary value to the true one, and the ordinate is the true extinction/backscatter ratio in the model. Figures in the contour map are relative errors (in percent).

評価の方が誤差は小さく、 $S_1 > \hat{S}_1$  のときは過少評価の方が良い結果を与える。

通常のレーザーレーダー観測だけから  $\hat{S}_1$  の値を知ることは不可能である以上、真値に近い  $S_1$  を推定するほかはない。また、Klettの解は、 $S_1 = S_2 (=8.53)$  とおくことに等しく、この値を採用する特別の優位性はないと言える。したがって、Fernaldの二成分方程式の解を採用することを前提とした上で、 $S_1$ の気象要素への依存性等を明らかにすることが今後、重要であろう。

境界条件を、解析対象の領域に比べて、十分遠方において与えられる場合には、境界条件の設

定誤差は解に対してあまり影響することはない。しかし、境界条件を遠方におけない場合には、境界条件を正確に与えることが必要となる。特に、S/N 比の低い領域の信号から境界値を決める (slope 法などで) ことを余儀なくされることが多く、このようなとき、次のような平滑化の方法は実用上、有効であろう。

$$\overline{X(z_{ic})} = \left[ \frac{1}{M} \sum_{i=i_i}^{i_c} X(z_i) \right] \exp(2\bar{\alpha}z_{ic})$$

ここで

$$M = (i_c - i_i + 1)$$

$\bar{\alpha}$  は  $z = z_{i_i} \sim z_{i_c}$  に間に対して slope 法で求めた平均の消散係数である。

### 引用文献

- 1) 笹野泰弘・竹内延夫(1982): 「環境科学特別研究」R-52 遠隔計測班, 昭和 57 年度研究報告予稿集, 9-12.
- 2) Klett, J. D. (1981): Stable analytical inversion solution for processing lidar returns (1981). Appl. Opt., **20**, 211-220.
- 3) Fernald, F. G. (1984): Analysis of atmospheric lidar observations; some comments. Appl. Opt., **23**, 652-653.
- 4) Zuev, V. E. (1982): Laser Beams in the Atmosphere (Translated by J. S. Wood). Consultants Bureau, New York.
- 5) Viezee, W., E. E. Uthe and R. T. H. Collis (1969): Lidar observations of airfield approach condition; an exploratory study. J. Appl. Meteorol., **8**, 274-283.
- 6) Penndorf, R. (1957): Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0  $\mu$  and their application to atmospheric optics. J. Opt. Soc. Am., **47**, 176-182.

II-3 レーザーレーダーと光散乱粒子計数器を用いた  
エアロゾルの散乱パラメーターの測定

**Measurement of the Scattering Parameter  
by Laser Radar and Optical Particle Counter**

中根英昭<sup>1</sup>・笹野泰弘<sup>1</sup>

Hideaki NAKANE<sup>1</sup> and Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>

**要 旨**

レーザーレーダー受信信号を解析してエアロゾル濃度分布を得るためには、エアロゾルの散乱パラメーター（消散係数と体積後方散乱係数の比）を推定することが必要である。本研究では、レーザーレーダーと光散乱粒子計数器（OPC）を用いてエアロゾルの散乱パラメーターを求める手法を開発した。

この手法では、OPCによって得られた粒径分布を用いてミー散乱理論計算を行い、それによって求めた消散係数と、レーザーレーダー信号を解析して得た消散係数が一致するようにエアロゾルの複素屈折率を決定し、散乱パラメーターを求める。

フィールド実験の結果、この手法により、散乱パラメーターを実用的な精度で求められることが明らかになった。

**Abstract**

In order to obtain the aerosol concentration distribution by analyzing signals of laser radar, estimation of the scattering parameter (the ratio of the volume extinction coefficient to the volume backscatter coefficient) is necessary. A method to measure the scattering parameter by laser radar and optical particle counter was developed and is described here. The method employs the principle that the volume extinction coefficient estimated by optical particle counter using Mie theory and that obtained by laser radar signals are equivalent when the assumed complex refractive index is valid. The result of field observation indicates that this method used to obtain the scattering parameter is useful.

---

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

## 1 はじめに

大気汚染状況の把握、視程の測定、大気の光学的厚さの測定等にレーザーレーダーを利用する場合、定量的なエアロゾル濃度分布を得る必要がある。

レーザーレーダーは光学的な測定であるが、測定されるエアロゾル濃度は質量濃度ではなく光学的な量である。レーザーレーダー信号はエアロゾルの体積後方散乱係数及び消散係数を反映している。視程、大気の光学的厚さ、個数・質量濃度との対応を考えるならば、レーザーレーダー計測によるエアロゾル濃度は消散係数の形で得られることが望ましい。

レーザーレーダー信号から消散係数を求めることは、長い間困難な問題であった。それは、レーザーレーダー信号から消散係数を得るための方程式(レーザーレーダー方程式)の解が不安定だったからである。

最近、Klett<sup>1)</sup>は、エアロゾル濃度の高い場合に適用可能なレーザーレーダー方程式の安定な解法を提案し、Fernald<sup>2)</sup>はこれをエアロゾル濃度に関係なく適用できるように一般化した。現在のところ、Fernaldの解法が低層大気におけるレーザーレーダー観測結果を解析する最も優れた方法であると我々は考えている。

しかし、Fernaldの解法を用いるためには、散乱パラメーター(消散係数と体積後方散乱係数の比)を与える必要がある。そして、解の精度は散乱パラメーターの精度に依存する<sup>3)</sup>。したがって、レーザーレーダー観測の都度、散乱パラメーターを測定するか、又は、気象条件、エアロゾルの発生源(エアロゾルの成分)を考慮して散乱パラメーターの取り得る範囲を推定することが重要である。

散乱パラメーターは、バイスタティック方式のレーザーレーダー<sup>4)</sup>、レーザーレーダーによる窒素分子のラマン散乱光の測定<sup>5,6)</sup>、高分解能レーザーレーダー<sup>7,8)</sup>によって求めることができる。また、水平方向にエアロゾルが一様に分布していると仮定して、スラントパス法によって散乱パラメーターを求める方法<sup>9)</sup>も用いられている。文献4)によれば、散乱パラメーターはほぼ10~100(sr)の範囲の値を取り、相対湿度と弱い正の相関がある。

散乱パラメーターの値と気象条件、エアロゾル発生源(成分)との関係を明らかにするためには、エアロゾルの粒径分布・複素屈折率の測定が重要である。これらは、ネフェロメーターによる散乱光強度及び偏光の角度分布の測定によって求めることができる<sup>10)</sup>。

しかし、ネフェロメーターは、装置が大がかりで、データの解析も複雑であるため、レーザーレーダーの補助データの測定という目的には適合しない。

本研究では、レーザーレーダーと光散乱粒子計数器(Optical Particle Counter, 略してOPC)を組み合わせた測定による散乱パラメーター・粒径分布・複素屈折率の測定の可能性を検討した。その結果、レーザーレーダー信号の解析に利用できる精度で散乱パラメーターを決定できることが明らかになった。

本報告の第2節では、測定原理について、第3節ではフィールド実験の結果と解析、誤差の評

値について述べる。

## 2 散乱パラメーターの測定原理

### 2.1 本測定手法の理論的背景

エアロゾルによる光の散乱・吸収は、組成の均一な球形粒子であれば、Mie 散乱理論によって計算することができる。計算に際して必要なパラメーターは、粒子の半径  $r$ 、及びエアロゾルの複素屈折率  $m^*(=n-ik)$  である。 $m^*$  の実数部  $n$  が散乱を表し、虚数部  $k$  が吸収を表す。

レーザー光がエアロゾルを含む大気中を通過する場合のレーザー光の減衰及び後方への散乱の大きさは、消散係数  $\alpha_1$ 、体積後方散乱係数  $\beta_1$  で表される。添字 1 はエアロゾルの寄与を表し、後に式(4)中でてくる添字 2 は空気分子の寄与を表す。エアロゾルが粒径分布  $n(r)$  をもつとき、 $\alpha_1$  及び  $\beta_1$  は次式で表される。

$$\alpha_1 = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_E \left( m^*, \frac{2\pi r}{\lambda} \right) n(r) dr \quad (1)$$

$$\beta_1 = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_B \left( m^*, \frac{2\pi r}{\lambda} \right) n(r) dr \quad (2)$$

ここで、 $Q_E \left( m^*, \frac{2\pi r}{\lambda} \right)$  及び  $Q_B \left( m^*, \frac{2\pi r}{\lambda} \right)$  は、それぞれ消散効率因子、後方散乱効率因子であり、Mie 散乱理論によって計算される。散乱パラメーター  $S_1$  は、次式で計算される。

$$S_1 = \frac{\alpha_1}{\beta_1} \quad (3)$$

したがって、エアロゾルの粒径分布  $n(r)$  と複素屈折率  $m^*$  が既知であれば、消散係数と散乱パラメーターを求めることができる。

一方、二成分レーザーレーダー方程式は次式で表される。

$$P(R) = C \{ \beta_1(R) + \beta_2(R) \} \exp[-2\{ \alpha_1(R) + \alpha_2(R) \}] R^{-2} \quad (4)$$

ここで、 $R$  はレーザーレーダーから測定点までの距離、 $P(R)$  はレーザーレーダー信号であり、 $C$  は装置定数である。レーザーレーダーは距離分解能を持っているため、 $\alpha$  及び  $\beta$  は距離の関数  $\alpha(R)$ 、 $\beta(R)$  になっている。また、二成分レーザーレーダー方程式の解として得られるエアロゾルの消散係数  $\alpha_1(R)$  は次式で表される。

$$\alpha_1(R) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_2(R) + \frac{X(R_c)}{\alpha_1(R_c) + \frac{S_1}{S_2} \alpha_2(R_c)} + 2 \int_R^{R_c} X(R) \exp \left[ 2 \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \int_R^{R_c} \alpha_2(R') dR' \right] dR \quad (5)$$

ここで、 $X(R)$ はレーザーレーダー信号に距離の自乗をかけたものであり、 $R_c$ は境界値を与える距離である。 $R_c$ を十分大きくとれば、右辺の第2項の分母第1項(境界条件を含む項)は分母第2項に対して無視できる大きくなる。空気の散乱パラメーター及び消散係数  $S_2$ 、 $\alpha_2(R)$ は既知である。したがって、エアロゾルの散乱パラメーター  $S_1$ が既知であれば、レーザーレーダー信号からエアロゾルの消散係数  $\alpha_1(R)$ を求めることができる。

### 2.2 散乱パラメーターの測定原理の概略

上に述べたように、エアロゾルの粒径分布を測定すれば、散乱パラメーターと消散係数が複素屈折率の関数として求められる。また散乱パラメーターを与えれば、式(5)によって消散係数が求められる。そこで、粒径分布から求めた散乱パラメーター、消散係数と式(5)中のそれとの間に矛盾のないようにエアロゾルの複素屈折率を決定し、この複素屈折率に対応する散乱パラメーターを得ることができる。このような考え方に基づいて以下の具体的な測定手続きを構成した。

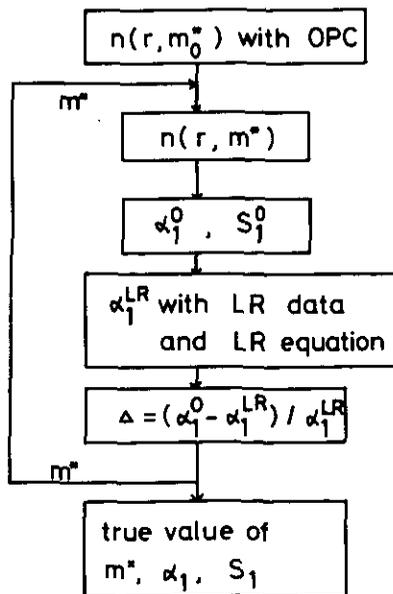


図 1 散乱パラメーターの測定のプロローチャート

Fig. 1 Flow chart of the measurement of the scattering parameter

散乱パラメーター及び複素屈折率の測定のフローチャートを図1に示す。以下順を追って図1の説明を行う。

- 1) レーザーレーダーの光路の真近で OPC による粒径分布  $n(r, m_0^*)$  の測定を行う。ここで得られる粒径分布は、大気中のエアロゾルが、ポリスチレンラテックスと等しい複素屈折率  $m_0^*(=1.595)$  を持っているとの仮定に基づいたものである。
- 2) 大気中のエアロゾルの真の複素屈折率を  $m^*$  と仮定し、粒径分布を補正する。実際には真の複素屈折率を前もって知ることはできないので、粒径分布を複素屈折率の関数として表す。
- 3) 仮定した複素屈折率と補正された粒径分布  $n(r, m^*)$  から、式(1), (2), (3)を用いて  $\alpha_i^0$ ,  $S_i^0$  を求める。添字は OPC を表す。
- 4) レーザーレーダーのデータ及び Fernald の解法、すなわち式(5)を用いて、OPC 観測地点の消散係数  $\alpha_i^{LR}$  を求める。添字 LR はレーザーレーダーを表す。
- 5) 4) で得た  $\alpha_i^{LR}$  と(3)で得た  $\alpha_i^0$  を比較し、その差の相対値  $\Delta$  を求める。 $\Delta$  は次式で定義される。

$$\Delta = (\alpha_i^0 - \alpha_i^{LR}) / \alpha_i^{LR} \quad (6)$$

- 6)  $m^*$  の値を変えて 2)-5) を繰り返す。
- 7)  $\Delta=0$  となる複素屈折率  $m^*$  を求める。
- 8) 7) の  $m^*$  を用いて  $\Delta=0$  になる  $n(r, m^*)$ ,  $S_i^0$  を求める。これらが最も確からしい複素屈折率、粒径分布、散乱パラメーターである。

実際には、 $m^*$  は複素数であるため  $\alpha_i^0$  と  $\alpha_i^{LR}$  は曲面であり、これらが交わる場合、一般に、交線は曲線になる。これが  $\Delta=0$  を表す曲線である。したがって  $m^*$  を一意的に確定するためには、補助的な情報が必要である。しかし、このようにして存在範囲を限定された  $m^*$  に対応する  $S_i^0$  の取り得る範囲が十分限定されているならば、レーザーレーダー方程式を解くための散乱パラメーターの評価という実用上の目的は達せられたとすることができる。

### 2.3 光散乱粒子計数器で求められる粒径分布に対応する複素屈折率補正

光散乱粒子計数器 (OPC) は、光をエアロゾルに照射し、散乱光の強度から粒子の大きさを、散乱光パルス数から粒子の個数を測定する装置である。散乱光強度及びその角度分布はエアロゾルの複素屈折率に強く依存する。したがって、等しい粒径を持っていても複素屈折率が異なれば散乱光強度が異なり、結果的に異なった粒径を持った粒子として計数されてしまう。

白色光源を用いた側方散乱粒子カウンター、及び前方散乱粒子カウンターの応答計算は金川<sup>11)</sup>によって行われた。レーザーを光源に用いた場合には応答計算は簡単になる。この場合、金川の式を変形すると光電管に発生する光電流  $I_p$  は、

$$I_p = K \int_{\theta_1}^{\theta_2} \lambda^2 (i_1 + i_2) d\theta \tag{7}$$

となる。ここで  $K$  は装置定数、 $\lambda$  はレーザーの波長、 $\theta$  は散乱角度、 $i_1, i_2$  はそれぞれ垂直及び水平偏向成分散乱強度分布を示す関数である。

式(7)を用いて、Royco LAS 226 レーザーパーティクルカウンターの場合について  $I_p$  を計算し、図2に示した。 $\theta_1 = 35^\circ, \theta_2 = 120^\circ$  である。実線は複素屈折率  $m^* = 1.595 - 0.0i$  のポリスチレンラテックス粒子に対する応答であり、破線は  $m^* = 1.50 - 0.01i$ 、一点鎖線は  $m^* = 1.50 - 0.03i$  のエアロゾルに対する応答である。○印はメーカーによる較正データであるが、理論計算によく一致している。横線は OPC の各粒径域を区切る粒径に対応する  $I_p$  である。例えば第10チャンネルは直径  $2.37\mu\text{m}$  のポリスチレンラテックスに対応する  $I_p$  によって区切られるが、 $m^* = 1.50 - 0.03i$  の場合には、この  $I_p$  を与える粒子の直径は  $8.74\mu\text{m}$  になる。このように、複素屈折率の虚数部が増加すると、真の粒径分布は OPC によって測定された粒径分布よりはるかに大粒子側にずれたものになる。このずれは、粒子の直径が  $1\mu\text{m}$  を越えると顕著に現れる。

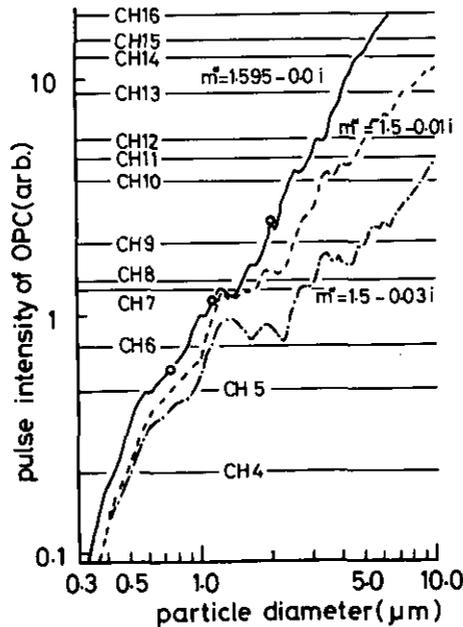


図 2 エアロゾルの複素屈折率による OPC の応答の変化

Fig. 2 Dependence of the response curves of an optical particle counter on the complex refractive index of aerosols

## 2.4 光散乱粒子計数器のデータに基づく $a_i^0$ 及び $S_i^0$ の評価手法

本節では OPC データから精度良く  $a_i^0$  と  $S_i^0$  を求めるための手続きについて述べる。その手続きには、

- 1) OPC によって得られた粒径分布を個数表示から体積表示に変換する。
- 2) 体積表示された OPC データから下に述べる  $r_i$  と  $r_{i+1}$  を求める。

という 2 段階からなる。

まず、OPC のデータを体積表示に変換することの意義について述べる。

OPC によって得られる量は、 $i$  番目の粒径域が半径  $r_i$  から  $r_{i+1}$  であるとする、半径が、 $r_i \leq r < r_{i+1}$  という条件を満たすエアロゾルの個数  $\Delta N_i$  である。 $r_i$  から  $r_{i+1}$  の間の粒径分布に関しては全く情報を持っていないので、この間の粒径分布は一定とせざるを得ない。このための誤差を小さくするためには、粒径分布を個数表示の粒径分布 ( $dN/d\ln r$ ) ではなく、体積表示の粒径分布 ( $dV/d\ln r$ ) で表すと良い。(ここで、 $N$ 、 $V$  はそれぞれエアロゾルの総個数密度、全体積密度である。その理由は、大気中のエアロゾルの粒径分布は近似的にユング分布、

$$\frac{dN}{d\ln r} = Cr^{-a}, \quad (8)$$

$$a \doteq 3$$

で表されるが、 $a=3$  の場合のユング分布は体積表示によれば、

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{4\pi C}{3} = \text{constant} \quad (9)$$

となる。したがって、体積表示の粒径分布を用いるならば、誤差を小さくすることができる。

次に、測定量  $\Delta N_i$  から ( $dV/d\ln r$ ) を求める方法を以下に示す。

粒径域  $[r_i, r_{i+1}]$  では ( $dV/d\ln r$ ) は一定と考えるので、

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\ln r} &= \frac{3}{4\pi r^3} \frac{dV}{d\ln r} \\ &= \frac{3}{4\pi r^3} \Delta V \end{aligned} \quad (10)$$

である。また、

$$\begin{aligned} \Delta N_i &= \int_{\ln r_i}^{\ln r_{i+1}} \frac{dN}{d\ln r} d\ln r \\ &= \left( \frac{\Delta V}{\Delta \ln r} \right)_i \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{r_i^3} - \frac{1}{r_{i+1}^3} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

である。したがって、 $i$  番目の粒径域における粒径分布は、

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta \ln r}\right)_i = 4\pi \Delta N_i (r_i^{-3} - r_{i+1}^{-3})^{-1} \quad (12)$$

である。

更に、 $(\Delta V/\Delta \ln r)$  を用いるならば、消散係数と散乱パラメーターを計算する方法は以下のよう  
に定式化される。体積表示の粒径分布  $(dV/d \ln r)$  を用いると式(1)は変形されて、

$$\alpha_i^0 = \int_0^\infty \frac{3}{4r} Q_E \left( m^*, \frac{2\pi r}{\lambda} \right) \frac{dV}{d \ln r} d \ln r \quad (13)$$

となる。式(2)についても同様である。 $(\Delta V/\Delta \ln r)$  を用いると  $\alpha_i^0$  は、

$$\alpha_i^0 = \sum_j K_j^E (\Delta V/\Delta \ln r)_i \quad (14)$$

ここで、 $K_j^E$  は、

$$K_j^E = \int_{\ln r_i}^{\ln r_{j+1}} \frac{3}{4r} Q_E \left( m^*, \frac{2\pi r}{\lambda} \right) d \ln r / \int_{\ln r_i}^{\ln r_{j+1}} d \ln r_i \quad (15)$$

である。 $\beta_1$  についても、 $K_j^E$  と同様に定義される  $K_j^B$  を用いて計算する。このようにして、OPC の  
データ  $\Delta N_i$  を基にして、 $\alpha_i^0$ 、 $S_i^0$  を求めることができる。ここで注意すべきことは、粒径  $r_i$ 、粒  
径分布  $(\Delta V/\Delta \ln r)_i$  は複素屈折率補正のために、 $m^*$  の関数になることである。

### 3 測定と結果

#### 3.1 測定

フィールド観測は 1984 年 3 月 1 日から 13 日の間の 5 日間、建設省国土地理院、建設省土木研  
究所及び大穂中学校で行った。ここに紹介するフィールド実験データは、1984 年 3 月 5 日 15 時 54  
分から 16 時 2 分間に土木研究所本館屋上で得られたものである。解析には、この地点に置かれ  
た Royco LAS 226 レーザーエアロゾルパーティクルカウンターによって 2 分ごとに粒径分布を  
観測して 8 分間平均値を求め、これを用いた。

また、この実験では、レーザービームが OPC から数 m 離れた所を通るように、レーザーレー  
ダーの方向を調整した。レーザーの繰り返し周波数は 28 Hz である。50 パルスの信号を積算して  
S/N 比を改善し、これを 1 個 (カウント) のレーザーレーダー信号データとした。

#### 3.2 データの解析

解析は前説で述べた手続きにより行った。すなわち、エアロゾルの複素屈折率  $m^*$  をパラメー

ターとして与え、粒径分布の補正、 $\alpha_i^0$ ,  $S_i^0$ ,  $\alpha_i^R$ ,  $\Delta$  の計算を行った。ここで、 $m^*$  の実数部  $k$  は 1.35 から 1.65 まで 0.05 刻みで、虚数部  $n$  は 0 から 0.05 まで 0.005 刻みで変化させた。したがって 70 個の  $m^*$  について計算したことになる。

図 3 に、複素屈折率に関する補正、粒径分布の変化の一例を示す。(a) は、複素屈折率に関する補正をせずに求めた粒径分布、すなわち  $m^*=1.595-0.01i$  に対する粒径分布、(b) は  $m^*=1.50-0.01i$  に

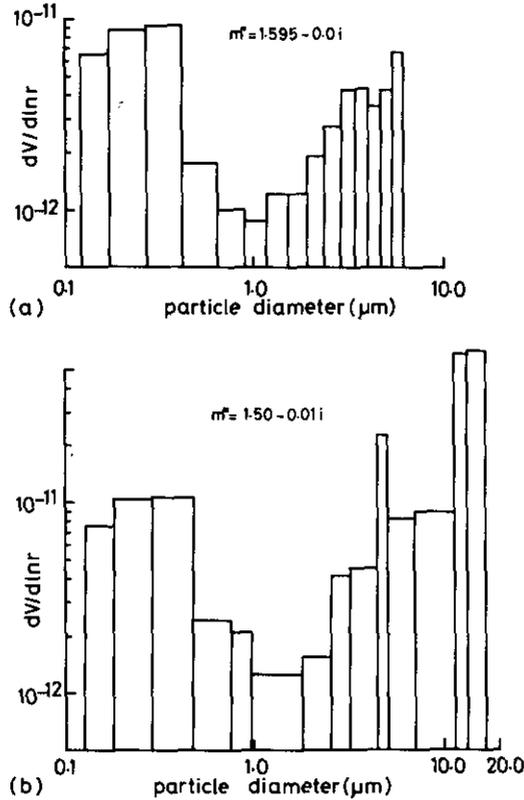


図 3 エアロゾルの粒径分布の測定例

観測日時：1984年3月5日，15時54分-16時2分。

観測場所：土木研究所本館屋上。

(a) OPCによって得られた体積表示の粒径分布。

(b)  $m^*=1.5-0.01i$ として(a)を複素屈折率補正した粒径分布。

Fig. 3 Example of aerosol size distribution measured in the field measurement

Time : Mar. 5, 1984, 15:54-16:02

Place : the housetop of the main building of the Public Works Research Institute

(a) the volume size distribution obtained by an optical particle counter

(b) the corrected volume size distribution when the complex refractive index,  $m^*$ , is assumed to be  $1.5-0.01i$ .

対する粒径分布である。なお、OPCの第16チャンネル(直径が $6.12\mu\text{m}$ 以上の粒子の全個数が表示される)は無視した。粒子の直径が $1\mu\text{m}$ 以下では補正の影響は小さいが、それ以上では影響が大きい。

このように、各 $m^*$ について、図3(b)のような、補正を施した粒径分布が得られ、これを用いて $\theta_i^0$ と $S_i^0$ が得られる。

この70個の $S_i^0$ のそれぞれと、約2秒ごと、300カウントのレーザーレーダーのデータを式(5)に代入し、得られた消散係数を時間平均して $\alpha_i^R$ を求めた。このとき境界条件を与える距離 $R_c$ を25 km, 境界値 $\alpha_i(R_c)=5\theta_i(R_c)$ , すなわち、 $\alpha_i(R_c)=6.65\times 10^{-4}\text{m}^{-1}$ とした。この条件で、境界値の誤差による解の誤差を見積もると、 $R=9\text{ km}$ では3%以下になる。

この計算に使用したレーザーレーダー信号を図4に示す。OPCによる観測を行った土木研究所本館屋上は9 kmの距離にある。9 km地点の信号はピークに挟まれた平坦部分になっている。

図5は $\alpha_i^0$ と $\alpha_i^R$ の複素屈折率依存性を示したものである。 $\alpha_i^0$ が $0.9\times 10^{-4}\text{m}^{-1}$ から $1.8\times 10^{-4}\text{m}^{-1}$ まで大きく変化するのに対して、 $\alpha_i^R$ はほとんど一定である。これは次の理由によるものである。 $\alpha_i^0$ は消散効率因子 $Q_E(m^*, 2\pi r/\lambda)$ 及び粒径分布 $n(r, m^*)$ の複素屈折率依存性に従って変化する。それに対して、 $\alpha_i^R$ は、エアロゾル分布の形に大きく依存する。平坦なエアロゾル分布の場合には、 $\alpha_i^R$ の散乱パラメーター依存性は小さい。

$\Delta=0$ , すなわち $\alpha_i^0=\alpha_i^R$ の条件を満たす $m^*$ は複素平面上の曲線として表される。これを図6に太い実線で示した。Takamuraら<sup>10)</sup>は仙台において $m^*$ を10か月間測定した。その結果によれば、この期間、複素屈折率の実数部 $Re(m^*)$ の範囲は、

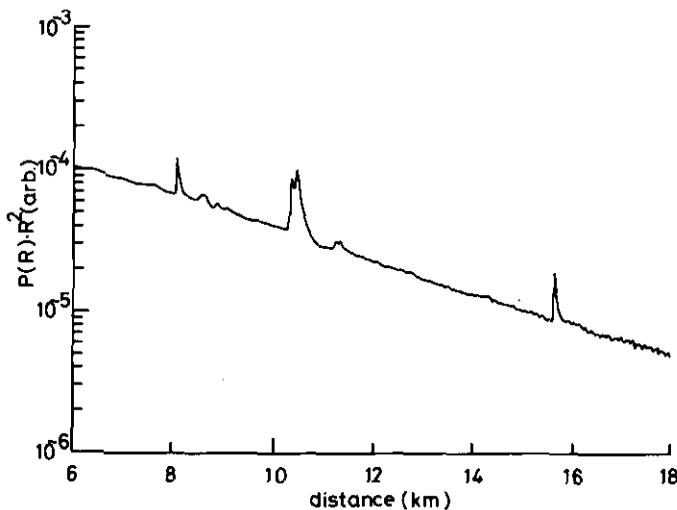


図 4 レーザーレーダー受信信号の測定例

Fig. 4 Example of the obtained return signal of the laser radar

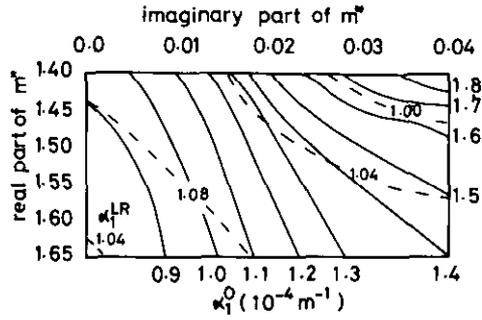


図 5  $\alpha_i^0$  及び  $\alpha_i^{LR}$  の複素屈折率に対する依存性  
 $\alpha_i^0$  を実線,  $\alpha_i^{LR}$  を破線で表す。

Fig. 5 Dependence of  $\alpha_i^0$  and  $\alpha_i^{LR}$  on  $m^*$   
 The solid and broken lines indicate  $\alpha_i^0$  and  $\alpha_i^{LR}$ , respectively.

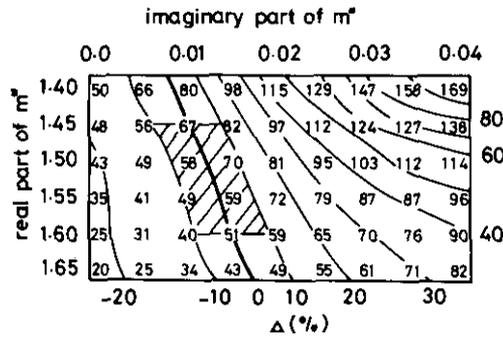


図 6  $\alpha_i^0$  と  $\alpha_i^{LR}$  の差の相対値  
 図中の数字は散乱パラメーター。

Fig. 6 The relative discrepancy of  $\alpha_i^0$  from  $\alpha_i^{LR}$ .  
 The figures express  $S_1^0$ .

$$1.45 < \text{Re}(m^*) < 1.60$$

であった。本測定においても、 $m^*$  の実数部がこの範囲にあるとすれば、図 6 より  $m^*$  の虚数部は 0.01 と 0.015 の間、 $S_1$  は 51 と 67 の間にあることになる。

### 3.3 結果と検討

前項の結果は OPC とレーザーレーダーのデータに誤差がない場合である。しかし、実際には次に示すような誤差要因があるため、 $S_1$  にも誤差があると考えられる。

- 1) レーザーレーダー信号の測定誤差、

- 2) 境界値  $\alpha_1(R_c)=5\alpha_2$  と置いたことによる、レーザーレーダー方程式解法上の誤差、
- 3) OPC の粒径域の較正における誤差、OPC のフローメータの誤差、
- 4) なめらかな粒径分布をヒストグラムで表すことによる誤差、
- 5)  $0.12\mu\text{m}$  以下の粒子及び  $6.12\mu\text{m}$  以上の粒子 (ただし、複素屈折率補正をしていない粒径である) を無視していることによる誤差、

である。

このうち、1)、2)の誤差は、大型レーザーレーダーの性能、 $R_c$  が十分遠方 (25 km) であることから、それぞれ 3% 程度、又はそれ以下であると考えて良い。

3)の OPC の粒径域の較正上の誤差は、メーカーのデータによると、 $0.721\mu\text{m}$  において  $0.0057\mu\text{m}$  (0.79%) となっている。ユング分布を仮定すると、この粒径域の誤差から、3% 程度の粒子数の誤差が生ずる。フローメータの誤差は  $\pm 3\%$  とされている。

4)のヒストグラムで表すことによる誤差は、粒径分布に依存する。ユング分布の場合には誤差は生じない。 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$  と  $10\sim 20\mu\text{m}$  付近にピークのある 2 山分布を仮定すると、16 チャンネルの粒径域を持つロイコ LAS 226 の場合に誤差を見積もると 10% 以下になった。

5)の誤差で問題になるのは  $6.12\mu\text{m}$  以上の粒子寄与であるが、これを見積もるには、 $6.12\mu\text{m}$  以上の粒子の粒径分布を知る必要がある。ここで検討しているデータについてはこの情報がないので、 $\alpha_1^0$  を過少評価している可能性があること、したがって等値線が全体として左に寄る可能性のあることを指摘するにとどめる。

1)-4)の誤差は全体として  $\pm 10\%$  程度になると思われる。

以上の考察を総合するならば、真の複素屈折率は図 6 の斜線部分内に存在すると考えられる。すなわち、

$$0.005 < \text{Im}(m^*) < 0.02$$

$$40 < S_1 < 80$$

である。 $S_1$  についてこれだけの情報が得られるならば、通常、二成分レーザーレーダー方程式を解いて得られるエアロゾルの消散係数の誤差が 10% 以下に抑えられる。このような意味において、本方法がエアロゾルの散乱パラメーターの値を決定するために有効であることが確認されたと言える。

#### 4 まとめ

レーザーレーダーと光散乱粒子計数器を用いてエアロゾルの散乱パラメーター (消散係数と体積後方散乱係数の比) を求める方法を提案し、フィールド実験によって有効性を確認した。

主な誤差は光散乱粒子計数器の誤差に起因する。

今後の課題として重要なことは、光散乱粒子計数器の較正を広範囲の粒径で行うこと、 $6.12\mu\text{m}$ 以上の粒径のエアロゾルについて、粒径分布を得ることである。また、散乱パラメーターの時間変化、日変化、空間変化について解析を進める必要がある。

## 謝 辞

フィールド実験の場所を提供して下さった、建設省国土地理院、建設省土木研究所及び大穂町立大穂中学校の関係者の方々に感謝します。

## 引 用 文 献

- 1) Klett, J. D. (1981): Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Appl. Opt.*, **20**, 211-220.
- 2) Fernald, F. G. (1984): Analysis of atmospheric lidar observations: some comments. *Appl. Opt.*, **23**, 625-653.
- 3) Sasano, Y. and H. Nakane (1984): Significance of the extinction/backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation. *Appl. Opt.*, **23**, 11-13.
- 4) Zuev, V. E. (1982): *Laser Beams in the Atmosphere*. (Translated by J. S. Wood). Consultants Bureau, New York, 356-358.
- 5) 清水 浩・小林喬郎・稲葉文男(1977): 対流圏大気の多元情報測定および処理のためのレーザーレーダーシステム, 電通学会論文誌, J60-C, 162-169.
- 6) Yu. F. Arshinov, S. M. Bobrovnikov and V. E. Zuev (1984): Remote determination of the atmospheric aerosol optical parameters using a Raman lidar. in *Proceedings, 12th International Laser Radar Conference, Aix-en-Provence (August 1984)*, 63-65.
- 7) Eloranta, E. V., F. L. Rosler and J. T. Sroga (1982): The High Spectral Resolution Lidar. in *Technical Digest, Workshop on Optical and Laser Remote Sensing, Monterey, Calif., Feb. 1982*, Paper 13.
- 8) Simizu, H., S. A. Lee and C. Y. She (1983): High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters. *Appl. Opt.*, **22**, 1373-1381.
- 9) Spinhirne, J. D., J. A. Reagan and B. M. Herman (1980): Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in the troposphere by lidar techniques. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 426-438.
- 10) Takamura, T., M. Tanaka and T. Nakajima (1984): Effects of atmospheric humidity on the refractive index and the size distribution of aerosols as estimated from light scattering measurements. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **62**, 573-582.
- 11) 金川 昭(1970): 前方光散乱粒子カウンターの応答計算, 化学工学, **34**, 991-996.

II-4 大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル  
濃度分布の定量的測定

Obtaining Quantitative Aerosol Concentration Distribution  
for Wide Area with Large Laser Radar

中根英昭<sup>1</sup>・笹野泰弘<sup>1</sup>・清水 浩<sup>1</sup>・杉本伸夫<sup>1</sup>  
松井一郎<sup>2</sup>・竹内延夫<sup>1</sup>・浦 慶<sup>3</sup>・北村新三<sup>4</sup>

Hideaki NAKANE<sup>1</sup>, Yasuhiro SASANO<sup>1</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>1</sup>,  
Nobuo SUGIMOTO<sup>1</sup>, Ichiro MATSUI<sup>2</sup>, Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup>,  
Pu QING<sup>3</sup> and Shinzo KITAMURA<sup>4</sup>

要 旨

レーザーレーダーによる測定データからエアロゾル濃度分布を定量的に得るための解析手法を開発した。この手法の適用によって、レーザー光の減衰を補正する問題及び装置定数を較正する問題が解決され、エアロゾル濃度(消散係数、単位： $m^{-1}$ で表す)の絶対値の分布を得ることができるようになった。

上の成果は、レーザーレーダー方程式から導かれる微分方程式の境界条件を精度良く決める問題を解決するとともに、散乱パラメーターの誤差から生ずる消散係数の誤差を解析することによって得られた。

開発された手法は、国立公害研究所の大型レーザーレーダーによる観測の結果に適用さ

- 
1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, 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小野川16番2  
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
  3. 昭和59年度 国立公害研究所共同研究員(神戸大学工学部計測工学科 〒657 神戸市灘区六甲台町)  
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Engineering, Kobe University Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657, Japan.)
  4. 昭和55~59年度 国立公害研究所客員研究員(神戸大学工学部計測工学科 〒657 神戸市灘区六甲台町)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Engineering, Kobe University Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657, Japan.)

れた。その結果、良好な条件のもとでは、東京上空を含む半径 50 km 圏のエアロゾル分布が得られた。得られた 2 次元データから、エアロゾルの発生源や拡散状況、都市域や工業地帯のエアロゾル濃度の高いこと等が容易に読みとることができた。

### Abstract

A method to extract quantitative aerosol concentration distributions from data measured with a laser radar was developed. Since this method enables extinction correction and the calibration of the laser radar system, the distribution of the absolute aerosol concentration can be obtained, where the aerosol concentration is expressed in terms of the volume extinction coefficient. A method to evaluate the boundary conditions of the differential laser radar equation was developed and the error of the volume extinction coefficient due to the error of the scattering parameter was examined.

This method was applied to data measured with the large laser radar of the National Institute for Environmental Studies, and aerosol concentration maps for a wide area including the city of Tokyo were obtained. These two-dimensional data show the emission sources of aerosols and their horizontal diffusion profiles. These data also show that the aerosol concentration was higher in the southeastern part of Tokyo.

## 1 はじめに

本研究の多目的棟に設置された大型レーザーレーダーは、観測可能距離において世界最大の規模を持つとともに、測定精度・データ処理システム・稼働実績においても世界最高水準を誇っている<sup>1-4)</sup>。

エアロゾル分布パターン画像データの作成手法に関しても、レーザーレーダー信号の規格化、高濃度エアロゾルの影響の除去に関する研究等によって信頼性の高いエアロゾル分布パターンデータが既に得られている<sup>5,6)</sup>。

しかし、これまで採用してきたデータ処理手法では、「レーザー光の減衰に関する補正」及び「装置定数の較正」の問題が未解決として残されていた。このため、得られたエアロゾル分布画像データは、相対的なエアロゾル濃度分布として解析に用いてきた。

本研究では、最近提案されたレーザーレーダー方程式の解法<sup>7,8)</sup>を比較検討し、これを広域エアロゾル分布計測へ適用する技術を確立した。これによって、減衰補正と較正の問題を解決し、エアロゾル濃度の絶対値の分布を測定することが可能になった。

本報告の構成は以下のとおりである。

第 2 節では、減衰補正の問題及び較正の問題を解決し得るレーザーレーダー方程式の解法 (Fernald の解<sup>8)</sup>) について述べる。

第 3 節では、較正の問題に関連して、Fernald の解の境界条件を求めるために本研究において開発した方法について述べる。

第 4 節では、実際に得られたエアロゾル濃度分布パターンデータの誤差について検討するとと

もに、エアロゾル分布と発生源・風向等の対応を調べ、エアロゾル分布パターンの物理的妥当性を明らかにする。

## 2 レーザーレーダー方程式の解法とエアロゾル濃度分布の定量化

### 2.1 レーザーレーダー方程式

レーザーレーダーの受信信号パワー、 $P(R)$ は次式で表される。

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

ここで、 $R$ は距離、 $\beta(R)$ は体積後方散乱係数、 $Y(R)$ は幾何学的効率、 $P_B$ は背景光パワーである。また $T(R)$ は透過率で、 $T(R)$ と消散係数 $a(R)$ は次式で関係づけられる。

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

ここで、受信信号パワーから背景光パワーを除去し、幾何学的効率の補正及び距離自乗補正を行った量、 $X(R)$ を次式で定義する。

$$X(R) = \{P(R) - P_B\} \cdot R^2 / Y(R) \quad (3)$$

式(1)に式(2)を代入し、 $X(R)$ を用いるとレーザーレーダー方程式は簡略化される。

$$X(R) = C \cdot \beta(R) \cdot \exp \left[ - 2 \int_0^R a(r) dr \right] \quad (4)$$

この簡略化されたレーザーレーダー方程式（以降、単にレーザーレーダー方程式と呼ぶ）の左辺 $X(R)$ は測定量であり既知量である。 $a(R)$ 及び $\beta(R)$ は共にエアロゾル濃度に依存する量であって未知量である。さらに装置定数 $C$ の絶対値を全測定データに対して精度良く求めておくことは困難である。したがって、レーザーレーダー方程式は、2個の未知量と1個の測定困難な定数を持ち、このままでは解けない。これが、「減衰項（ $a(R)$ を含む項）に関する補正の問題」、「較正の問題」の生ずる原因である。

レーザーレーダー方程式における未知数を1個にするために、 $a(R)$ と $\beta(R)$ の間に比例関係等を仮定する方法が、最近有力視されるようになった。すなわち、Klettの解<sup>7)</sup>、及び、それを一般化した Fernaldの解<sup>8)</sup>である。

### 2.2 混濁大気に対して有効な一成分レーザーレーダー方程式の解（Klettの解）

Klett<sup>7)</sup>はエアロゾル濃度の大きい混濁大気において有効なレーザーレーダー方程式の解法を提案した。

基本的な仮定は、 $k_1$ と $k_2$ を定数として

$$\beta(R) = k_1 \alpha(R)^{k_2} \quad (5)$$

( $k_1, k_2 = \text{constant}$ )

の関係が成立することである。なお  $k_2 = 1$  の場合、 $\beta(R)$  と  $\alpha(R)$  の間の比例関係を仮定したことになる。

式(5)を式(4)に代入し変形すると次の一階微分方程式が得られる。

$$\frac{d\alpha(R)}{dR} - \frac{1}{k_2} \frac{d\{\ln X(R)\}}{dR}, \alpha(R) - \frac{2}{k_2} \alpha(R)^2 = 0 \quad (6)$$

この方程式の解は、

$$\alpha(R) = \frac{X(R)^{1/k_2}}{C_1 - \frac{2}{k_2} \int_0^R X(r)^{1/k_2} dr} \quad (7)$$

である。境界条件として、 $R = R_c$  で  $\alpha(R) = \alpha(R_c)$  を与えると  $C_1$  が決まり  $\alpha(R)$  が求められる。このとき、境界条件を測定対象領域のレーザーレーダー側に置く ( $R_c < R$ ) 場合と、遠方に置く場合 ( $R_c > R$ ) で解の安定性に関して性質が異なる。

$$\alpha(R) = \frac{X(R)^{1/k_2}}{\frac{X(R_c)^{1/k_2}}{\alpha(R_c)} - \frac{2}{k_2} \int_{R_c}^R X(r)^{1/k_2} dr}, \quad (R_c < R) \quad (8)$$

$$\alpha(R) = \frac{X(R)^{1/k_2}}{\frac{X(R)^{1/k_2}}{\alpha(R)} + \frac{2}{k_2} \int_R^{R_c} X(r)^{1/k_2} dr}, \quad (R < R_c) \quad (9)$$

なお、式(8)、式(9)はそれぞれ Viezee<sup>9)</sup> 及び Klett<sup>7)</sup> により提案されたものである。以下、これらの式をそれぞれの提案者の名前をとって呼ぶことにする。Viezee の解では分母に「-」があるため、 $R$  が大きくなって分母第2項が増大すると解が不安定になる。そして、 $\alpha(R_c)$  のわずかな誤差が、拡大され解が発散し易い。それに対して Klett の解は、安定だけでなく、分母第2項の増大に伴って、 $\alpha(R_c)$  の決定に伴う誤差が減少し、解は真の  $\alpha(R)$  に収束する。Klett の解は、 $\alpha(R)$  と  $\beta(R)$  の間に式(5)の関係を仮定する解法を実用的なものにしたという意味で大きな意義をもっている。この解は霧の鉛直分布<sup>10)</sup>、雲底高度や視程<sup>11)</sup> の観測に有効であることが実証されている。

### 2.3 清浄大気から混濁大気まで一般的に有効な二成分レーザーレーダー方程式の解

#### (Fernald の解)

Klett の解では式(4)中の体積後方散乱係数  $\beta(R)$  及び消散係数  $\alpha(R)$  で表されるレーザー光の

後方散乱・消散はすべてエアロゾルによるものと仮定している。しかし、実際には空気分子による後方散乱・消散の寄与があるため、混濁度の大きくない大気状態の場合には Klett の解を適用することはできない。

Fernald は、Klett の方法を一般化し、エアロゾルと空気分子の二成分の寄与を考慮したレーザーレーダー方程式、

$$X(R) = C \{ \beta_1(R) + \beta_2(R) \} \exp \left[ -2 \int_0^R \{ \alpha_1(r) + \alpha_2(r) \} dr \right] \quad (10)$$

の解を求めた。ここで添字 1 はエアロゾルの、添字 2 は空気分子の寄与を表す。

Fernald の解は次式で表される。

$$\begin{aligned} \alpha_1(R) = & -\frac{S_1}{S_2} \alpha_2(R) \\ & + \frac{X(R) \exp \left[ 2 \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \int_R^{R_c} \alpha_2(R) dR \right]}{\alpha_1(R_c) + \frac{S_1}{S_2} \alpha_2(R_c)} + 2 \int_R^{R_c} X(R) \exp \left[ 2 \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \int_R^{R_c} \alpha_2(r) dr \right] dR \end{aligned} \quad (11)$$

ここで  $S_1$ ,  $S_2$  は、

$$S_1 = \frac{\alpha_1(R)}{\beta_1(R)} \quad (12)$$

$$S_2 = \frac{\alpha_2(R)}{\beta_2(R)} \quad (13)$$

で表されるエアロゾル及び空気の散乱パラメーターである。 $S_2$  は一定である。Fernald の解では、 $S_1$  が空間的に一様であることを仮定している。

Fernald の解の中の  $X(R)$  は観測される量であり、空気分子に関する量  $\alpha_2(R)$  は気象観測データから知ることができる。また  $S_2$  は既知 ( $= 8.53^{12}$ ) である。したがって、エアロゾルの散乱パラメーター  $S_1$  及び、式(11)の第 2 項の分母第 1 項 (境界値を表す項、以後、境界値項  $b_c$  と表す) を与えると、 $\alpha_1(R)$  が求められる。Sasano と Nakane の数値シミュレーション<sup>13)</sup> に基づいて Fernald の解の特徴を以下に要約する。

- 1) 体積消散係数  $\alpha_1(R)$  で表されるエアロゾル濃度プロファイルを精度良く求めるためには、 $S_1$  及び境界値項を正しく評価する必要がある。
- 2)  $S_1$  についての情報を持たない場合、 $S_1$  の値を 50 程度と仮定すると、 $\alpha_1(R)$  の誤差は通常 10% から 30% 程度である。
- 3) 境界条件を測定対象領域の遠方で与えるならば、境界値項の寄与を小さくすることができ

る。

- 4) Klett の解は Fernald の解において、 $S_1 = S_2$  とした場合に一致するが、 $S_1 = S_2$  という条件は現実的なものではない。

したがって、エアロゾル濃度分布を定量的に測定しようとする、境界値項の評価方法及び散乱パラメーター  $S_1$  の推定手法を確立した上で Fernald の解を用いることが重要である。

#### 2.4 消散係数で表現したエアロゾル濃度の物理的意味

レーザーレーダーは光学的な測定であるため、エアロゾル濃度も光学的な量として得られる。消散係数は、単位体積当たりのエアロゾルが光を消散（散乱及び吸収による減衰）させる度合を表す量で、 $m^{-1}$  の単位を持つ量である。この量は、全散乱と吸収の効果を含むこと、及び積分値がエアロゾルの光学的厚さに一致することを考えるならば、エアロゾルの光学的意味における濃度を最も良く表す量と言える。

消散係数と質量濃度の関係は、エアロゾルの光学的性質に依存するので単純ではないが、Charlson の観測結果<sup>14)</sup>が一応の目安にはなる。それによると、消散係数  $a_1(m^{-1})$  と質量濃度  $M(\mu a/m^3)$  の間には、

$$\begin{aligned} M &= a a_1 \\ a &= 38 \mu g m^{-3} / 10^{-4} m^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

の関係がある。

### 3 二成分レーザーレーダー方程式の解（Fernald の解）における境界値項の評価

#### 3.1 境界値項の評価における問題点

Fernald の解の境界値項  $b_c$ 、すなわち、

$$b_c = \frac{X(R_c)}{a_1(R_c) + \frac{S_1}{S_2} a_2(R_c)} \quad (15)$$

の中で未知の量は  $a_1(R_c)$  である。これをレーザーレーダー信号から求める実際的な方法は、 $R_c$  を含む区間  $[R_1, R_2]$  におけるレーザーレーダー信号の減衰からこの区間における  $a_1(R)$  の平均値を求め（なお、こうして、 $a_1(R)$  を求める方法はスロープ法と呼ばれている<sup>15)</sup>、これを  $a_1(R_c)$  と見なす方法である。

スロープ法により  $a_1(R_c)$  を評価する際に問題になるのはエアロゾル分布の局所性とレーザーレーダー信号の測定誤差である。 $a_1(R_c)$  がスロープ法により区間  $[R_1, R_2]$  の平均値として求められるのであれば、式(15)の分子の  $X(R_c)$  も同様に区間  $[R_1, R_2]$  に関して平均操作を施して求める必要がある。この平均操作は、エアロゾル分布の局所性の影響の除去に必要であると同時に、

信号の測定誤差の影響を軽減するためにも必要である。

### 3.2 境界値項の意味とその評価方法

境界値項を求めるためにスロープ法を用いる際に、 $X(R)$ の対数をとることが必要である。測定誤差が信号と同程度になると、対数を取り最小二乗法を用いて求めた傾きは測定誤差の影響を大きく受ける。したがって、スロープ法を適用する区間  $[R_1, R_2]$  は、信号が測定誤差に比べ十分大きい領域に設定する必要がある。

それに対して、Frenaldの解の第2項の分母第2項の計算の際には、 $R_c$ が測定誤差の大きな領域に設定されても、積分によって測定誤差が平均化される。また、分母第2項が大きいく程、境界値項の推定誤差が、 $\alpha_1(R)$ に及ぼす影響は小さくなる。したがって、 $R_c$ はできるだけ遠方に設定したほうがよい。

ここでは、 $R_c$ が区間  $[R_1, R_2]$ の中央にある必要があるのか、という問題について検討する。そのためには、境界値項の物理的意味を明らかにする必要がある。

区間  $[R_1, R_2]$ において  $\alpha_1(R)$ が一定 ( $= \alpha_1$ )と見なせるとすると、この区間内の距離  $R_c$ における境界項  $b_c$ は、式(10)、(11)、(12)、(13)、(15)により、

$$b_c = C_1 S_1^{-1} \exp[-2 \bar{\alpha} (R_c - R_1)] \quad (16)$$

である。つまり、 $b_c$ は  $C_1 S_1^{-1}$ に減衰項のかかったものである。ここで、

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \alpha_1 + \alpha_2 \\ \alpha_2 &= \alpha_2(R) = \text{constant} \end{aligned} \quad (17)$$

である。この  $C_1$ は「 $R_1$ にレーザーレーダーがあると考えた場合の装置定数」であり、レーザーパワー、装置の光学的効率に加えて、距離0から距離  $R_1$ までのレーザー光の減衰を含む定数である。 $C_1$ は区間  $[R_1, R_2]$ で一定であるから、 $C_1 S_1^{-1}$ を、この区間の信号から評価した量  $\overline{C_1 S_1^{-1}}$ によって表すことができる。これを用いると、距離  $R_c$ における境界値項  $b_c$ は次式で表される。

$$b_c = \overline{C_1 S_1^{-1}} \exp[-2 \bar{\alpha} (R_c - R_1)] \quad (18)$$

ここで、 $\overline{C_1 S_1^{-1}}$ は、

$$C_1 S_1^{-1} = \frac{X(R) \exp[2 \bar{\alpha} (R - R_c)]}{\bar{\alpha}_1 + \frac{S_1}{S_2} \alpha_2} \quad (19)$$

を  $R$ に関して  $R_1$ から  $R_2$ まで平均して求める。ただし、 $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha} - \alpha_c$ である。

これまでの考察から、 $R_c$ は区間  $[R_1, R_2]$ の中央にある必要がないことがわかる。すなわち、式(18)が成立する限り  $R_c$ は区間  $[R_1, R_2]$ 内の任意の位置に設定できる。また、式(18)が、 $R_2$ の更

に遠方にまで成立するならば、 $R_c > R_2$  とすることも可能である。

### 3.3 境界値を与える距離 $R_c$ の最適化

測定誤差が十分小さい場合には、 $R_c$  を遠方に設定する程、得られる  $a_1(R)$  の精度は良くなる。しかも、応用上できるだけ遠方までのエアロゾル分布を得ることが望ましいので、 $R_c$  はできるだけ遠方に設定したい。しかし、実際には遠方程、誤差は大きくなる。したがって、 $R_c$  の最適な位置は、この二つの要因を考慮して決める必要がある。

境界値項の推定誤差が、測定領域において  $a_1(R)$  にどれだけの誤差を生むかは、Fernald の解 (式(11)) の第2項の分母第2項 (積分項) が分母第1項 (境界値項) に比べどれだけ大きいかによって決まる。 $a_1(R)$  が一定 ( $= a_1$ ) の場合について境界値項の寄与率を計算して図1に示した。 $S_1$  は50と仮定した。 $R$  は測定領域内の最も遠方の点の距離である。 $X$  は積分項と境界項の比である。したがって、縦軸は分母全体が境界値項の何倍になるかを示す。 $R_c$  と  $R$  の差が大きくなると、 $1 + X$  は指数関数的に急速に増大する。

$X^{-1} (1 + X)^{-1}$  は  $a_1 + (S_1/S_2) a_2$  中の境界値項の寄与率を示す。 $a_1$  に対する境界値項の寄与率が  $1/10$  になる条件を図中に点線で示した。境界値項の寄与率が  $1/10$  になる距離は、 $a_1 = 2 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$  では  $20 \text{ km}$ 、 $a_1 = 8 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$  で  $10 \text{ km}$ 、 $a_1 = 2 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$  では約  $4 \text{ km}$  である。したがって、境界値項の推定誤差が数10%であれば、 $R_c - R$  を上に示した距離にとることによって、 $a_1(R)$  の誤差を10%以内にする事ができる。

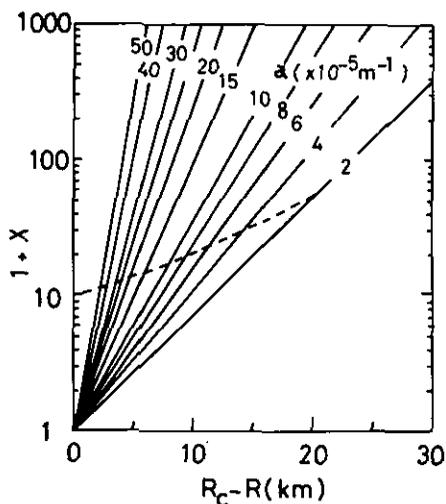


図 1 境界値項の寄与率と  $R_c$  の関係

Fig. 1 Relation between the contribution of the boundary value and  $R_c$

#### 4 エアロゾル濃度分布画像データの信頼性

消散係数で表されるエアロゾル濃度分布の信頼性は、得られた画像データの S/N 比、境界値項の推定誤差から生ずる消散係数の誤差、及び散乱パラメーター  $S_1$  に起因する誤差によって決定される。この節では、 $S_1$  の推定誤差に起因する消散係数の誤差について述べるとともに、得られた画像データを紹介して、エアロゾル分布パターンの妥当性について総合的に議論する。

##### 4.1 エアロゾル濃度分布プロファイルと散乱パラメーターの関係

Sasano と Nakane<sup>13)</sup> によれば、真のエアロゾル濃度分布  $\hat{\alpha}_1(R)$  が正弦的に振動している場合、大きな  $S_1$  を与える程、Fernald の解によって得られるエアロゾル濃度分布  $\alpha_1(R)$  の振動の振幅が大きくなる。真のエアロゾル濃度分布  $\hat{\alpha}_1(R)$  が完全に一様である場合には、 $\alpha_1(R)$  は  $S_1$  によらない。実際の対気に対して Fernald の解を適用した例を図 2 に示す。国立公害研究所の南西方向 20 km ~ 30 km について、 $\alpha_1(R)$  のプロファイルを示した。22 km 付近に煙があるが、ここでは  $S_1 = 90$  の場合の  $\alpha_1(R)$  は  $S_1 = 10$  の場合の  $\alpha_1(R)$  の約 2 倍の大きさになっている。更に、煙の手前では逆に  $S_1 = 10$  の場合の  $\alpha_1(R)$  が  $S_1 = 90$  の場合の  $\alpha_1(R)$  の約 2 倍になっている。そして、 $S_1$  が異なれば、 $\alpha_1(R)$  の値が異なるだけでなく、煙のプロファイルも異なる。

したがって、レーザーレーダー観測時の  $S_1$  を知ることが重要である。この方法については本報告書 II-3 で述べる。通常の観測では、 $S_1$  に関する特別な測定は行われていないので、最も確からしい  $S_1$  を与える必要がある。そして、真の  $S_1$  が、与えた  $S_1$  と異なる場合にどれだけの誤差を

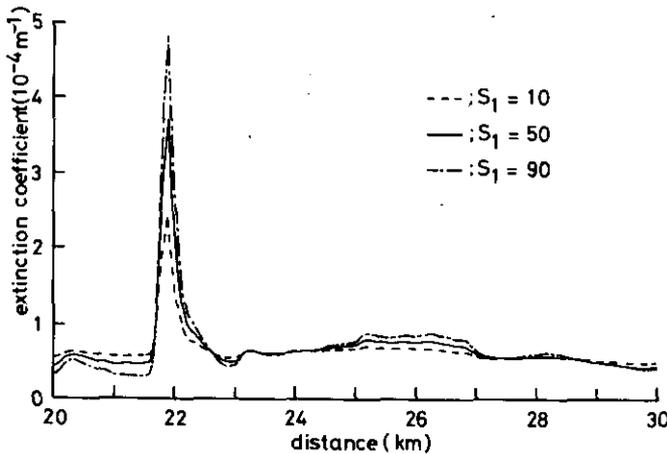


図 2 二成分レーザーレーダー方程式の解として得られるエアロゾル濃度プロファイルの  $S_1$  による変化

Fig. 2 Dependence of the aerosol concentration distribution obtained from the two-component laser radar equation on  $S_1$

生み出すかについて検討する必要がある。

#### 4.2 散乱パラメーター $S_1$ の取り得る範囲

散乱パラメーター  $S_1$  の観測は 1970 年代後半, ソ連のグループによって精力的に行われた。そして,  $S_1$  と湿度に相関があると結論している。図 3 に代表的な結果をまとめた。 $S_1$  は 50 前後に集中しており大部分のデータは  $S_1 = 10$  から  $S_1 = 100$  の範囲に入っているが, 湿度依存性について決定的な結論が得られるようには思えない。

$S_1$  は消散係数と後方散乱係数の比であるので, エアロゾルによるレーザー光の吸収及び散乱光の角度分布によって決まる。そして, これらは, エアロゾルの粒径分布と複素屈折率に依存する。複素屈折率の虚数部は吸収を表す。最近 Takamura ら<sup>17)</sup> は散乱光の強度及び偏光の角度分布を 10 か月間にわたり測定し, エアロゾルの複素屈折率の湿度依存性について検討した。その結果によると, 30%~90%の湿度変化に対応して, 複素屈折率の実数部は 1.6~1.45, 虚数部は

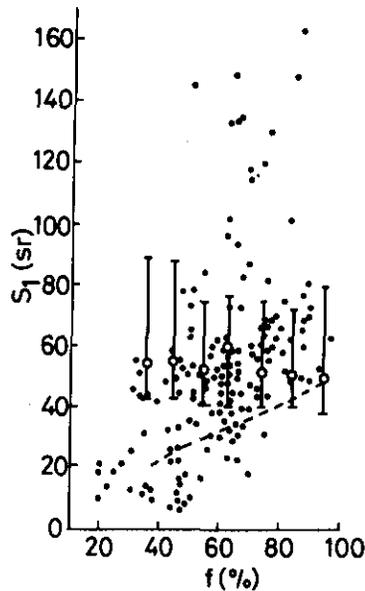


図 3  $S_1$  の値の報告例

・は文献 16) の Fig.7.1 に基づく。---は文献 16) の式 (7.15) に基づく。  
○は文献 17) によるエアロゾルの複素屈折率とユング分布を用いて筆者が計算した値である。

Fig. 3 Reported value of  $S_1$

・; cited from fig. 7.1 of the reference 16). ---; based on the equation (7.15) of reference 16). ○; calculated by authors based on the complex refractive indices of aerosols in the reference 17) and the Yunge distribution.

