

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56年度特別研究報告

Research Report in 1981

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

国立公害研究所研究報告 第39号

環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究

— 昭和56年度 特別研究報告 —

正 誤 表

頁	行	誤	正
1	下から18行目	代表性の問題点	代表性の問題
3	上から16行目	プロフィール	プロファイル
4	上から2行目	シミュレーションモデル	シミュレーションモデル
4	上から14行目	NO ₂ の測定を、	NO ₂ の測定と、
84	最下行のフットノート(*)の説明は p88 の最下欄に掲載		
127	図4(d)の写真うらがえし		

序

環境の適正な管理を行うためには、大気、水域、陸域の汚染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る。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、地上の限られた地点で、時間についても離散的な観測を行う限り到底不可能である。リモートセンシング（遠隔計測）の方法は、計測機器の発達、データ解析の理論的進歩などによって最近目覚ましい発達を遂げた。そこで国立公害研究所でも特別研究「環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究」として昭和55年度より4か年計画で遠隔計測技術を環境汚染の計測分野で実用化するための研究に取り組んでいる。その初年度の成果は本シリーズ（国立公害研究所研究報告）第34号にまとめておいた。この報告は第2年度（56年度）の研究の成果をまとめたものである。

この研究は、レーザーレーダーによる大気汚染の遠隔測定とマルチスペクトルスキャナーによる水質汚濁の計測とに大別される。大型のレーザーレーダーはすでに完成して稼動中であるが、分光型のレーザーレーダーについては装置を製作し、併せて基礎技術の確立を企画している。一方マルチスペクトルスキャナーは、既存の技術を使った。

これらの方法によって遠隔計測を行うと大気の大立体的な汚染分布と水質の平面的な汚濁とが画像データとして得られ、また、測定を継続することによって汚染分布の時間的な移動、変動なども調べることができる。しかしながら各種の原因などによる雑音等を除去して取得データの精度をあげるいわゆるデータ処理手法についてはまだ研究を要するところが多い。このようにして広域の環境汚染の計測が可能になった場合にそれを環境保全の行政施策へ適応するためには、さらに測定局の適正配置、広域汚染指標の制定などを含めてリモートセンシングによって取得されたデータの解析利用の道が研究されなければならない。それらについても若干ふれておく、このようにして遠隔計測技術を環境測定に適用し、かつ環境行政に利用するための道を模索しているところである。

本報告にも述べている通り、レーザーレーダー技術やマルチスペクトルスキャナーの技術、及びスペクトルセンサー技術など遠隔計測機器についてはなお技術的に検討を要することが少なくなく、現在そのような技術が進歩、発達している。またそれと同時に、得られたデータを解析する情報処理技術についてもなお研究を継続する必要がある。これらはさらに今後も研究所において行われる予定である。

本報告は、特別研究の中途経過であるのでまだ未完成なところも少なくないが、リモートセンシングについては国内外に極めて関心が高まっているのでそれらの方々から有益な御批判が寄せられることを期待している次第である。

昭和57年10月

国立公害研究所

所長 近藤次郎

目 次

I. 研究の概要と意義 (竹内延夫・内藤正明).....	1
II. 報文	
1. 白色雑音を利用したA/D変換器分解能改善法.....	15
清水浩・飯倉善和・笹野泰弘・竹内延夫	
2. レーザーレーダー信号の高精度収集法.....	27
笹野泰弘・清水浩・竹内延夫	
3. レーザーレーダー信号の積算平均によるS/N比改善.....	39
笹野泰弘・竹内延夫	
4. 大型レーザーレーダーによる広域観測画像の修復法.....	47
北村新三・平尾浩司	
5. 大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布の計測 ——高品質画像データの収集のための測定方法, データ処理法の検討——.....	61
中根英昭・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・清水浩・竹内延夫	
6. 大型レーザーレーダーによる画像の強調と雑音除去.....	77
宮本定明・大井絃・内藤正明	
7. 中赤外半導体レーザーを用いた汚染気体の高感度計測装置の基本特性.....	93
新井敏弘・佐藤平道・中根英昭・竹内延夫	
8. リモートセンシング画像におけるピーク雑音の除去.....	119
安岡善文・R. M. Haralick	
9. 遠隔計測による湖水域の水質分布計測 ——回帰分析を用いた大気補正と水質推定——.....	129
安岡善文・宮崎忠国	
10. 大気汚染測定系の総合評価のための基礎的研究 ——地上測定局網の評価と構成——.....	145
大井絃・新藤純子・藤原正弘	

CONTENTS

I. Outline and Significance of the Studies	1
N. TAKEUCHI and M. NAITO	
II. Original papers	
1. Resolution Improvement in an Analog-to-Digital Converter Using White Noise.....	15
H. SHIMIZU, Y. IIKURA, Y. SASANO and N. TAKEUCHI	
2. Resolution Improvement for Collecting Laser Radar Signal.....	27
Y. SASANO, H. SHIMIZU and N. TAKEUCHI	
3. S/N Ratio Improvement by Averaging in Laser Radar Signals.....	39
Y. SASANO and N. TAKEUCHI	
4. A Method for the Restoration of Images from the Wide-Range Laser Radar.....	47
S. KITAMURA and K. HIRAO	
5. Measurement of Wide Area Aerosol Distribution by the Large Laser Radar.....	61
H. NAKANE, Y. SASANO, N. SUGIMOTO, I. MATSUI, H. SHIMIZU and N. TAKEUCHI	
6. Enhancement and Noise Reduction of Images Obtained by the Large-Scale Laser Radar.....	77
S. MIYAMOTO, K. OI and M. NAITO	
7. Fundamental Performance of Highly Sensitive Instrument for Air-Pollutant Measurement by Middle-Infrared Semiconductor Diode Laser.....	93
T. ARAI T. SATO, H. NAKANE, and N. TAKEUCHI	
8. Peak Noise Removal in Remote Sensing Image.....	119
Y. YASUOKA and R.M. Haralick	
9. Remote Sensing of Water Quality in the Lake —Atmospheric Correction and Water Quality Estimation by Regression Analysis—.....	129
Y. YASUOKA and T. MIYAZAKI	
10. A Fundamental Research for a Comparative Evaluation of Air-Pollution Monitoring Systems —An Evaluation and Synthesis of a Network of Monitoring Stations—.....	145
K. OI, J. SHINDO and M. FUJIWARA	

I. 研究の概要と意義

竹内延夫 (大気環境部)・内藤正明 (総合解析部)

1. はじめに

本特別研究 (環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究) は、環境汚染計測に対して遠隔計測技術の活用を図るための技術的、システム的な問題点を検討することを目的として、昭和55年度より4か年計画で開始されたものである。初年度の研究成果は既に国立公害研究所研究報告第34号として公表したが、本報告書は、第2年度 (昭和56年度) の研究成果をまとめたものである。

今日、環境行政は大気や水の総量規制、環境影響評価、環境管理計画など次第に複雑多様化し、いずれもその政策の立案に当たって広域環境に関する高度な汚染分布データが必要な情報の一つとして強く要求されるに至っている。また、これら施策評価の基礎としての、総合的な環境汚染指標の策定などにも、質の高い汚染分布情報の収集が望まれている。これに対して、対象地域に離散的に設置された限られた数の測定局によって行われてきた従来の環境汚染の計測は、必ずしも十分にその要求に応え難い問題点を有する。その一例が測定値の時間的・空間的な代表性の問題点であり、大気汚染計測、水質汚染計測のいずれにおいても、これが現在一つの大きな検討課題となっている。また、環境行政の進展とともに、局所的高濃度汚染は改善されたが、一方、汚染現象の広域化が問題となってきている。大工業地帯や大都市などの大発生源から排出された汚染質は、排出源近傍において局所的な汚染をもたらすだけでなく、地域特有の風系構造によって遠距離を運ばれ、その結果煙源から数十km離れた地点で大気汚染の被害をもたらしている。しかも、遠距離を運ばれる過程で、光化学反応が進み、2次汚染質が生成されるなど、汚染のメカニズムが非常に複雑になっている。このような広域、立体に亘る複雑な汚染現象の把握、メカニズムの解明も現時点における緊急課題の一つであることは周知の通りである。そのため航空機を利用した大規模な観測が実施され、その実態の把握に努力がなされている。しかし、航空機を利用する測定であっても、広い領域における汚染質の分布状況を立体的に、しかも時間的に連続して把握することは困難である。さらに、航空機観測を頻繁に実施することが経費の点から、難しいことは言うまでもない。これらの事情から現状では、広域大気汚染現象の全体的な把握に到っていない。

ところで、遠隔計測技術を用いると、3次元領域の物象の状況を時間的および空間的に連続に近い形で把握することが可能である。この技術を環境計測へ利用することは、前述の諸問題に対処する方法として極めて有効であると期待されている。しかし遠隔計測は新しい技術であり、まだ環境計測分野で十分実用化されるまでには至っていないのが現状である。本研究では環境計測分野での遠隔計測技術の実用化を目指して、基礎技術の開発から、環境行政への適用性の検討までを含めた

一連の総合研究を行うことを目標としている。遠隔計測技術としては、大気汚染計測にはレーザーレーダー技術を、水質・陸域計測に対しては、マルチスペクトルスキャナー（MSS）技術を取りあげる。

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

MSSは陸地、海面、湖水などによる電磁波の放射、散乱量を分光計測するパシブリモートセンサーである。MSSデータの分光的解析から測定対象の状態に関する情報が得られる。水質・陸域の遠隔計測技術としては、現在のところ最も実用化に近いと考えられている。

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

遠隔計測技術を用いると、大気汚染質、水質汚染質、陸域汚染の空間分布を画像パターン（以下、“パターン”と呼ぶ）として把握することが可能となる。これは従来の“離散点”測定データの集積では得ることが難しい、新しい多様な情報を有している。この環境汚染の空間的なパターン情報を環境行政に適用するには、

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

という一連の段階的な研究が必要である。

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

2. 本研究の構成

本研究は、大気、水質・陸域の環境汚染に関する遠隔計測技術の開発と、その結果として得られる画像パターン情報の環境行政施策への適用性の検討を課題としていることは上述の通りであるが、大気汚染に関しては、広域の汚染・移流拡散状況の把握と、大気汚染気体成分の局所的な空間分布状況の把握が二つの重要な研究分野である。このうち、広域の大気汚染現象の計測には大型レーザーレーダーが、局所的汚染気体成分の分布状況の計測には分光型レーザーレーダーが適している。この二つのレーザーレーダーは、異なる測定原理に基づいており、技術的にもその相違は大きい。したがって本研究では、この二つを独立したサブテーマ（研究課題）とした。

水質・陸域汚染に関しては、測定技術が同一なので1サブテーマとし、まずMSS技術の水質推定への適用を図る。

それぞれのサブテーマは、測定装置の開発、計測手法（データ処理手法を含む）の開発、フィールド計測、画像パターンデータの解析と行政施策への適用性の検討という四つの段階に分けられる。測定対象によって設定された三つのサブテーマは、“パターンデータの解析”までは、互いに関連しつつもある程度独立に研究が進められ、“適用性の検討”の段階で一つにまとめられる。それゆえ、最終段階の“適用性の検討”を独立のサブテーマとした。以上の課題の構成を図1に示した。実際のサブテーマ名は以下の通りである。

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

それぞれのサブテーマで取り上げる具体的研究内容は以下の通りである。

1. 大型レーザーレーダーに関しては基本的な装置部分（ハードウェア部分）が完成している。したがって、装置機能の向上から開始し、高品質画像データを得るデータ処理法の開発、広域汚染分布や移流のデータの取得方法の研究を行う。
2. 分光型レーザーレーダーに関しては、装置の開発から開始し、フィールドで大気汚染気体の濃度分布プロフィールを計測する手法を開発する。分光型レーザーレーダーの種類としては汚染気体の空間分布が容易に測定できる差分吸収方式レーザーレーダー（DIAL）と一定距離の平均濃度を高感度で測定できる長光路吸収法を採用する。

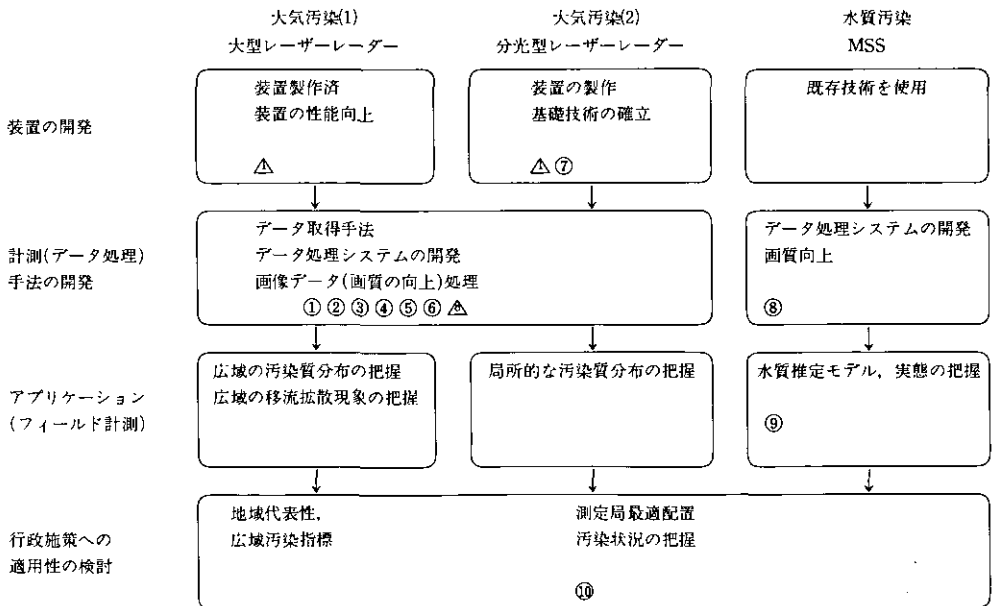


図1 研究計画 (○は報文番号、△は関係ある分野)

3. 水域・陸域に関しては、MSS技術が既にハード面では完成しているので、画像データ処理装置の開発から始めて、水質推定のシミュレーションモデルの開発を行う。

4. 以上の研究成果をもとに、分布パターン情報を用いて、環境汚染の解析と広域的評価、およびその環境行政施策への適用を検討する。

3. 研究成果の概要

本研究は図1に示した流れにそって研究が進められている。測定対象とそれに適した測定技術によって分けられた三つのサブテーマは、いずれも装置の開発、計測手法の開発、フィールド計測(データの収集)を行っている。これらを総合してサブテーマ4で、得られた画像パターンデータの行政施策への利用法を検討している。

55年度、56年度の研究推進の結果、遠隔計測技術によって得られる環境汚染パターンデータに対するデータ処理、画質向上の基礎的手法がほぼ確立された。

大型レーザーレーダーに関しては、これまでに測定機能の向上、広域汚染分布や移流(風)のデータ取得手法の基礎研究、画像データの画質・信頼性の向上の研究がなされた。

分光型レーザーレーダーに関しては、可視域DIALを用いたNO₂の測定を、赤外域半導体レーザーを光源とする長光路吸収方式を用いたCOの測定をとりあげた。それぞれの装置を試作し、技術的な問題点と解決の方向を明らかにするなど、基礎的な実験を終了した。

MSSについても大気効果補正手法を開発し、水質推定のシミュレーションモデルを構築するなど基礎段階を終了した。

一方、分布パターン情報を環境汚染解析に利用する研究に関しては、55~56年度では、シミュレーションデータを用いた基礎的研究を進めてきた。

本年度の研究成果を各サブテーマ毎に要約すると以下の通りである。

(1) 大型レーザーレーダーによる広域汚染の計測手法の開発

56年度においては、前年度の検討結果に基づき、データ質のチェック・向上を目的とするデータ処理手法を開発するとともに、装置に起因する各種ノイズ対策を施した。また、減衰効果の補正手法について検討を加えた。データ処理に関連して、データの収集・処理・蓄積の効率化を図るため、ミニコン・大型電算機間のデータ伝達システムを用いた処理手法を実用化した。56年度末までに、各種のノイズ対策、ソフト的なノイズ除去手法の適用により、半径30km程度までの汚染質空間分布が、ほぼ定常的に取得できる段階にまで達している。

