

環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究

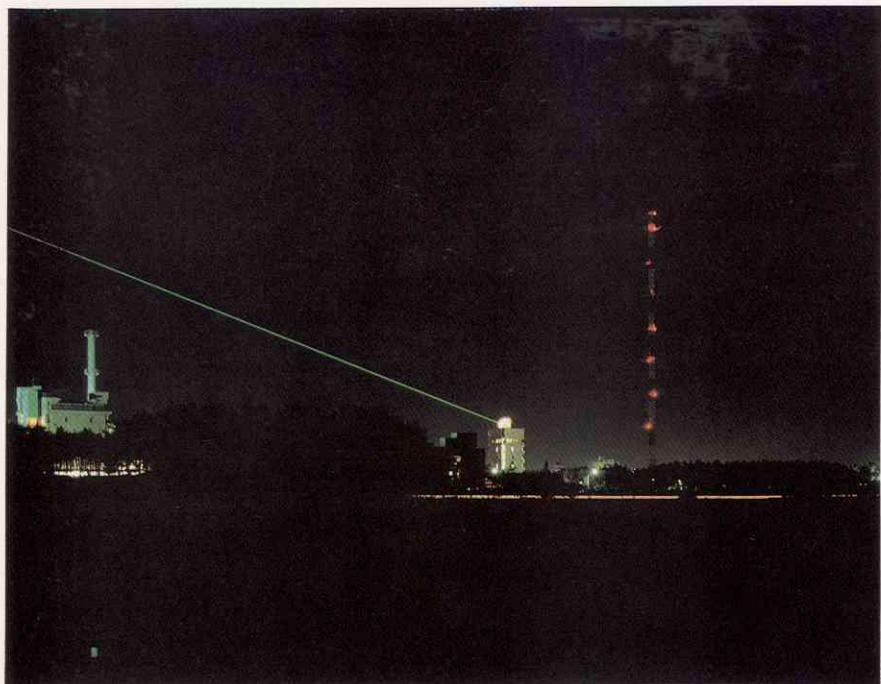
The Development and Evaluation of Remote Measurement Methods for Environmental Pollution

昭和55年度

Research Report in 1980

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES



大型レーザーレーダー夜景

(建設省筑波研究学園都市施設管理センター提供)

序

環境の適正な管理のためには、大気、水域、陸域の状況を正しく把握するための調査、計測がまず第一に必要であろう。しかしながら地球を覆う大気や水域の状態を広い範囲にわたり、時々刻々に計測することは、これまでの限られた地点における離散的観測では到底不可能である。リモートセンシング（遠隔計測）の方法は、これに代わるものの一つとして極めて有効であることは申すまでもない。すでに人工衛星によるマルチスペクトルデータや航空写真をもとにした植生の分類、水質汚濁パターンの把握などの研究が各所で進んでいる。

レーザーレーダーは大気の遠隔測定の新しい方法として注目を集めている。特に当研究所の大気汚染質実験棟に設置された大型レーザーレーダーシステムは現在のところ、大気汚染測定用としては世界最大規模である。したがって、その設計の経過に関する情報も関連分野の方々にとっては有用であろうと考え、この部分についてはやや詳しく紹介した。

レーザーレーダーによる遠隔計測技術を環境測定に適用するための研究はまだ始められて間もないため、その実用化にはいまだ多くの研究継続が必要と考えられる。本報告は環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する国立公害研究所の特別研究プロジェクトの第一年度の成果をまとめたものである。このプロジェクトは、遠隔計測技術を環境管理の方法として実用化することを目的とした学際的研究であり、当研究所の関係各部はもとより、大学等所外の研究者の協力を得て推進されている。

リモートセンシングの研究は、いろいろな分野の研究者が参加して、専門の学会が本年6月に設立された発展途上の分野である。本報告書がリモートセンシングに関係する多くの方々に注目されて御批判を賜れば幸いである。なお、本プロジェクトのリーダーであった奥田典夫大気環境部長は、この報告書の脱稿後急逝された。その遺稿の一つともいえる本報告書が当分野の内外における研究の発展に資するであろうことを信じている。

昭和56年8月22日

国立公害研究所

所長 近藤次郎

目 次

序 (近藤次郎)

I. 研究プロジェクトの概要 (奥田典夫)	1
II. 遠隔計測によるデータ収集と評価について	
1. レーザーレーダーによる大気汚染計測	5
竹内延夫	
2. 大気汚染計測用分光型レーザーレーダーの現状	19
杉本伸夫・竹内延夫	
3. リモートセンシング技術による水質計測の現状	29
宮崎忠国・大井 紘	
4. 道路近傍における自動車排出成分の測定法に関する研究 — 従来の計測法とレーザーレーダーによる計測法の比較	43
溝口次夫・功刀正行	
5. 環境汚染の広域的評価	49
内藤正明	
III. 報 文	
1. 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作	61
清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫	
2. 大型レーザーレーダーの性能試験	83
清水 浩・松井一郎・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫	
3. 大型レーザーレーダーにおける測定用ソフトウェアプログラムの開発	107
杉本伸夫・笹野泰弘・清水 浩・松井一郎・竹内延夫・奥田典夫	
4. レーザーレーダー画像データ処理表示手法の開発	125
笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫	
5. レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向・風速の遠隔計測法	143
清水 浩・笹野泰弘・安岡善文・植田洋匡・竹内延夫・奥田典夫	

6. 単経緯儀法によるパイバル観測により得られる大気境界層中の風向・風速値の 時間・空間代表性.....	153
笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫	
7. スキャニング・レーザーレーダー観測による空間相関法を用いた水平風ベクト ルの決定.....	167
笹野泰弘・広原寿英・山崎哲夫・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫	
8. 差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中の NO ₂ 濃度分布の測定.....	187
杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫	
資料 1.	
「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」に関する研究会（要旨）.....	199
資料 2.	
レーザーレーダーデータ検討会一覧.....	201

CONTENTS

Preface	
J. KONDO	
I. Background of the Research Project	1
M. OKUDA	
II. Data Collection and Evaluation by Remote Measurements	
1. Air Pollution Measurement by Laser Radars	5
N. TAKEUCHI	
2. Present Status of Spectroscopic-Type Laser Radars for Air Pollution Measurement	19
N. SUGIMOTO and N. TAKEUCHI	
3. Present Status of Water Quality Measurement by Remote Sensing	29
T. MIYAZAKI and K. OI	
4. Utilization of Laser Radar for Measurement of Automobile Exhausts	43
T. MIZOGUCHI and M. KUNUGI	
5. Significance of Detecting and Assessing Environmental Pollution on a Regional Basis	49
M. NAITO	
III. Papers	
1. Design and Construction of a Large-Scale Laser Radar for Monitoring Air Pollution over a Wide Range	61
H. SHIMIZU, N. TAKEUCHI, Y. SASANO, N. SUGIMOTO, I. MATSUI and M. OKUDA	
2. Performance Test of the Large-Scale Laser Radar	83
H. SHIMIZU, I. MATSUI, Y. SASANO, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
3. Software Programs for the Large Atmospheric Multi-Purpose (LAMP) Lidar	107
N. SUGIMOTO, Y. SASANO, H. SHIMIZU, I. MATSUI, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
4. Development of Image Processing Programs for Laser Radar Data	125
Y. SASANO, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	

5. Remote Measurement of Wind Direction and Velocity by a Laser Radar Using the Spatial Correlation Technique	143
H. SHIMIZU, Y. SASANO, Y. YASUOKA, H. UEDA, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
6. On the Temporal and Spatial Representativeness of Wind Data Obtained by Single-theodolite Pibal Observations	153
Y. SASANO, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
7. Horizontal Wind-Vector Determination from the Displacement of Aerosol Distribution Patterns Observed by a Scanning Laser Radar	167
Y. SASANO, H. HIROHARA, T. YAMAZAKI, H. SHIMIZU, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
8. Remote Measurement of NO ₂ Profile in a Stack Plume by a Differential Absorption Laser Radar	187
N. SUGIMOTO, N. TAKEUCHI and M. OKUDA	
APPENDIX 1	
Abstract of the Seminars	199
APPENDIX 2	
List of Technical Meetings	201

1. 研究プロジェクトの概要

奥田典夫 (大気環境部)

本研究プロジェクトは従来から当研究所で実施してきた遠隔計測に関するハードからソフト技術にいたる種々の基礎研究に立脚し、これらを統合することにより遠隔計測を環境監視システムとして実用化することを目標として、大気環境部、環境情報部、計測技術部、総合解析部がプロジェクトを組み、発足した総合研究である。昭和55年度に研究を開始し、4年間を一期とする計画で、その間の研究全体のテーマ構成は以下のようなものである。

1. 大型レーザーレーダーによる広域汚染の計測手法の開発

(1) 常時測定のための技術開発

大型レーザーレーダーは定常的な観測体制のもとで、常に機能を最高に発揮した一定の状態で測定することが要求される。そのために、

- 1) 確度の高い試験、較正方法の開発
- 2) 新しい光源の開発

などを行い機能の向上、信頼性の向上を計る。

(2) 広域3次元データの処理・表示手法の開発

- 1) 地球曲率、光路屈折の補正法など広域測定に特有の問題
- 2) 大量データの効率的な処理法
- 3) 3次元データの有効な表示法
- 4) 直交変換等による圧縮法などのデータ蓄積手法
- 5) システムの開発等に関する理論的検討

(3) 広域汚染分布の計測手法の開発

浮遊粒子状物質の広域分布状況の把握を目的として

- 1) 解析対象の現象の空間、時間スケールに応じた測定領域、空間、時間分解能の選択、効率的な空間掃引方法の検討
- 2) 異なる季節、気象、発生源条件のもとでの測定の実施
- 3) 汚染質分布に関する立体的な直接測定に基づくレーザーレーダーデータの検証

4) 広域汚染分布データの蓄積

(4) 汚染質の広域移流・拡散現象の計測手法の開発

- 1) 広域の汚染質分布の時間的推移から、汚染質の移流、拡散現象、広域の風系構造を把握する手法の開発
- 2) 直接測定による検証にもとづいて、現象の空間、時間スケールに応じた測定法の確立
- 3) 広域の移流・拡散、風系構造に関するデータの蓄積

2. 分光型レーザーレーダーによる汚染質空間分布の計測手法の開発

(1) 分光型レーザーレーダーシステムの開発および計測法の評価・検討

- 1) フィールド測定用DIALレーザーレーダーシステムの完成
- 2) NO₂空間分布のDIALシステムによる計測法の評価・検討
- 3) 長光路吸収システムの開発

(2) 複合型レーザーレーダーシステムの開発および計測手法の開発

- 1) 高い空間分解能のミッドレンジレーザーレーダーとの複合による気体成分の詳細な空間分布構造の把握とシステムの開発
- 2) 計測手法の確立
- 3) 汚染成分別空間分野に関するデータの蓄積

3. 画像データによる陸域・海域汚染情報の定量化

(1) 水質汚染の定量的汚染分布の推定手法の開発

- 1) 温排水、廃油、濁質などを画像データから定量的に推定する手法の開発
- 2) 航空機観測と地上のグラントルースの比較による手法の信頼度向上
- 3) 画像データの大気効果の補正

(2) 植物活力度および熱汚染の定量化手法の開発

大気汚染と地物的条件との関係を求めるために、植生、植物活力度および都市域における熱汚染を定量化する手法を開発する。

(3) 2次元画像情報処理手法の開発

水域・陸域にわたる2次元画像データを効率的に処理するために、有効な環境情報の抽出手法の確立、大量画像データの蓄積、検索表示システム（対話型システム）の開発を行う。

4. 分布パターン情報を用いた環境汚染解析およびその環境施策への適用性の検討

(1) 分布パターンデータの特性解析

- 1) 計測された2, 3次元パターンの局所特異性解析, パターン特徴抽出等により, 大気汚染空間分布の特性を定量化
- 2) モニタリングポスト選定やパターンモデルの作成の基礎的検討

(2) 低煙源等大気汚染モデルの改良・作成

汚染分布パターンデータとグラントルース, 煙源データ, 気象因子, および地形因子との相関解析により各種大気汚染モデル, 特に低煙源モデル, Street Canion モデル, 広域移流モデル等の改良, 確立を図る。

(3) 各種汚染質とその汚染分布構造の相関解析

汚染質ごとの空間分布構造について, その分布相関等の関連性を統計的に解析し, 将来の複合汚染・広域汚染指標作成の基礎とする。

(4) 大気汚染パターンと他環境質項目との相関分析

レーザーレーダーによる大気汚染計測と航空機, 衛星データによる熱汚染, 植物活性などの映像データとの相関分析を行う。

本報は研究計画の立案された背景と第一年目に得られた成果を取りまとめた「中間報告」である。その構成は前半(第Ⅱ章)で主として環境データの収集と評価に関する遠隔計測技術の位置づけ, これまでの研究業績, 今後の方向等についてサーベイしそれを分析・整理したものを集約している。次いで後半(第Ⅲ章)では本プロジェクトで過去1年間に得られた成果を各サブテーマごとに並列的にとりまとめている。

なお, 研究実施に伴い現れてくる種々の問題点のため, 前記の計画テーマがすべて同等の進捗状況にあるわけではなく, また研究の総合化も今後の課題として残されていることは本報告に見られる通りである。しかし残された期間内に計画全般のバランスのとれた進展を図るとともに, それを総合化し, 所期の目標に至るべくなお一層の努力を重ねる積りである。

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

II. 遠隔計測によるデータ収集と評価について

II-1

レーザーレーダーによる大気汚染計測

竹内延夫¹

Air Pollution Measurement by Laser Radars

Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

大気汚染現象を時間的にも空間的にも連続に測定することは、現象の把握、シミュレーションモデルの確立など基本的研究にとって非常に重要である。レーザーレーダーは、時・空間的に連続に測定するのに適した手法であり、しかも、遠隔的に測定が可能である。大気汚染現象をその現象がもつスケールによって分類し、スケールとレーザーレーダーの性能との対応を論じた。広域計測に適した国立公害研究所の大型レーザーレーダーシステムについて、その特長、機能について紹介する。

Abstract

Continuous measurement, both temporally and spatially, is important for the study of air pollution, and for this purpose, the laser radar is a powerful remote measuring method. In this paper, the range of air pollution is categorized into scales, and each scale's relation to the capability of various laser radars is discussed. The large laser radar at the National Institute for Environmental Studies, which was designed to study wide-area pollution is introduced.

1. 大気汚染遠隔計測

従来、大気汚染データは、対象地域に散在する地上局の測定データをテレメトリ・システムで集中的に収集することによって得られてきた。したがって、そのデータは空間的に離散した地点のデータであるが、それらを用いて空間的に連続な対象地域の汚染状況を解析してきた。また、測定器はごく限られた局所の汚染気体を吸引して測定しているので、サンプルの局所性やまた吸引操作に

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

1. The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Tsukuba, Ibaraki 305

よる誤差等が入る可能性があり、得られたデータの意味、精度について種々問題がありうる。これらの問題は、レーザーレーダー（ライダー）^{1), 2)}等の手法によって、時間的にも空間的にも連続で、存在するそのままの状態を乱すことなく、遠隔的に測定することによって解決される。

大気汚染現象は、発生源、汚染過程や影響範囲などによって、マイクロ・スケール（0～1 km）、ローカル・スケール（1～10 km）、メソ・スケール（10～100 km）、リージョナル・スケール（100～1,000 km）に分類される^{3), 4)}。また、人間活動の舞台である都市は、通常5～50 kmの大きさを持ち、都市スケールと呼ばれることもある。これらのスケールを有する大気汚染現象について、スケール全体の空間的な特性を明らかにするには、連続的な測定が可能なレーザーレーダー計測が最も適している。

レーザーレーダーには、光と物質の相互作用に基づいて分類すると、浮遊粒子状物質の分布を測定するミー散乱方式と、大気汚染気体の分光的性質を利用して個々の成分の濃度分布を測定する方法がある。従来の研究では、小型のミー散乱方式のシステムを車に搭載して、比較的狭い領域を測定するのがレーザーレーダー計測の主流であった⁵⁾。国立公害研究所では、広域を測定するために、大型のレーザーレーダー装置を設計・製作し、完成させた⁶⁾。本特別研究では大型レーザーレーダーを用いて広域の汚染状況や汚染気塊の移流など、都市スケールやメソスケールの現象の把握と、汚染源や気象条件との因果関係の研究を中心に行う。さらに、大型レーザーレーダーによる広域測定を補うものとして、個々の大気汚染成分の濃度を測定できる分光型レーザーレーダーを含め、車載型システムで、発生源やその近傍への影響といったマイクロスケールやローカルスケールの現象の研究を行っている。以下でレーザーレーダーによる遠隔計測の意義や、レーザーレーダーの種類、および本研究に用いるシステムの特徴について概要を述べる。

2. 大気汚染計測におけるレーザーレーダーの意義

レーザーレーダーは、ライダーとも呼ばれ、レーザー光の強大なパルス出力と優れた指向性を利用し、遠方の物体や状態、濃度、組成などの諸情報を遠隔的に測定する装置である^{1), 2)}。この装置によって大気汚染を遠隔的に計測する場合の原理を図示したものが図1である。この手順を述べる。まず、大気中にパルスレーザー光を射出する。レーザー光が大気汚染物質によって散乱され、戻ってくるまでの時間から距離が、散乱光の性質から成分が、散乱光強度から濃度が求められる。レーザー光の射出方向を掃引することによって、汚染物質の3次元分布を求めることができる。

レーザーレーダーの特徴は、

- 1° 時間・空間的に連続な測定が可能である（空間分布を取得できる）、
- 2° 存在するそのままの状態を遠隔的に測定できる、

ことであるが、これらはレーダー方式に固有な性質である。

レーザーレーダーを、従来から気象・測距の分野で用いられているレーダー（マイクロ波レーダー）と比較してみると以下の長所・短所が存在する：

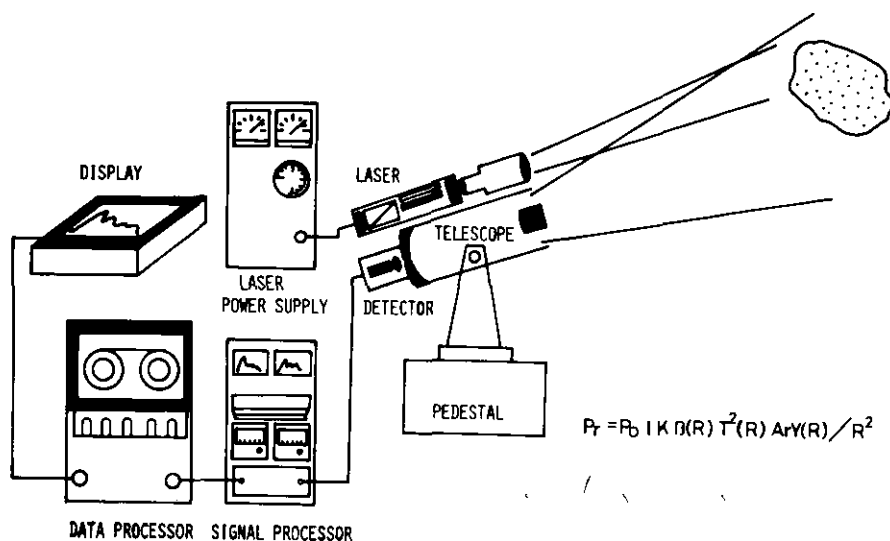


図1 レーザーレーダーの原理

- 1° 有形の散乱体からの散乱は、散乱体の大きさが波長程度になると大きな効果を示す（ミー散乱）。マイクロ波では飛行体や雨滴、雲といった大きな物体しか、測定できないのに対し、レーザー光では煙や目に見えない浮遊粒子も測定可能となる。
- 2° マイクロ波の領域では、水蒸気、炭酸ガス、酸素といったごく一部の分子しか共鳴吸収を示さないのに対し、レーザー光は紫外から赤外までの広い領域にわたっており、各種の分子の共鳴吸収や蛍光、ラマン散乱など、光との相互作用が存在する。したがって、気体の成分の測定や、相互作用を有効に利用した気象要素の測定が可能となる。
- 3° マイクロ波に比べ、光の大気伝播における減衰は大きい。

大気伝播における減衰についてはマイクロ波の方が有利であるが、微小粒子・大気成分の測定が可能であるという利点はマイクロ波にはない長所である。

これらの性質を大気汚染の計測にあてはめると、従来の化学分析を主とする大気汚染物質の測定法と比べて、以下の特長を有する。

- 1° 測定対象に影響を与えることなく、測定が可能である。この性質により、試料のサンプリングによる影響を受けることなく測定できる。また、排出源からの発生状況をありのままの状態 で測定可能である。
- 2° 行路での積分量を求めることができる。レーザーレーダーでは空間分布が得られるので、一点の濃度値だけでなく、必要な距離もしくは領域における濃度の積分値（汚染物質の総量）を算出できる。したがって、シミュレーション・モデル等における対象領域全体の平均濃度を算出できる。
- 3° 地表および上空の測定が可能である。地表での大気汚染の影響を正確に理解するには、上空での汚染状況の情報が必要である。特に汚染物質の拡散を追跡するには、レーザーレーダーに

よる上空の測定が最も効果的な測定法である。

4° 地域の特徴をとらえる測定が可能である。遠隔計測によって、散在した測定点だけでなく、空間的に連続な測定が可能となるので、その地域を代表する特徴をとらえることができる（地域代表性）。また、地上における測定局網の最適配置の決定にも有効である。

5° 広域測定が可能である。汚染気塊の流れや大気中の排煙移流・拡散を測定するために、広域の測定が重要である。移動型や大型のレーザーレーダーによって広域の測定が可能である。

これらの特長を生かして、汚染現象の各スケールに応じて、レーザーレーダーを実用的な計測手法として供する研究が重要である。

3. レーザーレーダーの種類

レーザーレーダーの種類は、(1) 波長、(2) レーザー光源の同調性、(3) 測定原理、(4) 測定対象、(5) 装置の移動性（測定のプラットフォーム）などの観点から分類される。通常、測定原理による分類が一般的である。測定原理と測定対象とは密接な関連があり、大型レーザーレーダーで採用しているミュー散乱方式の場合には、浮遊粒子状物質が対象物であり、分光型レーザーレーダーの場合には個々の汚染気体濃度が測定の対象となる。

3.1 波長による分類

レーザーレーダーで使用される波長は、“大気の窓”領域に存在することが不可欠の条件である。図2に近紫外から赤外にかけての大気の透過率の1例を示す。透過率の良い領域が“大気の窓”領域である。この領域における透過率は、気象条件、特に湿度やエアロゾル量によって、大きく変化する。レーザーレーダーによる遠隔計測の測定精度を高めるためには、信頼のおける大気光学モデルの開発が望まれる。レーザーレーダーでは、検出器として光電子増倍管（フォトマル）を使用できる近紫外、可視、近赤外領域が用いられるが、赤外レーザー光源および赤外検出技術の発展と

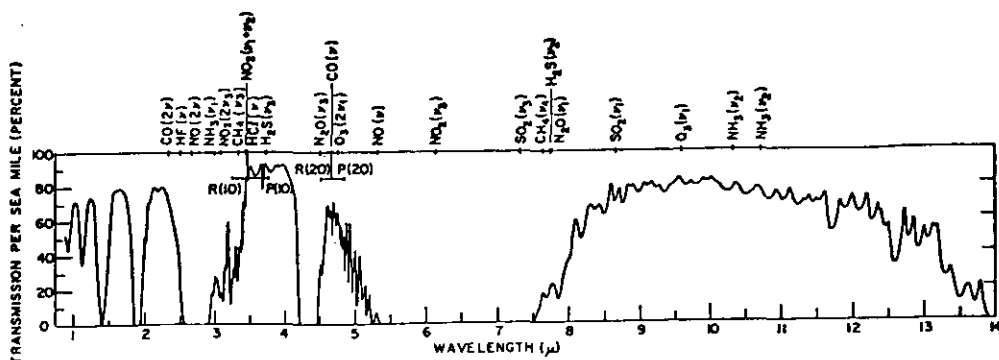


図2 大気の透過特性

もに、気体分子濃度を測定する場合に振動遷移の共鳴吸収を利用できる赤外領域の重要性が認識されつつある。

3.2 光源の同調性

汚染気体濃度を測定する分光型レーザーレーダーのうち、ラマン散乱方式以外（差分吸収散乱方式）では、気体の共鳴吸収に波長を合わせる必要があるのでレーザー光源の波長同調性が、重要である。分光型レーザーレーダーで、波長同調性を要求される場合には、可視領域では、色素レーザーが一般的である。赤外領域では、信頼性における波長可変レーザーはまだ開発途上であるが、光パラメトリック発振器（OPO）、ラマン周波数変換、差周波発生などの非線型光学過程やカラーセンターレーザー、高圧気体レーザーなどがその候補として有望視されている。赤外領域の分子レーザーは、少しずつ離れた多数の波長で発振しているので、分子吸収との偶然の一致を探しだす試みがなされており、特にCO₂レーザー（9.4～10.6 μm）で活発である。また、空間分解能を犠牲にして高感度検出を行う長光路吸収法では、比較的小出力のレーザーを用いることが可能で、中赤外領域の鉛化合物半導体レーザーを波長同調光源として用いることが可能である。

3.3 測定原理・測定対象による分類

本研究で用いている浮遊粒子状物質を測定対象としたミー散乱レーザーレーダーと大気汚染成分濃度を測定対象とした分光型レーザーレーダーについて述べる。

ミー散乱レーザーレーダーは、1908年にMieが発表した理論（屈折率が不連続な媒体に光が入射したときに発生する散乱）に基づいて、入射光の波長より大きな粒子からの散乱光強度から粒子（エアロゾル）濃度を算出する方式である。

ミー散乱の特徴は以下の通りである。

- 1) 粒径パラメーター（ $2\pi a/\lambda$ ； a は粒子半径）が1より大きくなるにしたがって、大きな散乱を示すので、レーザーを光源とした場合、浮遊粒子状物質の測定に適している。
- 2) 散乱体の形状が球状で、粒子半径、複素屈折率が与えられている場合、後方散乱係数を計算できる。後方散乱係数の計算の1例を図3に示す。レーザーレーダーの測定によって得られる情報は、粒径分布によって平均された後方散乱係数である。
- 3) ミー散乱の散乱強度は、粒子1個当りに換算して、吸収、蛍光、ラマン散乱（1分子当り）より、それぞれ約12、16、21桁大きく、また、濃度も地上から高度1～2kmの領域では大きな値を示すので、広い領域を短い時間で測定することが可能である。
- 4) 測定に多波長を用いることによって、粒径分布の情報を得ることができる。
- 5) 直線偏光した光を送信光として用い、散乱光の偏光解消度から粒子形状の非球状性を求めることができる。

ミー散乱レーザーレーダーで、レーザーレーダー方程式から、後方散乱係数 β を求める場合、大

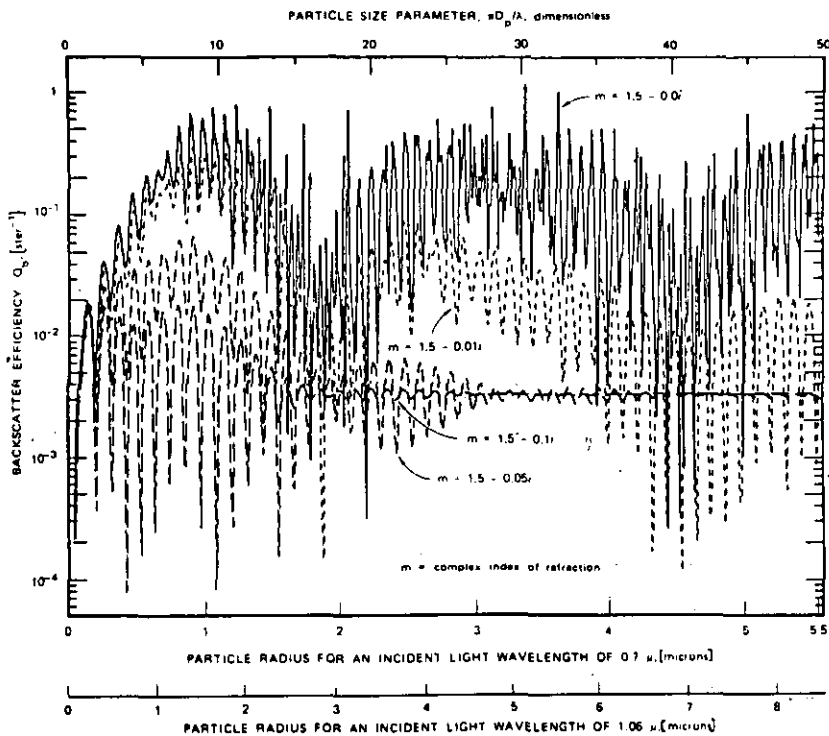


図3 ミー後方散乱係数の計算例

気の減衰率 σ を仮定する必要がある。通常、 β と σ の間に一定の関係を仮定したり、大気の減衰率 σ は一定高度では一定であると仮定して処理する。大気の減衰率 σ は、感覚的指標である視程（目を感じる光の透過率が $1/50$ に減衰する距離）との関係が経験的に求められている。ミー散乱測定と同時に N_2 のラマン散乱を測定するとその減衰率から σ が求まるが、まだこの方法は一般的にはなっていない。

一方、分光型レーザーレーダーは、個々の大気汚染気体濃度の空間分布を得るレーザーレーダーで、ラマン散乱、蛍光散乱、吸収と後方散乱を組合わせた手法（例えば差分吸収散乱レーザーレーダー：DIAL）などがある（詳しくは、II-2参照）。分光型レーザーレーダーでは、到達距離は、（成層圏からの蛍光散乱を例外として）一般に最大、数km程度であるが、直接測定できない排出源からの排出濃度の測定などに効果がある。

3.4 装置の移動性による分類

遠隔計測（リモートセンシング）の観点からレーザーレーダーを眺めると、測定を行うプラットフォームも重要なポイントである。プラットフォームは測定領域と密接な関連がある。通常のミー散乱測定用小型システムでは到達距離が $1 \sim 10$ km であるので、車載型として測定対象物の近く

へ移動し、マイクロ～ローカスケールの現象を計測するか、道路を走行してさらに広い領域を計測することが行われる。この場合メソスケールの 100 km 程度が限界である。さらに広いリージョナルスケールを測定するには、航空機に搭載するシステムが米国、ドイツ等で開発されている。以上はいずれも機動性をもたせたシステムであるが、短時間に広い領域を測定するには、固定局方式でシステムを大型化する方向が考えられる。この場合、都市スケール（ローカルと・メソ・スケールの中間）の測定が可能となり、レーザーレーダーによる大気汚染の実用的計測手法の開発には非常に有効である。この方向に沿って新たに開発されたのが、国立公害研究所の大型レーザーレーダーである。

4. 測定対象とする現象

レーザーレーダーによる測定が適している大気汚染現象をスケール別に紹介する。

(A) マイクロ・スケール (0.1 ~ 1 km)

- 1° 有効煙突高度
- 2° 煙突排煙、排出源からの排出物成分の濃度測定
- 3° 道路からの排ガス拡散測定
- 4° 建物間の気流構造

(B) ローカル・スケール (1 ~ 10 km)

- 1° 煙突周辺の汚染状況
- 2° 面源（群小煙源）の排出状況
- 3° 逆転層構造、混合層構造の測定
- 4° 内部境界層構造およびいぶし現象 (fumigation) の観測
- 5° 工業地帯の大気汚染
- 6° 視程（特に空港周辺など）

(C) 都市スケール (5 ~ 50 km)

- 1° ヒートアイランドなど都市化による現象
- 2° 地域代表性、測定局最適配置などの基礎情報

(D) メソ・スケール (10 ~ 100 km)

- 1° 高濃度汚染域分布図
- 2° 海陸風、湖陸風、山谷風に関する事象
- 3° アーバン・プルーム
- 4° 排煙の長距離輸送
- 5° 広域移流

(E) リージョナル・スケール (100 ~ 1000 km)

- 1° 広域移流（長距離移送）

2° 砂漠化の進行

特にリージョナル・スケールの現象は、大陸内、または大陸間にまたがる現象で、レーザーレーダーによる測定では、航空機に搭載した広域計測システムが必要である。

5. 大型レーザーレーダーの特徴と性能

国立公害研究所の大型レーザーレーダーは、従来、車載型レーザーレーダーで走行したり、航空機に搭載しなければカバーできなかった広域（ローカル～都市スケール）を時間的にも空間的にも連続に測定できるように設計された。そのために、平均出力の大きいレーザーを光源とし、大口径の望遠鏡を用いている。さらに、ミー散乱による浮遊粒子状物質ばかりでなく、ラマン散乱によって温度・湿度・視程などの気象要素の空間分布も測定できる機能を付加されており、大気汚染研究用多目的大型レーザーレーダー（Large Atmospheric Multi-Purpose Lidar）として LAMP ライダーの略称でも呼ばれている。

設計は次の指針で行われた。

- 1) 半径約 50 km の広域の粒子状汚染物質の空間分布を短時間で測定できる。
- 2) 風・温度・湿度・視程などの気象要素の 3 次元分布を測定できる。
- 3) ミニコンピュータによって、システム制御、データ収録等が自動的に行える。
- 4) 速く変化する現象にも追従できるだけのレーザー発振の繰返し、架台掃引の機能をもつ。
- 5) 長時間連続測定を前提として設計されており、長期的定常的計測が可能である。
- 6) 汚染源の位置決定、汚染位置のマッピング、空間パターンの積算による検出感度の向上のために、高精度の方位設定性能を持つ。

以上の指針に基づいて製作された大型レーザーレーダーは大気汚染質実験棟（8 階建）の最上階（ドーム室）とその下の階（7 階：制御室）に分けて設置され、図 4 の構成を持つ。全体の仕様を表 1 に示した。

本システムの特徴は以下の通りである。

（1）測定性能

レーザーレーダーの性能はレーザー出力（平均出力）と受光望遠鏡の面積との積で決められるが、本装置では、Nd:YAG レーザーの繰返し周波数を第 2 高周波の出力が最大となる周波数（この装置では 25 pps）に固定するとともに、大型の望遠鏡（有効口径 1.5 m）を採用して受光面積を大きくしている。レーザー出力と望遠鏡面積の積は基本波で $51 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 、第 2 高調波で $17 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ であり、この値は環境計測用のレーザーレーダーとしては最大規模のものである。

（2）多元情報計測

本装置では、Nd:YAG レーザーの基本波（ $1.06 \mu\text{m}$ ）と第 2 高調波（532 nm）を同時に送光している。また、信号処理系では、第 2 高調波の 4 % を分けとり、そのミー散乱を第 2 チャンネルでモニターできる。2 つのチャンネルを利用することによって、大気中の浮遊粒子状物質濃度の空

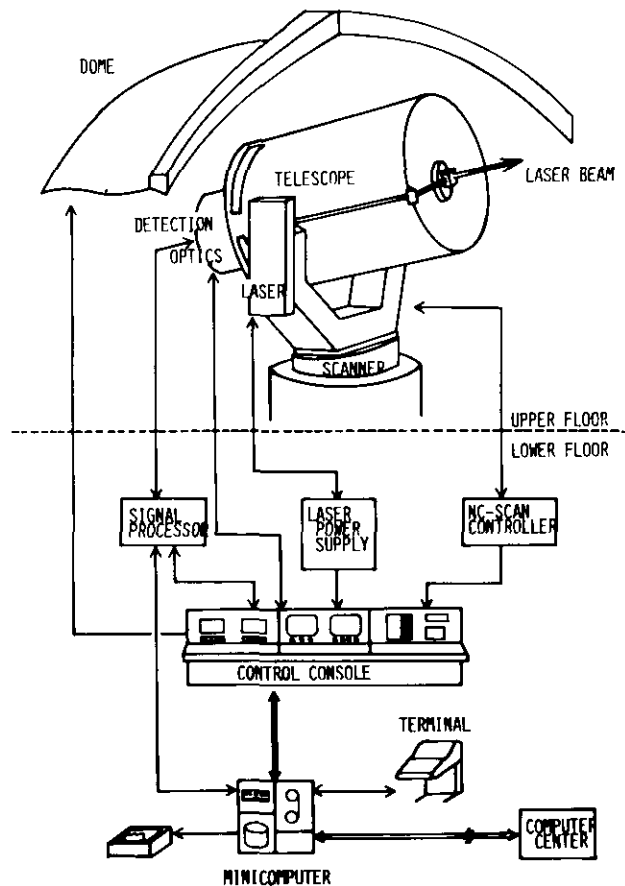


図4 大型レーザーレーダーブロック図

間分布に関して、粒径分布の知見を得ることが可能である。さらに、3段の切換可能な干渉フィルター群やダブルモノクロメータを用いて、ラマン散乱を測定し、微量汚染気体濃度や気象要素についての情報を得ることができる。

(3) 高速現象への追従性

排煙の移流現象など時々刻々変化する現象にも追従できるように、レーザー繰返し周波数(25 pps)に合わせて、高速の磁気テープ(125 インチ/秒, 1600 BPI)をデータ収録用として使用している。架台の掃引も0.1分刻みで、最高10度/秒まで数値制御が可能である。

(4) 位置精度

架台の掃引方向はマイコンによる数値制御装置を採用して、1分の絶対精度(相対精度は0.1分)で制御が可能である。これによって50 km 遠方でも15 m の距離精度で位置を求めることができる。

(5) ミニコンによる制御

本装置の複雑な機能を生かして測定を行うには、オペレーターが操作卓から操作するのは不可能

表1 大型レーザーレーダーの主な性能と特性

測定方法	ミー／ラマン散乱方式	
測定対象	エアロゾル, 汚染気体, 気象要素	
レーザー部	Nd:YAGレーザー (1osc + 3amp)	
波長	1.06 μm (基本波)	0.532 μm (第2高調波)
平均出力	30 W	10 W
最大繰返し	25 pps	25 pps
パルス幅	16 ns	14 ns
ビーム拡がり	0.3 mrad	0.3 mrad
受光望遠鏡	カセグレン型反射望遠鏡	
主鏡有効径	1500 mm	合成焦点距離 8000 mm
副鏡有効径	380 mm	焦点調整 副鏡移動
視野範囲	0.15 ~ 4 mrad	
測定距離	100 m ~ 60 km	
分光装置	フィルター (ターレット切換), ダブルモノクロ	
架台	高位方位方式 速度 10°/s ~ 360°/day	
信号処理部	主・副2系列	
主系列	トランジェント・レコーダ,	
制御部	ドーム, レーザー, 架台, 受光光学系	
制御モード	手動, 自動, ミニコン	
ミニコン	TOSBAC 7/40	
構成	CPU, DISC, MT, LP 他	
転送	専用回線でホストの計算機へデータ転送可能	

であり、ミニコンによってプログラム制御することが不可欠となる。現在、ミニコンから架台の掃引、レーザーの発射、パラメータの読み込み、データの収録などを行えるプログラムが完成している。さらに、研究所の大型コンピュータ（日立M-180）と専用線で結び、測定データの転送、大型コンピュータでの演算、演算結果の受信を行う機能を担っている。

測定例として10 km × 10 km の設定領域の測定パターンを図5に示す。高位角は 0°（水平）で、方位は -135° ~ -180°（SW-S）である。測定波長は 532 nm であり、途中の障害物の影響を取り除く処理を行っている。

6. 大気汚染成分の観測

大気汚染に関する政策的な目標としては、公害対策基本法第9条に基づき、環境基準が定められている。それによると窒素酸化物（NO_x）はNO₂の1時間値の1日平均値が40~60 ppb までのゾーン内またはそれ以下にあること、硫黄酸化物（SO_x）は1時間値の1日平均値が40 ppb 以下であり、1時間値が100 ppb 以下であること、オキシダント（O_x）は1時間値が60 ppb 以下であること、一酸化炭素（CO）は1時間値の1日平均値が10 ppm 以下であり、かつ、8時間平均値が20 ppm 以下であること、浮遊粒子状物質は1日平均値が0.10 mg/m³ 以下で、かつ1時間値が

表2 汚染気体の振動スペクトルの吸収波長

気体の種類	ν_1	ν_2	ν_3
H ₂ O	2.74	6.27	2.66
CO ₂	7.20 w	14.99 i	4.26
CO	4.67		
SO ₂	8.69 w	19.3 i	7.34
NO ₂	7.58 w	15.4 i	6.17 i
NO	5.25		
N ₂ O	7.78	16.98 i	4.50
O ₃	9.96 w	14.08	5.75
CH ₄	3.43	(ν_3) 3.31	(ν_4) 7.66

ν_1, ν_2, ν_3 : 振動の基準モード

単位は μm 。 w : 吸収が弱い。

i : H₂O, CO₂ の吸収と重なる。

i) 可視領域に共鳴吸収を持つNO₂を差分吸収散乱方式(DIAL)レーザーレーダーで測定する手法の開発

ii) 中赤外領域を鉛化合物半導体レーザーを用いて行路平均値を求める長光路吸収法の開発
を取りあげた。後者では、見通し距離を比較的取りやすい道路を測定対象とし、自動車からの排出が一番重要なCOを対象汚染気体として選定した。詳しくはII-2に述べる。

7. まとめ

大気汚染研究の進展とともに、大気汚染現象を空間的にも時間的にも連続に測定し、そのパターンとしての特徴を見つけ、気象条件や地形地物条件との関連を調べるのが重要となってきた。その目的に最も適した測定法がレーザーレーダーによる遠隔計測法である。大気汚染現象をスケールの観点から分類し、本研究に用いる大型レーザーレーダーや分光型レーザーレーダーとスケールとの対応を考察した。本研究では、浮遊粒子状物質の空間分布を指標として、広域汚染や遠隔地輸送の研究を進めている。今後、計測車搭載レーザーレーダーによる発生源近傍の大気汚染成分の測定を含め、研究が進展するものと確信する。

引用文献

- 1) Hinkley, E. D. ed. (1976): Topics in Applied Physics, vol. 14, Laser Monitoring of the Atmosphere, Springer-

Verlag, New York, 380 p.

- 2) 日本気象学会編 (1973) : 気象研究ノート, 116 号, ライダー (レーザーレーダー) と気象観測.
- 3) 河村 武 (1976) : 大気汚染. 気象研究ノート, 128 号, 285 - 301.
- 4) 竹内清秀・木村富士男 (1980) : 化学反応を伴う大気拡散のシミュレーション. 第21回大気汚染学会講演要旨集, 70 - 73.
- 5) 竹内延夫 (1979) : 大気汚染観測用車載型レーザーレーダー. レーザー研究, 6, 15 - 27.
- 6) 清水浩他 (1981) : 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作. 応用物理, 50 (11), 1154 - 1164.

II-2

大気汚染計測用分光型レーザーレーダーの現状

杉本伸夫¹・竹内延夫¹

Present Status of Spectroscopic-Type Laser Radars for
Air Pollution Measurement

Nobuo SUGIMOTO¹ and Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

大気汚染現象の観測において、空間的に連続な濃度分布を測定できる遠隔計測手法は、サンプリング測定にはない特長を持っており、その実用化が期待されている。汚染気体の分光学的特性を利用して気体濃度等を遠隔的に計測するレーザーレーダー手法を分光型レーザーレーダーと定義する。それらには、(1)気体の吸収を利用する差分吸収レーザーレーダー、(2)蛍光法レーザーレーダー、(3)ラマン散乱法レーザーレーダーなどの種類がある。ここでは、最近の文献を中心に分光型レーザーレーダーの大気汚染研究への応用の現状および可能性について議論する。

Abstract

Remote measurement is superior to conventional sampling measurement because it has the advantage of measuring the spatial distribution of air pollutant concentration, and practical remote measurement methods are being sought. The laser radar methods which utilize the spectroscopic characteristics of pollutant gases are denoted as "spectroscopic-type laser radars"; these include (1) differential absorption lidar (DIAL), (2) fluorescence laser radar, (3) Raman-scattering laser radar. Here, the current state-of the-art for spectroscopic-type laser radars in the study of air pollution is discussed.

1. はじめに

大気汚染の動態を把握するうえで、汚染気体の濃度分布を測定することは不可欠である。汚染気体の測定は現在、ポイントサンプリングによる計測手法で行われることが一般的であるが、空間的に広い範囲にわたって連続した濃度分布の得られる遠隔計測手法の実用化が望まれている。本文では、

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

1. The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Tsukuba, Ibaraki 305

レーザー光を用いて、大気汚染気体を遠隔計測する分光型レーザーレーダーについて、研究および開発の現状を報告する。

分光型レーザーレーダーは大気汚染気体の分光的性質を用いてその濃度分布等を遠隔計測するもので、分子の吸収を利用するもの、ラマン散乱を用いるもの、蛍光を用いるものなどがある。

分光型レーザーレーダーは分子固有の分光的性質を用いるため、例えば、吸収、共鳴、蛍光などを用いる方式では、分子の吸収線に同調可能なレーザー光源が必要である。また、一般にレーザーレーダーで遠隔計測を行うためには、水蒸気やCO₂などの強い吸収がなく、大気の透過率の高い大気の窓領域と呼ばれる波長域で測定を行う必要がある。このようなことから、分光型レーザーレーダーの開発は、気体の分光学的性質の研究を基礎として、レーザー光源の開発に伴って発展してきたと言える。

分光型レーザーレーダーに関するレビューとしては、これまでにHinkleyの本¹⁾やKobayashiらによる解説²⁾、Takeuchiによる解説³⁾などがあるが、ここでは、最近の研究を中心に、大気汚染物質の測定を対象とするレーザーレーダーの現状を概説する。

2. 分光型レーザーレーダーの分類

分光型レーザーレーダーには測定対象の分光的性質として、吸収、ラマン散乱、蛍光などを用いる方法がある。また、この他に、二重共鳴を用いる方法なども提案されている。以下に手分別にこれらの現状を述べる。

2.1 吸収を用いる方法

地表付近の微量成分の遠隔測定に対しては吸収を用いるものが最も高感度であると考えられ、多くの研究がなされている。

吸収を用いる手法には、大気中に浮遊するエアロゾルを後方散乱体として利用する差分吸収レーザーレーダー(DIAL)とコーナークューブなどの反射体を用いる長光路吸収法がある。DIAL法は汚染物質濃度を距離分解能を持って測定できる点に特徴を持つが、微少なエアロゾル後方散乱を用いるため、比較的強力なレーザー光源を必要とする。いうまでもなく、レーザー波長は分子の吸収線に同調している必要があるが、強力なレーザー光の得られる波長帯に吸収を持つ分子の種類は限られており、従って、DIALで測定できる分子は限定されている。

一方、長光路吸収法は、反射体までの吸収の積分値を測定するもので、距離分解能は持たない。しかし、反射率の高い反射体を用いることにより、微弱なレーザー光源でも測定が可能である。赤外半導体レーザーは、ほとんどの分子が振動回転遷移の吸収帯を持つ赤外領域で波長可変であるので、赤外半導体レーザーを用いた長光路システムは複数の分子を同時に測定できる可能性がある点で注目される。

大気汚染計測法として重要な、DIAL法と、長光路吸収法については後に章を改めて述べる。

2.2 ラマン散乱法

ラマン散乱は分子固有の振動準位や回転準位に伴う非弾性散乱で、散乱光は分子に固有の周波数だけ入射光からシフトする。ラマン散乱断面積はレイリー散乱と比べて3ケタ程度小さく、大気中の微量汚染物質の遠隔測定を高感度で行うことは難しいと考えられる。ラマン散乱法は N_2 や H_2O などの大気中の主要成分の測定に適している。

ラマン散乱レーザーレーダーによる H_2O の測定は、最近では、Pourny ら^{4), 5)}によって報告されており、 H_2O （絶対湿度）の高度1.8 kmまでの鉛直分布が15%（高度1 kmで）の精度で測定されている。

また N_2 および O_2 の回転ラマンスペクトルの温度変化を用いた気温の測定が、Gill ら⁶⁾により報告されており、2 kmまでの高度で、 $\pm 1^\circ C$ の精度が得られている。

2.3 蛍光法

蛍光は光励起された分子の自然放出過程で通常、蛍光は励起光より長波長側に観測される。蛍光断面積は、大気圧中では空気分子との衝突によるクエンチングのために小さくなっているが、 NO_2 などでは、それでもラマン散乱に比べると大きい。このため、地表付近の NO_2 を測定する蛍光法レーザーレーダーが試みられたこともあったが、大気中のエアロゾルも蛍光を発する⁷⁾ので NO_2 の蛍光のみを検出することが困難である。 NO_2 の蛍光断面積の異なる2波長のレーザー光を用いて測定を行い、エアロゾルの蛍光を除去することは可能であるが、後に述べる差分吸収レーザーレーダーと比べて蛍光法の利点は見い出せない。しかし、成層圏の微量成分に対しては、クエンチングが小さいため蛍光法による高感度の測定が期待できる。一方、高層ではDIAL法は必ずしも有効ではない。

最近、スペースシャトル搭載蛍光法レーザーレーダーによる成層圏のOHラジカルの測定の検討⁸⁾や、 NO_2 のPre-dissociation cut-off (398 nm)の前後の2波長を用いた蛍光法レーザーレーダーの検討⁹⁾がなされている。

また、共鳴散乱を利用した地上ベースのレーザーレーダーは高層（中間圏上部から熱圏下部：高度60～120 km）のKやNa層の測定に有効である。Na層の観測はSandford ら¹⁰⁾、Gardner ら¹¹⁾、Nagasawa ら¹²⁾、Kamimura ら¹³⁾などによって行われており、Naをトレーサーとした高層大気の運動の研究がなされている。また、最近、Liの観測がJegou ら¹⁴⁾により報告されている。

2.4 その他の手法

以上に述べた測定法はすべて線型な分光的特性を応用したものであるが、二重共鳴など非線型過程を用いる測定法も提案されている。Measuresによって提案されたPROBE法^{15), 16)} (Profile Resolution Obtained By Excitation) は対向する二つのレーザーパルスを用い、一方のパルスで特定分子を励起し、もう一方で励起状態にある分子の吸収を測定するものである。PROBE法の大気

汚染計測への応用の検討結果によるとCOについてはCO₂レーザーの第2高調波を用いて測定が可能であろうと考えられる¹⁷⁾が、微量成分については現在得られる光源では測定は困難である。しかし、PROBE法は測定分子に対する選択性が強いなどの特徴を持っており、大気汚染への応用に限らず、今後の研究が期待される。PROBE法の他にも、NH₃が2光子により連続的に解離されて生成するNH*の蛍光を利用した、大気中のNH₃の測定が報告されている¹⁸⁾。

3. 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 (Differential Absorption Lidar ; DIAL) はミー (レイリー) 散乱レーザーレーダー信号の分子の吸収による減衰項に着目した手法で、1966年にSchotlandによって提案された¹⁹⁾。測定対象成分の吸収係数の異なる2波長におけるレーザーレーダー信号プロファイルは吸収の大きい波長で減衰が大きい。従って、ある任意の距離に対応する受信信号の2波長の比より、その距離までに受ける吸収の大きさ、すなわち、その距離までに分布する分子濃度の積分値が得られる。これを距離方向に微分することにより、分子濃度のプロファイルが得られる。

最初のDIAL実験は、温度同調ルビーレーザーを用いた水蒸気分布の測定であった¹⁹⁾。その後、レーザー光源の開発に伴って、多種の汚染成分についてDIALの研究が行われてきた。これらのうち、主なものを表に示す。DIALの開発はレーザー光源と切り離して考えることはできないので表では光源別の分類を行っている。表には、参考のため、報告されている最小検出感度 (精度) を示したが、積算時間などが明確にされていない場合も多く、一概には比較できない。なお最小感度は (濃度) × (距離分解能) の値を ppb-km または ppm-km で示した。

有機色素レーザーは近赤外から近紫外までの波長域で同調可能で、高出力の得られる良好な光源である。しかしながら、この波長域に吸収帯を持つのはSO₂ (～0.3 μ), NO₂ (～0.4～0.5 μ), O₃ (～0.3 μ), H₂O (～0.7 μ, ～0.1 μ) のみである。NO₂, SO₂, O₃の測定は、Rotheら^{20), 21)}やGrantら^{22), 23)}により早くから研究されており、現在ではすでに、SRIなどいくつかの研究機関で車載型のシステム²⁵⁾⁻²⁷⁾が開発されるに至っている。国立公害研究所においても、NO₂測定用DIALシステムの開発を行い、排煙を対象に測定実験を行った²⁸⁾。これについてはⅢ-8で述べる。

H₂Oの測定は、最近ではBrowellら²⁹⁾によって行われ、高度3 kmまでの水蒸気分布が高精度で測定された。NASAでは、水蒸気をトレーサーとした大気の流れの観測を目的とした航空機搭載H₂O DIALシステムが開発されている³⁰⁾。

赤外領域では、TEA CO₂レーザー (～10 μ) およびその第2高調波を用いて多くの研究がなされている。これらのうち、O₃については、Asaiら³²⁾により高精度の測定結果が報告されている。さらに、O₃の地域分布の測定を目的に、航空機から地表の反射を利用してO₃の長光路測定を行うシステムの開発が行われている³³⁾。CO₂レーザーの第2高調波を用いた実験では、建物などをトポグラフィックターゲットとして用いた長光路測定ではあるが、CO³⁴⁾、NO³⁵⁾の測定がなされている。

光パラメトリック発振器 (Optic Parametric Oscillator, OPO) は、1.4～4 μの波長域で同

測定対象	波長(μm)	光源	最小感度(精度)	観測時間	空間分解能	装置の形態	測定例	研究機関	参考文献
H ₂ O	0.694	temp-tuned Ruby レーザー				DIAL	鉛直プロファイル	New York Univ.	Schojland (1966) ¹⁹⁾
NO ₂	0.45	フラッシュランプ励起 色素レーザー	20 ppb・km	~60 min	100 m	DIAL	排煙パターン	Koln Univ.	Rotte <i>et al.</i> (1974) ^{20), 21)}
NO ₂ SO ₂ O ₃	0.45 0.3 0.3	フラッシュランプ励起 色素レーザー	50 ppb・km 60 ppb・km 120 ppb・km	~15 min		吸収セルを用いた実験		SRI	Grant <i>et al.</i> (1974) (1975) ^{22), 23)}
SO ₂	0.3	フラッシュランプ励起 色素レーザー	4.5 ppb・km		300 m	DIAL	排煙	NASA Langley	Hoell <i>et al.</i> (1976) ²⁴⁾
SO ₂ NO ₂ O ₃	0.3 0.45 0.3	YAG レーザー励起 色素レーザー	2 ppb・km 2 ppb・km 2 ppb・km	50 m		車載型 DIAL	排煙パターン 都市域(一次元) 鉛直プロファイル	SRI	Hawley <i>et al.</i> (1981) ^{25), 26)}
SO ₂ NO ₂	0.3 0.45	YAG レーザー励起 色素レーザー	~10 ppb・km		~50 m	車載型 DIAL	工場排煙	Chalmers Univ.	Fredriksson <i>et al.</i> (1981) ²⁷⁾
NO ₂	0.46	フラッシュランプ励起 色素レーザー	3.5 ppb・km (at 500 m)	4 min	120 m	DIAL	排煙(一次元)	公害研	杉本ほか(1981) ²⁸⁾
H ₂ O	0.724	Ruby レーザー励起 色素レーザー	~±1 % (at 1 km at night)	100 s	100 m	DIAL	鉛直プロファイル	NASA Langley	Browell <i>et al.</i> (1979) ²⁹⁾
H ₂ O	0.724 0.960	YAG レーザー励起 色素レーザー				Air-borne DIAL		NASA Langley	Browell <i>et al.</i> (1980) ³⁰⁾
H ₂ O	1.03	CO ₂ レーザー		400 s	60 m	DIAL	水平方向 1.2 km まで	SRI	Murray <i>et al.</i> (1976) ³¹⁾
O ₃	1.0	CO ₂ レーザー	4.5 ppb・km (at 500 m)	100 s	300 m	DIAL	都市域 2 km まで	電政研	Asai <i>et al.</i> (1979) ³²⁾
O ₃	1.0	CW CO ₂ レーザー			—	Air-borne, 長光路へ テロダイン検知	地域分布	電政研	Itabe <i>et al.</i> (1980) ³³⁾
CO	4.6	CO ₂ レーザー 第2高調波(SHG)	25 ppb・km		—	トポグラフィックター ゲットを用いた長光路		MIT	Kallinger <i>et al.</i> (1980) ³⁴⁾
NO	5.3	CO ₂ レーザー SHG	~50 ppb・km		—	トポグラフィックター ゲットを用いた長光路		MIT	Menyik <i>et al.</i> (1980) ³⁵⁾
SO ₂	4.0	YAG レーザー励起 光パラメトリック 発振器(OPO)	0.9 ppm・km ~4 ppm・km	40 s	—	トポグラフィックター ゲットを用いた長光路		Stanford Univ.	Baumgartner <i>et al.</i> (1978) ^{36), 37)}
H ₂ O HCl CH ₄	1.77	YAG レーザー励起 OPO	~±1 % ±1 °C	45 s	—	トポグラフィックター ゲットを用いた長光路		Stanford Univ.	Erdmann <i>et al.</i> (1980) ³⁸⁾
N ₂ O HCl CH ₄	3.89 3.636 3.715	DF レーザー	0.24 ppm・km 0.05 ppm・km 5.0 ppm・km		—	トポグラフィックター ゲットを用いた長光路		SRI	Murray <i>et al.</i> (1976) ³⁹⁾
N ₂ O	3.89	DF レーザー	~0.5 ppm・km		—	トポグラフィックター ゲットを用いた長光路		Institute for Physik	Altmann <i>et al.</i> (1980) ⁴⁰⁾
成層圏 O ₃	0.308	XeCl エキシマ レーザー	~±15 % at 25 km	~260 min	1.5 km	増上ベース DIAL	成層圏 O ₃ プロファイル 15~30 km	九州大学	Uchino <i>et al.</i> (1978) (1980) ^{41), 42)}

調可能で、SO₂、CH₄などの長光路測定がBaumgartnerら^{36), 37)}によって行われている。また、H₂O(絶対湿度)および気温の測定が報告されている³⁸⁾。気温の測定はH₂Oの吸収帯の回転構造の温度依存性を利用したもので、Mason³⁹⁾によって提案された手法である。

また、DF レーザー(~4 μ)を用いたN₂O、HCl、CH₄の長光路測定が報告されている^{40), 41)}

この他に、紫外域ではXeClエキシマレーザー(0.308 μ)を用いた成層圏オゾンプロファイルの観測がUchinoら^{42), 43)}により行われている。

4. 長光路吸収システム

大気の透過率 T は吸収係数 α と光路長 l を用いて Beer の法則によって

$$T = \exp(-\alpha l)$$

と表せる。長光路吸収法は、光路長 l を長くとり、極く小さい吸収係数 α を求める測定法である。行路を一定にとるので、通常はその光路の平均濃度だけで空間分解能は得られない(平面内を多数方向に測定すれば、多元連立方程式を解くことによって、原理的には空間分解能を得ることができ

る。)。しかし、差分吸収レーザーレーダーの基本段階としても長光路吸収法の意義は大きい。

可視・紫外領域のレーザーや赤外の CO_2 レーザーなどの強力なレーザー光源を用いた長光路吸収法は、3章で述べられているので、ここでは、ほとんどすべての気体が共鳴吸収を持つ中赤外領域の代表的な波長同調光源である鉛化合物半導体レーザーを光源とする方法について紹介する。

鉛化合物半導体レーザー（以下SDL：Semiconductor Diode Laser と略称）は、図1に示すように $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ 、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{S}$ 、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{S}$ 、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$ 、 $\text{PbS}_{1-x}\text{Sex}$ 、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ などがあり、発振波長は $2.5 \sim 34 \mu\text{m}$ の範囲にわたっている^{44), 45)}。このうち、現時点で問題になるのは後3者で、発振波長は $4.6 \mu\text{m}$ より長波長である。鉛化合物半導体レーザーは $N-V$ 族化合物半導体に属し、次の性質を持つ：

- 1) 液体窒素温度以下の動作温度を要する。
- 2) 温度、電流、磁場によって容易に波長同調をとれる。逆に、温度の変動により、たやすく発振波長が変化する。
- 3) 低温と室温の間の熱サイクルによって劣化を受けやすい。
- 4) 通常、単一モードで連続発振可能なのは $0.5 \sim 3 \text{ cm}^{-1}$ 、同一素子で 50 cm^{-1} 程度である。
- 5) 発振出力は 1 mW 以下であることが多い。

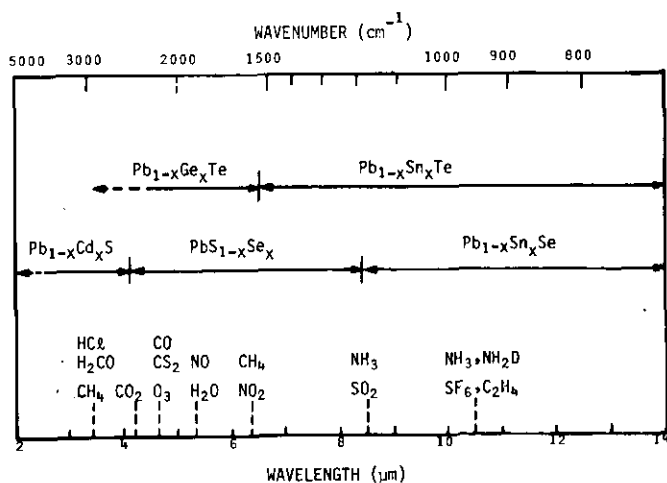


図1 赤外半導体レーザーの発振波長域と共鳴吸収を示す汚染気体

SDLは自動車排ガス中の CO 、 NO 、 C_2H_4 、 H_2O ⁴⁶⁾ や煙道中の SO_2 ⁴⁷⁾ の測定に用いられている。最近、Reid らは White cell 型の多重光路セル（セル長 5 m 、全光路長 200 m ）と組合わせて、 SO_2 、 N_2O 、 NH_3 を 1 ppb の精度で測定している⁴⁸⁾。長光路吸収法はこの方法を野外の長光路に応用したものである。初期の測定例では $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ レーザーを用いて往復光路 1 km で、駐車場上空の C_2H_6 の濃度が精度 100 ppb で測定され、自動車の発着による濃度の変化が観測されている⁴⁹⁾。

1975年には米国環境保護庁（EPA）による RAPS（Regional Air Pollution Studies）の一環として、St. Louise で夏季に40日間にわたり、往復光路680 mにとり、COの連続測定が行われ、測定局データとの比較がなされ、良い一致が見られている⁵⁰⁾。その測定の1例を図2に示す。

国立公害研究所では、4.6 μ 帯の $\text{PbS}_{1-x}\text{Sex}$ レーザーを用いた長光路システムの開発を行っている。

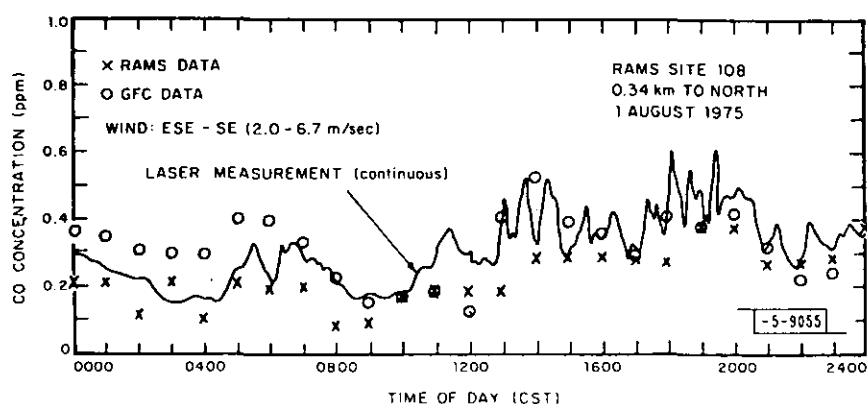


図2 半導体レーザーを光源とする長光路吸収法によるCO濃度の連続測定と他の測定法との比較

本研究では、周波数のドリフトを除くために、COの吸収線に発振波長を固定し、干渉ガス等の変動因子の影響を除くために、周波数変調による2次導関数法による検出法を採用している。道路周辺のフィールド観測を行うことを目標にシステムの設計を行い、現在、室内実験によって性能テストを行っている。

5. あとがき

分光型レーザーレーダーは、大気汚染気体の空間的な分布状態を観測できるため、大気汚染の研究に極めて有用な情報を与えるものである。しかし、分光型レーザーレーダーによる測定は汚染物質および大気分光特性による物理的な制約や、レーザー光源からの制約を受ける。このため、実用的なレベルで測定が可能な物質の種類は限定されている。3章で述べたように、例えば、DIAL法による NO_2 、 SO_2 、 O_3 、 H_2O の測定などは現在すでに実用レベルに近いと考えられる。しかし、これらの場合でも、測定感度、距離分解能、時間分解能などには制約があり、今後、実用化を進めるためには、分光型レーザーレーダーの性能を考慮したうえで、その特徴を発揮できるような応用研究を行っていく必要がある。さらに、応用研究からの要求に応じた、計測システムの開発や測定手法の開発を行わなければならない。

一方では、レーザー光源の開発や汚染物質の分光特性の研究などの基礎研究によって、分光型レーザーレーダーの可能性がさらに広げられることが期待される。

引用文献

- 1) Hinkley, E. D. ed. (1976): Laser Monitoring of the Atmosphere, Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York (1976).
- 2) 小林・稲場 (1977): レーザーによる環境大気のリモートセンシング. 計測と制御, 16 (12), 908 - 916.
- 3) 竹内 (1977): レーザーを用いた大気汚染物質の遠隔測定. 公害と対策, 13, 90 - 99.
- 4) Pourny, J. C., D. Renut *et al.* (1979): Raman-lidar Humidity Sounding of the Atmospheric Boundary Layer. Appl. Opt., 18(8), 1141-1148.
- 5) Renaut, D., J. C. Pourny *et al.* (1980): Daytime Raman-lidar Measurements of Water Vapor. Optics. Lett., 5(6), 233-235.
- 6) Gill, R., K. Geller *et al.* (1979): Measurement of Atmospheric Temperature Profiles Using Raman Lidar. J. Appl. Meteor., 18, 225-227.
- 7) Gelbwachs, J. and M. Birnbaum (1973): Fluorescence of Atmospheric Aerosols and Lidar Implications. Appl. Opt., 12(10), 2442-2447.
- 8) Heaps, W. S. (1980): Measurement of Hydroxyl Radical in the Upper Atmosphere Using Lidar from Space Shuttle. Appl. Opt., 19(2), 243-249.
- 9) McIlath, T. J., C. Dulcey *et al.* (1980): Two Wavelength NO₂ Fluorescence Lidar Using the 397 nm Predissociation Cutoff. 10th International Laser Radar Conference, Maryland.
- 10) Sanford, M. C. W. and A. J. Gibson (1970): Laser Radar Measurements of the Atmospheric Sodium Layer. J. Atm. Terr. Phys., 32, 1423-1430.
- 11) Gardner, C. S. and J. D. Shelton (1981): Spatial and Temporal Filtering Technique for Processing Lidar Photocount Data. Opt. Lett., 6(4), 174-176.
- 12) 長沢・内海ほか (1981): レーザーレーダーによる中間圏ナトリウム層の観測 (Ⅱ). 第7回レーザーレーダーシンポジウム予稿, 19 - 20 (浜松).
- 13) 上山・富田ほか (1981): 色素レーザーレーダーによるナトリウム層の観測 (Ⅱ) (Ⅲ). 第7回レーザーレーダーシンポジウム予稿, 23 - 26 (浜松).
- 14) Jegou, J. P., M. Chanin *et al.* (1980): Lidar Measurements of Atmospheric Lithium. Geophys. Res. Lett., 7(11), 995-998.
- 15) Measures, R. M. (1977): PROBE: A New Technique For Measuring the Density Profile of a Specific Constituent Using Counterpropagating Laser Pulses. Appl. Opt. 16(11), 3016-3026.
- 16) Measures, R. M. (1978): PROBE-Profile Resolution Obtained By Excitation. Appl. Spectrosc., 32(4), 381-388.
- 17) 杉本・竹内ほか (1980): PROBE 法による大気汚染物質濃度分布測定の検討. 41 回応用物理学会, 名古屋.
- 18) Halpern, J. B., W. M. Jackson *et al.* (1979): Multiphoton Sequential Photodissociative Excitation: A New Method of Remote Atmospheric Sensing. Appl. Opt., 18(5), 590-592.
- 19) Schotland, R. M. (1966): Some observations of the vertical profile of water vapor by means of laser optical radar. Symp. on Remote Sensing of Environment, 4th, proc. 273-283, Ann Arbor.
- 20) Rothe, K. W., U. Brinkmann and H. Walther (1974): Remote measurement of NO₂ emission from a chemical factory by differential absorption technique. Appl. Phys., 4, 181-182.
- 21) Rothe, K. W., U. Brinkmann and H. Walther (1974): Applications of tunable dye lasers to air pollution detection: measurements of atmospheric NO₂ concentration by differential absorption. Appl. Phys., 3,

- 22) Grant, W. B., R. D. Hake, Jr., R. C. Robbins and E. K. Proctor, Jr. (1974): Calibrated remote measurement of NO_2 using the differential absorption backscatter technique. *Appl. Phys. Lett.*, **24**(11), 550-552.
- 23) Grant, W. B. and R. D. Hake, Jr. (1975): Calibrated remote measurements of SO_2 and O_3 using atmospheric backscatter. *J. Appl. Phys.*, **46**(7), 3019-3023.
- 24) Hoell, J. M., W. R. Wade and R. T. Thompson (1975): *Proc. Int. Conf. on Environmental Sensing and Assessment, Las Vegas.*
- 25) Hawley, K. G., G. F. Wallace and L. D. Fletcher (1981): A mobile differential absorption lidar (DIAL) for range resolved measurements of SO_2 , O_3 , and NO_2 . 19th Aerospace Science Meeting on Measurement and Modeling of Atmospheric Trace, St. Louis.
- 26) Hawley, J. G. (1981): A mobile differential absorption lidar for the remote measurement of sulfur dioxide, ozone, and nitrogen dioxide. *Laser Focus March*, 60-61.
- 27) Fredriksson, K., B. Galle and K. Nyström (1981): Mobile lidar system for environmental probing, *Appl. Opt.*
- 28) 杉本・竹内ほか (1981) : 差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中の NO_2 濃度分布の測定. *応用物理*, **50** (9), 923-928.
- 29) Browell, E. V., T. D. Wilkerson and T. J. McIlrath (1979): Water vapor differential absorption lidar development and evaluation, *Appl. Opt.*, **18**(20), 3473-3483.
- 30) Browell, E. V., A. F. Carter and T. D. Wilkerson (1980): An airborne differential absorption lidar system for water vapor investigation. *Optical Engineering "Instrumentation for Environmental Sensing"*.
- 31) Murray, E. R., J. E. van der Laan and J. G. Hawley (1976): Remote measurement of HCl , CH_4 and N_2O using single-ended chemical-laser lidar system. *Appl. Opt.* **15**(12), 3140-3148.
- 32) Asai, K., T. Itabe and T. Igarashi (1979): Rang-resolved measurements of atmospheric ozone using a differential absorption CO_2 laser radar. *Appl. Phys. Lett.*, **35**(1), 60-62.
- 33) Itabe, T., T. Matsui and T. Igarashi (1980): Air-borne CO_2 laser heterodyne remote sensor for monitoring regional ozone. 10th Int. Laser Radar Conf.
- 34) Killinger, D. K., N. Menyuk and W. E. Defeo (1980): Remote sensing of CO using frequency doubled CO_2 laser radiation. *Appl. Phys. Lett.*, **36**(15), 402-405.
- 35) Menyuk, N., D. K. Killinger and W. E. Defeo (1980): Remote sensing of NO using differential absorption lidar. *Appl. Opt.*, **19**(19), 3282-3286.
- 36) Baumgartner, R. A. and R. L. Byer (1978): Remote SO_2 measurements at $4\text{ }\mu\text{m}$ with a continuously tunable source. *Optics Lett.*, **2**(6), 163-165.
- 37) Baumgartner, R. A. and R. L. Byer (1978): Continuously tunable IR lidar with applications to remote measurements of SO_2 and CH_4 . *Appl. Opt.*, **17**, 3555-3561.
- 38) Endemann, M. and R. L. Byer (1980): Remote single-ended measurements of atmospheric temperature and humidity at $1.77\text{ }\mu\text{m}$ using a continuously tunable source. *Optics Lett.*, **5**(10), 452-454.
- 39) Mason, J. B. (1975): Lidar Measurement of Temperature: a New Approach. *Appl. Opt.*, **14**(1), 76-78.
- 40) Murray, E. R., R. D. Hake, Jr., J. E. van der Laan and J. G. Hawley (1976): Atmospheric water vapor measurements with an infrared ($10\text{-}\mu\text{m}$) differential absorption lidar system. *Appl. Phys. Lett.*, **28**(9), 542-543.
- 41) Altmann, J., W. Lahmann and C. Weitkamp (1980): Remote measurement of atmospheric N_2O with a DF laser lidar. *Appl. Opt.*, **19**(20), 3453-3457.
- 42) Uchino, O., M. Maeda, J. Kohno, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hirono (1978): Observation of stratospheric ozone layer by XeCl laser radar. *Appl. Phys. Lett.*, **33**(1), 807-809.
- 43) Uchino, O., M. Maeda, T. Shibata, M. Hirono and M. Fujiwara (1980): Measurement of stratospheric vertical ozone distribution with a Xe-Cl lidar; estimated influence of aerosols. *Appl. Opt.*, **19**(24), 4175-4181.
- 44) 竹内延夫 (1981) : 半導体レーザーの分光・計測への応用. *電子科学*, **31** (6), 37-44.