0.03~0.01 という変化を示す。

粒径分布にユング分布を仮定し、上記の複素屈折率を用いて  $S_1$  を計算した結果を図4に示す。湿度の上昇に伴い複素屈折率は、実数部、虚数部とも減少する。実数部の減少は  $S_1$  の増大をもたらす。虚数部の減少は  $S_1$  の減少をもたらすため、 $S_1$  は湿度にあまり依存しないで50を中心に30~80の範囲の値をとる。

以上を総合すると、 $S_1$  は通常50を中心にして±40の範囲に存在すると考えて良い。

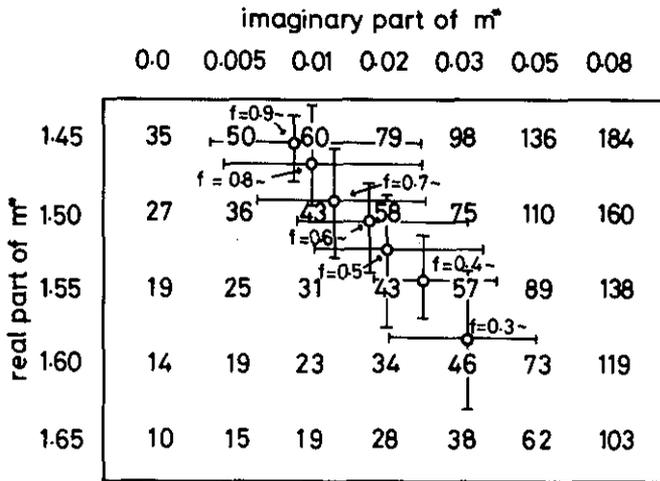


図 4  $S_1$  とエアロゾルの複素屈折率の関係  
○及びばらつきは文献17)による。

Fig. 4 Relation between  $S_1$  and the complex refractive indices  
○ and the scatters are based on the reference 17)

#### 4.3 散乱パラメーターの推定誤差とエアロゾル濃度分布画像データの誤差

Fernaldの解を用いる際に与えた  $S_1$  の誤差と、結果として得られる  $\alpha_1(R)$  の誤差の関係について、SasanoとNakane<sup>13)</sup>は数値シミュレーションを行い、エアロゾル濃度が大きくなると  $\alpha_1(R)$  の誤差は小さくなること、与える  $S_1$  の値の選択が重要であることを示した。

ここでは、実際に観測されたデータに対して  $S_1 = 50$  を与えて解析した場合にどの程度の誤差が生じ得るかについて検討する。

図5(a)は国立公害研究所東方15 km×15 kmの領域のエアロゾル濃度分布である。約2分間の測定で得られたデータである。消散係数の値は  $1.0 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$  と  $9.0 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$  の間を10レベルに区切りカラー表示した。濃度は、薄い方から、白、空色、青、黄緑、黄、薄茶、茶、褐色である。最高濃度レベル以上は黒で表してある。この画像に表示されているエアロゾル濃度(消散

係数) の平均値は  $4.3 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ , 平均値のまわりのばらつきは 33% である。

図 5(b) は (a) と同じデータに対して  $S_1 = 10$  を与えてエアロゾル濃度分布を求めたものである。濃淡がなだらかになっているのが特徴である。右側は、真の散乱パラメーターが 10 であると仮定した場合、 $S_1 = 50$  を与えた (a) のエアロゾル濃度分布の誤差  $\delta_{10}(I, J)$  がどのような頻度で現れるかを示したものである。 $\delta_{10}(I, J)$  は次の式で表される。

$$\delta_{10}(I, J) = \frac{\alpha_{50}(I, J) - \alpha_{10}(I, J)}{\alpha_{10}(I, J)} \times 100 (\%) \quad (20)$$

$\alpha$  及び  $\delta$  の添字は  $S_1$  の値を表す。誤差分布の標準偏差は 16% であった。図 5(c) は真の散乱パラメーター  $\hat{S}_1$  が 90 であると仮定した場合の濃度分布と誤差分布である。エアロゾルの濃淡が際立っていること、及び誤差分布曲線が正の側にすそを引くことが特徴である。誤差分布の標準偏差は 19% であった。

以上の考察から、 $\hat{S}_1$  が通常取り得る最大及び最小値である 90 及び 10 の間にあれば、 $S_1 = 50$  と仮定して得た図 5(a) のエアロゾル濃度分布は、19% 以内の誤差で決定できることが分かる。

図 6(a) は、 $S_1 = 50$  の場合のエアロゾル平均濃度が  $1.1 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ , 平均値のまわりのばらつきが 21.6% のデータである。エアロゾル濃度が高く、レーザー光の減衰が大きいため、15 km 以上では S/N 比が小さくなる。図 6(b), (c) はそれぞれ  $\hat{S}_1 = 10$ ,  $\hat{S}_1 = 90$  の場合の誤差分布曲線である。誤差分布の標準偏差は両者とも 9.5% であった。

図 7(a) は国立公害研究所南西方向、東京の一部をも含む 40 km × 40 km 圏のエアロゾル分布である。夜間、大気の清浄な状態において 22.5 分間の測定によって得たデータである。50 km 付近では、測定誤差が大きくなっているが誤差の大きい領域も含め、 $S_1 = 50$  の場合のエアロゾル濃度の平均値は  $7.1 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ , 平均値のまわりのばらつきは 62% である。(b), (c) は  $\hat{S}_1 = 10$ , 90 の場合の誤差分布である。 $\delta_{10}(I, J)$  及び  $\delta_{90}(I, J)$  はそれぞれ 23% 及び 22% であった。

以上の例より、エアロゾル濃度の平均値が小さく、空間的な濃度変化が大きい程、 $S_1$  の推定誤差によって生ずるエアロゾル濃度分布の誤差が増大する。しかし、その誤差は、大気中のエアロゾル濃度が低く、しかも濃度の差が大きい場合でも 20 数% であった。通常の大気状態の場合 (視程が 40 km 未満) では  $S_1$  の誤差に起因する誤差を 10% 未満にすることができる。

#### 4.4 エアロゾル濃度分布パターンの実測例

この項では、得られたエアロゾル濃度分布パターンが風向・風速・エアロゾル発生源とどう対応しているか、パターンの時間変化は妥当か、どのような誤差が見られるかなどを検討し、総合的にデータの妥当性を検討する。

図 5(a) の測定時の国立公害研究所における風向は西北西、風速は 3.7 m/s であった。高濃度分布のパターンが西北西から東南東に流れている。霞ヶ浦上にはエアロゾル発生源が見られない。

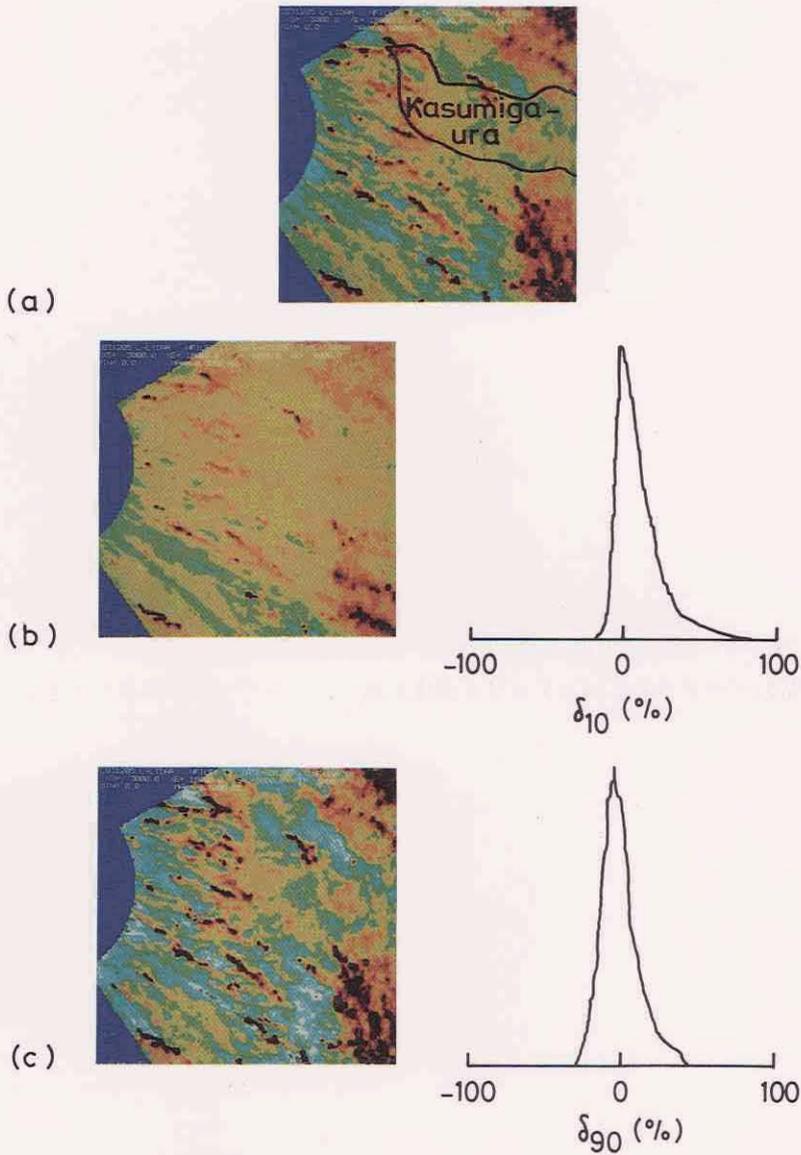


図 5 エアロゾル濃度分布の例

測定領域：霞ヶ浦周辺 15km×15km, 測定日時：1983年12月6日14時3分, 測定時間2.3分, 風向：西北西, 風速：3.7m/s. (a), (b), (c) はそれぞれ  $S_1 = 50$ ,  $S_1 = 10$ ,  $S_1 = 90$  に対応する。(b), (c) 右側は  $\delta_{10}(I,J)$ ,  $\delta_{90}(I,J)$  のヒストグラム。

Fig. 5 Examples of aerosol concentration distribution

Measurement area ; the area around the lake Kasumigaura over a square of 15 km in each side. Time ; Dec. 6, 14 : 03. Measurement time ; 2.3 min. Wind direction ; WNW. Wind speed ; 3.7 m/s. (a), (b), (c) corresponds with the case,  $S_1 = 50$ ,  $S_1 = 10$ ,  $S_1 = 90$  The right side of (b) and (c) are the histogram of  $\delta_{10}(I,J)$ , and  $\delta_{90}(I,J)$ .

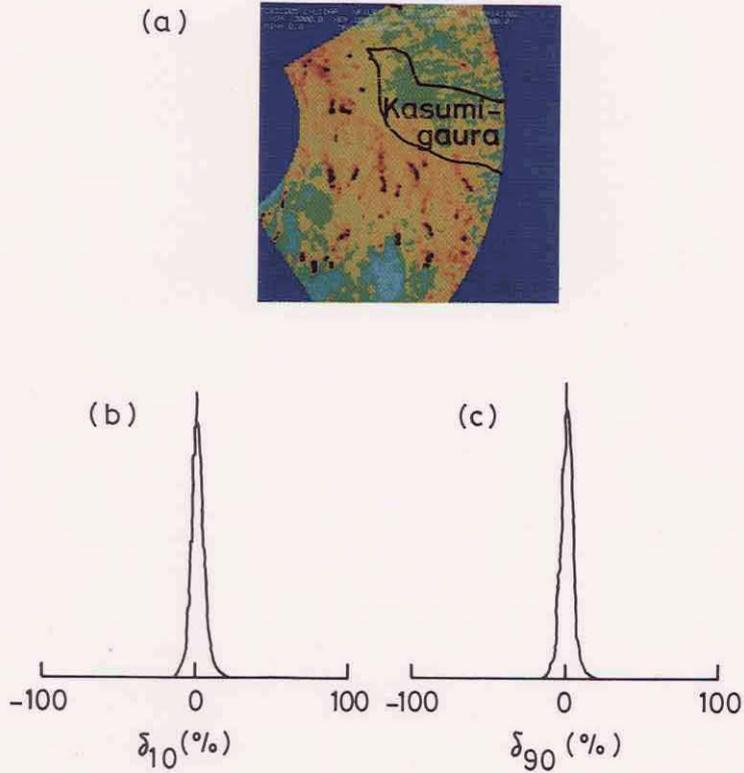


図 6 (a) エアロゾル濃度分布の例

測定領域：霞ヶ浦周辺  $15\text{km} \times 15\text{km}$ ，測定日時：1983年12月5日14時12分，  
測定時間：2.3分，風向：南，風速：1.7m。

(b)，(c)は  $\delta_{10}(I,J)$ ， $\delta_{90}(I,J)$  のヒストグラム。

Fig. 6 Examples of aerosol concentration distribution

Measurement area ; the area around the lake Kasumigaura over a square of 15 km in each side. Time ; Dec. 5, 14 : 12. Measurement time ; 2.3 min. Wind direction ; S. Wind speed ; 1.7 m/s.

(b) and (c) are the histograms of  $\delta_{10}(I,J)$  and  $\delta_{90}(I,J)$ .

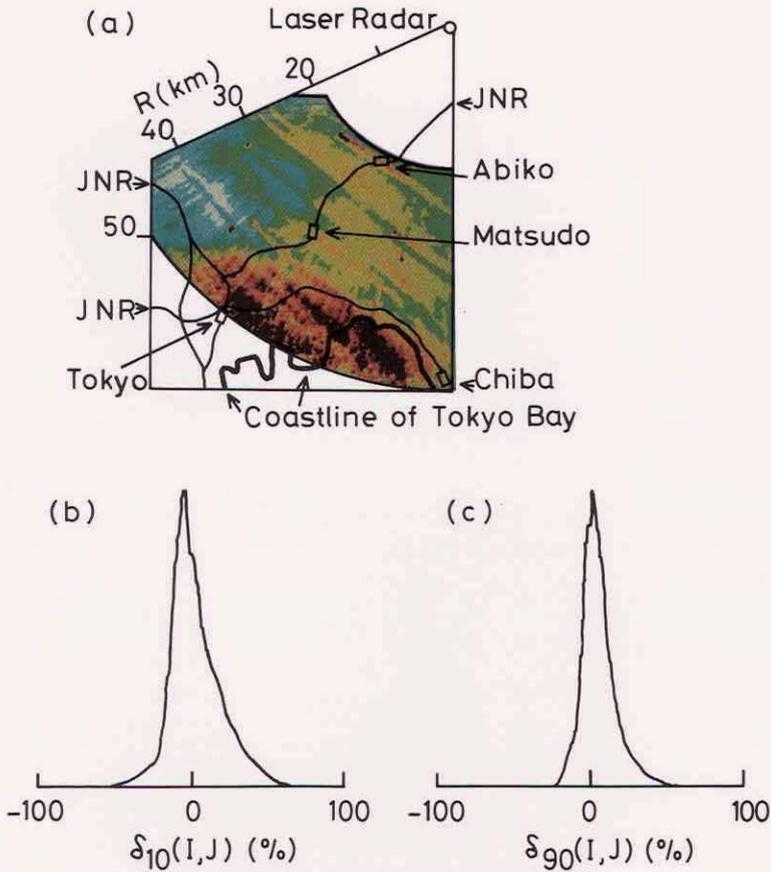


図 7 (a) エアロゾル濃度分布の例  
 測定領域：東京・千葉以北 40km×40km，測定日時：1984年2月9日20時3分，  
 測定時間：22.5分，風向：北西，風速：4.7 m/s。  
 (b)，(c)は  $\delta_{10}(I,J)$ ， $\delta_{90}(I,J)$  のヒストグラム。

Fig. 7 (a) Examples of aerosol concentration distribution  
 Measurement area; the north-eastern part of the Tokyo over a square of 40 km in each  
 side. Time; Feb. 9, 20:03. Measurement time; 22.5 min. Wind direction; NW. Wind  
 speed; 4.7 m/s.  
 (b), (c) are the histogram of  $\delta_{10}(I,J)$  and  $\delta_{90}(I,J)$ .

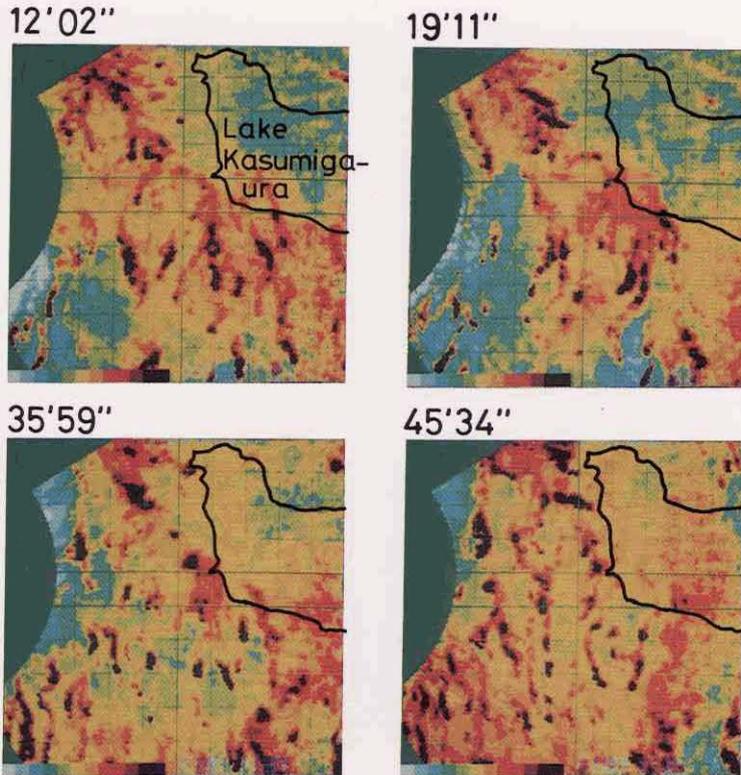


図 8 エアロゾル濃度分布の時間変化  
測定領域：霞ヶ浦周辺 10km×10km, 測定日時：1983年12月5日14時12分から  
14時48分にかけて2.3分ごとに行われた連続測定の一部。  
風向：南，風速：1.7 m/s。

Fig. 8 Change of aerosol concentration distribution with time  
Measurement area; the area around the lake Kasumigaura over a square of 10 km in each  
side. Time; Dec. 5, 14: 12-14: 48. Wind direction; S. Wind speed; 1.7 m/s. A part  
of the results of the sequential measurement carried out at every 2.3 minutes.



図 9 エアロゾル濃度分布例

測定領域：霞ヶ浦周辺 8km×8km, 測定日時：1983年12月17日12時, 測定時間：22.5分, 風向：北東, 風速：4.7 m/s。

Fig. 9 Example of aerosol concentration distribution

Measurement area; the area around the lake Kasumigaura over a square of 8 km in each side. Time; Dec. 17, 12: 00. Wind direction; S. Wind speed; 4.7 m/s. Measurement time; 22.5 minutes.

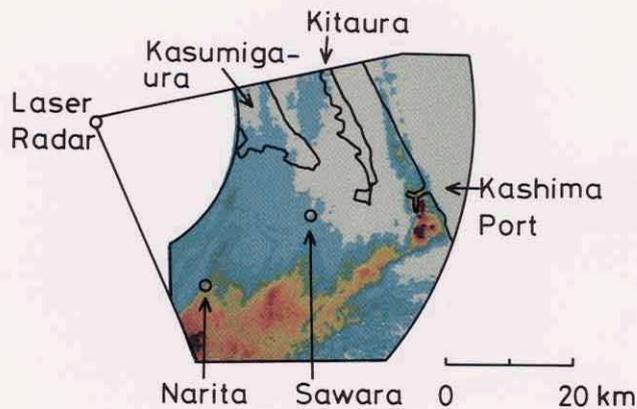


図 10 エアロゾル濃度分布例

測定領域：鹿島・成田を含む 50km×50km, 測定日時：1984年4月6日20時, 測定時間：22.5分, 風向：北北西, 風速：1.3 m/s。

Fig. 10 Example of aerosol concentration distribution

Measurement area; the area around Kashima and Narita over a square of 50 km in each side. Time; Apr. 6, 20: 00. Wind direction; NNW. Wind speed; 1.3 m/s. Measurement time; 22.5 minutes.

図8は、図6(a)を拡大し、更に、エアロゾル分布の時間変化を示したものである。なお、それぞれのデータの測定に要した時間は約2分間である。測定時の国立公害研究所における風向は南、風速は1.7 m/sであった。霞ヶ浦上にエアロゾル発生源のないことは、図8の画像すべてに共通である。全体として、南東、南西の風が吹いているようなパターンが見られるが、土浦周辺では複雑なパターンを示している。時間の経過とともに、エアロゾルの高濃度部分は塊状になるとともに、全体としてエアロゾル濃度が高くなる。これは風が弱くなったことによると考えることができる。

図9も同様に霞ヶ浦付近のエアロゾル濃度分布であるが、測定時4.6 m/sの北東の風が吹いていたこと、全体にエアロゾル濃度が高いことが特徴である。測定時間は22.5分であった。

図7の測定は、視程の良い夜間に行われた。東京地方における風向は北西、風速は4.7 m/sであった。東京から千葉にかけてエアロゾル濃度の高いことが特徴である。

図10は、国立公害研究所の南東方向、鹿島、成田を含む50 km×50 kmの領域の夜間のエアロゾル分布である。測定時、国立公害研究所における風向は北北西、風速は1.3 m/sであった。風は弱く曇もあったが、視程は極めて良かった。鹿島付近にエアロゾル濃度の高い部分が見られる。

以上のように、エアロゾル濃度分布パターンは風向、風速及びエアロゾル発生源に良く対応した妥当なものである。データによっては放射状の縞模様が見られる場合がある。図7の場合に顕著であるが、これは境界値項に異常な値が入ったことによるものと考えられる。画像表示した領域とレーザーレーダーの間には、数多くの送電線の鉄塔があり、その背後の信号は小さくなる。また、高濃度エアロゾルの背後の信号も弱くなる。そのために測定誤差の大きい部分で境界値項を決めなければならないこと、信号が小さいと積分項も小さいため、境界値項の誤差を緩和することができないこと、これらが放射状の縞模様を生むと考えられる。これは信号が局所的に小さいという問題であるので、本研究の枠内での解決は困難である。エアロゾル濃度分布画像から取り出したい情報に応じて、適当な画像処理を施すことが望ましい。

## 5 まとめ

本研究によって、レーザーレーダー観測データ解析上の障害となっていた、「減衰項に関する補正」及び「装置定数の較正」の問題を解決し、エアロゾル濃度分布を消散係数(単位： $\text{m}^{-1}$ )の分布として定量的に得ることが可能になった。

そして、条件に恵まれるならば、半径50 km圏の広域エアロゾル分布の測定が可能となった。また、短時間で掃引し、パターンデータの時間変化を得ることが可能であることも実証された。

更に高精度のエアロゾル分布を得るためには、散乱パラメーターに関する観測を同時に行う必要がある。また、エアロゾルの光学的性質(粒径分布、複素屈折率)と気象・エアロゾル組成の関係に関する知見は、散乱パラメーターの推定を容易にするのみならず、得られたエアロゾル濃度分布データの利用価値を増大させるであろう。

本研究において開発した手法を、大気汚染気塊の観測、エアロゾル濃度鉛直分布の測定、多波長レーザーレーダーによる粒径分布の遠隔測定等に応用することにより、エアロゾルの時間的・空間的・光学的性質の総合的解明に役立てる所存である。

## 引用文献

- 1) 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.
- 2) 清水 浩・松井一郎・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1982) : 大型レーザーレーダーの性能試験. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 83-106.
- 3) 杉本伸夫・笹野泰弘・清水 浩・松井一郎・竹内延夫・奥田典夫 (1982) : 大型レーザーレーダーにおける測定用ソフトウェアプログラムの開発. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 107-124.
- 4) Shimizu, H., Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, I. Matsui and N. Takeuchi (1985) : A large scale laser radar for measuring aerosol distribution in a wide area. Appl. Opt. (to be published.)
- 5) 中根英昭・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・清水 浩・竹内延夫 (1983) : 大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布の計測—高品質画像データの収集のための測定方法, データ処理法の検討—. 国立公害研究所研究報告, 第 39 号, 61-76.
- 6) 北村新三・平尾浩司 (1983) : 大型レーザーレーダーによる広域観測画像の修復法. 国立公害研究所研究報告, 第 39 号, 47-60.
- 7) Klett, J.D. (1981) : Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. Appl. Opt., **20**, 211-220.
- 8) Fernald, F. G. (1984) : Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments. Appl. Opt., **23**, 652-653.
- 9) Viezee, W., E.E. Uthe and R.T.H. Collis (1969) : Observations of airfield approach conditions: an exploratory study. J. Appl. Meteorol., **8**, 274-283.
- 10) Measure, E. and R. Rubio (1982) : Quantitative lidar measurement of extinction coefficient. Eleventh International Laser Radar Conference, Madison Wisc., 210 p.
- 11) Lentz, W.J. (1982) : Quantitative extinction measurements with the visioceilometer. Eleventh International Laser Radar Conference, Madison Wisc., 211 p.
- 12) Penndorf, R. (1957) : Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh Scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0  $\mu$  and their application to atmospheric optics. J. Opt. Soc. Am., **47**, 176-182
- 13) Sasano, Y. and H. Nakane (1984) : Significance of the extinction/backscatter ration and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation. Appl. Opt., **23**, 11-13.
- 14) Charlson, R.J., N.C. Ahlquist, H. Selvidge and P.B. MacCready, Jr. (1969) : Monitoring of atmospheric aerosol parameters with the integrating nephelometer. J. APCA, **19**, 937 p.
- 15) Hamilton, P.M. (1968) : Lidar measurement of backscatter and attenuation of atmospheric aerosol. Atmos. Environ., **3**, 221-223.
- 16) Zuev, V.E. (1982) : Laser beams in the atmosphere (Translated by J.S. Wood), Consultants Bureau, New York, 356-358.

- 17) Takamura, T., M. Tanaka and T. Nakajima (1984): Effect of atmospheric humidity on the refractive index and the size distribution of aerosols as estimated from light scattering measurements. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **62**, 573-582.

## II-5 差分吸収レーザーレーダーの測定誤差に関する実験的研究

### Experimental Estimation of Errors in Measurement in a Differential Absorption Lidar System

杉本伸夫<sup>1</sup>・竹内延夫<sup>1</sup>

Nobuo SUGIMOTO<sup>1</sup> and Nobuo TAKEUCHI<sup>1</sup>

#### 要 旨

差分吸収レーザーレーダー (DIAL) による大気汚染気体の濃度分布の測定における誤差について実験的な評価を行った。本文では、DIAL 測定における二波長切り替え時間内のエアロゾル濃度分布の変動による誤差について大型レーザーレーダーのデータを用いて考察し、二波長切り替え時間間隔と誤差の関係、データ積算処理方法と誤差の関係について考察する。また、YAG レーザーを用いた DIAL 実験により DIAL 測定の二波長における消散係数の違いから生じる系統的な誤差の評価を行うとともに、DIAL システムの最小検出感度について実験的な評価を行う。

#### Abstract

Errors in measurement using a differential absorption lidar (DIAL) were experimentally estimated. The error caused by the fluctuation of the aerosol backscattering coefficient was analyzed using the data of the NIES LAMP lidar. The dependence of the error on the time interval of the two wavelength measurements and the dependence on the data accumulation method were investigated. The systematic error due to the difference in the extinction coefficient for the two wavelengths was estimated from a DIAL experiment using a tunable dye laser pumped by a YAG laser. Also, the minimum detectivity of the DIAL system was estimated.

#### 1 はじめに

本特別研究では NO<sub>2</sub> の濃度分布測定を目的とした差分吸収レーザーレーダー (Differential

---

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

Absorption Lidar; DIAL) の開発に関する研究を行ってきた。初年度では、それまで経常研究で行ってきた基礎研究に引き続き、フラッシュランプ励起色素レーザーを用いた DIAL 装置の製作を行った<sup>1)</sup>。この装置を用いて排煙流中の NO<sub>2</sub> の濃度分布の測定を行い、装置の性能評価を行った。この結果高濃度の領域では NO<sub>2</sub> の濃度分布の DIAL による測定が可能であることが示された。しかしながら、フラッシュランプ励起色素レーザーを用いたシステムでは、レーザーの繰り返し数が遅い (0.5 Hz) ためレーザー波長切り替えの時間内のエアロゾルの変動による雑音の問題になることが明らかになった。この結果については、昭和 55 年度特別研究報告書<sup>2)</sup>でも報告した。また、フラッシュランプ励起色素レーザーは出力が不安定で、また電氣的雑音が大いいため、これを用いてフィールド観測用 DIAL システムを製作することは困難であった。

以上に述べた問題点を解決するために次の二つの方法で研究を進めた。一つは、フラッシュランプ励起色素レーザーを改良し、これを用いて DIAL システムを製作することである。もう一つは、フラッシュランプ励起色素レーザーに比べて信頼性が高く繰り返し数の比較的速い YAG レーザー励起色素レーザーを用いることである。

フラッシュランプ励起色素レーザーについては、信州大学工学部との共同研究により、電氣的な雑音の低減を図るとともに、二波長同時発振できるように改良し、これを用いて DIAL の実験を行った。この研究については本報告書の報文 II-6 で報告されている。

一方、YAG レーザー励起色素レーザーは、フラッシュランプ励起色素レーザーに比べて、出力が安定であること、繰り返しが遅いこと、波長幅が狭いこと、電氣的雑音が少ないこと、信頼性が高いことなどの利点を持っている。本特別研究では昭和 56 年度に YAG レーザー励起色素レーザーを導入し、これを用いた基礎的な研究を行ってきた。昭和 57 年度特別研究報告書<sup>3)</sup>では、YAG レーザー励起色素レーザーを用いた NO<sub>2</sub> の分光学的研究について報告した。

本論文では YAG レーザー励起色素レーザーを用いた DIAL システムにおける、測定誤差に関する実験的な研究について報告する。DIAL 測定における誤差の原因となるものとして、光電子増倍管のショットノイズ、電氣的雑音、A/D 変換の量子化誤差のほかに、二波長切り替え時間内のエアロゾルの濃度変動が重要である。また、二波長におけるエアロゾルの消散係数の違いも系統的な誤差の原因となる可能性がある。

本論文第 2~4 節ではエアロゾルの性質に起因する誤差に着目して実験的な考察を行う。第 2 節では二波長切り替え時間内のエアロゾルの濃度変動と DIAL の測定誤差との関係について考察する。第 3 節ではデータの積算処理の方法と測定誤差の関係について考察する。第 4 節では二波長におけるエアロゾルの消散係数の違いによる系統的な誤差について考察する。

本論文第 5 節では YAG レーザー励起色素レーザーを用いた DIAL システムの予備実験の結果を用いて測定誤差を評価する。これにより、DIAL システムの最小検出感度の評価を行う。第 6 節では本文のまとめと今後の研究について述べる。

## 2 エアロゾルの濃度分布の変動に起因する誤差

本節では国立公害研究所大型レーザーレーダー<sup>4)</sup>のデータを用いて、エアロゾルの濃度分布の変動に起因する誤差の評価を行う。ここでは、大型レーザーレーダーを用いて、毎秒12.5ショットのレーザーレーダー信号を測定し、それぞれのショットをDIAL測定用の $\lambda_{on}$ (NO<sub>2</sub>の吸収のピークの波長)、 $\lambda_{off}$ (吸収の小さい波長)の信号であると見なして、DIALの場合と同様の濃度の計算を行い、その標準偏差を求める。この場合、実際には同じ波長のレーザーレーダー信号を用いるので、濃度については得られた値は零になるが、誤差については評価が可能である。DIAL測定における波長切り替え時間間隔と測定誤差の関係を調べるため12.5 Hzのデータを $n$ 個おきに取り、 $\lambda_{on}$ 、 $\lambda_{off}$ の信号であると見なした。

大型レーザーレーダーのデータを用いた実験結果について述べる前に、まずDIAL測定の誤差について理論的な考察を行う。

レーザーレーダー受信信号は次式で表される。

$$P(R) = cP_0\beta/R^2 \exp[-2 \int_0^R [N\sigma + \alpha] dr] \quad (1)$$

ここに $R$ は距離、 $c$ は装置定数、 $P_0$ はレーザー出力強度、 $\beta$ はエアロゾル体積後方散乱係数、 $N$ はNO<sub>2</sub>の濃度、 $\sigma$ はNO<sub>2</sub>の吸収断面積、 $\alpha$ はエアロゾルによる消散係数である。ここで次式により $f_i(R)$ 、 $F(R)$ を定義する。

$$f_i(R) = P_i(R+L)/P_i(R) \quad (2)$$

$$F(R) = f_{off}(R)/f_{on}(R) \quad (3)$$

ここに $i$ はon, offの波長を意味する。また $L$ はDIAL測定の距離分解能である。これを用いると、NO<sub>2</sub>の濃度は次のように書ける<sup>1)</sup>。

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma_d L} \ln [F(R)] \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_d = \sigma_{on} - \sigma_{off}$ とする。いま、 $P_i$ の平均値からのずれ $\Delta P_i$ が平均値 $P_i$ に比べ小さい場合を考えると、濃度 $N(R)$ の偏差は次式のように表される。

$$\left( \frac{\Delta N(R)}{N(R)} \right)^2 = \left( \frac{1}{2\sigma_d L N(R)} \right)^2 \left( \frac{\Delta F(R)}{F(R)} \right)^2 \quad (5)$$

$$= \text{const} \left[ \left( \frac{\Delta f_{on}}{f_{on}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta f_{off}}{f_{off}} \right)^2 - 2 \left( \frac{\Delta f_{on}}{f_{on}} \right) \left( \frac{\Delta f_{off}}{f_{off}} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
 &= \text{const} \left[ \left( \frac{\Delta P_{\text{on}}(R+L)}{P_{\text{on}}(R+L)} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P_{\text{on}}(R)}{P_{\text{on}}(R)} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P_{\text{off}}(R+L)}{P_{\text{off}}(R)} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P_{\text{off}}(R)}{P_{\text{off}}(R)} \right)^2 \right. \\
 &\quad - 2 \left( \frac{\Delta P_{\text{on}}(R+L)}{P_{\text{on}}(R+L)} \right) \left( \frac{\Delta P_{\text{on}}(R)}{P_{\text{on}}(R)} \right) - 2 \left( \frac{\Delta P_{\text{off}}(R+L)}{P_{\text{off}}(R+L)} \right) \left( \frac{\Delta P_{\text{off}}(R)}{P_{\text{off}}(R)} \right) \\
 &\quad \left. - 2 \left( \frac{\Delta P_{\text{on}}(R+L)}{P_{\text{on}}(R+L)} - \frac{\Delta P_{\text{on}}(R)}{P_{\text{on}}(R)} \right) \left( \frac{\Delta P_{\text{off}}(R+L)}{P_{\text{off}}(R+L)} - \frac{\Delta P_{\text{off}}(R)}{P_{\text{off}}(R)} \right) \right]
 \end{aligned}$$

ここで、最後の等式の右辺の後ろの三つの項は相関項である。これらは負の係数を持つので  $P_{\text{on}}(R)$ ,  $P_{\text{off}}(R)$ ,  $P_{\text{on}}(R+L)$ ,  $P_{\text{off}}(R+L)$  の測定値に相関がある場合には  $N$  の誤差はある程度打ち消されることがわかる。

$P_i(R)$  の誤差の原因として考えられるのは、光電子増倍管のショットノイズ、レーザー出力強度の変動、エアロゾル体積後方散乱係数  $\beta$  の変動などである。(エアロゾルの消散係数の項はオーダーが一つ低いので無視できる。) これらのうちショットノイズは  $P_{\text{on}}(R)$ ,  $P_{\text{off}}(R)$ ,  $P_{\text{on}}(R+L)$ ,  $P_{\text{off}}(R+L)$  の測定で独立であると考えられる。あとの二つの雑音はそれぞれ相関を持っている。例えば、レーザー出力強度の変動については  $P_i(R)$ ,  $P_i(R+L)$  で完全な相関を持っている。また、エアロゾル体積後方散乱係数  $\beta$  の変動については、二波長の測定が十分短い時間に行われた場合には相関を持つ。また、距離方向についても相関を持っている。

次に、大型レーザーレーダーのデータを用いて、(5)式により  $\overline{(\Delta F/\bar{F})^2}$  を実験的に評価した結果を示す。ここに、 $\bar{\quad}$  は時系列データの平均値を表す。データとしてはレーザー波長 532nm、繰り返し数 12.5pps で約 10000 ショットの連続したデータを用いた。トランジェントレコーダーのゲート時間は 50 nsec とした。図 1 は二波長測定の間隔に対して  $\overline{(\Delta F/\bar{F})^2}$  をプロットしたものである。ここでは、 $R=1.5\text{km}$ ,  $L=500\text{m}$  としている ( $L=500\text{m}$  では、エアロゾル分布の距離方向の相関は小さいと考えられる)。図には観測の日時が異なるいくつかのデータが示されている。二波長測定の間隔が短くなるとともに誤差は減少して一定値に近づいている。逆に時間間隔が大きくなった場合は誤差は増大し、やはり一定値に近づく。これは次のように解釈できる。時間間隔が大きい極限では二波長の測定においてエアロゾルの変動に相関が無く、時間間隔が小さくなるに従って相関が出てくるために誤差が小さくなると考えられる。図 1 の右端に点線で示したのは、それぞれのデータについて  $2(\Delta f_{\text{off}}/\bar{f}_{\text{off}})^2$  を計算したもので、エアロゾル時間変動の相関が全く無い場合この値に近づくと考えられる。一方、時間間隔が小さい極限では、エアロゾル時間変動が無視できるようになり、一定値に近づく。この実験では、1/12.5 秒以下の時間間隔で測定していないが、図 1 を見る限りでは 1/10 秒程度でほぼ一定に近づいているものと推測される。時間間隔の小さい極限で残っている誤差は相関の無い独立な誤差で、ショットノイズ、電気

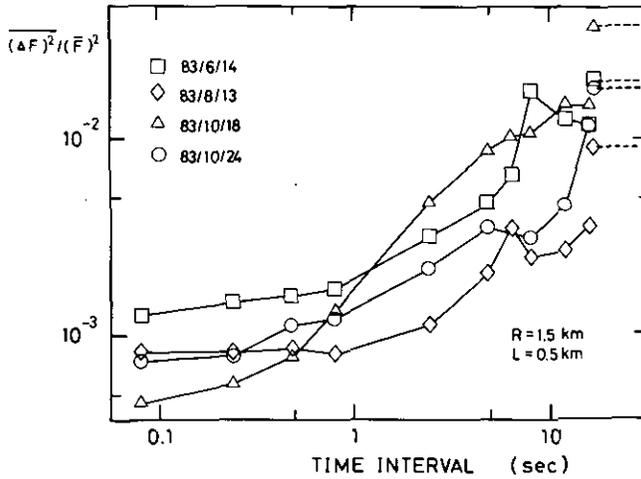


図 1 二波長切り替え時間間隔と誤差  $(\Delta F/\bar{F})^2$  の関係

Fig. 1 Dependence of the error  $(\Delta F/\bar{F})^2$  on the time interval of the two-wavelength measurements

的な雑音などの寄与を表していると考えられる。

図 1 の結果はエアロゾル変動の時間相関を表しているが、ここで、 $f_i(R)$  の自己相関係数の計算結果を示しておく。次式により、自己相関係数を計算した。

$$S(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=j+1}^N (f_i(R) - \overline{f(R)})(f_{i-j}(R) - \overline{f(R)}) \quad (6)$$

ここに  $i$  は時系列データの番号、 $i$  が time lag に相当する。また、ここに、

$$\overline{f(R)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(R) \quad (7)$$

である。 $S(j)$  の計算結果を図 2 に示す。図 2 はちょうど図 1 を逆にした形で、表現は異なるが図 1 と等価である。図 1 あるいは図 2 の結果より、DIAL 測定の波長切り替え時間間隔を 1/10 秒程度以下に選べばエアロゾル変動の影響を十分に打ち消すことができるという結論が得られる。

DIAL の誤差に関するこれまでの研究で、例えば Menyuk-Killinger<sup>5)</sup> は数 km 離れたターゲットからの反射を測定する実験を行い、大気屈折率のゆらぎが重要であることを指摘している。Menyuk-Killinger はゆらぎの時間スケールとして数ミリ秒を報告している。しかしながら、本研究ではエアロゾルの後方散乱を観測しているので観測されたゆらぎの主な原因はエアロゾルの体積後方散乱係数の変動である。また、本研究の場合、屈折率のゆらぎの影響を受ける可能性のあ

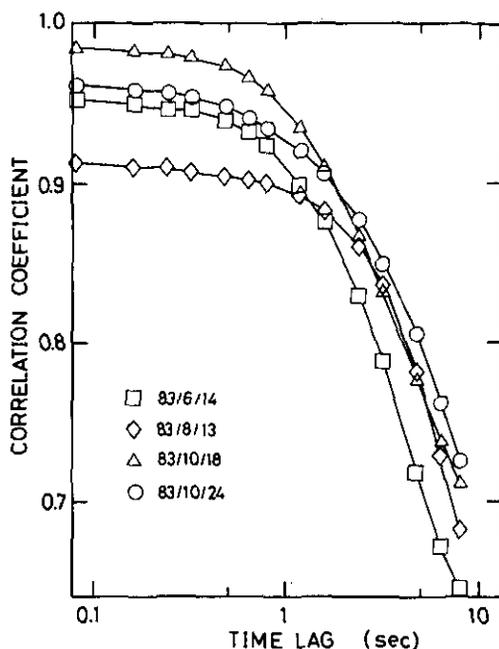


図 2 エアロゾル濃度分布の時間変動の自己相関係数

Fig. 2 Self correlation coefficient of the ratio of the received signals,  $f = P(R+L)/P(R)$

る区間は長さ  $L$  で, Menyuk-Killinger の実験の場合の数 km に比べて短い。このため屈折率のゆらぎの影響は小さいであろうと推定される。図 1 あるいは図 2 の時間間隔の最小値よりも左側で大気屈折率のゆらぎの寄与が残っている可能性はあるがその寄与はエアロゾルの体積後方散乱係数の変動に比べて小さいことは明らかであろう。

これまでに、いくつかの研究機関で開発された DIAL システムのうち、NASA や SRI のシステムは 2 台のレーザーを使用し、0.1 ミリ秒の時間内に二波長の測定を行う方式を採用している。これに対してスウェーデンの Fredrikson らによる DIAL システムでは 1 台のレーザーを 1/10 秒ごとに波長を切り替えて測定を行っている<sup>6,7)</sup>。本研究の結果から 1/10 秒ごとに波長を切り替える方式でも、エアロゾル変動の影響をほとんど受けないことが結論される。ただし、排煙中など高濃度のエアロゾルが小さな空間スケールに分布している場合の測定では、もっと速い時間変動が問題になることが予想される。また、当然ながら NASA の場合のように航空機搭載型の場合は速い波長切り替えが必要であろう。

エアロゾルの濃度分布の時間変動は、エアロゾルの濃度の空間分布と風速により決まると考えられる。したがって、エアロゾルの濃度の空間分布スケールを調べることはより本質的な問題として重要であろう。これは、今後の課題であるが、ここで、エアロゾルの空間分布スケールについて簡単な考察を行っておく。図 3 に本研究で用いたデータのうちの二つについて一次元エアロ

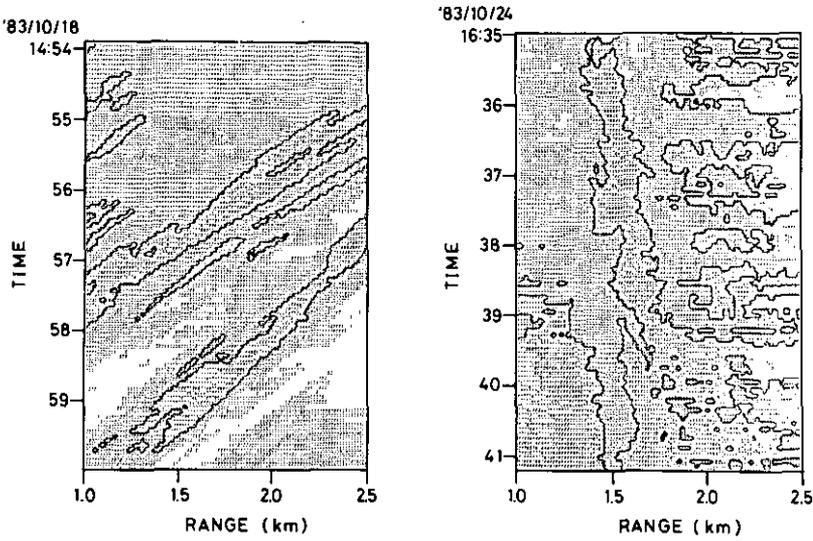


図 3 エアロゾル一次元濃度分布の時間変化の例

Fig. 3 Temporal profile of the aerosol concentration

Deviation from the mean value of aerosol concentration at each distance is shown.

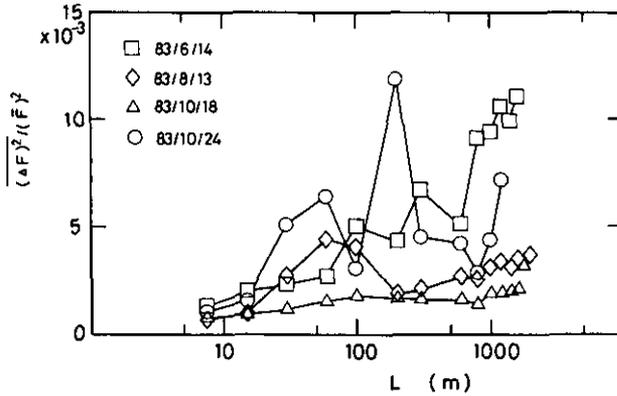


図 4 距離分解能  $L$  と誤差  $(\Delta F/\bar{F})^2$  の関係

Fig. 4 Dependence on the error  $(\Delta F/\bar{F})^2$  on the range resolution  $L$

ゾル濃度分布の時間変化のパターンを表示した。この図は各距離におけるエアロゾル濃度の時間平均値からのずれを 10 段階で表示したものである。レベル 5 が平均値に相当している。この図より、代表的なエアロゾル空間分布スケールは、数十から数百 m であることがわかる。この分布スケールは、風速が数 m であることを考えると、時間相関が 10 秒以下で大きくなることとよく対応している。また、図より、測定時の風向により一次元濃度分布の変化の様子が異なることが見ら

れる。

ところで、図1の計算ではDIAL測定の距離分布解能 $L$ として大きな値500mの場合を考えたが、 $L$ を小さくした場合、エアロゾルの空間方向の相関が大きくなるために誤差が減少することが考えられる。本節の最後に、 $\overline{(\Delta F/\bar{F})^2}$ の $L$ に対する依存性を図4に示す。 $R=1.5\text{km}$ とした。また、時間間隔は大きな値80秒とした。データのサンプル数が少ないので多少バラついているが、 $L$ が小さくなるに従って誤差が減少する傾向が見られる。しかしながら、実際のDIAL測定では $L$ は数十から数百mに取るので、空間方向の相関による誤差の減少はあまり期待できない。また、測定時間間隔が十分に小さい場合にはエアロゾル分布の変動は既に完全に打ち消されているので、空間方向に相関があっても誤差がさらに減少することはない。

以上、本節ではエアロゾル濃度分布の変動によるDIALの測定誤差について考察を行った。次節では、データの積算処理の方法と測定誤差の関係について述べる。

### 3 データ積算処理の方法と測定誤差について

実際のDIAL測定においては、信号対雑音比(SN比)を改善するためにデータの積算処理を行うことが一般的である。また、データ処理装置の機能から考えても、1ショットごとのレーザーレーダー信号を記録することは膨大な記憶容量を要するので現実的ではない。本節では、どのようなデータの積算処理を行う場合にも最もSN比の良い結果が得られるかを考察する。

ここでは、次の3種類の処理方法について考える。

(方法1)  $\lambda_{\text{on}}$ ,  $\lambda_{\text{off}}$  を交互に測定し、得られた信号 $P(R)$ を1ペアごとに演算して $N(R)$ を求め、 $N(R)$ について $M$ 回の積算を行う。

(方法2)  $\lambda_{\text{on}}$ ,  $\lambda_{\text{off}}$  を交互に測定し、 $P_i(R)$ について $M$ 回の積算を行う。積算された $P_{\text{on}}(R)$ ,  $P_{\text{off}}(R)$ を用いて濃度を計算する。

(方法3)  $\lambda_{\text{on}}$ を $M$ 回続けて測定して積算を行い $P_{\text{on}}(R)$ を求め、次に $\lambda_{\text{off}}$ を $M$ 回続けて積算を行い $P_{\text{off}}(R)$ を求める。これらを用いて濃度を計算する。

方法1はレーザー出力の変動、エアロゾル分布の変動を完全に打ち消すことができるので、 $\Delta P_i$ が $P_i$ に比べて十分小さい限りは理想的な方法である。しかし、演算が多く必要で高速の計算機が必要である。また、 $\Delta P_i$ が $P_i$ と同じ程度に大きくなると、割算の過程で誤差が非常に拡大されるのでこの方法を使うことはできなくなる。

方法2はレーザー出力の変動が大きい場合、エアロゾル分布の変動を完全に打ち消すことができなくなる可能性がある。しかし演算は少なくすむので現実的な方法である。また、割算の前に雑音が改善されるので $\Delta P_i$ が大きい場合にこの方法は有効である。

方法3は、積算回数を増やした場合エアロゾルの時間変動の影響を直接に受けるので誤差が増えて大きくなることも考えられる。

前節と同じデータを用いて、以上の三つの場合について実際に $M$ 回積算したときの $\overline{(\Delta F/\bar{F})^2}$

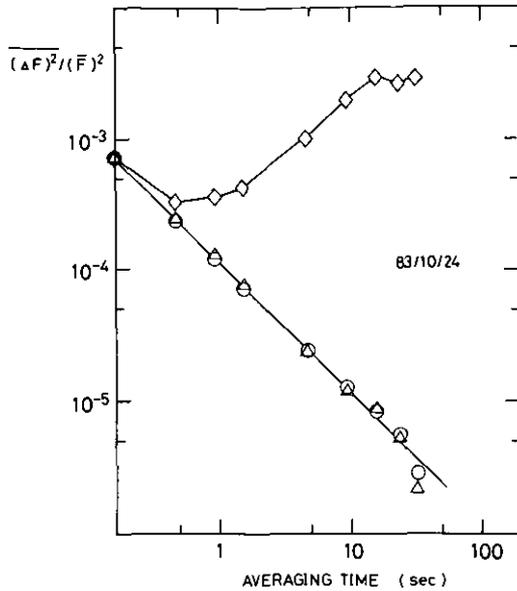


図 5 データ積算時間と誤差  $(\Delta F/\bar{F})^2$  の関係  
丸印：(方法 1), 三角：(方法 2), 菱形：(方法 3)。

Fig. 5 Dependence of the error  $(\Delta F/\bar{F})^2$  on the averaging time. Three methods for data averaging are shown with circles, triangles and rumbusis.

を計算した結果を図 5 に示す。ここでも、 $R=1.5\text{km}$ ,  $L=500\text{m}$  とした。方法 1, 2 では積算回数に比例して、誤差  $(\Delta F/\bar{F})^2$  が減少していることがわかる。これに対して 3 の方法では、積算回数を増やした場合逆に誤差が増加している。これは、積算時間がエアロゾル変動の相関時間を越えたために、エアロゾルの変動が打ち消されなくなったためである。一方、1, 2 の方法で、誤差が正確に  $1/M$  に比例していることは、エアロゾルの変動が完全に打消されていて、 $F(R)$  については長い時間の自己相関がないことを示している。

ところで 3 の方法を用いる場合、 $R=1.5\text{km}$  と  $R+L=2\text{km}$  の 2 点の回りのある距離範囲  $K$  にわたって距離方向の積算のデータの積算を行うことにより、誤差が改善されるかどうかを調べた結果を図 6 に示した。図 6 を見ると確かに距離方向のデータの積算の効果は見られるが、エアロゾル変動による誤差を距離方向の積算だけでは十分に改善することはできないことが結論される。このことは、図 3 に示したエアロゾル濃度分布のスケールから考えても納得のいく結果であろう。

本節の考察により、データ積算の方法としては (方法 2) が最も現実的で適当であること、またこの方法でデータの積算による SN 比の改善が理論どおりに期待できることが結論される。

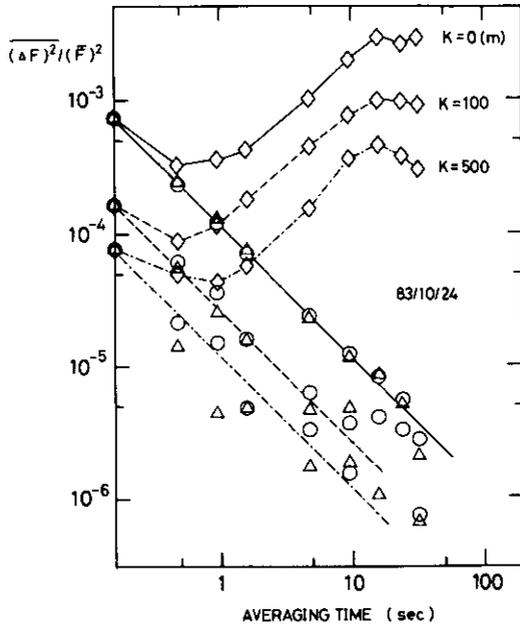


図 6 データ積算時間と誤差  $(\Delta F / \bar{F})^2$  の関係  
 距離方向の積算を行った場合 丸印：(方法 1)，三角：(方法 2)，菱形：(方法 3)。  
 Fig. 6 Dependence of the error  $(\Delta F / \bar{F})^2$  on the averaging time Signal at each distance was spatially averaged within the range of  $\pm(K/2)$ .

#### 4 エアロゾルの消散係数の波長依存性より生じる誤差の評価

前節までの議論では、測定結果の標準偏差という意味での誤差について議論してきた。本節では、DIAL 測定における濃度の算出の際に用いられる仮定から生じる誤差について考察する。DIAL 測定では近接する二波長を用いるので消散係数  $\alpha$  は二波長で等しいと仮定している。しかし、厳密には  $\alpha$  は短波長で大きい。本節では実際の DIAL 測定において  $\alpha$  の波長依存性からどの程度の（何 ppb に対応する）系統的な誤差を生じるかについて評価する。

ここでは、YAG レーザー励起色素レーザーを用いて  $\text{NO}_2$  の吸収断面積の等しい 447.0 nm と 449.5 nm の二波長でレーザーレーダー信号を測定し、2 波長の信号の減衰係数の差から  $\alpha$  の波長依存性を評価した。使用した装置については次節の表 1 に示す。ここでは、10 pps で 100 ショットごとに二波長を切り替えて約 15 分間の積算を行った。(1)式より、二波長のレーザーレーダー信号の比は、

$$\frac{P_1(R)}{P_2(R)} = \frac{P_{01}\beta_1 \exp[2(-N\sigma_1R - \alpha_1R)]}{P_{02}\beta_2 \exp[2(-N\sigma_2R - \alpha_2R)]} \quad (8)$$

ここで簡単のために  $\alpha$  は距離によらず一様と仮定した。今、減衰は小さいとして指数関数を展開して一次まで取ることにする。 $\sigma_1 = \sigma_2$  の二波長を選んでいるので、

$$\frac{P_1(R)}{P_2(R)} = \frac{P_{01}\beta_1}{P_{02}\beta_2} [1 - 2(\alpha_1 - \alpha_2)R] \quad (9)$$

図 7 に  $P_1(R)/P_2(R)$  を、 $R=0$  において 1 になるように規格化してプロットした。ここに 1 は 447.0 nm, 2 は 449.5 nm を意味する。この直線の傾きから  $2(\alpha_1 - \alpha_2)$  を求めると、0.016 (/km) が得られる。

次に、この値が実際の DIAL 測定でどの程度の誤差をもたらすかを評価する。DIAL 測定で  $\lambda_{on} = 447.9\text{nm}$ ,  $\lambda_{off} = 446.6\text{nm}$  の二波長を用いることにする。波長差は 1.3 nm である。今、 $\alpha$  の波長依存性についても一次で展開することになるとこの波長ペアについて  $2(\alpha_{on} - \alpha_{off})$  は次式で求められる。

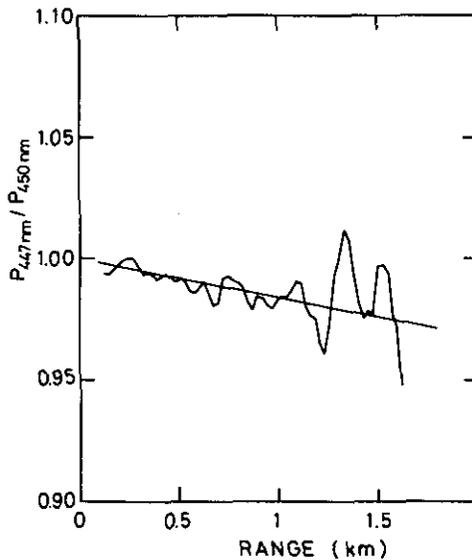


図 7 二波長のレーザーレーダー信号の比

Fig. 7 Ratio of the laser radar signals at 447 nm and 450 nm

$$2(\alpha_{on} - \alpha_{off}) = 0.016 \times (-13) / 25 = -0.009 (/km) \quad (10)$$

一方, 1 ppb の NO<sub>2</sub> による吸収係数の差は  $\sigma(447.9nm) = 7.17 \times 10^{-23} m^2$ ,  $\sigma(446.5nm) = 3.59 \times 10^{-23} m^2$  を用いると

$$2(\sigma_{on} - \sigma_{off})N = 0.00192 (/km) \quad (11)$$

となる。したがって,  $\alpha$  の依存性から約 -4.7ppb に相当する系統的な誤差が生じることになる。

消散係数にはエアロゾルのミー散乱と空気分子のレイリー散乱が寄与している。地上付近では, エアロゾルの寄与が主であり, 今の場合にもレイリー散乱の寄与はたかだか数%であると見積もられる。波長に対する依存性はレイリー散乱では  $\lambda^{-4}$  で, ミー散乱に比べて波長依存性は大きい, そのことを考慮してもレイリー散乱の寄与は無視できる。

エアロゾルの消散係数の波長依存性については次の経験式が知られている<sup>6)</sup>。

$$\alpha = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \quad (12)$$

ここに  $V$  は視程である。また,

$$q = 1.3 \quad \text{平均的規程の場合}$$

$$q = 0.585 V^{1/3} \quad V < 6km \text{ のとき}$$

この式を用いて  $2(\alpha_{on} - \alpha_{off})$  を計算すると,  $V = 10km$  のとき  $-0.0039 (/km)$ ,  $V = 5 km$  のとき  $-0.0056 (/km)$ ,  $V = 2 km$  のとき  $-0.0099 (/km)$  となる。今回実験的に得られた  $2(\alpha_{on} - \alpha_{off}) = -0.009 (/km)$  の誤差はこれと比較して多少大きめであるが, 妥当な値であると考えられる。(もしも, レーザレーダーデータから  $\alpha$  の値の絶対値が評価できれば, (12) 式の経験式そのものの検討を行うことができる。今回の測定データでは, 装置の視野の重なり関数  $Y(R)$  が不明確なことから, データを記録した距離範囲が狭いため  $\alpha$  の絶対値を正確に決めることが困難であった。このため, ここでこれ以上の議論は行わない。しかし, 今後広い波長にわたって  $\alpha$  の波長依存性を調べることは重要な課題の一つであると考えられる。)

ところで, -4.7ppb の系統的誤差は環境濃度の測定では無視できない。したがって何らかの補正が必要である。補正の方法としては次の方法が考えられる。エアロゾルの分布が一様であると見なせる場合には, 視程に対応する補正値を計算して測定値に加えることにより補正することができる。また, エアロゾル分布が一様と見なせない場合には, 例えば吸収のピークを挟んで三波長(すなわち二つのペア)で測定を行い, 二つのペアから求めた濃度の値を波長の重みを付けて平均する方法で補正することができる。

### 5 YAG レーザー励起色素レーザーを用いた DIAL の誤差の実験的評価

本節では、YAG レーザー励起色素レーザーを用いた DIAL の誤差の予備的な実験による評価の結果について報告し、現時点でどの程度の感度で DIAL 測定が可能であるかを示す。使用した装置の主な仕様を表 1 に示す。ここでは、色素レーザーの波長を 447.0 nm に固定して、10 pps でレーザーレーダー信号を連続して測定した。測定は 6 月の夕方(7 時前後)に行った。トランジェントレコーダーのゲート時間は 20 ns に設定した。このデータを用いて第 2 節、第 3 節で行ったのと同様の方法で誤差の評価を行った。

表 1 予備実験に用いた装置の主な仕様  
Table 1 Specifications of the DIAL system used for the error estimation

Laser	YAG laser pumped dye laser (Quanta-Ray PDLI) Pulse energy 10 mJ Pulse duration 6 nsec Repetition 10 pps Spectral width 0.3 cm <sup>-1</sup>
Telescope	0.5 m Newtonian
Photomultiplier	RCA 8852
Transient recorder	Iwatsu DM901 Accuracy 8 bits Clock rate 10 nsec Memory 1024 words
Computer	NOVA4/C

図 8 に第 3 節の 2 番目の方法により十分間の積算を行った場合の  $(\overline{\Delta F(R)}/\overline{F(R)})^2$  と、これに対応する濃度の測定値の誤差を示す。距離分解能  $L=200\text{m}$  としている。 $F(R)$  の計算においては距離分解能に見合うだけの距離方向の平滑化処理を行っている。図 8 は約 700 m までの距離で 10 ppb の NO<sub>2</sub> が SN 比 1 で測定できることを示している。しかしながら、この値は同じレーザーと望遠鏡を用いた最適システムに対して理論より予測される測定感度に比べるとまだひとけた程度高い。最適システムの理論計算の結果は以前の論文(3)に示した。次に、この誤差の原因について考察する。

$(\overline{\Delta F}/\overline{F})^2$  は次のように表されると考えられる。

$$\left(\frac{\overline{\Delta F}}{\overline{F}}\right)^2 = C_0 + \frac{C_2}{P} + \frac{C_4}{P^2} + g(R) \quad (13)$$

ここに第 1 項はエアロゾル後方散乱係数の変動による誤差を表す。また、第 2 項はレーザーレー

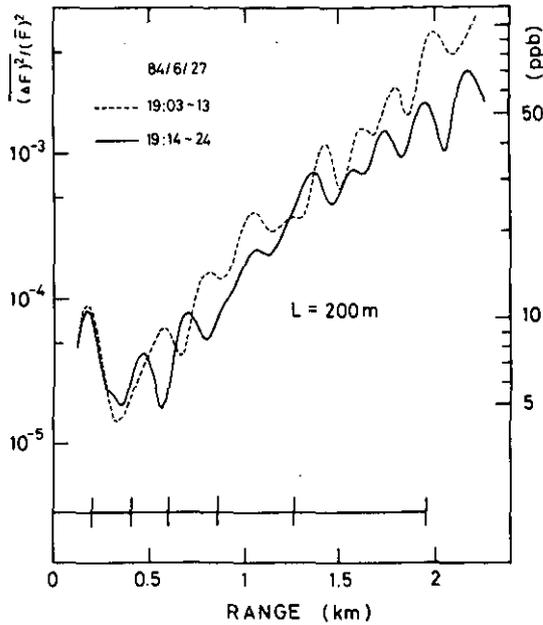


図 8 DIAL 測定における誤差  $(\Delta F/\bar{F})^2$  と対応する濃度。

Fig. 8 Experimentally estimated errors in DIAL measurements

ダー信号によるショットノイズ, 第3項は背景光によるショットノイズ, A/D変換の量子化誤差, レーザーレーダー信号と同期していない電氣的雑音などを表す。また, 最後の項はレーザーレーダー信号と同期した電氣的雑音を表す。図9は実験結果を用いて  $(\Delta F/\bar{F})^2$  を  $P$  の測定値に対してプロットしたものである。図9を見ると  $P^{-2}$  に比例する項が主であることがわかる。これは, 実験状況から考えて, 背景光によるショットノイズが主な原因となっているものと考えられる。理想的なシステムにおいては,  $(\Delta F/\bar{F})^2$  は 3 km 付近まで信号のショットノイズで制限され,  $P^{-1}$  の依存性を持つはずである。 $(\Delta F/\bar{F})^2$  が  $P^{-1}$  の依存性を持たないということは, まだ雑音の改善の余地があることを意味している。

ところで, 今回の予備実験の結果でも, 10分間の測定で, 500 m の距離において, 距離分解能 200 m で, 約 8 ppb の  $\text{NO}_2$  が SN 比 1 で測定できることが示された。これは都市域において高濃度の気団をとらえることが可能な性能である。 $(\Delta F/\bar{F})^2$  は  $L$  の 3 乗に比例するので遠方になるほど距離分解能を粗く, すなわち  $L$  を大きくとることにより, どの距離においても同程度の感度で測定を行うことができる。図8中に, 今回の実験結果を用いて, 8 ppb の感度が得られる距離分解能を表示した。今後さらに実際の DIAL システムに即して, 雑音の検討を行い, 誤差の低減を図ることが必要である。

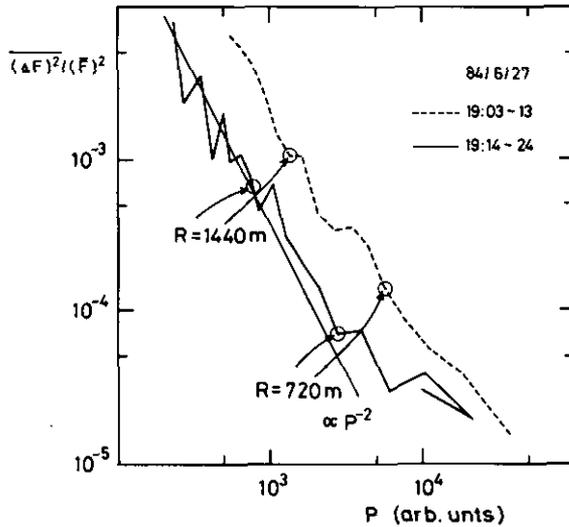


図 9 誤差  $(\Delta F/F)^2$  の  $P$  に対する依存性

Fig. 9 Dependence of the error  $(\Delta F/F)^2$  on the received signal intensity  $P$

## 6 おわりに

以上、本文では、DIAL 測定における誤差について実験的な考察を行った。本研究により次の結論が得られた。

- 1) DIAL 測定において、二波長切り替え時間内のエアロゾル濃度の変動は誤差の原因の一つとして重要である。
- 2) エアロゾル濃度の変動による誤差は二波長切り替え時間間隔を小さくすれば打ち消される。本研究の結果では、1/10 秒以内に二波長の測定を行えば十分である。
- 3) 二波長の受信信号の比を取ったデータについては、長い時間スケールの自己相関は見られず、データの積算により理論通りに誤差が低減する。
- 4) エアロゾルの消散係数の波長依存性から DIAL 測定で得られた濃度に対して数 ppb の系統的な誤差を生じる可能性があり、補正を行う必要がある。
- 5) DIAL により、10 ppb レベルの  $\text{NO}_2$  の測定が可能である。

DIAL の大気汚染研究への応用としては例えば、煙突や道路などの発生源からの汚染物質の拡散の追跡などが考えられる。 $\text{NO}_x$  については  $\text{NO}$  から  $\text{NO}_2$  への変化の追跡なども興味あるテーマである。しかしながら、応用研究においては DIAL の性能、すなわち最小検出感度、距離分解能、時間分解能(測定に要する時間)を十分に考慮して研究の対象を設定することが必要である。DIAL では、高距離分解能、高時間分解能を要する測定は難しいので、例えば一本の煙突の排煙の拡散を追跡する研究などへの応用はあまり適当ではないと考えられる。

これに対して、DIAL による NO<sub>2</sub> 濃度の鉛直分布の連続観測と、他の方法による風向風速の測定を組み合わせた、比較的広い領域の汚染気団の移流の観測は、DIAL システムの性能から考えても成果が期待できる。システムの形態としては、簡易型レーザーレーダーによる混合層高度の連続観測<sup>9-11)</sup>と同じように、フィールドにおいて NO<sub>2</sub> 濃度の鉛直分布が長時間にわたって連続観測できる DIAL システムが有望である。大気物理研究室では、このような観測を目的とした YAG レーザー励起色素レーザーを用いた DIAL システムの製作を計画している。DIAL ではエアロゾル分布も同時に測定できるので、このシステムで混合層高度も同時に観測することができる。

ところで、NO<sub>2</sub> 以外の物質については、YAG レーザー励起色素レーザーを用いた同様のシステムにより、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O の測定が可能である<sup>6,7)</sup>。

#### 謝 辞

データの解析において御協力をいただいた信州大学工学部情報工学科の南波浩一氏に感謝します。

#### 引 用 文 献

- 1) 杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫 (1982) : 差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中の NO<sub>2</sub> の濃度分布の測定. 応用物理, **50**, 923-928.
- 2) 杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫 (1982) : 差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中の NO<sub>2</sub> 濃度分布の測定. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 187-198.
- 3) 杉本伸夫 (1984) : NO<sub>2</sub> の分光特性と遠隔計測への応用上の問題点. 国立公害研究所研究報告, 第 49 号, 105-122.
- 4) 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫 (1982) : 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. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 61-81.
- 5) Menyuk, N. and D. K. Killinger (1983) : Assenment of relative error sources in 1R DIAL measurement accuracy. Appl. Opt., **22**, 2690-2698.
- 6) 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—. ふんせき, **11**, 834-841.
- 7) 杉本伸夫・竹内延夫 (1982) : 大気汚染計測用分光型レーザーレーダーの現状. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 19-28.
- 8) Kruse, P. W., L. D. McGlanchlin and R. B. McQuistan (1962) : Elements of Infrared Technology. Wiley, New York, 189-192.
- 9) 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**(2), 175-183.
- 10) 松井一郎・笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫 (1984) : 混合層連続測定用簡易型レーザーレーダーの製作. 国立公害研究所研究報告, 第 49 号, 15-26.
- 11) 笹野泰弘・松井一郎・清水 浩・竹内延夫 (1984) : レーザーレーダーによる混合層高度の連続自動観測. 国立公害研究所研究報告, 第 49 号, 27-38.

