

Research Report from the National Institute for Environmental Studies, Japan, No.107, 1987

国立公害研究所研究報告 第107号

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

Studies on Remote Sensing for Spatial and Temporal Analysis of Environment

昭和59～60年度 特別研究報告

Research Report in 1984—1985

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

環境問題は近年増々広域化及び多様化の度を深めている。また、環境を把握するにはより定量的かつ、時間的な変化、すなわち、動態に対応できる情報が要求されるに至っている。このような状況に対応するには、従来からのいわゆるポイントサンプリングによる手法ではもはや不十分となってきている。

このような要請から、国立公害研究所では、環境の把握にリモートセンシング技術を採用することの利点に着目し、そのためのハードウェアの開発、データ処理技術の開発、環境情報抽出手法の開発等を続けて来た。これらの研究は、1980年度より1983年度までの4年間に行われた特別研究「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」を中心にして始められ、二次元あるいは三次元的な環境情報を得る手段を確立した。その成果に基づき、動態の把握についての技術についても完成を目指して、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」を1984年度から4年間の予定で開始した。

ここで採用したリモートセンシング技術は、大気環境の計測に関しては、大気汚染物質やエアロゾルの分布が三次元的に、かつその時間的変動量も測定可能なレーザーレーダーを採用した。また、陸域や水域の環境計測については、平面的な分光反射特性を極めて短時間のうちに計測できる多重分光走査装置(MSS)を用いた。

本報告書は「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」の前期2年分の成果をまとめたものであり、まだ完成されたものではない。しかし、その内容には、環境レベルの濃度のNO₂分布測定用レーザーレーダーの開発や、内陸での高濃度大気汚染の原因と目されている海風前線の立体構造の測定など極めて価値の高い成果が掲載されている。

御一読下さり、御批判、御批評を頂くと共に、この成果が環境科学、環境行政の各方面で御利用頂くことができれば無上の幸いとするところである。

1987年3月

国立公害研究所

所長 江上信雄

目 次

I. 研究の意義と概要	1
大喜多敏一・清水 浩・安岡善文	
II. 報 文	
1. 高分解能レーザーレーダーによる消散係数と気温の遠隔測定の理論的検討	9
清水 浩・野口和夫	
2. 環境濃度 NO ₂ の鉛直分布の観測を目的とする差分吸収 レーザーレーダーの製作	31
杉本伸夫・松井一郎・笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫	
3. エアロゾル分布の時間変動による差分吸収レーザーレーダー 測定の誤差について	49
杉本伸夫・松井一郎・笹野泰弘・清水 浩・竹内延夫	
4. 散乱パラメータを一定としたときのレーザーレーダー方程式解の誤差	57
笹野泰弘・Edward V. BROWELL・Syed ISMAIL	
5. 多波長レーザーレーダーによるエアロゾル粒径分布計測に関する 数値シミュレーション	65
中根英昭・浦 慶・笹野泰弘・北村新三	
6. 大気汚染成分の鉛直分布	85
刃刀正行・柴田恵子・土井妙子・溝口次夫	
7. 一般化されたエントロピー評価基準によるレーザーレーダー画像の強調	103
宮本定明・大井 紘	
8. 多重閾値による MSS データの探索的な分類法	117
横田達也	
9. ランドサット MSS データによる植生相観の対話型分類法	133
袴田共之・横田達也・廣崎昭太	
10. 大型レーザーレーダーによる海風前線の構造の観測	155
中根英明・笹野泰弘	

11. 大気汚染物質濃度の時間空間変動特性の経年変化に基づいた 観測系構成の考え方	167
新藤純子・大井 紘	
成果発表一覧	185

CONTENTS

I. The Purpose and Outline of the Studies	1
T. OKITA, H. SHIMIZU and Y. YASUOKA	
II. Original Papers	
1. The theoretical analysis for the measurement of extinction coefficient and temperature by the high spectral resolution laser radar	9
H. SHIMIZU and K. NOGUCHI	
2. A differential absorption laser radar system for measurement of vertical distribution of NO ₂ in the urban atmosphere	31
N. SUGIMOTO, I. MATSUI, Y. SASANO, H. SHIMIZU and N. TAKEUCHI	
3. Experimental estimation of the error due to the fluctuation of aerosol backscattering in DIAL measurements	49
N. SUGIMOTO, I. MATSUI, Y. SASANO, H. SHIMIZU and N. TAKEUCHI	
4. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the laser radar solution	57
Y. SASANO, E.V. BROWELL and S. ISMAIL	
5. Numerical simulation on measurement of size distribution of aerosols by multi-wavelength laser radar	65
H. NAKANE, P. QING, Y. SASANO and S. KITAMURA	
6. Vertical distribution of atmospheric pollutants	85
M. KUNUGI, K. SHIBATA, T. DOI and T. MIZOGUCHI	
7. Enhancement of laser radar images based on optimization of a generalized histogram entropy	103
S. MIYAMOTO and K. OI	
8. A classification method of remotely sensed multispectral data by use of the exploratory selected multi-level thresholds	117
T. YOKOTA	

8. A classification method of remotely sensed multispectral data by use of the exploratory selected multi-level thresholds	117
T. YOKOTA	
9. An interactive classification of vegetation by using LANDSAT MSS data	133
T. HAKAMATA, T. YOKOTA and S. HIROSAKI	
10. Structure of a sea-breeze front revealed by the NIES large laser radar	155
H. NAKANE and Y. SASANO	
11. Basic concepts of an air monitoring network design based on yearly change of spatial and temporal variation of concentration data	167
J. SHINDO and K. OI	
List of Publications Related to the Project	185

研究の意義と概要

The Purpose and Outline of the Studies

大喜多敏一¹・清水 浩¹・安岡善文²

Toshiichi OKITA¹, Hiroshi SHIMIZU¹ and Yoshifumi YASUOKA²

要 旨

本研究では、遠隔計測手法を用いて大気及び陸域、水域の環境動態の評価手法の開発を行うことを目的としている。本研究で用いた計測手法は大気域ではレーザーレーダー、陸域、水域では多重分光走査装置(MSS)である。本報告書は4年間の研究期間のうちの前期2年間の成果を主としたものである。これまでの主な成果はNO₂測定用の差分吸収型レーザーレーダーが完成し、最小濃度2ppbまでのNO₂が高度1.5kmまでにわたって測定できたこと、大型のミー散乱型レーザーレーダーを使用して海風前線の構造とその動態がとらえられたこと、画像の強調手法、土地被覆分類手法、植生分類手法の開発を行ったこと、及び、パターンデータをもとにした、大気汚染のモニタリングポイントの配置の方法についての検討を行ったことなどである。

Abstract

The objective of this project is to develop monitoring techniques of dynamics of the environment through remote sensing. The instruments employed here are laser radars in the atmospheric environment region and multi-spectral scanners (MSS) in the water region and ground environment region. The period of the project is 4 years from 1984 to 1987 fiscal year. In this report, results in the first half-period are found. The major achievements are: A differential absorption laser radar was constructed and the NO₂ concentration in the ambient level of 2 ppb was successfully measured. The structure and movement of a sea breeze front was observed by a large scale laser ladar. The image enhancement techniques and land average classification techniques were developed. The spatial and temporal structure of atmospheric pollution was analyzed in order to organize the ground monitoring systems for atmospheric environment.

-
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 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.

1 本研究の目的と意義

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ところであろう。

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域の変化等が進行し、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、植生等にかかわるそれらの時間的変化を含めた空間的・時間的な監視と、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、航空機や気球などの飛翔体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航空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、短時間内に地域的分布やその時間変化を把握する必要がある。また、粒子状物質、SO₂、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共に、それらを環境予測へ適切に応用することが望まれる。

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、その空間分布の時間的変化を長期的に監視してゆくことが必要である。

以上の観点から、広い領域にわたる環境の状態を定量的に把握するための技術は急速に必要性を増しつつある。このために国立公害研究所では昭和55年度から昭和58年度の4年間で前特別研究「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」を行い、環境の遠隔計測について、総合的な取り組みを行った。ここでは計測装置として、大気域についてはレーザーレーダー、水域、陸域に関しては多重分光走査装置(MSS)を選んだ。

レーザーレーダーの測定原理は電波をエネルギー源として使用するレーダーと同等であり、距離の分解能を持って測定できるという機能を有する。しかも、レーザーレーダーは電波を使用したレーダーと比べて非常に細かい微粒子まで測れるという特長があり、かつ、光と物質との特別な相互作用

用を用いれば、大気汚染に関連する特定の物質の濃度も測定可能である。

また、MSSは太陽光の反射光強度をいくつかのスペクトル別に測定する装置であるが、スペクトルによる反射率は対象の物性を反映していることを利用して、水質や土壌の特性、植生などを測定することが可能である。MSSは航空機や人工衛星などに搭載することにより2次元にわたる広い領域を短時間で測定することが可能であるという特徴を有する。以上の特徴から、環境の遠隔測定装置として大気状態ではレーザーレーダーが、水域・陸域ではMSSが最も良く機能を発揮する。

さて、前特別研究では遠隔計測技術を時間成分を含まない2次元平面あるいは3次元空間に適用することに成功を納めた。この成果を十分に活用し、新たに時間変化を含めた環境すなわち環境の動態の遠隔計測技術を開発することが環境計測の立場からは重要視されるに至った。このような主旨で開始されたのが本特別研究である。

本特別研究で特に主眼としたことは、環境動態をとらえることにより環境汚染の発生、移流・拡散等にかかわる構造をとらえるために有効な計測技術とパターン情報処理を確立し、この技術を用いて環境の評価を行うための手法を確立することである。

この目標を受けて、本研究では、環境動態の評価を行うための装置開発に始まって、動態把握による環境の評価手法に関する研究に至る一連の研究を四つのサブテーマに分けて行った。それぞれのサブテーマの課題名は以下に示す通りである。

- 1) 環境動態の把握のための遠隔計測装置の開発に関する研究
- 2) 遠隔計測技術にかかわる大気の光学的性質とその時間、空間変動に関する研究
- 3) 環境動態の把握のためのパターン情報処理に関する研究
- 4) 動態把握による環境の評価手法に関する研究

本特別研究は上記のサブテーマの下、前特別研究と同様、対象領域を大気領域と水域・陸域の二つに大別した。そして、使用する主要な遠隔計測機器として大気域ではレーザーレーダー、水域・陸域ではMSSを選んだ。

本報告書は4年間にわたる研究期間のうちの前期2年間における研究成果をまとめたものであり、第Ⅱ部は論文集の形式をとっている。

2 研究成果の概要

本研究では大気域ではエアロゾルとNO₂を測定対象として選んだ。エアロゾルはそれ自身が環境汚染物質であるが、大気の種類々の動きのトレーサーとしても重要な働きを持つ。したがって、エアロゾルの分布とその時間的变化を適確にとらえることができれば、そこから大気に関する多くの情報を導くことができる。またNO₂は現在大気汚染物質として最も重要視されている物質であり、NO₂の空間分布とその時間変化の測定は大気汚染の研究の立場からは最も強い要請がある。

また、陸域では植生と土壌水分の測定が目標とされている。植生や土壌水分の測定は、対象となる領域が広く、かつ、人間が直接分け入りにくい山地も含まれる。したがってその正確な把握には

遠隔計測に頼らざるを得ない。また水域では、クロロフィル含有量などの水質を測定することとしたが、これらの対象もその平面的領域が広くかつ、比較的急速な移動や変化をするという点で遠隔計測法の利点が最も良く生かせる分野である。

本研究では以上の測定対象について四つのサブテーマの下に研究が行われているが、大気域に関してはサブテーマ1、2及び4に含まれている。また、水域、陸域に関する研究はサブテーマ2、3及び4で扱われている。大気域と陸域・水域とでは、測定対象が異なることはもちろんのこと、測定機器も違っているが、データ抽出、誤差の除去、あるいは環境の評価の手法等には共通性があるため、手法や手続きごとに一つずつのサブテーマに分けて研究を行っている。以下に、各サブテーマごとの成果の概要を紹介する。

2.1 環境動態の把握のための遠隔計測装置の開発に関する研究

本サブテーマでは本特別研究を完成させるために、4種類の機器を開発することを目標としている。これらの機器と、その開発の目的は次のとおりである。

- 1) 高信頼レーザー光発生装置：動態把握のためには時間的に連続したデータを長期にわたって得ることが必要である。しかも、測定は温度や湿度等の環境が大幅に変化する野外で行われる。このような目的に使用可能なレーザーレーダー用の光源はこれまでになく、新たに開発することの必然性がある。
- 2) 高分解能レーザーレーダー：従来から使われてきたミー散乱型レーザーレーダーは、感度が良く、測定が簡単であるという特徴を有する。しかし、測定信号強度は、エアロゾルによる後方への散乱の大きさであるミー体積後方散乱係数と、測定地点に至るまでに、散乱や吸収によって生じるレーザー光の消散の大きさを表す消散係数の二つの値の関数であり、どちらか一方を一義的に決めることはできない。このため、ミー散乱型レーザーレーダーによる定量的なデータの取得は難しいとされてきた。この問題をハードウェア的に解決するのが高分解能レーザーレーダーである。この方式はエアロゾルによるミー散乱と空気分子によるレイリー散乱を分離して計測することにより、目的を達成するものである。
- 3) 多波長化レーザーレーダー：エアロゾルの粒径分布の情報は、エアロゾルの光学的性質、組成、起源等を知る上で極めて重要である。粒径分布を知るための一つの手段として、レーザーレーダーに使用するレーザーの波長を多波長化することが有効である。この目的のために、多波長で測定が可能な装置開発が必要である。
- 4) NO₂ 測定用差分吸収レーザーレーダー (DIAL)：差分吸収レーザーレーダーは測定対象の吸収線に一致した波長のレーザーと、これからずれた波長のレーザーを光源として使い、それらの波長のレーザー光が大気中を伝播する際の減衰の違いから対象の濃度を測定するものである。NO₂ 分布の遠隔計測には差分吸収レーザーレーダーが最も高感度であり、環境レベルの濃度の測定には、この方式が適している。

これらの装置開発のうち、現時点では、まず高分解能レーザーレーダーの開発のための理論的検討が完了している(清水ら、Ⅱ-1)。この方式は、空気分子による散乱と、エアロゾル粒子による散乱はスペクトル幅が異なることを利用して、狭帯域フィルターによって、これらのスペクトルを分離することが基本的な原理である。この狭帯域フィルターとして、蒸気状の原子の吸収線を用いることがこの装置の特徴であるが、ここでは、最適な原子の吸収線と原子の温度の最適値の選定方法について検討している。また、この方式における誤差の要因を洗い出し、定量的な分析を行っている。さらに、測定感度の計算も行っている。これらの検討をもとに、装置の開発が進められている。

次に、NO₂測定用差分吸収レーザーレーダーは、ハードウェアが完了して試験を行いながらサブテーマ4で使用するためのデータの蓄積を行いつつある(杉本ら、Ⅱ-2)。この装置はYAGレーザーの第3高調波で励起した色素レーザーを光源としているが、0.1秒の間隔で2本の波長のレーザー光を交互に発振させていることが特徴である。

差分吸収レーザーレーダーでは、2本の波長の光を同時に使用して測定すべきか、1本ずつ交互に出しても測定誤差に影響を与えないか否かについてはこれまでに多くの議論がある。この問題に結論を与えるため、ミー散乱型大型レーザーレーダーを使用して検証実験を行った結果、0.1秒以下の間隔でレーザーを発射すれば、測定誤差に影響は現れないとの結果が得られた(杉本ら、Ⅱ-3)。ここで開発した装置はこの結果をもとにして作られたもので、従来の差分吸収方式レーザーレーダーでは2台の色素レーザーが必要であったものが、この方式により1台で機能が果たせることになった。この装置は全体が普通トラックに積載可能な形状のコンテナに納められており、全国どこへでも移動させて測定することが可能である。

この装置の最小測定感度は測定時間を10分間に設定したとき、2ppbであり、環境濃度レベルのNO₂を水平距離約3km、高度約1.5kmまで測定することが可能である。この装置を用いたNO₂の測定実験は浦和市で続けられているが、NO₂濃度の高度分布の日変化がとらえられている。

2.2 遠隔計測技術にかかわる大気の光学的特性とその時間・空間変動特性に関する研究

本研究では、差分吸収レーザーレーダーにおけるNO₂の測定精度や多重分光データの解析における、いわゆる大気効果に及ぼすエアロゾルの影響を調べることを目的としている。そのため、エアロゾルの光学的特性と空間変動特性について検討すること、及び、この検討結果を用いて多重分光データを解析する上での大気効果の補正手法について研究することが目標である。

ここではその目的を達成するための基礎的検討として、まず、ミー散乱型レーザーレーダーで得られる信号から、体積後方散乱係数や体積消散係数を一義的に抽出するためのソフトウェア的手法について検討した(笹野ら、Ⅱ-4)。ここでは、体積消散係数と体積後方散乱係数の比をミー散乱パラメータとして定義し、この値を適当な値に設定する手法についてシミュレーションを行っている。ミー散乱パラメータはエアロゾルの粒径分布や組成に依存する量であって、通常10から90程度

の値を持つ。この値が空間的に一様である時には平均的な値である50程度の値を設定して、体積後方散乱係数等を求めた場合、ミー散乱パラメータの値がその誤差に与える影響が小さいことは、前特別研究で既に確認されている。一方、ミー散乱パラメータが不均一な場合について検討したのがⅡ-4である。その結果によると、ミー散乱パラメータの値の与え方いかんによっては、測定値の誤差がかなり大きなものになるという結論が得られ、ミー散乱パラメータの値の設定には特に注意が必要であることが明らかになった。ここでは、この問題のひとつの解決策として、湿度とミー散乱パラメータの値についての相関をあらかじめ求めることが重要であることが指摘されている。

また、多波長レーザーレーダーの有効性を確かめるために、エアロゾルの粒径分布を測定する際の精度等の数値シミュレーションを行った(中根ら、Ⅱ-5)。このシミュレーションでは、YAGレーザーの基本波(1.064 μm)、第2高調波(0.532 μm)、及びルビーレーザーの基本波(0.694 μm)と第2高調波(0.347 μm)の4本の波長を用いて、エアロゾルの消散係数と体積後方散乱係数をそれぞれ求め、これらの都合八つのデータからエアロゾルの粒径分布を求めることの可能性を追求している。その結果、エアロゾルの複素屈折率がある程度精度良く求められていれば、粒径分布はよい精度で得られることが分かった。

これらの二つの研究から、エアロゾルの性質を定量的に導き出すための基本的な条件が明らかとなったわけで、これらの結果を応用すればエアロゾルの光学的性質についての情報をレーザーレーダーデータから求めることは容易になる。

これら二つの研究に付け加え、レーザーレーダーによる計測を都市内の建築物の建て込んだ地域に適用する際に、レーザービームが建物のために届かず、死角ができるという問題点に考慮を払う必要がある。もし、建築物の障害を受けずにレーザービームを水平に飛ばすことができる高度と、地上との間に汚染物質やエアロゾル濃度が高い相関を見つければ、この問題は解決する。このような要請から、気象研究所の高度200mの鉄塔の各高度に各種の大気汚染物質や微量成分の測定装置を設定し、高度ごとの濃度分布の時間変化を長期的にわたって観測した(功刀ら、Ⅱ-6)。測定対象はエアロゾルとオゾン及び窒素酸化物である。これらの測定の結果、混合層内部ではそれぞれの物質の高度ごとの濃度の相関は高いことが示された。しかし混合層の内部とその上では濃度に著しい違いが見られた。したがって、レーザーレーダーデータより地上付近の濃度を推定するには、データの高度の下限が混合層内部にある必要があることが結論される。

2.3 環境動態把握のためのパターン情報処理に関する研究

環境の変化を把握するためには、複数の異なった時点での画像データを重ね合わせて比較し、その時間的変化を解析することが必要となる。このためには、画像上の位置の精度(幾何精度)の向上や画像信号の基準化をはじめとして、様々な画像処理手法の開発が要求される。本サブテーマでは、各種の環境項目について遠隔計測によるパターン計測の総合化を図ると共に、パターンの動的変化を解析するための情報処理手法及びシステムの開発を行うことを目的とした。これまでの成果は、

特に、

- 1) 画像の強調手法の開発
- 2) 土地被覆分類手法の開発
- 3) 変化に着目した植生分類手法の開発

を行ったことである。

画像強調は、パターンの特徴をとらえる上で重要な処理手法の一つである。本研究では、画像の有する濃度ヒストグラムを変換することにより画像強調を行う手法を提案した。すなわち、ここでは、画像のヒストグラムに対して一般化されたエントロピー評価基準を導入し、ヒストグラムを任意のヒストグラムに変換する時、この変換パラメータ(ヒストグラムの上限と下限)を、エントロピー基準を最大化するように選択することにより画像の強調を行う。本方式を、レーザーレーダーで得られたエアロゾルの分布パターンに適用し、パターンの特徴が明示されることが示された(宮本ら、II-7)。

人工衛星や航空機で得られた多重分光画像からの土地被覆分類手法の開発では、人間が介在して探索的に分類を進めていく手法について検討した。本方式は、分類手法の中でも、植生分類における樹種分類のように、分光特性が非常に類似した対象領域の分類に有効な手法である。多重分光画像の分類では従来、最尤法分類、線形判別分類などの手法が用いられてきたが、これらの方法では、対象領域の特性についていくつかの仮定を設定しているため、これらの仮定からはずれたデータ(実際の遠隔計測データではこのような場合が多い)では誤分類が多くなる。本研究で提案する方法は、簡単な多重閾値処理による分類手法であるが、人間が介在して探索的に閾値の設定を行い、分類の容易な部分から順次分類していくという手法を用いる。本方式を丘陵地帯で得られた航空機 MSS データに適用した結果、良好な分類精度が得られた(横田、II-8)。

さらに、土地被覆分類の中でも難度の高い植生分類の方法について、複数の時期のデータを併用し、分類精度を向上させる手法の開発を行った。ここでは、春夏秋冬異なった時期のデータを重ね合わせ、これらのデータを主成分分析によってデータ圧縮を行い、変化の特徴を強調した上で分類を行う。分類手法には上記の多重閾値による探索的方法を用いた。本方式は、四季による植生の変化に着目し、これを強調して分類の精度を上げるもので、埼玉県において得られた LANDSAT MSS データに適用し良好な結果を得た。なお本方式は、複数時期のデータから変化した部分を抽出する方法としても有効であり、植生動態の把握に適用することが可能と考えられる(袴田ら、II-9)。

2.4 動態把握による環境の手法に関する研究

本サブテーマでは高度な遠隔計測法によって得られた各種環境項目の分布パターンとそれらの変化から、時間的・空間的特性の現象を解明し、環境の動態を把握することによる環境の評価を行うことを目的としている。

本サブテーマでは大気領域の研究として、エアロゾルをトレーサーとした海風前線の観測から、大気塊の動態を把握する試みが成功を納めている(中根ら、II-10)。

良く知られているように海風は日射の強い日に、海よりも陸地が高い温度に暖められることによって海から陸地に向かって吹く風である。臨海地域に工場や大都市がある場合、そこで発生した汚染物質が海風によって運ばれ内陸地域に被害をもたらす例がある。したがって海風の構造、特に海風によって作られる前線である海風前線の構造を測定することは重要であるとされてきた。しかし、従来の方法では、地上の点において前線の通過は観測できても、その立体構造やその時間変化を観測することは不可能であった。本研究では大型レーザーレーダーを水平及び垂直に掃引することにより、その構造をとらえることに成功した。しかも時間間隔を置いて同様の測定を繰り返すことにより、その動態をも測定することが可能となった。

また、評価のための重要な遠隔計測法の利用分野として、地上大気の常時観測系があるが、これを実測値をもとにして検討している(新藤ら、II-11)。

この研究では、遠隔計測及び点観測による計測を融合した観測システムを構成するための第1歩として、従来からの点観測に基づいたデータから、大気汚染物質濃度の時間的、空間的変動を調べた。この結果、大気汚染の分布パターン及び距離による相関特性は経年的にも季節的にも大きく変動しており、それらの変動の下で、有効性を維持できる観測システムを構想しなければならないことを明らかにした。これは、今後、地上観測システムと遠隔計測システムの併用によって、経年的、季節的変動に対してより頑健な観測システムを構成する必要があることを示すものと考えられる。

II-1 高分解能レーザーレーダーによる消散係数と 気温の遠隔測定の理論的検討

The Theoretical Analysis for the Measurement of Extinction Coefficient and Temperature by the High Spectral Resolution Laser Radar

清水 浩¹・野口和夫²

Hiroshi SHIMIZU¹ and Kazuo NOGUCHI²

要 旨

エアロゾルと空気分子の散乱比，視程及び気温を測定するためのレーザーレーダーの新しい方式を提案する。高分解のレイリー・ミー散乱の理論に基づき，大気パラメータの測定のために蒸気状の原子を狭帯域バンドパスフィルターとして使用することの可能性を数値計算により検討した。気温測定のために最適条件で原子フィルターの温度を設定する手続きについて述べた。また測定誤差と感度の検討も行った。本方式は高分解能レーザーレーダーと名付けるが，現在製作中の装置では気温の測定が実用的なレベルで行うことが可能であることが示された。

Abstract

A new lidar technique for measuring the profiles of backscatter ratio, atmospheric visibility, and atmospheric temperature is proposed. Based on the theory of high resolution Rayleigh/Mie scattering, the feasibility and advantages of using atomic vapor cells as blocking filters for measuring atmospheric parameters are demonstrated with a numerical example worked out in detail.

The procedures for selecting the optimum temperature for an atomic vapor filters as well as for error analysis and sensitivity estimation were carried out. We named the new technique the High Spectral Resolution Laser Radar or HSRL. It is verified that the precision of an atmospheric temperature measurement with a HSRL system under construction is feasible for practical use.

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. 昭和60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 千葉県習志野市津田沼)

Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. Present Address: Department of Electric Engineering, Chiba Institute of Technology, Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275, Japan.

1 はじめに

レーザーレーダーは、広い意味でのリモートセンシング技術の中で分類すると、アクティブリモートセンシングの一技術に属する。アクティブリモートセンシング技術は、太陽光を光源とするパッシブリモートセンシングに比べて、自然条件に影響されないことや、深さ方向に距離分解能を持って計測できることなどの特徴を有している(Hinkley, 1976)。このため、レーザーレーダーはこれまでは、主に大気状態の測定に使用されてきたが(Shimizuら, 1985)、今後、陸域や、水域(Buftonら, 1983)を対象とした測定にも応用分野が広がるものと期待されている。

レーザーレーダーをその測定方式により分類すると、ミー散乱型(Fiocco & Smullin, 1963)、ラマン散乱型(Inaba & Kobayashi, 1972)、差分吸収型(Shotland, 1964, 1974)などに分けられる。このうち、ミー散乱型は任意の波長のレーザー光を使用し、大気中のエアロゾルからのミー散乱光強度を測定するものである。この方式は感度が良く、分光などに特別な配慮を要しないのでこれまで最も多く使われてきた。ところがこの方式では、対象物の位置は測定できるが、その定量的な性質についての情報を得ることは極めて困難であった。また、ラマン散乱型は大気中の空気分子や、微量分子などからのラマン散乱光を測定するもので、多くの種類の気体を1台の装置で測定できるという特徴を有している。しかし、この方式は感度が悪いという欠点を持っている。差分吸収方式では測定したい物質の吸収線に同調したレーザーを使用し、その物質の分布を測定するものである。この方式は感度が比較的良好であるが、装置の構成が難しいという欠点を持っている。

以上のように、各種のレーザーレーダーはそれぞれに利点、欠点を有している。そのために、これらの方式を越える新しい方式の登場が待たれるところである。

このような期待の一部に応えるべく、新しいレーザーレーダー方式を考案した。この方式は一台の装置で、エアロゾルの体積後方散乱係数、視程、気温を同時に測定することを目的としたもので、ラマン散乱や差分吸収方式より感度が良いということ、ミー散乱方式に比較して、より定量的な情報が得られるというのが特徴である。この方式は高分解の分光技術を使用することから、高分解レーザーレーダーと呼ぶことにする。

この方式はエアロゾルにレーザー光が照射された時に生ずるミー散乱と、空気分子に照射された時のレイリー散乱(正確にはレイリー-ブリルアン散乱)の光学的性質を利用するものである。これまで、このような性質を利用する試みは幾つかあった。まず、Fioccoら(1971)が気温を求めるための基礎実験を行っている。最近になって、Elorantaら(1982)は銅蒸気レーザーを光源とし、3個の直列に並べたファブリーペロー干渉計を分光装置として使って、エアロゾルの体積後方散乱係数と視程を同時に測定することを試みている。さらにSchwiesow & Lading(1981)は、安定化した2個のマイケルソン干渉計を用いて気温を測定する方法を提案している。彼らの試算では距離が5 kmの遠方で、 ± 1 Kの感度が測定できるという結論が得られている。

高分解レーザーレーダーが、所期の目的を達成するには、ミー散乱とレイリー散乱を分離するためのフィルターあるいは分光装置が基本的な役割を果たす。以前の高分解レーザーレーダーの試み

では、分光装置として、ファブリーペロー型やマイケルソン型の干渉計が使われてきた。これらの干渉計は、スペクトルの分解能は非常に良いという利点は有するが、スペクトルの分離能力 (rejection ratio) がそれ程大きくないという一つの欠点がある。したがって、分離能力を増すためには同一特性の干渉計を複数個シリーズに使用する必要がある。また干渉計は一般に機械的に不安定で、振動や、気温の変化で容易に性能が変化するという大きな欠点を持っている。さらに、信号となるべき光の透過効率も小さく、損失が大きい。したがって、室内実験で、短時間使用するには、これを用いることも可能だが、実用性には欠けるという問題を持っていた。

分光装置のこのような欠点を取り除くために筆者らは、分光装置あるいは、フィルターとして、蒸気状の原子を使用することを提案した (Shimizu ら, 1983, 1985, 1986 ; 清水・She, 1984 ; 野口ら, 1985)。

なお、ここでは蒸気状の原子のことを原子フィルターと呼ぶことにする。

2 レイリー散乱スペクトルとその気温依存性

測定原理を説明するにはまず、大気中の物質による光の散乱現象について述べておく必要がある。粒子と光の波長に対する大きさで分類すると、大気中には二種類の粒子が存在する。一つは波長よりも十分に小さな物質で、主に大気中の分子がそれに当たる。もう一つは波長と同程度あるいはそれ以上の大きさを持つもので、粉じん、ゴミ、霧粒などのいわゆるエアロゾルである。前者による光の散乱にはレイリー散乱とラマン散乱があり、後者によるものはミー散乱と呼ばれている。なお、レイリー散乱の呼び名については現在でも、多くの議論がある。通常レイリー散乱と呼ばれており本方式においても用いようとしている散乱は正確にはブリルアン散乱も含まれるという論文も発表されている (Young, 1982)。ここでは、便宜上、ブリルアン散乱も含めたレイリー散乱をレイリー散乱と呼ぶことにする。ところで、ブリルアン散乱とは、光の散乱と同時に音響振動も引き起こす散乱のことで、入射光と散乱光の間には音響振動のエネルギーに相当する波長のシフトが存在する。

ミー散乱とレイリー散乱の性質について少し触れる。ミー散乱の散乱の大きさ (散乱断面積) は、粒子断面積にはほぼ比例する。これに対して、レイリー散乱は断面積の 2 乗に比例する。逆に粒子径が同じであれば波長の 4 乗に逆比例して散乱断面積が大きくなる。この 4 乗特性が空が青いことの原因とされている。すなわち、空気分子は波長の長い赤よりも短い青をより強く散乱する。もう一つの大きな性質の違いは、散乱スペクトルの形状である。レイリー散乱スペクトルでは、粒子が熱運動をしているために生ずるドップラー効果により、入射光のスペクトルを中心に広がりを持っている。さらにブリルアン散乱が生じ、ブリルアン散乱自体もドップラー効果を持っている。ミー散乱スペクトルにはブリルアン散乱に相当するものはなく、入射レーザー光を中心に、わずかの広がりを持つ。この広がりの原因は、レイリー散乱同様にドップラー効果によるものである。その広がり幅は粒子の質量の平方根に比例するため、レイリー散乱に比べてけた違いに小さい。これらの散乱スペクトルを模式図的に描くと、図 1 (a) のような形となる。図 1 において、レイリー

散乱はガウス型のスペクトルが三つ重ね合わされた形となっている。そして、スペクトル全体の広がり、可視の入射光に対して数 GHz である。また、ミー散乱は、スペクトルの中心部に鋭いピークを持つ。このようにミー散乱とレイリー散乱とは、スペクトル形状に違いがあるため、これを利用して、両者の散乱を分離して測定を行うというのが、高分解レーザーレーダーの基本的な原理である。こうして分離した時に、測定可能な大気情報をまとめると次のようなものがある。

- 1) 視程(あるいは光の減衰係数)
- 2) ミー体積後方散乱係数(あるいは散乱強度比)
- 3) 気温や気圧などの気象要素

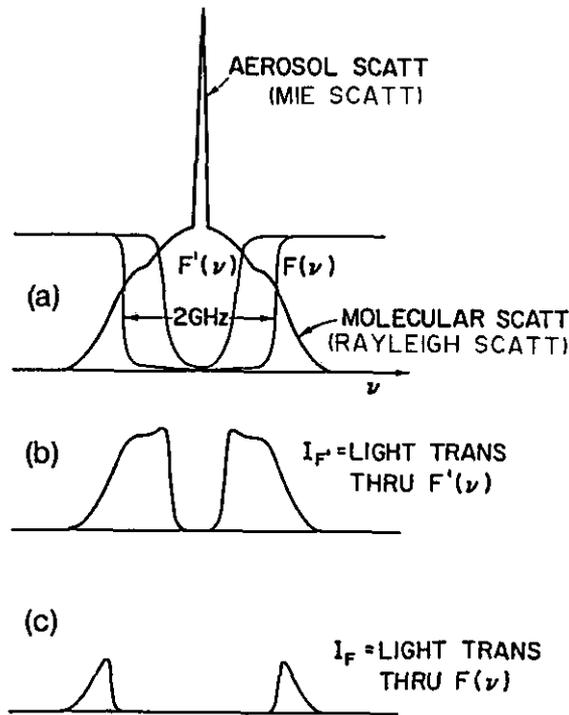


図 1 (a) 空気分子によるレイリー散乱とミー散乱のスペクトル形状及び原子フィルターの透過率 $F(\nu)$ 及び $F'(\nu)$
 (b) は低温のフィルターを通した後のスペクトル形状
 (c) は高温のフィルターを通した後のスペクトル形状
 ここで $F(\nu)$ 及び $F'(\nu)$ はそれぞれ高温と低温の原子フィルターの透過率

Fig. 1 (a) Rayleigh/Mie light scattering spectrum of air molecules
 (b) Residual scattering spectra after the transmission through the lower temperature filter
 (c) Residual scattering spectra after the transmission through the higher temperature filter

In the same figure, the transmission curves of two atomic filters, $F'(\nu)$ at lower temperature and $F(\nu)$ at higher temperature.

さて、レイリー散乱スペクトルを記述する理論には Yip & Nelkin (1964) により提案されたモデルと、Tenti ら (1974) により提案されたモデルが代表的である。これらのモデルについて Young & Kattawar (1983) は、それぞれ SM モデル、S6 モデルと名づけているので、以下本文でもこのモデル名を使用する。

これらのモデルはいずれも、粒子の運動を記述する運動方程式を解くことにより、スペクトル形状を求めるものである。SM モデルは単原子分子について行ったモデルであり、S6 モデルは複数の原子から成る分子にも適用可能なモデルである。そして、実際の空気分子のスペクトルには S6 モデルのほうが一致がよい。

S6 モデルの計算には、分子の粘性のパラメータであるシアビスコシティーとバルクビスコシティーの比と、シアビスコシティーと熱伝導率の比の値が必要である。これらの値は Young & Kattawar と同様、300K における N_2 分子の値として、それぞれ 1.407 及び 0.198 を使用した。なお、これらの値は気温によりわずかに変化するが、ここでは一定と考えた。

SM モデルの計算には、ブリルアン散乱とレイリー散乱の大きさの比を表すパラメータ y が必要であるが、 y は次式で定義される。

$$y = 0.2308 \frac{T_a + 110.4}{T_a^2} \cdot \frac{P_a \cdot \lambda}{\sin(\theta/2)} \quad (1)$$

ここで、 T_a は気温、 P_a は気圧、 λ は入射光の波長、 θ は入射光と散乱光のなす角度である。

高分解能レーザーレーダーによる気温測定で必要になるレイリー散乱スペクトルの情報は、測定したい気温と気圧の下での空気分子のスペクトル形状と、その温度変化率である。温度変化率は測定したい気温におけるスペクトル形状と、気温を 1 K 変化させたときの形状とを計算しその差をとることにより求められる。ただし、空気密度も気温ともに変化し、しかも、レーザーレーダー信号強度は空気密度の変化にも依存するので、この変化も考慮に入れる必要がある。したがって、高分解能レーザーレーダーで測定される気温変化率は次式となる。

$$\Delta R(x) = \{R_R(T_a, x) - R_R(T_a + 1, x) \cdot T_a / (T_a + 1)\} / R_R(T_a, x) \quad (2)$$

ここで、 R_R は中心周波数から x ずれた規格化された周波数におけるレイリー散乱スペクトル強度で、

$$\int_0^\infty R_R(T_a, x) dx = 1 \quad (3)$$

と定義する。なお、 $x = -2\pi\nu/Kv_0$ で、 ν は周波数、 K は散乱波数ベクトルで、 $K = (4\pi/\lambda) \cdot \sin(\theta/2)$ と表され、 θ は入射光と散乱光のなす角で、 v_0 は分子の速度である。後に述べるように、高分解能レーザーレーダーに使用可能な原子は、Rb (780nm)、Ba (554nm)、Cs (389nm)、Pb (283nm) の 4 種類であるが、これらのそれぞれの波長でのレイリー散乱スペクトルとその温度依存性を S6

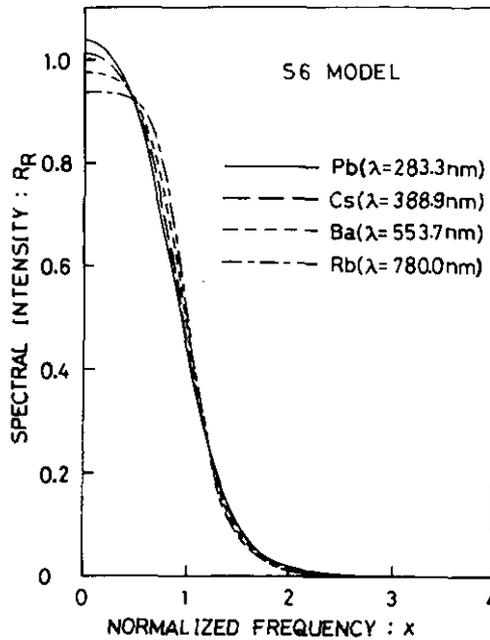


図 2 S 6 モデルによる N_2 分子のレイリー散乱スペクトル
 Fig. 2 Rayleigh spectra of N_2 by the S 6 model

モデルによって計算した結果を図 2 及び図 3 に示す。

図 3 より、いずれの原子フィルターの波長においても温度変化率が、規格化周波数の小さいところでは正で、いったん 0 になった後、負の値をとるのが特徴である。さらに波長が短くなるにしたがって変化率が大きくなる。これは、波長が短くなるに従いブリルアン散乱の強度が大きくなることによる。

また、389nm (Cs の波長) におけるスペクトルの気温依存性を、SM モデルと S 6 モデルについて比較した結果を図 4 に示す。図 4 を平均的にみると、温度変化率は S 6 モデルのほうがわずかに大きい。また、変化率が正から負に変わる点の規格化周波数がわずかに異なる。

3 原子フィルター

すべての原子は近赤外域から X 線領域にかけて、鋭い吸収スペクトルを持っている。これは電子遷移による吸収に基づくもので、吸収の中心での吸収係数が極めて大きい。その吸収線の幅は原子の密度にも依存するが、そのドップラー幅により強く影響を受ける。原子の密度はその温度における原子の蒸気圧で決まり、ドップラー幅も絶対温度の平方根に比例する。いずれにしても、吸収線の幅は原子フィルターの温度で制御可能である。レーザーレーダーに原子フィルターを用いるに

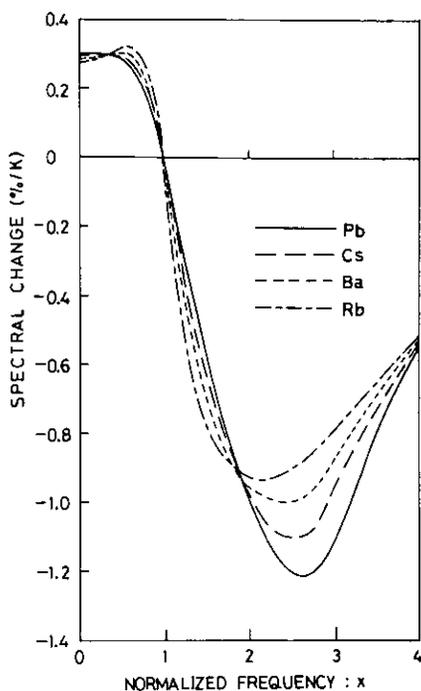


図 3 S 6 モデルによる N_2 分子のレイリー散乱スペクトルの気温依存性
 Fig. 3 Temperature dependences of Rayleigh spectra of N_2 by the S 6 model

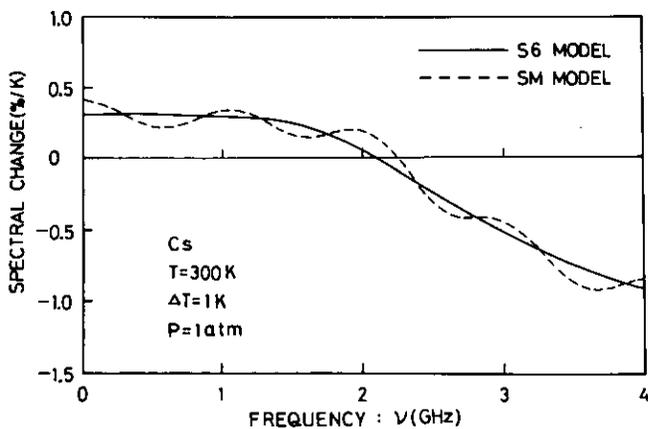


図 4 S 6 モデルと SM モデルによるレイリー散乱スペクトルの温度依存性の比較
 Fig. 4 Temperature dependences of Rayleigh spectra by the S6 and SM models

は、まず、レーザーの波長を原子フィルターの中心波長に同調する必要がある。このようなレーザー光を用いて生じた散乱に対して、低い温度に設定した原子フィルターを通過させると、図 1 (b) に示すようにミー散乱のみが吸収を受け、レイリー散乱のみが測定される。また、ある程度高い温度に設定した原子フィルターを用いると、図 1 (c) に示すようなレイリー散乱のウイング部のみを測定することができる。こうして、ミー散乱とレイリー散乱を分離し、かつレイリー散乱を中心部とウイング部に分けることが可能となる。

蒸気温度 T_0 、セルの厚さが l の原子フィルターセルを考える。この場合には、原子の吸収線の幅はドップラー広がり依存するから、周波数 ν の透過率 F は次式で与えられる (Mitchell & Zemansky, 1971)。

$$F(\nu) = \exp \{-k_0 l \exp[-4 \ln 2 (\nu - \nu_0)^2 / (\Delta \nu_D)^2]\} \quad (4)$$

又は

$$F(x) = \exp \{-k_0 l \exp[-\ln 2 (K \nu_0 x)^2 / (\pi \Delta \nu_D)^2]\} \quad (5)$$

ここで、 k_0 、 ν_0 、 $\Delta \nu_D$ はそれぞれ、基底レベルからの遷移に対する共振点での吸収係数、共振周波数及びドップラー幅である。 k_0 と $\Delta \nu_D$ は共に温度に依存し、次式で与えられる。

$$\Delta \nu_D = \frac{2.1472 \times 10^{-5}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{T_0}{M}} \text{ (GHz)} \quad (6)$$

$$k_0 = \frac{2.4928 \times 10^{-11}}{\Delta \nu_D} N_a f \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

ここで、 λ_0 は共振中心波長 (cm)、 M (amu) は原子質量、 N_a は原子密度、 f は遷移の振動子強度である。

原子フィルターとして使用する吸収の遷移周波数は、もちろんレーザー周波数と一致しなければならない。この条件を満たすために、可変周波数レーザーが必要となる。この条件に加えて、原子フィルターは次の条件を満たす必要がある。1) ドップラー幅が大気分子の幅よりも十分小さい必要があるため、原子質量が空気分子に比べて十分大きいこと。2) 低い蒸気圧でミー散乱を強く吸収するために、遷移の振動子強度が十分に大きいこと。3) 吸収線の近くに、超微細構造がないような、スピン量子数が 0 である遷移か、または、2 本の超微細構造の間隔が空気のレイリー散乱のスペクトル幅よりも十分大きい遷移であること。

近赤外から近紫外の波長領域にかけて原子フィルターとして使用可能な原子と、その特性を表 1 にまとめて示してある。また、図 5 に Cs の吸収スペクトルを温度をパラメータとして示す。ただし、有効長は 5 cm である。

表 1 原子フィルターとして使用可能な原子とその性質
Table 1 Atoms suitable for blocking filters and their profiles

Atom	Ba	Rb	Cs	Pb
Wavelength (Å)	5537.01	7800.23	3888.65	2833.6
Suitable laser	Dye	Alexandrite	Doubled alexandrite	Doubled dye
Transition	$6s^2\ ^1S_0-6p\ ^1P_1^0$	$5s^3\ S_{1/2}-5p^2\ P_{3/2}$	$6s^2\ S_{1/2}-8p^2\ P_{3/2}$	$6p^2\ ^3P_0-7s^3\ P_{1/2}^0$
Oscillator strength	1.59	0.67	2.8×10^3	0.17
Atomic weight	138	87	133	208

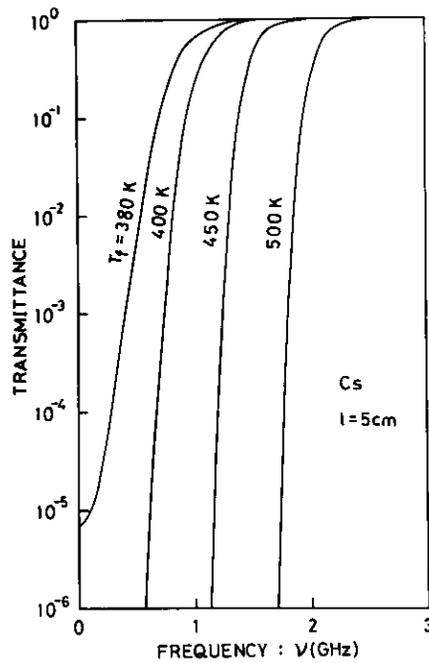


図 5 Cs 原子フィルターの吸収スペクトルの温度依存性
Fig. 5 Temperature dependences of the absorption spectra of an atomic vapor filter (Cs)

4 高分解能レーザーレーダーによる後方散乱比と視程測定法

通常のミー散乱レーザーレーダーでは1発当たり N_0 の光子数のレーザーパルスに対して、ミー散乱とレイリー散乱による後方散乱光に基づき検出される光子の数 $N_s(R)$ は次式のレーザーレーダー方程式で与えられる。

$$N_s(R) = N_0 L K_L \beta_s T^2(R) A / R^2 \tag{8}$$

ここで、 $T(R)$ は光の透過率で

$$T(R) = \exp\left[-\int_0^R \alpha_e(R') dR'\right] \quad (9)$$

である。また、 K_L は装置の効率で、これには、送・受信光学系の効率と、光検出器の量子効率とが含まれる。さらに、 A は受信望遠鏡の有効面積、 L は距離分解能、 R は測定対象までの距離、 β_s は体積後方散乱係数、 α_e は体積消散係数である。ミー散乱方式レーザーレーダーでは空気分子及びエアロゾル粒子からの散乱が同時に測定されるので体積後方散乱係数と、消散係数はそれぞれの寄与の和として次式で表される。

$$\begin{aligned} \beta_s &= \beta_m + \beta_a \\ \alpha_e &= \alpha_m + \alpha_a \end{aligned}$$

ここで m , a はそれぞれ空気分子による散乱とエアロゾルによる散乱を表す。

ミー散乱の大きさをミー散乱型レーザーレーダーにより受信される信号から定量的に求めるために、後方散乱比 $r(R)$ がしばしば使われる。これは全散乱強度に対するレイリー散乱強度の比で次式の形となる。

$$r(R) = \frac{\beta_s(R)}{\beta_m(R)} = \frac{N_s(R)}{B T^2(R) \beta_m(R)} \quad (10)$$

ここで B は、

$$B = N_0 K_L A L \quad (11)$$

である。(10)式より、正確な r の値を求めるにはレーザーレーダーの信号強度の他に、レーザーレーダーの装置数 B と大気透過率 $T(R)$ 、 β_m を求めるための空気分子密度 $n(P_a, T_a)$ の値が必要である。これらの量はモデル計算や他の独立な測定から求めなければならない。したがって $r(R)$ の測定誤差はかなりのものになる。この誤差を取り除くためには、レーザーレーダーの装置定数の絶対値や透過率 T に依存しない測定を行う必要がある。高分解レーザーレーダーは、この問題の一つの解決法になる。

高分解レーザーレーダーにおいて、レーザーレーダー信号は異なったスペクトル対応を持つフィルターを備えた二ないし三つのチャンネルに分ける。こうして、二ないし三つの同時測定が行われる。ここでは最初に、2チャンネルシステムを考える。そして、チャンネル1ではフィルターを用いずに、全散乱を受けるものとし、チャンネル2では、分子からの散乱とエアロゾルによる散乱の透過係数が、それぞれ f_m , f_a であるようなフィルターを用いるものとする。

ここで、 f_m は(3)式と(5)式より

$$f_m = \int_0^\infty R_R(T_a, x) F(x) dx \quad (12)$$

で定義され、 f_a は $R_a(x)$ をミー散乱の規格化されたスペクトル形状とすると、

$$f_a = \int_0^\infty R_a(x) F(x) dx \quad (13)$$

で表される。すると、各チャンネルで受信される光子の数は

$$N_1(R) = b_1 B (\beta_m + \beta_a) T^2(R) / R^2 \quad (14)$$

$$N_2(R) = b_2 B (f_m \cdot \beta_m + f_a \beta_a) T^2(R) / R^2 \quad (15)$$

となる。ここで、 b_1 と b_2 は全受信信号のうち、チャンネル1と2のそれぞれを通過する信号の割合を示している。(10)式と上式を解くことにより、後方散乱比と、大気の透過率(すなわち視程)が次式で求められる。

$$r(R) = [N_1 b_2 (f_m - f_a) / N_2 b_1] / (1 - f_a N_1 b_2 / N_2 b_1) \quad (16)$$

$$T(R) = \left[\frac{N_2(R) \{1 - f_a N_1(R) b_2 / N_2(R) b_1\} \beta_m(R) R^2}{b_2 B (f_m - f_a)} \right]^{1/2} \quad (17)$$

(10)式で示した通常のみー散乱型レーザーレーダーの場合と異なり、(16)式は B 、 β_m 、 T には依存しない。(16)式のパラメータである f_m 、 f_a 、 b_1 、 b_2 は受信システムのものであり、正確に求めることが可能である。したがって r の誤差はレーザーレーダー信号の N_1/N_2 の比のゆらぎのみ依存する。厳密に言えば、分子の減衰ファクター f_m は、気温 T_a と気圧 P_a には依存する。しかし、 f_m の不確定さは、測定対象の気温 T_a と気圧 P_a の範囲内で高々数%に過ぎない。これより、 r の値は、大気情報の知識なしに、高分解レーザーレーダーのデータから正確に測定することが可能となる。

高分解レーザーレーダーのもう一つの利点は、光の透過率、したがって視程が求められることである。(17)式によれば、 β_m と B が未知数である。だが、通常目的からすると、求めたい透過率は、レーザーレーダーの位置から R 点までの値では必ずしもなく、レーザーレーダーから十分に近い点、 R_0 から R までの間の透過率で良い。 R_0 点までの透過率を $T(R_0)$ とすると、

$$T(R_0) = \frac{N_2(R_0) \{1 - f_a N_1(R_0) b_2 / N_2(R_0) b_1\} \beta_m(R_0) R_0^2}{b_2 B (f_m - f_a)} \quad (18)$$

(17)、(18)式の比をとることにより R_0 から R までの透過率は

$$T(\nu, R - R_0) = \frac{N_2(R) \{1 - f_a N_1(R_0) b_2 / N_2(R) b_1\} \beta_m(R) R^2}{N_2(R_0) \{1 - f_a N_1(R_0) b_2 / N_2(R_0) b_1\} \beta_m(R_0) R_0^2} \quad (19)$$

となり、 B の値に依存しない。また β_m の値は

$$\beta_m = \frac{3}{8\pi} n (P_a \cdot T_a) \alpha_a \quad (20)$$

であり、気温と気圧に依存するが、 n の値は 1 K の気温変化と 1 mb の気圧変化に対して、それぞれ 0.3%, 0.1% 変化するのみで R と R_0 が同一高度なら、 $\beta_m(R) = \beta_m(R_0)$ としても大きな誤差とはならない。ちなみに、(20) 式の α_a の値は 5537 Å において、 $6.02 \times 10^{-32} \text{m}^2$ と求められている (Inaba, 1976)。

5 高分解レーザーレーダーによる気温の測定法

前節の β_m と f_m は気温 T_a と気圧 P_a に依存し、その関数形は既知であるから、3 番目のチャンネルすなわち、図 1 (C) のスペクトルを用いることにより、高分解レーザーレーダーで気温あるいは気圧を求めることができる。もし空気分子と、エアロゾルの減衰ファクターを f'_m , f'_a とすれば、チャンネル 2 と 3 で受信される光子数は

$$\begin{aligned} N_2(R) &= b_2 B (f_m \beta_m + f_a \beta_a) T^2(R) \\ &\doteq b_2 B f_m \beta_m T^2(R) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} N_3(R) &= b_3 B (f'_m \beta_m + f'_a \beta_a) T^2(R) \\ &\doteq b_3 B f'_m \beta_m T^2(R) \end{aligned} \quad (22)$$

となる。ここで b_3 は全受信光のうち、チャンネル 3 で受信される信号光の割合である。ここでは、 f_a , f'_a は 10^{-70} のオーダーで、 f_m , f'_m が 10^{-2} 以上のオーダーであることから、 f_a , f'_a は無視している。(21), (22) より次式を得る。

$$\gamma = \frac{f'_m}{f'_m + f_m} = \frac{N_3 b_2}{N_3 b_2 + N_2 b_3} \quad (23)$$

(23) 式の γ の値は気温や気圧によって変化するため、 $N_2(R)$, $N_3(R)$ の測定値から、気温や気圧が求められる。 γ の値の気温あるいは気圧依存性は、3 番目のチャンネルを分離するための原子フィルターのスペクトル幅により大きく変化する。このスペクトル幅の最適値を選ぶことにより、気温あるいは気圧が高感度で測定される。すなわち、 γ の気温依存性が最も大きくなるようにスペクトル幅を設定することにより気温が測定でき、気温依存性が最も大きくなるように設定すれば気圧が求められる。ただし、最適値を選んだ場合の γ の変化量は気圧に対してよりも気温の変化に対して、より敏感であり、気温の測定がより高感度で行うことができる。また応用上も気温を遠隔的に求めたいとする要請が強い。したがって以下では気温の測定に絞って話を進める。

高分解レーザーレーダーにより、最大の感度で気温を測定するには、表1に掲げた使用可能な原子のうちから最適なものを選び、さらに、フィルターの温度の最適値を設定する手続きを要する。ここでは、まず、各フィルターについて温度の最適値を計算し、その後に最適な原子を選ぶ方法について述べる。

5.1 最適温度の設定

最適温度は次の方法で求める。まず、フィルターの有効長 l を決める。ここでは 5 cm とした。次に測定したい気温 T_a と気圧 P_a を定めたうえで、フィルター温度 T_F をパラメータとして(24)式を計算する。

$$D(T_a, T_F) = \int \Delta R(T_a, \nu) \cdot \sqrt{R_R(T_a, \nu) \cdot F(\nu, T_F)} d\nu \quad (24)$$

こうして、 D の値が最大となる T_F が最適の原子フィルター温度となる。図6にCsを例にとった、 300K 、 $1.013 \times 10^5 P_a$ の下での D の値とフィルター温度の関係を示す。なお、ここで、レイリー散乱スペクトルモデルとしてSMとS6の双方で計算しているが、最適のフィルター温度に約20Kのずれがでている。同様の計算をSM及びS6モデルを用いて他の原子について行くと、Rb, Ba, PbのそれぞれについてSMモデルでは、 410K 、 770K 、 990K であり、S6モデルでは 390K 、 750K 、 970K であった。

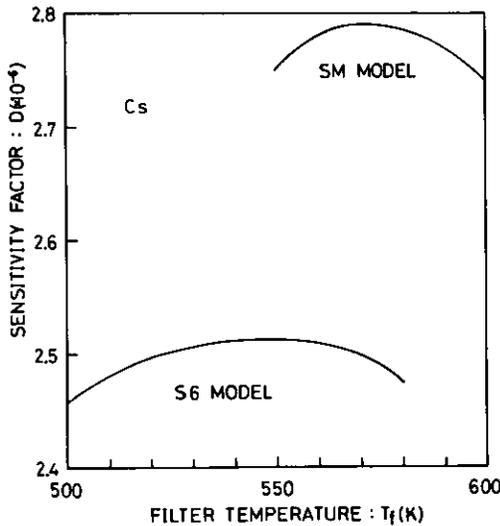


図 6 SMモデルとS6モデルによる D の値
Fig. 6 Values of D with the SM and S6 models

5.2 最適原子の選択

原子フィルターとして最適な原子を決定するには、5.1で求めた最高温度において、(25)式で示される性能指数(FM)を計算する。

$$FM = E \eta D / \lambda^4 \tag{25}$$

ここで、E(=Nohν)は現在、市販のレーザーで入手できるレーザーの出力、ηは同じく市販の光電子増倍管の量子効率、λはレーザーの波長である。なお、FMの1/λ⁴の依存性はレイリー散乱断面積が波長の4乗分の1に比例することから来ている。表2には各原子の波長におけるE、η、D、1/λ⁴の値を示す。ここでEの値は市販のXeClエキシマーレーザーで励起された色素レーザーの出力を示している。ただし、Pbの波長については色素レーザーの第二高調波を考えている。また、表2にはこれらの値を用いて得られたFMの値も示す。