- 45) 神保孝志・梅野正義・服部秀三 (1981) : 波長 5 ~ 15 μ m 帯半導体レーザー・レーザー研究, 9, 342 - 348.
- 46) Ku, R. T., E. D. Hinkley and J. O. Sample (1975): Long-path monitoring of atmospheric carbon monoxide with tunable diode laser system. Appl. Optics, 14, 854.
- 47) Hinkley, E. D. (1972): Tunable infrared lasers and their applications to air pollution measurements. Opto-Electron., 4, 69.
- 48) Reid, J. *et al.* (1978): High sensitivity point monitoring of atmospheric gases employing tunable diode lasers. Appl. Optics, 17, 1806-1810.
- 49) Harman, T. C. and I. Melngailis (1974): Applied Solid State Science, vol. 4, ed. R. Wolfe Academic Press p. 79.
- 50) Ku, R. T. and E. D. Hinkley (1976): Long-path monitoring of atmospheric carbon monoxide — 1975 Regional air pollution study, MIT Lincoln Lab. Rept., NSF/RANN/IT/GI-37603.

II-3

リモートセンシング技術による水質計測の現状

宮崎忠国¹・大井 紘¹

Present Status of Water Quality Measurement by Remote Sensing

Tadakuni MIYAZAKI¹ and Koh OI¹

要 旨

人工衛星や航空機を利用したリモートセンシング技術により水域の環境計測がさかんに行われるようになってきた。本章では水域観測に用いられる人工衛星および航空機搭載のマルチスペクトルスキヤナ (MSS) の紹介と、湖沼あるいは内湾等の富栄養化現象と最も関連の深いクロロフィル-*a*, SS (浮遊物質), 透明度等の水質項目をリモートセンシング技術により観測した例について内外の文献の紹介を行った。

Abstract

The increasing potential of remote sensing techniques and their application in a variety of fields during the last decade, have demonstrated that they offer new ways to solve many problems of the natural sciences.

The aim of the present chapter is to discuss recent methods of remote sensing and their applicability to water quality measurement. Particular emphasis is put on an introduction to space craft and airborne multispectral scanners as remote sensor systems, as well as the review of the chlorophyll-*a* and suspended sediment measurement in water bodies, such as lakes, bays, and ocean.

1. はじめに

近年、人工衛星、航空機を利用したリモートセンシング技術が、湖沼、内湾、沿岸水域等の環境調査にたびたび利用されるようになってきた。一般に、人工衛星や航空機リモートセンシングによる水域の調査は、図1に示すように対象水域のリモートセンシングデータの収集とランドトランスによって行われる。しかしリモートセンシングによる水質計測は、センサーの感度、分解能、パ

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

1. The National Institute for Environmental Studies, Environmental Information Division, Tsukuba, Ibaraki 305

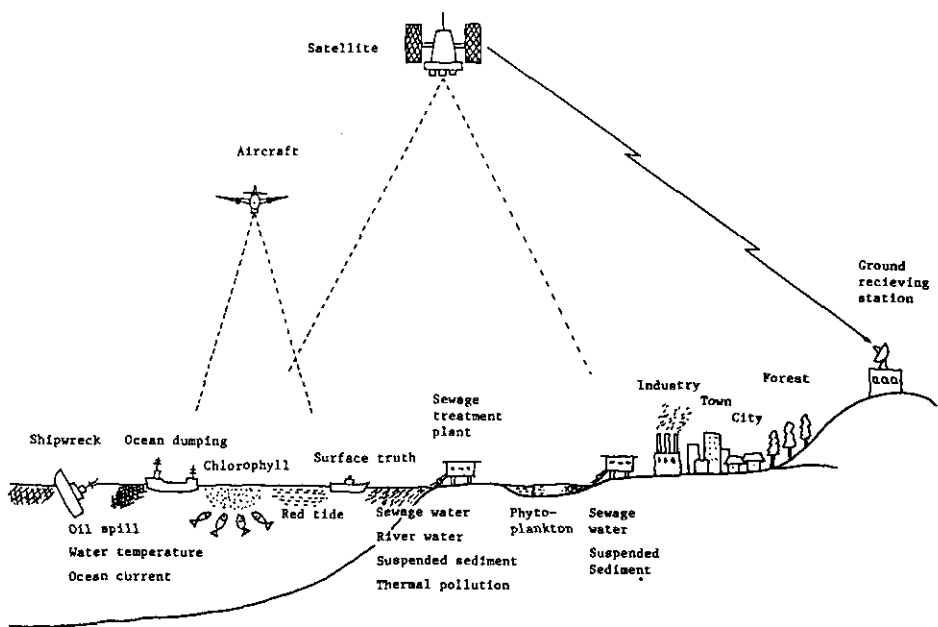


図1 水域リモートセンシングの概要

ソド幅の問題、最適波長の選択、気象要因、パサラディアンズ、水面反射光等の妨害光の除去など解決しなければならない多くの問題が残されているため、まだ技術的に十分実用であるとは言えない。

水域におけるリモートセンシングによって観測が可能と考えられる測定項目は、現時点では、赤潮、アオコ、SS（浮遊物質）、透明度、油汚染、塩分濃度、水温分布、流況などである。赤潮、アオコ、SSはその反射スペクトル特性が水のスペクトル特性と比較して、特徴的なスペクトルを有しているため、これらを測定することにより定量的、定性的に計測することが原理的に可能である。また、透明度は、一般に、赤潮やアオコ、SSの濃度と逆相関があるためこれらを観測することにより間接的に測定することができる。その他、油汚染は紫外部、表面水温は熱赤外部、塩分濃度はマイクロ波帯を利用して計測が可能である。さらに水域の流況は水温分布や対空標識の変化を測定することによって行われる。

図2、図3、図4はそれぞれ実験室における赤潮藻類（オルソディスカスルーテウス）、アオコ（ミクロキスティス）およびSS（霞ヶ浦）の反射スペクトルの測定結果である。これによると赤潮とアオコはクロロフィル-*a*に起因する $0.68\mu\text{m}$ 付近の吸収領域と $0.71\mu\text{m}$ 付近の蛍光領域の特徴的な反射スペクトルがわかる。他方、SSにおいては $0.70\mu\text{m}$ 付近の反射スペクトルが特徴的である。

しかし、これら赤潮、アオコ、SS等水質項目に対して、水域に関する生活環境の保全に関する

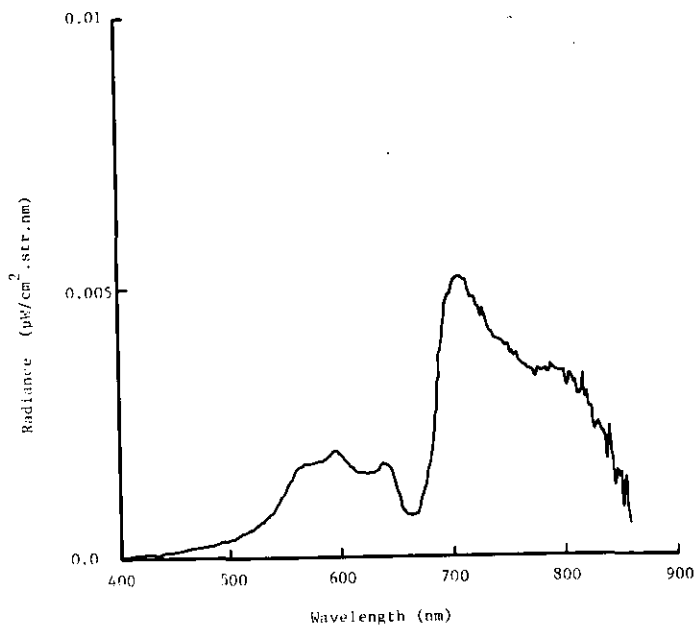


図2 赤潮藻類の分光特性

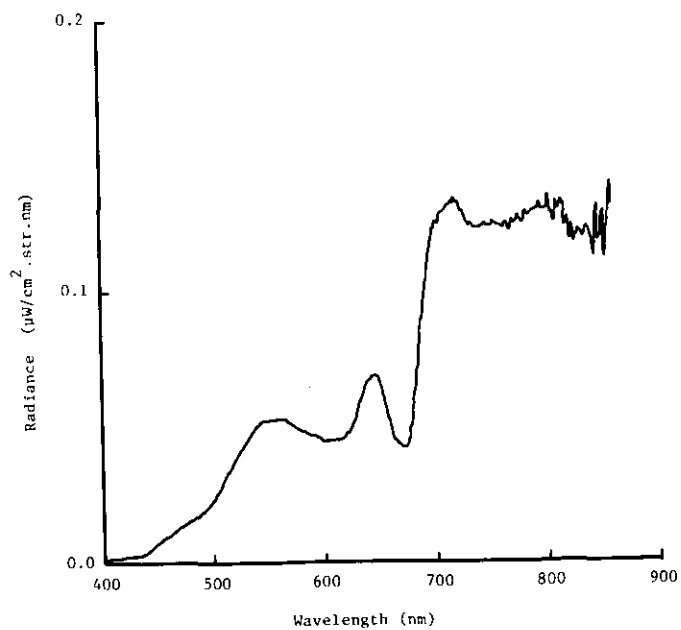


図3 アオコの分光特性

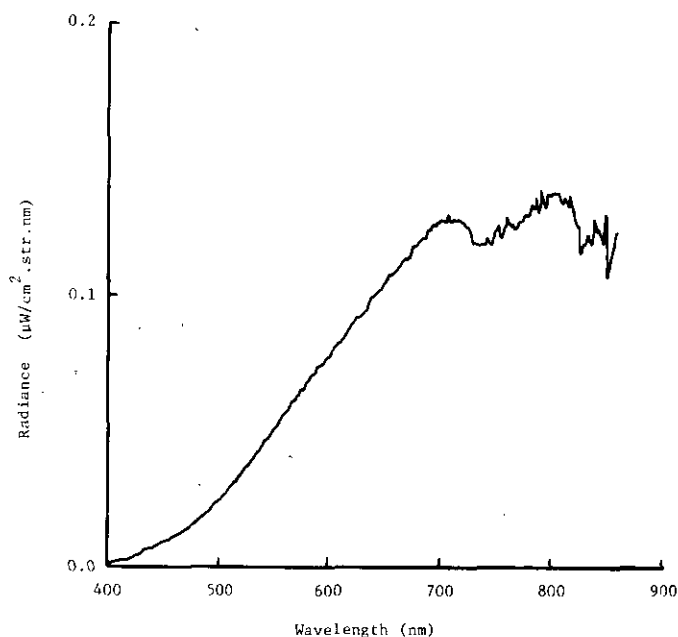


図4 SSの分光特性

環境基準項目のPH、BOD、COD、DO等に関してはまだこれらを測定する適当な手法が開発されていない。また定量的な水質計測ではグラントルースを必要とするためかなりの費用をかけるなければならない。

この章では人工衛星および航空機リモートセンシングで用いられるマルチスペクトルスキャナ(MSS)の紹介とこれまでに湖沼、内湾、河川等を対象に行われてきたリモートセンシングによる水質計測、特に、水域の富栄養化現象と係りの深い藻類およびSSの計測に関する文献の紹介を行う。

2. マルチスペクトルセンサー

リモートセンシングデータを得る方法としては、カラーフィルム、赤外フィルムや黒白フィルムとフィルターを組み合わせ対象物を撮影する写真方式および光電変換素子を用いた光・機械的方式により地上の物体を走査する線走査方式がある。光・機械的走査方式は太陽光の反射や対象物からの自然放射を利用する受動方式と対象物に人工的光源(例えばレーザービームやマイクロ波など)を照射し、その反射を利用する能動的方式がある。ここでは光・機械的走査方式のうち受動方式、特に人工衛星と航空機搭載型のセンサー(マルチスペクトルスキャナー)について簡単に述べる。

マルチスペクトルスキャナー(MSS)は走査機能を持つ望遠型の分光放射計とすることができ、この方式は0.3～20 μmの波長帯を4から最大24バンドに分けて記録することが可能であり、写真方式に比べて放射測定精度がすぐれている。マルチスペクトルスキャナーは走査、結像、分光

などの機能を持つ光学系および検出、増幅、記録、送信などの機能を持つ電子系から構成される。走査は図5(a)に示すように回転平面鏡と望遠鏡とにより飛行方向に対して直角方向に行われる。また、(b)、(c)に示すように数ラインまとめて走査したり円錐形に走査する方式もある。望遠鏡の結像側にはモノクロメータおよび入射した放射光を電気的な信号に変換する放射検出器がある。変換された電気信号は増幅されアナログまたはデジタル方式で高密度磁気テープに記録されたり直接地上へ無線により伝送される。光・機械的スキャナ概念図を図6に示す。

表1に現在使用されている人工衛星搭載型MSSの仕様を、表2に航空機搭載型のMSSの仕様を示す。

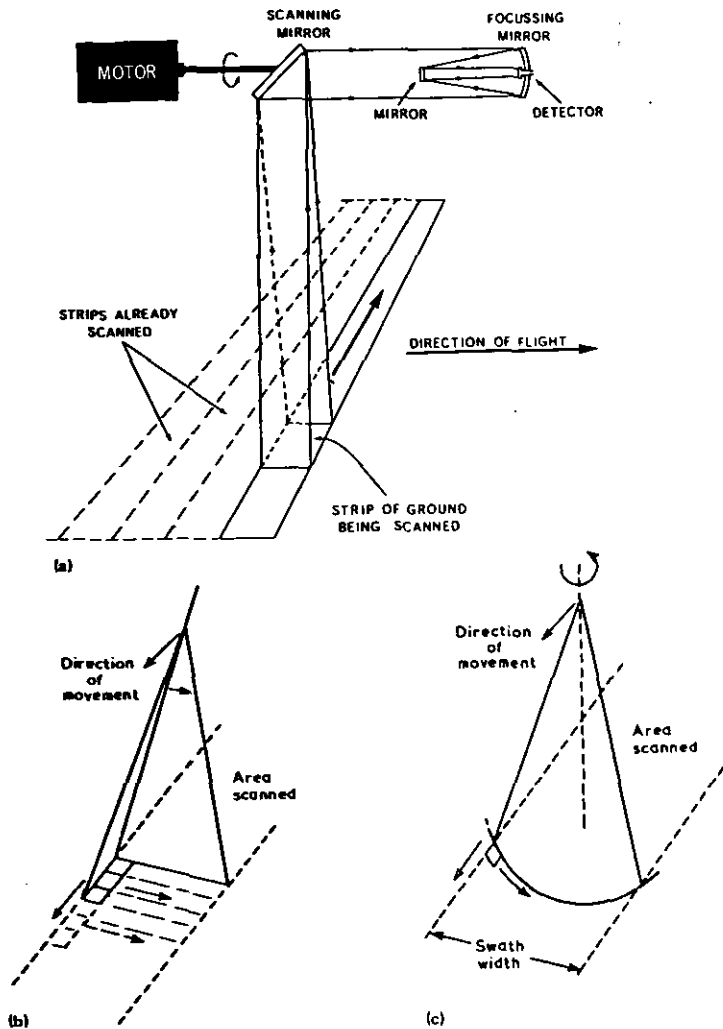


図5 走査方式 (a)リニア走査 (b)アレイ走査 (c)円錐走査⁵¹⁾

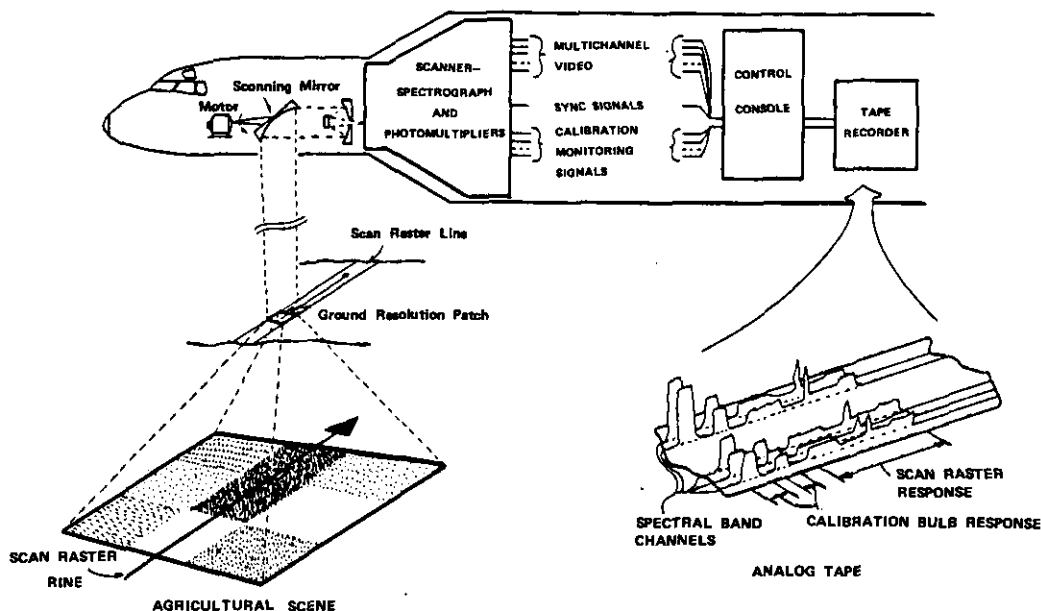


図6 マルチスペクトルスキャナーの概念図⁵²⁾

3. リモートセンシングによる水質計測

この節ではリモートセンシング技術による藻類（クロロフィル-*a*）およびSSの計測に限って国外および国内の例について紹介する。

藻類の観測はその主成分であるクロロフィル-*a*の反射スペクトルをリモートセンサーにより計測することにより行われる。

リモートセンシングによる藻類の観測は、Clarkeら⁴⁾、Mueller⁶⁾により70年代の前半から試みられ、米国ミシガン湖においては、Strongら⁶⁾がランドサット-1号のMSSデータの解析からバンド4およびバンド5により湖の水質パターンが良くとらえられ、それぞれ水深、10 m、2.3 mまでの水中情報が得られると述べている。さらにBukataら⁷⁾、Strongら⁸⁾によりミシガン湖の実験が行われ、クロロフィル-*a*の $10 \mu\text{g}/\text{l}$ 以上の濃度はランドサット-1号で観測可能であると述べている。また、Clarkeら⁹⁾は $R(540)/R(460)$ をカラーインデックスと名付けてこの値が大きいほどクロロフィル-*a*量が多いと述べている。

Wezernakら¹⁰⁾、Wezernakら¹¹⁾はニューヨーク湾の観測からTrophic State Indexという指標を開発し、透明度は $(0.50 \sim 0.54 \mu\text{m}) / (0.62 \sim 0.70 \mu\text{m})$ バンド比を、クロロフィル-*a*は $(0.62 \sim 0.70 \mu\text{m}) / (0.42 \sim 0.48 \mu\text{m})$ バンド比を用いるとこれらの定量が可能であることを示し、航空機によりミシガン州の六つの湖でリモートセンシング実験を行いこれを実証した。

また、Millerら¹²⁾は理論計算より水中情報値、特にクロロフィル-*a*の量の値を計算し、ジョージア湾におけるグランドトルース値と比較し、0.81～0.98の相関係数を得ている。

表1 人工衛星搭載用スキャナ³⁾

Manufacturer	Hughes/Santa Barbara Research Center	Santa Barbara Research Center	Santa Barbara Research Center
Scanner Model	Multispectral Scanner	Temperature-Humidity IR Radiometer	ITOS High Resolution Scanning Radiometer
Satellite	ERTS B	Nimbus IV, E, F	NOAA I. ITOS B-E
Method of Scanning	Pivoting Mirror	Single 45° Mirror	Single 45° Mirror
Scan Lines per Second	13.6 Scans/Sec 6 Lines/Scan (refl. bands) 2 Lines/Scan (thermal bands)	0.8	0.8
Swathwidth Degrees	11.5	180	180
Orbit	Sun Synchronous (500 NM)	Sun Synchronous (600 nmi)	Sun Synchronous (790 nmi)
Resolution IFOV mrad	0.086 (reflective bands) 0.26 (thermal band)	7 (10.5–12.5 μm) 21 (6.7 μm)	2.7 (0.55–0.73 μm) 5.6 (10.5–12.5 μm)
Type of Collecting Optics	Spherical + Corrector Mirrors	Cassegrain	Cassegrain
Focal Length and no.	825 mm f/3.6	430 mm f/3.38	430 mm f/3.38
Diameter of Aperture	229 mm	127 mm	127 mm
Effective Aperture Area	32,900 mm ²	10,200 mm ²	10,200 mm ²
Calibration in Flight	Lamp, Sun	Blackbody, Space	Blackbody, Space, Lamps
Method of recording Ground	Computer Compatible Magnetic Tape	Magnetic Tape	Magnetic Tape and Facsimile
Method of Spectral Separation	Filters	Dichroic	Dichroic
Size	15 × 24 × 35 in.	7 × 7.5 × 15.6 in.	6.4 × 8.4 × 15.9 in.
Weight Kilograms	51 (112 lb)	9.03 (19.9 lb)	8.30 (18.3 lb)
Power Watts	42 Max	7.5	6.5
Source of Specifications	Mfg. Lit.	Mfg. Lit.	Mfg. Lit.
Detector	Photomultiplier Si Photodiode	Bolometer	Bolometer Si Photodiode
Detector Cooling	Yes (Hg:Cd:Te)	No	No
Spectral Bands (μm)	0.5–0.6 0.6–0.7 0.7–0.8 0.8–1.1 10.5–12.6	6.7 10.5–12.5	0.55–0.73 10.5–12.5

表2 航空機搭載用スキャナー³⁾

Manufacturer	Daedalus Enterprises	Bendix Aerospace Systems Division
Scanner Model.	Daedalus Spectrometer	Modular Multispectral Scanner (M ² S)
V/H Max.	0.2	0.25
Method of Scanning	Single 45° Mirror	Single 45° Mirror
Scan Lines/Second	80	100
Swath Width Degrees	77	100
Resolution IFOV mrad	2.5	2.5
Type of Collecting Optics	Paraboloidal Newtonian	Dall-Kirkham
Focal Length and f/no.	152 mm f/2	400 mm f/4
Diameter of Aperture	127 mm	100 mm
Effective Aperture Area	4,560 mm ²	6,500 mm ²
Roll Compensation	Signal $\pm 10^\circ$	Signal $\pm 10^\circ$
Calibration in Flight	Q-H Lamp	Blackbodies, Q-I Lamp Sunlight
Method of Recording	7 Track Magnetic Tape	Magnetic Tape
Method of Spectral Separation	Prism	Diffraction Grating Dichroic
Total Weight (less recorder)	54.3 kg (120 lbs)	118 kg (261 lbs)
Power	132 W 28 VDC	7 AMP 115 V 400 Hz 15 AMP 28 VDC
Source of Specification	Mfg. Lit.	Mfg. Lit.
Spectral Bands (μm)	0.38-0.42	0.38-0.44
	0.42-0.45	0.44-0.49
	0.45-0.50	0.49-0.54
	0.50-0.55	0.54-0.58
	0.55-0.60	0.58-0.62
	0.60-0.65	0.62-0.66
	0.65-0.70	0.66-0.70
	0.70-0.80	0.70-0.74
	0.80-0.90	0.76-0.86
	0.90-1.10	0.97-1.05 8.0-12.0

水中の浮遊物質の測定は Yarger ら¹³⁾ がカンサス州の2つの湖で、Scherz ら¹⁴⁾ は Wisconsin 州でまた Yost ら¹⁵⁾ はニューヨーク州の海岸でリモートセンシングの実験を行いランドサットのバンド5と水中の浮遊物質が良い相関を得たと報告している。また同時にバンド5とバンド6の演算からさらに高い相関 ($r = 0.92 \sim 0.99$) を得たことも報告されている。

Williamson ら¹⁶⁾ はチェサピーク湾の実験から、異った水域のSSの定量は、SSの性質によりその反射スペクトルが違ってくるのでリモートセンシングによるSSの定量は水域によってキャリブレーションが必要であると指適している。

Klernas ら¹⁷⁾ はデラウェア湾で、また Bukata ら¹⁸⁾ はオンタリオ湖で同様な実験を行ったが、ここでもランドサットのバンド5とSSが高い相関($r > 0.9$)を示したことを報告している。さらに Kritikos ら¹⁹⁾ はポトマック川で Maul ら²⁰⁾ はニューヨーク湾で河川から流出する懸濁物の観測を行いランドサットバンド5がSSの観測に適していることを実証した。カナダでは Thomson ら²¹⁾ によりケベック州のジューズ湾で同様な観測を行い良好な結果を得ている。

サザンインディアン湖では Abiodum ら²²⁾ らがSSとランドサットバンド4、透明度とランドサットバンド5の相関係数がそれぞれ0.84、0.96であったと報告している。また Johnson²³⁾ はチェザピーク湾とデラウェア湾の実験からSSとランドサットの四つのバンドとの重回帰分析を行い重相関係数 $r = 0.99$ を報告している。さらに Abiodum²⁴⁾ はナイジェリアのカンジ湖でのSSの分布をランドサットの全バンドを用いて5段階に分類した結果を述べている。

Rouse ら²⁵⁾ はミシシッピ川で収集したSSとカオリンの実験室における反射スペクトルの測定からランドサットのバンド5がSSの観測に最適であることを示し、ミシシッピ川の懸濁物の影響の多いルイジアナ湾でこの結果を実証した。

Morel ら²⁶⁾ は線形モデルによりSSの濃度とその反射スペクトル特性を記述してきたが、Alfoldi ら²⁷⁾、Amos ら²⁸⁾ は Morel らに対しログモデルでSSの濃度特性を記述すべきだと主張した。これに先がけ、Gordon ら²⁹⁾、Gordon³⁰⁾、Gordon ら³¹⁾、Maul ら³²⁾ によりモンテカルロ技法を用いた Gordon モデルの開発があったが、Munday³³⁾ はこれら三つのモデルの比較を行い、ダイナミックレンジの広いフィールドでは非線形モデルの使用をすすめている。

Strong³⁴⁾ はオンタリオ湖でランドサットのバンド5を用いて白色懸濁物の観測に成功している。

リモートセンシングによる水域の深さ方向への影響は Thomas³⁵⁾ によりSSに対しては、ランドサットのバンド5が $40 \sim 50 \pm 5$ cmの深さまでのデータを、バンド6が $10 \sim 15 \pm 5$ cmの深さまでのデータを得ることができると報告している。

我が国においては安岡ら³⁶⁾ により霞ヶ浦の水質現況解析のためリモートセンシング技術が用いられ、航空機によりSS、透明度、クロロフィル-*a*等の計測が行われた。SS、透明度に関しては良い結果は得られなかったがクロロフィル-*a*はチャンネル5 ($0.60 \pm 0.04 \mu\text{m}$)、チャンネル7 ($0.68 \pm 0.04 \mu\text{m}$)で観測可能であると報告している。また、落合ら³⁷⁾ はランドサット1号および2号により三河湾における赤潮、伊勢湾における河川流出水の分布パターンの測定を行い、バンド6がSSの量を反映していると報告している。また、落合ら³⁸⁾ は琵琶湖の水質をランドサット1号と航空機を利用したリモートセンシングで観測を行い、南湖のにごりを観測している。さらに安岡ら^{39), 40), 41)} は航空機によるMSSデータとグランドトルースデータから湖水域の水質を定量する統計モデルを開発し、霞ヶ浦高浜入のクロロフィル-*a*の分布を推定した。これによると航空機MSSのチャンネル2 ($0.43 \pm 0.04 \mu\text{m}$) およびチャンネル7 ($0.68 \pm 0.04 \mu\text{m}$) クロロフィル-*a*の濃度と高い相関を示すことを、また航空機の高さ差によるMSS画像から大気の影響を推定し、高々度の場合のクロロフィル-*a*の定量はチャンネル7が適していると報告している。また落

合ら⁴²⁾は沖縄県の中城湾で航空機により MSS データを収録し、水深、濁度等についての定量化を試みている。

安岡ら⁴³⁾はランドサットのフライトに同期して航空機実験を霞ヶ浦地域で行い、高度差による大気効果の影響、航空機 MSS とランドサット MSS のチャンネル帯域幅のちがいによるクロロフィル-*a* の検出感度について検討を行った。これによると、ランドサットでは SS、透明度がバンド 5、6 で観測可能であるが、クロロフィル-*a* は検出不可能であると指適している。

横山ら^{44), 45), 46)}は三陸海岸、大船渡湾等において航空機により MSS データの収集を行い、これに同期してグランドトルースを行い、重回帰分析、単重回帰分析などにより水温、透明度の検出の可能性を示したが、TOC、クロロフィル-*a*、COD は検出できないと述べている。しかし、鳥井ら⁴⁷⁾、井岡ら⁴⁸⁾は穴道湖・中海の水質を航空機 MSS とグランドトルースデータの重回帰分析からクロロフィル-*a*、塩分濃度、T-P、SS について分布推定を行っている。

一般に、水質測定のためのリモートセンシング MSS データには大気の影響や水面での反射光などの妨害光が含まれていると言われている。これらを除去し水中情報のみを取り出すことが現在の課題の一つであるが、鬼塚ら⁴⁹⁾はランドサットのバンド 7 が水中情報を含まず大気パスラジアンを含むことに注目し、バンド 7 によりバンド 4、5、6 を補正することを試みている。さらに岡見ら⁵⁰⁾はグランドトルースの一部に水面直上および水中のスペクトル特性の測定を組み込み、水面反射光をのぞいた水中情報からリモートセンシングによるクロロフィル-*a*、SS、透明度の計測のための波長の選択を行った。これによると、水面反射光を除去した場合はクロロフィル-*a* の蛍光に起因する波長 0.7 μm 付近のピーク波長がクロロフィル-*a* の定量に有効である。また、0.4 μm と 0.7 μm バンドの比がクロロフィル-*a* の定量に良い結果を示し、この場合は水面反射光の効果が小さくなることを述べている。さらにランドサットのバンドではバンド 6 が水質の定量特に透明度、SS に有効であると報告している。

図 7、図 8 はそれぞれ航空機および人工衛星による水質計測の例である。図 7 は霞ヶ浦高浜入のクロロフィル-*a*、図 8 は霞ヶ浦西浦全域の SS の推定分布図である。

4. おわりに

簡単に水域におけるリモートセンシングによる水質の定量に関する文献のサーベイを行ったが、これらによるとランドサットによる水質計測は、SS の計測に関してはある程度の精度で定量的に測定可能であるが、藻類、クロロフィル-*a* の定量は、現在の段階では不可能に近い。航空機リモートセンシングにおいては人工衛星と同様に SS の定量は可能であるが、クロロフィル-*a* の定量は、湖沼のような藻類濃度の高いフィールドでの観測では定量的に計測可能である。しかし内湾や沿岸のような一般にクロロフィル-*a* 濃度の低い場所では、夏場の異常増殖期を除いて測定は不可能である。

今後、リモートセンシング技術による水質計測において、その測定精度の向上や、水質測定項目

の増加のためにはリモートセンシングデータに含まれている大気散乱光や水面反射光などの妨害光を除去する手法の開発や水質計測のための画像解析手法の開発が必要となると共に、感度の良い、バンド幅のせまいリモートセンサーの開発や、気象条件に左右されないマイクロウェーブリモートセンシング、航空機搭載可能なレーザレーダなど能動的手法を用いるセンサーの開発が必要となる。

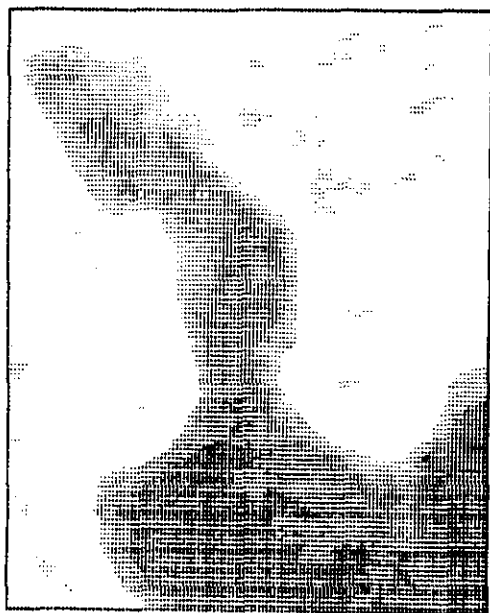


図7 クロロフィルの推定分布図⁴³⁾



図8 SSの推定分布図⁴³⁾

引用文献

- 1) Barrett, E. C. and L. F. Cartis (1976): Introduction to Environmental Remote Sensing, London, Chapman and Hall Ltd.
- 2) Estes, J. E. (1974): Imaging with Photographic and Monophotographic sensor system, Remote Sensing, Techniques for environmental analysis, Edited by J. E. Estes and L. W. Senger California, Hamilton Publishing Company, 15-50.
- 3) Lowe, D. S. (1975): Imaging and nonimaging sensors. Manual of Remote Sensing, Edited by R. G. Reeves, American Society of Photogrammetry, Virginia, Kenffell and Essex Company, 367-397.
- 4) Clarke, G. L., G. C. Ewing and C. J. Lorenzen (1970): Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. Science, 167, 1119-1121.
- 5) Mueller, J. L. (1972): Remote measurement of chlorophyll concentration and Secchi-depth using the principal components of the ocean's color spectrum. Fourth Annual Earth Resources Program Review, NASA Manned Spacecraft Center, Houston, Texas 4, 105-1/105-13.

- 6) Strong, A. E., H. G. Stumpf, J. L. Hart and J. A. Pritchard (1974): Extensive summer upwelling on Lake Michigan during 1973 observed by NOAA-22 and ERTS-1 satellites. *Proc. 9th Internat. Sympos. Rem. Sens. Environ.*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Mich., 923-932.
- 7) Bukata, R., G. P. Harris and J. E. Bruton (1974): Detection of suspended solids and chlorophyll-a utilizing digital multispectral data. *Proc. 2nd Canadian Sympos. Rem. Sens.*, 551-560.
- 8) Strong, A. E. and H. G. Stumpf (1975): An evaluation of ERTS Data for Oceanographic uses through Great Lakes studies. Final Report NASA Contract S-70246-AG, Goddard Space Flight Center, 200.
- 9) Clarke, G. L., *et al.* (1974): Remote Spectroscopy of the sea for biological production studies. Optical aspects of Oceanography, Academic Press N. Y. 456-468.
- 10) Wezernak, C. T., D. R. Lyzenga and F. C. Polcyn (1975): Remote sensing studies in the New York, Bight. Report No. 109300-5-F, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- 11) Wezernak, C. T., F. J. Tanis and C. A. Bajza (1976): Trophic State Analysis of Inland Lakes, Remote Sensing of Environment, 5, 147-165.
- 12) Miller, J. R., S. C. Jain, N. T. O'Neill, W. R. McNeil and K. P. B. Thomson (1977): Interpretation of Airborne Spectral Reflectance Measurement Over Georgian Bay. *Remote Sensing of Environment*, 6, 183-200.
- 13) Yarger, H. L., J. R. McCauley, G. W. James, L. M. Magnuson and G. R. Marzolf (1973): Quantitative Water Quality with ERTS-1. *Proc. 3rd. ERTS-1 Sympos. 1(B)* 1637-1652. Goddard Space Flight Center. Maryland.
- 14) Scherz, J. P. and S. A. Klooster (1973): Water Quality Determination by Photographic Analysis. 2nd. Ann. Conf., Remote Sens., Tullahoma, Tenn.
- 15) Yost, E., R. Hollman, J. Alexander and R. Nuzzi (1973): An Interdisciplinary Study of the Estuarine and Coastal Oceanography of Block Island Sound and Adjacent New York Coastal Waters. *Proc. 3rd. ERTS-1 Sympos. 1(B)* 1607-1618, Goddard Space Flight Center. Maryland.
- 16) Williamson, A. N. and W. E. Grabau (1973): Sediment concentration mapping in tidal estuaries. Third ERTS-1 Symposium, Washington, D. C., Dec. 10-14.
- 17) Klemas, V., D. Bartlett, W. Philpot, R. Rogers and L. Reed (1974): Coastal and Estuarine Studies with ERTS-1 and SKYLAB, *Remote Sens. Environ.*, 3(3), 153-174.
- 18) Bukata, R. P., J. E. Bruton and G. P. Harris (1974): The Detection of Suspended Solids and Chlorophyll in Utilizing Digital Multispectral ERTS-1 Data. *Proc. 2nd. Canadian Sympos. Remote Sens.*, University of Guelph, Guelph. Ontario.
- 19) Kritikos, H., L. Yorinks and H. Smith (1974): Suspended solids analysis using ERTS-A data. *Remote Sensing of Environment*, 3, 69-78.
- 20) Maul, G. A., R. L. Charnell and R. H. Qualset (1974): Computer enhancement of ERTS-1 images for ocean radiances. *Remote Sensing of Environment*, 3, 237-254.
- 21) Thomson, K. P. B., C. Pare and M. D. Roy (1975): Digital Analysis of Multispectral Satellite Data Applied to Lake Surveillance Problems in Large Hydro Electric Developments. Paper presented at 3rd. Canadian Sympos. Remote Sens. Edmonton, Alberta.
- 22) Abiodun, A. A. (1975): Applications of LANDSAT Data in the Limnological Study of Southern Indian Lake, Report prepared for the Freshwater Institute, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- 23) Johnson, R. W. (1975): Quantitative sediment mapping from remotely sensed multispectral data. *Proc., Fourth Annual Remote Sensing of Earth Resources Conf.*, Tullahoma, Tenn.
- 24) Abidum, A. A. (1976): Satellite Sarvey of Particulate Distribution Patterns in Lake Kainji. *Remote Sensing of Environment*, 5, 109-123.
- 25) Rouse, L. J. and J. M. Coleman (1976): Circulation Observation in the Lowisiana Bight Using Landsut Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 5, 55-66.
- 26) Morel, A. and L. Prieur (1977): Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanog.*, 22, 709-722.

- 27) Alföldi, T. T. and J. C. Munday, Jr. (1977): Progress toward a LANDSAT water quality monitoring system. Fourth Canadian Symposium on Remote Sensing Quebec City, Quebec, Canada, May 16-18, Canad. Aeronautics and Space Inst., Ottawa, Canada, 325-340.
- 28) Amos, C. L. and T. T. Alföldi (1979): Determination of suspended sediment concentrations in a macrotidal system using LANDSAT data. J. Sedimentary petrol.
- 29) Gordon, H. R. and O. B. Brown (1973): Irradiance reflectivity of a flat ocean as a function of its optical properties. Appl. Opt., 12, 1549-1551.
- 30) Gordon, H. R. (1973): Simple calculation of the diffuse reflectance of the ocean. Appl. Opt., 12, 2804-2805.
- 31) Gordon, H. R., B. B. Brown and M. M. Jacobs (1975): Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. Appl. Opt., 14, 417-427.
- 32) Technology Satellite (LANDSAT-1) in optical oceanography (1975): Remote Sens. of Environ., 4, 95-128.
- 33) Munday, J. C., Jr. (1979): Landsat Test of Diffuse Reflectance Models for Aquatic Suspended Solids Measurement. Remote Sensing of Environment, 8, 169-183.
- 34) Strong, A. E. (1978): Chemical Whiting and Chlorophyll Distributions in the Great Lakes as Viewed by Landsat. Remote Sensing of Environment, 7, 61-72.
- 35) Thomas, I. L. (1980): Suspended sediment dynamics from repetitive Landsat data. Int. J. Remote Sensing, 1(3), 285-292.
- 36) 安岡善文・宮崎忠国 (1977): 遠隔計測による霞ヶ浦地域の現況解析. 国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 48-66.
- 37) 落合弘明・竹内章司・鈴木康志 (1977): LANDSAT 画像の解析と応用(2). 海洋環境調査への応用. 第3回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 99-102.
- 38) 落合弘明・鈴木康志・竹内章司 (1977): 湖における水質解析へのリモートセンシングの応用. 第3回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 135-136.
- 39) 安岡善文・宮崎忠国 (1977): 遠隔計測による湖水域の定量的水質計測. 第3回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 143-146.
- 40) 安岡善文・宮崎忠国 (1978): 遠隔計測による湖水域の定量的水質計測 — その2 — クロロフィル *a* の定量. 第4回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 119-122.
- 41) 安岡善文・宮崎忠国 (1979): 遠隔計測による霞ヶ浦の定量的水質計測 — クロロフィル *a* の定量. 国立公害研究所研究報告, 第6号, 85-93.
- 42) 落合弘明・古賀呉綱・鈴木康志 (1978): MSS データによる水質の推定. 第4回リモートセンシングシンポジウムの予稿集, 133-134.
- 43) 安岡善文・宮崎忠国 (1979): 遠隔計測による水質特性分布の把握. 第5回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 103-106.
- 44) 横山隆三・蒲沢晃人・小山内孝徳・佐藤裕 (1979): リモートセンシングによる大船渡湾の環境調査(1). 第5回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 123-126.
- 45) 横山隆三・蒲沢晃人・小山内孝徳・佐藤裕 (1979): リモートセンシングによる大船渡湾の環境調査(2). 第5回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 127-130.
- 46) 横山隆三・蒲沢晃人 (1980): 航空機リモートセンシングによって検出できた三陸沿岸の水質環境情報. 第6回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 9-12.
- 47) 鳥井清司・井岡幹博・福岡 順・伊達善夫 (1980): 航空機 MSS による宍道湖・中海の観測(1). 第6回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 65-68.
- 48) 井岡幹博・鳥井清司・福岡 順・伊達善夫 (1980): 航空機 MSS による宍道湖・中海の観測(2). 第6回リモートセンシングシンポジウム予稿集, 69-72.
- 49) 鬼塚正光・太田一之・岡見 登・J. R. Miller (1980): ランドサット映像の バスラジアンズ補正の一

方法. 日本海洋学会春期大会講演要旨集, 227 - 228.

- 50) 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国 (1981): 霞ヶ浦湖水の光学的特性と水質, 遠隔計測による環境情報の収集と解析. 文部省環境科学研究報告集, B 91 - R 52 - 3, 267 - 281.
- 51) Barret, E. C. and I. F. Curtis (1976): Introduction to Environmental Remote Sensing. Chapman and Hall Ltd, London.
- 52) Estes, J. E. (1974): Imaging with Photographic and Nonphotographic Sensor System. Remote Sensing Techniques for Environmental Analysis, Edited by J. E. Estes, Hamilton Publishing Company, California.

II-4

道路近傍における自動車排出成分の測定法に関する研究
—— 従来の計測法とレーザーレーダーによる計測法の比較 ——

溝口次夫¹・功刀正行¹

Utilization of Laser Radar for Measurement of Automobile Exhausts

Tsuguo MIZOGUCHI¹ and Masayuki KUNUGI¹

要 旨

道路内および道路周辺での自動車排出成分は、発生源の近くということもあって、時間的、空間的に極めて挙動が激しい。したがって、従来のポイントサンプリングによる計測法では、その正確な把握は困難である。そこで、レーザーレーダーによる計測がそれらの挙動の明確化に有効かどうかを検討した。大気汚染ガスの計測には分光型レーザーレーダーが有力と思われるが、今回はミュー散乱レーザーレーダーによって道路周辺のエアロゾル濃度分布を計測した。

Abstract

Automobile exhausts diffuse in a highly complex manner in street canyons or near roadways. It is very difficult to evaluate this phenomenon by ordinary measurement methods e. g., point sampling. This paper reports on the practicality of using the laser radar for the measurement of air quality, especially automobile exhaust pollutants.

1. はじめに

道路内および道路周辺の自動車排出ガス成分等による汚染のメカニズムを解明するために、新しい計測手法であるレーザーレーダーの適用の可能性と実用化などについて研究するのが本セクションの目的である。従来の計測法には、高性能で精度、感度が極めて高いものから、単に汚染のレベルを知る程度の簡易測定法まで数多くの種類がある。しかし、いずれの測定法もポイントサンプリングが基本となっており、それぞれのサンプリング地点がどの範囲までの代表性をもつかというこ

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

とが常に問題として提起される。また、一定時間の平均値を求める測定法の場合には、測定の目的に応じて、サンプリング時間をどうするか、要求されるサンプリング時間間隔の測定が可能かなどの検討が必要となってくる。自動車排出成分を測定の対象とする場合には、発生源のすぐ近くでサンプリングを行うことになるため、短時間内での濃度変動が極めて大きく、人体への急性の影響などを考えるとき、従来の測定時間による測定値の評価が疑問となってくる。したがって、ポイントサンプリングの手法で、道路近傍の自動車排出成分の挙動を空間および時間スケールを含めて明確にするためには、短時間測定可能な計測法で、しかも、狭い空間内に数多くの測定点を設ける必要があるなど、現実的には不可能となってくる。レーザーレーダーは、汚染濃度の空間分布が、任意の時間間隔で測定できるなど、従来の計測法の欠点を補うことができる有力な計測法である。

2. 従来の計測法による道路周辺での測定

東京、大阪など大都市域の市域地道路では自動車排出ガス成分等を常時測定するための観測ステーションが主要道路端に設置され24時間連続測定が行われている（昭和55年度末現在で自動車排出ガス常時観測ステーションは全国で378局となっている）。しかし、ほとんどが道路端一点だけの測定であるため、その周辺の濃度分布等に関する情報は入手できない。したがって、道路内あるいは道路周辺の汚染のパターンなどを把握したいときには、目的に応じた測定計画によって、別に、測定しなければならない。普通、マイラーバック、真空ビンなどをサンプラーとして対象地点で空気をサンプリングした後、機器分析などによって成分濃度を求める方法がとられる。特に、瞬間値あるいは連続測定が必要な場合には、自動測定器を対象フィールドへ設置して測定が行われる。また、長時間の平均値を求める場合には、トリエタノールアミンろ紙法などの簡易測定法が用いられることもある。

図1、2は国道6号線土浦市内の道路端で行ったNO_x（化学発光法による）およびCO（定電位電解法による）の連続測定記録の一部である。気象要素（特に、風向、風速）、周辺建物等の形状、走行する自動車自身の影響で濃度変化は極めて大きく、平均値の20倍以上の値を示すことも何度かある。サンプリングポイントを少し変えるだけでもパターンは変るであろう。このような非定常な挙動を正確に把握することはポイントサンプリングの手法では困難である。また、いわゆるストリートキャニオンと呼ばれる道路内では、道路上空の一般風の影響で内部循環流が生じる。図3に三次元拡散水路模型実験によって得られたパターンを示す。これによると、一般風の風上側が道路内下部では風下側となる。図1、2の地点で測定した道路内の汚染分布の例を図4に示す。風向が道路と平行に近く、道路と直角成分の風速ベクトルが小さいため、顕著ではないが一般風の風上側の道路端の濃度が高いことが確認されている。図4の測定はテドラーバックにそれぞれの地点で10分間空気をサンプリングした平均値である。道路内のサンプリング地点は歩道橋を利用した。図5は大阪市内の国道25号線（御堂筋）で実測した道路断面のCO濃度分布である。両側のビルの高さ約30m、道路幅員約45mの典型的なストリーキャニオンである。道路両側の各高さの測定はビルの窓か

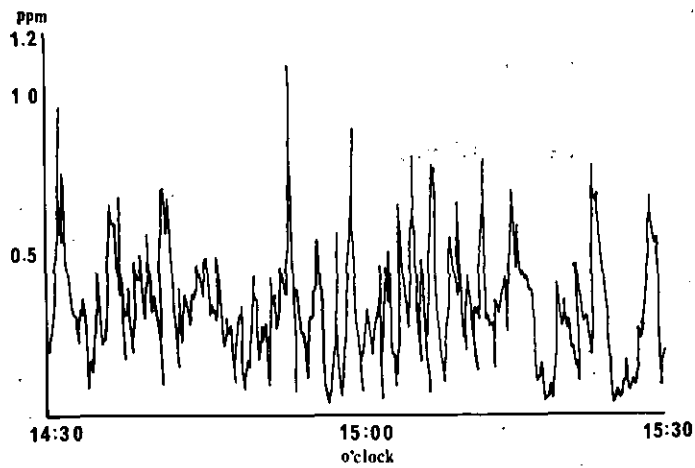


図1 道路端のNO, NO_x 濃度変化

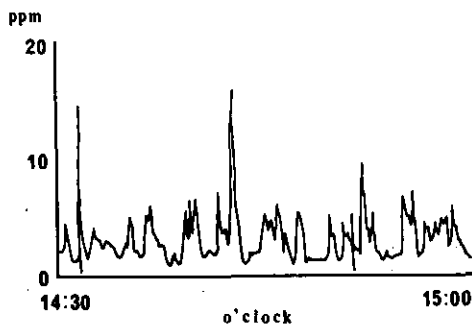


図2 道路端のCO 濃度変化

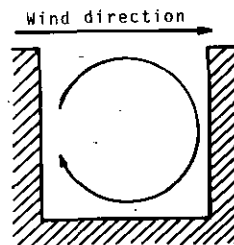


図3 道路内の風の流れ

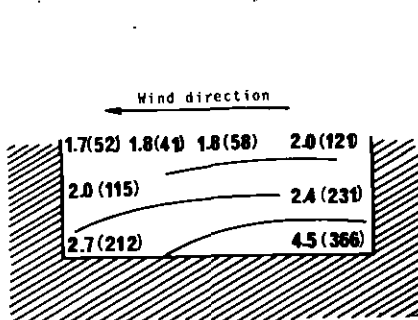


図4 道路断面濃度分布(国道6号線)

() 外; CO ppm
() 内; NO_x ppb

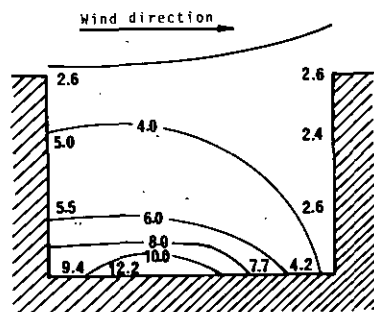
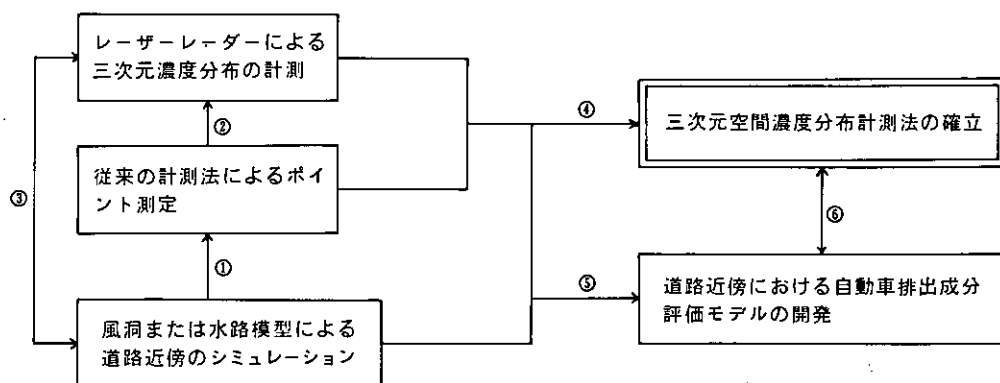


図5 道路断面CO 濃度分布(国道25号線)

らサンプリングチューブを出して行った。このように、道路内でのサンプリングは従来の方式では困難を伴い、道路中央部空間での測定は不可能である。

3. レーザーレーダーによる自動車排出成分の測定

レーザーレーダーによる大気汚染成分の計測は、本来、広域の3次元の立体濃度分布の測定に威力を発揮するものと考えられている。しかし、最近のラマン散乱、けい光散乱などの分光型レーザーレーダーの開発および小型、軽量の自動車搭載式レーザーレーダーの製作によって、局所空間、すなわち、道路内あるいは道路周辺の汚染物質の空間分布、挙動を直接測定するのに有効な計測法として注目されて来た。道路近傍では自動車から排出された汚染物質の挙動は前述したように極めて複雑である。したがって、これまでに提案されている自動車排出ガス予測モデルでは評価できない場合が多い。そこで、本研究は、小型、分光型レーザーレーダーなどによって、道路内および道路周辺の自動車排出成分による汚染のメカニズムを解明するための計測法を確立し、あわせて自動車排出成分の局所的、短時間値予測モデルの開発を試みるものである。研究のプロセスはほぼ図6に示すとおりである。



- ① 風洞実験等によって道路内、道路周辺のサンプリングポイントを決定する。
- ② レーザーレーダーによって計測された相対値をリファレンス計測法によって得られた値に置き換える。
- ③ フィールド測定と風洞実験等の条件を合わせて検証する。
- ④ ①～③の結果を総合的にチェックし、レーザーレーダーの精度を向上して、レーザーレーダーによる道路周辺の三次元空間濃度分布計測法を確立する。
- ⑤ ①～③の結果に基づいて道路近傍における自動車排出成分評価モデルを提案する。
- ⑥ レーザーレーダーによる計測結果と数学モデルによる計算結果を比較検証する。

図6 道路近傍の汚染メカニズム解明のための研究プロセス

4. ミー散乱レーザーレーダーによる道路周辺での測定

道路周辺に建造物等のない平坦な場所で、風下方向への自動車排出成分の拡散の状況をミー散乱レーザーレーダーおよびポイントサンプリング（バックによるサンプリング）の方法で計測した。測定は国道17号線新大宮バイパス（戸田市内）で行った。道路の幅員は約50mであり、片側3車線ずつ、計6車線あるが、中央の分離帯がかなり幅があり、風上側車線の影響をどのように考えるか検討が必要と思われる。図7はテドラバックによって地上約1mの地点で風下方向5地点（道路端から0, 10, 20, 50, 100m）で10分間サンプリングしたNO_x, COの平均値をプロットしたものである。図8はミー散乱レーザーレーダーによって測定したエアロゾルの風下方向への拡散プロファイルの瞬間値である（地上4mでの濃度）。図9は新大宮バイパスを通過する自動車交通量のパターンである。10分間の計測ではあるが一応の周期性が認められる、ミー散乱レーザーレーダーによる濃度の測定と交通量の測定は時期が異なるのでそのままの比較はできないが、エアゾル濃度と交通量の周期とはほぼ一致するものと考えられる。以上の結果から、平坦な地域における自動車排出成分（エアロゾル）の風下方向への拡散は次式で表現できる。

$$C(x) = C_B + Q_L \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} (u\sigma_z)^{-1} + A e^{-ax} \sin(2\pi t - \theta)$$

$C(x)$ = 風下方向 x でのエアロゾル濃度

C_B = バックグラウンド濃度

Q_L = エアロゾル排出強度

u = 道路と直角方向風下の風速

σ_z = 鉛直方向のエアロゾル濃度分布の標準偏差

A = 排出強度に関するパラメータ

a = 気象要素

t = 時間 $t = x/u$

θ = 交通流に関するパラメータ

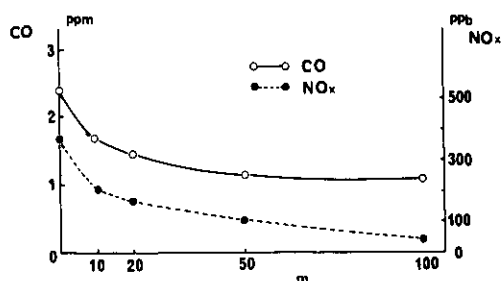


図7 道路から直角風下方向のCO, NO_x濃度

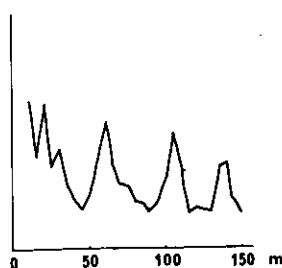


図8 風下方向のエアゾル濃度

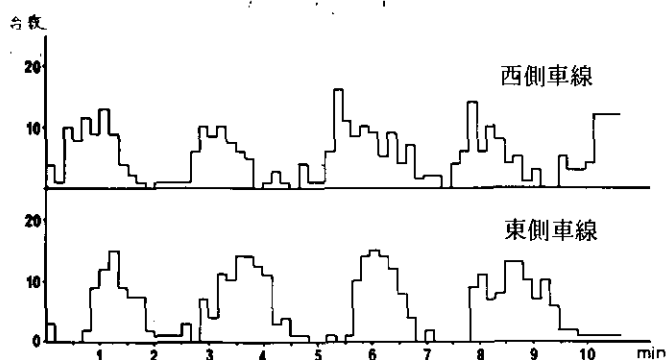


図9 新大宮バイパス交通量調査

5. おわりに

ミー散乱レーザーレーダーおよび分光型レーザーレーダーの開発によって道路近傍での汚染物質のメカニズムを解明するのが本研究の最終目標であるが、今回は、ミー散乱レーザーレーダーによって道路から風下方向へのエアロゾルの拡散プロファイルを測定し、その結果に基づいて、短時間値の拡散モデルを提案した。測定地点も一地点だけであり、気象条件等も限られているので、今後、数多くの地点で、種々の条件において測定を行い、数学モデルの修正、改造を重ねて、精度の高いものとする必要がある。また、ラマン散乱、けい光散乱等の分光型レーザーレーダーについても実用化目指して、ハードウェアおよびソフトウェア両面の研究を続け、道路での測定に供したいと考えている。

引用文献

- 1) 溝口次夫ほか(1972):自動車排出ガスによる一酸化炭素濃度の予測モデルの開発について. 環境技術, 1(7).
- 2) 溝口次夫ほか(1979):大気汚染成分の計測手法と問題点. 環境技術, 8(6).
- 3) 小林喬郎・稲葉文男(1973):ラマン散乱および共鳴効果利用のレーザーレーダー. 気象研究ノート, 第116号.
- 4) 大気環境部 大気物理研究室(1980):計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測. 国立公害研究所報告, 第16号, 94p.
- 5) 池田有光ほか(1981):主要道路近傍の風の構造と汚染物質の拡散に関する研究. 昭和55年度文部省科学研究費補助金.