## II-6 二波長同時差分吸収方式レーザーレーダーシステムの開発

### Development of a Simultaneous Two-wavelength Operation Differential Absorption Laser Radar

齊藤保典<sup>1</sup>・野村彰夫<sup>2</sup>・鹿野哲生<sup>1</sup>

Yasunori SAITO<sup>1</sup>, Akio NOMURA<sup>2</sup> and Tetsuo KANO<sup>1</sup>

#### 要 旨

送信から受信, 信号処理に至るまで, すべて二波長同時動作可能な差分吸収方式レーザーレーダーシステムを開発した。送信系には同軸構造のフラッシュランプ励起色素レーザーを用いた。波長同調法として誘電体多層膜干渉フィルタを共振器内に挿入する方式を提案し, プリズム方式と比べ良好なスペクトル特性を得た。受信系には2本の光電子増倍管を備え, 信号処理系においても2チャンネル同時動作可能な高速 A/D 変換器, 処理器を採用した。フィールド実験として, NO<sub>2</sub> の吸収断面積を求め  $1.6 \times 10^{-23} \text{ m}^2$  の値を得た。さらに近距離排煙中の NO<sub>2</sub> 濃度分布測定を行いピーク値で 7 ppm となった。一連の実験を通して, 二波長同時差分吸収方式レーザーレーダーにおける問題点を明らかにした。

#### Abstract

A simultaneous two-wavelength operation DIAL (differential absorption lidar) was developed. A simultaneous two-wavelength oscillating flashlamp dye laser was used as the light source; two photomultipliers were used as detectors; and a two-channel transient memory with fast A/D converters and signal analyzer for signal processing were also used for the simultaneous two-wavelength operation. A new tuning method using a dielectric multilayer filter inserted in a cavity was examined and high quality spectra and intensities were obtained. This DIAL system was used for NO<sub>2</sub> measurement in a stack plume. The two wavelengths were set at 463.1 nm (on resonance) and 465.8 nm (off resonance). The

- 
1. 昭和 59 年度 国立公害研究所客員研究員 (信州大学工学部 〒 380 長野市若里)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Engineering, Shinshu University, Wakasato, Nagano 380, Japan.)
  2. 昭和 55~58 年度 国立公害研究所客員研究員 (信州大学工学部 〒 380 長野市若里)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Engineering, Shinshu University, Wakasato, Nagano 380, Japan.)

concentration of  $\text{NO}_2$  was obtained with 75m resolution by averaging 50 signals (for 5 minutes) and its peak was 7ppm at the center of the stack plume. On the basis of these results, problems of simultaneous two-wavelength operation DIAL system were discussed and clarified.

## 1 はじめに

1960年に Maiman によって最初のレーザー発振が実現されて以来<sup>1)</sup>、現在ではレーザーは理工学分野はもちろんのこと、我々の日常生活にまで入ろうとしている。レーザーの大気観測への応用は 1963年の Fiocco と Smullin による上層大気からの散乱光の観測が最初のものである<sup>2)</sup>。以後、各所で精力的に研究・開発が行われ、種々のタイプのレーザーレーダーが提案されてきた。

大気観測用レーザーレーダーは、非分光型（主に浮遊粒子状物質の測定）と分光型（主に大気中微量成分の測定）に大別される。非分光型の代表としてはミー（レーリー）散乱方式があり、大気中エアロゾル分布の測定等に威力を発揮している。分光型にはマラン散乱方式、けい光方式、共鳴散乱方式、長光路吸収方式及び差分吸収方式等がある。ラマン散乱方式はその散乱断面積が小さく、大気中微量成分の高感度測定はできないが、単一波長で多成分を同時に検出することができる。けい光方式は大気中においてはクエンチング効果のためけい光強度が弱くなることから主に成層圏や中間圏での測定に適する。共鳴散乱を利用した方式は中間圏上部の Na 等の測定に用いられている。長光路吸収方式は、吸収長を比較的長くとり、その間の吸収量の積分値を調べるものである。この方式は他の方式と比べて高感度の測定が可能である。距離分解能を得ることはできないが差分吸収方式の基本段階としての意義は大きい<sup>3)</sup>。差分吸収方式については次章で詳しく述べる。

我々は  $\text{NO}_2$  濃度測定用差分吸収方式レーザーレーダーの開発を行ってきた。この方式においては測定に必要な二波長を同時に送信及び受信することが望ましい。このために送信から受信、信号処理に至るまですべて二波長同時動作可能なシステムを構成した。フィールドテストとして近距離排煙中の  $\text{NO}_2$  濃度分布測定を行った。本報告では以上の実験結果について述べ、さらに二波長同時差分吸収方式レーザーレーダーの基本的な問題点についても検討する。

## 2 差分吸収方式レーザーレーダー (DIAL) の理論的検討

### 2.1 測定原理

差分吸収方式レーザーレーダー (Differential Absorption Lidar: 以下 DIAL と略す) は、気体分子固有の吸収とエアロゾルによる後方散乱とを組み合わせた方式である。高感度で距離分解能が得られ、大気中微量成分の測定においては、現在最も実用性に富む優れた方式である。この方式は 1964年に R. M. Schotland による提案され水蒸気の分布測定に用いられた<sup>4)</sup>。その後、種々のレーザーの開発に相まって、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  等の測定が行われている<sup>5)</sup>。

DIAL では測定気体の吸収曲線の極大と極小に同調した二波長のレーザー光を用いる。また二

波長を近接二波長とすることで、不確定要素（システムの効率、視野の重なり、後方散乱係数、大気の減衰係数など）をすべて打ち消すことができる。レーザーレーダー方程式を用いると、測定気体濃度は次式で表される。

$$\int_0^R N(R) dR = \frac{1}{2\sigma} \ln \left\{ \frac{P_{\text{off}}(R)}{P_{\text{on}}(R)} \cdot \frac{P_{0,\text{on}}}{P_{0,\text{off}}} \right\} \quad (1)$$

$$N(R) \approx \frac{1}{2\sigma} \frac{d}{dR} \left\{ \frac{P_{\text{off}}(R)}{P_{\text{on}}(R)} \right\} \quad (2)$$

$N(R)$  は距離  $R$  における測定気体濃度、on, off はそれぞれ吸収の極大、極小を示す。 $\sigma$  は極大と極小における吸収断面積の差、 $P_{\text{on}}(R)$ ,  $P_{\text{off}}(R)$  は受信光電力、 $P_{0,\text{on}}$ ,  $P_{0,\text{off}}$  は出射光電力である。背景光電力は無視した。このように DIAL では近接二波長における受信信号の比をとり距離微分することで測定気体の濃度分布を求めることができる。また距離  $R$  間の平均濃度を  $\bar{N}$  とすると(1)式より次式が得られるがこれは長光路吸収である。

$$\bar{N} = \frac{1}{2\sigma R} \ln \left\{ \frac{P_{\text{off}}(R)}{P_{\text{on}}(R)} \cdot \frac{P_{0,\text{on}}}{P_{0,\text{off}}} \right\} \quad (3)$$

この場合には距離分解能は得られず、送信光強度のモニターが必要となる。

## 2.2 最小検出濃度、測定誤差<sup>6-8)</sup>

最小検出濃度の式は(1)式より導かれる。すなわち距離分解能  $L$  をもって  $R \sim R+L$  間の濃度  $\bar{N}(R, R+L)$  を求めるのであれば次式が得られる。

測定気体濃度の測定誤差を相対偏差の2乗の形で表すと(4)式となる。ただし  $P(R)$  と  $P(R+L)$  との共分散の項は無視した。式中の  $\Delta N(R)$ ,  $\Delta P(R)$  はそれぞれ  $N(R)$ ,  $P(R)$  の誤差、 $M$  は積算回数、 $S/N$  は信号対雑音比である。

$$\left\{ \frac{\Delta N(R)}{N(R)} \right\}^2 \approx \frac{1}{M} \left\{ \frac{1}{\Delta \ln(R)} \right\}^2 \left\{ \frac{\Delta P(R)}{P(R)} \right\}^2 = \left\{ \frac{1}{(S/N)} \right\}^2 \quad (4)$$

測定誤差  $\Delta N$  を決定する要因を考える。これらは測定量  $P(R)$  に誤差  $\Delta P(R)$  として入ってくる。本質的に避けられない誤差要因としては、光電子増倍管で信号光を受光する際に、受信信号強度に応じて発生するショットノイズがあげられる。これは出射レーザー光強度や望遠鏡の口径等の装置の規模により決定されるものである。ショットノイズが測定誤差の最大の要因であると考えると、理論的最小検出濃度  $N_{\text{min}}(R)$  を求める。光電子増倍管における  $\Delta P$  は次のように表される。

$$\left\{ \frac{\Delta P(R)}{P(R)} \right\}^2 = \frac{2 \cdot e \cdot \Delta f}{S \cdot P} \tag{5}$$

e は電子の電荷,  $\Delta f$  は測定系の帯域幅, S は光電子増倍管の陽極放射感度である。また  $N_{\min}(R)$  は(4)式に(5)式を代入し(6)式で示される。

$$N_{\min}(R) = \frac{1}{M} \left[ \frac{S/N}{\sigma L} \right]^2 \left[ \frac{2e\Delta f}{S \cdot P} \right]^2 \tag{6}$$

図1に計算結果を示す。計算に用いた各変数の値は次のとおりである。 $M=1$ ,  $S/N=7$ ,  $\sigma=1.6 \times 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>],  $L=75$  [m],  $e=1.6 \times 10^{-19}$  [c],  $\Delta f=2 \times 10^8$  [Hz],  $S=64 \times 10^{-3}$  [A/W]。さらに積算回数  $M$  を50回にすれば、距離500mの地点で距離分解能75mとして、最小検出濃度は0.03 ppmとなる。

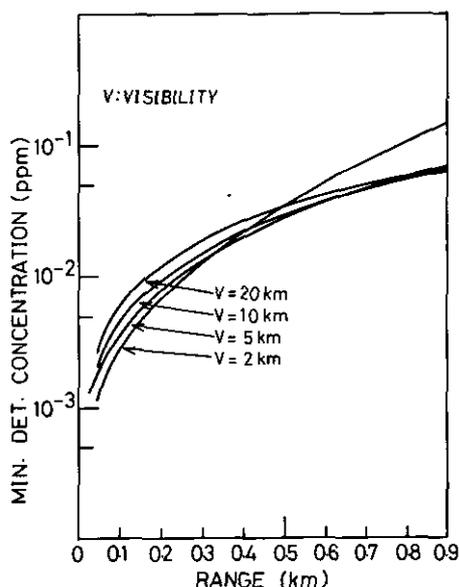


図 1 理論的最小濃度の計算

Fig. 1 Minimum detectable concentration of NO<sub>2</sub> vs the range with a parameter of visibility

2本の光電子増倍管を使用して二波長を別々に同時に受信する場合には、2本の特性の違いが誤差になることがある。これについては後で実験的に検討を加える。自然光(太陽, 月など)や人工光(街灯など)による背景光, 電子回路内部で生じる電気的ノイズ, A/D変換の際に生じる量子化誤差, レーザー発振による電気的パルスを光電子増倍管や信号用ケーブル, 電子機器などで

拾うことによる電磁誘導的ノイズなどは、使用機器の選択あるいはシステム製作上の技術で解決のつく問題である。ただし電磁誘導的ノイズについては後に実験例を示し、具体的な対策を検討する。送信レーザー光の出力変動、送受信光学系のゆらぎ、大気状態の変化などについては、二波長同時差分法であれば特に問題はない。ただし大気状態の変化については、特に二波長交互発振の場合問題になることがある。大気状態の変動が全くないいわゆる“凍結した状態”であれば良いが、風速 10 ms の場合には二波長の発振を 8.5 ms の間に切り換えねばならないとの報告もある<sup>9)</sup>。

二波長を同時に発振させ同時に受光する方式であれば、切り換え時間内における大気状態の変化は問題にならない。また周波数変動によるものも考えられるが、発振スペクトル、吸収スペクトルとも多少広がりをもっており、その範囲内の変動であれば、さほど影響はない。

### 3 二波長同時 DIAL システム

#### 3.1 二波長同時 DIAL システムの構成

開発した二波長同時 DIAL システムのブロック図を図 2 に、仕様を表 1 に示す。送信系では、光源として同軸構造フラッシュランプ励起色素レーザーを用いた。測定気体の吸収の極大と極小に同調された二波長のレーザー光が同時に発振する。発振光の一部は光ファイバーでフォトダイオードに導かれ、信号処理系のトリガとして使われる。受信系では、後方散乱光がフレネルレンズ屈折型望遠鏡により集光され 2 本の光電子増倍管で電気信号に変換される。信号処理系では、電気信号をトランジェントレコーダーにより高速 A/D 変換し、シグナルアナライザーで処理を行い記録する。これらの動作は発振から処理に至るまで、すべて二波長とも同時に行われる。以下、送信系、受信系、信号処理系について詳しく述べる。

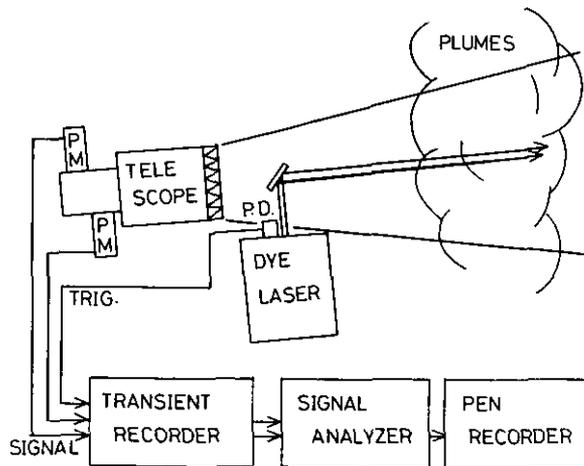


図 2 二波長同時 DIAL システムのブロック図

Fig. 2 Block diagram of the simultaneous differential absorption laser radar (DIAL) system

表 1 DIALシステムの仕様

Table 1 Specification of the DIAL system

Transmitter	Flashlamp-pumped dye laser	
	Pulse energy	5 mJ
	Pulse duration	300 ns
	Repetition	0.2 pps
	Wavelength tuning	Interference filter
	Dye	C1H ( $1.5 \times 10^{-4}$ mol/l)
	Wavelength	$\lambda_{on}$ 463.1 nm
		$\lambda_{off}$ 465.8 nm
	Beam divergence	5 mrad
Linewidth	0.5 nm	
Receiver	Fresnellens refracting telescope	
	Diameter	0.5 m
	Focallength	0.8 m
	Field of view	10 mrad
	Photomultiplier detector	HTV R376
Processor	Transient recorder-DM902 (Iwatsu)	
	Min. sampling time	10 ns
	Accuracy	8 bit
	Signal analyzer-SM2100 (Iwatsu)	

## 3.2 送信系

### 3.2.1 フラッシュランプ励起色素レーザー装置<sup>9)</sup>

装置の基本構成を図3に示す。装置は高圧充電回路、トリガ制御回路、トリガ制御回路、レーザーヘッド、色素・冷却水循環系、温度制御系より成る。高圧充電回路ではヘッド部のメインコンデンサ ( $1\mu\text{F}$ ) を正の高電圧 ( $<25\text{kV}$ ) で充電する。共振充電方式を用いているため直流電源電圧は充電電圧の約半分で良い。 $1\mu\text{F}$  のコンデンサが負荷の場合、充電効率 80%、充電時間 50 ms である。トリガ制御回路は、スパークギャップスイッチング用のトリガパルス発生器と各種保護回路より成り、トリガ周波数は、SINGLE, AUTO (0.2, 0.5, 1, 2 pps) 又は MANUAL による任意の繰り返しを選択できる。レーザーヘッド部は、高耐圧コンデンサ、トリガ昇圧トランス、スパークギャップ、同軸構造フラッシュランプ及び色素セルからなる共振器を含んでいる。放電回路及びスパークギャップは、ガラスポキシ基板を加工して、放電回路は平行平板型、スパークギャップは同軸型にするなどの改良を加えた。色素溶液は 23 l/min の割合で循環される。外部冷却水は色素タンク、純水タンクの中を通して熱交換される。温度制御系は温度コントローラと温度指示計より成る。温度コントローラは、色素溶液とヘッド冷却用純水をそれぞれのタンクに入っているヒーターによって、レーザー発振に適した温度条件にするための装置である。温度指示計

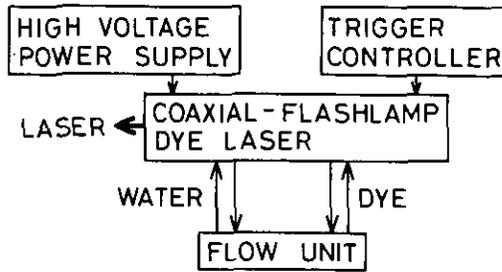


図 3 色素レーザー装置の基本構成

Fig. 3 Block diagram of the dye laser

は白金抵抗測温体による温度センサー2個から成り  $-39.99 \sim +39.99^{\circ}\text{C}$ まで測定可能である。

### 3.2.2 同軸型フラッシュランプの基本特性

フラッシュランプ (Phase-R, DL-15Y) は内径 15 mm, 長さ 300 mm の同軸タイプである。この中に 2 本の色素セル (石英, 外径 6 mm, 内径 5 mm, 長さ 330 mm, セル間隔 7 mm) を通し 2 本のレーザー光が同時に発振するようにしてある。色素は  $1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$  の C1H (日本感光色素研究所) のエタノール溶液である。色素セルとフラッシュランプの周囲には冷却用の純水を流している。フラッシュランプへの入力は通常 200 J とした。レーザー光のパルス幅は 300 ns, 立上り時間は 150 ns 程度である。また出力に対する色素溶液の屈折率温度依存性がみられた。このことは色素セルの回りに冷却水が流れている場合, 両者の温度差が発振の条件に大きく影響を与えることを意味する。最適出力は  $\Delta T$  ( $\Delta T = \text{色素溶液温度} - \text{冷却水温度}$ ) が  $-0.4 \sim -1.0 \text{ deg.}$  の範囲で得られた。 $\Delta T$  が負ということは, 増幅媒体が光学的に収束型 ( $dn/dT < 0$ , レンズ効果) となり共振器が安定になるためである。また出力が半分になる時期を交換時期とすると, このフラッシュランプは入力 200 J で 25,000 ショット程度が寿命である。

### 3.2.3 レーザー光の同調特性

二波長の同調法として, 損失の少ない誘電体干渉フィルター (以下, 干渉フィルターと略す) を用いた同調法を試み, 従来のプリズム用いた同調法と比較した。両方式の構成を図 4 に示す。プリズム同調法では分散を大きくするためプリズムを 2 個使用した。M2, M3 を調節して同調を行なう。干渉フィルター同調法では干渉フィルターは, 入射角  $0^{\circ}\text{C}$ において中心透過波長が 464 nm, 透過率 70%, スペクトル幅 2.0 nm である。測定は分光器 (日本分光, CT-25 C) からの光を光電子増倍管 (浜松ホトニクス, R 376) で検出し, トランジェトレコーダー (岩通, DM-902) で A/D 変換し記録して行われた。図 5 はスペクトル特性である。各波長は任意に選ばれている。図 6 は出力特性であり, この場合は  $\text{NO}_2$  観測に必要な 460 nm 付近に同調されている。これらの

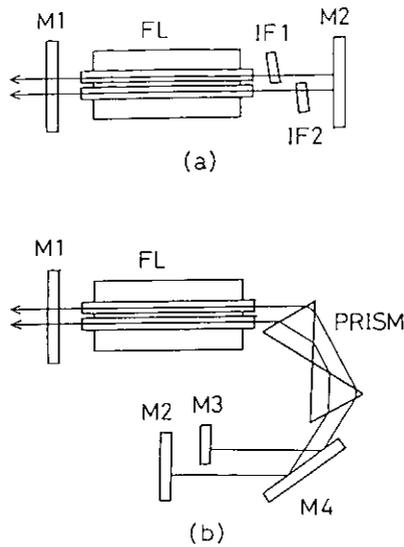


図 4 二波長同調法  
 (a)：干渉フィルター同調方式 (b)：プリズム同調方式

Fig. 4 Schematic diagrams of laser cavities with two dielectric multilayer filters (a) and with two prisms (b)

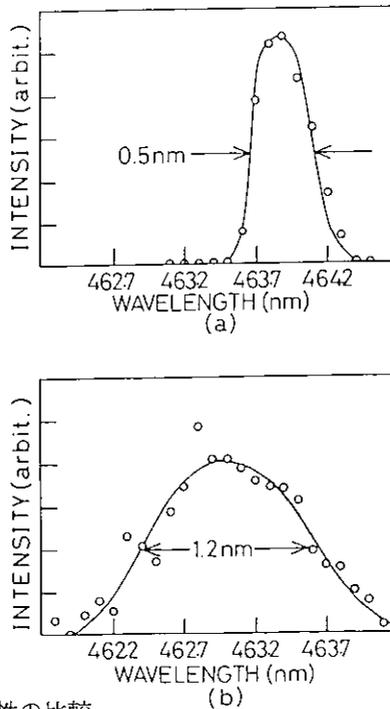


図 5 スペクトル特性の比較  
 (a)：干渉フィルター同調方式 (b)：プリズム同調方式

Fig. 5 Tuning spectra of the dye laser tuned by two dielectric multilayer filters (a) and by two prisms (b)

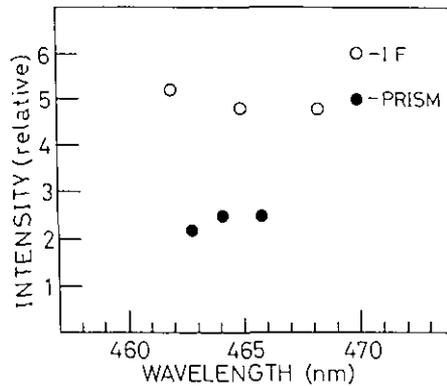


図 6 出力特性の比較

IF：干渉フィルター同調方式 PRISM：プリズム同調方式

Fig. 6 Output intensities of the dye laser tuned by two dielectric multilayer filters (○) and by two prisms (●)

結果より、干渉フィルター同調法はプリズム同調法と比較すると、スペクトル幅で1/2、出力で2倍の特性を持つレーザー光が得られ、同調法としてより有効であることが確かめられた。この原因として干渉フィルター同調法では共振器長を短くでき(干渉フィルター同調法で0.7 m, プリズム同調法で1.2 m)、増幅回数が増えたためである。光軸合わせも干渉フィルター同調法の方が容易であった。

DIALに必要な二波長として、 $\text{NO}_2$ の吸収極大波長463.1 nm, 極小波長465.8 nmを選んだ。スペクトル幅は共に0.5 nmであった。

### 3.3 受信系

#### 3.3.1 受信望遠鏡

受信望遠鏡には大口径のフレネルレンズ型屈折望遠鏡を用いて受信光の増大を図った。フレネルレンズは、従来のガラスを用いた反射鏡又は屈折レンズに比べて極めて軽量であり、最近によくレーザーレーダー用として使われている<sup>12,13)</sup>。使用したフレネルレンズはアクリル樹脂製で直径0.5 m, 焦点距離0.8 m, 焦点面でのスポットサイズは0.5 mmである。また重量は0.7 Kgである。鏡筒後部には700 mm×700 mmの平板が置かれ、この上にアイリス、接眼レンズ、光検出器を置いた。鉛直方向の回転はウォームギアを用いて行った。

#### 3.3.2 光検出器

二波長同時発振を活かすには、検出側でも二波長同時に受光することが必要である。このため、フレネルレンズで集光された受信光は、接眼レンズで平行光線にされ、ハーフミラーで2光束と

なり、各々干渉フィルターで背景光を除去するとともに波長選択され、2本の光電子増倍管で別々に同時に検出されるようにした。使用した2枚の干渉フィルターは、それぞれ入射角 $0^\circ$ において中心透過波長463.5 nm, 466.1 nmで、透過率及びスペクトル幅はそれぞれ共に9.0%, 0.35 nmである。ハーフミラーと全反射ミラーを調整して干渉フィルターへの入射角を変え、必要な二波長(463.1 nm, 465.8 nm)に設定した。スペクトル幅は共に0.6 nmである。図7に光検出器のスペクトル特性と $\text{NO}_2$ の吸収スペクトルを示す。光電子増倍管はR 376を使用し(数本の同種の光電子増倍管の中から、比較的特性のそろったもの2本を選んで使用した)、ブリーダ回路は大出力電流にも応じられるようにダイノード各段の電圧にこう配をつけて使用した。

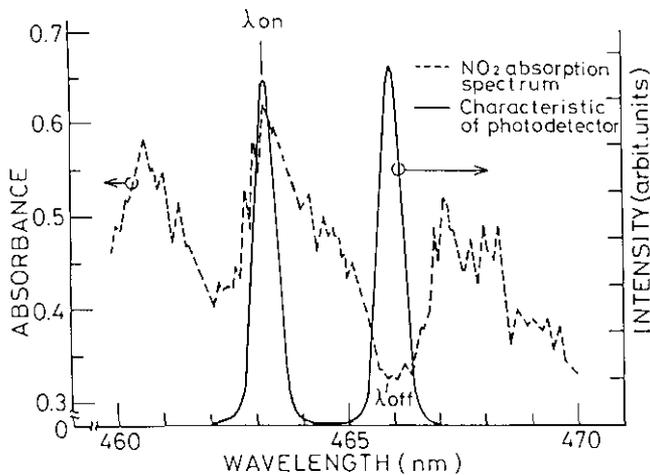


図 7 光検出器のスペクトル特性と $\text{NO}_2$ の吸収スペクトル

Fig. 7 Characteristic of the detector and  $\text{NO}_2$  absorption spectrum,  $\lambda_{on}$ : 463.1nm,  $\lambda_{off}$ : 465.8 nm

### 3.4 信号処理系

信号処理系でも二波長同時に行えるようにした。まず広帯域増幅器 (PARC, Model 115) を2台使用して二波長を別々に増幅する。帯域はDC~50MHz, 増幅度は10又は100である。入力換算雑音は0.06 mV<sub>rms</sub>である。次に2チャンネル同時動作可能なトランジェントレコーダー (岩通, DM-902) を用いて高速A/D変換を行い記憶する。その性能は、精度8 bit (最小分解能0.2 mV), 最小サンプリング時間10 ns/word, 記憶容量は2048 wordsである。この出力は多目的信号解析装置 (岩通, SM-2100) を用いて、12 bitの精度で処理され加算平均、二波長での割り算、対数変換などが行われ、ブラウン管に表示されるとともにペンレコーダに出力される。

#### 4 性能試験

構成したシステムの動作時における問題点を取り上げ詳細に検討する。まず発振に伴う電磁的雑音、測定に関する雑音について述べる。さらに光検出器の時間分解能、実験的測定精度について述べる。

##### 4.1 動作時における雑音と対策

2.2 で述べたように、原理的にはショットノイズだけで理論的最小検出濃度は求められるが、実際には他の多くの要因が混入してくる。このことは、レーザーレーダーのような大電力を必要とするレーザー発振器と高感度特性を有する検出器（光電子増倍管）が同居しているような装置では問題となる。一般に雑音ではシティマティックなものや統計的なものがある。

シティマティックなものとしては、レーザーの発振に伴うもの、レーザー装置の電源によるもの、商用周波数によるものなどの、電磁波の輻射・伝搬による電磁的雑音があげられる。この値の評価は次のように行った。理想的には光電子増倍管の暗電流による出力以下に抑えることが望ましいが、現実的には単一光子状態の微弱な入射光に対して光電子増倍管で発生する信号を最小出力と考え、これよりも雑音が小さければ良いとすると<sup>6)</sup>、最小出力  $V_{\min}$  は次式で与えられる。

$$V_{\min} = R \times \frac{n_p \cdot G \cdot e}{\tau} \quad (7)$$

$R$  は光電子増倍管の負荷抵抗、 $n_p$  は入射光子数、 $G$  は電流増倍率、 $e$  は電荷量、 $\tau$  は分解時間である。使用した光電子増倍管 ( $R=200\Omega$ ,  $G=5.3 \times 10^5$ ,  $\tau=300\text{ns}$ ) での  $V_{\min}$  は  $25\mu\text{V}$  となる。我々の観測は多光子状態でありこの値の10倍以上の入力があると考え、電磁的雑音を  $0.5\text{mV}$  以下に抑えることを目標とした。

システムをすべて動作させ、受光望遠鏡にふたをして光学的遮へいを施した状態で本装置の雑音を測定した。雑音の周波数解析を行った結果、雑音周波数は  $100\text{kHz}$ ,  $1.5\text{MHz}$ ,  $2.5\text{MHz}$  に集中しており、 $1.5\text{MHz}$  は電源の周波数に対応することがわかった。ほかにはスパークギャップ放電時のものである。この種の雑音対策は経験的なものが多く、種々の対策がとられたが、特に有効だったものは次の3点であった。1) 信号処理系のトリガに使用していたフォトダイオードを装置から分離した所におき、その間に光ファイバーを用いて光を誘導した。2) レーザー発振器のシールドリングを強化した。3) 送信系（本学情報棟3階）と受信・処理系（同6階屋上）の位置を約  $20\text{m}$  離れた（ただし最終的には2)の対策を強化した結果、同一室内での計測が可能になった）。以上の結果、電磁的雑音は最大値で  $0.2\text{mV}_{\text{p-p}}$  まで抑えることができ、目標値 ( $0.5\text{mV}_{\text{p-p}}$ ) を十分下まわることができた。

次に加算平均化について述べる。この手法は統計的な雑音（ショットノイズ）に対して効果がある。誤差は加算平均の回数  $M$  の平方根に逆比例して小さくなるため、 $M$  の値をあまり大きくす

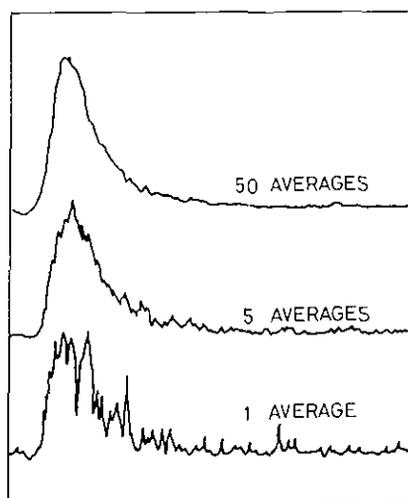


図 8 受信波形 (A スコープ) の加算平均による効果

Fig. 8 Effect of signal averaging (A-scope signal)

る必要はなく、加算する間の大気状態の変動なども考慮すると 50~100 回程度で十分である。また繰り返し測定における同期が不完全な場合は、信号波形に対するひずみが大きくなるので注意しなければならない。図 8 に受信した A スコープ波形の加算平均の効果を示す。

#### 4.2 光電子増倍管の負荷抵抗と距離分解能

パルス測光の場合、検出器、信号ケーブルそして測定器とのマッチングに注意する必要がある。通常、特性インピーダンスが  $50 \Omega$  の信号ケーブルを使用する場合には、光電子増倍管の負荷抵抗や測定器の入力抵抗は  $50 \Omega$  で終端される。しかし測定における時間分解能が許す限り、光電子増倍管の負荷抵抗を大きくし受信電圧を大きくすることができる。場合によっては増幅器を必要とせず、増幅器による雑音を除くこともできる。負荷抵抗の値を変えて行った実験の結果、 $200 \Omega$  の値で距離分解能 75 m で測定できることがわかった。

#### 4.3 実験的測定誤差の検討

実際に受信された信号光強度を用いて、ショットノイズのみを考慮して求めた最小検出濃度は 1 ppm であった。2 章の結果によれば 500 m の距離において 0.03 ppm であり二けた程悪い結果となった。これは、近距離の測定であるため望遠鏡に入射する散乱は平行光線にならないこと、さらにその結果受信光学系の幾何学的効率が悪くなり、受信信号が小さくなったことが考えられる。DIAL では、原理的には幾何学効率はキャンセルされるが、その大きさは直接受信信号の大きさに影響するものであり、受信信号が小さい程誤差は大きくなる。

さらに、NO<sub>2</sub>濃度が稀薄と思われる大気からの二波長における受信信号を求め、その比を求めたところ、比の変動幅は12%であった。濃度に換算すると2.6 ppmである。原理的にはNO<sub>2</sub>が存在しなければ、変動幅は0%、濃度でも0 ppmとなるべきものである。この原因として、2本の光電子増倍管の特性の違いが考えられた。前述したように、使用に際しては、このことに十分配慮し、同種の数本の光電子増倍管の中から比較的特性のそろったものを選んだのであるが、出力の比がとられるためわずかな特性の違いでも、誤差に大きく影響を及ぼす。このことは二波長同時受信方式において本質的な問題であり、使用すべき検出器の詳細な特性の把握とともに、誤差の軽減、除去に関する新しい信号処理法の開発など、今後の課題として残されている。

## 5 フィールド測定

### 5.1 NO<sub>2</sub>の吸収断面積の差の測定

測定気体濃度を求める際に必要となる吸収断面積の差は、レーザー光のスペクトル幅及び検出器の分解能などにより変わるため、システムの定数として吸収断面積の差を求めておかなければならない。吸収断面積の差は長光路差分吸収方式の原理に基づいて(1)式から次のように表される。

$$\sigma = \frac{1}{2 \int_0^R N(R) dR} \ln \left( \frac{P_{\text{off}}(R)}{P_{\text{on}}(R)}, \frac{P_{0,\text{on}}}{P_{0,\text{off}}} \right) \quad (8)$$

測定は次のようにして行われた。送信光路上に既知の濃度を含むNO<sub>2</sub>セル(長さ30 cm, 直径5 cm パイレックスガラス製)を置き、50 m前方の建物(白い壁)より返ってくる散乱光を受信した。また送信光路上にハーフミラーを置き、反射光の一部を望遠鏡に入れることにより出射光( $P_{0,\text{on}}$ ,  $P_{0,\text{off}}$ )と受信光( $P_{\text{on}}(R)$ ,  $P_{\text{off}}(R)$ )を同時に取得できるようにした。これらの値は(8)式に代入され吸収断面積の差が求められる。この結果、吸収断面積の差 $\sigma = 1.6 \times 10^{-23} \text{m}^2$ の値を得た。なおセル内のNO<sub>2</sub>は純NO<sub>2</sub>ガスをN<sub>2</sub>で希釈し所定の値としたものを用いた。全圧は1気圧である。

次にセル内NO<sub>2</sub>の濃度を色々変化させ、この値を用いて濃度を求めてみた。図9に結果を示す。横軸はセル封入時にマンメータで測定した値、縦軸はレーザーレーダーで測定した値である。

### 5.2 排煙中NO<sub>2</sub>濃度分布測定

ゴミ焼却の際の排煙中に含まれるNO<sub>2</sub>の濃度分布測定を行った。測定のプロック図は図2に示したとおりである。図10に測定の配置を示す。DIALシステムはすべて地上約10 m(本学情報棟3階)に置かれており、排煙源とは150 m離れている。測定時の天候は曇りで風は微風であった。排煙は非常にゆっくりと拡散しながらシステムより遠ざかる方向(斜め前方)へ流されていった。

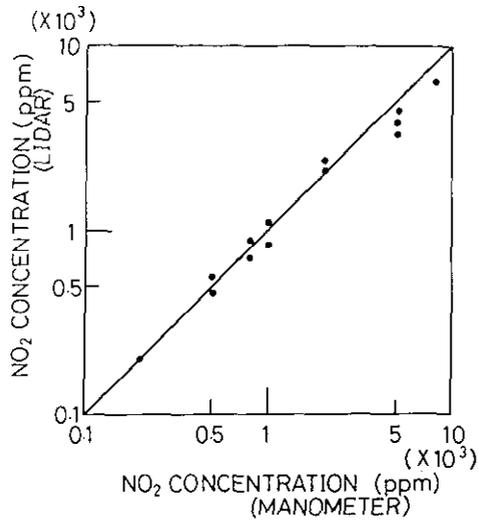


図 9 セル内 NO<sub>2</sub> 濃度の長光路吸収方式レーザーレーダーによる測定と直接測定 (マンメータによる) との比較

Fig. 9 Measurement of NO<sub>2</sub> concentration in an absorption cell at an atmospheric pressure of NO<sub>2</sub> ambient gas with the long-path differential absorption laser radar and a manometer

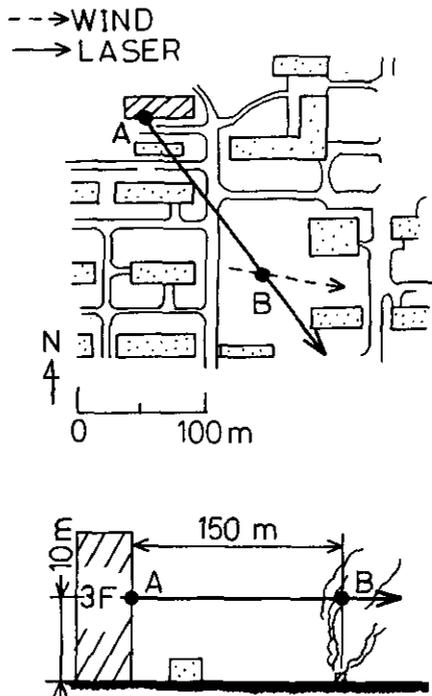


図 10 NO<sub>2</sub> 濃度測定 of 配置図  
A : DIAL システム B : 排煙源

Fig. 10 Configuration of the DIAL, A : DIAL system, B : stack at the incinerator

また排煙はかなりの範囲に広がり DIAL の視野内をすべて覆い、レーザー光はその中を突抜ける格好となった。排煙は多量の塵じんを含んでおり肉眼にもはっきり白く見えた。図 11 は二波長受信光の A スコープ表示、その比、 $\text{NO}_2$  濃度分布である。距離分解能は 75 m、積算回数は 50 回(所要時間 5 分)である。排煙源付近でピークとなり、風向きの影響で排煙源前方では濃度が低く後方ではやや高くなっている。濃度のピーク値は 7 ppm であり、燃焼直後における  $\text{NO}_2$  濃度を示しているものと思われ、各種焼却炉、ボイラーにおいて排出される値と比べてもそう高い値ではない<sup>14)</sup>。

現在のところ、レーザー光出射エネルギーが低く、測定範囲が限られている。レーザー光のエネルギーを高める工夫とともに、微弱光検出のためのフォトンカウンティング法の導入なども、今後検討していかなければならない。

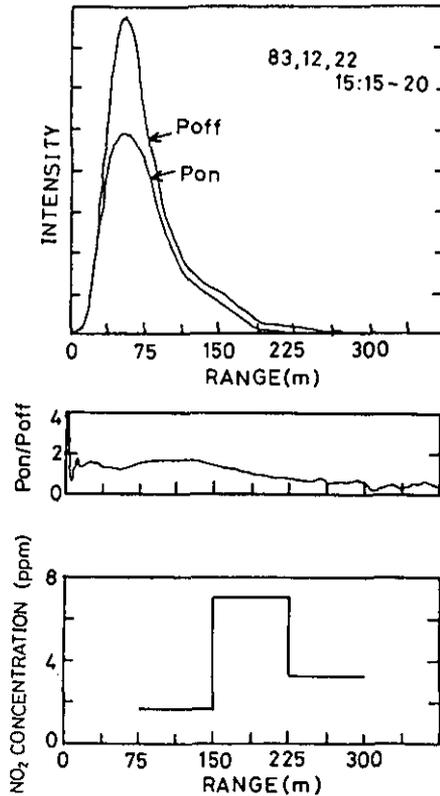


図 11 排煙中  $\text{NO}_2$  濃度測定結果

Fig. 11 Measurement of  $\text{NO}_2$  concentration profile with 75m resolution and averaging 50 signals

## 6 まとめ

二波長同時 DIAL システムの開発を行った。さらにフィールド測定を行い排煙中の NO<sub>2</sub> の濃度分布測定を行った。以下本研究で得られた主な結果について述べる。

送信系の光源には、内部に 2 本の色素セルを含む同軸構造フラッシュランプ励起色素レーザーを用い、二波長同時発振を試みた。誘電体多層膜干渉フィルターを共振器に内挿する波長同調方式を提案し、スペクトル幅 0.5 nm の良好なスペクトル特性を有する二波長が得られた。プリズム同調方式と比較した結果、スペクトル幅約 1/2、出力で約 2 倍となった。

受信望遠鏡には大口径フレネルレンズ型屈折望遠鏡を用いた。検出器には 2 本の光電子増倍管を配置し二波長を別々に同時に検出できるようにした。検出器のスペクトル幅は 0.6 nm であった。光電子増倍管の負荷抵抗を 200 Ω にすることで、距離分解能 75 m で測定できることが確かめられた。

信号処理には、それぞれ 2 チャンネル同時動作可能な高速 A/D 変換器と多目的信号解析装置を用い、送信から信号処理まですべて二波長同時動作可能な DIAL システムが完成した。

性能試験の結果、二波長の比の変動から求められた最小検出濃度は 2.6 ppm となった。この原因としては 2 本の光電子増倍管の特性の違いによるものが大きい。またレーザー自体の出力の低さ、受信光学系の効率の低さなどが考えられる。

フィールド測定として、まず長光路差分吸収方式によりセル中 NO<sub>2</sub> の吸収断面積の差の測定を行い、 $1.6 \times 10^{-23} \text{m}^2$  の値を得た。さらにこの値を用いて、近距離排煙中の NO<sub>2</sub> の濃度分布測定を行い、距離分解能 75 m、積算回数 50 回 (所要時間 5 分) の条件で、排煙中心にピーク値 (7 ppm) を持つ濃度分布が明りように示された。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たり、実験的研究において重要な寄与をされた信州大学工学部修士課程の樋口隆一氏に感謝します。また、有意義な討論と御助言をいただいた環境庁国立公害研究所大気環境部大気物理研究室 竹内延夫室長、清水浩主任研究員、杉本伸夫研究員に感謝の意を表します。

## 引用文献

- 1) Maiman, T. H. (1960): Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, **187**, 493.
- 2) Fiocco, G. and L. D. Smullin (1963): Detection of scattering layer in the upper atmosphere (60-140km) by optical rader. *Nature*, **199**, 1275-1276.
- 3) 杉本伸夫・竹内延夫 (1982): 大気汚染計測用分光型レーザーレーダーの現状. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 19-28.
- 4) Schotland, R. M. (1964): Proc. 3rd Symp. on Remote Sensing of the Environment, Univ. Michigan, Ann

Arbor, 215-224.

- 5) 竹内延夫・清水 浩・杉本伸夫 (1983) : レーザーレーダーによる大気状態の測定. 応用物理, **52**, 644-656.
- 6) Schotland, R. M. (1974) : Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption. J. Appl. Meteorol., **13**, 71-77.
- 7) Takeuchi, N., H. Shimizu and M. Okuda (1978) : Detectivity estimation of the DAS lidar for NO<sub>2</sub>. Appl. Opt., **17**, 2734-2737.
- 8) 清水 浩・松戸 修・笹野泰弘・竹内延夫 (1979) : 車載型レーザーレーダーシステムの開発. 「環境科学」研究報告集, B19-R52-1, III-1, 15-35.
- 9) 日本電気株式会社 : SL269 色素レーザー取扱説明書.
- 10) Nomura, A., Y. Shimomura, Y. Saito, and T. Kano (1982) : Simple tunable dye Laser using a dielectric multilayer filter. Rev. Sci. Instrum., **53**, 539-540.
- 11) Saito, Y., T. Teramura, A. Nomura and T. Kano (1983) : Simultaneously tunable two-wavelength dye laser using two dielectric multilayer filters. Appl. Opt., **22**, 1799-1800.
- 12) 清水 浩・小林喬郎・稲葉文男 (1977) : 対流圏大気の多元情報測定および処理のためのレーザーレーダーシステム. 信学論, **60-C**, 162-169.
- 13) 松井一郎・笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫 (1982) : 混合層高度連続測定用簡易型レーザーレーダーの製作. 国立公害研究所研究報告, 第 49 号, 15-26.
- 14) 浅野 実・安住典雄・大村晋一 (1984) : 准連続式ごみ焼却炉における窒素酸化物の低減運転について. PPM, **15**, 40-49.

II-7

地上付近での浮遊粉じんの拡散

Studies on Atmospheric Aerosol Diffusion near the Surface

溝口次夫<sup>1</sup>・池田有光<sup>2</sup>・若園 淳<sup>3</sup>

Tsuguo MIZOGUCHI<sup>1</sup>, Yukoh IKEDA<sup>2</sup> and Kiyoshi WAKAZONO<sup>3</sup>

要 旨

重力沈降が無視できない浮遊粒子状物質の道路近傍での拡散現象のモデル化のための基礎研究を行った。従来、粒子状物質の拡散をシミュレートする手法はガス状物質の拡散モデルに何らかの修正を加えた解析手法が用いられているが、本研究では粒子の一つ一つの挙動をコンピューターでシミュレートする手法を検討した。

シミュレーションの結果によると、粒子は粘性及び重力沈降の効果によってガス状物質に比べて拡散は小さく、すなわち、発生源周辺での汚染が大きくなることがわかった。

Abstract

A diffusion model was studied for estimating distribution phenomena of airborne particulates mainly derived from vehicles near the surface.

Generally, mathematical models based on diffusion equations for calculating concentrations of gaseous substances in the atmosphere have been used for estimating behavior of airborne particulates. In this study, the method for simulating movements of each particulate was discussed. By the results of simulations, the diffusion coefficients of airborne particulates were rather smaller than those of gaseous substances by the efforts of its own viscosity and gravity. For the reason, it appeared that concentrations of airborne particulates were higher near pollution sources.

1. 国立公害研究所 計測技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Chemistry and Physics Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和59年度 国立公害研究所客員研究員 (京都大学工学部 〒606 京都市左京区吉田本町)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo, Kyoto 606, Japan.)
3. 昭和59年度 国立公害研究所共同研究員 (京都大学工学部 〒606 京都市左京区吉田本町)  
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606, Japan.)

## 1 まえがき

環境大気中に存在する粒子状物質の粒径、化学組成、性状などはその生成由来によって種々の様相を呈する。

また、発生源も土壌、海塩粒子、火山、黄砂、花粉などの自然界に起因するものと、工場、自動車などの人為起源のもの、さらに、ガス状物質として大気中に出てから、物理的、化学的变化によって粒子状物質になるものなど、極めて広範囲に及んでいる。しかし、これらの粒子状物質が大気中でどのような挙動を示すか、拡散するかといった基礎的な研究はまだあまり進んでいない。

また、道路周辺での浮遊粒子状物質には、自動車からの不完全燃焼によるもの、道路に堆積しているものの巻き上げ及び最近、冬季の北国で問題となっているスパイクタイヤのもたらす粉じんなどがある。これらの中には人体に有害な物質も含まれており、その挙動を解明する必要があることは言うまでもない。

本研究は、このような道路周辺における粒子状物質の挙動を表現するモデルを構築するため、粒子の乱流拡散係数及び空間濃度分布を求めるなどの基礎的なものである。

## 2 エアロゾルの拡散モデル<sup>1,2)</sup>

簡単なモデルは、かなり大きい粒子に関して比較的適合性がよいとされている tilted plume models がある。これは Plume 式における排出源高さ  $h$  を Stokes の式で求まる地降速度  $V_g$  を用いて  $(h-x \cdot vg/u)$  で置き換えたものである。

また、Van der Hoven は粒子の沈降の効果を取り入れることによって Plume 式の修正を行っている。これは、次式で定義される地表面に沈降する粒子速度： $W$  ( $g/S \cdot m^2$ ) を用いたものである。

$$W = V_a \cdot \bar{c}(x, y, 0) \quad (1)$$

ここで  $V_a$  は沈降速度と呼ばれる比例定数、 $c(x, y, 0)$  は、Gaussian Plume 式より求まる  $(x, y, 0)$  における濃度を示す。 $(x, y, z)$  における濃度が  $\bar{c}(x, y, z)$  で与えられるとき、地表面に近い  $(x, y, z_a)$  における沈降する粒子速度  $W_a$  を求めることに対しては、source depletion model がある。前者は Chambelain Hoven らによって提案されたもので  $W_a$  は、次式によって与えられる。

$$W_a = \frac{-2V_a Q(x)}{\sqrt{2\pi}\sigma_z u} \cdot \exp(-h^2/2\sigma_z^2) \quad (2)$$

ここで、 $Q(x)$  は風下距離  $x$  の地点に到達するまでに沈降して系外へ除去された量を除く排出強度、 $u$  は風速、 $\sigma_z^2$  は濃度の鉛直分散である。

後者の surface depletion model は Horst によって提案されたもので、 $W_a$  は次式で与えられる。

$$w_a = V_a \left\{ Q(0)D(x, y, z_a) - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\sigma}^x V_a c(\zeta, \eta, g_a) \cdot D(x - \zeta, y - \eta, z_a) d\zeta \cdot d\eta \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$D(x, y, z) \equiv \bar{c}(x, y, z)/Q(x) \quad (4)$$

個々の粒子に注目したモデルについては、Basset, Clseen 及び Boussinesq らが次のような輸送方程式を提案している。

$$\begin{aligned} \frac{4\pi}{3} a^3 \rho_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = & \frac{4\pi}{3} a^3 \rho_p F(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) - \frac{4\pi}{3} a^3 VP + \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi}{3} a^3 \rho \frac{d}{dt}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \\ & + 6a^2(\pi\rho\mu)^{\frac{1}{2}} \int \frac{d}{dt}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}} + F_e \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\rho_p$ ,  $\rho$  はそれぞれ粒子、空気の密度、 $\mathbf{u}_p$ ,  $\mathbf{u}$  はそれぞれ粒子、空気の速度、 $a$  は粒径、 $p$  は圧力、 $F_e$  は外力、 $F$  は Stokes の法則に従う力、 $\mu$  は空気の粘性係数である。(5)式中、右辺第一項は粘性項、第二項は圧力こう配に関連する項、第三項は加速度に関連する項、第四項は Basset 力に関連する項である。

Hjelmfelt や Mockros らは粒子と空気の密度比が大きいとき ( $\sim 10^3$ ) には(5)式中、重要な項は粘性項のみであることを示している。このとき粒子の運動方程式は次式のようになる。

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F \cdot (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}) + F_e \quad (6)$$

今回行うシミュレーションでは(5)式の唯一の支配項が粘性項であるとし、粒子の運動方程式としては(6)式を採用する。このとき、粒子の  $(x, y, z)$  方向の速度成分を  $(u_p, v_p, w_p)$  とし、風の  $(x, y, z)$  方向の速度成分を  $(u_a, v_a, w_a)$  とすると、質量  $m$  の粒子の運動方程式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= m \frac{du_p}{dt} = -R \cdot (u_p - u_a)/v \\ F_y &= m \frac{dv_p}{dt} = -R \cdot (v_p - v_a)/v \\ F_z &= m \frac{dw_p}{dt} = -R \cdot (w_p - w_a)v - W \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  はそれぞれ粒子に対して  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向に働く力、 $v$  は粒子の風に対する相対速度、 $R$  は風の粒子に与える抗力であり、 $W$  は粒子に働く重力を示す。 $v$ ,  $R$ ,  $W$  はそれぞれ

れ(8), (9), (10)式で与えられる。

$$v = \sqrt{(u_p - u_a)^2 + (v_p - v_a)^2 + (w_p - w_a)^2} \quad (8)$$

$$R = C_D \cdot A \cdot \rho_f \cdot (v^2/2) \quad (9)$$

$$W = V \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f) \quad (10)$$

ここで,  $\rho_s$ ,  $\rho_f$  はそれぞれ粒子, 空気の比重,  $V$  は粒子の体積,  $A$  は粒子の断面積,  $C_D$  は形状抵抗係数である。

(7)~(10)式より粒子の運動方程式は次の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= -C_D \cdot A \cdot \rho_f \cdot v \cdot (u_p - u_a) / 2m \\ \frac{dv_p}{dt} &= -C_D \cdot A \cdot \rho_f \cdot v \cdot (v_p - v_a) / 2m \\ \frac{dw_p}{dt} &= -C_D \cdot A \cdot \rho_f \cdot v \cdot (w_p - w_a) / 2m - g(\rho_s - \rho_f) / \rho_s \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで, 上式中の形状抵抗係数  $C_D$  は一般にレイノルズ数  $Re$  と次のような関係がある。

$$\begin{aligned} Re < 2 & \quad C_D = 24/Re & \text{(Stokes の法則)} \\ 2 \leq Re < 500 & \quad C_D = 10/\sqrt{Re} & \text{(Allen " )} \\ 500 \leq Re < 10^5 & \quad C_D = 0.44 & \text{(Newton " )} \end{aligned}$$

ここでのシミュレーションは(6), (7)式で表されるような簡略化した粒子の運動方程式を採用して行った。

### 3 エアロゾルの乱流拡散係数

#### 3.1 モデルの設定

従来, 粒子の拡散パラメーターについては風洞実験等により風の拡散パラメーターと同等もしくは, 若干低めの値を示すことが報告されているが, ここでは粒子の乱流拡散係数について前述の拡散モデルを用いて求めてみた。

粒子の拡散係数は, まず粒子の運動方程式(5)に風速変動データを与えることにより粒子の変動を求め, その速度変動から Taylor の理論により次式で求めることができる。

$$K_p = \overline{V_p'^2} \int_0^T R_{LP}(\xi) d\xi \quad (12)$$

今回計算に用いた風速変動データは昭和 51~53 年度に大阪府によって行われた低煙塵拡散実

態調査<sup>3)</sup>の際に大阪府内5地点(境市小代, 境市新金岡, 池田市荘園, 阿倍野区阿倍野元町, 阿倍野区阪南)で, ポール上12.5 m~15.0 mに設置された超音波風向風速計により1秒ごとに観測されたものである。

この風速変動データは Euler 量であるので, (12)式において Lagrange 相関から Euler 相関への変換として, Hay と Pasquill の方法, すなわち  $\zeta = \beta t$  のとき  $R_L(\zeta) = R_E(t)$  であるという関係式を用いる。

$$K_p = \beta \overline{V_p^{12}} \int_0^{T/B} R_{E0}(t) dt \quad (13)$$

ただし,  $\beta$  は Lagrange 統計量から Euler 統計量へのスケール変換係数であり, これまでのところ平均して約4程度の値をとることが利用データに対しても認められている。そこで,  $\beta = 4.0$  として計算した。

1回の計算は20分間のデータについて行い,  $y$ 方向についてのみ拡散係数を求めた。粒径は  $50\mu\text{m}$  と  $100\mu\text{m}$ , 密度  $3\text{ g/cm}^3$  の2種類の粒子について調べた。なお, Euler 相関は最大エントロピー法 (MEM) を用いて求めた。

### 3.2 拡散係数のシミュレーションと考察

計算条件は表1に示すとおりである。この条件に基づいて, 拡散係数を求めた結果から表2に粒径  $50\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  の粒子及び風の  $\overline{V^{12}}$ , Lagrange 相関の積分値  $\int R_L$ , 乱流拡散係数  $K$  をまとめて掲げた。

拡散係数  $K$  は  $\overline{V^{12}}$  と  $\int R_L$  の積で与えられるわけであるが,  $K$  の値を評価する際に  $\overline{V^{12}}$  と  $\int R_L$  に分けて考えた方がわかりやすい。したがってここではまず,  $\overline{V^{12}}$ ,  $\int R_L$  をそれぞれについて検討していく。

#### ① $\overline{V^{12}}$ について

粒子と風の  $\overline{V^{12}}$  の値を比較すると, それほど大きな差はなく, 粒径  $50\mu\text{m}$  の場合であればその差はおおよそ3%以内に留まっている。しかし, ほとんどの場合について風の  $\overline{V^{12}}$  より粒子の  $\overline{V^{12}}$

表 1 計算条件

Table 1 Calculations conditions

particle density (g/cm <sup>3</sup> )	3.0
air density (g/cm <sup>3</sup> )	0.0012
dynamic viscosity of air (g/cm · s)	0.00018
initial velocity of particle (x) (m/s)	0.0
initial velocity of particle (y) (m/s)	0.0
initial velocity of particle (z) (m/s)	0.0
calculation time step (s)	0.01

表 2 粒子と風の拡散係数

Table 2 Particulation and wind diffusion coefficient

(Kodai District Particle dia., 100 $\mu$ m)

	$\overline{V_{ps0}^2}$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\overline{V_{p100}^2}$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\overline{U_d^2}$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\int R_L^{p_{50}}$ (s)	$\int R_L^{p_{100}}$ (s)	$\int R_a$ (s)	$K_{p50}$ (m <sup>2</sup> /s)	$K_{p100}$ (m <sup>2</sup> /s)	$K$ (m <sup>2</sup> /s)
小代(1)	0.442	0.434	0.445	39.7	41.3	38.2	17.6	17.9	17.0
小代(2)	1.466	1.423	1.486	32.5	33.8	33.6	47.7	48.1	50.0
元町(1)	1.935	1.900	1.954	38.5	39.9	40.0	74.5	74.6	77.5
元町(2)	1.158	1.096	1.125	54.9	55.8	56.9	61.1	64.0	
新金岡(1)	0.312	0.291	0.321	54.5	58.3	54.0	17.0	17.0	17.4
新金岡(2)	0.875	0.867	0.881	188.8	190.0	203.6	165.2	164.8	179.3
阪南(1)	3.035	3.926	3.088	14.1	15.0	13.7	42.8	44.0	42.3
阪南(2)	1.083	1.053	1.105	17.4	18.2	17.8	18.9	19.2	19.6
荘園	0.517	0.511	0.520	113.0	114.5	112.5	58.5	58.5	58.5

の方が若干小さくなっており、粒径 100 $\mu$ m の粒子になると、さらに  $\overline{V^{12}}$  は小さくなり（差はおおよそ 10%以内）この傾向が強くと現れている。これは、粒子の場合一般にその慣性力のため与えられた風速変動より小さな速度変動に留まることによるもので、粒径が大きくなり慣性力が増せば、さらに速度変動は小さくなるためと考えられる。

以上より  $\overline{V^{12}}$  は粒子の拡散係数を風より小さくしようとする因子となる。

②  $\int R_L$  について

$\int R_L$  についても粒子の値と風の値との差はそれほど大きくない。このことは、粒子と風の自己相関の一例を図 1 に示すが、これからもわかるであろう。

$\overline{V^{12}}$  の差は粒径 50 $\mu$ m の粒子の場合でおよそ 4%以内、粒径 100 $\mu$ m の粒子の場合でおよそ 10%以内である。しかし、 $\int R_L$  に関しては 50 $\mu$ m の場合は粒子の方が風より小さい場合が多く、100 $\mu$ m の場合はその逆で粒子の方が風より大きい場合が多くなっており、 $\int R_L$  について、 $\overline{V^{12}}$  のように粒径にかかわらず風と粒子の大小に一定の関係があるわけではない。ただし、50 $\mu$ m と 100 $\mu$ m の値を比較すると、すべての場合について  $\int R_L$  は 100 $\mu$ m の粒子の方が小さくなっていることから、50-100 $\mu$ m 以上の粒子では風より大きくなり、それ以下では風より小さくなることが考えられる。

以上より、粒径が大きくなると  $\overline{V^{12}}$  は風より小さくなる反面、 $\int R_L$  は大きくなり、粒径が小さくなるとその逆の現象が起きることがわかった。したがって粒子と風拡散係数の大小はそれらの値のかねあいで決まるわけであるが、 $\overline{V^{12}}$ 、 $\int R_L$  ともに粒子と風の値はそれほど大差ないことから、拡散係数は極く近いものになる。今回のシミュレーションのような 50-100 $\mu$ m 程度の粒子の場合は図 2 からわかるように風の拡散係数と同等、もしくは若干低めである。