この表より、レイリー散乱断面積の1/λ⁴依存性の影響が大きいため、短波長の方が、FMの値が大きい傾向となる。また、CsとPbの比較で、CsのFMが大きいのは、市販のレーザーの出力の違いによる。表2のFMの値から各原子の測定感度の比較をすると、Csが最適であることが明らかである。また、原子フィルターの最適温度もCsはRbに次いで低く、技術的に見ても有利である。

以上の議論より、気温の測定には原子としてCsを用いて、これを長さ5cmのセルに封入して原子フィルターとすると、550Kに温度を設定すれば、300K、1気圧の下では最も感度良く測定できると結論できる。

表 2 高分解能レーザーレーダーの Figure of merit
Table 2 Figure of merit for HSRL

Atom	Rb	Ba	Cs	Pb
Laser Energy (mJ)/Pulse	7.0	27.0	20.0	3.0
Wavelength (nm)	780.0	553.7	388.9	283.3
1/(Wavelength) ⁴ *	1.0	3.9	16.2	57.5
Quantum efficiency (%)	1.5	9.0	30.0	25.0
D	4.03×10 ⁻⁶	3.39×10 ⁻⁶	2.36×10 ⁻⁶	5.16×10 ⁻⁷
Figure of Merit	4.23×10 ⁻⁵	3.21×10 ⁻⁸	2.27×10 ⁻²	2.21×10 ⁻²

* Relative value

5.3 校正曲線

前述のように原子フィルターの有効長とその温度を設定し、レーザーレーダーで受信する信号光の強度から実際の気温を求めるためには、あらかじめ校正曲線を求めておく必要がある。ここでは(23)式のγの値を校正曲線として用いることにする。

校正曲線のS6モデルによる計算結果を図7に示す。校正曲線は気圧、すなわち、測定する高度の変化によって異なるので、同図では測定高度をパラメータとして計算してある。同図より、常温、常圧でのγの値は1K当たり0.54%程度変化している。

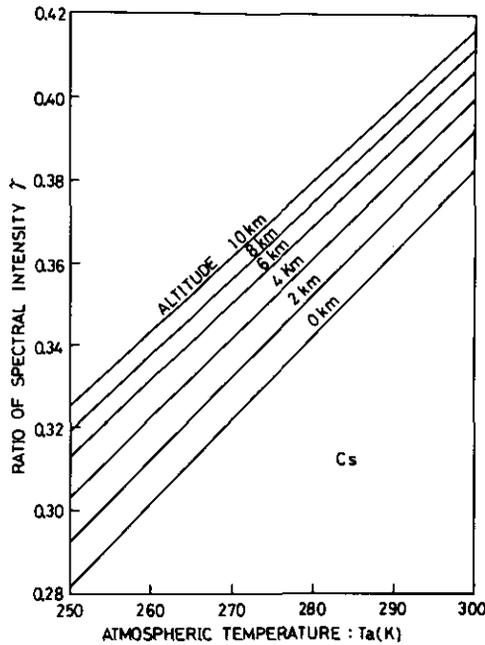


図 7 レイリー散乱スペクトルの中心部とウィング部のスペクトル強度比
 Fig. 7 Spectral intensity ratio of the wing to central part of the Rayleigh spectra

6 測定誤差と感度の検討

レーザーレーダーによる測定では、測定の誤差の種類として、系統的なものとランダムなものがある。高分解能レーザーレーダーによる測定においても、同様に2種類存在する。ここでは、気温測定を行う場合のこれら2種類の誤差の大きさについて検討を行う。

6.1 系統的な誤差の検討

高分解能レーザーレーダーでは、系統的な誤差の要因は3種類である。一つはレイリー散乱のモデルが不完全なために生じる誤差である。しかし、これは測定の条件により変化するものではないので、レーザーレーダー装置完成時に通常の気温測定法を用いて校正を行うことにより、問題は解決できる。

二つ目は、気圧の変動による誤差である。図8に、1気圧(約 $10^5 P_0$)から $100 P_0$ 変化したときの γ の値の変化を気温の関数として求めてある。同図によると、273Kの気温において、1 mb すなわち $100 P_0$ の変化に対して、 γ の変化率は、 $1.5 \times 10^{-2} \%$ となる。気温1Kの変化に対する γ の変化は約0.54%であるが、これは、気温に換算して約0.028Kの気温変化に相当するのみである。レーザーレーダーによる気温測定でめざしている測定範囲は、数十 km 以内で、この区間での気圧の変化は高々2~ $300 P_0$ である。よって気温測定点における気圧の影響は気温にして0.1K以下に抑えるこ

とは可能である。

三つ目は、原子フィルターの温度のふらつきによる誤差である。図9にフィルターの温度の変化に対する、 γ の変化量を気温の関数として計算してある。同図によると、気温が273Kで高温側のフィルター温度が+1K変化したとき、 γ の変化量は、 4.8×10^{-3} にもなる。これは気温にして約2.5K

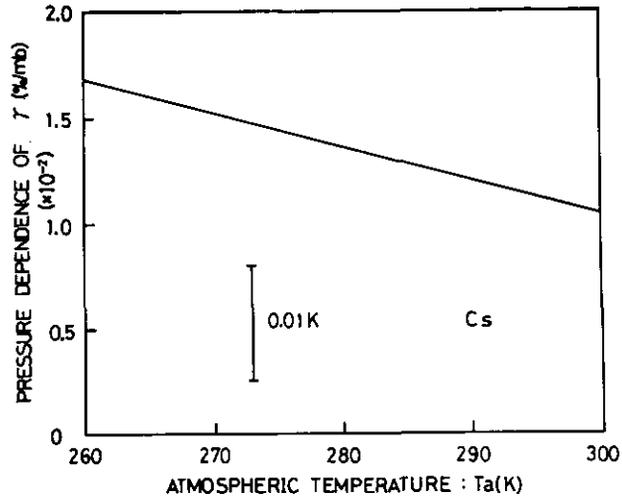


図 8 γ の気圧依存性
Fig. 8 Pressure dependence of γ

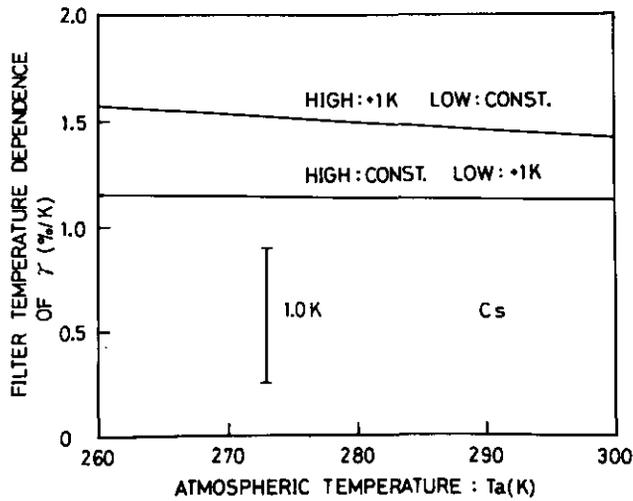


図 9 γ のフィルター温度の依存性
Fig. 9 Filter temperature dependence of γ

に相当する。したがって、気温を±1Kの精度で計りたいとするならば、フィルター温度の変動は、0.4K以内に抑える必要がある。

6.2 測定感度の検討

系統的な誤差を十分小さく抑えれば、測定感度はランダムな誤差で決定される。

気温測定のために、図10で示したような装置を考えるとチャンネル2を通るレイリー-散乱スペクトルの中心部の信号強度は(15)式で、翼部の信号強度は次式で表される。

$$N_3(R) = N_0 L K_L \beta_m b_3 f_m T^2 A, Y, \eta / R^2 \quad (26)$$

ここで、 b_3 は全信号のうちチャンネル3を通過するものの割合である。

アナログ的な光検出を仮定すると、(15)、(26)式を用いてそれぞれのチャンネルでの測定のS/Nは次式で表される。

$$(S/N)_2 = \frac{N_2(R) \sqrt{mt}}{\sqrt{\mu (N_2(R) + b_2 N_B)}} \quad (27)$$

$$(S/N)_3 = \frac{N_3(R) \sqrt{mt}}{\sqrt{\mu (N_3(R) + b_3 N_B)}} \quad (28)$$

ここで、 m は1秒間当たりのレーザーのパルス数、 t は測定時間、 μ は光検出器の等価雑音指数である。

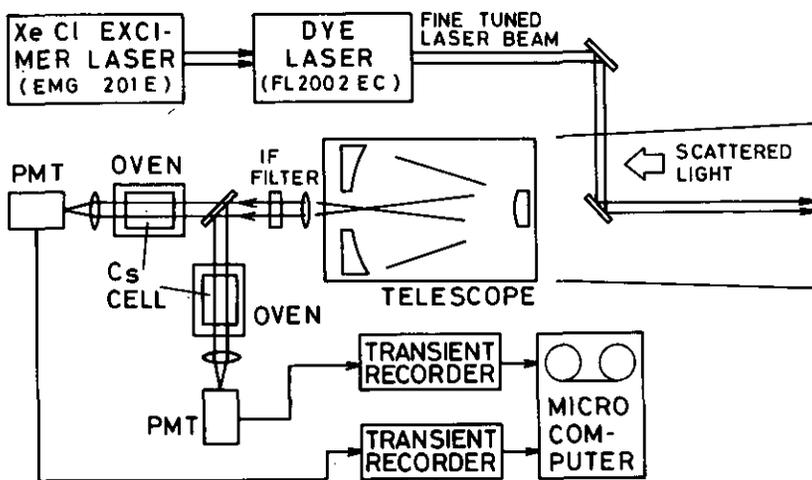


図 10 高分解能レーザーレーダーの装置の概念図

Fig.10 Schematic of a HSRL system

(27), (28)式を用いて, 気温が 1 K 変化するときのスペクトル強度比の変化, すなわち, $d\gamma/dT$ は次式で表される。

$$d\gamma/dT = \sqrt{(1/(S/N)_2)^2 + (1/(S/N)_3)^2} \\ = \frac{1}{t} \left\{ \frac{b_2 f_m C + b_2 f_m' C}{(b_2 f_m C)^2} + \frac{b_2 N_b}{(b_3 f_m' C)^2} \right\} \quad (29)$$

ここで,

$$C = N_0 m L K_L \beta_m T_r^2 A_r Y_r \eta / \mu R^2 \quad (30)$$

(29)式より, 測定時間 t は次式で与えられる。

$$t = \frac{1}{C^2 \{d(f_m'/f_m)/dT\}^2} \cdot \left(\frac{f_m C + N_b}{b_2 f_m^2} + \frac{f_m' C + N_b}{b_3 f_m'^2} \right) \quad (31)$$

(31)式において, t を最小にする b_2 と b_3 の関係は

$$b_2 \cdot f_m' \sqrt{f_m' C + N_b} = b_3 \cdot f_m \sqrt{f_m C + N_b} \quad (32)$$

である。

そのときの t の値は

$$t = \frac{1}{C^2 \{d(f_m'/f_m)/dT\}^2} \cdot \left(\frac{f_m \sqrt{f_m' C + N_b} + f_m' \sqrt{f_m C + N_b}}{f_m' f_m} \right) \quad (33)$$

である。

表 3 に, 現在試作中の気温測定用の高分解能レーザーレーダーの特性を示す。同表に示された値を (33)式に代入することにより, 測定距離に対する測定に必要な時間が求められる。図 11 にその結果を示す。

高分解能レーザーレーダーによる気温の測定においては, 上空に行くに従い, 空気密度が小さくなり, それに基づいてスペクトルの温度変化率も小さくなるので感度が低下する。したがって, 図 11 では, 水平方向と鉛直方向の双方向について測定を行った場合について計算した結果を示してある。

この結果によると, 5 km の遠方を誤差 1 K, 距離分解能 30m で気温を測定する場合, 水平方向では 9 秒, 鉛直方向でも 14 秒で測定が可能である。

これまで, レーザーレーダーによる気温測定法には, ラマン散乱を使用する方法と差分吸収レーザーレーダー方式を使用する方法とが提案されている。比較のために, ラマン散乱については

Strauch ら (1971) により提案された方法, 差分吸収レーザーレーダーについては, Kalshoven ら (1981) の提案に基づき同じ出力のレーザーを使用するものとして, 測定感度の計算を行った。その結果も図11に示されているが, 高分解能レーザーレーダー方式は圧倒的に感度が良好であるのが特徴である。

表 3 高分解能レーザーレーダーの性能の例
Table 3 Specification of a HSRL system

Definition	Symbol	Value
Energy/Pulse	E (mJ/Pulse)	20
Repetition rate	m (1/sec)	25
Depth resolution	L (m)	30
Quantum efficiency	η (%)	30
PMT noise factor		2
Collection area	A_c (m ²)	0.385
Efficiency of optics	K	0.1
Geometric form factor	Y_r (%)	100

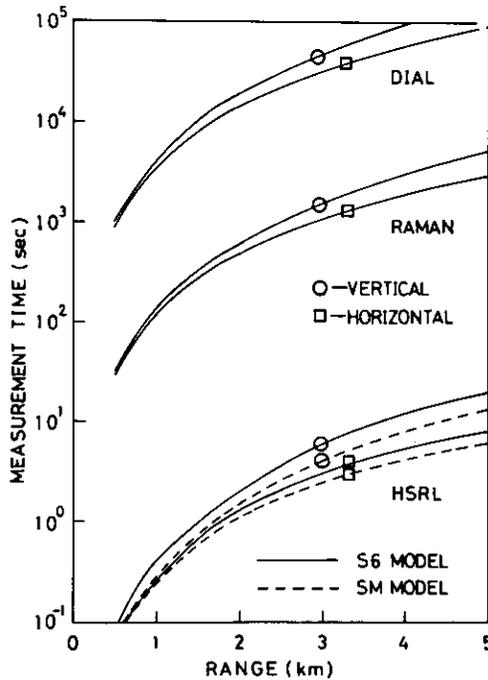


図 11 ± 1 Kの精度で気温を測定するのに必要な測定時間
Fig.11 Time required for atmospheric temperature measurement with the accuracy of ± 1 K

7 まとめ

本文では、気体状原子をフィルターとして用いる高分解能レーザーレーダーの提案を行った。この方式は比較的簡単な装置で、ミー散乱強度比、視程及び気温の遠隔的測定が高い精度で行えるのが特徴である。測定感度の計算からは、気温の測定が実用的に許される時間内に行えるとの結果を得た。

引用文献

- Bufton, J. L., F. E. Hoge and R. N. Swift (1983) : Airborne measurement of laser backscatter from the ocean surface. *Appl. Opt.*, **22**, 2603-2618.
- Eloranta, E. W., F. L. Roesler and J. T. Sroga (1982) : The high spectral resolution lidar, in *Technical Digest, Workshop on Optical and Laser Remote Sensing*, Monterey, Calif., Feb. 9-11. Paper 13.
- Fiocco, G. and L. P. Smullin (1963) : Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-40 km) by optical radar. *Nature*, 1275-1276.
- Fiocco, G., G. Beneditti-Michelangeli, K. Maischberger and E. Madonna (1971) : Measurement of temperature and aerosol to molecule ratio in the troposphere by optical radar. *Nature London Phys. Sci.*, **229**, 78-79.
- Hinkley, E. D. (1976) : *Laser Monitoring of the Atmosphere*. Topics in Applied Physics, (Springer, Venlag Berlin), p.14.
- Inaba, H. and T. Kobayashi (1972) : Laser raman radar. *Opto-Electronics*, **4**, 101-121.
- Inaba, H. (1976) : Detection of atoms and molecules by raman scattering and resonance fluorescence. *In* : *Laser Monitoring of the Atmosphere*, (ed.) E.Hinkley, (Springer, New York) 153-236.
- Kalshoven, Jr. J. E., C. L.Korb, G. K. Schwemmer and M. Dombrowski (1981) : Laser remote sensing of atmospheric temperature by observing resonant absorption of oxygen. *Appl. Opt.*, **20**, 1967-1978.
- Mitchell, A. C. G. and M. W. Zemansky (1971) : *Resonance Radiation and Excited Atoms*, (Cambridge, U. P., London).
- 野口和夫・清水 浩・C. Y. She (1985) : 高分解能レーザーレーダーにより気温測定を行うための最適条件. *応用物理*, **54**, 972-978.
- Schwiesow, R. L. and L. Lading (1981) : Temperature profiling by Rayleigh scattering lidar. *Appl. Opt.*, **20**, 1972-1979.
- Shimizu, 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.
- 清水 浩・C. Y. She (1984) : 高分解能レーザーレーダーによる大気環境の計測. *日本リモートセンシング学会誌*, **4**, 27-37.
- Shimizu, H., Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, I. Matsui and N. Takeuchi (1985) : Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area. *Appl. Opt.*, **24**, 617-626.
- Shimizu, H., K. Noguchi and C. Y. She (1986) : Atmospheric temperature measurement by a high

- spectral resolution lidar. *Appl. Opt.*, **25**, 1460-1466.
- Shotland, R. M. (1964) : The determination of the vertical profile of atmospheric gases by means of a ground based optical rader. *Proceedings of 3rd Symp. Remote Sensing of the Environment*, Michigan, p.215.
- Shotland, R.M. (1974) : Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 71-82.
- Strauch, R. G., V. E. Derr and R. E. Cupp (1971) : Atmospheric temperature measurement using Raman backscatter. *Appl. Opt.*, **10**, 2665-2675.
- Tenti, G., C. D. Boley and R. C. Desai (1974) : On the kinetic model description of Rayleigh Brillouin scattering from molecular gases. *Can. J. Phys.*, **52**, 285-294.
- Yip, S. and M. Nelkin (1964) : Application of a kinetic model to time dependent density correlation in fluids. *Phys. Rev.*, **A135**, 1241-1252.
- Young, A. T. (1982) : Rayleigh scattering. *Phys. Today*, **35**, 42-48.
- Young, A. T. and G. W. Kattawar (1983) : Rayleigh-Scattering line profiles. *Appl. Opt.*, **22**, 3668-3698.

II-2 環境濃度 NO₂ の鉛直分布の観測を目的とする 差分吸収レーザーレーダーの製作

A Differential Absorption Laser Radar System for Measurement of Vertical Distribution of NO₂ in the Urban Atmosphere

杉本伸夫¹・松井一郎²・笹野泰弘¹・清水 浩¹・竹内延夫¹

Nobuo SUGIMOTO¹, Ichiro MATSUI², Yasuhiro SASANO¹, Hiroshi SHIMIZU¹
and Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

都市域における環境濃度の NO₂ の鉛直分布の連続的な測定を目的とする差分吸収レーザーレーダー (DIAL) の開発を行った。光源には YAG レーザー励起色素レーザーを用い、青色領域の 2 波長を交互に発振して差分吸収測定を行う。この装置の測定感度は 10 分間の測定で約 10ppb である。本論文ではこの DIAL システムの設計と製作について報告する。

Abstract

The design and construction of a differential absorption laser radar (DIAL) system for measuring the vertical distribution of NO₂ in the urban atmosphere are described. Two-wavelength laser beams in the blue region generated by a dye laser pumped by Nd: YAG laser are used as the light source for the DIAL measurement. The wavelengths are switched alternately with the pulse repetition rate of 10pps. The minimum detectable NO₂ concentration (signal-to-noise ratio = 5) for the DIAL system is 10ppb for a 10 minute measurement.

1 はじめに

差分吸収レーザーレーダー (DIAL) は大気中のガス状汚染物質を遠隔計測する最も有効な測定法のひとつである。国立公害研究所ではこれまでに、フラッシュランプ励起色素レーザーを用いた差分吸収レーザーレーダーの開発を行い (杉本ら, 1981, 1982), 排煙を対象とした測定実験を行った。

-
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.
 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.

また YAG レーザー励起色素レーザーを用いて DIAL の基礎研究を行ってきた(杉本, 1984 ; 杉本・竹内, 1985 ; Sugimoto ら, 1985)。これらの研究に基づき YAG レーザー励起色素レーザーを光源とした DIAL システムの開発を行った。NO₂, SO₂などを測定対象とした DIAL システムはこれまでもいくつかの研究機関で開発され(Hawley, 1981 ; Egeback ら, 1984 ; Fredriksson & Hertz ら, 1984 ; Jolliffe ら, 1984 ; Marzorati ら, 1984 ; Staehr ら, 1985), 主に排煙流を対象とした測定実験が行われてきた。しかしながら DIAL の測定感度, 距離分解能, 時間分解能を考慮した場合, 最も有効な応用のひとつは, 比較的広域における汚染気団の分布や移流に関する情報を得るための汚染気体の鉛直分布の連続的な測定であると考えられる。DIAL 測定では, ガス状物質の分布と同時にエアロゾル分布が得られるので, 混合層構造の情報も同時に得られる。このような考察に基づいて, 都市域における環境濃度の NO₂ の鉛直分布を連続観測することを目的とした DIAL システムの製作を行った。

2 DIAL システムの設計

差分吸収レーザーレーダーはミー散乱レーザーレーダーとガスの吸収測定を組み合わせた方法である。ミー散乱レーザーレーダーはパルスレーザー光を大気中に発射し, エアロゾルのミー散乱により後方散乱された光を望遠鏡で受信して, その時間応答を記録する。レーザー発射からの時間遅れが距離に対応し, その距離における信号の強度がエアロゾルの濃度に対応する。差分吸収レーザーレーダーの場合は, ガスの吸収の大きい波長と小さい波長の 2 波長のレーザーレーダー信号を記録する。このとき, ガスの吸収の大きい波長のレーザーレーダー信号は吸収の少ない波長に比べて速く減衰する。ある距離までの減衰の比をとることによりその距離までのガスによる吸収が分かり, これをさらに距離について微分すれば各距離におけるガスの濃度が得られる (Schotland, 1974)。

製作した DIAL システムは YAG レーザー励起色素レーザーを光源とし, 青色領域の 2 波長を用いて差分吸収測定を行う。DIAL の光源として YAG レーザー励起色素レーザーを用いたのは次の理由による。フラッシュランプ励起色素レーザーを用いたこれまでの研究で, 繰り返しの遅いレーザーを用いた場合波長切り替えに要する時間中のエアロゾルの変動から生じる誤差が問題となることが明らかになった(杉本ら, 1981, 1982)。また, フラッシュランプ励起色素レーザーは高電圧を使用するので電氣的雑音を発生しやすく, この対策がかなり困難であった。また, 一ショットごとのレーザーの出力変動も大きい。これに対して YAG レーザー励起色素レーザーは繰り返しが比較的早く, また雑音も少なく, 安定であるので DIAL 用の光源として優れている。一方, これまでに行った基礎的研究の結果, 混合層内の NO₂ の鉛直分布の測定では 2 波長を 10pps 以上で切り替えれば十分であるという結論が得られている(杉本・竹内, 1985 ; Sugimoto ら, 1985)。このことについては本報告書論文(II-3)でも述べた。この結果に基づき, このシステムでは 2 波長を 10pps で交互に切り替える方式を採用した。

表 1 に NO₂ DIAL システムの主な仕様を示す。また, 図 1 に理論的に見積もった測定感度を示す。

表 1 NO₂ DIAL の仕様
Table 1 Specification of the NO₂ DIAL system

Laser	
Type	Nd : YAG pumped dye laser (JK lasers HY750, Quanta-Ray PDL 1)
Output energy	20mJ/pulse
Wavelength	$\lambda_{on} = 448.1\text{nm}$ $\lambda_{off} = 446.6\text{nm}$
Telescope	
Type	Newtonian
Diameter	50 cm
Focallength	1.2 m
Field of view	0.7mrad
Filter	
Type	Interference filter
Bandwidth	1.5 nm
Photomultiplier tube	
Type	(Hamamatsu R329)
Transient recorder	
Type	(Autnics SI21)
Clock rate	20 MHz
Accuracy	10 bits

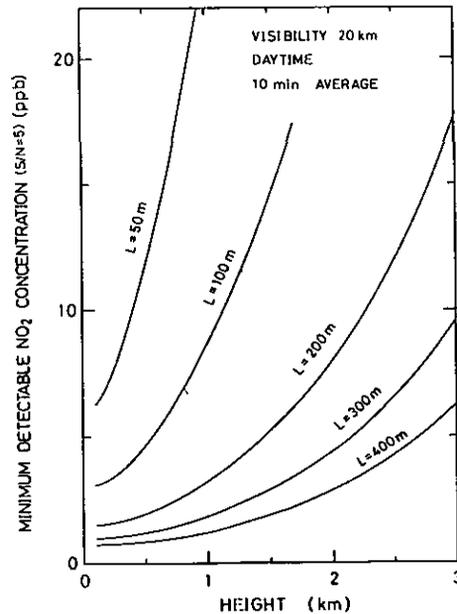


図 1 DIAL システムの理論的な測定感度
Fig. 1 Calculated minimum detectable NO₂ concentration

図1に見られるとおり、この装置は都市域の環境大気において高濃度のNO₂を含む気団をとらえるための十分な性能を持つことが分かる。すなわち距離分解能を100m から300m に設定すれば約10分間の測定で3 km までの距離において10ppb のNO₂をSN比5で測定できる。

3 DIAL システムの製作

本装置の構成を図2に示す。本装置は大きく分けて送光部、受光部、信号処理部からなる。装置全体はコンテナに収納されている。コンテナ内の配置図を図3に示す。送光部はレーザー装置、波長モニター装置、波長制御用マイクロコンピュータなどから構成される。受光部は受光望遠鏡、受光光学系、光電子増倍管からなる。送光部と受光部は振動によりアラインメントが狂わないように一つの光学台の上に設置されている。信号処理部はプリアンプ、トランジェントレコーダー、データ収集・処理用マイクロコンピュータから構成される。図4にコンテナの外観の写真を示す。次にこれらの各部分についての詳細を述べる。

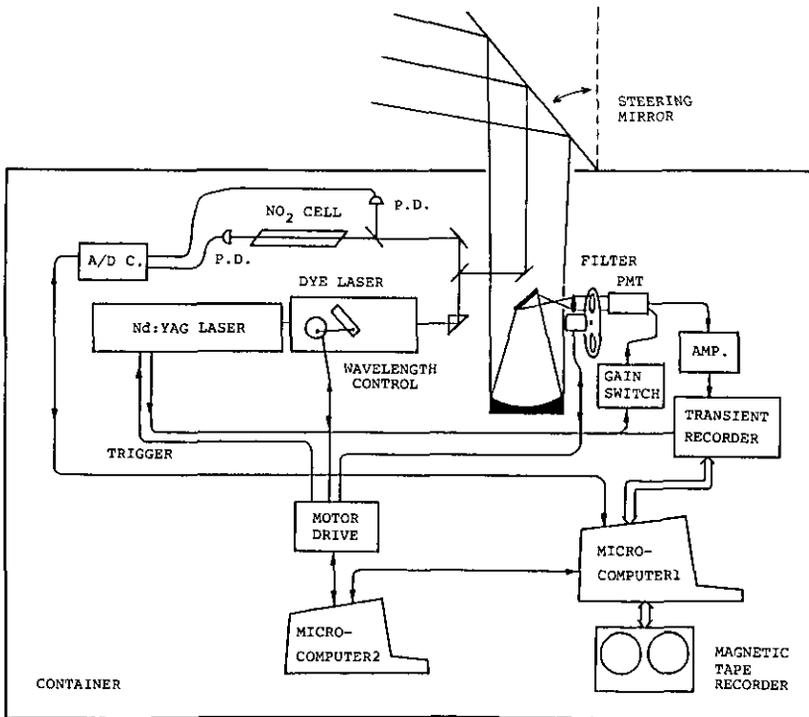


図 2 DIAL システムのブロック図

Fig. 2 Block diagram of the NO₂ DIAL system

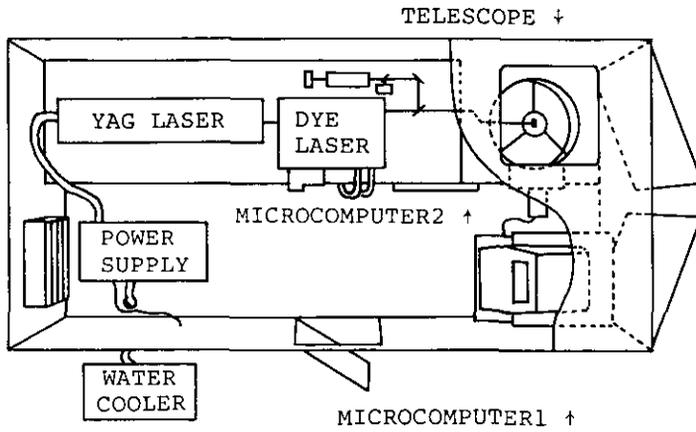


図 3 コンテナ内の配置

Fig. 3 Layout inside the container

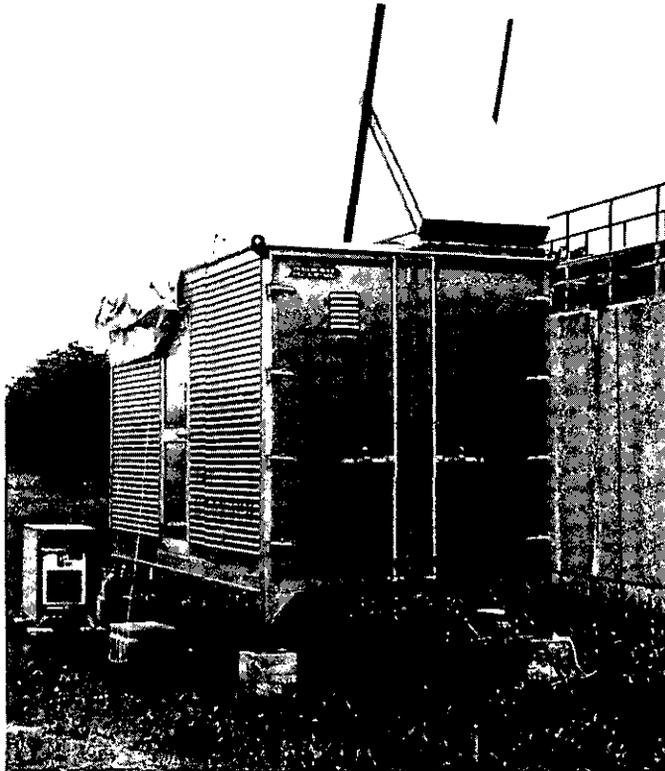


図 4 DIAL システムの外観

Fig. 4 Outside view of the NO₂ DIAL system

3.1 送光部

レーザー装置

レーザー装置はYAGレーザー励起色素レーザーを用いている。YAGレーザーの3倍高調波を用いて色素レーザーを励起し、青色領域のレーザー光を得ている。YAGレーザーはJKレーザー社のHY750型で355nmの出力は170mJ/pulseである。また、繰り返し数は10pps、パルス幅は約10nsである。色素レーザーはQuanta-Ray社PDL1型を用いた。クマリン系の色素を用い、青色領域の出力は約20mJである。また、波長幅は 0.3cm^{-1} である。

波長切替装置

色素レーザーの波長は特別に製作した波長切替装置により、2波長のレーザー光が交互に得られるようにした。この装置の構造を図5に示す。ステップモーターに取り付けられたカムにより色素レーザーの回折格子のサインバーを振動させる構造になっている。振動の振幅及びバーの振動の中心の位置はねじで微調節され、任意の2波長を交互に取り出すことができる。ステップモーターは専用のマイコン(SHARP MZ80)で制御され、レーザーの発射及び後に述べる受光系のフィルター切替装置と同期をとって動作する。

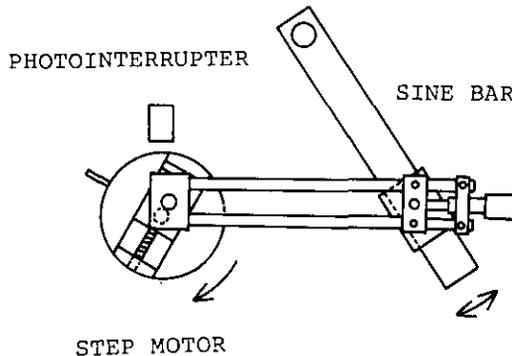


図 5 レーザー波長切替装置

Fig. 5 Laser wavelength switching device

送光光学系、校正装置

色素レーザーの出力はプリズム系でレーザー光出射窓に導かれ、大気中に発射される。受光望遠鏡の光軸とレーザー光の光軸は同軸とした。一方、レーザー光の一部はビームスプリッターにより校正装置に導かれる。校正装置はDIAL測定と同時に、濃度を正確に設定したNO₂セルの吸収を測定してDIAL測定の校正を行うために用いられる。校正装置はNO₂を封入したセルとセルの前後に設置した二つのレーザーパワーモニター装置(ANALOG MODULES LEM100)からなる。レーザーパワーモニター装置からの信号はAD変換されデータ収集用マイクロコンピュータ(SORD M343)に読み込まれる。このパワーモニター装置はリセット信号を与えるまでパワーの測定値を

ホールドする構造になっている。リセット信号はマイコンから与えられる。校正装置はレーザー波長切替装置の波長設定用にも用いられる。この場合にはレーザー波長切替装置のステップモーターをゆっくり回転して校正用 NO₂ セルの吸収スペクトルを測定し、このデータを用いて使用する 2 波長を設定する。

3.2 受光部

受光光学系

受光望遠鏡は50cmのニュートン型を用いた。焦点距離は1.2mである。望遠鏡の視野の方向は鉛直上方のみで東西南北5度までの微調節が可能ないように設計された。受光望遠鏡で集光された光はレンズで平行にされた後、干渉フィルターを通して光電子増倍管に入射される。干渉フィルターのバンド幅は1.5nmで、レーザー波長と同期して切り替える方法を採用した。2枚の干渉フィルターをレーザー波長の切り替えと同期して切り替えるためのフィルター切替装置の構成を図6に示す。干渉フィルターの取り付けられた円板はステップモーターにより駆動され、レーザー波長切替装置と同じマイコンにより制御される。DIALに用いるのは通常2波長であるが、干渉フィルターは4枚までに取り付けられるように設計した。これは多波長の測定を行う可能性を考慮したものである。

光電子増倍管にはHAMAMATSU R329を用いた。光電子増倍管のプリーダー回路にはHAMAMATSUのゲート回路付きソケットを用いた。

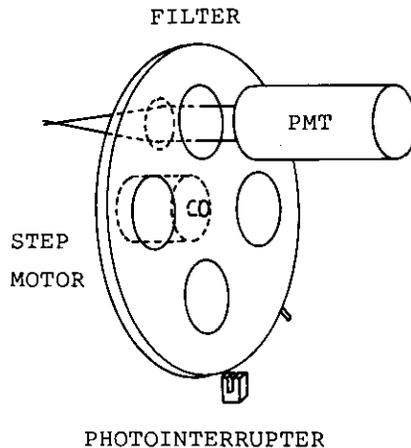


図 6 フィルター切替装置
Fig. 6 Filter switching device

スキャン測定用ミラー

DIALの視野の方向は鉛直方向に固定されているが、コンテナの天井に取り付けた大口径のミラーを用いて鉛直方向の他に仰角0～30度までの測定が行える。角度の設定は手動で行う。

3.3 信号処理部

トランジェントレコーダー

レーザーレーダー信号はトランジェントレコーダー(オートニクス社 S121型)により記録される。最小サンプリング時間は50ns, セグメント数2048, 精度10bitである。トランジェントレコーダーでAD変換されて記録されたデータは, 1ショットごとにマイコンに転送される。

データ収集用マイクロコンピュータ

マイクロコンピュータは, データの記録と測定の制御に用いられる。トランジェントレコーダーにより取得されたデータは, マイコンに転送された後, 積算処理が行われ磁気テープに記録される。本システムではソード社 M343型を用いた。トランジェントレコーダーはパラレルインターフェイスを用いてマイコンに接続された。測定プログラムをアセンブラー言語で作成することにより1024ワードのデータを約15Hzの繰り返しで転送し積算することができた。DIAL測定では, 10Hzで測定した1024セグメントのレーザーレーダーデータを1ショットごとにマイコンに取り込み, on, offそれぞれの波長のデータを積算処理し, それぞれを磁気テープに記録する方法を用いた。データ収集用マイコンはこの他に波長切替装置, フィルター切替装置などの異常の検知を行いシステム全体の管理を行う。

4 測定用プログラム

DIAL測定制御データ収集用コンピュータシステムのハードウェアの構成を図7に示す。システム全体は2台のマイクロコンピュータから構成される。マイコン1(SORD M343)ではデータ収集と測定全体の制御が行われ, マイコン2(SHARP MZ80)では波長の制御が行われる。これらのマイコンシステムはタイミングを取りながら動作するが, プログラムは独立に作成され, 独立に動作する。システム全体の動作のタイミングはマイコン2から出力される信号で決定されている。データ収集用のマイコン1はマイコン2からのステータス信号とレーザートリガ信号を用いてタイミングを合わせて動作する。

4.1 波長制御

波長制御用マイコン(SHARP MZ80)の行う機能を表2に示す。レーザー波長の切り替えについては, 図5に示した装置のステップモーターのドライブ用のパルスの出力, 位置センサーからの信号の入力, 及び正常な回転を確認するためのパルスの出力を行う。フォトインタラプターを用いた位置センサーからは特定の位置でパルスが出力される。この信号は測定の最初に, 波長切替装置を初期の正しい位置に設定するために用いられる。また, 通常の測定時にモーターが回転している場合には, マイコン2から位置確認用パルスを位置センサーからのパルスと同じタイミングで出力し, これらの信号の論理積を取ることにより, 回転が正常であることを確認する。すなわち, 正常な回転では一周期に一つパルスが得られる。このパルスがとぎれた場合にはアラーム信号がマイコン1

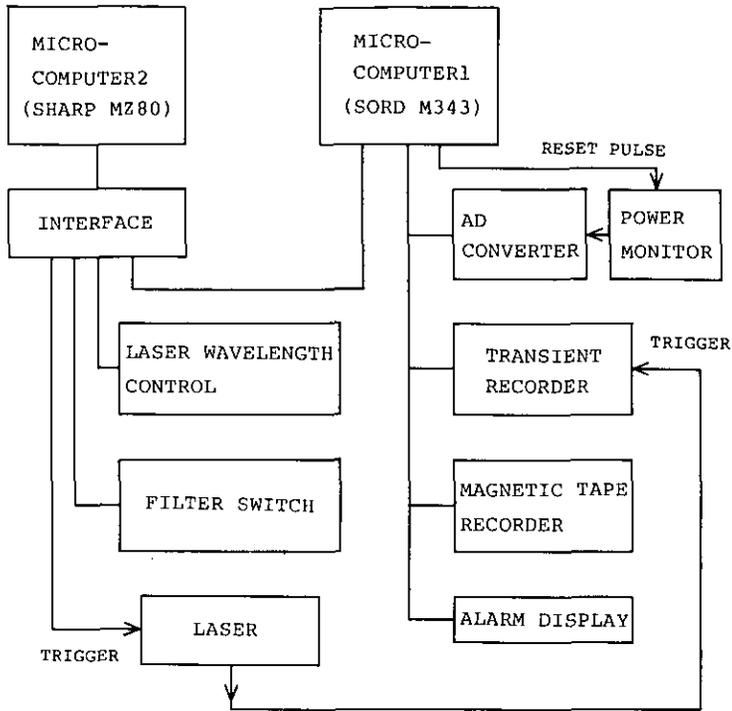


図 7 DIAL 測定制御・データ収集用コンピュータシステムの構成
 Fig. 7 Block diagram of the measurement control and data acquisition system

表 2 波長制御用マイコン(マイコン2)の機能
 Table 2 Functions of the microcomputer 2

(a)	Control of the laser wavelength
	• Generating pulses for the motor drive
	• Reading signals from the position sensor
	• Generating pulses for checking operation
(b)	Control of the filter switch
	• Generating pulses for the motor drive
	• Reading Signals from the position sensor
	• Generating pulses for checking operation
(c)	Generating the laser trigger pulses
(d)	Sending status signals to the microcomputer 1
	• Status of the laser wavelength (λ_{on} or λ_{off})
	• Alarm for abnormal operation

に送られる。受光系フィルター切替装置(図6)についても同じ方法で制御を行っている。

波長切替装置、フィルター切替装置のステップモーターの一周期は400ステップである。それぞれのステップモーターの初期の位置をアドレス1、一周期の終わりをアドレス400に対応させる。波長 λ_{on} はアドレス1、波長 λ_{off} はアドレス201に対応する。マイコン2はこれらの二つの位置でレーザートリガ用のパルスを出力する。また、発射したレーザー波長が λ_{on} であるか波長 λ_{off} であるかをマイコン1に知らせるために、アドレス1~200ではhi、アドレス201~400ではloの信号を出力する。マイコン2から出力するこれらのパルス信号はマイコン2の主メモリー上にあらかじめ用意された400バイトのデータを順次出力することによって発生させる。

マイコン2に用いる波長制御用のプログラムのフローチャートを図8に示す。測定モードには、通常のDIAL測定モードとレーザー波長切替装置をゆっくり回転させて波長をスキャンするモードの2種類を用意した。プログラムは波長切替装置、フィルター切替装置の初期状態の設定を行った後、コマンド入力により測定モードを選択する。

DIAL測定モードでは、2波長を交互に切り替えてレーザーを発射する。このモードではプログラムは、あらかじめ設定されている400個の制御用パルスデータを繰り返し出力する。通常の観測ではレーザーの発射は毎秒10回行われる。しかし、動作の初めからこの速度でモーターを回転させることは不可能であるので、最初はゆっくり回転し、徐々に速度を増して毎秒5回転の一定速度にする必要がある。ここでは回転数の制御はマニュアルで行っている。すなわち、マイコン2のプログラム中のディレイループのディレイ定数をコントロールボードより入力する方法を用いている。

スキャンモードの動作も同様であるが、この場合はフィルター切替装置は動作させない。また、モーターの回転は低速で一定である。このモードではレーザーは1ステップごとに発射される。

4.2 データ収集及び測定の制御

データ収集用マイコンの行う機能を表3に示す。このマイコン(マイコン1)はマイコン2からのステータス信号、トランジェントレコーダーへのトリガ信号を見ながらマイコン2とタイミングを合わせて動作する。実際の測定では、マイコン2をDIAL測定モードあるいはスキャンモードで動作させた後、任意の時間にマイコン1の動作を開始することにより測定を開始できる。

表 3 データ収集用マイコン(マイコン1)の機能
Table 3 Functions of the microcomputer 1

(a)	Reading states signals from the microcomputer 2
(b)	Reading data from the power monitor modules
(c)	Control of the transient recorder
(d)	Reading data from the transient recorder
(e)	Writing data on the magnetic tape
(f)	Displaying alarms

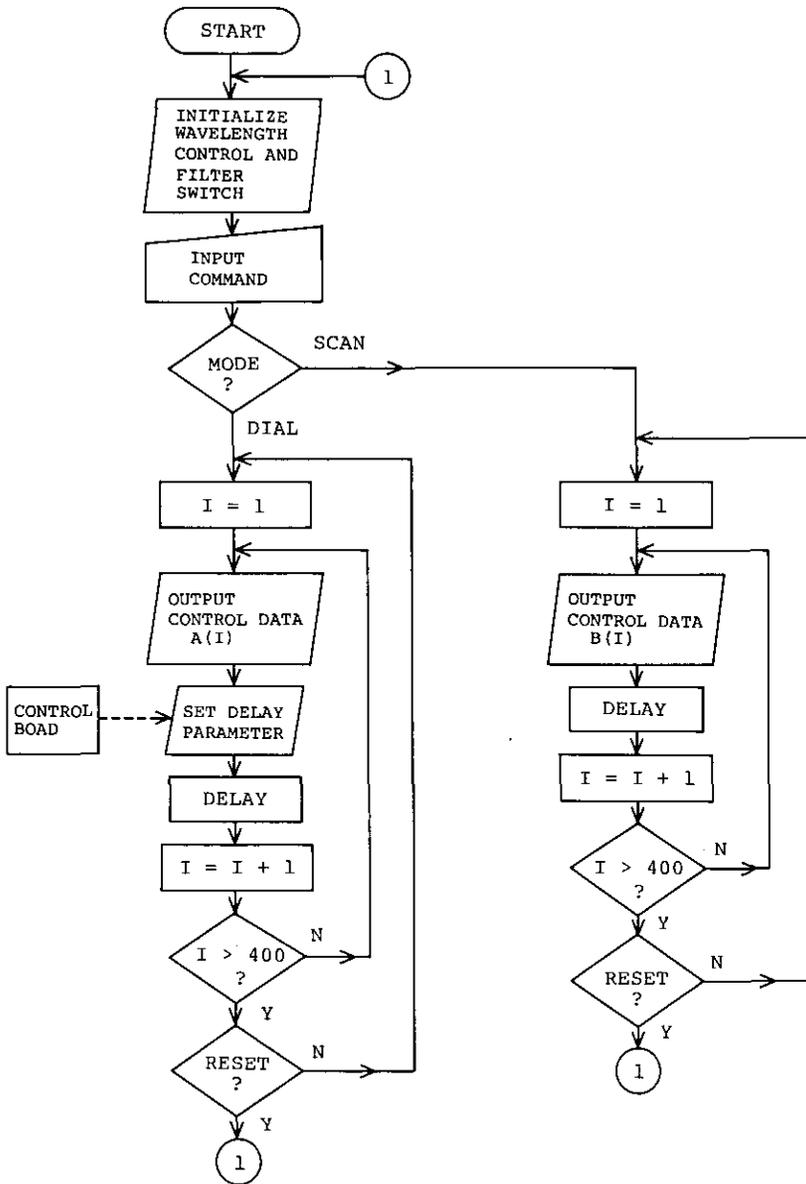


図 8 測定用ソフトプログラム(マイコン2)のフローチャート
 Fig. 8 Flow chart of the software program for the microcomputer 2

作成したマイコン1のプログラムは表4に示した3種類である。DIAL測定用のプログラムの他はテスト用のプログラムである。

DIAL測定用プログラムのフローチャートを図9に示す。測定回数、積算回数を設定した後、マイコン2のステータスを読み、波長切替装置が正常に動作していることを確認する。正常であれば

表 4 DIAL 測定用プログラム
Table 4 Software programs for the DIAL measurement

Program for the microcomputer 1	Operation mode of the microcomputer 2
(1) Program for the DIAL data acquisition	DIAL mode
(2) Program for measuring absorption spectrum of the standard NO ₂ cell	Scan mode
(3) Program for testing the power monitor modules	—

測定動作に入る。測定動作は、積算のループと積算を終わった後のデータを MT に書き込んで次の積算を開始するループの大小二つのループから構成される。測定の基本動作は、まず、トランジェントレコーダーとパワーモニター装置のリセットを行った後、レーザーが発射され、トランジェントレコーダーのトリガを待つ。トリガされた後、パワーモニター装置とトランジェントレコーダーのデータを読み込む。また、マイコン 2 のステータスを読み、波長が λ_{on} 、 λ_{off} のいずれであるかを判断する。 λ_{on} 、 λ_{off} のレーザーレーダーデータはそれぞれ別々に積算される。 λ_{on} 、 λ_{off} のデータそれぞれについて設定した回数の積算が終了した後、次の測定に進む。設定した数の測定を終了した場合はメッセージを出力して、次の動作のコマンドの入力を要求する。波長切替装置、フィルター切替装置に異常が生じた場合はアラーム信号を出力して測定を終了する。毎秒10個のレーザーレーダー信号を積算するためには高速の動作が必要であるので、DIAL 測定用のプログラムはアセンブラ言語で作成した。これにより、最高で約15pps までの測定に対応できる。図10に DIAL 測定用プログラムで磁気テープに記録されるデータの内容を示す。

表 4 の(2)に示した、波長スキャン測定プログラムはマイコン 2 をスキャンモードで動作させて校正セルの吸収スペクトルを測定するためのものである。この場合には、トランジェントレコーダーからのデータは取得しないが、レーザー発射とタイミングを取るためにトランジェントレコーダーのトリガ信号を用いる。このプログラムはパワーモニター 1、2、それぞれについて一周期400アドレスのデータを取得し、指定した周期の数だけの積算を行い、結果をディスクに記録する。また、CRT にスペクトルのグラフを出力する。この測定は DIAL 測定ほどの高速動作を要求しないので BASIC 言語でプログラムを作成した。

表 4 (3)のパワーモニター装置テスト用プログラムはパワーモニター装置に入射するレーザー光が適当な大きさであることを確認する目的のもので、パワーモニター装置 1、2 からの信号の大きさをレーザーの1ショットごとに CRT 上に表示する。

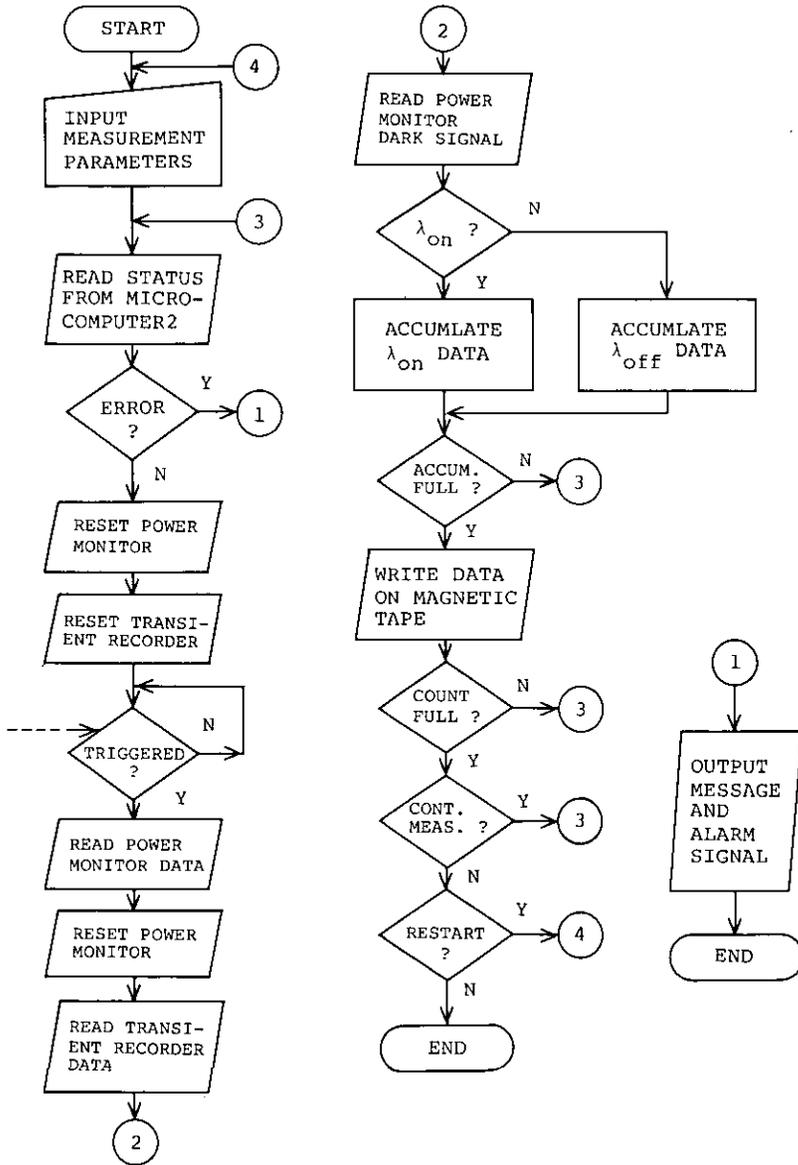


図 9 DIAL 測定プログラム(マイコン 1)のフローチャート

Fig. 9 Flow chart of the software program for the microcomputer 1 : Program for DIAL data acquisition

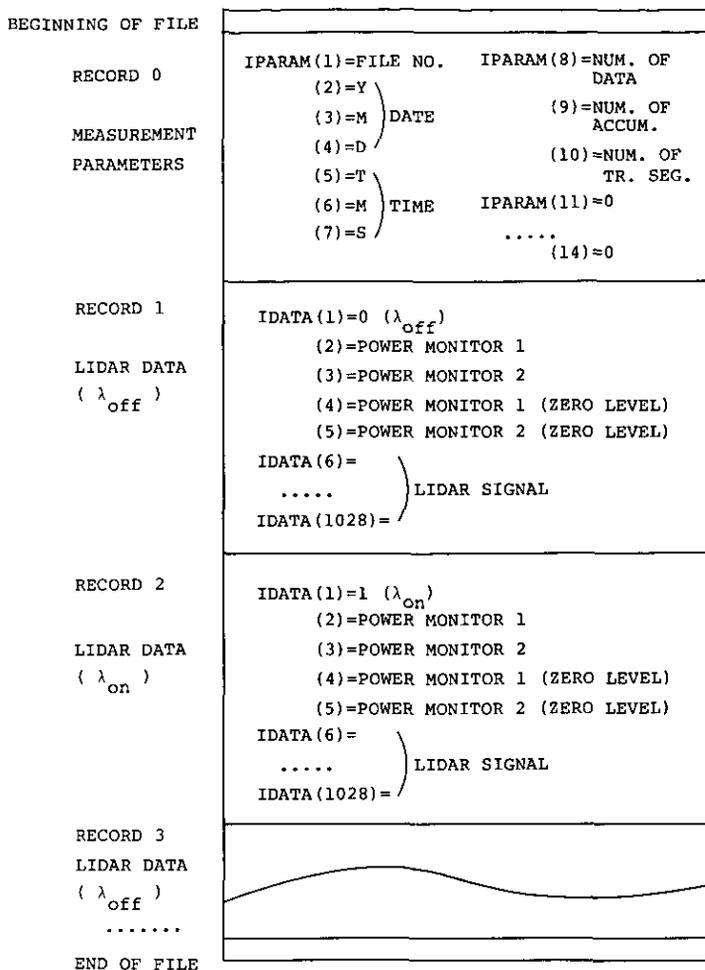


図 10 磁気テープに記録される測定データ

Fig.10 Data recorded on the magnetic tape

5 DIAL システムの動作試験

5.1 波長切替装置

波長切替装置の動作特性を調べるために次の二つの動作試験を行った。ひとつは、スキャンモードによる校正用セルの吸収スペクトルの測定で、これにより、設定波長の絶対値の確認を行った。もうひとつは、分光器とダイオードアレイを用いた波長測定で、これにより波長の再現性を調べた。

レーザー波長の設定は次の手順で行った。色素レーザー装置本来の波長スキャン装置は 1 Å 以上の精度で波長が直読できるように調整されている。そこで、最初に波長切替装置の取り付けネジを緩めて、本来のスキャンができるようにしておき、回折格子の角度と波長の関係を記録しておく。回折格子の角度の読み取りは回折格子の回転軸に小さなミラーを取り付け、He-Ne レーザーを用

いて光学的なてこを構成することにより行った。このようにして、回折格子の角度と波長の関係を記録した後、波長切替装置を取り付け、希望する2波長に対応する角度が得られるように調整する。この方法により、あらかじめ1 Å以上の精度で波長を設定することができた。

図11に波長スキャンモードにより測定したNO₂セルの吸収スペクトルの例を示す。用いた測定プログラムは、マイコン1は表4の(2)、マイコン2は波長スキャンモードである。図の横軸はステップモーターのアドレス、縦軸は透過率である。この例では積算回数は5回である。アドレス1とアドレス201がそれぞれ波長 λ_{on} 、 λ_{off} に対応する。すなわち、アドレス1が4481 Å、アドレス201が4466 Åである。Wilkersonら(1974)のNO₂の吸収スペクトルと比較すると、正しい2波長が得られていることが分かる。ここで用いた校正セルはNO₂ 7 Torr + N₂ 750 Torr、セル長10cmのものであるが、吸収係数の絶対値についても良く一致する。

次に10ppsで波長切替装置を動作させた場合の波長の再現性を測定するために、レーザー光を1 mの分光器に入射させて写真乾板面上に取り付けたフォトダイオードアレイを用いて波長を測定した。図12はこれにより記録したスペクトルである。写真では計160ショット、すなわち、 λ_{on} 、 λ_{off} そ

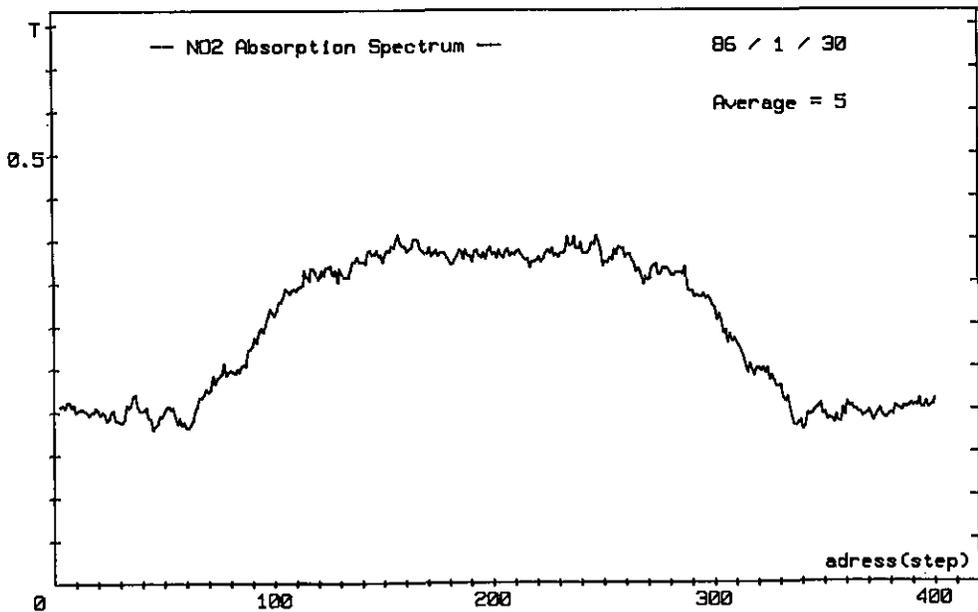


図 11 NO₂ 標準セルの透過スペクトル

Fig.11 Transmission spectrum of the standard NO₂ cell

れぞれ80ショットずつのスペクトルが露光されている。記録されたレーザー光のスペクトルの幅から、波長の1ショットごとのバラツキは±0.5 Å以内であることが分かった。これはNO₂の測定においては十分な再現性である。

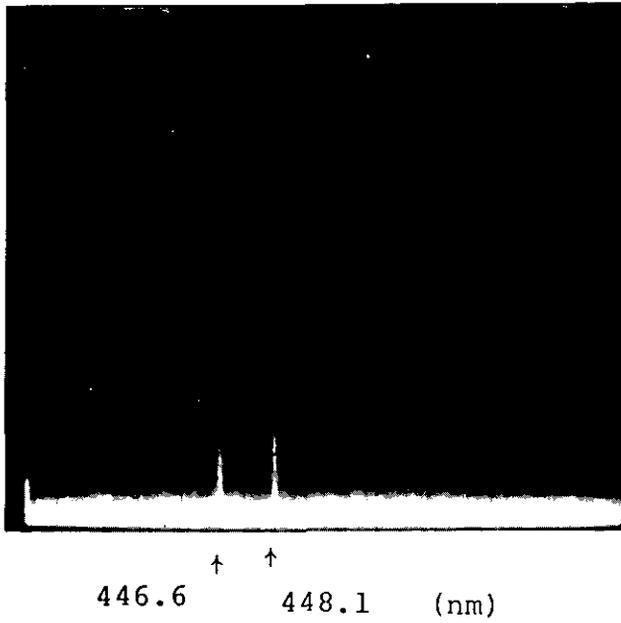


図 12 色素レーザーの出力のスペクトル
それぞれの波長についての80パルスの積算.