II-5

環境汚染の広域的評価

内藤正明¹

Significance of Detecting and Assessing Environmental Pollution
on a Regional Basis

Masaaki NAITO¹

要 旨

二次元ないし三次元的に拡がりをもった大気や水域の汚染状況を広域的に評価する考え方およびこのための評価指標について述べた。そしてこのような評価のために環境の汚染（特に大気汚染）を二次元パターンとして計測することの意義を明らかにすると共に、得られたパターンデータの処理および表示に関する手法の一例を紹介した。

Abstract

Emphasis is placed on the significance of assessing environmental pollution on a region-wide basis. The importance of detecting pollution, particularly atmospheric pollution, as a two dimensional pattern is described based on some practical examples. The method of treating and displaying such kind of information as regional patterns is also demonstrated.

1. 広域汚染評価と遠隔計測

(1) 計測・制御からみた環境の特徴

まず計測技術という側面からみたとき環境という対象が有する特徴を列挙してみると、

- ① 対象場が広い3次元領域にわたる。
- ② 状態再現が不可能なため時々刻々のデータを蓄積しておかねばならない。
- ③ 微量 (ppm, ppt オーダー) であるものが多い。
- ④ 多成分が混合し、尺度すらつけにくい項目がある。
- ⑤ 生物に関する量も重要な対象となる。

1. 国立公害研究所 総合解析部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

1. The National Institute for Environmental Studies, System Analysis and Planning Division, Tsukuba, Ibaraki 305

⑥ 感覚量（臭，騒音など）；主観量（景観など）も対象となる。

⑦ 各種の異なる評価量を総合化することが必要である。

などが，その主なものであるう。

その中でも特に第1の特徴のために環境計測は困難性を有する。現状では，この測定は広い水域や大気の中での一点の状況をとらえるにすぎず，多少観測点の数を増したにしても，環境空間の広がりの中ではそのサンプル量は無視少であると言えよう。そこで3次元領域の汚染を連続量に近い形で把握することを可能ならしめる遠隔計測手法の実用化が期待されるわけである。特にそのような連続計測情報が環境施策に関連して重要になりつつある状況については次節でも述べるが，そこに至る計測システムの動向，経緯を以下に要約してみる。

（2）環境の計測からみた課題と将来の問題

将来を予見するために，過去から現時点までの経緯をごく簡単に振り返ってみよう。

まず環境の計測・制御に対して，組織的対応がなされはじめたのは，昭和30年代後半からであり，その歴史はそれほど古いものではない。その後急速に数理，計測，システム工学分野の研究者が多数環境問題に取り組み，種々の成果がみられるようになってきた。この分野に関連する課題を要約したのが表1である。これは計測からモデリング，制御・管理に至る一連の段階で，情報収集・加工・利用に関してどのようなことが検討され，また指向されつつあるかをKey wordsの形でまとめたものである。この表中で特に遠隔計測に関連する部分を□内に囲ってある。

ところで環境に対して最も早い時期に確立された情報システムは，大気汚染テレメータネットワークである。これは主にSO₂による深刻な汚染状況を，発生源の緊急時規制により回避するための，検出・制御系として昭和40年頃より東京，大阪をはじめ大都市で順次設置された。観測データはテレメータでセンターに送られ，計算機で処理後蓄積されている。ところが大気以外についてはこのようなシステムは設けられなかった。それは，技術的可能性と必要性の欠如という両面から解釈されるが，近時水質については総量規制からの要求があり，一方技術的には自動計測技術の進歩もあり，ここ数年内に代表的水域にテレメータシステムが急ピッチで設置される予定である。

しかし，このような常時観測システムを，維持，管理することの技術的，経済的困難さは大きい。しかも限られた時点で，限られたポイントにおいて得られた計測値が，どれだけ広い環境場の状況を表現しているかという，いわゆる計測値の地域代表性の問題が，現在環境計測に関する最大の検討課題となっている。これに対する解答を与えることは非常にむづかしいが，もし遠隔計測の時，空パターンデータが得られれば，このような代表性を判断する上で極めて有力な根拠となるう。

一方将来にわたって集積する大量のデータにどう対処するかは重大である。そのために，この種の広域にわたる大量情報の蓄積，処理の方法がハード，ソフト両面から検討されているが，特に面的分布状況をそのまま電算機検索が可能なマイクロ写真のアナログ情報として蓄積し，これを処理す

表1 環境の計測—制御に関わる諸課題

計測・制御 環境デ ータの問題点	データの収集 (計 測) (モニタリング シ ス テ ム)		データの伝送, 処 理, 蓄 積	デ ー タ の 利 用 (シミュレ ーシ ョ ン) (制御・管理)	
※広い3次元領域 ※大量時系列デ ータ	—遠隔計測技術 レーザ—レーダ 写真・MSS	—モニタリング点 最適配置	—内外挿平滑化 —異常値修正 —データ縮約と 蓄積(特徴抽出) —画像蓄積	—数理モデル 大気、水質、土壌 騒音、振動 地盤沈下 物理モデル、 統計モデル	—大気汚染緊 急時制御 —大気(SO ₂ , NO _x)総量 規制 —水質(COD) 総量規制
※微量(ppm～ pptオーダー)	—痕跡分析技術	—大気監視テレメータシステム —水質 “ ” —土壌 “ ”		—実験模型 大気風洞 スモッグチャン バ 水理、水質モデ ル 土壌トロン 植物トロン 動物トロン (制御技術)	
※多成分や混合 物	—多元素同時分 析技術 —BOD など複 合物質計測技 術		地域メ ッシュ デー タ ベース		—廃水処理シ ステム自動 制御 —廃棄物処理、 資源化シス テム自動制 御
※生物が含まれ る	—試料保存法 —標準試料 —生物指標	—生態系観察フィ ールド			
※感覚量が対象	—主観量の客観化	—環境モニタ制度		—環境アセスメント —Audio-Visual Computer Conference —地域環境管理	
※指標の総合化 要求					

るときは計算機へのデジタル入力化するようなシステムが開発されつつある。このような情報機器が適当な価格で実用化されれば、特にリモートセンシングによるパターンデータの蓄積、利用に極めて好都合となろう。

2. 汚染の広域的評価の意義

2.1 広域汚染指標の定義とその必要性

従来、ある地域全体の大気質の汚染指標として、対象地域内のいくつかの観測点で測られたデータを単純平均したものをを用いることが、普通行われてきた。しかし、この方法では、たまたまある地点に置かれた観測点の値しか採用されないの、観測点の位置によって結果が大きく左右され、これが全域の汚染を代表するものであるという保証はない。このため、最近、Rinaldiや堀江などによって、このような問題を取扱うための汚染指標が提案されている。

それを一般的に表現すると、

$$\phi = \frac{\int_T \int_A \varphi(a) f[c(a, t)] da dt}{T \int_A \varphi(a) da} \quad (1)$$

と書ける。ただし、 $c(a, t)$ は時刻 t の a 点における濃度であり、 $\varphi(a)$ は a 地点での重み係数である。問題はこの地点 a ごとの重み $\varphi(a)$ をどのように選ぶかにある。たとえば、 $\varphi(a) = 1$ とすれば面積荷重平均であり、 $\varphi(a)$ として人口密度を採用すれば暴露人口の指標として一つの意味を有するであろう。しかしさらに、汚染による人間被害をもっと直接に表現するには、影響関数 f を導入することも考えられよう。ここに $f(c, t)$ は、ある時刻 t に、汚染濃度 c に接した住民、および動植物や事物等がうける影響の大きさである。 A は対象とする地域であり、 T は対象とする期間（汚染への暴露時間）である。ここで φ, f としては種々のものが考えられるが、これまでに提案されているもの、およびそれらのもつ意味についてはすでに報告したので省略する¹⁾。

いずれにしても、これらの指標を採用する時の問題は、地域全体の汚染分布パターンを知ることである。

パターンを求める手順としては、

(イ) 直接リモートセンシング等の手段により求める方法、

(ロ) 煙源データと汚染濃度との関係をシミュレーションモデルを用いて求め、汚染濃度を推定する方法、(このとき観測点データは、モデルのパラメータを推定するために使用される)。

(ハ) 観測点データから直接、内外挿と平滑化を行って地域全体のパターンを求める方法、

が考えられる。それら各手法の間の関連を図1に示す。

この中でもし実現すれば最も望ましい手法は直接的にパターンの得られる(イ)によるものであることは言うまでもない。この点にも遠隔計測手法の早急な実用化が求められるが、現時点では、(ロ)、(ハ)の手法も併用せざるを得ない。パターン化の手法に関する検討は次節でおこなうが、いずれにしてもパターンデータが得られたとして、上述の広域汚染の評価指標を試算してみると以下のようなのである。

具体例として、

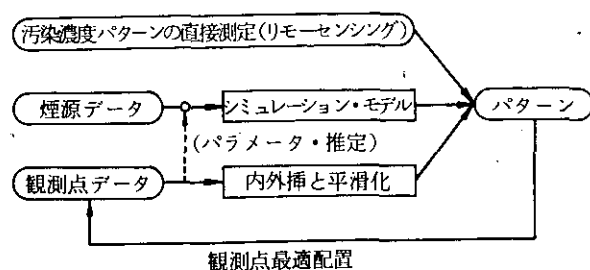


図1 分布パターン把握の三つのルート

i) 単純平均 (NWI)
$$\frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N}$$

ii) 面積荷重平均 (AWI)
$$\frac{1}{A_0} \int_A c(a) da$$

iii) 人口密度荷重平均 (PWI)
$$\frac{1}{P_0} \int_A p(a) c(a) da$$

を取り上げて、それぞれのもつ特徴、問題点を検討する。なお対象地として栃木県 A 市付近の SO_2 汚染を例にとる。

対象とする地域の各メッシュ点における実際の濃度を、排出源データから、Sutton 式により計算し、その値を汚染レベルの真値とみなす。このような汚染分布状況ををもつ対象地域に対して、観測点を一つずつ増して14か所まで増設したとする。

得られる観測点のデータに対応するそれぞれの指標の値を図2に示す。ただし、観測点はまず対象とする地域の中心地（高濃度地点）に設けられ、次第に周辺地域（低濃度地点）にも増設されていくものとする。図2からみられるように、その時点で存在するモニタリングデータのみを単純平均した値で、地域全体の汚染レベルを論じることは無意味な場合があり得る。このことはすでに一部で認識され、このため地域汚染の経年変化をみる場合、過去から継続して存在する地点のデータ

推定指標値/標準指標値

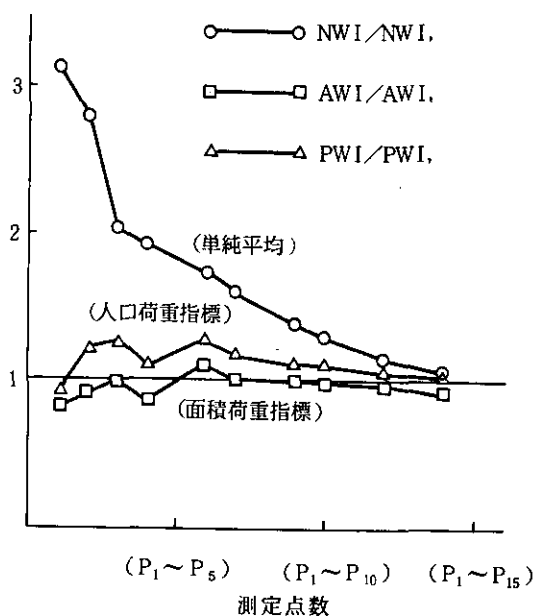


図2 測定点数と汚染指標値変化

のみを用いて平均する等の配慮をしている。しかしこれではデータ数が限られるし、新たに設置した観測点のデータが生かされない。この点を解決する一つの方法として、地域全体のパターンを考慮した面積荷重平均による指標（AWI）が有意であることが、この計算結果から推測されよう。

2.2 広域汚染評価の例

(1) パターン把握のための観測点の配置

遠隔計測が恒常的な技術となり得ない場合、通常の点的な観測ステーションが補間的に設置されることになる。この場合にも、それら観測点の配置の適正化が重要な検討課題であり、そのときの判断情報として遠隔計測によるパターンデータが有用であることはすでに述べた。このようなデータが得られたとして、観測点配置について考えられる多くの手法があり得る。このような中で一つの簡易手法を提案したものが以下のようなものである。

配置の最適性の評価関数として対象域 R 全域にわたる実際値 C^* と推定値 C の差の2乗すなわち

$$J = \int_R (C^* - C)^2 dr \quad (2)$$

を用い、実例の試算をしてみた。

その手法としてまず n 個の観測値より推算したパターンと真値との差を各地点で計算し、これが最大になる地点に $(n+1)$ 番目の新しい観測点を追加していくという単純な手順である。

数値計算例の結果を図3に示すが、ここにはこの手順により得られたパターンと現状の観測点によるパターン、等間隔に観測点を配置したときのパターンの3通りについて、評価式の値を観測点数に対してプロットしたものである。

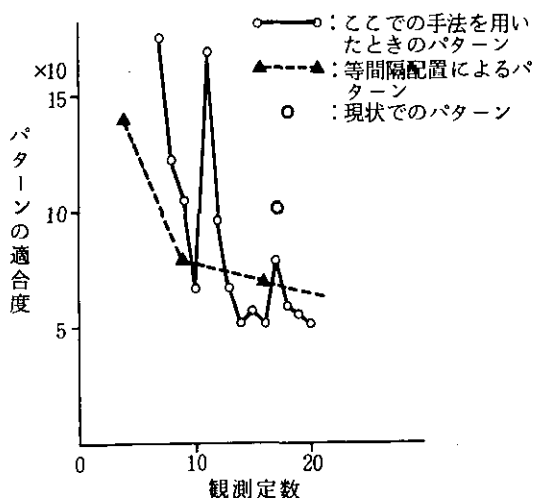


図3 観測点データから再現されたパターン

図3から明らかなように、その目的からして一般的に、高濃度地点を探知するように配置されている従来の観測点は、地域全体のパターンを得るという意味では必ずしも最適でないと思われるが、この例にみる限り、パターン再現の目的にもかなりよく合致しているといえる。

なお、ここでの手法は

- イ) n 個のデータがあり、 $(n+1)$ 番目をどの地点にするかという決め方をするので、第1番目の点の決め方に自由度が残る。
- ロ) 求めたい分布パターンCが分かっているとしてはじめて求まるものであり、これにある代表的時点の遠隔計測データが利用し得るなどのことが期待される。

(2) 道路周辺汚染評価

道路周辺の大気の状態を評価するのに、現在までは、主に自動車排ガス測定局における、測定値の平均や基準値を達成した測定局の割合などが用いられている。しかしながら、比較的限られた地域の将来にわたるバイパスの効果を評価するような場合には、このような考え方では対応できない。そこで本研究では、先に述べた広域指標を採用した評価を試みた。なお道路周辺の局地的な汚染を扱うために、対象とする地域の範囲は道路の両側それぞれ100mとした。

まずシミュレーションにより、対象道路(国道6号土浦市街部と6号バイパス)周辺の NO_x 分布を予測した。(一例を図4に示す)これをもとに人口密度荷重平均指標とその増減率を試算したところ、その結果の一例は図5のようになった。なおこれを3次元的にディスプレイ装置により表現したものが図6である。どのケースをとってみても、全体として現状より汚染指標は低い値を示している。これは NO_x 汚染影響低減に対するバイパスの効果が定量的に示されたことになる。

図5で2車線のときと4車線のときに分けて交通規制の効果をみてみると、どちらの場合も全体

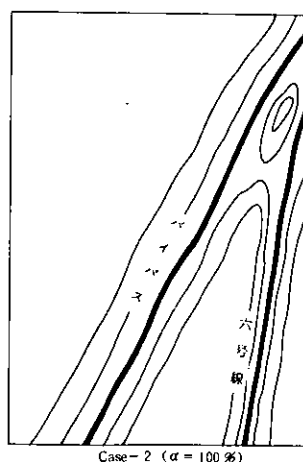


図4 NO_x 分布シミュレーション結果

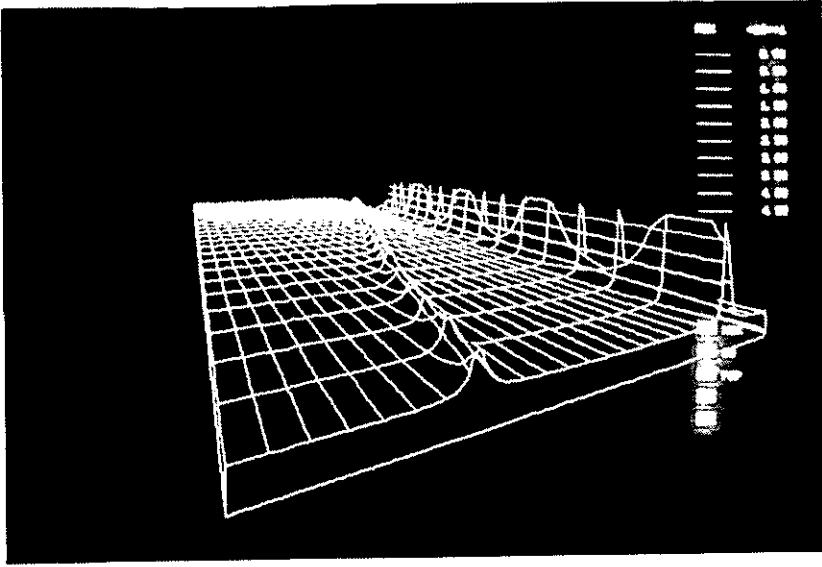


図5 グラフィックディスプレイによる汚染分布パターン表示

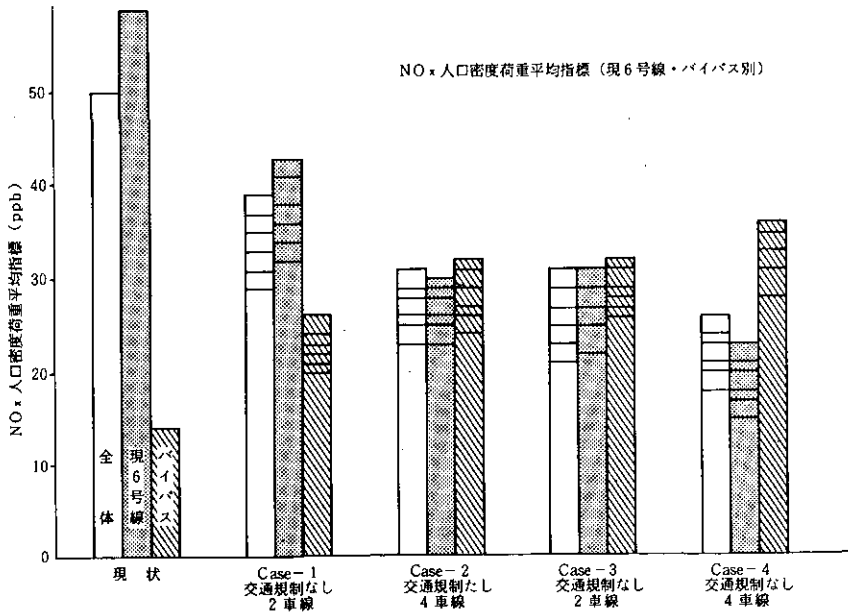


図6 NOx人口密度荷重平均濃度 (現6号バイパス別) (12月昼間を例にして)

として交通規制をした方が良い結果となる。しかし、交通規制をした場合、全体として良くなるがそれはバイパス側へのしわ寄せの結果であることがわかる。そこで人口密度荷重平均指標を現6号線とバイパスに分けて算出してみると、2車線の場合では、全体として値が低く、しかもバイパスと現6号線のバランスのとれたCase-3（交通規制あり）の方がCase-1（交通規制なし）よりも良いと言える。

3. 広域汚染パターンの把握手法

3.1 点データのパターン化手法

直接遠隔計測により分布パターンが把握出来ない間は、何らかの他の方法でパターン情報をうる必要がある。この手法はまた遠隔計測データが得られた場合に、それをグランドトランスデータと対応づける為にも必要であろう。

現時点でパターン情報をえる一つの有力な手法は観測値の内外挿によるものであろう。

従来から用いられている各種手法のうち多項式や、フーリエ級数などで補間する方法は、直感に合わない結果がしばしば見られるなどの問題があると指摘されている。それら以外に、距離に応じた重みつき平均をとる方法等がある。いずれにせよ、どの方法もデータがかなり密に存在することが必要であり、また外挿して推定された境界付近の濃度は極端に不自然なものになることがあるなど、種々の問題点を有している。

以上の各手法のなかで“スプライン法”というのは

- 1) データ密度が小さくても、スプライン係数の選択によって滑らかな曲面を得る。
- 2) 平面内で等方的な補間方法である。
- 3) データ点での測定値がそのまま適用される。

などの特徴の為に、環境データに適用するには便利である。これを2次元平面の場合に定式化すると、

$$E = \int_R \{ (\Delta z)^2 + \sigma (\nabla^2 z)^2 \} dx dy \rightarrow \min \quad (3)$$

with

$$\text{B.C. } \frac{\partial z}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

を満たす $z(x, y)$ が求める解である。

それではスプライン係数 σ をいくらにとるのが適当かということが重要な問題となる。これについては、従来からも種々議論はなされたが通常は直感的に適当な値を与える以外、確たる方針は見い出されていない。

そこで現実的な一つの方法として次のような解析を試みた。まず、東京都の50か所の観測点データ（1970年のSO₂年平均値）を用いて、この観測値をtraining dataとchecking dataの2種に分ける。そして係数 σ を種々に設定し、training dataを用いてスプライン補間を行い、その計算結果

と checking data との誤差を比較してみる。その一例を図7に示すが、これを見ると誤差を最小とする σ の存在することが分かる。このことはきわめて興味深く、かつ実用上有用であるといえよう。この例では、 $\sigma = 1.0$ 近辺が最適値であることを示している。この場合の分布パターン推定結果を図8に示す。

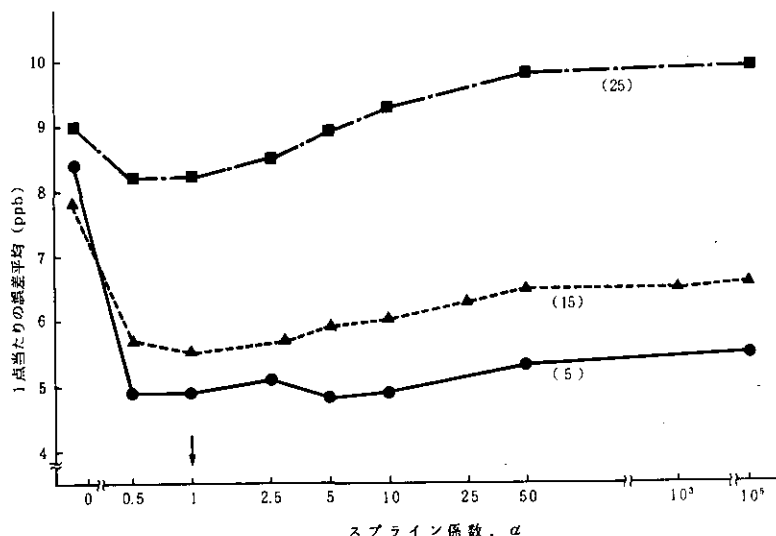


図7 スプライン係数と計算誤差の関係

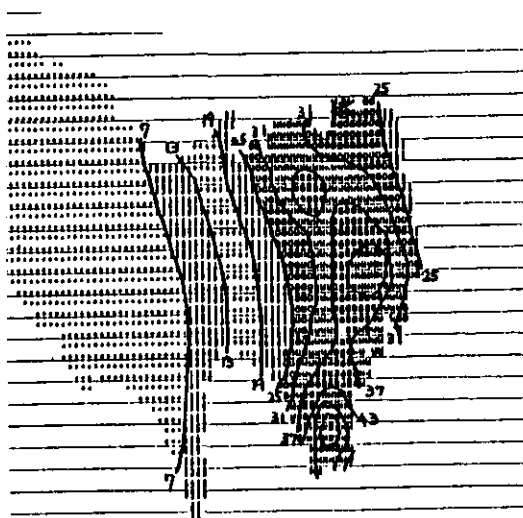


図8 スプライン法による大気汚染分布のパターン化 (東京都 SO_2 年平均値)

3.2 汚染予測パターンモデルの提案

ここで提案するパターンモデルの全体の構成を図9に模式的に示した。点観測データから二次元パターンを作り、それにフーリエ変換を始めとするいくつかの数学的手法を適用して、パターンの特徴抽出や分類を行う手順が図の左側に示されている。一方右側では状況要因の整理と類型化を行う。二次元パターンと状況要因との関連を分析することが最終的な目標となるが、その定性的取扱いについてはすでに報告しているので省略し、ここでは定量的分析について説明する。なおモデルの定式化の各段階に用いた手法を併せて図中に示してある。

得られた二次元パターン $g(x)$ の特徴を定量的に記述するためにフーリエ変換を行う。 $g(x)$ に対する二次元離散フーリエ変換は次の式で与えられる。

$$G(m, n) = \sum_i \sum_j g(i, j) W_M^{im} W_N^{jn} \quad (5)$$

$$g(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_m \sum_n G(m, n) W_M^{-im} W_N^{-jn} \quad (6)$$

但し、 $W_n = \exp[-(2\pi j/M)]$ 。(5)式から得られるフーリエ係数 $\{G(m, n)\}$ は二次元パターンの空間周波数成分を表しており、(6)式の逆変換によりこのパターンは完全に再現される。ところで二次元パターン $g(x)$ (図10)を得る段階で平滑化によって局所性が取除かれることが多いため、フーリエ係数の高次の項のパターン再現への寄与は少ない。その例として図11に低次の項だけを使って図10のパターンを再現したものを示す。分布パターンの広域的な特徴を把えることを目的とすれば図11に示した程度の再現性でも十分有効であると思われる。

汚染分布パターンの定量化にフーリエ変換を用いたことの利点をまとめれば、

- 1) フーリエ係数が局所的ではなく広域的なパターンの特徴を把えており、その意味するところ(濃度分布の方向性やその強度)が直観的に把握できる。

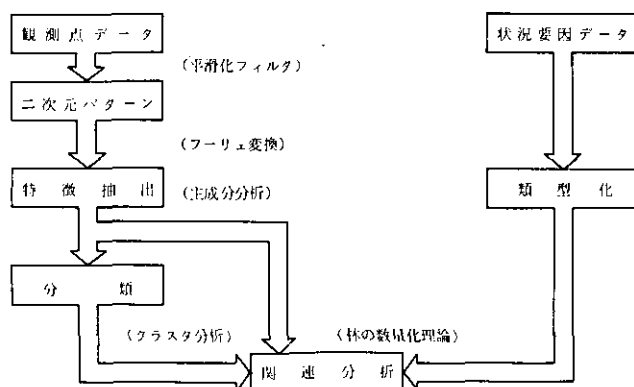


図9 パターンモデルの構成

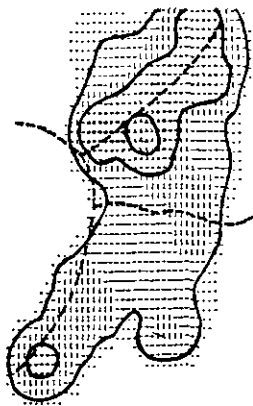


図10 観測値を平滑化して得た分布パターン

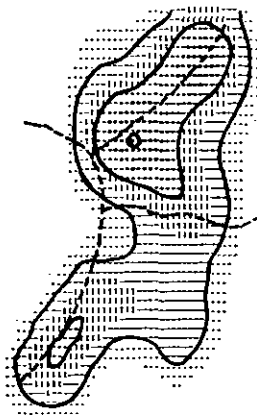


図11 0～3次フーリエ係数によるパターンの再現

2) FFT等の手法を用いることにより変換・逆変換が容易である。

3) 二次元パターンは低次の項のみでもある程度再現可能であり、情報の縮約にもなる。

などであり、これはいずれ遠隔計測技術の確立と相俟って、汚染状況データの処理、蓄積、表示に極めて有力な手法となろう。

引用文献

- 1) 内藤 (1975) ; 環境システム—計測の未来—。計測と制御, 19 (1), 163 - 167.
- 2) Finzi, G. *et al.* (1977). Modeling and Forecasting DDP. IFAC'77 symposium, Kyoto.
- 3) Horie, Y. *et al.* (1976): Analysis of Population Exposure to Air Pollution in New York, New Jersey, EPA-450, U. S. EPA.
- 4) 落合, 内藤 (1977) ; 広域汚染の指標に関する検討 - I. 公害と対策, 13 (9), 58 - 64.
- 5) 落合, 内藤 (1978) ; 広域汚染の指標に関する検討 - II. 公害と対策, 14 (9), 69 - 76.
- 6) 篠原, 乙間ほか (1981) ; 道路環境の総合評価の一例. 土木学会, 環境問題シンポジウム
- 7) 篠原, 内藤 (1980) ; スプライン法による大気汚染二次元分布の推定. 環境情報科学, 9 (4), 62 - 64.
- 8) Ikura, Y. and M. Naito (1977): Pattern Model for Prediction of Regional Distribution of Airborne Pollutant. IFAC Symp. Sept. Kyoto.

Ⅲ. 報 文

Ⅲ-1

広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作*

清水 浩¹・竹内延夫¹・笹野泰弘¹

杉本伸夫¹・松井一郎²・奥田典夫¹

Design and Construction of a Large-Scale Laser Radar for Monitoring Air Pollution Over a Wide Range*

Hiroshi SHIMIZU¹, Nobuo TAKEUCHI¹, Yasuhiro SASANO¹,
Nobuo SUGIMOTO¹, Ichiro MATSUI² and Michio OKUDA¹

要 旨

広域の大気汚染現象を測定する目的で、大型のレーザーレーダー装置を開発した。この目的の装置ではレーザー波長の選択を特に注意して行う必要があり、検討の結果、Nd:YAG レーザーとその第2高調波が最適であることが分かった。

この装置の主要な性能は、レーザー出力が30W (1.06 μm) と10W (532nm)で、受信望遠鏡の口径は1.5mである。測定可能領域はS/Nの計算から求められるが、この装置では50~60 kmまでの測定が可能であることが、理論計算と実際の測定から確かめられた。

Abstract

A large-scale laser radar system, which measures Mie scatter from atmospheric aerosols and Raman scatter from major atmospheric components, has been constructed to observe the pollution over a wide area. For the system design, a laser wavelength should be selected carefully in order to observe the wide range, and from numerical calculation, the Nd:YAG laser and its second harmonic were found best.

The major specifications of the system are: the laser output power is 30 W (at 1.06 μm) and 10 W (at 532 nm) with a repetition rate of 25 pps and pulse duration of about 20 nsec, and the effective diameter of the receiving telescope is 1.5 m. The

*本論文の要旨は応用物理, 50(11月号)(1981), 1154-1164, に掲載。

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

S/N ratio was calculated and the observable range was found to be 50 to 60 km for Mie scattering. This calculated range was verified by field observation.

1. はじめに

レーザーレーダーはレーザーの多くの応用分野の中でも最も歴史の古い分野の一つである。1963年、Fiocco¹⁾らにより初めてレーザーレーダーによる観測が行われて以来、レーザー技術の発展やレーザーレーダーに関する基礎技術の進歩が成果を納め、その有用性が次第に認められつつある²⁾。

最近のレーザーレーダー技術で特筆すべきことは、レーザー関係では発振の安定性と信頼性が増し、しかも高出力化が可能になってきたことが挙げられる。また、周辺技術では、コンピュータの発達により、レーザーレーダー装置の制御にもこれが導入されるようになったことである^{3~4)}。そのために、測定精度と収集可能な情報量が著しく向上し、さらに、データ処理に要する時間も大幅に短縮された。

このような流れの中で、筆者らは大気汚染を遠隔計測する目的で、計測車搭載型のコンピュータ化したミー散乱方式レーザーレーダー⁵⁾や色素レーザーを用いた差分吸収方式レーザーレーダー⁶⁾などの開発を手がけてきた。そしてこれらの基礎技術を背景に大型のレーザーレーダー装置の開発を行った。

この装置は、使用目的から、半径50km以上の距離までのミー散乱によるエアロゾル濃度分布の測定と、半径3kmまでの大気分子によるラマン散乱の測定が要請される。これまで作られてきた環境計測用のレーザーレーダーの測定可能距離はせいぜい10km程度であった。これを一挙に5倍以上に伸ばすためには、装置の大型化と高効率化を図る必要がある。そのために、基本設計を行うに当たって特に検討を行った項目がある。ここでは、それらを中心に、ハードウェアを中心とした装置の概要を述べる。

2. 設 計

ここでは設計に当たって特に検討した事項について述べる。

2.1 レーザーの選択

中・小型のレーザーレーダーでは高感度で信号を検出するためのレーザーの波長を選択する際に、測定対象の散乱の大きさと検出器の効率のみを重点的に考慮すればよかった。しかし、遠距離測定装置では光の減衰についても考える必要がある。何故なら、往復で100kmを超す距離を伝播させると、強度の低下が著しいためである。

(1) 波長感度の検討

波長感度の検討は次式のレーザーレーダー方程式⁷⁾に基づいて行われる。

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

ここで、 $n(R)$ は検出器で検出される信号量、 n_0 はレーザーパルス1発当たりの光子数、 p は測定に要するレーザーパルス数、 L は距離分解能、 K は光学系の効率、 β は体積後方散乱係数、 T は光の透過率、 A_r は受信望遠鏡の有効面積、 Y_r は視野の重なり、 η は検出器の量子効率、 R は測定地点までの距離である。

(1)式から、高感度で測定するためには、 T 、 β および検出器の感度を最大とする波長を選択する必要がある。

まず、 T は光の減衰係数を σ とするとき、

$$T = \exp(-\sigma R) \quad (2)$$

で表される。ここで、 σ の値は空間的に一様であると仮定しており、 R は(1)式で用いたものと同じである。 σ の値の波長依存性について最も広く使用されている計算式は Kruse ら⁸⁾のものであり、次式で表される。

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \quad (3)$$

ここで、 V は可視光における視程(km)で λ は使用波長(μm)である。また、 q は定数であり、Kruse らによると、

$$\begin{aligned} q &= 0.585 V^{\frac{1}{3}} & \cdots \cdots V < 6 \text{ km} \\ q &= 1.3 & \cdots \cdots \text{平均的視程} \end{aligned}$$

である。(3)式の妥当性についてはこれまでに数多くの議論がある。例えば、Junge の理論⁹⁾によれば $q = 1$ となり、Bullrich¹⁰⁾によれば $q = 0.5$ から2.0の幅を持つ。しかし、ここではWoodman のレビューにより¹¹⁾、可視の領域では $q = 1.3$ を使用する。また、赤外の領域では(3)式の関係はエアロゾルの粒径分布やその組成により大きく変化するため、(3)式を赤外の領域に使用するのとは適当ではないが、可視光に近い領域においては近似的に使用しても差し支えない。

つぎに β の波長依存性について検討する。一般に σ と β との比はミー散乱パラメータ $\kappa(=\sigma/\beta)$ と呼ばれている¹²⁾。 κ の値は波長および粒径に依存する。一般にエアロゾルの大きさは波長とほぼ等しい大きさを持っている。この領域では κ の値を一義的に決めることは困難である。一例として、屈折率1.33の水滴について行った計算および、超音波霧発生器とアルゴンイオンレーザーを用いて行った実験によると¹³⁾、

$$\kappa = \frac{2.0\overline{r}}{\lambda} + 88 \quad (4)$$

$$\frac{\lambda}{2} < \bar{r} < 30 \lambda$$

という結果が得られている。ここで $\bar{r}$ は平均粒径である。(4) 式によれば κ は波長に依存するが、波長と粒径の大きさが余り変わらないという条件ではほぼ一定とみても差し支えない。これより、 β の波長依存性も (3) 式の $q = 1.3$ とした場合とはほぼ同じであると考えられる。

最後に、検出器の感度である。検出器は使用する波長により種類と感度が異なる。このうち、紫外域から近赤外領域の波長では光電子増倍管が最も感度がよく、最も多く使われている。赤外領域では数多くの種類の検出器が使用されているが、いずれも、感度は光電子増倍管に比べ数桁低い。検出器の感度は、光電子増倍管の場合、量子効率で表現することが多く、赤外検出器では detectivity: $D^{(14)}$ がもっぱら使用されている。このように、全く異なる概念で表現されている検出器の感度を同一の基準で比較するために、ここでは測定に必要な最小の信号エネルギー (E_m) を定義する。

赤外検出器の S/N は次式で与えられる⁽¹⁴⁾。

$$(S/N) = DP_s = \frac{D^* \tau^{\frac{1}{2}} P_s}{A^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

ここでは D は検出器の Detectivity, P_s は信号パワー、 D^* は規格化された Detectivity, τ は測定時間、 A は検出器の面積である。測定に必要な信号エネルギー E_m は P_s と τ の積であるから、次式で与えられる。

$$E_m = P_s \tau = \left(\frac{S}{N} \right) \frac{A^{\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}}}{D^*} \quad (6)$$

光電子増倍管の S/N は量子雑音制限の場合次式で求められる⁽¹²⁾。

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{n_s \eta}{\mu}} = \sqrt{\frac{E_m \eta}{h \nu \mu}} \quad (7)$$

ここで、 n_s は信号の光子数、 h はプランクの定数、 ν は信号光の振動数、 μ は光電子増倍管の雑音指数で約 2 をとる。(7) 式より E_m は次式で与えられる。

$$E_m = \left(\frac{S}{N} \right)^2 h \nu \mu / \eta \quad (8)$$

高感度で測定を行うには、次のように定義される感度の figure of merit が最大となる波長を選べばよい。

$$S_f = \sigma T^2 / E_m \quad (9)$$

(2) レーザーレーダー用レーザーの S_f 値

レーザーレーダー用のレーザーとして過去に使われ、あるいは今後も使われる可能性のあるレーザーは、波長の長い方から、CO₂ (10.6 μm), 半導体 (近中赤外), Nd:YAG (1.064 μm) およびその高調波 (532 nm, 355 nm), ルビー (694 nm) およびその高調波 (347 nm), N₂ (337 nm), エキサイマー (可視および紫外) である。

これらのレーザーのうち近中赤外, 可視, 近紫外の各波長領域について代表的なものとして, CO₂, Nd:YAG, ルビー, Nd:YAG の第二高調波および第三高調波を選びその E_m の値を求める。共通の条件として, $S/N=1$, $A=1\text{ cm}^2$, $\tau=5\text{ }\mu\text{s}$ (レーザーレーダー距離分解能が750 mに相当) とする。また, それぞれのレーザー波長で使われる検出器の種類と特性は, 表1に示す。さらに, これらの特性を(6)式と(8)式に代入して得られる E_m の値も同表に示す。

表1の E_m の値と(2)式および(3)式より求められる T の値および(3)式から得られる σ の値から, (9)式の S_f が求められる。 S_f を求めるに当たって, まず σT^2 の値の波長依存性を求めた結果を図1に示す。

図1は視程が30km, 測定距離 R は50 kmを選んで計算してある。なお, この値は, 夏の季節にレーザーレーダーの設置場所で月間15日以上これより良好な日があるという条件から求めたものである。この図では σT^2 の値が大きければ大きい程感度よく測定可能になるが, 波長4 μm 付近に最大値がある。それより短波長では急激に減少する。これは T^2 の項が大きく影響している。長波長側ではなだらかに減少しているがこれは σ の項に基づく。

図1には σT^2 と E_m から求めた S_f の値も丸印で示してある。さらに, この値は表1にも示してある。この結果からルビーレーザーの波長が最も感度がよく, Nd:YAG レーザーがこれに続いている。また, その他のレーザーは桁違いに感度が低下する。近距離測定用のレーザーレーダーでは, σ の値が大きくしかも検出器の感度の良好な近紫外の波長が最も感度良好であるが, 遠距離測定用レーザーレーダーではこのような違いが出てくる。

また, ラマン散乱は断面積がレーザー波長の4乗に逆比例するため使用する波長は短波長である程良い。

表1 検出器感度の波長依存性

LASER	WAVELENGTH	DETECTOR	MATERIAL OF DETECTOR	SENSITIVITY	E_m	S_f
CO ₂	10.6μm	Photo con.	Hg Cd Te	$D^* = 2 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1/2} \text{ W}^{-1}$	$1.2 \times 10^{13} \text{ J}$	1.9×10^{10}
Nd:YAG	1.06μm	PMT	S-1	$\eta = 0.1\%$	$1.9 \times 10^{16} \text{ J}$	1.2×10^{12}
RUBY	694nm	PMT	Ga As	$\eta = 12\%$	$2.4 \times 10^{18} \text{ J}$	2.7×10^{12}
Nd:YAG(SH)	532nm	PMT	Ga As	$\eta = 18\%$	$2.1 \times 10^{18} \text{ J}$	8.1×10^{10}
Nd:YAG(SH)	355nm	PMT	bialkali	$\eta = 20\%$	$2.8 \times 10^{18} \text{ J}$	4.2×10^6

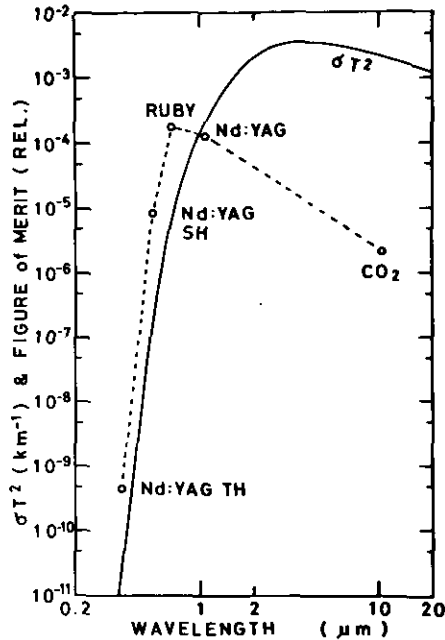


図1 広域モニター用レーザーレーダーの信号受信効率の波長依存性

(3) レーザーの選択

レーザーの選択では、前項で述べた波長のほかに、レーザー装置の性能や機能も考慮に入れる必要がある。レーザーレーダー用レーザーに要求される性能としては、高出力であること、高速繰り返し発振が可能であること、十分時間幅の短いパルス光が得られること、指向性がよいことなどが挙げられる。また、機能の点では、小型であること、保守性が良いこと、安定に動作することなどがある。これらを検討すると、CO₂、Nd:YAG およびその第2高調波は、型状が多少大型になる点を除いてはすべての要求を満たしている。ルビーレーザーは高速繰り返しができないという大きな欠点を持っている。

図1の結果を考え合わせると、Nd:YAG レーザーが広域の測定のために最もふさわしいということが結論される。しかも、Nd:YAG レーザーから発生する第2高調波は比較的短波長であり、ラマン散乱測定のための光源としてふさわしい。

以上の理由から、レーザーとしては、Nd:YAG レーザーとその第2高調波を選んだ。

2.2 送光方式

レーザーレーダーでは、送信レーザービームの光軸を受信望遠鏡の光軸と平行に保ちながら掃引を行う。その送光方式には、直結型、クーデ型、補助鏡回転型とがあった。

直結型では望遠鏡の掃引とともにレーザーも回転させるため、レーザーヘッドの機械的安定性が問題となる。

クーデ型はレーザーヘッドの回転がないため、その機械的安定性に注意を払う必要がない。しかし、最低5枚の反射鏡を使うためにレーザー光の損失が大きく、しかも掃引装置の回転軸とレーザービームの光軸を平行にする調整の精度を非常に高くしなければならないという欠点がある。

補助鏡回転型には前の二つの方式のような欠点はないが、掃引の角度範囲が狭い領域に限られてしまう。

ところで、広域測定のためのレーザーレーダーで送光方式を選択する場合、次のような条件がある。まず、レーザーヘッドは高出力を出すため、大型で構造的に複雑になり、機械的安定性を高くすることは困難であり、直結型の使用は不可能である。また、広域を測るためにはレーザービーム送光角度精度を高くすることが必要である。また、レーザー光の損失も極力抑えたい。この要求からクーデ方式は効率が悪い。さらに、広域を測るために広範囲に掃引する必要があり、補助鏡回転型は使用できない。したがって、広域測定のためのレーザーレーダーとしてはいずれの方式もふさわしくない。

そこで本装置の設計に当たっては、セミクーデ方式ともいうべき新しい方式を考案した。この方式は図2に示すように、レーザーヘッドを掃引装置の水平回転軸と垂直回転軸の間に取りつけ、水平方向の掃引に対しては直結型と同じ働きをし、鉛直方向の掃引についてのみクーデ型として働くようにしたものである。一般にレーザーヘッドは水平方向のなめらかな回転に対しては機械的に安定であり、鉛直方向に対してのみ不安定である。したがって、セミクーデ方式により、レーザーヘッドの機械的安定性に配慮を払う必要がない。また、クーデ方式は鉛直軸一軸のみであれば精度よく動作させることが可能である。

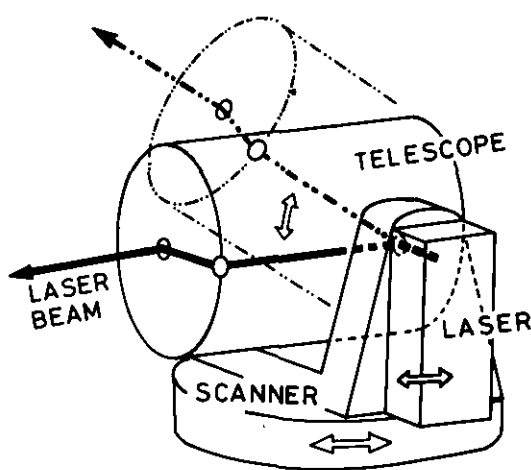


図2 セミ・クーデ方式の模式図

2.3 受光望遠鏡の口径の選択

レーザーレーダーの測定可能距離 R は、レーザーの種類が決まれば、レーザーの出力 P と望遠鏡の有効面積 A の積 AP に依存する。本装置の場合、 R はあらかじめ決められているため、(1)式を用いて AP の値は求められる。これらのうちどちらを優先させるかを決める要因の主なもの、費用とレーザー技術および望遠鏡製造技術のレベルである。レーザー技術は日進月歩の進歩をしており、レーザー出力は年々向上し、コストは低下する方向である。また、望遠鏡製造技術は今後大きな進歩は望めない見通しであり、短い期間の間に性能が時代遅れになるようなことはない。これらの条件から、まず、望遠鏡について、費用と技術の許せる限りの口径の大きなものとし、それに合わせてレーザーの出力を選ぶという手順で AP の値を決定した。その結果、直径 1.5 m の口径を選んだ。

3. 装置の概要

図3に完成した装置のブロック図を示す。装置全体の基本的構成は、レーザー、望遠鏡、掃引装置、信号受信装置、信号処理装置およびミニコンピュータを用いた処理装置である。さらに、これら全体を1か所で制御するためのコントロールコンソールが付加されている。

この装置全体は、図3に示すように8階建ての建物の8階と7階に設置されている。8階の天井はドーム式となっている。

表2に装置全体の主な特性を示す。以下表2に従って各部ごとに装置の説明をする。

3.1 レーザー

レーザーは、Qスイッチを用いたステープル発振方式のオシレータに3段の増幅を施している。このレーザーのパルス当たりの出力は1.2 J、パルス幅約15 ns、パルス繰り返し25 pps、ビーム拡がり0.3 mrad である。フラッシュランプは各段に2本ずつのキセノンランプを使用している。このランプの寿命は約300万ショットである。

第2高調波発生のための結晶には KD^*P を使用している。

3.2 受光望遠鏡

受信望遠鏡はカセグレン型で、その主鏡は有効径1500 mmの直径を持っている。材質は超々ジェラルミンで、表面はカニゼンメッキを施した上アルミ蒸着を行い、 SiO_2 の保護膜を付けてある。副鏡は直径380 mmで、材質、表面処理とも主鏡と同一である。合成焦点距離は8000 mm、鏡筒の長さは2800 mm である。焦点距離の調整は副鏡を遠隔操作で移動させることにより行う。

3.3 掃引装置

掃引方式は高度方位方式で、運転速度範囲は $600^\circ/\text{min} \sim 0.25^\circ/\text{min}$ である。高速の限界は、

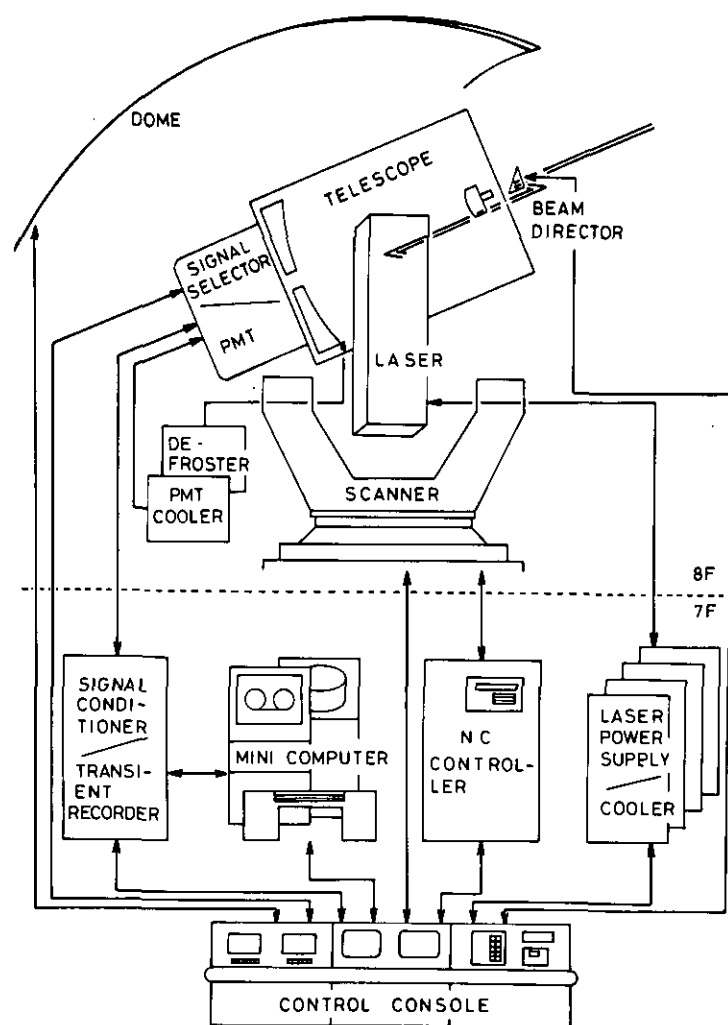


図3 大型レーザーレーダーの構成図

筆者らが開発した風向・風速の測定法¹⁵⁾の条件より決め、低速の限界は地球の自転速度から決めた。位置および運動精度はともに $1'$ (0.3 mrad) である。この角度はレーザーのビーム拡がり角と同一である。掃引装置の運転は、コントロールコンソールからの手動または自動運転の指令およびコンピュータからのプログラム指令により動作可能である。

3.4 信号受信装置

信号受信装置とは、望遠鏡の視野紋りから光電子増倍管までの光学系のことである。この部分のブロック図を図4に示す。これの主な特徴は、信号光をビームスプリッターで分離し、同時に二つの

表2 大型レーザーレーダーの仕様

LASER		
MATERIAL	Nd:YAG	KD*P(SHG)
AVERAGE OUTPUT POWER	30 W	10 W
OUTPUT ENERGY / PULSE	1.2 J	0.4 J
REPETITION RATE		25 pps
PULSE DURATION		15 n
BEAM DIVERGENCE		0.3 m rad
RECEIVING TELESCOPE		
TYPE		CASCEGRAIN
EFFECTIVE APERTURE		1.67 m ²
FOCAL LENGTH		8 m
SPOT SIZE ON FOCUS		1 mm
SCANNER		
SCAN TYPE	AZIMUTH-ELEVASTION	
SCAN RATE	600-0.25 deg/min	
ACCURACY OF AIMING	1 min (0.3 mrad)	
ACCURACY OF SCAN	1 min (0.3 mrad)	
TRANSMITTING TYPE	SEMI-COUDE	
RECEIVING OPTICS		
RECEIVING ANGLE	0.15-4.8 m rad	
MONOCHROMATION	IF FILTERS AND DOUBLE MONOCHROMATOR	
BAND WIDTH OF FILTERS	0.7A ~ 1.5A	
TRANSMITTANCE OF FILTERS	12% ~ 24%	
FOCAL LENGTH OF MONOCHROMETER	30 cm	
SIGNAL PROCESSOR		
TYPE	DIGITAL PROCESSING	
MIN. SAMPLE RATE	10 n s	
ACCURACY	8 bits	
MEMORY	2 ch-2048 word/ch	
DATA PROCESSOR		
TYPE	MINI COMPUTER-LARGE COMPUTER COMBINED SYSTEM	
MINI COMPUTER	TOSBAC 7 / 40	
LARGE COMPUTER	HITAC M-180	

種類の信号が測定できること、測定の目的に応じて4本の光電子増倍管を自由に選択できることなどである。図4を参考にして信号の流れを見る。まず、望遠鏡の焦点に付けられた絞りに信号光が集められる。この絞りは、0.15 mrad から2倍ごとのきざみで4.8 mrad まで合計6種類の受信視野が変えられる。絞りを通った光はレンズで平行光とされる。テストの際にはITVに導かれる。測定の場合にはビームスプリッターで分割される。分割の割合は96%対4%である。この大部分の信号を受け入れるチャンネルを主系列、もう一方を副系列と呼んでいる。主系列に導かれた信号は干渉フィルタで分光する。フィルタは、温度コントロールを施したもの2枚と施さないもの14枚を選択できる。分光された信号光は直接光電子増倍管に入れることもできるし、ダブルモノクロメータでさらに分光させることも可能である。光電子増倍管は、レーザーの基本波用と第2高調波用およびそれぞれの昼、夜用の計4本が用意されている。

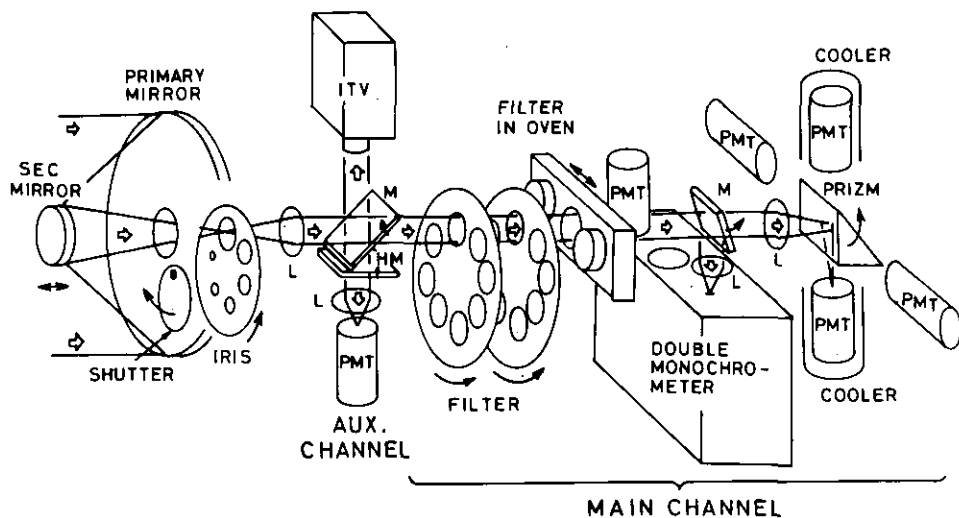


図4 受信光学系の構成図

副系列に入った信号光は、第2高調波の波長の光を通す干渉フィルタを通した上光電子増倍管に入る。

この部分のすべては遠隔操作で動かすことができる。

3.5 信号処理装置

信号処理装置は、光電子増倍管、信号前処理装置、トランジェントレコーダ、リアルタイム表示装置から成っている。この部分のブロック図を図5に示す。信号前処理装置は、光電子増倍管からの出力をトランジェントレコーダの入力に適合するように増幅、減衰、フィルタリング等を行う部分である。トランジェントレコーダには岩通製 DM 902 を使用している。リアルタイム表示装置は、トランジェントレコーダのアナログ出力に距離補正等を加え、さらに、掃引装置の角度データを合わせてブラウン管上に実時間でのデータ表示を行わせる。

3.6 データ処理装置

データ処理装置はミニコンピュータとその周辺装置から成っている。さらに、このミニコンピュータは32kw/sの転送速度を持つ高速伝送線により大型計算機と接続されている。データ処理装置全体のブロック図を図6に示す。ミニコンピュータのCPUには、TOSBAC 7/40を使用している。データの記録はマグネティックテープ (MT) に行うが、ここで使用されている MT デッキは 1600

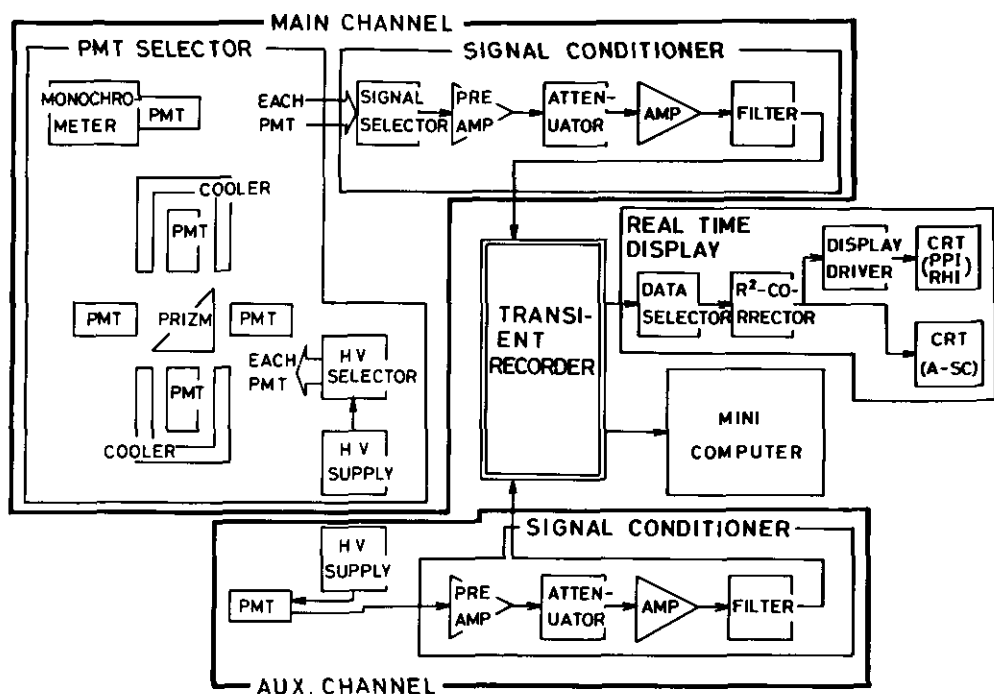


図5 信号処理系の構成図

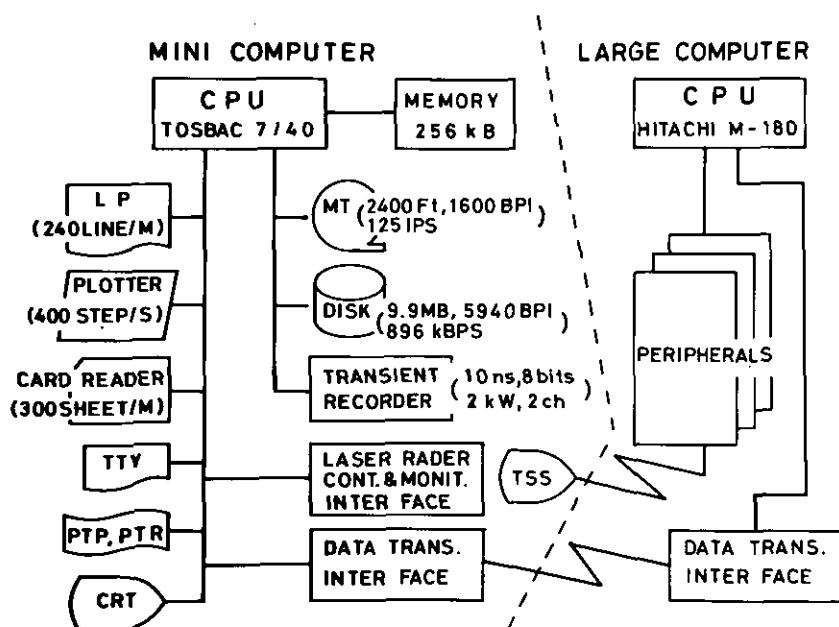


図6 データ処理系の構成図

BPI, 125 IPS の性能を持つ。データ処理プログラムの管理は、9.9 MB の容量を持つ固定ディスクで行う。データの出力はラインプリンタまたはプロッタで行う。データ処理装置では、プログラムの管理の下でデータの収集、データ処理、装置全体の制御を行うことができる。

3.7 コントロール装置

コントロール装置は装置全体の制御とモニターを集中的に行う部分である。従来のレーザーレーダーでは、装置の各部分において制御あるいはモニターが行われていた。しかし、装置が大型化したことにより集中的に制御することが必要になった。コントロールの系統図を図7に示す。

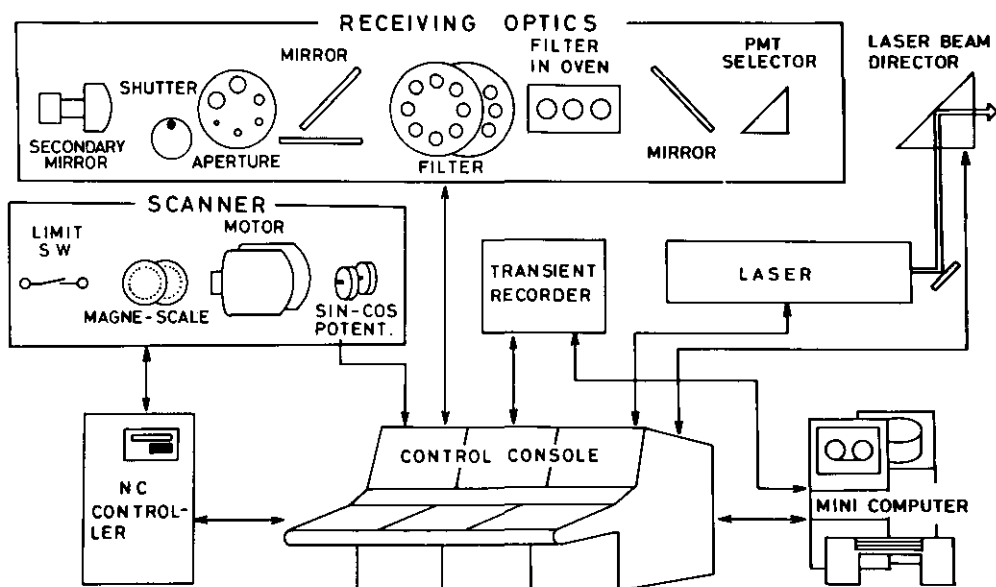


図7 制御系の構成図

コントロール装置で行う制御項目は、1) レーザー発振に関すること、2) 光軸の平行度の調整、3) 信号受信装置の各構成要素の選択、4) 架台の操作に関すること、5) ドームの回転および開閉、である。

コントロール装置で行うモニター項目は、1) レーザーに関するもの、2) 信号受信装置に関するもの、3) 架台に関するもの、4) データのリアルタイムモニターに関するもの、である。

4. 測定の可能性の検討

レーザーレーダーによる測定値の誤差を決定する主な要因は三つある。一つは、レーザーレーダーの受信信号強度と光検出器の雑音から求められる S/N (信号検出の S/N)、もう一つは、レー