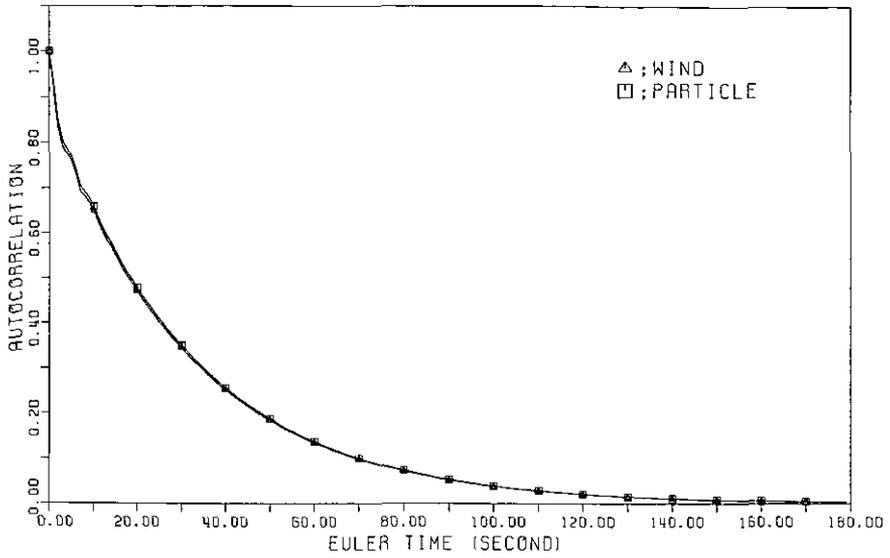


図 1 粒子と風の自己相関 (小代地区粒径  $100\mu\text{m}$ )

Fig. 1 Particle and wind diffusion coefficient (Kodai District, Particle diameter  $100\mu\text{m}$ )

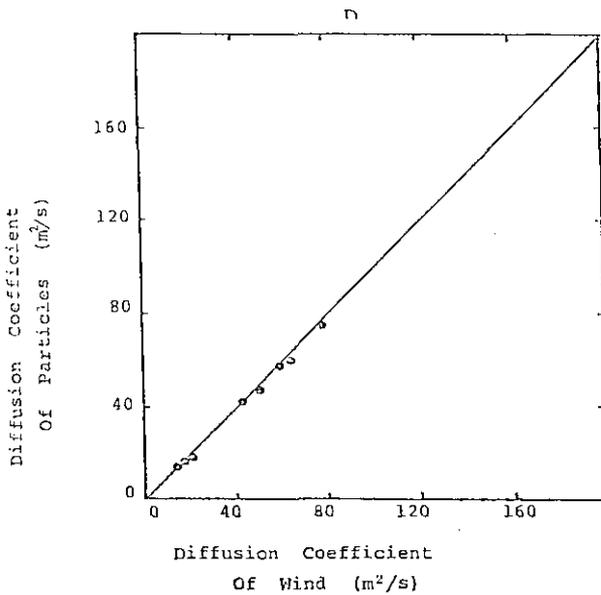


図 2 粒子と風の拡散係数

Fig. 2 The Relationship between particle and wind diffusion coefficient

## 4 粒子の拡散シミュレーション

### 4.1 モデルの設定

通常の大気では地表面の存在のために乱れは鉛直方向に非等質であり、 $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_w^2$ ,  $T_{Lv}$ ,  $T_{Lw}$  は鉛直方向に変化する。ここでは、このような3次元非等質流について拡散シミュレーションを行い、浮遊粒子状物質の空間濃度分布を求めた。

風速場の設定として一次の Markov 過程（自己回帰式）を用いる。

$$z(t+\Delta t) = \rho Z(t) + n(t) \quad (14)$$

ここで、 $Z(t+\Delta t)$  は時刻  $t$  の風速  $Z(t)$  を  $\rho$  の割合で保存する、 $\Delta t$  時間後の風速で、 $n(t)$  は Gaussian white noise である。

今、相関のてい減率を Lagrange 渦時間スケール  $T_L$  に等しいとすると、 $\rho$  は  $T_L$  を用いて次のように表される。

$$\rho = 1 - \frac{\Delta t}{T_L} \quad (15)$$

また、Gaussian white noise の分散を  $\sigma_n^2$ 、速の分散を  $\sigma_a^2$  とすると、

$$\sigma_n = (1 - \rho^2) \sigma_a^2 \quad (16)$$

で表される。

したがって、(14)~(16)式に対し、 $T_L$ ,  $\sigma_a^2$ ,  $\Delta t$  を与えることにより風速場を設定することができる。ここでは、 $T_L$ ,  $\sigma_a^2$  の鉛直方向プロファイルとして乗則を採用し次のように仮定する。

$$u = u_1 \left( \frac{Z}{Z_1} \right)^m, \quad \sigma_v^2 = \sigma_{v1}^2 \left( \frac{Z}{Z_1} \right)^a, \quad \sigma_w^2 = \sigma_{w1}^2 \left( \frac{Z}{Z_1} \right)^{a'} \\ T_{Lv} = T_{Lv1} \left( \frac{Z}{Z_1} \right)^b, \quad T_{Lw} = T_{Lw1} \left( \frac{Z}{Z_1} \right)^{b'} \quad (17)$$

こうして設定した風速場に粒子を放出することによりシミュレーションは実行されるが、その program flow を図 3 に示す。想定した計算領域は風下距離 0~100 m、幅 55~155 m、高さ 0~30 m の 3次元短形領域とし、粒子放出の位置(発生源)は (0, 0, 3m) とする。また、Counting Net の大きさは  $dX = dY = 10$  m,  $dZ = 3$  m とし、放出粒子数は 500 個とする。

### 4.2 シミュレーション結果と考察

風速 3 m/s、場表面での完全沈着を想定した場合について、拡散状況を視覚的に把握しやすくするために、粒子 50 個の軌跡を図 4 に示す。この図より粒子状物質の場合はガス状物質と比較して重力沈降の影響で大部分の粒子が発生源近くで地表面に沈降してしまい拡散の程度が小さいこ

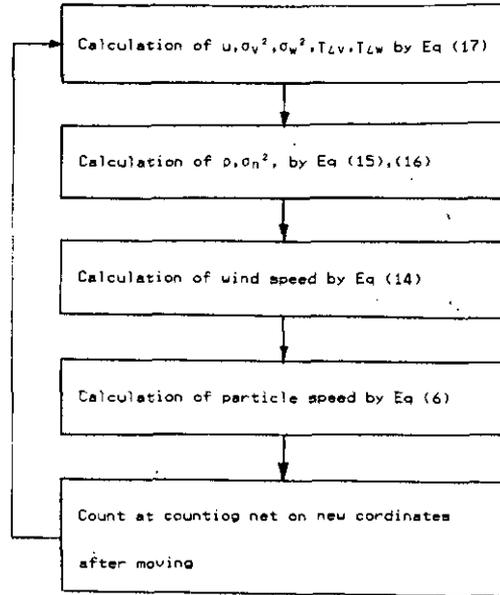


図 3 プログラムの流れ図

Fig. 3 Program flow of simulation

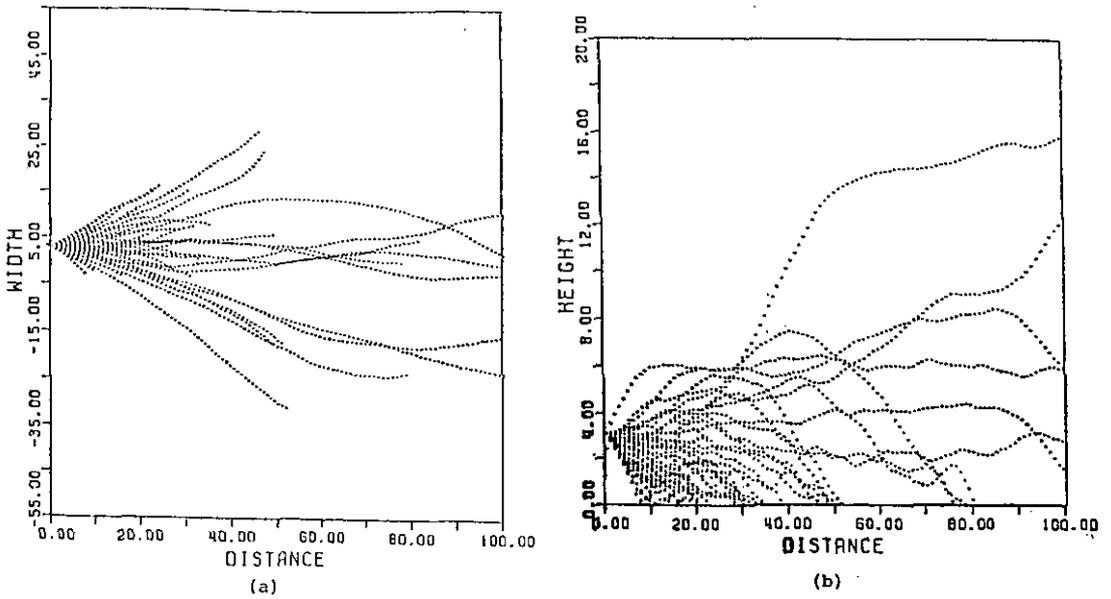


図 4 粒子の軌跡

Fig. 4 Trajectories of particles

表 3 シミュレーション結果

Table 3 Results of simulation (Wind speed 3m/s)

(A) Concentration at the surface

		DISTANCE (M)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
width (m)	-55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.11
	-45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13	0.72	0.44
	-35	0.0	0.0	0.0	0.07	0.32	0.04	0.0	0.11	0.0	0.0	0.09
	-25	0.0	0.25	1.83	1.71	1.17	0.10	0.40	0.75	0.30	0.50	
	-15	1.83	12.13	10.04	4.97	3.87	2.77	1.39	1.63	1.42	0.46	
	-5	146.57	77.90	23.45	8.22	6.06	5.68	5.15	4.32	1.90	0.53	
	5	4.13	22.47	17.18	7.82	3.70	2.94	2.48	0.48	0.51	1.02	
	15	0.0	0.87	2.43	2.44	3.08	1.88	2.03	1.61	0.84	0.54	
	25	0.0	0.0	0.50	0.59	0.56	0.98	0.84	0.08	0.23	0.0	
	35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.52	0.72	0.47	0.52	0.95	
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.06	0.07		

(B) Concentration along the center line

		DISTANCE (M)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
height (m)	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.21	0.21	0.20	0.20
	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.16	0.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.11	0.06	0.0	0.11	0.23	0.30	0.57	
	9	0.07	0.59	0.72	0.98	0.52	0.89	2.02	1.30	1.17	0.82	
	4	14.73	15.29	12.36	9.20	6.20	3.56	2.12	1.31	1.04	0.91	
	3	146.57	77.98	23.45	8.22	4.86	5.68	5.15	4.32	1.98	0.53	

とがわかる。

表 3, 4 は風速がそれぞれ 3m/s, 6m/s の場合のシミュレーション結果である。これらより風速が大きくなると明らかに移流により濃度分布ガス軸方向に拡大されることがわかるが、さらに風速とともに変わる  $y, z$  方向の風速の分散, また  $T_{Lv}, T_{Lw}$  による効果が確認される。 $\sigma_y^2, \sigma_w^2$  並びに  $T_{Lv}, T_{Lw}$  が拡散に及ぼす影響を調べるため、風速 3m/s の場合の計算条件において  $\sigma_y^2, \sigma_w^2$  のみを大きくした場合、及び  $T_{Lv}, T_{Lw}$  のみを大きくした場合についてシミュレーションを

表 4 シミュレーション結果

Table 4 Results of simulation (Wind speed 6m/s)

(A) Concentration at the surface

		DISTANCE (M)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
width (m)	-55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.12	0.25	0.24	0.51
	-35	0.0	0.0	0.02	0.35	0.14	0.41	1.07	0.45	0.44	0.39	
	-25	0.0	0.07	0.79	1.47	1.52	1.41	1.33	1.27	0.43	0.44	
	-15	0.48	5.27	5.84	5.38	3.91	2.43	2.01	1.75	1.01	0.62	
	-5	58.49	39.63	18.97	10.54	6.89	4.54	2.48	1.52	1.01	1.04	
	5	0.50	6.17	3.56	6.51	5.51	3.82	2.75	1.47	1.35	1.52	
	15	0.0	0.11	0.83	1.47	1.90	1.87	1.65	1.60	1.30	0.90	
	25	0.0	0.0	0.05	0.28	0.49	0.32	0.45	0.91	0.84	0.44	
	35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	0.0	0.17	0.09	0.19	0.74	
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	0.0	0.0		

(B) Concentration along the center line

		DISTANCE (M)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
height (m)	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.09
	18	0.0	0.0	0.05	0.02	0.0	0.03	0.14	0.26	0.44	0.40	
	15	0.0	0.03	0.05	0.07	0.35	0.55	0.62	0.59	0.77	0.56	
	12	0.0	0.07	0.28	0.70	0.90	1.07	1.09	1.79	1.51	0.86	
	9	0.10	2.42	3.65	3.44	3.15	3.10	3.45	2.57	1.92	1.95	
	6	21.54	18.09	11.03	7.21	5.42	3.62	2.28	1.45	1.61	1.12	
	3	58.49	39.63	18.97	10.54	4.89	4.16	2.48	1.52	1.01	1.04	

行ったが、これらから、 $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_w^2$ 並びに  $T_{Lv}$ ,  $T_{Lw}$ が大きくなるほど拡散は進み、それらの拡散に及ぼす影響は大であることがわかった。また、一般に  $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_w^2$ の与える影響の方が  $T_{Lv}$ ,  $T_{Lw}$ より大きいことが確認された。

さらに、指数のみを変えた場合についてもシミュレーションしたが、特に  $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_w^2$ にかかる指数が変わると濃度分布も大きく変わり、べき指数がすべて0のとき、すなわち一様風速場については特に水平方向に拡散が進み、そのため鉛直方向にはかえって拡散しなくなることが確認された。

以上はすべて地表面で完全沈着する場合のシミュレーションであったがさらに地表面で完全反射する場合についても調べてみた。完全反射を想定した場合はプログラム上で粒子位置が負（地面の下）になったら粒子位置の絶対値を採用するとともに、次のZ方向の粒子速度発生に必要な粒子の履歴速度を反対符号とした。

シミュレーションした結果、完全反射を想定してもさほど高くまで反射の影響は至らず、再び上空まで舞い上がることを示している。

なお、これらの結果は式(17)で与えられた渦時間スケール、乱れの分散の鉛直分布の仮定によるが、実際のシアー液でこれらの式が合理的かどうか、乱流計測のサンプリング間隔、サンプリング期間の結果への影響等は今後検討したい。

## 5 あとがき

以上、エアロゾルの特に道路周辺での挙動を検討したが、今回の解析の結果次のような知見が得られた。

1) エアロゾルの運動方程式を設定して、風速の実測データからエアロゾルの風流拡散係数を求めたところ、拡散係数は風よりやや低めであることが確認された。

2) 設定したエアロゾルの運動方程式について、鉛直方向の風速プロファイル等にべき乗則を採用して自己回帰式により風速を発生させてエアロゾルの拡散シミュレーションを行った。その結果、ガス状物質と比較してエアロゾルは粘性及び重力沈降の効果により特に鉛直方向の拡散は進まない。すなわち、発生源近くでの汚染が大きくなることがわかった。

今回の実験は基礎的なものに終始したため、そのまま実際の道路に適用できるかどうか疑問である。

今後は、エアロゾルの発生機構、粒径分布等を実際の道路で詳細に調査して、道路周辺でのエアロゾルの拡散をさらに正確に表現できるモデルを構成していく必要がある。

## 引用文献

- 1) Haugen, D. A (1975): Lecture on air pollution and environmental impact analyses. Am. Meteorol. Soc., 52-54.
- 2) Tadmor, J. and I. Zur (1980): Resuspension of particles from a horizontal surface. Atmos. Environ., 15, 141-149.
- 3) 環境庁・大阪府 (1976-1978): 低煙源拡散調査報告書。

## II-8 筑波における大気エアロゾルの高度別分布と シミュレーション

### Measurement and Simulation of Atmospheric Aerosols at Tsukuba

溝口次夫<sup>1</sup>・功刀正行<sup>1</sup>・葉山幸雄<sup>2</sup>  
藤田真一<sup>2</sup>・溝畑 朗<sup>3</sup>

Tsuguo MIZOGUCHI<sup>1</sup>, Masayuki KUNUGI<sup>1</sup>, Yukio HAYAMA<sup>2</sup>,  
Shinichi FUJITA<sup>2</sup>, and Akira MIZOHATA<sup>3</sup>

#### 要 旨

低層大気中のエアロゾル及びその成分の鉛直分布測定を気象研究所の気象観測鉄塔を利用して行った。

測定方法は目的に応じて数種類、すなわち、光散乱式浮遊粉じん測定機、ローボリュームサンプラー、ハイボリュームサンプラー及びカスケードインパクターを用いた。測定高度は地上を含めて4か所とした。また、測定期間は1982年秋から、季節を変えて4回それぞれ1～2週間程度である。

成分分析は、フィルター捕集したサンプルによって行ったが、使用した分析法はけい光X線分析法、原子吸光法、放射化分析法及びイオンクロマトグラフィー法を用いた。

通常の気象条件ではエアロゾル濃度は、地上から離れるに従って小さくなるのが明確になったが、その成分の中には全く逆の挙動を示すものも含まれている。

風速、気温、湿度ともにTSP濃度と高い相関を示しているが、その中でも地上と上空との気温差がTSP濃度を予測するのに有効であることが分かった。

1. 国立公害研究所 計測技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Chemistry and Physics Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和59年度 国立公害研究所客員研究員 (大阪府公害監視センター 〒537 大阪市東成区中道)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Osaka Environmental Pollution Control Center, Nakamichi Higashinari-ku, Osaka 537, Japan.)
3. 昭和58～59年度 国立公害研究所客員研究員 (大阪府放射線中央研究所 〒593 大阪府堺市)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Radiation Center of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka 593, Japan.)

## Abstract

Airborne particulates were sampled at the meteorological observation tower of Meteorological Research Institute in Tsukuba Science City. They were collected or measured with low volume samplers, high volume samplers, cascade impactors and light scattering particle counters. The instruments were set up on four stages of the tower. Samplings were carried out for five to fifteen days in various seasons of these two years.

X-ray fluorescence analysis, atomic absorption analysis, neutral activated analysis and ion chromatography were applied for the determination of chemical components of airborne particulates collected on the filters.

The concentration of total airborne particulates at the ground level was higher than at the upper level in the ordinary weather, while some components showed reverse behavior. It appeared that the concentration of airborne particulates depended on wind speed, temperature and humidity. Temperature difference between 10m height and 200m height was effective for estimating the concentration of airborne particulates.

## 1 まえがき

低層環境大気中での汚染物質の鉛直分布等の測定はその成分の挙動の解明,あるいは,起源の推定等を行う上で必要なことである。

エアロゾルとその成分の鉛直プロファイル等を知るため気象研究所の気象観測用鉄塔を利用して高度別のサンプリングを行った。サンプリングは1982年10月18~23日,1983年8月18~23日,1983年12月13~26日及び1984年5月30日~6月10日にいずれも同様の条件で行った。

測定結果を解析するために,気象研究所が同鉄塔で連続してモニタリングしている高度別の風向,風速,気温及び湿度の1時間ごとのデータの提供を受けた。

エアゾルの測定結果とその解析等について以下に述べる。

## 2 エアゾルとその成分の測定方法

使用したサンプリング装置は,光散乱方式浮遊粉じん自動測定機,ローボリュームサンプラー,ハイボリュームサンプラー及びカスケードインパクトである。サンプリング地点は地上と鉄塔の62m,125m,及び175mの4か所である。このうち,ハイボリュームサンプラーは地上と175mの2か所に設置し,他の測定機はすべての場所で稼働させた。また,気象観測値は鉄塔の高度10,25,50,100,150,200及び213mの7地点でモニタリングされているものを気象研から提供を受けた。光散乱方式の自動測定機は,柴田科学製AP-635型及びAP-636型を用いたが,鉄塔での測定の前後にそれぞれ数日間,同一場所で運転し,その結果から,各機種間の相関を求め,鉄塔での測定値を補正した。

ローボリュームエアサンプラーは,柴田科学製,多段型分粒器付LT-20及びL-20型をそれぞれ2台使用し,フィルターは東洋ろ紙TM-300メンブランフィルターを用いた。原則として,

フィルター交換は同一日時に行っているが、特定のステージで高濃度となったときは、そこだけ途中で交換をしている。ハイボリュームエアーサンプラーは、柴田科学製インパクター型分粒器付の HVC-1000 A を、フィルターは、ゲルマン MICR O-QUARTZ を使用し、原則として 1 日 2 回、朝と夕方交換した。カスケードインパクターは、地上にはシェラ社大気用カスケードインパクター 218 型を、衝突板としてグラスファイバーろ紙を用いて使用し、他の三つのステージにはシェラー社マーブルパーソナルカスケードインパクター 296 型を用い、衝突板にはマイラフィルムを使用し、全期間を通して捕集を行った。

捕集したエアロゾルは、恒温恒湿室に 24 時間以上放置した後、秤量を行った。試料のうち、ローボリュームで捕集したエアロゾルは、ORTEC 6111, エネルギー分散型けい光 X 線分光計で、主として金属成分を分析した後、放射化分析を行った。ハイボリュームで捕集したエアロゾルは、イオンクロマトグラフ及び原子吸光分光計によって、無機イオン、金属成分の分析を行っている。一方、カスケードインパクターで捕集したエアロゾルは、光学顕微鏡及び日本電子製走査型電子顕微鏡 JSM-840 によって粒子像等を観察し、付設の X 線マイクロアナライザーによって、個々の粒子の元素分析及び元素の面分析を行っている。

### 3 測定結果

#### 3.1 エアロゾル濃度の測定結果

1983 年 12 月 13 日～26 日に行った高度別のエアロゾル濃度の測定結果を図 1 に示す。エアロゾル濃度は高度が増すごとに低くなっているが、変化のパターンはよく一致している (62 m の結果は欠測率が多いため記載していないが同様のパターンを示している)。図 2, 図 3, 図 4 に同時に観測されている風速、気温及び湿度のデータのうち、高度 10 m と 200 m の日変化を示す。風速は、200 m の高さの変動が大きく、平均風速もかなりの差が認められる。気温は逆に地上の方が変化が大きいの。湿度は地上付近が高く、上が低くなっている。この時期は、ほとんど毎朝、強い接地逆転が観察される。以上の結果から、地上付近の風が弱いとき、気温逆転時にエアロゾル濃度が高くなるということが明確になっている。

#### 3.2 エアロゾルの成分分析

表 1, 2 にけい光 X 線分析及び放射化分析の結果を示す。また、図 5 にハイボリュームで捕集したエアロゾルの金属及び無機イオンの分析結果を示す。

Na は、全捕集期間を通じて、地上から 175 m までその濃度にほとんど差が観測されていない。強い逆転の有無にかかわらずこの傾向が認められる。したがって、Na の発生源はローカルなものは少なく、大部分が遠隔地から運ばれており、例えば、海塩等によるものと考えられる。Mg も、比較的上下の濃度差は小さく、濃度変化の挙動も Na に似ている。しかし、カスケードインパクターで捕集したエアロゾルの走査型電子顕微鏡による観察では、NaCl の結晶等は見いだせな

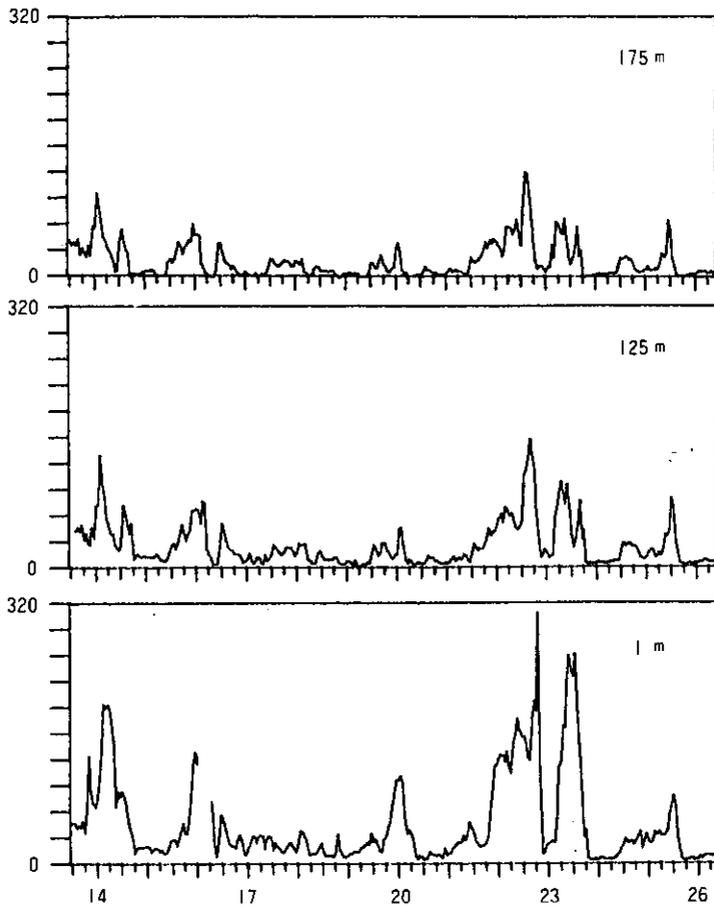


図 1 エアロゾル濃度の高度別変化  
(1983年12月14~26日)

Fig. 1 Aerosol variation for from Dec. 14 to 26, 1983

かった。Al, Fe, Sc は、エアロゾル濃度の減少より少しゆるやかに低下している。Al, Fe, Sc が主に土壌起源の元素であることから、また、粒径分布で比較的大きな粒径の粒子が高所ほど低下している結果から、主として風等による土壌の巻き上げによるものと考えられる。Cl, Br はエアロゾル濃度の減少以上に、高所ほど濃度の減少が急になる傾向がある。また、ハイボリュームサンプラーの結果から、エアロゾル濃度が高いときに、特に顕著である。これは、接地逆転により大気が強い安定状態になったときに対応しており、ローカルな発生源からの寄与が極めて大きいものと思われる。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>イオンが、この傾向と比較的良好に対応している。周辺の田畑で冬季に草等をよく燃やしており、捕集時もあちこちで煙が出ているのが鉄塔から観察された。1~2 μm の粒子が高い所程低下しているのは、そうした燃焼起源の粒子の比率の影響によるものと推定さ

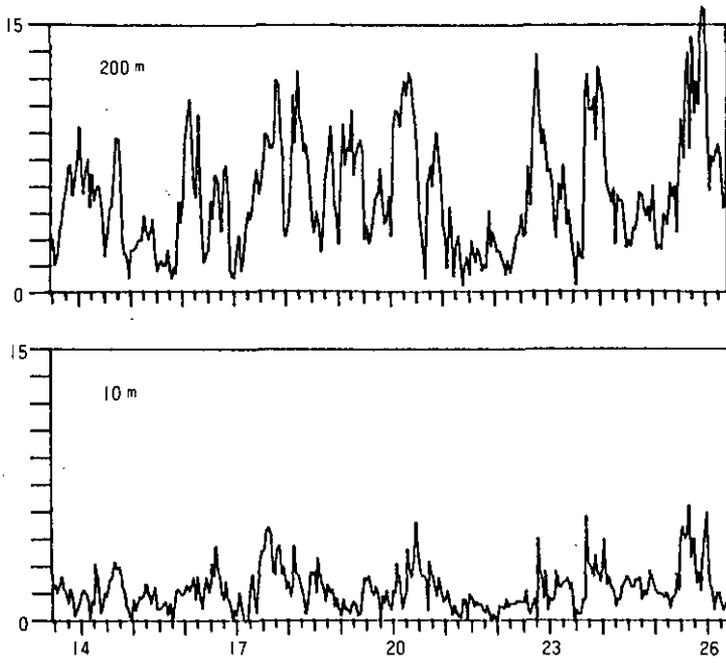


図 2 風速の変化 (1983年12月14~26日)

Fig. 2 Wind speed variation for from Dec. 14 to 26, 1983

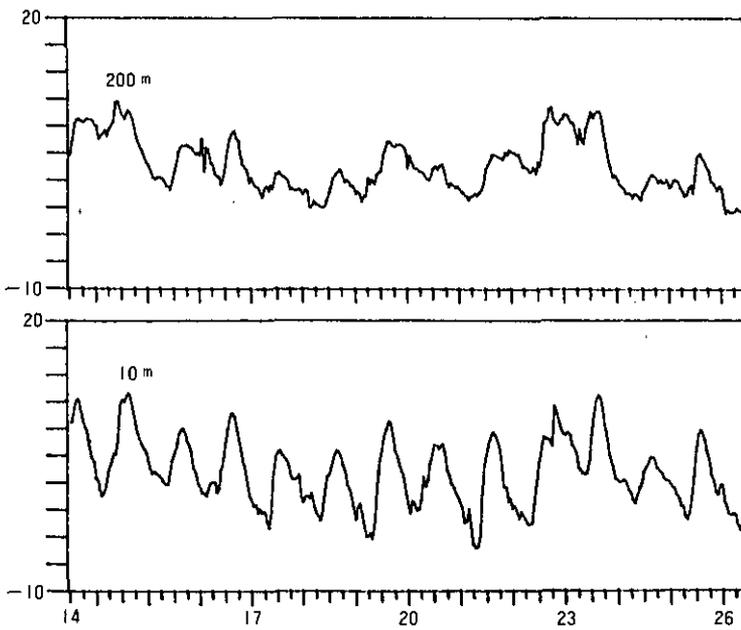


図 3 気温の変化 (1983年12月14~26日)

Fig. 3 Temperature variation for from Dec. 14 to 26, 1983

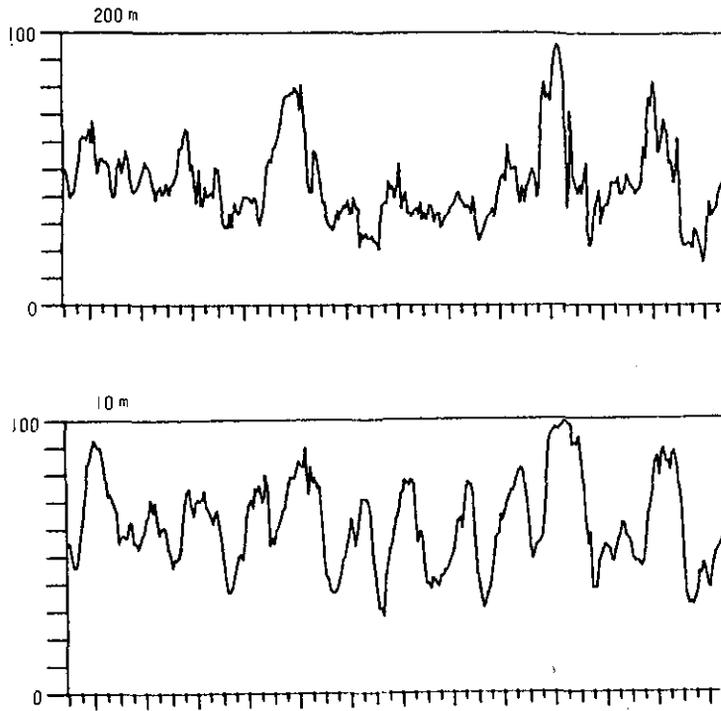


図 4 湿度の変化 (1983年12月14~26日)

Fig. 4 Humidity variation for from Dec. 14 to 26, 1983

表 1 けい光 X線分析の結果 (ng/m<sup>3</sup>)

Table 1 Analytical results by X-ray fluorescence analysis

Sampling Date	1983 12/13~17				17~23				23~26			
	0 m	62 m	125 m	175 m	0 m	62 m	125 m	175 m	0 m	62 m	125 m	175 m
Element												
V	11	13	8	8	11	6	5	4	6	3	2	4
Cr	4	7	7	8	7	6	4	5	9	6	6	4
Mn	33	29	30	23	23	23	23	22	13	11	9	7
Fe	450	400	360	330	140	320	330	330	100	180	140	140
Cu	24	23	15	17	14	10	9	9	10	7	8	
Zn	240	200	180	150	210	160	130	130	94	86	63	50
Pb	65	50	66	66	61	50	58	58	35	32	17	19

表 2 放射化分析の結果 (ng/m<sup>3</sup>)

Table 2 Analytical results by neutral activation analysis

Sampling Date	1983 12/13~17				17~23				23~26			
	0 m	62 m	125 m	175 m	0 m	62 m	125 m	175 m	0 m	62 m	125 m	175 m
Element												
Na	320	340	340	330	320	290	330	320	230	220	230	250
Al	430	340	300	260	430	270	270	260	220	190	150	160
S	<6000	<5000	5000	<5000	7000	<3000	6000	<2000	300	<4000	<300	400
Cl	3900	300	200	1500	4000	2500	2000	1400	1500	1500	920	830
K	460	410	380	330	480	340	300	250	100	100	100	70
Ca	<100	300	300	<100	200	200	300	300	<100	<100	<90	<90
V	9.1	9.6	7.4	5.9	8.0	7.5	6.7	5.7	4.5	4.0	3.2	2.6
Cr	2.7	3.1	4.3	3.9	5.3	2.6	3.2	4.6	4.2	2	3	2
Mn	27	24	25	20	24	17	19	18	10	3.4	7.5	6.9
Fe	470	400	350	330	400	300	290	320	200	150	140	150
Cu	10	41	33	17	20	46	9	5	10	10	10	5
Zn	250	240	150	150	200	170	130	140	92	42	62	55
Br	22	13	9.9	7.9	24	12	3.5	6.9	7.0	6.5	6.7	4.3
Cd	6.8	2	5	3.4	3.3	2.2	1.9	2.4	2	2	2	1
Sc	0.093	0.073	0.062	0.056	0.094	0.013	0.056	0.056	0.045	0.038	0.055	0.032
TSP (ug/m <sup>2</sup> )	47.6	37.4	31.2	23.3	50.1	32.1	27.5	24.2	18.5	18.5	13.2	12.7

れる。

無機イオン NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> はこのようなときも濃度が高くなるが、高度による差はそれ程顕著ではなく、このことは発生源が近傍だけでなく遠隔地からの寄与もあると推察される。

走査型電子顕微鏡の観察では、球形の粒子が多くみられ燃焼起源によるものと思われる。また、175 m の微粒子段に針状の結晶が多数観察されたが、径がかなり大きいこと、固まっていることから、ミスト状の粒子等が集まり乾燥の際に結晶化したものと思われる。この結晶を X線マイクロアナライザー分析した結果は、主に S, Na, Ca の存在が確認された。したがって、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub> 等の硫酸塩が主であると思われる。硝酸塩も存在すると思われるが明確ではない。

#### 4 エアロゾル濃度の予測モデル

レーザーレーダーによる上空のエアロゾル濃度の測定値から地上濃度を求めることを想定し、以上のフィールド測定で得られた気象データ及び上空のエアロゾル濃度データを用いて、地上濃度の推定を行う統計モデルを段階式重回帰法及び GMDH (Groap Method of Data Handling) 法によって構築した。本法に用いるデータは表 3 に示す項目とした。

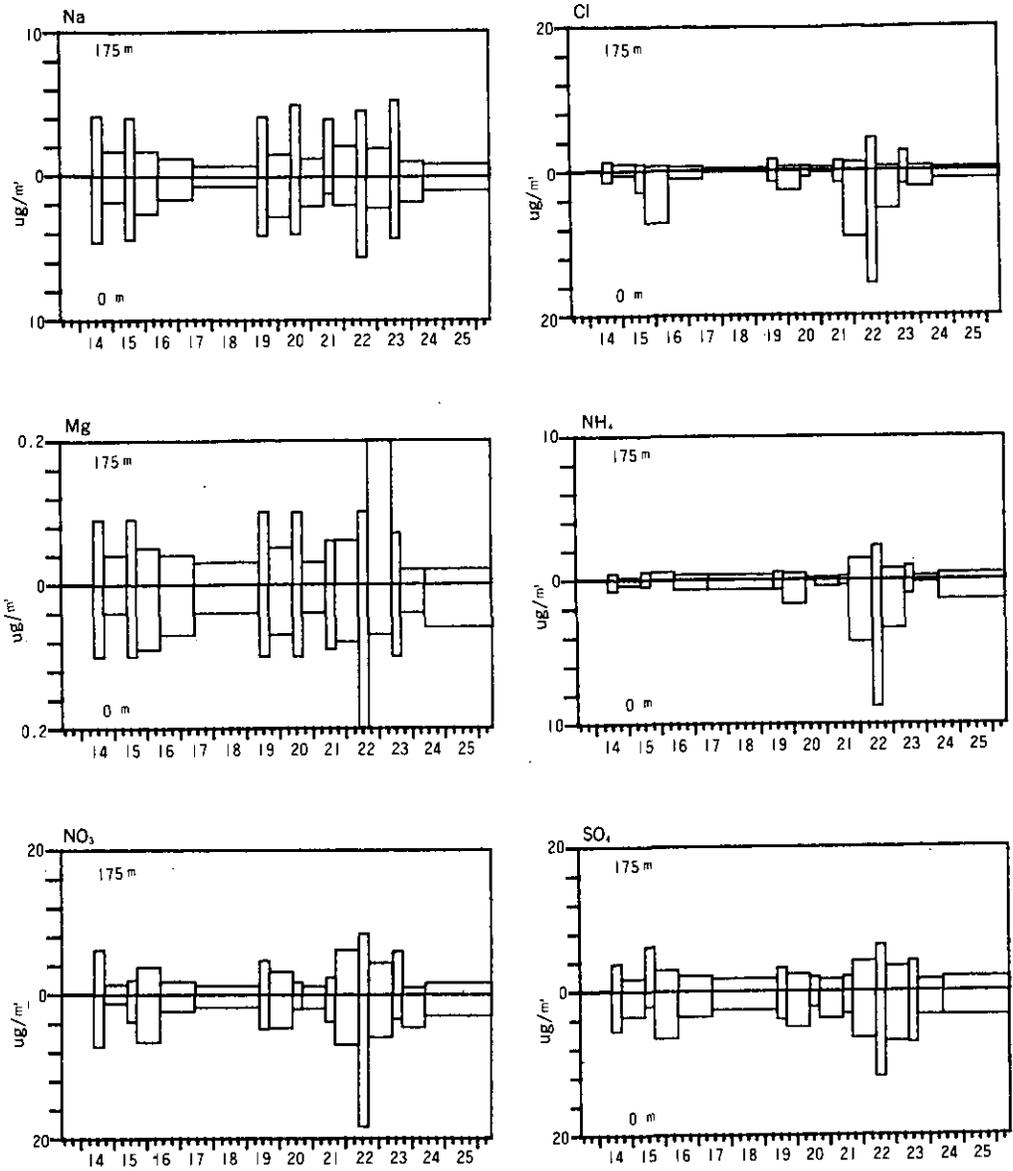


図 5 主要成分の変化 (1983年12月14~26日)

Fig. 5 Major element and component variation for from Dec. 14 to 26, 1983

表 3 測定項目

Table 3 Measurement parameters

parameter	height
temperature	10 m
temperature	200 m
wind speed	10 m
humidity	10 m
SPM	175 m
SPM	1 m

#### 4.1 段階式重回帰による方法

[段階式重回帰法]

従属変数  $Y$ , 独立変数  $X_{\alpha i} (i=1, 2, \dots, \alpha=1, 2, \dots, n)$  が与えられているとする。いま, その中の  $X_1, X_2, \dots, X_q (q < P)$  が回帰式に入っている状態とする。

$$Y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \dots + \hat{\beta}_q X_q$$

このとき変数増減法の手順は次のとおりである。

- (1) まだ回帰式内にはいない  $X_{q+1}, X_{q+2}, \dots, X_p$  に対して  $Y$  との間に最も高い偏相関係数をもつ独立変数をさがす。
- (2) その独立変数を偏 F 検定し, 与えられた導入基準より大きければ, 新たに回帰式に加える。
- (3) 回帰方程式  $Y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \dots + \hat{\beta}_q X_q + \hat{\beta}_{H} X_{q+1}$  が与えられたとして  $X_{q+1}$  が導入されたときの各  $X_1, X_2, \dots, X_{q+1}$  がもつ寄与の程度を偏 F 値によって検討する。最小の偏 F 値が, 与えられた除去基準より小さければ, その偏 F 値をもつ変数を回帰式から除く。
- (4) 導入と除去の繰り返しは, 回帰式に加えられるべき変数がなくなり, また除かれるべき変数がなくなると終わる。

[計算条件]

従属変数を地上における SPM 濃度とし, 独立変数を表 4 に示す。12 月 23 日は雨天であったこと, 及び大気安定度を考慮して表 5 に示す 6 ケースについて計算を行った。

#### 4.2 GMDH による方法<sup>1-3)</sup>

[改良型 GMDH]

GMDH は, A. G. Ivaknenko により開発されて以来多くの改良が行われてきた。本論では, 近年, 田村等により提案された改良型 GMDH を用いることとした。

システムの入力変数との間に

表 4 独立変数

Table 4 Independent variables

Variable	Content
X 1	temperateve (°C) at 10 m
X 2	temperateve (°C) at 200 m
X 3	$x_3 = x_2 - x_1 + 1.862$
X 4	wind speed (m/s) at 10 m
X 5	relative humidity (%) at 10 m
X 6	concentration of SPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) at 175 m
X 7	$X_1/X_4$
X 8	$X_2/X_4$
X 9	$X_3/X_4$
X 10	$X_5/X_4$
X 11	$X_6/X_4$
X 12	$X_3 * X_5$

表 5 計算ケース

Table 5 Weather conditions for calculations

case	rainy weather	atmospheric stability
1	exclude	stable, neutral
2	exclude	unotable seutral
3	exclude	stable, neutral, unstable
4	include	stable, neutral
5	include	unstable, neutral
6	include	stable, neutral, unstable

$$\phi = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$$

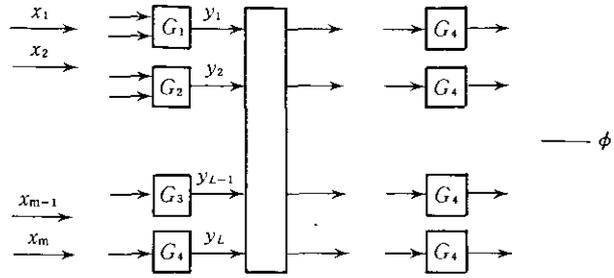
という従属変数関係があるものとし、この関数  $f$  (一般に非線形) を入出力データから発見的自己組織化の原理に基づいて求める。 $f$  の完全表現の式が、次の Kolmogorov-Gavor 多項式で表されると仮定する。

$$\phi = \delta_0 + \sum a_i \cdot X_i + \sum \sum a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum \sum \sum a_{ijk} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_k + \dots$$

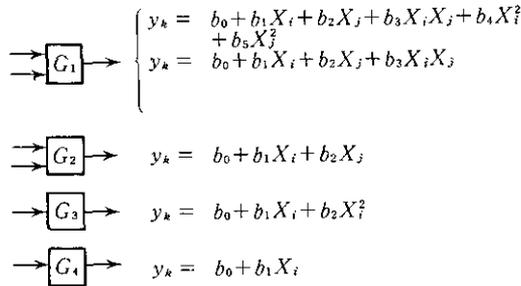
改良型 GMDH は次のアルゴリズムに基づいて完全表現式を決定する (図 6 参照)。

(1) 入力データの 2 変数のあらゆる組み合わせを考えて、2 次以下の多項式を作成する。(部分表現式という、部分表現式の発生器は図 6 に示すように、 $G_1$  から  $G_4$  までの 4 種類がある。)

(2) 部分表現式の発生器の選択は、 $N$  個のすべてのデータを用いて AIC (Akikis Information Criterion),



I : self-selection of intermediate variables  
(a) block diagram



(b) generator of optimal partial polynomial

図 6 田村の改良型 GMDH のブロック図

Fig. 6 The structure of modified GMDH algorithm by Tamura

$$AIC = N \log_e Sk^2 + 2(k+1) + C$$

$$Sk^2 = (1/N) \sum (\phi_i - \hat{\phi}_i)^2$$

( $\phi$ : 出力変数の実測値,  $\hat{\phi}$ : 出力変数の予測値)

を計算し、AIC を評価基準にして自動的に行う。ここで、中間変数  $Y$  の選択個数の最大値  $L$  は計算機のメモリの許される範囲内でできるだけ大きくとる。

(3) 次の層に移り、選択された中間変数  $Y$  を入力変数として同様な計算を繰り返す。

(4) 部分表現式の発生器としてすべて  $G_4$  が選択された層において計算を打ち切る。

最終的に、システムのモデルは、最終層に残った中間変数の(重みつき)平均で構成する。

(計算条件)

出力変数を地上における  $SPM$  濃度とし、入力変数として表 6 に示すデータを用いた。なお、計算ケースは重回帰と同様に表 5 に示す 6 ケースとした。

表 6 GMDH 計算における入力変数

Table 6 Input variables for GMDH

Variable	Content
X 1	temperature (°C) at 10 m
X 2	temperature (°C) at 200 m
X 3	$X 3 = X 2 - X 1 + 1.862$
X 4	wind speed (m/s) at 10 m
X 5	relative humidity (%) at 10 m
X 6	concentration of SPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) at 175 m

## 4.3 結果と考察

## (1) 段階式重回帰法による結果

表 7 に従属変数に対する独立変数の相関係数を示すが、ケース 2 及びケース 5 は、175 m における SPM と非常に高い相関を示している。これは、不安定な大気状態では上下の混合が行われているためと考えられる。

また、表 8 に段階式重回帰法の結果を示すが、同ケースでは、上空の SPM と温湿度のみが説明

表 7 従属変数に対する独立変数の相関係数

Table 7 Correlation coefficient between independent and dependent variables

case	correlation coefficient to dependent variable											
	X 1	X 2	X 3	X 4	X 5	X 6	X 7	X 8	X 9	X 10	X 11	X 12
1	0.09	0.57	0.62	-0.22	0.27	0.74	0.14	0.41	0.32	0.12	0.46	0.36
2	0.23	0.27	0.32	-0.33	0.36	0.92	0.33	0.36	0.12	0.38	0.71	0.31
3	-0.01	0.49	0.58	-0.27	0.33	0.69	0.11	0.42	0.34	0.17	0.49	0.39
4	0.14	0.58	0.59	-0.21	0.39	0.71	0.20	0.42	0.29	0.14	0.43	0.38
5	0.28	0.32	0.33	-0.35	0.37	0.90	0.37	0.41	0.11	0.40	0.70	0.32
6	0.04	0.52	0.57	-0.26	0.43	0.66	0.18	0.43	0.32	0.19	0.45	0.42

表 8 段階式重回帰法による実行結果

Table 8 Calculated values based on regression model

case	Number of observation	correlation coefficient corrected degree of freedom regression coefficient	regression coefficient											
			$\beta 0$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	$\beta 4$	$\beta 5$	$\beta 6$	$\beta 7$	$\beta 8$	$\beta 9$	$\beta 10$	$\beta 11$
1	199	0.87	6.25	2.57	-	10.050	-	-0.278	1.503	-1.249	3.337	-	-0.056	-0.286
2	75	0.93	-10.86	1.605	-	-	-	0.285	0.949	-	-	-	-	-
3	274	0.87	-11.88	1.743	-	9.436	2.692	-	1.404	-	2.290	1.225	-0.093	-0.274
4	221	0.84	-0.30	3.114	-	12.843	5.045	-	1.500	-	2.413	-	-	-0.301
5	76	0.92	-12.20	-	1.608	-	-	0.344	0.928	-	-	-	-	-
6	297	0.85	-16.86	1.985	-	10.626	3.262	-	1.518	-0.975	4.011	-	-0.058	-0.369

note=null-hypothesis was rejected in all cases at risk ratio of 1% by F-test

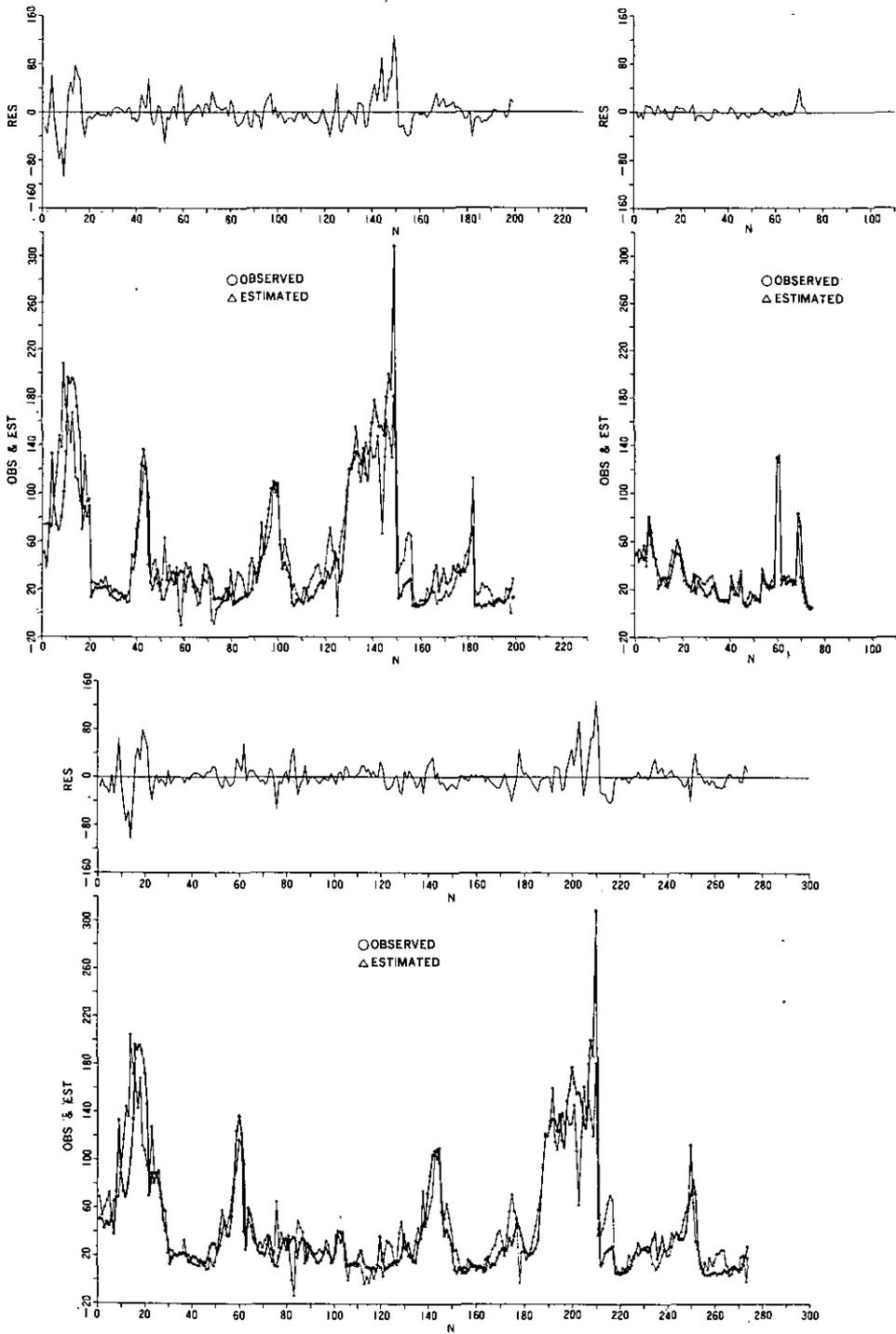


図 7 段階式重回帰法による推定結果  
(1)ケース 1, (2)ケース 2, (3)ケース 3

Fig. 7 Measured values and calculated values based on regression model

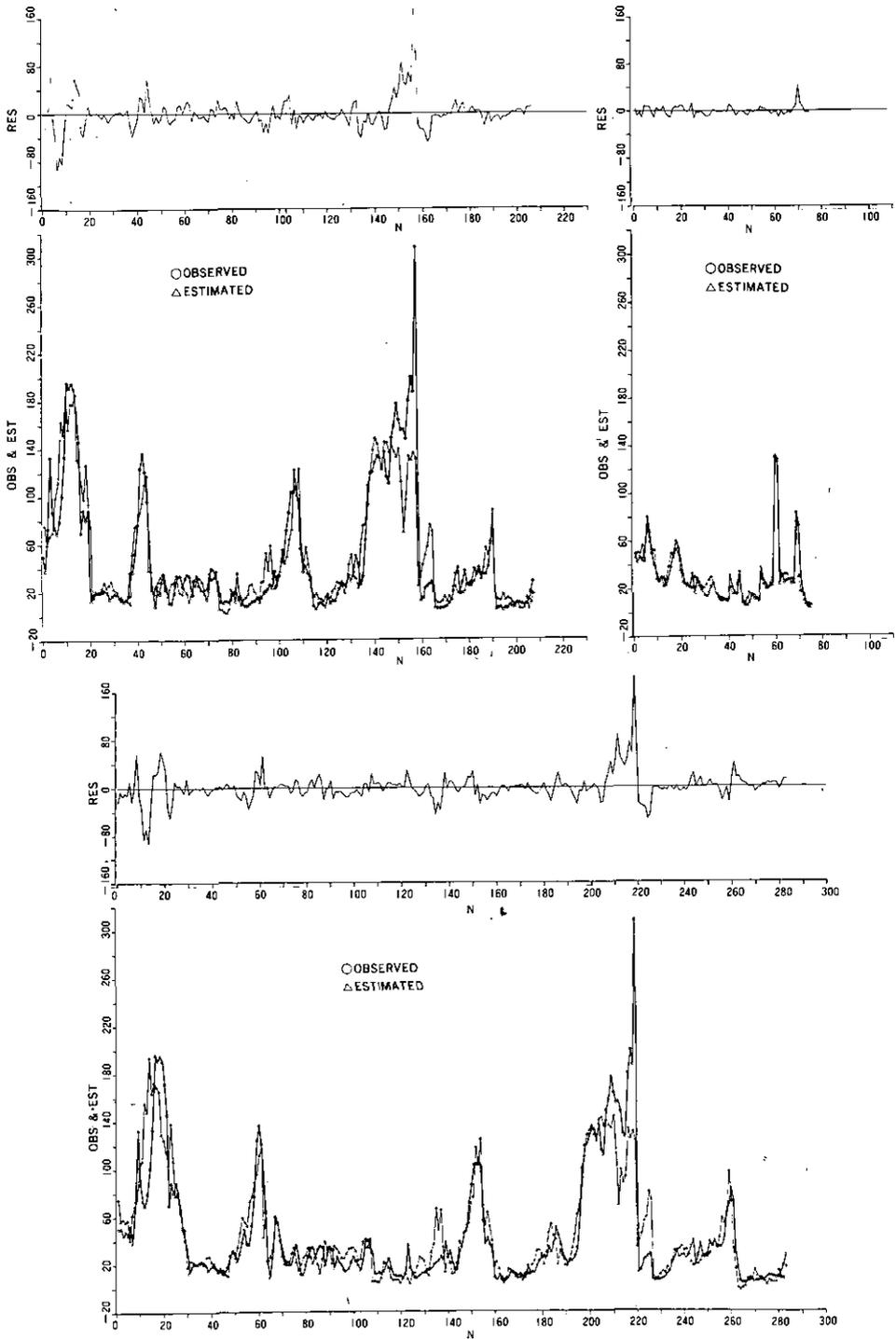


図 8 GMDH による推定結果  
(1)ケース 1, (2)ケース 2, (3)ケース 3

Fig. 8 Measured values and calculated values based on GMDH

変数として利用されているが、上空の *SPM* と単回帰でも十分説明が可能である。

ケース 1 及び 4 では、逆転層の位置が不明確であるため、個別の相関は良くない。しかし、重回帰の結果では上空の *SPM*、温度差、下の温度の順に寄与が高く、これらの要因を考慮することにより、0.87、0.84 の重相関が得られた。また、測定期間 14 日中、雨の日は 1 日だけだったので、大きな差異は認められないが、比較的良好な結果の得られたケース 1 から 3 における実測値と推定値のグラフを図 7(1)～(3)に示す。

## (2) GMDH による結果

表 9(1)～(6)に GMDH による実行結果を図 8(1)～(3)に実測値と推定値のグラフを示す。いずれのケースにおいても若干精度の向上が図られたが、モデルの複雑さ及びモデルに対する物理的な意味付けが困難であるなどの要因を考慮すれば、この場合においては線形モデルで十分推定できると考えられる。

## 5 あとがき

環境大気中のエアロゾルの鉛直分布の測定とその成分分析を行い、その一部のデータについて気象要素との関連を含めて解析した。解析に用いたデータは冬季の約 2 週間のものであり、全体としての評価はできないが、今回の解析の結果、低層大気中のエアロゾルの挙動、成分比率などがある程度明確にできた。今後、他の季節のデータ解析を行うことにより、筑波地域におけるエアロゾルの起源等の解明に役立つものとする。

また、レーザーレーダーでの上空のエアロゾル濃度の測定値から地上濃度を推定するために提案したモデルは、その期間についてはほぼ満足できるものと思う。

次のステップでは、ここでシミュレートした結果を踏まえて、年間を通じてのあらゆる気象条件下でのシミュレーションを行い、また、エアロゾル濃度予測のための独立変数、従属変数ともに任意の高度に一般化した鉛直分布モデルの構築を目指すこととする。さらに、実用化のための簡略化モデルの検討も進めることとしたい。

なお、本研究実施に当たり気象観測用鉄塔での測定、データの解析等について、多大の協力をいただいた気象研究所の金沢五寿夫、土器屋由起子、及び池上三和子の各研究員に厚く感謝いたします。

表 9 GMDH による実行結果

Table 9 Calculated values based on GMDH

(2) (ケース 1)

model	structure of partial polynomial	correlation coefficient	Mean Square Error
1	$\phi 1 = -0.516 + 0.706 \cdot Z 3 + 0.304 \cdot Z 5$	0.87	26.44
2	$\phi 2 = -0.482 + 0.742 \cdot Z 3 + 0.268 \cdot Z 6$	0.87	26.48
3	$\phi 3 = Z 1$	0.87	26.55
4	$\phi = 0.5 \cdot \phi 1 + 0.25 \cdot \phi 2 + 0.25 \cdot \phi 3$	0.87	26.42
structure of intermediate variables	$Z 1 = -7.235 + 0.527 \cdot Y 4 + 0.511 \cdot Y 6 + 0.001 \cdot Y 4 \cdot Y 6$ $Z 3 = -2.050 + 0.424 \cdot Y 5 + 0.389 \cdot Y 6 + 0.003 \cdot Y 5 \cdot Y 6$ $Z 5 = 1.021 + 0.765 \cdot Y 1 - 0.001 \cdot Y 1 \cdot Y 5 + 0.003 \cdot Y 5^2$ $Z 6 = -5.734 + 0.671 \cdot Y 1 + 0.441 \cdot Y 4$ $Y 1 = 2.517 + 2.505 \cdot X 6 + 1.065 \cdot X 3 + 0.015 \cdot X 6^2$ $Y 4 = 7.177 + 3.078 \cdot X 1 + 1.394 \cdot X 1 \cdot X 3 + 2.294 \cdot X 3$ $Y 5 = 11.174 - 9.426 \cdot X 1 + 21.030 \cdot X 2 - 0.627 \cdot X a^2$ $Y 6 = -0.297 + 12.134 \cdot X 4 + 3.089 \cdot X 8 - 1.031 \cdot X 4^2 - 0.018 \cdot X 6^2$		

(2) (ケース 2)

model	structure of partial polynomial	correlation coefficient	Mean Square Error
1	$\phi 1 = -0.254 + 0.702 \cdot Z 1 + 0.306 \cdot Z 6$	0.94	7.84
2	$\phi 2 = -0.335 + 0.635 \cdot Z 2 + 0.376 \cdot Z 6$	0.94	7.86
3	$\phi 3 = -0.262 + 0.682 \cdot Z 3 + 0.327 \cdot Z 6$	0.94	7.88
4	$\phi 4 = -0.363 + 0.596 \cdot Z 5 + 0.416 \cdot Z 6$	0.94	7.91
5	$\phi 5 = Z 1$	0.94	7.98
6	$\phi = 0.2 \cdot \phi 1 + 0.2 \cdot \phi 2 + 0.2 \cdot \phi 3 + 0.2 \cdot \phi 4 + 0.2 \cdot \phi 5$	0.94	7.86
structure of intermediate variables	$Z 1 = 1.074 + 0.845 \cdot Y 1 + 0.003 \cdot Y 1 \cdot Y 6$ $Z 2 = Y 1$ $Z 3 = -3.028 + 0.424 \cdot Y 2 + 0.143 \cdot Y 6$ $Z 5 = Y 2$ $Z 6 = -1.704 + 0.938 \cdot Y 3 + 0.003 \cdot Y 6^2$ $Y 1 = 7.048 - 2.378 \cdot X 2 + 1.239 \cdot X 6 - 0.058 \cdot X 2 \cdot X 6 + 0.494 \cdot X 2^2$ $Y 2 = 14.481 - 4.373 \cdot X 1 + 1.338 \cdot X 6 - 0.054 \cdot X 1 \cdot X 6 + 0.471 \cdot X 1^2$ $Y 3 = 9.137 + 0.019 \cdot X 5 \cdot X 6$ $Y 6 = -134.923 + 3.088 \cdot X 2 + 5.648 \cdot X 5 - 0.048 \cdot X 5^2$		

(3) (ケース 3)

model	structure of partial polynomial	correlation coefficient	Mean Square Error
1	$\phi 1 = -0.278 + 0.671 \cdot Z 1 + 0.335 \cdot Z 5$	0.87	23.56
2	$\phi 2 = -0.282 + 0.690 \cdot Z 1 + 0.316 \cdot Z 6$	0.87	23.57
3	$\phi 3 = -0.364 + 0.632 \cdot Z 2 + 0.376 \cdot Z 6$	0.87	23.57
4	$\phi 4 = -0.234 + 0.683 \cdot Z 1 + 0.322 \cdot Z 3$	0.87	23.59
5	$\phi 5 = -0.305 + 0.630 \cdot Z 2 + 0.376 \cdot Z 5$	0.87	23.60
6	$\phi = 0.2 \cdot \phi 1 + 0.2 \cdot \phi 2 + 0.2 \cdot \phi 3 + 0.2 \cdot \phi 4 + 0.2 \cdot \phi 5$	0.87	23.57
structure of intermediate variables	$Z 1 = -21.380 + 0.827 \cdot Y 2 + 0.779 \cdot Y 6 - 0.002 \cdot Y 2 \cdot Y 6$ $Z 2 = -21.176 + 0.825 \cdot Y 3 + 0.776 \cdot Y 6 - 0.002 \cdot Y 3 \cdot Y 6$ $Z 3 = -19.126 + 0.800 \cdot Y 4 + 0.740 \cdot Y 5 - 0.002 \cdot Y 4 \cdot Y 5$ $Z 5 = -17.310 + 0.758 \cdot Y 3 + 0.708 \cdot Y 5 - 0.001 \cdot Y 3 \cdot Y 5$ $Z 6 = -17.414 + 0.760 \cdot Y 2 + 0.710 \cdot Y 5 - 0.001 \cdot Y 2 \cdot Y 5$ $Y 2 = 8.078 + 3.619 \cdot X 1 + 1.261 \cdot X 1 + 1.261 \cdot X 1 \cdot X 3 + 2.264 \cdot X 3^2$ $Y 3 = 11.654 + 6.072 \cdot X 2 + 1.315 \cdot X 2 \cdot X 3 - 0.300 \cdot X 2^2 + 0.794 \cdot X 3^2$ $Y 4 = 14.171 + 7.650 \cdot X 2 - 3.932 \cdot X 1 \cdot X 2 + 1.143 \cdot X 1^2 + 2.550 \cdot X 2^2$ $Y 5 = -91.640 + 3.145 \cdot X 5 + 1.417 \cdot X 6 + 0.012 \cdot X 5 \cdot X 6 - 0.022 \cdot X 5^2 + 0.009 \cdot X 6^2$ $Y 6 = 9.453 + 2.650 \cdot X 6 - 0.096 \cdot X 1 \cdot X 6 - 0.009 \cdot X 6^2$		

(4) (ケース 4)

model	structure of partial polynomial	correlation coefficient	Mean Square Error
1	$\phi 1 = -0.543 + 0.228 \cdot Y 5 + 0.448 \cdot Y 6 + 0.002 \cdot Y 5 \cdot Y 6 + 0.002 \cdot Y 5$	0.85	32.26
2	$\phi 2 = -8.407 + 0.544 \cdot Y 4 + 0.504 \cdot Y 6 + 0.001 \cdot Y 4 \cdot Y 6$	0.85	32.44
3	$\phi 3 = -7.714 + 0.531 \cdot Y 3 + 0.490 \cdot Y 6 + 0.001 \cdot Y 3 \cdot Y 6$	0.85	32.47
4	$\phi 4 = -1.096 + 0.515 \cdot Z 4 + 0.505 \cdot Z 5$	0.84	32.59
5	$\phi 5 = -1.091 + 0.518 \cdot Z 4 + 0.502 \cdot Z 6$	0.94	32.60
6	$\phi = 0.2 \cdot \phi 1 + 0.2 \cdot \phi 2 + 0.2 \cdot \phi 3 + 0.2 \cdot \phi 4 + 0.2 \cdot \phi 5$	0.85	32.34
structure of intermediate variables	$Z 4 = 6.027 + 0.460 \cdot Y 2 + 0.002 \cdot Y 2 \cdot Y 5 + 0.002 \cdot Y 5^2$ $Z 5 = -7.488 + 0.628 \cdot Y 1 + 0.508 \cdot Y 4$ $Z 6 = -6.902 + 0.618 \cdot Y 1 + 0.495 \cdot Y 3 + 0.001 \cdot Y 1 \cdot Y 3$ $Y 1 = -10.495 + 9.007 \cdot X 3 + 2.962 \cdot X 6 - 0.020 \cdot X 6^2$ $Y 2 = -0.438 + 5.338 \cdot X 1 + 2.810 \cdot X 6 - 0.017 \cdot X 6^2$ $Y 3 = 10.418 + 4.095 \cdot X 2 + 1.591 \cdot X 2 \cdot X 3 + 0.783 \cdot X 3^2$ $Y 4 = 5.572 + 3.519 \cdot X 1 + 1.732 \cdot X 1 \cdot X 3 + 2.479 \cdot X 3^2$ $Y 5 = 7.914 - 10.221 \cdot X 1 + 23.129 \cdot X 2 - 0.573 \cdot X 1^2$ $Y 6 = -3.237 + 15.865 \cdot X 4 + 3.418 \cdot X 6 + 1.390 \cdot X 4^2 - 0.021 \cdot X 6^2$		

(5) (ケース 5)

model	structure of partial polynomial	correlation coefficient	Mean Square Error
1	$\phi 1 = 2.556 + 0.745 \cdot Y 1 + 0.005 \cdot Y 1 \cdot Y 5$	0.93	8.73
2	$\phi 2 = 2.895 + 0.734 \cdot Y 2 + 0.005 \cdot Y 2 \cdot Y 5$	0.93	8.89
3	$\phi 3 = 1.191 + 0.839 \cdot Y 1 + 0.003 \cdot Y 1 \cdot Y 6$	0.93	8.89
4	$\phi 4 = 1.399 + 0.811 \cdot Y 2 + 0.004 \cdot Y 2 \cdot Y 6$	0.93	8.97
5	$\phi 5 = Y 1$	0.93	9.01
6	$\phi = 0.2 \cdot \phi 1 + 0.2 \cdot \phi 2 + 0.2 \cdot \phi 3 + 0.2 \cdot \phi 4 + 0.2 \cdot \phi 5$	0.93	8.79
structure of intermediate variables	$Y 1 = 7.337 - 3.089 \cdot X 2 + 1.271 \cdot X 6 - 0.068 \cdot X 2 \cdot X 6 + 0.639 \cdot X 2^2$ $Y 2 = 17.209 - 5.782 \cdot X 1 + 1.390 \cdot X 6 - 0.063 \cdot X 1 \cdot X 6 + 0.620 \cdot X 1^2$ $Y 5 = 2.792 - 36.217 \cdot X 4 + 2.388 \cdot X 4 \cdot X 5 - 28.537 \cdot X 4^2$ $Y 6 = -140.760 + 3.408 \cdot X 2 + 5.824 \cdot X 6 - 0.050 \cdot X 5^2$		

(6) (ケース 6)

model	structure of partial polynomial	correlation coefficient	Mean Square Error
1	$\phi 1 = -0.513 + 0.581 \cdot Z 1 + 0.430 \cdot Z 4$	0.84	29.32
2	$\phi 2 = -0.522 + 0.587 \cdot Z 1 + 0.424 \cdot Z 5$	0.85	29.32
3	$\phi 3 = -0.517 + 0.592 \cdot Z 1 + 0.417 \cdot Z 6$	0.85	29.33
4	$\phi 4 = -0.500 + 0.579 \cdot Z 2 + 0.431 \cdot Z 4$	0.85	29.33
5	$\phi 5 = -0.502 + 0.588 \cdot Z 2 + 0.424 \cdot Z 5$	0.85	29.35
6	$\phi = 0.2 \cdot \phi 1 + 0.2 \cdot \phi 2 + 0.2 \cdot \phi 3 + 0.2 \cdot \phi 4 + 0.2 \cdot \phi 5$	0.85	29.33
structure of intermediate variables	$Z 1 = -19.751 + 0.817 \cdot Y 2 + 0.727 \cdot Y 5 - 0.002 \cdot Y 2 \cdot Y 5$ $Z 2 = -19.450 + 0.810 \cdot Y 4 + 0.721 \cdot Y 5 - 0.002 \cdot Y 4 \cdot Y 5$ $Z 4 = -6.851 + 0.654 \cdot Y 1 + 0.484 \cdot Y 2$ $Z 5 = -1.794 + 0.653 \cdot Y 1 + 0.483 \cdot Y 4$ $Z 6 = -6.786 + 0.654 \cdot Y 1 + 0.482 \cdot Y 3$ $Y 1 = -6.181 + 9.203 \cdot X 3 + 2.335 \cdot X 6 - 0.011 \cdot X 6^2$ $Y 2 = 6.408 + 4.062 \cdot X 1 + 1.592 \cdot X 1 \cdot X 3 + 2.451 \cdot X 3^2$ $Y 3 = 12.537 + 4.302 \cdot X 2 + 1.520 \cdot X 2 \cdot X 3 + 0.752 \cdot X 3^2$ $Y 4 = 13.868 - 2.479 \cdot X 1 + 10.729 \cdot X 2 - 3.123 \cdot X 2 + 0.776 \cdot X 1^2 + 2.215 \cdot X 2^2$ $Y 5 = -60.920 + 1.855 \cdot X 5 + 1.612 \cdot X 6 + 0.011 \cdot X 5 \cdot X 6 - 0.010 \cdot X 5^2 - 0.010 \cdot X 6^2$		

## 引用文献

- 1) 榎木義一・池田三郎 (1974) : 環境指導制御 (II) . 計測と制御, **13**, (10) 781-796.
- 2) 藤田真一 (1983) : 環境システムのモデリングにおける GMDH の応用. 全国公害研究会誌, **8** (2), 49-53.
- 3) Tamura, H. and T. Kondo (1977) : Range-spatial pattern identification of air pollution by a combined model of source-receptor matrix and revised GMDH. Proc. IFAC Symp. Environ. Syst. Plan. Control, Kyoto, 373-380.