Fig.12 Spectrum of the dye laser output
(80 pulses for each wavelength)

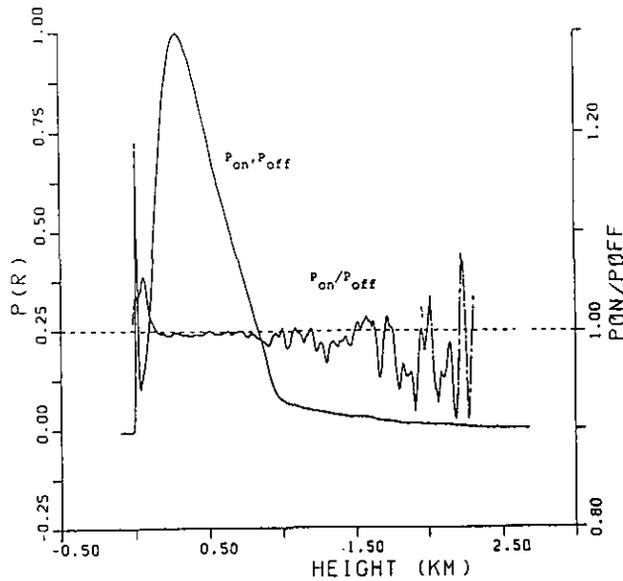


図 13 観測されたレーザーレーダー信号の例

Fig.13 Example of observed lidar signal

5.2 システム全体の動作試験

DIAL システムを測定モードで動作させて 2 波長のレーザーレーダー信号を測定した例を図13に示す。測定は鉛直方向で、国立公害研究所構内で行ったものである。この図では λ_{on} , λ_{off} それぞれについて3000回の積算を行ったレーザーレーダー信号 P_{on} , P_{off} とその比 P_{on}/P_{off} が表示されている。測定に要した時間は約10分である。 P_{on}/P_{off} の傾きが NO₂ の濃度に対応する(杉本・竹内, 1985)。この結果では約 1 km までの高度で NO₂ 濃度は 3 ppb 以下である。これまでのところ他の測定器との比較は行っていないが、筑波上空の NO₂ 濃度は非常に低いと思われるので、この結果は妥当であろう。また、逆に実際の NO₂ 濃度がゼロであったと仮定すると装置の系統的な誤差の大きさが大きく見積もっても 3 ppb 程度であることが推定できる。

6 おわりに

本文では NO₂ 測定用 DIAL システムの設計と製作について報告した。動作試験により、約10分の測定で数ppb の NO₂ を測定できることが示された。現在この DIAL システムは国立公害研究所構内における動作試験を終了し、埼玉県浦和市に移動して測定実験を行っている。今後この DIAL を用いて、逆転層、大気混合層と NO₂ の鉛直分布との関係、海風前線や陸風前線の通過に伴う NO₂ 分布の変化など、各種の観測を行う計画である。

引用文献

- Egeback, A.-L., K. A. Fredriksson and H. M. Hertz (1984) : DIAL techniques for the control of sulfur dioxide emission. *Appl. Opt.*, **23**, 722-729.
- Fredriksson, K. A. and H. M. Hertz (1984) : Evaluation of the DIAL technique for studies on NO₂ using a mobile lidar system. *Appl. Opt.*, **23**, 1403-1411.
- Hawley, J. G. (1981) : A mobile differential absorption lidar for the remote measurement of sulfur dioxide, ozone, and nitrogen dioxide. *Laser Focus*, March, 60-62.
- Jolliffe, B. W., R. C. Felton, N. R. W. Swann and P. T. Woods (1984) : Field measurement studies using a differential absorption lidar system. *Proceedings of the 12th International Laser Radar Conference, Aix-en-Provence, France.*
- Marzorati, A., W. Corio and E. Zanzottera (1984) : Remote sensing of SO₂ during field tests at Fos-Berre in June 1983. *Proceedings of the 12th International Laser Radar Conference, Aix-en-Provence, France.*
- Schotland, R. M. (1974) : Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 71-77.
- Staehr, W., W. Lahmann and C. Weitkamp (1985) : Range-resolved differential absorption lidar : optimization of range and sensitivity". *Appl. Opt.*, **24**, 1950-1956.
- 杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫(1981) : 差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中の NO₂濃度分布の測定. *応用物理*, **50**, 923-928.
- 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 NO₂濃度分布

の測定. 国立公害研究所研究報告, 第34号, 187-198.

杉本伸夫(1984): NO₂ 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.

杉本伸夫・竹内延夫(1985): 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. 国立公害研究所研究報告, 第77号, 101-116.

Sugimoto, N., I. Matsui, H. Shimizu and N. Takeuchi (1985): Experimental estimation of the error due to the fluctuation of aerosol backscattering in DIAL measurements. First International DIAL Data Collection and Analysis Workshop, Virginia beach, USA.

Wilkerson, T. D., B. Ercoli and F. S. Tomkins (1974): Absorption spectra of atmospheric gases. University of Maryland Technical Note BN-748.

II-3

エアロゾル分布の時間変動による
差分吸収レーザーレーダー測定誤差について
Experimental Estimation of the Error Due to the Fluctuation of
Aerosol Backscattering in DIAL Measurements

杉本伸夫¹・松井一郎²・笹野泰弘¹・清水 浩¹・竹内延夫¹

Nobuo SUGIMOTO¹, Ichiro MATSUI², Yasuhiro SASANO¹, Hiroshi SHIMIZU¹
and Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

エアロゾル後方散乱の時間変動により生じる DIAL 測定誤差を国立公害研大型レーザーレーダーのデータを用いて定量的に評価した。この結果、大気混合層内の汚染気体を測定対象とする地上ベース DIAL の場合、10pps のレーザーを用いて 2 波長を交互に切り替える方式を用いてもエアロゾル後方散乱の時間変動による誤差は十分に小さいことが示された。

Abstract

The error in DIAL measurements caused by the fluctuation of aerosol backscattering was quantitatively analyzed using the data of the NIES large scale lidar. The alternate, two wavelength method with a 10 pps laser is sufficient for ground-based DIAL in the visible region for measurements of pollutants in the atmospheric mixed layer.

1 はじめに

国立公害研究所では都市域における環境濃度の NO₂ の連続観測を目的とする差分吸収レーザーレーダー (DIAL) システムの開発を行っている (本報告書論文 II-2)。本論文ではこの装置の設計に先だって行った、DIAL 測定誤差の実験的な評価についてまとめて報告する。特に DIAL 測定における 2 波長切り替えの時間間隔とエアロゾル濃度分布の時間変化から生じる誤差との関係につい

-
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.

て議論する。この問題については以前の論文(杉本・竹内, 1985; Sugimoto ら, 1985)でも述べたが、本論文では定量的な議論を行い、具体的なシステムにおける測定誤差の評価の方法を考える。

2 実験

エアロゾルの変動による DIAL 測定の誤差を評価するために国立公害研究所大型レーザーレーダー(清水ら, 1982; Shimizu ら, 1985)により測定したデータを利用した。大型レーザーレーダーを用いた理由は測定の SN 比が高く、エアロゾルの濃度分布の変動を明りょうに観測することができるためである。以前の論文(杉本・竹内, 1985; Sugimoto ら, 1985)で述べた方法に従い、大型レーザーレーダーの532nmにおけるレーザーレーダー信号のそれぞれのショットを DIAL に測定における on, off の信号と見なして DIAL におけると同様の計算を行い濃度に対応するものを計算した。今の場合、1 波長のレーザーレーダーデータを用いているので、濃度はゼロとなるが、濃度測定における誤差は評価することができる。12.5pps で測定したデータを n ショットおきに on, off の信号とみなすことにより 2 波長切替時間に対応する量を変化させた。

3 結果と考察

DIAL 測定において濃度は次のように計算される。

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

ここに、 L は測定の距離分離分解能、 σ_d は差分吸収断面積、 $F(R)$ 、 $f_i(R)$ は次のように定義されている。

$$\begin{aligned} F(R) &= f_{\text{off}}(R) / f_{\text{on}}(R) \\ f_i(R) &= P_i(R+L) / P_i(R) \quad (i = \text{on, off}) \end{aligned} \quad (2)$$

$P(R)$ はレーザーレーダー受信信号である。

濃度 $N(R)$ に対する誤差は一次の近似で次のように表される。

$$\begin{aligned} (\Delta N(R) / N(R))^2 &= [1 / (2\sigma_d L N(R))]^2 (\Delta F(R) / F(R))^2 \\ &= \text{const} [(\Delta f_{\text{on}} / f_{\text{on}})^2 + (\Delta f_{\text{off}} / f_{\text{off}})^2 - 2(\Delta f_{\text{on}} / f_{\text{on}})(\Delta f_{\text{off}} / f_{\text{off}})] \end{aligned} \quad (3)$$

すなわち、 $N(R)$ に対する誤差の波長切替時間間隔への依存性は $\Delta f(R)$ の自己相関関数によって表される。以前の論文(杉本・竹内, 1985; Sugimoto ら, 1985)にいくつかの観測データを用いて計算した $\Delta f(R)$ の自己相関関数が示されている。ここでは $\Delta f(R)$ の自己相関関数に関数形を当てはめて定量的な議論を行う。ここでは自己相関を表す関数 $S(\Delta t)$ を次式で定義する。

$$S(\Delta t) = \overline{\Delta f(t) \Delta f(t - \Delta t)} / \bar{f}^2 \quad (4)$$

図1に示すように関数 $S(\Delta t)$ の $\Delta t = 0$ の部分以外は $b \exp[-a\Delta t]$ の関数で非常によく表現できることが分かった。 $\Delta t = 0$ の部分にはショットノイズなどのランダムな雑音成分が含まれている。

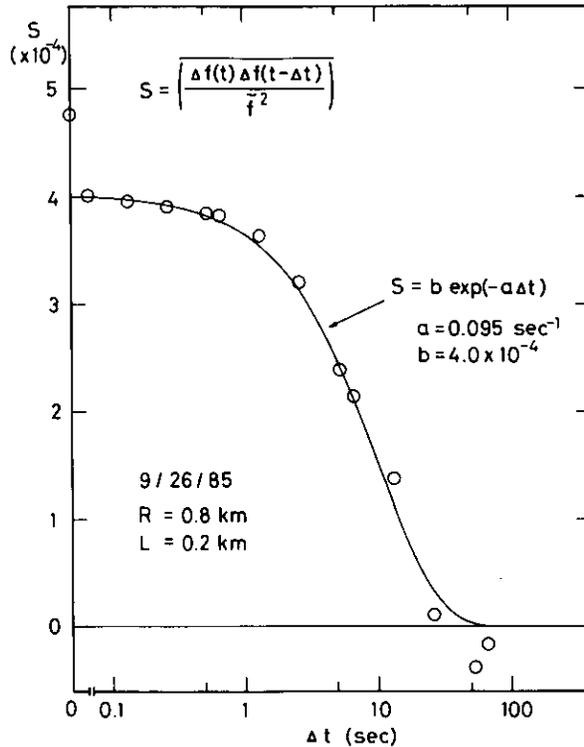


図 1 実験的に求めた関数 S の一例
 Fig. 1 An example of the experimentally obtained S as a function of Δt

いろいろな測定条件の測定データから求めた a , b の値の例を表1にまとめて示す。表1中でエアロゾルと示したものは日中の大気混合層内のエアロゾルに対する代表的な値、その他のものは観測の一例である。この結果から言えることは、エアロゾル変動の時間スケールはいずれの場合も同じ程度であるが、変動の絶対値は非常に異なるということである。エアロゾルの変動の時間スケールが散乱の対象に依存しないのは少し意外であるが、これは観測されたエアロゾルの変動の時間スケールがレーザーレーダー測定の距離分解能に依存しているためであると考えられる。すなわち、レーザーレーダー測定では距離分解能に相当する区間のエアロゾル濃度分布を平均したものが測定される。非常に速い時間変動を示す対象はその空間スケールも小さいと考えられるので、速い時間変動は空間分布の平均により打ち消されてしまうものと考えられる。

表 1 いくつかの測定例における係数 a, b の値
 Table 1 Coefficients a and b for several examples

	a (sec ⁻¹)	b
aerosol	0.095	4.0×10^4
light plume	0.10	3.5×10^2
cloud	0.11	3.0

関数 $S(\Delta t)$ を用いてエアロゾル変動による DIAL 測定の誤差は次式で評価することが可能である。

$$\left(\frac{\Delta F(R)}{F(R)}\right)^2 = 2 \times [S(0) - S(\Delta t)] \quad (5)$$

ここで Δt は 2 波長切替の時間間隔である。

具体的な DIAL システムにおける誤差の評価は次のようにして行うことができる。測定誤差は次式のように受信信号強度 P に対する依存性の異なる項に分けて表される。

$$\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 = C_0 + C_1/P + C_2/P^2 \quad (6)$$

第一項はエアロゾルの変動などによる項、二項目はショットノイズ、三項目は量子化誤差、背景光雑音などである。実際の DIAL システムにおける誤差の評価ではこれらの誤差の大小を考察すれば良い。

例として国立公害研究所において開発した NO₂ 測定用の DIAL システムにおける誤差の評価を行う。このシステムの主な仕様を表 2 に示す。この仕様を用いて理論的に評価した測定誤差の大きさを図 2 に示す。実線がショットノイズと量子化誤差を加えたものである。図 2 中に矢印で示したのは散乱するものが混合層内のエアロゾルの場合、薄い煙の場合、雲の場合についてのエアロゾルの変動による誤差の大きさである。それぞれについて、いくつかのレーザー繰り返し数について示した。波長は 1 ショットごとに切り替えるものとしている。エアロゾルの変動による誤差は測定距離に依存しない。

図 2 は 1 ショットの測定における誤差の大きさを示している。以前の論文で報告したように積算を行った場合、エアロゾル変動の誤差も積算回数の平方根で減少する。したがって、積算を行う場合も図 2 の縦軸のスケールが変化するだけでそれぞれの誤差の大小関係に変化はない。

図 2 より、10pps の繰り返し数のレーザーを用いる場合、混合層内の通常の観測ではエアロゾルの変動による誤差はショットノイズと量子化誤差の和に比べて小さく、ほとんど問題にならないことが分かる。また、薄い煙のある状況でも実用上問題ないことが結論される。

表 2 国立公害研究所 NO₂ DIAL の主な仕様

Table 2 Specification of the NIES NO₂ DIAL system

Laser	
ND :	YAG pumped dye laser
Output energy :	20 mJ/pulse
Wavelength :	$\lambda_{on}=448.1$ nm
	$\lambda_{off}=446.6$ nm
Telescope	
Diameter :	50 cm
Transient recorder	
Accuracy :	10 bits
Clock rate :	50 ns

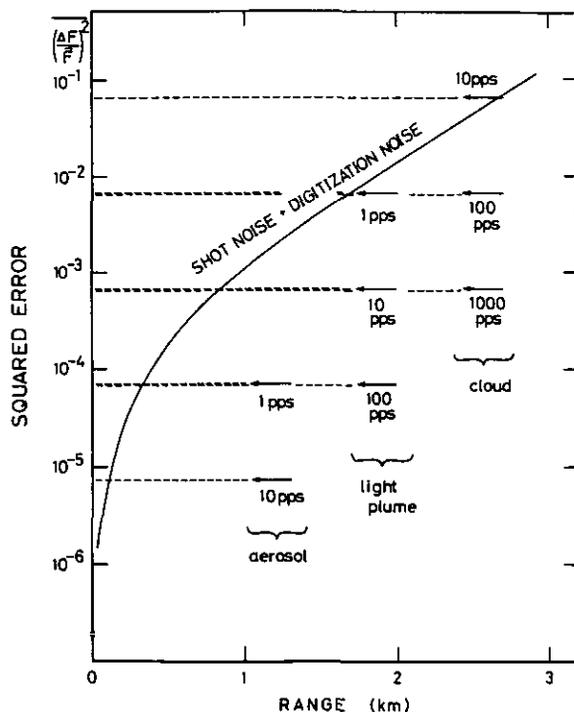


図 2 国立公害研究所 NO₂ DIAL システムにおける誤差の評価

Fig. 2 Estimation of errors in the NIES NO₂ DIAL system

以上の見積もりではエアロゾルの時間変動が $b \exp[-a \Delta t]$ の関数で表されるものと仮定している。しかし自己相関係数の $\Delta t = 0$ の近傍ではショットノイズなどのランダム雑音のほかに非常に速い大気のゆらぎの影響が含まれている可能性がある (Schotland, 1974; Menyuk & Killinger, 1981, 1983)。そこで、大型レーザーレーダーのデータについて、 Δf の自己相関係数を距離分解能 L をゼロに外挿した値などを用いて、ショットノイズなど完全にランダムな誤差の大きさを見積もり、これと $\Delta t = 0$ における誤差の大きさととの差をとることにより速いゆらぎの成分の大きさの推定を行った。この結果 10ppb のレーザーを用いて DIAL 測定を行う場合、大気の速いゆらぎを含めた誤差の大きさは大きく見積もっても、混合層のデータでは 5×10^{-5} 、薄い煙の場合でも 5×10^{-3} 程度以下であるという結論を得た。したがって、先に述べた結論には大きな変化は無いと思われる。

国立公害研究所 NO₂ DIAL では以上の結果に基づいて 10ppb のレーザーを交互に切り替える方法を用いている。

4 おわりに

本論文ではエアロゾル濃度の時間変動により生じる DIAL 測定の誤差の評価法について述べた。実際のシステムの設計において重要なことは、エアロゾル濃度の時間変動による誤差が、ショットノイズ、あるいは量子化誤差と比較してどの程度の大きさであるかを評価することである。すなわち、エアロゾルの変動による誤差がショットノイズ等と比較して十分小さくなるように 2 波長の測定の時間間隔を設定すれば十分である。本研究により、YAG レーザー励起色素レーザーを光源とする NO₂ 測定用 DIAL の場合は 10ppb のレーザーを交互に切り替える方法で十分であることが示された。しかし、例えばもっと大きな出力のレーザーや大口径の受光望遠鏡を用いる DIAL の場合、あるいは長光路差分吸収方式の場合などシステムのショットノイズが低いレベルにある場合にはエアロゾル濃度変動や大気の屈折率のゆらぎ等に対してより厳しい対応が必要となる。

本文における議論は一波長のライダー信号を用いた議論であるので、波長に依存する効果は全く考慮していない。可視から紫外領域では細かい構造を持つようなエアロゾルの散乱係数の波長依存性は見られないと考えられる。したがって NO₂ の測定ではこのことは考慮しなくて良いと考えられる。しかし、赤外領域の DIAL 測定では散乱係数の波長依存性は重要である。最近、赤外領域ではエアロゾルの散乱係数が波長に細かく依存する構造を持つことが話題になっており、また、Menyuk & Killinger (1981, 1983) の実験でも波長に依存する効果が見られている。

一方、紫外領域の O₃ の測定ではエアロゾルの空間分布より生じる誤差が Browell ら (1985) によって議論されている。紫外領域の O₃ の測定では用いる 2 波長の波長間隔が大きいため、2 波長におけるミー散乱とレイリー散乱の比がかなり異なる。このためエアロゾルの散乱係数の空間的な分布が波長に依存し、これによって濃度の値に誤差が生じる。Browell らは λ_{off} から得られるエアロゾルプロファイルを用いてこの誤差を補正する手法を開発し、良い結果を得ている。NO₂ などの測定では 2 波長の間隔が小さいのでこの誤差の影響は無視できると考えられる。

引用文献

- Browell, E.V., S. Ismail and T. Shipley (1985) : Ultraviolet DIAL measurements of O₃ profiles in regions of spatially inhomogeneous aerosols. *Appl. Opt.*, **24**, 2827-2836.
- Menyuk, N. and D.K. Killinger (1981) : Temporal correlation measurements of pulsed dual CO₂ lidar returns. *Opt. Lett.*, **6**, 301-303.
- Menyuk, N. and D.K. Killinger (1983) : Assessment of relative error sources in IR DIAL measurement accuracy. *Appl. Opt.*, **22**, 2690-2698.
- Schotland, R.M. (1974) : Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 71-77.
- 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.
- Shimizu, H., Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, I. Matsui and N. Takeuchi (1985) : Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area. *Appl. Opt.*, **24**, 617-626.
- 杉本伸夫・竹内延夫(1985) : 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. 国立公害研究所研究報告, 第77号, 101-116.
- Sugimoto, N., I. Matsui, H. Shimizu and N. Takeuchi (1985) : Experimental estimation of the error due to the fluctuation of aerosol backscattering in DIAL measurements. *First International DIAL Data Collection and Analysis Workshop, Virginia Beach, USA.*

II-4

散乱パラメータを一定としたときの
レーザーレーダー方程式解の誤差

Error Caused by Using a Constant Extinction/Backscattering Ratio
in the Laser Radar Solution

笹野泰弘¹ · Edward V. BROWELL² · Syed ISMAIL³
Yasuhiro SASANO¹, Edward V. BROWELL² and Syed ISMAIL³

要 旨

散乱パラメータを一定と仮定したときのレーザーレーダー方程式のベルヌイ解は、散乱パラメータが空間の関数であるとき誤差を与える。本論文では、散乱パラメータが実際の値と異なっているときの解の誤差を表現する一般化された解析的な式を示した。また、いくつかのレーザーレーダー波長に対するシミュレーションにより、誤差の現れ方を例示した。

Abstract

The Bernoulli solution of the laser radar equation with the assumption of a constant extinction/backscattering ratio can lead to errors in the derived aerosol extinction and backscattering profiles. This paper presents a general theoretical analysis of the errors that result from differences between the assumed and actual extinction/backscattering ratio profiles. Examples of the influence of the constant extinction/backscattering ratio assumption on the laser-radar derived aerosol extinction profile are presented for various laser wavelengths.

1 はじめに

ミ-散乱レーザーレーダー信号から消散係数、後方散乱係数の定量的な分布を求めるための手法が種々、提案されてきた(Collis & Russell, 1976)。最近、Klett(1985)は散乱パラメータ(消散係数と後方散乱係数の比)が空間の関数になっているときのレーザーレーダー方程式の一般的な解法を

* 本研究の概要は、Appl. Opt., 24, 3929-3932(1985)に発表した。

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

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

2. NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23665, U. S. A.

3. SASC Technologies, Inc, Hampton, Virginia 23665, U. S. A.

示した。本論文では散乱パラメータの値が現実と異なって与えられたときの誤差に関する一般的な理論解析の式を提案する。散乱パラメータの値が空間的に変化しているにもかかわらず一定値を与えた場合の誤差について解析的表現に基づいて議論すると共に、300nm, 600nm, 1064nm の波長に対する数値シミュレーションにより誤差の現れ方を例示した。

2 理論

距離自乗補正されたレーザーレーダー信号を $X(R)$ とすると、 $X(R)$ は次式で表される。

$$X(R) \equiv P(R)R^2 \\ = C[\beta_1(R) + \beta_2(R)] \exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha_1(r) + \alpha_2(r)] dr\right\} \quad (1)$$

ここで、 R はレーザーレーダーからの距離、 $P(R)$ は受信信号強度、 C はレーザー出力パワーを含むシステムの定数、 β と α は体積後方散乱係数、体積消散係数である。添字の 1, 2 は、それぞれエアロゾル、空気分子に関係する量であることを示している。

エアロゾル、空気分子のそれぞれの散乱パラメータは次式で定義される。

$$S_1(R) \equiv \alpha_1(R) / \beta_1(R) \quad (2)$$

$$S_2 \equiv \alpha_2(R) / \beta_2(R) \quad (3)$$

ここで、 S_2 は一定値である。

(1)~(3)式から、 $X(R)$ は次のように書ける。

$$X(R) = \frac{C}{S_1(R)} \left[\alpha_1(R) + \frac{S_1(R)}{S_2} \alpha_2(R) \right] \\ \times \exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha_1(r) + \alpha_2(r)] dr\right\} \quad (4)$$

今、規格化された全消散係数として、次式で $y(R)$ を定義し、(4)式に代入すると

$$y(R) \equiv \alpha_1(R) + \frac{S_1(R)}{S_2} \alpha_2(R), \\ S_1(R)X(R) \exp\left\{-2 \int_0^R \left[\frac{S_1(r)}{S_2} - 1\right] \alpha_2(r) dr\right\} \\ = Cy(R) \exp\left[-2 \int_0^R y(r) dr\right] \quad (5)$$

を得る。

(5)式のうち $S_1(R)$ が与えられ、また $\alpha_2(R)$ が適当な気象観測あるいは大気モデルから与えられれば、左辺はすべて既知の量となる。

(5)式の両辺の対数を取り、距離 R について微分すると

$$\frac{d \ln \left([S_1(R)X(R)] \exp \left\{ -2 \int_0^R \left[\frac{S_1(r)}{S_2} - 1 \right] \alpha_2(r) dr \right\} \right)}{dR} = \frac{1}{y(R)} \frac{dy(R)}{dR} - 2y(R) \quad (6)$$

となる。これは、左辺が空間的に変化する量 $S_1(R)$ と指数関数の項で変形されている他は Klett (1981) の原論文の (7) 式と同様の式となっている。ベルヌイ方程式として知られている (6) 式を解くと最終的に

$$\alpha_1(R) + \frac{S_1(R)}{S_2} \alpha_2(R) = \frac{S_1(R)X(R) \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^R \left[\frac{S_1(r)}{S_2} - 1 \right] \alpha_2(r) dr \right\}}{\frac{S_1(R_0)X(R_0)}{\alpha_1(R_0) + \frac{S_1(R_0)}{S_2} \alpha_2(R_0)} - 2 \int_{R_0}^R S_1(r)X(r) \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^r \left[\frac{S_1(r')}{S_2} - 1 \right] \alpha_2(r') dr' \right\} dr} \quad (7)$$

を得る。ここで、境界条件として

$$y(R_0) = \alpha_1(R_0) + \frac{S_1(R_0)}{S_2} \alpha_2(R_0)$$

を与えた。全体積後方散乱係数に対する解は

$$\beta_1(R) + \beta_2(R) = \frac{X(R) \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^R [S_1(r) - S_2] \beta_2(r) dr \right\}}{\frac{X(R_0)}{\beta_1(R_0) + \beta_2(R_0)} - 2 \int_{R_0}^R S_1(r)X(r) \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^r [S_1(r') - S_2] \beta_2(r') dr' \right\} dr} \quad (8)$$

と書ける。

解の表現 (7) (8) は、散乱パラメータが空間の関数として積分項に含まれていることを除いて、Fernald (1984) の与えた式に一致する。この相違を考慮すると、Fernald (1984) の数値積分スキームは次のように修正される。すなわち、指数関数項は

$$A(I, I-1) = |[S_1(I-1) - S_2] \beta_2(I-1) + [S_1(I) - S_2] \beta_2(I)| \Delta R \quad (9)$$

となり、距離 $R(I-1)$ における解は(7)(8)式に対応して、それぞれ

$$\begin{aligned} & \alpha_1(I-1) + \frac{S_1(I-1)}{S_2} \alpha_2(I-1) \\ &= \frac{S_1(I-1)X(I-1)\exp[A(I, I-1)]}{\frac{S_1(I)X(I)}{\alpha_1(I) + \frac{S_1(I)}{S_2} \alpha_2(I)} + \{S_1(I)X(I) + S_1(I-1)X(I-1)\exp[A(I, I-1)]\}\Delta R} \\ & \beta_1(I-1) + \beta_2(I-1) \\ &= \frac{X(I-1)\exp[A(I, I-1)]}{\frac{X(I)}{\beta_1(I) + \beta_2(I)} + \{S_1(I)X(I) + S_1(I-1)X(I-1)\exp[A(I, I-1)]\}\Delta R} \quad (10) \end{aligned}$$

である。これらは後方積分スキームであるが、前方積分スキームについても同様に得られる。右辺分母の第一項は、計算の各ステップごとの境界条件に対応している。

以下では、レーザーレーダー信号の解析において散乱パラメータの空間変化を無視することの影響を調べる目的で、誤差を表す一般的な表現を導出する。これは Klett (1981), Braun (1985) の方法の拡張であり、空気分子の効果を含めたものである。ここで、真値を表すために \wedge を用いることにすると、(5)式より

$$\begin{aligned} & \hat{S}_1(R)\hat{X}(R)\exp\left\{-2\int_0^R\left[\frac{\hat{S}_1(r)}{S_2}-1\right]\hat{\alpha}_2(r)dr\right\} \\ &= \hat{C}_y(R)\exp\left[-2\int_0^R\hat{y}(r)dr\right] \quad (11) \end{aligned}$$

を得る。ここで、 X , α_2 についても測定誤差などがあり得ることを考慮して真値 \hat{X} , $\hat{\alpha}_2$ として扱っている。

$\sigma \equiv S_1/\hat{S}_1$, $\xi \equiv X/\hat{X}$, $\delta \equiv \alpha_2/\hat{\alpha}_2$, $\eta = y/\hat{y}$ を定義すると、(5), (11)式から次式を得る。

$$\begin{aligned} & \sigma(R)\xi(R)\exp\left(-2\int_0^R\left\{\left[\sigma(r)\delta(r)-1\right]\frac{\hat{S}_1(r)}{S_2}\hat{\alpha}_2(r)\right.\right. \\ & \quad \left.\left.-[\delta(r)-1]\hat{\alpha}_2(r)\right\}dr\right) \\ &= \eta(R)\exp\left\{-2\int_0^R[\eta(r)-1]\hat{y}(r)dr\right\} \quad (12) \end{aligned}$$

ここで、(12)式の両辺について対数を取り、微分をすると

$$\frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{dR} - 2\hat{y}\eta = -2\hat{y} + \frac{d \ln(\sigma \xi)}{dr} - 2(\sigma \delta - 1) \frac{\hat{S}_1 \hat{\alpha}_2}{S_2} + 2(\delta - 1) \hat{\alpha}_2 \quad (13)$$

となる。これは(6)式と同形であり簡単に解けて、次の解が得られる。

$$\eta(R) =$$

$$\frac{\left[\exp\left[-2 \int_{R_0}^R \left\{ \hat{y}(r) + (\sigma(r)\delta(r) - 1) \frac{\hat{S}_1(r)}{S_2} \hat{\alpha}_2(r) - (\delta(r) - 1) \hat{\alpha}_2(r) \right\} dr\right] \sigma(R) \xi(R) / (\sigma(R_0) \xi(R_0)) \right]}{\left[1/\eta(R_0) - 2 \int_{R_0}^R \hat{y}(r) \exp\left[-2 \int_{R_0}^r \left\{ \hat{y}(r') + (\sigma(r')\delta(r') - 1) \frac{\hat{S}_1(r')}{S_2} \hat{\alpha}_2(r') - (\delta(r') - 1) \hat{\alpha}_2(r') \right\} dr'\right] \sigma(r) \xi(r) / (\sigma(R_0) \xi(R_0)) dr \right]} \quad (14)$$

$S_1(R)$ の効果は、光学的厚さが小さく積分項が無視できる場合に、次のような簡単な議論で調べられる。このとき(11)式は単純化されて

$$\eta(R) = \eta(R_0) \frac{\sigma(R)}{\sigma(R_0)}$$

あるいは、 η 、 σ をきちんと書けば

$$\frac{\alpha_1(R) + \frac{S_1(R)}{S_2} \alpha_2(R)}{\hat{\alpha}_1(R) + \frac{\hat{S}_1(R)}{S_2} \hat{\alpha}_2(R)} = \frac{\alpha_1(R_0) + \frac{S_1(R_0)}{S_2} \alpha_2(R_0)}{\hat{\alpha}_1(R_0) + \frac{\hat{S}_1(R_0)}{S_2} \hat{\alpha}_2(R_0)} \left[\frac{S_1(R)}{\hat{S}_1(R)} / \frac{S_1(R_0)}{\hat{S}_1(R_0)} \right] \quad (15)$$

となる。ただし、すべての R に対して $\xi(R) = 1$ と仮定した。さらに、空気分子の項が無視できれば、次式を得る。

$$\frac{\alpha_1(R)}{\hat{\alpha}_1(R)} = \frac{\alpha_1(R_0)}{\hat{\alpha}_1(R_0)} \left[\frac{S_1(R)}{\hat{S}_1(R)} / \frac{S_1(R_0)}{\hat{S}_1(R_0)} \right] \quad (16)$$

これから、距離 R におけるエアロゾルによる消散係数は、 $S_1(R)/S_1(R_0) [S_1(R)/S_1(R_0)]^{-1}$ に比例することが分かる。仮に S_1 に一定値を入れる ($S_1(R) \equiv S_1(R_0)$) にすると、 $\alpha_1(R)$ は $\hat{S}_1(R)$ に逆比例する。

減衰の項も正しく取り入れると((14)式)、光学的厚さが厚くなるにつれて解は真値へ収束していく(ただし、後方積分のとき)。しかしこの場合にも、(14)式から明らかのように散乱パラメータの変化 $\sigma(R)/\sigma(R_0)$ に依存して解のプロファイルは変わる。減衰が無視できるような場合、体積後

方散乱係数は $S_1(R)$ に無関係である。光学的厚さが大きいときには $\sigma(R)/\sigma(R_0)$ が解に影響する。

3 数値シミュレーションの例と検討

図1に、散乱パラメータの空間変化を無視した時の効果を調べるための数値シミュレーションの結果の例を示した。エアロゾルの分布はステップ状に(図の実線)与え、真の散乱パラメータを図示したように40, 80とモデル化した。図中の記号をつけた曲線は、エアロゾルのモデル分布と一定の空気分子分布に対するレーザーレーダー受信信号(式(1))を解いて得た消散係数分布である。受信信号は測定誤差を持たないと仮定し、空気分子の分布は正確に知られているものとした。

計算に用いた波長は300, 600, 1064nmで、これに対応する空気分子の消散係数は $0.145 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$, $0.815 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$, $0.807 \times 10^{-6} \text{m}^{-1}$ である。

図1の白抜きの記号のつけられた曲線は、 $S_1=60$ とおいたもの、他の二つは $S_1=40, 80$ とおいた結果である。いずれも、境界条件を $R=1500\text{m}$ で正しく与え、後方積分により解を求めた。

(15)式によれば、 S_1 に一定値を代入したときの解は空気分子に関係する項を通してのみ S_1 の影響を受ける。したがって、 $S_1=40, 60, 80$ としたときの波長300nmに対する解の間の相違は、空気分子の関する項の大きさの違いに起因している。波長が1064nmの場合には、モデルで与えられた空気分子の消散係数は、エアロゾルの消散係数に比べて無視できるほど小さい。このため、計算された消散係数は、例えば $R=1000\text{m}$ において $S_1(R)$ が2倍になっているのに対応して半分の値となっている。これは、先に(16)式を用いて説明した簡単な場合の議論に一致している。

同じ $S_1 (=60)$ を用いた三つのケース(波長, 300nm, 600nm, 1064nm)の間の相違は空気分子の項とエアロゾル消散係数の項の相対的な大きさの違いに依存している。距離500mの地点において、

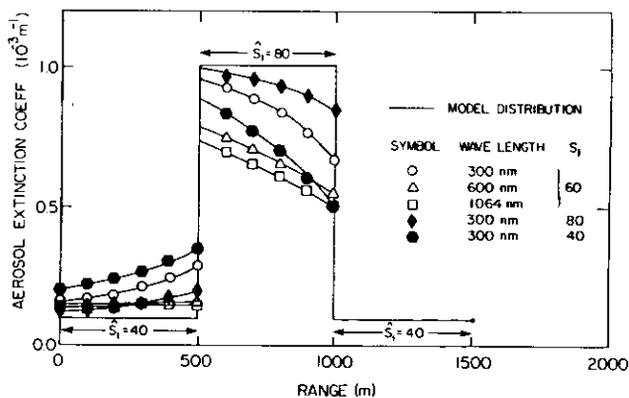


図 1 エアロゾル消散係数のモデル分布と再構成分布
境界条件は距離1500mで正しく与え、後方積分により求めた。

Fig. 1 Reconstructed profiles of aerosol extinction coefficient.

Boundary conditions were correctly given at 1500m, and the backward integration was applied.

真の散乱パラメータの値は再び40に変わっている。ここで、計算された消散係数は距離1000mの地点の振舞いとは逆に過大評価になっている。もちろん、これはエアロゾルの分布モデルに依存する。

光学的厚さが十分に厚くなると、解は真値に収束していく。収束の速さは、エアロゾル、空気分子の消散係数の大きさや、散乱パラメータの値に依存する。

一般的な状況のもとで、散乱パラメータを空間の関数としてあらかじめ知ることは容易ではない。しかし、例えば、Saleminkら(1984)が示したような散乱パラメータの相対湿度依存性のようなパラメタリゼーションが可能であるならば、(7)(8)式で与えられるような解が現実的なものとなる。このとき、相対湿度は従来の気象観測機器あるいはDIALによる水蒸気、気温の測定などから求めることになろう。ただ、相対湿度依存性なども議論の余地のあるところで、今後の一層の研究が必要とされる。

なお、本研究は著者のひとり(笹野)がオールドドミニオン大学客員研究員として、NASA ラングレー研究所に滞在中に実施したものである。

引用文献

- Braun, C. (1985) : General formula for the errors in aerosol properties determined from lidar measurements at a single wavelength. *Appl. Opt.*, **24**, 925-927.
- Collis, R.T.H. and P.B. Russell (1976) : Lidar measurement of particles and gases by elastic back-scattering and differential absorption. *In* : *Laser Monitoring of the Atmosphere*, (Ed.) D. Hinkley, (Springer-Verlag), New York. 110-117.
- Fernald, F.G. (1984) : Analysis of atmospheric lidar observations : Some comments. *Appl. Opt.*, **23**, 652-653.
- Klett, J.D. (1981) : Stable analytical inversion solution processing lidar returns. *Appl. Opt.*, **20**, 211-220.
- Klett, J.D. (1985) : Lidar inversion with variable extinction / backscatter ratios. *Appl. Opt.*, **24**, 1638-1643.
- Salemink, H., P. Schotanus and J.B. Bergwerff (1984) : Quantitative lidar at 532 nm for vertical extinction profiles and the effect of relative humidity. *Appl. Phys.*, B34, 187-189.

II-5 多波長レーザーレーダーによるエアロゾル粒径分布計測 に関する数値シミュレーション

Numerical Simulation on Measurement of Size Distribution of Aerosols by Multi-wavelength Laser Radar

中根英昭¹・浦 慶²・笹野泰弘¹・北村新三³

Hideaki NAKANE¹, Pu QING², Yasuhiro SASANO¹ and Shinzo KITAMURA³

要 旨

多波長レーザーレーダー観測によって得られるエアロゾルの消散係数と後方散乱係数から、反転法を用いてエアロゾルの粒径分布を求める方法について、数値シミュレーションを行った。本研究では粒径分布を表現する際の基底関数として1次のB-スプラインを用いた。これによって、粒径分布をヒストグラムではなく折れ線で近似することが容易になった。レーザーレーダーの波長としては0.347, 0.532, 0.694, 1.064 μm の4波長を用いた。

数値シミュレーションの結果、1)数値計算上の誤差や粒径分布を折れ線近似することによる誤差の影響は小さいこと、2)粒径分布のスムージングの程度を表すラグランジュ未定定数を適当に選ぶならば、体積表示した粒径分布の最大値付近では測定値の相対誤差の2倍程度の誤差で粒径分布を再現できること、3)相対湿度の変化によるエアロゾルの複素屈折率の変動は粒径分布の誤差に大きな影響を与えないことが明らかになった。

最終的に粒径分布の精度を決定するのはラグランジュ未定定数の妥当性とエアロゾルの複素屈折率の正確さであるが、多波長レーザーレーダーによるエアロゾルのタイプの識別法はこれら二つのパラメータの決定に際して有効な情報を与える。

-
1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番 2
Atmospheric Environment Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
 2. 昭和59～61年度 国立公害研究所共同研究員(神戸大学大学院自然科学研究科 〒657 神戸市灘区六甲台町)
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. Present Address: The Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657, Japan.
 3. 昭和55～61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. Present Address: Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657, Japan.

Abstract

The feasibility of deriving aerosol size distribution from aerosol volume extinction and backscattering coefficient measurements by multi-wavelength laser radar is numerically investigated. The present study employs the matrix inversion with the first order B-spline as basis function to approximate aerosol size distribution; this function gives better approximation of the size distribution than the conventional histograms. The four wavelengths, 0.347, 0.532, 0.694, and 1.064 μm , are used in the simulation. The results of the numerical simulations show, 1) the effects of round-off errors in the numerical calculation is negligible and approximation errors of the size distribution by B-spline function is small, 2) the reconstruction errors of size distributions at their peaks are about twice as large as the relative measurement errors when the Lagrange multipliers, which express the degree of smoothing the size distribution, are suitably chosen, 3) the variation in the complex refractive indices of aerosols due to humidity change does not produce large errors in the size distributions. The identification of aerosol types using multi-wavelength laser radar is useful for determination of the Lagrange multipliers and estimation of the complex refractive indices of aerosols.

1 はじめに

エアロゾルの組成及び粒径分布は、エアロゾルの生成機構や履歴を反映すると同時にその大気中の動的挙動、化学的性質を支配し、さらに、大気中の光の伝ぱん、太陽放射や大気・地面からの放射による大気の加熱・冷却過程に対して大きな影響を与える。したがって、組成と共に粒径分布はエアロゾルの物理的・化学的・光学的性質を決定する基本的なパラメータである。

エアロゾルの粒径分布を測定する方法の中で、光学的な原理に基づく方法は非接触で測定できるという利点を持つため、数多くの研究が成されてきた。例えば、サンフォトメータによって求められる太陽光の減衰量の波長依存性から大気柱全体に対する平均的な粒径分布と個数密度を求める手法(例えば、King, 1982)、ポーラーネフェロメータによって得られるエアロゾルによる散乱光の角度分布から粒径分布と複素屈折率を同時に求める手法(Tanakaら, 1982)等である。

一方、レーザーレーダーはエアロゾルの消散係数や体積後方散乱係数の空間分布を求める装置である。したがって、多波長レーザーレーダーで求めた消散係数や体積後方散乱係数の波長依存性から粒径分布を推定することができるならば、粒径分布の空間変化が得られるという意味で極めて有用な情報を提供できる。しかし、多波長レーザーレーダー信号から粒径分布を求める手法の実用化は進んでいない。その理由は、第一に、これまで高出力のレーザーを多くの波長で得ることが困難であったこと、第二に、レーザーレーダーの信号から定量的に消散係数や体積後方散乱係数の分布を求める手法が十分発達していなかったことにある。これらの問題点は、最近のレーザーの進歩とレーザーレーダー信号の解析手法の発達(Spinhirneら, 1980; Klett, 1981; Saleminkら, 1984; Fernald, 1984; Sasano & Nakane, 1984; 中根ら, 1985; Klett, 1985; Sasano & Browell, 1986; Sasanoら, 1985)によって克服されつつある。したがって、消散係数と体積後方散乱係数の波長依存性から粒径分布を得る手法の確立が現在の重要な課題である。

消散係数または体積後方散乱係数,あるいはこの両者から粒径分布を求める問題は, Fredholmの第一種積分方程式を解く問題に帰着するが,この方程式の一般的な解析的解法は存在しない。そこで,様々な数値解法が提案されている(例えば, Phillips, 1962; Tikhonov, 1963; Twomey, 1963)。

これらの提案のなかでも, Müller & Quenzel (1985)は特に多波長レーザーレーダーを対象として取り上げて観測データからエアロゾルの粒径分布を求める問題について数値シミュレーションを行い,得られる粒径分布の誤差について論じた。彼らの用いた手法の特徴は,第一に,消散係数と体積後方散乱係数の両者を連立積分方程式に組み込んだこと,第二に,連立積分方程式をまともに解くのではなく,試行錯誤的に粒径分布を与えて消散係数と体積後方散乱係数を計算し,測定値として与えた消散係数,体積後方散乱係数と比較して誤差を求め,これが小さくなるように解を決定する方法を採用している事である。前者は,レーザーレーダーの特性に基づいた合理的な手法であるが,後者については,一般に用いられている手法,すなわち反転法(inversion method, 例えば Shaw, 1979; King, 1982)と比較して,特に優れた方法であるとは言えない。反転法は Twomey (1977)等の研究により解法が数学的に定式化されており,特に解として得られる粒径分布に対するスムージングの程度が一つのパラメータ(ラグランジュの未定定数)で表すことができるという利点を持っている。

そこで,本研究では,消散係数と体積後方散乱係数の両者を連立方程式に組み込み,反転法を用いてエアロゾルの粒径分布を求める手法について数値シミュレーションを行った。この数値シミュレーションの目的は,解として得られる粒径分布の誤差をもたらず要因を明らかにすることである。主要な誤差要因としては,

1. 数値計算上の誤差及び粒径分布を折れ線近似することによる誤差
2. 消散係数と体積後方散乱係数の測定誤差
3. エアロゾルの複素屈折率の不確定性

が考えられる。これらの誤差要因の寄与の大きさを明らかにするために本研究では次のような数値シミュレーションを行った。まず,真のエアロゾルの粒径分布を与え, Mie 散乱理論によって各波長の消散係数と体積後方散乱係数を計算する。そして,これらのデータから反転法を用いて粒径分布を求め,真の粒径分布と比較して誤差を求めた。その際に,測定誤差を付加すること,及び複素屈折率に誤差を与えることにより,これらの誤差要因の影響を調べた。

第2節では用いた反転法について,第3節では数値シミュレーションの方法について述べ,第4節では数値シミュレーションの結果を基にして,本研究で用いた反転法の誤差要因について検討する。

2 反転(inversion)の方法

波長 λ の光に対するエアロゾルの消散係数 α_i , 体積後方散乱係数 β_i は

$$\alpha_i(R) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_E(m, 2\pi r/\lambda_i) n(r) dr \quad (1)$$

$$\beta_i(R) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_B(m, 2\pi r/\lambda_i) n(r) dr \quad (2)$$

で定義される。ここで、 r はエアロゾルの半径、 Q_E は消散効率因子、 Q_B は後方散乱効率因子、 m は大気の複素屈折率、 $n(r)$ は半径 r から $r+dr$ の間にあるエアロゾルの個数密度である。

粒径分布は、個数密度 $n(r)$ だけではなく、表面積密度、体積密度によって表すことができる。そこで、式(1)、(2)を変換し、一般化して表現すると

$$g_i = \int_{x_0}^{x_1} K(x, \lambda_i, m) f(x) dx \quad (3)$$

の形の積分方程式になる。ここで、 g は α または β を表し、 x は

$$x = \ln r \quad (4)$$

である。ここで、粒径分布 $f(x)$ の x 依存性が少ないほど反転(inversion)結果が良好である(Yamamoto & Tanaka, 1969)。実際の大气エアロゾルの粒径分布はしばしば粒径のべき乗、

$$n(x) = \frac{dN}{dx} = Cr^{-\beta} \quad (5)$$

で表される。通常 $\beta = 3$ が用いられるがこの場合には個数密度は r^{-3} 、表面積密度は r^{-1} に比例し、体積密度は定数になる。したがって、 $f(x)$ としては体積密度で表した粒径分布を用いるのが適当である。

この場合には、核関数と粒径分布は、

$$K(x, \lambda_i, m) = \frac{3}{4r} Q_L(m, 2\pi r/\lambda_i), \quad (L=E \text{ または } B) \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{4\pi}{3} r^3 n(x) \quad (7)$$

$$n(x) = dN/d \ln r$$

となる。 N はエアロゾルの全個数である。

式(3)はFredholmの第一種積分方程式であり、一般的な解析法は存在しない。通常、用いられる解法は式(3)を離散化した連立方程式による近似解法である。これらの解法では、粒径分布 $f(x)$ を次のように離散化する。

$$f(x) = \sum f_j B_j(x) + \epsilon^d(x) \quad (8)$$

ここで、 $B_j(x)$ は粒径分布の近似に用いる基底関数であり、 f_j は j 番目の粒径に対応する重みである。また、 $\epsilon^d(x)$ は離散化による誤差である。基底関数 $B_j(x)$ は、通常は各粒径区間で一定値をとる関数であり、例えば図1(a)のような関数は、(b)のように近似する。しかし、 $B_j(x)$ を屋根型関数(roof function)で表すならば、図1(c)に示すように $f(x)$ 全体が折れ線近似され、離散化の誤差 $\epsilon^d(x)$ をより小さくすることができる。前者は0次の、後者は1次のB-スプライン(市田・吉本, 1979)を基底関数にとったことになる。本研究では、粒径分布は連続関数で近似するべきであるという立場から1次の正規化されたB-スプラインを基底関数として用いた。もちろん、測定波長の数が多い場合には2次や3次のB-スプラインを基底関数にとることも可能である。 $B_j(x)$ を具体的に書くと、

$$\begin{aligned}
 B_j(x) &= 0 & (x < x_{j-1}) \\
 B_j(x) &= 1 - \frac{x_j - x}{x_j - x_{j-1}} & (x_{j-1} < x < x_j) \\
 B_j(x) &= 1 - \frac{x - x_{j+1}}{x_j - x_{j+1}} & (x_j < x < x_{j+1}) \\
 B_j(x) &= 0 & (x > x_{j+1})
 \end{aligned} \tag{9}$$

これらの量を用いると式(3)の i 番目の測定値 g_i は

$$g_i = \sum A_{ij} f_j + \epsilon_i^t \tag{10}$$

で表される。 ϵ_i^t は離散化によって生ずる誤差と測定誤差の和であり、 A_{ij} は

$$A_{ij} = \int_{x_{j-1}}^{x_{j+1}} K(x, \lambda_i, m) B_j(x) dx \tag{11}$$

である。

式(10)の連立方程式を f_j について解くことができれば、原理的には粒径分布を求めることができる。この式は、行列表示では

$$\mathbf{g} = \mathbf{A}\mathbf{f} + \boldsymbol{\epsilon} \tag{12}$$

となる。ここで \mathbf{g} は g_i を要素とする列ベクトル(測定値ベクトル)、 \mathbf{A} は A_{ij} を要素とする行列、 \mathbf{f} は f_j を要素とする解ベクトル、 $\boldsymbol{\epsilon}$ は ϵ_i^t を要素とする誤差ベクトルである。

式(12)は解に対する拘束条件を持つ反転法によって解くことができるが、様々な手法の中から、本研究では、解は与えられた条件の中で2階差分が最小という拘束条件、すなわち、解として得られる粒径分布が最も滑らかな曲線を描くという条件を採用した(Phillips, 1962; Twomey, 1977)。それは、大気エアロゾルの粒径分布は滑らかな関数であると考えられるので拘束条件が実際の粒径分布に適合しているからである。この方法によると、解ベクトル \mathbf{f} は、

となる。また、 γ は解の滑らかさを表すラグランジュ未定数で、式(13)の第一項中の $A^T A$ と γH の相対的な大小関係がスムージングの効果を支配する。 γ が小さすぎると解は振動し、大きすぎるとスムージングがかかりすぎてしまう。 $A^T A$ と γH の相対的な大小関係を、

$$\gamma = \gamma_0 \{ \prod_i (A^T A)_{ii} \}^{\frac{1}{2}}, \quad (\gamma_0 = 10^{-3}, 10^{-2}, \dots, 10^2) \quad (15)$$

を用いて表す(Tanakaら, 1982)。

γ の選択の基準の一つに、観測値 g と式(11)の解 f から再構成した観測値 g' の差、すなわち残差ベクトル e

$$e = (g - g') = (g - Af) \quad (16)$$

がある。これを用いて、

$$Q_1 = e^T S^{-1} e \quad (17)$$

を定義する。 S は測定値 g の分散 σ_{ii}^2 と共分散 σ_{ij}^2 を要素とする共分散行列で、誤差に相関のない合($\sigma_{ij} = 0, i \neq j$)には、 Q_1 は、

$$Q_1 = \sum (e_i^2 / \sigma_{ii}^2) \quad (18)$$

となる。観測データ数が P 個の場合、Twomey(1977)は、 γ が、

$$Q_1 \leq P \quad (19)$$

を満たす範囲にあるのが適当であること、また、 Q_1 が P よりはるかに小さい場合には、解に好ましくない振動が生じることを示した。また、「最適の γ 」については多くの研究がなされてきた。しかし、真の値に最も近い解を与える γ は、自動的に決定されるようなものではなく、測定誤差や粒径分布を考慮して選ぶ必要がある(King, 1982)。

3 数値シミュレーションの方法

式(13)より得られる粒径分布に対する数値計算上の誤差(例えば、丸めの誤差が増幅されて生じる誤差)、粒径分布を折れ線近似する際の誤差、測定誤差から生じる誤差、エアロゾルの複素屈折率の不確定性から生じる誤差を検討するために、数値シミュレーションを行った。その手順は、

- 1) レーザーの波長(λ_i : 0.347, 0.694, 0.532, 1.064 μm)、複素屈折率(m ; 全波長において一定であると仮定する)と真の粒径分布 $f(x)$ を与え、式(1)、(2)より消散係数 α_i 、体積後方散乱係数 β_i を求める。
- 2) 与えた粒径分布の範囲、レーザーレーダーの波長、複素屈折率を式(11)に代入して A_{ij} を計算する。

3) 測定誤差を含む消散係数と体積後方散乱係数 α'_i, β'_i を次のように作る。

$$\alpha'_i = \alpha_i (1 + \epsilon) \quad (20)$$

$$\beta'_i = \beta_i (1 + \epsilon) \quad (21)$$

ただし、 ϵ は、平均値 $\mu = 0$ 、標準偏差 $\sigma =$ 測定誤差の期待値 σ_{ii} を与え、大型計算機で発生させた乱数である。

4) α_i, β_i と複素屈折率 m を用い、 $10^{-5} \leq \gamma < 10^3$ の範囲で $\ln \gamma$ が等間隔になるようにとった 100 個の γ について反転を行い、粒径分布 $f(x)$ を求める。

3) 4) の段階は解 $f(x)$ の誤差が統計的意味をもつ程度繰り返す。ここでは、100 回繰り返した。

なお数値計算は、国立公害研究所の大型計算機 HITAC-280 によって行い、1 次連立方程式の数値解法に当たっては、HITAC 数値計算プログラムライブラリ-MSL II の ¥DLF 1 M (ガウス法) を用いた。

4 反転法の誤差要因

本研究で取り上げた反転法の誤差要因について検討する。まず第一に、測定値にも複素屈折率にも誤差を含まない場合の解の誤差、すなわち、数値計算上の誤差が増幅されて生じる誤差や粒径分布を折れ線近似することによる誤差の影響について述べ、第二に、測定誤差によって生じる解の誤差、第三に、複素屈折率の不確定性によって生じる誤差について検討する。

4.1 数値計算上の誤差及び粒径分布の折れ線近似によって生じる解の誤差

測定値や複素屈折率に誤差を含まない場合にも、解として得られる粒径分布に誤差が生じる可能性はある。それは数値計算上の誤差及び粒径分布を離散的な関数、例えば折れ線によって近似することによる誤差である。これらの分離して検討するためにまず、真の分布が、

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_0, \text{ or } x \geq x_9 \\ C(x-x_0)/(x_4-x_0), & x_0 < x \leq x_4 \\ C(x_9-x)/(x_9-x_5), & x_5 \leq x < x_9 \\ C, & x_4 < x < x_5 \end{cases} \quad (22)$$

で表される場合についてシミュレーションを行った。ここで、 $C=10^{-11}$ であり、 $x_i (i=0 \sim 9)$ はエアロゾルの半径 r_i の自然対数 $\ln r_i$ である。粒径分布は閉区間 $[r_0, r_9]$ で定義したが、 $r_0=0.03 \mu\text{m}$ 、 $r_9=3 \mu\text{m}$ とした。これは、積分方程式の核関数(図 2) が有為な値を持つ範囲として設定したが、これは Heintzenberg ら (1981) が ratio criterion によって決定した範囲とほぼ一致している。また、節点 $x_1 \sim x_8$ は $[x_0, x_9]$ を対数軸上で等間隔に分割する点である。

解は、一次の B-スプラインの一次結合で表される。与えた粒径分布(式(22))は一次の B-スプ

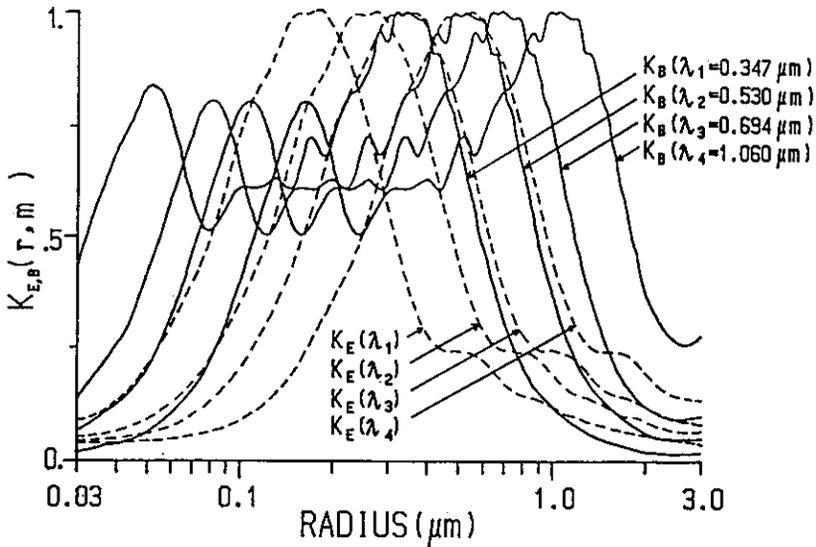


図 2 核関数の波長依存性
Fig. 2 Wavelength dependence of kernel function

インによって厳密に表すことが可能であるため、解の誤差は数値計算上の誤差によるものと考えることができる。 γ_0 は 10^{-5} から 10^3 まで変化させ、最も真の粒径分布に近い解を与えるものを採用した。すなわち、解 f_j と真の粒径分布 \hat{f}_j の間の自乗残差 Δf^2 ,

$$\Delta f^2 = \frac{\sum (f_j - \hat{f}_j)^2}{\sum \hat{f}_j^2} \quad (23)$$

が最小になるように、 γ を選んだ。計算は有効数字14ケタの倍精度で行った。

シミュレーションの結果を図3(a)に示した。与えた真の粒径分布を破線で、インバージョンで得られた結果を実線によって示したが、誤差が小さいために図の上では完全に一致した。このことは、数値計算上の誤差の影響が小さいことを示すと同時に、用いたインバージョン法が全体として妥当なものであることを示している。

次に、粒径分布を折れ線近似することによる誤差の影響を確かめるために、一次のB-スプラインでは表せない粒径分布に対してシミュレーションを行った。真の粒径分布として、個数密度表示で対数正規分布で表されるものを体積密度表示で表現したもの、

$$f(x) = \frac{4\pi r^3}{3} \frac{N}{\sigma(2\pi)^{\frac{3}{2}}} \exp \left\{ -\left(\ln \frac{r}{r_m} \right)^2 / (2\sigma^2) \right\} \quad (24)$$

を用いた。ここで、 $N = 5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, $\sigma = \log(1.6)$, $r_m = 0.08 \mu\text{m}$ とした。これは、成層圏エアロゾルの粒径分布(Hofmann & Rosen, 1983)を想定した粒径分布である。

シミュレーションの結果を図3(b)に示した。解として得られた粒径分布(実線)は一次のB-スプ

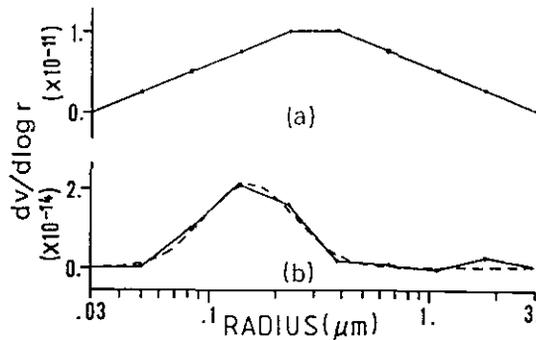


図 3 測定誤差のない場合のインバージョンの結果
 破線は真の粒径分布，実線はインバージョンの結果として得られた粒径分布。
 Fig. 3 Results of inversion without measurement errors

ラインによって近似できる範囲で，真の粒径分布を良く再現している。

これらの結果から，適当な γ を選ぶならば数値計算上の誤差や離散的な関数で粒径分布を近似することによる誤差は反転の結果に大きな影響を与えるものではなく，測定値や複素屈折率に誤差の無い場合には本研究において使用した反転法は良好な結果を与える。

4. 2 測定誤差によって生じる解の誤差

解に対する測定誤差の影響の大きさはラグランジュ未定数 γ によって支配されている。 γ が小さ過ぎる場合には，わずかの測定誤差が増幅されて，解が振動するような形の大きな誤差が生じる(Phillips, 1962)。 γ が大き過ぎる場合には，測定誤差による解の振動は押さえられるが，粒径分布にスムージングがかかるような形の系統的な誤差が生じる。したがって，測定誤差の影響を論ずるためには γ を変化させて解のばらつきと真の粒径分布からのずれの両者について検討する必要がある。これによって，真の粒径分布が既知でない場合の γ の選択方法を議論することが可能になる。

そこで，3節に示した方法により，測定誤差の期待値を1%，5%，10%に設定してランダムに誤差を発生させながら， γ_0 を 10^{-5} から 10^3 まで変化させて解 f_i 及び真の粒径分布からのずれ Δf_i (式(23))を求めた。 f_i はランダムな誤差に対応して得られるので，これらの平均値とばらつき σ_{f_i} を求めた。また同時に，式(12)の Q_1 の平均値 \bar{Q}_1 を計算した。真の粒径分布は式(22)で表される台形の分布とし，複素屈折率は $1.50-0.02i$ とした。

なお， γ の選択に当たって，King(1982)，Tanakaら(1982)，Müller & Quenzel(1985)らは粒径分布の要素 f_i がすべて正であるという拘束条件を課したが，本研究ではこの条件を用いなかった。その理由は，真の粒径分布が小さな値をとる粒径においては，測定誤差のために解が負の値をとる場合があることは不合理なことではないからである。逆に， γ を大きくすることによって粒径分布が負の値になることを抑制するならば，粒径分布全体に過大なスムージングをかけてしまう場合が

ある。

図4(a)に測定誤差が5%の場合の Δf 及び Q_1 の γ に対する(したがって、 γ_0 に対する)依存性を示した。 Q_1 は γ_0 の減少に伴って減少するが Δf は0.4に最小値を持つ。図中のAは Δf を最小にする γ_0 の平均値を示し、Bは Δf の平均値を最小にする γ_0 、Cは $Q_1=8$ に対応する γ_0 を示す。A、B、Cのそれぞれの γ_0 に対応する粒径分布を図4(b)に示す。真の粒径分布を破線で表し、解として得られる粒径分布のばらつきの範囲を実線で表した。この範囲は f の平均値と標準偏差によって求めた。A、B、Cを比較すると γ_0 が大きくなるにつれてばらつきは小さくなるが、解として得られる粒径分布が真の粒径分布とずれてくる。図5(a)、図6(a)はそれぞれ1%、10%の測定誤差の

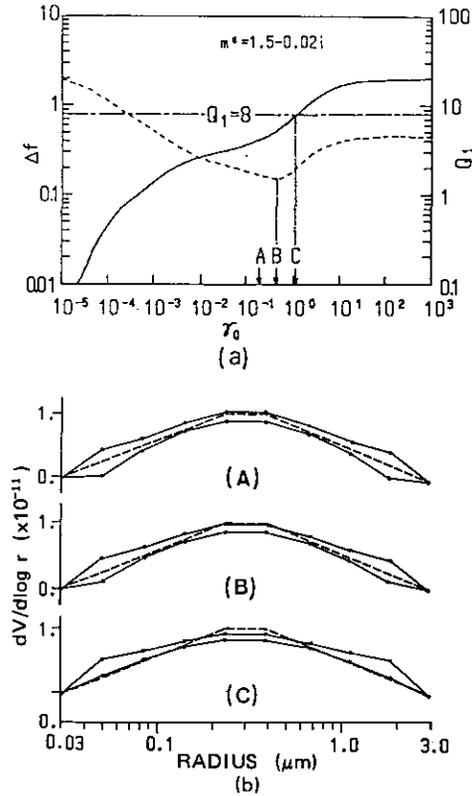


図 4 測定値の相対誤差が5%の場合のインバージョン結果の γ 依存性

(a)の実線は Q_1 を破線は解として得られる粒径分布の誤差 Δf を表す。

(b)の破線は真の粒径分布、実線は解のばらつきの範囲を示す。

Fig. 4 γ -dependence of the results of inversion with relative measurement errors of 5%

The solid line and dotted line in (a) express Q_1 and Δf of the size distribution as solutions, respectively. The dotted line and the solid line in (b) indicate the real size distribution and the range of scattering of solutions.