項目ごとの主な研究成果は以下のとおりである。

1) 定常的な測定のための技術開発

微弱信号の検出精度を高めるため、電氣的ノイズに除去対策を施した。また、装置本体の熱歪み

に起因すると考えられる光軸平行性のずれの現象を各種条件下での実験より明らかにした。

2) 広域三次元データの処理・表示手法の開発

データの収集・処理・表示の一連の閉鎖ループ処理のための、大型レーザーレーダー、ミニコンピュータ、環境情報部大型電算機間の伝達システムを利用した処理手法を実用化した。また画像データ処理プログラムの一部として、障害物エコーの検出・除去ルーチンを開発した。

画像処理プログラムパッケージの導入により、画像の平滑化、画像強調等の手法についてレーザーレーダーデータへの適用性の検討を行った。

大型レーザーレーダーから得られる2次元パターンに含まれる情報を明確化するための画像強調とスムージングのアルゴリズムを検討し、画像処理プログラムを作成した。これらのプログラムによる処理をレーザーレーダーにより得られた平面画像に適用し、濃淡の強調、像のエッジの明確化、不要部分の除去、雑音の空間的特性を考慮したスムージングなど画質の向上をはかった。

3) 広域汚染分布の計測手法の開発および汚染質の広域移流、拡散現象の計測手法の開発

計測の範囲を拡大するために、信号に重畳される電氣的ノイズを除去する対策を施すとともに、データ質のチェックプログラムを開発して広域測定データについて各種条件とデータ質の相関を検討した。これに基づき、半径30km程度までの良質な広域汚染分布データの収集・蓄積を行ってきた。

(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) 前年度に引き続き、NO₂測定用車載型差分吸収レーザーレーダーの性能試験を行った。レーザーの発する電氣的誘導雑音、レーザー発振の安定性など実際に計測車に搭載した場合の技術的な問題点を明らかにした。

2) 前年度に引き続き、道路からの自動車排ガス拡散の測定を携帯型ガス濃度測定器及びミー散乱レーザーレーダーを用いて行った。その結果、特にミー散乱レーザーレーダーによる測定では、交通量に対応した粒子状物質の濃度パターンが道路に直角な方向に拡散していく状況をとらえることができた。

3) 赤外半導体レーザーを光源とする長光路吸収測定システムの開発のために、循環型クライオスタット冷却器内にマウントした赤外半導体レーザー (PbSSe, 発振波長4.5~4.7 μ m) を光源とするCO気体用の高感度検出システムを試作した。本装置では光路を二つに分け、片方はCOを封入した標準セル中を通して波長を固定するとともに、出力の変動の規格化を行う。検出回路は2次導関数法を採用し、検出感度の向上を図った。さらに、測定データをデジタル化し、マイコンで処理する方式を採用した。これらによって、100mの光路に換算して、5ppbの測定データを得た。

(3) 環境パターン情報の処理解析手法の開発

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

まず、広水域の水質分布を定量的に推定することを目的として、データの収集実験、水質の定量化を行った。実験水域として富栄養化による被害の著しい霞ヶ浦を選び、昭和56年11月24日及び昭和57年3月3日の2度にわたり、人工衛星（LANDSAT）、航空機によるマルチスペクトル画像データの収集、グラントルースデータ（水質及び水中、水面での輝度スペクトル）の収集を実施、収集されたデータに対して以下の解析を行った。

1) 遠隔計測データと水質データの関連を調べるために、回帰分析を行い、両者を関連づける統計モデルを構成した。この結果、SS（浮遊懸濁物）、透明度が遠隔計測データと高い相関を有することが示された。また富栄養化と関連の深いクロロフィルは狭帯域のマルチスペクトルスキャナ（航空機搭載）データと高い相関を有し、分布図推定の可能性が示された。

2) 水質の定量化に際しては、遠隔計測データから水面反射光、大気による散乱光などの雑音成分を除去することが重要な問題となる。ここでは、グラントルースとして収集された水面直上及び水中での輝度スペクトル情報と機上で遠隔計測された輝度スペクトル情報とを比較することにより、水面及び大気が遠隔計測データに及ぼす影響の評価を試みた。この結果、ヘイズ等で視程が悪い場合でも、ヘイズの分布が一樣であれば遠隔計測において水中に関するスペクトル情報が著しく損われることはないことが示された。

一方、遠隔計測で得られる画像データ、グラントルースデータなどの大量情報を効率的に処理するために、解析処理システムの拡充を図った。

3) 対話型画像処理システム（IPSEN）のソフトウェア、処理方式の拡充を行い、遠隔計測データの雑音除去、データ圧縮などに新たな方式を開発した。特にレーザーレーダーデータ処理で問題となる線状雑音（障害物後方の信号レベル低下など）を統計的に除去する方式を開発した。

4) 画像データ及びグラントルースデータを効率的に蓄積、検索、処理するためにそのデータベース化について検討し、特にそのデータ構造の問題点を明らかにした。

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

このテーマは、リモートセンシングによる環境情報が実用レベルで得られるようになった時点で、この情報をどのように利用して環境施策の評価と策定に結びつけるかについて検討することを目的としている。

前年度に引き続き、汚染分布データの地域代表性を考えるため、レーザーレーダーから取得される広域の汚染分布パターンをいくつかの類似度を導入して、地域分割を行うことの検討を進めた。これはモニタリングポストを設置するための地域代表性の決定の基礎手法となるもので、具体的対象を選び4種の手法の比較を行い、それぞれの手法の得失を明らかにした。

本報告書の報文（II-1～10）が、研究のフロー図のどの位置に相当するかは、図1の関係コラムの中に記した。報文II-1～6はサブテーマ1に、II-7はサブテーマ2に、II-8、9はサブ

テーマ3, II-10はサブテーマ4に関するものである。II-1, 8は他のサブテーマにも関連する研究内容である。次節に各報文の概要を紹介する。

報文の概要は以下の通りである。

〔II-1〕 白色雑音を利用したAD変換器分解能改善法

(清水浩・飯倉善和・笹野泰弘・竹内延夫)

レーザーレーダーのデータ処理では、ほとんどの場合、検出器からの信号をデジタル化したあとでコンピュータ処理を行う。当研究所のシステムも全てデジタル処理方式を採用している。デジタル処理方式は、(1)演算途中で精度が低下しない、(2)コンピュータで任意の処理を施せるという長所を持つが、近距離の強い信号から遠距離の微小信号までの広いダイナミックレンジを有するレーザーレーダー信号を、限られたビット数(精度)のデジタル変換器(ADC)でデジタル化しなければならない。広いダイナミックレンジを扱うには、信号のダイナミックレンジの圧縮法、あるいはADCのダイナミックレンジの拡大法をはかる必要がある。本報文では後者の1例として適度の白色雑音を重畳する方法を提案し、実験的に検証している。

〔II-2〕 レーザーレーダー信号の高精度収集法

(笹野泰弘・清水浩・竹内延夫)

本報文では、報文II-1の手法も含めて、レーザーレーダー観測の際に精度の良いデータを収集するための三つの方法について詳しく検討している。

大型レーザーレーダーを用いて広域のエアゾル分布を測定するとき、観測される信号の大きさは、近距離からの信号の方が遠距離からの信号よりも $10^5 \sim 10^6$ 倍強い。これだけの幅のある信号を一つの測定系で扱うのは難しい。本報文では信号の幅を圧縮する方法として「幾何学的効率を利用する方法」を取りあげ、測定系のダイナミックレンジを拡大する方法として、「複数のADCを用いる方法」及び「白色雑音を重畳させた積算平均化による方法」(報文II-1)の二つを扱った。

これらの方法の組合せによって大型レーザーレーダーのデータ収集を実用的に十分な高精度で行うことが可能である。ここで扱った手法は大型レーザーレーダーばかりでなく、差分吸収ライダー(DIAL)も含めて全てのレーザーレーダーに適用できる。

〔II-3〕 レーザーレーダー信号の積算平均によるS/N比改善

(笹野泰弘・竹内延夫)

大型レーザーレーダーによる測定を実施する際、効率的なデータ収集をするためのパラメータ設定が極めて重要である。例えば、測定範囲、時間・空間分解能、測定時間などは、測定精度との関係で最適な測定方法を設定することが必要である。

本報文では、これらのパラメータ設定をする上で重要な要素となる時間・空間分解能と測定精度との関係について、理論および実測の両面から明らかにしている。この結果を用いることによって、レーザーレーダーによるデータ収集に先立って、気象条件に応じて適切な測定方法を設定することができる。

〔II-4〕大型レーザーレーダーによる広域観測画像の修復法

(北村新三・平尾浩司)

本論文では大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布の高品質画像データを得るための処理手法の一環として、障害物やその背後の減衰による異常値を検出・除去する手法を提案し、実際のデータに適用して手法の有効性を実証している。これらの異常値を障害物にもとづくピーク値として捉え、統計的検出法によって検出し、加算受信信号の積分波形を基準として画像データを修正する手法を採用している。

〔II-5〕大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布の計測

——高品質画像データの収集のための測定方法，データ処理法の検討——

(中根英昭・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・清水浩・竹内延夫)

地上大気汚染量との関連等を研究するために、高品質なエアロゾル分布広域画像データの収集を目的として、測定方法およびデータ処理方法の改善の結果を報告している。

測定面では、レーザービームと望遠鏡の光軸合わせについて、データ処理面では、報文II-4の内容を取り入れた障害物や高濃度汚染の影響の除去について力点を置いて検討している。その結果得られたエアロゾル分布パターンデータは、十分なS/N比を持ち、物理的にも妥当であることを報告している。

〔II-6〕大型レーザーレーダーによる画像の強調と雑音除去

(宮本定明・大井紘・内藤正明)

遠隔計測により得られる画像データをより有効に利用するためには、一般に画像の画質向上、特徴把握のための画像強調、画像変換などが研究されなければならない。これら、計測された画像データを計算機によって解析し、処理する手法は画像処理と呼ばれ、遠隔計測に必須のものとなっている。

レーダーレーダーによるデータには、その装置の性質、動作環境等から、様々な雑音に伴う。従って、一般に平滑化と呼ばれる画像処理の手法が有効に働くと考えられる。本稿では、平滑化の様々なアルゴリズムの中から、雑音を除去する一方で、画像に存在するパターンの輪郭を保存し、単純化するものを選び、大型レーザーレーダーによる画像に適用してその効果を見た。

また、レーザーレーダー画像に隠されている様々なパターンをより有効に抽出するため、ヒストグラム平坦化による画像強調を試みた。この手法は、いわば、画像を複雑化することによって、画像から得られる情報をなるべく多くしようとするもので、先に述べた平滑化の手法と対照をなしている。

さらに、原画像と平滑化画像との重ね合わせにより、原画像の情報を失わず、かつ雑音を除去する手法を考え、大型レーザーレーダー画像に適用した。

〔II-7〕中赤外半導体レーザーを用いた汚染気体の高感度計測装置の基本特性

(新井敏弘・佐藤平道・中根英昭・竹内延夫)

本論文は大気汚染気体の高感度検出に適した長光路吸収法を実用化するために、装置を試作し、基本的特性を測定した結果について報告している。

報文の前半では、最小検出濃度、測定時のS/N比について3種の長光路吸収法(2波長差分測定法、周波数変調1次導関数法、周波数変調2次導関数法)について理論的検討を加え、2次導関数法が最も優れていることを明らかにした。後半では、装置の製作と測定された基本特性について述べている。装置は周波数安定性を高めるために測定汚染気体の吸収線にレーザー周波数を固定する方式を採用している。基本特性として、レーザー周波数の同調率、最適変調条件、周波数安定度、濃度測定指示値の直線性などを測定し報告している。

〔II-8〕 リモートセンシング画像におけるピーク雑音の除去

(安岡善文・R.M.Haralick)

広域にわたる環境状態を計測するために、人工衛星、航空機などから撮影されたりリモートセンシング画像がしばしば利用される。一般にリモートセンシング画像では信号レベルが低いなどの理由により様々の雑音により汚されている場合が多い。例えば、マルチスペクトルスキャナー(MSS)やレーザーレーダーなどの走査型センサーでは、電源電圧の変動などに起因する走査線むらなどの雑音が発生する。また検出器における白色性のランダム雑音なども無視できない。これらの雑音は、画像データを利用して、土地利用分類、水質分布推定などの解析を行う際に誤分類や推定誤差を生ずる原因となるため、その除去が不可欠である。

本報文は、リモートセンシング画像における雑音除去方式を確立することを目的としている。特に、ピーク状雑音に着目し、これを自動的に検出、除去する方式について検討している。ピーク状雑音は、一般の白色性雑音と異り、平滑化などの操作によって雑音の影響が拡大するため、これを個別に検出しなければならない。本報文では統計的な検定方法を用いてピーク状雑音を自動的に除去する方式を開発し、マルチスペクトルスキャナーによって得られた画像データに適用、良好な結果を得たことを報告している。

〔II-9〕 遠隔計測による湖水域の水質分布計測

——回帰分析による大気補正と水質推定——

(安岡善文・宮崎忠国)

水に依存することの多い我が国にとって、海洋、湖沼などにおける環境汚濁を監視し、水の浄化を行っていくことは重要な課題である。広い範囲にわたる水域の環境を把握するために、人工衛星、航空機などを利用する方法(遠隔計測)が試みられている。しかしながら現在のところ、遠隔計測データから水質を推定するための普遍的なモデルは得られていない。これは、(i)大気による影響、(ii)水面反射光による影響、(iii)水質組成の違いによる影響、が複雑で時期、場所によらないモデルの構成が困難であることによる。

本報告は、広域水質分布を計測するために、普遍的な水質推定モデルを構成することを目的としている。まず、上記の3つの要因のうち(i)大気についてその影響を評価し、補正することを行っている。ここでは、人工衛星LANDSATによるマルチスペクトル(分光)データ及び水面直上でのスペクトルデータの統計的比較から大気透過率、光路輝度の大气パラメータを推定し、このパラメータを用いてLANDSATデータを補正している。さらに大気補正されたデータと水上実測データ(水質データ)の比較から、水質推定モデルを構成し、水質分布図の推定を行っている。

今後の問題として、(ii)水面による影響、(iii)水質組成の違いによる影響、を定量的に評価し、時期、場所によらない普遍的な水質推定モデルの開発の必要性を論じている。

〔II-10〕大気汚染測定系の総合評価のための基礎的研究

——地上測定局網の評価と構成——

(大井紘・新藤純子・藤原正弘)

本報文では、経済的な立場もふくめた合理的な環境汚染観測体系を、遠隔計測も含めたものとして形成するための基礎研究として、地上測定局網により、大気汚染濃度の地表分布を効率的に得る方法を検討している。

遠隔計測技術の汚染監視行政における実用性を考えるとき、地上測定局によるものより低コストで測定できるかが最終的な問題になる。この経済比較を意味のあるものにするためには、地上測定局網も十分に合理的に構成されたものでなければならない。

地表の濃度分布を精度よく求めるためには、測定局を多数設ければよいというわけにはゆかない。測定局の建設と維持には巨額の経費が要るからである。測定局は、測定目的を果す範囲で、少なければ、少ないほどよい。

そこで、本研究では、測定局データから、地表の濃度分布を求める手法として、スプライン法による内挿を用い、定められた測定局でのデータから、必要な精度で濃度分布が得られているかどうかを判別する方法を与えている。この方法に基づいて、測定局網の中で必要な局数が同時に求められる。この必要局数から、既存測定局網のみなおしをする方法を導いている。すなわち、ある必要な精度で濃度分布を求めるために残すべき局を最適に選び出す方法を与えている。

この研究では、地上測定局網の利点と限界をより明らかとし、遠隔計測を含めた観測系を作るうえでの基礎的知見を得ている。

4. おわりに

55年度、56年度の研究推進の結果、遠隔計測技術によって得られる環境汚染画像データに対するデータ処理、画質向上の基礎的手法はほぼ確立された。また、分光型レーザーレーダーシステムについての基礎的な実験が終了した。

第3年度は、55～56年度に確立された基礎的手法にもとづいて、

- 1) アプリケーションプログラムの開発
- 2) グランドトゥースデータとの比較による遠隔計測データの定量化
- 3) データの収集・蓄積

を行う。さらに今後、これらを推し進め、遠隔計測データをもとにしたパターンデータの利用・評価の検討を行う予定である。

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数の研究者の方々、並びに実務的な面での支援を頂いた研究企画官、総務部さらには環境庁の関係者に深く感謝の意を表す。

印刷物・口頭発表のリスト

〔印刷物〕

(サブテーマ1)

- 1) 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.
- 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レーザーレーダーの設計と製作。応用物理, **50**, 1154-1164.
- 3) 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。電子通信学会論文誌, **J64-C**, 242-249.
- 4) 清水浩・飯倉善和・笹野泰弘・竹内延夫(1981)：ディザ信号の重畳によるA-D変換器分解能の改善法。電子通信学会論文誌, **J64-A**, 963-969.