II-9

遠隔計測による水質の定量

Remote Sensing of Water Quality

安岡善文<sup>1</sup>・宮崎忠国<sup>1</sup>

Yoshifumi YASUOKA<sup>1</sup> and Tadakuni MIYAZAKI<sup>1</sup>

要 旨

人工衛星 (LANDSAT) 及び航空機を利用した水質の遠隔計測手法について検討し、水質推定モデルの開発を行った。まず、水の太陽光に対する分光性を調べるために、水質と水面直上で得られる上方方向放射輝度の分光特性の関係を統計的に解析し、水質の遠隔計測の可能性を検討した。次に遠隔計測により得られたデータと水質との関係を調べ、水質定量のための統計モデルの作成を行った。さらに、水質の推定に大きな影響を及ぼす大気散乱光及び水面反射光について、その影響の評価を行った。これらの解析を行うための実験対象水域として茨城県霞ヶ浦を選び、LANDSAT 及び航空機に搭載したマルチスペクトルスキャナー (MSS) による遠隔計測データの収集、水質データ、分光放射輝度等グラントルースデータの収集を実施した。

Abstract

A quantitative method for remote sensing of water quality is described. First, the basic relationships between the water quality and the spectral characteristics of water bodies are investigated by correlating the density of water quality parameters (suspended sediment, transparency, chlorophyll-*a*) with the upwelling radiance just above the surface. Next, the statistical models to estimate water quality from the remotely sensed data are developed based on the linear regression analysis between the surface truth data (water quality) and the LANDSAT multispectral scanner (MSS) data and the airborne MSS data. The discussion also includes the evaluation of influence on water quality estimation by the atmospheric effect (transmittance and path radiance) and also surface reflectance of water bodies. Finally, a qualitative method to generate classification map of water quality characteristics is introduced.

- 
1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

## 1 はじめに

広い範囲を対象とする環境監視に、人工衛星や航空機を利用した遠隔計測を応用する試みが始められている。遠隔計測により得られる映像データは、従来の離散的に配置された測定点におけるデータと比較し、その情報量は膨大であって、これらのデータから有効な環境情報を抽出することは、環境の監視、保全、管理を行っていく上で有効な手段となる。

特に水域においては、系の時間変化が早い上、水質の濃度が場所によって大きく異なる、といった問題のために、従来からの採水、分析といった方法のみでは、状況を迅速かつ的確に把握することは困難であり、遠隔計測技術の利用が望まれる。本研究では、人工衛星、航空機に搭載したマルチスペクトルスキャナー (MSS) を利用して水域の水質分布を計測することを目的とし、水質定量のための統計モデルの作成、さらに、水質の定量に及ぼす大気散乱光の影響及び水面反射光の影響等について検討を行った。なお本報告は、本特別研究を通じて得られた水質の遠隔計測に関するいくつかの知見をまとめたものである<sup>1-5)</sup>。

第2章では、水質の遠隔計測において最も基本的な概念である分光スペクトルについてその測定法及び測定例について述べる。第3章では、MSSにより得られた遠隔計測データから水質を推定するための統計的モデルについて検討する。第4章及び第5章では、水質の遠隔計測に及ぼす大気及び水面の影響の評価法について検討する。第6章では、第3章で述べた定量的な水質の推定に対して、水質特性の違いを定性的に分類する手法について紹介する。

## 2 水の分光特性の計測

水中に入った太陽光は、水中の物質及び水自身によって吸収、散乱、透過及び反射される。光に対するそれらの波長特性 (分光特性) は物質によって異なるから、水中に入って再び水面に出てきた光は、水中の物質組成によって異なった分光特性を示す。水質の遠隔計測は、MSSなどの装置を用いて、この光に対する水の分光特性を計測し、水中の物質組成を推定することにより行われる。

水質の遠隔計測の可能性を検証するためには、その第一歩として、水質と水面上で得られる光の関係を明らかにしなければならない。本研究では、まず、野外実験用に開発した高速スペクトルメータを用いて、水面直上における光の分光特性を測定し、これと水質との関係を調べた<sup>1)</sup>。スペクトルメータの詳細については、本報告書中の参考文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

図1に水面付近における光学系を示す。水面における分光反射率  $R$  は、水面直上での上方向放射輝度  $U$  及び水面に入射する太陽の放射輝度  $H$  を用いて、

$$R = \frac{U}{H} \quad (1)$$

により与えられる。水面直上における上方向放射輝度  $U$  は、水中から水面に出てくる光の放射輝

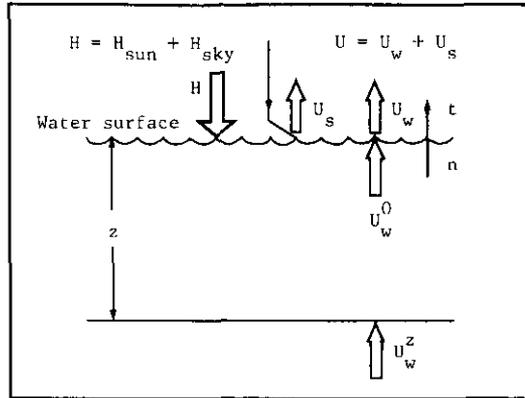


図 1 水面近傍における光学系の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of optical system above and below water surface

度  $U_w$  と水面において反射された天空光による放射輝度  $U_s$  の二つの成分から構成され、

$$U = U_w + U_s \quad (2)$$

により与えられる。水面における反射光を除いた、水中からの光  $U_w$  のみによる水面直上の分光反射率を  $R_w$  とすると、 $R_w$  は、

$$R_w = \frac{U_w}{H} \quad (3)$$

により与えられ、水の太陽光に対する分光特性を示す。ここでは、水面における分光反射率  $R_w$  と水質との関係を回帰分析により統計的に調べた。

水中からの光の放射輝度  $U_w$  は、直接測定することができないため、水面下において測定した上方向放射照度を用いて推定した。すなわち、水中からの光の放射輝度  $U_w$  は、水面直下における上方向放射輝度  $U_w^0$  を用いて、

$$\begin{aligned} U_w &= \frac{t}{n^2} U_w^0 \\ &= \frac{t}{n^2} \frac{1}{\pi} E(0) \end{aligned} \quad (4)$$

により与えられる。ここで、 $t$  及び  $n$  はそれぞれ水中から空中に出る光の透過率及び屈折率を示す(真上に進む光に対しての理論値は  $t/n^2=0.544$ )。また、 $E(0)$  は水面直下における上方向放射照度であり、直接測定することはできないが、水深  $z(m)$  における上方向放射照度  $E(z)$  を用い

て、

$$E(0) = E(z) \cdot \exp(k \cdot z) \quad (5)$$

により推定できる。ここで  $k$  は上方向への光の放射照度の消散係数であって、二つの深さにおける上方向放射照度  $E(z_1)$  及び  $E(z_2)$  を用いて、

$$k = \frac{1}{z_2 - z_1} \log_e \frac{E(z_1)}{E(z_2)} \quad (6)$$

により与えられる。

ここでは、水面直上の放射輝度  $U$  を高速スペクトルメータにより、水中の上方向放射照度  $E(z)$  を小型水中分光放射計 (Scripps 海洋研究所 MER-1000) により測定した。さらに、水面に入射する光の放射照度  $H$  は、船上に設置された白色標準反射板<sup>7)</sup>からの放射輝度  $W$  を高速スペクトルメータで測定し、

$$H = \pi \cdot W / \rho \quad (7)$$

により求めた。ここで  $\rho$  は白色板の反射率で、該当する波長域においてほぼ 1.0 とみなすことができる。測定された  $U$ 、 $E(z)$  及び  $H$  を用いて、(1)、(3)により分光反射率  $R$ 、 $R_w$  を求め、分光反射率と水質との関係について調べた。

表1には一例として、1980年8月13日に霞ヶ浦湖面上14点において測定された水質(クロロフィル  $a$ 、透明度、SS)と分光反射率(11波長における  $R$  及び  $R_w$ )の間の相関係数を示した。(なお、表中下線は  $t$  検定(95%)により「相関なし」が棄却されることを示す。)表1において、霞ヶ浦湖水の最大透過率に近い波長である  $\lambda=540\text{nm}$  及びクロロフィル  $a$  のけい光帯である  $\lambda=694\text{nm}$  において分光反射率と水質の間に相関が認められる。また一般に相関係数は  $R$  に対する方が  $R_w$  に対するものよりも低く、これは  $R$  に水面反射光による影響が雑音として加わるためと考えられる((1)、(2)、(3)式参照)。表2にはさらに、各水質項目と、分光反射率の和と差の比の相関係数を示した。 $R$  及び  $R_w$  いずれの場合にも高い相関係数を示し、水質と分光特性の間に相関が認められた。これらの結果は、水面からの光が水中の物質に関する情報を有していることを示し、上空からの水質の遠隔計測の可能性を示すものと考えられる。

### 3 回帰分析による水質推定モデルの開発

前節において、水の分光特性が水中の物質の組成、量などを反映することを示した。しかしながら、航空機や人工衛星に搭載されたMSSによって検知される光には、水中からの光に加えて、水面からの反射光や大気からの散乱光が雑音として含まれるため、これから水質を定量することは容易ではない。上空で得られた遠隔計測データ(例えば、MSS画像の画像濃度  $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_m)$ )

表 1 水質(クロロフィル $a$ , 透明度, SS)と水面における分光反射率  $R$  及び  $R_w$  の相関係数Table 1 Correlation coefficients between water quality parameters and radiance reflectance  $R$  and  $R_w$ 

波長 (nm)	410	442 (441)	488	520	540	570	590 (589)	626 (625)	656	672 (671)	694
[Chl. $a$ ]											
$R$	-0.190	-0.245	-0.026	0.201	0.387	0.211	0.072	0.015	0.061	0.100	0.389
$R_w$	-0.491	-0.487	-0.184	0.376	<u>0.606</u>	0.146	0.003	-0.021	0.228	0.267	<u>0.594</u>
ln [Chl. $a$ ]											
$R$	-0.162	-0.201	0.043	0.282	0.467	0.314	0.157	0.103	0.134	0.166	0.480
$R_w$	-0.388	-0.454	-0.101	0.475	<u>0.683</u>	0.150	0.147	0.114	0.360	0.344	<u>0.693</u>
[ $D_z$ ]											
$R$	0.061	0.084	-0.162	-0.375	<u>-0.542</u>	-0.394	-0.266	-0.216	-0.287	-0.320	<u>-0.570</u>
$R_w$	0.365	0.379	0.035	<u>-0.560</u>	<u>-0.716</u>	-0.202	-0.236	-0.243	-0.469	-0.484	<u>-0.781</u>
ln [ $D_z$ ]											
$R$	0.107	0.139	-0.098	-0.309	-0.483	-0.323	-0.197	-0.145	-0.219	-0.260	-0.500
$R_w$	0.416	0.389	0.072	<u>-0.514</u>	<u>-0.687</u>	-0.207	-0.163	-0.169	-0.404	-0.445	<u>-0.736</u>
[SS]											
$R$	-0.110	-0.145	0.088	0.303	0.477	0.301	0.171	0.127	0.207	0.238	0.497
$R_w$	-0.445	-0.410	-0.100	0.471	<u>0.658</u>	0.102	0.122	0.129	0.363	0.419	<u>0.707</u>
ln [SS]											
$R$	-0.053	-0.076	0.167	0.382	<u>0.548</u>	0.388	0.255	0.217	0.290	0.314	<u>0.577</u>
$R_w$	-0.389	-0.400	-0.055	<u>0.532</u>	<u>0.699</u>	0.170	0.218	0.225	0.447	0.473	<u>0.700</u>

(注1) 表中下線部は t 検定 (95%) による「相関なし」が棄却されることを示す。

表 2 水質と分光反射率の和と差の比の相関係数

Table 2 Correlation coefficients between water quality parameters and ratio of difference and summation of radiance reflectance at different wave length

	$\frac{R(488) - R(540)}{R(488) + R(540)}$	$\frac{R_w(488) - R_w(540)}{R_w(488) + R_w(540)}$	$\frac{R(442) - R(694)}{R(442) + R(694)}$	$\frac{R_w(442) - R_w(694)}{R_w(442) + R_w(694)}$
[Chl. $a$ ]	<u>-0.783</u>	<u>-0.783</u>	<u>-0.808</u>	<u>-0.741</u>
ln [Chl. $a$ ]	<u>-0.787</u>	<u>-0.814</u>	<u>-0.851</u>	<u>-0.809</u>
[ $D_z$ ]	<u>0.682</u>	<u>0.795</u>	<u>0.836</u>	<u>0.825</u>
ln [ $D_z$ ]	<u>0.706</u>	<u>0.779</u>	<u>0.823</u>	<u>0.782</u>
[SS]	<u>-0.721</u>	<u>-0.770</u>	<u>-0.829</u>	<u>-0.773</u>
ln [SS]	<u>-0.692</u>	<u>-0.792</u>	<u>-0.848</u>	<u>-0.827</u>

(注1) 表中下線部は t 検定 (95%) により「相関なし」が棄却されることを示す。

( $m$  は波長帯域数) から水質 ( $y$ ) を推定するためには, 両者の関係

$$y = f(d) \quad (8)$$

を近似的にはあっても定量的に推定しなければならない。

一般に、(8)式を同定する方法は、物理的方法と統計的方法に分類される。前者では、水中の物質組成や量と分光特性の関係、また大気散乱光や水面反射光などによる影響を物理光学的な理論モデルを用いて記述する<sup>8)</sup>。しかしながら理論モデルでは、モデルに含まれるパラメーターの値の設定が難しい、モデルが複雑になる程解くことが難しくなる、などの問題点がある。また水質組成、大気組成が複雑になると、これを理論モデルで記述することが難しくなる。

一方、統計的方法では、遠隔計測データと実際に水面上で測定したデータを用いて、両者の間の関係を統計的にモデル化するもので、通常、回帰モデルなどが使用される。この方法では、水質推定モデルを作成するごとに常に実測データを収集しなければならない、という欠点があるが、処理が簡単であり、実験の繰り返しによってある程度安定した推定モデルが得られる、などの利点もあり、水質分布図の作成には有効と考えられる。本研究では、霞ヶ浦を対象として、航空機及び人工衛星によるマルチスペクトル画像データ (MSS 画像データ) の収集及び水面における実測データの収集を行い、両データを統計的に解析することにより、(8)式を推定することを試みた<sup>2)</sup>。

湖上観測点  $i$  における水質の値 (濃度) を  $y_i$ 、MSS 画像中で観測点  $i$  に対応する点の濃度レベルを  $(d_1, d_2, \dots, d_m)$  とする。各観測点における水質濃度  $y$  (及びその対数  $y' = \log y$ ) と  $\{d\}$  に対して、

$$\left. \begin{array}{l} \text{(i)} \quad y = \alpha d_j + \beta \quad (\text{単回帰モデル}) \\ \text{(ii)} \quad y = \sum_{j=1}^k \alpha_j d_j \quad (\text{重回帰モデル}) \\ \text{(iii)} \quad y = \alpha (d_j / d_{j'}) + \beta \quad (\text{チャンネル間の比モデル}) \\ \text{(iv)} \quad y = \alpha (d_j - d_{j'}) / (d_j + d_{j'}) + \beta \quad (\text{チャンネル間の和と差の比モデル}) \end{array} \right\} (9)$$

などの回帰式を仮定し、収集された画像データ及び実測データから回帰式の算定を行った。

表3には、霞ヶ浦において過去5年間に得られたデータをもとに算出された水質項目とLANDSAT MSS データとの間の相関係数を示す ((9)-(i)式を使用)。表3において、SS及び透明度はLANDSAT MSS 画像との間に高い相関を示し、遠隔計測データから水質推定の可能性が示された。しかしながらクロロフィル  $a$  については有意な相関は得られなかった。

1980年8月13日の一例については高い相関係数が得られているが、これは、アオコの大量発生のためにクロロフィルがSSと高い相関を有し、SSを介して間接的に高い相関を示したものと考えられる。この傾向は他の回帰式の場合においても同様であった。

一方、表4にはクロロフィル  $a$  濃度の対数と航空機MSSデータとの相関係数を示した ((9)-(i)式を使用)。表4において、クロロフィル  $a$  のスペクトル吸収帯に対応するチャンネル7とクロロフィル  $a$  濃度が負の相関を示し、航空機によるクロロフィル  $a$  の遠隔計測の可能性が示された。航空機によるデータがクロロフィル  $a$  と相関を有するにもかかわらず、LANDSATデータでは相関が得られなかった原因として、

- (i) 高度の違いによる大気効果の影響

表 3 水質とLANDSAT MSSデータの相関係数

Table 3 Correlation coefficients between water quality parameters and LANDSAT MSS image densities

実験日	1979/2/20			1979/12/14			1980/1/19			1980/2/6		
バンド	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
透明度	-0.93	-0.94	-0.95	-0.00	-0.19	-0.53	-0.39	-0.64	-0.90	-0.30	-0.13	-0.71
SS	0.91	0.89	0.90	0.18	0.18	0.23	-0.17	0.33	0.49	-0.01	0.01	0.04
クロロフィル-a	-0.10	-0.15	-0.06	-0.52	-0.47	-0.04	-0.21	0.08	0.59	-0.24	-0.40	-0.12
COD	-0.14	-0.42	-0.42	-	-	-	-	-	-	-0.57	-0.54	-0.31
水質調査地点数	15			10			10			16		
ランドサット	2号			3号			3号			3号		
実験日	1980/8/13			1980/12/17			1981/1/22					
バンド	4	5	6	4	5	6	4	5	6			
透明度	-0.86	-0.88	-0.95	-0.40	-0.60	-0.71	-0.42	-0.64	-0.44			
SS	0.77	0.81	0.95	0.70	0.72	0.74	0.39	0.61	-0.41			
クロロフィル-a	0.72	0.72	0.90	-0.07	-0.12	-0.19	0.27	0.42	0.30			
COD	-	-	-	0.12	-0.01	0.31	-0.19	0.33	0.38			
水質調査地点数	22			22			15					
ランドサット	2号			2号			2号					

## (ii) MSSにおける各波長帯域の違い

が考えられる。特に後者に関しては、航空機搭載のMSSにおける各チャンネルの帯域幅が $0.02\sim 0.05\mu\text{m}$ であるのに対し、LANDSAT搭載のMSSでは $0.1\mu\text{m}$ と広く、このためクロロフィルaの狭いスペクトル吸収帯域に対する検出感度が低下するものと考えられる。

## 4 大気散乱光による影響の評価

3節において示したように、人工衛星等に搭載されたセンサーに検知される光エネルギーには、大気からの散乱光や水面からの反射光が雑音として含まれるために、MSSデータから水質を定量的に計測することは容易ではない。特に大気からの散乱光（光路輝度）は、水域において、人工衛星の検出器に検知される全エネルギーの80%程度を占めると推定され<sup>9)</sup>、その影響は極めて大きい。このために、例えば3節において示されたように、各水質項目と遠隔計測データとの間に強い相関関係が認められる場合でも、その回帰係数は季節や水域によって異なり、必ずしも安定した推定モデルとはならない。

本研究では、遠隔計測による水質推定に及ぼす大気の影響を評価するために、LANDSAT MSSデータから得られる放射輝度と、LANDSAT MSSの撮影に同期して水面直上において計測した分光放射輝度との回帰分析を行い、大気の透過率及び光路輝度を推定した<sup>3)</sup>。

LANDSAT MSSにより検知される光の輝度エネルギー（LANDSAT輝度） $L$ は、水面直上

表 4 クロロフィル a 濃度と航空機 MSS データとの相関係数

Table 4 Correlation coefficients between chlorophyll-a concentration and airborne MSS image densities

実験日		1976 8/23	1976 12/6	1978 8/23		1979 2/18			1979 2/20	1980 12/13
飛行高度 (m)		1000	2000	1000	2000	1000	2000	3000	4000	1500
チャンネル	2	-0.12		-0.78	-0.33	-0.64	-0.70	-0.70	0.01	-0.85
	3		-0.77			-0.57	-0.65	-0.79	-0.25	-0.90
	5	0.35	-0.82	0.24	0.48	-0.59	-0.65	-0.77	-0.20	-0.94
	7	0.55	-0.82	-0.86	-0.78	-0.63	-0.80	-0.77	-0.75	-0.94
	9	0.54	-0.64	-0.68	-0.71	-0.23	0.36	-0.16	-0.64	-0.85
水質調査地点数		11	9	13	13	12	13	13	10	11
スキャナ		M <sup>2</sup> S	M <sup>2</sup> S	MSS-BG-1 B		MSS-BG-1 B			DS-1250	M <sup>2</sup> S
備考		視界悪し		アオコが多い		強風			ランドサットと同期	強風

(注1) 表中下線部は t 検定 (95%) による「相関なし」が棄却されることを示す。

(注2) 各チャンネルの波長帯域はMSS-BG-1Bにおいて、  
 2 (0.43~0.45 $\mu$ m), 3 (0.45~0.50), 5 (0.55~0.60), 7 (0.65~0.69), 9 (0.80~0.89)  
 M<sup>2</sup>S, DS-1250において、  
 2 (0.42~0.45 $\mu$ m), 3 (0.45~0.50), 5 (0.55~0.60), 7 (0.65~0.69), 9 (0.80~0.89)である。ただし  
 1980年12月13日のM<sup>2</sup>Sでは、  
 2 (0.40~0.45 $\mu$ m), 3 (0.49~0.54), 5 (0.62~0.66), 7 (0.66~0.70), 9 (0.70~0.74)である。

での上方向放射輝度  $U$ , 大気の光路輝度  $P$  を用いて,

$$L = \tau \cdot U + P \tag{10}$$

により表される (図2)。ここで  $\tau$  は大気の透過率を示す。いま, LANDSAT MSS 画像 (バンド  $j$  とする) 上で, 測定点  $i$  に対応する点の LANDSAT 輝度を  $L_i^j$ , CCT カウント値 (画像濃度)  $N_i^j$  とすると,  $L_i^j$  は  $N_i^j$  から,

$$L_i^j = (L_{\max}^j - L_{\min}^j) \times N_i^j / 127 + L_{\min}^j \tag{11}$$

により計算される。ここで  $L_{\max}^j, L_{\min}^j$  は MSS 各バンドにおける検出器の感度パラメーターで, CCT カウントがそれぞれ 0 及び 127 に対応するときの輝度である<sup>10)</sup>。

ここでは, 計算された LANDSAT 輝度  $L_i^j$  と水面上で測定された上方向放射輝度  $U_i^j$  との回帰分析を行い, 大気の光路輝度及び透過率を推定した。水面での測定は, LANDSAT MSS による撮影時刻と必ずしも一致しないため, 両データを比較するためには, 水面で測定された放射輝度  $U_i^j$  を測定時刻の違い (太陽照度の違い) によって補正しなければならない。ここでは, 各測定点において測定した白色標準反射板 (2 節参照) の放射輝度  $W_i^j$  を用いて放射輝度の補正を行った。すなわち, 測定点  $i$  における放射輝度として,

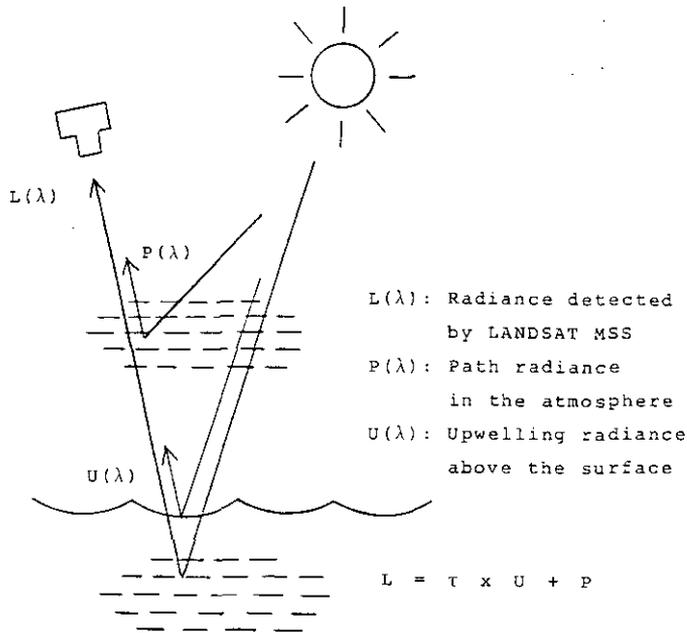


図 2 水質の遠隔計測における光学系の概略図

Fig. 2 Schematic diagram of optical system in remote sensing of water quality

$$\tilde{U}_i = U_i \times W_i / W_i \quad (12)$$

により補正した値を用いた。ここで  $W_i$  は LANDSAT MSS とほぼ同時刻に測定された測定点  $i$  における白色標準反射板の放射輝度である。すなわち  $\tilde{U}_i$  は、実験時間内で大気及び水域の条件が変化しない ( $\tau$ ,  $P$ ,  $R=U/H$  が変わらない) との仮定のもとで、LANDSAT 通過時刻における測定点  $i$  での水面における放射輝度の推定値と考えることができる。

得られた  $\{L_i\}$  と  $\{\tilde{U}_i\}$  の相関解析を行い、回帰式

$$L = a \cdot U + b \quad (13)$$

を決定した。(10)及び(13)式より、透過率  $\tau$  及び光路輝度  $P$  は、それぞれ、

$$\tau = a, P = b \quad (14)$$

により与えられる。図3に LANDSAT 輝度と水面直上の放射輝度  $U$  との回帰式の一例を示す。図3は、1981年11月24日及び1982年3月3日に霞ヶ浦において得られたデータを基に算出された LANDSAT 輝度(バンド5)  $L$  と放射輝度  $U$  の回帰式であって、 $L$  と  $U$  との間に良い線形性が認められる。また表5には、回帰式から推定された透過率及び光路輝度の推定値(95%の信

頼区間)を示す。透過率については一般に予想される値よりもやや高いが、光路輝度については Rogersら<sup>11)</sup>により測定された値とも概ね一致している。

得られた大気の透過率及び光路輝度を用いて、水面直上における各点の分光反射率  $R$  は、(1)、(7)、(10)より、

$$R = \frac{\rho(L-P)}{r \cdot \pi \cdot W} \tag{15}$$

により求められる。ここでは各測定点における水質の値  $\{y_i\}$  と分光反射率  $\{R_i\}$  に対して、3節(9)式と同様に回帰分析を行い、大気補正の効果が回帰式に及ぼす影響を調べた。一例として SS 濃度と LANDSAT バンド 5 データの回帰式を図 4 に示す。図 4(a)は、SS 濃度と LANDSAT 輝度  $L$  (大気補正前) の回帰式を、図 4(b)は SS 濃度と LANDSAT 輝度から推定された分光反射率  $R$  の回帰式を示す。図 4 に示されるように、透過率、光路輝度による補正を行った後は、異なる時期 (大気状況) における回帰式が一致する傾向がみられる。これは大気による影響の補

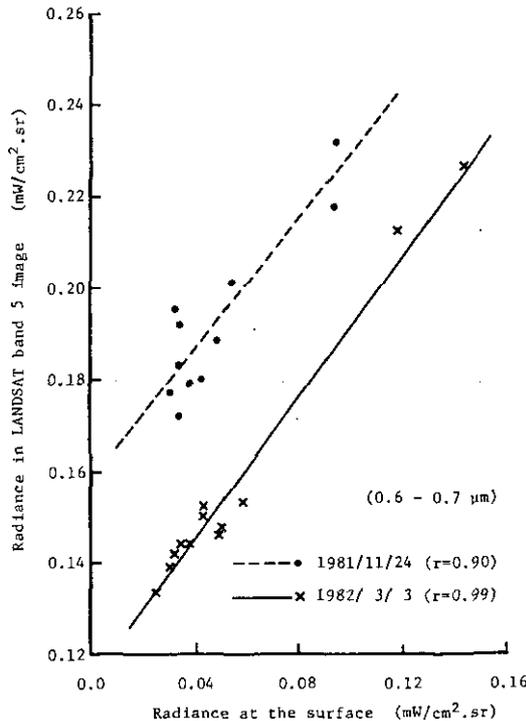


図 3 LANDSAT 輝度 ( $L$ ) と水面における上方向放射輝度 ( $U$ ) との回帰式 (バンド 5:  $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ )

Fig. 3 Relation between radiance in LANDSAT MSS image ( $L$ ) and upwelling radiance above water surface ( $U$ ) (band 5)

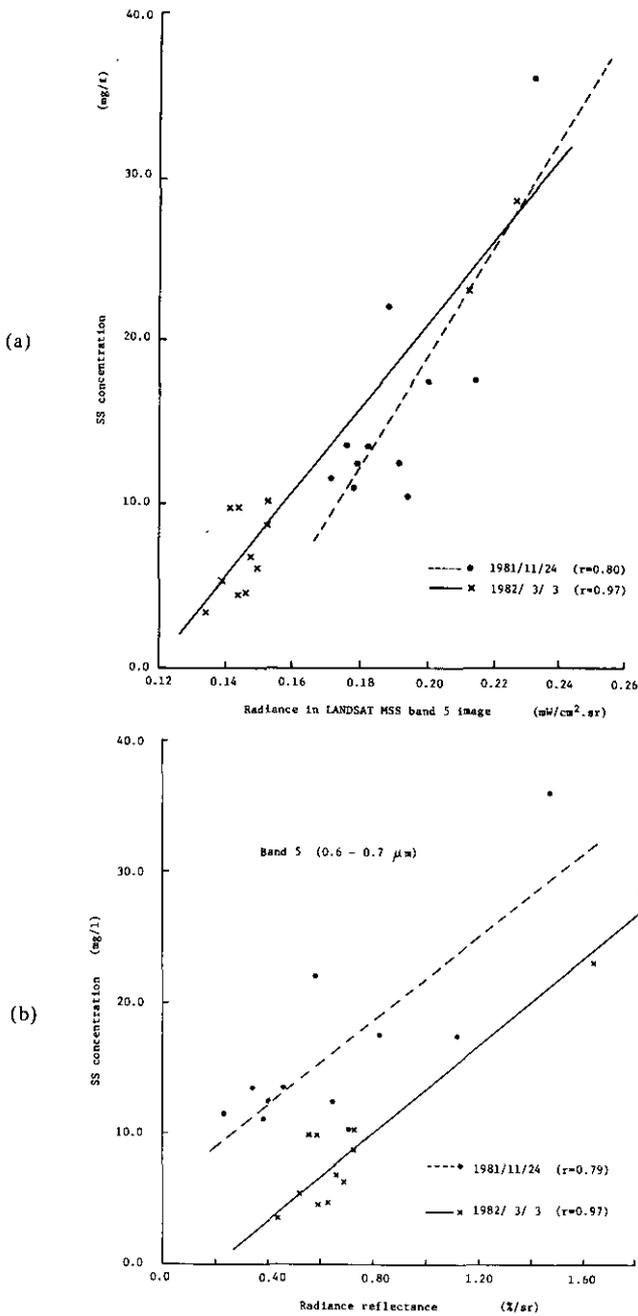


図 4 水質項目 (SS) と LANDSAT MSS データ (バンド 5) の回帰式  
 (a) SS と LANDSAT 輝度 ( $L$ ) の回帰式 (b) SS と分光反射率 ( $R$ ) の回帰式

Fig. 4 Relation between SS concentration and LANDSAT MSS band 5 image  
 (a) Relation between SS and radiance in LANDSAT MSS band 5 image  
 (b) Relation between SS and radiance reflectance estimated LANDSAT MSS band 5 image

表 5 大気の透過率及び光路輝度の推定値

Table 5 Estimated atmospheric transmittance and path radiance

Coef.	1981 / 11 / 24		1982 / 3 / 3	
	a	b (mW/cm <sup>2</sup> ·sr)	a	b (mW/cm <sup>2</sup> ·sr)
4	0.77(±0.27)	0.26(±0.02)	0.86(±0.10)	0.26(±0.01)
5	0.72(±0.26)	0.16(±0.01)	0.78(±0.08)	0.11(±0.01)
6	1.17(±0.56)	0.10(±0.01)	1.01(±0.21)	0.06(±0.01)

正を行うことにより、場所、時期によらない安定な水質推定モデル構成の可能性を示すものと考えられる。図4(b)の回帰式から推定された霞ヶ浦全域のSS濃度分布を図5に示した。図5(a), (b)はそれぞれ11月24日, 3月3日の推定分布図であり, (a)ではSS濃度10~30 mg/lを, (b)では0~20 mg/lを10レベルで濃淡表示した。

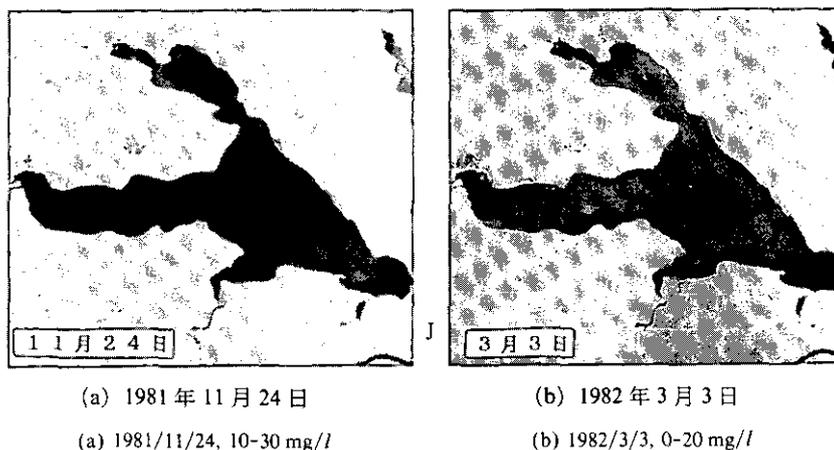


図 5 LANDSAT MSS データ(バンド 5)より推定された霞ヶ浦における SS の分布図

Fig. 5 Estimated distribution of SS concentration from LANDSAT MSS band 5 image

### 5 水面反射光の影響の評価

遠隔計測による水質の定量においては、大気散乱光による影響に加えて、水面反射光による影響も無視できない。本研究では、水質の遠隔計測における水面反射光の影響を評価することを目的として、水面直上及び水面下で測定された上方向の分光反射輝度の回帰分析を行い、水面反射光の定量化を行った<sup>4)</sup>。

水面直上における上方向分光反射輝度  $U$  は, (2), (4)式により, 水面直下の上方向放射輝度  $U_0^{\uparrow}$

を用いて,

$$U = \frac{t}{n^2} U_w^0 + U_s \quad (16)$$

により表される (図 1)。 $U_w^0$  は直接測定することは困難であるが、水面下 ( $z$ m) における上方向放射照度  $E(z)$  を用いて,

$$U_w^0 = \frac{t}{n^2} \frac{1}{\pi} E(z) \cdot \exp(k \cdot z) \quad (17)$$

により推定される ((4), (5), (6) 式)。ここでは、水面直上で実測した  $U$  と、水中において測定された  $E(z)$  から推定された  $U_w^0$  との回帰分析を行い、水面反射光  $U_s$  を評価することを試みた。なお、(i) 水面反射光は全水域において一様であり、(ii) 太陽の直接反射光による直上方向への影響はないと仮定した。また、消散係数  $k$  は各測定点での湖水の吸収係数  $a$  から  $k=1.2a$  により推定した<sup>12)</sup>。

各測定点で得られた  $\{U\}$  及び  $\{U_w^0\}$  の回帰式を

$$U = \alpha U_w^0 + \beta \quad (18)$$

とすると、(16), (18) 式より  $\alpha$  及び  $\beta$  は  $t/n^2$  及び  $U_s$  の推定値となる。ここでは、4 節と同様に、1981 年 11 月 24 日、1982 年 3 月 3 日に霞ヶ浦において得られたデータの解析を行い、水面反射光の推定を行った。回帰分析は、水上で測定した分光反射輝度スペクトルのうち、 $\lambda=420, 480, 550, 600, 670$  及び  $710\text{nm}$  の 7 波長について行った。図 6 には、一例として、 $\lambda=520\text{nm}$  における  $U$  及び  $U_w^0$  の回帰式を示す。回帰式の相関係数は全波長について  $\lambda=0.93\sim 0.99$  の高い値を示した。図 7 及び図 8 には、回帰分析により推定された  $t/n^2 (= \alpha)$  及び水面反射光  $U (= \beta)$  の波長特性を示す。

図 7 において、 $t/n^2$  が理論値 0.544 (2 節参照) よりやや高くなるのは、消散係数  $k$  の波長依存性が強く、特に短い波長域において  $k=1.2a$  に当てはまらないためと思われる。一方、図 8 において、水面反射光は短波長側で強く、長波長側では小さくなることが示されている。表 6 には、水面反射光による相対的な影響を見るために、水面直上における上方向放射輝度に占める水面反射光の割合  $U_s/U$  を示した。水面反射光の推定量 (図 8) と同様、短波長域において水面反射光の影響が大きく、 $\lambda=440\text{nm}$  では、ほぼ 50% に達していることが示された。水質の遠隔計測においては大気散乱光のみならず水面反射光の影響の除去が不可欠と考えられる。

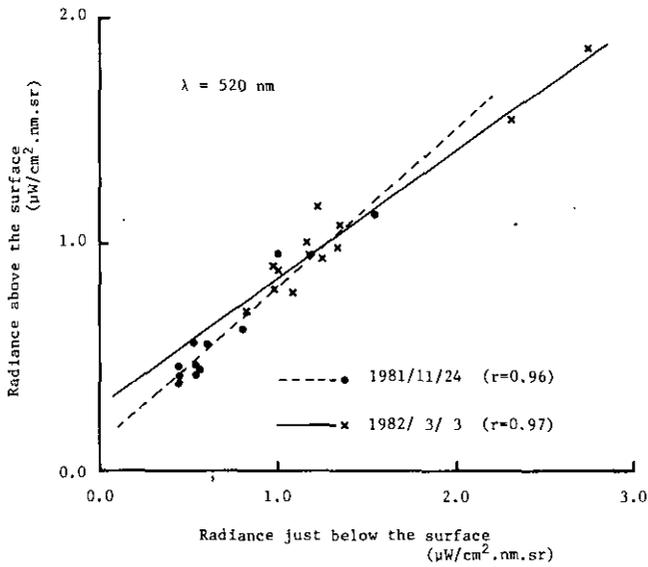


図 6 水面直上における上方向放射輝度 ( $U$ ) と水面直下における上方向放射輝度 ( $U_w^0$ ) との回帰式 ( $\lambda = 520 \text{ nm}$ )

Fig. 6 Relation between radiance just above the water surface ( $U$ ) and radiance just below the surface ( $U_w^0$ ) ( $\lambda = 520 \text{ nm}$ )

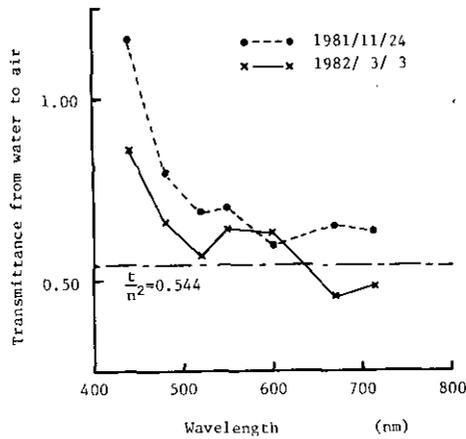


図 7 回帰分析により推定された  $t/n^2$  の波長特性

Fig. 7 Spectral characteristics of  $t/n^2$  estimated from regression analysis between radiance just above the water surface and radiance just below the surface

## 6 水質の違いによる水域の分割

水域における水質測定地点の適正配置, 流れや水質などのシミュレーションモデルの構成などにおいては, 水域を水質特性が一樣とみなせるいくつかのブロックに分割することが必要となる

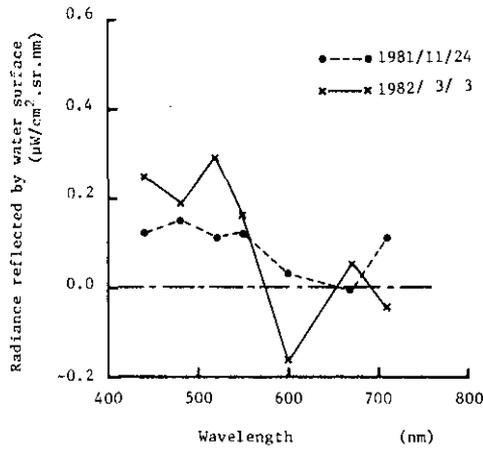


図 8 回帰分析により推定された水面反射光 ( $U_s$ ) の波長特性

Fig. 8 Spectral characteristics of reflected light at the water surface estimated from regression analysis between radiance just above the water surface and radiance just below the surface

表 6 水面直上における上方向放射輝度に占める水面反射光の割合 ( $U_s/U$ )

Table 6 Ratio between radiance of reflected light at the water surface and radiance just above the water surface

Wave-length	Date	
	1981 / 11 / 24	1982 / 3 / 3
440	0.417	0.448
480	0.392	0.290
520	0.221	0.301
550	0.237	0.168
600	0.051	-0.238
670	-0.032	0.177
710	0.243	-0.328

場合がある。しかしながら、従来からの点観測による調査では、広い範囲にわたる水域の水質特性を面的に計測することは困難であった。本研究では、LANDSAT MSS 画像データを利用して水域を水質特性の違いにより分割することを試みた<sup>3)</sup>。

まず湖上で実測された水質データを用いて、水質調査地点を水質特性の違いによりクラスター分類した。すなわち、水質測定地点  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) における水質項目  $Q_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) の濃度を  $y_k^i$  とする。各水質項目に対して濃度の平均値及び分散を、

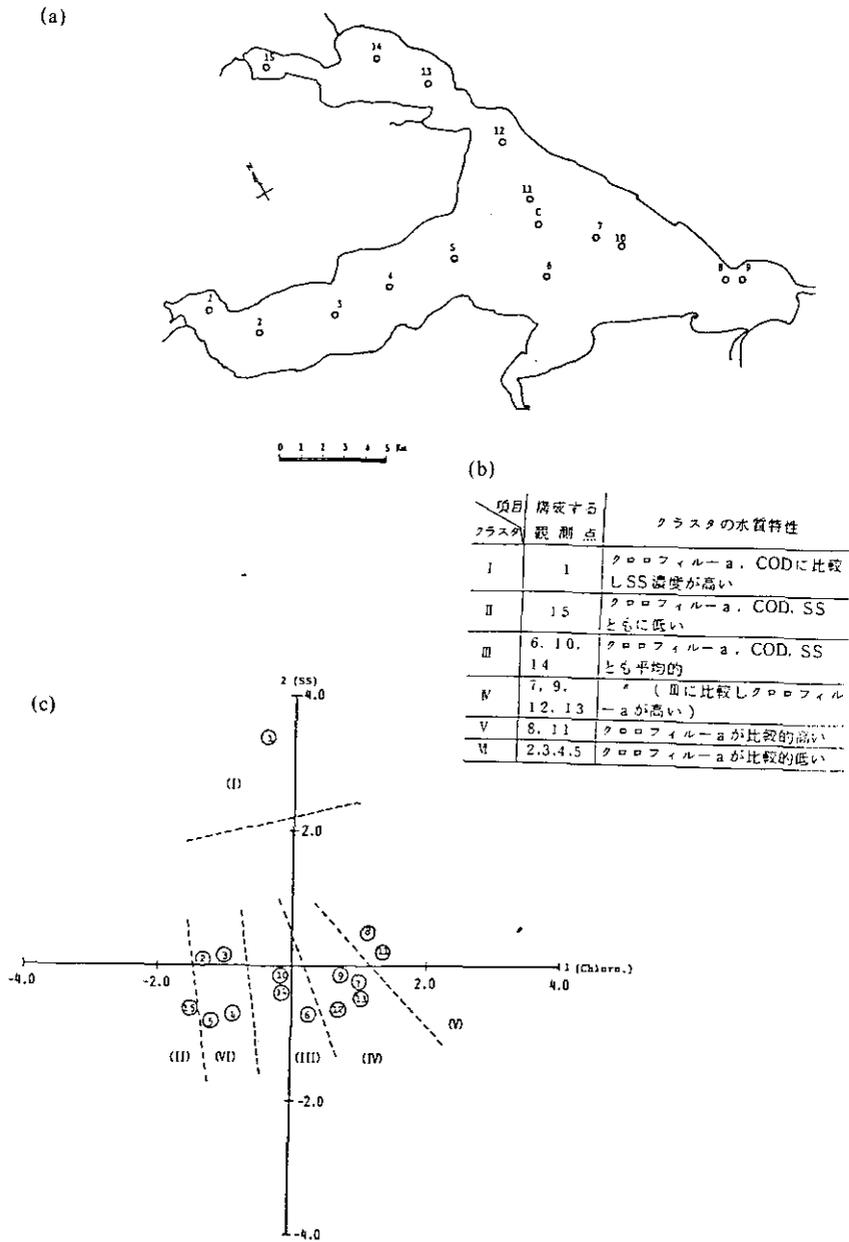


図 9 水質特性の違いによる水質調査地点のクラスター分析  
 (a) 測定地点の配置図 (b) 6 クラスターに分類した場合の各クラスターの水質特性  
 (c) 各クラスター間の距離 (クロロフィル-a 及び SS を変数とした平面内で表示)

Fig. 9 Cluster analysis of monitoring stations in terms of water quality characteristics  
 (a) Monitoring stations in Lake Kasumigaura (b) Water quality characteristics of each category (c) Distance between each cluster (chlorophyll-a and SS)

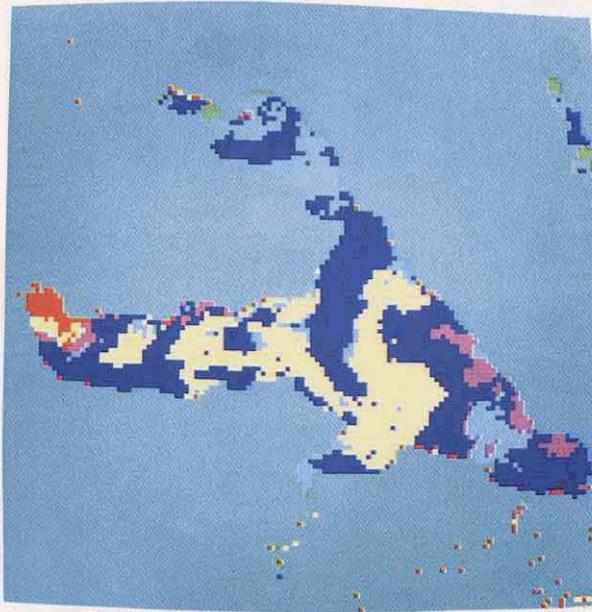


図 10 霞ヶ浦の水質特性の違いによる水質分割図 (6 クラスター)

Fig. 10 Classification of water quality characteristics in Lake Kasumigaura

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_k^i$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_k^i - m_k)^2 \quad (19)$$

とする。各測定地点間の距離を、水質特性の違いにより

$$d_{iir} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (z_k^i - z_k^i)^2} \quad (20)$$

ただし  $z_k^i = (y_k^i - m_k) / \sigma_k$

により定める。すなわち、(20)式で計算される距離が小さい測定点同士は、水質特性が類似していると考えられる。このためここでは、距離の近い測定点を組合せ、順次クラスターを構成した。

図9には、1979年2月20日霞ヶ浦において得られたデータを基にした水質調査地点のクラスター分類の例を示す。測定地点は15点、水質項目としては、クロロフィル *a*、SS、CODの3項目を選んだ。図9(a)は測定地点の配置を、(b)には6クラスターに分類した場合の各クラスターの水質特性を示す。また図9(c)には、各クラスター間の距離をクロロフィル *a* 及びSS濃度の変数空間内で示した。なお、5クラスターに分類した場合は、クラスターIIIとIVが統合され同一クラスターとなった。

次にLANDSAT MSSデータを利用して、水域を上記の6クラスターに分類した。すなわち、マルチスペクトル画像中の各点を、その画像濃度特性(4バンドの画像濃度  $d_1, d_2, d_3, d_4$ )により、その画像濃度特性が最も類似している測定点(画像中で測定点に対応する点)に判別分類し、さらに、クラスター分類により同一特性を有すると判定された測定点ごとに統合することにより、画像中の各点を6クラスターに分類した。

判別分類は最尤法により、画像中の各点(濃度ベクトルを  $\mathbf{d} = (d_1, d_2, d_3, d_4)$ )を、

$$g_i(\mathbf{d}) = -\frac{1}{2}(\mathbf{d} - \mu_i)' \Sigma_i^{-1}(\mathbf{d} - \mu_i) - \frac{1}{2} \log |\Sigma_i| \quad (21)$$

が最大となる *i* に属するよう決定した。ここで  $\mu_i$  及び  $\Sigma_i$  は測定点 *i* の近傍 7×7 画素の画像濃度の平均値ベクトル及び共分散行列である。

図10には、1979年2月20日のLANDSAT MSSデータを用いて、図9に示された6クラスターに分類された霞ヶ浦の分割図を示す。図10において、霞ヶ浦北部の水が北風によって中央部に流れ込む水流が明示されている。図10の例に示されるように、水域の定性的なパターン分類では、従来からの測定点における観測では得られない情報を得ることが可能であり、流況などの水域の大局的な水質分布パターンを知る上で有効と考えられる。

## 7 まとめ

遠隔計測による水質推定を目的として、水質定量のための統計モデルの作成、モデルの作成に及ぼす大気散乱光及び水面反射光の影響について検討を行った。この結果、SS、透明度についてはLANDSAT MSSデータと高い相関を有し、水質推定の可能性が示された。またクロロフィル $a$ については航空機MSSデータと相関を有し、水質推定の可能性が示されたものの、LANDSATデータとは有意な相関は得られなかった。これはLANDSATが高々度であるため大気による影響を受けやすく、またLANDSAT MSSの波長帯域がクロロフィル $a$ のスペクトル特性に比較して広いため、その吸収特性を検出できないためと考えられる。

また、水域の遠隔計測においては、大気、水面による影響が極めて強く、場所、時期によらない安定した水質推定モデルを構成するためには、これらの影響の補正が不可欠であることが示された。本研究で提案された大気の透過率、光路輝度、水面反射光の推定にはグラントルースデータとして、常に、水面分光放射輝度の測定が必要であり、必ずしも実用的とはいえない。また大気水面の状態が場所により変更する場合には良好な結果が得られない。今後、より実用的な大気、水面による影響の補正手法が必要となるであろう。

なお本研究ではデータ収集、討論を通じて、理化学研究所、岡見登氏、岸野元彰氏、杉原滋彦氏の御協力を得た。各位に深く感謝する次第である。また本研究は一部、科学技術庁振興調整費「リモートセンシング技術の利用実証に関する研究」及び文部省科学研究費環境科学特別研究「遠隔計測による環境情報の解析・評価に関する研究」との協同により行われた。

## 引用文献

- 1) 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国 (1982): 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質. 日本リモートセンシング学会誌, 2(1), 21-31.
- 2) 宮崎忠国 (1982): 環境汚染の遠隔計測手法の開発—水域の水質計測. 国立公害研究所発表会予稿集 (昭和57年度), 199-218.
- 3) 安岡善文・宮崎忠国 (1982): 遠隔計測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(3), 51-62.
- 4) 安岡善文・宮崎忠国 (1982): 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—. 第2回リモートセンシング学会学術講演会論文集, 13-14.
- 5) 安岡善文・宮崎忠国 (1979): 遠隔計測による水質特性の計測と分類. 第18回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 733-734.
- 6) 宮崎忠国・清水 浩・安岡善文 (1984): 高速ラジオスペクトルメータの開発. 国立公害研究所研究報告, 第77号, 183-198.
- 7) Grum, F. and G. W. Lucky (1968): Optical sphere paint and a working standard reflectance. Appl. Opt. 7(11), 2289-2294.
- 8) McCluney, W. R. (1976): Remote measurement of water color. Remote Sensing Environ. 5, 3-33.

- 9) Gordon, H. R. (1978): Removal of atmospheric effect from satellite imagery of the oceans. *Appl. Opt.*, **17**(10), 1631-1636.
- 10) U. S. Geological Survey (1979): *LANDSAT Data Users Handbook*. U. S. G. S, pp. 1-11 10-1.
- 11) Rogers, R. H., K. Peacock and N. Navinchanara (1974): Techniques for collecting ERTS data for solar and atmospheric effects. 3rd ERT-1 Symposium, vol. 1, Tech. Sec(B), 1878-1904.

II-10

高速ラジオスペクトロメータの開発

Development of High-speed Spectroradiometer

宮崎忠国<sup>1</sup>・清水 浩<sup>2</sup>・安岡善文<sup>1</sup>

Tadakuni MIYAZAKI<sup>1</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>2</sup>  
and Yoshifumi YASUOKA<sup>1</sup>

要 旨

人工衛星や航空機を利用したリモートセンシングのグラントルース用高速ラジオスペクトロメータの開発を行った。本装置は分光部にグレーティングを、光検知部にPMTを使用し、波長分解能2nmで、400nmから850nmの波長範囲を1秒間で測定する高速ラジオスペクトロメータである。本装置の操作はマイクロコンピュータにより制御され、測定されたデータは積算・平均処理後、絶対輝度値変換のための補正を行い、カセット磁気テープに記録される。

実験室内での各種物体の分光反射スペクトルの測定や、フィールドにおいて、リモートセンシング実験のグラントルースデータとしての分光反射スペクトルデータの収集等に本装置を使用した結果、本装置の有効性が示された。特に変化の速い水域での分光反射スペクトルデータの収集に威力を示すことがわかった。

Abstract

A portable highspeed spectroradiometer, specifically designed for measuring spectral reflectance of the ground objects in remote sensing is described. The instrument employs diffraction grating and photomultiplier for light detecting system and operate the 400-850nm wavelength with the resolution of 2nm. The operation of the instrument is interactively controlled by built-in micro processor and data measured are stored on digital magnetic cassette tape to simplify computer data processing. The instrument has intrinsic advantage

- 
1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
  2. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

of portability and speed of operation that make instrument particularly suitable for ground truth work in areas of fast moving surface conditions. Some examples of the practical use of the instrument for measuring spectral reflectance of polluted water surface in a lake are also presented.