期待値の場合についての、 Δf 及び Q_1 の γ_0 に対する依存性である。全体の傾向は変わらないが、 Δf の最小値に対応する γ の値はそれぞれ 0.052, 0.85 に変わる。図 4 (b) で見られた傾向が図 5 (b) ではあまり現れないが、図 6 (b) ではよりはっきりと現れる。

以上の結果をまとめ表 1 に示した。粒径分布のピーク (この場合は $i=4$) における解の真の粒径分布からのずれ ($=d_i$) の平均値はいずれも負であり、解のばらつき σ_i^2 は測定誤差の 1~2 倍である。 γ_0 が A の位置にある場合には d_i のばらつきの方がその平均値より大きく、B の場合には同程度、C の場合には平均値の方が大きい。そして、 d_i の平均値とばらつきを加えた全体としての誤差は A の場合でも負の側に測定誤差の 2 倍程度である。したがって、この粒径分布の場合にはピー

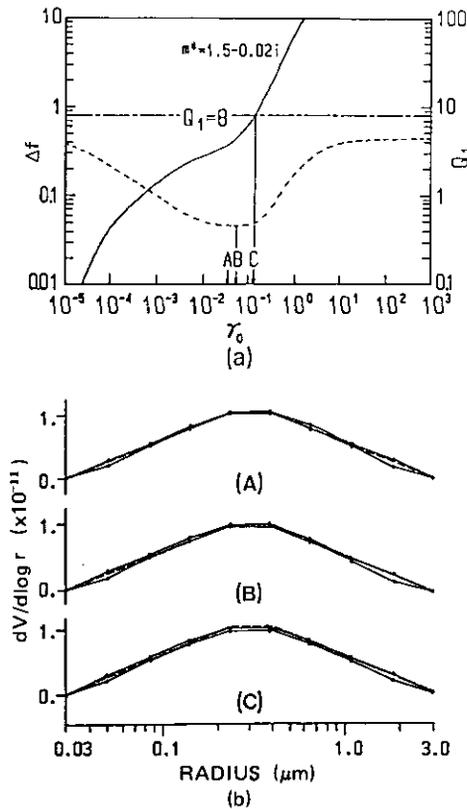


図 5 測定値の相対誤差が 1% の場合のインバージョン結果の γ 依存性

(a) の実線は Q_1 を破線は解として得られる粒径分布の誤差 Δf を表す。
 (b) の破線は真の粒径分布、実線は解のばらつきの範囲を示す。

Fig. 5 γ -dependence of the results of inversion with relative measurement errors of 1%

The solid line and dotted line in (a) express Q_1 and Δf of the size distributions as solutions, respectively. The dotted line and the solid in (b) indicate the real size distribution and the range of scattering of solutions.

クにおける d_i のばらつきが測定誤差の2倍程度になるまでさらに γ_0 を小さくしても全体としての誤差をあまり変えずにスムージングによる粒径分布の系統的な変形を小さくすることができると考えられる。

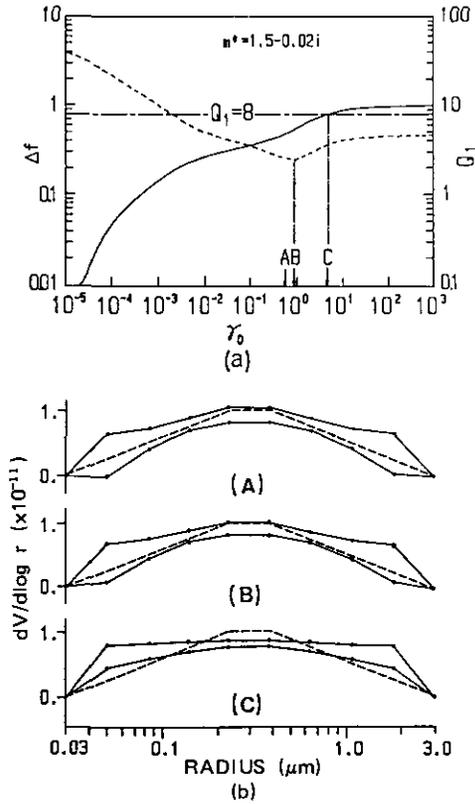


図 6 測定値の相対誤差が10%の場合のインバージョン結果の γ 依存性
 (a)の実線は Q_1 を破線は解として得られる粒径分布の誤差 Δf を表す。
 (b)の破線は真の粒径分布、実線は解のばらつきの範囲を示す。

Fig. 6 γ -dependence of the results of inversion with relative measurement errors of 10%

The solid line and dotted line in (a) express Q_1 and Δf of the size distributions as solutions, respectively. The dotted line and the solid line in (b) indicate the real size distribution and the range of scattering of solutions.

4.3 実測データの解析に際しての γ の選択

実測データから粒径分布を推定する場合には真の粒径分布と比較して γ を決定することはできない。しかし、これまで、台形の粒径分布を例として検討を進めてきたように、真の粒径分布を最も良く再現するような γ を与えた場合の測定誤差と解のばらつきの関係を実際の大气中に存在する

表 1 粒径分布の誤差の測定誤差及びラグランジュ未定定数に対する依存性
 Table 1 Dependence of the errors in size distributions on the measurement errors and Lagrange multipliers

γ	測定誤差	γ_0 の値	粒径分布のピークにおける誤差(%)
γ_A	1%	0.036	- 1.5 ± 1.8
	5%	0.192	- 3.3 ± 7.6
	10%	0.586	- 7.0 ± 12.1
γ_B	1%	0.052	- 1.9 ± 1.8
	5%	0.404	- 6.1 ± 6.7
	10%	0.850	- 9.2 ± 10.9
γ_C	1%	0.132	- 3.3 ± 1.6
	5%	1.023	-11.1 ± 5.2
	10%	4.534	-19.2 ± 5.6

様々なタイプの粒径分布について明らかにするならば、実測データの解析に際して妥当な γ を与えることは可能である。すなわち、

- 1) 典型的な粒径分布について前節と同様のシミュレーションを行い、最適な γ を用いた場合の測定値(消散係数及び体積消散係数)の誤差 σ_{ii} と解として得られる粒径分布のばらつき σ_{ij}^2 の関係を求めておく。
- 2) 実測データから反転法によって粒径分布を求める。このとき、 γ を変えながら解及びそのばらつき d_i を計算する。そして、1)で求めた σ_{ii} と σ_{ij}^2 の関係をを用いて最適の γ_0 を決定する。という方法である。

しかし、 σ_{ii} と σ_{ij}^2 の関係は粒径分布に依存すると考えられる。したがって、様々なタイプのエアロゾル(例えば、都市大気中のエアロゾル、光化学スモッグ中のエアロゾル、砂漠起源のエアロゾル、海洋性のエアロゾル、成層圏エアロゾル等)に典型的な粒径分布について σ_{ii} と σ_{ij}^2 の関係を求めておく必要がある。そして、実測データの解析に際して、観測対象となっているエアロゾルのタイプを、エアロゾル発生源の位置、風向・風速等の気象データ、測定高度等から推定することによって、実際の粒径分布に即した σ_{ii} と σ_{ij}^2 の関係をを用いる。ここで、多波長レーザーレーダーのデータを解析してエアロゾルのタイプを識別する方法(Sasano & Browell, 1986)を併用するならば、エアロゾルのタイプの推定をより確実なものにすることができる。

このような方法で粒径分布に即した γ を与えると共に、 γ の変化に対する粒径分布の変化の大きさを調べることで、解として得られた粒径分布が γ の選択に用いた粒径分布と一致するか否かを確認することが重要である。

4.4 複素屈折率の不確定性による、解として得られる粒径分布の誤差

エアロゾルの複素屈折率はエアロゾルの化学組成や大気の状態(気温、湿度、気圧等)に依存する。そして、これらを実測することが不可能な場合には、観測対象としているエアロゾルの起源、履歴や気象条件等から推定することになる。特に、エアロゾルの複素屈折率に対する湿度の影響については、ポーラーネフェロメータを用いて詳細な研究がなされている(Takamuraら, 1984)。

表2はポーラーネフェロメータを用いて仙台で行われた250例のエアロゾルの複素屈折率の実測結果を相対湿度の関数として示したものである。相対湿度が増加すると複素屈折率の実数部、虚数部共に減少するが、これはエアロゾル中の水($m=1.33-0.0i$)の割合が増加することとして合理的に説明できる。

表 2 仙台でポーラーネフェロメータを用いて測定されたエアロゾルの複素屈折率の相対湿度に対する依存性 (Takamura ら, 1984)

RH は相対湿度であり、 \overline{RH} は相対湿度の各グループ内での平均値、「cases」は測定データ数、 n 及び k はそれぞれ複素屈折率の実数部と虚数部である。

Table 2 The dependence of the complex refractive indices on the relative humidities measured using polar nephelometer in Sendai.

RH and \overline{RH} indicate the relative humidities and their mean values for each humidity groups, "cases" shows the number of measurements, n and k the real and imaginary parts of the refractive and indices of aerosols.

RH	\overline{RH}	cases	n	k
0 - 0.4	0.32	29	1.578	0.032
0.4 - 0.5	0.45	36	1.540	0.025
0.5 - 0.6	0.54	37	1.527	0.020
0.6 - 0.7	0.65	44	1.514	0.018
0.7 - 0.8	0.74	36	1.493	0.012
0.8 - 0.9	0.85	41	1.471	0.010
0.9 - 1.0	0.93	27	1.453	0.0091

上に述べた観測結果に見られる複素屈折率の値、変動幅を念頭において、その不確定性によって生じる(解として得られる)粒径分布の誤差を評価した。図7は複素屈折率の真の値 $1.50-0.02i$ に対して、その実数部を ± 0.05 、虚数部を ± 0.01 変化させ、解として得られる粒径分布に対する影響を示したものである。 $m=1.45-0.01i$ 及び $m=1.55-0.03i$ の場合には解は真の粒径分布を良く再現しているかが、 $m=1.45-0.03i$ 及び $m=1.55-0.01i$ の場合には再現性が非常に悪い。その他の場合は、これらの中間程度の再現性を示す。すなわち、複素屈折率の実数部と虚数部が同一方向に増減するような誤差の場合には解として得られる粒径分布に大きな誤差は生じない。複素屈折率の実数部と虚数部の誤差が逆方向にずれる場合には粒径分布の誤差は大きい。したがって、解として得られる粒径分布は、相対湿度の増減または相対湿度の実測値がないことによる複素屈折率の不

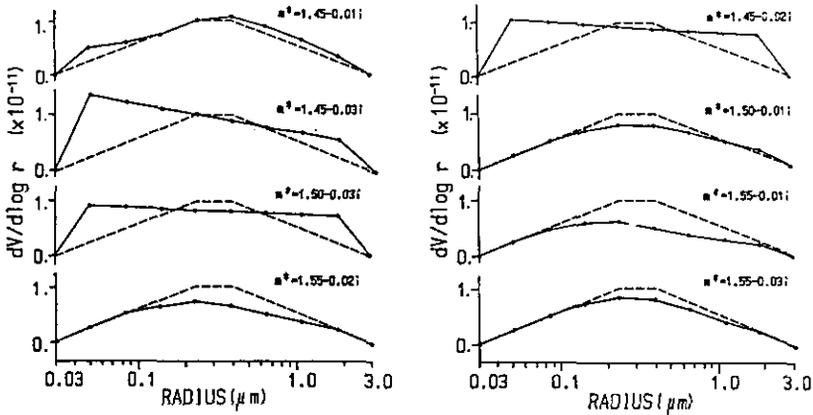


図 7 エアロゾル複素屈折率の変化による解の変化
 破線は真の粒径分布。実線は解として得られた粒径分布。
 Fig. 7 Changes of solutions with the complex refractive indices of aerosols
 Dotted lines indicate real size distributions and solid lines are those given as solutions.

確定性に対してそれほど敏感ではない。

なお、上に述べた複素屈折率の誤差の影響に関する傾向は、核関数の複素屈折率依存性によって説明できる。図 8 (a) に示すように消散係数の核関数は、ピークで規格化するとあまり複素屈折率に依存しない。これに対して体積後方散乱係数の核関数は図 8 (b) に示すように複素屈折率によって大きく変化するが、実数部と虚数部が同時に増減するような変化の場合には核関数の変化は小さい。このように、解として得られる粒径分布の誤差の複素屈折率の誤差に対する依存性の傾向は、主に体積後方散乱係数の複素屈折率依存性に起因するものである。

エアロゾルの組成が湿度ではなく発生源によって通常値から大きくずれる場合には、解として得られる粒径分布に大きな誤差が生じる可能性がある。しかし、4.3でも述べたように、観測対象としている気塊の物理状態や含まれるエアロゾルのタイプを気象観測、化学分析や多波長レーザーレーダーを用いて推定することによって、エアロゾルの複素屈折率の不確定性、したがって、解として得られる粒径分布の誤差を小さくすることが可能である。

5 まとめ

本研究では多波長レーザーレーダーによって得られる消散係数と体積後方散乱係数に反転法を適用しエアロゾル粒径分布を推定する際の、数値計算上の誤差及び粒径分布を折れ線近似することによる誤差、測定誤差から生じる誤差、エアロゾルの複素屈折率の不確定性によってもたらされる誤差について検討した。その結果、

1. 数値計算上の誤差や一次の B-スプライン関数による粒径分布の近似に伴う誤差は反転結果に大きな影響を与えない。

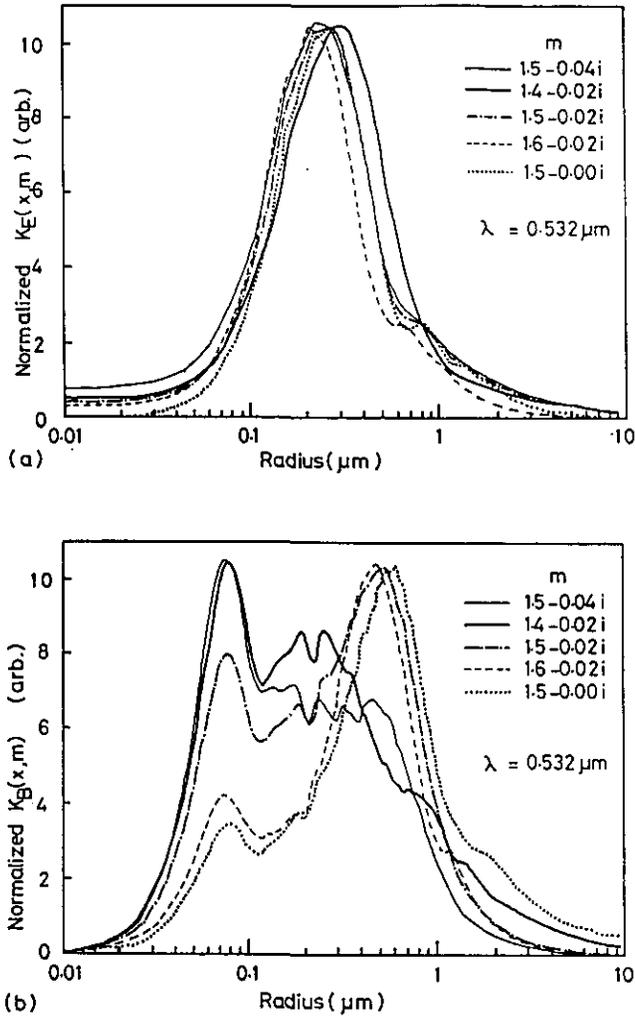


図 8 エアロゾルの複素屈折率の変化による核関数の変化
(a)消散係数の場合、(b)体積後方散乱係数の場合。

Fig. 8 Changes of the kernel functions with the complex refractive indices for extinction (a) and backscattering (b)

- 測定誤差から生じる粒径分布の誤差は、本研究において例として取り上げた粒径分布では、粒径分布のピークにおいて測定誤差のほぼ2倍程度である。
- エアロゾルの複素屈折率の不確定性は解として得られる粒径分布に誤差をもたらすが、解の誤差の大きさは複素平面上での真の複素屈折率からのずれの方向によって異なる。
- 2, 3の誤差を小さくするためには、粒径分布や複素屈折率と気象条件の関係についての観測や理論的検討、多波長レーザーレーダーによるエアロゾルタイプの推定が有効である。

ことを明らかにした。

今後、様々な粒径分布について同様のシミュレーションを行い λ の選択をより一意的なものにすると共に、エアロゾルの複素屈折率を容易に求める手法、消散係数や体積後方散乱係数をより精度よく求める手法についての研究が重要である。

謝 辞

本研究をはじめに当たって、筑波大の宮本定明講師から多くの重要なコメントをいただいた。また、竹内延夫室長をはじめとする国立公害研究所大気物理研究室の皆様には有益な討論をしていただいた。ここに、深く感謝する次第である。

引用文献

- Fernald, F.G. (1984) : Analysis of atmospheric lidar observation : Some comments. *Appl. Opt.*, **23**, 652-653.
- Heintzenberg, J., H. Müller, H. Quenzel and E. Thomalla (1981) : Information content of optical data with respect to aerosol properties : numerical studies with a randomized minimization-search-technique inversion algorithm. *Appl. Opt.*, **20**, 1308-1315.
- Hofmann, D. J. and J. M. Rosen (1983) : Sulfric acid droplet formation and growth in the stratosphere after the 1982 eruption of El Chichon. *Science*, **222**, 325-327.
- 市田浩三・吉本富士市(1979) : スプライン関数とその応用. 教育出版, p.20.
- King, M. D. (1982) : Sensitivity of constrained linear inversions to the selection of the Lagrange Multiplier. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1356-1369.
- Klett, J. D. (1981) : Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Appl. Opt.*, **20**, 211-220.
- Klett, J. D. (1985) : Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Appl. Opt.*, **24**, 1638-1643.
- Müller, H. and H. Quenzel (1985) : Information content of multispectral lidar measurements with respect to the aerosol size distribution. *Appl. Opt.*, **24**, 648-654.
- 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(1985) : 大形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. 国立公害研究所研究報告, 第77号, 75-98.
- Phillips, D. L. (1962) : A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind. *J. Assoc. Comput. Mach.*, **9**, 84-97.
- Salemink, H., P. Schotanus and J. Bergwerff (1984) : Atmospheric parameters at 532 and 1064 nm : quantitative vertical profiles, humidity and wavelength. 12th International Laser Radar Conference, Aix-en-Provence, France, 59-60.
- 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.
- Sasano, Y., E.V. Browell and S. Ismail (1985) : Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution. *Appl. Opt.*, **24**, 3929-3932.

- Sasano, Y. and E.V. Browell (1986) : Wavelength dependence of aerosol backscatter coefficients obtained by multiple wavelength lidar measurements. 13th International Laser Radar Conference, Tronto, Canada, 28-30.
- Shaw, G.E. (1979) : Inversion of optical scattering and spectral extinction measurements to recover aerosol size spectra. *Appl. Opt.*, **18**, 988-993.
- 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 technique. *J. Appl. Meteorol.*, **19**, 426-438.
- 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. Jpn.*, **62**, 573-582.
- Tanaka, M., T. Nakajima and T. Takamura (1982) : Simultaneous determination of complex refractive index and size distribution of airborne and water-suspended particles from light scattering measurements. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 1259-1272.
- Tikhonov, A. N. (1963) : On the solution of incorrectly stated problems and a method of regularization. *Dokl. Acad. Nauk SSSR*. **151**, 501-504.
- Twomey, S. (1963) : On the numerical solution of Fredholm integral equation of the first kind by the inversion of the linear system produced by quadrature. *J. Assoc. Comput. Mach.*, **10**, 97-101.
- Twomey, S. (1977) : Introduction to the mathematics of inversion in remote sensing and indirect measurements. Elsevier, 243p.
- Yamamoto, G. and M. Tanaka (1969) : Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements. *Appl. Opt.*, **8**, 447-453.

II-6

大気汚染成分の鉛直分布

Vertical Distribution of Atmospheric Pollutants

功刀正行¹・柴田恵子¹・土井妙子²・溝口次夫¹

Masayuki KUNUGI¹, Keiko SHIBATA¹, Taeko DOI² and Tsuguo MIZOGUCHI¹

要旨

低層大気中のエアロゾル及びガス状汚染物質の鉛直分布を気象研究所の気象観測用鉄塔を用いて測定した。

エアロゾルの測定及び捕集は、デジタル粉じん計、ローボリュームエアサンプラー、ハイボリュームエアサンプラー、及びカスケードインパクターを用いた。測定は、地上付近としては鉄塔わきの地表に各機器を設置し、鉛直方向には鉄塔に設けられた10か所のステージの内、62m, 125m, 175mの3か所、計四つの高度で行った。ガス状大気汚染成分としては、オゾンと窒素酸化物を、エアロゾルと同様鉄塔わきの地表、及び91m, 195mで測定した。測定期間は、季節を変えて各々2週間前後である。

エアロゾルの成分分析は、蛍光X線分析、原子吸光、放射化分析及びイオンクロマトグラフィーを用いた。そのほか、電子顕微鏡によるエアロゾルの形態観測、個々のエアロゾルの元素分析をSEM-EDXを用いて行った。

エアロゾル濃度、成分濃度、オゾン及び窒素酸化物濃度の鉛直分布は、季節によりそのパターンが異なり、主として大気の安定度に依存することが明らかになった。

エアロゾル中の成分の鉛直分布は、成分によってそのパターン及び季節変化が異なり、その主原因は発生源の種類並びに発生源の位置によることが明らかになった。

Abstract

The chemical compounds in the suspended particles and gases were continuously determined at the various heights of the Meteorological Observation Tower of Meteorological Research Institute in various seasons. The concentration of the suspended particles near the ground was found to be influenced by the atmospheric stability, which imposed major effect on the seasonal variation of the concentration of the suspended particles. It was found to be

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. 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.

useful to know the vertical distribution of the chemical compounds of the suspended particles for elucidation of sources of them. Discussions were done on their sources and the meteorological conditions to explain the typical distributions.

1 はじめに

低層大気のエアロゾル及びガス状汚染成分の鉛直分布測定の実例は少ない。

Lioy(1980)らは、ニューヨーク大学メディカルセンターの1階と屋上において10年以上ハイボリュームエアースンプラーにより観測を続け、粉じん量、Pb、V及びMn濃度が高度により差があり、その原因は主として発生源の高度によるとしている。

Okita(1980)は、1978年夏にヘリコプターによる関東地方上空の調査を行い、 NH_4^+ 及び NO_3^- は主として地上の発生源に由来し、 SO_4^{2-} は遠隔地からの輸送によると報告している。

我々は、気象研究所の気象観測用鉄塔を用い、1982年より季節を変えて高度別に2週間程度のエアロゾルの捕集、測定を行った。本報告では、エアロゾル濃度の日変化、季節変化とその解析、エアロゾル中の成分分析結果と季節変動、ガス状汚染物質の日変化と季節変化について述べる。

2 測定方法

2.1 エアロゾル及びその成分分析法

エアロゾル濃度の測定及び成分分析法は、前回の報告(溝口ら、1985)及びKunugiら(1987)と同一であるので簡単に述べる。

エアロゾル濃度の日変化の測定は、柴田科学製デジタル粉じん計AP型を、エアロゾルの捕集にはローボリュームエアースンプラー、ハイボリュームエアースンプラー及びカスケードインパクターを用いた。捕集に使用したフィルター等の詳細は、前報告書(同上)を参照されたい。

2.2 オゾンの測定

オゾンの測定は、紫外線吸収法によるオゾン計ダッシー1003AH型を用い、地表、91m、195m(1984年の測定は、地表、87m、175m)に設置して行った。オゾン計は、測定の前後に気相滴定法を用いて校正した。

3 測定結果

3.1 エアロゾル濃度の鉛直分布

ハイボリュームエアースンプラー(10 μ カッター付)による捕集は、これらの観測期間以外に地表及び175mで通年測定を行っている。図1に、このハイボリュームによる地上及び175mにおけるエアロゾル濃度の平均的な傾向を示した。地上付近のエアロゾル濃度は、冬季に大きな極大を持ち、春先にも極大が現れ、梅雨の時期に極小となる。この傾向は、観測を始めて数年間変わっておらず、

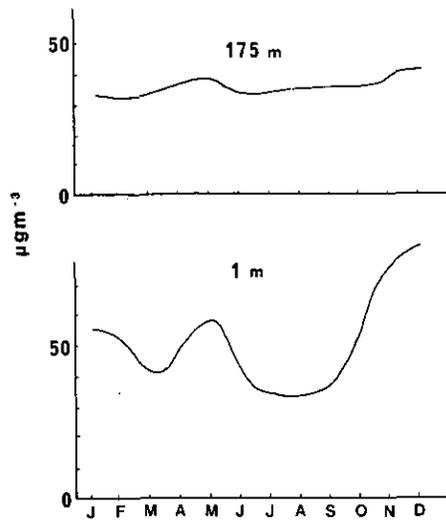


図 1 ハイボリュームサンプラーによる地上 1 m 及び 175 m でのエアロゾル (<math><10\ \mu\text{m}</math>) の年変化

Fig. 1 General trends of the concentration of suspended particles measured by high volume air sampler at 175 and 1 m (<math><10\ \mu\text{m}</math>)

この変化の主な原因は、気象要素によることが示唆される。一方、大変興味深いことは、175 m のエアロゾル濃度の変動が比較的少なく春先と冬季に小さな極大を持つことである。春先の極大は、土壌の舞上りと、この時期しばしば観測される大陸からの黄砂によるものと思われる。

デジタル粉じん計によるエアロゾルの鉛直分布と日変動の様子を、図 2 ~ 4 に等濃度線図で示した。同図には、合わせて等温線図を示した。図 2 は、1983 年 12 月の観測結果である。等温線図中に、ハッチを付けた部分は気温の逆転が起きていることを示す。地上付近の高濃度の出現と、接地逆転はよい相関を示している。しかし、接地逆転が起きているでもエアロゾルの高濃度が出現しないときもある。図 3 は、1984 年 5 月 30 日から 6 月 11 日までの観測結果である。しばしば出現している上空の高濃度は、低い雨雲の影響である。この時期は、鉛直方向の分布はほぼ一様である。6 月 6 日以降の低濃度時は晴天と強い風で、この年初めて東京地方に光化学スモッグ注意報が出された。図 4 は、1984 年 10 月の観測結果である。図 2 と同様、地上付近の高濃度と接地逆転にはよい相関がみられる。また地上の高濃度はほぼ 1 日おきに出現している。

3. 2 エアロゾル成分分析結果

エアロゾル成分の鉛直分布を図 5 に示す。エアロゾル濃度の鉛直分布は、冬季に地上付近が高く、高度が増加するごとにエアロゾル濃度が低くなる。しかし、エアロゾル中の成分の分布は図に示すように様々である。塩素は、冬季に地上付近の濃度が極めて高く、高度の増加と共に急激に減少す

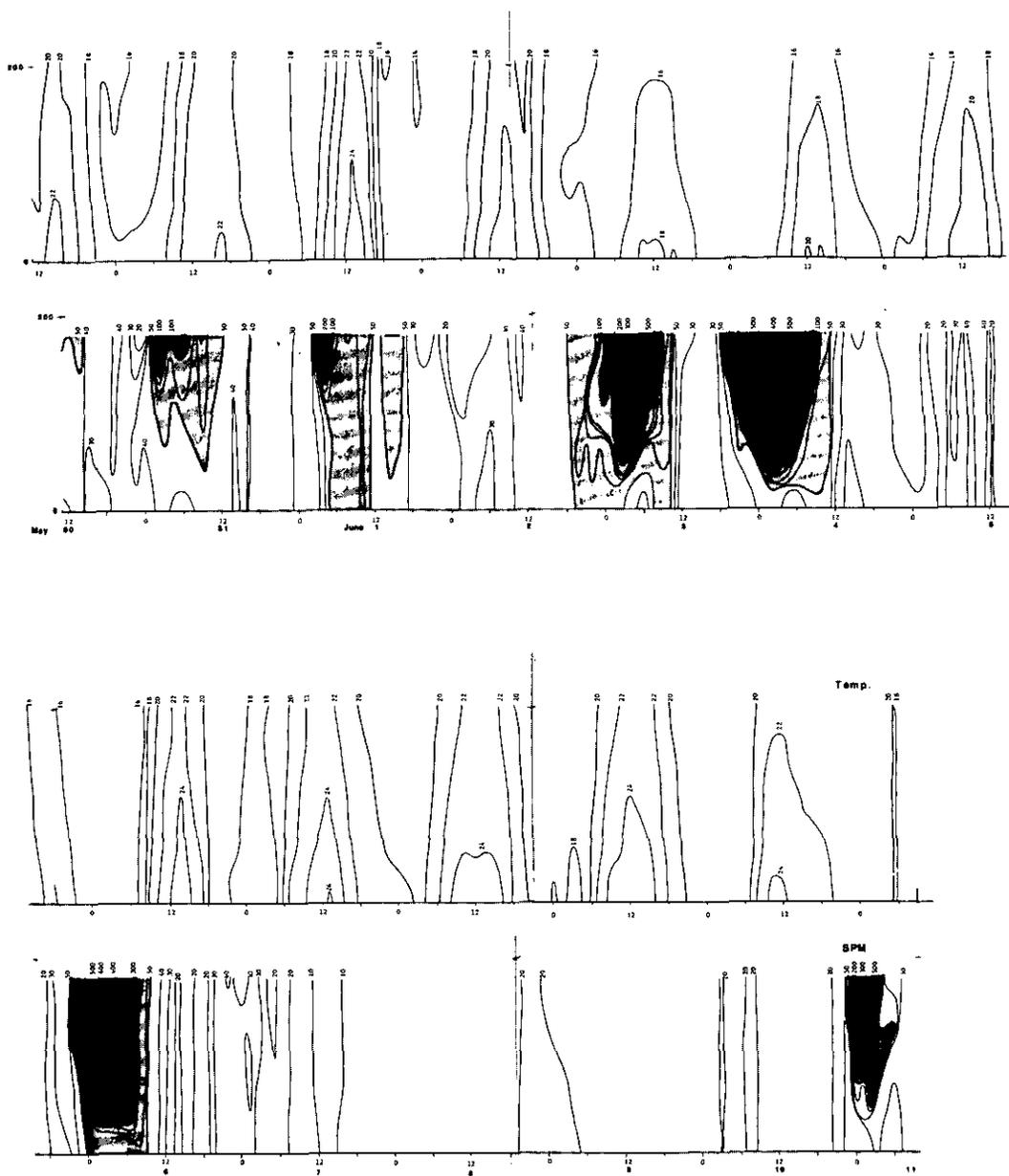


図 3 低層大気中のエアロゾルの等濃度線図と等温線図(1984年5月~6月)
 Fig. 3 The temperature and the concentration of suspended particles shown by isopleths during May 30— June, 11, 1984

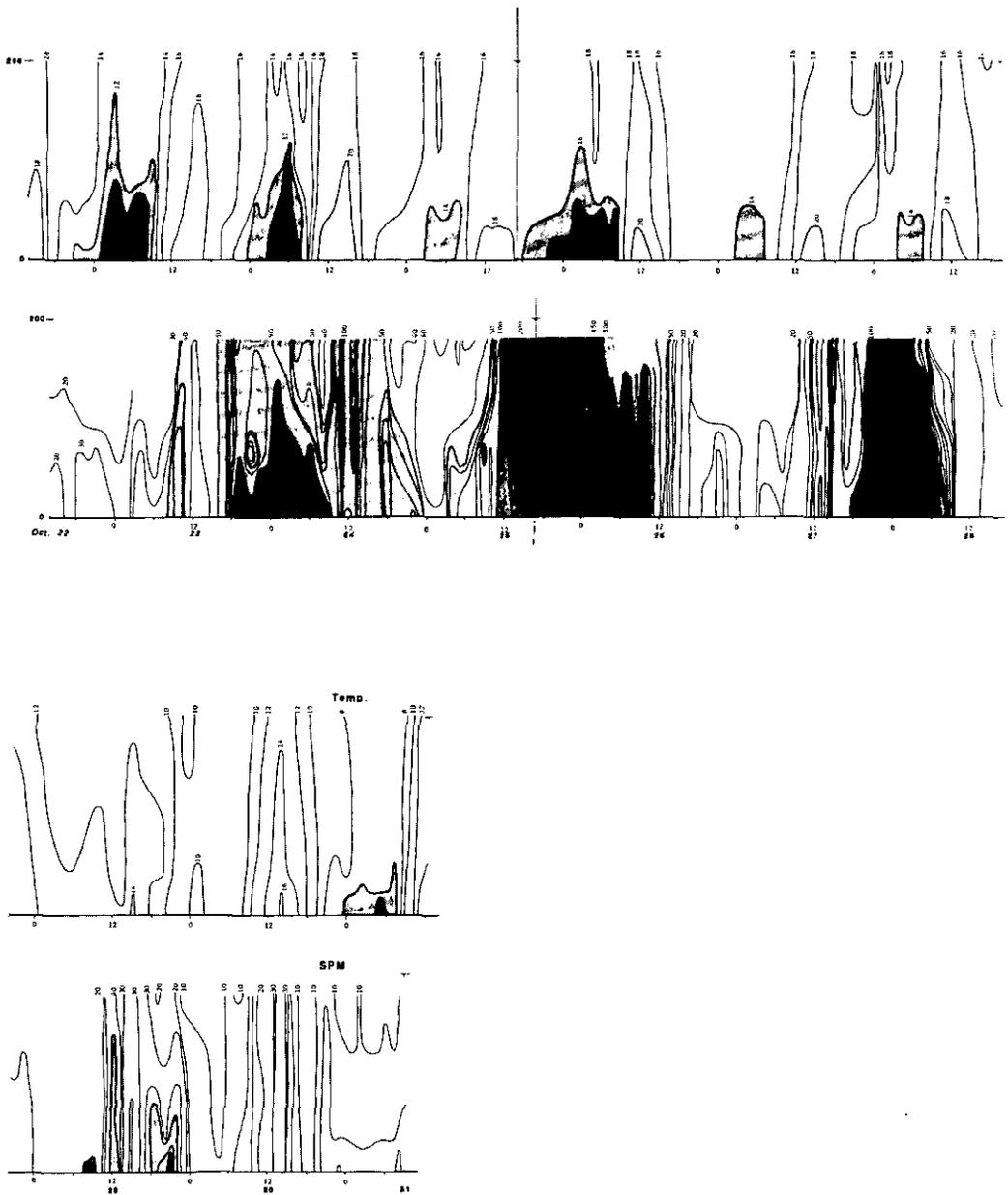


図 4 低層大気中のエアロゾル中の等濃度線図と等温線図(1984年10月)
Fig. 4 The temperature and the concentration of suspended particles shown by isopleths during October 22-31, 1984

る。一方、ナトリウムはほぼ一様の分布をしている。1984年の6月の測定結果では、冬季ほどは各成分の鉛直分布は観測されないが、やはり成分により鉛直分布パターンに差がみられる。

1984年10月の測定結果では、両者の中間的な分布を示している。特徴的なのは、塩素、硝酸イオン及び硫酸イオンでその変化は著しい。

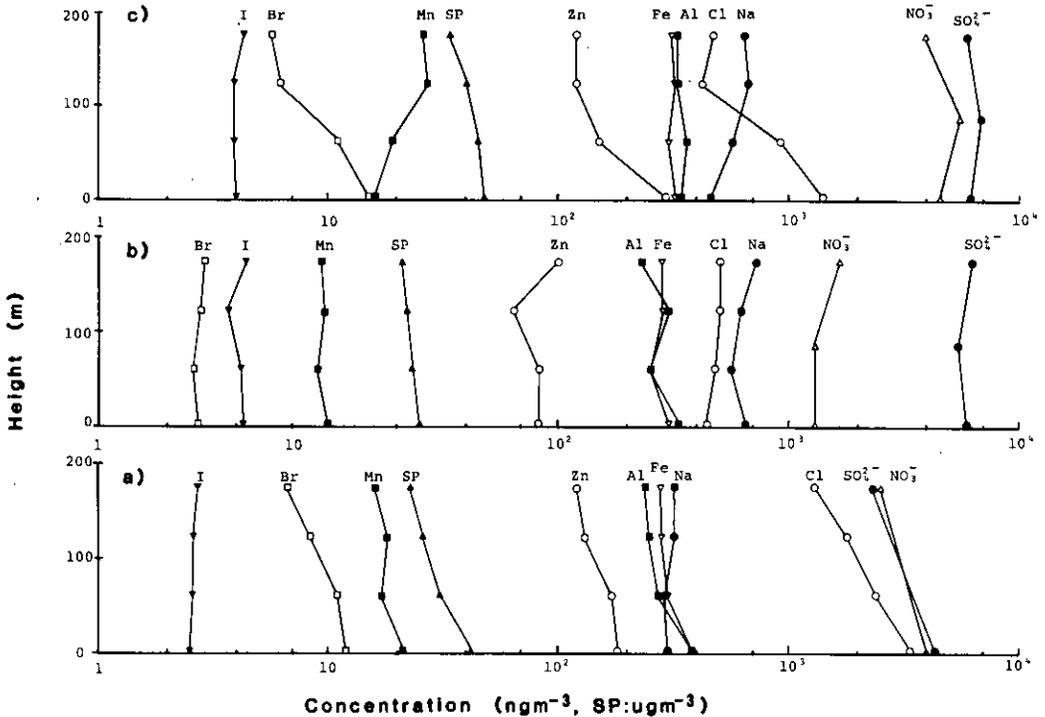


図 5 エアロゾル(SP μgm^{-3})及びエアロゾル中の各成分(ngm^{-3})の鉛直分布
a)1983年12月, b)1984年5月~6月, c)1984年10月

Fig. 5 Vertical distributions of suspended particles (SP μgm^{-3}) and the chemical components (ngm^{-3})
a) December 13-26, 1983, b) May 30-June 11, 1984, c) October 22-31, 1984.

3.3 オゾンの測定結果

図6, 7にオゾンの測定結果を, 図8, 9に地表での紫外線量を示す。図6は, 1984年10月の測定結果である。地表付近のオゾンの濃度変化は, 明確な日変化を示しており, 日中最大となり夜間には減少しほぼ零近くまで低下する。図4のエアロゾル濃度と逆相関があり, エアロゾル濃度が高くなるときはオゾンはほぼ零となる。また紫外線量とよい相関を示している。地上87mのオゾンは地表と同様に日変化を示すが夜間の減少はある濃度レベルまでであり, 地表付近のように零にはならない。175mの高度でのオゾン濃度の日変化は, 不規則であり, 日中にピークがあるが他の高度

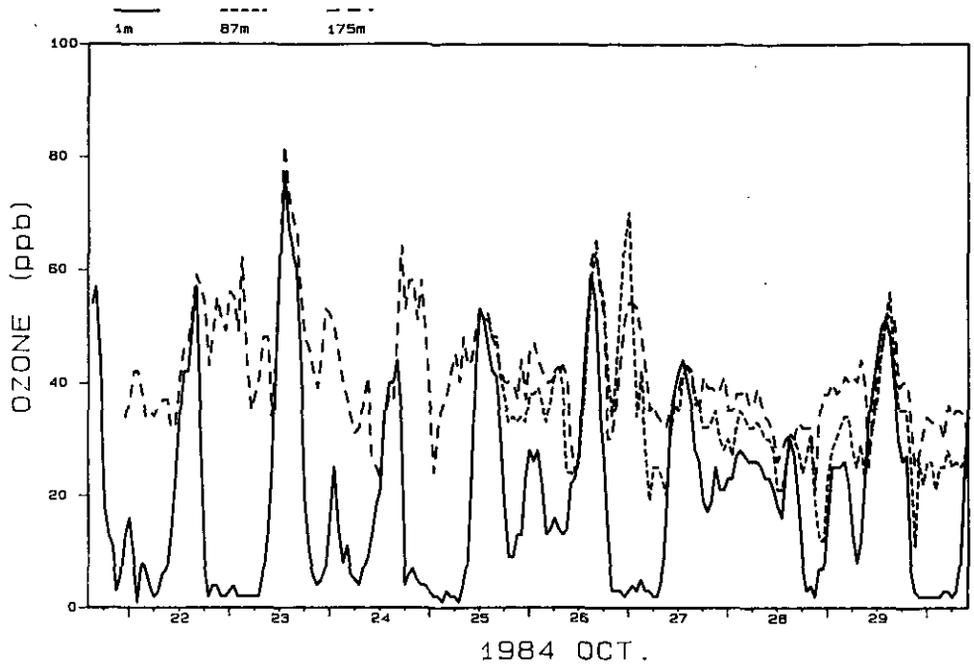


図 6 オゾンの日変化(1984年10月)
Fig. 6 Diurnal variation of ozone during October 22-31, 1984

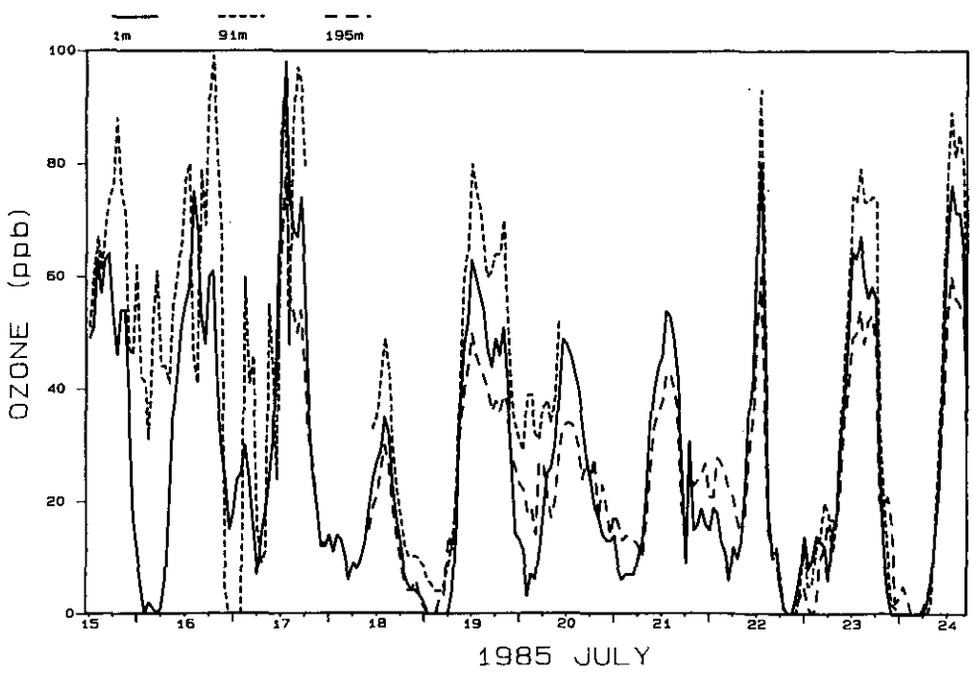


図 7 オゾンの日変化(1985年7月)
Fig. 7 Diurnal variation of ozone during July 15-24, 1985

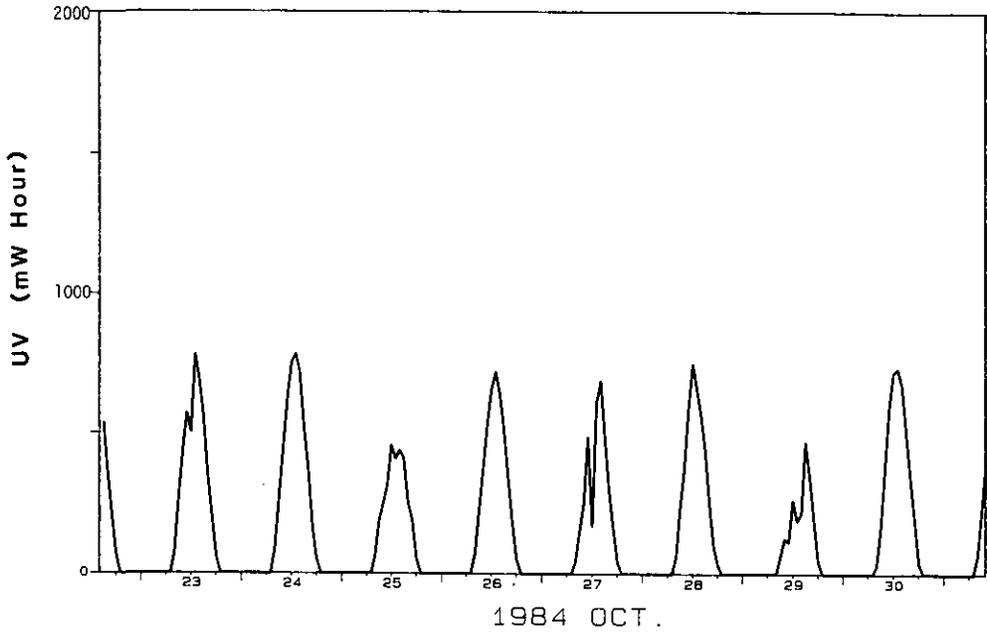


図 8 地表における紫外線量の日変化(1984年10月)
Fig. 8 Diurnal variation of ultraviolet during October 22-31, 1984

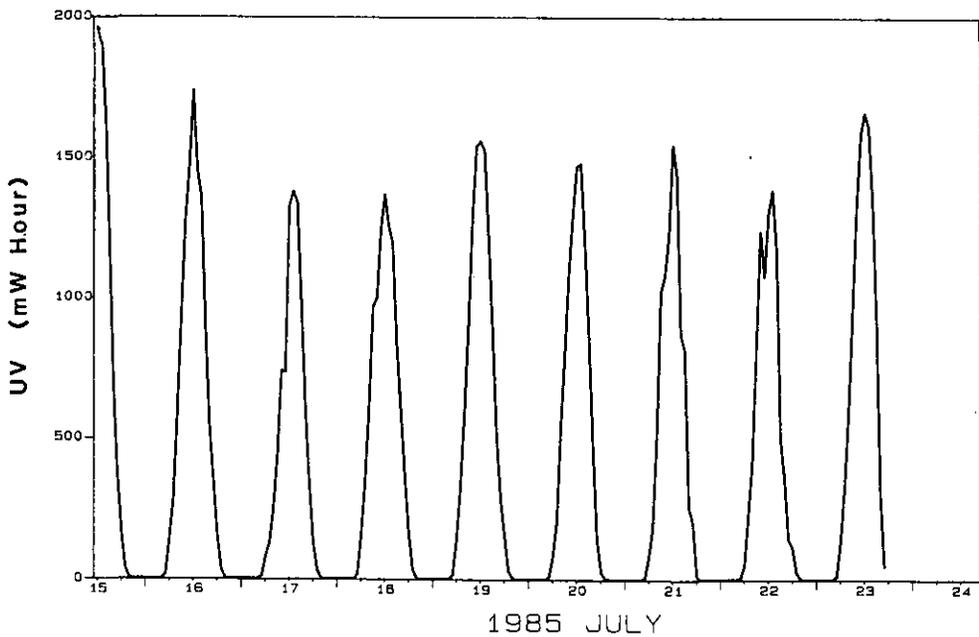


図 9 地表における紫外線量の日変化(1985年7月)
Fig. 9 Diurnal variation of ultraviolet during July 15-24, 1985

のように明確ではない。

一方、図7は1985年7月の測定結果である。測定は、地表付近、91m、195mにおいて行ったが、各高度におけるオゾンの濃度変化に特徴的な相違はみられず、ほぼ同様な日変化を示している。

4 考察

4.1 エアロゾル濃度

測定結果で述べたように、エアロゾル濃度の季節変動は高度によって異なる。言い替えば、エアロゾル濃度の鉛直分布は季節によって異なるパターンを示す。冬季は、接地逆転の影響が大きく、地表付近で夜間極めて高濃度が出現することがしばしば観測される。高濃度の範囲は接地逆転の強さと関係があり、図4に示すように初冬では比較的高い位置までその効果が及んでいる。図10に、各測定期間のエアロゾル濃度の対数正規確率分布図を示した。同図からもその様子がよく分かる。また、接地逆転の高さは、100m から50m 付近であり、その高さはしばしば20m 程度の幅で揺らい

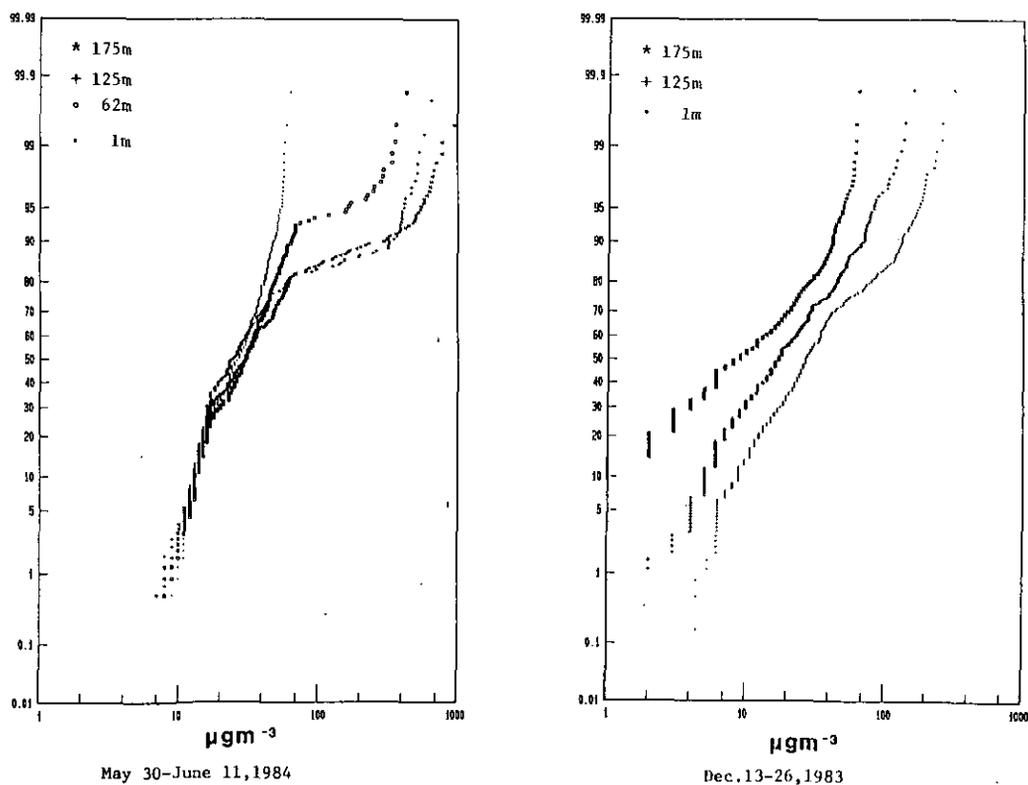


図 10 エアロゾル濃度の対数正規確率分布図

Fig.10 Lognormal plot of suspended particles

であり、それに応じてエアロゾル濃度もその付近でかなり変動がある。更に、接地逆転の解消は非常に短時間で起き、同時にエアロゾル濃度も極めて急速に低下する。

しかし、逆転が起きていても、エアロゾル濃度が高くないことがしばしばある。気象データとの関連性を調べたが明確な原因は今のところはっきりしない。

4.2 エアロゾル成分

図5に示したように、エアロゾル中の成分はその鉛直分布パターンによって幾つかのグループに分けることができる。

最も典型的なのは塩素であり、冬季の地上付近で極めて高く、高度が増加するにつれて塩素濃度は急激に減少する。夏季やその他の季節では、濃度もそれほど高くなくほぼ均一な鉛直分布をする。臭素もほぼ同様な傾向が観測される。

亜鉛、鉛、バナジウム、カリウム、カルシウム、アルミニウム、鉄、スカンジウム等は、塩素や臭素程顕著ではないが同様に冬の地上付近で高く、高度の増加と共に濃度は減少傾向にある。硫酸イオン及び硝酸イオンも冬高く、夏低くなるが鉛直分布パターンは他の成分ほど変化はみられない。

一方、ナトリウムはその鉛直分布は一様であり、年間を通じて分布のパターンはあまり変化しない。濃度は、夏季に高く、冬季低くなる傾向がある。

マグネシウム、クロム、マンガン等は類似の分布を示すが、測定データのばらつきが大きく、ここでは議論の対照としない。

これらのエアロゾル中の成分の分布の違いは、発生源の種類、発生源の場所及び輸送過程、気象要素などが複雑に関与しているためと思われる。

各元素の発生源の寄与を調べるために、CMB (Chemical Mass Balance) 法を用いて各発生源の寄与率を推定した。発生源として、土壌(サンプリング地点近傍の土壌、遠隔地から輸送されてくるもの、特に大陸からの黄砂を含む)、海塩、鉄鋼業、焼却場、石油燃焼、自動車(ガソリン使用車)の6種とした。発生源データは、土壌としては公害研周辺の土壌データ、その他のデータは真室ら(1979a, b, 1980)の値を用いた。指標元素は、Na, Al, K, Sc, V, Mn, Pb, Ca, Fe, Zn 及び Br を用い、パーソナルコンピュータを用いて計算した。結果を表1に示す。

表1からも分かるように、CMB法で求めた各発生源からの寄与の総和は、20%に満たない。この原因はいくつか考えられる。一つは、サンプリング地点の近傍には、大きな発生源が存在しないこと。使用した発生源のデータは、例えばスタックでのサンプリングによって得られたものなどであり、長距離の輸送過程でかなり組成などが変化している可能性がある。エアロゾル中の多くの部分を占める炭素(元素状炭素、有機炭素)、冬季かなり増加する塩素、そのほか硝酸塩や硫酸塩等を計算の対象としていない点、自動車の中に負荷の大きなディーゼル車を含まない等が上げられる。

表 1 CBM 法により求めた、各測定期間、各高度における全エアロゾル中に占める各発生源の寄与率(%)

Table 1 Percentage contribution to total suspended particles from each main component calculated with CMB method

Sampling Period	Stage	Soil	Marine aerosols	Iron-and steel ind.	Refuse incineration	Fuel oil combustion	Gssoline automobile	
Dec.13 }	1m	9.6	0.5	1.7	3.4	1.6	1.6	
	62m	10.3	1.1	2.0	3.6	2.3	1.6	
	26, 1983	125m	8.3	1.7	2.5	4.6	2.0	0.4
		175m	13.2	2.3	2.6	3.0	2.1	1.9
May 30 }	1m	15.3	7.1	1.1	1.0	1.8	0.5	
	62m	10.3	8.3	1.0	2.3	1.4	0.0	
June 11, 1984	125m	16.8	7.9	1.3	1.5	1.7	0.3	
	175m	10.7	10.2	1.4	1.3	1.6	0.3	
		10.7	10.2	1.4	1.3	1.6	0.3	
Oct.22 }	1m	10.6	1.5	1.2	3.6	1.1	0.4	
	62m	12.0	1.9	1.5	4.2	1.4	0.4	
	31, 1984	125m	12.0	4.3	2.9	2.6	1.5	0.8
		175m	11.3	4.7	2.9	2.1	1.4	0.9

4.3 エアロゾル中の塩素の鉛直分布

エアロゾル中の塩素は、前述したように冬季地上付近で極めて高濃度になり、その濃度は高度が増加するにつれて急速に減少する。また、地上付近でのエアロゾルの高濃度時と塩素の高濃度時はよく一致する。表2にCMB法で求めた各発生源の寄与率から計算した塩素の負荷を示した。この結果では、地上付近では、廃棄物焼却炉の寄与が約12%と最も大きく、次に海塩で約3%である。6種の発生源の寄与をすべて合計しても16%にしかならず、ほとんどの塩素の起源が不明である。高度が増すにつれて、廃棄物焼却炉の負荷が低下し、海塩の寄与が増加する。175mでは、海塩の寄与が約22%となり、廃棄物焼却炉の寄与は約14%となり、総合計で38%となるがまだ多くの塩素の起源が説明できない。廃棄物焼却炉からの塩素は、総塩素量に比べ高さによる濃度の減少率が緩やかである。これは、廃棄物焼却炉の発生源としての高度は数10mあり、逆転層の高さとほぼ同じかあるいは高いことが原因と思われる。一方、総塩素量から各発生源の寄与を引いた残分は、高度と共に極めて急激に減少している。このことから、残分の塩素の発生源は極めて地上に近い位置にあると推定される。

図11に、ハイボリュームアンダーセンサンプラーによって捕集されたエアロゾル中の塩素の微粒子側に存在するものと粗大粒子側に存在するものの総塩素に対する割合を示した。冬季の塩素は、微粒子側にその50%程度存在する。これによって、冬季の塩素の多くが燃焼などの人為起源と推定される。筑波地域では、冬季多くの畑で枯草などの廃棄物を燃やしており、この廃棄物の中にはビニールハウスなどで使用される塩化ビニールが多く混じっているのがみられる。また、ごみの焼却と言うのではなく、霜が降りるのを防ぐために燃やしている場合が多く、この場合には夜間や早朝に行っているため、逆転層の影響もあり地上付近が極めて高濃度になるものと推定される。

夏季は、全く様相が異なり、CMB法で計算された寄与率に基づき各発生源からの塩素の負荷を

表 2 CMB法により求めた各発生源からの塩素寄与(ngm^{-3})

Table 2 Mass contribution (ngm^{-3}) of chloride from each source, and observation height and period

Sampling Period	Stage	Soil	Contributions from components (ngm^{-3})					Total conc. (ngm^{-3})	
			Marine aerosols	Iron-and steel ind.	Refuse incineration	Fuel oil combustion	Gssoline automobile	Predicted	Observed
Dec. 12	1m	0	113	25	407	1	2	548	3400
	62m	0	181	21	357	1	1	561	2400
	26.	125m	0	251	23	290	1	1	566
1983	175m	0	289	20	186	0	1	496	1300
May 30	1m	0	977	9	68	0	0	1054	440
	62m	0	1051	8	143	0	0	1202	480
June 11,	125m	0	957	10	89	0	0	1056	500
	1984	175m	0	1179	10	74	0	0	1263
Oct. 22	1m	0	350	18	421	0	0	789	1400
	62m	0	463	23	504	0	0	990	923
	31.	125m	0	844	35	254	0	1	1134
1984	175m	0	893	34	194	0	1	1121	470

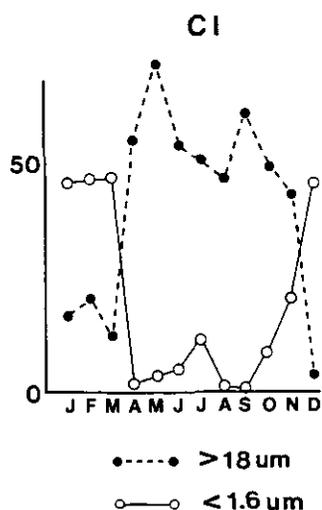


図 11 1982年に地表付近でハイボリュームエアースンプラーにより捕集されたエアロゾル中の塩素の粒径分布の年変化
 白丸実線は $1.6\mu\text{m}$ 以下の微小粒子の全塩素に占める割合(%), 黒丸破線は $18\mu\text{m}$ 以上の粗大粒子の全塩素に占める割合.