ザーの出力変動, さらにデータ処理装置で発生する電氣的雑音である。測定値の S/N を $(S/N)_T$ とすれば, この値は次式で求められる。

$$(S/N)_T = 1 / \sqrt{\frac{1}{(S/N)^2} + \delta_I^2/p + \delta_c^2/p} \quad (10)$$

ここで, (S/N) は信号検出の S/N , δ_I , δ_c はそれぞれレーザーおよびデータ処理装置に基づく誤差分, p は前出のレーザーパルス数である。(10) 式の S/N の値は装置の規模に直接依存する。 δ_I を小さくするにはレーザーの出力を精度よくモニターし, 受信信号をこのモニター値で規格化する。

(10) 式の S/N の値は次のように理論的に求められる。まず, (1) 式のレーザーレーダー方程式から受信される信号光強度を求める。また, 背景光の強度も次式から同時に求める。

$$n_b = \frac{N_\lambda Q f K A_r L p \eta}{h \nu c} \quad (11)$$

ここで, N_λ は空の明るさ, Q は受信立体角, f はフィルタのバンド幅, h はプランクの定数, ν は光の振動数, c は光速である。こうして求められた値を用いて, S/N は次式で求められる¹²⁾。

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{n(R)}{\mu \{n(R) + 2n_b\}}} \quad (12)$$

ここで μ は光電子増倍管の雑音指数である。ここでは, ミー散乱を利用して広域の測定を行う場合と, ラマン散乱を利用して気象状態を測定する場合の二つに分けて S/N の計算を行う。

4.1 広域測定の可能性

本レーザーレーダーの場合の (1) 式および (11) (12) 式に関連する定数を表 3 に示す。表 3 には, 基本波 (1.06 μm) と第 2 高調波 (532 nm) における値を示してある。なお, 背景光量は, 第 2 高調波では Shotland¹⁶⁾ の値を用いており, 基本波では太陽光量が 3 分の 1, ミー散乱強度が (3) 式の λ に 1.06 μm を代入した値に減るものと考えている。

基本波波長と第 2 高調波波長において (1) 式と (11) 式に表 3 の値と測定の条件を代入した結果を (12) 式に入れば S/N が求められる。表 4 に広域のミー散乱を測定する場合の典型的な測定条件を示す。測定領域は R を半径とする $\frac{1}{4}$ 円とし, 距離分解能はレーザービームの方向および円周方向とも L であるとする。測定時間は, 大気状態が一定と見なせる最大の時間である。レーザーの繰り返しは 25 pps であるから, 20 分間にレーザーは 3 万回発射される。この 3 万回を $\pi R / 2L$ で割った数が測定に用いられるレーザーパルス数 p である。

表 4 の数値を用いた S/N の計算の結果は, 表 5 に示すような値とする。基本波長においては昼夜の測定条件とも S/N の値は 14 となり, 十分に測定が可能である。第 2 高調波の場合, 夜の条件

表3 信号雑音比 (S/N) の計算に用いたシステムのパラメーター

SYMBOL	DEFINITION	VALUE	
		FUNDAMENTAL	SH
n_0	PHOTON NUMBER OF LASER (photons / pulse)	4.32×10^{18}	1.08×10^{18}
K	EFFICIENCY OF OPTICS (%)	27	16
A_r	EFFECTIVE APERTURE (m^2)	1.7	1.7
Y_r	GEOMETRIC FOAM FACTOR (%)	100	100
η	QUANTUM EFFICIENCY (%)	0.1	8
N_λ	BACK GROUND INTENSITY ($W/nm \text{ sr } m^2$)	2.9×10^{-3}	2×10^{-2}
κ	Mie SCATTERING PARAMETER	90	90
Ω	RECEIVING ANGLE (sr)	7.1×10^{-8}	7.1×10^{-8}
f	BAND WIDTH OF FILTER (nm)	0.5	0.1

表4 信号雑音比 (S/N) の計算に用いた典型的測定条件

SYMBOL	DEFINITION	VALUE
R	RANGE (km)	50
L	RESOLUTION (m)	750
V	VISIBILITY (km)	30
t_m	OBSERVATION TIME (min)	20
S/N	SIGNAL TO NOISE RATIO	10
S	MEASUREMENT AREA	QUARTER CYCLE WITH RADIOUS R
p	NUMBER OF LASER PULSES FOR ONE DIRECTION	286

表5 $1.06 \mu m$ と 532 nm に対する昼間・夜間の信号雑音比 (S/N) の計算結果

	DAY	NIGHT
FUNDAMENTAL	14	14
SH	1.7	0.03

でも1.7しか得られず、 S/N が10以上で測定したいという要求は満たされないことになる。これは、第2節で行なった波長の選択の検討結果をそのまま反映している。

表5の結果から、この装置は基本波を使えば広域の測定には十分使用できることが分った。ところで、測定条件の違いによって測定の可能性がどのように変化するものかを検討しておくことは、多くの種類の応用を考える場合に有効である。変化させることができる条件は、表4に示した6種類のすべてである。そのうち、ここでは測定距離に対する S/N の値を視程をパラメータとして計算した結果のみを示す。図8はその結果である。この図では、視程のパラメータとして20km, 30km, 50kmをとってある。また波長は基本波と第2高調波の両方を考えている。この図からも、近距離の測定では第2高調波の感度が良好であるが、広域の測定では基本波の方が優れていることが示されている。なお、基本波長では昼夜とも感度はほぼ同じである。

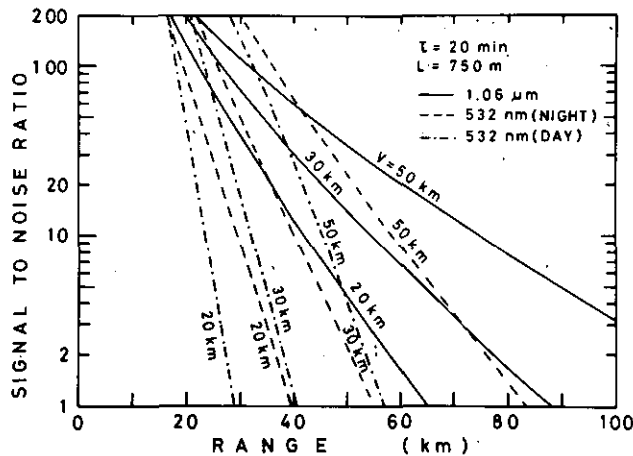


図8 システムの感度の計算値 (ミー散乱)

4.2 ラマン散乱測定の可能性

ラマン散乱による気象状態の測定法については、筆者らの1人が既に検討を行っている¹²⁾。その結果によると、ラマン散乱で測定可能な気象状態は、 N_2 分子の測定による、視程、 H_2O 分子による温度、回転ラマン線や O_2 分子のアンチストークスラマン線の測定による気温の測定などである。各測定における測定の可能性の計算法も文献7に示してある。それは4.1で述べた方法とほぼ同じである。

ここでは、本装置を用いる場合の測定の可能性の計算結果を、湿度の測定についてのみ示す。図9は、気温が $5^\circ C$ と $20^\circ C$ において、相対湿度が50%の状態での10%の誤差で測定を行うという条件で計算した。横軸は距離であり、縦軸は距離分解能を3mと、30mにとった時の測定時間である。

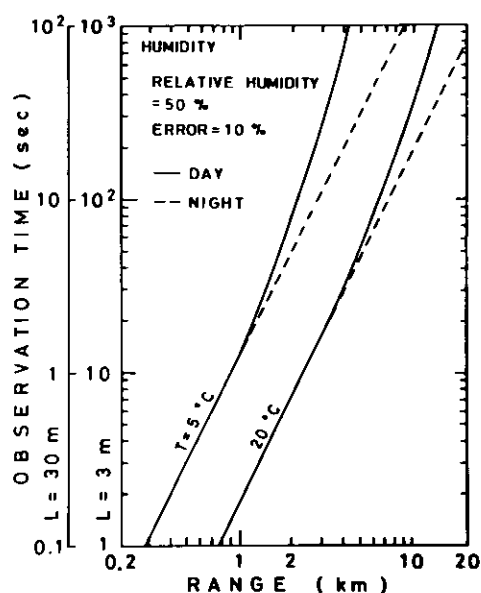


図9 システムの感度の計算値（水蒸気ラマン散乱による湿度測定）

この結果によると、20°C の場合で距離分解能を30mとすれば、3 km までの測定は2.6秒程度で行えることになる。

5. 装置のテスト

装置のテストは装置各部分の単体テストと総合テストに分けられる。

5.1 単体テスト

単体テストには、レーザー、レーザービームと受信望遠鏡の平行度、レーザービーム拡がり、架台の角度精度、信号処理装置などがある。

まず、レーザー出力のテストではその一部をバイプラナダイオードで受光し、この出力をA-D変換した上でコンピュータに転送し、その変化を測定している。このレーザーの出力変動は27%程度であった。

次に、光軸平行度のテストは、従来、レーザービームを遠方のターゲットに当て、これより反射される光をレーザーレーダーで受信し、その強度が最大となるように光軸を調整することにより行われていた。しかし、この方法ではあらゆる方向についてのテストはできない。クーデ方式を使った送光方式ではすべての角度でのテストをする必要がある。このため、本装置では可変絞りと工業用テレビカメラ（ITV）を用いたテスト装置を考案した。

この装置は図4に示した光学系に組み込まれているが、その詳しい構成図を図10に示す。この装置はレーザーレーダーの受信望遠鏡の焦点の位置に開口径が可変の絞りを置き、受信信号の通り道に45°回転できる反射鏡を取り付けてある。この反射鏡は、テストの時のみ信号光を90°折り曲げる。そして、折り曲げられた信号はITVで受信する。ITVの焦点は可変絞りの位置を写すように調整する。

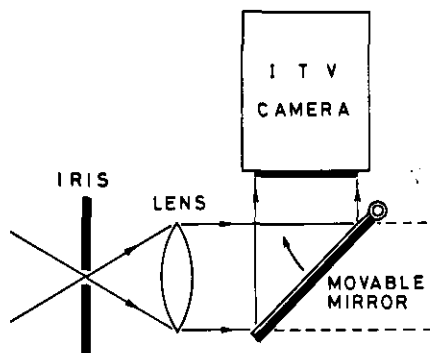


図10 ITV装置を用いた光軸調整装置の構成図

この装置を用いれば、送信レーザービームの断面を受信望遠鏡を通してテレビモニタに写し出すことができます。もしこの断面の像が絞りの中心で観測されれば光軸は平行である。従って、望遠鏡のあらゆる角度で断面の像が中心にくるように調整すればよい。また、像の大きさは送信レーザービームの拡がり角に比例する。これより、拡がり角も同時に測定できる。

図11にブラウン管に写し出された視野絞りに集光した送信レーザービームの像を示す。この図は

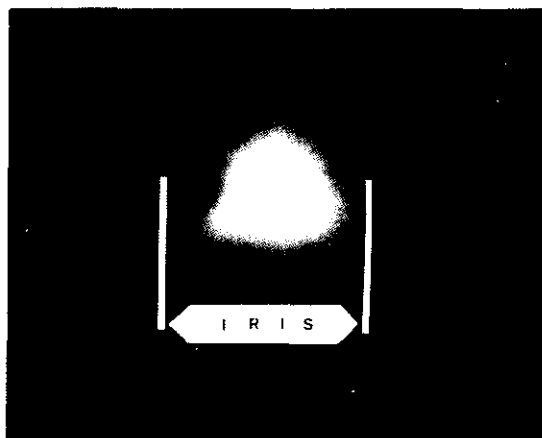


図11 ITV装置により、レーザービームパターンの測定を行った例

視野絞りを 0.6 mrad にした場合の像である。外側の鮮明な円が絞りの大きさを表し、内側の明るい円がレーザービームの像である。調整はこの像が絞りの中心にくるように行う。また、像の大きさがレーザービームのビーム拡がりを表しているが、視野絞りの直径に対して、像の直径が半分程度であり、ビーム拡がりは約 0.3 mrad であることを示している。

掃引装置の角度精度のテストは北極星を基準として行う。これは光軸平行度テスト装置を使用し、モニター用ブラウン管に写し出された絞りの中心に北極星の像がくるように調整する。この時の望遠鏡の方向と、あらかじめ計算で求めた北極星の方向が一致しているかどうかを確かめる。本装置の場合、1 か月ごとにこのテストを行っているが、角度誤差はいずれも $0.2'$ 以下であり、表 2 で示した性能が満たされている。

信号受信装置では干渉フィルタを重点的にテストする必要がある。そのために、分解能が $0.2 \text{ \AA}$ の高分解能の分光光度計を構成した。

本装置で用いているフィルタで最もバンド幅の狭いものは Day Star 社の温度調節フィルタである。これらはラマン散乱用に 4 枚用意してあるが、測定の結果、バンド幅はすべて $0.7 \text{ \AA}$ から $1.5 \text{ \AA}$ 、透過率は 12% から 24% の間であった。

信号処理装置では、時間応答と信号入力に対する出力の直線性が重要である。時間応答については DC から 40 MHz まで特性の変化なしに動作した。直線性では、トランジェントレコーダが入力フルスケールに対して $\pm 80\%$ までは、 0.1 LSB 以下の直線性があり、それより大きな入力に対しては急速に悪化し、 $\pm 90\%$ では約 1 LSB 、 95% では約 3 LSB のずれが生じた。なおこの測定は直流標準電源を入力とし、出力はミニコンピュータに転送し、結果の平均値をとることにより行った。

5.2 総合テスト

装置の総合テストは、(10) 式で求められる理論的測定誤差と、実際に測定される信号の誤差を比較することにより行うことができる。

本装置の場合、 δ_I の値は、レーザーの単体テストから 27% と見積られる。また δ_e の値は、 δ_I に比べ無視できる程小さい。

図 12 に信号の誤差の測定値の 1 例を示す。横軸は距離、縦軸は誤差の測定値の逆数、すなわち、すべての誤差を総合した $S/N \{ (S/N)_T \}$ をとってある。この測定の条件は、波長が第 2 高調波、時間は夜間、視程約 120 km 、距離分解能 60 m 、1 回の測定におけるレーザーパルス数 100 発としている。測定は 40 回繰り返し、その平均値に対する標準偏差の値を $(S/N)_T$ として測定距離ごとに求めている。また、同図には理論曲線を破線で示してある。この曲線は、測定条件を (12) 式の S/N 式に代入して求めた値に、レーザーによる誤差分と測定中の大気状態の変化分を加えている。レーザーによる誤差分は $\delta_I / \sqrt{p} = 2.7\%$ と計算できる。大気状態の変化分は次のように求めた。仮定として、20 分間の間に大気状態は平均して 10% 変化するものとする。しかも、この変動は主

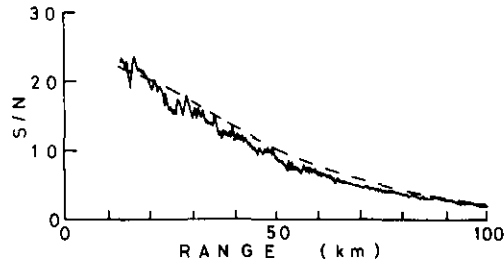


図12 信号雑音比 (S/N) の測定例

に風による大気の流れによって起こるものとする。この測定においては 160 秒を要している。従って、この時間内の大気状態の変化は約 1.3 % となる。

図12により、理論曲線と実験値はよい一致を示しており、装置全体がほぼ理論通り動作していることが確かめられた。

6. ま と め

本文では、環境大気計測用の大型レーザーレーダーのハードウェアに関する概要を述べてきた。

設計においては、レーザーの種類、送光方式および望遠鏡の口径の選択方法が最も重要であるため、これらに重点を絞って述べた。

本装置の測定感度の計算は従来からの方法で行った。総合テストとして行った S/N の測定と測定感度の計算結果はよい一致を示し、装置全体が設計通り正常に動作していることが確認された。

引 用 文 献

- 1) Fiocco, G. and L. D. Smullin (1963): Detection of scattering layer in the upper atmosphere (60–140 km) by optical radar. *Nature.*, **199**, 1275–1276.
- 2) 稲場文男ほか (1973): ライダー (レーザーレーダー) と気象観測. 気象研究ノート, 116 号.
- 3) Uthe, E. E. and W. B. Johnson (1971): Lidar observation of the lower troposphere aerosol structure during BOMEX. SRI project 7929 AEC contract AT (04–3)–115.
- 4) Grams, G. W. and C. M. Wyman (1975): Airbone laser radar for mapping two-dimensional contours of aerosol concentration. *Opt. Quant. Electr.*, **7**, 187.
- 5) H. Shimizu, Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. *Opt. Quant. Electr.*, **12**, 159–167.
- 6) 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 NO_2 濃度分布の測定. *応用物理*, **50**, 923 – 928.
- 7) 稲場文男・小林喬郎・市村 勉・森久光雄・伊藤弘昌 (1968): A スコープ方式レーザーレーダーの基本的動作特性. *電子通信*, **51 – B**, 417 – 424.

- 8) Kruse, P. W., L. D. McGlanchlin and R. B. McQuistan (1962): Elements of Infrared Technology. Wiley New York, 189-192.
- 9) Junge, C. E. (1963): Air chemistry and Radioactivity. Academic Press New York.
- 10) Bullrich, K. (1964): Scattered Radiation in the Atmosphere and Natural Aerosol. Adv. Geophys., 10, 101-260.
- 11) Woodman, D. P. (1974): Limitations in using atmospheric models for laser transmission estimates. Appl. Opt., 13, 2193.
- 12) 清水 浩・小林喬郎・稲場文男 (1977): 対流圏大気多元情報測定および処理のためのレーザーレーダーシステム. 電子通信学会論文誌, 60 - C, 162 - 169.
- 13) 清水 浩・小林喬郎・稲場文男 (1978): レーザーレーダーによる霧および雲中の粒径および水量分布の遠隔測定法. 応用物理, 47, 30 - 36.
- 14) Cruse, P. W. (1977): Optical and Infrared Detectors. Topics in Applied Physics Vol. 19 ed. R. J.
- 15) 清水 浩・笹野泰弘・安岡善文・植田洋匡・竹内延夫・奥田典夫 (1981): レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向, 風速の遠隔測定法. 応用物理, 50, 616 - 620.
- 16) Schotland, R. M. (1974): Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption. J. Appl. Meteorol., 13, 71-77.

Ⅲ - 2

大型レーザーレーダーの性能試験

清水 浩¹・松井一郎²・笹野泰弘¹
竹内延夫¹・奥田典夫¹

Performance Test of the Large-Scale Laser Radar

Hiroshi SHIMIZU¹, Ichiro MATSUI², Yasuhiro SASANO¹,
Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

大型レーザーレーダーは、広い領域の大気汚染現象の把握と解明、および比較的狭い領域での気象要素の立体的測定を行うことを目的として製作された。本装置の性能を、十分に発揮させるためには、完成後の性能試験を十分に行うとともに、日常行う保守のための試験方法を確立する必要がある。本報は、大型レーザーレーダーの試験結果と、試験法をとりまとめたものである。主な性能試験は、レーザー発振器、信号処理装置、光学系などの各コンポーネントと、総合試験とに分けて行った。これらの試験結果、所期の目的である半径50Kmまでの測定が可能であることが示された。

Abstract

A large-scale laser radar system has been constructed for the purposes of understanding the pollution phenomena over a wide area and of measuring the spatial distribution of meteorological factors in a short range. In order for this system to work efficiently, it is necessary to carry out performance tests after construction and to establish the methodology for routine testing. This paper describes the test methods which were developed for the large-scale laser radar system at NIES and some useful results. The performance tests were i) laser oscillator test, ii) signal processing system test, iii) optical system test, etc.

The performance tests showed that the large-scale laser radar can measure the aerosol distribution over an area 50 km in radius, thus meeting the theoretical expectation.

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

1. はじめに

国立公害研究所に完成したレーザーレーダー^{1),2)}は半径が50 Km 以上にもおよぶ広い領域の大気汚染現象の把握と解明を目的としている。さらに、比較的狭い領域での気象要素の立体的変化の測定を行うことも目標としている。そのため、装置全体は大型にする必要があるとともに精度の向上も要求され、結果として複雑な構成となっている。このような装置を用いて、所期の目的を達成するには、設計、製造段階での管理が十分であることはもちろんであるが、完成後の性能試験を十分に行うことと、保守のための試験法を確立しておく必要がある。

装置完成直後に性能試験を行った後、応用測定と平行して、試験法について検討を重ねてきた³⁾⁻⁷⁾。本論文は、大型レーザーレーダーの試験結果と、試験法をとりまとめたものである。

試験法について注意すべき点は、十分な精度で結果を得ることと、日常的な点検において、簡単に試験を行う方法を採用することである。ここでは、数多く考えられる試験法の中から、上記の二つの条件を満たすものを取りあげている。

本文では、まず大型レーザーレーダー装置の概要について述べる。つぎに、試験内容を、装置を構成する各要素ごとの、いわゆる単体試験と、装置全体の総合試験に分けたうえで、これらの各々について、詳しく述べる。さらにこの装置を用いた測定の例を紹介する。

2. 装置の概要

図1に大型レーザーレーダー装置のブロック図を示す。装置全体は8階建ての建てものの7階と8階を占めている。8階天井には回転ドームが設置されており、測定時にはこのドームを最大90°まで開くことができる。

装置の基本的な構成は、レーザー、受信望遠鏡、架台、信号受信用光学系、信号処理装置および、ミニコンピュータを用いたデータ処理装置、さらに、これら全体を1か所で制御するためのコントロールコンソールから成っている。

装置の主要な性能や特性を表1に示す。レーザーには、Nd YAG レーザー (1.06 μm) とその第2高調波 (532 nm) を使用している。このレーザーの出力は平均30W (1.06 μm) と10W (532nm) で繰り返し周波数25 pps、パルス幅約15nS、ビーム拡がり 0.3 mrad の性能を持っている。

望遠鏡には、主鏡の直径が 1.5 m で合成焦点距離が 8 m のカセグレン式反射望遠鏡を使用している。この望遠鏡で無限の点光源を見た場合の焦点でのスポットサイズは 1 mm 以下である。

架台の掃引方式は高度方位方式を採用している。掃引の最高速度は10°/s、最低 360°/d である。また、この精度は位置精度および掃引速度精度ともに 0.3 mrad である。この精度で架台を制御するため、本装置では、制御方式にマイクロコンピュータを用いた数値制御方式を採用している。

信号受信用光学系は、望遠鏡で受信された信号光を、分光したうえで効率よく光検出器に導く部分で、視野絞り、干渉フィルターとその選択装置、ダブルモノクロメーター、光検出器などから成っている。干渉フィルターには温度コントロールをしたもの (バンド幅 1 $\text{\AA}$ 、透過率約20%) と、コ

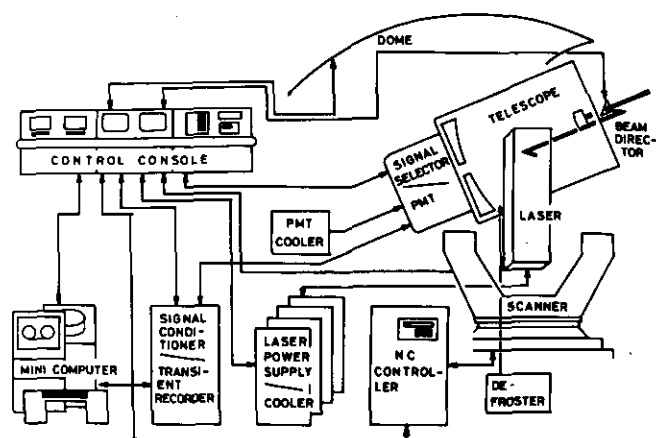


図1 大型レーザーレーダー装置のブロック図

表1 大型レーザーレーダー装置の性能の概要

LASER	
MATERIAL	Nd: YAG
WAVELENGTH	1.06 μ
MAX OUTPUT POWER	30 W
MAX ENERGY	1.2 J
REPETITION RATE	25 pps
TELESCOPE	
TYPE	CASSEGRAINIAN
EFFECTIVE DIA	1.5 m
FOCAL LENGTH	8 m
SCANNER	
SCAN TYPE	AZ-EL
SCAN RATE	600°-0.25°/min
ACCURACY	1'
SYGNAI PROCESSING SYSTEM	
METHOD	DIGITAL
MIN SAMPLE RATE	10 ns
ACCURACY	8 bits
DATA PROCESSOR	
CPU	TOSBAC 7/40
PERIPHERALS	DISK MT LP PLOTTER CR CRT TTY etc.

ントロールをしないもの（バンド幅約 $2\text{Å} \sim 20\text{Å}$ ，透過率約 20～40%）を使用している。光検出器には光子増倍管（PMT）を用いているが、 $1.06\mu\text{m}$ 測定には浜松テレビ製 7102(s-1 特性)を使用しており、 532nm 付近の測定はRCA製 8852 (Bi Alkali)を使用している。ダブルモノクロ

メーターは焦点距離25 cm, 分解能 $0.2 \text{ \AA}$, 分散 $32 \text{ \AA/mm}$ の性能を有している。

信号処理装置は, PMT からの出力を増幅したうえで, 減衰器, ローパスフィルターを通して信号を整形し, トランジェントレコーダーで高速 A/D 変換するまでの部分である。信号の増幅器には PAR 117 形広帯域増幅器を使用しており, その性能は, 増幅度10および100倍, 帯域DC ~ 50 MHz である。トランジェントレコーダーには岩崎通信機製 DM 902 を使用しているが, その特性は, 精度8 bits, 最小サンプルタイム10 ns, 記憶容量 2048 word/ch, チャンネル数2チャンネル独立, である。

また, 信号処理装置には, データのリアルタイムディスプレイ装置も含まれる。これは受信信号をアナログ的に処理し, リアルタイムで表示する装置である。

データ処理装置は, トランジェントレコーダーからのデジタル信号を収集し処理するとともに, 測定に必要なレーザーレーダー装置全体のモニターをコントロールを行うためのもので, ミニコンピュータと周辺装置とから成る。

3. 装置の単体試験

レーザーレーダー装置がシステムとして正常に動作するためには, システムを構成している構成要素それぞれが十分な性能を発揮していることを常に確認する必要がある。この確認を装置の単体試験と呼ぶことにすると, 単体試験項目には, 大きくわけて5種類ある以下, それらの1項目ごとに行った試験の方法と, その結果について述べる。

3.1 レーザー関係

レーザー関係の試験には, レーザーパワーの絶対値測定, レーザーパワーの常時測定, およびパルス波形の測定の3項目がある。

3.1.1 レーザーパワー絶対値モニター

これらのうち, レーザーパワーの絶対値の測定は, 数か月程度に一度の割りで, レーザーパワーの常時測定値を校正するのが主な目的である。

レーザーパワーの絶対値の測定のために構成したシステムの構成図を図2に示す。検出器には, Coherent Radiation 社のレーザーパワーモニターを用い, レーザービームと検出器との間には直径15 cmで, 焦点距離20 cm の集光レンズとフィルターから成るアダプターを取りつけてある。

本レーザーに用いているレーザーからの光は, 倍率10倍のコリメータでビーム径を約10 cm に拡大したのち, ビーム送光方向のアライメント機構を通過して大気中に放出される。図2において, レンズは, 直径10 cm に広がったレーザービーム径を, 検出器の受光面積である直径10 mm 以内に絞ることを目的としている。また, フィルターは, 強力なパルスレーザー光により, 検出器の受光面が損傷を受けることをさけるために用いている。このフィルターには, 透過率60%のニュートラ

ルデンシティーフィルターを4枚用いて、レーザーパワーを13%にまで減衰させている。また、レーザー光の波長は $1.06\mu\text{m}$ とその第2高調波(532nm)であるが、第2高調波のみを測定する際には $1.06\mu\text{m}$ の波長を10000分の1にまで減衰させる熱線吸収フィルターを用いている。

このパワーモニターシステムの写真を図3に示す。図3(A)が検出器、(B)がアダプター、(C)がこれを支えるスタンド、(D)がレーザービームの出力口である。

測定は、レーザービームが、検出器の受光面に垂直に入射するようにセットしたうえでレーザーを連続的に発振させ、数分間の平均値をとる。

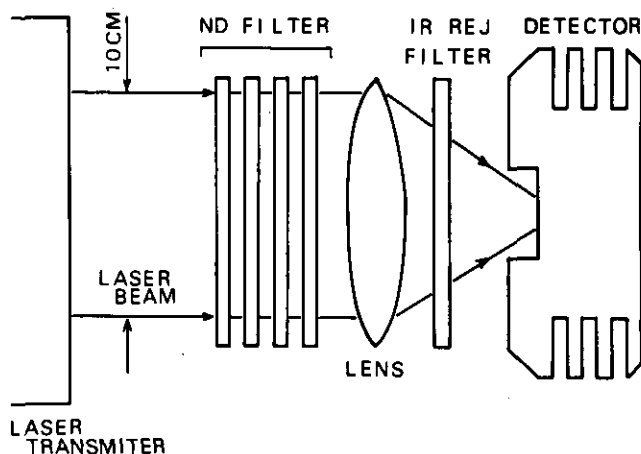


図2 レーザーパワー絶対値モニターの構成図

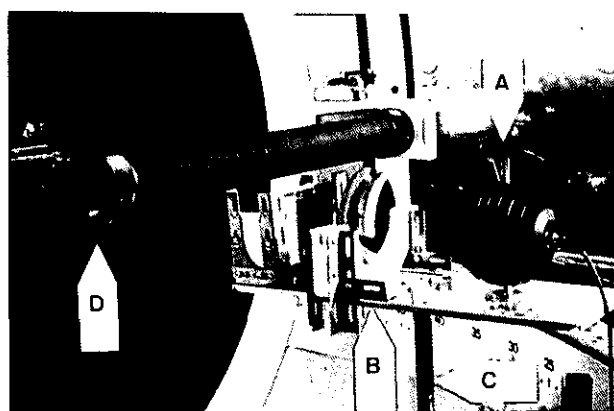


図3 レーザーパワー絶対値モニターの外観図
(A) 検出器 (B) アダプター (C) スタンド
(D) レーザービーム出射口

3.1.2 パルス波形測定

パルス波形の測定は、励起用フラッシュランプの劣化や発振器のQスイッチの動作状態を確認することなどの目的で使用する。

パルス波形の測定には、50Ωの出力インピーダンスを持つバイプラナダイオードを光検出器として使用し、波形のモニターには、トランジェントレコーダーとミニコンピュータを用いている。ここで用いているバイプラナダイオードは、3段のアンプで増幅した後のレーザー波形を観測するように設置してある。このレーザー波形は一般に次のような理由で、次のような変化をする。

- 1) オシレーターのランプの劣化により、パルス時間幅が広がるとともに、Qスイッチのトリガーから発振までの時間が遅れる。図4にこの変化の様子を示す。この図で横軸はQスイッチのトリガー時間を基準とした時間、縦軸は光信号強度である。また、パラメータは、発振器を印加する電圧を変化させて、ランプが劣化したときと同じような条件を作った場合の、印加電圧である。この図より、励起エネルギーが $2/3$ になると、パルス幅は3倍に広がり、170 ns 程の時間遅れが生じる。
- 2) 増幅段のランプの劣化により、1) で示したような変化は発生せず、信号パルスのピーク値のみが小さくなる。
- 3) Qスイッチの光学的損傷や、Qスイッチに印加する電圧が適正でない場合、あるいは発振器の光学系のアライメント不良により、Qスイッチの動作が不完全になり、ノルマル発振が発生する。この場合、測定される波形は、Qスイッチの発振の数10 μ s 以前から直前までの間に、数100 ns のスパイク状のパルス波形が見られる。
- 4) フラッシュランプのミスフラッシュにより、信号強度の急激な変化が発生する。通常レーザーパルスの出力エネルギーは27%程度変化する。フラッシュランプのミスフラッシュの場合、連続的に信号強度を測定した時、通常の変動よりも大きな変動が発生する。図5に、この変化の様子を示す。このデータは3段目のアンプのフラッシュランプに印加する電圧を抑えて、特にミスフラッシュの起こり易い条件を作った場合のものである。横軸は時間で、縦軸は信号パルス強度である。図中の丸印がデータポイントであるが、丸印に矢印を付けてあるものが、ミスフラッシュの起きたときのデータを示している。

パルス波形の測定により、レーザーの発振に関する以上のような4種類の異常が発見できるため、観測実験の前後などの日常の点検の際にこの測定法を利用している。

3.1.3 レーザーエネルギーモニター

レーザーエネルギーモニターは、通常の観測実験の際に、レーザーエネルギーのふらつきが測定結果に影響を与えることを防ぐため、レーザーレーダーの受信信号をレーザーエネルギーの値で規格化することが第1の目的である。もう一つの目的として、観測実験中、あるいは、テスト動作中における、フラッシュランプの劣化と、レーザー装置の異常をいち早く発見するということがある。

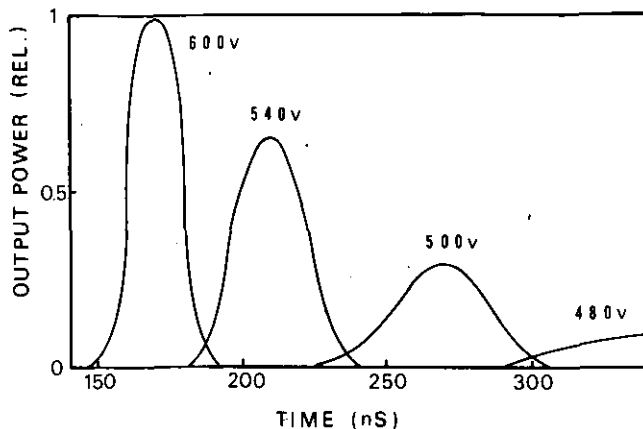


図4 Qスイッチトリガーからレーザー発振までの時間とレーザーパルス波形
電圧は、発振段の印加電圧を示す。

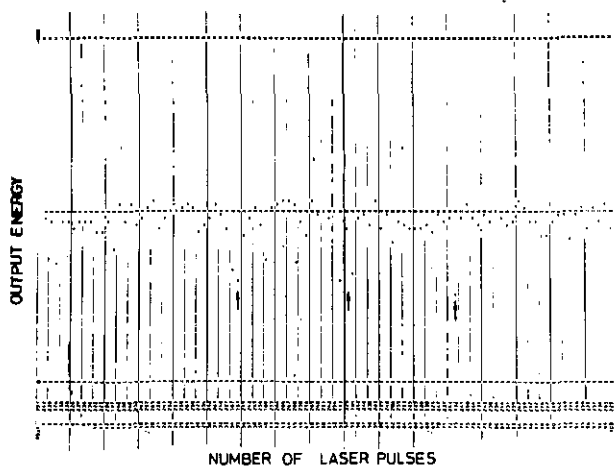


図5 レーザー出力変動の測定例

特にミスフラッシュの起こり易い条件を作った場合のものである。

レーザーエネルギーモニターは次のような方式で構成している。レーザーエネルギーモニターの目的からして、レーザー発振1発ごとのエネルギーの変動と、長時間での変動を同時に観測する必要がある。また、レーザーの出力波形は、条件により、ピークパワーのみならず、パルス幅も変動するため、レーザーエネルギーの測定には、通常のパルス光のエネルギーを測定する場合のように、パルスのピーク値を測定するのみでは正確な測定は出来ない。そこで、ここでは検出器からの電荷を積分する方式で、エネルギーを測定することとした。この方式は図6に示すようにきわめて簡単である。すなわち、バイプラナダイオードを高出力インピーダンス（この場合2M Ω ）の状態で使用し、この出力を高インピーダンスの増幅器で増幅したうえ、A-D変換器で信号をデジタル化

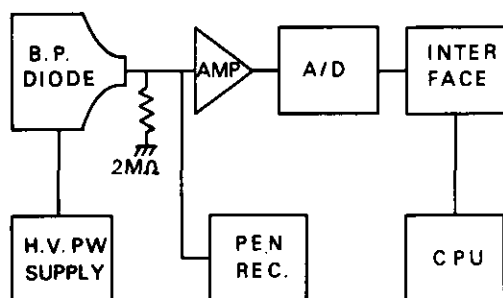


図6 レーザーエネルギーモニターの構成図

し、インターフェースを通してCPUに送り、レーザーレーダー受信信号を規格化するために使用する。一方バイプラナダイオードからの信号を同時に高インピーダンスで時間応答の遅いレコーダーで記録し、長時間にわたるレーザー出力エネルギーの変動を確認する。この方式で光検出器として、バイプラナダイオードを使用している理由は、光電子増倍管やフォトダイオードなどの光検出器と比較して、出力電圧の直線範囲が10 V 程度までと、他の検出器に比べ10倍近い出力が得られることである。このため、バイプラナダイオードの出力を直接レコーダーに記録することができる。

このようにして構成したエネルギーモニターの入力エネルギーに対する出力の直線性を図7に示す。横軸は3.1.2で述べたパルス波形モニターを使用して測定したパルス波形を時間で積分した値で、入力エネルギーに相当し、縦軸はここで述べたエネルギーモニターのレコーダー出力である。測定は、発振器のフラッシュランプに印加する電圧を変化させることにより、レーザーの出力エネルギーを変えて行ったが、図で示す通り、直線性は良好であることが確認された。

レーザーに関するテストはここに述べた、3つの方法で行っている。

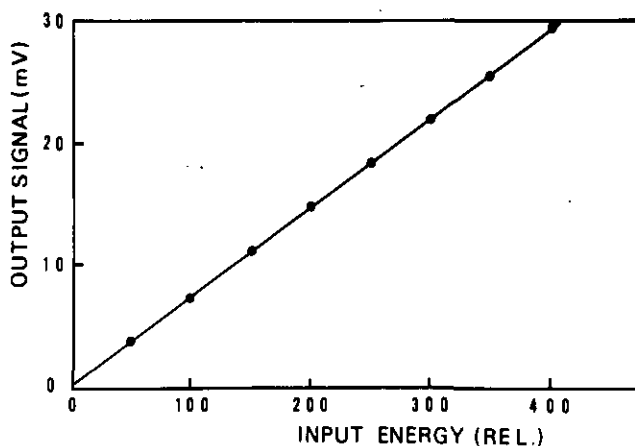


図7 レーザーエネルギーモニターの特性測定結果

3.2 光学系関係

光学系関係の試験には、光学フィルターの特性の試験と、光学系全体の劣化の試験がある。

3.2.1 光学フィルターの特性試験

本レーザーレーダー装置は、昼間でも測定を行うことと、極めて信号光の微弱なラマン散乱の測定も行うことを目的としているため、帯域が $1\text{ \AA}$ 程度の非常に狭い干渉フィルターを使用している。狭帯域の干渉フィルターは一般に、温度 10°C の変化に対して $1\text{ \AA}$ 程度の非常に狭い干渉フィルターを使用している。狭帯域の干渉フィルターは一般に、温度 10°C の変化に対して、 $1\text{ \AA}$ 程度の波長シフトが生じるため、温度変化の発生する場所での使用に際しては温度コントロールした容器にセットした状態で使用する必要がある。

狭帯域の干渉フィルターはこのような特性を持っているため、当然経年変化も起こり易く、常に良好な性能が保たれているかどうかを確認する必要がある。そのために、図8に示すようなテスト装置を構成した。図8において、光源にはISCO 社製白色標準ランプを使用している。標準ランプから放出された光は2枚の平面鏡と凸レンズを使い分光器のスリット上に集光する。分光器にはSPEX 1704型を使用している。この分光器の主な特性は、焦点距離 100 cm 、分散 $8\text{ \AA/mm}$ 、明るさ $f=9$ 、分解能 $0.08\text{ \AA}$ である。干渉フィルターは入射させる光は平行光であり、しかも、入射角が干渉フィルターに対して垂直であることが重要な条件である。そのため、分光器のスリットから出た光はレンズで平行光としたうえ、さらに絞りをを用いて平行度を良くし、フィルターを載せる試料台を通して再び絞りを通過させ、レンズでPMTに集光している。この装置で、干渉フィルターに入射させる光が平行光であるかどうかの確認は、フィルターの位置に反射鏡を置き、これに反射された光が再びレンズを通過して分光器のスリット上で焦光されるかどうかを確認すれば良い。また入射光を干渉フィルターに対して直角に入射させるための試料台には、水平方向と、垂直方向にマイクロメータヘッドの精度で回転する回転台を用いている。

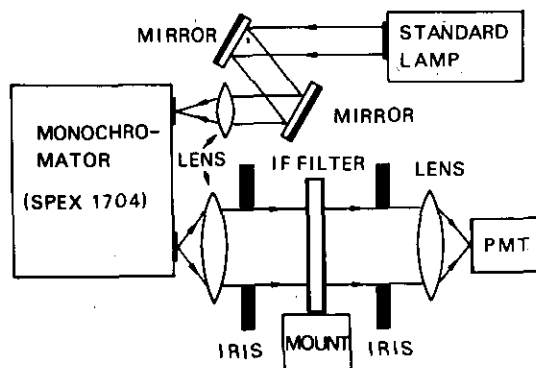


図8 狭帯域干渉フィルターテスト装置の構成図

この装置で測定した干渉フィルターの特性を図9に示す。これは N_2 分子のラマン散乱測定用でピーク波長 $6603\text{\AA}$ のフィルターであるが、透過率24%、バンド幅 $1\text{\AA}$ と測定され、所期の性能を持っていることが確認された。

この装置を用いて、数か月に1度の割合で干渉フィルターの性能試験を行っているが、現在のところ、性能劣化は認められていない。

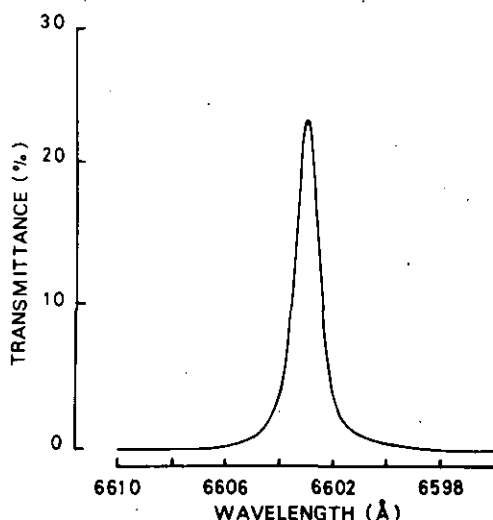


図9 狭帯域干渉フィルター測定例

3.2.2 光学系全体の特性試験

光学系は耐候性に弱く、経年変化による性能の劣化は避けられない。そのため、数か月に一度の割りで特性試験を行い、劣化の進行状況を把握しておく必要がある。

光学系の特性試験で特に重要な項目は、受信望遠鏡の主鏡および副鏡の反射率である。この主鏡および副鏡は、材質に超々ジュラルミンを使用し、これに、ニッケルを主な材料とするカニゼンメッキを施し、さらにアルミニウムをコートとしたうえで、 SiO の保護膜がかぶせてある。こうして作られている反射鏡の反射率は2通りの方法で測定する。

一つは、鏡面に指向性の鋭い $He-Ne$ レーザーを照射し、反射された光と、反射前の光との強さの比をとることにより行う。この方法では1回の測定で $He-Ne$ レーザービームのスポット径（直径 2 mm 程度）の領域しか測れず、鏡面全体の反射率を測定するには非常な労力と時間が必要である。

もう一つの方法は、遠方に置いた標準光源からの光を受信望遠鏡で集光し、その強度をレーザーレーダー信号受光用のPMTで受信するものである。この方法では、鏡面全体の反射率に関する情報が得られ、反射率の経年変化を捉えることは可能であるが、反射率の絶対値を求めることは困難である。そのため、 $He-Ne$ レーザーを使う方法で、あらかじめ反射率の絶対値を測り、経年変化

は、標準光源を用いる方法を使って測定するのが有効である。なお、標準光源を用いる方法において、標準光源にはISCO社製を使い、これを設置する位置はレーザーレーダー装置から約200m離れた建物の屋上としている。

3.3 光軸調整

レーザーレーダーにおいて、送光レーザービームの方向と受信望遠鏡の光軸の平行度は特に精密に調整する必要がある。本システムの場合、要求される精度は0.3 mradである。

本レーザーレーダーシステムは、架台に対する、レーザー発振器のマウント方式として、セミクーデ方式²⁾を採用した。このため、平行度の調整は直結型に比べて難かしくなり、特別の方法で調整する必要がある。

本装置の送光光学系は図10に示すような構成となっている。同図において、レーザーヘッドから出たレーザー光は、第1プリズムで直角に曲げられる。レーザーレーダーの架台の回転軸は、第1プリズムと第2プリズムの間に位置している。従って、架台の垂直方向の回転時には、第2プリズムは第1プリズムに対して回転する。第2プリズムを通った光は、望遠鏡の中心からレーザービームを大気中に送光するため、第3および第4プリズムを使用して、2度折り曲げられる。

この光学系において、光軸調整の最も重要なポイントは、第1プリズムを調整することにより、レーザービームを、架台の回転軸に0.3 mrad以下の精度で一致させることである。この調整に、本装置では2種類の方法を採用している。

3.3.1 オートコリメータによる方法

この方法を、図11に示す構成図に従って説明する。まず、第2プリズムを取りはずし、回転軸に垂直になるように平面反射鏡を取り付ける。この反射鏡が、回転軸に垂直かどうかの確認は、同図に示すように構成した補助プリズムとペンタプリズムを介したオートコリメータで行う。すなわち、反射鏡で反射されたオートコリメータからの光が、このオートコリメータの接眼レンズの中心に正確に像を結ぶことを確認する。もし、架台を回転させても、像の位置が変わらなければ、反射鏡は正確に取り付けられているということが確認されることになる。なお、ここで使用しているオートコリメータの角度精度は1秒であり、この目的に使用するには十分な精度を持っている。

こうして、反射鏡を取り付けた後、レーザーを発射し、レーザー光の光軸が反射鏡に垂直に入射するように第1プリズムの角度を調整する。この場合、反射鏡で反射されたレーザー光が補助プリズムとペンタプリズムを通して、オートコリメータの接眼レンズの中心に像を結べば、調整は正確に行われたことになる。

この方法は、光軸調整の精度が高く、また、レーザービームの方向が、調整したい方向と著しくズレている場合でも調整可能であるという利点を持っているが、調整に大がかりな装置と、長い時間を要するため、レーザーの光軸が大きくずれるような故障のあった時以外は使用していない。

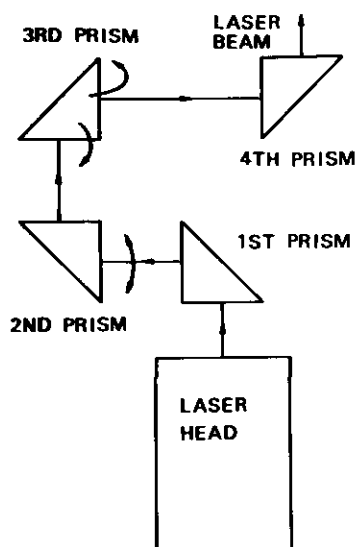


図10 本装置の送光光学系の構成図

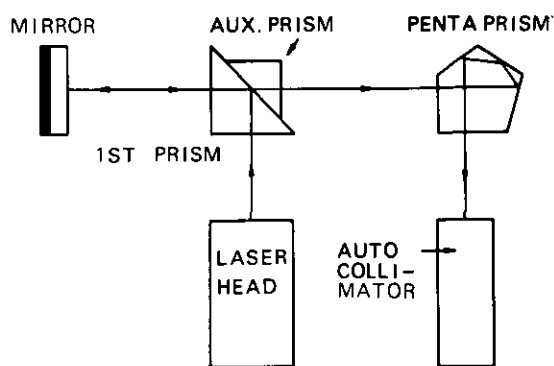


図11 オートコリメータによる送光光学系の光軸調整の構成図

3.3.2 ITV を用いた光軸調整装置による方法

光軸の調整を容易にしかも精度良く行うために、本装置にはITV装置を用いた光軸調整装置を考案し、取り付けてある。この装置は図12に示すように、受信望遠鏡の焦点面に焦点を合わせたITVカメラと、このITVカメラに望遠鏡の焦点の像を導く移動可能な反射鏡とから成っている。これにより、望遠鏡の絞りに対する目標物の大きさや形状の関係がブラウン管を通して見ることができる。

この装置を用いれば、送光レーザービームが、大気中の散乱体で散乱されてできる像、すなわち、レーザービームのパターンと、その送光方向を捉えることができる。もし、レーザービームの送光方向と、望遠鏡の光軸が平行であれば、ブラウン管で観察されるレーザービームのパターンは、焦点の絞りの中心に来る。図13にこの装置で捉えたレーザービームのパターンを示す。この図でIRISと示したのは、絞りの大きさで、この場合、 0.6 mrad にとつてある。このIRISの中心部に明かるく見えるのがレーザービームのパターンである。このパターンの大きさからレーザービーム拡がり角がわかるが、絞りの大きさの半分程度であるので、拡がり角は 0.3 mrad 程度と見積られる。

この装置を用いて、望遠鏡の架台の方向のいかにかわらず、常にレーザービームのパターンが絞りの中心に来るように、図11の第1プリズムを調節すれば、光軸調整が行える。

この方法は、オートコリメーターを用いる方法に比べ著るしく簡単のため、日常の光軸の調整に使用している。

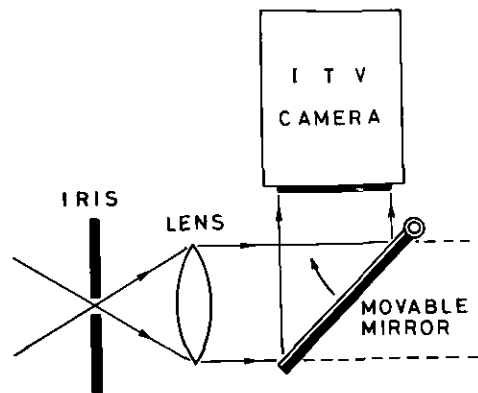


図12 ITV装置を用いた光軸調整装置の構成図

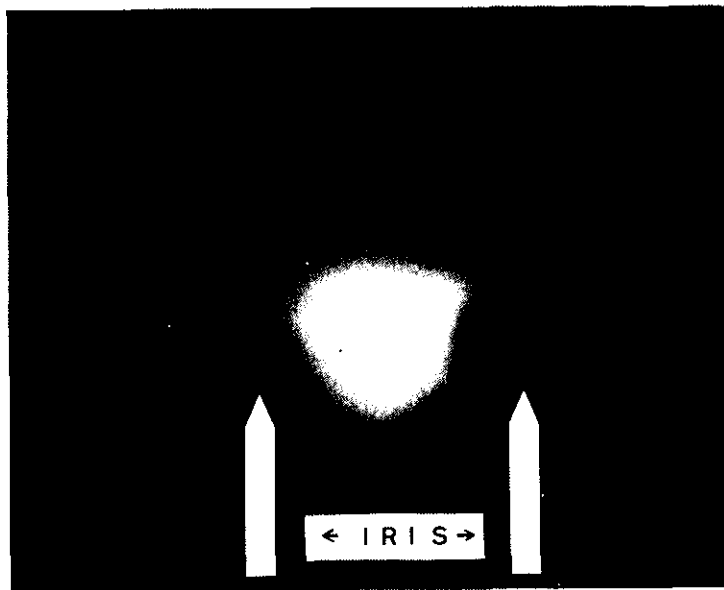


図13 ITV装置を用いた光軸調整装置により、レーザービームパターンの測定を行った例

3.4 架台関係

レーザーレーダーの望遠鏡を掃引する架台の性能は、位置決め精度と、掃引速度の正確さで決まる。

3.4.1 位置決め精度試験

位置決め精度は北極星の位置を望遠鏡で確認することにより行う。すなわち、北極星の位置は時

間と季節により時々刻々変化する。この時間に対する位置は理科年表などの資料より求めることが出来る。こうして求めた北極星の位置と、レーザーレーダーの望遠鏡で北極星をとらえた時の、架台の角度との差が位置決めの精度となる。

望遠鏡で北極星を確認するには、3.3.2で述べた光軸調整用のITVカメラシステムを使い、望遠鏡の絞りの中心に北極星の像が写し出されるように架台を調整する。こうして確認された北極星の像を図14に示す。この図では、北極星の像は、 0.1 mrad の見込み角に相当する大きさとなっているが、この大きさは、望遠鏡の鏡面精度に依存するものである。

位置決め精度試験も数か月に1度の割りでを行っているが、常に 0.05 mrad 以内の精度に納まっている。

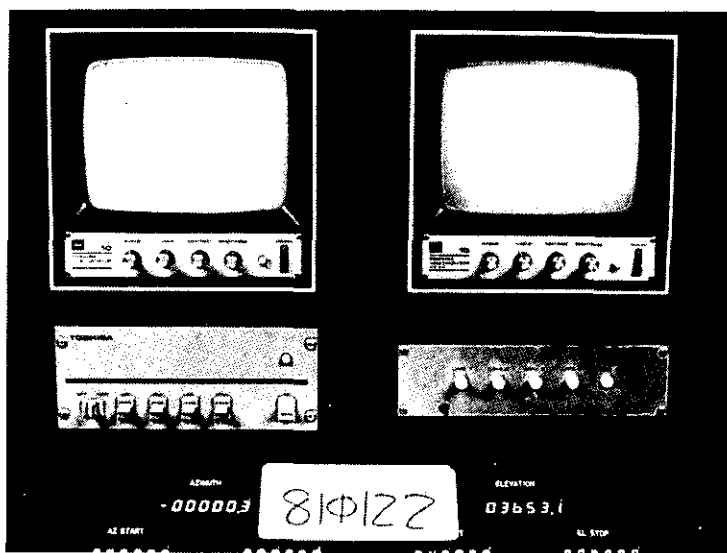


図14 北極星による位置決め精度の測定中を示している
右側のテレビに北極星の像が写し出されている

3.4.2 掃引速度試験

本装置の架台の速度コントロール用モニターの制御機構は、架台の角度読み取り表示機構のデータを読み取り、これでフィードバックをかけながら動作させるのではなく、制御機構自体も、独立に角度読み取り機構を持っていて、これで得られた角度情報でフィードバックをかける構成となっている。

掃引速度試験はこの機構を利用して、コンピュータからの指令により、種々の速度で架台を回転させ、速度に対する望遠鏡の角度を、角度読み取り・表示機構で読み取りコンピュータに記憶する。そして、コンピュータから与えた指令と、記憶された角度情報がどの程度一致するかを比較する。

この試験では、架台の掃引速度を最大速度である $10^\circ/\text{s}$ 、および $1^\circ/\text{s}$ 、 $0.1^\circ/\text{s}$ に設定して測定を行っているが、これまで行った試験では、角度の偏差は 0.1 mrad 以内に納まっている。

3.5 信号処理関係

信号処理装置の試験では信号処理装置自体の性能に関する試験と、処理装置に外部から混入する雑音の二つに関して検討する必要がある。

3.5.1 信号処理装置の性能試験

信号処理装置は、PMTからの電気信号をコンピュータでデータ処理することができる形態に変換するための部分で、前置増幅器、減衰器、ローパスフィルタおよびトランジェントレコーダーから成っている。

信号処理装置に要求される性能試験の項目は、すべての部分に必要なものとして、入力信号に対する出力の直線性、帯域、装置自体が発生する雑音の特性である。また、増幅器のみに必要なものとして増幅度があり、トランジェントレコーダーに必要なものとして、増幅度、トリガー特性がある。

以上の性能試験のうち、まず、トランジェントレコーダーの特性試験の結果について述べる。

直線性と増幅度の試験は図15に示すように、標準電源と、この電源の電圧測定用の精度9桁のデジボルおよび被測定用のトランジェントレコーダーさらに、トランジェントレコーダーの出力を記録し、統計処理を行うためのミニコンピュータの構成で行った。試験は、標準電源電圧をわずかながら変化させたときのトランジェントレコーダーの出力を測定し、この結果と、同時にモニターをしたデジボルの電圧とを比較することにより行った。測定は、一つの電圧につき、1000回繰返し、その平均値をとることにより、トランジェントレコーダーのA-D変換器の1LSB以下の変化も捕えている⁹⁾。

試験結果を図16に示す。同図は横軸に入力電圧、縦軸に、入力電圧と出力の差をLSB単位でとっている。この結果より、入力電圧がトランジェントレコーダーのフルスケールの60%程度までは、直線性が0.1LSB以下に納まっているが、それを超えると、次第に偏差が大きくなっていることが確認された。これより、このトランジェントレコーダーは入力信号の大きさを制限して、フルスケールの70%以下で使用すれば、高精度での測定が保証されることになる。

トランジェントレコーダーのその他の特性として、装置自体が出す雑音の大きさは、入力感度が最大の時、0.1LSB以下、帯域約40MHz、増幅度の偏差5%程度、トリガー特性は、トリガーの入力に対して、信号を記録する時間のジッターは10ns以下という結果で、いずれもレーザーレーダー信号の測定には支障がないという結果が得られている。

つぎに、前置増幅器の試験について述べる。前置増幅器はPrinceton Applied Research社製MODEL 115を使用している。この増幅器を試験した結果、直線性に関しては、出力電圧 $\pm 0.6\text{mV}$

まで0.02mV以下の偏差に納まっていること、周波数帯域は約52MHzであること、入力等価雑音は0.01mV程度であり、増幅度は、増幅度10倍のレンジにおいて10.1倍程度であることが確認された。

減衰器、ローパスフィルタについては、レーザーレーダー信号の測定に悪影響を与える特性は特になかった。

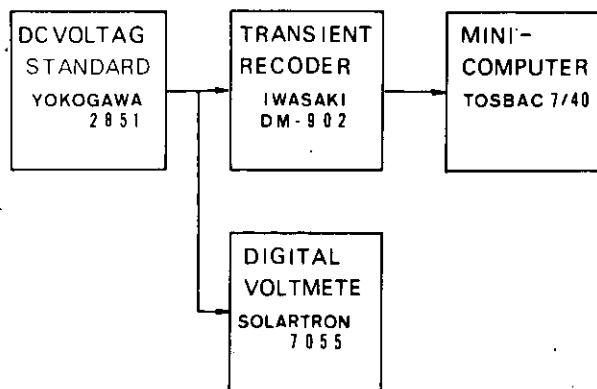


図15 トランジェントレコーダーの直線性試験の構成図

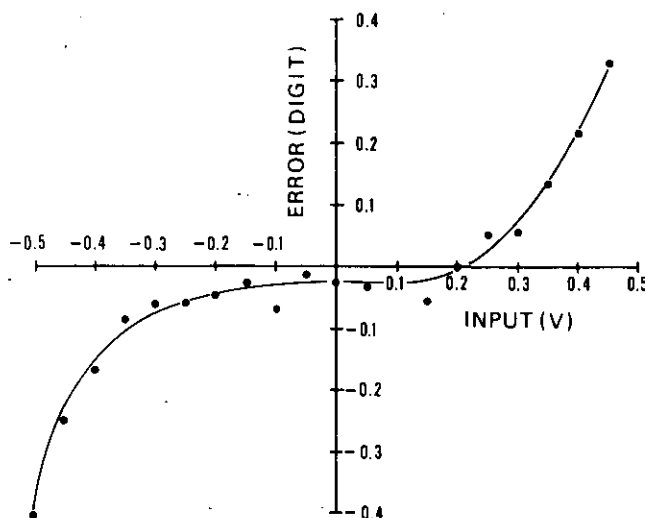


図16 トランジェントレコーダーの直線性試験の結果

3.5.2 外部から混入する雑音

レーザーレーダー信号に与える雑音のうち、信号処理装置以外で発生するものは、レーザーの発振に伴うもの、架台の掃引時、掃引用のモーターより発生するもの、商用の50Hzで発生するもの

および、レーザーレーダーコントロール装置の電源などで発生するものがある。

一般に雑音の種類には統計的なものと、システムティックなものがあり、測定値に混入する雑音（2乗誤差）は次式で表される。

$$\delta_T^2 = \delta_R^2/M + \delta_S^2 \quad (1)$$

ここで δ_T は全誤差、 δ_R は統計的誤差、 δ_S はシステムティックな誤差、 M は測定回数である。式(1)より δ_R の影響は M を増やすことによりいくらでも小さくできるが、 δ_S の影響は測定回数には依存しない。 δ_S の影響を取り除くには、ハードウェア的に δ_S の混入を防ぐか、あるいは δ_S の形状が常に一定であれば、測定値から δ_S の大きさを差し引くことの二つの方法がある。

この節の冒頭で述べた雑音源のうち、レーザーの発振に伴うものは δ_S に属する種類の雑音が発生し、他の雑音源は主に δ_R に寄与する。

本装置における雑音対策は、 δ_R および δ_S のいずれの雑音源についてもハードウェア的に極力抑え、抑え切れなかった分について、 δ_R に対しては測定回数を増やす方法で、また δ_S に対しては、測定値から差し引く方法で影響を少なくすることを試みた。

この装置で発生する雑音の形態を図17に示す。同図はレーザーレーダーを動作状態とし、PMTに信号が入る直前のシャッターをおろした状態で測定したもので、横軸は時間、縦軸は雑音電圧の強さである。図17(a)は測定を1回のみ行ったものであり時間軸のフルスケールは1msである。図17(b)、(c)はそれぞれ測定を5000回繰返し、 δ_R の影響をとり去り、 δ_S の影響のみを明瞭に表したものであり図17は時間軸のフルスケール200 μ s、(c)は1msである。

図17(a)で示された雑音のほとんどは δ_R に基づくものである。図17(c)においてAの記号を付けた雑音はQスイッチのスイッチングに伴うものでありBはフラッシュランプの点灯に伴うものでありCは、フラッシュランプに印加するための電圧を制御するためのサイリスタチョッパの開閉に伴うものである。

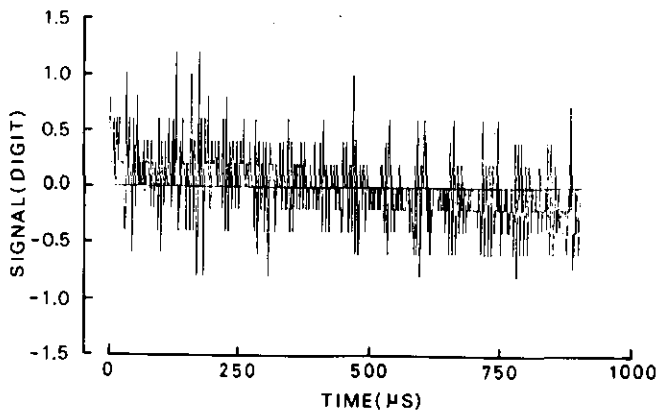


図17(a) 本装置で発生する雑音の測定例
測定回数1回 時間フルスケール1ms

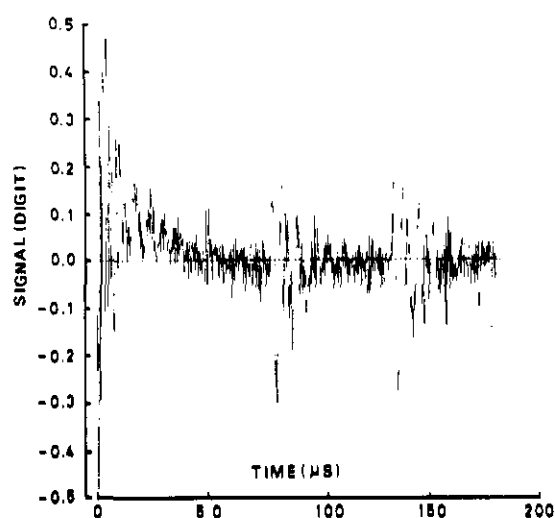


図17(b) 本装置で発生する雑音の測定例
測定回数 5000 回 時間フルスケール 200 μ s

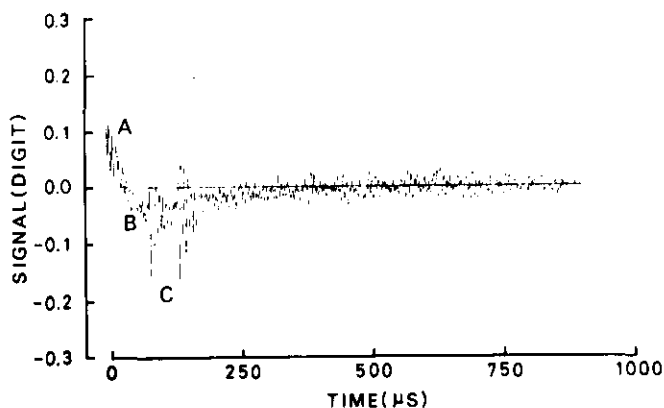


図17(c) 本装置で発生する雑音の測定例
測定回数 5000 回, 時間フルスケール 1ms

ハードウェア的に雑音に対する対策を行うには、発生源および受信源に対して、シールドを施すこと、距離を離すこと、アースラインを一致させないこと。アースがループを組まないこと、ケーブル類をツイストペアーとすること、ケーブル類にノイズを切るためのコア類を入れることなどを行えば良い。図17は、一応これらの対策を行った後のデータであるが、レーザーレーダー信号を受信するにはまだ不十分であったため、さらに上記の対策を強化した結果、雑音量を約1桁小さくすることが出来た。現在は、この程度の雑音量で測定を行っているが支障はない。