(サブテーマ2)

- 5) 杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫(1981)：差分吸収レーザーレーダーによる排煙流中のNO₂濃度分布の測定。応用物理, **50**, 27-32.
- 6) 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**, 37-44.
- 7) 溝口次夫(1981)：道路近傍の自動車排出ガスの挙動と測定。京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム講演論文集, **3**, 224-227.

(サブテーマ3)

- 9) 宮崎忠国(1982)：ランドサットから見た霞ヶ浦。水, **24-2**, 28-33.

(サブテーマ4)

- 10) 内藤正明・落合美紀子(1981)：環境モニタリングステーションの適正配置について。公害と対策, **17**, 934-940.

〔口頭発表〕

(サブテーマ1)

- 1) 竹内延夫(56.6)：環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発—大型レーザーレーダーによる水平移流ベクトルの測定—。国立公害研究所研究発表会。
- 2) 広原寿英・笹野泰弘・清水浩・竹内延夫・奥田典夫・河村武(56.5)：スキャニングレーダーレーダーによる水平の平均風速ベクトルの測定。日本気象学会, 東京。
- 3) 清水浩・笹野泰弘・松井一郎・竹内延夫・奥田典夫(56.4)：A/D変換器の統計的誤差を利用した測定の高精度化。第28回応用物理学関係連合講演会, 小金井。
- 4) 清水浩・松井一郎・杉本伸夫・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫(56.4)：大型レーザーレーダーの性能試験。昭和56年度電子通信学会総合全国大会, 東京。
- 5) 竹内延夫(56.9)：レーザーレーダーによる大気汚染計測の問題点。光と電波の境界領域第130

委員会，東京。

- 6) 竹内延夫・松井一郎・清水浩・奥田典夫(56.10)：大型レーザーレーダー用航空機探知レーダーの製作。第42回応用物理学学会学術講演会，福井。
- 7) 竹内延夫・笹野泰弘・清水浩・松井一郎・杉本伸夫・奥田典夫(56.10)：大型レーザーレーダーによる広域大気汚染観測(II)——ローカールスケールの観測。第22回大気汚染学会，秋田。
- 8) 竹内延夫・笹野泰弘・松井一郎・杉本伸夫・平尾浩司・北村新三(56.11)：レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布データ収集における問題点。第7回リモートセンシングシンポジウム，東京。
- 9) Takeuchi, N., H.Shimizu, Y.Sasano, N.Sugimoto, I.Matsui and H.Nakane (57.2)：Wide area air pollution measurement by the NIES large lidar, Workshop on Optical and Laser Remote Sensing, Monterey (USA).

(サブテーマ2)

- 10) 杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫(56.4)：2波長同時発振DIALによるNO₂濃度の測定。第28回応用物理学関係連合講演会，東京。
- 11) 杉本伸夫・竹内延夫・奥田典夫(56.10)：地上ベース蛍光法レーザーレーダーによる成層圏NO₂測定の検討。第42回応用物理学学会学術講演会，福井。
- 12) 杉本伸夫・竹内伸夫・奥田典夫(56.10)：NO₂測定用車載型差分吸収レーザーレーダーシステム。第22回大気汚染学会，秋田。
- 13) Takeuchi N., N.Sugimoto, S.Takezawa and M.Okuda (56.9)：Remote measurement of the NO₂ Concentration profile using a tunable laser. 9th Int. Conf. Atom. Spectrosc. and 22nd Colloq. Spectrosc. Int. , Tokyo.
- 14) 佐藤平道・竹内延夫・奥田典夫・新井敏弘(56.10)：赤外半導体レーザーを用いた多重光路吸収システムの製作。第42回応用物理学学会学術講演会，福井。
- 15) 佐藤平道・竹内延夫・新井敏弘(57.4)：波長変調法によるCO濃度測定装置の特性。応用物理学関係連合講演会，東京。

(サブテーマ3)

- 16) 宮崎忠国・清水浩・安岡善文(56.11)：多用途高速スペクトロメータの開発。第7回リモートセンシングシンポジウム，東京。
- 17) 宮崎忠国・岡見登・岸野元彰(56.11)：霞ヶ浦湖水の分光特性と水質。第7回リモートセンシングシンポジウム，東京。
- 18) 安岡善文・R.M.Haralick(56.11)：リモートセンシング画像における走査線雑音、粒状雑音の除去。第7回リモートセンシングシンポジウム，東京。
- 19) Yasuoka Y., T.Miyazaki (56.12)：Assessment and evaluation of water quality by remote sensing, Int. Symp. Man's Impact Ecosystem Dynamics, Tokyo.

(サブテーマ4)

- 20) 藤原正弘・大井紘・新藤純子(56.8)：補間法による大気汚染濃度分布の推定と測定局の最適配置。京都大学環境衛生工学会第3回シンポジウム，京都。

II. 報 文

II-1

白色雑音を利用した、A-D変換器の分解能改善法*

清水 浩¹・飯倉善和²・笹野泰弘¹
竹内延夫¹

Resolution Improvement in an Analog-to-Digital Converter Using White Noise

Hiroshi SHIMIZU¹, Yoshikazu IIKURA²
Yasuhiro SASANO¹ and Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

A-D変換器で1 LSB以下の測定を行うための分解能改善の方法に、信号にディザを重畳させ、繰返し測定を行う方法がある。本論文ではこの方法の定量的検討と、実験的検証を行っている。

定量的検討ではディザが信号に加わった場合のA-D変換結果と、その分散の期待値を数値計算より求めた。その結果、ディザの振幅が大きくなるに従い、A-D変換結果の期待値は急速に信号の真の値に近づき、分散の期待値は大きくなることが判明した。この結果より、ディザ振幅と分解能改善の関係が測定回数との関連で求められた。例えば、測定回数を100回とすれば、ディザの振幅が0.4LSB程度のとき、分解能は0.05LSBまで改善できる。

これらの計算結果を、ディザ源として白色雑音源を使用し、信号源としてDC標準電源を使い、A-D変換器として、トランジェントレコーダを用いて検証を行い、計算と実験が一致することを確認した。

Abstract

This paper discusses a method to improve the resolution of an analog-to-digital (A-D) converter to detect small differences less than 1 LSB (least significant bit) in an input signal. Resolution is improved by superposing dither on the input signal

* 本論文の要旨は電子通信学会論文誌J64-A(1981), 963-969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
Atmospheric Environment Division, The National Institute for Environmental Studies, Yatabe
Tsukuba, Ibaraki, 305, Japan
2. 同 総合解析部
ibid System and Planning Division

and averaging over many measurements. The theory and experimental verification for this method are described.

In this analysis, the expected value of the result of A-D conversion and the expected value of the variance are calculated numerically, with the dither superposed on the input signal. The results show that, for a larger amplitude of dither, the expected value of A-D conversion comes closer to the real value, and the expected value of the variance becomes larger. The relation between the amplitude of dither and improvement of the resolution is obtained as a function of the measurement time. For example, resolution can be improved to 0.05 LSB for 100 measurements and 0.4 LSB of the dither amplitude.

These results are verified by experiments using a white noise generator as a dither source, a DC voltage standard as a signal source and a transient recorder as an A-D converter.

1. はじめに

最近のレーザーレーダー¹⁾においては、信号処理装置としてトラジェントレコーダー²⁾とミニコンピューターを組み合わせたデジタル処理装置³⁾が用いられることが主流となっている。その理由は、デジタル方式における精度の良さと、データ処理の容易さによる。国立公害研究所大型レーザーレーダーにおいても、データ処理にはデジタル方式が採用されている。

ところで、トラジェントレコーダーは高速動作のA-D変換器と、入力増幅器およびメモリーを備えている。高速動作のA-D変換器はビット数を増やして精度を上げることが難しい。そのため、測定ダイナミックレンジが限られてしまうのが、デジタル処理方式を使用する場合の技術上のネックになっていた。

とくにレーザーレーダー信号は、強度が距離の2乗に反比例して減衰するため、近距離地点と遠距離地点を同時に計る時に大きな変化をする。従って、測定器のダイナミックレンジは通常の測定に比べ、著しい広さが要求される。

一方、A-D変換器では、一般に分解能(1 LSB: least significant bit)より小さい強度の変化は分解できないとされている。そこで、ディザ(Dither)⁴⁾を測定すべき信号に重畳させ、繰返し測定を行う方法を用いることにより、分解能以下の信号の変動を測定することが考案されている。このような方法は分解能改善と呼ばれているが、分解能が改善されればダイナミックレンジは拡大されることになる。分解能改善の定性的な理論は寺尾⁴⁾により検討されている。なお、ディザとは強度分布が一様な不規則振動であり、白色雑音はディザとしての性質を持っている。

本論文は、ディザを用いたA-D変換器の分解能改善の方法の理論⁴⁾を、より定量化すると共に、実験的にこの理論を検証することを目的としている。

2. 分解能改善の理論的検討

2.1 分解能改善法の定式化

分解能改善の理論的検討の一部は既に筆者らが行っている⁵⁾。ここでは、これをもとに更に詳しい議論を行う。

まず、この方法の考え方を図1を用いて説明する。信号源にディザを重畳してA-D変換器で変換を行う。信号の波形は図の(a)に示すような定常状態に始まって、時間と共に大きくなり、定常状態で終るものとする。これにディザが加われば図の(c)に示すような変調波形となる。もし、ディザが加わっていないとすれば、変換出力は何度測定してもとびとびの値となる。しかし、振幅の小さなディザを加えた信号の変換を何度も繰り返せば、出力の平均値はわずかながら入力信号の値に近くなる。ディザの振幅が大きくなるに従い出力の平均値は次第に入力の値に近づいてくる。

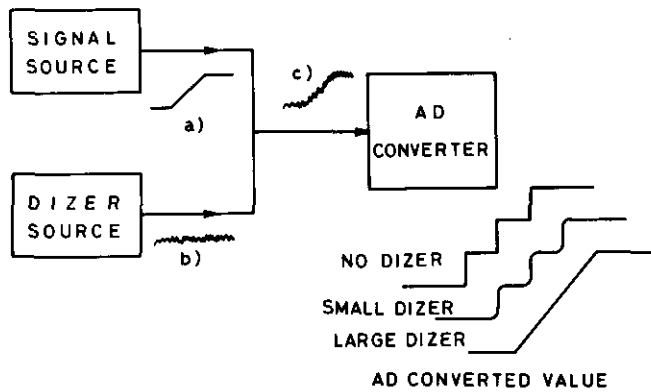


図1 分解能改善の概念図

信号の真の値と出力の平均値との差を量子化誤差と呼ぶことにする。又、ディザが信号に加われば変換出力に揺らぎが生じる。この揺らぎの大きさをランダム誤差と呼ぶことにする。ランダム誤差は統計的な誤差である。従って、繰り返し測定を行い平均操作を施せば、この誤差の影響は平均回数平方根に反比例して小さくなる。

量子化誤差とランダム誤差の影響を総合したものが測定の全誤差となる。

以上を定式化する。まず量子化誤差の大きさを求める。信号強度 x_0 にディザの大きさ ϵ が重畳されたものがA-D変換器の入力の大きさ X となる。

$$x = x_0 + \epsilon \tag{1}$$

ここで考えるA-D変換器の変換特性は、図2に示すように、+0.5以下の入力強度に対して変換出力はすべて0で、それより入力強度が1増すごとに、出力も1ずつ増える階段関数とする。又、出力の最大値は有限の値で N とする。図2に示してあるA-D変換の特性を表す関数を $z(x)$ とす

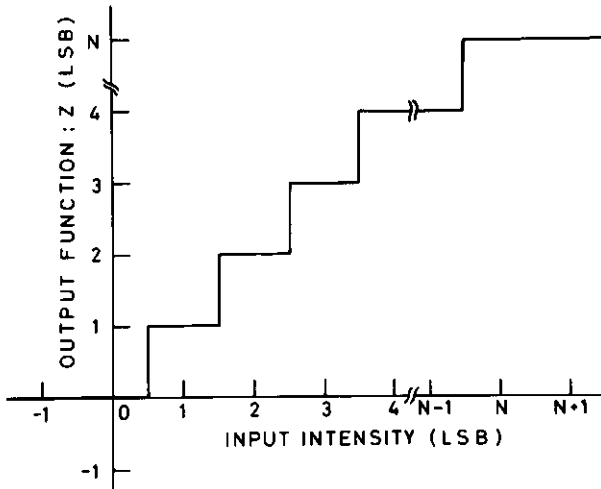


図2 A-D変換器の特性を表す関数

る。更に、ディザの確率密度関数を $p(\epsilon)$ とする。このとき x の入力に対して、A-D変換出力の平均値 m_N の期待値は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 m_N(x_0) &= \int_{-\infty}^{\infty} z(x) p(x-x_0) dx \\
 &= \sum_{k=1}^N k \int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} p(x-x_0) dx + N \int_{N+\frac{1}{2}}^{\infty} p(x-x_0) dx
 \end{aligned} \tag{2}$$

式(2)の第1項は $z(x)$ の階段関数の部分の寄与であり、第2項は最大値 N で変換出力が飽和していることによる。

式(2)はディザの確率分布関数 $F(x)$ を用い、しかも、 $p(x-x_0)$ が偶関数とすると次式のように変形される。

$$m_N(x_0) = \sum_{k=1}^N F(x_0 + \frac{1}{2} - k) \tag{3}$$

量子化誤差 δ_q は信号強度と変換出力の差であるから、

$$\delta_q = m_N(x_0) - x_0 \tag{4}$$

となる。

次に、出力の分散 V_N の期待値は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 V_N(x_0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ z(x) - m_N(x_0) \right\}^2 p(x-x_0) dx \\
 &= \sum_{k=1}^N K^2 \int_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} p(x-x_0) dx + N^2 \int_{N+\frac{1}{2}}^{\infty} p(x-x_0) dx - \left\{ m_N(x_0) \right\}^2
 \end{aligned}$$

$$= \sum_{k=1}^N (2K-1) F(x_0 + \frac{1}{2} - K) - \{m_N(x_0)\}^2 \quad (5)$$

式(5)の V_N の平方根がランダム誤差の期待値 δ_R である。すなわち、次式で表される。

$$\delta_R = \sqrt{V_N} \quad (6)$$

A-D変換器出力の2乗全誤差は式(4)と式(6)より、

$$\delta^2(x_0) = \delta_q^2 + \delta_R^2/M \quad (7)$$

となる。ここで、 M は平均の回数、すなわち測定の繰り返しの数である。式(7)の δ_q はディザの振幅の増大と共に減少し、 δ_R はその逆の傾向を示す。又、式(7)の第2項は平均回数と共に減少する。従って、 δ を最小にするためには、ディザの振幅と平均回数間に最適値がある。すなわち、平均回数をあらかじめ決めれば、加えるべきディザの振幅に最適値が存在する。