Fig.11 Particle size distribution of chloride in the suspended particles collected at 1m during 1982
 Solid line with open circles shows the percent distribution in the smallest particles ($<1.6\mu\text{m}$).
 The dotted line with solid circles shows that of the larger particles ($>18\mu\text{m}$).

計算すると表2のように、塩素は大きな不足を生ずる。各高度とも60%前後の塩素の不足となる。これはいわゆるクロリンロスと言われる現象を示すもので輸送中に、あるいはエアロゾルの捕集中に揮発性の高い塩素がなんらかの反応で失われるものと考えられている。夏季の塩素は、図11に示すように粗大粒子側が50%以上を占めること、CMB法の結果より海塩の寄与が大きいと推定される。

1984年10月の測定結果のCMB法による寄与率から求めた塩素の鉛直分布は、ちょうど中間的な様子を示しており、100m以下では廃棄物焼却炉及び地上での焼却の寄与が大きく、100m以上では海塩の影響が大きくなっており、塩素が不足している。

4.4 オゾンの鉛直分布

各高度におけるオゾン濃度の重相関分析の結果を、表3に示す。これによると夏季(1985年7月)の、オゾン濃度は各高度間の相関が高くよく混合しているといえる。図12に、地上と195m間のオゾンの散布図と回帰直線を示した。これからも、地上と195mのオゾンの相関がよいことが分かる。しかし、回帰直線が原点を通らず、数ppb程度のげたをはいている。これは、図7中で夜間地上付近がほぼ零となっても、195mではまだオゾンが残っているときがあり、この影響である。この時期、オゾン濃度は日中しばしば二つの極大を示すことがあり、風向などから東京方面からの移流の影響と考えられる。気象条件によって極大の現れる時間が異なり、夜間に現れることもある。

一方、冬季は高度間の相関は悪く、特に地上と175mの相関が悪い。87mと175mの相関はかなりよいことから地上付近と数十m以上では、オゾンの消長の機構がかなり異なることが示唆される。図13に、地上と175m間のオゾン濃度の散布図と回帰直線を示した。回帰直線のY軸の切辺は、35ppb程度を示している。この結果と、図6の日変化の様子から、次のようなメカニズムが考えられる。オゾンは日中光化学反応により生成され、比較的よく混合されているが、日没と共に逆転層が形成されはじめ、オゾンを分解する一酸化窒素の発生源は主として地上付近にあるので、地上付近に留まってしまいある高度以上には到達しない。したがって、上空で形成された、または混合によって上空に運ばれたオゾンはすべてが分解することなくある程度残ってしまう。あるいは、バックグラウンドのオゾン濃度は30~40ppbといわれており、回帰直線の切片とよく一致していることから、光化学反応で生成したオゾンはすべて分解されてしまい、さらに上空にあるバックグラウンドオゾンが降りてくるが逆転層により地上と隔離されているため分解されることなく混合が始まる早朝までその濃度が維持される。

測定期間が短く、現在ではどちらのメカニズムがこの様な高度による変化をもたらしているか明確ではないが、極めて興味深い結果である。オゾンの測定のみでなく、窒素酸化物及びNMHC等の測定もあわせて行い、さらに詳細な検討が必要であろう。

表 3 各高度間におけるオゾン濃度の相関係数

Table 3 Correlation coefficients among the concentration of ozone at three sampling heights

Sampling Period Oct. 22 ~ 31, 1984			Sampling Period July 15 ~ 24, 1985	
	O ₃ 87m	O ₃ 175m	O ₃ 91m	O ₃ 195m
O ₃ 0m	0.429	0.380	0.954	0.950
O ₃ 87m		0.797	O ₃ 91m	0.973

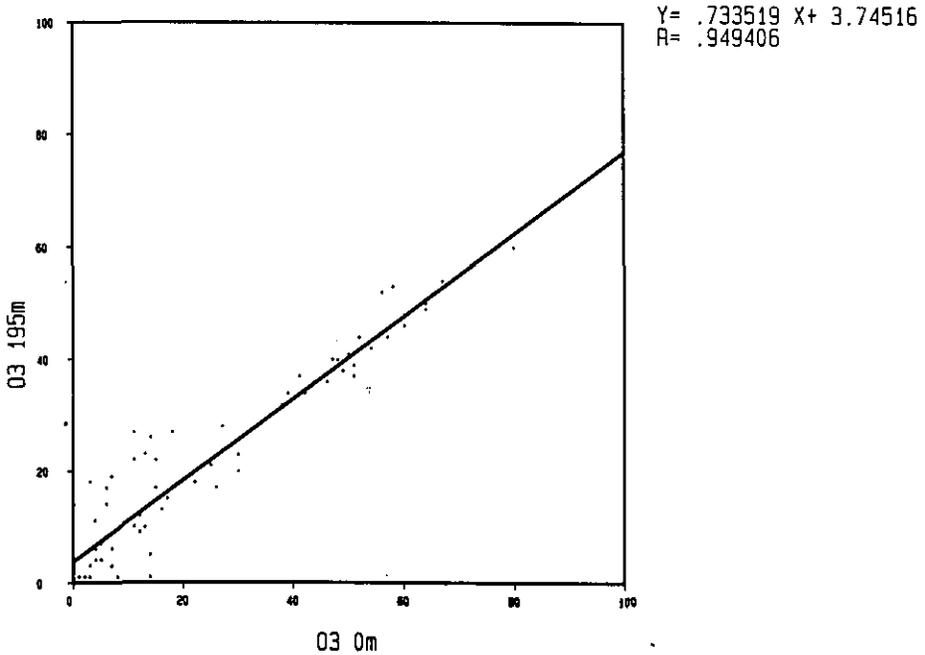


図 12 地表付近のオゾンと地上高度195m のオゾンとの相関(1985年7月)

Fig.12 Correlation between ozone at 1m and 195m during July 14-24, 1985

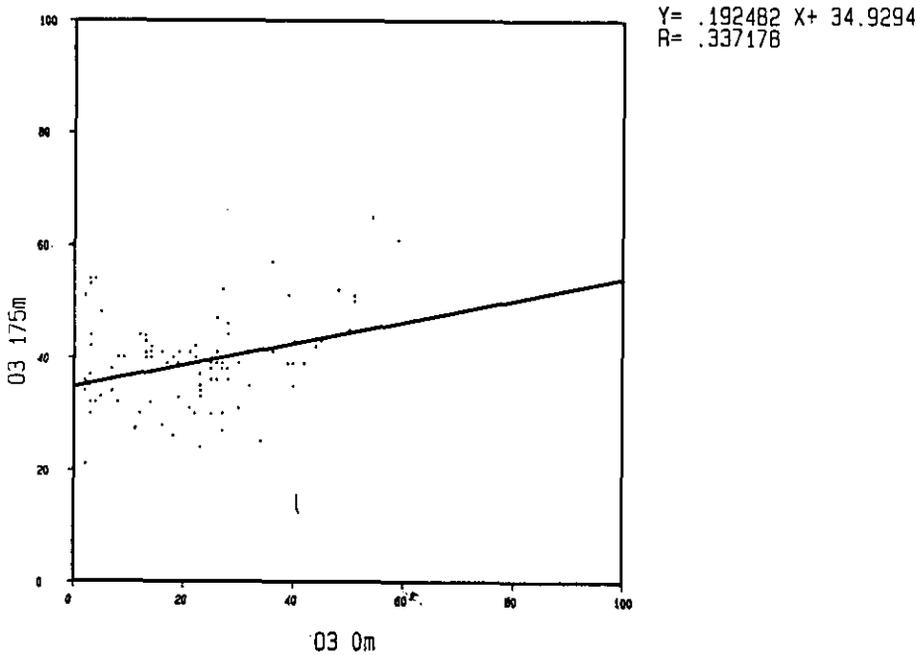


図 13 地表付近のオゾンと地上高度175m のオゾンとの相関(1984年10月)
Fig.13 Correlation between ozone at 1m and 175m during October 22-31, 1984

5 まとめ

我々は、気象研究所の気象観測様鉄塔を用いてエアロゾル及びエアロゾル中の成分、オゾンの測定などを季節を変えてここ数年行ってきた。その結果、地上から200m程度の低層大気においてもその分布は極めて複雑であり、その分布やメカニズムを把握することは、大気汚染現象を研究する上で多くのインフォメーションを提供してくれることが明確になった。今後はさらに充実した測定を行うと共に、レーザーレーダーのデータとの相関などに付いても検討を重ねる必要がある。本年の測定では、更に詳細な時間分解能のエアロゾル濃度の測定、窒素酸化物の測定などに重点をおいている。

謝 辞

気象研究所の皆さんには、鉄塔の借用初め気象データの提供など多くの援助を頂いた。特に、土器屋由紀子博士には貴重なデータの提供、様々な助言、さらに測定の期間中お手伝い頂いた。金沢五寿雄、池上三和子各研究員には様々な援助を頂いた。計測技術部分析室の方々には機器の設置から測定のお手伝いまでして頂いている。放射化分析は大阪府放射線中央研究所の溝畑朗氏に測定を依頼した。厚く感謝いたします。

引用文献

- Kunugi, M., T. Mizoguchi, I. Kanazawa, K. Hirose and Y. Dokiya (1987) : Vertical distribution of suspended particles and their components as measured on a meteorological observation tower. *Atmos. Environ.*, **21**, 917-927.
- Lioy, P. J., R. Mallon and T. J. Kneip (1980) : Long-term trends in total suspended particulates, vanadium, manganese, and lead at near street level and elevated sites in New York City. *J. Poll. Control Assoc.* **30**, 153-156.
- 真室哲雄・溝畑 朗・久保田寅英(1979a) : 都市廃棄物焼却炉より放出される浮遊粒子の元素組成. *大気汚染学会誌*, **14**, 190-196.
- 真室哲雄・溝畑 朗・久保田寅英(1979b) : ボイラーより放出される浮遊粒子の元素組成. *大気汚染学会誌*, **14**, 296-303.
- 真室哲雄・溝畑 朗・久保田寅英(1980) : 鉄鋼工業より放出される浮遊粒子の元素組成. *大気汚染学会誌*, **15**, 69-76.
- 溝口次夫・功刀正行・葉山幸雄・藤田真一・溝畑 朗(1985) : 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. *国立公害研究所研究報告*, 第77号, 147-164.
- Okita, T. (1980) : Research on sulfate, nitrate and nitric acid in Kanto area. *Proc. 5th U. S. -Japan Conference on Photochemical Air Pollution*. Environmental Agency.

II-7 一般化されたエントロピー評価基準による レーザーレーダー画像の強調*

Enhancement of Laser Radar Images Based on Optimization of a Generalized Histogram Entropy

宮本定明¹・大井 紘²

Sadaaki MIYAMOTO¹ and Ko OI²

要 旨

先に著者らは、エントロピー評価基準によるレーザーレーダー画像の強調について報告した(宮本ら, 1985)が、本稿では、この方法を一般化し、一般的なヒストグラムへの変換形式に対応した最適化問題の定式化について考察した。

このために、一般化されたエントロピー型の評価基準を導入し、この基準が強調問題の定式化のために適当であることを示し、この基準が、ある一般的なエントロピー型の関数族のなかで、強調問題の定式化のために必要な条件を備えた関数として、唯一のものであることを証明した。

実際のレーザーレーダー画像に対して、ヒストグラム平坦化、エントロピー最適化、エントロピーの一般化の三つの方法による処理結果をもとに、各々の効果を比較検討した。

Abstract

The image enhancement problem is formulated as an optimization of generalized entropy of the histogram of an image relative to a class of piecewise linear transformations. The present method is a generalization of the previous method of optimization based on the histogram entropy criterion proposed by the authors. A criterion of an entropy type is introduced in which a desirable histogram of a general shape is assumed so that the histogram of an image should be adapted to the desirable one. Moreover the present criterion is

1. 昭和55~60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 茨城県新治郡桜村天王台 1-1-1)

Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. Present Address: Institute of Information Science and Electronics, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Sakura-mura, 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.

* この論文の一部は、「システムと制御」, Vol. 30, No. 3, 195-201, (1986)に掲載されたものである。

proved to be an almost unique choice in a class of criteria which have the form of entropy of various functions defined on the histogram for the purpose of the image enhancement by the piecewise linear histogram transformations. Several images by a laser radar are processed: results by the present method with a hyperbolic histogram which is assumed in the criterion and those by the previous method of the maximization of histogram entropy are compared.

1 序 言

大気観測用レーザーレーダーは、過去20年にわたって大気汚染の観測に効果をあげているが、その画像処理には多くの研究の余地が残されている。筆者らは、先に区分線形変換に基づくレーザーレーダー画像の強調の方法を提案した(宮本ら, 1985)。これによれば、与えられた画素データからなるべく多くの情報を引き出すための表示の区間が、エントロピー評価基準の最適化によって自動的に定められる。また、このエントロピー評価基準は、ヒストグラム平坦化(Rosenfeld & Kak, 1982a, b)の手法が情報量としてのエントロピーを最大にすることを契機として導入されたものであった。

ところで、ヒストグラム平坦化の手法がヒストグラム双曲線化(Frei, 1977)や、一般的なヒストグラムへの変換(Rosenfeld & Kak, 1982a, b)へと一般化されたことを考えると、先に提案したエントロピー最適化の手法も同様に一般化できるのではないかと考えるのが自然である。すなわち、本稿の目的は、次のように要約される：先に提案した(宮本ら, 1985)エントロピー評価基準を一般化することによって、画素データのヒストグラムを与えられたヒストグラム(必ずしも平坦であるとは限らない)に変換する問題を最適化問題として定式化し、次にヒストグラム変換のクラスを区分線形変換に限定することによって、表示の区間を自動的に定める画像強調問題を定式化すること。かつ、このようにして得られた方法を実際のレーザーレーダー画像に適用すること。

そこで、一般化されたエントロピーの族を導入する前に、先に提案した最適化による定式化(宮本ら, 1985)を簡単に振り返ってみよう。

与えられた画素データを画素 (i, j) に対して、数値 p_{ij} , $1 \leq i, j \leq n$ が対応するものとする。画素データは出力の濃淡レベル $(1, 2, \dots, K)$ に量子化される。この量子化のためのしきい値を $c = (c_1, c_2, \dots, c_{K-1})$ と表すと、画素データから出力の濃淡レベルへの変換は、次式の T で与えられる。

$$T(p_{ij}) = \begin{cases} 1, & (p_{ij} \leq c_1) \\ k, & (c_{k-1} < p_{ij} \leq c_k, \quad k = 2, 3, \dots, K-1) \\ K & (p_{ij} > c_{K-1}) \end{cases}$$

次に、しきい値 c のクラスとして、

$$(i) \mathcal{C}_1 = \{c \mid c_1 < c_2 < \dots < c_{K-1}\}$$

$$(ii) \mathcal{C}_2 = \{c \mid c_1 = \alpha, c_{K-1} = \beta, c_2 - c_1 = c_3 - c_2 = \dots = c_{K-1} - c_{K-2} > 0\}$$

を導入する。 \mathcal{C}_l はすべての変換を含む最大のクラスを意味する。また、 \mathcal{C}_{l_1} は表示区間 $[\alpha, \beta]$ に対応する区分線形変換のクラスを意味し、 α, β をさまざまに変えることによって生じる表示区間の全体を意味している。 \mathcal{C}_{l_1} のもとでは、区間 $[\alpha, \beta]$ に入らない画素データはクリッピングされ、最小あるいは最大の濃淡レベルによって出力されるが、一方 $[\alpha, \beta]$ 内のデータは線形に表示される。

しきい値 c を定めると、出力濃淡レベルのヒストグラムとして (h_1, h_2, \dots, h_K) が定まる。ここで、 $h_k, 1 \leq k \leq K$ は第 k レベルに入る画素数である。 h_k はしきい値の関数であるから $h_k = h_k(c)$ と表し、 $h = h_1 + h_2 + \dots + h_K$ とおく。

ヒストグラムのエントロピー評価基準 $H(c)$ を、

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

で定義する。ヒストグラム平坦化は、明らかに最適化問題

$$\max_{c \in \mathcal{C}_l} H(c)$$

の解である。このことから前(宮本ら, 1985)に論じたように、区分線形変換による画像強調の問題は、

$$\max_{c \in \mathcal{C}_{l_1}} H(c)$$

として定式化される。

2 一般化されたエントロピー基準

いま、一般的な形のヒストグラム (f_1, f_2, \dots, f_K) が与えられているものとして考えよう。記述を簡単にするため、ヒストグラムをベクトル $f = (f_1, \dots, f_K)$ で代表させる。かつ、条件 $h = f_1 + f_2 + \dots + f_K$ が満たされているとして、一般性を失わないことに注意しよう。

画像のヒストグラムを f に変換する問題を最適化問題として定式化しよう。 f が平坦なヒストグラムを表さなるとき、先に示したエントロピー $H(c)$ では、画像強調の問題を定式化できないことは明らかである。そこで、これに代わるものとして次の形の評価基準 $H_m(c)$ を考える。

いま、

$$m_i = (\max_{1 \leq j \leq K} f_j) - f_i$$

とおき、

$$H_m(c) = - \sum_{i=1}^K \frac{h_i(c) + m_i}{\sum_{1 \leq j \leq K} h_j \cdot \max_{1 \leq j \leq K} f_j} \log \frac{h_i(c) + m_i}{\sum_{1 \leq j \leq K} h_j \cdot \max_{1 \leq j \leq K} f_j}$$

とおこう。この関数 $H_m(c)$ は、次の条件を満足する。

(a) $H_m(c)$ はエントロピーとしての条件

$$\frac{h_i(c) + m_i}{K \cdot \max_j f_j} \geq 0, \quad 1 \leq i \leq K; \quad \sum_{i=1}^K \frac{h_i(c) + m_i}{K \cdot \max_j f_j} = 1$$

を満たす。

(b) $f_1 = f_2 = \dots = f_K$, すなわちヒストグラムが平坦なとき,

$$H_m(c) = H(c)$$

(c) $\max_{c \in \mathcal{C}} H_m(c)$

の解は $h_k = f_k$, $1 \leq k \leq K$ を満たす。すなわち, 非線形変換を含む最大のクラスでは完全なヒストグラムのマッチングが達成される。

最後の性質(c)は $H_m(c)$ の最大化が,

$$\frac{h_i(c) + m_i}{K \cdot \max_j f_j} = \frac{1}{K}$$

を満たすことから容易に得られる。

上述の(c)より前節と同様にして, 一般化された画像強調の問題は,

$$\max_{c \in \mathcal{C}, \mathcal{L}_1} H_m(c)$$

と定式化される^{注)}。

さらに, 上に提案した関数 $H_m(c)$ は, ヒストグラムを一般化した場合の $H(c)$ の一般化として, ほとんど唯一に近いものであることが以下の定理によって証明できる。このために, 一般化された

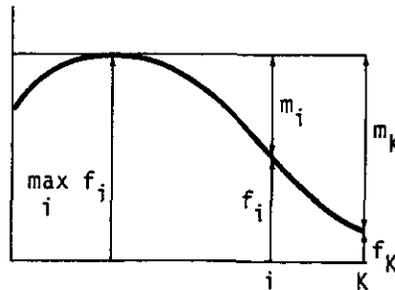


図 1 望ましいヒストグラム f_i と相補的ヒストグラム m_i の間の関係

Fig. 1 Relation between the desired histogram f_i and a compensating histogram m_i

注) この評価基準 $H_m(c)$ の意味は, 図 1 によって説明される。この図において, m_i はヒストグラム f_i に加えることによって平坦なヒストグラムを作り出すためのもので, いわば相補的なヒストグラムと考えることができる。

エントロピーの関数族を導入し、それが $H(c)$ の拡張として、画像強調問題に適した性質をもつための必要十分条件を導こう。

いま、一般的なエントロピーの関数族として、

$$H_q(c) = -\sum_{i=1}^K q_i(h_i(c); f) \log q_i(h_i(c); f)$$

の形を考える。ここで、 $q_i(x; f)$ 、 $1 \leq i \leq K$ は非負の実変数 x とヒストグラムを表すパラメータ f に対して定義され、区間 $[0, 1]$ に値をとる 1 回微分可能な関数と仮定する。この関数族 H_q が、ここで考える画像強調のための最適化基準として用いられるためには、先の $H_m(c)$ がもつ性質 (a), (b), (c) が成立しなければならない。すなわち、

(A) H_q はエントロピーとしての条件、すなわち、 $x_1 + x_2 + \dots + x_K = h$ 、 $x_i \geq 0$ 、 $1 \leq i \leq K$ となる実数 x_i に対し

$$\sum_{i=1}^K q_i(x_i; f) = 1$$

を満たす。

(B) $f_1 = f_2 = \dots = f_K$ のとき、 $H_m(c) = H(c)$ 。すなわち、一般化されたエントロピー基準は先のエントロピー基準に一致する。

(C) $\max_{c \in C} H_m(c)$ の解は $h_k = f_k$ 、 $1 \leq k \leq K$ で与えられる。

このとき、次の定理が得られる。

定理：一般化されたエントロピー基準 $H_q(c)$ が条件 (A), (B), (C) を満たすためには、

$$q_i(x_i; f) = \frac{x_i + \bar{f} - f_i}{K\bar{f}} \quad (1)$$

であることが必要十分である。ここで、 \bar{f} は一般にはヒストグラム f に依存する定数で、次の条件を満たす。

(D) $\bar{f} \geq f_i$ 、 $1 \leq i \leq K$

(E) $f_1 = f_2 = \dots = f_K = h/K$ ならば $\bar{f} = h/K$

(証明) 十分であることは簡単な計算によって確かめられるので、必要性のみを示そう。いま、ラグランジュ乗数 λ を用いて、

$$L = \sum_{i=1}^K q_i(x_i; f) - \lambda \left(\sum_{i=1}^K x_i - h \right)$$

とおく。条件 (A) より、 $\sum_i q_i$ が一定の値をとることから

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{dq_i}{dx_i} - \lambda = 0$$

が $\sum_i x_i - h = 0$ なる任意の x_1, \dots, x_K に対して成り立たなければならない。この最後の式を積分することによって、

$$q_i = \lambda x_i + a_i$$

を得る。ここで λ と a_i は一般にはヒストグラム f に依存する定数である。そこで上式を、

$$q_i = \lambda (x_i - \bar{f}_i) + b_i$$

と変形し、条件(C)は $q_i(f_i; f) = 1/K$ と等価であることを考慮すると、 $b_i = 1/K$ を得る。 $\bar{f} = 1/(\lambda K)$ とおくと、

$$\begin{aligned} q_i(x_i; f) &= \frac{K \lambda (x_i - \bar{f}_i) + 1}{K} = \frac{x_i + 1/(K \lambda) - \bar{f}_i}{1/\lambda} \\ &= \frac{x_i + \bar{f} - \bar{f}_i}{K \bar{f}} \end{aligned}$$

q_i は常に非負でなければならないから、 $\bar{f} \geq \bar{f}_i$, $1 \leq i \leq K$, すなわち条件(D)を得る。また、最後の性質(E)は条件(B)より得られる。すなわち、

$$q_i(x_i; h/K) = \frac{x_i + \bar{f} - h/K}{K \bar{f}} = \frac{x_i}{h}$$

とおくと $\bar{f} = h/K$ であり、逆に $\bar{f} = h/K$ とすれば上式が成立する。(証明終)

上の定理で明らかにされた $q_i(x_i; f)$ の形は、 $H_m(c)$ にみられるものとほとんど変わらない。実際、(1)において $\bar{f} = \max_i f_i$ とおけば(D), (E)が満たされる。また一方、(D), (E)を満たす \bar{f} のうちで、 $\bar{f} = \max_i f_i$ は最も簡単な \bar{f} の選び方であることは明らかである。

3 レーザーレーダー画像への適用

図2は、レーザーレーダー画像を10の出力濃淡レベル($k=10$)で表したものである。この図では、レーザーレーダーは地上の一点に固定され、レーダーの方向は垂直上方に固定されている。したがって、この図は地上の一点における大気の時間変化を表したもので、垂直方向は地上から上方へ2 kmの範囲を、また水平軸は24時間の時間変化を表している。画素数は垂直方向に128、水平方向に100であるので、1画素は垂直方向については15.6m、水平方向については14.4分の範囲を表している。図2では、等間隔のしきい値

$$c_1 - \min_{i,j} p_{ij} = c_2 - c_1 = \dots = c_9 - c_8 = \max_{i,j} p_{ij} - c_9 > 0 \quad (2)$$

を用いており、この図はいわば画像強調を行う前の原画像と呼ぶこともできる。図3は、この画像データを256レベルに量子化したときのヒストグラムを示しているが、多くの画素が濃度の低い部分に集中しているのに対し、少数の濃度の高い画素が右に点々と延びている。

図4はヒストグラム平坦化を行った結果であり、図5は $H(c)$ を区分線形変換 \mathcal{C}_{ℓ_1} において最適化した結果である。図4は非線形変換の範囲で強調しているのに対し、図5は区分線形変換で強調している点が異なっている。

なお、図5及び以下の諸結果における最適化の計算は、著者らの前の報告(宮本ら, 1985)と同じ格子点探索であるので、ここでは説明を省略する。このように、図5は原画像にはみられないさまざまなパターンが現れていて、情報量が大きい。その一方で、図の上方に見える雑音なども強調されていて、いくぶん見にくい画像になっているともいえる。

図6は、 $H_m(c)$ を \mathcal{C}_{ℓ_1} において最適化した結果である。ここで、ヒストグラムは双曲線

$$f_i = \frac{M}{(i-1)/K+d} \quad (3)$$

と仮定している(Frei, 1977)。双曲線を仮定した理由は、人間が受け取る明るさの感覚は、画素濃度の非線形関数であるので、ヒストグラムを双曲線化するほうが、平坦化するよりも人間が知覚す



図 2 入力データを出力濃淡レベルへ線形変換したレーザーレーダー画像
Fig. 2 A laser radar image with the linear transformation from input data to output gray-levels

る情報量の多い画像が得られる (Frei, 1977) とされているためである。ここで、定数 M は $h=f_1+\dots+f_k$ が成り立つように調整される。さらに、この図では $d=0.1$ としている^{注)}。

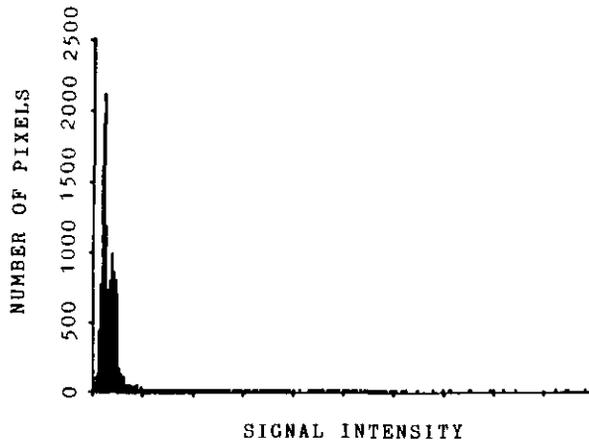


図 3 図 2 の原画像の信号を 256 の等間隔レベルに量子化したときのヒストグラム
Fig. 3 Histogram of the original signals of the image in Fig. 2 when they are quantized to 256 levels of equal intervals

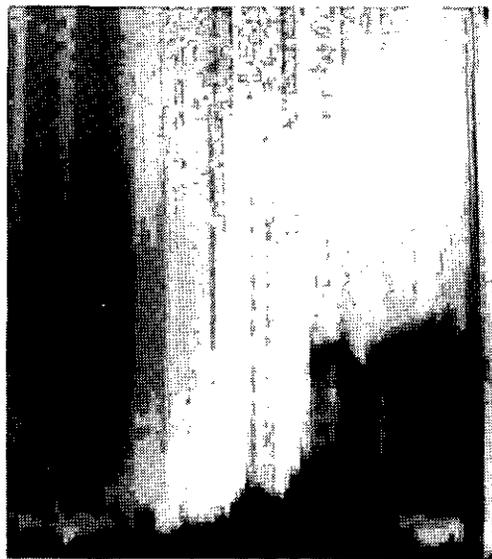


図 4 図 2 の原画像にヒストグラム平坦化を適用した結果
Fig. 4 The result of the histogram flattening applied to the original image in Fig. 2

注) 図 5, 図 6 の下方にみられる高濃度部分は、大気混合層と呼ばれ、大気汚染の状態を決定する重要なパラメータとして知られている (Pasquill, 1974)。本報告で扱った垂直画像では、混合層の時間変化をとらえることが主要な目的の一つとなっている。



図 5 図 2 の原画像に $H(c)$ を $\mathcal{C}l_1$ において最適化して強調した結果
Fig. 5 The result of $\max H(c)$ with $c \in \mathcal{C}l_1$ applied to the original image in Fig. 2

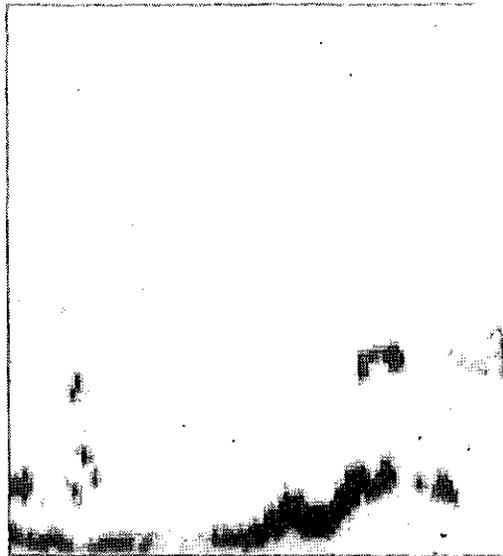


図 6 図 2 の原画像に $H_m(c)$ を $\mathcal{C}l_1$ において最適化して強調した結果
ヒストグラム f は (3) 式によって定義される。
Fig. 6 The result of $\max H_m(c)$ with $c \in \mathcal{C}l_1$ applied to the original image in Fig. 2
The histogram f is defined by (3)

この画像を A とし、同じく垂直方向の大気の時間変化をとらえた別の画像を B (ここでは画像 B は図として示すことはしない。) として、これら二つのデータに対し、(3)式のパラメータ d を変化させて、その結果エントロピー H と出力画像の平均濃度がどのように変化するかを調べた結果を図7に示す。ここで平均濃度とは、出力濃淡レベルを濃度の薄いものから順に1から10までの数値で置き換え、1枚の画像における平均をとったものである。ただし、横軸の原点に対応する画像は、 $d=0.0$ に対するものではなく、(2)式のしきい値を用いた原画像である。このグラフからわかるように、両方の画像において $d > 0.5$ のとき、エントロピーと出力濃淡レベルに変化がない。 d が増加すると、双曲線は平坦なヒストグラムを表すようになるから、このグラフは d が 0.5 より大きいとき、 H_m の最適化は H の最適化と同じ結果をもたらし、一方 d を 0.5 より小さくしてはじめて双曲線化した効果が表れることを意味している。

画像 A, B と同様の垂直方向画像16枚について同様の強調を行った。図8, 9はそれぞれ16枚の原画像((2)式のしきい値による)、ヒストグラム平坦化、 $\mathcal{C}l_1$ による $H(c)$ の最適化(以下、 $\max H$ という)、(3)式と $d=0.1$ を用いたときの $\mathcal{C}l_1$ による $H_m(c)$ の最適化(以下、 $\max H_m$ という)の結果、生じるエントロピーの値と出力画像の平均濃度をグラフにしたものである。ヒストグラム平坦化の結果におけるエントロピーと、平均濃度が各画像で少しずつ異なるのは、レーザーレーダー画像ではしばしば、ある一定のレベルの信号がほかにくらべて多く受信されることなどの理由によって、完

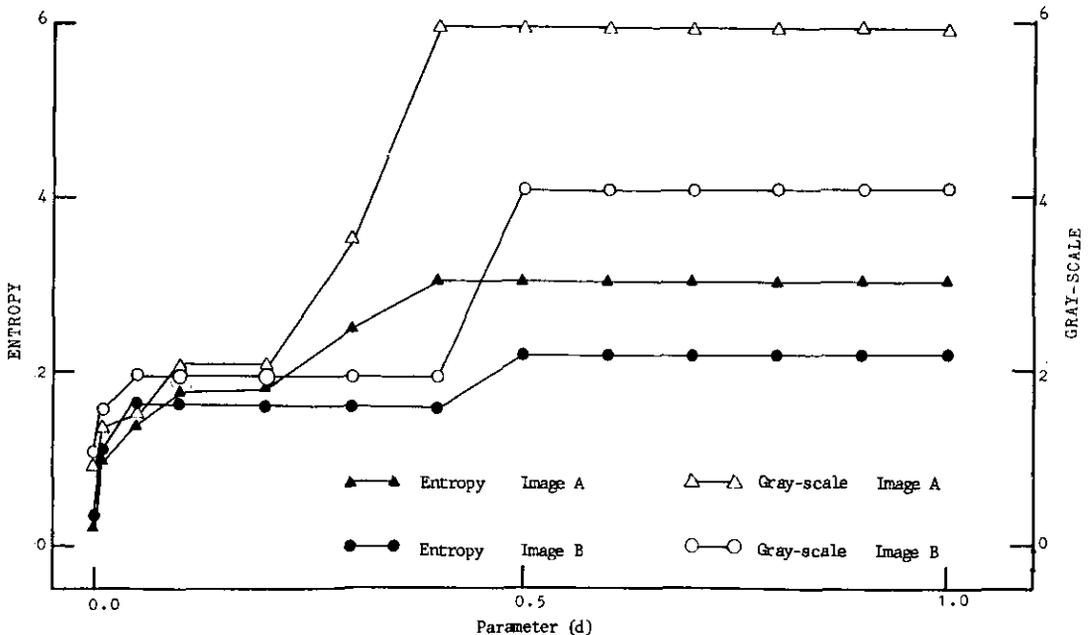


図 7 二つのレーザーレーダー画像についての(3)式のパラメータ d の値に対するエントロピー値と平均濃淡レベル

Fig. 7 Entropy values and averaged gray-levels with different values of parameter d in function (3) for two laser radar images

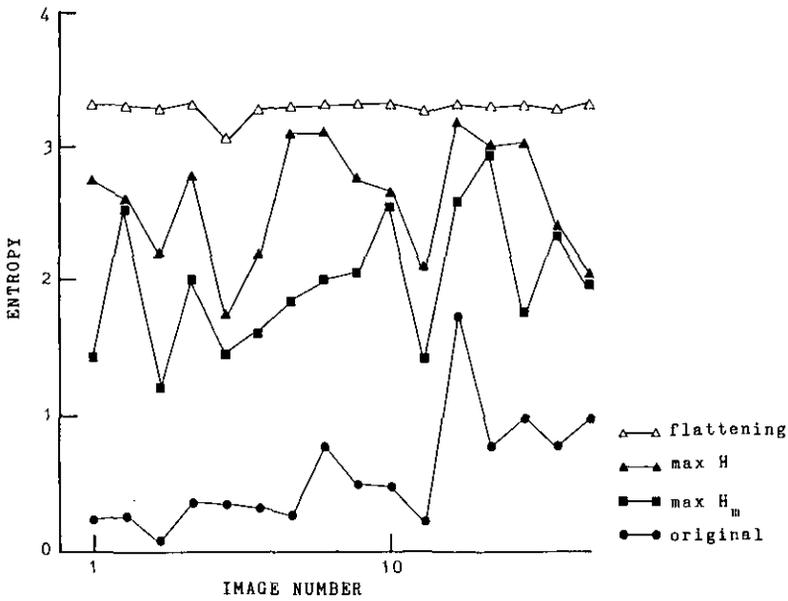


図 8 ヒストグラム平坦化, $\max H$, $\max H_m$ による16の出力画像のエントロピー値

Fig. 8 Entropy values of 16 output images by the linear transformation, by the histogram flattening, by $\max H$, and by $\max H_m$

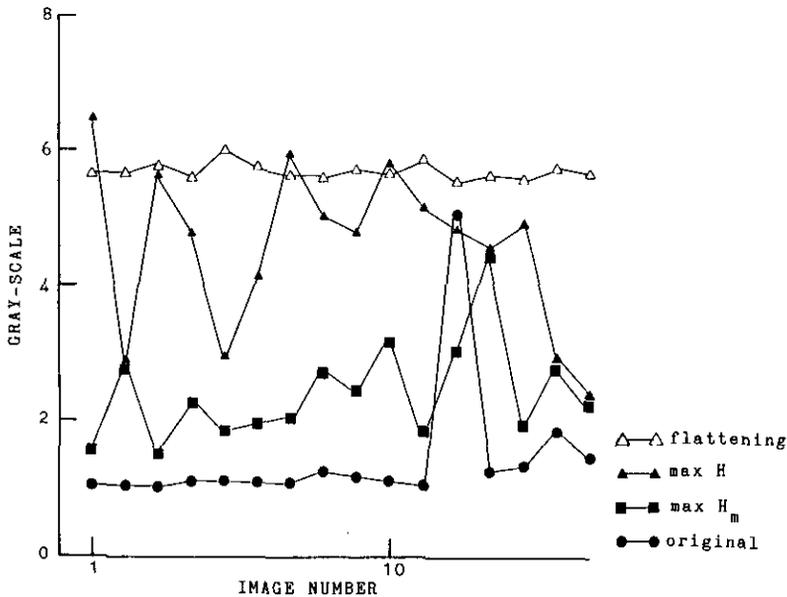


図 9 ヒストグラム平坦化, $\max H$, $\max H_m$ による16の出力画像の平均濃淡レベル

Fig. 9 Averaged gray-levels of 16 output images by the linear transformation, by the histogram flattening, by $\max H$, and by $\max H_m$

全な平坦化ができないからである。これら二つのグラフから、全般的に原画像, $\max H_m$, $\max H$, 平坦化の順にエントロピーと平均濃度が増加していくことがわかる。

4 結 論

本稿では、先に提案したエントロピー最適化による画像強調が、一般的なヒストグラムへの変換へと一般化されることを示し、その場合に最適化すべき評価基準を導いた。また、この基準の一意性について考察した。さらに実際のレーザーレーダー画像にこの方法を適用し、その効果を調べた。

先に示したエントロピーの最適化及び量子化誤差の考え方(宮本ら, 1985), またここで述べたエントロピーの一般化による画像強調の定式化は、情報量の最大化という一般的な考え方に基づいているため、大気観測用レーザーレーダーだけにとどまらず、さまざまな計測による画像に試みることができると思われる。

計算には国立公害研究所の M180, 及び同研究所の画像出力システム IPSEN を用いた。また, ヒストグラム平坦化には, 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(スパイダ作業グループ, 1982)を利用した。

終わりに当たって, 本研究に遂行上御指導御教示をいただいた筑波大学池辺八洲彦教授, 研究討論に参加し計算をしていただいた同学大学院生浅山泰祐氏に感謝します。また, 多大の御助言をいただいた国立公害研究所の内藤正明部長, 竹内延夫室長, 安岡善文主任研究官, 宮崎忠国主任研究員に謝意を表します。

引用文献

- Frei, W. (1977) : Image enhancement by histogram hyperbolization, *Computer Graphics and Image Processing*, No. 6, 286-294.
- 宮本定明・大井 紘・内藤正明・小林正紀(1985) : 区分線形濃度変換にもとづく画像強調問題の最適化による定式化と大気観測用レーザーレーダへの応用. システムと制御, Vol. 29, 313-321.
- Pasquill, F. (1974) : *Atmospheric Diffusion, The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources*, 2nd ed., Ellis Horwood, Chichester, Sussex, England, 429p.
- Rosenfeld, A. and A.C. Kak (1982a) : *Digital Image Processing*, 2nd ed., vol. 1, Academic Press, New York, 435 p.
- Rosenfeld, A. and A.C. Kak (1982b) : *Digital Image Processing*, 2nd ed., vol. 2, Academic Press, New York, 349 p.
- スパイダ作業グループ(1982) : 画像処理サブルーチン・パッケージ, SPIDER USER'S MANUAL, 共同システム開発, 東京, I-22+II-61+III-577p.

II - 8

多重閾値による MSS データの探索的な分類法
A Classification Method of Remotely Sensed Multispectral Data
by Use of the Exploratory Selected Multi-level Thresholds

横田達也¹

Tatsuya YOKOTA¹

要 旨

リモートセンシングデータの分類法として、植生領域における樹種分類など、分光特性が非常に類似した領域間の分類に有効な手法を提案する。本手法は、多重閾値処理による教師付き分類法の一つであり、人間が介在して探索的に閾値の設定を行う、分類結果の良否から閾値の設定の繰り返しを行う、分類が容易な部分から順次分類を行う、そして分類不明領域を残すという点に特徴がある。丘陵地域の航空機観測データ(9月、落葉前)に対して本手法による植生分類(落葉樹、常緑樹、陰の分類)を行い、12月のデータとの比較を行ったところ、比較的良好な結果が得られた。

Abstract

Proposed a classification method effective to discriminate the several areas from remotely sensed data whose spectral features of the data are similar one another, such as the classification of the vegetation.

This method is one of the supervised classification methods using parallelepiped classifier, and the thresholds are selected exploratory by the analyst.

The thresholds may be reselected when the classified results are not suitable.

The easily classifiable pixels are discriminated by using a single band data at first, and the remains are discriminated by using multiband data.

The unclassified pixels may be reasonably remained in the results by the method proposed here.

Multiband data obtained by aircraft over the vegetative hill area in September (before defoliation) were classified by the method into three categories: evergreen tree, deciduous tree, and shadow. And the results were similar to the pattern in the aerial photograph obtained in December (after defoliation).

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

多次元の分光特性を利用したリモートセンシングデータの教師付き分類法には、最尤法(和達ら編, 1976; 土井・安藤, 1980), 判別関数を用いる方法(藤村ら, 1978; 辻内編, 1981), BDT(Binary Decision Tree)法(稲村ら, 1979; Briemanら, 1984), 閾値処理(Rosenfeld & Kak, 1976)などの手法がある。これらの自動分類手法の中には、データの分布に単峰性や正規性などの仮定を必要とするものが多い。しかし、既知の領域(トレーニングエリア, 以下「TRA」と記す)として指定した部分のデータの分布がそれらの仮定を必ずしも満たさないことは、過去の研究報告(例えば下川ら, 1983)においても確認されている。また、緑地, 都市域, 河川, 田畑などは、各カテゴリー間の分光特性の違いがはっきりとしているために、それらの分類は比較的容易であるが、例えば、緑地の中の樹種分類, 都市域の中の建造物分類など、分光特性が類似したものについての分類では、TRAの分光データの分布がカテゴリー間で重複する場合もあり、従来の方法では誤分類率が高く、適切な結果が得られないこともある。

TRAのデータの分布に基づいて分類のための閾値を設定する際、自動的な決定法を用いず、分類対象の実情に関する知識を持っている専門家がTRAのデータの分布の状況やTRA間の分離度などを判断して閾値を決定すれば、その知識が生かされた分類結果が得られると期待される。

以上の事実を考慮して、本研究では、分類精度を向上させるために人間を介入させ、カテゴリー間の分離度を評価しつつ、多重閾値を用いて段階的に分類を行う手法を提案する。

本手法は、(i)データの分布形を規定しない、(ii)閾値分類であるためアルゴリズムが確定した後は分類が高速である、(iii)分類を行う者の知識や判断に基づいた閾値の設定が可能であるという特徴を持つ。

2 分類アルゴリズム

多重分光画像(多次元データ)を構成する個々の画素を、分光特性を利用して何種類かのグループ(これをカテゴリーと呼ぶ)に分類する。カテゴリーは、教師無し分類によるクラスターとは異なり、それぞれ分類目標としての意味を有する。したがって、分類前にデータの中でどのカテゴリーに属するかが判明している部分(TRA)を抽出し、それらを教師として、全データを分類する。

個々の画素を、その分光特性に基づいていずれかのカテゴリーに分類する場合に、単一バンド(1次元データ)のみの情報を用いて比較的容易にカテゴリーを判定できる画素もあれば、すべてのバンドの情報を用いてもどのカテゴリーに属するかの判定が難しいものもある。本手法では、単一バンドの情報のみから分類できるものから順に分類し、残った画素について組み合わせるバンド(次元)数を増加して分類を行う。分類にはBDT法を利用する。

いま、 p バンドからなる i 番目の画素の輝度レベルを $d_i = \{d_i(j), j = 1, \dots, p\}$ とする。未知のデータ d_i が k 番目のカテゴリー C_k に属するかどうかを判断するための、 j バンドにおける二つの基準値 $U_k(j)$ (上限)と $L_k(j)$ (下限)をTRAのデータの分布から設定する。これらを第 k カテゴリー

の j バンドにおける「閾値」と呼ぶ。TRA の C_k が j バンドの輝度レベル空間(一次元)上に占める領域を $R_k(j)$ と表すと、多重閾値処理は、以下のように表される。

$$L_k(j) \leq d_i(j) < U_k(j) \rightarrow d_i(j) \in R_k(j) \quad (1)$$

$$d_i(j) \in R_k(j) \text{ for } \forall j \rightarrow d_i \in C_k \quad (2)$$

単一バンド $j=j_0$ のみの情報を用いた分類は、上記アルゴリズムで $[L_k(j) = -\infty, U_k(j) = +\infty, \text{for } j \neq j_0]$ と考えればよい。

閾値の設定方法には、TRA の平均値及び標準偏差を用いる方法(稲村ら, 1979)などもあるが、本手法では、データの表示手法として探索的データ解析(Exploratory Data Analysis, Tukey, 1977)の「箱ヒゲ表示(Hoaglin ら, 1983)」(図 1)を用いて、人間の判断を介して閾値の設定を行う。自動的に閾値を設定することは原理的には可能であるが、どのカテゴリーを優先して分類を行うか、非常に類似したカテゴリーを一つのカテゴリーとして扱ってよいかどうかなどを、箱ヒゲ表示の結果を利用して人が判断し、その判断に基づいて閾値が設定されれば、設定者の専門分野の知識が生かされた分類結果が得られる。

以下、閾値設定の具体的な方法について述べる。はじめに、処理領域内に適当な個数の TRA を

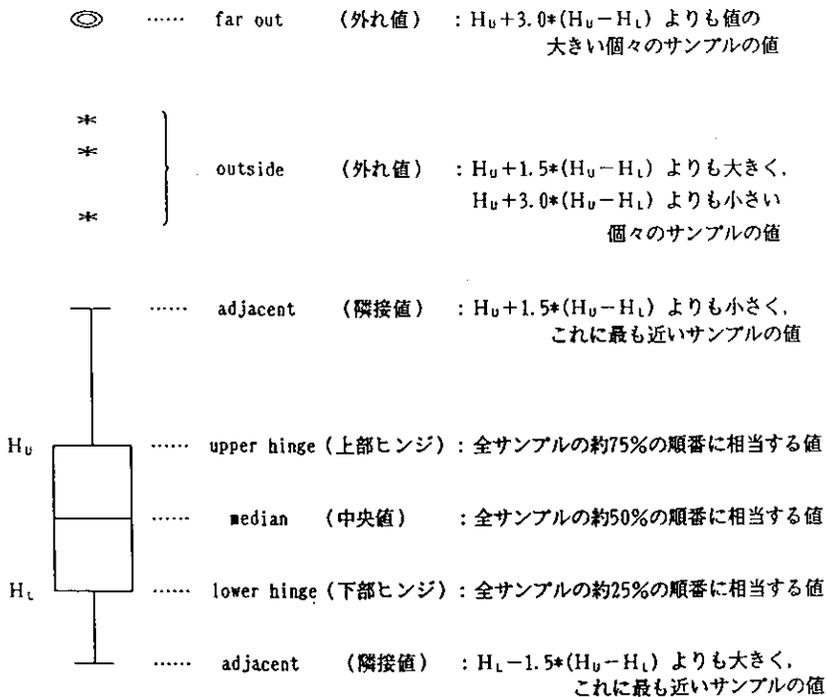


図 1 単一バンドのデータの分布を表す「箱ヒゲ表示」とその意味

Fig. 1 Box-and-whisker display of the distribution of the single band data

選定する。次に、各バンドごとに各カテゴリーに対応する TRA のデータの分布を示す箱ヒゲ表示を行う。これらの表示から、カテゴリーを明確に分離できるような値があれば、それを閾値として設定する。また、場合によっては、ある程度の誤分類を許容した閾値や TRA 内の外れ値を除いた確実性の高い閾値を設定することもできる。これらは、箱ヒゲ表示を TRA 間で比較することによって、閾値を設定する者が判断する。単一バンドにおける基本的な閾値の設定アルゴリズムを以下に示す。

[STEP 1]

第 s カテゴリー C_s の TRA のデータを $y_i(s) = \{y_i(j; s), j = 1, \dots, p\}$, $i = 1, \dots, q(s)$ とする。Count $\{X | A\}$ を、条件 A を満たすデータ X の個数を表す関数として、単一バンド j において、第 s カテゴリーに属していることが既知の TRA のデータのうち、閾値処理によって第 s カテゴリーに分類されるものの個数 $N_s(j)$ を、

$$N_s(j) = \text{Count} \{y_i(s) \mid L_s(j) \leq y_i(j; s) < U_s(j), \\ y_i(j; s) \in R_s(j) \text{ and } y_i(j; s) \notin R_k(j) \text{ for } \forall k \neq s\} \quad (3)$$

としたとき、 $N_s(j)$ を最大にするような $L_s(j)$ 及び $U_s(j)$ が存在すれば、それらを閾値とする。なお、一般に $0 \leq N_s(j) \leq q(s)$ である。また、いかなる $L_s(j)$, $U_s(j)$ を用いても $N_s(j) = 0$ の場合がある。これは、TRA のデータに対してバンド j のみの情報からカテゴリー C_s に属するデータの抽出は不可能であることを意味し、 C_s に分類するための閾値を設定することはできない。しかし、すべてのバンドについてこの閾値設定作業を行った後、TRA のデータの中で $L_s(j) \leq y_i(j; s) < U_s(j)$ を満たすデータを除いた、残りのデータのみに対して再び箱ヒゲ表示を行い、上記のアルゴリズムと同様の閾値設定を繰り返して行えば、新たな閾値が得られることがある。すなわち、1 回目に $N_s(j) = 0$ となって閾値を設定することができなかったカテゴリーでも、2 回目以後には設定できる場合がある。したがって、本アルゴリズムは、TRA の未分類データに対して次々と繰り返して適用すれば、より効果が上がる。なお、人が介入すれば、カテゴリー間の箱ヒゲ図の関係から、視覚判断によってある程度の誤分類を許容して(すなわち(3)式において $y_i(j; s) \in R_k(j)$ for $k \neq s$ を許して)閾値を設定したり、 $N_s(j)$ は最大とはならないが TRA 内の外れ値を除いた確実性の高い閾値を設定することもできる。ここまでの閾値設定を「STEP 1」とする。

[STEP 2]

次に、STEP 1 の単一バンドの繰り返しによる閾値設定によって、いずれのバンドを用いてもどのカテゴリーにも分類されなかった TRA のデータ $y_i(s)$ に対して、単一バンドにおける箱ヒゲ表示を参考にして適当と思われる 2 バンドを組み合わせて散布図を描き、2 次元の同時分布に対する閾値を設定する。バンド $j = j_1, j_2$ を用いた場合、 C_k が (j_1, j_2) の輝度レベル空間(二次元)上に占める

領域を $R_k(j_1, j_2)$ と表すと、バンド j_1, j_2 において、もともと第 s カテゴリーに属する TRA のデータの STEP 1 で残されたもののうち、二次元の閾値処理によって第 s カテゴリーに分類されるものの個数 $N_s(j_1, j_2)$ を、

$$N_s(j_1, j_2) = \text{Count} \{ y_i(s) \mid L_s(j_1) \leq y_i(j_1; s) < U_s(j_1), L_s(j_2) \leq y_i(j_2; s) < U_s(j_2) \\ (y_i(j_1; s), y_i(j_2; s)) \in R_s(j_1, j_2), \\ (y_i(j_1; s), y_i(j_2; s)) \notin R_k(j_1, j_2) \text{ for } \forall k \neq s \} \quad (4)$$