以上述べてきたように、5種類の項目について試験とその方法の確立を行い、レーザーレーダー装置を常に良好な状態に保ちながら測定を行っている。

4. 装置の総合試験

レーザーレーダーの性能を総合的に試験する方法と、その結果について話を移す。

レーザーレーダー装置全体が正常に動作しているかどうかを確認する最も初歩的方法は、レーザーレーダーエコーの波形をブラウン管その他の方法で観察することである。レーザーレーダーエコーはよく知られている通り、時間の原点ではエコー強度がゼロで時間の経過とともに急激に立ち上がり、最大値をとった後は比較的ゆるやかに減少するという形をとる。そして、この減少カーブは、時間すなわちレーザーレーダーでは距離の2乗に逆比例し、大気中での光の減衰により、さらに大きく減少する傾向を示す。もし、レーザーレーダーエコーが、ほぼこのような形をしていれば、正常に動作をしているかどうかの第1段階の確認はとれたことになる。

次の段階では、掃引を行いながら、レーザーレーダーエコーを観察し、図じような波形が見られることを確認する。

予備的試験の結果得られたエコーの波形の一例を図18に示す。同図において、横軸は75 Kmまでの距離をとってある。この図で、約25Kmまでは値が一定で、それより遠い距離で減衰する信号となっている。このような近距離で一定になっている理由は、測定に用いたトランジェントレコーダーのダイナミックレンジが8 bitしかないため、遠方での信号強度を明像に見ようとすると、近距離では飽和してしまうためである。

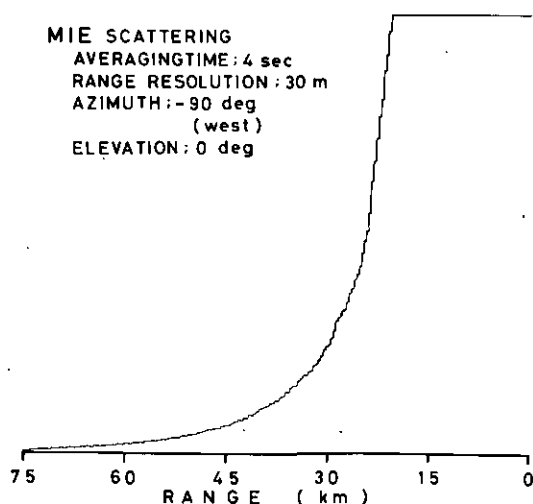


図18 予備的試験の結果得られたエコーの波形例

レーザーレーダー全体が理論通り動作しているかどうかを確認するには、レーザーレーダー方程式⁹⁾と S/N 式⁹⁾から求められる理論的な測定感度と、実際の測定から得られる測定誤差を比較し、一致するかどうかを確かめる方法が良くとられる。

レーザーレーダー方程式と S/N 式はそれぞれ(2)式および(3)式で与えられる。

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

$$S/N = \frac{n(R)}{\sqrt{\mu \{n(R) + 2n_b\}}} \quad (3)$$

ここで $n(R)$ は PMT で検出された信号量、 n_0 はレーザーパルス 1 発当りの光子数、 P は測定に要するレーザーパルス数、 L は距離分解能、 K は光学系の効率、 β は体積後方散乱係数、 T は光の透過率、 A_r は受信望遠鏡の有効面積、 Y_r は視野の重なり、 η は検出器の量子効率、 R は測定地点までの距離である。また、 n_b は PMT で検出される背景光の強度であり、次式で表される。

$$n_b = \frac{N_\lambda \Omega f K A_r L P \eta}{h \nu c} \quad (4)$$

ここで N_λ は空の明るさ、 Ω は受信立体角、 f はフィルターのバンド幅、 h はプランクの定数、 ν は光の振動数、 c は光速である。これらの式に装置の定数と、測定条件を代入すると、理論的な S/N が求められる。

レーザーレーダーで測定される信号の誤差は、理論的な S/N から求められる信号検出上の誤差と、レーザー発振の出力変動によるものおよび、信号処理装置に混入する雑音の 3 つで決まり、次式で表される。

$$\delta_m^2 = 1/(S/N)^2 + \delta_L^2/P + \delta_p^2 \quad (5)$$

ここで δ_m は測定誤差、 δ_L はレーザーの出力変動、 δ_p は信号処理装置に混入する雑音量である。本レーザーレーダーの場合、 δ_L は 27% であり δ_p は無視出来る大きさである。

図 19 に、信号の測定誤差の測定値の 1 例を示す。横軸は距離、縦軸は誤差の測定値の逆数である。この測定の条件は、波長が第 2 高調波、時間は夜間、視程 120 Km、距離分解能 60m、1 回の測定におけるレーザーのパルス数を 100 発としている。測定は 40 回繰返し、その平均値に対する標準偏差の値を誤差として、測定距離ごとに求めている。また同図には、式(5)より求められる理論的な誤差の値を破線で示してある。

図 19 より、理論曲線と実験値は良い一致を示しており、装置全体がほぼ理論通り動作していることが確かめられた。

5. 測定例

本装置を用いて行った測定の例を示す。

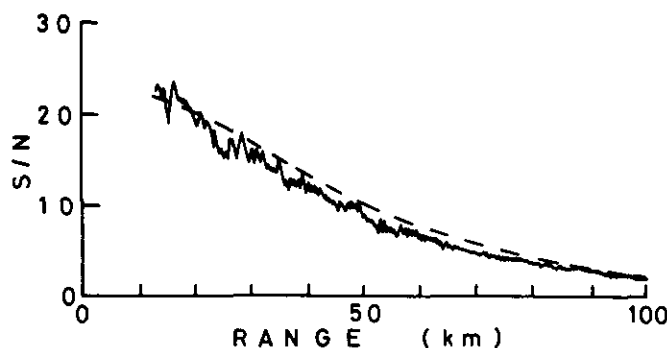


図19 信号の測定誤差の測定例
実線は、測定値、破線は、理論値を示す。

まず、この装置は半径50 Km程度の領域のエアロゾル分布を測定することが大きな目的の1つだった。この目的に沿って測定した例が図20である。図20は図18で示したエコー波形を、架台を水平に掃引しながら測定し、得られたデータをもとに、信号の強い場所を濃くあらわす、いわゆる重ね打ちの方法¹⁰⁾で表現したものである。データ処理は図21に示す方法で行った。その細かい内容は次の通りであった。

- 1) レーザーレーダー信号には、背景光による直流成分が重畳されるのでこれを除去する。
- 2) 距離に関する補正を行う。すなわち、レーザーレーダー信号は距離の2乗に反比例して減衰する。また、広い領域を測定するためのレーザーレーダーではレーザー光が大気を伝播する間に生ずる減衰も大きく、これらを補正し、正確な信号強度とする必要がある。これらの減衰の要因のうち、距離の2乗に反比例する部分は信号強度に距離の2乗をかければ良く簡単であるが、光の減衰にもとづくものは、現在のところ、決め手となる補正法がない。ここでは、第一近似として、エアロゾル濃度が空間的に一様であると仮定して、レーザーレーダーエコーの空間的变化は光の減衰によって生じるものと考え、近傍と遠方からのエコー強度の違いから、平均的な減衰係数を求める。こうして得られた減衰係数を用いて、補正を行う。
- 3) 精度を向上させるため、平均化やスムージングを行う。
- 4) 座標変換を行い、極座標からデータとして扱い易い直交座標に変換する。
- 5) 重ね打ちのための数値に変換し、ラインプリンターに表示する。

図20の測定データの距離分解能は250m、掃引速度は $0.2^\circ/\text{s}$ 、視程は約75 Km、波長は532 nmを使用している。

このようなデータをもとに、広域での移流や拡散現象の把握等の測定が可能である。

図20はエアロゾル濃度の違いが、見た目には必ずしも明瞭でなかったので比較的狭い領域で、変化が明らかな例を図22に示す。図22は図20と同様に、水平方向を測定し、同様な方法でデータ処理と

表示を行ったものである。距離分解能は50m, 掃引速度 $0.2^\circ/\text{s}$, 波長は532 nmの条件で測定した。同図において, 最も黒く太い線状の領域は, 工場の煙突からの排煙であり, 比較的細く黒い線状の領域は道路などに対応する。

この例のように, 大型のレーザーレーダーではエアロゾルの空間分布を広い領域にかつて測定することができる。

つぎに, ラマン散乱の測定例を示す。図23は, 大気中の N_2 分子のラマン散乱と, 同時に測定したエアロゾルによるミー散乱のエコーパターンである。横軸は距離で, 縦軸はデータ処理を加えない受信信号波形である。ラマン散乱の測定は20秒間で500発のレーザーパルスに対する波形を積算し, 距離分解能は15mである。

図23の二つのエコーを比較すると次のようなことが言える。

- 1) 信号の形状が, ミー散乱エコーに比べ, ラマン散乱エコーは細かい変化が大きい。これは S/N の違いによるものと考えられる。
- 2) ミー散乱エコーは, 急激に信号が小さくなったり, あるいは大きくなったりの変化が多いが, ラマン散乱エコーは, S/N の悪さを除いて考えれば, なめらかに減衰している。これは, ミー散乱信号強度に影響を与える要素が, ミー散乱の大きさと, 光の減衰の大きさの二つであるが, ラマン散乱では, 減衰の大きさのみであることによる。

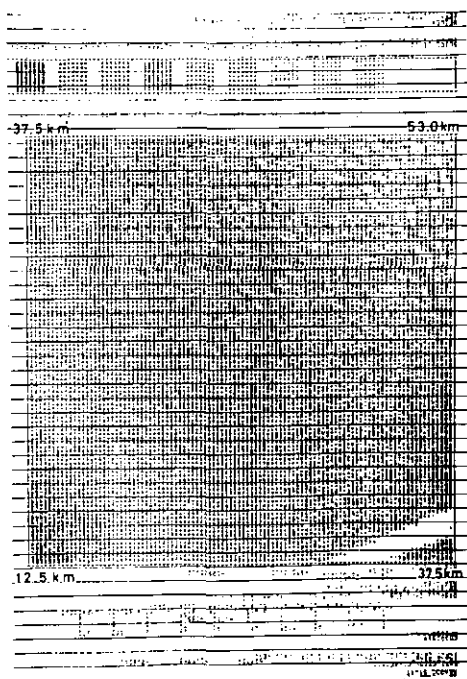


図20 半径50 Km 程度の領域の
エアロゾル分布の測定例

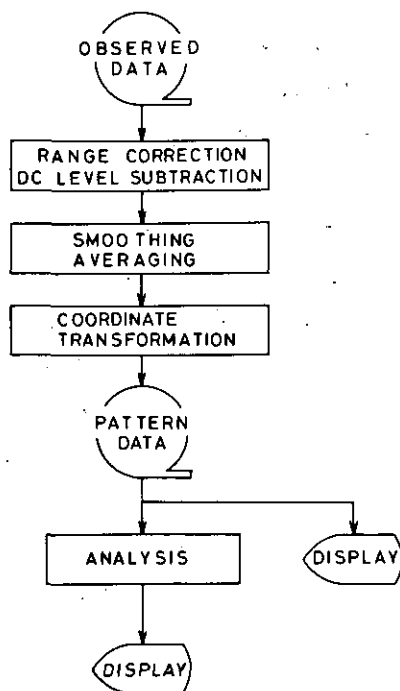


図21 データ処理の系統図

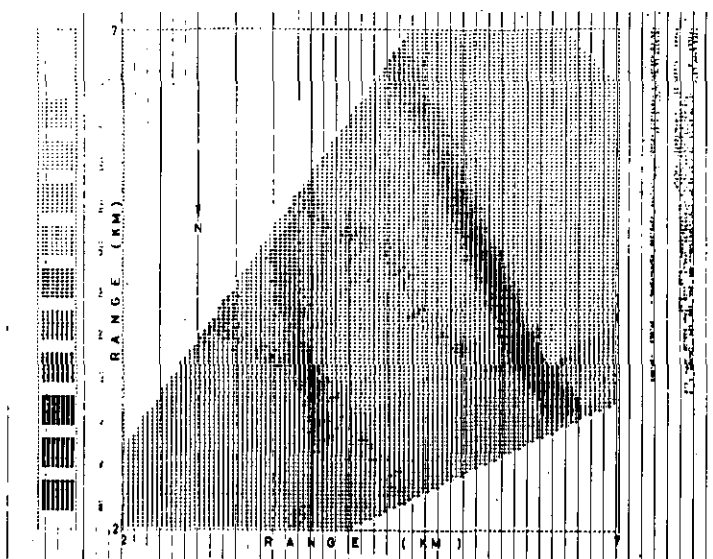


図22 狭い領域のエアロゾル分布の測定例

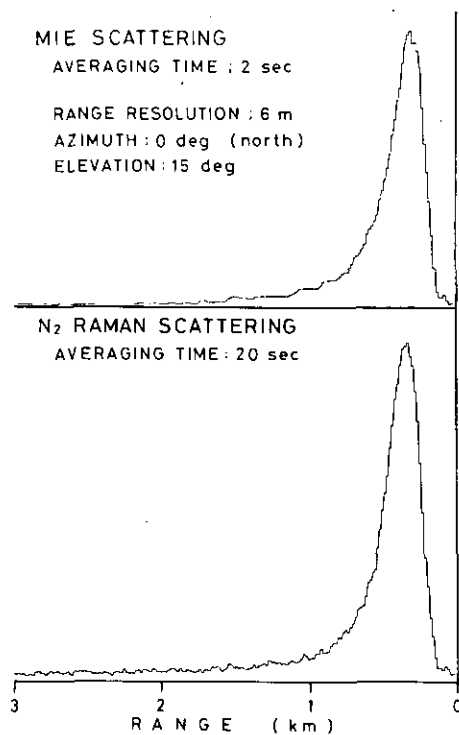


図23 ラマン散乱の測定例
上) ミー散乱のエコーパターン
下) ラマン散乱のエコーパターン

以上の三つのデータ例は、本装置を用いた応用の基礎となるものであり、これらを基本として、応用研究が行われている。

6. まとめ

本文では、主に、大型レーザーレーダーの性能試験と、その方法について述べてきた。現在まで、本装置のように大型のレーザーレーダーは存在しなかったため、その試験法も新たに開発したことが多い。なかでも、光軸調整のためのITVモニターシステムは、この装置に初めて取り付けられ、真価が発揮されたものである。

本文で述べたような試験法が確立されれば、装置の不調をいち早く発見できるとともに、装置を良好な状態で使える確率が大きくなる。

今後、ここで述べたような試験法を、本装置に対して定期的に適用して行く予定である。

引用文献

- 1) 清水浩・竹内延夫・松井一郎・笹野泰弘・杉本伸夫・奥田典夫 (1980): 広域大気汚染計測用多用途レーザーレーダーの開発, 電子通信学会技術研究報告, OQE 79-141, 73-78.
- 2) 清水浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫 (1981): 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作, 応用物理学会誌, 50, 1154-1164.
- 3) 松井一郎・清水浩・杉本伸夫・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1981): 大型レーザーレーダーの性能評価法, 第7回レーザーレーダー(ライダー)シンポジウム予稿集, 浜松, 87-88.
- 4) 清水浩・松井一郎・杉本伸夫・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1981): 大型レーザーレーダーの測定感度に関する考察, 第7回レーザーレーダー(ライダー)シンポジウム予稿集, 浜松, 89-90.
- 5) 清水浩・松井一郎・笹野泰弘・杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫 (1981): レーザーレーダーデータの高感度, 高精度収集法, 第21回大気汚染学会講演要旨集, 浦和, 511.
- 6) 松井一郎・清水浩・笹野泰弘・杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫 (1980): レーザーレーダーシステムの性能評価法, 第21回大気汚染学会講演要旨集, 浦和, 513.
- 7) 松井一郎・清水浩・杉本伸夫・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1981): 広域汚染測定用大型レーザーレーダーの性能評価, 昭和56年度春季応用物理学会予稿集, 東京, 1p-G-4.
- 8) 清水浩・飯倉善和・笹野泰弘・竹内延夫 (1982): A-D変換器の分解能改善法の実験的検証, 電子通信学会誌, J64-A, 963-969.
- 9) Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okada (1980): A mobile computerized laser rader system for observing rapidly varying meteorological phenomem. Opt. Quant. Electr., 12, 159-167.

Ⅲ-3

国立公害研究所大型レーザーレーダー 測定用
ソフトウェアプログラムの開発

杉本伸夫¹・笹野泰弘¹・清水 浩¹・松井一郎²
竹内延夫¹・奥田典夫¹

Software Programs for the Large Atmospheric
Multi-purpose (LAMP) Lidar

Nobuo SUGIMOTO¹, Yasuhiro SASANO¹, Hiroshi SHIMIZU¹,
Ichiro MATSUI², Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

国立公害研究所大型レーザーレーダー (LAMP Lidar) は大気汚染および大気汚染に関連する気象要素の観測を目的に製作された。大型レーザーレーダー装置はコンピュータ化されており、測定動作の制御およびレーザーレーダーデータの高速の収集・処理を行うことができる。これまでに、(1) THI, (マルチ) RHI, (マルチ) PPI を行う標準的な測定プログラム, (2) 大気の減衰係数を測定するプログラム, (3) リアルタイムのデータ処理を含む混合層観測用 RHI プログラムの開発を行い、日常の観測に使用している。

Abstract

The 'LAMP' lidar (Large Atmospheric Multi-purpose Lidar) was constructed for the observation of air pollution phenomena and their relating meteorological phenomena. The lidar system is capable of computer-controlled operation and high-speed processing of lidar data. (1) The standard software programs for THI, (multi-) RHI, (multi-) PPI measurements, (2) a program for the measurement of extinction coefficient, and (3) a program for RHI measurement in observing the mixed layer which enables real-time data processing of the display, have been developed.

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

1. はじめに

国立公害研究大型レーザーレーダー (Large Atmospheric Multi-Purpose Lidar; LAMP Lidar) は大気汚染 分布の観測, 汚染物質の移流拡散の観測をはじめ, 大気構造の観測など, 多目的の研究用に開発された。(本報告書Ⅲ-1)

大型レーザーレーダーは, 測定制御およびデータ処理用にミニコンピュータシステムを用いている。このシステムにおける測定用ソフトウェアプログラムは各種の観測目的にかなう機能を持たねばならず, その開発においては次の点で配慮がなされた。

- 1) 高速でデータ集収が可能なこと。
- 2) 測定対象に応じた測定動作が行えること。
- 3) すべての測定を容易な操作で行えること。
- 4) 測定に応じて, リアルタイムのデータ処理および表示を行うこと。

本報では, 大型レーザーレーダー測定のためにこれまでに開発され, 観測に用いられているソフトウェアプログラムについて報告する。なお, 多目的, 多機能という点では, すでに報告を行った車載型レーザーレーダー¹⁻³⁾に共通する点も多い。大型レーザーレーダーでは, コンピュータ化がさらに徹底されており, 制御項目が多く, またデータ収集速度も約4倍に高速化されている。このため大型レーザーレーダー測定プログラムは, 以下に述べるようにプロセス制御用のオペレーティングシステムを用いて, 効率良く制御を行うように設計されている。

2. ハードウェア構成

大型レーザーレーダー装置についての詳細は本報告書Ⅲ-1で述べられているので, ここでは省略し, ミニコンによる制御系統についてのみ述べる。図1に大型レーザーレーダーミニコンシステムのハードウェア構成を示す。CPUはTOSBAC 7/40, 主メモリ容量は, 256 K bytesである。ミニコンにより制御されるレーザーレーダー装置は, レーザー発振器, 架台, 光学系, 望遠鏡副鏡, 信号処理系, 表示系およびトランジェントレコーダーである。また, ミニコンは図1に示す入出力機器を有しており, さらに国立公害研究所電子計算機システム (HITAC M-180) との間のデータ通信システムを備えている。

レーザーレーダー各部に対するミニコンによる制御項目は表1に示すとうりである。

3. ソフトウェア構成

オペレーティングシステム (OS) はTOSBAC, POPS II (Process Operating System) を用いている。POPS II はプロセス制御用に開発されたOSで, 主メモリーのセグメント分割や, 空き時間を利用して優先度に応じて他のプログラムに制御を移す機能などに特徴を持っている。ファンクションプログラムには, POPS II 下で実時間で管理されるリアルタイムプログラムと, POPS II のサブシステムであるFTS (Free Time System) 下で, 空き時間を利用して管理されるフリータ

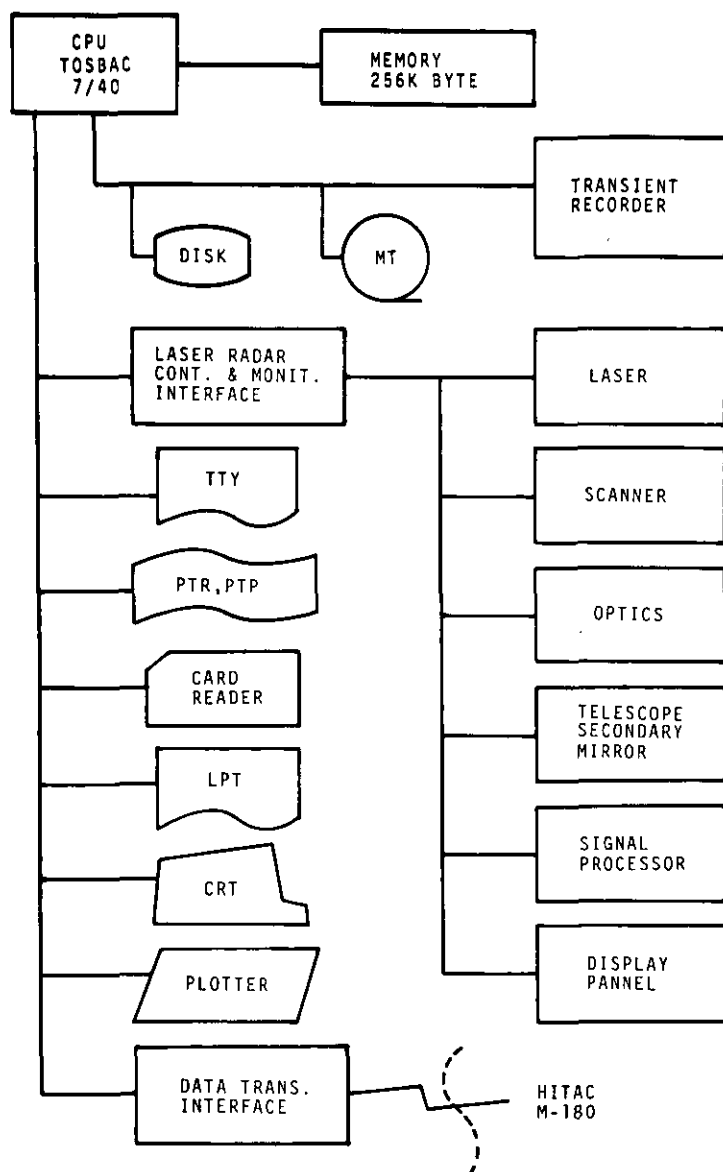


図1 大型レーザーレーダー制御用ミニコンシステムのハードウェア構成

表1 ミニコンによる制御項目と制御の内容

制 御 項 目	制 御 の 内 容	
レ ー ザ ー	1. レーザーの制御	フラッシュ ON OFF
		共振器シャッター OPEN CLOSE
	2. ステータス チェック	電源, 動作中, 異常等のチェック
	3. 出力モニター	レーザー出力 (GREEN および IR) のモニター
架 台	1. 架台角度の読み込み	ELEVATION, AZIMUTH 角度の読み込み (精度, 3 秒)
	2. 架台制御	EL 方向 UP, DOWN
		AZ 方向 UW, CCW
		速度 0.4deg/min ~ 160 deg/min まで 23 段階
	3. ステータス チェック	電源, 動作中, 異常等のチェック
光 学 系	1. フィルタ等の状態の読み込み	シャッター, IRIS, フィルタ1~3, PMT
	2. フィルタ等の設定	シャッター, IRIS, フィルタ1~3, PMT
	3. ステータス チェック	動作中, 異常等のチェック
副 鏡	1. 副鏡位置の読み込み	
	2. 副鏡位置のコントロール	FAR, NEAR, STOP
	3. ステータス チェック	
信 号 処 理 系	1. 設定状態の読み込み	電気フィルター (主, 副) アテニュエーター (主, 副)
	2. フィルタ等の設定	電気フィルター (主, 副) アテニュエーター (主, 副)
表 示 系	1. パネル面ランプの点灯, 消灯	ONLINE, BUSY, ALARM
トランジェント レコーダー 〔岩通 DM 901〕	1. 制御	パラメータの設定 トリガデータ DELAY クロックレイト WRITE, READ モード FULL, SCALE レベル 等
		オペレーション ストップ
		トリガレディ
	2. データ転送	データの主メモリーへのDM 転送
	3. ステータス チェック	

イムプログラムがある。FTS下にはFORTRANコンパイラ、アセンブラ等が用意されており、ユーザーファンクションプログラムの作成、登録を行うことができる。

リアルタイムプログラムはプログラム番号で管理され、番号の小さいものほど優先度が高い。また、プログラム中で他のプログラムを起動する機能を持ち、同時に複数のプログラムが起動されている場合には、互いに入出力待ち時間を利用して、優先度の高いものから処理される。ユーザはこの機能を利用して各機能ごとにプログラムを作成し、順次プログラムを起動したり、並列に処理を行うことができる。また、フリータイムプログラムは英文字によるプログラム名により管理される。

ユーザーがファンクションプログラム中でシステム機能、すなわちプログラム管理、時間管理、割り込み管理、入出力管理の機能を実行する場合には、マクロ命令（SVC命令）が用いられる。POPS IIにおいては、すべての入出力がSVC命令で行われる。表1に示したレーザーレーダー装置に対する制御についても、ユーザー用SVC命令を作成し、これを用いて制御を行っている。

4. 大型レーザーレーダー測定用プログラム

4.1 測定プログラムの機能

レーザーレーダー測定用プログラムの行う機能は、大きく分けて、自動測定機能と、リアルタイムのデータ処理、表示の二つである。リアルタイムの処理については後に述べるとして、ここでは測定データを磁気テープ（MT）に出力する基本的な測定プログラムについて述べる。

測定プログラムには測定対象に応じて架台の動作を行ういくつかの測定モードが必要である。本プログラムでは以下に述べる四つの測定モード（モード0～4）を設定した。

（モード0）架台の制御を行わないフリーモード

（モード1）架台を指定方向に固定して一次元データの時間変化を測定するTHIモード。

（モード2）架台を鉛直面内でスキャンし、さらに方位角を変えていくつものスキャン面でスキャンを行える（マルチ）RHIモード。

（モード3）架台を水平面内でスキャンし、さらに仰角を変えていくつものスキャン面でスキャンを行える（マルチ）PPIモード。

以上の四つの測定モードで大気結現象の測定に必要な動作を行うことができる。

4.2 測定プログラムの構成

測定プログラムはPOPS IIの特徴を生かして、各制御機能ごとに一つのファンクションプログラムとして作成し、これを順次起動して一連の測定動作を行う構成をとった。測定に必要なパラメータはコモン領域の測定パラメータテーブルに用意し、各プログラムはこれを参照しながら動作する。コモン領域のパラメータテーブルは100バイトで、その内容は表2に示すとうりである。

図3に測定プログラムの構成を示す。また、表3に各プログラムの機能を示す。測定パラメータテーブルはディスクに作成したパラメータテーブルライブラリにあらかじめ各種のものを用意して

表2 測定パラメータテーブルの内容

パラメータ NO.	パラメータの内容	パラメータ NO.	パラメータの内容
1	データを書き込むMTファイル番号	26	—
2	現在オープンしているMTファイル	27	信号処理系
3	時間 *	28	パラメータ {
4	秒 *	29	アテニュエータ (主)
5	年 *	30	(副)
			フィルター (主)
			(副)
6	月 *	31	スキャン
7	日 *	32	パラメータ {
8	曜日 *	33	EL {
9	1 スキャンのカウンタ数	34	スタート角度
10	1 カウンタの積算回数	35	ストップ角度
			AZ {
			増分(マルチ RHI)
			スキャン方向数
			1 方向スキャン数
11	トランジェントレコーダチャンネル	36	スキャン
12	トランジェントレコーダ転送ワード数	37	パラメータ {
13	トランジェント DELAY	38	AZ {
14	レコーダ	39	スタート角度
15	パラメータ	40	ストップ角度
	CLOCK RATE		EL {
	MODE		増分(マルチ PPI)
			スキャン方向数
			1 方向スキャン数
16	CH1 FULL SCALE	41	光学系
17	CH2 FULL SCALE	42	パラメータ {
18	—	43	シャッター
19	—	44	IRIS
20	—	45	フィルター 1
			フィルター 2
			フィルター 3
21	測定モード (0 ~ 3)	46	副鏡位置 *
22	測定回数	47	—
23	スキャン スピード	48	—
24	測定時間間隔 {	49	—
25	時	50	—
	秒		

注) * は読み込まれる量

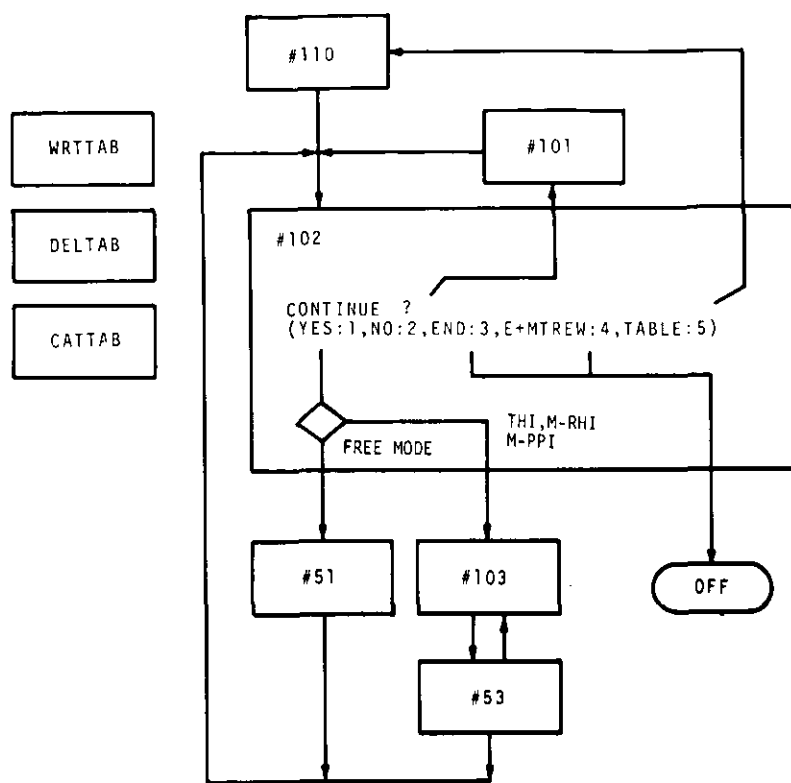


図2 測定プログラムの構成

表3 図2に示した各プログラムの機能

プログラム名	機 能
WRTTAB	コモン領域のパラメータテーブルをディスクのパラメータテーブルライブラリに書き込む。テーブルは各測定モード別に番号で識別される。
DELTAB	パラメータライブラリからのテーブルの削除
CATTAB	ディスクのパラメータライブラリのカatalogを出力する。
# 110	指定したパラメータテーブルをディスクのパラメータライブラリからコモン領域にセットする。
# 101	コモン領域にセットされているパラメータを修正するためのプログラム
# 102	測定開始のコマンド入力要求を行いパラメータテーブルの内容に従ってデータ収集プログラムを起動する。
# 51	データ収集 (フリーモード用)
# 103	スキャン制御
# 53	データ収集 (THI, (マルチ) RHI, (マルチ) PPI用)

おき、プログラム# 110を用いて測定に用いるテーブルを指定してコモン領域にセットする。ディスクのパラメータライブラリには測定モードごとに500種類のパラメータテーブルを収録しておくことができる。収録されたテーブルは各測定モードごとに番号で識別される。また、パラメータライブラリへの書き込み、消去および一覧表の出力を行うためのプログラムが作成されている。

(プログラム名 WRTTAB, DELTAB, CATTAB)

プログラム# 101はコモン領域にセットされたパラメータを修正する場合に用いる。

プログラム# 102はCRTコンソールから測定開始コマンドの入力を要求し、入力されたコマンドおよびパラメータテーブルの各値を判断してデータ収集プログラムを起動する。

プログラム# 51は架台の制御を含まないフリーモードのデータ収集プログラムで、レーザーレーダーシステムの調整時などに用いられる。プログラム# 103および# 51は架台制御を伴うデータ収集プログラムで、THI, (マルチ) RHI, (マルチ) PPIを行うことができる。

なお、これらのプログラムはFORTRAN IV とアセンブラの混用で作成された。

4.3 測定プログラムの動作

図3, 図4に4.2節で述べたプログラム# 103, #53のフローチャートを示す。プログラム# 103は架台スキンの制御を行う。測定するスキン領域を一定速度でスキンするために、架台はスキン領域の外側に位置決めされ、スキン開始した後、データ収集プログラム# 53に制御が移される。# 53は架台が測定スキン領域に入ったことを確認してデータ収集を開始する。図5に測定プログラムの架台動作の例を示した。取得されたデータは指定回数の積算の後、磁気テープ(MT)に記録される。# 53は測定スキン領域でデータの収集を終えるとMT ファイルを更新し、再び# 103に制御を移す。# 103は次のスキンのための位置決めを行い同様の動作を繰り返す。

図6にMTに記録されたデータのフォーマットを示す。MTファイルの先頭にはコモン領域のパラメータテーブルがそのままのイメージで記録される。第2レコードめからがレーザーレーダーデータである。架台角度やパワーモニターなど1カウントごとに読み込まれる補足データは、各レコードの始めの100バイトに記録される。補足データの内容は表4に示した。レーザーレーダーデータは〔トランジェントレコーダーのワード数〕個の整数型データで、2チャンネルで測定する場合にはCHIのデータに続けてCH2のデータが出力される。

なお、測定は、レーザー繰り返し数25 pps (pulses per second)で行われ、1パルス当たりを取得されるデータ量は1チャンネルの測定の場合最大2048ワード、2チャンネルの場合最大1024ワードである。

5. 予備観測用プログラム

前節で基本的な測定プログラムについて述べたが、測定を十分な信号対雑音比(SN比)で行うためには、視程(すなわち光の減衰係数)に応じてデータの積算回数などのパラメータを定める必要

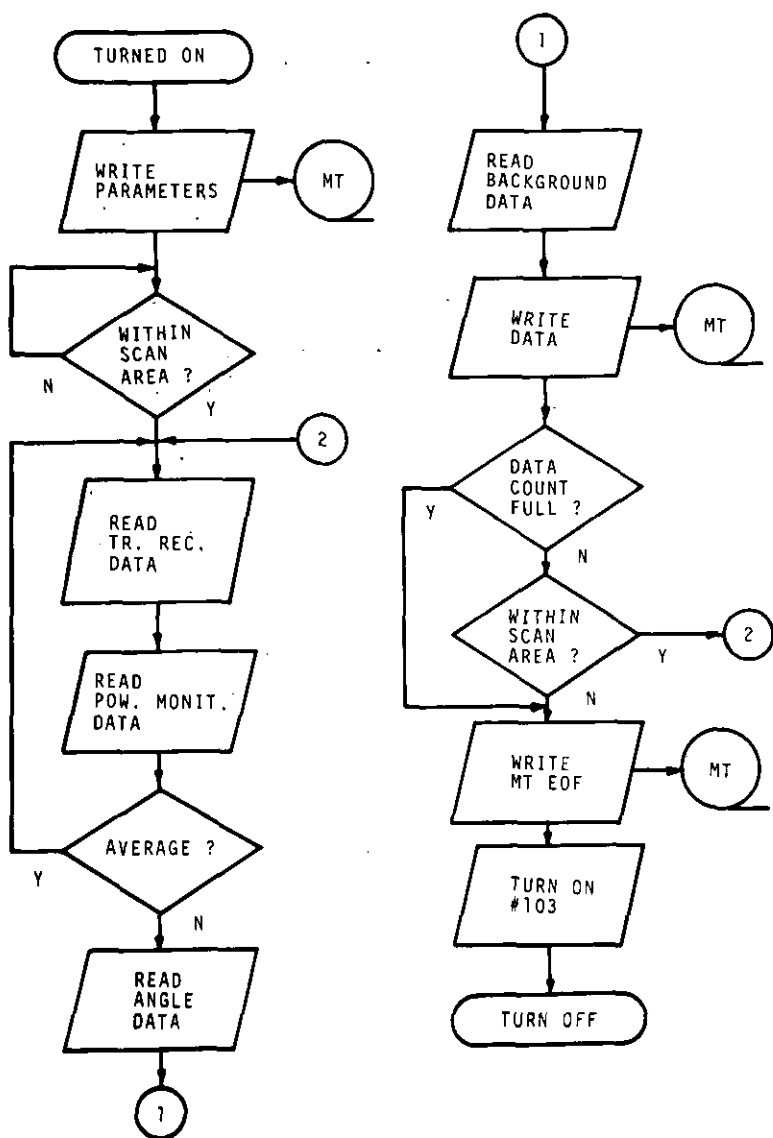
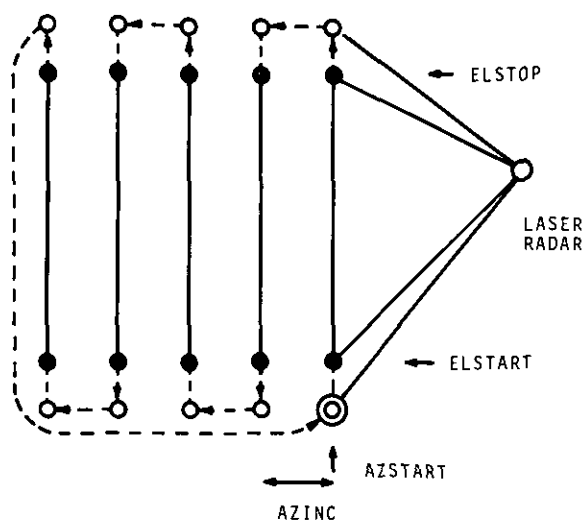


図4. データ収集プログラム（#53）のフローチャート



PARAMETER NO.21 = 2 (M-RHI)
 NO.31 = ELSTART
 NO.32 = ELSTOP
 NO.33 = AZINC
 NO.34 = 5
 NO.35 = 1
 NO.36 = AZSTART

図5 測定動作の例 (マルチRHIの場合)

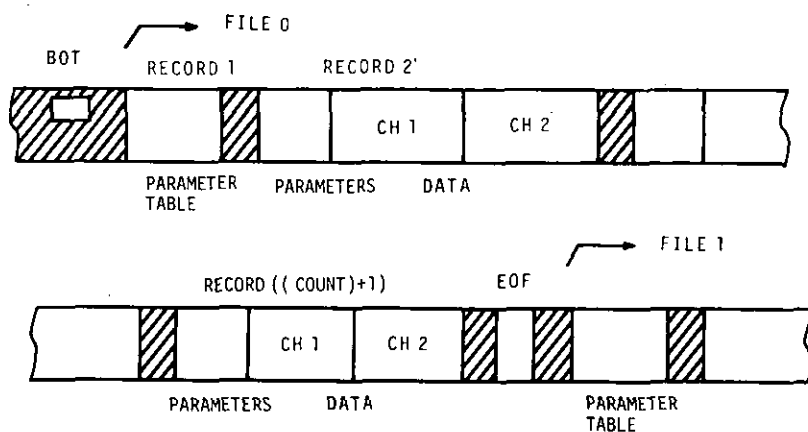


図6 磁気テープに記録されたデータのフォーマット

表4 1カウントごとに記録される補足データの内容

相対アドレス (バイト)	デ ー タ の 内 容
0 2	トランジェントレコーダー 転送エラー数 CH 1 CH 2
4 6	レーザー出力モニター 532nm (2バイトバイナリ) 1.06μ
8 10 12 14	ELEVATION 角度 (4バイトバイナリ, 1 = 3°) AZIMUTH 角度
16 18	バックグラウンドレベル CH 1 " CH 2
20 2 98	拡張用

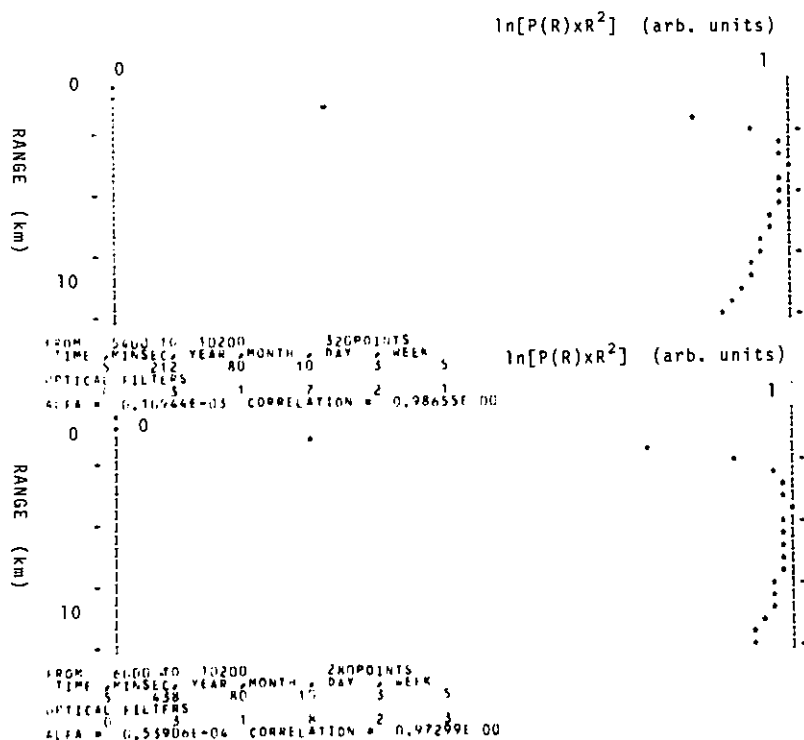


図7 減衰係数測定用プログラム GENSUIによる表示例(上は波長 532nm, 下は 1.06 μ の測定例を示した)

6. リアルタイム処理プログラム

6.1 混合層観測用プログラム

レーザーレーダーデータは大気現象の多種の情報を含んでいるため、同一データから複数のデータ解析が可能な場合や、まだ解析手法の十分に確立されていない情報を含む場合もある。このため測定の実データを磁気テープに記録しておくことは有意義である。一方、解析手法の定まった単目的の観測ではリアルタイムのデータ処理も可能であり、観測結果に検討を加えながら効率良く観測が行えるという意味で磁気テープへの記録と同時にリアルタイム処理を行うことが必要である。

ここでは、リアルタイムデータ処理を含む混合層高度測定用プログラムについて述べる。本プログラムはRHI測定を行った後、ゼロレベル補正、距離2乗補正を行い、エアロゾル濃度に比例する量を求める。レーザーレーダーで得られたエアロゾル濃度分布は極座標で表わされているので、次にこれをXY座標に変換する。求められたエアロゾル2次元分布 $C(X, Y)$ をラインプリンタ上に表示する。ここにXは水平軸、Yは鉛直軸とする。

次に、混合層高度を推定するために、エアロゾル濃度分布の水平方向の平均値を計算し、エアロゾル鉛直分布 $C(Y)$ を求め、 $C(Y)$ およびこれのYに対する傾き (Normalized Concentration Gradient: NCG) をラインプリンタに出力する。NCGは次式で定義される。

$$NCG = -[C(Y + \Delta Y) - C(Y)] / \Delta Y \cdot C(Y)$$

NCGはエアロゾル鉛直分布から混合層高度を推定する際の客観的な基準を与えるために導入された。笹野らは多数のTHI観測データより経験的に、NCGが40m以上にわたって引き続いて50% / 100mを越えるとき、これをエアロゾル層の上端高度とみなし、最下層のエアロゾル層上端高度と底層ゾンデ観測より求めた安定層底部高度とのよい相関関係を得ている⁴⁾

図8に混合層観測用RHIプログラムの構成を、表5に各プログラムの機能を示す。POPS IIの特徴を生かして各処理ごとにプログラムを分割して順次起動をかける構成をとっている。4節で述べたものと同様のパラメータテーブルを用いており、コマンドの入力も同じくプログラム#102で行われる。この測定の測定モードは12と定めている。

図10にこのプログラムによるエアロゾル濃度の表示例を、また図11にエアロゾル鉛直分布とNCGの表示例を示す。本プログラムによる処理に要する時間は計算に約25秒、ラインプリンタへの打ち出しに約2分である。測定に要する時間は、スキャン領域、スキャンスピードにより異なるが通常4分程度である。

6.2 大型計算システムとの通信システム

大型レーザーレーダー制御用ミニコンピュータシステム (TOSBAC 7/40) は国立公害研究所電子計算機システム (HITAC M-180) との間のデータ通信システムを備えている。これは、レーザーレーダーデータのミニコンでの処理能力には限界があるため、測定データを大型計算機に転送

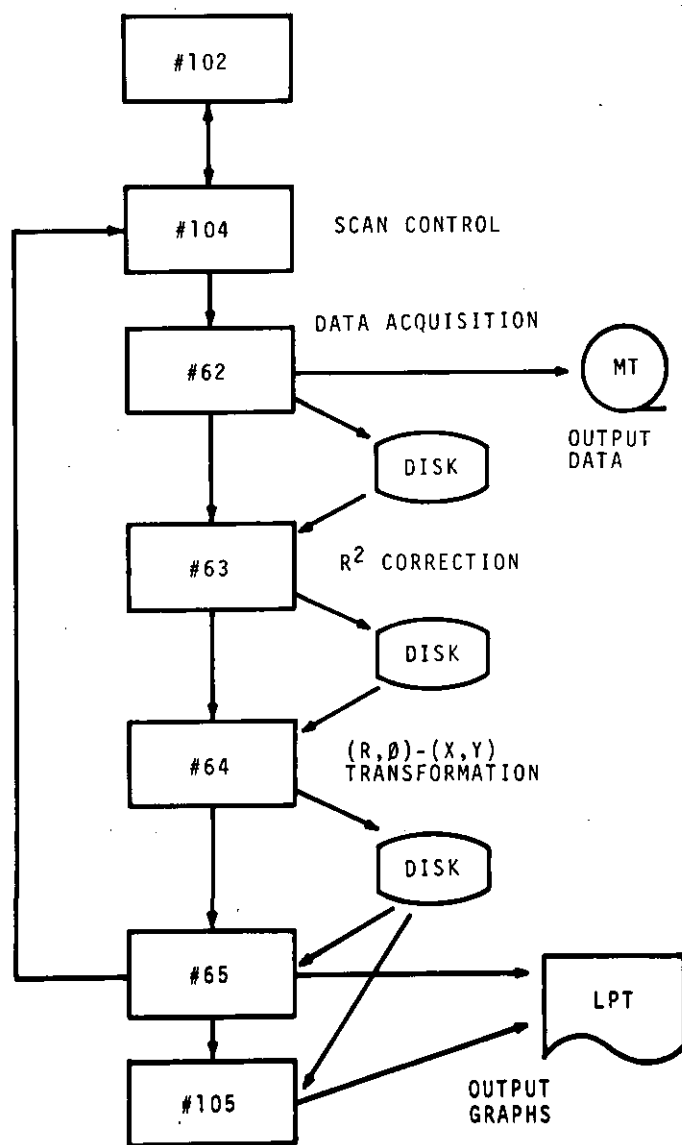


図8 混合層観測用RHI測定プログラムの構成

表5 図8に示した各プログラムの機能

プログラム名	機 能
# 104	スキャン制御
# 62	データ収集
# 63	ゼロレベル補正, 距離 2 乗補正
# 64	極座標から XY 座標に変換する。
# 65	エアロゾル濃度分布をラインプリンタに表示
# 105	エアロゾル鉛直分布および NCG を計算し, ラインプリンタに表示

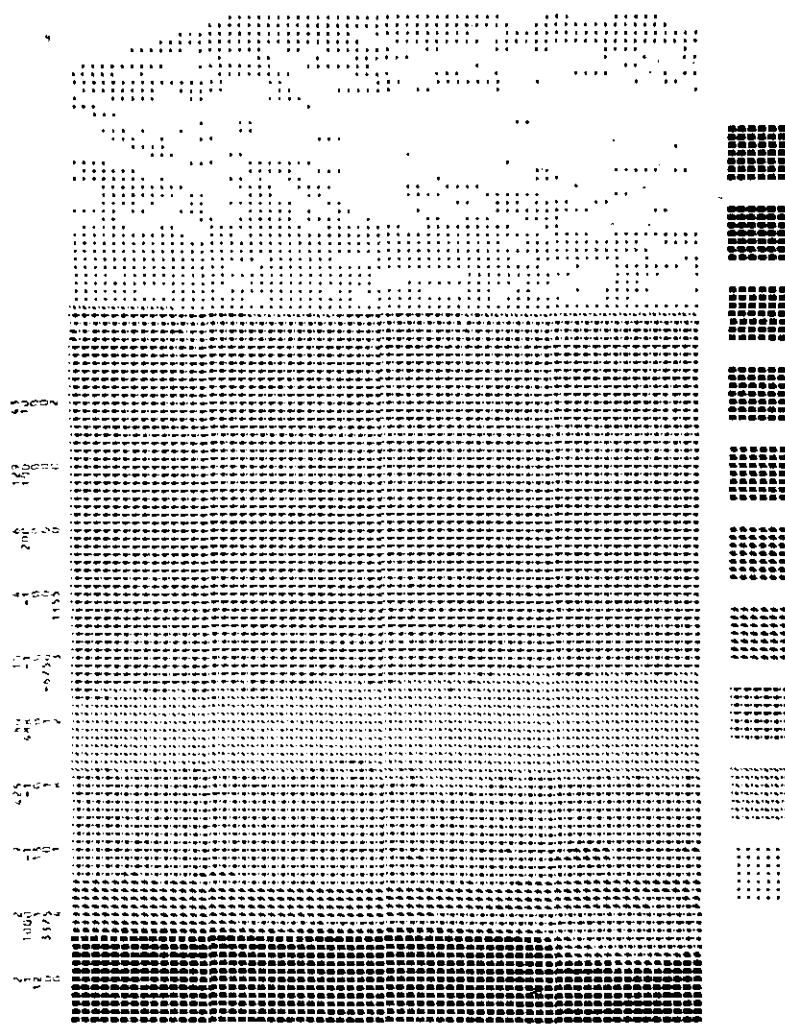


図9 混合層観測用プログラムによる、エアロゾル濃度分布の表示例

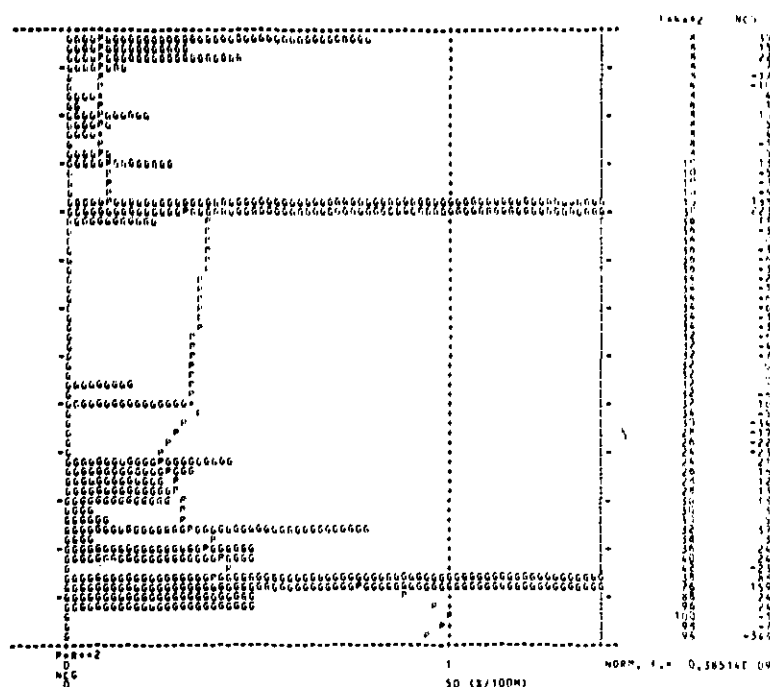


図 10 エアロゾル鉛直分布とNCGの表示例

し、解析を行い、解析結果を再びミニコンに転送して表示することを目的とする。

通信システムは半二重伝送方式で48 KBPSの転送速度を持つ。ミニコン側の通信制御はPOPS IIのサブシステムであるTCS IIにより行われる。

これまでに、ミニコンおよび大型計算機のディスク内のデータを相互に転送する基本的な応用プログラムを完成した。大型計算機側のプログラムはTSS 端末から起動され、ミニコン側の転送プログラムは大型計算機からの転送要求により起動される。現在このプログラムを測定プログラムと組み合わせてリアルタイムのデータ処理を行うプログラムを開発中である。

7. まとめ

国立公害研究所大型レーザーレーダーは大気汚染分布の測定、汚染物質の移流の測定、大気構造の測定など、大気汚染に関連する大気諸現象の観測を目的として開発された。大型レーザーレーダー測定用ソフトウェアプログラムは、観測目的に応じた複雑な測定動作を自動的にを行い、高速でデータを収集し、目的に応じたリアルタイムのデータ処理、表示を行う機能を必要とする。この要求を満たすため以下のプログラムの作成を行った。

- 1) THI, (マルチ) RHI, (マルチ) PPIを自動的にを行い、収集したデータを磁気テープに記録する基本的な測定プログラム

2) 本観測に先だって、十分なSN比で測定できるように測定パラメータを決定することを目的とした大気の減衰係数測定用プログラム

3) リアルタイムのデータ処理を含む混合層観測用RHI測定プログラム。

これらプログラムの開発によって大型レーザーレーダーシステムは真の完成に至り、現在、広域汚染、大気境界層などの観測に力を発揮している。

引用文献

- 1) 清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫・松戸 修・奥田典夫(1980): 大気拡散観測用コンピュータ化車載型レーザーレーダー, 国立公害研究所研究報告, 第16号, 17-32.
- 2) Shimizu, H., Sasano, Y. *et al.* (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. *Opt. Quantum Electron.*, **12**, 159-167.
- 3) 杉本伸夫・松戸 修・清水 浩・笹野泰弘・竹内延夫(1980): 車載型レーザーレーダー測定用プログラムの開発, 国立公害研究所研究報告, 第16号, 41-50.
- 4) 笹野泰弘・重松明夫・清水 浩・竹内延夫・奥田典夫(1980): レーザーレーダーで観測されたエアロゾル層高度と安定層高度の対応関係について, 国立公害研究所研究報告, 第16号, 69-84.

Ⅲ-4

レーザーレーダー画像データ処理・表示手法の開発

笹野泰弘¹・竹内延夫¹・奥田典夫¹

Development of Image Processing Programs for Laser Radar Data

Yasuhiro SASANO¹, Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

スキャンニングレーザーレーダーで得られるデータは、主に、2次元画像として取り扱われることが多い。本報告では、画像として取り扱われるレーザーレーダーデータの効率的な処理・表示を目的として、国立公害研究所において開発したソフトプログラムおよび処理システムについて解説する。データ処理は大型電算機のディスクとTSS 端末（ビデオターミナルおよびプリンター）を利用して、データ質の判断、出力領域の設定、表示様式の種類などを対話的に行うことができる。

Abstract

Laser radar data obtained by scanning are usually treated as two-dimensional images of the aerosol distribution pattern. This paper describes a new system with software programs which has been developed at the National Institute for Environmental Studies for efficient processing and display of the laser radar data. This system utilizes a disc memory device and a TSS terminal (a video-terminal and a printer), which enables interactive operation, including data quality judgement, display area assignment, display mode selection, etc.