## 1 はじめに

地球を取り巻く大気、水、陸の状態を巨視的な形でとらえるための手段として、リモートセンシングの研究が始められて久しい。リモートセンシング技術は、電磁波や音波等を利用して、遠方にある対象物の状態を非接触で計測する技術である。この技術は、広範囲な対象物を人手をかけず、短時間に測定できるため、環境状態を研究するための実用的手段として期待されている。

リモートセンシング技術は、測定のエネルギー源として自然界のものを利用するか人工のものを利用するかの違いによって、パッシブ方式とアクティブ方式に分類される。また使用するエネルギーの種類としては、可視光赤外線、マイクロ波、可聴音波、超音波等がある。これらのエネルギーを対象物によってうまく使い分け、対象物の形状、性質、量などの計測を行う。

筆者らは、水質汚濁や植生等の環境要素を定性的、定量的に把握する目的で、可視及び近赤外線の太陽光を使用するパッシブリモートセンシング技術についての研究を続けてきた<sup>1-3)</sup>。この技術を完成するためには、高性能のリモートセンサーやデータ処理手法の開発はもとより、リモートセンサーにより得られるデータと測定対象物の性状とを関連付けるための基礎的研究も重要である。

この基礎的研究では、対象物による光の反射、吸収、散乱等の光学的性質と汚染状況などの対象の性状との密接な関係を見いだすことと、こうして得られた微視的な関係をさらにリモートセンシングによる巨視的な関係と結び付ける実験的研究が最も重要である。

そのための有効な実験装置として、野外での使用が可能な分光測光装置が必要となる。従来この種の目的で使用されていた装置は数種類存在するが、いずれも性能上あるいは機能上の欠点が多く、リモートセンシングの基礎実験に使用するには十分でなかった。このため、筆者らは、このような分光装置に要求される機能、性能を検討し、新たな装置を開発した。ここでは装置の概要及びいくつかの測定例について述べる。

## 2 高速ラジオスペクトロメータの概要

野外での使用も可能なラジオスペクトロメータは、室内実験に使用されている装置に要求される機能に付け加え、幾つかの点で特に注意して設計を行う必要がある。一般のスペクトロメータにおいては、使用目的に応じて、分光装置部では、波長分解能、迷光、測定波長範囲、集光レンズの明るさ及び分光器の透過率などを考慮に入れて設計を行い、測光装置部については、光の強度のダイナミックレンジ、精度、感度がその対象となる。さらに野外で使用する装置については

さらに以下の要因が挙げられる。

- (1) 自然界の光の強度は一般に秒程度の時間で変化しているので、十分短時間に測定が完了可能であること。
- (2) 酷寒や酷暑の中での使用，船上，車上での測定もあることから，耐熱，耐水，耐震等の耐環境性に優れること。
- (3) 持ち運びを容易にするため，軽量，コンパクトであること。
- (4) 車上や船上などの機器操作の困難な場所での使用を可能にするため，操作が簡単であること。
- (5) あらゆる方向からの信号の測定を可能とするため，オプティカルファイバーを用いた受光アタッチメントの取り付けが可能であること。
- (6) 多種類の電源が使用可能であること。

## 2.1 高速ラジオスペクトロメータに要求される基本的性能

測定機器の設計において，同時には満足し得ない性能上の相反する要因が必ず存在する。分光測定の場合例えば，波長分解と測定時間の関係等である。したがって，設計する装置の目的をどこに置くかをあらかじめ設定する必要がある。

ここで述べる高速ラジオスペクトロメータの性能は次の点を基本とした。

- (1) 通常のリモートセンシングで使用されている装置の波長分解能は 30 nm から 100 nm であるが，本装置ではさらに一けた以上の高分解能とし，これにより，測定対象のわずかな光学的性質の違いを測定可能とする。ここでは波長分解能を 2 nm とする。
- (2) 測定波長範囲は可視部を重視し，全測定範囲を近紫外の 0.4  $\mu\text{m}$  から近赤外の 0.85  $\mu\text{m}$  までとする。
- (3) 測定時間は測定対象物の光学的状態が一定であると見なせる時間を 1 秒と仮定する。
- (4) 対象物の輝度が測定可能となるような光学系の構成とする。
- (5) 測定対象物は直接の太陽光と太陽光に照射されている地球上の物質とする。
- (6) 測定誤差は 5% 以下とする。
- (7) 使用温度条件は真夏の日陰と真冬の日中太陽が出ている状態での温度範囲として，35°C  $\sim$  0°C とする。
- (8) データの表示，記録は測定データを簡単にモニター可能とするため，CRT ディスプレイ出力と記録が容易なペンレコーダ出力，コンピュータで詳しい解析をするためのカセットテープ出力とする。
- (9) 電源はフィールドでの測定を可能とするため AC 100 V と DC 12 V とする。

## 2.2 分光及び測光装置

測光方法としては同時サンプル型と波長掃引型とがある。この両者の違いは、前者は検出器を多数用意し、分光された信号光すべてを同時に測定するもので、後者は1個の検出器を用い、波長を短時間のうちに掃引して測定を行うものである。両者の特徴としては、前者は信号光の無駄が無いために良質の検出器が存在すれば高感度の測定が可能であるが、現在市販されている検出器は必ずしも特性が優れているとは言えない。また後者では検出器に高性能の光検知素子の使用が可能であるという特徴を有す。しかし、波長範囲が $0.6\ \mu\text{m}$ で分解能が $2\ \text{nm}$ とすると、信号光のうち $1/300$ 程度しか有効に使用できないという欠点もある。

次に、分光に使用する分光素子には大きく分けて2種類存在する。一つはグレーティングを使用する分光器と、もう一つはフィルターである。このうち分光器は分解能が良いが形状が大きく、フィルターは形状は小さいが分解能が悪い。

検出器としては同時サンプル方式に使用可能な素子としてSIT (Silicon Intensified Target) ニュービコン、ヴィジコン、イメージセンサ等がある。このうちSITは高感度であるが、形状が大きく、ダイナミックレンジの広さ、素子自体の耐震性にも問題がある。さらに大きな欠点としては、 $1\ \mu\text{m}$ 付近の波長の光にはほとんど感度を示さない。波長掃引型ではPMT(光電子増倍管)と各種半導体検出器の使用が可能である。PMTは高感度であり、多くの特性、形状のものが市販されている。またダイナミックレンジも1けた以上あり通常の測定には問題がない。多少の問題点としては若干形状が大きいこと程度である。半導体検出器はPMTに比べて4けた以上の感度の悪いのが欠点である。

以上の結果から、分光素子としては分解能の点で分光器を選択せざるを得ない。測光方法と検出器を組み合わせた感度の比較では、SITを使用する同時サンプル型、PMTを使用する波長掃引型、半導体検出器を使用する波長掃引型の順で $1:1/300:1/(3\times 10^3)$ 程度の差がある。

形状、耐震等の比較では、半導体を使用する波長掃引型、PMTを使用する波長掃引型、SITを使用する同時サンプル型の順で良好である。

## 2.3 感度の評価

前節での検討結果から、本装置に採用の可能性のある方式には3種類存在することが明らかになった。ここでは、最も感度の良好なSITを使用する同時サンプル型について感度を計算しその評価を行った。

計算の前提として、図1に示す光学系を考える。すなわち、太陽光が測定対象物により反射を受け、それをオプティカルファイバーを介し集光レンズで受け分光器のスリットへ導く。分光された光はSITで受光されるという光学系である。計算の条件として次のように値を設定した。

(1) 波長： $\lambda = 0.8\ \mu\text{m}$

(2) 太陽光強度： $I = 1 \times 10^{-4}\ \text{Wcm}^{-2}\text{nm}^{-1}$

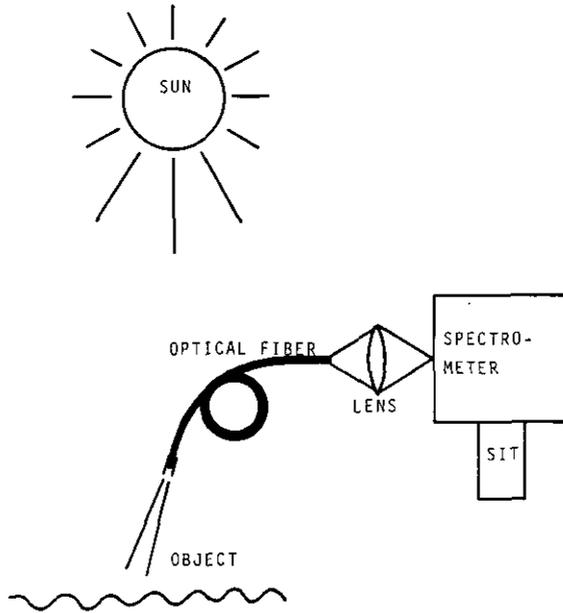


図 1 感度計算のための光学系

Fig. 1 Optics for sensitivity calculation

- (3) 対象物の反射率： $R=5 \times 10^{-2}$
- (4) 集光レンズの明るさ： $F=6$
- (5) 分光器のスリット面積： $S=0.04 \text{ cm}^2$  (高さ 0.5 cm, 幅 0.08 cm)
- (6) 分光器の分解能： $f=2 \text{ nm}$
- (7) 測定時間： $\tau=1 \text{ s}$
- (8) 分光器の透過率： $t_1=10^{-1}$
- (9) オプティカルファイバーの結合効率： $t_2=10^{-1}$
- (10) 検出器の量子効率： $\eta=10^{-2}$
- (11) 1 W 当たりの光子数： $n_0=4 \times 10^{18} \text{ W}^{-1}$
- (12) 誤差： $E=5\%$

これらの値を用いて、測定時間当たりに得られる信号量は次式で与えられる。

$$N = \frac{IRStt_1t_2\eta n_0}{2\pi F^2} = 7.08 \times 10^5$$

また、これより計算される誤差は、

$$E^* \approx \sqrt{\frac{2}{N}} = 1.68 \times 10^{-3}$$

となる。

この結果からわかるように、同時サンプル型の誤差は約 0.17% となり必要とする誤差 5% よりはるかに優れている。また PMT を使用する波長掃引型では 300 倍程度感度が低下すると考えると、 $E^* = 0.029$  となり、半導体検出器を使用する場合、 $E^* = 0.92$  となり、PMT を使用する波長掃引型でも感度は十分であると結論される。

以上の検討から、SIT には機能上の欠点が存在することを考慮すると、先に設定した性能を満たす方式として、PMT を使用する波長掃引型が最も優れていることが判明した。

## 2.4 分光器

測光方式と基本的に要求される性能から分光器の特性が決定される。まず、測定方式を波長掃引型とすることにより測定時間以内に波長の掃引を終了せねばならない制約がある。波長掃引は分光器のグレーティング等を回転あるいは振動させることにより行う。ここで回転させる方式は機能的には安定であるが測定のタイムロスが大きく、測定時間に対するロスタイムが 20 倍以上にもなる場合がある。それ故、振動方式をとらざるを得ない。そのため、振動部分の機械的精度には十分な配慮が必要である。なお、振動方式のロスタイムは測定時間とほぼ同程度である。また、振動させる対象はグレーティングが容易である。

次に、分光器の光学的性能と形状について検討する。まず、形状はフィールドで使用する機器であることから小型であることが必要である。そのため、シングルモノクロ形状をとらざるを得ない。また焦点距離も最大 30 cm 程度と考えられる。これら二つの条件の下に分光器の性能を決める要因としては、分解能、逆分散、明るさ、マウント方式がある。このうち分解能は 2.1 節で設定したように 2 nm が必要である。逆分散は必要な分解能を得るためのスリット幅を 0.8 nm 程度とすると、この値は 0.25 nm/mm 以上必要となる。また、明るさとマウント方式は迷光を取り除くために重要な要素であるが、分光器全体の形状を小型にして、なおかつ迷光を少なくするためには、明るさは少なくとも 6 程度必要であり、マウント方式としては軸はずし変型エバート型とするのが最良であると考えられる。

## 2.5 データ処理装置

野外で測定するための装置としての必須条件は測定が簡単でしかも得られたデータの扱いが容易であることである。本装置により得られるデータ量を計算してみると 1 秒間で完了する 1 回の測定で 225 波長のデータが得られるため、本装置を 10 分間動作させただけで  $1.35 \times 10^5$  データという膨大な量となる。したがってデータの収集、処理はコンピュータの助けを借りざるを得ない。

またコンピュータを使用すればデータの収集、処理、出力を自動的に行うことが可能になる。以上のことから本装置にはコンピュータを付属させることを考える。野外で使用可能なコンピュータとしてマイクロコンピュータがある。このマイクロコンピュータに持たせるべきハードウェアの機能として次のようなものが考えられる。

- (1) PMT からの出力を高速で A/D 変換し、その結果をインターフェースを通してメモリーに記録する。
- (2) 得られたデータに平均操作、規格化等の処置を施す。

表 1 高速ラジオスペクトロメータの仕様

Table 1 Specification of High-speed spectroradiometer

Light collecting system		
Method of light collection		Plane mirror and lens
Optical fiber		Glass made, 7mm
Diffraction grating		
Method of mounting system		Evert type
Focal length		300mm
Slit width		0.8mm
Reciprocal dispersion		1200 line/mm
F value		6
Method of driving system		Vibrating grating
Light detecting system		
PMT		S-20 side on type
Pre amplifier		
Range of frequency		DC-2kHz
Linearity		0.1%
Temperature stability		10 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
Out put power		$\pm$ 10V
A/D converter		
Resolution		12bit
Conversion time		10 $\mu$ s
Micro computer		
CPU		8080
Memory		Rom 1kw, Ram 4kw
Input device		Key board
Cassette tape unit		
Method of recording		PE system
Recording density		800 BPI
Speed of data exchange		12k bit/s
CRT display		
Screen size		5inch CRT
Number of character		24 $\times$ 80 characters
Density of screen		240 $\times$ 320 dots
Pen recorder		
A/D converter		12bit
Recording width		120mm

(3) CRT ディスプレー, コンピュータ, カセットテープに結果を出力する。

また, ソフトウェアとしてはデータの収集から出力までを自動的に行わせるためのプログラムの開発が必要である。

### 3 高速スペクトロメータの仕様

前節で検討した結果, 表 1 に示すように装置の仕様を定めた。また, 本装置は持ち運びの容易

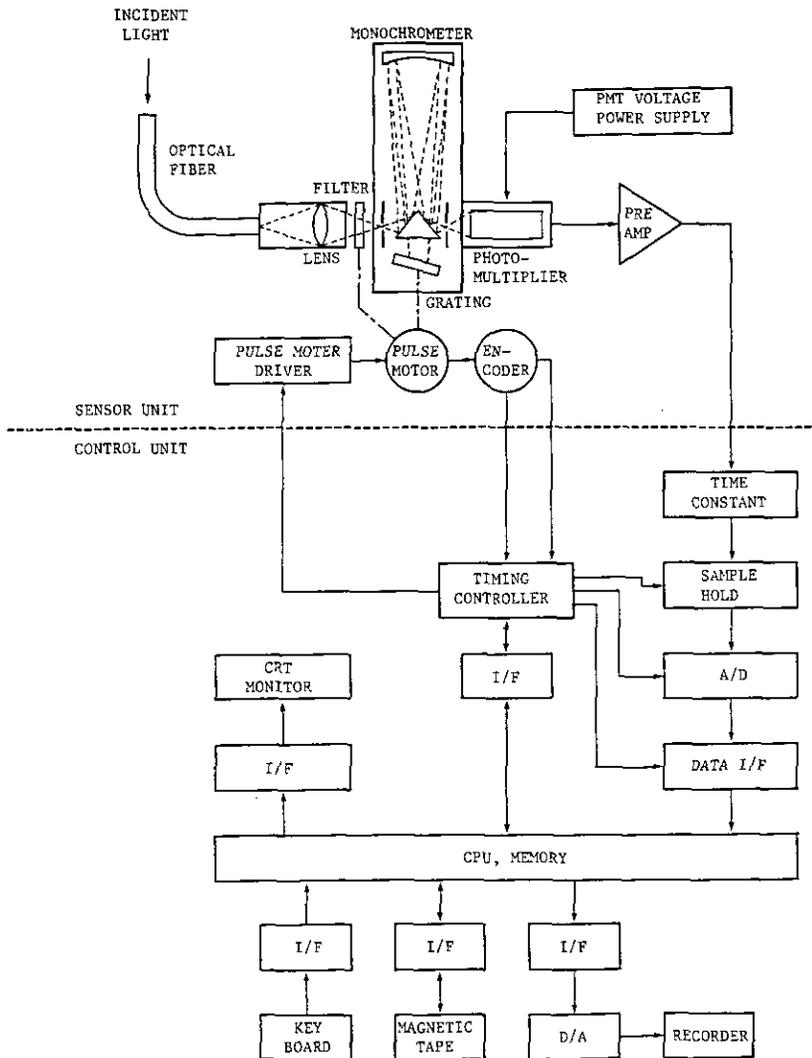


図 2 装置全体のブロック図

Fig. 2 Block diagram of High-speed spectroradiometer

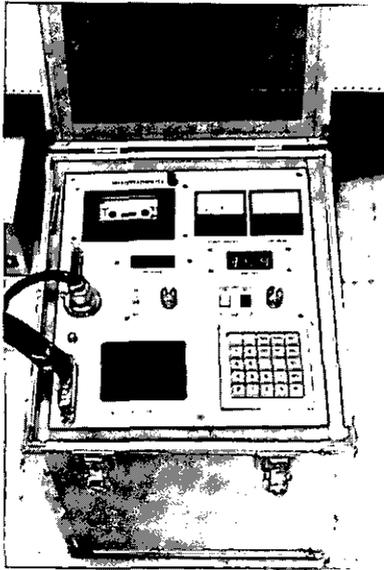
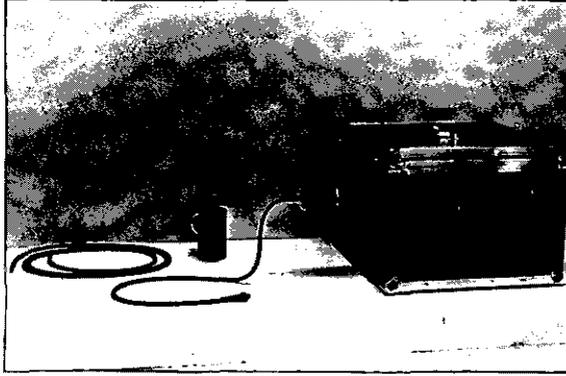


図 3 高速ラジオスペクトロメータの写真  
(A) 分光器部 (B) 操作部

Fig. 3 Photograph of High-speed spectroradiometer  
(A) Detector unit and optical attachments  
(B) Control unit

さ及び遠隔操作を可能とするために、分光器部と操作部をそれぞれ耐震を施したアルミトランクに納める構成とした。図2に本装置のブロック図を、また図3には本装置の写真を示す。本装置の集光光学系はレンズによる集光を基本構成とし、オプティカルファイバー及び下方向測定用集光アタッチメントの使用を可能とした。集光光学系の三構成を図4に示す。

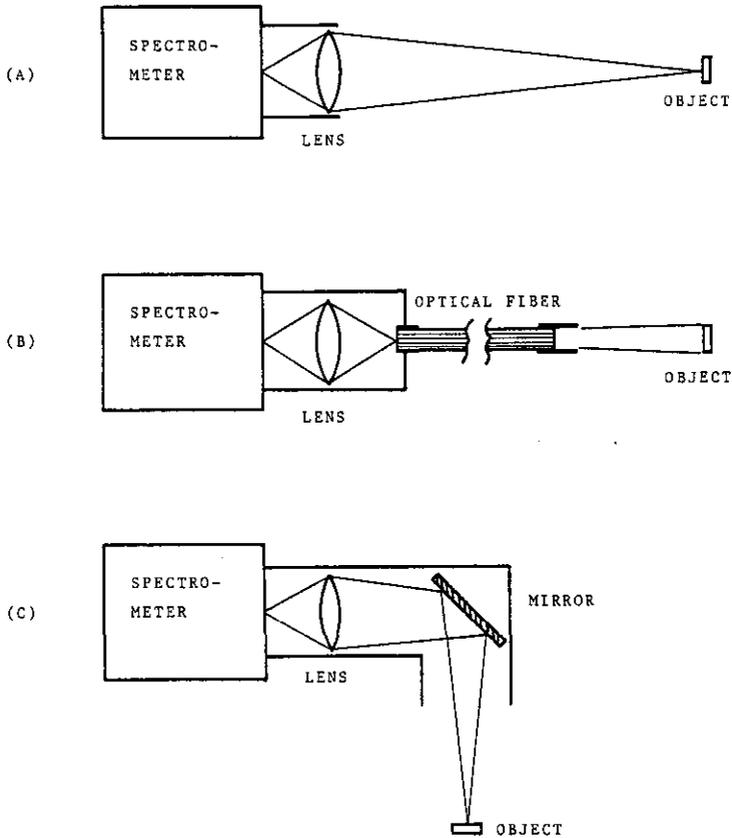


図 4 集光光学系の構成

- (A) 標準構成
- (B) オプティカルファイバー
- (C) 下方向測定用アタッチメント

Fig. 4 Optical arrangements

- (A) standard arrangement
- (B) optical fiber
- (C) downward attachment

#### 4 使用例

分光放射計による測定において最も重要なことは、分光放射輝度の絶対値を得ることである。このためには光学系を含めたシステム全体の補正係数を求め、それによって測定値を補正する必要がある。ここでは標準光源による補正法について述べた後、いくつかの実測例について紹介する。

##### 4.1 標準光源による補正法

本装置は集光部にオプティカルファイバー、レンズ、反射鏡、グレチティング等の光学系を用いているため、ほこりやその他の要因により、絶対輝度値測定のためには頻繁に測定の補正を必要とする。最も簡単で効率の良い補正法は標準光源を使用する方法である。標準光源は電気計器検定所により各波長ごとの分光放射照度の値が正確に検定された500 W ハロゲンランプを使用する。定められた距離に置かれた標準光源を本装置により計測し、測定値と検定値の比較から本装置の補正係数を算出する。検定値及び補正係数はカセットテープに収録可能であるため繰り返し読み出し、使用することができる。図5に補正係数の1例を示す。

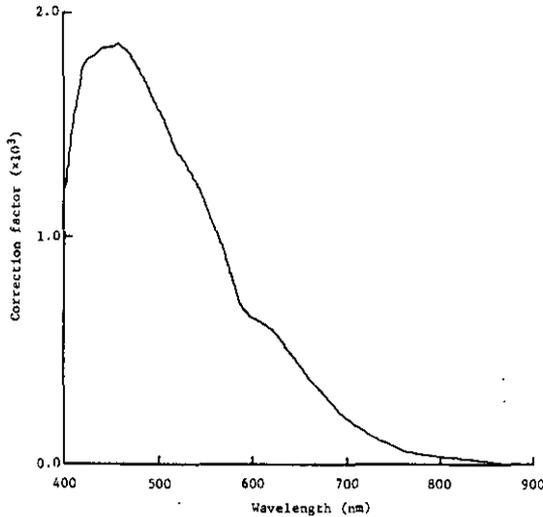


図 5 補正係数 (オプティカルファイバー使用)

Fig. 5 System efficiency curve (with optical fiber)

##### 4.2 測定例

図6は太陽直射光下に置いた白色標準反射板(イーストマン白色標準塗料塗装<sup>4)</sup>)の分光放射輝度の波長特性図である。この測定は10回(10秒間)の測定の平均値である。また、図7は茨城県

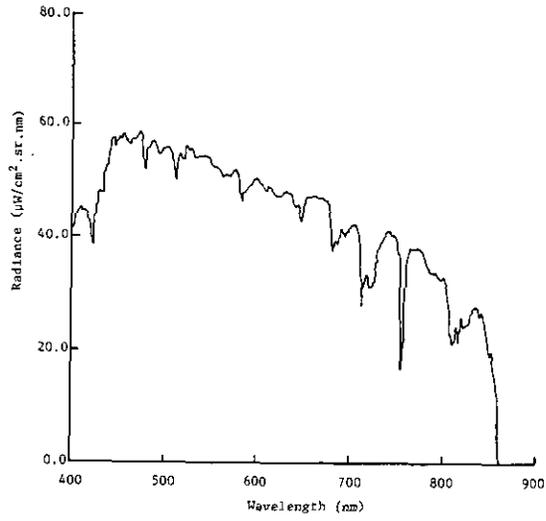


図 6 白色標準反射板の分光反射スペクトル  
Fig. 6 Spectral signature of white board

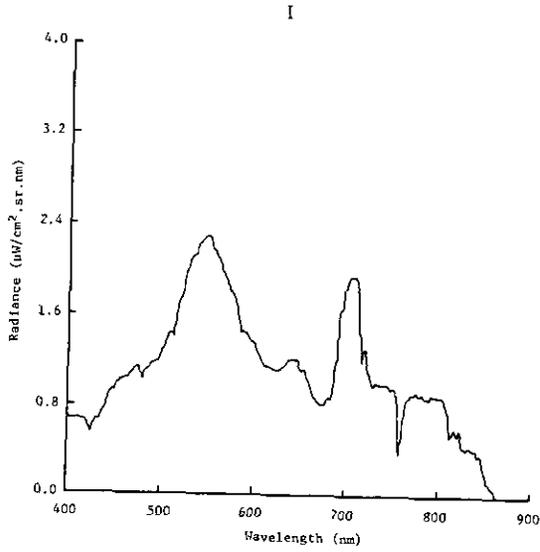


図 7 霞ヶ浦湖水の水面分光反射スペクトル  
Fig. 7 Spectral signature of lake Kasumigaura

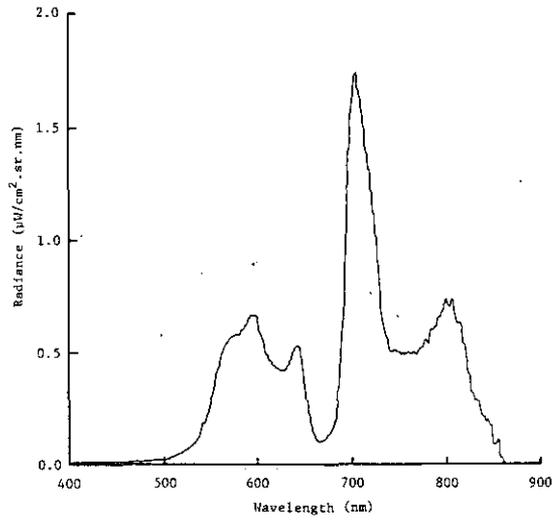


図 8 赤潮藻類 *Heterosigma akashiwo* の分光反射スペクトル  
Fig. 8 Spectral signature of red type algae, *Heterosigma akashiwo*

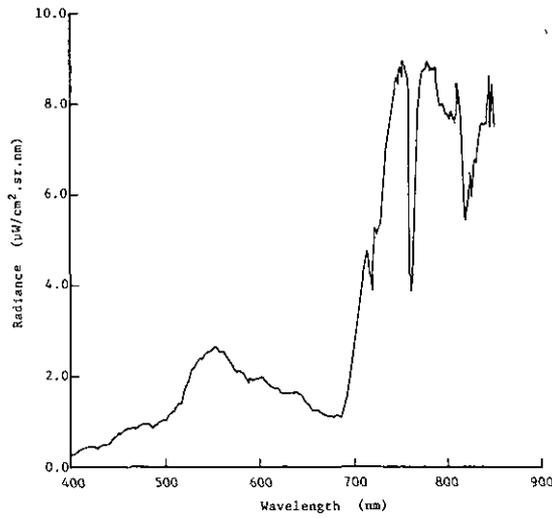


図 9 芝生の分光スペクトル  
Fig. 9 Spectral signature of lawn

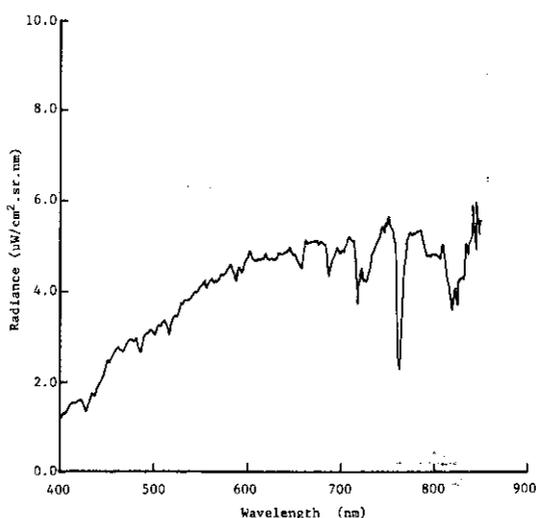


図 10 裸地の分光反射スペクトル

Fig. 10 Spectral signature of bare soil

霞ヶ浦における水面の放射輝度の波長特性<sup>5)</sup>である。水中の植物プランクトン中のクロロフィル $a$ による吸収帯(430, 680 nm 付近)が良く示されている。この測定は 20 回(20 秒間)の平均値である。図 8 はマイクロコズム内で培養された赤潮藻類 *Heterosigma akashiwo* の分光反射特性<sup>6)</sup>である。この場合もクロロフィル $a$ による吸収帯が測定結果に良く表れている。

図 9 及び図 10 はそれぞれ芝生と裸地の分光反射特性である。

## 5 将来計画

現装置の測定可能な波長範囲は 400~850 nm であるが紫外線領域の測定も可能な 280~850 nm へ測定領域を拡大する。これは機械的な変更は簡単に行えるが、紫外領域の光を通す石英レンズ、オプティカルファイバー等が必要となり可成りの費用を必要とする。さらに、測定波長範囲を近赤外域 1200 nm 付近まで広げる。これは機械的に大幅な変更を必要とする。赤外領域の光検知器として現在使用中の PMT は不適當であるため他の検知器へ切り替えるメカニズムが必要となる。しかし、これらの改造を行うことにより、人工衛星や航空機リモートセンシングで使用しているセンサーの波長範囲をすべてカバーすることができ、リモートセンシング研究の新しい技術の開発に役立つと考えられる。

また、現在のデータ処理システムは測定データを加算し平均処理を行い PMT の供給電圧や補正係数により絶対エネルギー値への換算を行い、さらにカセット MT に記録する。この一連の処理にかかる時間は実際の光を測定している時間を 10 秒と仮定しても約 1 分必要とする。このロス

時間を少なくするために、絶対エネルギー値への変換処理等を行わず生データをカセットテープへ記録する方式を検討している。これによると、測定時間 10 秒に対してテープへの書き込みが 2 秒程度と試算されデータ収集の速度向上とともにリモートセンサーの上空通過時間誤差の少ないブランドトルースデータの収集が可能となる。

さらに、コントロール部にタイマー機構を増設し無人による定間隔の測定なども予定している。

## 6 まとめ

新しく開発した高速スペクトロメータの性能、機能、使用例について述べ、その特徴を明らかにした。小型かつ掃引速度が速いため、船上のような狭いスペースで水面のように絶えず変化しているフィールドにおける分光測光に威力を発揮することが判明した。また、対活型のソフトウェアであるため、観測者によりキー操作で測定結果を CRT 上にディスプレイしたり放射輝度の絶対測定はもとより白板と対象物のスペクトルの比をその場で得るようなことも可能である。さらに耐環境性もフィールド実験用として十分である。

今後は、ハード、ソフト両面にわたる改良を重ねるとともに、実験室においては、植物プランクトンをはじめ各種対象物の分光学的基礎データの収集を行い、フィールドにおいてはリモートセンシング実験におけるブランドトルースデータとしての計測や水面反射光、大気散乱光等を推定するための基礎データの収集などを計画している。

## 引用文献

- 1) 安岡善文・宮崎忠国 (1977): 遠隔計測による霞ヶ浦地域の現況解析. 国立公害研究所研究報告, 第 1 号, 48-66.
- 2) 安岡善文・宮崎忠国 (1977): 遠隔計測による霞ヶ浦の定量的水質計測 (クロロフィル *a* の定量). 国立公害研究所研究報告, 第 6 号, 85-93.
- 3) Yasuoka, Y. and T. Miyazaki (1979): Quantitative measurement of water quality distribution by remote sensing. Spec. Proj. Res. Detect. Control Environ. Pollut., 4, Steering Group Spec. Proj. Res. Detect. Control Environ. Pollut., 124-127.
- 4) Grum, F. and G. W. Lucky (1968): Optical sphere paint and a working standard reflectance. Appl. Opt. 7 (11), 2289-2294.
- 5) 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国 (1982): 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質. 日本リモートセンシング学会誌, 2 (1), 21-31.
- 6) 宮崎忠国 (1982): 赤潮藻類 *Olisthodiscus luteus* の分光特性と水質. 国立公害研究所研究報告, 第 30 号, 371-378.

II-11 航空機搭載 MSS データによる九十九里平野の  
土壌水分推定分布図の作成

Soil Moisture Mapping in the Kujukuri Coastal Plain  
with Airborne Multispectral Scanner

宇都宮陽二郎<sup>1</sup>

Yojiro UTSUNOMIYA<sup>1</sup>

要 旨

九十九里平野における航空機搭載 MSS 及び地上測定データを解析し結果、以下の結果及び問題点を得た。

1. 近赤外データと土壌水分との関係については入射光の光量を変化するなど、種々の測定条件下において実験する必要がある。
2. 土壌水分推定モデルの作成では可視～近赤外データよりも赤外データの有用性が高い。特に土地被覆が混合サンプル（水田、まばらな草地、ワラ埋め込み畑<砂地>等のまばらな植被の土地）であっても、ある程度の推定精度を有する推定モデルが作成できる。ただし、その植被度については、今後さらに検討する必要がある。
3. 航空機搭載 MSS データの解析による土壌水分分布図によると、巨視的な観察や地域差、特徴の把握が困難であるが、地盤沈下地域における湛水等の被害状況をはじめとする環境現象が、より詳細に把握され、本手法が土壌水分推定分布図の作成手法として有益であることを示している。
4. モデル及び判別効率等の改良により一時期の航空機及び LANDSAT 搭載の MSS の観測データのみならず、観測時期に左右されない推定モデルの開発を図る必要があり、そのためには、さらに実験データと解析事例の積み重ねが必要であろう。

Abstract

This study was made to map the spatial distribution of soil moisture using airborne MSS and ground truth data in the Kujukuri coastal plain. The results obtained can be summar-

---

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

ized as follows :

1. It was thought that observation of the spectral reflectance of the soil surface should be carried out by changing the beam intensity of the lamp within the visible and near-infrared wavelengths.

2. The thermal infrared radiation model for soil moisture estimation is more appropriate than other models based on visible and near-infrared radiation. Even when the soil surface was covered with a thin vegetation cover, the performance was somewhat recognized in the estimation, so that the ratio of the vegetation cover must be studied in future analyses.

3. The soil moisture map based on the airborne MSS data indicated spatial characteristics of the terrain and phenomena (e. g. distribution of flooded area) of the studied area in detail, in spite of the lack of a broad view of regional differences and characteristics of the terrain.

4. For accurate future studies of soil moisture estimation models by using remotely sensed data, it is expected that the model is applicable over a wide range of cases and circumstances.

## 1 はじめに

土壌水分は直接のみならず、間接にも土壌中の微生物等の活発化を通じ、各種の化学分解に関与し植物の育成に影響するため、農産物の収穫量予測のカギともなっている。一方、水収支的に微妙な平衡の下にある半乾燥地域においては伐採をはじめとする土地改変など人為的な原因により砂漠化が地球的規模で進行している。また、地盤沈下等に起因する湛水域の発生など土壌水分の過剰による土地条件の悪化も随所に認められ、ここでも、土壌水分分布の把握が必要となっている。

ところで、土壌水分の測定にはテンションメーター、石膏ブロック、乾燥法等々の直接測定法があるが、これらの方法で広域にわたる土壌水分の分布を測定するためには多大の労力が必要であり、時間的制約及び現地への接近性の制限等により、測定不可能となることもあろう。降水量、蒸発量等の気象データにより広域にわたる水分の推定も可能であるが、この方法では限定された地域の各種微地形に影響される土壌水分分布の把握は不可能である。

これらの調査・測定法の改良を図るものとしてリモートセンシングによる計測手法があろう。土壌水分のリモートセンシングは可視・近赤外、熱赤外及び、マイクロ波等の各波長域のデータに基づき実施されているが、本研究では航空機搭載のMSSにより測定される可視～赤外波長域のデータを使用したので、MSSの可視・近赤外、熱赤外データと土壌水分との関係について以下に概説する。

一般に、水分含有量の減少に伴い、土壌の色の明度が高くなることが知られている。明度の増加は土壌表面のアルベドの増大となる。また、土壌水分は地表面温度に密接に関係しており、その関係は熱収支の法則  $R_n = I E + P + B$  (ただし、 $R_n$  は正味放射、 $I E$  は潜熱、 $P$  は顕熱、 $B$  は

地下への熱の伝播を示す)によって示される。これらは、可視域では反射エネルギーの増加として、熱赤外域では長波エネルギーとしてMSSに記録される。以上の点から、地表における物理的現象がMSSにより可視・近赤外と熱赤外域データとして記録され、かつ、それをもとに土壤水分の推定が可能なが知られる。

研究史的に見ると、一般に土壤水分の推定モデルの作成と土壤水分分布図の自動図化に関する研究は別個に実施されてきた傾向があるが、最近、Davisら<sup>1)</sup>、宇都宮<sup>2,3)</sup>、Shuchman<sup>4)</sup>、深山<sup>5)</sup>、池村ら<sup>6)</sup>等により土壤水分の自動図化が試みられた。これらの中には本来、推定不可能な場所、例えば、道路、家屋、樹木に被覆された土地の土壤水分分布図の作成、あるいは地表部近くの土壤水分ではなく地下水位とLANDSATデータとの短絡的な相関性の把握など、研究のアプローチ及び、表示方法としても不十分なものも含まれる。筆者はLANDSAT搭載MSSデータにより土壤水分分布図を作成するとともに、搭に設置した放射温度計及び航空機搭載MSS熱赤外データと土壤水分との関係について記載してきた<sup>2,3,7-9)</sup>。今回、九十九里平野において航空機搭載MSSにより、同一日時の精度の高いリモートセンシングデータを取得したので、土壤水分の推定・解析手法と土壤水分分布図の図化手法を吟味し、既報のLANDSATデータに基づく土壤水分分布図と比較したので報告する。

## 2 解析方法

### 2.1 データの取得

#### (1) 航空機による観測

九十九里平野の海岸線に平行に、宮城～上横地間(図1)を航空機搭載MSSによって、1981年1月23日、6:39～8:35、9:00～9:57、11:42～12:29の各時間帯に測定した。解析に使用したデータの取得時間は7:01～7:07(第1回)、9:31～9:37(第2回)、12:04～12:10(第3回)で撮影高度は第1回が6300 feet、第2、第3回が6400 feetである。撮影当日は快晴で、撮影機の機影及び地上の数km遠方の物体が明りように確認でき、ヘイズは極めて少ないと思われる。撮影に使用したMSSは(財)造船振興財団のMSS-BG-IA型で、このMSSで取得したデータからLANDSAT搭載MSSの波長に近似する波長域のデータをCCTに変換した(表1)。

#### (2) グランドトゥース

MSSの撮影に対応し、地上では地表温度測定、土地被覆物質(土地利用)観察、主要気象要素(風向、風速、気温、湿度及び日射量等)の測定と土壤のサンプリングを行った。なお、グランドトゥースは(株)パスコに委託し、1月22日～27日の4日間にわたり筆者の指導の下で実施した。以下に地表温度測定、土壤サンプリング、土地利用(土地被覆物質)観察について述べる。

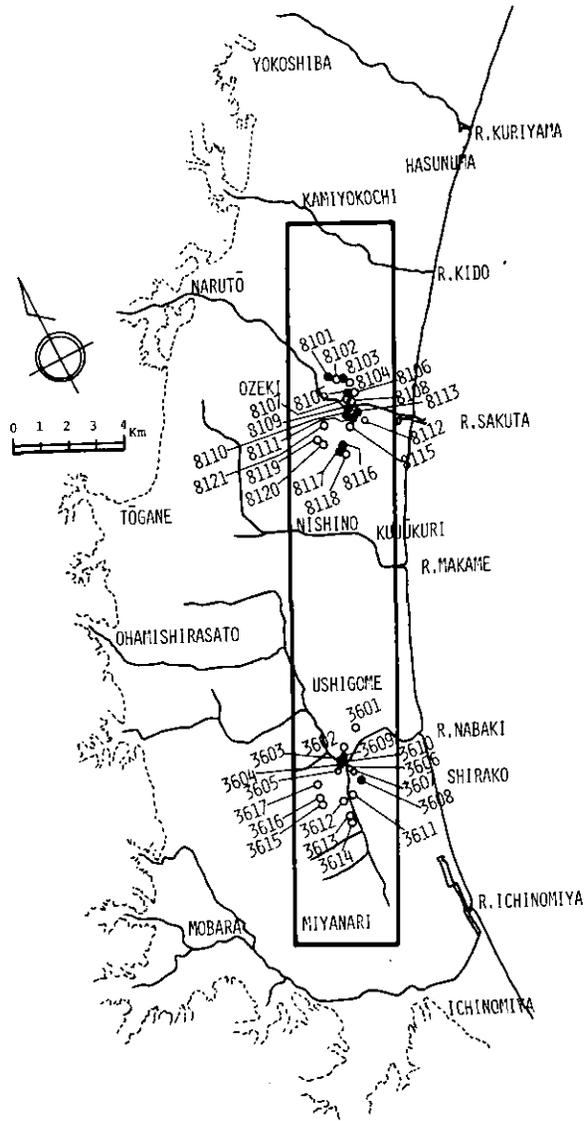


図 1 九十九里平野南部のグランドトゥース地点と航空機 MSS 撮影コース  
 Fig. 1 Ground truth points and flight path in the southern Kujukuri coastal plain (Jan. 23 1981)

1) 地表温度

第 1~3 回の MSS の撮影と同時に、あらかじめ選定しておいた測定点を器差別測定済みの 5 台の携帯用焦電型放射温度計 (National ER 2007 型) で測定した。MSS の瞬間視野角が 2.5 mrad、したがって地上解像度は 4.8~4.9 m となるため、測定点は MSS 画像の一面素の地上解像度に対

表 1 航空機搭載 MSS CCT データのバンド別波長  
Table 1 Spectral wavelengths in each band of airborne MSS CCT data

channel number	micrometers	data analyzed
0	0.30 — 0.35	
1	0.35 — 0.40	
2 A	0.433— 0.453	
3 A	0.47 — 0.49	○
4 A	0.51 — 0.53	
5 A	0.54 — 0.56	○
6	0.60 — 0.65	○
7 A	0.66 — 0.68	○
8	.....	
9	0.30 — 0.90	○
10	.....	
11	10.5 —12.5	○
12	4.3 — 5.5	not available
13	4.5 — 4.9	//

して十分広い等質な地表 (15×15 m) から、一辺 5 m の矩形をとり、その四隅と中心の 5 点のサ  
ブポイントを少なくとも 3 回測定し、その平均値を求めた。

## 2) 土壤サンプリング

地表温度測定後 1 時間以内に、土壤サンプラーにより上述の測定点について深さ 0~5 cm の土  
壤を採取した。全サンプルの混合による土壤の粒径別重量比は粒径 2.0 mm < で 5%、粒径  
2.00~0.84 mm, 3%、粒径 0.84~0.42 mm, 4%、粒径 0.42 mm > で 88% の各々の値を示し、  
大部分が fine sand から構成されている。また、この九十九里平野では実験の一週間前から降水  
が無く、各地点の土壤水分はその場所が定常的に示す水分特性にあった値を示すと思われる<sup>10)</sup>。

## 3) 土地被覆 (土地利用) の観察

数日間では土地被覆の変化がほとんどないものと看なし、MSS による撮影後 4 日間にわたり  
水田 (稲株、冠水、霜)、裸地 (畑、グラウンド、空地、冠水、霜)、ムギ畑、緑色野菜 (ネギ、大  
根)、牧草、芝生、アスファルト道路、砂浜、テニスコート、屋根 (カワラ、スレート、コンクリー  
ト、トタン、ワラ、ビニール、ガラス)、樹木 (松、杉、混交、常緑樹)、水域 (池、プール、海  
水、河川) の 20 余項目の土地被覆物質の分布状況を調査した。

## 2.2 方法

解析方法は図 2 に示したとおりで、基本的には既報<sup>3)</sup> と同一手法であり、正午に取得した可視  
データの判別分析により分類した裸地、植被のまばらな土地及び水田について、サンプル土壤の  
乾燥重量法による水分 (含水比) を目的変数、可視~赤外データを説明変数とした土壤水分推定

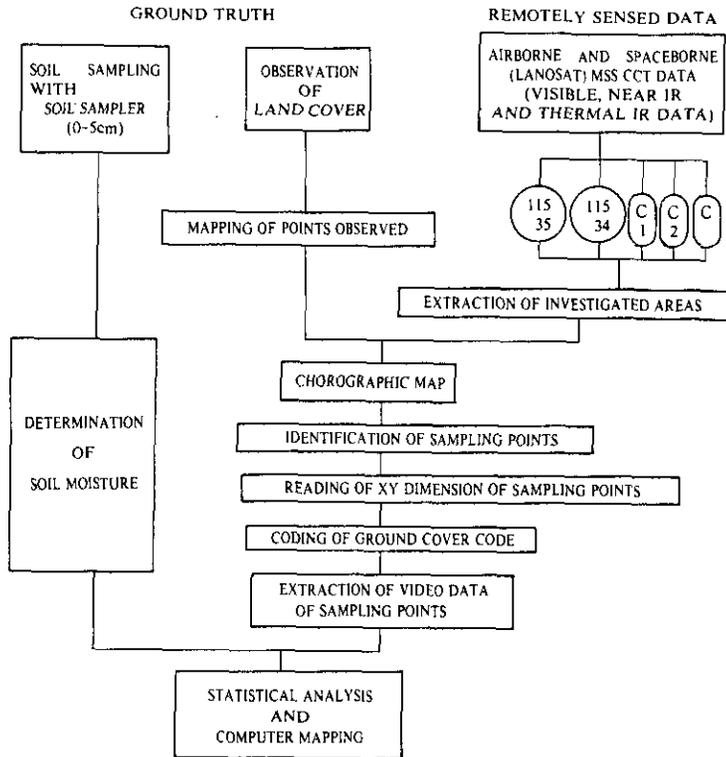


図 2 土壌含水比推定分布図作成のためのデータ解析システム

Fig. 2 Data processing system of soil moisture estimation and mapping of soil moisture distribution

モデルを作成し、コンピュータマッピングによる土壌水分分布図を作成した。ただし、図2ではデータ解析については簡略化している。なお、土壌水分推定モデルの作成ではこれら3回の測定データを使用した。

### 3 解析結果と考察

#### 3.1 土壌含水比モデルの作成

モデルの作成の前に、データを可視～近赤外データと熱赤外データに区分し、さらに土地被覆を裸地サンプルと裸地を含む水田、まばらな植被の土地からなる混合サンプルの二群に分け、各々についてMSS画像の濃度と土壌含水比との散布図を作成した。

##### (1) 可視～近赤外データ

図3は可視、近赤外波長域の5チャンネルのデータと土壌水分との散布図である。A, Bは各々、

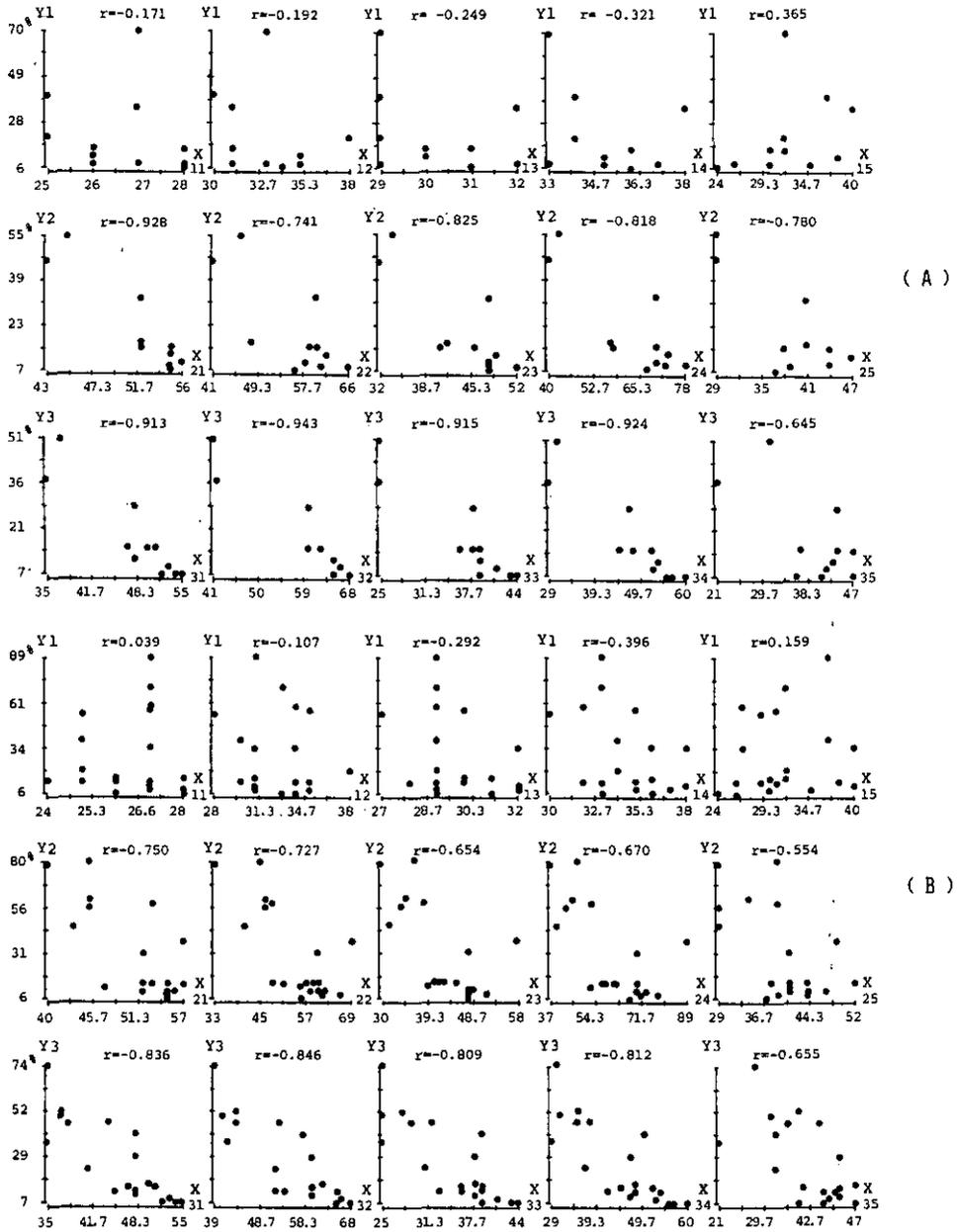


図 3 可視～近赤外データと土壤水分との散布図

Fig. 3 Scatter plots of airborne MSS video data versus soil moisture contents in the Kujukuri coastal plain

A : bare soil ; B : complex surface ; Y : soil moisture ; X : vldeo data, index of A and B : A-1, 2, 3, means the data obtained at 7 : 05, 9 : 35, 12 : 05, respectively. Index of Y means data sampling thme; index of X, the data derived from each channel of airborne MSS vinible and near IR wavelength : 3A, 5A, 6, 7A, 9, respectively.

裸地 (サンプル数: 11), 混合サンプル (サンプル数: 20) の各データ群の散布図で, 7:05の土壤水分と (Y 1) と MSS の各チャンネル (3 A, 5 A, 6, 7 A 及び 9) の画像濃度 (X 11~X 15), 9:35の土壤水分 (Y 2) と MSS の各チャンネルの画像濃度 (X 21~X 25), 及び, 12:05の土壤水分 (Y 3) と MSS の各チャンネルの画像濃度 (X 31~X 35) の関係を示したものである。本図によると, 早朝(7:05)を除き, B 混合サンプルより A 裸地サンプルの方が相関が高い。これは土地被覆が裸地のみで等質であり, 土壤以外の物体の反射光の混入が少ないためと思われる。そこで, これらのデータ間の相関を更に細かく見るため, 裸地データ, 裸地及び水田, 疎な雑草に

表 2 裸地データにおける相関係数行列

Table 2 Correlation matrix (bare soil)

Variable NO	Variable Name	Mean	S.D.	C.V.	Variable Number							
					50 LS-Ave	49 LS-12	48 LS-9	47 Ls-7	25 S-Ave	24 S-12	23 S-9	22 S-7
1	B-11	26.64	1.120	4.21	-0.340	-0.339	-0.356	-0.319	-0.217	-0.232	-0.256	-0.171
2	B-12	32.91	2.427	7.38	-0.290	-0.318	-0.339	-0.218	-0.276	-0.305	-0.340	-0.192
3	B-13	30.09	1.221	4.06	-0.203	-0.220	-0.179	-0.199	-0.250	-0.254	-0.243	-0.249
4	B-14	35.18	1.601	4.55	-0.221	-0.233	-0.223	-0.201	-0.314	-0.309	-0.306	-0.321
5	B-15	32.36	4.905	15.15	0.517	0.500	0.483	0.555	0.391	0.404	0.402	0.365
6	B-16	-6.52	1.735	-26.62	0.871	0.861	0.817	0.907	0.855	0.859	0.827	0.859
7	B-21	52.27	4.361	8.34	-0.879	-0.869	-0.887	-0.861	-0.900	-0.906	-0.928	-0.855
8	B-22	56.09	7.713	13.75	-0.680	-0.693	-0.708	-0.627	-0.697	-0.715	-0.741	-0.635
9	B-23	44.36	6.423	14.48	-0.811	-0.802	-0.806	-0.805	-0.808	-0.815	-0.825	-0.774
10	B-24	63.45	12.477	19.66	-0.792	-0.782	-0.786	-0.788	-0.802	-0.807	-0.818	-0.770
11	B-25	39.36	5.921	15.04	-0.668	-0.649	-0.660	-0.672	-0.768	-0.760	-0.780	-0.750
12	B-26	7.66	4.491	58.61	-0.940	-0.924	-0.931	-0.941	-0.901	-0.902	-0.901	-0.883
13	B-31	48.18	6.555	13.60	-0.904	-0.898	-0.901	-0.892	-0.903	-0.913	-0.921	-0.865
14	B-32	59.45	9.278	15.60	-0.903	-0.896	-0.913	-0.878	-0.937	-0.943	-0.955	-0.901
15	B-33	37.00	6.356	17.18	-0.888	-0.885	-0.876	-0.881	-0.908	-0.915	-0.918	-0.877
16	B-34	48.36	10.122	20.93	-0.925	-0.922	-0.922	-0.909	-0.913	-0.924	-0.929	-0.876
17	B-35	39.36	7.788	19.79	-0.588	-0.566	-0.581	-0.596	-0.646	-0.645	-0.683	-0.603
18	B-36	16.44	5.804	35.31	-0.979	-0.970	-0.963	-0.978	-0.948	-0.956	-0.953	-0.920
19	R-31	0.60	0.195	32.19	-0.973	-0.964	-0.948	-0.981	-0.945	-0.953	-0.943	-0.924
20	R-32	0.58	0.139	23.91	-0.694	-0.706	-0.670	-0.690	-0.695	-0.715	-0.708	-0.656
21	R-21	3.64	1.518	41.73	-0.969	-0.954	-0.946	-0.980	-0.974	-0.976	-0.927	-0.922
26	L-11	3.28	0.042	1.29	-0.338	-0.338	-0.354	-0.317	-0.215	-0.230	-0.254	-0.169
27	L-12	3.49	0.072	2.07	-0.301	-0.328	-0.348	-0.230	-0.280	-0.310	-0.345	-0.195
28	L-13	3.40	0.040	1.18	-0.206	-0.223	-0.182	-0.203	-0.254	-0.258	-0.247	-0.253
29	L-14	3.56	0.045	1.28	-0.231	-0.242	-0.233	-0.210	-0.325	-0.320	-0.316	-0.332
30	L-15	3.47	0.156	4.49	0.526	0.508	0.486	0.571	0.400	0.412	0.407	0.377
32	L-21	3.95	0.088	2.24	-0.872	-0.861	-0.881	-0.851	-0.896	-0.902	-0.926	-0.849
33	L-22	4.02	0.147	3.67	-0.686	-0.698	-0.716	-0.632	-0.704	-0.722	-0.752	-0.638
34	L-23	3.78	0.157	4.15	-0.813	-0.804	-0.811	-0.802	-0.819	-0.826	-0.839	-0.781
35	L-24	4.13	0.221	5.36	-0.799	-0.789	-0.797	-0.788	-0.819	-0.824	-0.840	-0.782
36	L-25	3.66	0.162	4.42	-0.692	-0.674	-0.686	-0.693	-0.793	-0.786	-0.807	-0.773
37	L-26	1.70	1.089	64.06	-0.930	-0.912	-0.919	-0.933	-0.984	-0.975	-0.968	-0.986
38	L-31	3.87	0.149	3.85	-0.892	-0.885	-0.892	-0.876	-0.901	-0.910	-0.923	-0.860
39	L-32	4.07	0.177	4.34	-0.888	-0.881	-0.899	-0.864	-0.935	-0.939	-0.953	-0.900
40	L-33	3.60	0.195	5.41	-0.877	-0.872	-0.870	-0.866	-0.911	-0.918	-0.925	-0.879
41	L-34	3.86	0.241	6.25	-0.907	-0.903	-0.909	-0.888	-0.914	-0.924	-0.935	-0.874
42	L-35	3.65	0.237	6.48	-0.595	-0.579	-0.599	-0.589	-0.641	-0.647	-0.691	-0.584
43	L-36	2.72	0.449	16.51	-0.961	-0.951	-0.954	-0.952	-0.971	-0.976	-0.980	-0.941
44	LR31	-0.56	0.391	-69.59	-0.965	-0.955	-0.949	-0.966	-0.979	-0.982	-0.978	-0.960
45	LR32	-0.57	0.261	-45.82	-0.704	-0.715	-0.688	-0.692	-0.713	-0.733	-0.733	-0.667
46	LR21	1.18	0.559	47.55	-0.960	-0.944	-0.943	-0.968	-0.985	-0.981	-0.971	-0.983
22	S-7	21.52	19.473	90.50	0.936	0.921	0.917	0.945	0.990	0.982	0.965	1.000
23	S-9	19.84	16.871	85.05	0.959	0.952	0.966	0.938	0.992	0.995	1.000	
24	S-12	18.55	14.369	77.48	0.970	0.963	0.966	0.956	0.998	1.000		
25	S-Ave	19.96	16.802	84.17	0.960	0.950	0.954	0.953	1.000			
47	LS-7	2.77	0.775	27.96	0.988	0.976	0.961	1.000				
48	LS-9	2.71	0.949	27.65	0.992	0.993	1.000					
49	LS-12	2.69	0.695	25.85	0.997	1.000						
50	LS-Ave	2.73	0.735	26.96	1.000							

number of samples : 11

L: log transformed  
S: soil moisture  
R: rising rate  
B: channel number

被覆された砂地を含む混合データについて相関係数行列(表2, 表3)を作成した。

表2の裸地データ及び、表3の混合データのいずれも相関は、早朝より、日中の9:35, 12:05に大きい。両者では、9:35より12:05の方がより高く、逆相関を示している。さらに、サンプル数が少なく、推定精度は悪いが、早朝(7:05)の近赤外(チャンネル9:0.8~9.0 $\mu\text{m}$ )データと土壌水分は正相関を示し、後述の熱赤外域における関係に類似する。これが近赤外域で共通に認められるならば、今後の解析上注意しなければならないであろう。一般に、日中の太陽エネ

表 3 混合データにおける相関係数行列

Table 3 Correlation matrix (complex surface) Photo 1 Distribution of soil moisture contents in the Kujukuri coastal plain (Jan. 23, 1981)

Variable No.	Name	Mean	S.D.	C.V.	Variable				Number			
					50 LS-Ave	49 LS-12	48 LS-9	47 LS-7	25 S-Ave	24 S-12	23 S-9	22 S-7
1	B-11	26.45	1.146	4.33	-0.117	-0.125	-0.134	-0.077	-0.012	-0.002	-0.069	-0.039
2	B-12	32.45	2.417	7.45	-0.178	-0.196	-0.212	-0.113	-0.175	-0.165	-0.243	-0.107
3	B-13	29.80	1.436	4.82	-0.279	-0.268	-0.287	-0.261	-0.317	-0.272	-0.366	-0.292
4	B-14	34.45	2.115	6.14	-0.395	-0.393	-0.414	-0.358	-0.435	-0.404	-0.483	-0.396
5	B-15	31.65	4.782	15.11	0.138	0.100	0.112	0.206	0.114	0.097	0.079	0.159
6	B-16	-6.05	1.583	-26.28	0.870	0.859	0.834	0.894	0.828	0.820	0.792	0.838
7	B-21	51.20	5.116	9.99	-0.701	-0.656	-0.706	-0.722	-0.756	-0.717	-0.750	-0.764
8	B-22	54.05	9.017	16.68	-0.674	-0.666	-0.674	-0.660	-0.737	-0.720	-0.727	-0.732
9	B-23	42.95	7.185	16.73	-0.640	-0.612	-0.630	-0.659	-0.672	-0.638	-0.654	-0.691
10	B-24	60.80	13.790	22.68	-0.645	-0.615	-0.636	-0.662	-0.681	-0.643	-0.670	-0.696
11	B-25	39.75	6.257	15.74	-0.526	-0.513	-0.498	-0.548	-0.602	-0.592	-0.554	-0.636
12	B-26	6.04	4.212	69.79	-0.848	-0.851	-0.828	-0.846	-0.783	-0.806	-0.742	-0.776
13	B-31	45.70	6.441	14.09	-0.854	-0.860	-0.841	-0.836	-0.832	-0.836	-0.818	-0.812
14	B-32	55.50	9.259	16.68	-0.853	-0.851	-0.850	-0.833	-0.849	-0.846	-0.836	-0.832
15	B-33	34.90	6.017	17.24	-0.823	-0.826	-0.802	-0.814	-0.810	-0.809	-0.786	-0.804
16	B-34	44.70	9.548	21.36	-0.846	-0.853	-0.830	-0.829	-0.809	-0.812	-0.790	-0.796
17	B-35	38.10	6.820	17.90	-0.615	-0.641	-0.580	-0.607	-0.606	-0.655	-0.557	-0.596
18	B-36	14.72	5.176	35.17	-0.899	-0.911	-0.873	-0.894	-0.815	-0.842	-0.774	-0.804
19	R-31	0.55	0.173	31.58	-0.921	-0.927	-0.891	-0.923	-0.844	-0.864	-0.803	-0.838
20	R-32	0.58	0.134	23.22	-0.538	-0.560	-0.511	-0.529	-0.457	-0.478	-0.437	-0.443
21	R-21	3.09	1.393	45.04	-0.911	-0.910	-0.885	-0.916	-0.848	-0.864	-0.806	-0.846
26	L-11	3.27	0.044	1.34	-0.110	-0.118	-0.127	-0.071	-0.006	0.004	-0.063	-0.045
27	L-12	3.48	0.074	2.13	-0.185	-0.201	-0.219	-0.120	-0.179	-0.167	-0.251	-0.109
28	L-13	3.39	0.048	1.42	-0.283	-0.271	-0.293	-0.264	-0.321	-0.274	-0.372	-0.294
29	L-14	3.54	0.062	1.75	-0.401	-0.397	-0.421	-0.363	-0.440	-0.406	-0.492	-0.399
30	L-15	3.44	0.150	4.35	0.153	0.112	0.125	0.226	0.127	0.108	0.092	0.174
32	L-21	3.93	0.105	2.66	-0.706	-0.664	-0.710	-0.725	-0.766	-0.731	-0.758	-0.773
33	L-22	3.98	0.180	4.53	-0.693	-0.686	-0.692	-0.680	-0.766	-0.756	-0.750	-0.762
34	L-23	3.75	0.172	4.58	-0.679	-0.653	-0.669	-0.696	-0.717	-0.689	-0.695	-0.734
35	L-24	4.08	0.238	5.83	-0.694	-0.667	-0.686	-0.709	-0.737	-0.706	-0.722	-0.750
36	L-25	3.67	0.164	4.46	-0.555	-0.544	-0.527	-0.578	-0.631	-0.624	-0.577	-0.667
37	L-26	1.41	1.089	76.96	-0.827	-0.830	-0.798	-0.839	-0.833	-0.862	-0.760	-0.855
38	L-31	3.81	0.147	3.86	-0.849	-0.853	-0.837	-0.831	-0.838	-0.841	-0.824	-0.818
39	L-32	4.00	0.177	4.42	-0.849	-0.845	-0.845	-0.832	-0.859	-0.855	-0.844	-0.845
40	L-33	3.54	0.183	5.16	-0.819	-0.826	-0.800	-0.812	-0.819	-0.817	-0.792	-0.815
41	L-34	3.78	0.226	5.97	-0.841	-0.846	-0.827	-0.825	-0.820	-0.822	-0.800	-0.809
42	L-35	3.62	0.201	5.54	-0.594	-0.619	-0.564	-0.583	-0.581	-0.629	-0.536	-0.567
43	L-36	2.62	0.398	15.19	-0.875	-0.883	-0.851	-0.872	-0.815	-0.841	-0.767	-0.812
44	LR31	-0.65	0.343	-52.35	-0.910	-0.912	-0.883	-0.914	-0.810	-0.877	-0.811	-0.863
45	LR32	-0.58	0.232	-40.23	-0.536	-0.556	-0.511	-0.527	-0.452	-0.472	-0.431	-0.440
46	LR21	1.01	0.535	52.90	-0.902	-0.898	-0.874	-0.914	-0.894	-0.910	-0.832	-0.910
22	S-7	29.07	24.544	84.43	0.942	0.918	0.974	0.956	0.960	0.952	0.936	1.000
23	S-9	29.21	24.863	85.12	0.949	0.920	0.963	0.936	0.960	0.950	1.000	
24	S-12	26.06	19.506	74.86	0.961	0.959	0.950	0.952	0.943	1.000		
25	S-Ave	28.11	22.673	80.66	0.963	0.943	0.960	0.960	1.000			
47	LS-7	3.04	0.831	27.34	0.990	0.970	0.974	1.000				
48	LS-9	3.03	0.852	28.14	0.993	0.979	1.000					
49	LS-12	2.99	0.765	25.60	0.991	1.000						
50	LS-Ave	3.03	0.811	26.82	1.000							

number of samples : 20

L: log transformed  
S: soil moisture  
R: rising rate  
B: channel number

ルギーの十分な時間帯に各種の測定が実施されており、光量の少ない条件下における測定例が少ない。今後、異なる条件下で近赤外から赤外の各波長ごとに水分量の異なる土壤について測定する必要がある。

(2) 熱赤外データ

図4(A), (B)は各々、7:05, 9:35, 及び12:05の各時刻の裸地の地表温度と土壤含水比, 混合サンプルの表面温度と土壤含水比との散布図である。A, Bいずれも土壤含水比と地表温度とは7:05では正相関を, 9:35, 12:05では逆相関をなし, 地表温度が土壤中の水分量の多寡に密接に関係することを示し, 土壤水分の少ない土壤ほど早朝で低温, 日中で高温をなす。

土壤粒子間の孔げきを満たす水量の減少は土壤粒子の接触面を減少させ, また, 熱容量及び熱伝導度や熱拡散率を減少させるため, 熱の伝導が小さく, 大気と土壤との熱交換が土壤の浅層に限定される。そのため, 今回のような冬期の実験では, 夜間の著しい地表面冷却により地表近くの土壤から熱が放出し, 乾燥土が湿潤土よりも低い地表温度を示す。同様な理由で日中では逆に, 地表温度の顕著な上昇が認められる<sup>11)</sup>。

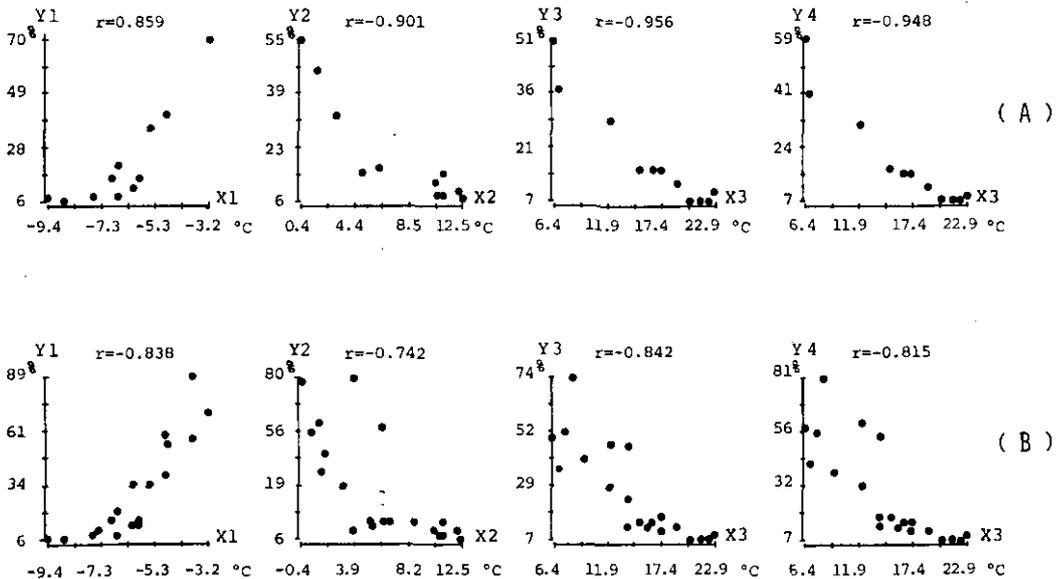


図 4 地表温度と土壤水分との散布図

Fig. 4 Scatter plots of soil moisture contents versus soil surface temperature

A: bare soil, B: complex surface, X, Y mens surface temperature and soil moisture, Index of X or Y: 1, 2, 3 means data collected at 7: 05, 9: 35 and 12: 05 respectively; Y4. average soil moisture.