としたとき、 $N_s(j_1, j_2)$ を最大にするような $L_s(j_1)$, $U_s(j_1)$, $L_s(j_2)$ 及び $U_s(j_2)$ が存在すれば、それらを閾値とする。この操作をいくつかのバンドの組み合わせに対して行い、必要に応じてこの操作を繰り返す。以上を「STEP 2」とする。

STEP 2 によっても分類されなかったデータは、さらに三つのバンドの組み合わせによって三次元空間における閾値処理を行うか、未分類データとして残す。未分類データは、カテゴリー間で非常に分光特性が類似していて、判断が付きにくい部分であるが、どのカテゴリーに属するか全く不明なのではなく、例えばカテゴリー C_1 か C_2 かは不明であるが C_3 ではないというように、ある程度の段階までは判明していることが多い。

以上のような方法で、分類のためのアルゴリズムが決定されれば、そのアルゴリズムに従って対象領域内のすべてのデータに対する分類を実行する。その分類結果を吟味し、例えば未分類領域が多過ぎる場合など、必要ならば閾値を再設定して分類を繰り返し、適切な分類結果を求める。

3 処理例

ここでは、本分類アルゴリズムを具体的な例を用いて説明する。分類目的は、航空機リモートセンシングデータから、植生領域における「落葉樹」、「常緑樹」、「陰」を分類することである。「陰」の部分は輝度レベルが低く、データが常緑樹と落葉樹との識別に有効な情報を含まないことがあり、このデータに対してあえて分類を行えば、信頼性の低い誤った結果が生じる可能性があるため、あらかじめ「陰」を別のカテゴリーとして扱う。

3.1 材料

観測対象は埼玉県・鎌北湖北部の丘陵地域である。データは、昭和57年9月中旬の落葉前に、航空機搭載の MSS (Daedalus 社製 DS-1250) によって観測された、11バンドの多重分光データである。分類対象地域の航空写真を図 2 に示す。同一地域の12月(落葉後)の航空写真(図 3)をもとに TRA (落葉樹 3 か所、常緑樹 4 か所、陰 3 か所)を計10か所選定する。これらの領域を図 4 (可視3バンドの合成画像)に示す。



図 2 分類対象領域の航空写真(9月, 落葉前)
Fig. 2 Aerial photograph of the classification area
(September, before defoliation)



図 3 分類対象領域の航空写真(12月, 落葉後)
Fig. 3 Aerial photograph of the classification area
(December, after defoliation)

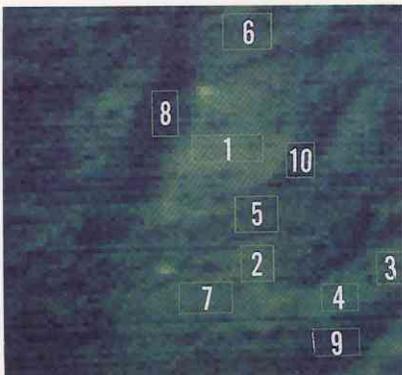


図 4 分類の対象データの3バンド合成画像
(青: B.3, 緑: B.4, 赤: B.7)と
TRA(#1~#10, エリア番号とカテゴリーと
の関係は図6参照)の選定
Fig. 4 Real color display of the data
(Blue: B. 3, Green: B. 4, Red: B. 7), and selected
training areas #1~#10 (cf. Fig. 6)

3.2 処理方法

はじめに11のバンド(B.1~B.11)について各 TRA のデータの箱ヒゲ表示を行う。その結果, B.1~B.3は分類のための情報をほとんど含んでいないことが判明した(その一例として, B.1のデータの箱ヒゲ表示を図5に示す)ため, これらの3バンドを除外した八つのバンド(B.4~B.11)を用いて閾値設定(STEP1)を行う。例えば図6は熱赤外バンド(B.11)の TRA のデータの分布を表す箱ヒゲ表示であり, この表示から, カテゴリー間でデータのレベルが重複しないような閾値を設定する。図6の場合には, 閾値としてL1, L2を設定し, 値がL1以上のデータを「常緑樹」に, L2未満を「陰」に分類する。L1未満かつL2以上のデータは, どのカテゴリーにも属する可能性があるため, このバンドの情報のみから属するカテゴリーを決定することはできない。はじめに, 「陰」の TRA を分類するための閾値設定を, 残りの七つのバンドについても行う。これらの閾値によって分類される TRA のデータを除いて, 次に「常緑樹」を分類するための閾値の設定を再び八つのバンドのそれぞれについて行う。さらに未分類の TRA のデータのみを用いて「落葉樹」の分類のための閾値設定を行う。以上が「STEP1」である。

次に, STEP1のいずれのバンドを用いてもどのカテゴリーにも分類されなかった TRA のデータに対して, 単一バンドにおける箱ヒゲ表示を参考にして適当と思われる2バンドを組み合わせて散布図を描き, 2次元の閾値を設定する。例えば, 図7(a)は, TRA の全データに対する B.8と

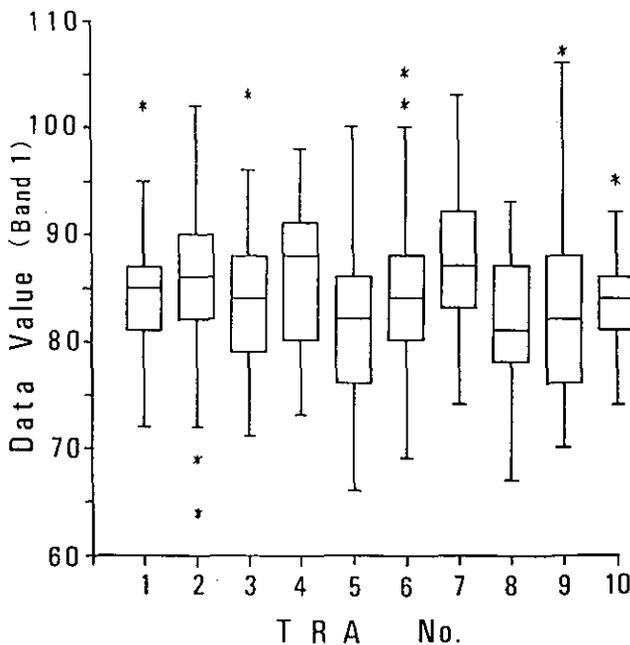


図 5 TRA の B.1 のデータの箱ヒゲ表示

Fig. 5 Box-and-whisker display of the data in B.1 for each training area

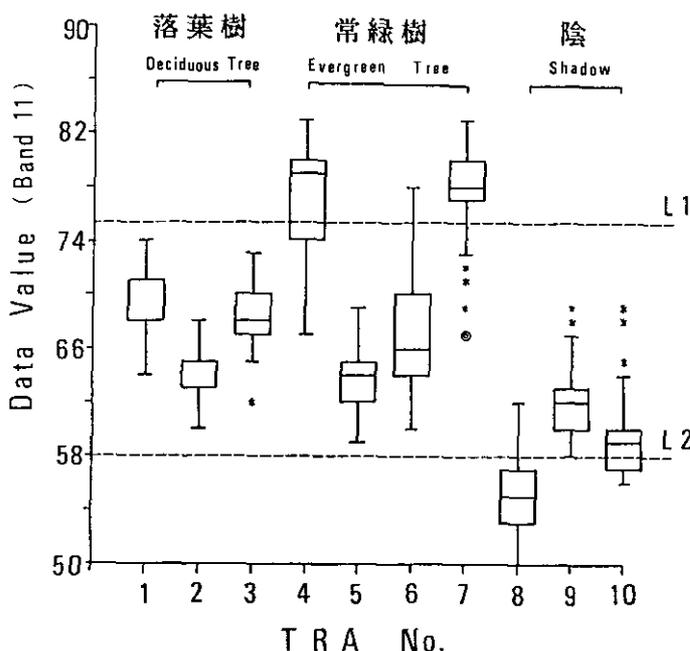


図 6 TRA の箱ヒゲ表示と閾値 (L1, L2) の設定例 (B.11)

Fig. 6 Example of the box-and-whisker display for each training area, and the decision of the thresholds (L1, L2) in B.11

B.11との散布図であり、STEP 1 で分類されなかった TRA のデータのみの散布図は図 7 (b)となる。図 7 (b)において閾値 L3, L4 を設定し、横軸 (B. 8) で L3 以上、かつ縦軸 (B.11) で L4 未満のデータを「落葉樹」に分類する。このように、未分類のデータのみについて散布図表示を行えば、閾値(あるいは各種判別関数)の設定が容易となる。これらの操作をいくつかの 2 バンドの組み合わせに対して行う。以上が「STEP 2」である。

この例においては、STEP 2 によっても分類されなかったデータに対して、3 バンド以上の組み合わせによる処理は行わず、それらを未分類データとした(図 7 (c))。

3. 3 分類結果

対象領域内の全データに対する STEP 1 までの分類結果を図 8 に、STEP 2 までの分類結果を図 9 に示す。STEP 2 では、「B. 8 と B.11」、「B.10 と B.11」、「B. 7 と B. 8」との組み合わせの散布図から 2 次元的に設定された閾値を用いた。

図 8 と図 9 との比較により、未分類(判定不能)領域が植種の境界部分に多く存在し、それらが STEP 2 で減少する様子が分かる。図 9 は図 2 に示される落葉前のデータを用いた分類結果であるが、落葉後の図 3 と比較すると、分類結果はおおむね良好であることが分かる。

図 10 に、具体的な分類アルゴリズムの流れを示し、各段階において分類された画素の個数または

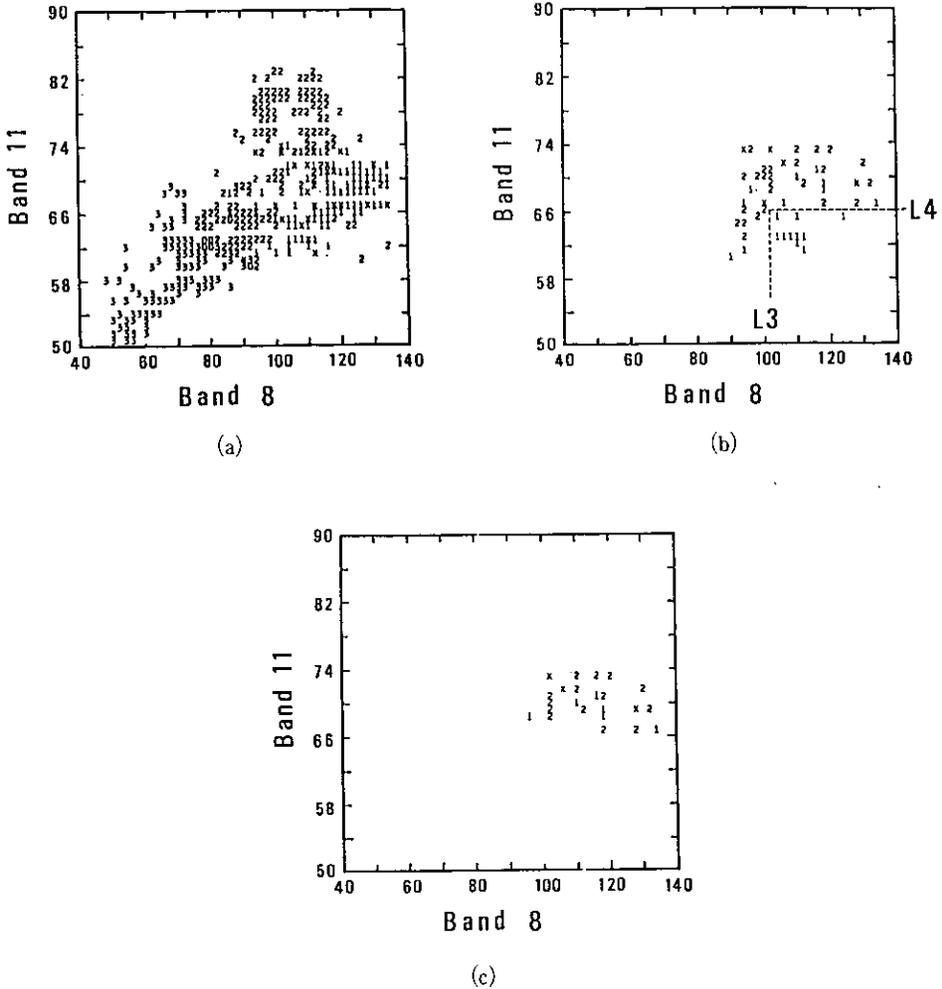


図 7 TRA におけるデータの散布図(横軸：B.8, 縦軸：B.11)と閾値の設定例

(1 : 落葉樹, 2 : 常緑樹, 3 : 陰, O, X, * : カテゴリーの異なるデータの重複部分)

(a) TRA 全データの散布図

(b) STEP 1 後の未分類の TRA のデータの散布図と閾値(L3, L4)の設定例

(c) STEP 2 後の未分類の TRA のデータの散布図

Fig. 7 Example of the scattergram of the data in the Training Areas (B.8 and B.11), and the decision of the thresholds

(1 : Deciduous tree, 2 : Evergreen tree, 3 : Shadow, O, X, * : Overlapped data among the different categories)

(a) Scattergram of all of the training data

(b) Unclassified training data after STEP 1, and the example of the thresholds (L3, L4)

(c) Scattergram of the unclassified training data after STEP 2

残された画素の個数を示す。図10の円の上段の数字が TRA の画素数を，下段の数字が処理の全領域における画素数を示す。

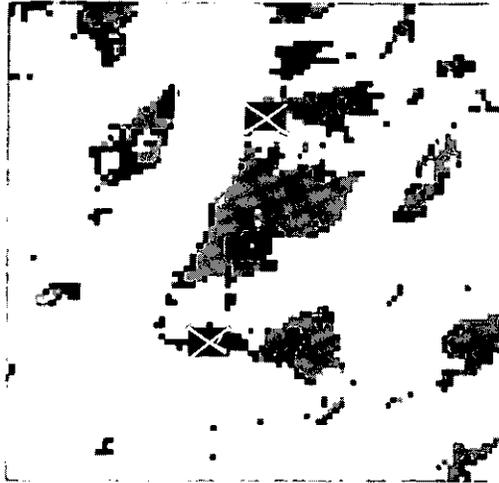


図 8 STEP 1 における分類結果

白色：陰，淡灰色：常緑樹，濃灰色：落葉樹，黒色：未分類，✕：送電線用鉄塔

Fig. 8 Classification result after STEP 1

White : Shadow, Light-gray : Evergreen tree, Dark-gray : Deciduous tree, Black : Unclassified, ✕ : Steel tower of the power-transmission line.



図 9 STEP 1 及びSTEP 2 による分類結果

白色：陰，淡灰色：常緑樹，濃灰色：落葉樹，黒色：未分類，✕：送電線用鉄塔

Fig. 9 Classification result after STEP 1 and STEP 2

White : Shadow, Light-gray : Evergreen tree, Dark-gray : Deciduous tree, Black : Unclassified, ✕ : Steel tower of the power-transmission line.

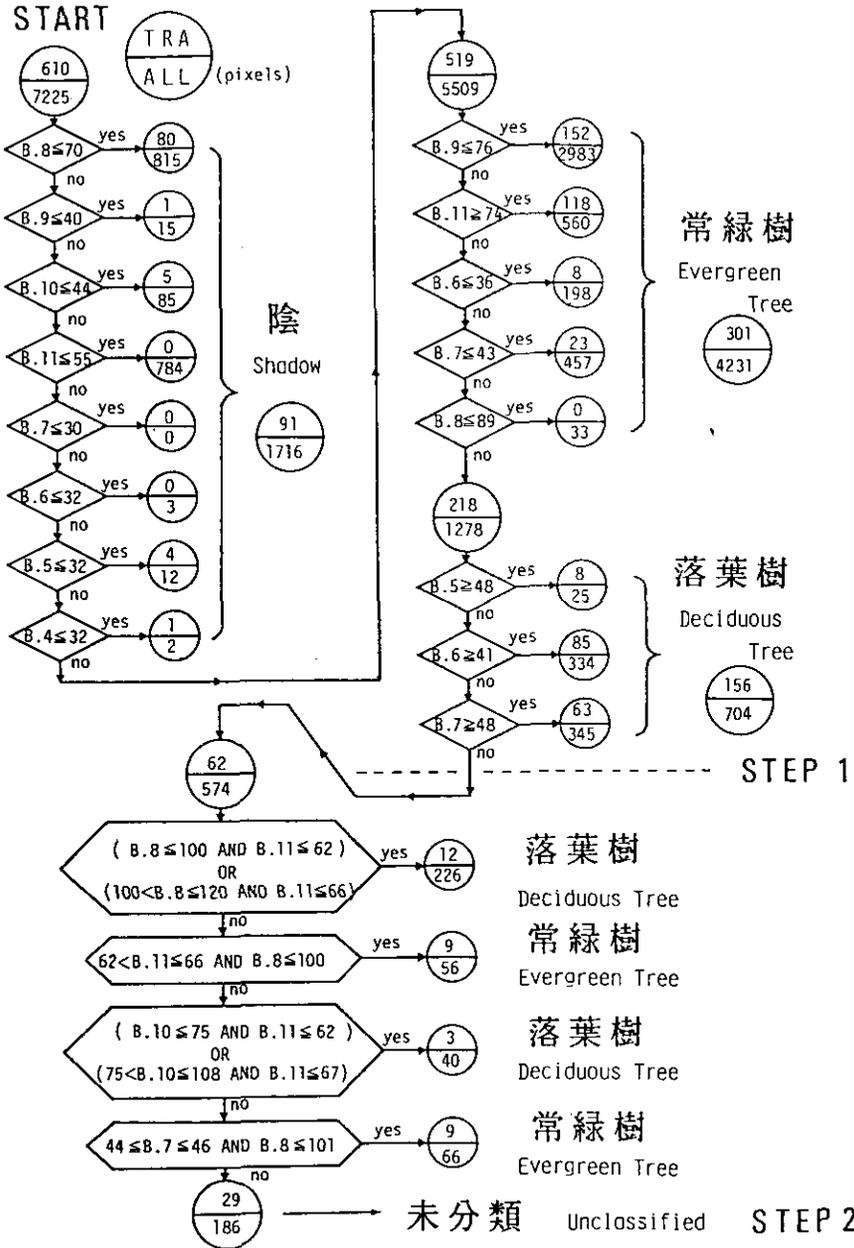


図 10 図 2 及び図 4 に示されるデータに対する本手法の分類アルゴリズム
 Fig.10 Diagram of the classification algorithm used here to the data shown in Fig.2 and Fig.4

3.4 考察

本分類アルゴリズムでは、まず単一バンドの輝度情報から陰の部分を抽出し、残りを常緑樹、落葉樹の順に分類する。ここまでがSTEP 1で、図10によると、TRA では全体の約90% (610画素中548画素)が分類され、全データでは全体の約92% (7225画素中6651画素)が分類されている。未分類の画素(TRA で62画素、全データで574画素)は、STEP 2の2バンドの組み合わせによる閾値処理により、落葉樹または常緑樹に分類され、未分類の画素はTRA で29画素、全データで186画素に減少した。すなわちSTEP 1とSTEP 2とで、TRA では全体の約95% (610画素中581画素)が、全データでは全体の約97% (7225画素中7039画素)が分類されたことになる。

本アルゴリズムによるSTEP 1またはSTEP 2までのTRA に対する分類結果を表1、表2に示す。ただしここでは、未分類及び陰に分類される画素を減らすために、ある程度の誤分類が生じること

表 1 トレーニングエリア(TRA)に対する多重閾値分類結果(画素数)

Table 1 Classification results (pixels) for training area by using the multi-level thresholds

カテゴリー	分類結果(画素数)				
	全画素数	落葉樹	常緑樹	陰	未分類
落葉樹	188	154	9		25
		168	11		9
常緑樹	277	2	238		37
		3	254		20
陰	145		54	91	
			54	91	

上段の数字：STEP 1までの結果

下段の数字：STEP 2までの結果

表 2 トレーニングエリア(TRA)に対する多重閾値分類結果(%表示)

Table 2 Classification results (%) for training area by using the multi-level thresholds

カテゴリー	分類結果(%)				
	全画素数	落葉樹	常緑樹	陰	未分類
落葉樹	188	82	5		13
		89	6		5
常緑樹	277	1	86		13
		1	92		7
陰	145		37	63	
			37	63	

上段の数字：STEP 1までの結果

下段の数字：STEP 2までの結果

を承知のうえで閾値設定を行った。これらの表において、常緑樹を落葉樹に分類したものが3画素(1%)、落葉樹を常緑樹に分類したものが11画素(6%)、陰を常緑樹に分類したものが54画素(37%)あった。陰はもともと常緑樹か落葉樹かのいずれかで、輝度の高い陰の部分はその識別もある程度は可能であると考えられ、対象領域の陰の部分においては図2、図3から分かるように常緑樹の方が落葉樹よりも多い。したがって、陰で常緑樹に分類されるものがある程度存在してもよいと考えられる。なお、このような閾値を設定したことにより、落葉樹で陰にある部分が常緑樹として誤分類される危険が生じることに留意する必要がある。

4 おわりに

本手法では、TRA の選定や閾値の設定を人間が判断して行う。したがって、選定される TRA や閾値を変えれば分類結果が大きく変化する可能性がある。しかし、これは本手法の特長でもあり、分類を行う者の知識及び判断が反映された分類結果が得られる。

また、箱ヒゲ表示と散布図によって TRA の特徴と閾値の設定の良否を容易に判定できるため、誤分類率を予測した TRA や閾値の再選定、あるいは分類に有効なバンドの選定とそれらの使用順序の決定とが可能である。すなわち、結果のどのカテゴリーにどの程度の誤分類が含まれているかが使用者には不明であるような従来の自動分類法とは異なり、本手法は閾値の設定と分類アルゴリズムの決定段階において、分類を行う者自身がどの程度の誤分類を含む結果が得られるかを予想することができるという利点がある。

本手法における「分類」とは、選定した TRA に分光特性が一致するデータを切り出すことである。したがって、未分類の判定不能領域の存在を容認する立場をとる。しかし、未分類領域の大きさは、選定する TRA や閾値の設定方法、組み合わせるバンド数、分類を行う者の目的に依存し、調整が可能である。

本手法はデータの分布に特定なモデルを仮定せず、データに即して段階的に分類を行うため、本例の「植生」のように、データが多次元空間に類似した分光特性を持って、複雑に分布しているような対象に対して特に有効であると考えられる。

本手法では、単一バンドでの箱ヒゲ表示と二つのバンドでの散布図とから、視覚的に最適な閾値を判断し、それらの選定を行うことができたが、組み合わせるバンド数を増加すれば、視覚判断に適するデータの分布の表示が困難となるため、閾値選定を自動的な選定アルゴリズムによる計算機処理に頼るか、多くても三つのバンドの組み合わせ(三次元表示)にとどめて未分類領域を残すことになる。また、バンド数が k 倍に増えると、全バンドの箱ヒゲ表示を行うための計算時間と、二つのバンドのすべての組み合わせにおける散布図を作成するための計算時間との合計は約 k^2 倍となり、それらの出力結果のすべてを検討して閾値を選定するためにも多くの時間を要する。

以上の問題の適切な解決と、本手法をさらに拡張して、分光特性のほかに対象の形状や画像の空間情報も利用する分類手法の開発が、今後の研究課題である。

引用文献

- Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. J. Stone (1984) : Classification and Regression Trees. Wadsworth International Group, Belmont-California, 358p.
- 土井康弘・安藤 繁(1980) : 画像処理論. 昭晃堂, 東京, 216p.
- 藤村貞夫・豊田弘道・愛甲 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.
- Hoaglin, D. C., F. Mosteller and J. W. Tukey (1983) : Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. John Wiley & Sons, Inc., New York, 447p.
- 稲村 実・豊田弘道・上田和紀・大森隆司・藤村貞夫(1979) : Binary Decision Treeによる多重分光画像の高速処理. 計測自動制御学会論文集, **15**(4), 486-491.
- 下川雅嗣・倉掛正治・藤村貞夫・豊田弘道(1983) : 分類における正規性と標本の代表性. 第22回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 665-666.
- Rosenfeld, A. and C. Kak (1976) : Digital Picture Processing. Academic Press, Inc. *In* : Translation into Japanese by Nagao, M. (1978), Kindaikagakusha, Tokyo.
- 辻内順平編著(1981) : 応用画像解析. 共立出版, 東京, 434p.
- Tukey, J. W. (1977) : Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 688p.
- 和達清夫・土屋 清・安田嘉純・江森康文・飯坂譲二・長尾 真編著(1976) : リモートセンシング. 朝倉書店, 東京, 280p.

II-9 ランドサット MSS データによる植生相観の対話型分類法 An Interactive Classification of Vegetation by Using LANDSAT MSS Data

袴田共之¹・横田達也²・廣崎昭太²

Tomoyuki HAKAMATA¹, Tatsuya YOKOTA² and Shota HIROSAKI²

要 旨

ランドサット MSS データによる植生分類に、主成分分析による要約結果を利用する際、分類に有効な季節の違いを示す主成分の固有値が、実用的な大きさ(>1.0)となる必要がある。埼玉県西部の6地域を選定し、MSSの各チャンネル×6時期からなる多次元データにつき主成分分析を行い、1, 3, 4, 5, 10, 12月の6時期から分類に適した時期を選定した。その結果、春と秋(又は冬)からなる3~4回のデータを使って、第3主成分までで80%以上の情報を要約でき、季節間の差を表す有効な情報が抽出された。得られた主成分スコアを使用して、探索的データ解析に基づく多重閾値法による植生分類を行い、既存の方法に比べ精度の良い分類結果を得た。

Abstract

Principal component analysis is useful to summarize multiseasonal data of the LANDSAT MSS (Multispectral scanner) to classify vegetation. It is valuable for the eigenvalue of principal component which represents seasonal difference of vegetational reflectance to be larger than unity. The six fields in the western part of Saitama prefecture and six months (January, March, April, May, October and December) were selected to analyze the MSS data by using an interactive computer software. The first three components could involve more than 80% of the information derived from less than four data-sets of spring and fall (or winter). These emphasized successfully the seasonal difference of vegetation. The main vegetations could be more accurately classified by using the principal component scores and the exploratory multi-threshold method than the former method.

1. 国立公害研究所 水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Water and Soil 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.

1 はじめに

植生図の作成は、環境庁の自然環境保全基礎調査その他において数多く実施されており(宮脇編, 1983; 環境庁, 1976, 1981), 国土の利用や自然環境保全等の基礎資料として重要である。植生図は、図化の対象, 目的, 方法, 縮尺などにより多様なものが存在する(宮脇, 1968)。従来植生学分野で作成されているものは、表現方法により、植物社会学的植生図と相観的植生図とに分けられる。前者は、植物群落の種組成を基準にした植生単位で表す植生図である。それに対し、後者は、群落の相観、すなわち植生の高さ、密度、樹齡、生活形などの形質を総合的に区分して作られ、優占種群落などを基準として表す植生図である。相観的植生図はそれ自体で使われると共に、植物社会学的植生図を作成する時の素図とすることも多い(鈴木ら, 1985)。

他方、リモートセンシングの植生図作成への応用は、相観的植生図の作成に空中写真が従来使われていたため、比較的早くから試みられてきた。特に、衛星データを利用すれば、広域的・同時に植生図を作成し、細密な調査の面的拡大や経年的変化の把握を効果的に行い得ると期待されるため各種の試みがなされている。

よく使われる分類手法としては、最尤法やクラスター分類、判別分析など、データに正規性を仮定した統計的な分類手法が依然として多い(Fox ら, 1985; Kachhwaha, 1983; 大嶋ら, 1985; Pokrant & Wilson, 1984; Strahler, 1981)。また、コンピュータ利用の方式は、従来、バッチ型利用が多かったが、近年は対話型利用が増えているように見受けられる。植生分類においては、季節による分光特性の変化が重要な情報となるため、2時期のデータを供試することもある(リモート・センシング技術センター, 1981; Ducros-Gambart & Gastell-Etchegorry, 1984)が、それ以上の時期のデータを使う時には、主成分分析によりデータを要約して供試することが行われる。ところが、その際、時期の選択が適切でないため肝心の季節変化の情報が極めて少ないままで分類に供されることがあり注意を要する。

我が国でも、既に各種の目的のために衛星データを利用した植生図が作成され(日本造船振興財団, 1982; 奥石, 1983), 関連する経験のとりまとめも行われている(大貫, 1981)。しかし、植生図の作成が、客観的なデータと方法論に基づき行われるとはいえ、理論的・経験的蓄積も同時に要求されるため、衛星データによる植生図作成法は普遍的方法として確定できる段階とは言いがたく各種の試行を重ねる段階にあるといえる。

そこで、上述のような現状認識にたつて、ランドサット MSS (Multispectral scanner) データを使用して特定地域の主要な群落につき表層の植生に着目した相観的植生図を作成する方法を以下のとおり検討した。

2 研究方法

供試データとして、宇宙開発事業団地球観測センター提供のランドサット 2号及び 3号富士山シーン(パスローウ番号: 116-35)から 6時期(1979年 5月22日, 10月31日, 12月15日, 1981年 1月

23日, 3月18日, 4月23日)のMSS データを選定した。未補正 CCT (Computer compatible tape) を使用し, 次のような補正を施した後, 植生分類に供した。

- ① ラジオメトリック補正：累積頻度曲線法(前田ら, 1980)
- ② 幾何補正：3次多項式を用いたブラックボックス補正法(村井, 1980)
- ③ 再配列(リサンプリング)：最近隣内挿法によるユニバーサル横メルカトル座標への投影(村井, 1980)

幾何補正の精度は, 地上基準点の実測座標と計算画像座標との差が1画素以内であった。

使用した画像は, 東経138度41分より139度21分, 北緯35度44分より36度17分の範囲で, 南北方向1,244画素(ライン), 東西方向1,226画素(ピクセル)となり, 画素サイズは南北方向50.03m, 東西方向50.02mであった(以下, ライン, ピクセル数を示す時は北東隅を基点とする)。これらのうち, 検討に供した地域の地図を図1に掲げた。

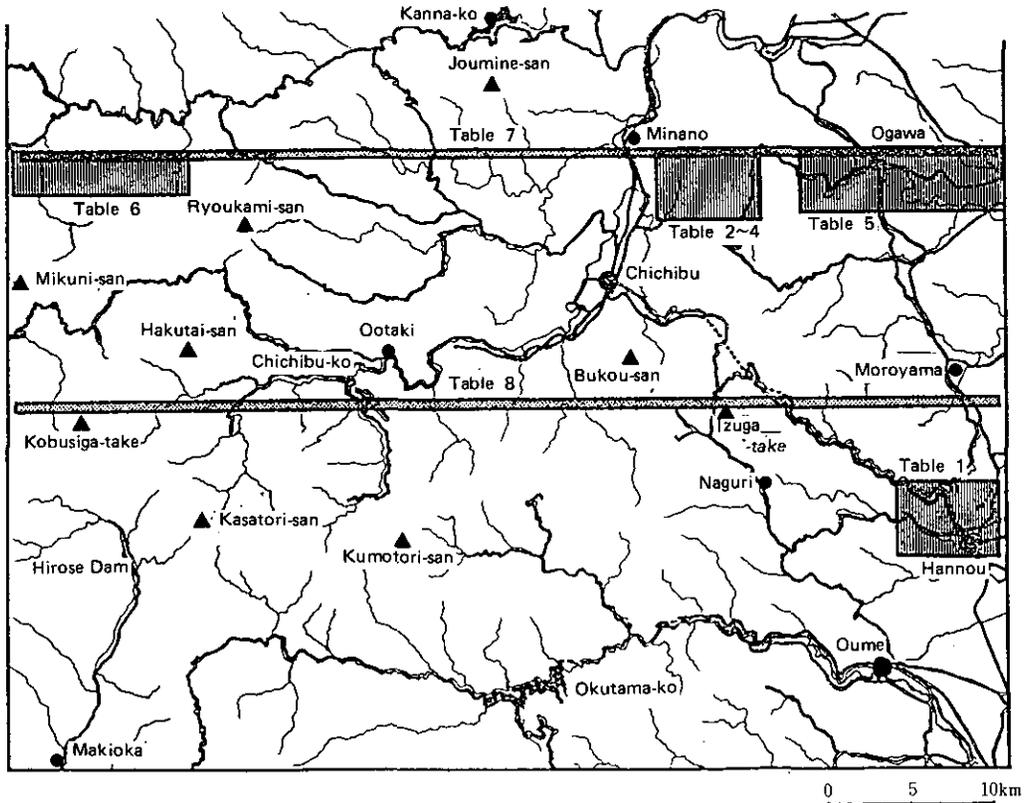


図 1 トレーニングエリア及びその周辺地域

ハッチをつけたエリアのデータで各表の検討を行った。左右下の縁取線は切り出したランドサットデータの境界を示す。

Fig. 1 Chichibu district and the training area

Results of every tables were gained from the data on the hatched area. Left, right and lower boader line show the edges of the LANDSAT data cut out for the study.

これらのデータに対し会話型プログラム(廣崎ら, 1986)により相関係数から出発した主成分分析を行い, 植生の季節変化を良く表すと考えられた分析結果に基づき, 埼玉県飯能市周辺を対象に探索的多重閾値法(横田, 1987)による植生分類を行い, いくつかの群落を対象とした相観的植生図を試作した。これらの作業は, 国立公害研究所の HITAC M-280H 及び画像処理システム IPSEN により実施した。

3 結果

3.1 分類法の概要

ランドサット MSS データによる植生相観の対話型分類法のプロセスを図2のフローチャートに示した。植生相観の分類のためには異なる季節のデータの利用が有効であるが, 季節の数を増やすほどデータの量も増加するので, 季節を選択した上で, 更にデータを要約する必要が生ずる。そのための前提として, 特定の画素に対応する全季節のデータが, 幾何補正によって, 地上の一定地点にすべて対応付けられている必要がある。また, 特定地域のある主要な群落を分類するのであるから, 分類対象群落を明確にしておくことも重要であり, そのためのトレーニングエリアを対象地域の踏査経験等に基づき選定しておく必要がある。

データの要約のための代表的手法として, 多変量解析法の一つである主成分分析があるが, 植生分類に有効な, 季節の違いを示す主成分の固有値が実用に供し得る大きさ(おおむね1.0以上)となる必要がある。それを効率的に検討するためには, データセットの選定(トレーニングエリアの選定)や変数の選定(季節や MSS バンドの選定)を効率よく行え, また必要に応じてデータに対する変数変換も行えるコンピュータープログラムが必要となる。そのようなプログラムとして国立公害研究所で開発した CDA がある(廣崎ら, 1986)。本報の主成分分析はすべて CDA によって実施したものである。

以上の操作により得られた主成分スコアを使って, 探索的多重閾値法による植生分類を行う。本手法の詳細については横田による報告がある(横田, 1987)が, 以下のような特徴を有する。

- ① トレーニングデータの分布形に特別な仮定(例えば正規分布など)を必要としない。
- ② 「箱ヒゲ表示」(Box-and-whisker plots; Tukey, 1977)を用いて, 最適なバンド(本報の場合には主成分の軸)と分類のための閾値を選定することができる。さらに一度分類した結果を見て, 使用バンド, トレーニング領域, 閾値を選定し直し, 現実により合致した分類結果を得ることができる。
- ③ 単一バンドで分類しやすい対象から順に分類し, 次いで, 判定しにくい領域に対して二つのバンドの組み合わせなどで分類することにより, 高速で低コストな分類を行うことができる。
- ④ 結果の中に分類不能領域を示すことにより, 分類精度の信頼性を低下させない。また, これらの領域については, 他の情報(形状やテキスチャーなどの空間情報, 標高等の地形データ等々の補助データ)を用いることで, 分類される可能性が残されている。どこまで判定不能領域を減らす必

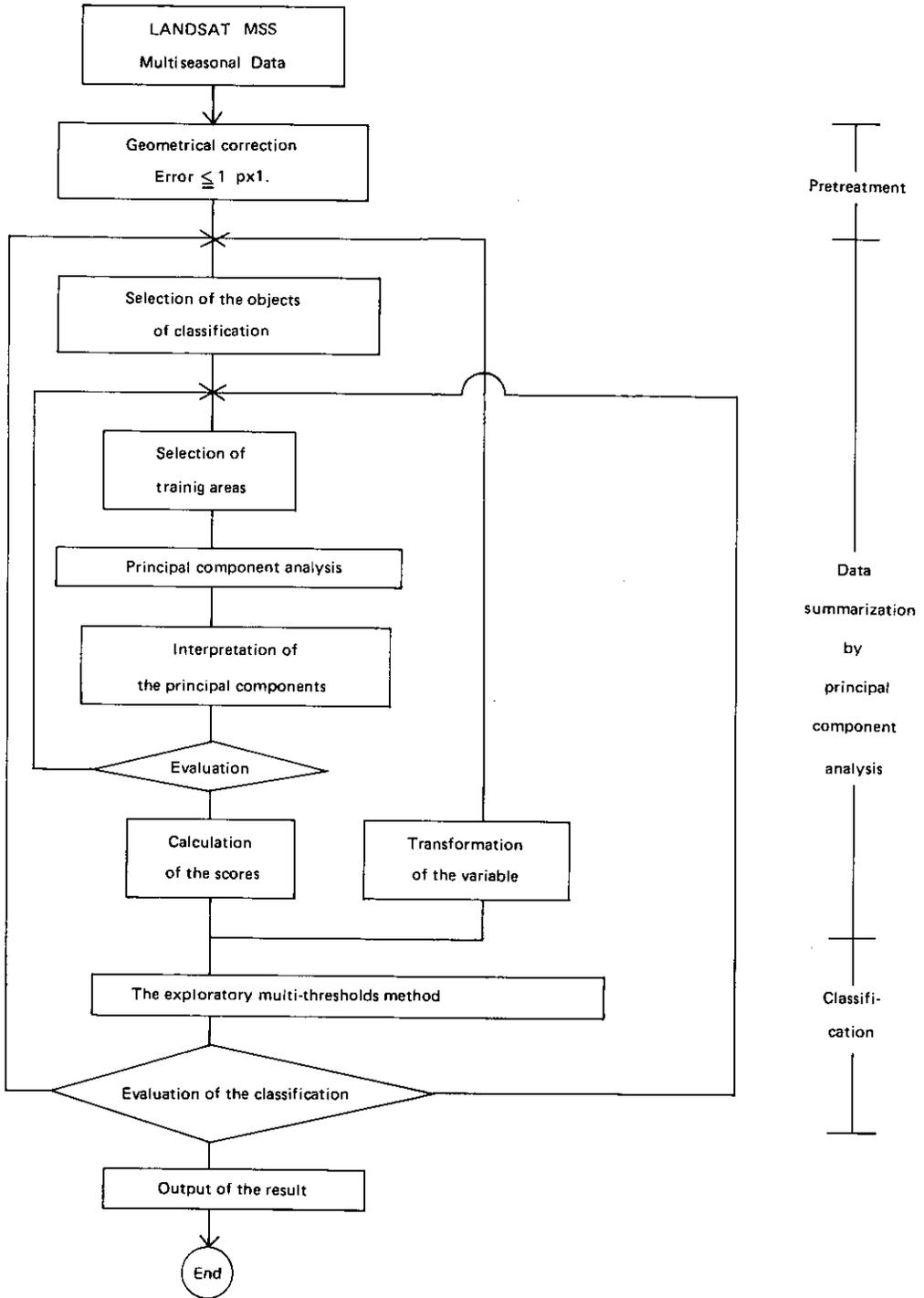


図 2 分類の概要

Fig. 2 Outline of the classification

要があるかは、結果の使用目的によって決まる。

MSS データを用いた分類手法としては、従来より様々な手法が提案されているが、ここでは画像中の水域、植生領域、人工物領域というような、対象の分光特性の明らかに異なるものを主眼にして分類するのではなく、植生領域の中をさらに細かく分類することを目的としているので、分光特性の近い領域を精度良く、効率的に分類する必要がある。また、特性が類似した対象を分類するのであるから、判別のつかない領域も生じ得る。このような領域については、無理に分類を行って誤った結果を与え、結果の信頼性を落とすことを避けるため、それらを分類不能領域として示す分類手法を採用した。

このように図2の対話型分類法は、植生分類の技術と情報処理の技術の両分野の経験を生かしながらも、それにとらわれることなくデータを多面的に解析し、試行錯誤を積極的に取り入れた方法(芳賀, 1985)である。

3.2 主成分分析の結果

従来、主成分分析を応用するに当たって固有値が小さい主成分をも分類に使用するケースが見られたが、対象エリア内のいくつかの代表的な植生域における主成分分析の検討結果に基づいて応用するならば、分類の精度はより向上する可能性が考えられる。ここで対話型操作により選択すべき要因として、① トレーニングエリア、② 季節、③ MSS のバンド、④ 探索的多重閾値法に使用すべき主成分軸、があげられる。これらのうち、③については、植生に対する分光特性に基づくバンド間演算等の研究が進んでいる(例えば Perry & Lautenschlager, 1984)ので、選択の対象から除外し主成分軸の解釈に当たってのみ考察を加えるにとどめた。また、④については、本報告では固有値が1.0以上の軸を選択の最低基準とした。したがって、本節では地域及び季節の選択を中心として検討する。

対象画像領域から植生、地形などに特徴のある6地域を取り上げ検討を加えた。6地域とは、飯能市周辺、皆野町近傍、小川町周辺、両神山近傍、小川町から両神山にかけての帯状地帯、毛呂山町から雲取山にかけての帯状地帯である。これらの各地域につき季節及び地形について検討した結果を、因子負荷量により判断した各主成分の意味付けを中心にして以下に示す。

3.2.1 季節についての検討

飯能市周辺(1, 4, 5, 12月;表1)……多時期のランドサットデータから主成分スコアを求めた場合、時期の違いがどの程度の固有値または寄与率で得られるかが重要であるが、しばしば経験するのは、重みづき平均>近赤外部と可視部との差>時期の違いという順序である。そのような例として、1, 4, 5, 12月のデータを使って得た結果を表1に掲げた。重みづき平均、近赤外部と可視部との差、主として近赤外部における春と冬の差が、それぞれ第1, 第2, 第3の主成分に現れている。

表 1 秩父地方飯能市周辺の矩形地域のランドサット画像の主成分分析結果
(128ピクセル×90ライン; 出発点: 10ピクセル, 901ライン)

Table 1 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images for a rectangular part near Hannou-city (128 pixels×90 lines, Starting point : 10th pixel, 901st line) in Chichibu district

Principal components	1	2	3	1	2	3	
Eigen value	8.90	2.82	1.60	—	—	—	
Contribution (%)	55.6	17.6	10.0	—	—	—	
	Factor loadings			Eigen vectors			
Jan.	Band 4 *	.87	-.25	-.11	.29	-.15	-.09
	Band 5	.91	-.22	-.07	.30	-.13	-.06
	Band 6	.71	.44	-.34	.23	.26	-.27
	Band 7	.54	.62	-.32	.18	.37	-.26
Apr.	Band 4	.86	-.35	.04	.29	-.21	.03
	Band 5	.87	-.38	.03	.29	-.22	.02
	Band 6	.81	.26	.24	.27	.15	.19
	Band 7	.61	.52	.32	.21	.31	.26
May	Band 4	.79	-.46	.11	.26	-.27	.09
	Band 5	.78	-.51	.04	.26	-.31	.03
	Band 6	.64	.28	.63	.22	.17	.50
	Band 7	.43	.49	.68	.14	.29	.54
Dec.	Band 4	.81	-.26	-.17	.27	-.15	-.13
	Band 5	.88	-.22	-.11	.29	-.13	-.09
	Band 6	.67	.46	-.38	.23	.28	-.30
	Band 7	.53	.64	-.36	.18	.38	-.29

皆野町近傍(1, 4, 5, 10, 12月; 表2)……第1主成分は5月を除く各月の重みづき平均値であり、5月の情報は第2主成分に現れている。第3主成分は4月と10月との差、第4主成分は(12月の全バンドと5月の可視部)と(1, 4月の可視部)との差を示している。第5主成分は主として5月の近赤外部と可視部との差を示すが、さらに10月の近赤外部と1月の可視部がそれぞれプラス、マイナスの符号で加わっている。このように、第4, 5主成分は固有値がそれぞれ1.21, 1.10と小さい上に、複雑な内容を含むので、実際のカテゴリ用としては供しにくいと考えられる。

皆野町近傍(4, 5, 10月; 表3)……そこで、明りょうな季節的特徴を示したと考えられた4, 5, 10月のデータセットをピックアップして主成分分析を施した。第3主成分までは表2の結果と類似しており、第1主成分は5月の特に可視部の情報が少ないが、各月の重みづき平均値を示し、第2主成分に5月の情報が強く現れている。第3主成分は4月と10月との差である。第4主成分は前の表の結果と異なり5月の近赤外部と可視部との差を示し、第2主成分と併用するとよりきめ細かな分類の可能性が期待されるが、固有値が0.96であり有効な情報とは言えない。

皆野町近傍(4, 10月; 表4)……表2, 3の結果から5月と4, 10月とは明りょうに異なると考

表 2 秩父地方皆野町近傍の矩形区域の5時期のランドサット画像の主成分分析結果(128ピクセル×90ライン, 出発点:301ピクセル, 501ライン)
 Table 2 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images of five seasons for a rectangular part near Minano-town (128 pixels×90 lines, Starting point : 301st pixel, 501st line) in Chichibu district

Principal components		1	2	3	4	5
Eigen value		10.21	3.23	1.69	1.21	1.10
Contribution (%)		60.5	16.2	8.5	6.1	5.5
Factor loadings						
Jan.	Band 4	.73	.24	-.03	-.35	-.37
	Band 5	.83	.18	-.09	-.27	-.28
	Band 6	.89	-.09	-.17	-.02	-.21
	Band 7	.87	-.14	-.19	.01	-.17
Apr.	Band 4	.66	.22	.56	-.23	-.00
	Band 5	.65	.39	.45	-.31	-.03
	Band 6	.76	-.02	.48	.04	.02
	Band 7	.76	-.04	.44	.07	.02
May	Band 4	.10	.84	-.23	.32	-.27
	Band 5	.11	.80	-.22	.30	-.38
	Band 6	.25	.84	-.03	.06	.42
	Band 7	.26	.77	-.00	.03	.52
Oct.	Band 4	.80	-.16	-.29	-.18	.13
	Band 5	.80	.00	-.37	-.23	.05
	Band 6	.83	-.15	-.38	-.11	.24
	Band 7	.82	-.14	-.40	-.11	.26
Dec.	Band 4	.77	-.18	.17	.32	.07
	Band 5	.84	-.09	.11	.27	.06
	Band 6	.82	-.28	.03	.43	-.00
	Band 7	.81	-.29	.01	.44	-.00

えられるので、4、10月のデータセットについて検討を加えた。第1主成分は両月の重みつき平均値、第2主成分は両月の差を示した。固有値が1.0以上の主成分はここまでで、4月の可視部と近赤外部との差を示した第3主成分は固有値が0.65に過ぎなかった。しかし、2時期以上のデータを供試して主成分分析で要約を行った場合、表1の結果のように可視部と近赤外部との差が、第1主成分の重みつき平均値に続いて第2主成分に現れることがしばしばあるので、そのような場合に比較すれば、表4は特徴ある結果と言えよう。

小川町周辺(1, 3, 4, 5, 10, 12月;表5)……第1主成分は重みつき平均値であり、第2主成分は、4、5月と12、1月の近赤外部との差を表している。第3主成分は3月と12月の近赤外部との差を示している。

表 3 秩父地方皆野町近傍の矩形区域の3時期のランドサット画像の主成分分析結果(128ピクセル×90ライン)

Table 3 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images of three seasons for a rectangular part near Minano-town (128 pixels×90 lines) in Chichibu district

Principal components		1	2	3	4
Eigen value		5.36	2.92	1.61	0.96
Contribution (%)		44.7	24.3	13.4	8.0
		Factor loadings			
Apr.	Band 4	.74	.05	.53	-.04
	Band 5	.73	.20	.44	.03
	Band 6	.78	-.16	.47	-.14
	Band 7	.76	-.16	.44	-.13
May	Band 4	.22	.85	-.21	-.41
	Band 5	.20	.81	-.19	-.51
	Band 6	.42	.78	-.07	.42
Oct.	Band 7	.43	.70	-.04	.54
	Band 4	.80	-.33	-.33	-.07
	Band 5	.81	-.19	-.40	-.10
	Band 6	.82	-.32	-.42	.06
	Band 7	.80	-.30	-.44	.09

表 4 秩父地方皆野町近傍の矩形区域の2時期のランドサット画像の主成分分析結果(128ピクセル×90ライン)

Table 4 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images of two seasons for a rectangular part near Minano-town (128 pixels×90 lines) in Chichibu district

Principal components		1	2	3
Eigen value		5.13	1.67	0.65
Contribution (%)		64.1	20.9	8.1
		Factor loadings		
Apr.	Band 4	.73	.57	.27
	Band 5	.69	.51	.45
	Band 6	.81	.44	-.36
	Band 7	.79	.40	-.43
Oct.	Band 4	.85	-.37	.04
	Band 5	.83	-.39	.21
	Band 6	.86	-.46	-.05
	Band 7	.84	-.48	-.04

表 5 秩父地方小川町周辺の矩形区域のランドサット MSS 画像の主成分分析結果 (256ピクセル×79ラインのうち最初の20,000ピクセル, 出発点: 1ピクセル, 501ライン)

Table 5 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images for a square part around Ogawa-town (The first 20,000 pixels of 256 pixels ×79 lines, Starting point: 1st pixel, 501st line) in Chichibu district

Principal components		1	2	3
Eigen value		17.66	1.79	1.24
Contribution (%)		73.6	7.5	5.2
		Factor loadings		
Jan.	Band 4	.85	-.03	.06
	Band 5	.88	-.16	-.02
	Band 6	.88	-.31	-.08
	Band 7	.84	-.37	-.11
Mar.	Band 4	.81	-.08	.48
	Band 5	.81	-.22	.48
	Band 6	.83	-.20	.46
	Band 7	.81	-.25	.44
Apr.	Band 4	.86	.34	-.05
	Band 5	.87	.35	-.02
	Band 6	.90	.30	-.05
	Band 7	.89	.24	-.08
May	Band 4	.85	.43	.05
	Band 5	.83	.34	.04
	Band 6	.82	.46	.05
	Band 7	.81	.42	.01
Oct.	Band 4	.90	-.10	-.11
	Band 5	.90	-.15	-.09
	Band 6	.89	-.23	-.17
	Band 7	.87	-.28	-.21
Dec.	Band 4	.87	.10	-.15
	Band 5	.90	-.07	-.23
	Band 6	.88	-.19	-.26
	Band 7	.82	-.30	-.31

3. 2. 2 地形が複雑な地域についての検討

比較的狭い区域を分類の対象とする場合は、主成分分析のために選んだのと同じ区域で植生分類を行えば良いが、広くなるほど困難が増し実用的でなくなる。今回、検討のために準備した画像領域(埼玉県西部)の全体は広域(1,244×1,226画素)な上に、おおむね東から西へと標高が高くなり複雑な地形を示している。そのような地域においては、比較的狭い地域で主成分スコアを求め、それを使って全体等のより広い範囲の分類を行うことが現実的である。主成分スコアを求めるための地域として、低標高から高標高の地点までを含む地域をとることが考えられる。以下に3地域について

て検討した結果を示す。

両神山近傍(表 6)……第 1 主成分はすべての時期とバンドの重みづき平均値であり、寄与率が大きく、本データの持つ情報の大部分を要約している。第 2 主成分は、近赤外部と可視部との差、特にバンド 6 と 4 との差を中心とした情報を含んでいる。近赤外部と可視部との差は、一般に、例えばランドサット MSS データのバンド 7 と 4 との差と和の比が Vegetation Index としてしばしば使われるように、植生についての重要な情報を含んでいる。第 3 主成分は、1, 3 月以外のバンド 7 と 1, 3 月のバンド 5 (または 6) との差を示している。これは、雪や岩肌の状態(影の状態を含む)を反映している可能性がある。この地域のように起伏の激しい高山地帯(標高は約 500m から約

表 6 秩父地方両神山近傍の矩形区域のランドサット画像の主成分分析結果(220ピクセル×50ライン, 出発点:1,001ピクセル, 501ライン)
 Table 6 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images for a rectangular part near Ryokami-san (220 pixels×50 lines, Starting point : 1,001st pixel, 501st line) in Chichibu district

Principal components		1	2	3
Eigen value		16.87	2.80	1.33
Contribution (%)		70.3	11.7	5.5
Factor loadings				
Jan.	Band 4	.87	-.36	-.11
	Band 5	.86	-.08	-.41
	Band 6	.81	.34	-.37
	Band 7	.87	.09	.04
Mar.	Band 4	.86	-.41	-.07
	Band 5	.85	-.22	-.36
	Band 6	.88	.30	-.27
Apr.	Band 7	.89	-.00	.16
	Band 4	.86	-.40	.17
	Band 5	.90	-.23	-.14
	Band 6	.85	.45	-.07
May	Band 7	.83	.30	.30
	Band 4	.80	-.41	.20
	Band 5	.80	-.44	-.10
	Band 6	.74	.60	.01
Oct.	Band 7	.64	.59	.35
	Band 4	.83	-.38	.23
	Band 5	.89	-.18	-.10
	Band 6	.82	.45	-.06
Dec.	Band 7	.81	.17	.36
	Band 4	.90	-.22	.15
	Band 5	.93	-.05	-.06
	Band 6	.81	.44	-.14
Band 7	.77	-.09	.46	

1,500m までで標高差は最高約1,000m) では、季節変化の情報は第2以下の主成分軸に分散される傾向にあると考えられる。

次に、低標高から高標高までを帯状にとった場合について示す。

小川町から両神山にかけての帯状地帯(表7)……第1主成分は、重みづき平均、第2主成分は近赤外部と可視部との差、第3主成分は近赤外部の5月と12月との差、第4主成分はやや複雑な内容を示しているが、季節の違いを表していると考えられる。

飯能市から雲取山にかけての帯状地帯(表8)……第1主成分は、重みづき平均、第2以下の主成分はかなり複雑であるが、近赤外部と可視部との差が季節の特徴に応じて異なる主成分に現れると

表 7 秩父地方小川町西部の帯状地帯のランドサット MSS 画像の主成分分析結果(1,200ピクセル×10ライン, 出発点:10ピクセル, 501ライン)

Table 7 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images for a band area of a western part of Ogawa-town (1,200 pixels×10 lines, Starting point : 10th pixel, 501st line) in Chichibu district

Principal components		1	2	3	4
Eigen value		14.06	2.94	2.03	1.19
Contribution (%)		58.6	12.3	8.5	5.0
		Factor loadings			
Jan.	Band 4	.79	-.16	.27	-.24
	Band 5	.85	-.06	.22	-.23
	Band 6	.83	.35	-.09	-.13
	Band 7	.74	.51	-.13	-.11
Mar.	Band 4	.84	-.36	-.01	-.19
	Band 5	.84	-.29	-.07	-.27
	Band 6	.84	.16	-.15	-.21
	Band 7	.74	.36	-.12	-.22
Apr.	Band 4	.83	-.43	.05	.17
	Band 5	.81	-.38	.28	.06
	Band 6	.84	.03	-.00	.38
	Band 7	.76	.23	.03	.40
May	Band 4	.77	-.42	.22	.11
	Band 5	.74	-.52	.12	.05
	Band 6	.36	.33	.83	.11
	Band 7	.24	.46	.82	.10
Oct.	Band 4	.81	-.28	-.26	-.09
	Band 5	.84	-.25	-.11	-.20
	Band 6	.75	.43	-.08	-.23
	Band 7	.65	.57	-.02	-.26
Dec.	Band 4	.83	-.21	-.21	.25
	Band 5	.87	-.07	-.10	.22
	Band 6	.78	.32	-.32	.31
	Band 7	.70	.45	-.31	.30

言える。つまり、第2主成分は、5、4月の可視部とその他の月の近赤外部との差、第3主成分は、5月の近赤外部と10月(及び12月)の可視部との差、第4主成分は、5月、10月の近赤外部と3月、4月の可視部との差、第5主成分は、12月と10月の近赤外部、3月の可視部との差を示すという解釈が可能である。また、第6主成分は1月の可視部を示すが、固有値は0.96であった。

以上の検討の結果、春と秋(又は冬)の時期のデータを選択して主成分分析を行った場合、季節間の差を表す主成分の固有値が1.0より大きく、かつ、おおむね第3主成分までにはほとんど(累積寄与率80%以上)の情報を要約できることが多かった。

表 8 秩父地方毛呂山町西部の帯状地帯のランドサット MSS 画像の主成分分析結果(1,200ピクセル×10ライン、出発点:10ピクセル, 801ライン)

Table 8 Results of principal component analysis of LANDSAT MSS images for a band area of a western part of Moroyama-town, (1,200 pixels × 10 lines, Starting point : 10th pixel, 801st line) in Chichibu district

Principal components		1	2	3	4	5	6	1	2	3
Eigen value		12.72	2.80	2.03	1.76	1.38	0.89	—	—	—
Contribution (%)		53.0	11.7	8.5	7.3	5.8	3.7	—	—	—
		Factor loadings						Eigen vectors		
Jan.	Band 4	.76	.08	.19	-.11	-.16	.52	.214	.050	.130
	Band 5	.84	.05	.17	-.12	-.12	.45	.234	.032	.120
	Band 6	.85	-.38	.11	.02	.09	.26	.237	-.230	.080
	Band 7	.78	-.48	.15	.06	.11	.22	.219	-.287	.102
Mar	Band 4	.77	.22	.02	-.32	-.32	-.08	.216	.134	.011
	Band 5	.78	.24	.06	-.33	-.34	-.03	.218	.141	.044
	Band 6	.80	-.35	.08	-.16	-.26	-.22	.223	-.207	.054
	Band 7	.73	-.46	.15	-.11	-.25	-.22	.204	-.274	.106
Apr.	Band 4	.77	.36	-.12	-.28	.09	-.14	.217	.217	-.087
	Band 5	.74	.42	.08	-.32	-.03	-.05	.209	.253	.057
	Band 6	.81	-.21	.13	-.27	.16	-.27	.227	-.123	.091
	Band 7	.75	-.33	.25	-.23	.14	-.25	.210	-.200	.178
May	Band 4	.62	.61	-.00	.24	.17	-.04	.175	.364	-.001
	Band 5	.72	.54	-.02	-.06	.05	.03	.202	.321	-.016
	Band 6	.34	.41	.68	.47	.00	-.10	.094	.242	.480
	Band 7	.26	.28	.76	.48	-.02	-.13	.072	.167	.532
Oct.	Band 4	.67	.20	-.56	.29	-.00	-.10	.187	.119	-.395
	Band 5	.73	.18	-.47	.24	-.23	-.02	.204	.105	-.328
	Band 6	.69	-.25	-.26	.48	-.32	-.05	.193	-.148	-.186
	Band 7	.63	-.31	-.15	.50	-.39	-.02	.175	-.185	-.107
Dec.	Band 4	.76	.25	-.30	.10	.36	-.02	.214	.149	-.213
	Band 5	.84	.20	-.18	.02	.30	.05	.236	.122	-.125
	Band 6	.79	-.33	-.05	.11	.43	-.01	.222	-.195	-.037
	Band 7	.74	-.41	.03	.13	.43	.01	.206	-.247	.020

3.3 植物相観の分類結果

表1の主成分分析で得られたスコア(表1の右側に示した固有ベクトルを使用した線形加算値)を使用して探索的多重閾値法により植生分類を行った結果を図3に掲げた。比較対象のために、標準的な既存の方法(リモート・センシング技術センター, 1981)で図3と同様な地域につき植生分類を行った結果を図4に掲げた。図3と図4とを比較すると、図4における「広葉樹及び針広混交林」(薄緑色)からコナラ・クリ林を中心とする「落葉広葉樹林」(図3の黄色)を単独で引き出し、針葉樹林に分類されたもの(図4の緑)が、スギ・ヒノキ・サワラ林(図3の緑)とアカマツ林(図3の青)に区別されるなど分類の精度を一層向上させることができたと言えよう。

次に、表8の分析結果において得られた主成分スコアの計算式(第3主成分までの固有ベクトルを表8の右側に示した)を使用して、トレーニングエリアより広い地域について分類した結果を図5に掲げた。この結果は、全般に各群落を実際より狭く区分している傾向がある。特に、ミズナラ林は何度かの試行によっても実際との隔たりが目立った。これは、クリ・コナラ林との区別が不十分であったためである。

飯能市周辺の二つの分類結果(図3, 4)を20万分の1の植生図(環境庁, 1976)と比較すると、大きな植生塊についてはいずれも良好な結果が得られた。これは、当地域の植生構成が比較的単純であることに負うところが大きいと考えられる。しかし、5万分の1の植生図(環境庁, 1981)と比較すると、植生界や小さな植生塊等での不一致が目につく。これは、ランドサットMSSの空間分解能(約80m)の限界と共に、植生図が林床植物をも含む種構成を基準にして作成されている(植物社会学的植生図)ことにもよっている。したがって、本研究の対象とすべき植生図としては、群落の最表層に着目した相観的植生図を考えるべきであろう。しかし、地形、標高、気象、土壌等の補助情報が使えれば植物社会学的植生図の作成も可能であると期待される。図3の結果も補助データを用いていないことを考慮すれば、一層改良の余地があると言えるが、秩父地域の植生については、標高により分布する植物群落が異なることが報告されている(永野, 1980)ので、補助データとして標高を導入することは有効と期待される。上に述べたミズナラ林は、コナラ・クリ林と分光特性が似ているが、この2林は標高によって識別可能な代表例であり、図5も標高データを補助データとして使えば一層実際に近い結果となるであろう。

4 考察

コンピューター技術の発達に伴って、その他の新しい技術や、従来不可能であった技術が新たに実用化されるケースは多い。それらの多くは人間の能力を補って現代文明に新たな変化をもたらしている。リモートセンシング技術の発達もその一例である。それらの傾向の中で顕著な特徴のひとつとして各種処理の自動化があげられる。リモートセンシングにおける分類操作もその方向での発達が著しい。しかし、植生図の作成などの分野では、本報告の冒頭に記したとおり、植生学分野での理論的・経験的蓄積の活用が不可欠であるので、それらを自動化処理によって置き換えて普遍的

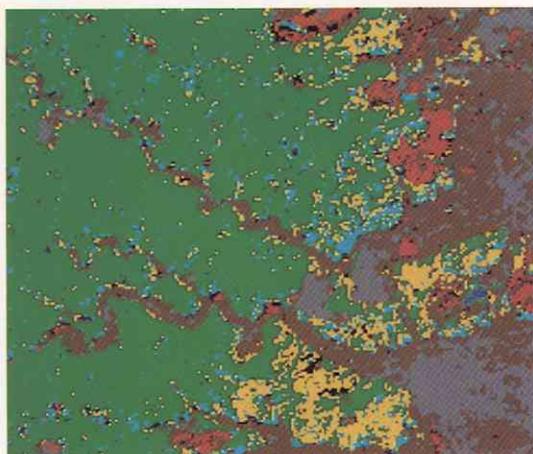


図 3 表 1 のデータによる植生の分類

緑：スギ・ヒノキ・サワラ林，黄：コナラ・クリ林，青：アカマツ林，赤：短草型植生，
茶：植生を伴う生活域，薄灰：市街地，採石場等，紺：開放水域，黒：その他。

Fig. 3 Classification of vegetation by using the data of Table 1

Green : Sugi·Hinoki·Sawara artificial forest, Yellow : Konara·Kuri forest, Blue : Akamatu forest, Red : Short grass type vegetation, Brown : Human habitat with vegetation, Right grey : Urban part or quarry etc., Dark blue : Open water, Black : Others.