1. はじめに

レーザーレーダーは、大気中に射出したレーザーパルス光のうち、大気に浮遊する微小粒子等により後方散乱された光を集光し、受信光強度から散乱体の量に関する情報を、受信するまでの時間の経過から散乱体までの距離情報を得るものである。集光された光は光電子増倍管により電気信号に変換され、種々の記録、演算装置へ送られる。

パルスを発射してから時々刻々、受信された光信号の時系列を、レーザーレーダーデータ（ある

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

1. The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Tsukuba, Ibaraki 305

いは、データ）と呼ぶことにする。データの処理方式の変遷を見ると、初期の段階は、出力電気信号をオシロスコープに波形として描かせたものを写真に撮影し、データを読みとることから始まった¹⁾²⁾。しかし、この作業に要する労力は大きく、また読み取りの精度を高くすることはできない。

レーザーレーダーデータは物理的に意味のある量に変換する必要がある。変換は、レーザーレーダー方程式に従って、i) 直流成分の除去、ii) 距離自乗補正、iii) 大気透過率補正等の演算により成される。データ処理技術の進展は、アナグロ的に前記3項目の演算を施した上で出力しようとする方向へ向った。しかも、スキャン測定によるデータを2次元的な画像として出力することが可能になった³⁾⁴⁾。

他方、コンピューター技術の発展は、レーザーレーダーデータ処理においてもデジタル処理の利用を促し、その結果より高精度、高効率の解析処理方式が採られることとなった⁵⁾⁶⁾。また、コンピューターの利用は、レーザーレーダー観測システムの測定プログラム制御、高速データ収集、リアルタイム表示を可能にし、レーザーレーダーの実用化に貢献している⁵⁾⁶⁾。

現在まで行われてきたMie散乱レーザーレーダー観測の主な研究対象を列挙すると次のようになる。

- i) 成層圏のエアゾル分布⁷⁻¹⁴⁾ (THI)
- ii) 大気境界層、混合層¹⁵⁻²³⁾ (THI, RHI)
- iii) 雲物理 (polarization)²⁴⁻³⁶⁾ (THI, RHI)
- iv) 視程³⁷⁻⁴²⁾ (THI, RHI)
- v) エアロゾルの光学的性質⁴³⁻⁴⁷⁾ (THI, RHI)
- vi) 拡散現象⁴⁸⁻⁵⁴⁾ (RHI)
- vii) 広域汚染 (PPI)
- viii) 風⁵⁵⁻⁵⁷⁾ (TRI, RHI, PPI)

ここで、THI, RHI, PPIはレーダー観測等で用いられる用語で（それぞれ、Time to Height Indication, Range to Height Indication, Plan to Position Indication の略）、鉛直分布の時間変化、鉛直断面内の分布、水平面の分布の表示方法を意味している。ここでは、さらにTRI (Time to Range Indication) という語を、一定方向のレーザーパルス光路上の分布の時間変化を表示するものとして定義し、他の語とともに、測定の方法（モード）を意味するものとして用いる。

基本的には、上記のいずれの観測、測定モードも2次元データとして収集される。しかし、成層圏エアロゾル (THI)、光学的性質 (TRI) のデータは、多くの場合時間的に平均化されて、単一のプロファイルデータとして取り扱われる。

レーザーの高速繰返し発振、スキャン測定による「画像データ」であることを特徴とするのは、大気境界層、混合層 (RHI)、拡散現象 (RHI)、広域汚染 (PPI)、相関法による風測定 (PPI, RHI) などである。その他の観測においてもデータ量は多く、もちろん手解析の時代でないが、画像としての取り扱い、それほど必要とされていない。

適切な画像出力を得ることは、データ解析の前段階として、人間の認識・判別能力を利用する上

で重要なことである。特に、画質の判断、解析領域の設定等において、レーザーレーダーデータの有効利用を計るために、効率的な画像表示法が必要である。

この報告では、このような、画像として得られるレーザーレーダーデータの効率的な処理・表示を目的として国立公害研究所において開発したソフトプログラムおよび処理システムについて解説し、処理出力例を示す。また、現在、データ処理において解決しなければならない諸問題について検討する。

ここで述べるのは、磁気テープに収録されたレーザーレーダーデータを大型電算機（HITAC M-180）を用いてオフライン処理する場合についてである。基本的なデータ処理の後、画像としての出力は、TTSターミナル（HITAC T560/20）（タイムシェアリングシステム用ビデオターミナルおよびプリンタ）を用いた対話形式により行われ、種々の出力様式の指定が可能である。

2. 基本的なデータ処理

レーザーレーダーデータの処理は、次に示すレーザーレーダー方程式に基づいて、体積後方散乱係数 β あるいは消散係数 α の空間分布を求めることが目的である。レーザーレーダー方程式は次式で表される。

$$Pr(R) = P_0 \cdot K \cdot L \cdot Ar \cdot \beta(R) \cdot T(R)^2 \cdot Y(R) / R^2 + P_B \quad (1)$$

ここで、各記号の意味は表1に示している。消散係数 α は、透過率 $T(R)$ と次式で関係づけられる。

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

幾何光学的効率 $Y(R)$ の関数形は別に実験的に求められる⁵⁸⁾。

表1 レーザーレーダー方程式に現れる記号の意味

$Pr(R)$	距離 R からの信号のパワー
P_0	レーザー出力パワー
K	光学系の効率（定数）
L	レーザーパルス空間長の半分
Ar	受信望遠鏡の有効面積
$\beta(R)$	距離 R における体積後方散乱係数
$T(R)$	距離 R までの大気の透過率
$Y(R)$	距離 R における幾何光学的効率
P_B	背景光パワー

観測される量 $Pr(R)$ に対して、未知の量は $\beta(R)$ 、 $T(R)$ の二つであるから、(1)式を解くためには $\beta(R)$ と $T(R)$ 、あるいは $\beta(R)$ と $\alpha(R)$ の間に、何らかの関係式を仮定するか、別の方

法で $T(R)$ を求めることが必要である。この問題は後で議論することにして、ここでは、それ以前の処理について示す。

(i) 直流成分の除去

(1) 式によれば、レーザーレーダー信号の他に、背景光による直流成分が受信される。背景光は天球内の方向、気象条件、時刻等によって大きく変わるので、スキャン測定で得られるデータにおいては、データ毎に背景光の大きさを求めて受信信号から差し引くことが必要である。

THI モードの測定などでは、背景光の大きさが時間的に変化しないと考えられる場合には、レーザーの射出をとめて背景光だけの観測を行うことも容易であるが、スキャン測定では一般に難しい。

(1) 式から明らかなように、十分に遠方からの受信光は、ほとんど背景光 P_B だけに依ると考えられるので、十分に遠方に相当する受信光レベルを求め、背景光強度を評価することが多い。

(ii) 距離自乗の補正

レーザーレーダーでは、射出光はほとんど広がらないで進むのに対して、受信すべき散乱光は散乱体積からの距離の自乗に比例して広がるため、(1) 式に示すように $1/R^2$ の項が入る。補正演算としては、レーザーレーダー信号に対して、 $R = ct/2$ (c は光速、 t はレーザーパルス発射から受信までの時間差) で決まる距離 R を用いて、 R^2 を掛けることで達成される。

(iii) 幾何光学的効率の補正

幾何光学的効率の関数 $Y(R)$ は、レーザービームの拡がり、受信視野との関係で決まり、一定の光学系のもとでは不変のものと考えてよい。 $Y(R)$ を幾何光学の理論計算により求めることは可能であるが、むしろ実際に取得されるレーザーレーダー信号をもとに、実験的に求めることが容易である⁵⁸⁾。

(vi) 絶対値の校正

出力パワー P_0 は、モニター装置により常時、モニターされ、レーザーレーダー信号とともに記録されている。また、光学的な効率 K は標準光源を用いて実験的に求められる。 L , A_r はシステムで決まる定数である。これらの量を用いて、受信信号の絶対値を求めることができる。

これら、四つの処理により、次式の量

$$\beta(R)T(R)^2 = (Pr(R) - P_B)R^2 / [Y(R) \cdot P_0 \cdot L \cdot K \cdot A_r] \quad (3)$$

を得る。

3. 減衰項の評価

前に述べたように、レーザーレーダー方程式によってデータを処理する目的は、体積後方散乱係数 β 、あるいは消散係数 α 、もしくは、その両者の空間分布を求めることである。レーザーレーダー観測だけから、これを行うためには、何らかの仮定を置くことが必要である。これまでに試みてきた、いくつかの方法^{37, 38, 41, 59, 60}について、簡単に記すことにする。詳細は文献を参照されたい。

(i) 光学的性質が空間的に一様な場合

エアロゾルの光学的性質が一様な場合、あるいは、なんらかの平均化操作によって、一様とみなせる場合には、次のようにして減衰係数を決めることが出来る。

(3)式を書き直すと

$$(Pr(R) - P_B) R^2 = \text{const} \times \beta(R) \times \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right] \quad (4)$$

ここで、 $Y(R)$ は簡単のため1とし、定数項に含めている。空間的一様性の条件から、 $\beta(R) = \bar{\beta}$
 $= \text{const}$ 、 $\alpha(R) = \bar{\alpha} = \text{const}$ 、である。したがって

$$\ln \{ (Pr(R) - P_B) R^2 \} = \text{const} + \ln \bar{\beta} - 2\bar{\alpha}R \quad (5)$$

ゆえに、

$$\bar{\alpha} = -\frac{1}{2} \frac{d \ln \{ (Pr(R) - P_B) R^2 \}}{dR} \quad (6)$$

により、平均的な減衰係数 $\bar{\alpha}$ を得る。

平均化の操作は実際には、水平面内スキャン測定の場合、スキャン面内の全部のデータを用いて平均のデータとしている。エアロゾルの分布条件によっては必ずしも、光学的条件が一様と見なせない場合がある。(5)式は R に対して一次式なので、一次式の最小自乗近似により、 $\bar{\alpha}$ を決めるのが現実的である。

(ii) 光学的性質が水平方向に一様で、成層を成している場合

この条件が成立する場合は、いわゆる、スラントパス法が適用できる。高度角を変えて測定したデータに対して、(4)式を用いると、

$$(Pr(z, \theta) - P_B) (z/\sin \theta)^2 = \text{const} \times \beta(z) \times \exp \left[-\frac{2}{\sin \theta} \int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad (7)$$

ここで、 $\beta(z)$ 、 $\alpha(z)$ は鉛直方向にだけ分布構造があるものと考えている。(5)、(6)式と同様に、

$$\ln \{ (Pr(z, \theta) - P_B) (z/\sin \theta)^2 \} = \text{const} + \ln \beta(z) - \frac{2}{\sin \theta} \int_0^z \alpha(z') dz'$$

$$T(z) = \int_0^z \alpha(z') dz' = -\frac{1}{2} \frac{d \ln \{ (Pr(z, \theta) - P_B)(z/\sin \theta)^2 \}}{d(1/\sin \theta)}$$

を得る。減衰係数 $\alpha(Z)$ は、光学的厚さ $T(Z)$ を Z で微分して、次式で求められる。

$$\alpha(z) = \frac{dT(z)}{dz}$$

この方法は、鉛直方向をスキャン測定する場合などに適用できる。(i)の方法と同様に、最小自乗による一次式のあてはめで、 $T(z)$ を求めるのが現実的である。国立公害研究所における実測によると、水平方向の光学的な一様性は、大気の状態が安定な成層をなしているときに達成されやすく、逆に、不安定な混合層中では不均一が大きい傾向がある。

その他の方法として、(iii) β と α の間に比例関係を仮定する方法、(iv) 他の方法で独立に測定した大気の total extinction を利用する方法、(v) 視程と減衰係数の経験式を利用する方法などがある。これらの方法については、ここでは触れない。

4. レーザーレーダーデータ画像の表示

より高度な画像の解析に至る前段階として、測定された2次元データの中から、必要な領域を抽出する作業を行わなければならない。これは解析しようとしている対象領域の中に、解析者の望む汚染質の空間分布構造があるかという判別の作業でもある。あるいは、解析画像が十分に質の良いもので、ノイズ等の除去は良好であるかの判断が必要とされる。

こういった画像処理の作業は、高速カラーグラフィック表示装置など画像処理用のハードウェア、ソフトウェアに依るのが、現在のところ、最も高率적であろう。しかし、これに代る手段として、TSS ビデオターミナルによる対話形式の画像処理・表示は、基本的なデータ前処理を含めて、容易にデータ加工の追加、変更が可能であるため、有効な方法である。

また、TSSのプリンタ等による画像表示はグラフィック表示装置等に比べると、データ密度、判断の容易さ等で劣る点もあるが、数値データの表示が同時に可能であるという利点がある。

この章では、TSSビデオターミナルを用いたレーザーレーダー画像処理、表示の方法について概説する。

現在、使用している処理プログラムは次の2系列に分けることが出来る(図1)。一つは、ディスクに格納されているレーザーレーダーの生データ*を呼び出して、TSSで対話的に処理するもので、測定領域内の任意の表示領域の指定が可能である。他の一つは、解析対象領域を定めた上で、画像としてのデータを画像データファイルに作成し、これとTSS間で出力様式の指定等を対話的に行うものである。いずれも演算等は全く共通であって画像データとして蓄えるか否かの違いだけである。しかし、後者の場合、作られた画像データの領域、空間分解を越えて画像出力することは出来

* TSS 端末による対話処理では、磁気テープ装置の操作を含む処理は望ましくないので、一旦ディスクにコピーして用いている。

ない。

生データから画像出力に至る演算は以下の通りである。

(i) 表示領域の指定、出力エリアの指定

2次元座標を x 軸, y 軸(原点をレーザーレーダー地点とし, 水平面内を表すときは x 軸を東西, y 軸を南北とする。鉛直面を表すときは, x 軸を鉛直軸, y 軸を水平軸とする。)で表すことにし, 表示領域を図2のようにXS, XE, YS, YE で指定する。出力方法はプリンターの印字によるものとし, 1字を最小単位(1メッシュ)として, 出力エリアを(IMAX, JMAX)で指定する。この結果, 1メッシュの大きさは, x 方向は $(XE - XS)/IMAX$, y 方向は $(YE - YS)/JMAX$ となる。

(ii) 極座標系メッシュデータから xy 座標系メッシュデータへの変換

レーザーレーダーデータはビーム方向には, 信号はサンプリングゲート幅の時間分解能の時系列

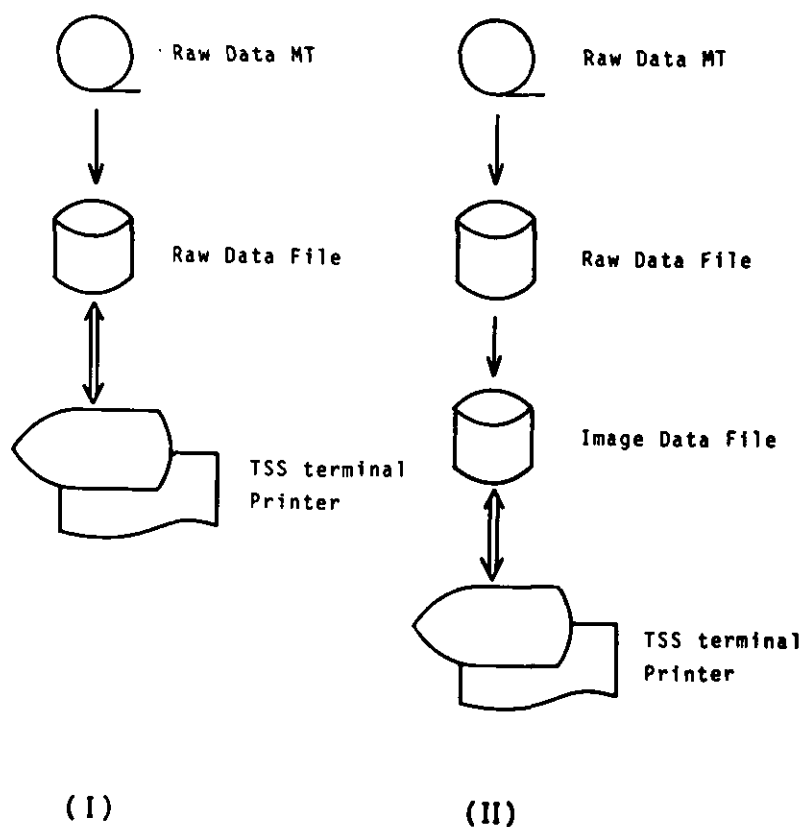


図1 レーザーレーダーデータ処理・表示の二系列のフロー

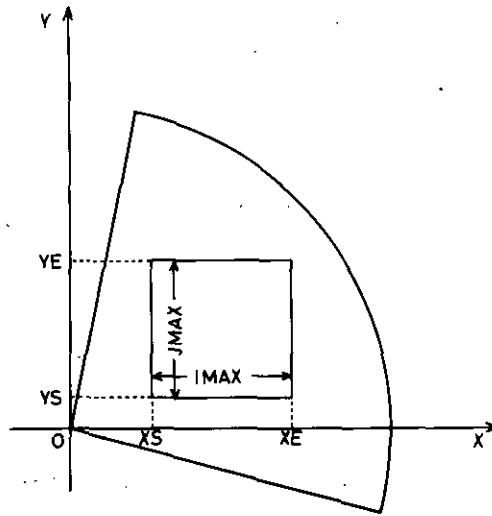


図2 画像表示領域 (X_S, X_E, Y_S, Y_E) と表示エリア ($IMAX, JMAX$) の指定

データとして収録される。また、スキャン方向には、一定の角度幅ごとに信号が収録される。したがって、レーザーレーダーの生データはビーム方向、スキャン方向に、極座標系で、それぞれ等間隔なメッシュ上のデータと考えることができる。

x, y 座標系上の新しいメッシュ、例えば、 X_1, X_2, Y_1, Y_2 で囲まれる領域に対しては、この領域内に含まれる極座標系メッシュデータの平均値を与えることにする。また、 X_1, X_2, Y_1, Y_2 で囲まれる領域に、極座標系メッシュデータが存在しない場合には、領域を囲む4点のデータの平均値で補間する。

(iii) 画像の拡大・縮小

処理系列(II)では、前項までの処理により作成された画像としての2次元配列データは、ディスクファイルに格納され保存される。この場合、画像出力にあたっては、表示領域、出力エリアの再指定により、格納されている画像データをもとに、出力画像の取り出し、拡大、縮小が可能である。

再指定の方法は、(i)の方法と同様に、表示領域 US, UE, VS, VE 、表示エリア $IUMAX, JVMAX$ の指定により行う(図3)。

処理系列(I)の場合には、画像の拡大・縮小は、生データの読み出しのステップに戻って、再計算を行う。

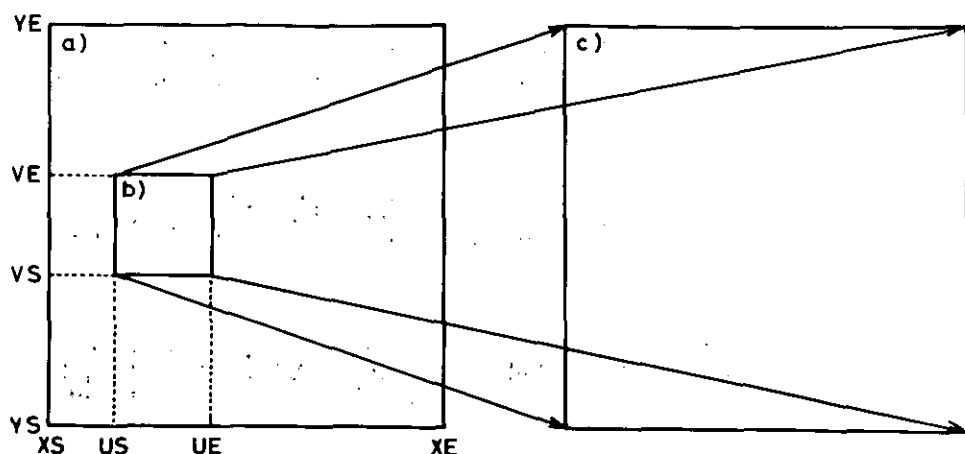


図3 画像の拡大・縮小の指定

(iv) 画像表示の様式指定

TSS ビデオターミナルとプリンタ装置を用いて画像を表示する場合、表示様式としては限られたものしか用いることは出来ないが、多量の数値情報を同時、同画面に表示可能であるという利点を有している。

現在、採用している画像の表示様式は基本的にはレベルスライスにより、数値（空白、0、1、……9、*）か文字（空白、・、；、……#、*）を用いて表示している。重ね打ちの可能なプリンタであれば、文字を適当な組み合わせで重ねて印字することにより、さらに見やすい濃淡（グレイレベルスライス）の表示が出来る（図4）。

また、スライスしたレベルのうち、とびとびのレベルについてのみ印字を行うことで、疑似コンター（等値線）を描くことが出来る。

レベルスライスは、初期レベルと増分を指定することにより行われる。あるいは、表示すべき画像中のデータの最大値と最小値を求めて、これを等間隔スライスすることも指定可能である。

(v) グラフ表示

2次元濃度分布の画像データ配列中の、指定した配列要素の並びについて、1次元のグラフ表示をすることができる。その他、平均プロファイル表示、標準偏差の表示等、必要な処理・表示のプログラムを追加・修正することは、FORTRAN 言語を用いて容易に行える。

5. 対話形式のデータ処理方式

すでに触れたように、レーザーレーダーの大量の画像データのうち、解析に供すべき対象領域の選定、あるいは画像データ質の判断等は、現時点では試行錯誤的な部分が大きく、対話形式の処理

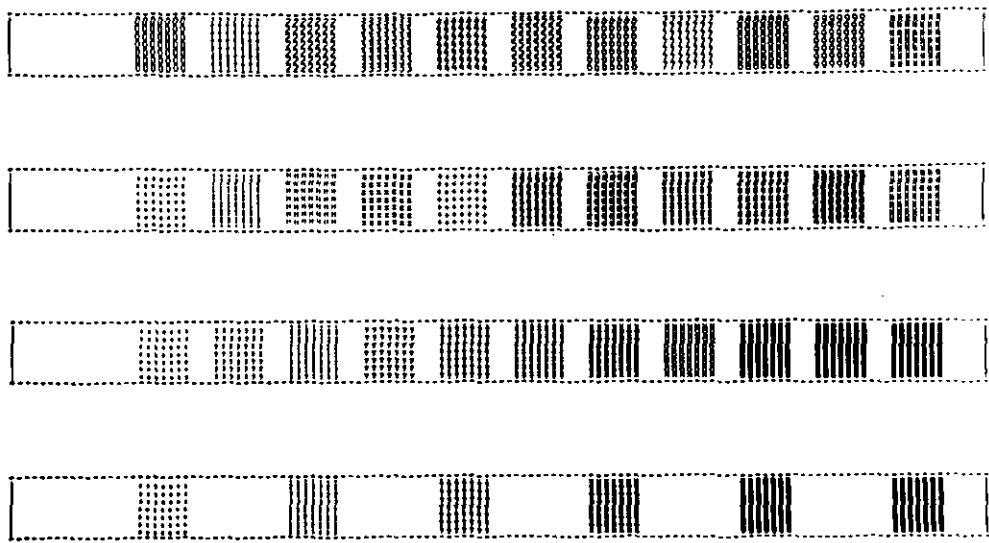


図4 レベルスライス表示における各種表示方法
a) 数値, b) 記号, c) 重ね打ち, d) 擬似コンター。

が有効である。

処理系列(I)と(II)では画像データの作成に至るまでの処理が若干、異なっている。処理系列(I)では、レーザーレーダー信号の生データの読み込みから、画像の出力までの一連の処理を対話的に行うのに対して、系列(II)では、必要な出力領域、出力エリアの大きさを指定して作成した画像データを、一旦、画像データファイルとして蓄えておき、画像データファイルとTSSターミナル間で対話的に処理するものである(図5)。

対話処理は、(i)ファイルの指定、(ii)画像データの作成・修正、(iii)出力様式の指定、において行われる。具体的な例に則して、以下に説明する。ここでは処理系列(I)について考える。

測定は大型レーザーレーダーにより、1980年12月13日11時29分より行った。測定の目的は、公害研の東方向(方位角 $65^{\circ} \sim 115^{\circ}$)約30 kmまでの領域の、水平面内の汚染質分布の特徴を得ることである。測定に係るパラメータ等は表2に示している。

1スキンの測定で収録されるデータ数はword数 $\times$ count数(1800×187)で、 3.4×10^5 データ(673 kbyte)に達する。空間分解能はビーム方向30 m、スキャン方向4.7 mrad(30 km遠方で140 mに相当)である。

対話的データ処理の目的としてはi)データ質のチェック、ii)減衰補正効果のチェック、iii)領域全体の汚質分布の概況把握、iv)特徴的な分布状況の詳細な把握、などが挙げられる。一般に空間分解精度を悪くすれば、データ質(S/N比)は向上する。また、出力領域が狭い場合には、減衰補正の誤差は相対的に小さくすることが出来る。

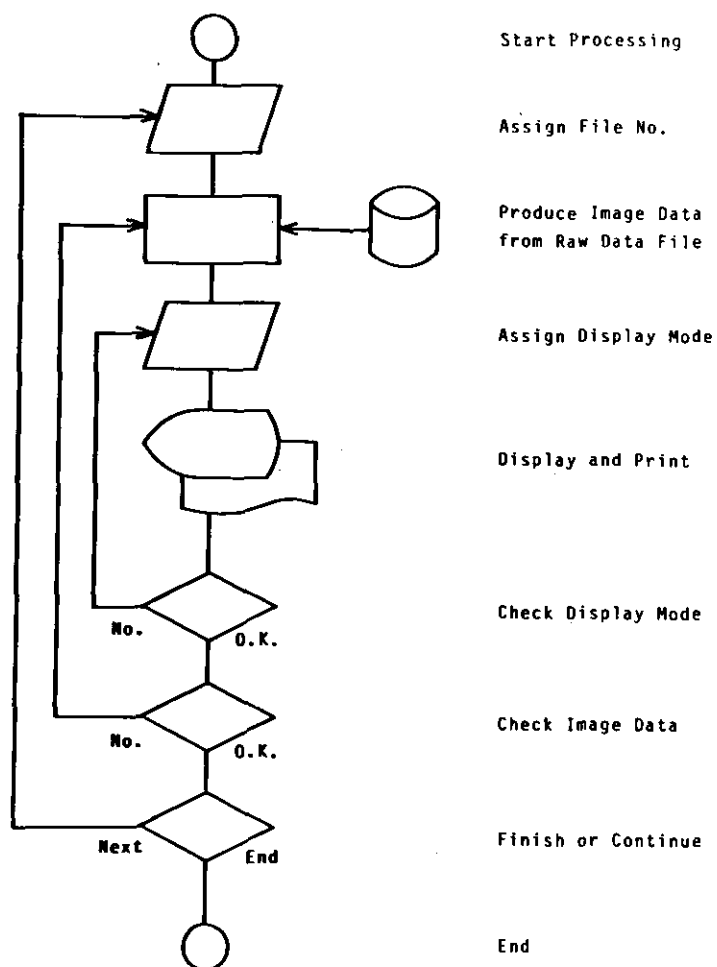


図5 対話形式のデータ処理フロー

表2 測定に関するパラメータ

サンプリング	ディレイ時間	0ns
サンプリング	ゲート時間	200ns
ワード数		1800
カウント数		187
積算パルス数		100
スキャン速度		4°/min
スキャン範囲	方位角	65°～115°
	高度角	1.04°

汚染質の空間分布については、濃度の変動幅はどの程度であるのか、また汚染分布現象の空間スケールはどれくらいであるのか、というようなことは、ほとんどわかっていないと言ってよい。このようなことから、汚染分布を画像として出力するにあたって、レベルスライスの区切方、空間分解精度の設定など、多くの不明の要素がある。これらについて、一つ一つ試行錯誤的に明らかにしていくのが、レーザーレーダーによる汚染質分布計測の現状である。

図6 a) ~ c) に示したのは、処理の例である。図6 a)、出力領域、出力エリア、スライスレベル設定は表3の通りである。図6 b) は図6 a) の一部分を切り出したもので、これを拡大したのが図6 c) に当たる。さらに図6 c) ではスライスのレベルを変えて、分布構造の詳細を見ようとしている。

なお減衰項の補正については、この例では、手法(i)を用いて測定領域内の平均的な減衰係数をあらかじめ求めて補正に用いている。また、汚染分布の相対値を考えることにし、信号の絶対値較正は行っていない。

このように本方式を用いると対話的に種々の画像出力様式を指定し、人間の判断により解析に適した良好な画像を得ることができる。これらの画像をTSSターミナルのプリンタ装置以外の出力機器に出力させることは、それぞれに必要な出力ジョブを作成することで実行される。例えばカラーグラフィックディスプレイ、XYプロッター、ラインプリンター(重ね打ち)などへの出力を行うことができる。これらの出力機器の特徴、出力様式の長所、短所等についての検討が、先に筆者らにより行われている⁶⁴⁾。

高度の画像解析にあたっては、ディスクの画像データファイルを介して対話型環境画像処理システム(IPSEN)⁶⁵⁾への入力が可能である。

大型レーザーレーダー装置の制御、データ収集用ミニコンピュータTOSBAC 7/40と国立公害研究所大型電算機HITAC M-180の間には、専用回線により送受信が可能である。これにより、データ収集中(リアルタイム)、あるいは収集直後(セミリアルタイム)にデータ転送を行い、データ処理を開始できる。

6. 画像処理上のその他の問題点

すでに触れたように、レーザーレーダーの受信々号から背景光の直流成分を差し引くことが必要である。十分遠方からの信号は後方散乱光は、ほとんど無視できて、背景光だけになると考えられるので、遠方に対応する受信々号の平均レベルを背景光の直流成分とみなせる。しかし、平均レベルを求める領域に何らかの障害物(建物、山、あるいは雲)がある場合、それによる後方散乱光成分が寄与して、背景光レベルを正しく決定することは難しい。問題点の一つは、この背景光成分決定の自動チェックを、どのようにソフトプログラムで機能させるかということにある。

同様に、解析しようとする領域、あるいはそれより手前に、建物や電線等の障害物がある場合、当然のことながら、障害物より遠方に対しては信号が得られない。これらを何らかの方法で検出し

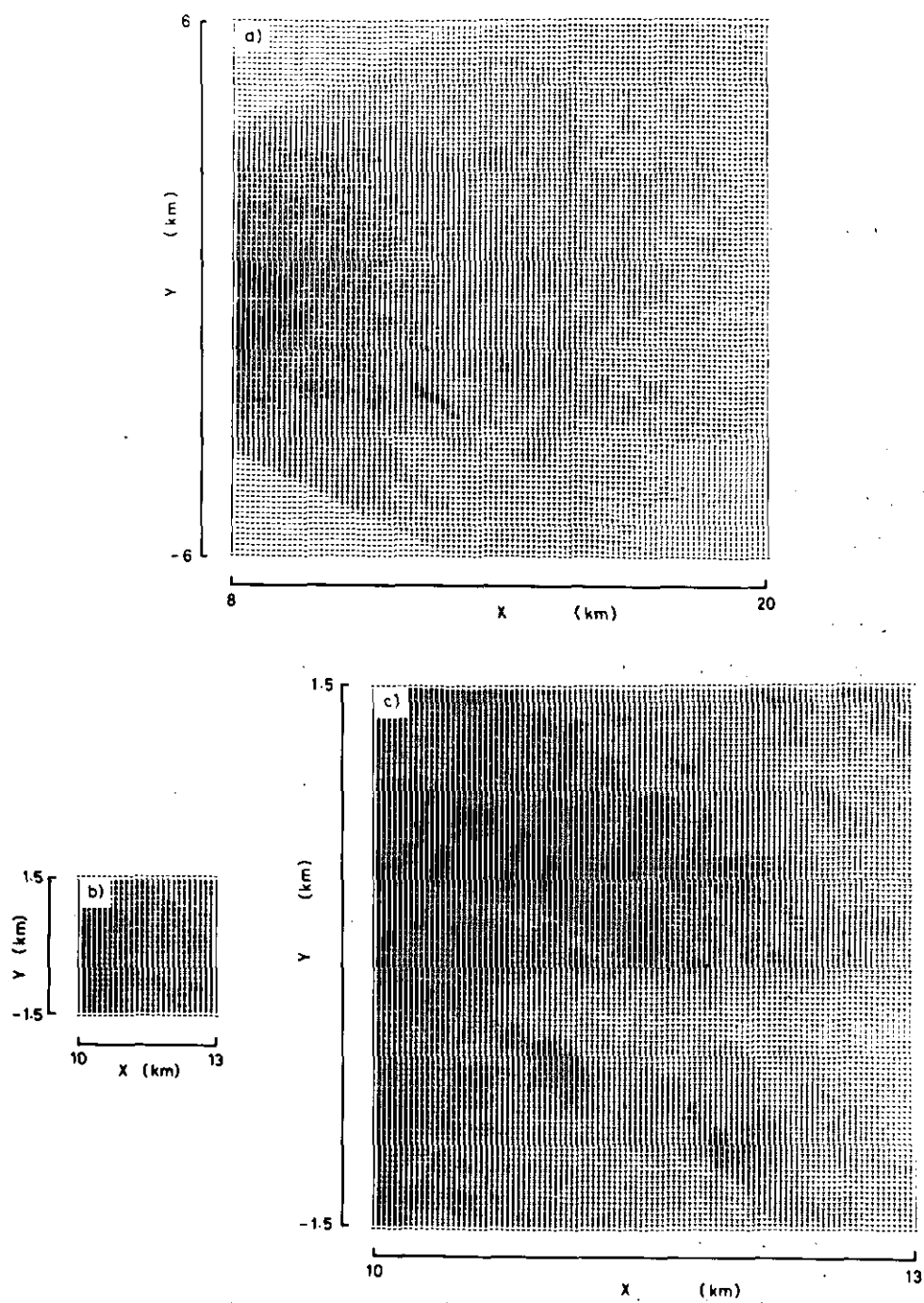


図6 a) データ処理・表示の例
 出力に係る設定値は表3を参照のこと。
 b), c) つづき

表3 画像出力例における設定値

	a)	b)	c)
出力領域	$X = 8 \sim 20\text{km}$ $Y = -6 \sim 6\text{km}$	$X = 10 \sim 13\text{km}$ $Y = -1.5 \sim 1.5\text{km}$	$X = 10 \sim 13\text{km}$ $Y = -1.5 \sim 1.5\text{km}$
出力エリア	100 × 100	25 × 25	100 × 100
レベルスライス			
初期値	0.0	0.0	0.0
増分値	0.25E9	0.25E9	0.1E10

処理する必要がある、MSS (マルチスペクトルスキャナー) データ処理における雑音除去の手法等、画像処理技術の適用を検討する必要がある。さらに、一般的な2次元画像としてのレーザーレーダーデータに適用できる合理的な減衰項の補正方法の開発が望まれる。

7. まとめ

本報告では、2次元画像として得られるレーザーレーダーデータの処理、表示手法について、国立公害研究所における開発状況の解説を行った。

レーザーレーダーで観測されるエアロゾル空間分布データの解析のために、観測されたデータから良質のデータを抽出し、目的としている内容を含んでいるかどうかを判断することが、まず必要とされる作業である。この作業は、表示された画像データをもとに、人間の判断を最も必要とするところであり、効率的な画像処理・表示が望まれる。

現在、国立公害研究所大型レーザーレーダーのデータ処理・表示においては、主に大型電算機のディスクとTSSターミナルを活用し、対話的な処理により、画質の判断、出力領域の設定、出力様式の設定を行っている。この方式により効率的なデータ処理が可能になっている。

引用文献

- 1) Masterson, J. E., J. L. Karney and W. E. Hoehne (1966): The laser as an operational meteorological tool. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **47**, 695-701.
- 2) Barrett, E. W. and O. Ben-Dov. (1967): Application of the lidar to air pollution measurements. *J. Appl. Meteorol.*, **6**, 500-515.
- 3) Allen, R. J. and W. E. Evans (1972): Laser radar (LIDAR) for mapping aerosol structure. *Rev. Sci. Instruments*, **43**, 1422-1432.
- 4) Collis, R. T. H. and E. E. Uthe (1972): Mie scattering technique for air pollution measurement with lasers. *Opt. Electron.*, **4**, 87-99.
- 5) Uthe, E. E. and R. J. Allen (1975): A digital real-time lidar data recording, processing and display system.

- Opt. Quantum Electron., 7, 121-129.
- 6) Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. *Opt. Quantum Electron.*, **12**, 159-167.
 - 7) McCormick, M. P. and W.H. Fuller, Jr. (1975): Lidar measurements of two intense stratospheric dust layers. *Appl. Opt.*, **14**, 4-5.
 - 8) McCormick, M. P. (1976): The use of lidar for atmospheric measurements. *Remote Sensing Energy Related Stud.*, 113-218.
 - 9) Russell, P. B., W. Veizee, R. D. Hake, Jr. and R. T. H. Collis (1976): Lidar observations of the stratospheric aerosol: California, October 1972 to March 1974. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **102**, 675-695.
 - 10) Russell, P. B. and R. D. Hake, Jr. (1977): The post-Fuego stratospheric aerosol: Lidar measurements, with radiative and thermal implications. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 163-177.
 - 11) Iwasaka, Y. (1977): The determination of the size distribution function of the stratospheric aerosols by two-color lidar. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **55**, 457-463.
 - 12) Itabe, T., M. Fujiwara and M. Hirono (1977): Temporal variation of the stratospheric aerosol layer after the Fuego eruption observed by lidar in Fukuoka. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **55**, 606-612.
 - 13) McCormick, M. P., T. J. Swissler, W. P. Chu. and W. H. Fuller, Jr. (1978): Post-volcanic stratospheric aerosol decay as measured by lidar. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1206-1303.
 - 14) Reiter, R., H. Jaeger, W. Carnuth and M. Littfass: Stratospheric aerosol layer monitored by lidar. *Remote Sensing of the Atmosphere*.
 - 15) Viezee, W., R. T. H. Collis and J. D. Lawrence, Jr. (1973): An investigation of mountain waves with lidar observations. *J. Appl. Meteorol.*, **12**, 140-148.
 - 16) Russell, P. B., E. E. Uthe, F. L. Ludwig and N. A. Shaw (1974): A comparison of atmospheric structure as observed with monostatic sounder and lidar techniques. *J. Geophys. Res.*, **79**, 5555-5566.
 - 17) Anfossi, D., P. Bacci and A. Longhetto (1974): An application of lidar technique to the study of the nocturnal radiation inversion. *Atmos. Environ.*, **8**, 537-541.
 - 18) Grams, G. W., E. M. Patterson and C. M. Wyman (1975): Airborne laser radar for mapping two-dimensional contours of aerosol concentration. *Opt. Quantum. Electron.*, **7**, 187-191.
 - 19) Grams, G. W. (1975): Optical techniques for probing the boundary layer. *Atmos. Tech.*, **7**, 50-59.
 - 20) Kunkel, K. E., E. W. Eloranta and S. T. Shipley (1977): Lidar observations of the convective boundary layer. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 1306-1311.
 - 21) Endlich, R. M., F. L. Ludwig and E. E. Uthe (1979): An automatic method for determining the mixing depth from lidar observations. *Atmos. Environ.*, **13**, 1051-1056.
 - 22) Coulter, R. L. (1979): A comparison of three methods for measuring mixing-layer height. *J. Appl. Meteorol.*, **18**, 1459-1499.
 - 23) Sasano, Y., H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda (1980): Diurnal variation of atmospheric planetary boundary layer observed by a computerized laser radar. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **58**, 143-148.
 - 24) Schotland, R. M., K. Sassen and R. Stone (1971): Observations by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors. *J. Appl. Meteorol.*, **10**, 1011-1017.
 - 25) Liou, K-N. and R. M. Schotland (1971): Multiple backscattering and depolarization from water clouds for a pulsed lidar system. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 772-784.
 - 26) Liou, K-N. (1972): On depolarization of visible light from water clouds for a monostatic lidar. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1000-1003.
 - 27) Pal, S. R. and A. I. Carswell (1973): Polarization properties of lidar backscattering from clouds. *Appl. Opt.*, **12**, 1530-1535.
 - 28) Sassen, K. (1974): Depolarization of laser light backscattered by artificial clouds. *J. Appl. Meteorol.*, **13**, 923-933.

- 29) Liou, K.-N. and H. Lahore (1974): Laser sensing of cloud composition; A backscattered depolarization technique. *J. Appl. Meteorol.*, **13**, 257–263.
- 30) Cohen, A. (1975): Cloud-base water content measurement using single wavelength laser radar data. *Appl. Opt.*, **14**, 2873–2877.
- 31) Sassen, K. (1976): Polarization diversity lidar returns from virga and precipitation; Anomalies and the bright band analogy. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 292–300.
- 32) Pal, S. R. and A. I. Carswell (1976): Multiple scattering in atmospheric clouds: lidar observations. *Appl. Opt.*, **15**, 1990–1995.
- 33) Derr, V. E., N. L. Abshire, R. E. Cupp and G. T. McNice (1976): Depolarization of lidar returns from virga and source cloud. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 1200–1203.
- 34) Pal, S. R. and A. I. Carswell (1977): The polarization characteristics of lidar scattering from snow and ice crystals in the atmosphere. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 70–80.
- 35) Allen, R. I. and C. M. R. Platt (1977): Lidar for multiple backscattering and depolarization observations. *J. Appl. Opt.*, **16**, 3193–.
- 36) Platt, C. M. R. (1978): Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates. *J. Appl. Meteorol.*, **17**, 482–488.
- 37) Hamilton, P. M. (1968): Lidar measurement of backscatter and attenuation of atmospheric aerosol. *Atmos. Environ.*, **3**, 221–223.
- 38) Viezee, W., E. E. Uthe and R. T. H. Collis (1969): Lidar observations of airfield approach conditions; an exploratory study. *J. Appl. Meteorol.*, **8**, 274–283.
- 39) Cohen, A. (1975): Horizontal visibility and the measurement of atmospheric optical depth of lidar. *Appl. Opt.*, **14**, 2878–2882.
- 40) Kreid, D. K. (1976): Atmospheric visibility measurement by a modulated cw lidar. *Appl. Opt.*, **15**, 1823–.
- 41) Murray, E. R., M. F. Williams and J. E. van der Laan (1978): Single-ended measurement of infrared extinction using lidar. *J. Appl. Opt.*, **17**, 265–299.
- 42) Bufton, J. L. and Ramakrishna S. Lyer (1978): Continuous wave lidar measurement of atmospheric visibility. *J. Appl. Opt.*, **17**, 265–271.
- 43) Uthe, E. E. and P. B. Russell (1974): Experimental study of the urban aerosol structure and its relation to urban climate modification. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **55**, 115–121.
- 44) Deluisi, J. J., P. M. Furukawa, D. A. Gillette, B. G. Schuster, R. J. Charlson, W. M. Porch, R. W. Fegley, B. M. Herman, R. A. Rabinoff, J. T. Twitty and J. A. Weinman (1976): Results of a comprehensive atmospheric aerosol-radiation experiments in the southwestern United States. Part I: Size distribution, extinction optical depth and vertical profiles of aerosols suspended in the atmosphere. Part II: Radiation flux measurements and theoretical interpretation. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 441–463.
- 45) Regan, J. A., J. D. Spinhirne and D. M. Byrne (1977): Atmospheric particulate properties inferred from lidar and solar radiometer observations compared with simultaneous in site aircraft measurements: A case study. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 911–928.
- 46) Russell, P. B., J. M. Livingston and E. E. Uthe (1979): Aerosol-induced albedo change: Measurement and modeling of an incident. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1587–1608.
- 47) Kent, G. S., F. Köpp and Ch. Werner, 1979: A joint lidar solar radiometer experiment. *J. Appl. Meteorol.*, **18**, 1649–1655.
- 48) Bacci, P., G. Elisei and A. Longhetto (1974): Lidar measurement of plume rise and dispersion at Ostiglia power station. *Atmos. Environ.*, **8**, 1177–1186.
- 49) Johnson, W. B. Jr. (1969): Lidar observations of the diffusion and rise of stack plumes. *J. Appl. Meteorol.*, **8**, 443–449.
- 50) Eckert, J. A., D. N. McNelis and E. L. Richardson (1979): Determination of point-source plume dimensions using a downwind looking airborne lidar. 9th ILRC., 259.
- 51) Hoff, R. M. (1979): Lidar Plume dispersion measurements during the Nanticoke environment study. 9th

ILRC. Proc., 258.

- 52) Hoff, R. M. and F. A. Fronde (1979): Lidar observation of plume dispersion in northern Alberta. *Atmos. Environ.*, **13**, 35-43.
- 53) Uthe, E. E. and W. E. Wilson (1979): Lidar observations of the density and behavior of the Labadie power plant plume. *Atmos. Environ.*, **13**, 1395-1412.
- 54) Uthe, E. E., Ludwig, F. L. and Pooler, F. Jr. (1980): Lidar observations of the diurnal behavior of the Cumberland power-plant plume. *J. Air. Pollut.*, **30**(8), 889-893.
- 55) Eloranta, E. W., J. M. King and J. A. Weinman (1975): The determination of wind speeds in the boundary layer by monostatic lidar. *J. Appl. Meteorol.*, **14**, 1485-1489.
- 56) Kunkel, K. E., E. W. Eloranta and J. A. Weinman (1980): Remote determination of winds, turbulence spectra and energy dissipation rates in the boundary layer from lidar measurements. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 978-985.
- 57) 清水・笹野・安岡・植田・竹内・奥田 (1981) : レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向・風速の遠隔的測定, 応用物理, **50**, 616 - 620.
- 58) Sasano, Y., H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1979): Geometrical form factor in the laser radar equation: An experimental determination. *Appl. Opt.*, **18**, 3908-3910.
- 59) 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.
- 60) Fernald, F. G., B. M. Herman and J. A. Reagan (1972): Determination of aerosol height distribution by lidar. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 482-489.
- 61) 清水 浩・笹野泰弘・安岡善文・松戸 修・竹内延夫・奥田典夫 (1981) : コンピュータによるレーザーレーダーデータの画像表示法, 電気通信学会論, **J 64-C**, 242 - 249.
- 62) Yasuoka, Y. and T. Miyazaki (1980): IPSEN - An image processing system for environmental analysis and evaluation. *Proc. of 5th Inter. Conf. on Pattern Recognition*.

Ⅲ-5

レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向、風速の遠隔的測定法*

清水 浩¹・笹野泰弘¹・安岡善文²・植田洋匡¹
竹内延夫¹・奥田典夫¹

Remote Measurement of Wind Direction and Velocity by
a Laser Radar Using the Spatial Correlation Technique*

Hiroshi SHIMIZU¹, Yasuhiro SASANO¹, Yoshifumi YASUOKA²,
Hiromasa UEDA¹, Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

上空大気の風の情報は、気象や大気汚染計測などの広範囲な分野で重要である。このため、遠隔計測の方法がしばしば用いられてきた。

この論文ではレーザーレーダー技術を使った新しい2次元の空間相関を利用する方法を提案する。この技術では、連続的に測定された平面的エアロゾルのパターンの相関が求められる。この方法は他の遠隔計測技術に比べて、空間的な風の情報が得られるということや雲などのような特別なトレーサーがなくても測定できるという点で利点がある。この方法の可能性を示すため、基礎的測定を行った。雲をここではトレーサーとして選んだ。結果によると、相関係数の最大値は0.88以上を示すことが判った。この結果は、相関が非常に安定であり、この方法が実際の応用に使用可能であることを示している。

Abstract

Information on the wind profile in the upper atmosphere is important for a wide range of meteorological and air pollution measurements. Remote sensing has frequently been used for this purpose.

This paper describes a new, two-dimensional, spatial correlation method using laser radar techniques in which sequentially-measured, planar aerosol patterns are correlated. The advantage of this method over other remote sensing techniques is that spatial wind information can be obtained and measurement can be made with-

* 本論文の大意は右記雑誌に発表。応用物理, 50, 616 (1981)

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

1. The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Tsukuba, Ibaraki 305

2. 同 環境情報部

2. ibid, Environmental Informaiton Division

out special atmospheric tracers such as clouds, etc. Fundamental measurements were made to demonstrate the feasibility of this method. A cloud was selected as a tracer. The results show that the maximum correlation factor is more than 0.88, which indicates that the correlation is very stable and that this method can be used.

1. はじめに

気象学の分野あるいは環境、公害問題の研究等において、大気境界層内の風の情報は必要欠くべからざるものである。とくに、大気汚染の予測や天気予報を行うに当たっては、地表付近のみならず、上空、あるいは広範囲に渡る立体的な風の情報が必要である。

従来気象観測で一般的に用いられてきた風向、風速の測器には、風杯型、風車型、超音波アネモメータ等がある¹⁾。これらはすべて直接測定のための測器で、空間内の一点の情報しか得られない。立体的な風の情報を得るためには、カイツーン、航空機等の測定プラットフォームが必要であり、それらの方法では使用上多くの制約がある。このような欠点を避けるためには、リモートセンシングの方法によらざるを得ない^{2), 3)}。

リモートセンシングの利点は、1) 遠隔的測定が可能であること、2) 状態を乱さずに測定が可能であること、3) 時間的にも空間的にも連続したデータが得られることなどである。

これまでに試みられた風向、風速のリモートセンシングによる測定法は次のように分類される。まず使用するエネルギー源からは電波^{3), 4)}、音波⁵⁾、および光^{6) 14)}を利用するものに分けられる。また測定のためのエネルギー源として人工のものを使用するか、自然に存在するものを使用するかの違いにより、アクティブとパッシブに分けられる。測定原理としてはドップラー効果を利用するもの(ドップラー法)^{3), 5), 6)}、大気のゆらぎによるシンチレーションを利用するもの(シンチレーション法)^{4), 7), 8), 9), 12)}、大気中に存在する浮遊物質等の散乱を利用してその相関をとる方法(相関法)^{10), 11), 12)}とがある。

相関法は、時間相関法と1次元の空間相関法とに分けられる。前者の例としては、Derr¹⁰⁾らおよびZuev¹¹⁾らにより提案されたバイスタティック型レーザーレーダーを利用し、各々のレーザーレーダーで観測されるエコーの時間的相関をとる方法がある。後者の例としては、Elorantaらが考案したレーザーレーダーエコーの1次元での変化の相関を求める方法¹²⁾、およびレーダーを用いる雲エコーの相関を求めるもの、あるいは、パッシブな方法として雲の衛星写真の相関を求めるもの¹⁵⁾などがある。

これらの方法の問題点を指摘すると以下のようなことが言える。

まずデータの量である。ドップラーおよびシンチレーション法では一点あるいは、測定区間内の平均風速のみが求められる。Elorantaの相関法では1次元の情報が得られる。そのため、これらの方法では、風向を含めた平面的な情報を得るのは原理的に不可能であるか、あるいは、非常に長い時間を要する。

つぎに汎用性について考察する。レーダーを利用する相関法では、トレーサーとして降雨性の雲

あるいは人工の散乱体が必要である。衛星写真でも同様に雲がない場合には測定不可能である。したがって、使用の可能性は非常に限られる。

さらに測定技術の点では、レーザーを使用するドップラー法は特に高度な技術が要求され、フィールドでの使用は困難である。

本論文では、雲エコーの相関を利用する方法および雲写真の方法の測定原理を基にして、Elorantaらの方法を2次元空間に拡張した新しい測定法を提案することを目的としている。この方法は、得られる情報が空間的な情報であるという点と、汎用性を有つと言う点で、従来のリモートセンシングによる方法に比較し、大いに利点がある。

ここでは、この測定法の原理と基礎的実験結果を示し、この方法の有用性を実証する。

2. 測定原理

大気中に浮遊する雲は、ほぼ大気と同じ速度で移動していることが確められている¹⁹⁾。したがってこれより粒径の小さなエアロゾルや浮遊粒子も大気速度で移動していると考えられる。風向、風速とは一般に大気の移動の方向と速度のことである。したがって、浮遊物質をトレーサーとしてその移動を測定すれば、風についての情報が得られる。浮遊物質は一般に空間的に不均一に分布している。この分布状態は、レーザーレーダーのようなアクティブなリモートセンサーにより捕えることが可能である。

この測定法の原理は、時間間隔を置いて上記の分布状態を測定し、その時間的变化から風向、風速の情報を得るものである。この原理を図に示して説明する。レーザーレーダーを高速度で掃引することにより、時間 $t=t_1$ および $t=t_2$ において、それぞれ図1のSCAN1およびSCAN2と示した分布状態が測定されたとする。この二つの分布状態は風により位置および形状が変化する。その変化の量を計算し、測定間の時間間隔で割れば、その結果がそのまま風の情報となる。この変化の量の計算に、相互相関法が使用可能であることから、この方式を相関方式と名付ける。こうして求められる情報としては次のようなものが挙げられる。

1) 測定平面全体の平均的な風向、風速：

SCAN1とSCAN2の分布状態全体の2次元相関を計算し、平行移動量を算出することにより求める。

2) 測定平面内の風向、風速分布（平面内のフローパターン）：

測定平面を細かい領域に分割し、それらの領域ごとの空間相関を計算することにより得る。

3) 測定平面内の風の空間スケールの周波数成分の分布：

測定された平面データに特定の空間周波数のフィルターをかけたうえ、上記の1)および2)の方法で相関を計算して求める。

さらに、空間相関関数自体の挙動、時間、空間相関関数などから、大気乱流の構造や拡散現象に関する多くの情報が得られる。

このように、本測定法から得られる情報は平面的あるいは立体的な分布の時々刻々の情報である。このような情報は大気乱流拡散の研究を飛躍的に発展させる可能性を持っている。当面の環境公害問題への応用にも極めて重要であり、とくに広域大気汚染の移流等の測定に対して、この測定法が有効に使用される可能性をもっている。

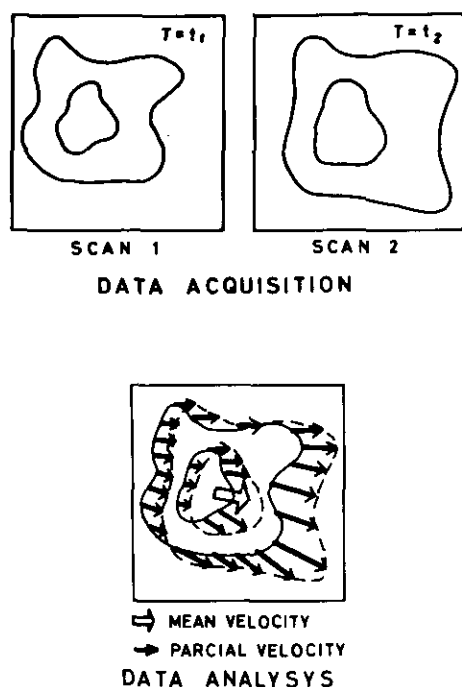


図1 風ベクトル測定法の原理

3. 測定

図2に使用したレーザーレーダー装置のブロック図を示す。また図1にその性能の概要を示す。ここで用いている装置はミー散乱を利用するモノスタティック型レーザーレーダーである。

この測定法において、とくに装置に要求される条件は高速度でのデータ収録が可能であるということである。そのため、この装置は高速繰り返し可能なレーザーと、高速掃引が可能なスキャナーと、高速のデータ入力に応答するデータ収録装置とを備えている。

さらに測定とデータ解析を容易にするため、装置全体がコンピュータでコントロールされている。

測定は高速でレーザービームを発射しながら、高速で架台を掃引し、平面的な散乱パターンを受信する。この過程を2回以上繰り返し行う。掃引を水平方向あるいは垂直方向に行うことにより、それぞれ風の水平分布、垂直分布が求められる。

ここでは最も基礎的な測定として、雲をトレーサーとした実験を行った。図3に1回の掃引によっ

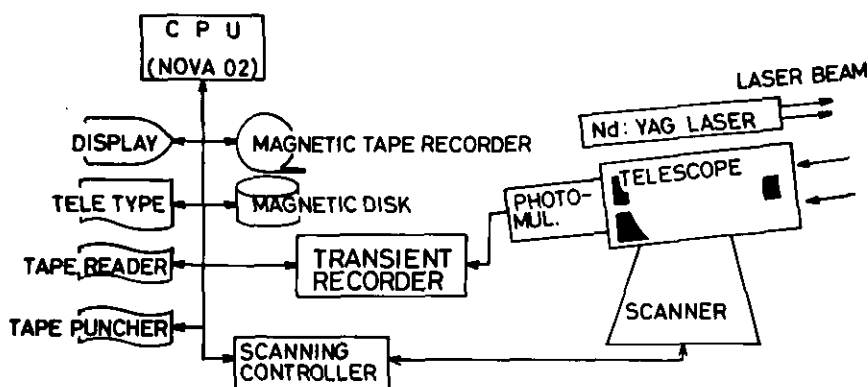


図2 測定に用いたレーザーレーダーシステムのブロック図

表1 測定に用いたレーザーレーダーシステムの仕様

レーザー LAY 117 (東芝)	
種類	Nd:YAG レーザー
波長	1.064 μm
出力	0.1 J/パルス
パルス幅	10 ns
最大繰返し	40 pps
望遠鏡	
型式	カセグレン型反射望遠鏡
口径	直径 30 cm
焦点距離	179 cm
前置増幅器 モデル 115 (PAR)	
バンド幅	DC ~ 50 MHz
増幅度	10, 100
トランジェント・レコーダー DM 901 (岩通)	
A/D変換時間	10 ns
精度	8 ビット
メモリー	1024 バイト/チャンネル
チャンネル数	2
感度	50 mV (フルスケール)

て得られたデータを示す。この測定では、仰角 25° で水平方向に掃引を行った。掃引速度は $1^\circ/\text{s}$ レーザーの繰返しは 10 pps である。測定を行った領域は図3の左下に示すように、レーザーレーダーの位置から 5.13 km と 7.05 km の区間で、掃引の角度幅は 12.8° である。1回の掃引に要した時間は 12.8 秒である。図3の中央には得られた雲のパターンを示してある。これは 128×128 個のデータをラインプリンタ上に打ち出したもので、散乱強度に応じて10段階にレベル分けしてある。

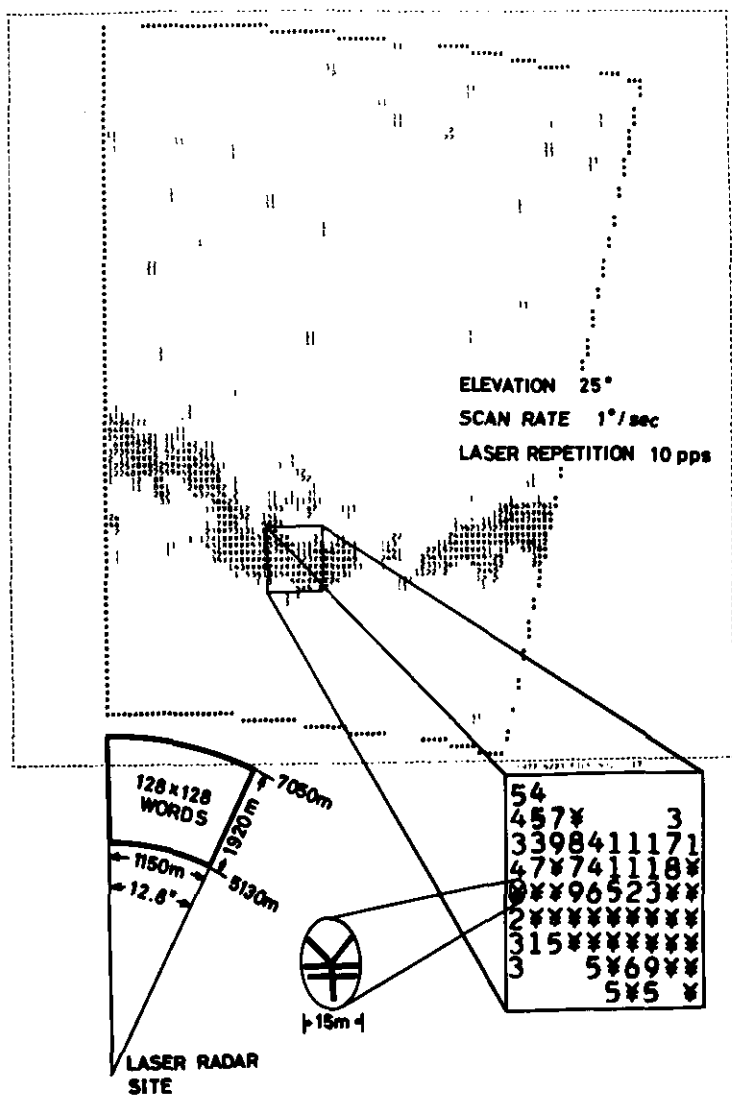


図3 1回の掃引によって測定された雲の空間分布図

すなわち、同図の右下に拡大図で示すように最も強度が弱い部分は数値の1で示し、最も強い部分は¥で表示している。また距離の分解は約15mである。

測定実験では上記の方法で54秒ごとに4回の掃引を行い相互の相関をとることにより、本測定法の実験的検証を行った。

4. データの解析と検討

測定結果から風の情報を求めるために次のような過程でデータ処理を行った。

1) 得られた生データに対する距離に関する補正と背景光による直流成分の除去⁷⁾

2) 座標変換

レーザーレーダーを掃引して得られる平面データはレーザーレーダーの位置を中心とする極座標系のデータである。相互相関係数等の演算には直交座標系が適しているので、内、外挿を施して座標変換を行う。なお図3は、ここまでの演算結果を示したものである。

3) 相互相関係数の計算

連続して測定した平面データ間の相互相関係数は次のようにして求められる。時間 $t=t_1$ と $t=t_2$ における掃引により得られたデータの2次元分布をそれぞれ $f_1(x_i, y_j)$, $f_2(x_i, y_j)$ とする。これらのデータ間の2次元の相互相関係数 $C(L_x, L_y)$ は次式で与えられる

$$C(L_x, L_y) = \frac{\sum_{i=L_x}^{N_x} \sum_{j=L_y}^{N_y} \{f_1(x_i - L_x, y_j - L_y) - \bar{f}_1\} \{f_2(x_i, y_j) - \bar{f}_2\}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2 (N_x - L_x + 1)(N_y - L_y + 1)} \quad (1)$$

ここで L_x, L_y はそれぞれ x 軸, y 軸方向のラグの大きさ, N_x, N_y はそれぞれ x 軸, y 軸の方向のデータ数である。また $\sigma_1, \sigma_2, \bar{f}_1, \bar{f}_2$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_1 = \left[\frac{\sum_{i=L_x}^{N_x} \sum_{j=L_y}^{N_y} \{f_1(x_i - L_x, y_j - L_y) - \bar{f}_1\}^2}{(N_x - L_x + 1)(N_y - L_y + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \left[\frac{\sum_{i=L_x}^{N_x} \sum_{j=L_y}^{N_y} \{f_2(x_i, y_j) - \bar{f}_2\}^2}{(N_x - L_x + 1)(N_y - L_y + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\bar{f}_1 = \frac{\sum_{i=L_x}^{N_x} \sum_{j=L_y}^{N_y} f_1(x_i - L_x, y_j - L_y)}{(N_x - L_x + 1)(N_y - L_y + 1)} \quad (4)$$

$$\bar{f}_2 = \frac{\sum_{i=L_x}^{N_x} \sum_{j=L_y}^{N_y} f_2(x_i, y_j)}{(N_x - L_x + 1)(N_y - L_y + 1)} \quad (5)$$

4) 相互相関係数の計算結果から風向, 風速の導出

2次元の相互相関係数の最大値を与えるラグの値 L_{xm}, L_{ym} が, 測定時間間隔の間のエアロゾル分布状態の変化量に相当する。ラグ当たりの平面上の距離を $\Delta x, \Delta y$ とすると x および y 軸方向の風速はそれぞれ

$$V_x = L_{xm} \cdot \Delta x / T \quad (6)$$

$$V_y = L_{ym} \cdot \Delta y / T \quad (7)$$

で求められる。

ここで3)の過程における計算において、全平面を対象とするかあるいは平面を分割した上で計算を行うかの違いおよび、 $f_1(x_i, y_j)$ $f_2(x_i, y_j)$ に数値フィルタを施すか否かにより2節の1) 2) 3)で述べた情報がそれぞれ求められる。

図4に以上の計算の過程を前節で得たデータに適用した結果を示す。なお、この計算では2節の1)で述べた平均風速を求めている。他の情報を得るための計算も同様の手順で行うことができる

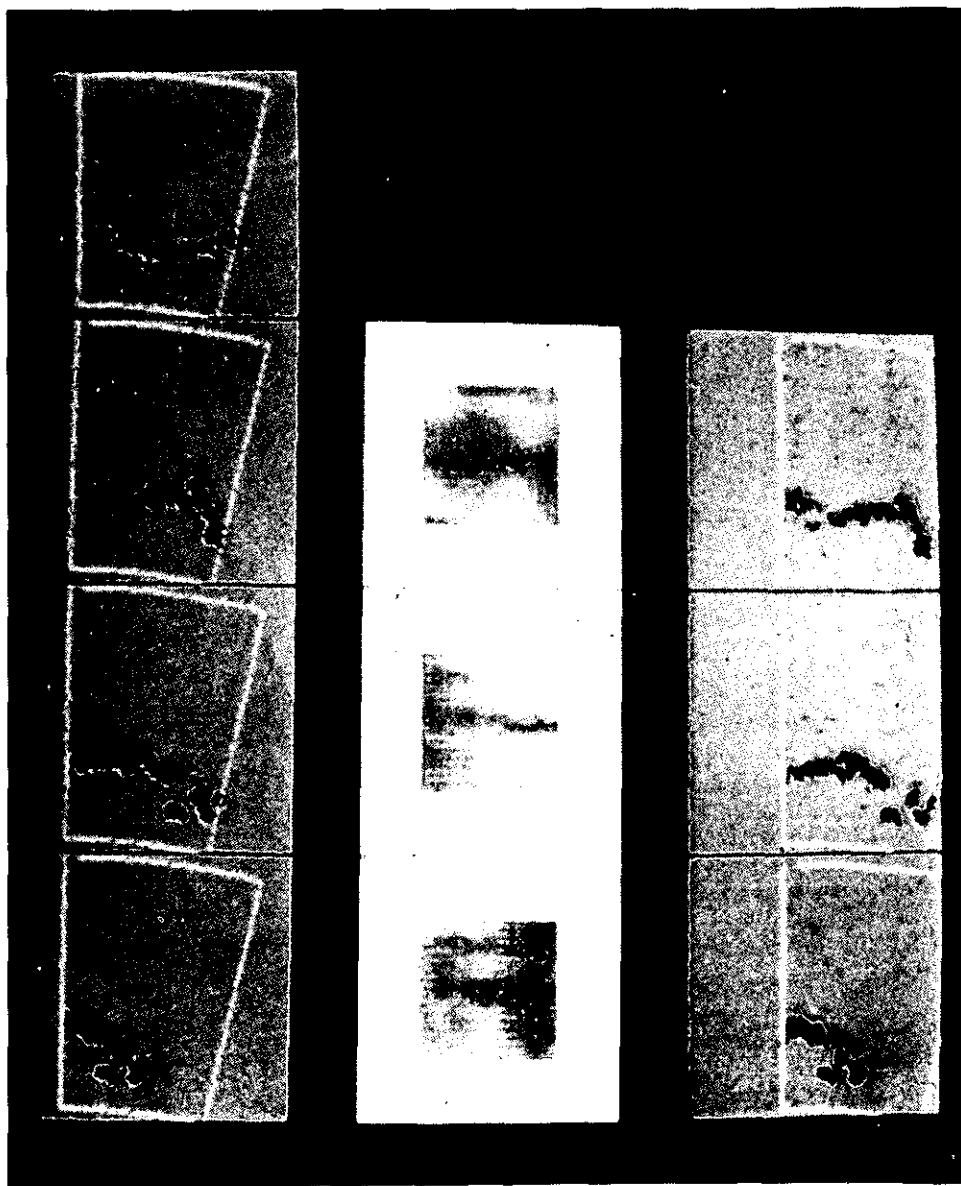


図4 風ベクトル導出法の過程

ため、ここでは省略する。図4において、左側の縦4枚の図は、3節で述べた方法にしたがって54秒ごとに測定した結果である。これらの図は上記の2)までの処置を施した計算結果である。図4の中央の3枚の図は4回の測定結果間の相互相関係数 $C(L_x, L_y)$ の計算結果である。この図では、 $C(L_x, L_y)$ の値の大きさを明度の濃さで表し、 x, y 座標をラグの大きさにとっている。なお、 x, y 軸の縦、横軸はラグ L_x, L_y であり、原点は図の中心である。原点から、図中の最も濃い点、すなわち $C(L_x, L_y)$ の最大値までの x, y 座標軸上の距離がそれぞれ L_{xm}, L_{ym} に相当する。また $C(L_x, L_y)$ の最大値は3枚の図の上からそれぞれ0.92, 0.91, 0.88と高い値を示している。

さらに同図の右側3枚は L_{xm}, L_{ym} の大きさだけ左側の図を移動させたものである。この図は分布状態の移動量を目視で判断することを可能とするために示したものであるが、右側の3枚の図を見比べて分かる通り、移動の大きさは良く一致している。

L_{xm}, L_{ym} より求めた風向はほぼ x 軸方向で風速は6.2 m/sであった。この結果は同時刻に付近の気象タワーの100 mの高度のところで測定した風速の値である6 m/sとよく合っている。

以上のように、この実験の結果からは、高い相関をもって風向、風速の計算が得られ、しかもその精度も実測と比較して信頼できるものと考えられる。しかし、この方式を定常的に使用するには次に示す通りの問題点も残されている。

- 1) ここでは雲をトレーサーとして測定を行ったが、この測定法を一般化するにはエアロゾルをトレーサーとする必要がある。
- 2) レーザー繰返し数、掃引速度、データ数等は任意に選択して測定したが、これらの値には風速や求めたい情報との関係から最適の条件を選ぶ必要がある。
- 3) トレーサーの動きと、風向、風速とは完全に一致するものと仮定しているが、地形等の関係で一致しない場合もある。したがってこの測定法の使用可能範囲について深く検討する必要がある。

5. まとめ

本論文では、レーザーレーダーを用いる新しい風向、風速の測定法についての提案を行った。この方式は、空間的な風の情報を気象条件にあまり左右されずに測定できることが従来のリモートセンシングの測定法にはなかった大きな利点である。そのために応用面、とくに大気汚染研究で最近問題となっている広い領域での移流や拡散の測定等に適用することができる。

本論文では雲をトレーサーとした測定実験と、そのデータを基にした風向、風速の導出を行い、この測定法が信頼性の高いものであることを示した。しかし、定常的に使用するにはなお幾つかの問題点が残されている。現在これらの点については実験的に検討中であり、それらの詳しい結果については別の論文に報告する。

引 用 文 献

- 1) 古濱洋治 (1976) : 大気のリモートセンシング. 電波研究所季報, **22**, 357.
- 2) 山本義一 (1979) : 気象学概論. 朝倉書店, p 83.
- 3) Baynton, H. W., R. J. Serafin, C. L. Frush, G. R. Gray, P. V. Hobbs, R. A. Houze, Jr. and J. D. Locatelli (1977): Real-time Wind Measurement in Extratropical Cyclones by Means of Doppler Radar. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1022-1028.
- 4) 中橋信弘 (1976) : 大気のアクティブマイクロ波センシング. 電波研究所季報, **22**, 501.
- 5) Kaimal, J. K. and D. A. Hanger (1977): An Acoustic Doppler Sounder for Measuring Wind Profiles in the Lower Boundary Layer. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1298-1305.
- 6) Michelangeli, G. B., F. Congeduti and G. Ficco (1972): Measurements of aerosol motion and wind velocity in the lower troposphere by doppler optical radar. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 906-910.
- 7) Lawrence, R. S., G. R. Ochs and S. F. Clifford (1972): Use of scintillation of measure araverage wind acroos a light beam. *Appl. Opt.*, **11**, 239.
- 8) Wang, T., S. F. Clifford and G. R. Ochs (1973): Wind and refractive - turbulence sensing using crossed laser beams. *Appl. Opt.*, **13**, 2602.
- 9) Ochs, G. R., S. F. Clifford and T. Wang (1976): Laser wind sensing: The effects of saturation of scintillation. *Appl. Opt.*, **15**, 403-408.
- 10) Derr, V. E. and C. G. Little (1970): A comparison for remote sensing of the clear atmosphere by optical, radio and acoustic radar techniques. *Appl. Opt.*, **9**, 1976-1992.
- 11) Zuev, V. E., Y. M. Vorevodin, G. G. Matvienko and I. V. Samokhvalov (1977): Investigation of structure and dynamics of aerosol in homogeneities in the groundlayer of the atmosphere. *Appl. Opt.*, **16**, 2231-2335.
- 12) Eloranta, E. W., J. M. King and J. A. Weinman (1975): The Determination of Wind Speed in the Boundary Layer by Monostatic Lidar. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1485-1489.
- 13) Clifford, S. F., G. R. Ochs and T. Wang (1975): Optical wind sensing by observing the scintillations of a random scence. *Appl. Opt.*, **14**, 2844-2850.
- 14) Hubert, L. F. and L. F. Whitney (1971): Wind Estimation from Geostationary - Satellite Pictures. *Jr. Monthly Weather Review*, **99**, 665-672.
- 15) 浜田忠昭 (1980) : 静止気象衛星「ひまわり」の画像からの風計算. 天気, **27**, 139 - 158.
- 16) H. Shimizu, Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for observing rapidly varying meteorological phenomena. *Opt. Quant. Electr.*, **12**, 159-167.