なお、式(7)の δ の値がA-D変換器の改善された分解能となる。

2.2 数値計算例

信号に重畳されるべきディザの平均値が0で、しかもその分布が平均値を中心に対称であれば統計的性質は問わない。ここでは、ディザが正規分布するものとして、式(2)から、式(7)に至る値を数値計算した。

正規分布では確率密度関数は次式で表される。

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (8)$$

ここで σ はディザの振幅の標準偏差である。ディザの振幅は σ の値に比例する。定義によっては、これを 2σ あるいは 3σ と取る場合もあるが、ここでは σ の大きさをディザの振幅と定義する。すると、式(2)から式(8)まではすべて σ の関数となる。

式(8)を式(2)に代入してA-D変換出力の期待値を計算した結果を図3に示す。ここで変換出力の最大値 N は4にとってある。 σ の値は0.02, 0.1及び0.5に変化させてある。この図より、変換出力は周期が1LSBの周期関数に近い関数であることが示されている。又、信号の強さが0及び N の近くでは周期性がくずれて出力が変形する。これは、マイナス及び N 以上の入力に対してはA-D変換出力は常にそれぞれ0及び N の値を持つためである。これを端の影響と呼ぶことにする。

σ の違いによるA-D変換出力を細かく見るため、端の影響を受けない領域での1LSBに相当する入力に対する量子化誤差の値を図4に示す。横軸は0.5LSB分だけにとってある。 σ の増加に対して、量子化誤差 δ_q が急激に減少していくことが示されている。同図において、 δ_q の最大値が測定回数を十分大きくとったときに到達できる最小の分解能になる。例えば、 $\sigma=0.5$ のときは0.0023

LSBまでの測定ができる。

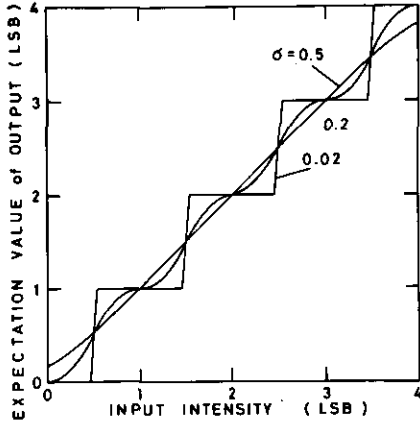


図3 A-D変換出力の期待値

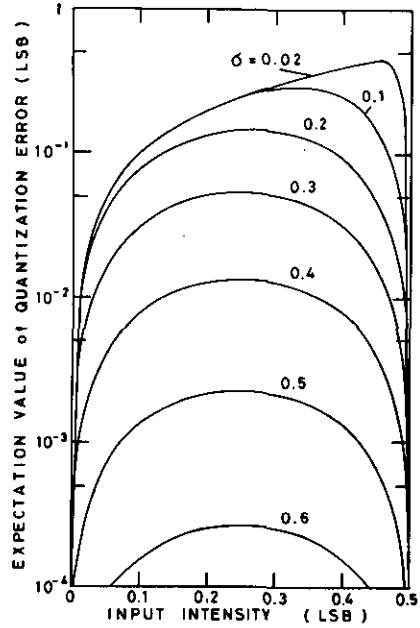


図4 量子化誤差の期待値

次に、式(8)を式(5)に代入し、更に、式(6)を使って求めたランダム誤差の期待値 δ_R を図5に示す。 δ_R は σ が小さいときには入力強度の変化に対して大きく振動する。 σ が大きくなるに従い、振動が小さくなり、平均値は大きくなる。なお、これでも端の影響が出ている。

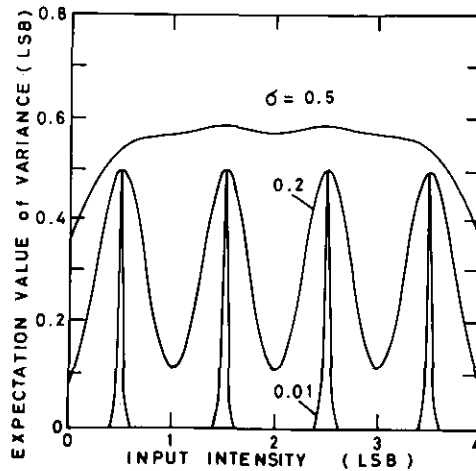


図5 ランダム誤差の期待値

図4と図5の計算結果を式(7)に代入して求めた全誤差 δ を平均回数 M の関数として図6に示す。 δ は M に依存するほかに、入力強度の変化に対する δ_q 及び δ_R の周期性に基づき1LSBを周期とする周期関数となる。実用上はこの周期関数の最大値が全誤差となるため、図6の δ にはこれの最大値をとっている。

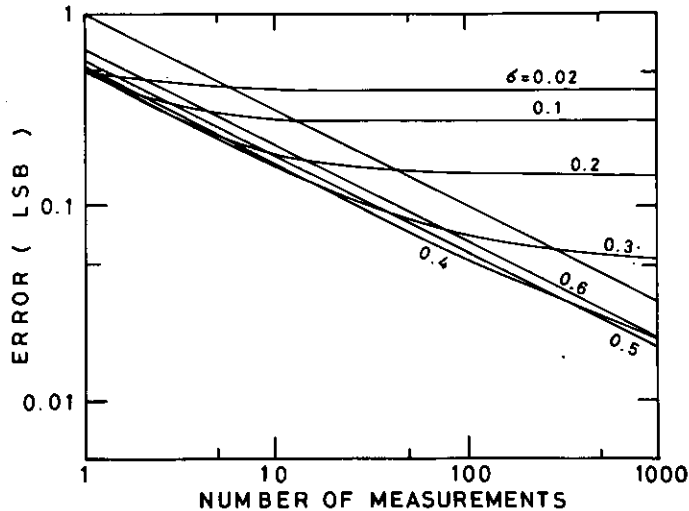


図6 平均回数に対する全誤差

図6により、ディザの重畳による分解能の改善が量的には握できる。例えば、 σ が0.4のとき、平均回数を100回にとれば、 δ の値は0.05LSBとなり、A-D変換器の最小分解能の10倍分解能が改善されることになる。又、原理的には、 δ を十分大きくとり、 M も増やして行けば δ の値は無限に小さくできる。

3. 分解能改善の実験的検証

3.1 実験装置の構成と方法

実験装置は図7に示すように構成した。A-D変換器は岩通製 DM902型ウェーブメモリ(トランジェントレコーダ)に組み込まれているものを使用した。この装置の基本的仕様は、ビット数8bit、最高A-D変換速度10ns、語数2,048ワードである。トランジェントレコーダの出力はTOSBAC 7/40型ミニコンピュータに接続した。入力信号源には、横川電機製の標準直流電源(2851型)を使用している。これの電圧精度は0.1mVである。又、ディザ発生源には、Waveteck社の白色雑音源を用いた。この雑音源は最大周波数が400kHzの白色雑音を任意の振幅で発生させることができる。サンプリング定理⁴⁾より、この雑音源を白色雑音源とみなすにはA-D変換のサンプリングレートを400kHzより十分小さくする必要がある。ここではサンプリング間隔を100 μ sにとった。

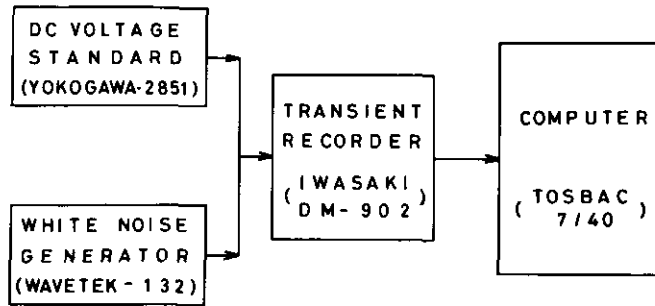


図7 実験装置のブロック図

本実験に入る前に各装置の特性を調べた。トランジェントレコーダについては、A-D変換及び入力増幅器のドリフトが1LSBより十分小さいことを確認する必要がある。このドリフトの大きさが分解能改善の上限を決めるためである。これについての確認は、入力信号を入れない状態でA-D変換を繰り返し行い、出力の標準偏差を計算することにより行った。その結果、1時間以内のドリフトの大きさは0.02LSBと求められた。

又、A-D変換器の入力に対する出力の直線性も調べておく必要がある。ここで用いた装置ではフルスケールの80%までは0.02LSB以下の直線性が得られ、それ以上の強度の入力に対しては次第にはずれることが確認された。このため入力強度がフルスケールの60%以下の領域でなら、ここで行的としている実験の目的を達成することはできるといふ結論になる。

もう一つの重要な予備実験はディザの統計的性質を調べることである。前節の理論の検証を行うには、ディザの強度分布が正規分布に十分近いことが必要である。これを実験的に確認するには、ディザの強度分布にカイ2乗(χ^2)検定^{6),7)}を施す。図8に求めた強度の振幅分布を示す。測定はディザの振幅をA-D変換器の1LSBよりも十分大きくとった上で、A-D変換を1,000回行い、その結果を強度を横軸とするヒストグラムとした。このヒストグラムから分布の標準偏差は4.5であった。 $\sigma=4.5$ の正規分布も図中に示してある。実験で求められたヒストグラムと $\sigma=4.5$ の正規分布曲線との偏差は $\chi^2=11.27$ であった。ヒストグラムの測定点は12ポイントであるから、自由度9の χ^2 分布表より、 χ^2 がこの値を持つ場合の有意水準を求めると、5%以上である。通常、 χ^2 分布の有意水準が5%以上であればその分布は十分正規分布に近いと結論できる。

以上の基礎的確認を行った上で、図3と図5の計算結果の検証のための実験を行った。

測定に際しては、あらかじめA-D変換器の入力増幅器の感度を上げた状態でディザの σ の値を、 χ^2 検定を行った方法と同じ要領で求めておく。こうして求めた σ の値は増幅器の感度を落とせば相対的に小さくなる。例えば、増幅器の感度を100mVフルスケールとしたとき、 σ の値が10であれば、10Vフルスケールでは100分の1の0.1となる。

σ の大きさをこのような方法で定めた上で、図7に示した構成図どおりの実験セットを組み、標

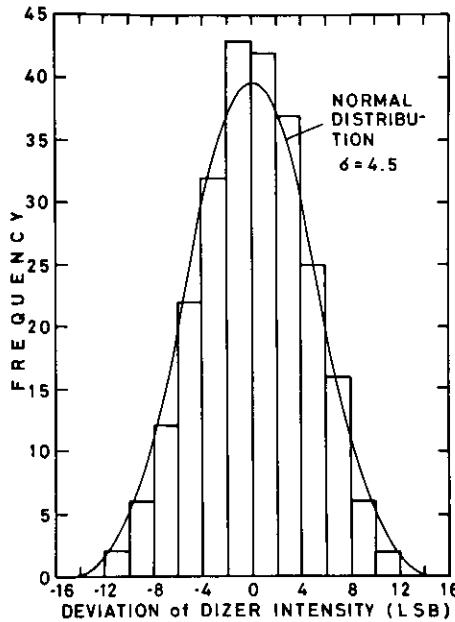


図8 白色雑音発生器の強度の振幅分布

準直流電源の電圧をわずかずつ増加させながら、この電圧と、A-D変換出力の平均値およびその出力の標準偏差を測定した。

3.2 実験結果と利用法の検討

測定の結果を図9と図10に示す。図9はA-D変換器の入力信号強度に対するA-D変換出力の平均値である。同図においてフルスケールは1LSBである。 σ の値は0.02, 0.1, 0.5と変化させた。測定は1点につき1,000回行っている。同図には理論曲線を実線で示してある。これと実験値の比較を行うと、 $\sigma=0.02$ と0.1では良く一致するが、 $\sigma=0.5$ では最大0.05LSB程度ずれる。このずれは予備実験で求めたA-D変換器関係のドリフトが0.02LSB、平均回数を1,000回としたことが0.022LSB程度ずつ影響を与えているものと考えられる。

図10はA-D変換出力の分散の測定結果である。これは図9の測定値から求めたものである。この結果でも理論と実験に多少のずれが生じているが、その理由は図9の場合と同じであると考えられる。

このように、A-D変換器のドリフトが影響を及ぼさない範囲では理論と実験が良く一致し、目的どおり検証が行われたと結論できる。

なお、ここで用いたA-D変換器では $\sigma=0.37$ 以下では δ_q の最大値がドリフトの大きさより小さくなる。この場合、 $\sigma=0.37$ より大きな標準偏差のディザに対しては、到達できる最小の分解能は

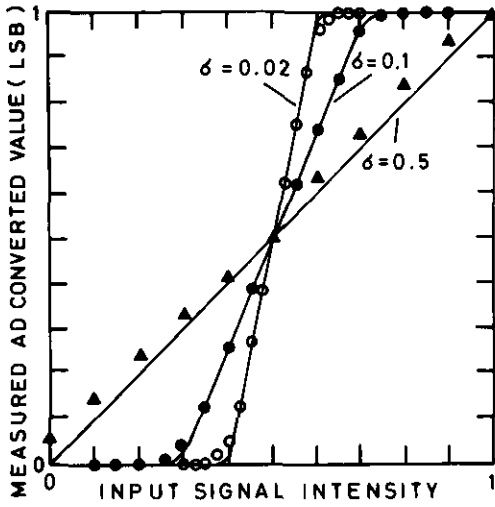


図9 A-D変換出力の平均値の実験結果

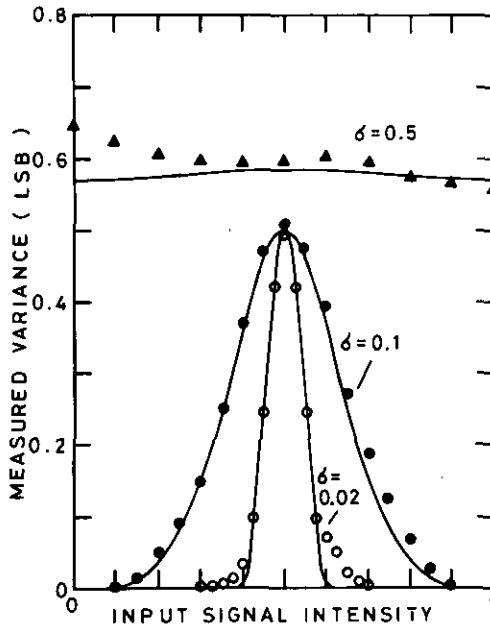


図10 A-D変換出力の分散の測定結果

ドリフトの大ききで決まる。しかも σ を大きくするに従い δ_R の影響が増大し、目的の δ の値を得るために必要な測定回数が増す。従って、 $\sigma = 0.37$ にできるだけ近い値のディザを使うのが最も効率の良い測定法ということになる。

次に、この方法の利用法について述べる。通常のA-D変換器を用いる測定で、この実験に使用

したようなディザの発生源が使えれば問題はない。しかし、高速の現象をとらえる実験では白色雑音発生装置の帯域が十分でない場合がある。そこで、他にディザとして使えそうなものには電気回路で発生する各種の雑音がある。特に高速のA-D変換器を使用する際には、ほとんどの場合、前置増幅器が使われる。それ故、これで発生する雑音がディザとして使用可能であれば特別の発生源を必要としない。その可能性のテストを行った。使用した増幅器はPAR社製115型広帯域増幅器である。この性能は増幅度、10倍及び100倍、帯域DC~50MHzである。増幅度を10倍とした場合の強度分布を測定し、 χ^2 検定を行うと、有意水準が0.1%よりわずかに下まわる値であった。従って、この雑音は完全な正規分布に乗るとはいえない。