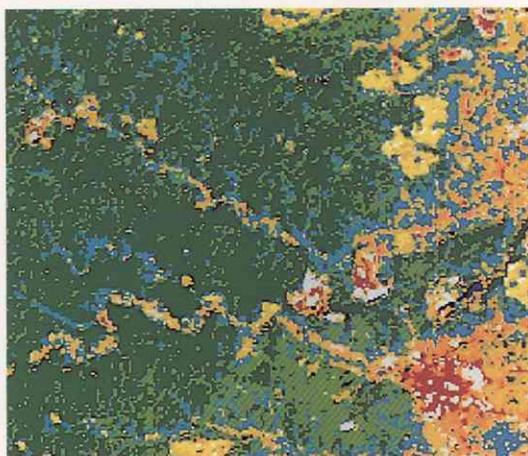


図 4 従来の方法による植生分類

2 時期 (3 月と 4 月) + 国土数値情報土地利用データ，緑：針葉樹林，薄緑：広葉樹 + 針広混交林，黄土：畑，黄：草地

Fig. 4 Classification of vegetation by a usual method

Data of two seasons (March and April) + Land use data from the 'Kokudo suuchi jouhou', Green : Conifer, Right green : Broadleaf tree + Broadleaf tree conifer mixed forest, Ocher/Cyanic : Fields, Yellow : Grasslands.

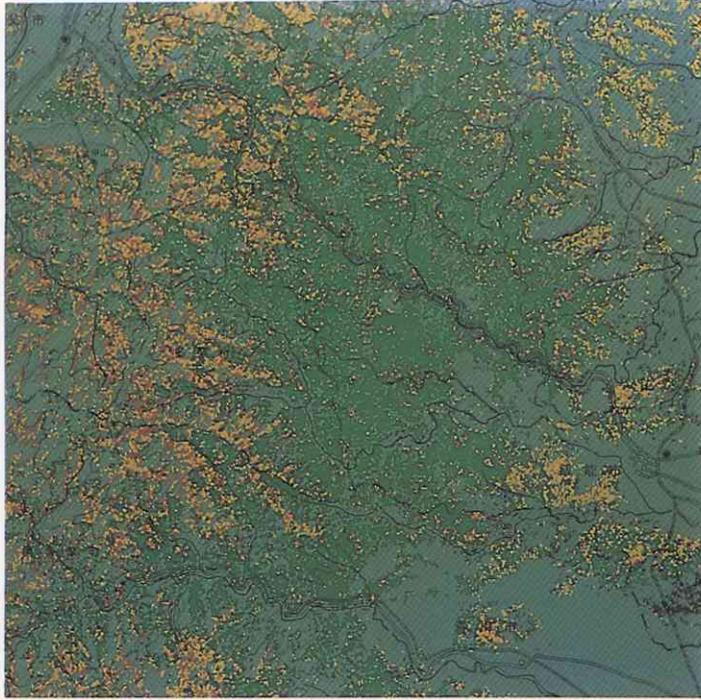


図 5 表 8 のデータによるトレーニングエリアより広い地域の植生分類
緑：スギ・ヒノキ・サワラ林，黄：コナラ・クリ林，濃茶：水田畑地雑草群落，紫：アカマツ
林，茶：ミズナラ・クリ林，灰：その他。

Fig. 5 Classification of vegetation in the broader area than the training area by using the data of Table 8

Green : Sugi·Hinoki·Sawara artificial forest, Yellow : Konara·Kuri forest, Dark brown : Field weed, Purple : Akamatsu forest, Brown : Mizunara·Kuri forest, Grey : Others.

な自動分類システムを作ることは現時点では極めて困難である。蓄積された植生学の知見とリモートセンシング技術を結び付ける方法としての対話型分類法の存在意義がそこにあると考えられる。この方法は、図2に示した通り、主成分分析によるデータの要約と、多重閾値法による分類とから成るが、いずれも植生学分野の知見を導入しつつ、それらの操作を対話的に遂行しようとするものである。

日本をはじめ温帯地方を中心とする季節変化が明りょうな地帯では、植物に起因する分光特性の季節変化も顕著な特徴であるので、本法はその情報を有効に利用することに重点をおいている。

検討結果から明らかになった要諦と問題点を上げしておくことは有意義であろう。なお、上述の通り、相観植生は最適な主成分スコアが容易に得られたり、それらによる分類が容易に行い得るような対象ではないので、より多くの事例を重ね、帰納的に整理した後、できるだけ一般的な実施基準を明らかにする必要がある。

要諦としては、

- ① 季節変化の大きいと予想されるデータを選定する。おおむね春と秋を中心に2～4時期のデータを用意する必要がある。対象エリアに若干の雲があるような場合には、季節の数を更に1～2だけ増やすことによってその影響をほとんど消すことができる(と、経験的に言うことができる)。春から初夏にかけての植物生育の変化の激しい時期に2時期を選ぶことも検討されたが、季節変化の情報は期待されたほどは含まれていなかった。
- ② トレーニングフィールド(主成分分析用データを得る地域)としては、植生に加えて地形条件についても代表できる地域とするのが良い。その際に必要となる面積に関して、あまり、広すぎる面積を供試すれば、高速のコンピューターを使用しても解析に長時間を要するので、対話型操作にとっては現実的でない。本報告のケースでは11,000～20,000ピクセルで大半の作業を行い、最高65,536ピクセルを供試した場合もあったが、使用したコンピューター(HITAC M-280H)の能力水準ではこの程度を上限の一応の目安として良いであろう。
- ③ 地形が複雑な地域の場合、山陰など特異な条件下の植生もトレーニングエリアとして選定することが必須である。

問題点としては、

- ① 植林された森林のような対象は良好に分類されるが、自然植生の場合は種構成が連続的に変化するなどのため境界が不明りょうなうえ、分類の精度が悪くなることが多い。それに対する手段としては今のところ、現地調査など植生学的な対応により修正を加えることが現実的である。
- ② 小面積の群落などを対象とする場合はセンサーの分解能の問題が大きいですが、既にTM(セマティックマッパー; 分解能, 約30m)がランドサットに搭載されるなどの前進がみられる。
- ③ 分類の精度を上げるためには、標高, 気象, 土壌等の補助情報の導入も有効と考えられる。

今後、本法を各種の事例に適用しつつ改良を加えるなら、実用的な植生図作成専用システムが構築でき、環境保全等にとって有効な役割を果たすことができると期待される。

謝 辞

画像処理に関して、国立公害研究所総合解析部安岡善文博士にお世話になった。深く感謝します。

引 用 文 献

- Ducros-Gambart, D. and J-P. Gastell-Etchegorry (1984) : Automatic analysis of bi-temporal landsat Data. An Application to the Study of the Evolution of Vegetation-covered Areas in Tropical Region. Dig. Int. Geosci. Remote Sens. Symp., 1984 (1), 187-192.
- Fox, L. III., J.A. Brockhaus and N.D. Tosta (1985) : Classification of timberland productivity in Northwestern California Using Landsat, Topographic and Ecological data. Photogramm. Eng. Remote Sensing., **51**, 1745-1752.
- 芳賀敏郎(1985) : 対話型統計ソフトウェアの現状. 数理科学, No. 4, 17-20.
- 廣崎昭太・新藤純子・芳賀敏郎(1986) : 環境データ解析のための対話型データ解析プログラム, CDA 利用マニュアル(第1版), 国立公害研究所研究資料, 第30号, 150p.
- Kachhwaha, T. S. (1983) : Spectral signatures obtained from landsat digital data for forest vegetation and land-use mapping in India. Photogramm. Eng. Remote Sens., **49**, 685-689.
- 環境庁(1976) : 自然環境保全調査報告書(基礎調査), 埼玉県, 縮尺1 : 200,000, 現存植生.
- 環境庁(1981) : 埼玉県現存植生図, 縮尺1/5万.
- 前田 紘・村井俊治・松岡龍治・奥田 勉(1980) : 累積頻度曲線を用いた LANDSAT MSS データのラジオメトリック補正. 写真測量とリモートセンシング, **19**, 4-9. }
- 宮脇 昭(1968) : 植生図の類型と立地評価. 地図, **6**, 1-9.
- 宮脇 昭編(1983) : 日本植生図目録. 改定版, 日本植生便覧, 至文堂, 183-226.
- 村井俊治(1980) : 新体系土木工学, 51. 土木測量. 技報堂, 5-13.
- 永野 巖(1980) : 埼玉県の森林植生(予報). 埼玉県市町村誌総説編, 64-126.
- 日本造船振興財団(1982) : 北海道植生図, 縮尺1/60万.
- 大嶋太市・宮下清栄・菅 雄三(1985) : LANDSAT 5号/TM データによる都市の緑地調査, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第4部, 40, 195-196.
- 大貫仁人(1981) : リモートセンシングデータの森林情報への利用と問題点. 写真測量とリモートセンシング81/特集号 I. 31-35.
- 奥石 肇(1983) : 宇宙からの目を創る新しいセンサ技術. 日本の科学と技術, 222, 41-50.
- Perry, C. R. Jr. and Lautenschlager, L. F. (1984) : Functional equivalence of spectral vegetation indices. Remote Sens. Environ., **14**, 169-182.
- Pokrant, H. and R. Wilson (1984) : Parkland selection in manitoba utilizing landsat computer classification. Proc. Can. Symp Remote Sens., **9**, 789-797.
- リモート・センシング技術センター(1981) : ランドサットデータによる富士山周辺森林の樹種分類画像, RESTEC, No. 6.
- Strahler, A. H. (1981) : Stratification of natural vegetation for forest and rangeland inventory using landsat digital imagery and collateral data., Int. J. Remote Sensing, **2**, 15-41.
- 鈴木兵二・伊藤秀三・豊原源太郎(1985) : 生態学研究法講座 3, 植生調査法 II, 一 植生社会学的

研究法 一. 共立出版, 190p.

Tukey, J. W. (1977) : Exploratory Data Analysis, Addison-Wesley Publishing Co., 688p.

横田達也(1987) : 多重閾値による MSS データの探索的な分類法, 国立公害研究所研究報告, 第107号, 117-132.

II-10 大型レーザーレーダーによる海風前線の構造の観測*

Structure of a Sea-breeze Front Revealed by the NIES Large Laser Radar*

中根英昭¹・笹野泰弘¹
Hideaki NAKANE¹ and Yasuhiro SASANO¹

要旨

国立公害研究所の大型レーザーレーダーを用い、エアロゾルをトレーサーとして海風前線の構造を観測した。

レーザーレーダー信号の解析によって得られたエアロゾル濃度の水平分布と鉛直面内分布画像には明りょうな境界が現れた。これらの境界は、気象データの解析から海風前線に対応するものであることが明らかになった。

エアロゾル濃度分布データの解析と気象データに基づいて、レーザーレーダーが海風前線の構造と運動に関する詳細なデータを提供するものであることを実証した。

Abstract

Structure of a sea-breeze front was observed by the NIES large laser radar using aerosols as tracers. Distinct boundaries were seen on the vertical crosssection of aerosol concentration distribution as well as on the horizontal one. The related meteorological data verified that these boundaries corresponded with the sea-breeze front. Detailed analysis of the aerosol concentration distribution with the aid of meteorological data revealed the structure and motion of the sea-breeze front and determined the related parameters.

1 はじめに

日本では沿岸地域に工業地帯や大都市が発達している。沿岸地域で放出・蓄積された大気汚染物質は、海陸風等の局地風の中によって長距離輸送され、内陸域に大気汚染をもたらす(Kuritaら, 1985; Kurita & Ueda, 1986)。特に海風前線周辺の大気の運動は上昇・下降・乱れを伴ったものであるため、大気汚染物質の蓄積や4上の高濃度大気汚染の出現にとって重要な役割を果たすと

* 本論文の要旨は、J. Met. Soc. Jpn., 64(5), 787-792(1986)に発表した。

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

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

考えられる。

海風前線(湖風前線)の一般的特徴は、野外観測(e. g., Simpsonら, 1977; Keen & Lyons, 1978; Ogawaら, 1986), 水槽を用いた室内実験(e. g., Simpson & Britter, 1980; Mitsumotoら, 1983), 及び数値シミュレーション(e. g., Estoque, 1961; Kondo & Gambo, 1979; Pearson, 1973)等の研究によって明らかになってきた。また, Simpsonら(1977)は, 海風は海上と陸上の大気密度の差によって通常重力流を形成すること, そして, この重力流の先端部分(ヘッド)では, 激しい乱れを伴いながらも全体として孤立した渦状の流れを作っていることを指摘した。しかし, 実際の大気中での海風前線の構造についての観測例は少ない。その理由は, 複雑な構造を持ち, 秒速数 m で移動する海風前線を観測するためには高い時間・空間分解能を持った観測手法が必要となるためである。レーザーレーダーはこのような観測が可能な装置の一つである。

本研究では, エアロゾルをトレーサーとしたレーザーレーダー観測によって, 海風前線の鉛直・水平構造を, 短時間に, 高い空間分解能で観測することに成功した。そして, 海風前線の形やヘッド内部の乱流構造についての知見が得られた。

2 海風前線の内陸部への侵入

海風前線の観測は, 本研究所の大型レーザーレーダー(Shimizuら, 1985)を用いて, 1984年2月15日に行った。観測領域は, 東京の北東約60km, 土浦市や霞ヶ浦を含む10km×10kmの領域(図1中の破線で囲まれた領域)である。この領域の中心から鹿島灘に面する海岸線までの距離は約35kmである。観測領域と海岸線の間には霞ヶ浦と北浦の二つの湖があるが, 他の大部分は海拔20~30mの平らな田畑・山林である。

午前9時の地上天気図によると, この日は, 高気圧が東シナ海にあり低気圧が関東東方1000kmにあるという弱い冬型の気圧配置であった。気圧傾度は9時には0.006mb/kmであったが, 夕方にかけてさらに減少した。このため, 関東地方には, 風向が複雑で風速の小さな風系が現れた。

観測当日は所々に雲が見られたが, 本研究所別団地は場で測定した日中の積算日射量は298.8cal. cm^{-2} であった(山口・藤沼, 1985)。これは7, 8月の晴天日の約2/3に相当する多量の日射量であり, これによって, 内陸部の地面温度が上昇した(例えば, 本研究所大気モニター棟において放射温度計によって測定した地表面温度は, 4時には, -7°C であったが, 11時には最高値 16.2°C に達した)。これに対して, 30km沖合までの鹿島灘の海面温度は, 茨城県水産試験場が行っている定点観測, 海上観測データから, 約 7°C であったと推定される。海面温度の日変化は小さいので, 日中は内陸部の地表面温度の方が高く, 夜間は海面温度の方が高かったと考えられる。この海陸の表面温度の日変化の差に対応して, 内陸部(高層气象台)の気圧の日変化は沿岸部(銚子地方气象台)よりも大きくなった。この2地点で測定された気圧の自記記録チャートを比較すると, 11時までは沿岸部(銚子地方气象台)の方が低圧であったが, 11時~17時の間は内陸部(高層气象台)の気圧の方が低くなり, 17時以降は再び沿岸部が低圧になった。上に示したような沿岸部と内陸部の気圧差の

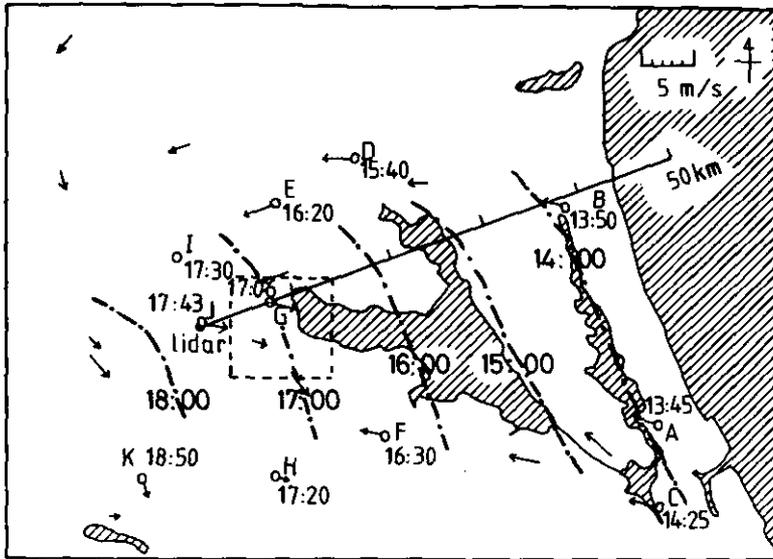


図 1 海風の内陸部への侵入

一点鎖線は14, 15, 16, 17, 18時の海風前線の位置, 矢印は17時の風ベクトルを示す, 点線に囲まれた領域に対してレーザーレーダー観測を行った。

Fig. 1 Inland penetration of the sea breeze

Hatched area are sea or lakes. Measurement sites A-K supplied continuous chart records of wind directions and wind velocities. Dash-dotted lines are the positions of the sea-breeze front at 14:00, 15:00, 16:00, 17:00 and 18:00 JST estimated from the wind data. Arrows are wind vectors at 17:00 JST. Lidar measurement were carried out over the region bounded by the broken line.

日変化は、この日の午後、海風が内陸部に侵入する条件が整っていたことを示している。

図1は、鹿島灘から国立公害研究所西方にかけての地域の地図中に17時の風ベクトルを記入したものである。図中にはまた、A~Kの地点で、風向が陸側(西寄り)から海側(東寄り)に変わりはじめた時刻及び、これらから求めた海風前線の位置の時間変化が示してある。風向の変化が、沿岸部から内陸部へと時間を追って進行したことが分かる。

図2には、図1の地点G(茨城県大気測定局、土浦)において測定された、相対湿度、気温、風向、風速の時間変化を示す。17時過ぎに、風向がWNWからENEへ、風速が1.5m/sから2.7m/sへ、気温が4.5°Cから3.0°Cへ、相対湿度が25%から48%へ、短時間に変化している。これらの4気象要素を測定している地点、A、C、E、G、I、Jの中で、Aを除く全地点で図2に見られるような気象要素の変化が見られた。また、気象要素のうち、風向、風速のみを測定している地点、B、D、F、H、Kでは、風向と風速が同時に変化した。I、Jを除く地点A~Kの気象要素の変化は茨城県大気測定局の自記記録データから読み取った。また、地点Iは筑波大学水理実験センター、地点Jは気象研究所鉄塔(図1の地点Jの風向、風速は地上10mのデータ)である。図1中の、地点A~K以外

の風ベクトルは、17時の AMeDAS データ及び消防署のデータに基づいて記入した。

上に述べた事実は、この日、冷湿な気塊が陸側から吹く風に逆らって沿岸部から内陸部へと侵入したこと、すなわち、明りょうな前線を持った重力流が侵入したことを示している。先に述べた内陸部と沿岸部の圧力差の日変化より、この重力流は海風であると考えられる。各観測地点の海風前線通過時刻から内挿して、14, 15, 16, 17, 18時の海風前線の位置を求め図1に一点鎖線で示した。

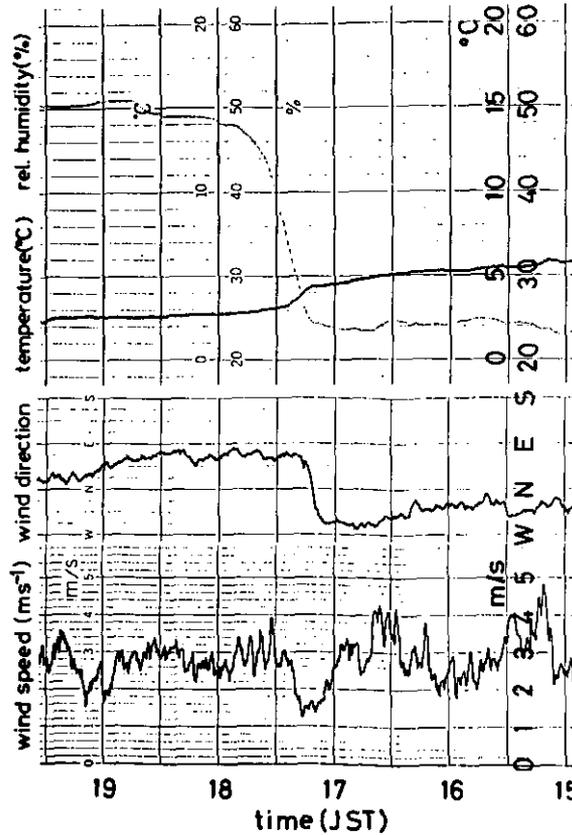


図 2 図1の地点G(土浦)における湿度、気温、風向、風速の時間変化
 Fig. 2 The temporal changes in relative humidity, temperature, wind direction and wind velocity at the point G in Fig. 1

3 レーザーレーダー観測とデータ処理

レーザーレーダー観測は17時より実施した。まず、2分間 PPI(Plan Position Indicator)観測を行い、17時8分より2.2分間、RHI(Range Height Indicator)観測を行った。PPI観測からはエアロゾル濃度水平分布が、RHI観測からはエアロゾル濃度鉛直面内分布が得られる。PPIモードによる観測面の高さは観測領域のレーザーレーダーに最も近い(遠い)ところで海拔74m(106m)であった。これ

は、レーザーレーダーの高さが海拔57m(地上34m)であり、PPI観測における仰角が 0.2° であったことに対応する。レーザービームに沿った距離分解能は30mであった。PPI観測における方位角の分解能は 0.27° 、RHI観測における仰角の分解能は 0.1° であったが、これは観測領域の中心部では、それぞれ47mの距離分解能、17mの高度分解能に対応する。

レーザーレーダー信号から距離方向のエアロゾル濃度分布を得るためにはレーザーレーダー方程式を解く必要がある。ここでは、Fernaldの解(Fernald, 1984; Sasano & Nakane, 1984)を用いて、消散係数の分布としてエアロゾル濃度分布を得た。

Fernaldの解を用いるためには、消散係数と体積後方散乱係数の比 S_1 を決める必要がある。本研究では、 S_1 の値として50を採用した(中根ら, 1985)。さらに、 $S_1=20$ 、 $S_1=80$ に対しても解を求め、得られるエアロゾル濃度分布の S_1 に対する依存性について検討した。その結果、 S_1 の値は、解として得られるエアロゾル濃度の大きさには影響を及ぼすが、濃度分布パターンの形にはほとんど影響を及ぼさなかった。このことは、仮定した S_1 の大きさによらず海風前線の構造を求めることが可能であることを示している。

4 結果と検討

図3はPPI観測によって得たエアロゾル濃度水平分布である。図中のエアロゾル濃度分布パターンは、東半分と西半分では全く異なっている。この二つの部分を分ける境界の位置は、第2節の気象データの解析結果から、海風前線の位置と一致することが分かる。エアロゾル分布パターンを詳細に見ると、境界の西側の領域では、点源から放出された煙が東南東へと流れているような構造が見られるのに対して、東側の領域では、高濃度で比較的均一なエアロゾル濃度分布が見られる。このことは、境界の両側で気象条件や気塊の性質が大きく異なっていることを示唆している。本観測ではエアロゾルの性質に関する観測は行っていないが、境界の東側での高い湿度と海風が海塩粒子を運んでくる可能性を考慮すると、高濃度で比較的均一なエアロゾル濃度分布が境界の東側に現れたことは合理的である。

これらの考察から、図3に見られる境界は海風前線を表すものと結論した。

図4は、RHI観測で得られた図3の一点鎖線上のエアロゾル濃度鉛直面内分布である。この図においても図3の境界上の地点(距離7.5km)から上に向かって、エアロゾル濃度の急変を示す線が走っている。これは海風前線面であり、この境界の東側の部分は海風前線のヘッドである(Simpsonら, 1977)と考えられる。

海風前線のヘッドの内部で特にエアロゾル濃度の高いところは、ヘッドの底部と海風前線面のすぐ後ろ側である。エアロゾル濃度分布パターンと図2の気象データは、ヘッドの底部では海から流れ込んだ冷湿な気塊が図の右から左へと流れ、そして前線面の後で上昇したことを示唆している。さらにその後、この気塊はヘッドの上部を通過して海側に戻っていったことが推察される。このようなフローパターンはOgawaら(1986)の野外調査においても得られている。このように、海風前線

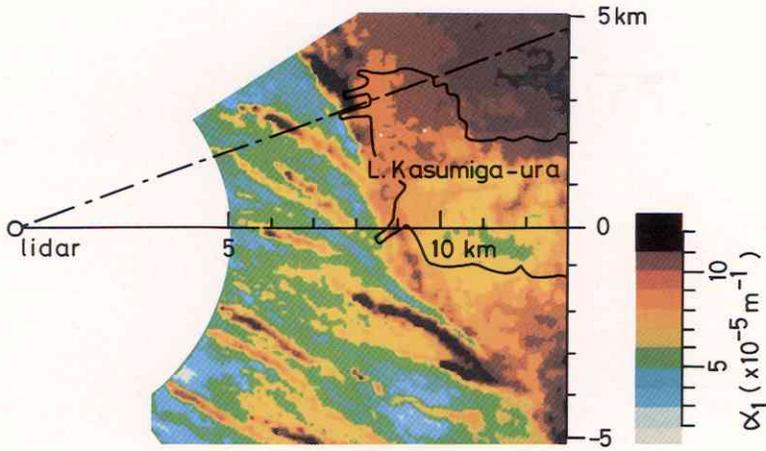


図 3 レーザーレーダーによる PPI 観測から得られたエアロゾル濃度水平分布
 消散係数 α_1 (単位: m^{-1}) の形で得られたエアロゾル濃度は、10レベルカラー表示されている。
 (空気分子による消散係数 α_2 は、15°C、1 気圧で $1.33 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ である)

Fig. 3 The horizontal concentration distribution of aerosols obtained from the PPI lidar measurement

The aerosol concentration in terms of the volume extinction coefficient, α_1 , is displayed by ten color slice levels. (The volume extinction coefficient due to air molecules, α_2 , is as large as $1.33 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ at $T=15^\circ\text{C}$, $P=1 \text{ atm}$).

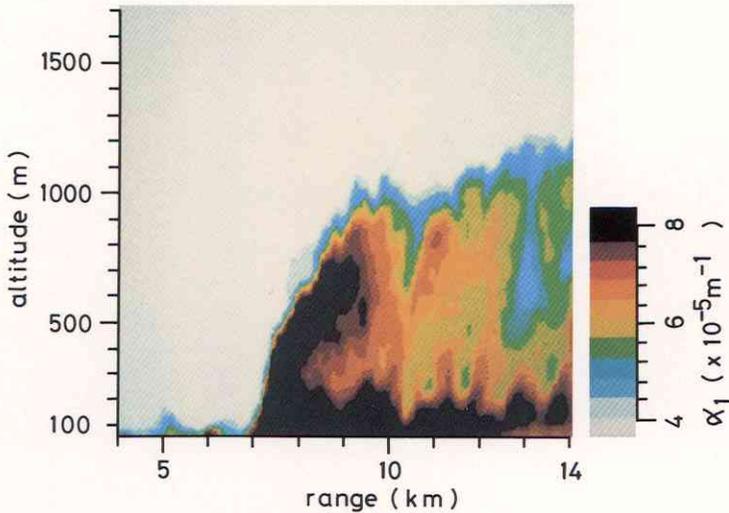


図 4 図 3 の一点鎖線(図 1 の実線)に沿って行った RHI 観測によって得られたエアロゾル濃度鉛直面内分布

Fig. 4 The vertical crosssection of the concentration distribution of aerosols obtained by the RHI measurement over the dash-dotted line in Fig.3 (the solid line in Fig.1)

付近の流れは、流入する海風(気層Ⅰ)、戻ってゆく海風(気層Ⅱ)、周囲流(気層Ⅲ)の三つに分類できる。

ヘッドの上部には波状のパターンが見られるが、これは乱流の存在を示している。このような波状の構造は、重力流に関する水槽実験においても観測されており、Kelvin-Helmholtz instability and/or gravitational instabilities (Britter & Simpson, 1978; Simpson & Britter, 1980)によるものと説明されている。

温かく、乾燥していて、エアロゾル濃度の低いヘッド外の空気がエントレイメント(吸込み)され、ヘッド上部で海風と混合される(Simpson & Britter, 1979)ために、ヘッド上部の空気はヘッド底部の空気よりも高温で、エアロゾル濃度も低い。したがって、ヘッドの底部(気層Ⅰ)、ヘッドの上部(気層Ⅱ)及び、ヘッドの外の周囲流(気層Ⅲ)の間には、気温逆転層の存在が期待される。これらの逆転層では、エアロゾル濃度の鉛直こう配が大きくなっていると考えられるので、エッジ強調法(Sasanoら, 1982)によって、海風前線の詳細な構造を取り出すことが可能である。

図4のエアロゾル濃度分布の構造を強調するために、これを2次元的に微分(差分)して図5に示した。この図には、気層Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの間の境界が明りょうに示されている。

海風前線の構造を特徴づけるパラメータを図4、図5及び気象データから読み取ることが可能である。すなわち、

- 1) 海風前線の底部(気層Ⅰ)の厚さは約300mであり、
- 2) 海風前線のヘッドの高さは1300m以上、

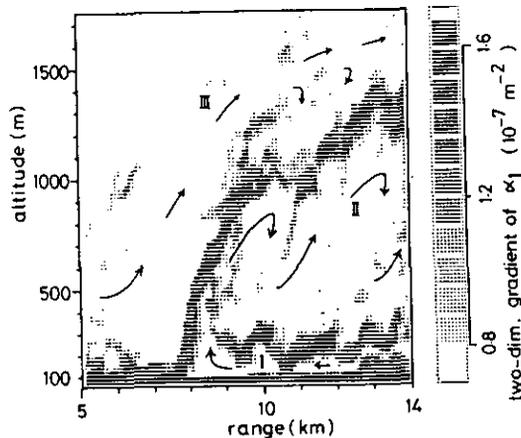


図 5 図4のエッジ強調画像
2次元的に微分し、10レベルグレー表示した。

Fig. 5 The vertical differentiation of Fig.4 for enhancement of the aerosol distribution structure
The vertical gradient of the volume extinction coefficient for each pixel is displayed by ten gray slice levels.

- 3) 前線面と地面のなす角度は、高度500m 以下では45°, 500~1000m 以上では6°,
 - 4) ヘッド上部の波状構造の波長は約2 km,
 - 5) 海風前線の進行速度は3.3 m/s,
 - 6) 海風の風向・風速は、東北東, 8 m/s であり, 周囲流の風向・風速は、西北西, 5 m/s,
 - 7) 海風層と周囲流の間の密度差は、0.58%,
- であった。6), 7) に関連したデータは、気象研究所の鉄塔(図1のJ地点)の高度200m における観測点で観測されたものである。

5 まとめ

本研究では、レーザーレーダーを用いて海風前線の構造を詳細にとらえることができた。今後、海風前線面-ヘッド全体-ヘッドの後ろ側に至る構造の全容を、季節・侵入時刻の異なった条件で観測することが重要である。

なお、海風の侵入を実証するための気象データを、気象研究所、茨城県環境局公害対策課、筑波大学水理実験センター、高層気象台、銚子地方気象台、茨城県水産試験場、国立公害研究所技術部生物施設管理室、同計測技術部分析室からいただいた。関係者の方々に厚く感謝する。

また、数々の貴重な助言をいただいた大気環境計画研究室、大気物理研究室の方々、観測やデータ解析に協力して下さった桜井二三男氏、山上浩志共同研究員(信州大学)に深く感謝する。

引用文献

- Britter, R. E. and J. E. Simpson (1978) : Experiments on the dynamics of a gravity current head. *J. Fluid Mech.*, **88**, 223-240.
- Estoque, M. A. (1961) : A theoretical investigation of the sea breeze. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **87**, 136-146.
- Fernald, F. G. (1984) : Analysis of atmospheric lidar observations : some comments. *Appl. Opt.*, **23**, 652-653.
- Keen, C. S. and W. A. Lyons (1978) : Lake/land breeze circulations on the western shore of Lake Michigan. *J. Appl. Meteorol.*, **17**, 1843-1855.
- Kondo, H. and K. Gambo (1979) : The effect of the mixing layer on the sea breeze circulation and the diffusion of pollutants associated with land-sea breeze. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **57**, 560-575.
- Kurita, H., K. Sakurai, H. Muroga, H. Ueda and S. Wakamatsu (1985) : Long-range transport of air pollution under light gradient wind conditions. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **24**, 425-434.
- Kurita, H. and H. Ueda (1986) : Meteorological conditions for long-range transport under light gradient winds. *Atmos. Environ.*, **20**, 687-694.
- Mitsumoto, S., H. Ueda and H. Ozoe (1983) : A laboratory experiment on the dynamics of the land and sea breeze. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1228-1240.
- 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(1985) : 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. 国立公害研究所研究報告, 第77号, 75-99.
- Ogawa, Y., T. Ohara, S. Wakamatsu, P. G. Diosey and I. Uno (1986) : Observation of lake breeze penetration and subsequent development of the thermal internal boundary layer for the Nanticoke II shoreline diffusion experiment. *Boundary-Layer Meteorol.*, **35**, 207-230.
- Pearson, R. A. (1973) : Properties of the sea breeze front as shown by a numerical model. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1050-1060.
- Sasano, Y., H. Shimizu and N. Takeuchi (1982) : Convective cell structures revealed by Mie laser radar observations and image data processing. *Appl. Opt.*, **21**, 3166-3169.
- 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.
- Shimizu, H., Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, I. Matsui and N. Takeuchi (1985) : Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over wide area. *Appl. Opt.*, **24**, 617-626.
- Simpson, J. E., D. A. Mansfield and J. R. Milford (1977) : Inland penetration of sea breeze fronts. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **103**, 47-76.
- Simpson, J. E. and R. E. Britter (1979) : The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. *J. Fluid. Mech.*, **94**, 477-495.
- Simpson, J. E. and R. E. Britter (1980) : A laboratory model of an atmospheric mesofront. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **106**, 485-500.
- 山口武則・藤沼康実(1985) : 国立公害研究所実験ほ場の土壌及び気象に関する調査資料集(II). 国立公害研究所研究資料, 第27号, 122p.

II-11 大気汚染物質濃度の時間空間変動特性の 経年変化に基づいた観測系構成の考え方

Basic Concepts of an Air Monitoring Network Design Based on Yearly Change of Spatial and Temporal Variation of Concentration Data

新藤純子¹・大井 紘¹
Junko SHINDO¹ and Ko OI¹

要 旨

遠隔計測を含む大気汚染観測系の構成のための基礎となる、大気汚染物質濃度の時間的、空間的な変動特性を関東地方の一般環境常時監視局の昭和52年度～56年度の測定データを用いて検討した。SO₂とNO₂に関しては空間相関特性、及び長期平均濃度の空間分布構造は経年的に、また季節によって変動することが明らかになった。大気汚染の場の特性の変化を考慮することなしに、観測系を数学的に厳密に設計することは、意味がないばかりでなく、次期の観測系の設計のために必要なデータを得られない場合もある。観測系の設計に関して、1)最適観測系を厳密に追求するべきでない、2)十分に長い期間のデータから安定した特性と経年的、季節による変動の大きさを評価する、3)大気汚染場を所要精度で代表しているかどうかの確認のため、観測には冗長性が必要である、の基本的な考え方を提示した。

Abstract

In order to provide a basic information for designing an air pollution monitoring network composed of monitoring stations and a laser radar system, spatial and temporal variation of air pollution data from 1977 through 1981 obtained by ambient air monitoring stations in the Kanto district was investigated. As for NO₂ and SO₂ concentration, it was demonstrated that spatial correlation fields and spatial distribution of long term averages were subject to yearly and seasonal changes. Rigorous designing of a monitoring network, which does not consider the yearly change of air pollution fields, is proved to be meaningless and sometimes misleading, because it may not provide sufficient data to design a new network to replace a current one. Following basic concepts for rational network design were proposed: 1) An 'Optimum network' should not be aimed at rigorously. 2) A stable feature of the air pollution field and its yearly fluctuation should be evaluated from actual

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.

monitoring data. 3) Redundant stations should be included to ascertain whether data obtained by a current network represent the air pollution field with a required accuracy.

1 はじめに

大気環境の状態を的確に把握し評価するために、従来の地上の測定局におけるモニタリングに加えてレーザーレーダー等の遠隔計測による観測を利用することが考えられる。この場合、地上の測定局による観測の特性を十分に検討し、これを補完するような方式で遠隔計測の利用を考えるのが現実的であろう。地上測定局による観測の場合、地域の環境評価のためには離散的な点での濃度の測定値から地域の平均濃度、あるいは空間的な濃度の分布を推定することが必要となる。推定精度は大気汚染物質濃度の時間的、空間的な変動の大きさ、変動の特性、及び観測の方法(測定局の密度、位置、頻度等)に依存する。したがって、まず、できるだけ精度良く、また効率良く観測できるように、地上の測定局による観測系が適正に構成される必要がある。

我が国では、地上の観測系は、当初は汚染の顕著な地点、被害の発生した地域を重点に測定局が設置され、次第に周辺地域での観測も行われるようになった。近年、大気環境の改善、モニタリングの目的の多様化に伴い、測定局の配置を見直し、適性化しようとする動きが起こってきた。諸外国でも現在までに大気汚染の状態を効率良く観測するために測定局をどこに設置するべきかを定めるための多くの手法が提案されている。しかしこれらの手法のうちの多くは、大気汚染物質濃度の変動の特性、特にその時間的安定性についてあまり配慮せずに、工学的なプロセスの最適設計問題あるいは最適実験計画の問題と同様に大気汚染観測系設計問題を扱っている。すなわち、モデル(多くの場合濃度の空間分布構造)を既知として、または再現性のある真のモデルが存在すると仮定してモデルを同定するための最適な観測系の設計を考えているものが多い。

本報は地上の測定局による大気汚染観測系の構成法について検討したものであるが、具体的な設計手法の提案ではなく、既存の手法を紹介することによりこれらの手法において前提とされている条件等を明らかにし、実際の大気汚染観測データの時間的、空間的な変動特性からこれらの手法の妥当性を検討したものである。更に、データの変動特性に基づいて、大気汚染観測系を設計するための基本的な考え方を提案する。

2 提案されている大気汚染観測系設計手法

現在までに提案された大気汚染測定のための観測系設計手法の代表的なものを表1にまとめた。ここに挙げたものは、主に大気的一般環境、人間居住空間の大気環境の状態を把握するための観測系であり、特定の発生源の監視や、排出源の逆推定などを目的としたものは対象外としてある。大気汚染モニタリングの目的は多様であり、それに応じて各手法で設定している観測系設計の指針、目的関数も様々である。しかし、それらの多くは表1に示したように、(a)最高濃度、ピーク濃度を把握するためのものと、(b)対象地域全体の濃度、あるいは地点ごとの濃度を全体として精度良

く推定するためのものにと大別できるようである。ここではこれらの手法をその方法から次の三つのタイプに分けて、考えることとした。

- 〈タイプⅠ〉 シミュレーションモデルにより推定された汚染物質濃度の空間分布に基づいて、設定した観測目的を最も良く達成するような最適な測定局配置を決める方法。
- 〈タイプⅡ〉 測定局間または地点間の相関係数を用いて、一つの測定値で許容精度以上で代表できる領域を推定する、または必要な測定局密度を推定する方法。
- 〈タイプⅢ〉 現在存在する測定局のうち、濃度が他の測定局の濃度データで精度良く推定できる測定局を削除することにより測定局数を減少させる方法。

手法によって複数のタイプに分類されるものがあるが、各々のタイプについて、いくつかの方法を簡単にレビューすることにより、これらの手法の考え方、前提としている条件などを明らかにすることとする。

表 1 従来より提案されている観測系設計手法
Table 1 Conventional approaches to air monitoring system design

利用データ	観測系設計の指針	
	高濃度の把握	濃度分布の推定
発生源データ 気象データ	Houglan & Stephens (1976) Nollら (1977) Munshi & Patil (1981)	←〈タイプⅠ〉
シミュレーションによる空間分布	〈タイプⅠ〉	
①長期平均値	Leeら (1978) 岡本ら (1984)	Nakamoriら (1979) Nakamori & Sawaragi (1984)
②短期平均値の時系列	Noll & Mitsutomi (1983)	岡本ら (1984)
③気象条件ごとの平均値	Liu & Avrin (1981)	Buell (1975)
測定局における観測データ	〈タイプⅡ〉	Egmond & Onderdelinden (1981)
	〈タイプⅢ〉	Handscombe & Elsom (1982) 加藤ら (1985)

2.1 推定された濃度の空間分布に基づいた最適配置(タイプⅠ)

大気汚染観測系を設計する手法の第1のタイプのもは、シミュレーションモデル等により推定された濃度の空間分布を用い、与えられた最適条件をこの空間分布において満足する地点を観測地点として選ぶものである。多くの手法が提案されており、それらは設定したモニタリングの目的に応じて、それぞれの最適条件や、それぞれの制約条件を採用している。次に典型的な例を示す。

表1でタイプI'としたものは、少数の発生源を想定して、拡散モデルにより最高濃度を示す地点(またはエリア)を発生源ごと、気象条件ごとに推定しこれをもとに測定局を配置するものである。

Leeら(1978)は、次の二つの基準を持った多目的最適問題を解いて測定地点を決定する方法を提案した。第1の基準は、'detection criteria'と呼ばれ、環境基準超過を発見する確率を最大にすることを目的とする。地域内の各格子点における基準超過発見確率は、シミュレーションにより推定した年平均濃度の空間分布と既存の測定局における測定値の幾何標準偏差を空間的に補間した値から計算される。第2の基準は'protection criteria'と呼ばれ、格子点の人口密度データを用いて測定地点における人口が最大となるように測定点を選択するものである。Liu & Avrin(1981)は代表的な気象条件ごとに推定された空間濃度分布を用いて、平均濃度の高い地点からランク付けをしてそれらを仮の測定点とした。更に各測定点の周りにそのその地点の濃度との相関係数が一定値以上である領域(spheres of influence: SOI)を求め、SOIが他の測定局の周りのSOIと重なりが大きいときにランクの低い測定点を削除することによりお互いに重複の少ない観測系を作成した。

一方、Nakamoriら(1979)、Nakamori & Sawaragi(1984)は、シミュレーションにより推定された一つの長期平均濃度の空間分布を用いて、領域内の空間的な変動の和が最小となるように全地域を決められた数の領域に分割し、領域ごとに一つの測定点の濃度で代表させる手続きを与えた。空間変動の大きい地域は多くの測定点が必要で、逆に空間の変動の小さい地域においては、一つの測定局で広い領域を代表することができる。

2.2 空間相関係数を用いる方法(タイプII)

タイプIIの手法は地点間の相関係数を用いて大気汚染物質濃度場の統計的性質から観測系を設計しようというものである。代表的なものとして optimum interpolation (O. I.) を利用して必要最小測定局密度を決定しようとする手法がある。O. I. は気象データの補間のために開発された客観解析(objective analysis)手法の一つで、Gandin(1963)により提案された。O. I. では、ある値の時間平均からの時刻 t における偏差 f_{ot} が次式により観測局における偏差 f_{it} ($i = 1, 2, \dots, n$) の線形結合によって推定できると仮定する。

$$f_{ot} = \mathbf{p} \mathbf{f}_i + E_{ot} \tag{1}$$

$$\mathbf{f}_i' = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}) \tag{2}$$

$$\mathbf{p}' = (p_1, p_2, \dots, p_n) \tag{3}$$

ここで、 \mathbf{p} は重みを表すベクトル、 E_{ot} は推定誤差、 n は観測局数である。推定誤差の時間にわたっての2乗和を最小にする \mathbf{p} は次式で得られる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}_o \tag{4}$$

ここで、マトリックス R 、ベクトル r_0 の要素は、各々観測局の間の相関係数、及び観測局と任意の地点との相関係数である。 r_0 を推定するために、2点間の空間相関係数はそれらの距離の減衰関数で表せると仮定する。すなわち、空間が均一 (homogeneity) かつ等方的 (isotropy) であると仮定する。推定誤差は、次式によって評価できる。

$$\overline{E_0^2} / \sigma^2 = 1 - p' r_0, \quad \sigma^2 : f \text{ の分散} \quad (5)$$

O. I. はデータの norm (時間平均または空間トレンド) からの偏差に対して適用されるものであり、norm の取り方の検討 (Thiebaut, 1974) や、気象データの相関係数の場の均一性と等方性の仮定の妥当性の検討 (Steinitz ら, 1971; Godshall, 1974; Thiebaut, 1975) 等が行われてきた。Alaka (1970) は与えられた精度で気象観測を行うための必要最小観測局密度を O. I. を用いて求めた。Egmond & Onderdelinden (1981) はこの手法を大気汚染の場に適用した。また Buell (1975) はシミュレーションにより推定した多くの気象条件ごとの空間分布に基づいて、格子点相互の相関係数行列を求め、これの大きな固有値に対応する固有ベクトルを空間的に補間して、任意の地点間の相関係数を推定した。これを R 及び r_0 として用いて、少数の測定局から出発して、O. I. による推定誤差最大の地点に新たな測定点を設けるという手順で観測系を作成した。

2.3 既存のネットワークからの測定局の削除(タイプⅢ)

既存のネットワークから他の測定局のデータによって許容精度で推定されうる測定局を削除することにより、測定局数を減らす手法がいくつか提案されている。Handsombe & Elsom (1982) は、空間相関分析の手法を用いてお互いに高い相関を持つ測定局の組よりなる領域 (delimiting area) を求めることを提案している。領域の中に、一つの測定局のみが残され、他の局は余分なものとして削除される。加藤ら (1985) は、ある測定局の濃度を他の局のデータで推定する重回帰モデルを変数選択法により測定局ごとに作成し、他の 4~5 の測定局のデータを説明変数として一定の精度以上で説明することのできる測定局を削減の候補として選んだ。

3 大気汚染データの時間空間変動

第2章で述べた観測系設計手法においては、濃度の空間分布やデータの変動の統計的性質、特に地点間の相関係数に関する仮定が前提となっている。各手法が大気汚染の状態を把握するための観測系を設計するのに適切、かつ現実的なものであるかどうかを検討するために既存の測定局で測られている大気汚染物質濃度のデータを解析した。

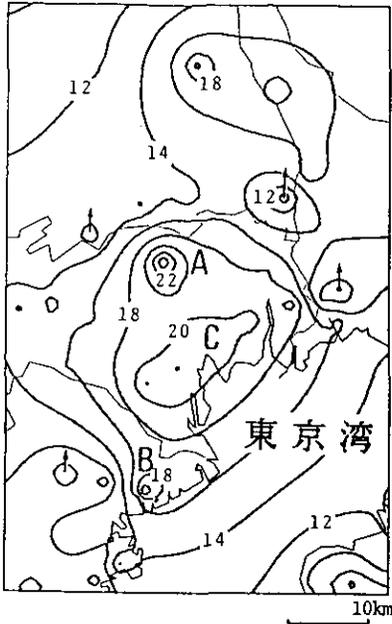
データは関東1都6県の約128km×128km内に設置されている一般環境大気常時監視局における昭和52年度~56年度の二酸化硫黄(SO₂)、二酸化窒素(NO₂)及び浮遊粒子状物質(SPM)または浮遊粉じん(SP)の日平均濃度である。各項目について長期平均(季節平均と年平均)濃度の空間分布、及び季節ごと、年度ごとの測定局間の相関係数を計算した。そしてそれらの季節による違い、経年

的な変化の程度と特徴、また変動の地域による特徴等を調べた。ここで年間の値の計算には各年度の4月～3月までのデータを用い、季節ごとの値としては、春は4月～6月、夏は7～9月…と3か月の期間ごとのデータを用いた。年平均、季節平均またそれぞれの相関係数は対象としている期間のうち2/3以上の日のデータが有効な場合にのみ計算した。測定局間の相関係数は測定局のペアにおいて両方の日平均値が存在する日を用いて求めた。また対象とする期間中に測定機が更新されている測定局は解析の対象から外した。すなわち、長期平均濃度の空間分布の比較に当たっては比較する複数の分布を含む期間内に測定機更新のあった局は除き、相関係数においては相関を計算する期間中に更新された局を対象から除いた。SPを重量測定によるF値で更正したものはSPMであるが、これらはそれぞれ測定している地域が偏っており、また測定がSPからSPMへ徐々に変更されているため、別々に扱うことが困難であったので、測定局間相関係数はSPとSPMを区別せずに用いて計算して参考程度のデータにとどめることとし、長期平均値の空間分布の検討は行わないこととした。

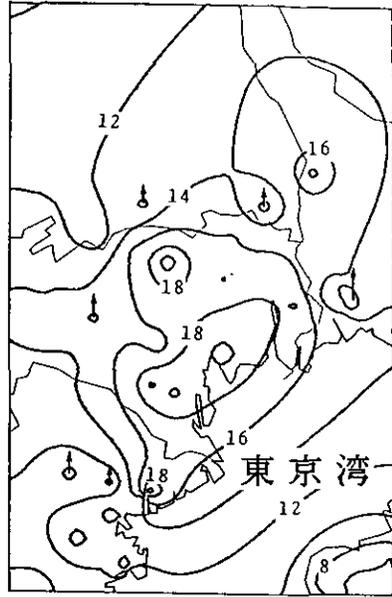
3.1 長期平均濃度の空間分布

与えられた長期平均値の空間分布に基づいて高濃度の把握や、その分布の再現のために最適な地点を選択するという手法が有効であるためには、① 推定された分布構造が現実の濃度分布の良い近似になっていること、② 濃度分布が時間的に安定していることが必要である。①については推定に用いるモデルに依存するのでここでは触れずに、②の濃度分布の安定性について検討した。

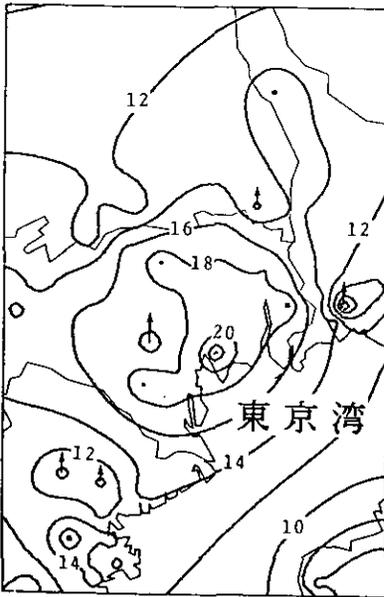
図1(a)～(d)に対象地域のうち都心を中心とした小領域について、昭和52年度～55年度のSO₂の年平均濃度の空間分布を、図2(a)～(d)に図1と同様の領域における54年度のNO₂の季節平均濃度分布を示した。図中の矢印は、周辺よりも低濃度であることを表す。また、表2は図1に対応する領域内の48の測定局の52～55年度のSO₂年平均値を用いて、年と測定局を因子とする二元配置の分散分析を行った結果である。同様に表3は図2に対応する78測定局の54年度春～冬のデータによる季節と測定局を因子とする分散分析結果である。両方の場合とも、年や季節による分散(平均平方)及び測定局による分散は、交互作用(年×測定局、季節×測定局)の分散と比べかなり大きいので、次に挙げるような時間的な濃度変化の特徴と空間的な分布構造は比較的安定しているといえる。すなわち、図1のSO₂年平均濃度に関しては、時間的には経年的な濃度の低下がみられ、空間的には東京都心部で高濃度、周辺地域で低濃度という分布であった。図2のNO₂季節平均濃度においては、時間的には春、夏に低濃度で秋、冬に高濃度となる、季節による周期性があり、空間的には東京都心部と川崎～横浜近辺で高濃度であった。平均的な空間分布パターンと各時期の平均濃度とで任意地点の濃度を推定した場合の誤差の標準偏差は表2(図1)のSO₂の場合、 $\sqrt{2.956}=1.7(\text{ppb})$ 、表3(図2)のNO₂の場合、 $\sqrt{9.644}=3.1(\text{ppb})$ となり、各々総平均濃度の11～12%程度であった。他の年度、季節のデータでも前述の共通の時間変化や空間分布構造の特徴を示している。ただし、NO₂では経年的な濃度の低下傾向は明らかでなかった。



(a) 昭和52年度
(a) 1977



(b) 昭和53年度
(b) 1978



(c) 昭和54年度
(c) 1979



(d) 昭和55年度
(d) 1980

図 1 SO₂年平均濃度の空間分布(単位 ppb)

Fig. 1 Spatial distribution of SO₂ yearly average concentration



(a) 春
(a) spring



(b) 夏
(b) summer



(c) 秋
(c) autumn



(d) 冬
(d) winter

図 2 NO₂ 季節平均濃度の空間分布(昭和54年度)(単位 ppb)

Fig. 2 Spatial distribution of NO₂ seasonal average concentration in 1979

表 2 SO₂ 年平均値による年度と測定局を因子とする二元配置分散分析表
(昭和52年度～55年度)

Table 2 Analysis of variance table with 2 criteria of classification (years and stations) for yearly average of SO₂ concentration (1977-1980)

変動因	自由度	平方和	平均平方
全 体	191	3726.882	
年 度	3	47.609	15.870
測 定 局	47	3262.457	69.414
年度×測定局	141	416.816	2.956

平均濃度：14.5 ppb

表 3 NO₂ 季節平均値による季節と測定局を因子とする二元配置分散分析表
(昭和54年度)

Table 3 Analysis of variance table with 2 criteria of classification (seasons and stations) for seasonal average of NO₂ concentration (1979)

変動因	自由度	平方和	平均平方
全 体	311	32230.828	
季 節	3	4731.394	1557.131
測 定 局	77	25271.589	328.202
季節×測定局	231	2227.845	9.644