Ⅲ-6

単経緯儀法によるパイバル観測により得られる大気境界層中の
風向・風速値の時間・空間代表性

笹野泰弘¹・竹内延夫¹・奥田典夫¹

On the Temporal and Spatial Ranges of Validity of Wind
Data Obtained by Single-Theodolite Pibal Observations

Yasuhiro SASANO¹, Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

大気境界層内の風の情報を得るために、パイバル観測によることが多い。しかし、単一放球によるパイバル観測では測定値に時間的な代表性に欠けるという問題があることが、従来から指摘されている。本研究では時間代表性とともに、空間的な代表性について検討する目的で、同時多点におけるパイバルの連続放球の観測を行い解析した。観測は、一般に用いられることの多い単経緯儀法により行い、観測誤差の評価に基づき、実際の風速の時間的な変動の大きさを見積った。観測地点は一辺7.5 kmの正方形の4頂点で同時に行った。地点間の差は、風向・風速の平均値に見られるとともに、風速変動の大きさに顕著な差が認められた。

Abstract

Pilot balloon measurements are commonly used to obtain wind information within the atmospheric boundary layer. However, it has been pointed out that the average wind field can not be obtained by this single-release measurement. In order to examine the temporal, as well as the spatial ranges of validity of pilot balloon measurements in the atmospheric boundary layer, some field experiments were carried out. In these experiments, six pilot balloons were released sequentially every 10 minutes at four observation sites over flat terrain (7.5 km × 7.5 km). After correction for various errors (buoyancy error, angle error, time error, ascent rate error) in the wind data obtained, it was found that the wind speed fluctuation was about 0.5 m/s for an average wind speed of 1 ~ 2 m/s and about 2 m/s for an average wind speed of 6 m/s. The difference in the average wind speed, direction and especially wind speed fluctuation was also found between the four observation sites.

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

1. はじめに

最近、大気汚染物質の遠距離輸送に伴う大気汚染現象の広域化が問題となってきた。広域大気汚染の実態把握に関しては、測定上の困難さから、特別観測期間を設けて行う低層ゾンデ、カイッソン、パイバル、航空機等を用いた気象・大気汚染物質分布の総合調査¹⁾に依る他は、地上測定点における風や汚染濃度分布の解析に頼るしか方法がなかった。したがって、汚染物質の輸送の担い手である上空の風の情報を日常的に得るのが極めて困難であるというのが現状である。

夏の光化学スモッグの発生が予想される時期には、関東地方では何点かのパイバルによる上空の風の観測が実施されるが、広域移流を把握できるほどの密度の高い観測ではない。しかも、パイバル観測による風データには、その時間代表性に問題があることが指摘されている^{2,3,4,5,6)}。本論文では、この問題について実測を行い、そのデータをもとに検討を加えることを目的としている。

文字・水間⁷⁾、Mizuma⁸⁾によると、気球の実際の上昇速度と計画上昇速度との差のために、単経緯儀法で求めた風速には20数%に達する誤差が生じることが示されている。低層ゾンデを用いたレーウィンゾンデ観測や双経緯儀によるパイバル観測では気球高度がより正確に決定できるので、上昇速度の変動に起因する誤差は小さくなる。

問題はむしろ、大気境界層のようにスケールが小さく、寿命の短い現象に対して、パイバルのような単一放球によって評価される風速に代表性があるかという点にある⁹⁾。Mizuma⁸⁾は、多良間島における1 Run 7個の放球による双経緯儀を用いた観測から測定風速の標準偏差を評価した。これによると、風速3～9 m/sに対して、平均風速と個々の風速の差の標準偏差は0.5 m/s程度で、高度に依らない。この値から海上におけるパイバル観測の時間代表性に関する目安を得ることができる。

一方、空間的な代表性について検討することは、上層風測定の空間密度を考える上で重要である。問題の複雑さは、一放球観測による誤差、時間代表性と、空間的に離れていることによる現実の差との分離が難しいという点にある。

Mizuma⁸⁾は、海陸風の観測にあたって、海岸部と内陸部において、それぞれの地点で連続放球観測を行い、時間平均の風プロファイルを求めている。本研究においては、これと同様に、パイバルの連続放球観測により時間代表性のある風のプロファイルを得るとともに、観測地点を平坦地形上の近接する(7.5 km 間隔)4地点に設定し、空間的な差異の表れ方について検討を加える。

パイバル観測は、言うまでもなく、双経緯儀法による方が単経緯儀法に比べて観測誤差を小さくすることができる⁴⁾。しかし、現実的には、単経緯儀法でなされることが多い。本研究でも、単経緯儀法による観測を行った。

パイバル観測は、一辺7.5 kmの正方形の頂点をなす4地点において、1 Runに6個(10分間隔)の連続放球により行い、全部で4 Run(7^h, 9^h, 11^h, 13^h)を行った。

2. 観 測

観測は図1に示すA, B, C, Dの4地点において、1981年2月26日に実施した。

観測点付近は、標高差はせいぜい20~30mの平坦な地形であるが、この領域の東側には霞ヶ浦があり、北方約20kmには標高876mの筑波山がある。

パイバルの放球は7^h, 9^h, 11^h, 13^hの各Runにおいて、各点で10分ごとに行い、通常の単経緯儀法により気球の高度角、方位角を40秒ごと（最初の200秒は20秒ごと）に読み取り、記録した。風向・風速は地上1400mまで100mごとの高度において算出した。ここで、50mから100mまでの平均を100m高度の値、150mから200mの平均を200m高度の値、……とし、高度600m以上については、各高度の下100mまでの平均値を各高度の値とした。

気球は各Runの始まる前に必要な個数だけHeガスを充てん（上昇速度150m/分に浮力調節）しておき、10分ごとに放球した。

観測日は日本のはるか東方海上に発達した低気圧、大陸には高気圧があって冬型の気圧配置であった。観測地点では晴れで、日中、一時的に雲が多かった。

A地点の近くの3階建の建物の屋上（地上高13m）に4mのポールを立てて、そこで風向・風速の連続測定を行った。ペンレコーダー記録から10分間ごとの平均値を読み取り、図2に示した。ここで、平均値とは、プロットした時刻の前10分間の平均を意味している。これによると、11^h頃まで風は弱く1~2m/sであったのが、11^hを過ぎると強くなっていった。風向は7~9^hと13~15^h

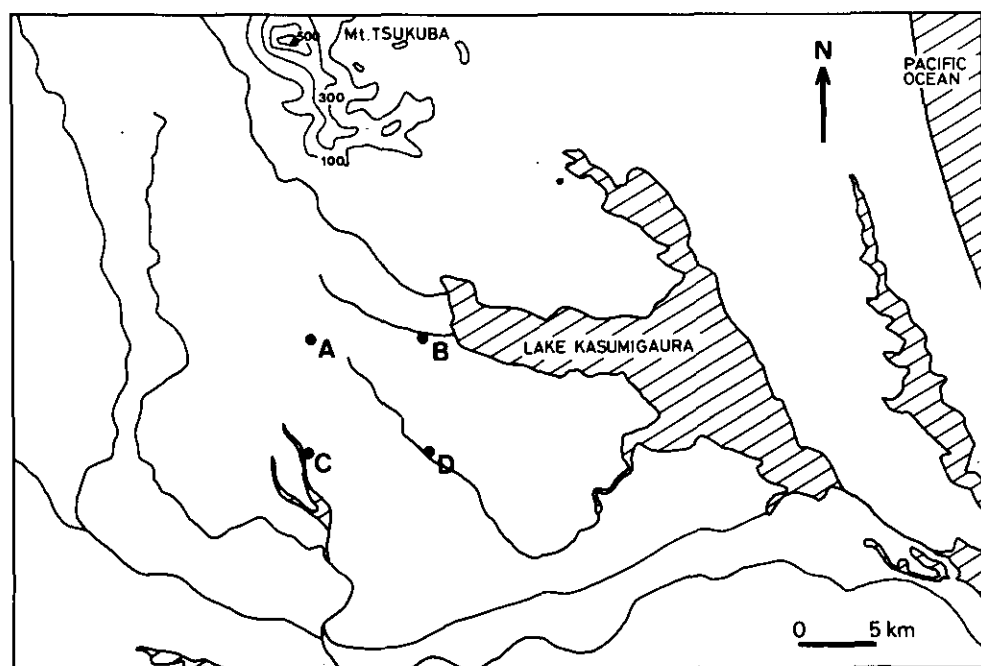


図1 パイバル観測地点

の間で変化は少ないが、その他の時間帯では変化が大きい。

低層ゾンデ観測による温位のプロファイルを図3に示す。接地層では10^h前後まで接地逆転がみられるが、その後、超断熱減率となっている。上層は全般に安定成層であるが、温位勾配は0.2%/100m程度で小さい。

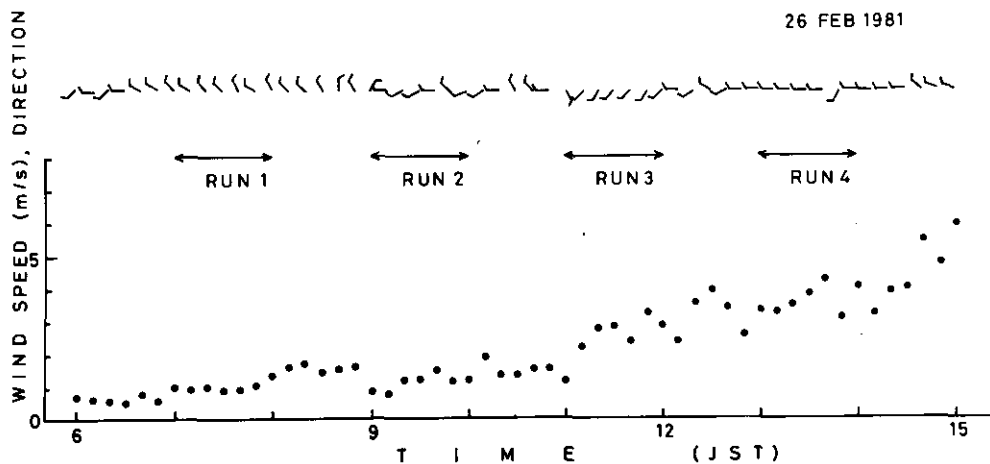


図2 10分間平均の風向・風速の時間変化
測定高度、地上17m

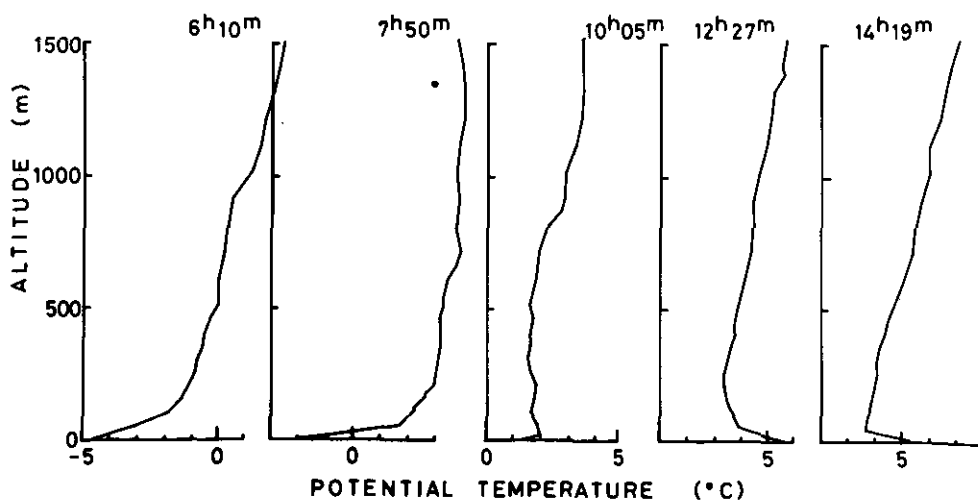


図3 低層ゾンデで測定された温位の鉛直分布

3. 観測結果

今回の解析の目的からすると、1 Run 中に風向・風速の系統的な変化は含まれていない方が望ましい。図2によると Run 2 では、10分間平均の風向に変化が大きく、Run 3 では風速が増大しつつある。これらを除いて、以下の解析には Run 1 と Run 4 の結果を用いることにする。

求められたスカラー風速は、Run ごと、地点ごと、高度ごとに平均値、標準偏差を次式により計算する。

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$$

$$\sigma_u = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

ここで、 u_i は i 番目の放球による測定値、 $\bar{u}$ 、 σ_u は平均風速と標準偏差である。 N は放球観測の回数で、欠測がない限り $N=6$ である。

風向については、各放球ごとに16方位で求め、これをもとに風速と同様に平均値と標準偏差を計算する。

図4、5に Run 1 と Run 4 の平均風速の鉛直プロファイルを描いている。図中の横棒は $2 \cdot \sigma_u$ を示している。

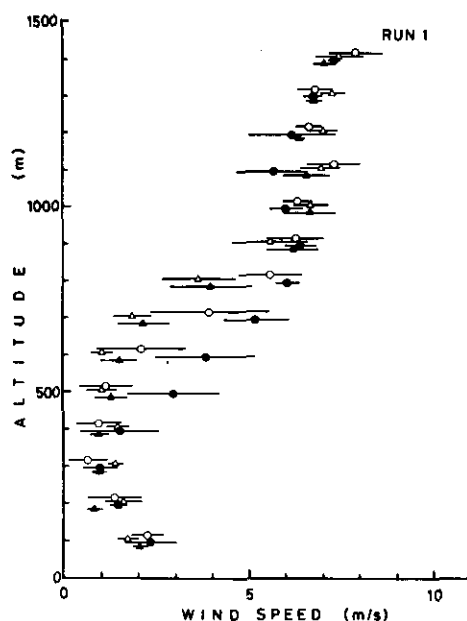


図4 パイバル観測で得られた地点ごとの平均風速の鉛直分布 (Run 1)

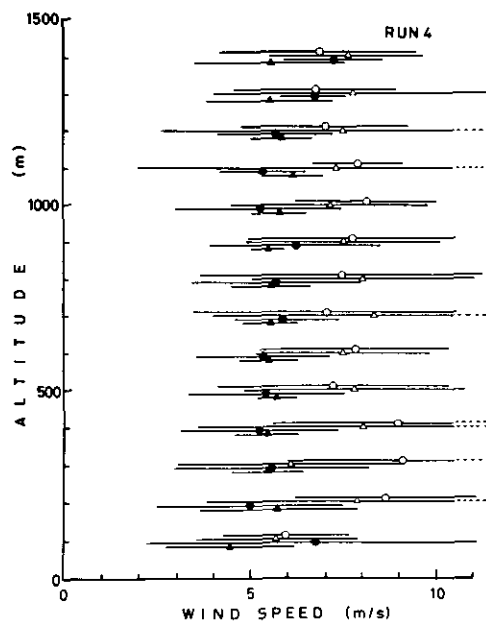


図5 図4と同じ。但し、Run 4。

記号は○：A点，△：B点，●：C点，▲：D点を表す。横棒は標準偏差の大きさを表す。

Run 1 では、平均風速は下層（0 - 500 m）で小さく、上層（900 - 1400 m）で大きい。中間層（500 - 800 m）では、地点間の差がみられる。Run 4 では、各地点とも全層に渡って一様な風速になっているが、A・B両地点（7 - 8 m/s）はC・D両地点（5 - 6 m/s）より大きい。

風速の標準偏差は、Run 1 では下層で、A・C両地点の値はB・D両地点に比べて大きい。上層では地点間の差は顕著ではない。平均的には0.6 m/s 程度であり、500 - 900 m間で、やや大きめの値となっている。Run 4 では地点間の差が大きく、 $D < C < A < B$ の順で σ_u が大きくなっている。全体の平均は2.3 m/s、地点別には、D点1.1 m/s、C点2.1 m/s、A点2.6 m/s、B点3.4 m/sである。各地点とも、高度への依存性はみられない。

図6、7に、風向について平均値と標準偏差の幅の鉛直プロファイルを描いている。Run 1 では、高度600 m以下で地点間の差が大きく、高度変化も特異である。標準偏差も下層で大きく3方位/16方位の風向変動が認められる。700 m以下では地点間の差はほとんどなく、標準偏差も小さい。

Run 4 では、600 m以下で平均風向に地点間の差（2方位/16方位）が認められる。標準偏差は1方位/16方位程度である。

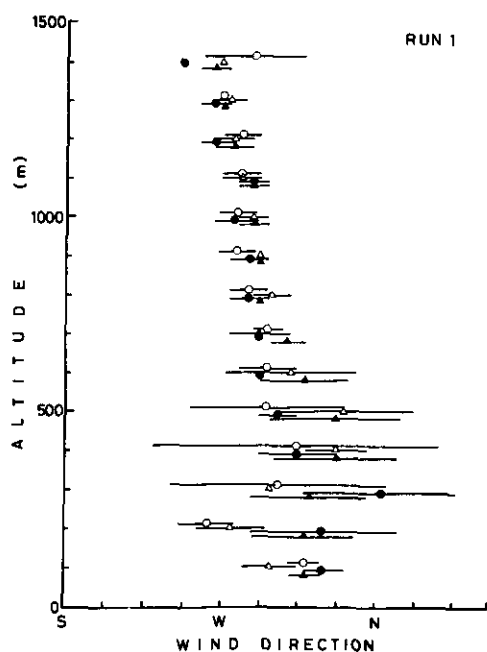


図6 図4と同じ。但し、平均風向の鉛直分布（Run 1）。

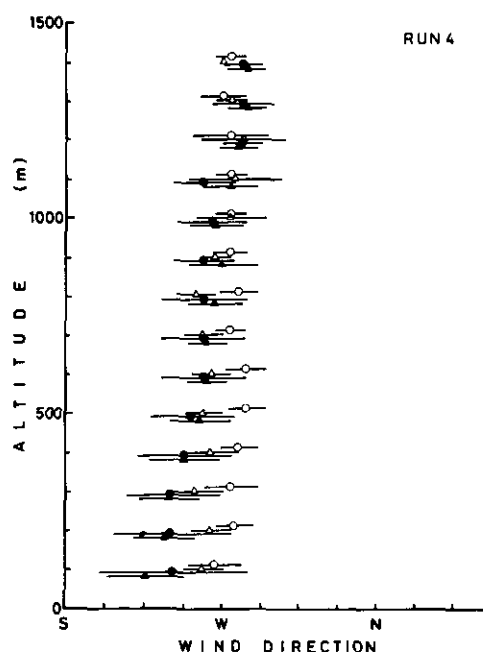


図7 図4と同じ。但し、平均風向の鉛直分布（Run 4）。

4. 風速測定誤差について

まず初めに、単経緯儀観測による観測誤差について議論する。考え得る誤差の要因は (i) 浮力調整の誤差, (ii) 角度読取誤差, (iii) 読取時間間隔の誤差, (iv) 上昇速度変動による誤差である。これらを平均風速 $\bar{u}$ に対する相対誤差として、それぞれ、 $\delta_b/\bar{u}$, $\delta_a/\bar{u}$, $\delta_t/\bar{u}$, $\delta_w/\bar{u}$ と表すことにする。

観測される風速の相対変動を $\sigma_u/\bar{u}$, 真の風速変動を $\sigma_0/\bar{u}$ と書くと

$$(\sigma_u/\bar{u})^2 = (\sigma_0/\bar{u})^2 + (\delta_b/\bar{u})^2 + (\delta_a/\bar{u})^2 + (\delta_t/\bar{u})^2 + (\delta_w/\bar{u})^2$$

の関係がある。

(i) 浮力調整の誤差 ($\delta_b/\bar{u}$)

付与浮力の誤差は計画上昇速度の誤差として現れる。気球の上昇速度が計画上昇速度より速い(遅い)場合、評価される風速は、風速に比例して小さく(大きく)なる。

気球の上昇速度は、浮力と空気抵抗のバランスの式から次式で与えられる。

$$w = k \frac{L^{\frac{1}{2}}}{(L+W)^{\frac{1}{3}}}$$

ここで、 w は上昇速度、 L は純浮力、 W は気球の自重である。空気抵抗係数はレイノルズ数 ($Re = \nu/aw$; ν は動粘性係数、 a は気球の直径) に依らないとすれば、 R は比例定数となる。この式から、浮力の誤差 ΔL の伝播は次式となる。

$$\left| \frac{\Delta w}{w} \right| = \frac{L+3W}{6 \cdot (L+W)} \left| \frac{\Delta L}{L} \right|$$

今回の観測では、 $L = 59.5 \text{ g}$, $W = 20 \text{ g}$ を使用して $w = 2.5 \text{ m/s}$ と設定している。仮に、10% の付与浮力の誤差があっても、上昇速度には3%の誤差として伝播するにすぎない。各Runの開始前に気球にHeを充てんし、放球するまでに最大で約1時間、放置されることになるが、Heがリークして浮力が変化したとしても、この変化による誤差は大きくないと考えられる。

Run 1 の結果では、上層と下層とでは風速は5倍くらい違うにもかかわらず、 σ_u は高度に依存していない。このことは、上昇速度差に起因する誤差は小さいことを意味している。浮力調整の方法は各Runを通して同様であるので他のRunにおいても、これによる誤差は小さいものと考えられ、したがって、

$$\delta_b/\bar{u} \lesssim 3\%$$

と見積もられる。

(ii) 角度の読取誤差 ($\delta_a/\bar{u}$)

単経緯儀で測定される気球の方位角 θ 、高度角 α から、次の式により風速が計算される。

$$X_n = H_n \cot \alpha_n \sin \theta_n$$

$$U_n = (X_n - X_{n-1})/Dt$$

ここで、 X は気球の x 方向の水平飛距離、 H は計画上昇高度から求めた気球の高度、 u は風速の x 成分、添字 n 、 $n-1$ は n 番目、 $n-1$ 番目の読取時の値を意味し、 Dt は読取時間間隔である。

いま、 X_n と X_{n-1} との間に系統的な誤差はないものとする、風速の評価誤差 Δu_n は、

$$|\Delta u_n| \simeq 2 |\delta X_n|/Dt = 2 H_n [\operatorname{cosec}^2 \alpha_n \sin \theta_n |\delta \alpha_n| + \cot \alpha_n \cos \theta_n |\delta \theta_n|]/Dt$$

ここで、 $\delta \alpha_n$ 、 $\delta \theta_n$ は高度角、方位角の読取誤差で、互いに相関はないと考える。これによると、 $Dt = 40$ s、 $H_n = 1000$ m とすると、読取誤差が 0.1° のとき風速の相対誤差 $\delta_a/\bar{u}$ はおよそ次のようになる。

$$\delta_a/\bar{u} \lesssim 8\% \quad (\text{地上から } H_n \text{ までの平均風速が } 4 \text{ m/s のとき})$$

$$\delta_a/\bar{u} \lesssim 12\% \quad (\text{地上から } H_n \text{ までの平均風速が } 8 \text{ m/s のとき})$$

気球の上昇速度より風速が大きいときには、風速は小さい程、誤差は小さくなるが、さらに風速が小さくなると逆に誤差は大きくなる。高度は低い程、誤差は小さい。

(iii) 読取時間間隔の誤差 ($\delta_t/\bar{u}$)

前出の式からも明らかな通り、時間間隔の相対誤差は評価風速の相対誤差に等しい。 $Dt=20\sim40$ s のとき、誤差は高々 5% 以下であろう。すなわち、

$$\delta_t/\bar{u} \lesssim 5\%$$

(iv) 上昇速度変動による誤差 ($\delta_w/\bar{u}$)

気球は鉛直風速の乱れの影響で、計画上昇速度に対してランダムな鉛直速度が重畳されることが考えられる。

気球の上昇速度の計画値からのランダムなずれは、風速の評価値に対して、次の二つの誤差をもたらす。一つは気球を放球してから一定時間が経過したときの気球の高度が計画された高度からずれているために、予定した高度でないところの風速を測定することによる。他の一つは、1 読取時間間隔の間の上昇高度差が計画値からずれるために起きる誤差である。今、1 読取時間間隔内の計

画上昇高度差に対して、上昇速度の変動による上昇高度差の相対的なずれを ε とすると、評価風速は実際の風速の $1/(1+\varepsilon)$ 倍となり、誤差はおおよそ ε となる。

今、乱れのない場の中では一定の上昇速度で上昇する粒子を、一様な乱れの場合の中においた場合の単一粒子の拡散として考えよう。上昇速度、粒子の高度ともに、平均的には乱れのない場合に一致する。個々の粒子について、上昇速度、高度の平均値に対する標準偏差値を $\tilde{\sigma}_w$, σ_z と書き、Lagrange 的な自己相関関数を $R^{(L)}(\tau)$ とするとき、次の関係がある⁹⁾。

$$\sigma_z^2 = 2\tilde{\sigma}_w^2 \int d\tau (t-\tau) R^{(L)}(\tau)$$

ここで、 $T_L \equiv \int_0^\infty d\tau R^{(L)}(\tau)$ で定義される時間のスケールを用いると $t \gg T_L$ のときには、

$$\sigma_z \approx \sqrt{2\tilde{\sigma}_w^2 T_L \cdot t} \quad (1)$$

また、 $t \lesssim T_L$ のときには、

$$\sigma_z \approx \tilde{\sigma}_w t \quad (2)$$

となる。

気球の上昇の場合にあてはめるために、Eulerian integral length scale を Λ_z とし、気球の平均上昇速度を $\bar{w}$ とすると、

$$T_L = \Lambda_z / \bar{w}$$

で近似できると考えられる。さらに、 $\Lambda_z \sim kz$ ($k = 0.4$: カルマン定数) とすると、 $\bar{w} = 2.5 \text{ m/s}$, $z = 500 \text{ m}$ に対して、 $T_L \approx 80 \text{ s}$ を得る。したがって、放球後、ある程度の時間が経過したときの気球の高度の計画高度からのずれは (1) 式で表される。一方、1 読取時間間隔内の上昇高度差の計画値からのずれは (2) 式で表される。但し、ここで t は読取時間間隔である。読取時間間隔に比べて、 T_L が小さい場合には、式 (1) が適用され、式 (2) の場合より σ_z は小さくなる。

鉛直風速の乱れに対する気球の動きの応答性は明らかではないが、上昇速度の変動は、鉛直風速の標準偏差 σ_w と同程度になると考えられる。

鉛直風速の標準偏差 σ_w と水平風速 $\bar{u}$ との比は、大気安定度や高度にも依るが、安定時 0.05、中立時 0.1、不安定時 0.3 程度である⁸⁾。したがって、安定のとき、風速 5 m/s に対して $\sigma_w = 0.25 \text{ m/s}$ で、これは計画上昇速度の 10%、中立のときには $\sigma_w = 0.5 \text{ m/s}$ で 20% に達することが分かる。

単経緯儀法では気球の高度を正確に求められず、評価風速の最大の誤差要因となっている。前に示した温位プロファイルの測定に用いた低層ゾンデ観測のチャート記録から、タイムマーク (27 秒間隔) ごとの高度を計算し、低層ゾンデの上昇速度の変動を調べた。その結果をとりまとめて表 1 に示している。なお低層ゾンデは、601 g の浮力を付与し、毎分 200 m の上昇速度に設定している。

表1 低層ゾンデの上昇速度変動 (m/s)

時刻	高度		
	100 - 500m	600 - 1000m	1100 - 1400m
6 ^h 10 ^m	0.25 (4)	0.44 (6)	0.61 (7)
7 ^h 50 ^m	0.40 (6)	0.16 (6)	0.97 (4)
10 ^h 05 ^m	0.75 (5)	0.43 (7)	0.47 (3)
12 ^h 27 ^m	0.73 (6)	0.69 (4)	— (1)
14 ^h 19 ^m	1.08 (4)	— (1)	0.79 (3)

表2 各 Run におけるパイバル上昇速度の相対変動の推定値

Run	時間帯	$\tilde{\sigma}_w$	$\tilde{\sigma}_w/w$ ($w = 2.5 \text{ m/s}$)
1	7 - 8 ^h	0.30	0.12
2	9 - 10 ^h	0.50	0.20
3	11 - 12 ^h	0.65	0.26
4	13 - 14 ^h	0.80	0.32

表中の数字は、各放球ごとの平均の上昇速度に対する各高度区間ごとの標準偏差値である。データ数 (表中、カッコ内の数字) は少ないが、時間変化の傾向を読み取ることはできる。これから、パイバル観測の各 Run の時間帯に相当する上昇速度の変動 $\tilde{\sigma}_w$ を求めると、表2となる。低層ゾンデの上昇速度の変動 $\tilde{\sigma}_w$ が、パイバルの上昇速度の変動に等しいものと仮定すると、パイバルの上昇速度の相対変動 $\tilde{\sigma}_w/w$ は表の最右欄の値となる。

一上昇中の上昇速度の変動については、文字・水間⁷⁾に記されており、上昇速度 (平均2m/s) の相対変動は20数%に達するという。これは表2の結果と矛盾しない。

上昇速度の変動に起因する誤差のうち前者 (式 (1) で表される) は、放球後 200 秒の計画高度 500m に対して、Run 1 で 54 m Run 4 で 143 m となる。後者については、

$$\varepsilon = \frac{\tilde{\sigma}_w \cdot t}{w \cdot t}$$

であるから上昇速度の相対変動は、測定風速の相対誤差 $\delta_w/\bar{u}$ として伝播する。したがって、

$$\delta_w/\bar{u} \cong 12\% \quad (\text{Run 1})$$

$$\delta_w/\bar{u} \cong 32\% \quad (\text{Run 4})$$

と考えることができる。

前者の誤差は風速分布にするどい鉛直シアがあるところで影響が大きく、例えばRun 1の500～800 m 付近の観測された風速変動が大きいことの理由の一つであると考えられるが、以下の議論では、この誤差については考慮しないことにする。

(V) 測定誤差を除いた実際の風速変動

以上の (i) ～ (iv) の誤差の評価をとりまとめると次のようになる。

$$(\sigma_u/\bar{u})^2 = (\delta_b/\bar{u})^2 + (\delta_a/\bar{u})^2 + (\delta_t/\bar{u})^2 + (\delta_w/\bar{u})^2 + (\sigma_0/\bar{u})^2$$

$$\begin{array}{ccccccc} 9 \times 10^{-4} & 6.4 \times 10^{-3} & 2.5 \times 10^{-3} & 1.4 \times 10^{-2} & & & \\ & \downarrow & & \downarrow & & & \\ & 1.4 \times 10^{-2} & & 1.0 \times 10^{-1} & & & \end{array}$$

各項の大きさを式の下に書いている。Run 4 では、図2に示した10分間平均の地上風速は時間とともに増加する傾向にある。このトレンドの影響を見るために12時から15時までの平均風速の変化を直線近似すると風速の増加率は0.54 m/s/h となる。これによる相対的な風速変動は右辺第5項 $(\sigma_0/\bar{u})^2$ の項に含まれているが、その大きさは 2.0×10^{-3} 程度であり、他の誤差の項に比べて寄与は小さい。これから分かるように、測定誤差の大部分は上昇速度の変動に起因するものである。第1項から4項までの和は、Run 1 で 2.3×10^{-2} 、Run 4 で 1.1×10^{-1} の値をとる。

図8、9に測定された風速の相対変動 $(\sigma_u/\bar{u})^2$ をプロットしている。Run1では、高度900 m 以上で測定誤差の評価値と同程度か、それより小さい。800 m 以下では、地点によって異なっているが、測定誤差に比べて、いずれの地点でも大きい。実際の風速変動の存在を意味している。但し、平均風速そのものは小さいので、風速変動の絶対的な大きさは小さく、0.5 m/s 程度である。

Run 4 では、D点は特異な値を示し、評価された測定誤差の自乗、 1.1×10^{-1} に比べて、測定風速の変動 $(\sigma_u/\bar{u})^2$ は極めて小さい。その他の地点では、 $(\sigma_u/\bar{u})^2$ は測定誤差を上回っており、実際の風速変動の存在を示している。 $(\sigma_0/\bar{u})^2$ の大きさは0.05～0.2の程度である。 $\bar{u} \approx 6$ m/sであることを考慮すると、 σ_0 の大きさは1.3～2.7 m/s となり、風速変動の絶対値はMizuma⁵⁾の値に比べて大きい。

5. 考 察

平均風速に対する相対的な測定誤差はRun 1で15%、Run 4で33%におよぶことが、前節で示された。単経緯儀法による観測では基本的にこれらの誤差は避けられない。そこでパイバル観測から観測誤差を考慮して求めた風速変動と、放球地点A点の北東約350 mの地点にある気象観測用鉄塔(高さ213 m)におけるエアロベーンの連続観測記録(図10)により求めた値とを比較する。

Run 1 (7^h - 8^h) においては、短周期の変動はほとんどなく、風速は若干、増加の傾向にある。これを前と同様に直線近似して、変動の相対値を計算すると、 $\sigma_0/\bar{u} \approx 0.31$ となり、風速変動の絶対値は0.4 m/s 程度である。

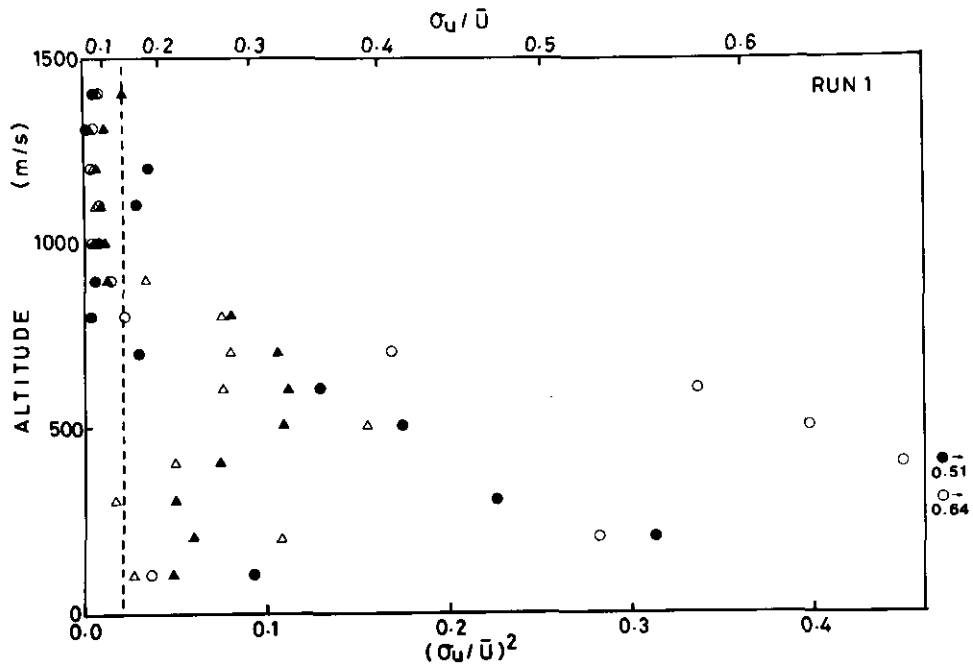


図8 観測された風速変動の相対値 (Run 1)
記号は図4と同じ。点線は評価された測定誤差の大きさ。

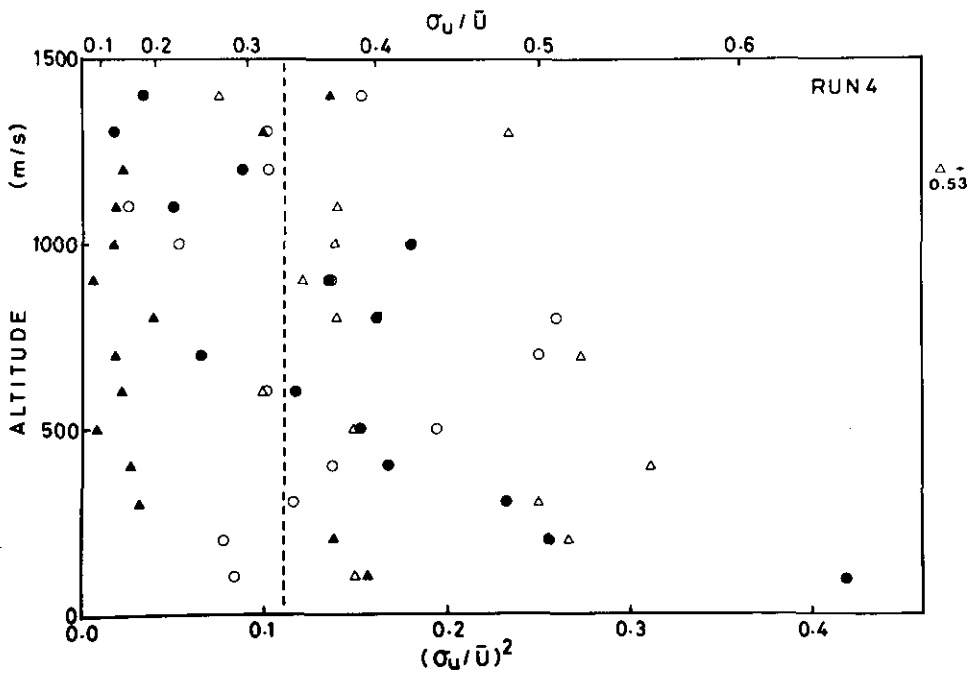


図9 図8と同じ。但し、Run 4。

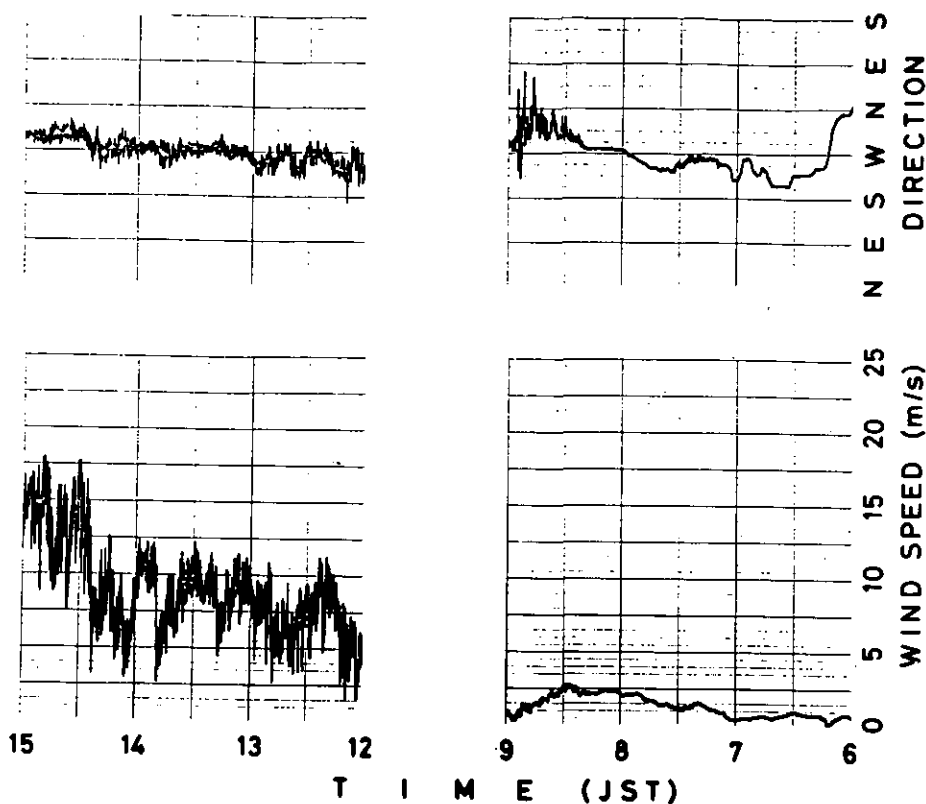


図10 気象研鉄塔で測定された風向・風速の連続記録
測定高度は200 m。

Run 4 (13^h - 14^h) の風速変化を見ると、短周期の変動の他に、20~30分程度の周期を持つ振幅の大きな変動が重なっている。この変動は鉄塔の他の高度 (200, 150, 100, 50, 25, 10m) でも、すべて同期して現れており、少なくとも、この程度の周期の風速変動が境界層全体に亘って起きていると考えられる。この変動による風速の最大・最小値は、それぞれ 12.5 m/s, 2.5 m/s 程度である。これを $3\sigma_0$ に等しいとみなすと、 $\sigma_0 \simeq 3.3$ m/s となる。これら (Run 1, Run 4) の値は、前節で求めた値と矛盾しない。

時間代表性という観点からは、Run 1 においては、上層では測定された風速の相対変動は評価された測定誤差にうずもれてしまって、真の変動成分の有無を確認できないために、時間代表性を議論することはできない。しかし、少なくとも測定誤差程度の時間代表性を、単一放球観測でも有していると言える。Run 1 の場合、下層では風速が弱いために、風速変動の相対値は大きい、絶対値は小さい。

Run 4 では測定誤差の見積り値33%に対して、実際の風速変動の相対的な大きさは22~45%と見

積られた。仮に双経緯儀法等で測定誤差を減らせるとしても、実際の風速変動のために、単一放球観測では時間代表性のある値を得ることは難しい。

平均風速の地点間の差は Run 1 ではあまり大きくないが、Run 4 では A・B 地点と C・D 地点とでは約 35%、前者の方が大きい。Run 4 における風向を考慮すると、B、A、D、C の順で霞ヶ浦に近いことから、地表面の非一様性の影響を受けている可能性は考えられる。

Run 4 では平均風速の地点間の差は明らかに存在すると思われるが、測定された風速変動の大きさは、この地点間の差を十分に上回っている。また、測定誤差を考慮して実際の風速変動を考えても、地点間の差と同程度の大きさであり、単一放球で地点間差を把握することは難しい。

風向については、Run 1 の下層の弱風域で風向変動、地点間差が大きい。弱風時は風向自体が不安定であるし、測定誤差も大きい。弱風時のパイバルによる風向データは、ほとんど意味をなさないと考えてよい。

その他のとき、測定された風向変動は、16 方位に対して Run 1 では 1 方位以下、Run 4 で 2 方位以下である。平均風向の地点間差は Run 1 の弱風域で大きい他は、Run 4 の下層で最大 2 方位程度である。

謝 辞

貴重なデータを提供して下さい下さった気象研究所鉄塔運営委員会に対し、感謝致します。また、有益な助言を頂いた植田洋匡大気環境計画研究室長、日本気象協会東京本部山崎哲夫氏に感謝します。

引 用 文 献

- 1) 齊藤直輔 (1977) : マクロに見た大気境界層 (南関東大気環境調査から). 天気, 24, 431 - 447.
- 2) 光田 寧 (1972) : プラネタリー境界層の計測方法. 天気, 19, 664 - 647.
- 3) Mizuma, M., S. Iwamoto, H. Sano and T. Takahashi (1971): Observations of wind profile at Research Reactor Institute, Kyoto University (II). Ann. Repts. Res. Reactor Inst., Kyoto Univ., 4, 144-152.
- 4) Mizuma, M. and M. Kakuta (1974): An observational study on land and sea breezes in the Tokai village area. J. Meteorol. Soc. Jpn., 52, 417-427.
- 5) Mizuma, M. (1976): An observational study of wind structure in the planetary boundary layer at Tarama Island. Ann. Repts. Res. Reactor Inst., Kyoto Univ., 9, 78-89.
- 6) Mizuma, M. (1980): Comparison between pilot-balloon observation and tower measurement of wind. Ann. Repts. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ., 13, 85-91.
- 7) 文字信貴・水間満郎 (1976) : 風, 温度, 湿度及び乱流輸送量の測定. 気象研究ノート, 130, 19 - 52.
- 8) Lumley, J. L. and H. A. Panofsky (1964): The structure of atmospheric turbulence. John Wiley & Sons, Inc. 239.
- 9) Hinze, J. O. (1975): Turbulence (Sencond edition) McGraw Hill, 790.

Ⅲ-7

スキャンニングレーザーレーダー観測による空間相関法を用いた
水平風ベクトルの決定

笹野泰弘¹・広原寿英²・山崎哲夫²・清水 浩¹
竹内延夫¹・奥田典夫¹

Horizontal Wind-Vector Determination from the Displacement of Aerosol
Distribution Patterns Observed by a Scanning Laser Radar

Yasuhiro SASANO¹, Hisahide HIROHARA², Tetsuo YAMAZAKI²,
Hiroshi SHIMIZU¹, Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

スキャンニングレーザーレーダーで観測されるエアロゾル分布パターンの空間移動を2次元空間相関計算により求め、風ベクトルを算出する方法を、先に筆者らは提案した。この方法を実際のレーザーレーダー観測データに適用する場合には、有限のスキャン速度のために観測されたエアロゾル分布パターンは歪み、風ベクトル計算に誤差を生じる。そこで本論文では反復計算による歪補正法を提案し、モデル計算でその有効性を確かめる。さらに、レーザーレーダー観測を実施し、4 km × 4 km の正方形領域に対して歪補正を含む相関計算を行い、風ベクトルを求めた。この結果は50 m と 100 m 高度に設置したエアロベーンによる風向・風速値と比較したところ、良好な一致を見た。

Abstract

In a previous paper, the authors proposed a new method for obtaining wind speed and direction in the atmospheric boundary layer from the aerosol distribution pattern displacement observed by a scanning laser radar. The principle is similar to the pattern-matching method for the pictures of cloud distribution by satellite measurements. The difference is that the aerosol distribution pattern is obtained by a scanning laser radar with a scanning speed close to the wind speed. Because of the difference in the speeds often not so high compared, the observed aerosol distribution pattern is distorted from the real distribution pattern leading to error in the

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

wind vector estimation. The present paper proposes an iterative method to correct for this distortion and shows the validity of the method by model calculations.

Measurements of aerosol distribution patterns for an area 4 km x 4 km were carried out to derive wind vectors by iterative correction and pattern matching. Comparison of the derived wind vectors with wind data obtained by aerovane measurement on a meteorological tower showed good agreement. This method can be extended to obtain a wide-area wind field by subdividing the area into smaller regions.

1. はじめに

大工業地帯や大都市などの大発生源から排出された各種汚染質は、排出源近傍において直接的な汚染をもたらすだけでなく、季節・気象条件および地域特有の風系構造によって、光化学反応等の化学反応を伴いながら、遠距離を輸送される。その結果、煙源から数10km離れた地点において大気汚染の被害をもたらすなど、大気汚染現象の広域化が問題となっている¹⁾。

遠距離輸送現象の解明にとって必要な広域の風系構造の解明には、南関東大気環境調査等の大規模な総合調査が行われているが、特別観測期間だけの実態把握にとどまらざるを得ない。夏の光化学スモッグの発生が予想される時期には、関東地方では何点かのパイバルによる上空の風の観測が実施されるが、時間・空間代表性の点から実際の汚染質の輸送、あるいは上空の風系構造を把握するのは、やはり困難な状況にあるというのが現状である。

基本的に、従来からなされている上空の風の観測（鉄塔や煙突に風速計を取りつけるか、カイト観測、パイバル等の放球観測）方法では、空間的には一地点観測であり空間代表性に乏しく、また、労力・コストの面からも多数の測定点を置くことは難しい。パイバル、レーウィン等を除いて観測高度が低いという制限もある²⁾。

これらの問題点を克服するものとして、遠隔的な風の測定法が近年、多く開発されてきている。遠隔計測では、(i) 測器を測定点に運ぶ (in situ observation) 必要がなく、(ii) 方法によっては線、面、体積平均された風のデータが得られ、(iii) 自動化、省力化が可能である、等の利点を有している³⁾。特に上空の広域の風データを得る方法としては、衛星の雲写真やレーダーによる雲分布画像を用いて、雲の移動量からその高度の風ベクトルを求めることが試みられている。大気汚染に関連する大気境界層内の風については、レーダー、音波レーダー、レーザーレーダーによるドップラ法を原理とする測定法が開発されている。これらは、いずれも面的な広がりを持つ測定は難しい。

スキャンニングレーザーレーダーを用いてエアロゾルの空間移動量の測定から風ベクトルを求める方法が、先に筆者らによって提案されている⁴⁾。この方法の原理は衛星の雲写真の解析等⁵⁾と同じであるが、雲のない大気低層においても一般に存在するエアロゾルの分布パターンをトレーサーとする点に特徴がある。

本報告では前報に引き続き、この方法を具体的に適用するにあたって問題となる、有限スキャン速度に起因する観測されたエアロゾル分布パターンの歪み補正の方法を提案する。さらに、実際のエアロゾル分布パターンの観測により風向・風速を算出し、エアロベーンによる直接測定データと

の比較を行う。

2. 測定の原理

高速繰返し発振するレーザーと高速スキャン機能を有するレーザーレーダーを用いることによって、大気中に浮遊するエアロゾルの2次元面内の濃度分布パターンを測定することができる。このエアロゾル濃度分布パターンの時間的な移動量から移動速度を求めることは、衛星の雲写真から高層風ベクトルを求めることと原理的には全く同じである。

説明を簡単にするために、水平面内をスキャン測定して得られるエアロゾル濃度分布パターンについて考えよう。時刻 t_1 における分布パターン $f_1(x, y)$ と時刻 t_2 における分布パターン $f_2(x, y)$ を比べると、パターンは風によって運ばれる距離だけ全体として移動していると考えられる。したがって、この移動距離を空間相関法等によって決めることが出来れば、これと時間差とから風ベクトルを求めることができる。

実際の測定では、スキャン速度が有限であるために、一定領域をスキャン測定するのに有限の時間を有する。したがってスキャン測定をしている間にも、エアロゾル分布は移動しており、観測された分布パターンは時刻 t_1, t_2 における瞬間的なものとは異なり、見かけ上、歪んだパターンとなっている。相関計算で移動量を求めて風速ベクトルを算出する際に、この歪み量の補正が必要となる。この問題について次節で検討する。

3. 空間相関法と歪みの補正

3.1 空間相関法によるパターンマッチング

平面上の位置を表すベクトルを r 、時刻を t として、位置 r におけるエアロゾルの濃度を $g(r, t)$ と表すことになる。エアロゾル分布の形状が時間的に変化せず、一定の形状を保ったまま、一定の風（ベクトル v で表す）によって移動しているものと考えれば、 $g(r, t)$ は次式で表される。

$$g(r, t) = F(r - vt) \quad (1)$$

ここで、 $F(r)$ は時刻 $t = 0$ におけるエアロゾル分布を表す。

したがって、時刻 t_1 と t_2 における分布パターン $g(r, t_1)$ と $g(r, t_2)$ について2次元の空間相関関数 $C(\xi)$ を次式

$$C(\xi) = \int_S g(r, t_1) g(r + \xi, t_2) dS \quad (2)$$

により計算すると、 $\xi^* = (t_2 - t_1) \cdot v$ なる ξ^* に対して $C(\xi)$ は最大値を与える。すなわち、 $C(\xi)$ の最大を与える ξ は風ベクトル v によるエアロゾル分布パターンの移動量を表している。

しかし、現実にはスキャン速度が有限であるためにスキャンビームの位置が時刻の関数となり、観測されるエアロゾル分布パターンの形、 $f(r, t)$ は、

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{r}, t) &= g(\mathbf{r}, t + \Delta t(\mathbf{r})) \\
 &= F\{\mathbf{r} - \mathbf{v} \cdot (t + \Delta t(\mathbf{r}))\}
 \end{aligned} \tag{3}$$

となる式で表される。ここで、 $\Delta t(\mathbf{r})$ はスキャン開始時刻 t から、スキャンビームが点 $\mathbf{r}$ を通過するまでに要する時間である。この式から明らかなように、有限速度のスキャン測定で得られるエアロゾル分布パターンは実空間に存在する真の分布パターンとは異なり、歪んだ形となっている。したがって観測された分布パターン $f(\mathbf{r}, t_1)$, $f(\mathbf{r}, t_2)$ から次式、

$$C'(\boldsymbol{\varepsilon}) = \int_S f(\mathbf{r}, t_1) f(\mathbf{r} + \boldsymbol{\varepsilon}, t_2) dS \tag{4}$$

で計算される $C'(\boldsymbol{\varepsilon})$ が最大となる $\boldsymbol{\varepsilon}$ は、必ずしも真の移動量を表してはいない。

特別な場合として、(I) スキャン方向が一定とみなせる場合（つまり、狭い角度範囲を対象とする場合）と (II) スキャンの方向、速度ともに一様とみなせる場合（角度範囲が狭く、しかもレーザーレーダーから遠い領域を対象とする場合）には、問題が単純化される。これらについては付録で簡単に触れる。

3.2 反復法による歪み補正

前項で述べたようにレーザーレーダーによる回転スキャン測定の場合、一般には観測された分布パターンは実空間内のエアロゾル分布パターンに対して歪んだ形となっている。しかも歪みの程度は空間内の位置、風速ベクトルとスキャンベクトルの関係等によって異なり、一般的な関係式を導くことは難しい。ここでは、反復法による歪み補正の方法を提案する。

反復法の主なステップは次の通りである。

- (i) 観測された分布パターン $f(\mathbf{r}, t_1)$, $f(\mathbf{r}, t_2)$ を (4) 式に適用し、相関値最大を与えるラグの大きさから風ベクトルの第一次近似値 $\mathbf{v}^{(1)}$ を求める。
- (ii) スキャン測定開始時刻 t_1 , t_2 における実空間のエアロゾル分布 $g^{(1)}(\mathbf{r}, t_1)$, $g^{(1)}(\mathbf{r}, t_2)$ を、(3) 式と $\mathbf{v}^{(1)}$ とから推定する。
- (iii) $g^{(1)}(\mathbf{r}, t_1)$, $g^{(1)}(\mathbf{r}, t_2)$ を (2) 式に適用して (i) と同様に風ベクトルの高次の近似値を求める。
- (iv) ステップ (ii) と (iii) の反復計算を、推定風速が収束するまで行う。

具体的な計算では、エアロゾル濃度分布データは $M \times M$ のメッシュデータとして扱われる。今、観測された分布パターンを $f_1(i, j)$, $f_2(i, j)$, $i = 1, M$; $j = 1, M$ とすると、相関関数はラグを (r, l) として次式で計算される。

$$C(r, l) = \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \sum_{i=1}^{M-r} \sum_{j=1}^{M-l} \{f_1(i, j) - \bar{f}_1\} \{f_2(i+r, j+l) - \bar{f}_2\} \tag{8}$$

ここで,
$$\sigma_1^2 = \sum_{i=1}^{M-r} \sum_{j=1}^{M-l} \{f_1(i, j) - \bar{f}_1\}^2$$

$$\sigma_2^2 = \sum_{i=1}^{M-r} \sum_{j=1}^{M-l} \{f_2(i+r, j+l) - \bar{f}_2\}^2$$

$$\bar{f}_1 = \frac{1}{(M-r+1)(M-l+1)} \sum_{i=1}^{M-r} \sum_{j=1}^{M-l} f_1(i, j)$$

$$\bar{f}_2 = \frac{1}{(M-r+1)(M-l+1)} \sum_{i=1}^{M-r} \sum_{j=1}^{M-l} f_2(i+r, j+l)$$

である。但し、これらの式は $r, l \geq 0$ に対応するもので、負の r, l に対しては同様の式で計算される。(8) 式によって計算される相関関数 $C(r, l)$ が最大値を与えるラグ (r^*, l^*) を求めることによって、相関計算の対象領域全体の平均的な移動速度ベクトルの第一近似値 $v^{(1)}$ が評価される。

次に、この $v^{(1)}$ を用いて観測された分布パターン $f_1(i, j)$, $f_2(i, j)$ の歪み補正を行い、スキャン測定開始時刻に対応する分布パターン g_1, g_2 を推定する。このとき、スキャンビームがスキャンを開始してから、位置 (i, j) を通過するまでの所要時間を $\tau(i, j)$ で表すと、スキャン測定中のパターン移動量を表わすベクトル $d(i, j)$ は

$$d(i, j) = \tau(i, j) \cdot v^{(1)} \quad (9)$$

と書ける。 $d(i, j)$ をメッシュ数に換算して (i_d, j_d) と書くと、(3) 式の関係は次のようになる。

$$g_1^{(1)}(i - i_d, j - j_d) = f_1(i, j) \quad (10)$$

$$g_2^{(1)}(i - i_d, j - j_d) = f_2(i, j)$$

$g^{(1)}$ と f の間には必ずしも一対一の対応関係がない場合があることに注意する必要がある。 $g^{(1)}$ の一つのメッシュに複数の $f(i, j)$ が対応する場合には、平均値として $g^{(1)}$ を与え、反対に $g^{(1)}(i, j)$ に対応する f 上のメッシュがない場合には、 $g^{(1)}(i, j)$ については相関計算の際、 $g^{(1)}$ 全体の平均値を埋めこんで、その影響を除くこととする。

なお、実際の歪み補正に際しては、スキャンビームが領域の中心を通る時刻を基準として分布パターンの修正を行う。

2次元の相関関数の計算は大型計算機を使用しても大きなCPU時間を要する。ここでは粗いマッチングと細いマッチングの2段階に分けて相関関数の計算によるパターンマッチングを行い計算時間の節約を計っている⁽⁶⁾。粗いマッチングでは、 $M \times M$ のメッシュデータを m メッシュおきに取り出して、 $M' \times M'$ メッシュとして相関計算を行い、分布パターンの移動量を粗く見積る。次に粗

いマッチングで求めた移動量の周辺で、 $M \times M$ メッシュのすべてのデータを使って細かいマッチングを行っている。以下のモデル計算および実データの計算では、 $M = 100$ 、 $m = 1$ を使用した。

4. モデル計算

前節で提案した歪み補正の方法の有効性を確かめる目的でモデル計算を行った。測定領域の大きさ、スキャン速度、相関計算対象領域、その他の設定諸元は表1に示してある。図1の破線で示した扇形の範囲、正方形の領域がそれぞれ、設定したスキャン領域、計算対象領域である。スキャン測定は、1回目は時計方向、2回目は反時計方向とし、スキャン測定間の時間の損失を少くしている。

スキャン速度の許容最小値は風速の大きさとの関係で決まり、また許容最大値はレーザー繰返し周波数、データポイントの空間密度との関係で決定されるべきものである。ここでは最大風速を10 m/sとし、2回のスキャン測定で得られる分布パターンが、対象領域の少なくとも60%の範囲で重なるようにスキャン速度を決めている。これは相関計算の安定性を考慮したものである。

相関計算の対象領域は4 km × 4 kmの正方形にとり、40m×40mのメッシュ(100 × 100)に分割している。1スキャンに要する時間は135秒であるから、風速の分解精度は約0.3 m/s程度となる。

モデル計算に用いるエアロゾル分布パターンは、2次元のガウス関数として与え、標準偏差の大きさを300 m、1回目のスキャン開始時に分布の中心を正方形領域の中心に設定した(図2-(a))。

モデル計算は次の2通りについて行った。

(1) 風速が5 m/s で風向きは8方位

(2) 風速が10 m/s で風向きは8方位

ここで、風向きはN, NE, E, SE, S, SW, W, NWの8方位を設定した。

図2-(b)(c)は、風速5 m/s、風向SWのときに観測されるエアロゾル分布パターン f_1 、 f_2 を模式的に示している。 f_1 は時計方向のスキャンのためにNE-SW方向に縮んだ形になって観測され、 f_2 は逆になっている。 f_1 と f_2 とから求めた第1近似の風ベクトルを用いて歪み

表1 モデル計算の条件

測定領域	方位角45～135° 高度角0°
スキャン速度	40°/分
相関計算対象領域	X方向 3～7 km Y方向 -2～2 km (正方領域)
メッシュの数	100 × 100

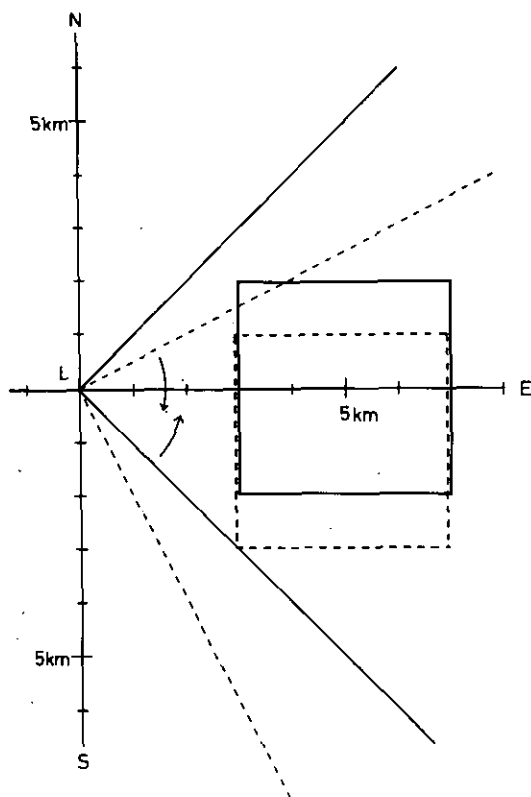


図1 測定領域(直線ではさまれた90°の領域)と相関計算の対象領域(正方形の部分)
実線はモデル計算のもの、破線はレーザーレーダーによる観測に対応する。

補正した分布パターン $g_1^{(1)}$, $g_2^{(1)}$ を図2-(d)(e) に示している。歪み補正によって分布パターンの対称性が復元されている。

図3は条件(1)(2)によるモデル計算結果をまとめたもので、第1近似値と最終推定値とをプロットしている。反復計算は3回まで行えば、十分に収束したので、3回目の反復計算の結果を最終推定値としている。最終推定値は設定した風速に十分近く収束している。風向きは第一近似で設定風向を再現し、収束性も良いので、ここでは図示していない。

第一近似の風速と真の値との差は風速が大きい方(10m/s)が大きく、歪みの程度が風速に依存していることを示している。風向によっては第1近似の風速が設定値に一致する場合があるが、(WとE)これは単一ピークを持つ分布形を用い、しかもビームが分布のピーク付近を通過するときスキャンの方向が風向と直角をなすために、歪みの影響が小さいためと考えられる。

最終推定値の風速と真値の間に若干の差が見られるのは、先に述べた風速の分解精度に起因すると考えられる。

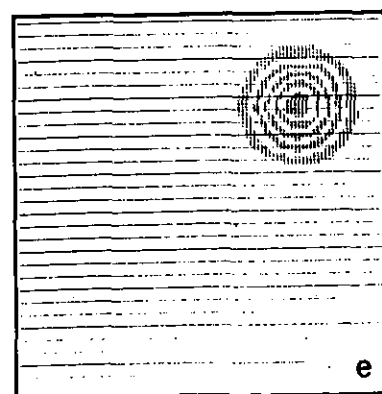
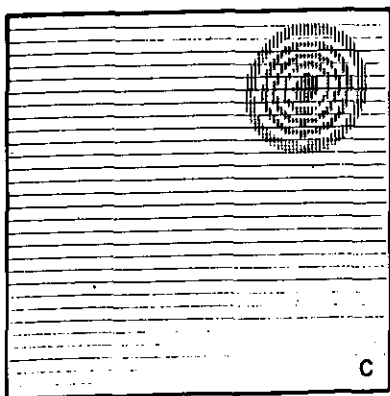
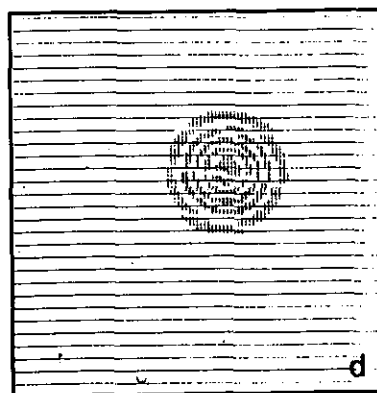
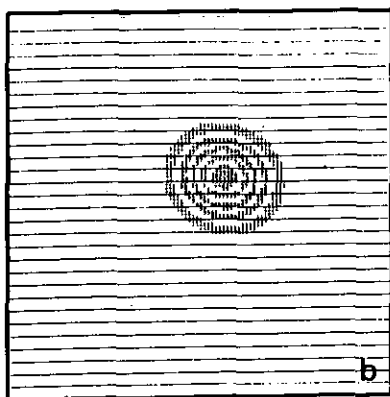
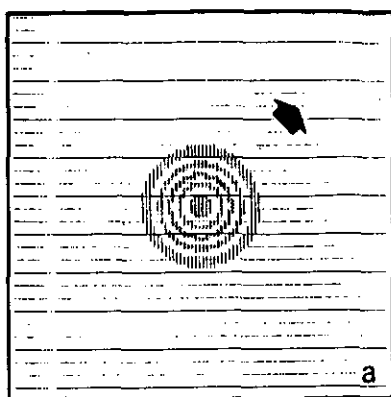


図2 エアロゾル分布パターン移動量測定モデル計算

a) スキャン開始時刻における実空間のエアロゾル分布。b) 1回目のスキャンで測定された分布パターン。c) 2回目のスキャンで測定された分布パターン。d, e) 歪補正された分布パターンで, b), c) に対応する。

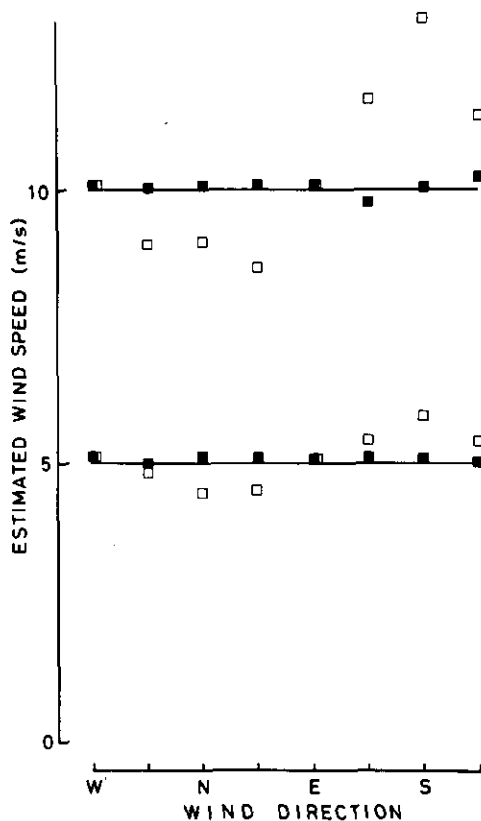


図3 モデル計算結果

□印は1回目の相関計算により求めた風速値。■印は3回の反復計算の結果。横実線は設定風速を表す。

5. 観 測

前節までに述べた歪み補正を含む水平風ベクトルの推定を実際のエアロゾル分布データを用いて行った。観測は国立公害研究所大型レーザーレーダー⁷⁾を用いて、1980年8月6, 7, 8, 11, 12日の5日間にわたって、主に日中に行った。観測期間中、天気は晴れであった。