表2の裸地データ、表3の混合データのいずれでも、土壤水分と地表温度とは高い相関を有し、熱赤外域においても、混合データより、裸地データにおける相関が高く、すでに述べたように地表の等質なことによるものと思われる。また、Aの裸地、Bの混合サンプルのいずれも、早朝で高い相関を示すが、9:35より12:05の方が、より高い相関係数を有する。

以上のことから、可視～近赤外データと土壤水分とは今回の実験のように、冬期の早朝では正相関を、日中では逆相関をなすことが知られる。可視～近赤外及び、熱赤外データと土壤水分の相関係数の値は日中では比較的高く、0.6～0.94を示す。特に熱赤外データでは早朝、日中を問わず0.83～0.98を示している。また、図3、4によると、ドットの分布は直線より曲線をなし、指数関数の当てはめ、又は変数変換による回帰分析が適当である。ここでは、変数変換による回帰分析によって裸地、混合サンプルの各々について、下記の土壤水分推定モデルを作成した。

	T	F	
EXP SMC 12=103.47-31.204 Ln 36	**	***	Model (1)
COM SMC 12=134.20-41.203 Ln 36	**	***	Model (2)

ただし、EXP SMC 12, COMSMC 12は、それぞれ裸地及び混合サンプルの土壤水分推定値、Ln 36は12:05に取得した地表温度のLog変換値、\*\*、\*\*\*は各々、1%、0.1%の有意水準を示す。

### (3) 土地被覆分類と土壤水分分布図図化

前述の土地被覆項目と可視～近赤外データ5チャンネルのMSS画像の濃度データに基づく判別結果(判別スコア)をCCTに出力した。既に報告した手法<sup>2,3)</sup>と同方法で、判別関数はマハラノビス平方距離の最小な土地被覆項目に未知データを分類する方法による。サンプルデータによる判別結果によると、判別効率は、コンクリート、スレート等では低く、未知データとして判別保留される比率が大である(表4)。これらの判別スコアのうち、疎らな植被の土地(水田、疎らな草地)と裸地(ワラ埋め込み砂地、砂地とシルト)の各スコアに相当する画像濃度に、前節で作成した2種類の水分推定モデルを適用し、土壤含水比を求めCCTに出力した。このCCTからカラーディスプレイ及びラインプリンターに分布図を出力できるが、写真1は裸地及び混合データ以外のスコアに対し、含水比としてコード、000を付与し白色に、水域を999として赤色に発色させ、北東から南西に向かって、木戸川、下横地、伊予坊、作田川、九十九里、真亀川、今泉、浜宿、白子町(牛込、市場)、南白亀川、宮成間の、土壤水分推定分布図を作成したものである。写真1によると、木戸川の作田川の間は土壤含水比は20～39%を示す一方、9%以下の水分の部分も比較的広い地域を占めている。作田川と真亀川間では40～49%であるが、真亀川の北では特に高い土壤水分が見られ、一部は湛水域となっている。真亀川と南白亀川間では40～60%の高い水分を示し、この地域には広い湛水域が認められる。南白亀川以南では30～49%の土壤含水比を示

表 4 土地被覆分類の判別効率

Table 4 Performance of classificatin of land cover in the Kujukuri coastal plain with airborne MSS data

Land cover No. Name	Number of sample	Number of land cover																												Efficiency		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		28	29
1 Paddy fieldA	59	1	9	3	0	0	0	0	2	0	1	0	1	3	0	0	2	19	6	0	2	0	1	0	2	5	0	0	0	1	68%	
2 Paddy fieldB	72	0	6	5	0	1	1	2	1	3	1	2	0	8	2	1	1	6	5	10	1	2	1	4	0	0	5	1	0	0	2	46
3 Green	51	2	0	0	0	1	1	1	2	0	1	8	4	1	2	2	2	3	9	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	3	2	51
4 Barley	40	1	0	0	1	3	2	0	0	5	3	2	3	1	4	0	0	0	3	1	2	2	1	0	3	1	1	0	1	0	55	
5 Radish	39	1	0	0	1	0	17	0	1	0	0	2	3	0	1	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	5	0	59	
6 Cabbage	28	0	1	0	0	0	1	4	0	0	2	8	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	4	54	
7 Welsh onion	25	2	0	2	0	2	1	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	7	0	1	1	0	0	0	0	2	0	1	0	1	25	
8 Green sprout	18	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	0	0	1	2	0	0	5	0	1	0	0	0	0	0	2	22
9 Straw	52	1	0	0	0	0	1	0	0	5	5	5	2	3	0	4	0	1	0	0	2	6	5	0	2	4	2	1	0	1	2	54
10 Pasture	17	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	7	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	53
11 Weed thin	8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75
12 Lawn	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	62
13 Weed mass	25	1	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	1	0	0	0	1	2	0	5	0	0	0	0	5	1	0	2	0	48
14 Pine	81	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	46	16	3	0	2	0	0	0	4	0	0	2	0	0	0	1	77
15 Japan cedar	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	83
16 Mixed	19	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	7	3	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	53
17 Wet sand	51	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	8	10	0	2	0	17	1	1	4	0	0	3	0	39
18 Dry sandA	99	0	8	5	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	4	20	35	0	1	15	0	0	3	0	0	0	1	71			
19 Dry sandB	99	2	2	2	0	4	3	0	1	4	6	0	4	7	13	3	0	7	0	0	1	4	13	2	1	5	8	3	0	1	3	41
20 Dry sandC	30	4	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	4	1	1	0	2	0	0	1	6	2	0	1	2	1	1	0	0	0	50
21 Silt	9	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	11
22 Water	58	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	7	0	0	0	42	0	0	0	0	0	1	0	72	
23 Concret	27	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	20	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	1	3	3	0	37
24 Asphalt	16	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	69
25 Straw thatchet	17	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	5	1	0	0	35	
26 Tile (roof)	19	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	0	3	3	1	0	42	
27 Slate	21	11	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	1	3	1	0	29		
28 Vinyl	46	1	0	0	1	0	4	1	3	0	0	0	1	0	0	0	1	1	2	0	0	0	5	2	0	3	4	15	2	33		
29 Vinyl & welsh	49	1	0	0	2	2	0	0	3	5	3	0	0	0	2	2	0	1	5	3	2	1	0	0	0	6	4	0	0	1	6	55

Number of samples : 1100

す。これらの高含水土壤は極地的に腐食の多い土壤の部分に発達するが、既に報告した<sup>3)</sup>ように、その分布は一般に離水砂洲や砂丘列等の浜堤、後背湿地等の走向に支配され、北微東～南微西走向の線状の分布をなす。

これらの高含水比土壤の地区は、真亀川南部の地域に認められ、今泉～浜宿～白子～市場付近では高含水比地区をなし塊状に分布している。また、農道が識別されるとともに、畑地及び、区画整理された水田の数筆ごとの水分分布が明りょうで、人工衛星搭載MSS(LANDSAT)データによる土壤水分分布図<sup>3)</sup>よりも詳細な土壤水分の分布状態が示されている。客土や盛土による地形改変や観測時期の違いなどにより、単純には比較できないが、LANDSAT搭載MSSデータによる水分分布図に示された南白亀川下流部の湛水域の分布<sup>3)</sup>は本図では顕著ではない。なお、本図

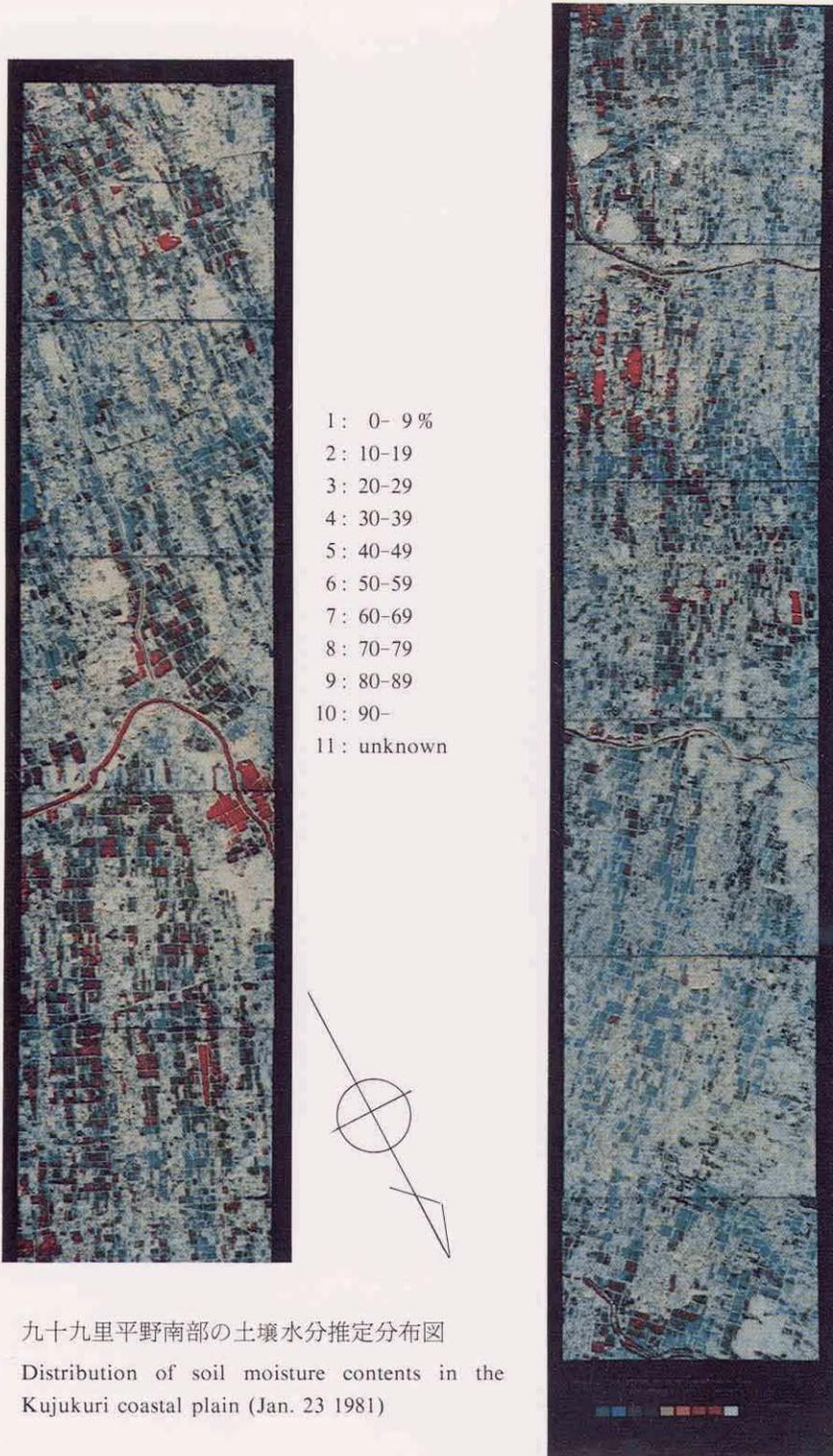


写真 1 九十九里平野南部の土壤水分推定分布図

Photo 1 Distribution of soil moisture contents in the Kujukuri coastal plain (Jan. 23 1981)

でも同様に屋敷林、平地及び建造物など日影の部分は水域として分類され、高い土壤水分として示される。

#### 4 まとめ

九十九里平野における航空機搭載 MSS 及び地上測定データの解析によると、砂～細砂よりなる裸地と若干の植被に覆われる地域では、適切な観測時期を選べば、可視～近赤外及び熱赤外データ（地表温度）から土壤含水比の定量的推定が可能であろう。本研究では一般に変数の Log 変換によりモデルを当てはめたが、指数関数の当てはめも可能である。既報の LANDSAT データによる土壤含水比推定モデルでは原データを変数として用いたが、これは LANDSAT データの場合、Log 変換しても高い相関を示さないためであるが、さらに実験事例を蓄積する必要がある。以上の検討結果をまとめると、以下のようである。

1. 近赤外データと土壤水分との関係については入射光の光量を変化するなど、各種の条件下における実験を行う必要がある。
2. 土壤水分推定モデルの作成では可視～近赤外データより、赤外データの有用性が高い。特に土地被覆が混合サンプル（水田、まばらな草地、ワラ埋め込み畑〈砂地〉等）のまばらな植被の土地であっても、推定モデルの作成は可能である。ただし、その植被の程度については、今後、検討する必要がある。
3. 航空機搭載 MSS データによる土壤水分分布図によると、巨視的な観察や地域差、特徴の把握が困難であるが、地盤沈下地域における湛水等の被害状況をはじめとする環境現象が、より詳細に示されるため、本手法は土壤水分推定分布図の作成手法として有用であろう。
4. モデル及び判別効率の改良により一時期の航空機及び LANDSAT 搭載の MSS データによる土壤水分分布図の作成が可能であるが、さらに、時期に左右されないモデルの開発のために実験を重ねる必要がある。

#### 謝 辞

本研究は特別研究の一環として実施したものであるが、航空機搭載 MSS データの取得では（財）日本造船振興財団、（株）東邦航空、（財）日本気象協会に協力いただいた。特に（財）日本造船振興財団の愛甲 敬氏（現在 気象協会）、岡寄修平の両氏にはデータ取得の際にお世話になった。記して、謝意を表する次第である。

なお、数値計算には国立公害研究所の電算機 HITAC-M 180 を使用した。本稿は第 9 回リモートセンシングシンポジウム（1983 年 11 月）及び、東北地理（1984 年 3 月）に発表した内容を再検討し、特別研究報告のために修正・加算したものである。

引用文献

- 1) Davis, C. F., R. A. Shuchman and G. H. Suits (1979): The use of remote sensing in the determination of beach sand parameters. Proceedings of the Thirteen International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 775-788.
- 2) 宇都宮陽二郎 (1980): LANDSAT CCT データによる九十九里地盤沈下地域の土壤水分の解析. 写真測量学会 昭和 55 年度秋期学術講演会発表論文集, 65-68.
- 3) 宇都宮陽二郎 (1981): サテライトリモートセンシングによる土壤含水比分布の地図化の試み. 地理学評論, **54**, 740-750.
- 4) Shuchman, R. A. and D. K. Rea (1981): Determination of beach sand parameters using remotely sensed aircraft reflectance data. Remote Sensing Environ., **11**, 295-310.
- 5) 深山一弥 (1981): 航空機 MSS による水田地帯のリモートセンシング. JAFSA RS REPORT812012, 181-194.
- 6) 池村雅司・野口 正・中沢保雄・寺川 陽 (1983): 浅層地下水把握のためのランドサットデータ処理. 日本リモートセンシング学会誌, **3**, 3-22.
- 7) 宇都宮陽二郎 (1982a): 熱赤外データによる土壤水分の計測手法に関する実験的研究. 写真測量とリモートセンシング, **21**, (2), 15-25.
- 8) 宇都宮陽二郎 (1982b): 熱赤外データによる土壤含水比の定量的推定に関する予察的研究. JAFSA RS REPORT822010, 95-109.
- 9) 宇都宮陽二郎 (1984): 航空機搭載 MSS 熱赤外データによる土壤含水比の計測. 東北地理, **36**, 39-45.
- 10) 宇都宮陽二郎 (1983): グランドツルースにおける二, 三の問題点について. 日本リモートセンシング学会, 第 3 回学術講演会論文集, 1-3.
- 11) Oke, T. R. (1978): Boundary Layer Climates. Methuen & Co. 39-40, 372p.

II-12

最良線形判別関数による  
MSS 画像の領域分類

Classification of Multispectral Images  
by the Best Linear Discriminant Function

飯倉善和<sup>1</sup>・安岡善文<sup>2</sup>

Yoshikazu IIKURA<sup>1</sup> and Yoshifumi YASUOKA<sup>2</sup>

要 旨

従来、MSS 画像の領域分類には最尤法による二次関数やフィッシャーの線形判別関数等が利用されてきた。後者は前者に比べて計算も容易であり、トレーニングデータの正規性や代表性に対して頑健であるが、各カテゴリーの共分散行列が等しいという強い仮定があるため、実際のデータへの適用には問題があった。本報告では分散が異なる場合の線形判別関数の簡便な計算法をミニマックス基準を評価基準として幾何学的に導出する。さらに本手法の妥当性を実データを用いて他の手法と比較することにより明らかにする。

Abstract

Multispectral images has been utilized in order to classify land use patterns. Maximum likelihood method and Fisher's linear discriminant function are two main methods, which has been investigated in the field of discriminant analysis theoretically. The latter method is easy to calculate and robust with respect to normality and representativity of training data. But its assumption of common covariance matrices for all categories makes this method unreasonable in practical use.

In this paper, we propose the simple algorithm for the calculation of the linear discriminant function, based on the geometrical analysis in which the difference in the

- 
1. 国立公害研究所 総合解析部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16 番 2  
Systems Analysis and Planning Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, 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小野川 16 番 2  
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

covariance matrices can be taken into consideration. The method is applied to the multispectral data to show its effectiveness compared with the other two methods.

## 1 はじめに

リモートセンシングで得られる多重分光画像 (MSS 画像) を用いて土地被覆状態を調査する手法が実用化されつつある。土地被覆分類は、MSS 画像の分光濃度特性が対象領域 (畑地、水域、裸地等) によってそれぞれ異なることを利用して、画像を分類するもので、対象領域の濃度特性をトレーニングデータ等からあらかじめ人間が教えることによって行う教師付分類と画像の持つ濃度情報のみから分類を行う教師なし分類に大別される<sup>1)</sup>。

このうち教師付分類法に属するフィッシャーの線形判別関数と最尤法による分類は、使用例も多く理論的考察もなされている<sup>2,3)</sup>。最尤法では、各対象領域の多重分光特性が多元正規分布することを仮定することにより一般に二次判別関数が同定される。一方フィッシャーの線形判別関数は、最尤法の特別な場合で各対象領域の共分散行列が等しいと仮定することにより同定される。

これらの分類手法の妥当性は MSS 画像の質と量に依存する。フィッシャーの線形判別関数は二次判別関数と比べて計算時間を要しないため大量のデータの処理には適している。一方最尤法はトレーニングデータの正規性や代表性が満足されている場合、理論的には最も誤分類が少ない手法である。特に各対象領域の共分散行列が異なる場合にフィッシャーの線形判別関数に比べて有利となる。ただしトレーニングデータに偏りがある場合、その影響が大きく出やすい傾向をもつ。すなわちデータの正規性や代表性に関してはフィッシャーの線形判別関数より頑健ではない。

上述のようにフィッシャーの線形判別関数を実際の MSS 画像の分類に適用する場合、最大の問題となるのは、各対象領域の共分散行列が等しいという非現実的な仮定である。この点を改良する手法として、Clunies-Loss ら<sup>4)</sup> は最良線形判別関数を提案した。基本的な考え方としては、各対象領域の共分散行列の違いを取り入れた定式化を用いて、最適な一次判別関数を同定しようとするものである。ただし、最良線形判別関数を特定化するためには、評価基準を規定する必要があり、一般的な形で取り扱う場合計算が複雑となる<sup>5)</sup>。

最良線形判別関数に関する文献はその後いくつか出ているが<sup>6,7)</sup>、主に 2 群の場合の理論的検討に関するものであり、リモートセンシングへ適用した例はまだない。

本論では、始めに出現率が未知の場合の分類法の評価基準について検討を加える。次に直観的かつ幾何学的な定式化を用いて、最良線形判別関数を特定化し、その主要な性質及び計算法を導出する。さらに多群への適用の際の問題点をふまえて、リモートセンシングで得られた MSS 画像の領域分割の例を紹介する。

## 2 分類法の評価基準

分類法を比較する場合、その評価基準が問題となる。判別分析では一般に平均誤判別率が評価

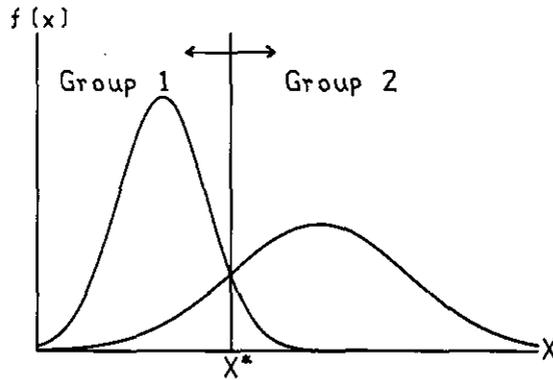


図 1 2群1変数の場合の分類  
 $f(x)$ は確率密度,  $x^*$ は分類の境界値

Fig. 1 Classification of two categories with one variable  
 $f(x)$  and  $x^*$  denote a probability density function and a boundary point of classification, respectively.

基準にとられる。

図1に2群1変数の場合の理論誤判別率を模式的に示した。理論誤判別率とは各群の確率分布が既知の場合の誤判別率の期待値である。以後本論では、データの正規性・代表性は満足されているものとして、理論誤判別率について検討する。

図中の  $x^*$  を分類の境界値とする場合、各群の誤判別率は次の式で与えられる。

$$P_1 = \int_{x^*}^{\infty} f_1(x) dx \tag{1}$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{x^*} f_2(x) dx \tag{2}$$

各群の出現率  $\pi_1, \pi_2$  が既知の場合、平均誤判別率は

$$\bar{P} = \pi_1 P_1 + \pi_2 P_2 \tag{3}$$

となり、これを最小とする  $x^*$  が最適な分類規則となる。

ところで、実際のデータでは出現率をあらかじめ与えることが問題となる場合が多い。このときは(3)式に代わる評価基準が必要となる。

統計的決定理論の分野において<sup>8)</sup>、出現率が未知の場合の代表的な評価基準は、ラプラスの基準とミニマックスの基準である。ラプラスの基準は出現率を等確率とした場合の平均誤判別率を最小とするものである。一方ミニマックスの基準は、出現率を最悪になるようにとった場合の平均誤判別率を最小とするものである。式で示せば次のようになる。

$$\text{ラプラスの基準} : \{x_L^* \mid \min_x (P_1 + P_2)/2\} \tag{4}$$

$$\text{ミニマックス基準} : \{x_M^* \mid \min_x \max_{\pi} (\pi_1 P_1 + \pi_2 P_2)\} \tag{5}$$

二つの基準に対して、出現率を変えて平均誤判別を求めると図2のようになる。この場合  $\pi_1$  が小さいとき、ラプラスの基準による分類は平均誤判別率が大きくなる。一方ミニマックス基準では  $P_1 = P_2$  となり、平均誤判別率は出現率に依存しない。 $P_1 = P_2$  という条件は確率分布関数の単調性からミニマックス基準をみたすための必要条件であることが多変数の場合にも当てはまる。したがって、一般にミニマックス基準は出現率に対して頑健性があるといえる。

以上の概念を2群多変数の場合で考えると最尤法に基づく2次判別関数はラプラスの基準を満足するが、ミニマックス基準は満足しない。フィッシャーの線形判別関数は一般にはどちらの基準も満足しないが、共分散行列が等しい場合に両者を共に満足する。最良線形判別は各基準に対して、違う一次関数が特定化されるが、本論で特定化するものはミニマックス基準を満足するものであることが、次節で示される。

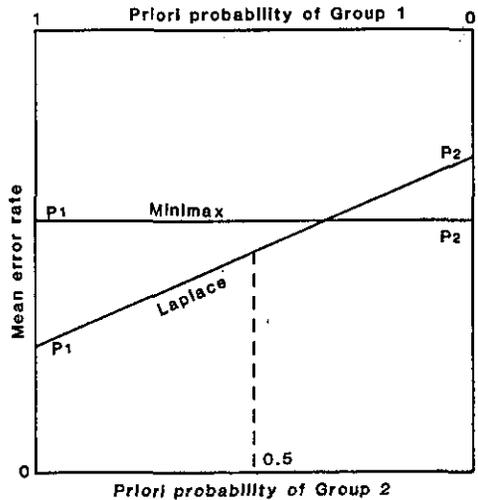


図 2 評価基準と平均誤判別率  
 横軸は各群の出現率  $\pi_1, \pi_2$ ,  
 縦軸は平均誤判別率。

Fig. 2 Criteria of classification and mean error rate  
 Top and bottom axes of abscissas show priori probabilities of category 1 and 2, respectively. Vertical axis shows mean error rate.

### 3 最良線形判別関数

#### 3.1 幾何学的導入

図3に二つの多元正規分布  $f_1, f_2$  に対するマハラノビス距離  $D$  を等高線の形で示した。 $D$  は次式で与えられるため等高線は楕円となる（等距離長円と呼ぶ）。

$$D_i = (\underline{x} - \underline{\mu}_i)' \Sigma_i^{-1} (\underline{x} - \underline{\mu}_i), \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

ただし、 $\underline{\mu}_i, \Sigma_i$  は各群の平均値と共分散行列である。

点  $x_0$  は  $D_1 = D_2$  でかつ両者の等距離長円が接する点であり、図より明らかなように  $\Sigma_i$  が特異とならない限り常にユニークに存在する。本論で検討する最良線形判別関数は点  $x_0$  を通りかつ両者の等距離長円に接する図中に示した直線である。

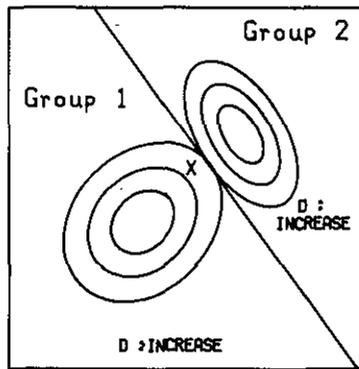


図 3 2群2変数の場合の最良線形判別関数  
変数平面上に等距離長円、最良線形判別関数  $\underline{a}^*$ 、接点  $x_0$  を示す

Fig. 3 Best linear discriminant function in the case of 2 categories and 2 variables  
Ellipses with equi-Mahalanobis distances, best linear discriminant function and a tangent point are shown in the plane of variables

#### 3.2 数学的定式化

多元正規分布  $f$  と一次関数  $\underline{a} (\underline{a}^t x - a_0 = 0)$  が与えられたとき、 $\underline{a}$  が接する等距離長円がある。そのときのマハラノビス距離を  $D^*$ 、接点を  $x_0$  とすると  $\underline{a}$  は楕円の接線の方程式として

$$(\underline{x}_0 - \underline{\mu})' \Sigma^{-1} (\underline{x} - \underline{\mu}) = D^* \quad (7)$$

とかける。(7)式が  $\underline{a}$  と同等になり、かつ  $x_0$  が接点となるためには、次の式を満足しなければならない。

$$\underline{a}\underline{a} = \Sigma^{-1}(\underline{x}_0 - \underline{\mu}) \quad (8)$$

$$\underline{a}\underline{a}_0 = D^* + (\underline{x}_0 - \underline{\mu})^t \Sigma^{-1} \underline{\mu} \quad (9)$$

$$(\underline{x}_0 - \underline{\mu})^t \Sigma^{-1} (\underline{x}_0 - \underline{\mu}) = D^* \quad (10)$$

上の3式より,  $\alpha, \underline{x}_0, D^*$  を求めることができる。

この  $D^*$  を  $D^*(f, \underline{a})$  接点を  $x_0(f, \underline{a})$  と表現すると, 最良線多判別関数は次のように定義できる。

定義: 与えられた  $f_1, f_2$  に対して次の式を満たす一次関数を最良線形判別関数と呼び,  $\underline{a}^*$  で示す。

$$D^*(f_1, \underline{a}^*) = D^*(f_2, \underline{a}^*) \quad (11a)$$

$$\text{かつ } x_0(f_2, \underline{a}^*) = x_0(f_2, \underline{a}^*) \quad (11b)$$

### 3.3 計算法

定義より接点  $x_0$ , マハラノビス距離  $D^*$  を用いて  $\underline{a}^*$  を示せば,  $f_1, f_2$  に対してそれぞれ次のようになる。

$$(\underline{x}_0 - \underline{\mu}_1)^t \Sigma_1^{-1} (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_1) = D^* \quad (12)$$

$$(\underline{x}_0 - \underline{\mu}_2)^t \Sigma_2^{-1} (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_2) = D^* \quad (13)$$

(12) (13)式が同じ直線を示すためには

$$\alpha (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_1)^t \Sigma_1^{-1} = (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_2)^t \Sigma_2^{-1} \quad (14)$$

$$\alpha \{D^* + \underline{\mu}_1^t \Sigma_1^{-1} (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_1)\} = D^* + \underline{\mu}_2^t \Sigma_2^{-1} (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_2) \quad (15)$$

が必要であり,  $x_0$  が接点であるためには

$$(\underline{x}_0 - \underline{\mu}_1)^t \Sigma_1^{-1} (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_1) = D^* \quad (16)$$

$$(\underline{x}_0 - \underline{\mu}_2)^t \Sigma_2^{-1} (\underline{x}_0 - \underline{\mu}_2) = D^* \quad (17)$$

となる。(16), (17)式を(15)式に代入すれば, (14), (15)式より,  $\alpha$  と  $x_0$  が求まる。

実際の計算においては次のアルゴリズムが有効である。

STEP1 :  $\alpha = 1$  とおく

STEP2 : (14)式から  $x_0$  を求める

STEP3 : (16), (17)式に  $x_0$  を代入して,  $D_1^* D_2^*$  を求める。 $D_1^* = D_2^*$  ならば求める解である。

STEP4 :  $\alpha' = \alpha \sqrt{D_1^*/D_2^*}$  としてSTEP2に戻る

4~5 回の反復で, 必要な精度の解を求めることが通常可能である。

### 3.4 最良性

本論で特定化した最良線形判別関数  $\underline{a}^*$  が, 一次関数の中で平均誤判別率のミニマックス基準を満たすことを示す。

ミニマックス基準の必要条件が  $P_1 = P_2$  になることは第2章の議論より明らかである。一方等距離長円に接する直線 (一般には超平面) の外側の確率は自由度1の  $\chi^2$  分布を用いて  $Pr\{\chi^2 > D\}/2$  で与えられることが知られている<sup>9)</sup>。したがってミニマックス基準の必要条件を満たす一次判別関数は,  $f_1, f_2$  の各等距離長円に同じマハラノビス距離で接していなければならない。 $\underline{a}^*$  は前節の定義により二つの確率分布  $f_1, f_2$  に同じ距離で接する。したがって  $P_1 = P_2$  となり, ミニマックス基準の必要条件を満たす。

次に十分条件を検討する。二つの等距離長円に接する一次関数は  $\underline{a}^*$  を含めて3とおり考えられる。図4にそれぞれを模式的に示した。図4(a)は  $D^* > D$  の場合であるこのとき  $\chi^2$  分布の性質より  $Pr\{\chi^2 > D^*\} \leq Pr\{\chi^2 > D\}$  となり  $\underline{a}^*$  より誤判別率は大きくなる。また(c)で示した  $D^* < D$  の場合には一次関数より,  $f_1, f_2$  の中心は同じ領域になる。したがってどちらかの誤判別率は  $1/2$  より大きくなり, 明らかにミニマックスの基準を満足しない。したがって等距離長円が

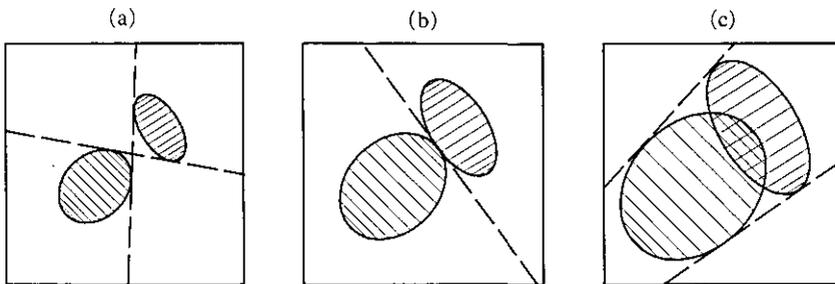


図 4 等距離長円と接する一次関数のとおりのケース

Fig. 4 Three cases of tangent linear function with equi-Mahalanobis distance

- (a)  $D < D^*$
- (b)  $D = D^*$
- (c)  $D > D^*$

接する(b)の場合がミニマックスの基準を満足するものとなる。すなわち  $\hat{a}^*$  がこの意味で一次関数の中で最良である。

#### 4 MSS 画像への適用

##### 4.1 多群の場合の問題点

図5は3群2多数の場合の各手法による分類の結果を変数軸上に示したものである。手法としてはフィッシャーの線形判別関数, 本論で特定した最良線形判別関数, 最尤法に基づく二次判別関数を用いた。図中には各群の等距離長円と分類された領域が示されている。

多群の場合, 判別関数が複数個必要となりそれぞれ交わる部分がでてくるため, 厳密な意味で評価基準を満足するように一次関数や二次関数を特定化することは困難である。しかし近似的には2群の場合と同様に考えることができよう。

フィッシャーの線形判別関数では, 共分散行列として各群の共分散行列の平均を用いた。他と比べて, 分散の大きいI群の領域が小さくなっており, かつ分類に共分散行列の違いが反映されていない。

最良線形判別関数では各群の領域は線形判別関数の結果と比べて, 二次判別関数に近く, 共分散行列の違いを反映している。ただし, 図中の白抜き領域は分類が不能となった領域である。これは最良線形判別関数では分類に際して線形順序が成立しない場合が生ずるためである。このため実データを用いて分類する際にも各群の組み合わせに対する一対比較が必要となる。他の手法では線形順序が成立するため一対比較は群の数より1個少なくてもよい。群の数を  $N$ , 変数の数を  $M$  とした場合, 分類に必要なカケ算の数は, 最良線形判別関数の場合  $\frac{N(N-1)}{2} \cdot M$ , 線形

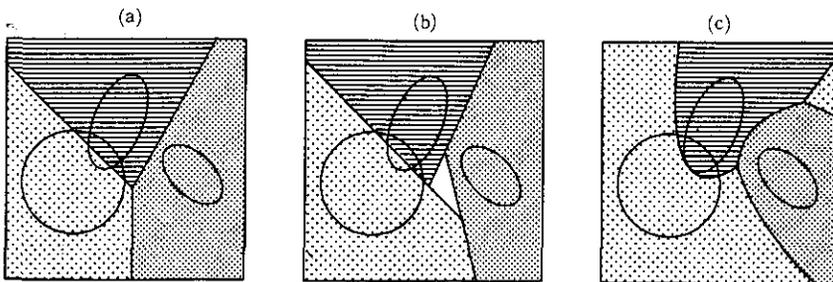


図 5 変数平面上での判別関数の比較  
 (a) フィッシャーの線形判別関数  
 (b) 最良線形判別関数  
 (c) 最尤法に基づく二次判別関数

Fig. 5 Comparison of discriminant functions in the plane of variables  
 (a) Fisher's linear discriminant function.  
 (b) Best linear discriminant function.  
 (c) Quadratic discriminant function by Maximum likelihood method.

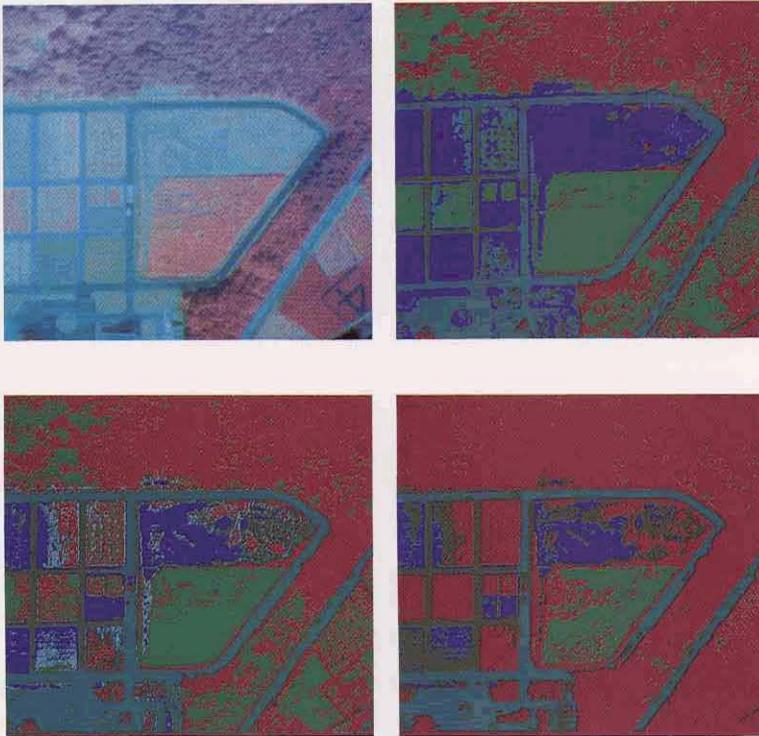


図 6 MSS 画像と分類結果

- (a) MSS 画像
- (b) フィッシャーの線形判別関数
- (c) 最良線形判別関数
- (d) 最尤法に基づく二次判別関数

Fig. 6 Results of classification with original MSS image

- (a) Original MSS image
- (b) Fisher's linear discriminant function
- (c) Best linear discriminant function
- (d) Quadratic discriminant function by Maximum likelihood method

判別関数と最尤法ではそれぞれ  $(N-1) \cdot M$ ,  $(N-1) \cdot M^2$  となる。したがって群の数が多い場合には計算時間という観点からは線形判別関数よりかなり劣る。

最尤法で問題となるのは分散の大きな群の領域が他に比べて極端に広がることである。これは変数の値が離れているところでの尤度はほとんど分散の大きさに依存するためであり、図中でも飛び地としてそれが現れている。また変数の数が多い場合に計算時間がかかる。

#### 4.2 MSS 画像の領域分類

最良線形判別関数による分類手法を実際の MSS 画像に適用した。使用した MSS 画像は国立公害研究所の実験ほ場で高度約 400 m からマルチバンドカメラ (IS MK-1) により撮映したものである。撮映したフィルムをドラムスキャナーを用いてデジタル化し、各バンドの画像をアフィン変換により重ね合わせた。分類には青、赤、近赤外の 3 チャンネルのデータを使用した。

分類結果を図 6 に示した。図 6(a) は MSS 原画像 (上記 3 チャンネルの合成)、図 6(b)~(d) はそれぞれフィッシャーの線形判別関数、本論文で提案した最良線形判別関数及び最尤法による分類の結果である。トレーニングエリアとしては、A: 松林、B: 舗装道路、C: 裸地、D: 草地、E: 未舗装道路の五つのカテゴリーを選んだ。

最良線形判別関数による分類結果で分類不能な地域 (図 5(b) 参照) は白抜きで表示した。前節で指摘したように、最尤法では分散の大きなカテゴリーにより多く分類される傾向があるが、図 6 においても、分散の大きな松林 (カテゴリー A: 図中で赤色) が他に比較し広い範囲を覆っている。全体として最良線形判別関数は、これまで代表的であった、フィッシャーの線形判別関数、最尤法の両者の欠点を補った中間的な傾向を示しているといえる。

#### 5 おわりに

本論ではミニマックス基準を評価基準とした場合の最良線形判別関数を幾何学的に導出し、その計算法を示した。一般の最良線形判別関数に比べて、直観的にも妥当であり計算も容易であるため MSS 画像の分類においても、フィッシャーの線形判別関数や最尤法とともにその適用を検討する価値があるものと考えられる。

今後、計算時間・出現率に対する頑健性、共分散行列の違いといった本論で検討した観点に加えて正規性や代表性に対する頑健性という観点から、これらの分類手法をさらに比較検討する必要があるだろう。

引用文献

- 1) 藤村貞夫・豊田弘道・愛田 敬・鈴木康志 (1978): マルチスペクトル画像を用いた自動識別手法の比較. 計測自動制御学会論文集, **14** (3), 269-276.
- 2) Lachenbruch, P.A. (1975): Discriminant Analysis, Hafner Press.
- 3) Lachenbruch, P.A. and M. Goldstein (1975): Discriminant analysis, *Biometrics*, **35**, 69-85.
- 4) Cluniess-Ross, C.W. and R.H. Riffenburgh (1960): Geometry and linear discrimination. *Biometrika*, **47**, 195-189.
- 5) 米田桂三・多賀保志・森 俊夫 (1981): 統計学の応用と演習. 同文書院.
- 6) Anderson, T.W. and R.R. Bahadur (1962): Classification into two multivariate normal distributions with different covariance matrixes. *Ann. Math. Stat.*, **33**, 420-431.
- 7) Marks, S. and O.J. Dunn (1974): Discriminant functions when covariance matrices are unequal" *J. Am. Stat. Assoc.*, **69**, 555-559.
- 8) 宮沢光一 (1971): 情報決定理論序説, 岩波書店.
- 9) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・古澤 正 (1971): 多変量解析法. 日科技連.

II-13 レーザーレーダー画像強調問題の最適化に  
よる定式化

Optimization Formulation of Enhancement Problems of  
Laser Radar Images

宮本定明<sup>1</sup>・大井 紘<sup>2</sup>・内藤正明<sup>3</sup>・小林正紀<sup>4</sup>

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

要 旨

大気観測用レーザーレーダーによる画像から多くの情報を取り出すには、濃度階調変換による画像強調を行わなければならない。画像の性質から、変換のクラスは区分線形変換に限られる。ここでは、この強調問題を画像ヒストグラムのエントロピーの最適化に帰着させる。さらに、エントロピーと密接な関連をもつ最適量子化基準を導入し、この問題を考えるのに適した最適化問題の族を考察する。大型レーザーレーダーによる画像にこれらの方法を適用し、比較検討を行う。

Abstract

A family of optimization procedures are developed for the enhancement of contrast of laser radar images based on histogram transformation. Here the transformation from input

1. 昭和55~59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. (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小野川16番2  
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, 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小野川16番2  
Systems Analysis and Planning Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
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 電気工学科 〒275 千葉県習志野市)  
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Department of Electrical Engineering, Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275, Japan.)

pixel data to output gray-scale picture is confined to a class of piecewise linear transformations. Although contrast enhancement is necessary in a laser radar image, general nonlinear transformation should be avoided, since they may induce unexpected distortions on the output picture, which cause difficulties in the specialists' evaluation of the picture.

Therefore the standard histogram flattening is useless. A family of interrelated criteria, i.e., histogram entropy and quantizing errors by Elias are introduced. Three classes of piecewise linear transformations are also introduced as admissible controls to each of the criteria. These procedures are applied to actual laser radar images and their effects are discussed. Although this method is developed for laser radar images of atmospheric measurement, it is applicable to various pictures in scientific measurement.

## 1 はじめに

本稿では、ヒストグラム変換によって、レーザーレーダー画像のコントラストを高める問題を考察する。通常、この問題は、ヒストグラム平坦化によって解決されるが、ここでは、ヒストグラム変換のクラスを区分線形変換に限定する。そこで、ヒストグラム平坦化がエントロピーを最大にする性質に着目し、この画像強調の問題を、エントロピー評価基準の最適化に帰着させる。

レーザーレーダー画像の強調問題の性質は、この最適化問題を拡張し、構造化することにより一層明確となる。一般に、あるシステムにおける最適化を考える場合、評価基準と許容制御クラスには様々な選択肢がある。この問題では、エントロピー最適化からはじめて、評価基準と許容制御クラスを広げていくことができる。このとき、評価基準として、エントロピーと密接な関係をもつ最適量子化基準を導入することができる。

このようにして構造化された画像強調——最適化の枠組みにおいて、実際のレーザーレーダー画像の処理を行う。ここで考える区分線形変換クラスでは、制御パラメーターの数は少ないので、最適化アルゴリズムには特に工夫をこらす必要はない。

本稿の方法は、レーザーレーダー画像の経験的処理に基づいて開発されたものではあるが、レーザーレーダーに限らず、より広い範囲の画像に適用できる考え方に立脚している。したがって、以下の記述では、レーザーレーダー以外の画像をも含んだ形での、一般的な画像処理の観点を中心とする。

## 2 問題の定式化

ここで扱うレーザーレーダー画像データや出力画像の濃淡値は離散的な値をとるが、以下では、説明の都合上、それらが連続であるかのようにみなすことがある。このことは、以下の議論を本質的に変えるものではない。

一般に、測定から得られた画素データを出力画像の濃淡に変換する場合、図1の破線のような線形変換がまず考えられる。この変換では、入力画素データの最大値が出力濃淡の最大値に、データの最小値が濃淡の最小値に対応し、その間の値には線形の対応関係がある。多くの画像では、

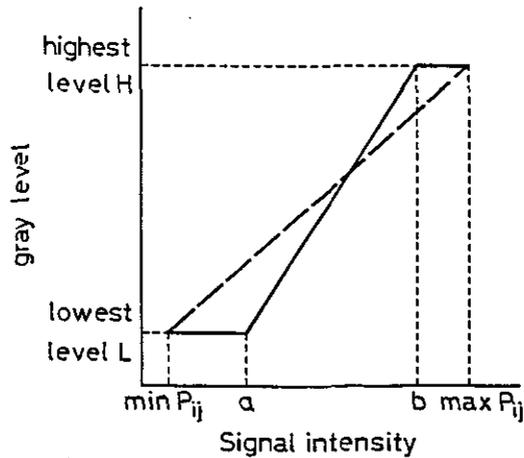


図 1 入力画素データから出力濃淡レベルへの線形及び区分線形変換

Fig. 1 Linear and piecewise linear transformations from input pixel data to output gray-levels

この線形変換では不十分で、図1の実線のような区分線形変換が用いられる<sup>1)</sup>。この変換は、クリッピングを伴う線形変換<sup>2)</sup>とも呼ばれ、画素データのうち、一部の区間に対応するものだけを線形に表示することによって、画像のコントラストを高め、より多くの情報を得ようとするためのものである。

この区分線形変換では、データのどの部分をクリッピングするかを決めなければならない。このことは、図1の実線において、パラメーター  $a$ ,  $b$  の値を決定することに他ならない。通常、これらのパラメーターは、あらかじめ経験的に決められているか、画像を評価する専門家により試行錯誤的に探索される。

ここで、次の問題が生じる。すなわち、何らかの評価基準に基づいて、表示区間、すなわちパラメーター  $a$ ,  $b$  を自動的に決定できないか。

試行錯誤的にパラメーターが決められている場合、もし、表示区間を自動的に決定できれば、作業の効率化につながる。経験的にパラメーターがあらかじめ固定されている場合でも、別の評価基準による区間決定を行ってみて、従来の結果と比べることによって、経験的方法の見直し、再評価が行えるであろう。

いま、クリッピングの意義が、画像のコントラストを改善することであった点に注目しよう。一般に、画像のコントラストを強調するには、ヒストグラム平坦化が基本的な手法である。この手法の有効性は、平坦化によって出力画像のもつ情報量が最大になることにより裏付けられている<sup>1)</sup>。平坦化の方法は、入力画素データから出力画像への非線形変換を引き起こすので、経験的に用いられている区分線形変換とは性質の異なる出力をもたらす、当面の問題には適用できないが、

この情報量最大化の性質は有用である。

そこで、ヒストグラム平坦化は、入力画素データから出力画像への変換において、非線形変換を含む変換のクラスによる情報量評価基準の最適化問題の解である、と逆に考えてみよう。このとき、上の表示区間決定の問題は、区分線形変換のクラスによる情報量基準の最適化と考えるのが自然である。

問題を定式化するため、記号を導入しよう。対象とする入力画素データを画素  $(i, j)$  に対する実数値  $p_{ij}$ ,  $1 \leq i \leq m$ ,  $1 \leq j \leq n$  で表す。一方、出力画像の濃淡レベルを  $\{1, 2, \dots, K\}$  とする。強調される前の入力画素データは、しきい値  $c = (c_1, c_2, \dots, c_{K-1})$  を伴う変換  $T$  によって、出力濃淡レベルに写される。

$$T(p_{ij}) = \begin{cases} 1 & (p_{ij} \leq c_1) \\ k & (c_{k-1} < p_{ij} \leq c_k; k = 2, 3, \dots, K-1) \\ K & (c_{K-1} < p_{ij}) \end{cases}$$

$$1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n$$

本節の初めでは、入力データから出力濃淡への変換を連続値から連続値への写像のように述べたが、出力レベルが離散値をとる場合でも、議論に本質的な変更はない。例えば図1の破線に対応する線形変換は、次式をみたま等間隔のしきい値に対応する。

$$c_1 - \min_{i,j} p_{ij} = c_2 - c_1 = \dots = c_{K-1} - c_{K-2} = \max_{i,j} p_{ij} - c_{K-1} > 0 \quad (1)$$

また、クリッピングを伴う区分線形変換は、パラメーター  $a, b$  を固定したとき、

$$c_1 = a, c_2 - c_1 = c_3 - c_2 = \dots = c_{K-1} - c_{K-2} > 0, c_{K-1} = b \quad (2)$$

で置き換えることができる。

一方で、しきい値  $c$  を固定したとき、それぞれの出力濃淡レベル  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) に写される画素  $(i, j)$  の数を  $h_k$  としよう。 $c$  に対してヒストグラム  $(h_1, h_2, \dots, h_K)$  が定まるので、 $h_k = h_k(c)$  と表し、 $h(c) = \sum_{k=1}^K h_k(c)$  と置く、そこで、ヒストグラムのエントロピーを次式で定義する。

$$H(c) = - \sum_{k=1}^K \frac{h_k(c)}{h(c)} \log \frac{h_k(c)}{h(c)} \quad (3)$$

先に述べたように、ヒストグラム変換による画像強調の問題を最適化と考えれば、しきい値が制御パラメーターに対応する。そこで、しきい値のクラスとして、

(i) (単調変換)

$$Cl = \{c \mid c_1 < c_2 < \dots < c_{K-1}\} \quad (4)$$

(ii) (両端以外等間隔の変換)

$$Cl_1 = \{c \mid c_1 = a, c_{K-1} = b, c_2 - c_1 = \dots = c_{K-1} - c_{K-2} > 0\} \quad (5)$$

を考えよう。(i)は非線形変換をも含むすべての変換に対応するしきい値を表す。(ii)は  $a, b$  を動かしたとき生じる区分線形変換のクラスに相当する。

先に述べたことから、ヒストグラム平坦化は、最適化

$$\max_{c \in Cl} H(c) \quad (6)$$

に他ならない。このことから、区分線形変換による画像強調は

$$\max_{c \in Cl_1} H(c) \quad (7)$$

として定式化される。問題(7)では、実際に動かすパラメーターは  $a, b$  の二つである。

一般に、実システムにおける工学的問題の定式化は一通りに定まるものではない。システム工学の観点からすれば、むしろ、異なる定式化の方法を比較的検討することが、真の問題解決のために望ましいといえる。

この見方から、上のように定式化された画像強調の問題をさらに拡張し、構造化することができる。このために、一般に、システムの最適化を行う場合、評価関数と許容制御のクラスには、様々な選択の可能性があることに注意しよう。

現在の問題に立ち戻って、許容制御のクラスについて検討しよう。既に、二つのクラス  $Cl, Cl_1$  を考えた。ところで、大気汚染の計測という観点からは、高濃度の汚染に対応するような強い入力信号の部分の線形に表示する必要性がしばしば生じる。このためには、図1の区分線形変換において、 $b = \max_{i,j} p_{ij}$  と固定することによって、強い信号の部分がクリッピングされないようにする必要はある。

逆に、バックグラウンド汚染などを調べる場合、高濃度部分はクリッピングされてもよいが、低濃度の部分は線形に表されなければならない。この場合、図1の区分線形変換において、 $a = \min_{i,j} p_{ij}$  とし、 $b$  のみを動かすのがよい。これらのことから、さらに検討すべき許容制御クラスとして

(iii)

$$\begin{aligned} Cl_2 &= \{c \mid c_1 = a, c_2 - c_1 = c_3 - c_2 = \dots = c_{K-1} - c_{K-2} \\ &= \max_{i,j} p_{ij} - c_{K-1} > 0\} \quad (8) \end{aligned}$$

(iv)

$$Cl_3 = \{c \mid c_1 - \min_{i,j} p_{ij} = c_2 = c_1 = \dots = c_{K-1} - c_{K-2} > 0, c_{K-1} = b\} \quad (9)$$

が考えられる。実際に動かせるパラメーターは、 $Cl_2$ では、 $a$ 、 $Cl_3$ では  $b$ のみである。

次に、評価基準について再検討してみよう。先には、ヒストグラム平坦化から出発して、エントロピー評価基準を得たが、これと類似の性質をもつ評価関数は他にないだろうか。

連続信号の最適量子化の問題は古くから考察され、情報量の最大化と密接な関係があることがわかっている<sup>3,4)</sup>。最適量子化の観点から画像のヒストグラム変換を論じた例もある<sup>5)</sup>。そこで、ここでは、最適量子化基準をエントロピーと比較すべき他の評価関数と考えよう。最適量子化のためには、様々な評価基準が提案されているが、ここで取り上げるのは、Elias<sup>4)</sup>による

$$M_r(c) = \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} (c_{k+1} - c_k)^r \int_{c_k}^{c_{k+1}} p(x) dx \right\}^{\frac{1}{r}}, \quad r > 0 \quad (10)$$

(ただし、 $c_0 = \min_{i,j} p_{ij}$ 、 $c_K = \max_{i,j} p_{ij}$ とする)。

の最小化  $\min M_r(c)$  である。ここで、 $p(x)$  は信号の確率密度関数であるが、ここでは画素データのヒストグラムで置き換えられる。

この評価関数を選ぶ理由は次のとおりである。

(a) 他の量子化基準は、しきい値  $c$  のほかに、区間  $(c_k, c_{k+1})$  の信号が量子化された値  $y_k$  を必要とするが、一方、現在の問題では、信号が量子化される値そのものは意味をもたない。Elias の基準(10)では  $y_k$  は必要でないので、現在の問題に適用しやすい。

(b) いま、

$$\lim_{r \rightarrow 0} M_r(c) = M_0(c)$$

表 1 区分線形変換による画像強調——最適化問題の構造

Table I Structure of the enhancement problem by optimization with the piecewise linear transformations

criterion class of admissible controls	$H$	$M_1$	$M_2$
	$Cl$	histogram flattening	×
$Cl_1$	○	○	○
$Cl_2$	○	○	○
$Cl_3$	○	○	○

$$\lim_{r \rightarrow \infty} M_r(c) = M_\infty(c)$$

とおく。クラス  $C_l$  における  $M_0$  の最適解は、 $K \rightarrow \infty$  のとき、ヒストグラム平坦化に近づくことが知られている<sup>4)</sup>。大ざっぱにいえば、 $M_0$  はエントロピー  $H$  に近い性質をもつ。また一方で、 $M_\infty(c) = \max_{1 \leq k \leq K-1} (c_{k+1} - c_k)$  であるから<sup>6)</sup>、 $M_\infty$  は(1)式で与えられる等間隔の量子化を与える。このことは、パラメーター  $r$  を変化させることによって、エントロピーに近い基準から、線形変換に至る連続的に変化する評価基準が得られたことを意味し、ある意味でエントロピーよりも柔軟で扱いやすい基準であるといえる。

以下の応用例では、すべての  $r$  に対する評価  $M_r$  を試みることはできないので、 $M_1$  と  $M_2$  のみを用いることにする。このようにして得られた最適化問題の構造を表1に示す。表1の×部分は現在の問題では考慮する必要がない。したがって考察すべき部分は、○印の部分である。すなわち、一つの入力画素データに対して、9種類の最適化が考えられる。

### 3 レーザーレーダー画像への適用

ここで扱うデータは、国立公害研究所の大型レーザーレーダー<sup>7)</sup>によって得られたものである。また、画像強調を行う前の入力画素データを得るまでの前処理は、国立公害研究所で開発されたデータ処理システム及びソフトウェアによった<sup>8)</sup>。

図2は1981年11月12日8時1分に測定されたレーザーレーダー画像である。この図では大気のはほぼ水平な断面が示されている。図の上方は北向きで、国立公害研究所の西側4~10 kmの範囲を測定している。また、レーザーレーダーの仰角は1.9°である。この画像では10個( $K=10$ )の出力濃淡レベルを用い、線形変換(1)によっている。この画像は、強調を考える前の画像という意

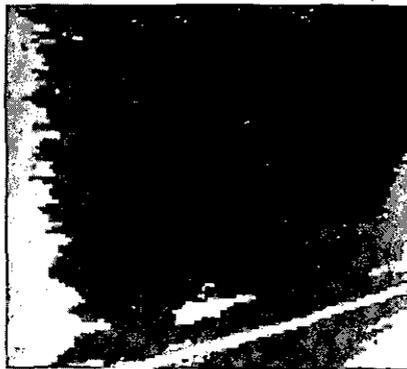


図 2 線形変換によるレーザーレーダー画像 (例1)

Fig. 2 A laser radar image with linear transformation from input data to output gray-levels (Example 1)



図 3 例 1 におけるヒストグラム平坦化の結果

Fig. 3 The result of histogram flattening ( $\max H(c)$  with  $c \in Cl$ ) on Example 1



図 4 例 1 における  $Cl_1$  によるエントロピー最適化の結果

Fig. 4 The result of  $\max H(c)$  with  $c \in Cl_1$  on Example 1

味で、画像強調のための入力画素データのようにみなせるので、以下、線形変換(1)による画像を原画像と呼ぶ。

このデータについて、クラス  $Cl$ ,  $Cl_1$ ,  $Cl_2$ ,  $Cl_3$  によるエントロピー最適化の結果をみよう。以下の画像では、すべて 10 個 ( $K = 10$ ) の出力濃淡レベルを用いている。図 3 はクラス  $Cl$  によるエントロピー最大化、すなわち、ヒストグラム平坦化の結果である。平坦化には、電子技術総合研究所の作成になる SPIDER サブルーチンライブラリー<sup>9)</sup>を用いた。ただし、レーザーレーダー画像には一般に欠測値が含まれるので、欠測値を除いた処理を行うように、ソースプログラムを一部修正した。図 4 は  $Cl_1$  による最適化の結果である。最適解を求めるために、領域

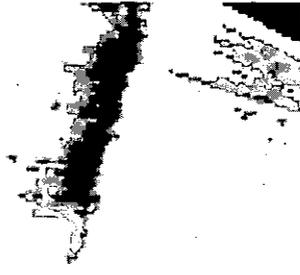


図 5 例 1 における  $Cl_2$  によるエントロピー最適化の結果

Fig. 5 The result of  $\max H(c)$  with  $c \in Cl_2$  on Example 1

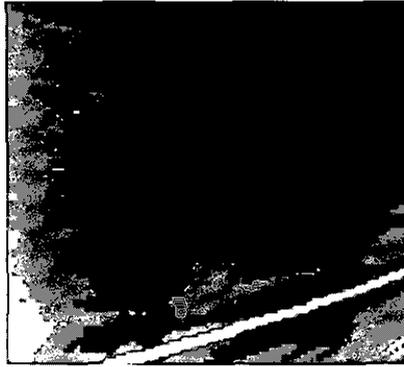


図 6 例 1 における  $Cl_3$  によるエントロピー最適化の結果

Fig. 6 The result of  $\max H(c)$  with  $c \in Cl_3$  on Example 1

$$\left\{ (a, b) \mid \min_{i,j} p_{ij} < a < \max_{i,j} p_{ij}, \min_{i,j} p_{ij} < b < \max_{i,j} p_{ij}, a < b \right\} \quad (11)$$

を、1 辺  $l = (\max_{i,j} p_{ij} - \min_{i,j} p_{ij}) / 20$  の小正方形に分割し、生じた格子点上を順次探索した。精密な最適解を求めることがここでの目的ではないので、このようなあらい探索でも十分と思われる。図 5、図 6 は、それぞれ  $Cl_2$  及び  $Cl_3$  による最適化の結果である。最適解は、 $Cl_2$  の場合は区間  $\min_{i,j} p_{ij} < a < \max_{i,j} p_{ij}$  を、 $Cl_3$  の場合は  $\min_{i,j} p_{ij} < b < \max_{i,j} p_{ij}$  をそれぞれ 20 等分し、分点上を探索した。

図 4 は原画像に比べてコントラストが格段に改善されている。また、ヒストグラム平坦化 (図 3) の結果と比べてみても見たところほとんど差がない。さらに図 4 と図 5、図 6 を比べよう。図

5は図4に比べて、高濃度部分の濃淡変化がより明りょうになっており、パラメーター $b$ を固定した効果が現れている。図6の場合、 $a$ を固定したため、画面は全体に暗く、原画像に近い。

なお、図2~6の高濃度部分は、大気混合層の上部に相当する。これらの図が大気のななめ断面を表すことから、汚染物質が蓄積する混合層から、その上方にかけての汚染濃度の変化が示されているといえる。

図7は1982年2月8日10時45分に測定された画像である。この画像も大気の水平断面を表し、図の上方は北で、国立公害研究所の東5~25kmの地域を測定している。この図は、図2と同様、線形変換(1)を用いている。

図7を原画像として、次にエントロピー及び最適量子化基準の最適化結果を比較してみよう。図8、図9、図10はそれぞれエントロピー $H$ の最大化、量子化基準 $M_1$ の最小化及び $M_2$ の最小

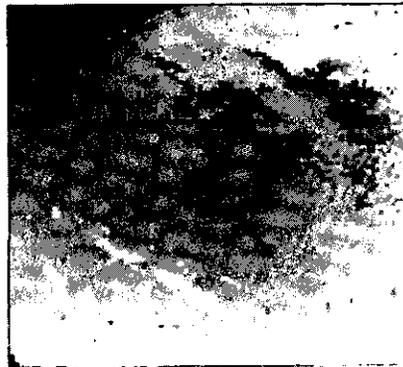


図 7 線形変換によるレーザーレーダー画像 (例2)

Fig. 7 Another laser radar image with linear transformation (Example 2)