平均濃度：27.1 ppb

しかし、更に詳細にみてみると、空間分布は経年的にまた季節によって変化している。図1では52年度では顕著であった東京都北部や横浜付近の高濃度のピーク(各々図1(a)のAとB)は年々濃度が低下し、54, 55年度にはほとんど消滅している(55年度に東京北部にみられるピークはAのピークより約5 km 南東に位置する)。一方都心の東京湾周辺(図1(a)のC付近)は52年度には広い範囲で高濃度で濃度の空間変動は比較的小さいが、次第に局所的な高濃度地点が発生してきている。また図2では春、夏には都心に大きなピークが存在するが、秋、冬にはその西側、荒川近くにピークが表れ、高濃度地点が移動している。図の左下の川崎、横浜付近の濃度分布にも季節による違いがみられる。

したがって、もしある年度またはある季節の平均濃度の空間分布に基づいて、タイプIの手法により、ピークの位置に測定地点を設けたり、空間的な濃度変動の大きい地域に多くの測定局を配置するという方法で、“最適”な観測系を設計するならば、それは他の年度または他の季節の空間分布に対しては最適とはいいがたいものとなる。

3.2 測定局間相関係数

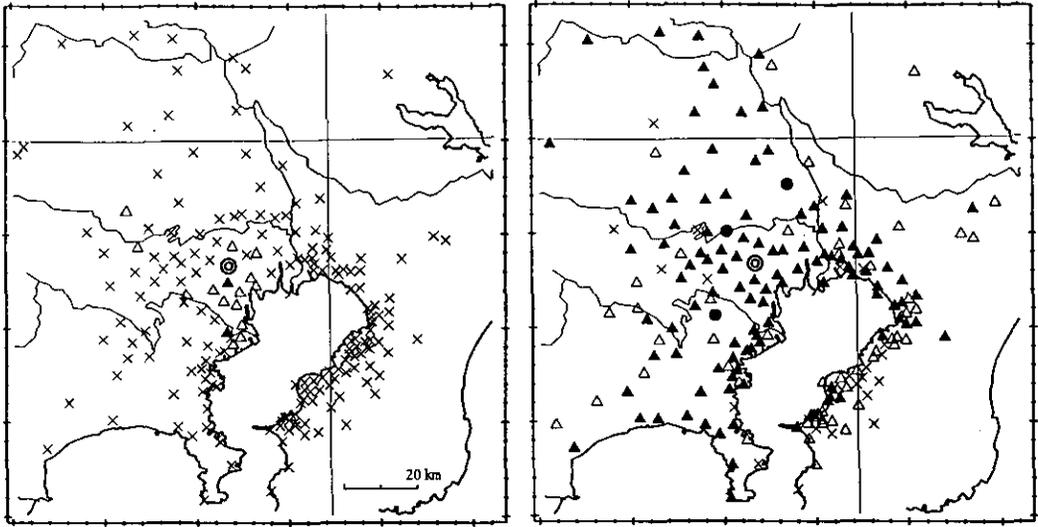
図3(a)～(c)は各々昭和52年度、54年度、及び56年度の秋におけるSO₂濃度データの測定局間相関係数の大きさを示したものである。◎で示したリファレンス測定局との相関係数が0.9以上の

測定局を●で、0.7~0.9の局を▲で、0.5~0.7の局を△で、0.5未満の局を×印で表してある。昭和52年度では高い相関係数を持つ範囲は非常に狭いのに対して、年々その範囲が広くなり、昭和56年度では関東地方のほとんどすべての領域で高相関を示している。他の測定局をリファレンス局に選んでも、他の年度や季節においても同程度の違いがみられた。図4(a)~(c)はNO₂濃度データに関して昭和52年度の春、夏、秋における測定局間相関係数の大きさを示したもので、図中の表示は図3と同様である。春、及び特に夏は高相関の領域が狭いのに対して、秋はかなり広がっており、測定局間相関係数の季節変化も顕著であることが分かる。冬は秋と同程度であり、またNO₂の場合も高相関の領域は年々広がっていた。図3(a)と図4(c)を比べると両方とも52年秋であるが、SO₂よりNO₂の方が測定局間相関係数が大きく、測定項目によっても異なることが分かる。相関係数の大きさは測定局間の距離に依存すると考えられるので、図5に測定局間相関係数と測定局間距離との関係を示した。3kmごと(0-3km, 3-6km, …)の区間に測定局間距離を区切り、各区分ごとにすべての測定局のペアの相関係数のメディアンを実線で、25パーセント値と75パーセント値を実線の周りの影の上端、下端で示してある。図5(a)はSO₂56年度の①夏、②秋、③年間にわたっての相関係数、(b)はSO₂の①52年度秋、②56年度秋、(c)はNO₂の①52年度夏、②52年度秋、③56年度秋、(d)はSPM(SP)の①52年度秋、②56年度秋についてである。測定局相互間の相関係数の大きさの全体としての目安を得るために、相関係数 r に測定局間距離 d の指数関数を当てはめ、測定項目ごと、年度ごとに指数 α を推定した。

$$r = \exp(-\alpha d) \quad (6)$$

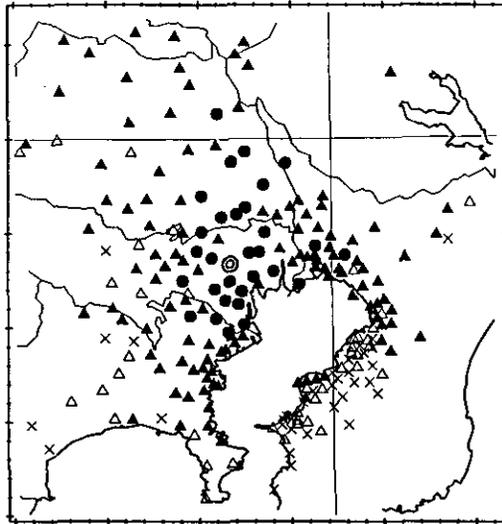
結果を表4に示した。指数 α の大きな値は、空間相関係数が距離と共に急激に減衰することを表している。これらの結果はSO₂とNO₂の場合、空間相関係数が経年的にまた季節によって著しく変化していることを示している。変化は特にSO₂において顕著である。空間相関係数は年ごとに高くなっているようであり、また一般に春、夏は相関係数が小さく、秋、冬に高相関となっている。25パーセント値と75パーセント値との間の大きな差(相関係数値のメディアンの周りの大きなバラツキ)は相関係数の値が同程度の距離でも場所や方向によってかなり異なっている、すなわち空間相関の場が均一でないことを表している。一方、SPM(SP)の場合は、相関係数の季節による変動は比較的小さく、経年的な変化もほとんどない。またメディアンの周りのバラツキも小さく、空間相関特性は時間的、空間的に安定しているといえる。指数 α も他の項目より小さく、広い範囲で高相関を示している。

年間にわたっての相関係数の値は、季節的な周期性を反映して短期間の相関係数より大きくなるので、空間相関解析においては一季節のデータのみを使うことが必要であるとされている(Goldstein & Landovitz, 1977)。しかし図5(a)と表4は年間の相関係数よりも秋(冬も)の相関係数が高いことが多いことを示している。この理由は明確ではないが、季節風や逆転層の生成等の気象条件により、ある期間だけ広い範囲で一様に汚染が推移することがあるためではないかと考えら



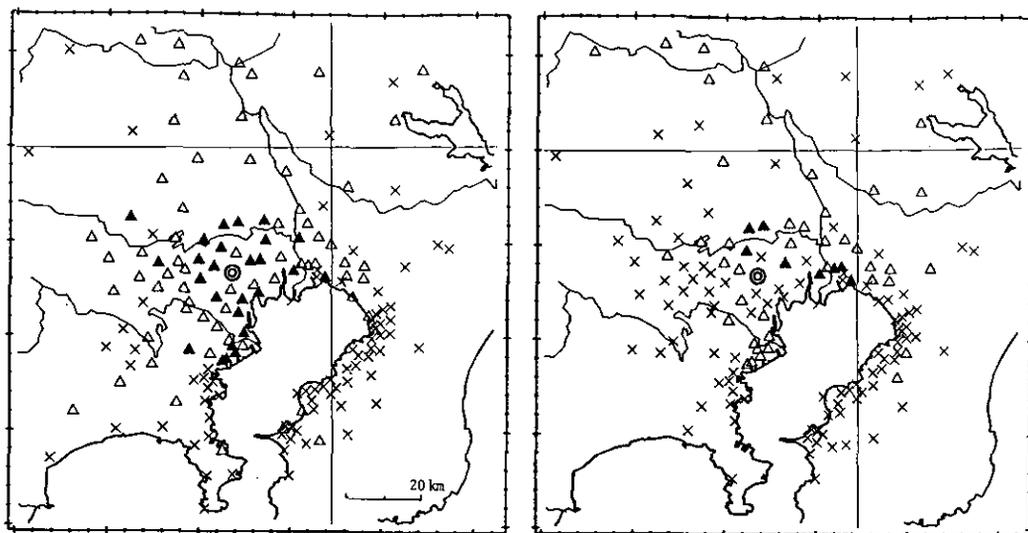
(a) 昭和52年度
(a) 1977

(b) 昭和54年度
(b) 1979



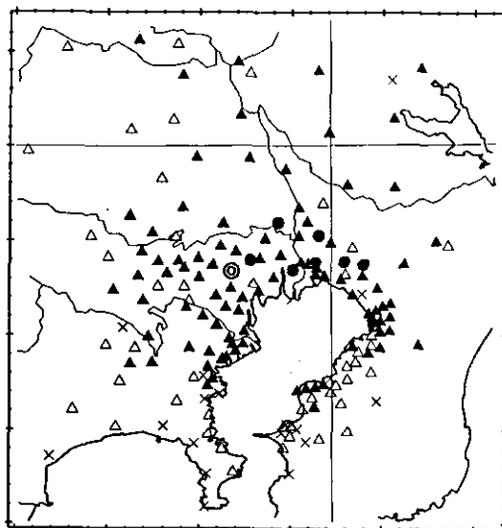
(c) 昭和56年度
(c) 1981

図 3 SO₂ 濃度の測定局間相関係数(秋)
Fig. 3 Spatial correlation field for SO₂ concentration in autumn
◎ : reference station, ● : $r \geq 0.9$, ▲ : $0.7 \leq r < 0.9$,
△ : $0.5 \leq r < 0.7$, × : $r < 0.5$



(a) 昭和52年度 春
(a) spring, 1977

(b) 昭和52年度 夏
(b) summer, 1977



(c) 昭和52年度 秋
(c) autumn, 1977

図 4 NO₂ 濃度の測定局間相関係数

Fig. 4 Spatial correlation field for NO₂ concentration

◎ : reference station, ● : $r \geq 0.9$, ▲ : $0.7 \leq r < 0.9$,
△ : $0.5 \leq r < 0.7$, × : $r < 0.5$

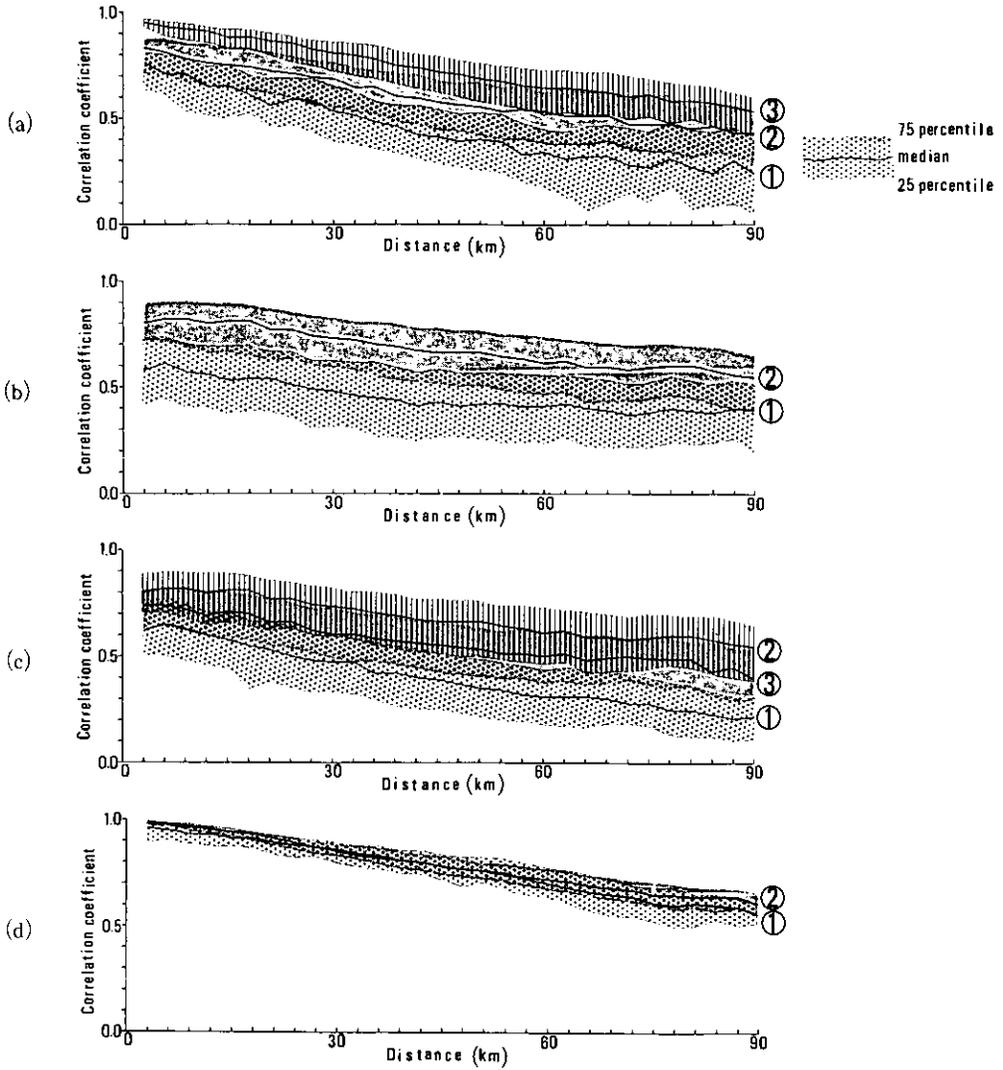


図 5 測定局間相関係数の距離による減衰

- (a) 昭和56年度 SO₂ ①夏, ②秋, ③年間
- (b) SO₂ 秋 ①昭和52年度, ②昭和56年度
- (c) NO₂ ①昭和52年度夏, ②昭和52年度秋, ③昭和56年度秋
- (d) SPM (SP) 秋 ①昭和52年度, ②昭和56年度

Fig. 5 Spatial correlation coefficients as a function of distance

- (a) SO₂ concentration in the summer (①),
in the autumn (②) and in the year (③) of 1981
- (b) SO₂ concentration in the autumn of 1977 (①) and 1981 (②)
- (c) NO₂ concentration in the summer of 1977 (①),
in the autumn of 1977 (②) and in the autumn of 1981 (③)
- (d) for SPM (SP) concentration in the autumn of 1977 (①) and 1981 (②)

表 4 測定局間相関係数の距離による減衰の指数 ($\alpha/10^3$)
 Table 4 Parameter of decline of spatial correlation with distance ($\alpha/10^3$)

項目 年度	SO ₂		NO ₂		SPM(SP)	
	年間	秋	年間	秋	年間	秋
昭和52年度	3.10	2.19	1.24	1.28	0.74	0.66
昭和53年度	2.30	1.03	0.93	0.80	0.64	0.46
昭和54年度	1.98	1.13	1.01	0.77	0.61	0.35
昭和55年度	1.68	1.32	0.87	0.78	0.60	0.46
昭和56年度	1.37	1.00	0.83	0.81	0.66	0.57

れる。図6は一例として昭和52年度の日平均値の東京都のある2局の関係をプロットしたもので、○が春、▲が夏、×が秋、●が冬である。年間、春、夏、秋、冬の相関係数の値は各々0.31, -0.14, 0.23, 0.55, 0.82である。

以上より、第2章で述べたタイプⅡの手法のうち、相関係数の場の均一性と等方性を仮定して、O.I.を用いて必要測定局密度を決定する方法はSO₂やNO₂に関しては、無理があるように思われる。更に、もしある年のデータを用いて推定精度と測定局設置や管理のための経費とのトレードオフとして最適な測定局密度を決定することができたとしても、相関係数の場が経時的に変動するのであるから、それは他の年では必ずしも最適であるとはいえない。余分な測定局を削除していくタ

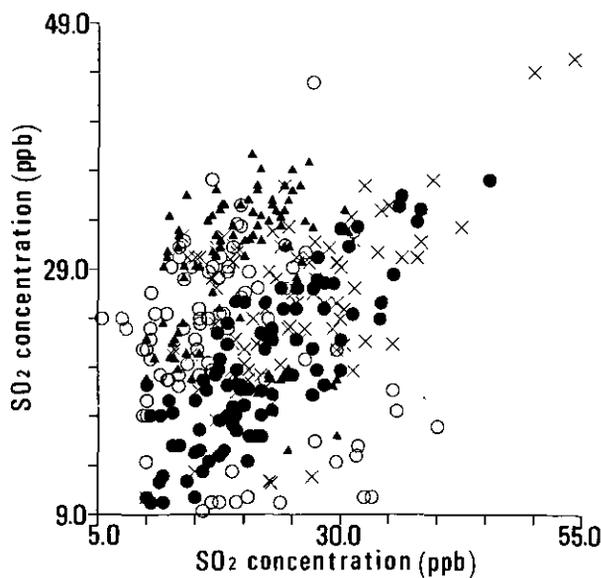


図 6 2測定局におけるSO₂日平均濃度の関係
 Fig. 6 Scatter diagram of SO₂ daily average concentration at 2 monitoring stations
 ○ : spring, ▲ : summer, × : autumn, ● : winter

タイプⅢの手法においては相関係数の場の均一性、等方性を仮定していないので、既存の測定局が十分に密に設置されているのならば、各々の地点の特性に応じた密度で測定局を配置することができる。しかし相関係数の経年変化の影響はタイプⅡの手法よりも重大である。これらの手法においては大気汚染の場の統計的な構造について何もモデルを仮定していないので、もしある年のデータに基づいて、ある測定局を余分な局として削減したならば、空間相関の場が経年的に変化した場合、その測定局における濃度が他の測定局のデータによってどの程度に説明されているかを知ることができない。

4 測定系設計の基本的考え方

大気汚染の場の空間的及び時間的な変動パターンは数年の間に変化し、汚染物質の種類によって変動パターンもその変化のしかたも異なることが明らかとなった。気象条件の変化、発生源の位置や規模の変化が大気汚染の変化の原因であろう。それぞれの年において最適な観測系は互いに異なり、一方、観測系の耐用年数は、少なくとも測定局の焼却期間と同程度であり数年以上と考えられる。したがって、短期間のデータまたは推定された一つの空間分布構造に対して最適に設計されたものをもって最適観測系と考えるのには問題があり、またそのような観測系を“厳密に”設計することにはあまり意味がないと思われる。更にそのような設計により得られた観測系はその方法によってはむしろ危険である場合もある。例えば、測定の大長性を少なくしようという指針で設計された観測系においては、観測されたデータによる推定精度が悪くなる方向に大気汚染の場の統計的性質が経年的に変化した場合、次期の観測系を設計するための十分な情報が得られなくなる。

タイプⅠの手法は、シミュレーション等で推定した一つの長期平均濃度の空間分布を真の分布であるとして、この分布に対して条件を最も良く満足する、またはこの分布をできるだけ精度良く再現するために最適な測定局網を設計しようとしている。シミュレーションにより推定された分布を用いる理由として、十分な観測データを得るのが難しいこと、実データは気象条件等の影響を受けて変動するので平均的な条件に対して観測系を設計するため等が挙げられている。しかし既に指摘されているように、この設計問題には次のような明らかな矛盾が存在する(内藤・落合, 1981)。用いられた空間分布が真のものであるならば、すなわち、真の分布構造を前もって推定することが可能であるならば、最適な測定局網を設計することばかりでなく、濃度を測定することさえも必要でなくなるであろう。一方、もし用いた分布が真のものでないならば、その分布に基づいて厳密に最適な解を求めることは無意味であろう。この矛盾を解消するため、観測系設計問題を次のように考えることができる：用いた分布は真のものではないがそれに近いものであり、観測は真の分布構造を決定するために行う。この視点からみると、測定系設計の問題は、真のモデルを同定するための最適実験計画の問題と考えられる(例えば、Box & Lucas, 1959; Rosenbrock & Storey, 1966)。しかし大気汚染の現象は発生源の変化、気象条件等により経年的に変化するものであり、長期間にわたって同一の“真の分布”が存在すると考えるのは無理がある。同定すべきモデルが時間と共に変

化していくという点で最適実験計画の問題とは異なる。

以上のような大気汚染物質濃度の特性に基づいて、大気汚染観測系の設計は次のような基本的考え方でされるべきであろうと考える。

- 1) “最適観測系”を厳密に追求するべきではない：大気汚染物質濃度の空間的、時間的な変動の特徴のうち、安定している特徴に基づいて、妥当と思われる観測系を設計する。この際、問題の定式化や解法において、厳密性を過度に要求しない。
- 2) 十分に長い期間のデータから大気汚染物質濃度の安定した変動特性を抽出し、それらの経年的、及び季節による変動の大きさを評価する。シミュレーションにより推定された分布を利用する場合も、実際の濃度の変動の程度を把握しておく必要がある。
- 3) 観測に冗長性を残しておく必要がある：現在の観測系により得られたデータが大気汚染の場を要求される精度で十分に代表しているかどうかを確かめるために、所要精度で推定可能な最小の測定局網に加えて補助的な測定局を配置しておく必要がある。更に大気汚染の場の変化を検出し、特に、現在の観測系で得られるデータによる推定精度が年々悪くなるような状況においても、次期の観測系を設計するときに必要な情報の提供を可能とするために補助的な測定局の存在は重要である。

5 遠隔計測の大気汚染監視への利用

限られた数の離散的な地点で測定することにより、空間的に変動している大気汚染物質濃度を把握しようとする場合、濃度変動の統計的な性質に基づいて測定点以外の地点での濃度を推定しなければならない。しかしこの性質が時間と共に変化していくのだから離散点における観測値による推定には限界がある。レーザーレーダーなどによる遠隔計測をも含めた観測系の構成に当たっては、離散点による観測を補完する方式で遠隔計測の利用を計画すべきであると考えられる。例えば、測定局が十分存在しない地域に新たに観測系を設計する場合、シミュレーション等による推定値に加えて、遠隔計測による一定期間の測定により時間的、空間的な変動の大きさを把握することは有用であろう。また既に適正化された観測系にあっては、遠隔計測により定期的に観測することにより大気汚染の場の変化をチェックし必要精度で測定されているかの確認等に利用できるであろう。

SPM (SP) については、ミー散乱型レーザーレーダーによる測定技術は確立していると言ってよく、したがってこれを上記の目的で用いることは可能であると考えられる。すなわち、大型のミー散乱型レーザーレーダーをもってすれば、半径50kmの観測が可能であると共に、解像度も十分と考えられる。また可搬型、小型のミー散乱型レーザーレーダーも開発されている。ただし3.2に述べたように、SPMは測定局間相関係数の観点からは地上の測定局により最も観測しやすくまた測定局の適正配置も決めやすい汚染種となっている。近年交通公害との関連も含めて注目されているNO₂については、DIAL型レーザーレーダーの開発が進められている。距離分解能はまだ必ずしも高くはないが、地上の測定局による測定との相補的な利用において有用さを期待できる程度に達

しているといえよう。この目的での実用化のためには観測可能半径の拡大と水平に掃引したときの有効性の確立が必要である。SO₂については、3.2に述べたように測定局間相関係数がNO₂より小さく、経年的な変化も大きく、その観点からすれば最も観測のしにくい汚染物質であるが、現在のところ我が国におけるSO₂観測用のレーザーレーダー開発はほとんど行われていない。

レーザーレーダーを地表付近の濃度の観測、及びそのための地上測定局位置の決定に用いるとき、掃引する高さを十分に低くとれるかという問題が生じる。大気の混合の良い季節であればこのことは大きな障害にならないであろう。しかし、3章で指適したように汚染質濃度の変動は季節により異なるので、その結果から他の季節のことが類推できるかどうかについては問題が残る。

6 おわりに

関東地方の大気汚染常時監視局における測定データを用いて、長期平均濃度の空間分布構造、空間相関特性の特徴及び経年的な安定性について検討した。この結果、SO₂とNO₂に関しては空間相関特性は年度や季節によって著しく変化すること、空間分布構造は比較的安定しているが、高濃度ピークの位置は時間と共に移動する等の変動があることが示された。観測系の設計において大気汚染物質濃度の場の変動特性、特に時間による特性の変化を考慮することなしに、手法の精密化、数学的な厳密さを追求することには問題があることを提起し、設計に当たっての基本的な考え方を示した。基本的な考え方に基づいた具体的な設計の方法、得られた観測系によって大気汚染物質の濃度変動をどの程度の精度で把握できるのか、更に遠隔計測による観測の具体的な利用手法の検討が、今後の課題である。

引用文献

- Alaka, M.A. (1970) : Theoretical and practical considerations for network design. *Meteorol. Mongr.*, **11**(33), 20-27.
- Box, G.E.P. and H.L. Lucas (1959) : Design of experiments in non-linear situations. *Biometrika*, **46**, 77-90.
- Buell, C.E. (1975) : Objective procedures for optimum location of air pollution observation stations. EPA-650/4-75-005, PB-252622, 218p.
- Egmond, N.D. van and D. Onderdelinden (1981) : Objective analysis of air pollution monitoring network data: Spatial interpolation and network density. *Atmos. Environ.*, **15**, 1035-1046.
- Gandin, L.S. (1963) : Objective analysis of meteorological fields (translated from Russian, 1965). Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 242p.
- Godshall, F.A. (1974) : The statistical structure of surface temperature fields. *Mon. Weather Rev.*, **102**, 523-526.
- Goldstein, I.F. and L. Landovitz (1977) : Analysis of air pollution patterns in New York City — I. Can one station represent the large metropolitan area ? *Atmos. Environ.*, **11**, 47-52.

- Handscombe, C.M. and D.M. Elsom (1982) : Rationalisation of the national survey of air pollution monitoring network of the United Kingdom using spatial correlation analysis : a case-study of the Greater London area. *Atmos. Environ.*, **16**, 1061-1070.
- Houglund, E.S. and N.T. Stephens (1976) : Air pollution monitor siting by analytical techniques. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **26**, 51-53.
- 加藤 均・長沢伸也・大滝 厚・塩澤清茂(1985) : 統計モデルによる測定局の代表性の研究. 大気汚染学会誌, **20**, 384-393.
- Lee, T.D., R.J. Graves and L.F. McGinnis (1978) : A procedure for air monitoring instrumentation location. *Manage. Sci.*, **24**, 1451-1461.
- Liu, M.K. and J. Avrin (1981) : Methodology for designing an optimum air quality monitoring network. EPA-600/4-81-002, PB81-171191, 60p.
- Munshi, U. and R.S. Patil (1982) : A method for selection of air quality monitoring sites for multiples sources. *Atmos. Environ.*, **16**, 1915-1918.
- 内藤正明・落合美紀子(1981) : 環境モニタリングステーションの適正配置について. 公害と対策, **17**, 934-940.
- Nakamori, Y., S. Ikeda and Y. Sawaragi (1979) : Design of air pollution monitoring system by spatial sample stratification. *Atmos. Environ.*, **13**, 97-103.
- Nakamori, Y. and Y. Sawaragi (1984) : Interactive design of urban level air quality monitoring network. *Atmos. Environ.*, **18**, 793-799.
- Noll, K.E., T.L. Miller, J.E. Norco and R. K. Raufer (1977) : An objective air monitoring site selection methodology for large point sources. *Atmos. Environ.*, **11**, 1051-1059.
- Noll, K.E. and S. Mitsutomi (1983) : Design methodology for optimum dosage air monitoring site selection. *Atmos. Environ.*, **17**, 2583-2590.
- 岡本真一・小林恵三・山田 剛・北林興二・栗山 茂・杉山 裕(1984) : 大気汚染測定局の代表性と適正配置に関する研究. 大気汚染学会誌, **19**, 129-140.
- Rosenbrock, H.H. and C. Storey (1966) : Estimation of parameters in differential equations. *In* : *Computational Techniques for Chemical Engineers*, Pergamon Press, 189-208.
- Steinitz, G., A. Huss, A. Manes, R. Sinai and Z. Alperson (1971) : Optimum station network in the tropics. *J. Appl. Meteorol.*, **10**, 364-369.
- Thiebaut, H.J. (1974) : Estimation of covariances of meteorological parameters using local time averages. *J. Appl. Meteorol.*, **13**, 592-600.
- Thiebaut, H.J. (1975) : Experiments with correlation representation for objective analysis. *Mon. Weather Rev.*, **103**, 617-627.

成果発表一覽

印刷発表

昭和58年度

発表者	題目	掲載誌	巻(号)	ページ	発行年
N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba*, K. Sakurai* (*Tokyo Univ.)	Random-modulation cw lidar	Appl. Opt.	22	1382-1386	1983

昭和59年度

発表者	題目	掲載誌	巻(号)	ページ	発行年
宮崎忠国・安岡善文	水域リモートセンシングにおける大気散乱光と水面反射光の評価	文部省「環境科学」研究報告集 B197-R52		87-93	1984
宮崎忠国・安岡善文	閉鎖性水域における水質調査法	昭和56年~58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(第I期)」成果報告書		213-225	1985
Y. Yasuoka	Removal of random striping noise in remotely sensed images	Proc. 1984 Int. Symp. Noise & Clutter Rejection Radars & Imaging Sens.		411-416	1984
安岡善文	これからの画像処理システムはどうあるべきか? —ユーザー(研究開発機関)の立場から—	映像情報	17(1)	35-37	1985
清水 浩・C. Y. She* (*コロラド州大)	高分解能レーザーレーダーによる大気環境の計測	日本リモートセンシング学会誌	4(1)	27-37	1984
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	4	233-244	1984
清水 浩	最近のレーザーレーダー技術	O plus E	(63)	52-61	1985
清水 浩	レーザーレーダーによる大気遠隔計測	精密機械	51	290	1985
H. Shimizu, Y. Sasano, H. Nakane, N. Sugimoto, N. Takeuchi	Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area	Appl. Opt.	24	617	1985
N. Sugimoto, N. Takeuchi, S. Takezawa* (*Gumma Univ.)	Rotational analysis of the ${}^2B_1(K=1) - {}^2A_1(K'=0)$ subband of NO_2 at 464.9nm in the time-gated excitation spectrum	Chem. Phys. Lett.	99	475-478	1983
N. Sugimoto, N. Takeuchi, H. Iijima*, T. Arai*, S. Takezawa** (*Univ. Tsukuba, **Gumma Univ.)	Observation of spin splittings in the 2B_1 state of NO_2 by means of polarization spectroscopy	Chem. Phys. Lett.	106	403-407	1984

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	発行年
N. Sugimoto, S. Takezawa* (* Gumma Univ.)	Rotational analysis and vibrational assignments of the 463- and 474-nm bands of NO ₂	J. Mol. Spectrosc.	106	307-319	1984
N. Sugimoto	Intensity distribution of fluorescence from the ² B ₁ state of NO ₂ excited at 495.0, 474.0, 454.5 and 436.7nm	J. Mol. Spectrosc.	106	362-368	1984

昭和60年度

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	発行年
宮本定明*・大井 紘・ 内藤正明・小林正紀** (*筑波大, **千葉工大)	区分線形濃度変換にもとづく画像強調問題の最適化による定式化と大気観測用レーザーダ画像への応用	システムと制御	29	313-321	1985
S. Miyamoto*, K. Oi, M. Naito, A. Shimizu**, (*Univ. Tsukuba, **Chiba Inst. Technol.)	Enhancement of laser radar images by a class of piecewise linear transformations of gray levels based on entropy criteria	Proc. 1985 IEEE Workshop Lang. Autom.		265-270	1985
S. Miyamoto*, Y. Asayama*, K. Oi (*Univ. Tsukuba)	Optimization method for enhancement of laser radar images by a class of piecewise linear transformation of gray levels	Tech. Rep. Inst. Inf. Sci. Electron., Univ. Tsukuba	ISE-TR 85-50	1-17	1985
宮本定明*・浅山泰祐*・ 大井 紘・池辺八州彦* (*筑波大)	一般化されたエントロピー評価基準によるレーザーダ画像の強調	システムと制御	30	195-201	1986
宮崎忠国・安岡善文	水質調査法(閉鎖水域) - 閉鎖性水域における普遍的な水質計測手法の開発 -	昭和59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 -		53-58	1985
安岡善文	環境における画像処理技術の応用	電気学会誌	105	455-458	1985
Y. Sasano	Observational study on the atmospheric mixed layer and transition layer structures using a Mie lidar	J. Meteorol. Soc. Jpn.	63	419-435	1985
Y. Sasano, E. V. Browell*, S. Ismail** (*NASA Langley Res. Cent., **SASC Technol. Inc.)	Error caused by using a constant extinction/back-scattering ratio in the lidar solution	Appl. Opt.	24	3929-3932	1985
斎藤典生*・丹野直弘*・ 高橋良男*・横戸健一*・ 清水 浩・杉本伸夫・ 松井一郎・笹野泰弘 (*山形大)	偏光消度測定用レーザーレーダーによる降雪雲の観測	応用物理	54	952-958	1985

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	発行年
野口和夫*・清水 浩・ Chao-Yao She** (*千葉工大, **コロラド 州大)	高分解能レーザーレーダーに より気温測定を行なうための 最適設計条件	応用物理	54	972-978	1985
清水 浩	レーザーレーダーによる大気 環境の鉛直気温分布の測定	第68回「温度計 測部会」資料 ((社)計測自動 制御学会)		1-6	1986
N. Sugimoto, S. Takezawa* (*Gumma Univ.)	Level crossings in the 2B_1 state of NO_2 : Rotational analysis by polarization spectroscopy	Chem. Phys. Lett.	118	604-610	1985
杉本伸夫・飯島弘昭* 竹沢賢三** (*筑波大, **群馬大)	偏光分光法による NO_2 の 2B_1 2A_1 吸収帯の回転構造の解 析	分光研究	34(5)	294-305	1985
N. Sugimoto, S. Takezawa* (*Gumma Univ.)	The 2B_1 ($K=1$) - $\tilde{X}{}^2A_1$ ($K=0$) subbands of NO_2 found in the excitation spectrum using a supersonic molecular beam	Chem. Phys. Lett.	121	367-370	1985
N. Sugimoto	Hadamard transform active long-path absorption spectrometer system for measurements of atmosphe- ric trace species	Appl. Opt.	25	863-865	1986
竹内延夫・杉本伸夫・ 桜井捷海*・馬場浩司*・ 上野敏行** (*東京大, **千葉大)	大気汚染計測用擬似ランダム 変調 CW ライダー	レーザー研究	11	763-771	1983
竹内延夫・馬場浩司*・ 桜井捷海*・上野敏行**・ 井戸田健†・新井敏弘††・ 常見真人††・石河直樹†† (*東京大, **千葉大, †筑波大, ††明星電気)	半導体レーザーを光源とする 擬似ランダム変調 CW ライダ ーの試作と動作特性	レーザー研究	13	353-364	1985
竹内延夫	レーザー・リモートセンサー の現状と動向	高度リモートセ ンシング技術資 料(動資源観測 解析センター)		23-28	1985
H. Baba*, S. Hoshina*, K. Sakurai*, N. Takeuchi (*Univ. Tokyo)	High-speed multichannel photon counter for time- resolved laser spectroscopy	Rev. Sci. Instrum.	56	1926-1929	1985
竹内延夫・大井 紘	半導体擬似ランダム変調 CW ライダーの性能向上とフィー ルド測定	文部省「環境科 学」昭和60年度 R-50環境情報 領域合同研究討 論会報告集		72-75	1986
松井一郎・清水 浩・ 杉本伸夫・笹野泰弘・ 竹内延夫・丹野直弘*・ 斎藤典生*・横戸健一* (*山形大)	レーザーレーダーによる降雪 雲の観測による降雪開始予測 の可能性の検討	日本リモートセ ンシング学会誌	5	321-329	1986

口 頭 発 表

昭和59年度

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	年 月
新藤純子・大井 紘	大気汚染物質濃度の空間相関特性の経年変化	第25回大気汚染学会	宇部	59.11
宮本定明*・大井 紘 内藤正明・小林正紀** (*筑波大, **千葉工大)	区分線形濃度変換による画像の強調Ⅰ——最適化による定式化——	第28回システムと制御研究発表講演会	京都	59.5
宮本定明*・大井 紘 内藤正明・小林正紀** (*筑波大, **千葉工大)	区分線形濃度変換による画像の強調Ⅱ——レーザレーダ画像への応用——	第28回システムと制御研究発表講演会	京都	59.5
宮崎忠国・渡辺正孝	水中ラジオスペクトロメータを用いたマイクロゾム内の分光特性の計測	計測自動制御学会第10回リモートセンシングシンポジウム	東京	59.11
宮崎忠国・安岡善文	分光反射スペクトルデータの収集	計測自動制御学会第10回リモートセンシングシンポジウム	東京	59.11
安岡善文	リモートセンシングによる環境の監視——なぜリモートセンシングか——	環境教育研究会	福井	59.7
安岡善文・宮崎忠国	軌道平行走査 MSS による高さの計測	第23回計測自動制御学会学術講演会	小金井	59.7
安岡善文・猪爪京子	都市域における緑と建物の分布の計測と評価	計測自動制御学会第10回リモートセンシングシンポジウム	東京	59.11
安岡善文	これからの画像処理システムはどうあるべきか——ユーザーの立場から——	画像処理技術の新展開セミナー	東京	59.11
安岡善文・宮崎忠国	軌道平行走査 MSS による三次元情報の抽出	日本リモートセンシング学会第4回学術講演会	東京	59.12
横田達也	多重閾値による MSS データの探索的な分類法	第23回計測自動制御学会学術講演会	小金井	59.7
横田達也・宮崎忠国・安岡善文	リモートセンシングにおける陰の評価(Ⅰ)	計測自動制御学会第10回リモートセンシングシンポジウム	東京	59.11
飯倉善和・安岡善文	最良線形判別関数による MSS 画像の分類	日本リモートセンシング学会第4回学術講演会	東京	59.12
刃刀正行・溝口次夫・宮坂恵子・広瀬妙子・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (*気象研)	大気エアロゾルの鉛直分布測定(Ⅰ)	第2回エアロゾル科学・技術研究討論会	京都	59.8
刃刀正行・溝口次夫・宮坂恵子・広瀬妙子・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (*気象研)	エアロゾル鉛直分布測定	第25回大気汚染学会	宇部	59.11
溝口次夫・刃刀正行・竹内延夫・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (*気象研)	大気エアロゾルの鉛直分布測定(Ⅱ)	第2回エアロゾル科学・技術研究討論会	京都	59.8
Y. Sasano	Mixed layer and transition layer structures observed by a scanning laser radar	12th Int. Laser Radar Conf.	Provence (France)	59.8

発表者	題目	学会等名称	開催都市名	年月
清水 浩・野口和夫* (*千葉工大)	気温測定用高分解レーザーレーダーの最適設計法	第31回応用物理学関係 連合講演会	東京	59.3-4
H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Saitoh* T. Atsumi*, N. Tanno* (*Yamagata Univ.)	Snow cloud observation by Mie lidar with depolarization property	12th Int. Laser Radar Conf.	Provence (France)	59.8
清水 浩・飯倉善和・ 笹野泰弘・松井一郎・	レーザーレーダーによる遠距離測定で生じるシステムティックな誤差	第45回応用物理学学会学 術講演会	岡山	59.10
野口和夫*・清水 浩 (*千葉工大)	高分解能レーザーレーダーによる気温測定の精度	第45回応用物理学学会学 術講演会	岡山	59.10
野口和夫*・清水 浩 (*千葉工大)	高分解能ライダーによる気温測定理論における分子散乱モデルの影響	第32回応用物理学関係 連合講演会	東京	60.3
清水 浩・杉本伸夫・ 飯倉善和	スペースシャトル搭載用レーザーレーダーに用いる望遠鏡	第32回応用物理学関係 連合講演会	東京	60.3
樋口隆一*・斉藤保典*・ 野村彰夫*・鹿野哲生*・ 杉本伸夫・竹内延夫 (*信州大)	差分吸収方式レーザーレーダー(DIAL)によるNO ₂ 観測	第31回応用物理学関係 連合講演会	東京	59.3-4
竹内延夫・馬場浩司*・ 桜井捷海*・上野敏行**・ (*東京大, **千葉大)	光ファイバーを用いたRM-CW DIALの動作特性	第31回応用物理学関係 連合講演会	東京	59.3-4
N. Takeuchi, H. Baba* K. Sakurai*, T. Ueno** (*Tokyo Univ., **Chiba Univ.)	Random-modulation cw lidar using an optical fiber head	Conf. Lasers Electro-Opt.	Anaheim, California	59.6
上野敏行*・馬場浩司**・ 桜井捷海**・竹内延夫 (*千葉大, **東京大)	m 系列変調方式によるレーザーレーダーの応答測定誤差	第23回計測自動制御学 会講演会	小金井	59.7
N. Takeuchi, H. Baba* K. Sakurai*, T. Ueno** (*Tokyo Univ., **Chiba Univ.)	Construction of compact RM-CW lidar systems	12th Int. Laser Radar Conf.	Provence (France)	59.8
竹内延夫	大気汚染計測用レーザーレーダーシステム	光・量子デバイス研 究会	東京	59.9
竹内延夫・馬場浩司*・ 桜井捷海*・上野敏行**・ 煤田秀雄***・ 石河直樹***(*東京大, **千葉大, ***明星電気)	半導体レーザーを光源とする擬似ランダム変調 CW ライダーの試作	計測自動制御学会第10 回リモートセンシング シンポジウム	東京	59.11
竹内延夫	光ファイバーを用いた擬似ランダム変調ライダー	第25回大気汚染学会	宇部	59.11
竹内延夫・煤田秀雄*・ 石河直樹*・井戸田健**・ 馬場浩司†・桜井捷海†・ 上野敏行†† (*明星電気, **筑波大, †東京大, ††千葉大)	半導体レーザー擬似ランダム変調 CW ライダーの特性と夜間エアロゾル観測への応用	第32回応用物理学関係 連合講演会	東京	60.3
井戸田健*・煤田秀雄**・ 竹内延夫・新井敏弘* (*筑波大, **明星電気)	RM-CW ライダーにおける昼間時エアロゾル測定のための考へ発振波長特性	第32回応用物理学関係 連合講演会	東京	60.3

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	レーザーレーダーと光散乱粒子計数器によるエアロゾルの散乱パラメータの測定	日本気象学会1984年春季大会	東京	59.5
H. Nakane, Y. Sasano	Measurement of the extinction / backscatter ratio of aerosols by lidar and optical particle counter	12th Int. Laser Radar Conf.	Provence (France)	59.8
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* (* 神戸大)	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	第32回応用物理学関係連合講演会	東京	60.3
可知直毅・安岡善文・戸塚 嶺・鈴木啓祐* (* 流通経済大)	推移確率による植生遷移の解析	日本植物学会第48回大会	京都	58.10

昭和60年度

発表者	題目	学会等名称	開催都市名	年月
安岡善文・宮崎忠国	軌道平行走査 MSS による表面反射率の角度依存性の評価	計測自動制御学会第11回リモートセンシングシンポジウム	東京	60.10
横田達也・宮崎忠国・安岡善文	リモートセンシングにおける陰の評価(II)	計測自動制御学会第11回リモートセンシングシンポジウム	東京	60.10
功刀正行・宮坂恵子・広瀬妙子・溝口次夫・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (* 気象研)	大気エアロゾルの鉛直分布	日本化学会第50回春季年会	東京	60.4
功刀正行・宮坂恵子・広瀬妙子・溝口次夫・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (* 気象研)	大気エアロゾルの鉛直分布測定(5)	第3回エアロゾル科学・技術研究討論会	東京	60.8
功刀正行・宮坂恵子・広瀬妙子・溝口次夫・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (* 気象研)	大気エアロゾルの鉛直分布測定(8)	日本気象学会1985年秋季大会	大阪	60.10
功刀正行・宮坂恵子・広瀬妙子・溝口次夫・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (* 気象研)	大気エアロゾルの鉛直分布測定(6)	第26回大気汚染学会	東京	60.11
功刀正行・宮坂恵子・広瀬妙子・溝口次夫・金澤五寿雄*・土器屋由起子* (* 気象研)	大気エアロゾルの鉛直分布測定(7)	第26回大気汚染学会	東京	60.11
笹野泰弘	レーザーレーダー散乱解析の手法	環境科学特別研究研究発表会レーザーセンサー班研究会	東京	60.11

発 表 者	題 目	学会等名称	開催都市名	年 月
清水 浩・杉本伸夫・ 飯倉善和	レーザーレーダー用簡易軽量 受光望遠鏡の試作	第10回レーザ・レーダ (ライダー)シンポジウ ム	福井	60.5
丹野直弘*・斎藤典夫*・ 横戸健一*・清水 浩・ 杉本伸夫・松井一郎 笹野泰弘 (*山形大)	偏光解消測定用レーザーレ ーダーによる降雪雲の測定	第10回レーザ・レーダ (ライダー)シンポジウ ム	福井	60.5
野口和夫*・清水 浩 (*千葉工大)	高分解能レーザーレーダーの 最適設計法	第10回レーザ・レーダ (ライダー)シンポジウ ム	福井	60.5
H. Shimizu, N. Sugimoto, Y. Iikura	Ultralightweight receiving telescope for lidar measurements from the space shuttle	Conf. Lasers Electro- Opt.	Baltimore (U.S.A)	60.5
清水 浩・松井一郎	部分反射鏡を用いた YAG レ ーダーの TEM ₀₀ モードの高 効率化	第46回応用物理学学会学 術講演会	京都	60.10
清水 浩・中根英昭・ 杉本伸夫・松井一郎・ 笹野泰弘・飯倉善和・ 竹内延夫	レーザーレーダーによる広い 領域の測定技術の開発	第26回大気汚染学会	東京	60.11
杉本伸夫・松井一郎・ 清水 浩・竹内延夫	環境濃度 NO ₂ の鉛直分布観測 用 DIAL システムの製作	第10回レーザ・レーダ (ライダー)シンポジウ ム	福井	60.5
N. Sugimoto, I. Matsui, H. Shimizu, N. Takeuchi	Experimental estimation of the error due to the fluctua- tion of aerosol backscattering in DIAL measurements	1st Int. DIAL Data Collect. Anal. Work- shop	Virginia Beach (U.S.A)	60.11
杉本伸夫・松井一郎・ 清水 浩・竹内延夫	NO ₂ 鉛直分布連続観測用差分 吸収レーザーレーダー装置の 開発	第26回大気汚染学会	東京	60.11
竹内延夫・馬場浩司*・ 上野敏行**・桜井捷海**・ 石河直樹*** (*東京大, **千葉大, ***明星電気)	半導体レーザーを光源とする 擬似ランダム変調 CW ライ ダーの動作特性	第10回レーザ・レーダ (ライダー)シンポジウム	福井	60.5
竹内延夫・上野敏行*・ 馬場浩司**・桜井捷海**・ 石河直樹*** (*千葉大, **東京大, ***明星電気)	半導体レーザー RM-CW ライ ダーの動作特性と測定誤差 (1)幾何学的効率と回路雑音 の影響	第46回応用物理学学会学 術講演会	京都	60.10
上野敏行*・竹内延夫・ 馬場浩司**・桜井捷海** (*千葉大, **東京大)	半導体レーザー RM-CW ライ ダーの動作特性と測定誤差 (2)非線形歪みの影響	第46回応用物理学学会学 術講演会	京都	60.10
竹内延夫・大井 紘	半導体レーザーを光源とする 擬似 CW ライダーの試作と 動作特性	環境科学特別研究研究 発表会レーザーセンサ ー班研究会	東京	60.11
竹内延夫	可搬型 RM-CW ライダーによ る夜間エアロゾルの観測	第26回大気汚染学会	東京	60.11
竹内延夫・馬場浩司*・ 桜井捷海**・上野敏行**・ 石河直樹*** (*東京大, **千葉大, ***明星電気)	半導体レーザー擬似ランダム 変調 CW ライダーの特性と性 能評価	日本リモートセンシン グ学会第5回学術講演会	東京	60.12

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	年 月
上野敏行*・佐藤 健**・ 馬場浩司***・ 桜井捷海***・竹内延夫 (*千葉工大、**東京理大、 ***東京大)	擬似ランダム変調 CW ライダ ーにおける変調歪みの影響	昭和61年レーザー学会 学術講演会第6回年次 大会	横浜	61.2
中根英昭・笹野泰弘・ 清水 浩・杉本伸夫・ 松井一郎・竹内延夫・ 大喜多敏一・浦 慶*・ 北村新三* (*神戸大)	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測 定	第10回レーザ・レーダ (ライダー)シンポジウ ム	福井	60.5
中根英昭・清水 浩・ 杉本伸夫・松井一郎・ 林田佐智子・飯倉善和・ 笹野泰弘・竹内延夫・ 大喜多敏一・小林 守*・ 石重 和*・北原隆朗*・ 河村 武* (*筑波大)	レーザーレーダーによる科学 万博会場上空の夜間のエアロ ゾル濃度鉛直分布の観測	日本気象学会1985年秋 季大会	大阪	60.10
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 エアロゾル濃度の空間・時間 分布の観測	第26回大気汚染学会	東京	60.11
北村新三*・浦 慶*・ 中根英昭・笹野泰弘 (*神戸大)	多波長レーザーレーダーによ るエアロゾルの粒径分布測定 に関する基礎的検討	環境科学特別研究研究 発表会レーザーセンサ ー班研究会	東京	60.11
新藤純子・大井 紘	最適観測網の構成問題の一考 察—大気汚染観測に関して—	化学工学協会第51年会	大阪	61.3
宮本定明*・浅山泰祐*・ 池辺八州彦*・大井 紘 (*筑波大)	一般化されたエントロピー評 価基準によるレーザーダ画 像の強調	第28回自動制御連合講 演会	東京	60.11

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 スモッグチャンパーによる炭化水素-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 スモッグチャンパーによる炭化水素-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」の調整、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(VII)—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(VIII)—*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(IX)—藻類培養試験法によるAGPの測定—昭和53、54年度。(1981)
- 第27号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X)—研究総括—昭和53、54年度。(1981)
- 第28号 複合大気汚染の植物影響に関する研究—昭和54、55年度 特別研究報告。(1981)
- 第29号 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
—第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科Orthoclaadiinae 各種の記載と、その分布の下水汚染度との関係について
—第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載)
- ※第30号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究—昭和54、55年度 特別研究報告。(1982)
- 第31号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和55年度 特別研究報告。(1981)
- 第32号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究—環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1)—昭和54年度 特別研究中間報告。(1982)
- 第33号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究—大気運動と大気拡散過程のシミュレーション—昭和55年度 特別研究報告。(1982)
- ※第34号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究—昭和55年度 特別研究報告。(1982)
- 第35号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究。(1982)
- ※第36号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究—昭和55、56年度 特別研究報告。(1982)
- ※第37号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究。(1982)
- 第38号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material.(1982)
(環境標準試料「池底質」の調整、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 土壌環境の計測と評価に関する統計学的研究。(1983)
- ※第42号 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究。(1983)
- ※第43号 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1983)
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June with description of 15 new species.
Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae 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パ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 汚泥の土壌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、生態学的研究)
- ※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-硫酸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 A 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 in 1980-1982.(1985)
(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)
- 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)
(日本の湖沼のユスリカの研究)
- 第84号 重金属環境汚染による健康影響評価手法の開発に関する研究—昭和57~59年度 特別研究総合報告.(1985)
- 第85号 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters.(1985)
(フリーラジカルの反応速度と分光学的及び熱力学的パラメーターに関する研究)
- 第86号 GC/MSスペクトルの検索システムに関する研究.(1986)
- 第87号 光化学二次汚染物質の分析とその細胞毒性に関する研究—昭和53~58年度 総合報告.(1986)
- 第88号 都市域及びその周辺の自然環境等に係る環境指標の開発に関する研究Ⅱ. 環境指標—応用例とシステム—昭和59年度 特別研究報告.(1986)
- 第89号 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing.(1986)
(LANDSATリモートセンシングによる霞ヶ浦の水質計測)
- 第90号 ナショナルトラスト運動にみる自然保護にむけての住民意識と行動—知床国立公園内100平方メートル運動と天神崎市民地主運動への参加者の分析を中心として.(1986)
- 第91号 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions.(1986)
(人間による環境資源利用の経済分析—水環境と国立公園地域を対象にして)
- 第92号 アオコの増殖及び分解に関する研究.(1986)
- 第93号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(Ⅰ)—昭和58~59年度 特別研究総合報告 第1分冊.(1986)
- 第94号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(Ⅱ)—昭和58~59年度 特別研究総合報告 第2分冊.(1986)
- 第95号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(Ⅰ)—汚濁負荷の発生と流出・流達—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- ※第96号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(Ⅱ)—水草帯・河口域・池沼の生態系構造と機能—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- 第97号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(Ⅲ)—水路及び土壌による水質の浄化—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- 第98号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(Ⅳ)—自然浄化機能を活用した処理技術の開発と応用—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- 第99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56~59年度 特別研究総合報告.(1986)
- 第100号 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—特定汚染選択的検出法及び高感度分析技術の開発—昭和58~60年度 特別研究報告.(1986)

- 第101号 複合ガス状大気汚染物質の生体影響に関する実験的研究――昭和57～60年度 特別研究報告。(1986)
- 第102号 地球規模大気質変動に関する予備的研究。(1986)
- 第103号 環境調和型技術としての電気自動車の評価に関する基礎的研究。(1987)
- 第104号 Studies on chironomid midges in lakes of the Akan National Park.(1987)
(北海道阿寒国立公園の湖におけるユスリカ相の研究)
- 第105号 畑地土壌における水分と諸元素の動態。(1987)
- 第106号 筑波研究学園都市における景観評価と景観体験に関する研究。(1987)
- 第107号 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――昭和59～60年度 特別研究報告。(1987)
- 第108号 植物の大気環境浄化機能に関する研究――昭和57～60年度 特別研究総合報告。(1987)

※ 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*(Deptera, 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(Deptera).(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 comouter-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 1979.(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, *Mycrocystis*—1978-1979.(1981)
- No. 26 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Determination of argal 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 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.
- ※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 1).(1982)
- No. 33 * Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region—Simulation of atmospheric motions and diffusion processes — Progress report in 1980.(1982)
- ※No. 34 * The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1980.(1982)
- No. 35 * Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic.(1982)
- ※No. 36 * Studies on the method for long term environmental monitoring—Progress report in 1980-1981.(1982)
- ※No. 37 * Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy —The Evaluation Laboratory of Man-Environment Systems.(1982)
- No. 38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material.(1982)
- ※No. 39 * The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1981.(1983)
- No. 40 * Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1981.(1983)
- ※No. 41 * Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of soil—with special reference to heavy metals—. (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 significance of sediment in nutrient 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 crustacia 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 oxides-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 oxides-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 oxides-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 1981-1983.(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,

Part 4.(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 and formation.(1984)
- No. 75 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa.(1985)
- No. 76 A study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere.(1985)
- No. 77 * The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1983.(1985)
- No. 78 * Study on residents' role in conserving the living environment.(1985)
- No. 79 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report in 1980-1982.(1985)
- No. 80 * Modeling of red tide blooms in the coastal sea—Research report in 1982-1983.(1985)
- No. 81 * A studies 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)
- No. 84 * A comprehensive study on the development of assessment techniques for health effects due to environmental heavy metal exposure—Final report in 1982-1984.(1985)
- No. 85 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters.(1985)
- No. 86 * A novel retrieval system for identifications of unknown mass spectra.(1986)
- No. 87 * Analysis of the photochemical secondary pollutants and their toxicity on cultured cells—Research report in 1978-1983.(1986)
- No. 88 * A comprehensive study on the development of indices systems for urban and suburban environmental quality II —Environmental indices—Applications and systems.(1986)
- No. 89 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing.(1986)
- No. 90 * National trust movement in Japanese nature conservation — Trustworthy or illusion?(1986)
- No. 91 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions.(1986)
- No. 92 * Studies on the growth and decomposition of water-bloom of *Microcystis*.(1986)
- No. 93 * Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil(I)—Research report and papers(Part 1)in 1983-1984.(1986)
- No. 94 * Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil(II)—Research report and papers(Part 2)in 1983-1984.(1986)
- No. 95 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(I)—Drainage and flowing down of pollutant load— Research report in 1983-1984.(1986)
- ※No. 96 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(II)—Structure and function of the ecosystems of littoral zone — Research report in 1983-1984.(1986)
- No. 97 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(III)—Self-purification in stream and soil—Research report in 1983-1984.(1986)
- No. 98 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(IV)—Development and application of wastewater treatment technologies utilizing self-purification ability—Research report in 1983-1984.(1986)
- No. 99 * Effects of toxic substances on aquatic ecosystems—Final report in 1981-1984.(1986)
- No.100 * Studies on the methods for long-term monitoring of environmental pollutants in

- the background regions--Development of highly sensitive and selective analytical methods for measurement of pollutants in the background regions--Progress report in 1983-1985.(1986)
- No.101* Experimental studies on the effects of gaseous air pollutants in combination on animals.(1986)
- No.102* A review on studies of the global scale air quality perturbation.(1986)
- No.103* Technological assessment of electric vehicle from the environmental protection viewpoint.(1987)
- No.104 Studies on chironomid midges in lakes of the Akan National Park.(1987)
Part I .Distribution of chironomid larvae in Lake Akan, Lake Panke and Lake Kussyaro.
Part II .Chironomid midges collected on the shore of lakes in the Akan National Park, Hokkaido(Diptera, Chironomidae)
- No.105* Formulation of the dynamic behavior of water and solutes leaching through the field soil.(1987)
- No.106* Appraised landscape and thier environmental value in Tsukuba Science City.(1987)
- No.107* Studies on remote sensing for spatial and temporal analysis of environment-- Research report in 1984-1985.(1987)
- No.108* Studies on the role of vegetation as a sink of air pollutants--Final report in 1982-1985.(1987)

* in Japanese
✳ out of stock

[昭和61年11月28日編集委員会受領]

**RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN**

No. 107

国立公害研究所研究報告 第107号

(R-107-'87)

昭和62年3月16日発行

発行 環境庁 国立公害研究所

〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

印刷 株式会社 イセブ

〒305 茨城県新治郡桜村天久保2-11-20

**Published by the National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
March 1987**