5.1 観測に用いた装置

大型レーザーレーダー (LAMP Lidar ; Large Atmospheric Multi-Purpose Lidar) についての詳しい報告は別になされている⁷⁾ので、ここでは、装置の概要を表2に示し、主な特徴を述べるにとどめる。

本装置は広域大気汚染観測用として設計・製作 (1979年秋、完成) されたもので、大出力レーザー、高効率の受信光学系を有している。また、本論文で述べる空間相関法による風ベクトルの測定

表2・ 国立公害研究所大型レーザーレーダーの概要

測定方法	ミー／ラマン散乱方式		
測定対象	エアロゾル，汚染気体，気象要素		
レーザー部	Nd：YAGレーザー（1'osc+3 amp）		
波長	1.06 μm （基本波）0.532 μm （第2高調波）		
平均出力	30 W	10 W	
最大繰返し	25 pps		
パルス幅	16 ns	14 ns	
ビーム拡がり	0.3 mrad		
受光望遠鏡	カセグレン型反射望遠鏡		
主鏡有効径	1500 mm	合成焦点距離	8000 mm
副鏡有効径	380 mm	焦点調整	副鏡移動
視野範囲	0.15～4 mrad		
測定距離	100 m～60 km		
分光装置	フィルター（ターレット切換），ダブルモノクロ		
架台	高位方位方式 速度10°／s～360°／d		
掃引			
信号処理部	主・副2系列		
主系列	トランジェント・レコーダ		
制御部	ドーム，レーザー，架台，受光光学系		
制御モード	手動，自動，ミニコン		
ミニコン	TOSBAC 7／40		
構成	CPU，DISC，MT，LP 他		
転送	専用回線でホストの計算機へデータ転送可能		

に使用できるように，高速繰返し発振のレーザーと高精度・高速スキャナーを装備している。

5.2 観測およびデータ処理の方法

観測は水平面内のエアロゾル濃度分布を得ることを目的として，地上付近の障害物を避けるため仰角0.5°で，いわゆるPPI⁸⁾測定を行った。スキャン領域，相関計算対象領域は図1の破線の扇形，正方形の範囲とした。スキャン速度は前節のモデル計算と同じであるが，反転時の若干のロスタイムを含めて，1スキャンに140秒を要する。生データとしては，ビーム方向75m，スキャン方向0.33°の分解能でデータを収集している。

スキャン測定は原則として1 Runに5回ずつ（時計方向3回，反時計方向2回）繰り返して行い，全部で117スキャンのデータを収集した。

収集したレーザーレーダーデータは次の演算処理を行い、以後の相関計算に用いる。

- (i) 直流成分の除去と距離自乗補正
- (ii) 減衰項補正
- (iii) 極座標から直交座標メッシュデータへの変換

減衰係数は空間平均として次の方法により求め、減衰項補正を行う。まず、レーザーレーダー方程式を導入する。

$$P(R) = K \cdot \beta(R) T^2(R) / R^2 \quad (11)$$

ここに、 R はレーザーレーダーからの距離、 $P(R)$ は受信パワー、 $\beta(R)$ はエアロゾルと空気分子による体積後方散乱係数、 K はシステム全体の効率を表す定数である。 $T(R)$ は透過率を表し、

$$T(R) = \exp \left[- \int_0^R \sigma(r) dr \right] \quad (12)$$

である。今、レーザーレーダー信号の1スキャン全体の平均を $\bar{P}(R)$ とすると、スキャン面内のエアロゾルの光学的な性質が平均的には一様であると仮定して、

$$\ln \bar{P}(R) R^2 = \text{const} - 2\bar{\sigma}R \quad (13)$$

の関係が導かれる。ここで、 $\bar{\sigma}$ は空間内の平均的な減衰係数である。実際には空間的な一様性は成立しない場合が多いので、 $\ln \bar{P}(R) R^2$ と R との関係について、直線式の最小自乗近似を行い、 $\bar{\sigma}$ を推定した。

図4に、演算(i)(ii)(iii)を施して得たエアロゾル分布パターンの例を示している。図4-

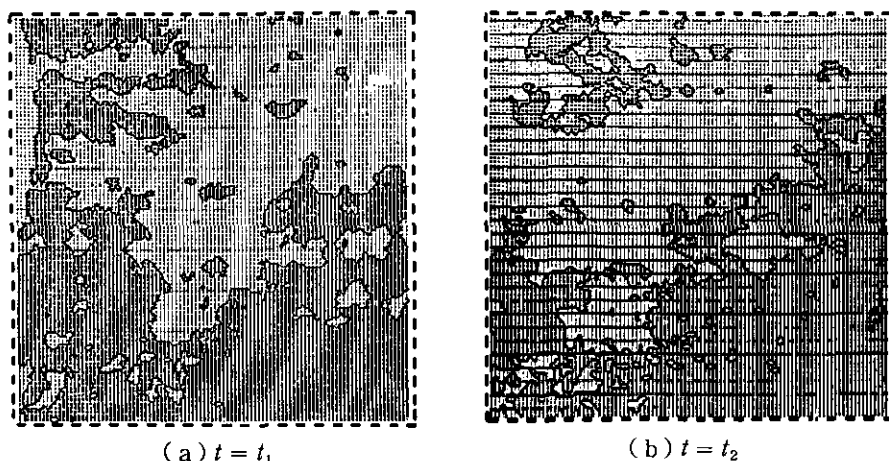


図4 レーザーレーダーで実際に観測されたエアロゾル分布パターン例

(a)(b)は8月11日14時12分前後に、引き続いてスキャン測定したものである。これらの分布パターンに対して粗いマッチングの相関係数値の配列表示を図5に示している。図の中心がラグ(0, 0)で、相関最大を示す点(▲)までのラグ(r^* , l^*)を時間差で割ると風速ベクトルの近似値が得られる。この場合、 $r^* = 800$ m, $l^* = 0$ m, $\Delta t = 140$ 秒なので、 $|\mathbf{v}^{(1)}| = 5.7$ m/s, 風向はEである。

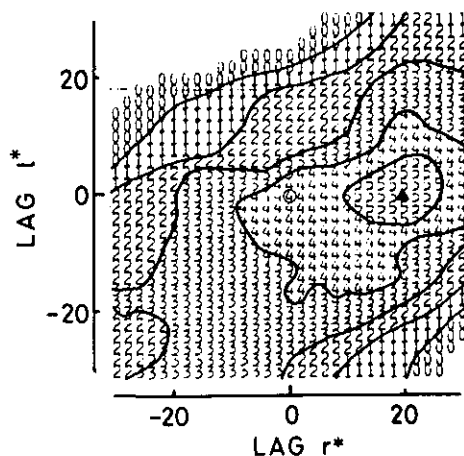


図5 図4の2枚のエアロゾル分布パターンの中で計算した2次元の空間相関関数のプロット
▲印は相関係数の最大値の位置。図の中心がラグ(0, 0)に対応する。

6. 結果と考察

図4に示したようなスキャンデータのペアから、歪み補正を含む空間相関計算によって風ベクトル計算を行ったのは、117スキャンデータから96組についてであった。

96組の反復相関計算のうち、モデル計算と同じ3回の反復計算で収束性を示さなかったのが12組、最終的に得られた相関係数の最大値が0.25以下のものが15組、推定値が異常に大きいものが18組であった。これら41組の存在は満足すべきものではないが、次の理由によると考えられる。ひとつは、スモールスケールのエアロゾル分布構造を除去するなど、適当なフィルター操作を施していない。また、測定仰角が 0.5° であり、測定高度が計算対象領域の中で約35mの高度差を持っているために、見かけ上、分布パターンが変形する。これらの問題については今後、検討の余地が残されている。

その他の55組については最終の相関最大値が0.25以上で、3回の反復計算で風向、風速値とも収束している。これらについて、次に、エアロベーン風向・風速計による測定値との比較を行う。

比較の対象とするエアロベーンは気象研究所筑波気象観測用鉄塔に設置されたもの⁹⁾である。鉄塔はレーザーレーダー位置から北東へ約350 m離れている。エアロゾル分布パターンの計算領域の

高度は60~95mの範囲に入るので、鉄塔の50m, 100 m 高度に設置されたエアロベーンデータの平均値を用いることにした。風向・風速値はレーザーレーダースキャン時刻に対応する値を自記記録計チャートから読み取った。

図6はレーザーレーダー観測から得た風速の値(E)とエアロベーンの値(T)との比較を示している。図7は図6に示した個々の対応関係について、10分間ごとに区切り、10分間内の測定値の平均値について比較を行ったものであり、両者(E と T)の相関は高い。

風向についても同様の比較(10分間平均値)を図8に行った。エアロベーンデータが時計回りの方向に系統的に寄っているが、全体としては良い一致を示している。

レーザーレーダーは4 km × 4 km という領域内のエアロゾル分布パターンの全体的(平均的)な移動量をもとに風速を求めているのに対して、エアロベーンは固定点における風速の測定であって本質的に異なる量である。ここでは、固定点における測定量の時間平均をとることで、空間平均量(レーザーレーダーデータ)との比較を行った。その結果、風速については良く一致しているが、風向については系統的なずれが見い出された。

風向は地形的な影響のために、わずかな空間距離であっても地点間で差が出ることは考えられる。特に今回の観測では、鉄塔の位置が霞ヶ浦から約10km 内陸にあり、レーザーレーダーの観測領域が霞ヶ浦と鉄塔にはさまれるような位置するところにあって、これらの地形条件の差が風向に影響していることも考えられる。

本論文で述べたようなパターンマッチングの方法による移動量の導出においては、分布パターン

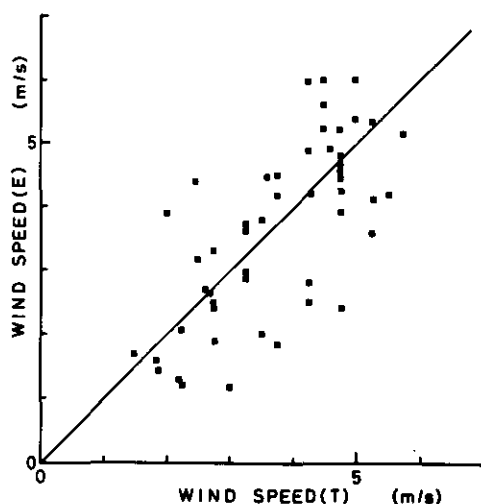


図6 レーザーレーダー観測で求めた風速の値(E)と鉄塔エアロベーンで観測した風速の値(T)との比較

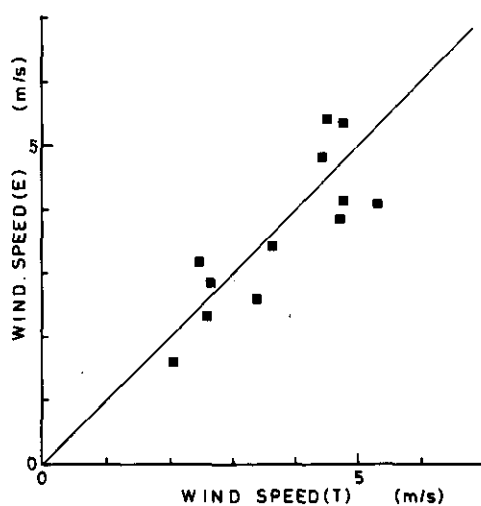


図7 図6と同じ。但し、10分間ごとに区切って
10分間内のデータの平均値の比較

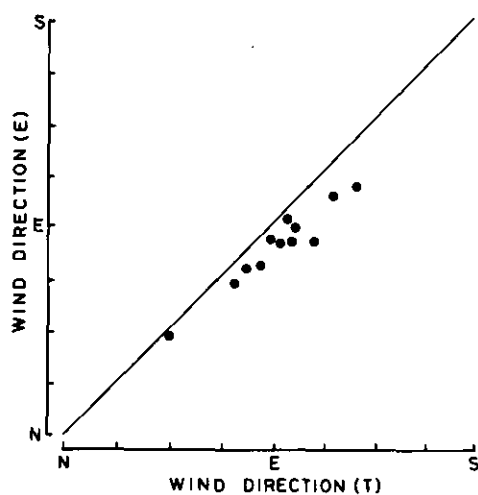


図8 図7と同じ。但し、風向についての比較

の時間的保存性がなければならない。今回の観測では、1組の分布パターンデータを得るのに約5分を要し、この間に2～3kmの距離を移動するが分布パターンは必ずしも保存されない。エアロゾル分布の空間スケールと分布の保存性との関係について、今後、検討を要する課題である。また、実用的にはマッチングのための相関計算はより効率的な手法を採用する必要があるだろう。

7. まとめ

本論文では大型レーザーレーダーを用い、エアロゾルの分布パターンの時間的な移動量を測定することによって風ベクトルを求める手法について述べた。有限なスキャン速度によるスキャン測定では、スキャン測定中にも分布パターンは移動するため、観測された分布パターンが実空間の分布パターンに対して歪む。本論文では反復計算による歪み補正法を提案した。この歪み補正の結果、測定値の真値に対する誤差が小さくなることをモデル計算により示した。また、実際に観測されたエアロゾル分布パターンを用いて風ベクトルを求め、エアロベーン測定による風のデータと比較したところ、瞬間値、10分平均値ともに良い一致を示した。

対象領域の大きさや測定感度に合わせて、スキャン速度、空間分解能等を適宜、選定する必要があるが、今回提案した方法は、レーザーレーダーの測定可能な範囲では任意の場所、任意の測定領域で適用可能である。したがって、広い領域、例えば半径50 km圏を5 km × 5 km のサブ領域に分割し、サブ領域ごとに平均的な風ベクトルを求めることができる。これによって、広い領域の風系構造を把握することが可能であり、広域汚染、遠距離輸送の研究あるいはモニタリングの手段として有効に用いることができる。

引用文献

- 1) 原田 朗 (1979): 都市の大気汚染, 都市の大気環境, 河村武編, 東京大学出版会, 東京, 185pp, 45-65
- 2) 文字信貴・水間満郎 (1976): 風・温度・湿度及び乱流輸送量の測定. 気象研究ノート, **130**, 19-52.
- 3) 小平信彦・村山信彦 (1976): 最近の気象観測機器. 気象研究ノート, **128**, 252-274.
- 4) 清水 浩・笹野泰弘・安岡善文・植田洋匡・竹内延夫・奥田典夫 (1981): レーザーレーダーを用いた空間相関法による風向, 風速の遠隔的測定. 応用物理, **50**, 616-620.
- 5) 例えば, Endlich, R. M., D. E. Wolf, D. J. Hall and A. E. Brain (1971): Use of pattern recognition technique for determining cloud motions from sequences of satellite photographs. *J. Appl. Meteorol.*, **10**, 105-117.
- 6) Asai, T., M. Yoshizaki and K. Ishikawa (1977): Some results on an objective analysis for tracking radar echoes of convective clouds. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **55**, 553-558.
- 7) 清水 浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫 (1981): 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作. 応用物理, **50**, 1154-1164
- 8) 笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫 (1982): レーザーレーダー画像データ処理・表示手法の開発, 国立公害研究所研究報告, 第34号, 125-141.
- 9) Hanafusa, T., T. Fujitani and N. Banno (1980): Behavior of winds in the lowest 200 m in central Tsukuba science city. *Pap. in Meteorol. Geophys.*, **31**, 125-152.

付 録

スキャンの方向が一定とみなせる場合には、風がスキャンの方向に吹いているとすれば、一次元の問題として取り扱うことができる(図 A-1 (a))。このとき、スキャンの方向を x 、スキャン速度を V 、風速を u とすると(3)式は、

$$\begin{aligned} f(x, t) &= g(x, t + \Delta t(x)) \\ &= F\{x - u(t + \Delta t(x))\} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。ここで、

$$\Delta t(x) = x/V \quad (15)$$

と書けるので、(4)式は、

$$\begin{aligned} C'(t) &= \int (x, t_1) f(x+l, t_2) dx \\ &= \int F\{x - u(t + \frac{x}{V})\} F\{x+l - u(t + \frac{x+l}{V})\} dx \end{aligned} \quad (16)$$

となり、

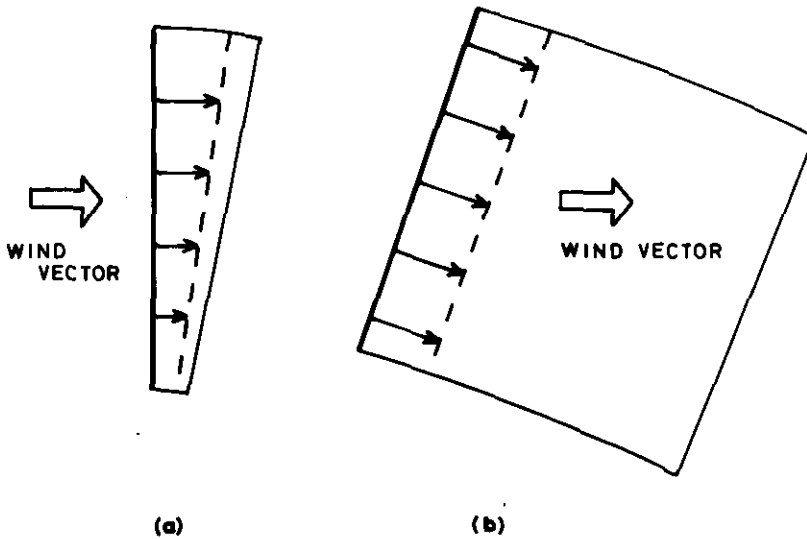


図 A-1 スキャン測定の特別な場合
(a)スキャンの方向が一樣で、風向に一致している場合。(b)スキャンの方向、速度が一樣で、スキャン面内に風向がある場合。

$$l^* \left(1 - \frac{u}{V}\right) - uT = 0 \quad (17)$$

を満たす l^* に対して $C'(l)$ は最大値を与える。すなわち、この場合には、観測された分布パターンを用いて相関計算を行い、相関値が最大となるラグ l^* を求めれば式 (17) によって風速値 u に換算することができる。

図 A-2 は、鉛直面内のスキャン測定例で a ~ c は各 7 秒おきにスキャン測定を行ったものである。1 スキャンには 4 秒を要している。この場合、風向はスキャン面に平行で、水平に吹いているものと考えている。図から分るように、エアロゾル分布パターンは時間の経過とともに右から左へと移動している。

分布データは高度方向には分解能 4 m のメッシュデータとしているので、高度ごとに水平方向の相関計算を行った結果は図 A-3 に示されている。各高度ごとに相関最大のラグを実線で結んでいる。図の場合、スキャン速度 V は約 90 m/s 、風速は約 5 m/s となっている。

スキャンの方向、速度ともに一様と見なせる場合 (図 A-1-(b)) も同様に考えることができる。今、 xy 直交座標系で考えることにして、スキャンビームは y 軸に平行で、一様な速度 V で x 方向に動くものとする、

$$\Delta t(x, y) = x/V \quad (18)$$

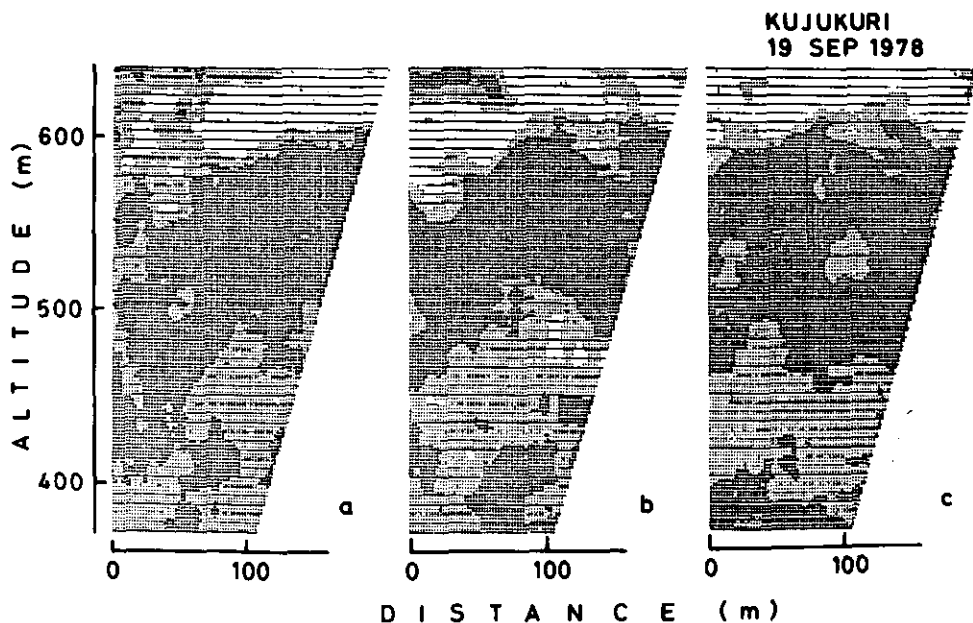


図 A-2 図 A-1 (a) の場合の実際の測定例
a ~ c は各 7 秒おきの測定を行った。

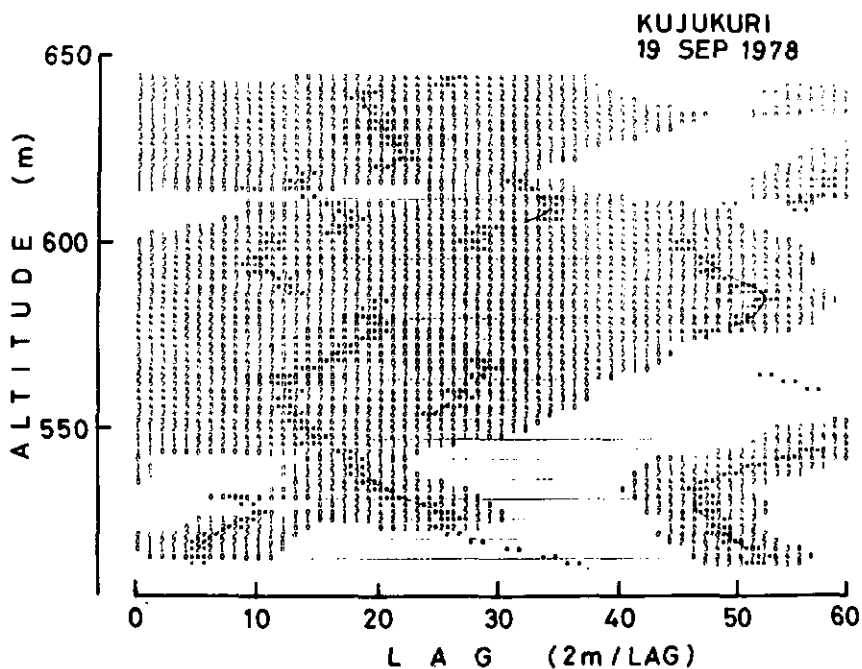


図 A-3 図 A-2 の a, b 間で相関計算を行った結果で、各高度の相関係数最大のラグを実線で結んでいる。

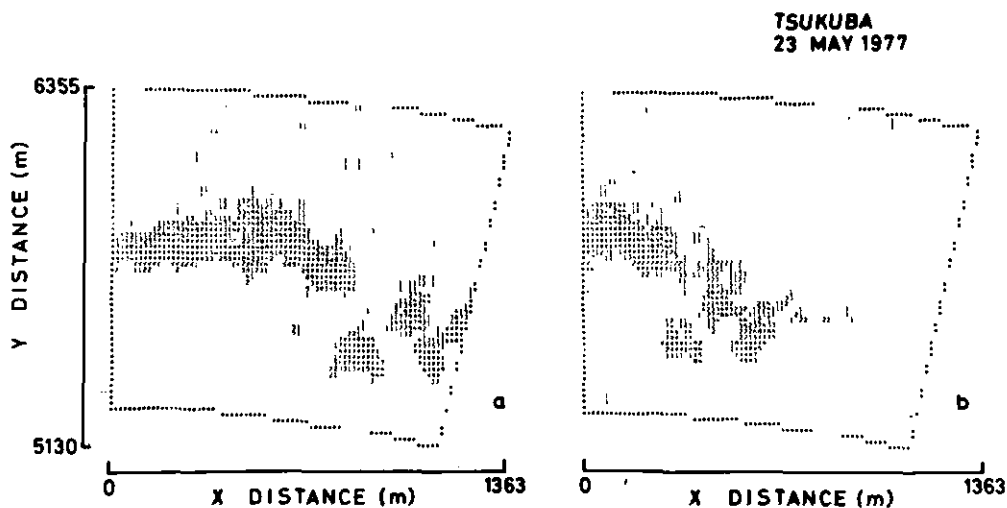


図 A-4 図 A-1 の (b) の場合の実際の測定例

とおける。このとき (3) 式は

$$f(x, y, t) = F\left\{x - u\left(t + \frac{x}{V}\right), y - v\left(t + \frac{x}{V}\right)\right\} \quad (19)$$

となり,

$$f(x, y, t_1), f(x, y, t_2)$$

を (4) 式に代入すると,

$$l^* \left(1 - \frac{u}{V}\right) - uT = 0 \quad (20)$$

$$r^* - \frac{v}{V} l^* - vT = 0$$

となる (l^*, r^*) に対して, 相関値最大を与えることが分かる。

つまり, この場合にも観測された分布パターンを用いて相関計算を施し, 相関最大となるラグ (l^*, r^*) 求めれば, 上式により, 風ベクトル (u, v) に換算することができる。前報⁴⁾で示した観測例は, この条件にあてはまる (図 A-4)。

Ⅲ-8

差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中の NO_2 濃度分布の測定*

杉本伸夫¹・竹内延夫¹・奥田典夫¹

Remote Measurement of the NO_2 Profile in a Stack Plume by
a Differential Absorption Laser Radar

Nobuo SUGIMOTO¹, Nobuo TAKEUCHI¹ and Michio OKUDA¹

要 旨

フラッシュランプ励起色素レーザーを用いた NO_2 測定用 DIAL システムの開発を行い、排煙流を対象に測定実験を行った。可視域の NO_2 の吸収帯の2波長に同調したレーザー光を2秒ごとに交互に発射して測定を行い、4分間の積算により、距離分解能 120 m で、500 m までの距離において、0.03 ppm の測定精度が得られた。また、誤差の考察の結果、測定誤差の主な原因は、2波長切り換えの間におこるエアロゾル濃度分布の時間変化によるものと考えられ、2波長同時測定により、測定精度をさらに改善できる可能性が示された。

Abstract

A DIAL (differential absorption lidar) system for NO_2 monitoring using a flash-lamp dye laser was developed. It was used to measure NO_2 concentration in a stack plume. Two wavelengths, resonant (463 nm) and off-resonant (466 nm) to the NO_2 absorption, were switched every two seconds in the measurement; this gave an accuracy of 0.03 ppm for NO_2 concentration with 120 m range resolution up to 500 m by integrating signals for 4 minutes. The sources of measurement error were investigated and the main source of error was shown to be the fluctuation of atmospheric aerosol concentration. It was pointed out that simultaneous measurement at two wavelengths should improve the accuracy of the measurement.

* 本論文中の大要は下記雑誌に発表 応用物理, 50 (9) (1981)

1. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町

1. The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Tsukuba, Ibaraki 305

1. はじめに

大気汚染成分の遠隔計測の手法としては、汚染成分による吸収、蛍光、ラマン散乱などを利用した、いくつかの手法が考えられる。これらのうち、対流圏における NO_2 , SO_2 などの微量分子の遠隔計測に対しては、ラマン散乱は散乱断面積が小さすぎ、蛍光法では大気による quenching があるため、吸収を利用した手法が最も有効であると考えられる。本論文で報告する差分吸収レーザーレーダー (DIAL, Differential Absorption Lidar) は、レーザー光の、大気中エアロゾルによる後方散乱を利用し、光路内の気体分子による吸収を測定する手法で、距離分解能を持って気体濃度分布を得ることができる。差分吸収の名が示すとおり、DIAL 測定では気体分子の吸収曲線の極大および極小に同調した 2 波長のレーザー光を用い、2 波長における信号の比より気体濃度が計算される。

国立公害研究所においては、汚染気体のうち特に重要な NO_2 について、フラッシュランプ励起色素レーザーを用いた DIAL システムの開発を行ってきた。 NO_2 はそれ自体、呼吸機能へ障害をおよぼす有害物質であるほか、光化学スモッグの原因物質のひとつとして、その動態を把握することが重要な課題となっている。 NO_2 の発生量、移流拡散、化学反応等の動態を解明する上で、 NO_2 の空間分布を測定することは不可欠であるが、従来のサンプリング測定と比べて、DIAL 等の遠隔計測の手法は空間的に連続した濃度分布データが得られる点で優れており、この実用化が期待されている。

本論文では、排煙流あるいは道路付近など比較的高濃度の地域における NO_2 濃度分布の測定を目的として開発した DIAL システムについて述べ、煙突からの排煙流を対象に行った測定実験の結果を報告する。このシステムはパルス当たりのエネルギーの大きい同軸型フラッシュランプ励起色素レーザーを光源として、可視域の NO_2 の吸収の極大 (463.1 nm) および近接する極小 (465.8 nm) の 2 波長を用いて DIAL 測定を行う。この実験では、4 分間の積算により、500 m までの距離において、距離分解能 120 m で 0.03 ppm 以上の精度が得られた。この事例でも DIAL が高濃度地域における NO_2 濃度分布の測定に対して十分な性能を持つことが示された。

2. NO_2 測定用 DIAL システム

2.1 測定原理

DIAL は 1964 年に Schotland^{1, 2)} により、ルビーレーザー ($\lambda = 694.3 \text{ nm}$) を用いて大気中の水蒸気の鉛直分布を測定する手法として提案された。その後、色素レーザー、光パラメトリック発振器、TEA- CO_2 レーザー等の光源の開発に伴って、 H_2O 以外の気体成分についても数多くの DIAL 実験が行われてきた。³⁻¹⁴⁾ (NO_2 ³⁻⁷⁾, SO_2 ^{8, 9, 13)}, O_3 ^{8, 14)}, H_2O ^{11, 12)}, その他¹⁰⁾) DIAL による NO_2 の最初の測定は 1974 年に Rothe ら^{5, 6)} および Grant ら⁷⁾ によって行われた。Rothe らは N_2 レーザー励起色素レーザーを用いて、約 700 m 離れた化学工場上空の NO_2 濃度分布の測定を行い、1 方向について 2 時間の積算により、0.2 ppm の精度を得た。また Grant らは、試料セルを用いたモデル実験を行った。本研究はこれらの延長上に位置するもので、同一の原理に

基づいている。本システムでは、出力の大きい色素レーザーを用いたこと、信号処理系が改善されたこと、およびコンピュータ制御によりデータ収集を行うことにより、以前の実験に比べ測定精度が向上している。

DIALはミュー散乱レーザーレーダーと気体分子による吸収を組み合わせた手法で、気体濃度プロファイルは気体分子の吸収の極大および極小に対応する2波長におけるレーザーレーダー受信信号の比より計算される。距離 R に対応するレーザーレーダー受信信号は次式で表される。

$$P_i(R) = Y(R) \eta P_o d A \beta_i R^{-2} \exp \{-2 \int_0^R [\alpha_i + \sigma_i N(r)] dr\} \quad (1)$$

ここに、 i は吸収の極大、極小の2波長(λ_{on} , λ_{off})を表す。 $Y(R)$ はレーザー出力光と受光望遠鏡の視野の重なりを表す関数、 η は光学系の効率、 P_o はレーザー出力光強度、 d はレーザーパルス空間長の半分(τ をパルス時間幅とすると $d = c\tau/2$)、 A は受光望遠鏡の面積である。また β はエアロゾルのMie体積後方散乱係数、 α はエアロゾルによる減衰係数、 σ は気体分子の吸収断面積、 $N(R)$ は気体濃度である。

気体濃度 $N(R)$ は、距離分解能を δR とする場合、(1)式より次のように求められる。⁽¹⁵⁾

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma_d \delta R} \left\{ \ln \left[\frac{P_{on}(R)}{P_{on}(R+\delta R)} \right] - \ln \left[\frac{P_{off}(R)}{P_{off}(R+\delta R)} \right] + B + T \right\} \quad (2)$$

$$\text{ここに、} B = \ln \left[\frac{\beta_{on}(R+\delta R)}{\beta_{on}(R)} \right] - \ln \left[\frac{\beta_{off}(R+\delta R)}{\beta_{off}(R)} \right]$$

$$T = -2(\alpha_{on} - \alpha_{off}) \delta R$$

また、 $\sigma_d = \sigma_{on} - \sigma_{off}$ とおいた。 λ_{on} , λ_{off} は近接する2波長であるので、 $\beta_{on} = \beta_{off}$, $\alpha_{on} = \alpha_{off}$ とみなせるとすると、 $B = T = 0$ である。以上においては、出力レーザーパルス幅が距離分解能に比べて十分小さい場合を考えている。距離分解能はレーザーパルス幅によって制限され、ディコンボリューション演算を行う以外にはパルス空間長の半分より高い分解能を得ることはできない。

一方、DIAL測定の誤差 ϵ は、測定された濃度の標準偏差を $\delta N(R)$ として、 $\epsilon = \delta N(R)/N(R)$ と定義される。測定のSN比は $1/\epsilon$ で表される。(2)式を用いると、 ϵ^2 は、 P_{on} と P_{off} の相関の項を省略して次のように書ける。

$$\epsilon^2 = \left[\frac{\delta N(R)}{N(R)} \right]^2 = \frac{1}{M} \frac{1}{4\sigma_d^2 \delta R^2 N(R)^2} \left[\sum_{i=on, off} \left\{ \left(\frac{\delta P_i(R)}{P_i(R)} \right)^2 + \left(\frac{\delta P_i(R+\delta R)}{P_i(R+\delta R)} \right)^2 \right\} \right] \quad (3)$$

ここに、 M は積算回数である。 $\delta P_i/P_i$ は光電子増倍管の雑音のみを考慮する場合には次式で表される。

$$\frac{\delta P_i^2}{P_i^2} = \frac{(h\nu_i/\eta_q T)(P_i + P_B) + P_D^2}{P_i^2} \quad (4)$$

ここに、 $1/T$ は信号処理系のバンド幅($T = 2\delta R/c$)、 η_q は光電子増倍管の量子効率である。

P_B は背景光強度 P_D は暗電流による雑音に相当する光強度である。 P_D の項は通常非常に小さい。今、 P_D および P_B の項が無視できるとすると、DIAL の SN 比は (3), (4) 式より $S/N \propto M^{1/2} \delta R^{3/2} N(R) P_o^{1/2}$ となり、レーザー出力光強度の $1/2$ 乗、距離分解能の $3/2$ 乗に比例する。

2.2 DIAL システムの概要

DIAL システムはレーザー送信系、受光系、信号処理系、制御およびデータ処理系によって構成されている。システムのブロック図を図 1 に、仕様を表 1 に示す。

レーザー光源としては同軸型フラッシュランプ励起色素レーザーを用い、波長の選択はレーザー共振器中においたエタロンの角度をステップモーターで調節することにより行う。この DIAL システムでは、2 波長の組として $\lambda_{on} = 463.1 \text{ nm}$, $\lambda_{off} = 465.8 \text{ nm}$ を用いて測定を行う。この 2 波長における NO_2 の吸収断面積はそれぞれ、 $\sigma_{on} = 4.7 \times 10^{-23} \text{ m}^2$, $\sigma_{off} = 2.3 \times 10^{-23} \text{ m}^2$ である。レーザー波長の校正は NO_2 を封入したセルによる吸収を測定して行う。図 2 にレーザー波長を変えて測定したセルの透過特性を分光器により測定した透過曲線と比較したものと示す。測定された透過曲線は互いによく一致している。図 2 より吸収の極大および極小の 2 波長に対応するステップモーターのアドレスを求め、これをミニコンに記憶させることにより波長の設定を行う。レーザー繰り返し数は 0.5 pps で、1 ショットごと、すなわち 2 秒ごとに波長を切り換えて測定を行う。

受光系は市販の 15 cm ニュートン型の望遠鏡を用い、上記の 2 波長を透過する波長幅 $\sim 10 \text{ nm}$ の干渉フィルターを使用した。

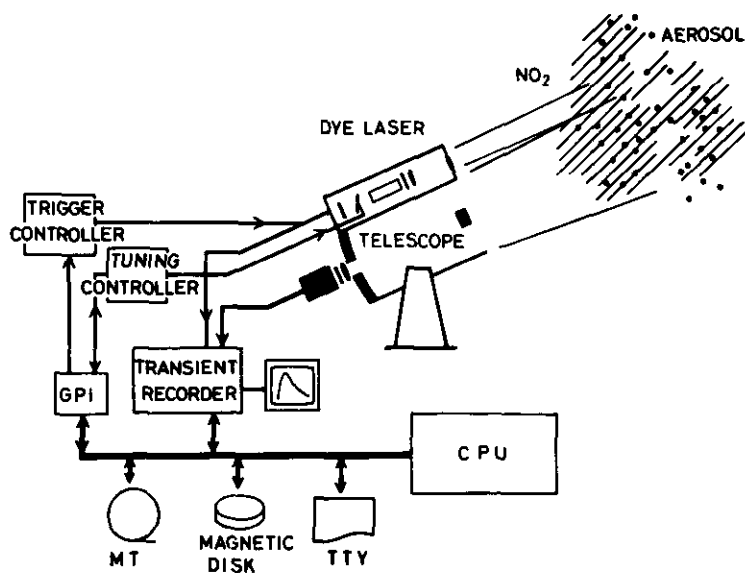


図 1 DIAL システムのブロック図

表1 DIAL システムの仕様

送 信 系	フラッシュランプ励起色素レーザー (NEC SL 269 パルスエネルギー パルス幅 繰り返し数 波長同調法 色 素 波 長	100 mJ 600 ns 0.5 pps エタロン角度による C 1 H (1.5×10^{-4} mol/l) λ_{on} 463.1 nm λ_{off} 465.8 nm
受 光 系	受光望遠鏡 光電子増倍管 トランジェントレコーダー (岩通 DM 901)	0.15 m ϕ ニュートン型 HTV R 376 クロックレイト 10 ns 精度 8 bits メモリー 1024 bytes
ミニコンピュータ	NOVA 02	

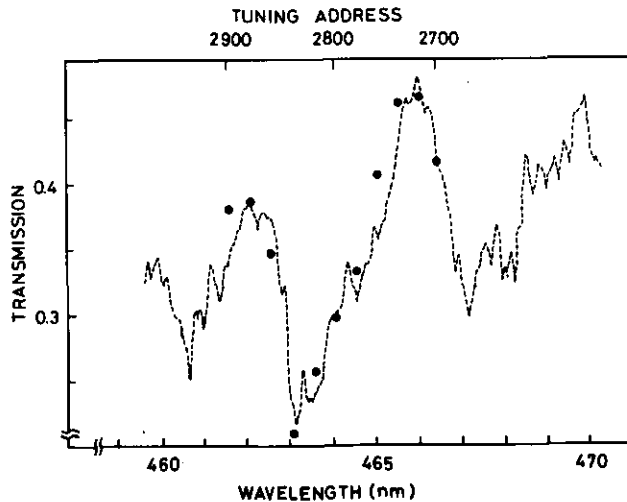


図2 レーザー波長を変化させて測定した NO₂ の透過スペクトル
(NO₂ 8 torr, N₂ 1 気圧)
破線は分光器により測定した透過スペクトルを示す。(分解能 0.1 nm)

信号処理にはトランジェントレコーダー（岩通DM901）を用い、ゲートタイム10 nsec, 1024セグメントで測定を行った。

DIAL システムはミニコン（NOVA-02）を用いて制御され、レーザーの発射、レーザー波長の切り換えトランジェントレコーダーのパラメータ設定、データ取り込み、データのMTへの記録が自動的に行われる。MTに記録されたデータは測定終了後ミニコンにより処理され、 NO_2 濃度分布が計算される。

以上に述べたように、このシステムは1ショット当たりのエネルギーの大きいレーザーを用いていること、レーザー波長を1ショットごとに切り換えていること、およびミニコンを用いて測定の制御、測定データの処理を行っている点に特徴を持つ。

3. DIAL による排煙の測定

3.1 測定方法

前節に述べた DIAL システムによる測定実験を国立公害研究所エネルギーセンターの煙突および焼却炉煙突からの排煙を対象に行った。図3は実験状況を示す地図である。Aは研究本館屋上に置いた DIAL システム、Bはエネルギーセンター、Cは焼却炉煙突である。AよりB上空を通過する仰角 5° の直線上の NO_2 濃度分布を測定した。

エネルギーセンターの排煙は排出ガス量 $10\,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ で NO_x は 100 ppm 含まれている。また、ばいじんは $0.006\text{ g}/\text{Nm}^3$ と少なく排煙は肉眼では見えない。一方焼却炉は排出ガス量 $4,600\text{ Nm}^3/\text{h}$ で NO_x を 40 ppm 含む。ばいじんは $0.03\text{ g}/\text{Nm}^3$ 含まれ、排煙は白く見える。測定時は双方とも運転中であり、エネルギーセンターボイラーは数分ごとの断続運転であった。また、天候はくもりで風はほとんど無かった。

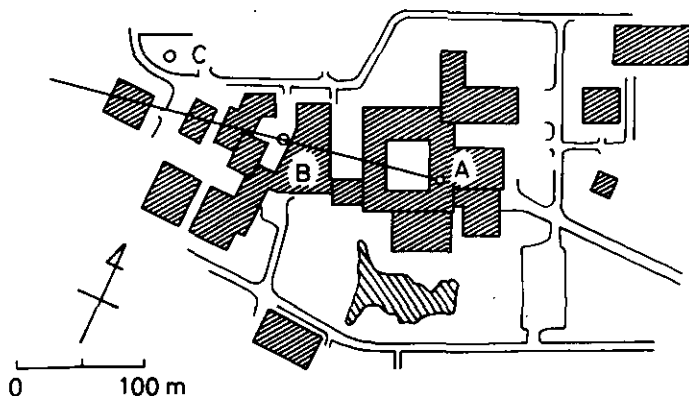


図3 DIAL 測定実験の状況を示す地図

AはDIAL システム、Bはエネルギーセンター煙突、Cは焼却炉の位置を示す。

3.2 測定結果

測定された2波長における受信信号の比 $P_{on}(R)/P_{off}(R)$ および(2)式より算出された濃度分布プロファイル $N(R)$ を図4に示す。

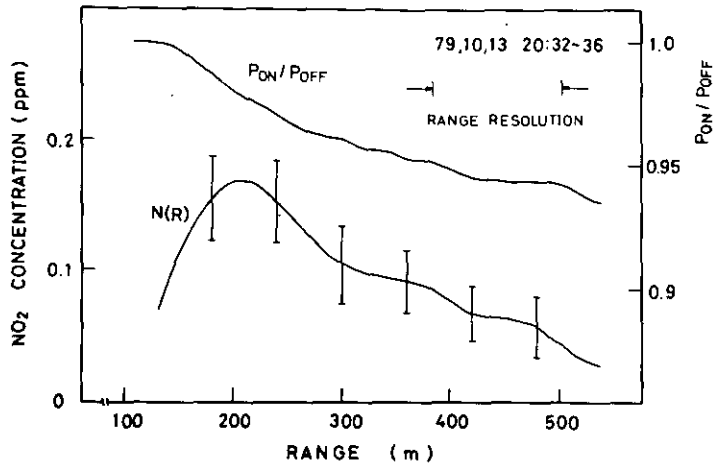


図4 2波長におけるレーザーレーダー信号の比(上図)および、これより計算された NO_2 濃度プロファイル

レーザーレーダー信号はゲートタイム10 ns (1.5 mに相当)で取得し、平滑化処理を行った後、(2)式で、 $\delta R = 120$ m において濃度を計算した。すなわち、図4にプロットされた濃度は各距離について、その点を中心とする120 mの区間の平均濃度を表している。濃度プロファイルは排煙の近くでピークを示しており、ピーク値は0.17 ppmであった。図4は60データすなわち4分間の積算を行ったもので、測定誤差は500 mまでの距離で0.03 ppm以内であった。一方、このシステムに対する誤差の理論値は、光電子増倍管のショットノイズのみを考慮する場合、500 mの距離において、0.004 ppmである。この計算においては、視程を10 kmと仮定し、表1に示したパラメータを用いた。また、受光系の効率 $\eta = 0.6$ 、光電子増倍管の量子効率 $\eta_0 = 0.1$ とした。測定誤差が理論値より大きい原因は、エアロゾル体積後方散乱係数 β の時間変化のためであると考えられるが、これについては次項で考察する。

図5は NO_2 濃度の一次元プロファイルの時間変化を示したもので、ラインプリンタの重ね打ちにより、濃度を10段階で濃淡表示している。図5において、100 mより近くではレーザー出力光線と受信望遠鏡の視野の重なりが小さく、SN比が悪いため表示から除いてある。図5中の最も濃い表示での NO_2 濃度は0.2 ppmである。図5において、ボイラーの断続運転の影響によると思われる濃度分布の変化が見られる。

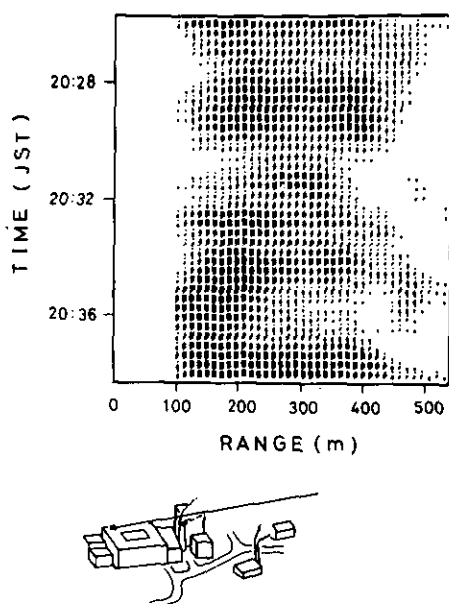


図5 NO₂ 濃度一次元プロファイルの時間変化
ラインプワントの重ね打ちによる濃度表示で、最も濃い部分は0.2 ppm に対応する。

図6は λ_{off} の受信信号より求めたエアロゾル分布の時間変化である。視野の重なり関数が不明であるためエアロゾル濃度そのものではなく、各距離における時間平均濃度からの差を平均濃度で正規化した量に相当する $\{P(R, t) - P(R)\} / P(R)$ を表示した。図6を図5と比較することにより、NO₂分布とエアロゾル分布の相関を調べることが可能である。DIAL測定では同時にエアロゾル分布を得られるため、DIALを用いた汚染質とエアロゾルの相関の研究は今後の成果が期待されるテーマの一つである。

3.3 測定誤差の検討

前項で述べたように、測定されたNO₂濃度の誤差は光電子増倍管の雑音のみを考慮した理論値より約1桁大きい。誤差の原因として考えられるものは、光電子増倍管の雑音の他に、電気的誘導雑音、レーザーパワーの変動、エアロゾル後方散乱係数の時間変化AD変換による量子化雑音等がある。またNO₂濃度そのものの時間変化も誤差の中に含まれている。これらのうち、電気的誘導雑音はシールドを厳重に行うことにより、問題にならない程度に抑えられている。また、レーザーパワーの変動は(2)式の分子、分母でキャンセルされる。

測定データより $(\delta P(R) / P(R))^2$ を見積るために、 $F(R) = P_{\text{off}}(R + \delta R) / P_{\text{off}}(R)$ を定義し、その標準偏差を計算して、図7のAに示した。 $P(R)$ と $P(R + \delta R)$ の相関の項を無視すると、

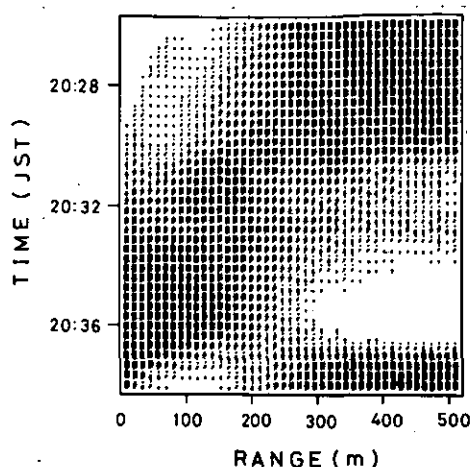


図6 エアロゾル濃度の時間変化
各距離における平均濃度からの差に相当する
 $\{P(R, t) - P(R)\} / P(R)$

$$\left(\frac{\delta P}{F}\right)^2 = \left(\frac{\delta P(R)}{P(R)}\right)^2 + \left(\frac{\delta P(R+\delta R)}{P(R+\delta R)}\right)^2$$

と書けるので、図7には $1/2 \cdot (\delta F/F)^2 = (\delta P/P)^2$ をプロットした。

一方、 $(\delta P/P)^2$ は誤差の原因として、ショットノイズ、量子化雑音、エアロゾル体積後方散乱係数 β の変動を考えると、

$$\left(\frac{\delta P}{P}\right)^2 = \frac{h\nu}{\eta_0 T} \frac{1}{P} + \frac{\text{const}}{P^2} + \left(\frac{\delta \beta}{\beta}\right)^2$$

と表される。このうち、上式の第1項のショットノイズおよび第2項の量子化雑音について $P(R)$ の測定値を用いて見積った値を図7のC, Dに示す。図7より $(\delta P/P)^2$ に占めるショットノイズ、量子化雑音は小さく、 $(\delta \beta/\beta)^2$ がほとんどであると考えることができる。 $\delta \beta/\beta$ エアロゾル濃度すなわち β の大きさに依存していると考えられ、図7においても β の大きい煙突付近で、 $1/2 \cdot (\delta F/F)^2$ が大きくなっている。

次に(2)式を用いて計算された $N(R)$ の標準偏差を 図7のBに示した。 $(\delta P/P)^2$ と比較するために(3)式の()内の $1/4$ に相当する量 $\sigma_d^2 \delta R^2 \delta N(R)^2$ をプロットした。この量は、 $\beta_{\text{on}}(R)$ と $\beta_{\text{off}}(R)$ の間に相間がなければ $1/2 (\delta F/F)^2$ と等しい値を持つ。この測定では、 $P_{\text{on}}(R)$ 、 $P_{\text{off}}(R)$ は2秒間隔で測定されているが、図6にも見られるような長周期のエアロゾル変化の相間があるため、(2)式中で $\beta_{\text{on}}(R)$ 、 $\beta_{\text{off}}(R)$ の変化がある程度キャンセルされて、図7のBは $1/2 (\delta F/F)^2$ より小さくなっている。しかし、ショットノイズおよび量子化雑音のみによる誤差よりはかなり大きく、 β の変動の影響を示している。DIAL測定において β の変動によ

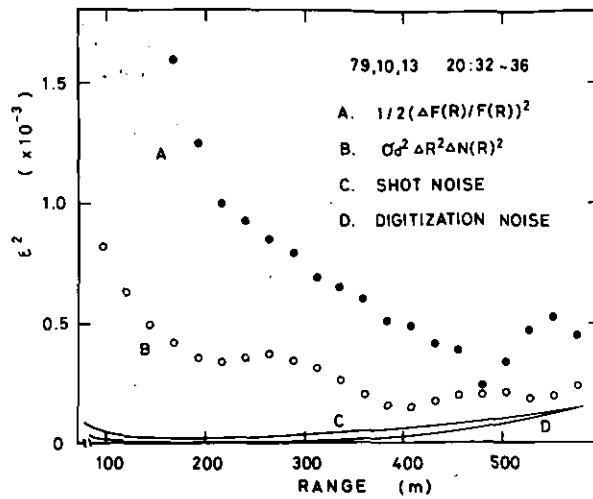


図7 誤差の評価

AおよびBはそれぞれ測定より求められた誤差 $1/2(\delta F(R)/F(R))^2$ および $\sigma_d \delta R^2 \delta N(R)^2$ を示す。CおよびDはそれぞれ、ショットノイズおよび量子雑音を示す。測定誤差が煙突付近で大きいことから、誤差の主な原因はエアロゾル濃度のゆらぎによるものであると考えられる。

る誤差を除くためには、(2) 式中で $\beta_{on}(R)$, $\beta_{off}(R)$ の変化が完全にキャンセルするように、2 波長を同時に測定するか、 β の変化が無視できる時間内に 2 波長を切り換えて測定する必要がある。

4. 結 論

以上に報告した DIAL 実験により、DIAL が排煙流など、高濃度の領域における NO_2 濃度分布測定に対して十分な測定感度を持つことが示された。測定精度をさらに向上させるためにはレーザーの 2 波長を同時に測定することが必要である。これは、このシステムにおいては、同軸フラッシュラン中に 2 本の色素セルを通し、2 つの独立な共振器を構成することにより達成される。これにより、測定誤差の主な原因である波長切り換えの間のエアロゾル変化の影響を除くことができる。

DIAL を実用的なものとするためには、このような改良を行うとともに、システムを車載型とすること、さらに、工場排煙あるいは道路周辺などを対象に、DIAL 測定とサンプリング測定を同時に行い、データの比較校正を行うことが必要である。

DIAL の実用化により、各種の測定実験への DIAL の応用が期待される。 NO_2 濃度分布とエアロゾル分布の相関の研究をはじめ、DIAL による排煙流中の NO_2 濃度の測定と Mie 散乱レーザーレーダーによる排煙流の断面および流速の測定⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ を同時に行うことにより、排煙中の NO の NO_2 への反応の追跡、 NO_x 排出量のモニターを行うことも可能と考えられる。

5. まとめ

フラッシュランプ励起色素レーザーを用いたNO₂測定用DIALシステムの開発を行った。可視域のNO₂の吸収の極大および極小の2波長(463.1, 465.8 nm)に同調したレーザー光を2秒ごとに交互に発射し、DIAL測定を行った。排煙を対象とした実験の結果、4分間の積算により、距離分解能120 mで500 mまでの距離において、0.03 ppm以上の精度が得られた。これは、発生源付近のNO₂分布の測定には十分な精度である。また、誤差の考察の結果、測定誤差の主な原因はエアロゾル濃度の時間変化によるもので、2波長同時測定より、測定精度をさらに改善できる可能性が示された。

引用文献

- 1) Schotland, R. M. (1964): Proc. 3rd Symp. on Remote Sensing of the Environment. Univ. of Michigan, Ann Arbor, 215-224.
- 2) Schotland, R. M. (1966): Proc. 4th Symp. on Remote Sensing of the Environment. Univ. of Michigan, Ann Arbor, 273-283.
- 3) Igarashi, T. (1973): Proc. 5th Conf. on Laser Radar Studies of the Atmosphere. Williamsburg, 57-59.
- 4) Inomata, H. and T. Igarashi (1975): Study of Laser Radar System Using the Differential Absorption Method for Detection of Air Pollutants. Jpn. J. Appl. Phys., **14**, 1751-1760.
- 5) Rothe, K. W., U. Brinkmann and H. Walther (1974): Applications of Tunable Dye Lasers to Air Pollution Detection: Measurements of Atmospheric NO₂ Concentration by Differential Absorption. Appl. Phys., **3**, 115-119.
- 6) Rothe, K. W., U. Brinkmann and H. Walther (1974): Remote Measurement of NO₂ Emission from a Chemical Factory by Differential Absorption Technique. Appl. Phys., **4**, 181-182.
- 7) Grant, W. B., R. D. Hake, Jr., E. M. Liston, R. C. Robbins and E. K. Proctor, Jr. (1974): Calibrated Remote Measurement of NO₂ Using the Differential Absorption Backscatter Technique. Appl. Phys. Lett., **24**(11), 550-552.
- 8) Grant, W. B. and R. D. Hake, Jr. (1975): Calibrated Remote Measurements of SO₂ and O₃ Using Atmospheric Backscatter, J. Appl. Phys., **46**(7), 3019-3023.
- 9) Hoell, J. M., W. R. Wade and R. T. Thompson (1975): Int. Conf. on Environment Sensing and Assessment. Las Vegas, Paper 10-6.
- 10) Murray, E. R., J. E. van der Laan and J. G. Hawley (1976): Remote Measurement of HCl, CH₄ and N₂O Using a Single-ended Chemical-Laser Lidar System. Appl. Opt., **15**(12), 3140-3148.
- 11) Murray, E. R., R. D. Hake, J. E. van der Laan and J. G. Hawley (1976): Atmospheric Water Vapor Measurements with an Infrared (10- μ m) Differential-Absorption Lidar System. Appl. Phys. Lett., **28**(9), 542-543.
- 12) Browell, E. V., T. D. Wilkerson and T. J. McIlrath (1979): Water Vapor Differential Absorption Lidar Development and Evaluation. Appl. Opt., **18**(20), 3474-3483.
- 13) Adrain, R. S., D. J. Brassington, S. Sutton and S. H. Valey (1979): The Measurement of SO₂ in Power Station Plumes with Differential Lidar. Opt. Quant. Electr., **11**, 253-264.
- 14) Asai, K., T. Itabe and T. Igarashi (1979): Range-resolved Measurements of Atmospheric Ozone Using a Differential Absorption CO₂ Laser Radar. Appl. Phys. Lett., **35**(1), 60-62.
- 15) Schotland, R. M. (1974): Errors in the Lidar Measurement of Atmospheric Gases by Differential Absorption. J. Appl. Meteor., **13**, 71-77.
- 16) Takeuchi, N., H. Shimizu and M. Okuda (1978): Detectivity Estimation of the DAS Lidar for NO₂. Appl.

Opt., 17, 2734–2738.

- 17) Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A Mobile Computerized Laser Radar System for Observing Rapidly Varying Meteorological Phenomena. Opt. Quant. Electr., 12, 159–167.

資 料

Appendix

資料 1.

「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」に関する研究会（要旨）

Appendix 1.

Abstracts of seminars

第 1 回

期 日 昭和 55 年 6 月 11 日（水）

場 所 国立公害研究所 中会議室

講 演 1. 大型レーザーレーダーの紹介

竹内延夫（大気環境部）

〔要旨〕 本特別研究において広域汚染観測の中心的装置となる大型レーザーレーダーについて、その設計指針、特長、性能について紹介された。

2. 大気汚染物質の種類とその発生源および汚染現象について

溝口次夫（計測技術部）

〔要旨〕 遠隔計測の対象となる大気汚染現象とその発生源に関するレビュー。

3. 広域汚染の計測・評価・施策について

内藤正明（総合解析部）

〔要旨〕 環境汚染の計測法の種類とそれぞれの現象の評価に用いる指標について分類し、遠隔計測による広域汚染研究に適した具体的な施策に関して論じた。

4. 汚染伝播行列による地域分割と観測点選択の方法について

宮本定明（筑波大）

〔要旨〕 遠隔計測によって測定される画像データを類似した地域のクラスターに分割する手法として汚染伝播行列を選択し、地域分割や観測点選択に適用することを検討した。

第 2 回

期 日 昭和 55 年 9 月 25 日（木）

場 所 国立公害研究所 中会議室

講 演 リモートセンシングによる大気構造の測定に対する考察・要望

横山長之（公害資源研究所）

〔要旨〕 大気汚染に関連して、排煙拡散（ブリューム形状、煙上昇高さ、初期拡散幅、

内部境界層、安定大気層)や混合層構造等の、レーザーレーダーによる測定可能性が指摘された。

第3回

期 日 昭和56年2月3日(火)

場 所 国立公害研究所 中会議室

講 演 1.大気拡散現象のモデル化

池田有光(京都大学工学部)

[要旨] 大気拡散シミュレーションモデルは種々の流れ場の条件で解かれる。そこで、これらのモデルを発生源と流れの条件から系統的に示し、モデルの特徴を解説した。特に、接地気層内のように風のシャー効果を無視できないところへの拡散モデルの適用には注意を要する。道路近傍の拡散を例にとって実測濃度データを検討し、モデルがもつ問題点を指摘した。道路近傍では、立体分布をシミュレートする必要があり、自動車排ガス濃度評価の複雑さが解説された。

2.局地風について

河村 武(筑波大学環境科学系)

[要旨] 日本の海陸風、海陸風の一般、外国の海陸風関係の三つに分けて、海陸風研究の歴史、特徴的事項、大気汚染との関連について説き解がなされた。

資料 2.

レーザーレーダーデータ検討会一覧

Appendix 2.

List of technical meetings

第 1 回

期 日 昭和 55 年 6 月 11 日 (水)

場 所 国立公害研究所 中会議室

テーマ 1) レーザーレーダーによるデータ取得・処理法について
2) 大型レーザーレーダー用ソフトプログラムの概要

第 2 回

期 日 昭和 55 年 9 月 25 日 (木)

場 所 国立公害研究所 第一委員会室

テーマ ○ 航空機を用いた立体観測時の取得データの概要

第 3 回

期 日 昭和 56 年 1 月 14 日 (水)

場 所 国立公害研究所 第一委員会室

テーマ ○ 道路近傍における自動車排ガス拡散観測 (昭 55 年 8 月 5 日, 昭 55 年 12 月 3 日)
の結果について

第 4 回 (1)

期 日 昭和 56 年 3 月 12 日 (木)

場 所 国立公害研究所 中会議室

テーマ ○ エアロゾル濃度予測に対する GMDH(Group Method of Data Handling) の適用
(国立公害研究所レーザーレーダー・データの大阪大学における解析結果)

第 4 回 (2)

期 日 昭和 56 年 3 月 19 日 (木)

場 所 国立公害研究所 第四会議室

テーマ ○ レーザーレーダー画像と A-スコープ信号の関係 (神戸大学における解析結果)

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第 1 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 — 霞ヶ浦を対象域として. (1977)
- 第 2 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/52年度研究報告. (1978)

(改 称)

国立公害研究所研究報告

- 第 3 号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae) (1978)
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属 9 種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 — 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和52年度中間報告. (1978)
- 第 5 号 芳香族炭化水素 — 窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究 — 昭和51/52年度研究報告. (1978)
- 第 6 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ) — 霞ヶ浦を中心として. (1979)
- 第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- 第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和52/53年度研究報告. (1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 — 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和53年度中間報告. (1979)
- 第 10 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/53年度特別研究報告. (1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2 Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
(多摩川に発生するユスリカの研究
— 第 1 報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係 —
— 第 2 報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について —)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和53, 54年度特別研究報告. (1980)
- 第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和54年度特別研究報告. (1980)
- 第 16 号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測. (1980)
- 第 17 号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果 — 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 昭和53/54年度 特別研究報告. (1980)

- 第 18 号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
(環境標準試料「リョウブ」の調製, 分析および保証値)
- 第 19 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅲ) — 霞ヶ浦(西浦)の湖流 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 20 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅳ) — 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 21 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅴ) — 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 22 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅵ) — 霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 23 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅶ) — 湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 24 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅷ) — 富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関する研究 — 昭和53/54年度. (1981)
- 第 25 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅸ) — *Microcystis* (藍藻類) の増殖特性 — 昭和 53 / 54年度. (1981)
- 第 26 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X) — 藻類培養試験法による AGP の測定 — 昭和 53 / 54年度. (1981)
- 第 27 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(XI) — 研究総括 — 昭和53/54 年度. (1981)
- 第 28 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54/55年度特別研究報告. (1981)
- 第 29 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
— 第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科 Orthoclaadiinae 各種の記載と, その分布の下水汚染度との関係について —
— 第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載 —)
- 第 30 号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 — 昭和54/55年度 特別研究報告, (1982)
- 第 31 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和55年度, 特別研究報告. (1981)
- 第 32 号 スモッグチャンバーによる炭化水素窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和54年度 特別研究報告 — 環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究 (その1). (1982)
- 第 33 号 大気運動と大気拡散過程のシミュレーション — 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 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)

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 1966. (1977)
- No. 2* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976–1977. (1978)

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

Research Report from the National Institute for Environmental Studies

- No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1977. (1978)
- No. 5* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells – Research report in 1976–1977. (1978)
- No. 6* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1977–1978. (1979)
- No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- No. 8* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977–1978. (1979)
- No. 9* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1978. (1979)
- No.10* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976–1978. (1979)
- No.11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No.12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No.13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
 - Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
 - Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No.14* Studies on the effect 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. (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 hydro-meteorological 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 *Microcystis* – 1978–1979. (1981)
- No.26* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Determination of algal growth potential by algal assay procedure – 1978–1979. (1981)
- No.27* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Summary of Researches – 1978–1979. (1981)
- No.28* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Progress report in 1979–1980. (1981)
- No.29 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)
- Part 3. Species of the subfamily 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 hydrocarbonnitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). (1982)
- No.33* Simulation of atmospheric motions and diffusion processes – meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Progress report in 1980. (1982)
- No.34* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1980. (1982)

* in Japanese

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES
No. 34

国立公害研究所研究報告 第34号
(R-34-'82)

昭和57年3月31日発行

編集・発行 国立公害研究所

茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

印刷 株式会社イセブ印刷
茨城県新治郡桜村天久保2-11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
March 1982