この増幅器を用いて図9及び図10の測定と同じ実験を行った。この増幅器の雑音の標準偏差を δ_A とすると、増幅器10倍のときの δ_A はA-D変換器の入力感度が0.1Vフルスケールに対して0.44という値であった。この増幅器の雑音及び白色雑音源の σ を0.44とした白色雑音信号をディザとして用い、それぞれ平均回数を1,000回に設定して δ_q 及び δ_R を求めた結果、両方の雑音に対する、 δ_q 、 δ_R の間に著しい差はなかった。その理由は次のように考えられる。まず、増幅器の雑音の強度分布は正規分布とはいえないが、かなり近い分布であること。又、ドリフトの大きさよりも十分小さな δ_q に対応する σ の値を使う場合には分布の違いよりもドリフトの大きさの方が実験結果に及ぼす影響が大きいことなどである。

この実験結果より、この増幅器と、A-D変換器の組合せにおいては、ドリフトによる誤差分の影響を受けない範囲で $\sigma=0.44$ とした場合の式(7)あるいは図6の計算結果がそのまま使えることになる。この結論はもちろん、すべてのA-D変換器と増幅器の組合せにおいて、適用可能というわけではない。しかし、増幅器の雑音の中に系統的な要因、例えば放送電波や高周波の発振による雑音などがほとんどないと仮定できれば、この方法を用いることは十分可能であると考えられる。

4. むすび

本論文では、ディザを使ったA-D変換器の分解能改善に関する理論と実験的検証について述べた。その結果、両者の間に定量的な一致があることが確認できた。又、実験に使ったA-D変換器で改善できる分解能はA-D変換器のドリフトのために1けた程度であるという結果が得られた。

この方法を応用するには、前置増幅器で発生する雑音をそのままディザとして使うのが最も簡単である。この場合、A-D変換器のドリフトの大きさと、前置増幅器の雑音の標準偏差 δ_A をあらかじめ求めておけば、定量的に分解能改善を見積ることができる。

実用的にこの方法で得られる分解能改善の割合は、ドリフトの大きさや平均回数に限度があることなどから10倍程度と考えられる。

引用文献

- 1) 日本気象学会編(1973): ライダ(レーザーレーダー)と気象観測. 気象研究ノート, No.116.
- 2) 岩崎正弥(1972): 波形記憶装置の動向. 電子科学, 29(5), 61-67.
- 3) Shimizu, H., Y. Sasano, N. Takeuchi, O. Matsudo and M. Okuda (1980): A mobile computerized laser radar system for obseruing rapidly varying meteorological phenomena. Opt. Quantum Electron, 12(1), 159-167.
- 4) 寺尾満(1975): 測定論. 岩波書店350pp, 197-225.
- 5) 飯倉善和・清水浩(1979): ティザー信号を用いたA-D変換器の分解能改善に関する一考察. 電子通信学会論文誌(A), J62-A(12), 915-917.
- 6) E. Kreyszig, 田島, 近藤訳(1970): 確率統計入門. 培風館, 320pp, 88-90.
- 7) 近藤次郎(1974): 応用確率論. 文祥堂, 280pp, 176-193.

II-2

レーザーレーダー信号の高精度収集法

笹野泰弘¹・清水 浩¹・竹内延夫¹

Resolution Improvement for Collecting Laser Radar Signal

Yasuhiro SASANO¹, Hiroshi SHIMIZU¹ and Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

レーザーレーダー信号は広いダイナミックレンジを有しており、高精度でこれを受信・収集するためには、ダイナミックレンジの圧縮、受信側の分解能の改善を図る必要がある。本報告では、この目的のためのAD変換器とミニコンピュータを組み合わせた受信システムにおける、幾何光学的効率を調整する方法、複数のAD変換器を用いる方法、ディザ信号を重畳させた積算平均による方法、の三つの方法を提案する。これらの方法を組み合わせることにより、 10^4 程度の分解能の改善が期待できる。

Abstract

Since laser radar signals cover, in general, wide ranges, compression of the signal dynamic range and improved resolution of receiver devices are required. This paper proposes three methods to accomplish these: (1) the adjustment of the geometrical form factor function, (2) the use of multiple AD converters and (3) the superposition of a dither signal. Combining these methods, the resolution can be improved by four orders of magnitude.

1. はじめに

レーザーレーダー受信信号のふるまいは、レーザーレーダー方程式¹⁾を用いて表される。今、距離 R からの受信光に対するフォトマルの光電子数を n_s とすると、

$$n_s(R) = \frac{\eta}{h\nu} P_0 L K \beta(R) T^2(R) A_r Y(R) / R^2$$

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

と書ける。ここで記号の意味は表1に示している。レーザーレーダー受信信号の特徴は、この式か

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

ら分かるように、距離 R の二乗に反比例して小さくなり、また、大気の透過率は距離とともに指数関数で小さくなることである。したがって、受信信号は非常に大きなダイナミックレンジを有する。例えば、距離100mから10kmを測定範囲とし、消散係数 α を 0.2km^{-1} (視程20kmに相当)とすると、100mと10kmとでは信号の大きさは 5×10^5 倍以上の違いがある。

表1 レーザーレーダー方程式中の記号の意味

n_s	受信信号に対するフォトマル光電子数
η	フォトマルの量子効率
h	プランクの定数
ν	レーザー光の振動数
P_0	送信レーザー光の電力
L	測定の空間分解精度
K	レーザーレーダーの光学的効率の定数
β	体積後方散乱係数
T	透過率
A_r	受信望遠鏡の有効面積
Y	幾何光学的効率の関数
R	レーザーレーダーからの距離
α	消散係数

近年、レーザーレーダーの信号収集においては8~10ビットの分解精度を持つAD変換器を用いて、デジタル的に処理することが多くなってきている²⁾。しかし、これでは256~1024レベルの分解精度を有するのみで、 5×10^5 倍以上のダイナミックレンジを持つレーザーレーダー信号を精度よく収集することはできない。いわゆる量子化誤差の影響が大きく、正しい信号波形を得ることができない。

この問題を解決するためには、AD変換器のビット数(分解精度)で足りるように信号のダイナミックレンジを圧縮するか、逆に、受信側の分解能を改善するなどの工夫が必要となる。

受信信号のダイナミックレンジを圧縮するための従来の対応策としては、(1)受信望遠鏡の視野を調整して幾何学的効率を小さくする方法³⁾、(2)光検出器(フォトマル)の感度や出力電流を信号強度の大きさに応じて適当に、自動的に変化させる(ゲインスイッチング)方法⁴⁾、(3)光検出器からの出力信号をアナログ的に非線形変換させる(対数増幅器などを用いる)方法⁵⁾などが試みられてきた。

図1に、受信信号および信号処理の過程におけるダイナミックレンジ圧縮および分解能改善の各方式の関与するステージを示している。(1)~(3)の方法は、いずれも受信信号波形を歪ませてダイナミックレンジを圧縮しようとするものである。これらの方法は、波形の復元にあたって精度の低下を招くとか、データ処理が煩雑になるなどの難点があったが、近年のコンピュータによるデジタルデータ処理方法の導入により、これらの問題も克服されつつある。

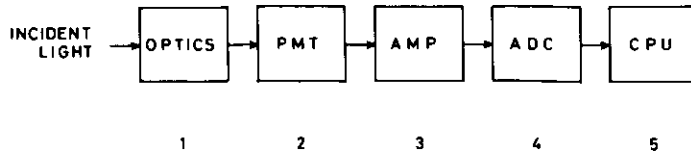


図1 受信信号および信号処理の過程におけるダイナミックレンジ圧縮 (1, 2, 3) 及び分解能改善 (4, 5) の方式

方式(2)(3)は電気回路技術に依存するもので、フォトマル感度や対数増幅器の増幅率の変化曲線に再現性があることが前提であり、変化曲線の形をあらかじめ実験的に決めておく必要がある。技術的な困難が解決されれば、ダイナミックレンジの圧縮には有効な方法となり得る。

一方、図1中の方式(4)(5)はデータ収集における分解能の改善を目的として、本報告で新たに提案するものである。方式(4)は複数のAD変換器を利用する方法、方式(5)はディザ信号を重畳させた積算平均による方法で、いずれもコンピュータによるデジタルデータ処理により現実的な方法として用いることができる。

本報告では、ここに述べた五つの方法のうち、電気回路技術に依る方式(2)(3)を除いた、他の三つの方法(方式(1), (4), (5))について詳述する。

国立公害研究所の大型レーザーレーダー¹⁾に関しては既存の装置を用いて、これらの三つの方法を採用することによって、合計で4桁程度の分解能が改善される。AD変換器の本来の分解精度の2.5桁と合わせると、6.5桁程度となり、通常のレーザーレーダー観測には十分な分解精度を持たせることができる。

2. 幾何光学的効率を調整する方法

幾何光学的効率を調整する方法は、信号光がフォトマルに入射する以前に視野絞りによって入射光量をカットするもので、その効率は視野絞りの口径、位置、受信望遠鏡の光学素子の幾何学的配置等に依存する。受信信号のダイナミックレンジを圧縮するためには、特に近距離からの比較的強い信号をより多くカットできればよい。

本節では、まず、幾何光学による理論計算の結果から幾何光学的効率の関数形を示す。次に、大型レーザーレーダーによる実測値との比較を行う。

今、簡単のために受信系は単一の凸レンズとその焦点においた視野絞りとからなるものとし、近軸光線の仮定を用いる。無限遠からレンズに入射してくる光に対しては、焦点の位置にスポットを描く。したがって、絞り半径 r 、焦点距離 f とするとき $\delta = r/f$ で与えられる視野角内からの光が絞りで集光される(図2(a))。

一方、有限の距離 R の点 P からレンズ全体に入射してくる光は、焦点(絞りの位置)よりも後の点 P' で像を結び、絞りの位置では有限の大きさの光束となっている(図2(b))。絞りを通過する光

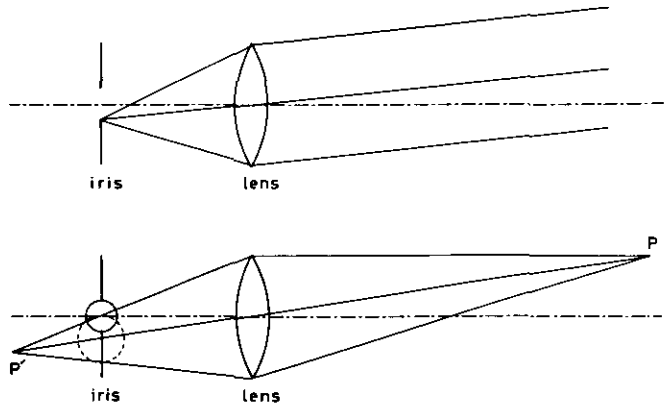


図2 (a)上図, 無限遠からの平行光束の結像

(b)下図, 有限の距離の点Pからレンズに入射する光束の結像

視野絞り位置で光束は太さを持ち(点線の円), 絞り(実線の円)を通過できるのは一部の光である。

束の断面積と光束の全断面積との比が, 点Pからの受信光に対する幾何光学的効率に相当する。絞りの位置における光束の太さは, 近距離からの光ほど太く, 絞りを通過できない光の割合が増加し, 幾何光学的効率は低下することが分かる。

ある距離 R における送信レーザービーム断面内の各点からの後方散乱光に対して同様の効率を計算して, ビームの断面内強度分布を重み関数として平均したものが, ここで言うところの幾何光学的効率 $Y(R)$ を与える。

実際のレーザーレーダーの受信光学系は反射鏡の組み合わせの他, コリメータレンズ等を含んで構成が複雑なため, ここでは単純化して合成焦点距離を用いて単一レンズに置きかえて, 計算の方法を具体的に示す。(方法は基本的には, Halldorsson & Langerhals⁶⁾と同様である。)

今, 合成焦点距離を f_t とし, 距離 R_0 からの後方散乱光が像を結ぶ位置 a に半径 r_1 の絞りを置く。 a は,

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{R_0} = \frac{1}{f_t}$$

で与えられる。

レーザービームはレンズ光軸に一致させて射出させるものとする時, 距離 R における断面内の光強度分布を $I(R, z, \varphi)$ とおく。ここで, z, φ は断面内の位置を表す座標で光軸からの距離, 角度を示す。点 (R, z, φ) 近傍の一微小面からレンズ全体に入射する後方散乱光は, レンズの後方 x の位置に像を結ぶ。ここで X は,

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{R} = \frac{1}{f_t}$$

で計算される。

この微小面からの光は点 a の絞り面においては、その光束は円形に拡がっており、半径 r_2 はレンズの半径を L とすると、

$$r_2 = \left| \frac{a-x}{x} \right| \cdot L$$

で与えられる。光束の中心はレンズの光軸（絞りの中心）から d だけ離れている。 d は、

$$d = \frac{z}{R} \cdot a$$

である。絞り位置における光束の面積を S_0 、光束と絞りとの重なり面積を S とすると、 S/S_0 はレーザービーム内の一点 (R, z, φ) からの後方散乱光が絞りに入る割合を表しており、ビーム内の光強度分布を重みとして積分することで、平均の重なり係数、つまり幾何光学的効率 $Y(R)$ が計算される。すなわち、

$$Y(R) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{S_0} \cdot S(R, z, \varphi) \cdot I(R, z, \varphi) z dz d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} I(R, z, \varphi) z dz d\varphi}$$

受信望遠鏡がカセグレイン型の場合には、後方散乱光の一部は副鏡の背面にさえぎられて主鏡に入射しない。この効果による入射光量の欠損は、上で述べた関数 $Y(R)$ の計算手順において、受信レンズの半径の代わりに副鏡の半径を代入することにより求められる。最終的な幾何光学的効率の関数 $Y(R)$ は両者の合成で与えられる。

以上は、レーザービームの中心がレンズの光軸と一致する場合であるが、両者が距離 l だけ離れ、かつビームの方向が光軸と平行でない場合についても、幾何学的な関係を示すパラメータが増えるだけで、同様の計算ができる。

図 3 は視野絞りの半径を変えたとき（表 2）の、幾何光学的効率の関数形の理論計算値である。距離 1~2km までで効率は 0 から徐々に立ち上がることがわかる。図 4 は、レーザービームの射出

表 2 視野絞りの半径と視野角

絞り	半径(m)	視野角(半角)(rad)
I 1	5.6×10^{-4}	0.07×10^{-3}
I 2	1.2×10^{-3}	0.15×10^{-3}
I 3	2.44×10^{-3}	0.305×10^{-3}
I 4	4.8×10^{-3}	0.60×10^{-3}
I 5	9.76×10^{-3}	1.22×10^{-3}
I 6	1.612×10^{-2}	2.015×10^{-3}

ただし、望遠鏡の合成焦点距離は 8 m とする。

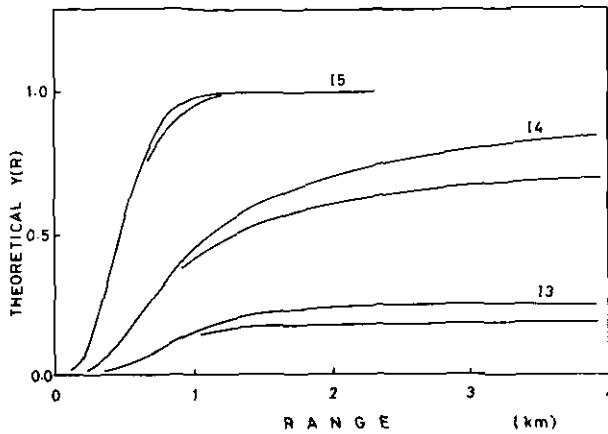


図3 視野絞りを変えたときの幾何光学的効率の関数形の変化（理論計算）
 ビーム拡がり幅は0.6mrad(上の曲線), 0.7mrad(下の曲線)としている。

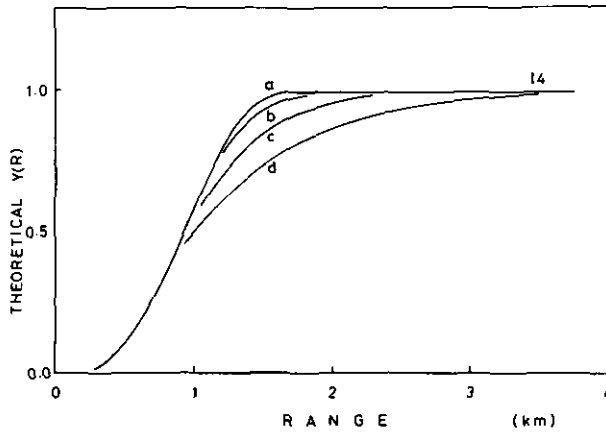


図4 ビーム射出方向を傾けたときの幾何光学的効率の関数形の変化
 ビーム拡がり幅は0.15mrad, 絞りはI4としている。
 (a: 平行, b: 0.1mrad, c: 0.2mrad, d: 0.3mrad)