図 8 例2における $Cl_1$ によるエントロピー最適化の結果

Fig. 8 The result of  $\max H(c)$  with  $c \in Cl_1$  on Example 2

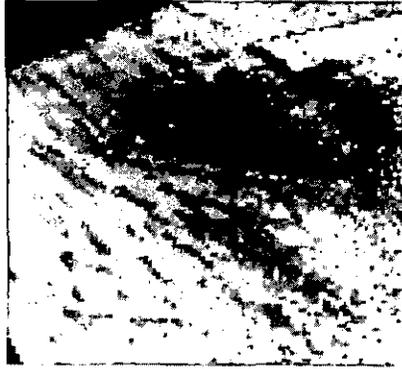


図 9 例 2 における  $C_I$  による量子化基準  $M_1$  最適化の結果  
Fig. 9 The result of  $\min M_1(c)$  with  $c \in C_I$  on Example 2

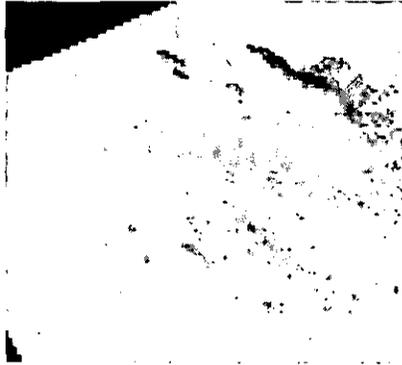


図 10 例 2 における  $C_I$  による量子化基準  $M_2$  最適化の結果  
Fig. 10 The result of  $\min M_2(c)$  with  $c \in C_I$  on Example 2



図 11 例 2 におけるヒストグラム平坦化の結果  
Fig. 11 The result of histogram flattening on Example 2

化の結果である。許容制御クラスはすべて  $Cl_1$  によっている。最適解は、図 4 を得たときのように、領域 (11) を分割した格子点上を探索して求めた。

図 8~10 をみると、 $M_2$  の最適化 (図 10)、 $M_1$  の最適化 (図 9)、 $H$  の最適化 (図 8) の順に出力画像の濃淡が濃くなっていくことがわかる。このことは、前節での予想に一致することに注意しよう。また、図 7 では図の下半分にほとんど変化がみられないが、図 8、図 9 とみていくに従って、下半分にも様々なパターンが現れてくるのがわかる。さらに、図 11 はヒストグラム平坦化の結果を示すが、この場合も、区分線形変換 (図 8) は、非線形変換 (図 11) と同様の出力をもたらすといえよう。なお、図 7~11 の上部にみられる高濃度部分は、排煙によると考えられる。

これらの画像を含む 22 枚のレーザーレーダー原画像について上記の処理を行った。図 12 はそれぞれの原画像に対して、クラス  $Cl_1$ 、 $Cl_2$ 、 $Cl_3$  によるエントロピー最適化を行った結果、どの程度エントロピーが増加したかを示している。 $Cl_2$  と  $Cl_3$  を比較してわかるように、一つのパラメーターのみを動かす場合、パラメーター  $b$  を動かすほうが、エントロピーの増加という点からみて、平均して効率がよい。

図 13 は、 $Cl_1$  によって  $H$ 、 $M_1$ 、 $M_2$  を最適化した結果とヒストグラム平坦化の結果を、エントロピーを基準に比較したものである。平坦化によるエントロピーが画像によって少しずつ異なるのは、欠測値を除いた画素数が各々の画像で異なること、及び、強調される前の入力データが、

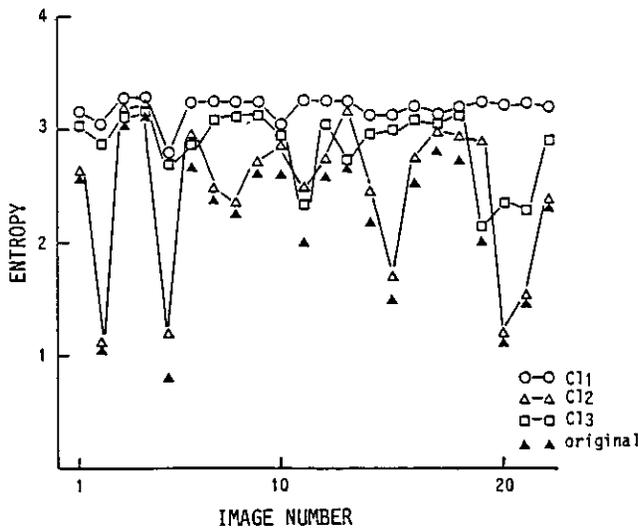


図 12  $Cl_1$ 、 $Cl_2$ 、 $Cl_3$  により最適化されたエントロピーの値 (横軸は 22 の異なるレーザーレーダー画像)

Fig. 12 Entropy values of the output images by the maximization of  $H(c)$  with  $Cl_1$ ,  $Cl_2$ , and  $Cl_3$ , where horizontal axis shows numbers of 22 laser radar images

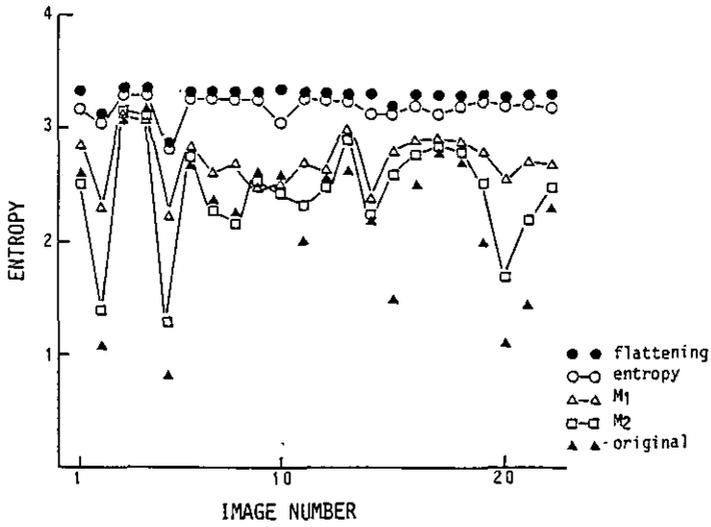


図 13  $H$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  の最適化結果におけるエントロピーの値

Fig. 13 Entropy values of the output images by the optimization of  $H(c)$ ,  $M_1(c)$ ,  $M_2(c)$  with  $Cl_1$ , and by histogram flattening

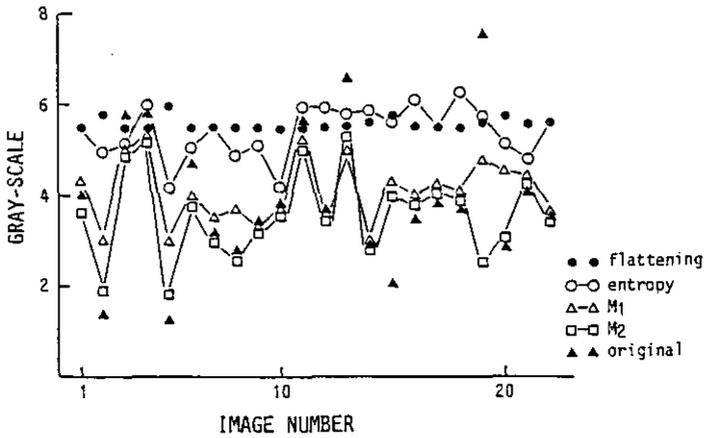


図 14  $H$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  の最適化による出力画像の濃淡の平均値

Fig. 14 Average gray-levels of the output images by the optimization of  $H(c)$ ,  $M_1(c)$ ,  $M_2(c)$  with  $Cl_1$ , and by histogram flattening

前処理の段階で A/D 変換されているため、完全な平坦化ができないことによる。この図にみられるように、エントロピーの面からみて、一般的に、原画像から、 $M_2$ ,  $M_1$ ,  $H$ , 平坦化の順にエントロピーが増加していくことがわかる。さらに、図 14 は、 $H$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ , 平坦化により出力された画像の濃淡の平均値を示している。ここでは、最も濃淡の低いレベルを 1, 濃淡の最高レベルを 10 とし、出力レベルを 10 段階に数値化して各々の画像における平均値をとっている。原画像の濃淡が薄い場合、前節で考えたように、 $M_2$ ,  $M_1$ ,  $H$  とすすむにつれ、濃淡が順次濃くなっていく様子が表れている。また、平坦化による平均値が計算値 5.5 と必ずしも一致しない理由は前に述べた。

#### 4 結 論

本稿における問題の定式化の要点は次の二つである。

- (i) 画像のコントラストを高めるように表示区間を決定する問題を情報量基準の最適化に帰着させたこと。
- (ii) 画像の特性を考慮することにより、制御クラスと評価関数を延長し、問題を構造化したこと。

従来、ヒストグラム変換による画像強調は、ヒストグラム平坦化に尽きるように考えられる傾向があったが、上のように考えることで、この問題を見直す可能性が生まれてくる。すなわち、ここでの定式化の利点として、次のようなことがあげられる。

- (A) ヒストグラム平坦化と違って、区分線形変換による強調は、画像に非線形変換による歪みをもたらさない。すなわち、原画像において、データが線形に変化する場合、出力画像でも、線形表示区間 (図 1 の  $[a, b]$ ) に入っている限り濃淡は線形に変化する。
- (B) レーザーレーダー画像の場合、時々刻々変化するパターンを逐次測定することが多い。このような場合、1 枚の画像において表示区間を部分的に変化させていく動的最適化を考える必要が生じる。このことは、人手による試行錯誤的方法では効率よく行えない。また一方で、画像の部分的平坦化を行っても、画像全体のつながりが分からなくなるため、効果がない。したがって、本稿の手法が有効となる。

次に、問題を構造化したことの意義を述べよう。

- (a) 許容制御クラス  $Cl_1$ ,  $Cl_2$ ,  $Cl_3$  の意味は先に述べたように、大気汚染観測におけるレーザーレーダー画像の役割からみて明らかである。一般に、画像のもつ特性と応用のされかたから、特定の制御クラスを見いだすことは、それほど困難ではないように思われる。
- (b) 評価基準を延長したことの意義はより微妙である。確かに、エントロピー評価基準だけでもここでの画像強調の目的はかなり果たされるのであるが、重要なことは、このように延長することで、問題がいわば連続的になったことである。前に述べたように、評価基準  $M_r$  は  $r$  を変化させることによりエントロピーに近いもの ( $M_0$ ) から線形変換を与えるもの ( $M_\infty$ ) まで連続的に変化する。このことから、最もよい画像を与える評価基準に対応する

パラメーター $r$ の値を、専門家の評価に基づいて定めることが考えられる。

経験に基づく表示区間の決定とヒストグラム平坦化のような強調手法の間には、一見、かなりへだたりがあるように思われる。ここで示した定式化の方法は、単に新しい画像強調の方法を与えるだけでなく、経験的手法とヒストグラム平坦化をつなぐ一連の強調方法を一つの連続的な族として表すものである。また、ここでは、レーザーレーダー画像に対して議論を行ったが、ここでの方法論は、様々な計測による画像に応用できると思われる。

終わりに、本稿を作成するに当たって、数々の貴重な御助言を頂いた国立公害研究所竹内延夫室長、笹野泰弘博士、中根英昭博士、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千葉工業大学住谷浩一氏（現在 日立製作所）に感謝する。

### 引用文献

- 1) Rosenfeld, A. and A.C. Kak (1982): Digital Picture Processing. 2nd ed. Academic Press, New York.
- 2) Pratt, W.K. (1978): Digital Image Processing. Wiley, New York.
- 3) Max, J. (1960): Quantizing for minimum distortion. IRE Trans. Inform. Th., Vol IT-6, 7-12.
- 4) Elias, P. (1970): Bounds on performance of optimum quantizers. IEEE Trans. Inform. Th., Vol. IT-16, No. 2, 172-184.
- 5) Hummel, R.A. (1975): Histogram modification techniques. Comput. Graph. and Image Process., 4, 209-224.
- 6) Hardy, G.H., J.E. Littlewood and G. Pólya (1967): Inequalities. Cambridge Univ. Press, London.
- 7) 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫 (1982): 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。国立公害研究所研究報告, 第34号, 61-81.
- 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, 125-141.
- 9) 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.

II-14

移動計測車による最適観測計画  
に関する一考察\*

On Optimal Strategy of Itinerating a Mobile Unit  
for Air Pollution Monitoring\*

甲斐沼美紀子<sup>1</sup>・内藤正明<sup>1</sup>

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

要 旨

大気汚染監視システムとして移動計測車を活用する方策を検討した。ここでは対象全域の観測誤差分散の総和を最小にするような計測車の巡回スケジュールを探索理論を用いて決定し、その結果以下の知見を得た。すなわち、

- 1) 単一測定点の場合、ある期間にわたる観測誤差を最小にするには、一定間隔で巡回すること。
- 2) 複数の測定点の場合は、それぞれの地点のデータの分散に応じて巡回頻度が割りつけられること。
- 3) 得られた手法に従って大阪府下の観測網に適用し、いくつかの興味ある結果が見いだされたこと。

ここでの手法はシステムモデルや評価関数を適当に改変することによって、更に現実的で複雑な状況に対しても容易に拡張されるという意味で、移動モニタリングのあり方を見いだす基本的なものと考えられる。また移動モニターとしては、最近レーザーレーダによる可搬型システムが開発され、一部は既に実用化されている。これらのシステムの効果的な運用方式の決定に本報の方法が適用できるであろう。

Abstract

By virtue of the search theory, a basic strategy has been developed how to itinerate mobile units to supplement or to substitute a routine air monitoring network system. The objective criterion is defined as to minimize the total error variance of monitored values throughout

\* 本報の一部は大気汚染学会誌第18巻第4号(1983)に掲載されたものである。

1. 国立公害研究所 総合解析部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2  
Systems Analysis and Planning Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

an objective area. An optimum itinerating schedule is decided under this criterion.

The followings are the results derived in this work ;

- 1) itinerary of a mobile unit should be made in constant interval to minimize total detection error along a given time span,
- 2) the interval can be decided depending upon a variance of the estimated values at each station in case of plural stations,
- 3) the evolved strategy was applied to a practical case of the air monitoring system in Osaka Prefecture and an interesting fact has been noted that the suburban stations have become of increasing importance to patrol in recent years.

The strategy above would be readily extended for more sophisticated situation by elaborating mathematical model and introducing more practical objective criteria. On a mobile unit, a compact laser radar system has been developed to receive practical applications. The strategy above would also be applied for the effective usages of this system.

## 1 はじめに

環境監視システム適正化に対する関心が近年高まっている<sup>1)</sup>。これは監視に要する多大の費用や労力をできるだけ軽減しつつ、必要情報を適切に収集することが強く要請されはじめたためである。このような背景を踏まえ環境監視（中でも大気汚染監視）の適正化に対する研究的なアプローチ<sup>2-4)</sup>と同時に国<sup>5,6)</sup>、自治体<sup>7)</sup>の行政的な検討調査も進められ、適正システム作りの実用的な指針が検討されている。

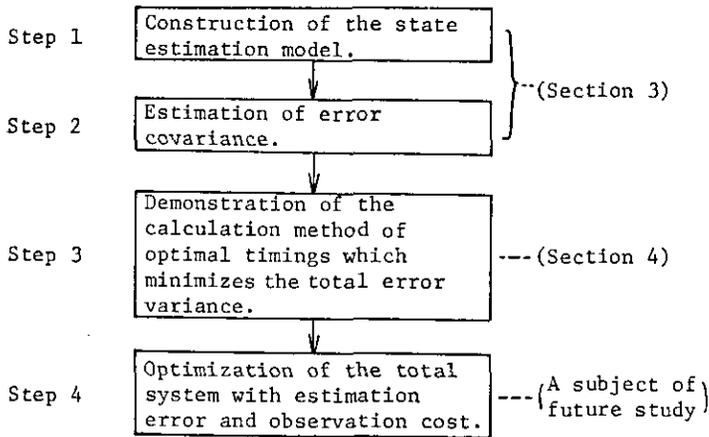
ところでこれら検討はいずれも固定観測局を対象とするものであり、多くの自治体で既に保有する移動計測車をシステムに組み込むまではまだ検討が及んでいない。しかし、広域の大気汚染分布を把握するのに1台の測定器で得られる情報量をできるだけ多くするためには、移動局をうまく活用することが有効であろうと考えられる。そこで本報はその第一として、“現在の常時監視システムを移動計測車で補間する場合の、計測車の巡回方式”について検討したものである。その巡回方式は、あらかじめ設定された巡回地点の濃度を予測モデルによって推定し、対象域全体にわたる推定誤差分散のある一定期間の総和を最小とするものである。これは各地点での限界誤差分散（1回測定を増やすことによる誤差分散の減少量）を等しくする巡回によって実現される。ここで導かれた基本方針に基づいて、大阪府を対象とする試算を行い、いくつかの興味ある結果を見いだした。なおこの手法を可搬型レーザーレーダの運用方式に適用することにより、都市域での汚染機構の解明に役立つ情報が得られることが期待される。

## 2 解析のフロー

目標物の位置や出現（消滅）などに関する確率法則がわかっているときに、どこをどんな頻度で探せばよいかという問題は、探索理論として研究され、既に遭難船の探索等に適用されている<sup>8,9)</sup>。ここでは、発見確率最大化の代わりに、システム全体の状態すなわち対象時・空全域にわ

表 1 手順の要約

Table 1 Summary of the analytical procedure



たる大気汚染濃度の推定誤差を最小とすることという目的関数を設定する。そしてこのときの移動計測車の最適巡回スケジュールを決定するために探索理論を適用する。その解析の全体フローを要約すると表1のとおりである。

さて、ある時間先の汚染濃度は何らかの予測モデルを使って推定されるが、この場合モデルの不確かさ（モデルパラメーターや気象要因等の変数の不確かさ）があるため、実際の汚染濃度の時々刻々の実現値は、予測モデルによる推定値のまわりにある分布をもって変動する確率変数と考えるのが一般的である。したがってここでは、「ある対象時間を設定した時、その時間全体にわたる誤差分散を、対象域全体について加えた総和が最小となる」ことが望ましい観測であるという条件を設け、これを実現するような観測スケジュールについて検討した。

そのため、まず3節で予測モデルを定義し、過去の観測値に基づいて推定される汚染濃度の“推定値”及び“誤差分散”を定式化する。次いで4節において最適監視計画の決定手法について、観測場所が一か所の場合の時間に関する最適観測計画と、観測場所が複数ある場合の、時間と空間に関する最適観測計画について検討する。この手法は観測費用が与えられたときこれを最小とするシステム全体の最適解を求める場合にもそのまま適用されるが、これについては本報では省略する。なお5節では大阪府を対象とする具体的データを用いてここでの手法を適用した試算例を示す。また6節においては観測地点間で互いに汚染濃度の状態に相関がある場合の最適観測計画について、簡単な数値例を示す。

### 3 システムの定義

#### 3.1 汚染濃度変化の状態方程式と観測方程式

前節の解析フローに従えば、まず対象とする状態量変化を数学的に記述することが第一段階である。ここでは汚染濃度の時間変化はその時刻の濃度の関数として、(1)式で記述されるものとする。一方観測は(2)式に従って離散的にある  $k$  時刻で行われるものとする。

システム方程式：

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), t) + w(t) \quad (1)$$

観測方程式：

$$y(k) = h_k(x(t_k)) + v(k) \quad (2)$$

ここに

i)  $x(t)$  は  $L$  次元ベクトルで、 $L$  は観測地点の数、要素  $x_l(t)$  ( $l=1, 2, \dots, L$ ) は  $l$  地点における時刻  $t$  での汚染濃度を表す。初期状態  $x(0)$  は、

$$\text{平均値 } E\{x(0)\} = \hat{x}_0$$

$$\text{共分散 } \text{Cov}\{x(0)\} = P_0$$

をもつガウス分布をしていると仮定する。

ii)  $f(x(t), t)$  は  $L$  次元ベクトルで、時刻  $t$  における濃度  $x(t)$  の変動を表す既知関数とする。

iii)  $w(t)$ ,  $v(k)$  はそれぞれ白色雑音ベクトルで

$$E\{w(t)w^T(t')\} = Q(t)\delta_{tt'} \quad (Q(t): L \times L \text{ 行列})$$

$$E\{v(k)v^T(j)\} = R_k\delta_{kj} \quad (R_k: m \times m \text{ 行列})$$

$$E\{w(t')v^T(k)\} = 0$$

であり、 $w(t)$  はシステム雑音を、 $v(k)$  は観測雑音を表す。 $m$  は計測車の数、 $T$  は行列の転置を表す。システム雑音の分散  $Q(t)$  と観測雑音の分散  $R_k$  は過去のデータから推定されるものとする。

iv)  $y(k)$  は  $m$  次元ベクトルで、 $k$  時刻での観測値を表す。

v)  $h_k(x(t_k))$  は  $m$  次元ベクトルで、時刻  $t_k$  での濃度と観測値との関係を表す既知関数とする。

#### 3.2 目的関数

最適観測方式を決定するためには、観測結果の良否を判定する必要がある。ここではそれを対象とする時・空領域全体の計測結果の誤差分散にとる<sup>10)</sup>。そこでこの誤差分散が観測方式(ここではタイミング)とどのような関係にあるかを定式化しておく必要がある。観測値  $Y_k = \{y(1), \dots, y(k)\}$  が与えられたとき、これに基づいて推定される汚染濃度  $x(t)$  の最小分散不偏推定は  $\hat{x}(t)$

$= E \{x(t) | Y_k\}$  で与えられる<sup>11)</sup>。ところで次の観測が行われるまでの汚染濃度の推定値及び分散は

状態推定方程式：

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = f(\hat{x}(t), t) \quad (3)$$

共分散行列方程式：

$$\frac{dP(t)}{dt} = F(\hat{x}(t), t)P(t) + P(t)F^T(\hat{x}(t), t) + Q(t) \quad (4)$$

で与えられる。

また観測が行われたことによる推定値及び分散の更新は次式に従って行われる。

状態変数の更新：

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [y(k) - h_k(\hat{x}_k(-))] \quad (5)$$

共分散行列の更新：

$$P_k(+) = [I - K_k H_k(\hat{x}_k(-))] P_k(-) \quad (6)$$

ここに(5), (6)式中の係数行列(カルマンゲイン)  $K_k$ は

$$K_k = P_k(-) H_k^T(\hat{x}_k(-)) [H_k(\hat{x}_k(-)) P_k(-) H_k^T(\hat{x}_k(-)) + R_k]^{-1} \quad (7)$$

ただし

$$F(\hat{x}(t), t) = \left. \frac{\partial f(x(t), t)}{\partial x(t)} \right|_{x(t) = \hat{x}(t)}$$

$$H_k(\hat{x}(-)) = \left. \frac{\partial h_k(x(t_k))}{\partial x(t_k)} \right|_{x(t_k) = \hat{x}_k(-)}$$

である。また  $\hat{x}_k(-)$  は時刻  $t_k$  での測定情報が入る直前の濃度の推定値,  $\hat{x}_k(+)$  は時刻  $t_k$  での測定情報が入った直後の濃度の推定値を表す。

いま期間  $T$  を 1 サイクルとし, この期間にわたっての全体の誤差分散は,

$$\Gamma = \int_0^T \text{trace}[P(t)] dt \quad (8)$$

であり, これが以下の観測方式を決定する場合の評価関数(目的関数)となる。なお  $P(t)$  は(4)式, (6)式に従って計算される。

そこで以下(8)式を最小とするような観測方式(測定タイミング)をいくつかの状態に対して検

討する。

### 3.3 前提条件

上の 3.1, 3.2 で移動計測計画を最適化問題として定式化した<sup>が</sup>, これを実際の問題に適用するため, 以下のようにいくつかの状況を仮定する。

i) 汚染濃度は空間的に連続に変化している<sup>が</sup>, ここでは, 測定場所として, 離散的な有限個の地点があらかじめ与えられているとする。

ii) 観測方程式中の  $h_k(x(t_k))$  は  $x(t_k)$  に関して線形である。このとき  $H_k$  は観測の型を表す  $m \times L$  行列で例えば 1 台の計測車で観測する場合は  $m=1$  となる。このとき  $k$  時刻に  $l$  地点を観測するとすると,  $H_k$  は第  $l$  要素が 1 でその他の要素が 0 という  $1 \times L$  行列,

$$H_k(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$$

となる。

iii) 観測が時刻  $t_0$  に行われ, その後観測が行われないとすると,  $t_0$  から  $\tau$  時間経過した時の誤差分散  $P(t)$  は, 一般に時刻  $t_0$  での値  $P(t_0)$  と, 状態変数  $x(t)$  とシステム雑音  $Q(t)$  の関数となる<sup>が</sup>, ここでは  $P(t)$  を次のような二つの場合に限定する。

(イ)  $P(t)$  は状態変数  $x(t)$  によらない。すなわち  $F(x(t), t)$  は一定である。

(ロ)  $P(t_0) \approx 0$ 。すなわちシステム雑音に比べて観測雑音が小さいので, 観測が行われた後には, 誤差分散は零に近づく。

この場合, 観測後  $\tau$  時間経過した時の誤差分散は, 観測時刻  $t_0$  に独立で,  $\tau$  に関して単調増加となる。

iv) 観測時間間隔は十分小さくできる。すなわち任意の時刻に観測を行える。

以上大きく四つの条件を設定した上で以下の最適観測計画を検討する。

## 4 最適観測計画の決定—各地点での状態が独立な場合—

### 4.1 1 か所で観測する場合の最適観測計画

基本的な状態を理解するために, まず観測点が 1 か所だけの最も簡単な場合を考える。このときは, その地点での観測をどのような間隔で行うかという観測スケジュールの決定問題となり, 観測を等時間間隔で行うようなスケジュールの時最適となることを示す。

まず期間  $T$  内に  $n$  回の観測を時間間隔  $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{n-1}$  で行うもの<sup>と</sup>すると, 制約式として,

$$\sum_{i=0}^{n-1} \tau_i = T \tag{9}$$

が必要となる。問題は (9) 式の制約のもとで (8) 式で与えられる目的関数を最小とするような観測時間間隔の組  $\{\tau_i^*\}$  を求めることである<sup>が</sup>, 3.3 節の前提条件のもとでは, ある一回の観測後  $\tau$  時

間経過したときの誤差分散は、観測時刻に独立で $\tau$ に関して単調増加となる。この関数を $g(\tau)$ とすると目的関数 $\Gamma$ は

$$\Gamma = \int_0^T P(t)dt = \sum_{i=0}^{n-1} \int_0^{\tau_i} g(\tau)d\tau \quad (10)$$

となる。このとき、目的関数(10)式を最小化する組 $\{\tau_i\}$ を求める。いま、例えば $\tau_h > \tau_m$ であったとする。このとき $\tau_h$ と $\tau_m$ とを新たに $(\tau_h + \tau_m)/2$ で置き換えたたとすると、 $g(\tau)$ が単調増加関数であることから、

$$2 \int_0^{\frac{\tau_h + \tau_m}{2}} g(\tau)dt - \int_0^{\tau_h} g(\tau)dt - \int_0^{\tau_m} g(\tau)dt = - \int_{\frac{\tau_h + \tau_m}{2}}^{\tau_h} g(\tau)d\tau + \int_{\tau_m}^{\frac{\tau_h + \tau_m}{2}} g(\tau)d\tau \leq 0$$

しかも、このように置き換えても(9)式の制約式は維持されている。これより目的関数(10)式を最小化する $\{\tau_i^*\}$ については、

$$\tau_0^* = \tau_1^* = \dots = \tau_{n-1}^*$$

でなければならないことがわかる<sup>8)</sup>。

#### 4.2 観測地点が複数ある場合の最適観測計画

観測地点の数が $L$ か所ある場合について、ここでは簡単なケースとして、各地点の状態 $x$ が独立であるとする。地点ごとにはそれぞれ適切なある等時間間隔の観測を繰り返すものとして、 $L$ 地点全体の誤差分散を最小とするような各地点での観測頻度の割り当てを求める。

地点間のデータが独立であると仮定しているので、先の濃度推移式(1)及び観測方程式(2)はそれぞれ各地点 $l$ ごとに

$$\frac{dx_l(t)}{dt} = f_l(x_l(t), t) + w_l(t) \quad (l=1, 2, \dots, L) \quad (11)$$

$$y_l(k_{i,l}) = x(k_{i,l}) + v(k_{i,l}) \quad \begin{pmatrix} i=0, 1, \dots, n_l-1 \\ l=1, \dots, L \end{pmatrix} \quad (12)$$

記述される。ここに $k_{i,l} (i=0, 1, \dots, n_l-1, l=1, \dots, L)$ は観測時刻である。

先の4.1の結果から、個々の観測点についてはそれぞれ等時間間隔で測定を繰り返すものとしているので、ある対象期間 $T$ 内での測定回数を $n_l$ とすれば、その観測間隔は $T/n_l$ である。したがって全地点での誤差分散の和は $\Gamma$ は

$$\Gamma = \sum_{l=1}^L \Gamma_l(n_l) = \sum_{l=1}^L \left[ n_l \cdot \int_0^{T/n_l} g_l(\tau) d\tau \right] \quad (13)$$

となる。ただし  $g_l(\tau)$  は 4.1 節で規定した観測後  $\tau$  時間経過した時点での誤差分散である。

制約条件は、ある対象期間  $T$  内での総測定回数は決められた回数 ( $N$ ) 以下であること、すなわち

$$\sum_{l=1}^L n_l \leq N, \quad n_l \geq 0 \quad (14)$$

である。

以上より、この最適化問題は「制約条件(14)式に従いつつ、目的関数(13)式を最小とする組  $\{n_l^*\}$  (期間  $T$  内に地点  $l$  ( $l=1, \dots, L$ ) で観測する回数) を求めること」となる。さてこの最適な組  $\{n_l^*\}$  については、観測される地点の集合を  $S = \{l | n_l^* > 0\}$  とすれば、ある  $\lambda$  ( $< 0$ ) について

$$\left. \frac{d}{dn_l} \Gamma_l(n_l) \right|_{n_l = n_l^*} = \lambda, \quad l \in S$$

$$\left. \frac{d}{dn_l} \Gamma_l(n_l) \right|_{n_l = 0} \geq \lambda, \quad l \notin S$$

が成立しなければならない。いま

$$\frac{d}{dn_l} \Gamma_l(n_l) = \lambda_l(n_l) \quad (15)$$

と置くと、 $\lambda_l(n_l)$  は  $n_l$  に関する単調増加関数であるから、 $\lambda < 0$  を変域とする次の関数を決めることができる。

$$n_l(\lambda) = \begin{cases} 0 & \lambda_l(0) \geq \lambda \\ \infty & \lambda_l(\infty) \leq \lambda \\ n_l & \lambda_l(n_l) = \lambda \end{cases} \quad (16)$$

このようにして決めた  $n_l(\lambda)$  は  $-\infty < \lambda < 0$  で定義された関数で  $\lambda$  に関して単調増加する。この  $n_l(\lambda)$  を用いて、

$$F(\lambda) = \sum_{l=1}^L n_l(\lambda) \quad (17)$$

を作れば、 $F(\lambda)$  も  $(-\infty, 0)$  で定義された  $\lambda$  に関する単調増加関数である。したがって、

$$\lambda^* = \text{Sup}_{F(\lambda) \leq N} \lambda \quad (18)$$

であるような  $\lambda^*$  が一意に定まる。この  $\lambda^*$  を使って、

$$n_i^* = n_i(\lambda^*) \quad (19)$$

を決めれば

$$\begin{aligned} n_i^* > 0 \quad \text{ならば} \quad \lambda_i(n_i^*) &= \lambda^* \\ n_i^* = 0 \quad \text{ならば} \quad \lambda_i(0) &\geq \lambda^* \end{aligned} \quad (20)$$

が成立しているので、(19)式の  $n_i^*$  が求める最適解の組である。

## 5 大阪府の観測システムを対象とする試算例

### 5.1 自己回帰モデルに基づく定式化

ここでは、これまで導いた手法を大阪府下でのモニタリングシステムに適用し、現在の固定測定局の代わりに、移動計測車で巡回して監視すると仮定した時の測定局ごとの巡回頻度を求める。

汚染濃度の時間変化を推定するモデルとしてここでは問題を見やすくするため、最も簡単な離散系での自己回帰モデル (AR(1)モデル) を採用する。この場合データ  $\{z_1, z_2, \dots, z_T\}$  が与えられたとき、データから平均値を取り除いた値  $x(k)$  ( $k=1, 2, \dots, T$ ) は次式に従って変動する。

$$x(k+1) = \Phi x(k) + w(k) \quad (k=1, 2, \dots) \quad (21)$$

このとき、 $\Phi$  の推定値と  $w(k)$  の分散は次式で与えられる<sup>12)</sup>。

$$\Phi \text{ の推定値: } \hat{\Phi} = r_1$$

$$W(k) \text{ の分散: } \hat{Q} = c_0(1 - r_1^2)$$

ただし

$$C_m = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{T-m} x(k)x(k+m), \quad (m=0, 1), \quad r_1 = C_1/C_0$$

である。

$l$  地点での観測は  $k_{i,t}$  時刻に行われ、観測誤差はないものとする、観測方程式は

$$y_i(k_{i,t}) = x_i(k_{i,t}) \quad (22)$$

で与えられる。このとき、観測後  $\tau$  時間で経過した時刻での  $l$  地点での誤差分散  $g_i(\tau)$  は、

$$g_i(\tau) = \frac{1 - \Phi_i^{2\tau}}{1 - \Phi_i^2} Q_i \quad (23)$$

となる。誤差分散の時間的な変化が(23)式で与えられるとき、観測回数  $n_i$  に対する単位期間  $T$  内の誤差分散の和は次式で与えられる。

$$\Gamma_i(n_i) = \frac{Q_i}{1 - \Phi_i^2} \left( T - \frac{n_i}{2 \log \Phi_i} \Phi_i^{2T/n_i} + \frac{n_i}{2 \log \Phi_i} \right) \quad (24)$$

(24)式を観測回数  $n_i$  で微分して限界誤差分散を求めると、

$$\lambda_i(n_i) = \frac{Q_i}{1 - \Phi_i^2} \left( -\frac{\Phi_i^{2T/n_i}}{2 \log \Phi_i} + \frac{T}{n_i} \Phi_i^{2T/n_i} + \frac{1}{2 \log \Phi_i} \right) \quad (25)$$

となる。

$\lambda$  が与えられると、限界誤差分散が  $\lambda$  であるような観測回数の組  $\{n_i\}$  が求まる。そこで全体の観測回数が  $N$  となる  $\lambda^*$  を求め、このときの  $\{n_i^*\}$  が求める最適観測回数の組である。

以上の基準の下に大阪府を対象とする試算を行う。府下の大気測定局の配置は図5に示すような64局があるが、このうちの特徴的な3地点を選んだ場合と、府下全域の測定局を対象とする場合の2ケースについて検討する。

### 5.2 特徴的な3地点を対象とする試算

基本的な状況を把握するために、まず特徴的な3地点、今宮中学校(大阪市)、石津小学校(堺市)、府立修徳学院(柏原市)を対象として試算する。用いたデータは昭和55年度SO<sub>2</sub>の日平均である。手順としては、まずこれら3地点での計測データを用いて(21)式の自己回帰(AR(1))モデルのパラメーター値を求めた。得られたパラメーター値とデータの平均値、分散と残差分散とを表2に示す。ここに得られたパラメーターの推定値( $\hat{\Phi}$ )と残差の分散( $\hat{Q}$ )を使用して、測定局での最適観測回数を求めた。時間経過とともに各測定局での誤差分散が変化する様子を図1に示した。測定回数に対応する誤差分散の変化を図2に示した。更に地点ごとの測定回数と限界誤差分散の関係及び総測定回数と限界誤差分散の関係をともに図3に示す。この図3より期間100日に対して、総測定回数が42回ならば石津小学校で測定を行い、116回以下のときは、今宮中学

表 2 今宮中学校、石津小学校、府立修徳学院でのパラメーターの推定値  
Table 2 Predicted parameter values at Imamiya Junior High School, Ishizu Primary School and Shutoku Gakuin High School.

Station	Annual Mean	Variance	Parameter	Error Variance
	(ppb)	$C_0$	$\hat{\Phi}$	$\hat{Q}_i$
Imamiya Junior High School	15.	37.56	0.469	29.30
Ishizu Primary School	22.	39.80	0.526	28.79
Shutoku Gakuin High School	15.	15.19	0.669	8.39

校と石津小学校で行うのがよいことがわかる。

府立修徳学院でのデータは分散も小さく、また AR(1)モデルによく当てはまり、残差の分散が非常に小さくなっているため、年平均値は今宮中学校と変わらないが、測定頻度の割当ては少ない。石津小学校でのデータの分散は3か所の中で一番大きいので、割当て回数も一番多くなっている。今宮中学校でのデータの分散は石津小学校でのデータの分散とほとんど変わらないが、モデルの残差分散が石津小学校の方が小さくなるため、総測定回数が小さい時の割当て回数は石津小学校に比べて少ない。総測定回数と誤差分散の総和との関係を図4に示す。もし測定回数に対応する費用曲線が与えられれば、図4のように誤差分散曲線と重なることにより、最適な総観測回数が定まり、そのときの地点ごとの最適観測回数を決定することができるが、費用曲線についてはここでは言及しない。

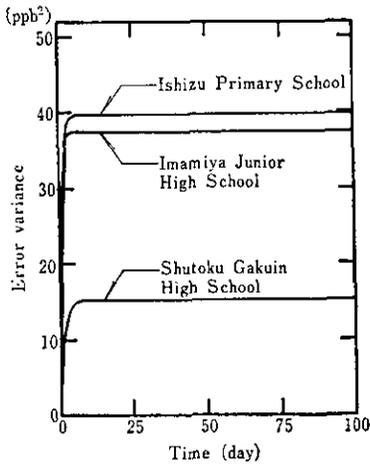


図 1 時間変化に対応した誤差分散の変化  
Fig. 1 Error variance as a function of time

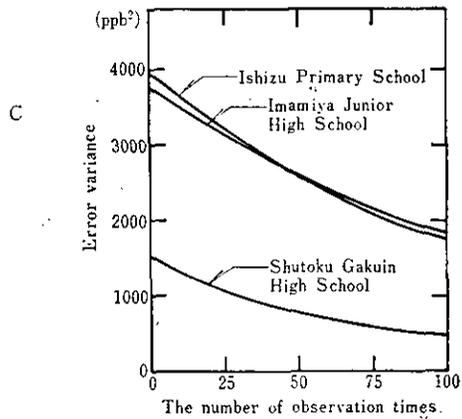


図 2 測定回数に対応した誤差分散の変化  
Fig. 2 Error variance as a function of the number of observation times

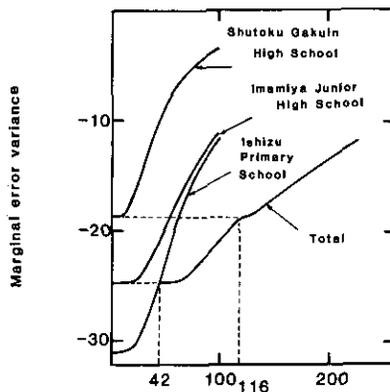


図 3 測定回数と限界誤差分散の関係  
Fig. 3 Marginal error variance as a function of the number of observation times

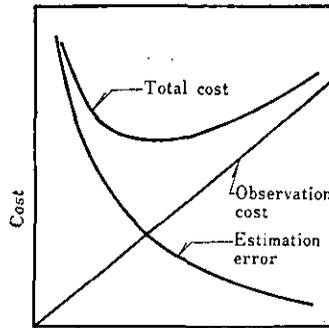


図 4 測定回数に対応した測定費用と推定誤差の関係

Fig. 4 The illustration of the total cost as a function of the estimation error and the number of observation times

### 5.3 府下全測定地点を対象とする場合の試算例

府下全体の 64 測定局のデータに対して先と同様の解析を行った。自己回帰モデルのパラメータの推定には、昭和 51 年度と昭和 55 年度の  $\text{SO}_2$  濃度測定値データを使用した。得られた結果を表 3 に示す。これは総測定回数が 100 回、200 回、300 回のときの各測定局への巡回回数を示すものである。ただし移動計測車はそれぞれ、1 台、2 台、3 台あり、1 台ずつが一日一地点を計測しているときの巡回回数に対応する。総測定回数が 300 回のときの巡回頻度 ( $n_i^*/300$ ) を図 5 に示す。これらの計算結果から導かれるいくつかの知見を要約すると以下のようである。

i) 残差分布の総和を最小とするためには、昭和 51 年度では、勝山中学校、聖賢小学校、此花区役所、三宝の各測定局を、昭和 55 年度では、貝塚市消防署、堺市役所、三宝、大東市役所、錦などの周辺地区の各測定局を重点的に測定する必要がある。これは、昭和 51 年から昭和 55 年にかけて、大阪市の中心部では  $\text{SO}_2$  に関する汚染が改善されたが、周辺部では横這いのところがあることによる。

ii) 総測定回数が多くなると、少数の特定点での測定回数を増すより、測定地点を増加させる方が望ましくなる。

なお、ここでの結果は 3.3 節に述べたような前提条件の下に得たもので、この結果から現在の大阪府下の大気モニタリングシステムについての適否を論じることは妥当でない。

表 3 期間が100日の場合の最適巡回頻度

Table 3 Optimal itinerating frequency when the period (T) is 100days

No.	Station	1976			1980		
		N=100	N=200	N=300	N=100	N=200	N=300
1	Ogimachi	0	0	0	0	0	0
2	Konohana	0	22.5	31.1	0	0	0
3	Horie	0	0	0	0	0	0
4	Hirao	0	0	0	0	0	0
5	Yodo	0	16.0	25.4	0	0	0
6	Katsuyama	36.9	39.8	43.7	0	0	0
7	Omiya	0	0	0	0	0	0
8	Seiken	26.0	30.7	36.3	0	0	0
9	Imamiya	0	0	0	0	0	0
10	Yodogawa	0	9.0	24.6	0	0	0
11	Nanryo	0	0	0	0	0	0
12	Setsuyo	0	0	0	0	0	0
13	Yodoyabashi	0	0	23.5	0	0	0
14	Kansi center	0	13.3	24.9	0	0	0
15	Furitsu Univ.	0	0	0	0	0	0
16	Sennan	0	0	0	0	0	0
17	Tyonakaminami	0	0	0	0	0	0
18	Toyonaka	0	0	0	0	0	0
19	Ikeda	0	0	0	0	0	0
20	Suita	0	0	0	0	0	0
21	Izumitsu	0	0	0	0	0	0
22	Takatsuki	0	0	0	0	0	0
23	Kaizuka	0	0	0	44.9	50.7	55.2
24	Moriguchi	0	0	0	0	0	0
25	Hirakata	0	0	0	0	21.0	27.5
26	Wani park	0	0	0	0	0	0
27	Ibaraki	0	0	0	0	0	0
28	Yao	0	0	0	0	0	0

N: Total number of observation times

## 6 最適観測計画の決定—各地点での状態が互いに依存している場合—

前節までの最適観測計画は、各地点での状態が互いに独立であるとした場合について検討した。しかし一般には、各地点での状態はその周辺の状態とかかわりを持つと考えるべきであろう。測定地点でのデータに相関があるとき、ある地点のデータを測れば、別の地点での汚染濃度をある程度推定することが可能である。いま最小とすべき目的関数は(8)式で与えられるが、積分式中の

誤差分散  $\Gamma_l$  は、 $l$  地点での観測だけでなく、 $l$  地点のデータと相関のある他の地点での観測によっても左右される。このときの問題は、

目的関数：

$$\sum_{l=1}^L \Gamma_l(n_1, n_2, \dots, n_l) \longrightarrow \max \quad (26)$$

制約条件：

$$\sum_{l=1}^L n_l = N \quad (27)$$

となり、(26)式の左辺  $\{n_l\}$  の組み合わせによって変わるため、最適解を求めるための計算量は増大する。

今簡単のため測定の対象となる地点は A, B の 2 が所しかないとして、A, B 両地点への観測頻度の割当ての数値解を求めてみる。各地点での状態は(21)式に従って変化するものとする。また観測は A か B のいずれかの地点で行われ、観測誤差はないものとする。また一方の観測値の一次式で他方の値が近似されるものとし、その推定精度が(21)式による結果より良好な場合はその値が採用されるものとする。A 地点で観測が行われてから  $\tau_1$  時間経過し、B 地点で観測が行われてから  $\tau_2$  時間経過したとすると、最新の情報が得られてからの経過時間は、

$$\tau = \min(\tau_1, \tau_2)$$

であり、そのときの A, B 各地点での誤差分散は、2 地点間の相関係数を  $\rho_{12}$  とすると、

$$g_i(\tau) = \min \left\{ \frac{1 - \phi_i^{2\tau_i}}{1 - \phi_i^2} Q_i, \frac{1 - \rho_{12}^2 \phi_i^{2\tau_{\bar{i}}}}{1 - \phi_i^2} Q_i \right\} \quad (28)$$

で与えられる。ここに  $\bar{i} = 1, 2$  はそれぞれ A, B 地点、 $\bar{i}$  は  $i = 1, 2$  に対してそれぞれ 2, 1 である。

A, B 地点での汚染濃度はそれぞれ今宮中学校と石津小学校のそれを採用し、また表 2 のモデル・パラメーターを使用した。1 サイクルを 10 日、総測定回数を 10 回として、2 地点間に相関があるときの全体の誤差分散を求めたものを図 6 に示す。2 地点間の相関が大きくなると、測定回数は同じであっても全体の誤差分散は小さくなり、特にデータの分散の大きい地点 (A) で測った方が良い結果になる。なおここでは非常に簡単な統計モデルを用いたため、モデルを使って推定したときの誤差分散が、他の地点の測定値から推定した場合より悪くなったが、実際にはもっと精度の高いモデルが開発されており、それらを採用すればもっと推定精度が上るであろう。ただし、このときはより複雑な問題を解くことが必要となる。なおデータが独立な地点が現在する場合には、4 節での手法をここでの方法と組み合わせればよい。

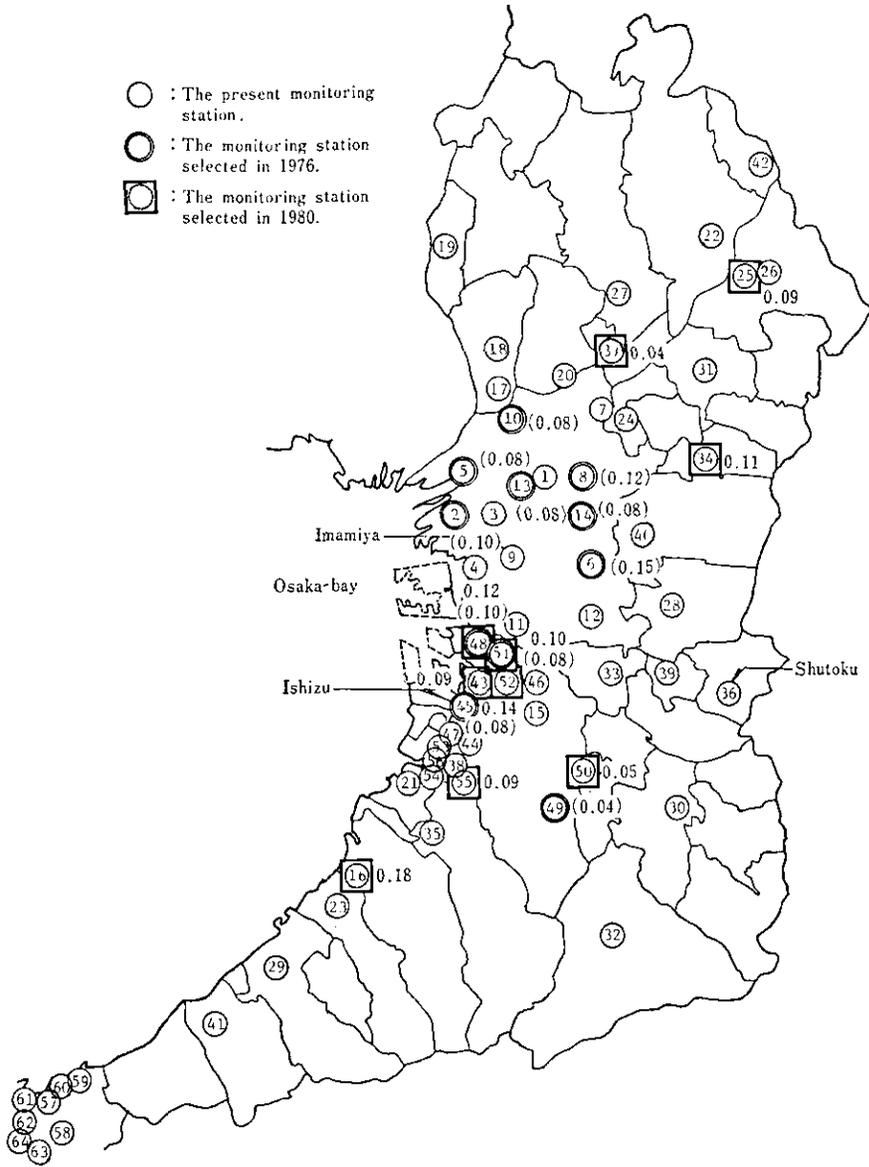


図 5 測定局と巡回頻度 (1976年と1980年の大阪府での試算)

Fig. 5 The present monitoring stations and the optimal interating frequencies in Osaka Prefecture in 1976 and 1980

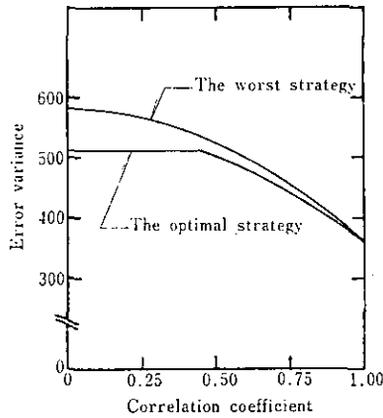


図 6 相関係数に対応した推定誤差の変化

Fig. 6 Error variance as a function of a correlation coefficient

### 7 成果と今後の課題

本報で得られた成果を要約すると、

- i) 1か所で測定する時は等時間間隔スケジュールが最適である。
- ii) 測定地点が複数である場合の測定回数の割当は、データの分散を算定するに用いた過去の計測値と採用する状態推定モデルの精度に依存して決定される。
- iii) 大阪府下の実データに当てはめたとき、経年的に巡回の重点が周辺部に移ることが示唆される。

以上は前節にも断わったように、あくまで移動計測車を利用する際の運用計画に関する基本方針を3.3節の前提条件のもとに検討したものであり、現実的な適用のためには、以下のいくつかの点の配慮が必要であろう。

i) 本報は測定地点が複数ある時の各測定地点への巡回頻度の決定に重点をおき、問題を明確にさせるために、汚染濃度推定のために簡単な統計モデルを使用した。実際には、これまでも提案されている精度の高いモデルのいずれかをを用いてモデルを改良することが必要であろう。

ii) 評価基準として「誤差分散最小」を採用しているが、それ以外にいくつかの現実的な基準が考えられる。例えば測定費用、中でも移動のための費用等である。これらを考慮し、推定精度を上げることによる便益と測定費用との関係から、最適な総測定回数を決めるなどの現実的な検討が今後必要であろう。

iii) 現実の問題としては、各地点での濃度変動に何らかの相関がある場合の、移動計測車と固定局との組み合わせによる総合的な最適システムの構成を検討することも要求されよう。

## 8 おわりに

本研究は問題設定を単純化し、移動計測車で大気常時監視を行おうとする場合の最も基本的な考え方と方策を見いだすことを目的としている。この手順を現実のシステム設計のために利用するには、上記のように“モデル”、“評価基準”などを現実に合わせて複雑化することが必要となるが、これはあくまでこの基本的手順の修正として扱えるであろう。その意味で本報の検討は単純化した条件化で行ってはいるが、一般性を有するものとする。大気汚染計測のためにリモートセンシング等の新技術が開発されているが、それらを含めた総合的な観測システムの検討が必要とされている。その際、可搬型システムの効果的な運用方式に本報の方式が適用できるであろう。

最後に本研究を進めるに当たり有益な示唆を頂いた大井紘氏（国立公害研究所環境情報部）に謝意を表す。

## 引用文献

- 1) 牧野利孝 (1981) : モニタリングの実態と問題点. 大気汚染学会, 第 22 回講演会, 大気モニタリングシンポジウム, 秋田.
- 2) Nakamori, Y., S. Ikeda and Y. Sawaragi (1979) : Design of air pollution monitoring system by spatial sample stratification. *Atmos. Environ.*, **13**, 97.
- 3) Noll, K. E., T. L. Miller, J. E. Norco and R. K. Ranfer (1977) : On objective air monitoring site selection methodology for large point sources. *Atmos. Environ.*, **11**, 1051.
- 4) 乙間末広・内藤正明 (1974) : 大気汚染マトリックスの提案とその利用. *環境技術*, **3**, 545-549.
- 5) 数理計画(株) (1979) : 測定値の地域代表性に関する調査. 環境庁委託業務報告.
- 6) 数理計画(株) (1981) : 測定値の地域代表性に関する調査. 環境庁委託業務報告.
- 7) 山口県環境部 (1983) : 大気汚染常時観測局の適正配置検討報告.
- 8) 多田和夫 (1973) : 探索理論. *日科技連*, 143-154.
- 9) 岸 尚 (1976) : 探索理論と遭難船の探索. *システムと制御*, **20**, 539-546.
- 10) Tomita, Y. (1977) : Fundamental studies on state estimation and optimization in stochastic environmental pollution control systems with observation cost. University of Tokushima.
- 11) Gelb, A. (1974) : *Applied Optimal Estimation*. The M. I. T. Press.
- 12) Box, G. E. and G. M. Jenkins (1969) : *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, 56-58.

## 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, 重金属等の土壌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 A G P 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 Orthocladiinae 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 Orthocladiinae 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及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 Orthocladiinae recovered 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 月に採集されたエリユスリカ亜科の各種について —  
 — 第 7 報 多摩本流より 3 月に採集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 2) —— 昭和54年度 特別研究中間報告。(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 —— 昭和53~55年度 特別研究報告。(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 —— 昭和54, 55年度 特別研究報告 第 1 分冊。(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 —— 昭和54, 55年度 特別研究報告 第 2 分冊。(1983)
- 第 48 号 水質観測点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)
- 第 50 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (I) —— 霞ヶ浦の流入負荷量の算定と評価 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 51 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (II) —— 霞ヶ浦の物質循環とそれを支配する因子 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 52 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (III) —— 霞ヶ浦高浜入における隔離水界を利用した富栄養化防止手法の研究 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 53 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (IV) —— 霞ヶ浦の魚類及び甲かく類現存量の季節変化と富栄養化 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 54 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (V) —— 霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 55 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VI) —— 富栄養化防止対策 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 56 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VII) —— 湯ノ湖における富栄養化とその防止対策 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 57 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VIII) —— 総括報告 —— 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 58 号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究 —— 昭和55~57年度 特別研究総合報告。(1984)

- 第 59 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 光化学スモッグチャンバーによるオゾン生成機構の研究 — 大気中における有機化合物の光酸化反応機構の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告 (第1分冊). (1984)
- 第 60 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 光化学エアロゾル生成機構の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告 (第2分冊). (1984)
- 第 61 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄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55~57年度 特別研究報告 (第3分冊). (1984)
- 第 62 号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究 — 昭和56~58年度 特別研究中間報告. (1984)
- 第 63 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56年度 特別研究報告. (1984)
- 第 64 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54~56年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 65 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 1. (1984)  
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響 — 第1分冊)
- 第 66 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 2. (1984)  
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響 — 第2分冊)
- 第 67 号 環境中の有害物質による人の慢性影響に関する基礎的研究 — 昭和54~56年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 68 号 汚泥の土壤還元とその環境影響に関する研究 — 昭和56~57年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 69 号 中禅寺湖の富栄養化現象に関する基礎的研究. (1984)
- 第 70 号 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park (1984)  
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.  
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park.  
(日光国立公園の湖沼のユスリカに関する研究  
— 第1部 日光国立公園の湖のユスリカの生態学的研究 —  
— 第2部 日光国立公園の湖沼に生息するユスリカ類の分類学的, 形態学的研究 — )
- ※ 第 71 号 リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析. (1984)
- 第 72 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄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2) — 昭和55~57年度 特別研究報告 (第4分冊). (1985)
- 第 73 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 昭和55~57年度 特別研究総合報告. (1985)
- 第 74 号 都市域及びその周辺の自然環境に係る環境指標の開発に関する研究. 環境指標—その考え方と作成方法—昭和59年度 特別研究報告. (1984)
- 第 75 号 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa. (1985)  
(琵琶湖底泥中の元素に関する陸水学及び環境化学的研究)
- 第 76 号 Study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere. (1985)  
(大気中モノテルペンの挙動に関する研究)
- 第 77 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58年度 特別研究報告. (1985)
- 第 78 号 生活環境保全に果たす生活者の役割の解明. (1985)
- 第 79 号 Studies on the method for long term environmental monitoring — Research report 1980-1982. (1985)  
(環境汚染の長期的モニタリング手法に関する研究)

- 第 80 号 海域における赤潮発生モデル化に関する研究 — 昭和57/58年度 特別研究報告. (1985)
- 第 81 号 環境影響評価制度の政策効果に関する研究 — 地方公共団体の制度運用を中心として. (1985)
- 第 82 号 植物の大気環境浄化機能に関する研究 — 昭和57~58年度 特別研究報告. (1985)
- 第 83 号 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)  
(日本の湖沼に発生するユスリカの研究)

※ 残部なし

## 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 reactions 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 eutrophication of fresh-water areas – Lake current of Kasumigaura (Nishiura) – 1978-1979. (1981)
- No.20\* Comprehensive studies on the eutrophication 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 eutrophication of fresh-water areas – Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.22\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.23\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Applicability of trophic state indices for lakes – 1978-1979. (1981)
- No.24\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources – 1978-1979. (1981)
- No.25\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Myrocystis* – 1978-1979. (1981)
- No.26\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Determination of algal growth potential by algal assay procedure – 1978-1979. (1981)
- No.27\* Comprehensive studies on the eutrophication 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\* Eutrophication 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 I). (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 Orthocladiinae 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)
- No.50\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Estimation of input loading of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.51\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – The function of the ecosystem and the importance of sediment in national cycle in Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.52\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Enclosure experiments for restoration of highly eutrophic shallow Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.53\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Seasonal changes of the biomass of fishes and crustacea in Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.54\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Modeling the eutrophication of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.55\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Measures for eutrophication control. – 1980-1982. (1984)
- No.56\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Eutrophication in Lake Yunoko. – 1980-1982. (1984)
- No.57\* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Summary of researches. – 1980-1982. (1984)
- No.58\* Studies on the method for long term environmental monitoring – Outlines of special research project in 1980-1982. (1984)
- No.59\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Photochemical ozone formation studied by the evacuable smog chamber – Atmospheric photooxidation mechanisms of selected organic compounds – Research report in 1980-1982, Part 1. (1984)
- No.60\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Formation mechanisms of photochemical aerosol – Research report in 1980-1982, Part 2. (1984)
- No.61\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere; (Part 1) – Research report in 1980-1982, Part 3. (1984)
- No.62\* Effects of toxic substances on aquatic ecosystems – Progress report in 1980-1983. (1984)

- No.63\* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1981. (1984)
- No.64\* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Final report in 1979-1981. (1984)
- No.65 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 1. (1984)
- No.66 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 2. (1984)
- No.67\* Studies on unfavourable effects on human body regarding to several toxic materials in the environment, using epidemiological and analytical techniques – Project research report in 1979-1981. (1984)
- No.68\* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil – Research report in 1981-1982. (1984)
- No.69\* Fundamental studies on the eutrophication of Lake Chuzenji – Basic research report. (1984)
- No.70 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park – Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park. – Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park. (1984)
- ※ No.71\* Analysis on distributions of remnant snowpack and snow patch vegetation by remote sensing. (1984)
- No.72\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere. —Research report in 1980-1982. (1985)
- No.73\* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Final report in 1980-1982. (1985)
- No.74\* A comprehensive study on the development of indices system for urban and suburban environmental quality. Environmental indices-basic notion formation—Research report 1984. (1984)
- No.75 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa. (1985)
- No.76 Study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere. (1985)
- No.77\* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution. (1985)
- No.78\* Study on citizens' role in conserving the living environment. (1985)
- No.79 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report 1980-1982. (1985)
- No.80\* Modeling of red tide blooms in the coastal sea—Research report 1982-1983. (1985)
- No.81\* A study on effects of implementing environmental impact assessment procedure—With particular reference to implementation by local governments. (1985)
- No.82\* Studies on the role of vegetation as a sink of air pollutants—Research report in 1982-1983. (1985)
- No.83 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)

\* in Japanese

※ out of stock

RESEARCH REPORT FROM  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

No.77

国立公害研究所研究報告 第77号

(R-77-'85)

---

昭和60年3月30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 前田印刷株式会社筑波支店

茨城県筑波郡谷田部町東新井14-5

Published by the National Institute for Environmental Studies

Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

March 1985

国立公害研究所研究報告 第77号

環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究

R-77 正 誤 表

頁	行	誤	正
vii	2	Signifiance	Significance
1	脚注	Tsuauba	Tsukuba
78	9	求められる	求められる。
81	7	Frenald	Fernald
	下3	$\alpha_c$	$\alpha_2$
83	10	Frenald	Fernald
84	Fig. 3 caption	refference	reference
85	Fig. 4 caption	refference	reference
89	図6 説明	2.3分	2.3分
	〃	1.7m	1.7m/s
	Fig. 6 caption	Examples	(a) Examples
105	下7	DIAL 測完	DIAL 測定
112	10	知られている <sup>8)</sup> 。	知られている <sup>8)</sup> 。
118	12	マラン散乱方式	ラマン散乱方式
120	3	陽極放射感度	陰極放射感度
123	下3	トランジェントレコーダー	トランジェントレコーダー
142	13	速の分散	風速の分散
	下3	場表面	地表面
147	ランニングヘッド	Nn.	No.
	脚注	Stndies	Studies
150	図1	scale の単位	Unit of Y axis $\mu\text{g}/\text{m}^3$
151	図2	〃	Unit of Y axis m/s
	図3	〃	Unit of Y axis $^{\circ}\text{C}$
152	図4	〃	Unit of Y axis %
156	表4	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	〃	temperateve	temperature
	表5	unotable	unstable
158	表6	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
159	図7	scale の単位	Unit of Y axis $\mu\text{g}/\text{m}^3$
160	図8	〃	Unit of Y axis $\mu\text{g}/\text{m}^3$
162	表9	(2) (ケース1)	(1) (ケース1)

頁	行	誤	正
162	表 (3)	Mean Squre Error	Mean Square Error
163	” (4)	stucture	structure
	” (6)	Mean Squre Error	Mean Square Error
164	5	Enivon.	Environ.
165	要旨 2	分光性	分光特性
179	3	参考文献 <sup>3)</sup>	参考文献 <sup>5)</sup>
203	要旨 1	解析し結果,	解析し,
204	10	distribution	distribution
204	下 6	実施されいるが	実施されているが
209	Fig. 3 caption	vldo	video
	”	airbome	airborne
211	Table 3	Photo 1 Distribution of soil moisture contents in the Kuiuikuri coastal plain (Jan. 23, 1981)	削除
212	Fig. 4 caption	mens	means
217	下 1	加算	加筆
227	図 6		上左 (a) 上右 (b) 下左 (c) 下右 (d)
60	5	誤 $\left[ \frac{1}{M} \sum_{i=ic}^i c X(z_i) \right] \exp(2\bar{a}z_{ic})$	
		正 $\left[ \frac{1}{M} \sum_{i=ic}^i X(z_i) \exp(2\bar{a}z_{ic}) \right] \exp(-2\bar{a}z_{ic})$	
64	式 (5)	誤 $+\frac{X(R_c)}{\alpha_1(R_c)+\frac{S_1}{S_2}\alpha_2(R_c)}+2\int_R^{R_c} \dots$	
		正 $\frac{X(R) \exp \left[ 2 \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \int_R^{R_c} \alpha_2(R) dR \right]}{\alpha_1(R_c) + \frac{S_1}{S_2} \alpha_2(R_c)} + 2 \int_R^{R_c} X(R) \exp \left[ 2 \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \int_R^{R_c} \alpha_2(R') dR' \right] dR$	