方向を受信望遠鏡の光軸に対して傾けたときの幾何光学的効率の関数形の変化を示したものである。関数形は立ち上った肩の部分で大きな変化をする。

次に大型レーザーレーダシステムを用いて、幾何光学的効率について実測値と理論値の比較を試みよう。実測値は水平方向に向けてレーザーレーダ観測を行い求めたもので、方法は Sasano et al.⁷⁾の報告に詳しい。2560パルス（約100秒間）の測定データを用いて計算を行った。また、理論値との比較を容易にするため、フォトマル感度、AD変換器への入力感度でノーマライズしている。

図5は、このようにして求めた幾何光学的効率 $Y(R)$ の実測値を視野絞り径をパラメータにして

プロットしている。関数形が滑らかな曲線になっていないのは、実測値を求める際の平均化時間が短く、分布の一様性が満たされていないためと考えられる。

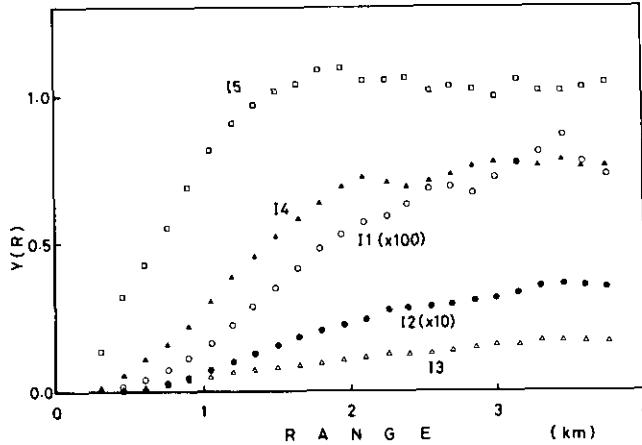


図5 幾何光学的効率の関数の実測値

図3の理論曲線は、この実測値にフィットするようレーザービームの拡がり角を設定して計算したものであるが、関数形の近距離の立ち上り部分で、必ずしも一致していない。近距離で一致しないことの原因として次のようなことが考えられる。(1)単一レンズに置き換えて計算したが、実システムでは絞りの後にコリメータレンズ系、フィルター等が入っており、これらの効果が考慮されていない。(2)レーザービーム強度分布をビーム拡がり角内で一定とおいたが、実際にはレーザービームの中心ほど強度が高い。(3)レーザービームと光学系光軸とのなす角が平行になっていない、などである。

Sasano et al.の報告⁷⁾でも述べているように、幾何光学的効率の関数形は理論計算になるよりも実測値から決定する方が現実的である。その理由の一つは、上に述べた種々の効果を計算に取り入れるのは、計算を非常に複雑なものにするということにある。また、仮にこれらを計算スキームに組み込んだとしても、レーザービーム断面内の強度分布や、フィルター透過率の入射角依存性などの不明な要素のために、より精度の高い計算が期待できない。

本節で述べた方法によれば、大型レーザーレーダーの場合、例えば視野絞りの半径を1cmとし、合成焦点距離の位置に視野絞りを置くことによって、幾何光学的効率が1となる距離を1.5kmにまで延ばすことができる。これにより、近距離からの強い信号光の入射を抑制することができ、入力信号のダイナミックレンジを1桁程度、圧縮することができる。

3. 複数のAD変換器を利用する方法

この方法はAD変換器を複数個用意し、各変換器には増幅器等で感度を変えた信号を同時に入力させ、後に変換器出力を合成するものである。こうして信号強度の強い部分と弱い部分を異なる変

換器で処理することにより、受信側の分解精度を改善することができる。

この方法を実現する場合の機器の構成を図6に示す。すなわち、AD変換器の分解精度を N 桁とすると、光検出器の出力をAD変換器の個数に応じて均等に分割し、そのうちの一つは直接、他の一つは N 桁倍よりも少し小さく増幅あるいは減衰を行わせる。さらにもう一つは $2N$ 桁、四つ目は $3N$ 桁よりも少し小さく、という形で増幅あるいは減衰を行わせる。これらの信号を同時にAD変換させることにより、ダイナミックレンジの大きい信号の部分々々を別々にAD変換させ、全体として受信側の分解能を改善させる。

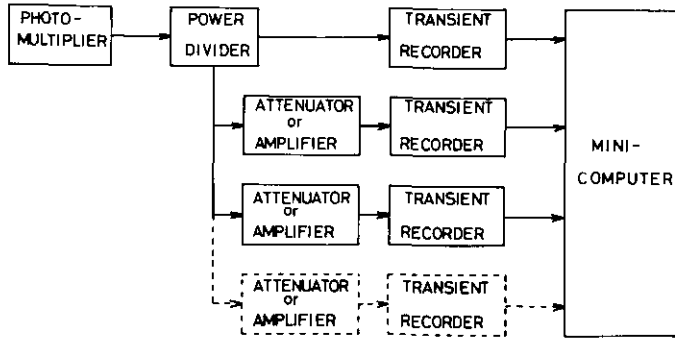


図6 複数のAD変換器を用いた分解能の改善法

この方法によれば、AD変換器の個数を増やすことにより、光検出器の受信感度の線形性の許す限りの信号の強度の変化を捉えることが可能である。現実的には2チャンネルのAD変換が可能なトランジェントレコーダーを用いて、2桁程度の受信ダイナミックレンジの拡大が可能である。

4. ディザ信号の重畳による方法

加算平均による受信ダイナミックレンジの拡大について、清水ら⁹⁾の論文をもとに、以下にその方法を説明しよう。

一般に、AD変換器を用いて信号処理を行うとき、分解能(1LSB: least significant bit)以下の小さな信号強度変化を分解測定するために、信号にディザを重畳させ、繰り返し測定を行い積算平均をとる方法がある。ディザとは統計的に定常な強度分布を持つ不規則信号で、白色雑音はディザとしての性質を有している。

信号波形が測定の度に不変であるならば、AD変換出力は何度測定しても、同一の形を保持する。しかし、信号波形に適当なディザが重畳されていると、測定の度にAD変換器への入力が少しずつ異なるためにAD変換出力もまた異なり、多数回の平均の出力は入力波形に近づく。これを概念的に示したのが図7である。

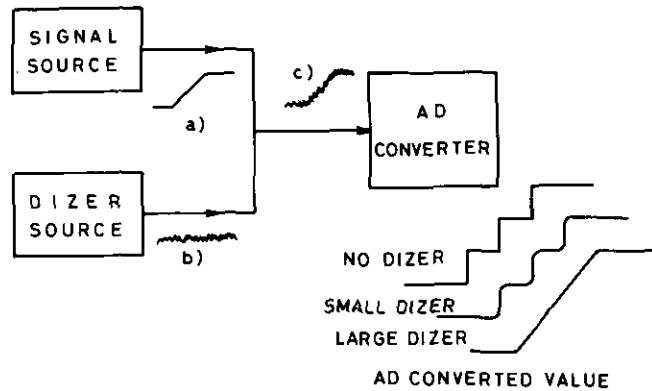


図7 ディザ信号の重畳による分解能改善の概念図

ここで、信号の真の値と出力の平均値との差を狭義の量子化誤差 δ_q と呼ぶことにする。また、ディザが信号に加われば変換出力に揺らぎが生じる。この揺らぎの大きさをランダム誤差 δ_R とする。繰り返し測定を行い、平均操作を施せば、ランダム誤差の影響は平均回数の平方根に反比例して小さくなる。量子化誤差とランダム誤差との影響を総合したものが、測定的全誤差を与える。

AD変換器出力の2乗全誤差は次式で与えられる。

$$\delta^2 = \delta_q^2 + \delta_R^2 / M$$

ここで、 M は平均の回数、すなわち測定回数を意味する。 δ_q はディザの振幅の増大とともに減少し、 δ_R は逆に増加する。また、上式右辺第2項は平均回数 M とともに減少する。したがって、 M を固定したとき δ を最小にするような、ディザの振幅の最適値が存在する。

図8～9は、ディザが正規分布に従うものとしたときの、AD変換出力特性の数値計算の結果を示している。ディザの振幅の大きさを正規分布の標準偏差 σ で表すことにする。

図8はAD変換出力の期待値で、ここで変換出力の最大値は4としている。 σ は0.02, 0.2, 0.5について示している。変換出力の両端では端の効果で歪んでいるが、 σ が大きいくほど、入力信号と出力信号の形が接近することが分かる。

ディザの振幅 σ の違いによるAD変換出力を細かく見るため、端の効果を受けない領域での1LSBに相当する入力に対する量子化誤差を計算すると、 σ の増加に対して、量子化誤差 δ_q は急激に減少することが示される。

全誤差 δ を、 σ をパラメータとして、平均回数 M の関数として表すと図9を得る。これより、ディザの重畳による分解能の改善が定量的に把握できる。例えば、100回の平均をとるときには、 $\sigma = 0.4$ とすると δ は0.05LSBとなり、AD変換器の最小分解能は10倍、改善される。原理的には σ を十分大きくとり、 M を増やしていけば、 δ の値は無限に小さくできる。

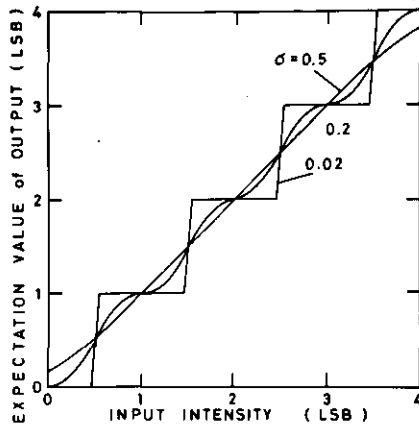


図8 ディザ信号を重畳させたときのAD変換器出力の期待値
 σ はディザ白色雑音の振幅の標準偏差。

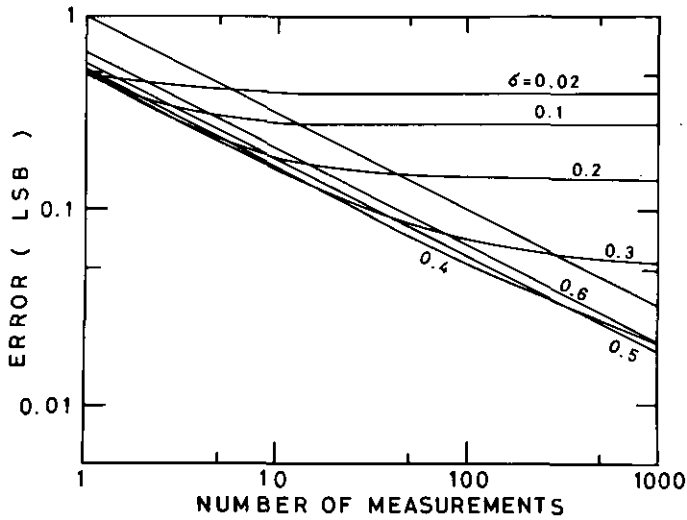


図9 ディザ信号を重畳して積算平均したときの全誤差

以上の清水らによる理論的考察より、通常、行われる程度(10~100回)の積算平均の場合には、ディザの大きさが約0.4LSBのとき最高に分解能が改善されることがわかる。そして、ディザの大きさが1LSBに比べて十分大きい場合には、量子化誤差の寄与は小さく、積算平均により分解能は積算回数 M の平方根に逆比例して小さくすることができる。一方、ディザが小さいときには、積算数を増やしても、分解能は改善されない。

ここで言うディザの重畳の効果はレーザーレーダー受信信号そのものの、パルス毎のランダムな変動においても同様の効果が期待できる。したがって、AD変換器に入る前の信号の変動の大きさ

が1LSBに比べて十分に大きいならば、量子化誤差よりもランダム変動に起因する誤差の寄与が大きく、積算回数を増やすことで分解能を上げることができる。しかし、信号の変動が1LSBに比べて十分小さいときには積算平均の効果はなく、この場合には、適当なディザを外部から信号に付加することで分解能を改善することができる。

通常のAD変換器を用いる測定で、ディザ源として白色雑音発生器のような発生源が使用可能な場合は問題がない。しかし、レーザーレーダー信号のように高速の現象を捉える必要があるときには、白色雑音発生器の帯域では不十分な場合がある。これに変わるものとして、前置増幅器に発生する雑音を用いることができる。

PAR社製115型広帯域増幅器を用いてテストを行ったところ、この雑音は完全な正規分布ではないが、量子化誤差、ランダム誤差の性質は、ここで検討してきた結果にほぼ一致することが分かった。増幅器で発生する雑音の性質をあらかじめ調べておけば、積算平均による分解能の改善を定量的に見積もることは可能である。

5. まとめ

本報告では、AD変換器の量子化誤差を軽減するための受信信号ダイナミックレンジの圧縮、測定系の分解精度の改善方法について論じた。ここで述べた方法は、幾何光学的効率による方法、複数個のAD変換器を用いる方法、ディザ信号の重畳による方法の三つである。これらの方法を用いることにより、ダイナミックレンジの圧縮、分解能の改善は、それぞれ、1桁、2桁、1桁程度が期待される。トランジェントレコーダーの本来の分解精度の2.5桁と合わせて6.5桁になる。これは通常の測定においては十分実用的といえる。

引用文献

- 1) 清水浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫(1981): 広域大気汚染観測用大型レーザーレーダーの設計と製作. 応用物理学会誌, 50, 1154-1164.
- 2) 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.
- 3) Harms, J., W. Lahmann and C. Weitkamp (1978): Geometrical compression of lidar return signals. Appl. Opt., 17, 1131-1135.
- 4) Allen, R. J. and W. E. Evans (1972): Laser radar (lidar) for mapping aerosol structure. Rev. Sci. Instrum., 43, 1422-1432.
- 5) Spinhirne, J. D. and J. A. Reagan (1976): Gain-switching amplifier for compression of optical radar return signals. Rev. Sci. Instrum., 47, 437-439.
- 6) Halldorsson, T. and J. Langerholc (1978): Geometrical form factors for the lidar function. Appl. Opt., 17, 240-244.
- 7) Sasano, Y., H. Shimizu, N. Takeuchi and M. Okuda (1979): Geometrical form factor in the laser

笹野泰弘・清水浩・竹内延夫

radar equation: an experimental determination. Appl. Opt., 18, 3908-3910.

- 8) 清水浩・飯倉善和・笹野泰弘・竹内延夫(1981): ディザ信号の重畳によるAD変換器分解能の改善法. 電通学会論文誌, J64-A, 963-969.

II - 3

レーザーレーダー信号の積算平均によるS/N比改善

笹野泰弘¹・竹内延夫¹

S/N Ratio Improvement by Averaging in Laser Radar Signals

Yasuhiro SASANO¹ and Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

レーザーレーダー信号を効果的に高精度で受信・収集するためには、大気の状態、測定距離によって測定の方法（積算数、空間分解能）を適切に設定することが必要である。本研究では実測データに基づいて、一定のS/N比を得るのに必要とされる積算数を、距離及び大気条件（消散係数）の関数として求めた。この結果は理論的な予測に一致しており、任意の距離、空間分解能、大気条件、S/N比に対して必要とされる積算数を算出することができる。

Abstract

Efficient collection of laser radar data with high accuracy requires measurement parameters (such as spatial resolution and accumulation number of signals) to be according to atmospheric conditions and measurement range. In the present study, the accumulation number required for obtaining laser radar data with a certain S/N ratio is calculated as a function of range and atmospheric extinction coefficient from observation data. The results agree well with a theoretical prediction curve and the accumulation number can be estimated for measurement at any range, spatial resolution, atmospheric condition and S/N ratio.

1. はじめに

レーザーレーダー受信信号の測定精度は信号対雑音比（S/N比）で表すことができる。ショットノイズで制限される信号のS/N比は、フォトマルで受信された信号に対する光電子数を n_s とすれば、

$$SN(R) = \frac{n_s(R)}{\sqrt{\mu(n_s(R) + 2n_b)}} \quad (1)$$

と書ける¹⁾。ここで、 μ はフォトマルの雑音指数、 n_b は背景光の受信光電子数、 R はレーザーレー

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

ダーからの距離を表している。 n_s 、 n_b はレーザーレーダー方程式を用いると、

$$n_s(R) = \frac{\eta}{h\nu} P_0 L K \beta(R) T^2(R) A_r Y(R) / R^2 \quad (2)$$

$$n_b = \frac{\eta}{h\nu} N_\lambda \frac{2L}{c} K \Delta\lambda \Omega A_r \quad (3)$$

と表される（記号の意味は表1に示した）。

表1 レーザーレーダー方程式に現われる記号の意味

n_s	受信信号に対するフォトマル光電子数
n_b	背景光に対するフォトマル光電子数
μ	フォトマルの雑音指数
η	フォトマルの量子効率
h	プランクの定数
ν	レーザー光の振動数
P_0	送信レーザー光の電力
L	測定の空間分解精度
K	レーザーレーダーの光学的効率定数
$\beta(R)$	体積後方散乱係数
$T(R)$	透過率, $T(R) = \exp[-\int_0^R a(r) dr]$, 但し $a(r)$ は消散係数
A_r	受光望遠鏡の有効面積
$Y(R)$	幾何光学的効率の関数
R	レーザーレーダーからの距離
N_λ	背景光輝度
$\Delta\lambda$	フィルターのバンド幅
Ω	受信立体視野角
c	光速

式(1)から分かるように、受信信号のS/N比は背景光を無視すれば、受信光量の平方根に比例する。受信光量の大きさは測定距離 R の二乗に反比例して小さくなり、また、体積後方散乱係数 β や透過率 $T(R)$ に依存する。したがって受信信号のS/N比は、距離と大気条件（体積後方散乱係数や透過率の大きさ）に大きく依存する。

ところで、レーザーレーダー信号の収集にあたっては、通常、繰り返し測定による積算平均操作によってS/N比の改善を図ることが多い。スキャン測定の場合には、積算平均をするということは、ある角度幅についての空間的な平均値を測定することを意味する。したがって、測定目的に応じた空間分解精度を保証しつつ、測定精度を高めるためには、スキャン速度を遅くすることが必要になる。

その一方で、測定対象場の定常性の問題から、一回のスキャン測定に対して許容できる測定時間には限度があるので、最適な測定の方法を選定することが極めて重要となる。

しかし、どれだけ積算をすることによってS/N比がどこまで改善されるかということは、受信

信号の強度に依存することで、測定時の大気条件により異なる。すなわち、所期のS/N比を得るために何回の積算をする必要があるかを知るためには、あらかじめ大気条件と信号強度(あるいはS/N比)との関係を知っておくことが必要とされる。

本報告では、この目的のために行った観測と解析結果について述べる。すなわち、一定のS/N比を得るのに必要な積算数を、大気条件(光の消散係数)の関数として実験的に求める。この結果を用いれば、ある大気条件のとき、距離Rで所定のS/N比の信号を収集するためには、何回の積算数が必要であるかを知ることができる。

2. 理論的検討

レーザーレーダー受信信号に重畳するショットノイズ等のランダムノイズは、積算平均することにより、信号波形を保存しつつ平滑化、除去される。今、簡単化のために背景光を無視できるとすると、受信信号のS/N比は、積算数を M 、距離分解能を L として

$$\begin{aligned} SN(R) &\propto \sqrt{M n_s(R)} \\ &\propto \sqrt{ML} \frac{\sqrt{\alpha} e^{-\alpha R}}{R} \end{aligned} \quad (4)$$

と書ける。ただし、体積後方散乱係数は消散係数 α に比例すると仮定し、ここでは空間的に一定とおいている。上式を変形すると

$$ML \propto \frac{R^2}{\alpha e^{-2\alpha R}} [SN(R)]^2 \quad (5)$$

を得る。

図1に L を一定($L=30\text{m}$)としたときの M と α の関係を R をパラメータにして描いている。図1の右の縦軸は、レーザーパルスの繰り返し周波数を25パルス/秒としたときの平均時間を示している。図1の上の横軸には、視程 V を $V=3.91/\alpha$ の関係を仮定して参考のために示している。一定のS/N比($SN_c=5$)を得るために必要な積算数 M は、測定距離によって大きく変わる。測定距離を伸ばすと、 M は消散係数の値にも大きく依存するようになる。これらのことは、測定距離や、その時の消散係数の大きさに応じて、測定の方法(積算数や空間分解能)を適切に変更する必要があることを意味している。

3. 観測および解析

実際のレーザーレーダー観測に際して、消散係数の大きさ(視程)、測定距離、必要なS/N比と積算数との関係をあらかじめ知っておくことは有用である。以下では、この目的で行った大型レーザーレーダー^{1,2)}による観測および解析結果について述べる。

ここで述べる観測は1982年4月から6月にかけて種々の大気条件のもとで行ったものである。レ

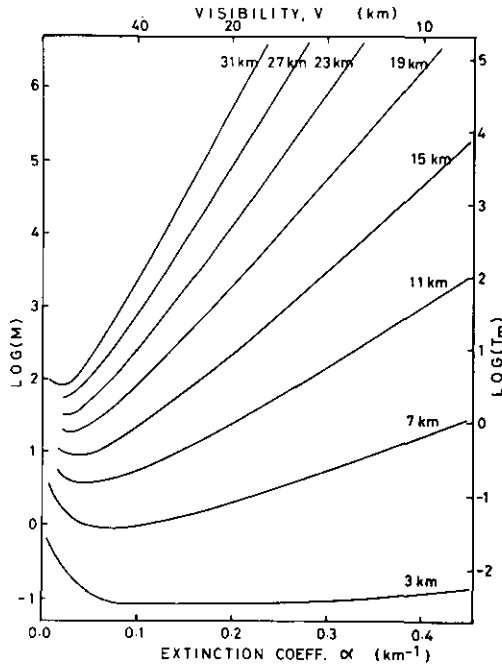


図1 消散係数と、一定のS/N比を得るのに必要な積算数との理論的關係距離をパラメータとしている。

表2 レーザーレーダー観測の方法

サンプリング時間幅	200nsec
(距離分解能)	(30m)
サンプリングワード数	2048
収録カウント数	2560パルス
測定波長	0.532μm

レーザーレーダーは水平方向に固定してデータの収集を行った。ここで測定に係るパラメータは表2に示している。

データの処理は笹野ら³⁾に述べた方法で行い、パワーモニター²⁾の値を用いてパワーの変動はノーマライズした。消散係数はスロープ法を距離3 km~5 km間に適用して求めた。スロープ法は大気中のレーザー光散乱体の空間分布の一様性を仮定するもので、詳しくは文献³⁾を参照されたい。このとき、最小自乗法による一次回帰の相関係数の値が0.9以下となったデータは、空間的一様性の仮定が成立していないと考えられるので以後の解析対象からはずした。

信号のS/N比は、測定データを用いて、次のように定義することができる。今、距離Rにおける収録信号の時系列を $S_i(R) (i=1, 2, \dots, N)$ としよう。ここで、Nは信号の全数(全パルス数)であ

る。これに対して、 M 個ずつ積算平均した信号の列を $S_{M,k}(R)$ ($k=1, 2, \dots, N/M$) と書くことができる。 $M=N$ のときの $S_{N,1}(R)$ は $S_j(R)$ の平均値に等しい。S/N比を信号の平均値と、平均値の周りの分散の平方根の比で定義すると

$$SN(R, M) = \frac{S_{N,1}(R)}{\sigma_M(R)} \quad (6)$$

ただし、

$$\sigma_M(R) = \sqrt{\frac{M}{N} \sum_{k=1}^{N/M} \{S_{M,k}(R) - S_{N,1}(R)\}^2} \quad (7)$$

と表すことができる。

この定義によれば、 $\sigma_M(R)$ にはエアロゾル濃度の変化に伴う信号の変化の寄与が含まれることになり、積算回数を増やしてもS/N比が増加しないことがあり得る。エアロゾル濃度変動の影響を少なくするために、 $\sigma_M(R)$ を求める際の信号の平均値として全体の平均 $S_{N,1}(R)$ を用いるのではなく、 $S_j(R)$ ($j=1, 2, \dots, N$) を最小自乗法で3次式近似し、近似式で推定される値からの偏差を用いて $\sigma_M(R)$ を求めた。

M は 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280パルスの9通りについて、距離 R は 1 km から 50 km まで、1 km ごとに $SN(R, M)$ の値を計算した。 $SN(R, M)$ の計算結果の一例を図2に示している。理論的には、背景光雑音がなく、ショットノイズのみでS/Nが決まると仮定すると、S/Nは M

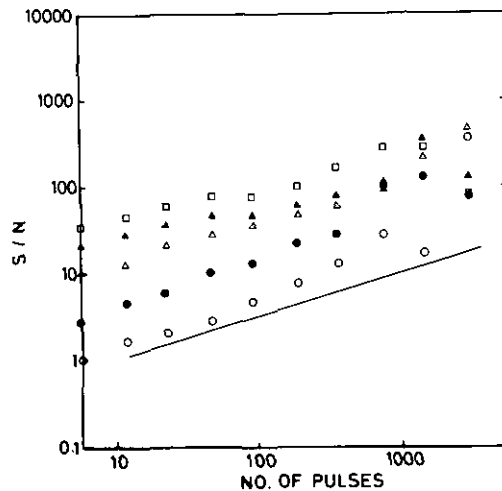


図2 積算数とS/N比の関係の実測の例

実線は M 乗の関係を示している。ここで

○印：11km, ●印：9km, △印：7km,

▲印：5km, □印：3kmである。

の平方根に比例する。図2に見るように、およそ、この関係が成立している。

$SN(R, M)$ の計算結果を用いて、ある一定のS/N比、 SN_c を得るのに必要とされる積算数 M を求めることができる。ここでは、それぞれの R に対して、 $SN(R, M)$ と M の間に次の関係を仮定した。

$$\log SN(R, M) = a_0(R) + a_1(R) \cdot \log M + a_2(R) \cdot (\log M)^2 \tag{8}$$

$a_0(R)$, $a_1(R)$, $a_2(R)$ を最小自乗法で決定し、任意の SN_c の値に対する M の値を内挿により求めた。また、 SN_c が内挿で求まる範囲外の際には、 $SN(R, M)$ と M の関係を直線で近似して、外挿により求めることとした。図3は $SN_c = 5$ とすると必要となる M の値を、それぞれの R に対してプロットしたものである。また、同図には図1に描いた M と α の理論的な関係をプロットしている。ただし、ここで示した理論計算では縦軸は任意であるので、 $R = 7\text{ km}$ と 11 km の実測値に理論値が一致するように描いている。このとき、式(5)における比例係数は 2×10^{-5} となる。

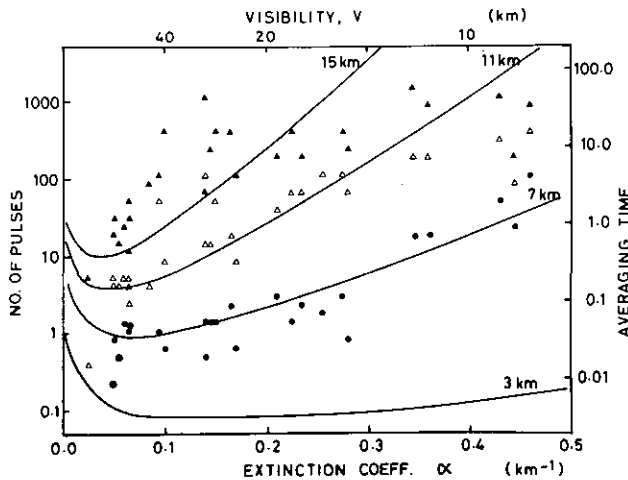


図3 図1と同じ。ただし、実測に基づく関係をプロットしている。

記号の意味は、●印：7 km, △印：11 km, ▲印：15 kmを表す。

図3によれば、消散係数 α が与えられたとき、一定のS/N比を得るのに必要な積算数の実測データに基づく関係は、理論的な予測にはほぼ一致している。これによると、 $\alpha = 0.1\text{ km}^{-1}$ のとき $R = 15\text{ km}$ で $SN = 5$ の信号を得るためには、積算パルス数は約20パルスが必要とすることが分る。

この計算は、空間分解能 $L = 30\text{ m}$ に対するものであるから、空間分解能を例えば 60 m とするならば、必要な積算数は $\frac{1}{2}$ になることは式(5)から明らかである。また、積算数はS/N比の2乗に比例して大きくする必要がある。式(5)の関係を用いれば、任意の分解能、S/N比に対する積算数 M の値を知ることができる。

4. 考察

図1に示した理論的な関係は体積後方散乱係数と消散係数が比例し、比例係数が大気条件によらず一定であることを仮定している。実際には、この比例係数もまた条件により変化すると考えられるが、現在のところ、十分には解明されていない。

図3に示した実測データに基づくプロットで、 $R=11\text{km}$ 及び $R=15\text{km}$ に対するデータが、消散係数が大きくなると理論曲線からずれていく。これは、データ全数が2560パルスであるため、積算数を多くしたときのS/N比の計算結果の信頼性が低下するためと考えられる。

図3に見られる全体的なばらつきの原因は、最初に述べた比例係数が一定という仮定の問題の他に、測定時間中(約100秒)の条件の変化に起因するものと考えられる。比較的長い周期の変動は3次曲線のあてはめで除くことができるが、短周期変動は除ききれていない。

上に述べたような問題はあるが、図3で示した結果は、実際の測定に際して、適切な測定の方法(積算数、空間分解能)の設定のための目安を与えることができる。消散係数が簡単に求められるとき、あるいは、視程が判定できるとき、消散係数または視程に対して、測定距離に応じて必要な積算数を読みとることができる。

5. まとめ

本報告では、レーザーレーダーデータの効果的なデータ収集を目的にした、積算平均によるS/N比改善についての子備解析について述べた。実測に基づく解析結果によれば、積算平均の効果は、ほぼ理論的な予測と一致する。視程 20km (消散係数 0.2km^{-1})のとき、約25パルス(1秒)の平均をすることにより、距離 11km まで $\text{SN}>5$ のデータを得ることができる。理論的な関係式を採用することにより、任意の距離、空間分解能、S/N比に対して必要とされる積算数を算出することができ、実際の測定に先立って、効果的な測定方法を設定することが可能である。

謝辞

本研究にあたり、東京電気特器(株)の桜井二三男氏にはデータ収集を、日科技研(株)の浜本尚子氏にはデータ処理をして頂いた。ここに感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 清水浩・竹内延夫・笹野泰弘・杉本伸夫・松井一郎・奥田典夫(1980): 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.
- 2) 清水浩・松井一郎・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫(1982): 大型レーザーレーダーの性能試験. 国立公害研究所研究報告, 第34号, 83-106.
- 3) 笹野泰弘・竹田延夫・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.

II-4

大型レーザーレーダーによる広域観測画像の修復法

北村新三¹・平尾浩司²

A Method for the Restoration of Images from the Wide Range
Laser Radar

Shinzo KITAMURA¹ and Koji HIRAO²

要 旨

大型レーザーレーダーによる広域観測の画像は、しばしば、画像としての一様性を欠くことがあり、それは主として、スキャンング面内での固定障害物や高濃度エアロゾルの存在、レーザーパワー減衰の空間的非一様性、受信信号直流成分の動揺、送受信望遠鏡の光軸間のずれに起因する。ここでは、そのような異常画像をソフトウェア技術により修復する方法を与えている。この方法は受信信号中のピーク値を統計的と検定法により検出する方法と、次に、加算受信信号の積分パワーを規格化することに基づいている。このための手続は完全にコンピュータ化することが可能であり、いくつかのデータによりその有用性が示された。

Abstract

The image over a wide-range area obtained from a large-scale laser radar often lacks the homogeneity mainly because of the existence of fixed obstacles and/or dense aerosols in the scanning plane, the spatial inhomogeneity of laser power attenuation, the fluctuation of the dc-component in the received signal and the deflection of the axis of the receiving telescope from that of the transmitting one. This paper presents a method for restoring such an abnormal image through software techniques. The method is based on the detection of the peak values in the received signal by the statistical t-test and next on the normalization of the integrated power for the accumulated received signal. The procedure is fully computer-feasible and its validity was shown by using several scanning data.

1. 神戸大学工学部計測工学科 神戸市灘区六甲台町
Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo, 657, Japan.
2. 国立公害研究所 客員研究員 (昭和55~56年度)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies, Yatabe Ibaraki, 305, Japan.

1. まえがき

国立公害研究所の大型レーザーレーダーにより大気汚染現象の観測が進められてきているが⁽¹⁾、とくに広域汚染を対象として水平スキャニング（PPI）を行う場合に、得られる画像に種々の問題点が生じる。これには

- (a) 水平面内に存在する固定障害物（鉄柱等）及び高濃度物質（エアロゾル）によるレーザー光の反射とその背部におけるレーザー光の減衰、
- (b) 背景光の影響及びアンプ等のドリフトによる信号直流成分の変動、
- (c) 大気中におけるレーザー光減衰の非一様性、
- (d) 送出及び受信望遠鏡の光軸間のずれ（温度変化等による）の影響、
- (e) レーザーパワーの変動。

などの原因が考えられる。これらのうち(a)~(d)がとくに影響が大きく、その結果、観測PPI画像には次のような状況を生じることがある。

(i) 障害物または高濃度エアロゾル後方からの受信信号はパワーが小さい。受信信号強度に比例した濃淡で画像を構成すると、上のような信号では、障害物等の後方が白ぬき状態となる。

（図1のB方向参照）。

(ii) 受信信号パワーの時間的変動、とくに直流成分の変動により、画像中に白または黒の放射状模様が生じたり、あるいは、画像全体に濃淡にドリフトが生じる（図1参照。なお、図1の画像は64×64メッシュである）。

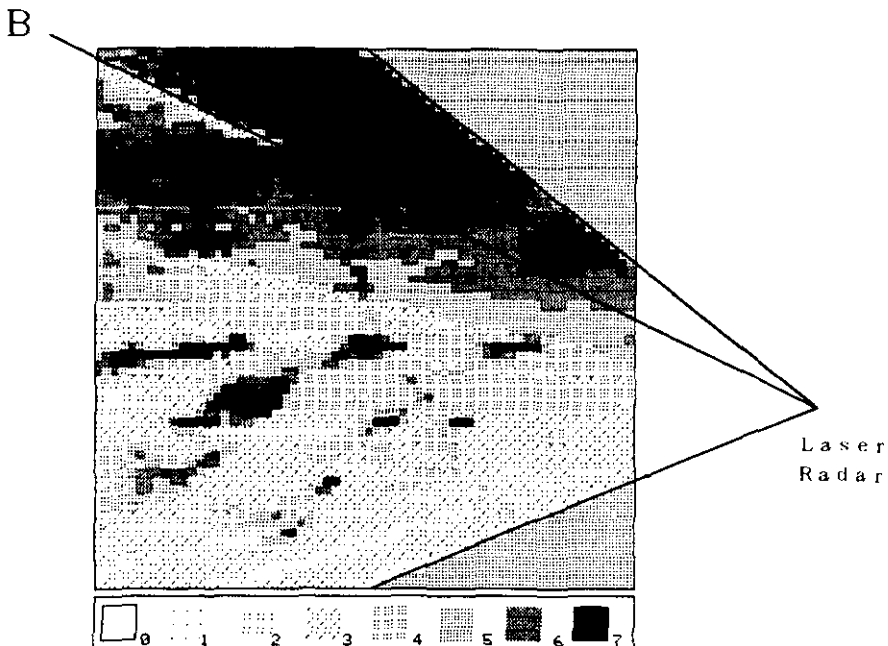


図1 異常画像の例

このような状態の改善のためには、大型レーザーレーダーシステムの各部ハードウェアの調整・改良も重要であるが、それのみでは対応できない問題も含んでいる。そこで、ここでは、第一段階として、ソフトウェアによりまず見やすい（あるいは画像らしい）形に画像の修復を図ることについて検討した。以下でその概要を報告する。

2. 画像の修復法

(1) 基本的なデータ処理

レーザーレーダーのデータ処理は、レーザーレーダー方程式

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

に基づく（各記号の意味は表1に示している）。受信信号 $P_r(R)$ より、距離 R における体積後散乱係数 $\beta(R)$ を求めることが主題である。その詳細についてはすでに述べられているのでここでは省略するが²⁾、レーザー投射線上で得られた $\beta(R)$ を2次元画像の形で表示する際、前節で述べたような問題点が生じる。

(2) 統計的検定による異常ピークの検出

障害物や高濃度エアロゾルからの受信信号は特別に大きいピーク値を示す。図2に図1のB方向の受信信号を示している。ただし、図のデータはもとの信号に直流分除去と距離自乗補正を加えて対数を取ったものである。以下では、このようなピークを異常ピークと呼ぶことにする。図2でも明らかなように、異常ピークの背部はパワーが小さい。とくに、大きな障害物による異常ピークの場合には、背部からの受信パワーは零と考えるべきである。しかし、ミー散乱方式では原理上、異常ピークが何で生じたかを判定できない。もし、図2のようなデータをそのまま画像に用いると、図1のB方向のように、異常ピークの背部が白くなって、PPI画像で大気の動き等を捉えるのに不

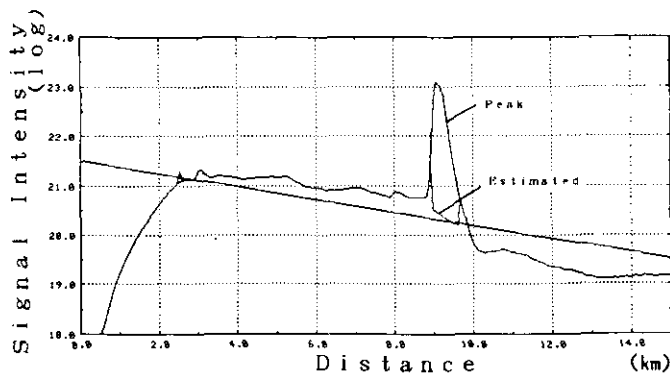


図2 受信信号での異常ピーク

表1 レーザーレーダー方程式の記号

記号	意味
$P_r(R)$	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
L	レーザーパルス空間長の半分
A_r	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

適になる。そこで、異常ピークの背部データに補正を加えて、画像としての一様性を持たせることが重要である。(この際、固定の障害物からの影響に関しては、別途、その位置の確認等の処理をする必要がある。)

このためには、時系列として得られる受信データ中の異常ピークを計算機で自動的に検出することが必要である。ここでは、次に述べるような多項式モデルを用いた統計的検定法^{3),4)}を用いた。信号データ中のある値が異常ピークであるかどうかは、その絶対値の大きさのみでなく近傍のデータ値、すなわち、データの空間的配置にも依存する。レーザー投射線上の受信データを距離 R の関数として $f(R)$ と表わし、点 R の近傍を N_R で示す。(図3参照。 N_R は R 点を含まない。) N_R において受信パワーを表す多項式近似モデルとして、たとえば一次式

$$f(R) = \alpha + \beta R + \epsilon(R), \quad R \in N_R \quad (2)$$

を考えよう。ここに $\epsilon(R)$ は

$$\left. \begin{aligned} E[\epsilon(R)] &= 0 \\ E[\epsilon^2(R)] &= \sigma^2 \end{aligned} \right\} (3)$$

なる性質をもち、かつ $\epsilon(R_1)$ と $\epsilon(R_2)$, ($R_1 \neq R_2$) は独立な正規性ノイズとする。モデルのパラメータ α , β は

$$S_e = \sum_{R \in N_R} (\alpha + \beta R - f(R))^2 \quad (4)$$

を最小とする条件より定まる。このために、 N_R を R を中心として左右対称とし、かつ R 点を新しく原点とした座標 R' をとれば(図3参照), $\sum R' = 0$ である。そこで(4)式より S_e の α , β に関する偏微分を零とおけば次式を得る。

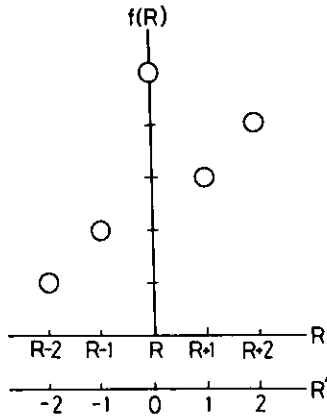


図3 ピーク信号検出の説明

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{n} \sum_{R' \in N_{R'}} f(R') \\ \beta &= \frac{\sum_{R'} R' f(R')}{\sum_{R'} (R')^2} \end{aligned} \right\} (5)$$

ただし n は $N_{R'}$ の要素数である。

さて、いま注目する $R'=0$ での観測値 $f(0)$ が異常ピークであるかどうかを、 $f(0)$ が、近傍データより定まる(2)式のモデルに属するかどうかの検定をすることにより判定する。すなわち、仮説

$$H_0: f(0) = \hat{f}(0) \quad (6)$$

を仮定し、 H_0 が棄却される時、 $f(0)$ は近傍データとは異なったピーク値を示すと判定する。このための検定手続は次のようになる。まず

$$t_1 = \frac{\hat{f}(0) - f(0)}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) V_e}} \quad (7)$$

ただし

$$V_e = S_e / (n-2) \quad (8)$$

を求める。 t_1 は自由度 $(n-2)$ の t 分布に従うので、この t_1 の値を、有意水準 $\rho\%$ の t 分布表と比較する。すなわち

$$|t_1| > t(n-2; \rho) \quad (9)$$

のとき仮説 H_0 は棄却され、 $f(0)$ は異常ピークと判定される。

この手法を現実の1次元データの全てのサンプル値に適用するわけであるが、この際近傍の要素数 n と有意水準 ρ を与える必要がある。ここでは要素数が、空間距離で 5~6km の程度 (A/D変換器のサンプル周期を 500ns として $n=80$ 程度)、また $\rho=0.5\%$ をとった (ρ を大きくとると、小さなピークも異常と判定する)。図2には異常ピークを検出し、それに(2)式の推定モデルを用いて、異常ピークを見掛け上、推定モデルによる値で置きかえた例を示している。

(3) 受信信号の規格化

図4に図1の画像中の受信信号の例を二つ示している。(表示は図2と同じで、もとの信号に直流分除去と距離2乗補正を加えて対数をとったものである。)このように、受信信号に相当の差が生じている。この原因には、種々のものが重なっているのであろうが、“まえがき”の(b)~(d)項が大きく影響すると考えられる。とくに、受信信号の直流分((1)式の P_B に対応)除去の方法にも問題があるようである。このような信号をそのまま用いて画像を構成すると、すでに述べたように画像に非一様性が生じるので、何んらかの補正が必要となる。このために、受信信号のエネルギーを一定とする方法が考えられる。

いま、(1)式で、 $Y(R)=1$, $P_0 K L A_r = K'$, $\beta(R)=1$, かつ消散係数 α が一定で

$$T(R) = \exp(-\alpha R) \tag{10}$$

と書ける場合を考えると

$$P_r(R) = \frac{K' \exp(-\alpha R)}{R^2} + P_B \tag{11}$$

となる。距離 R_1 から R_2 までの積分パワー

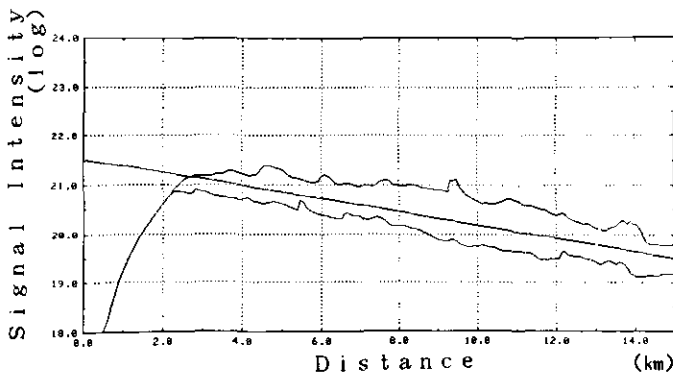


図4 受信信号パワーの違いの例

$$E = \int_{R_1}^{R_2} P_r(R) dR \quad (12)$$

は受信エネルギーに対応する量である。この量を各受信信号に対して一定となるように規格化すればよい。ただし、(12)式の形では、 $1/R^2$ の効果により、 R の大きい領域で信号の影響が現れないと思われるので、ここでは次のように考える。

図4に示した信号は

$$\log R^2 P_r(R) = \log \{ K' \exp(-\alpha R) + R^2 P_B \} \quad (13)$$

であり、もし $P_B = 0$ なら

$$\log R^2 P_r(R) = K_1 - K_2 \alpha R \quad (14)$$

(K_1, K_2 は定数)

となり、図4の信号の傾きが消散係数 α に対応する。ここで積分

$$S = \int_{R_1}^{R_2} \log R^2 P_r(R) dR \quad (15)$$

を考える。(この積分はエネルギーに対応しない。) いま、図4のような信号の差が、(13)式中の定数 K' 、 α あるいは P_B のどれか一つに起因するものとすれば (すなわち、残り二つが一定と考えることができるなら)、異なった二つの信号に対し、(15)式の積分が等しいとき、(12)式のエネルギーも等しくなる。実際には K' は一定と考えてよく、また、以下に述べるようにして一定の α を定めると、変動するのは P_B であると見なすことになる。ゆえに、(15)式の積分により、受信エネルギーの規格化が可能である。

この方法を実際に用いるために、まず、一画面の全受信データを各サンプル点で平均した基準の信号を求め、その傾きから基準となる直線を定める。(図4参照。これは、(14)式から、近似的に一定の α を定めたことに相当する。) 次に、受信信号一つずつの(15)式の積分値が、この基準直線の積分値と等しくなるように、受信信号に比率を掛けて規格化する。ただし、上の操作は $Y(R) = 1$ となる距離以遠について行うことにする。結果の例を図5に示す。なお、上の(2)項で述べたところの異常ピークをもつデータに対しては、ピーク点で信号を分割し、区間ごとに上の規格操作をほどこす。この際、異常ピーク値は、(2)でのモデルによる推定値におきかえて計算するが、規格後、もとのピーク値に戻す必要がある。この例を図6に示す。

(4) 微弱信号の除去

受信信号の中には至近距離の障害物からの影響によりデータとしての意味を失ってしまったものも少量ながら存在する(図7参照)。このようなデータは捨てることにし、もし補間が必要なら近傍データにより置きかえることにする。この際、どのような信号が微弱であるかの判断の基準が必

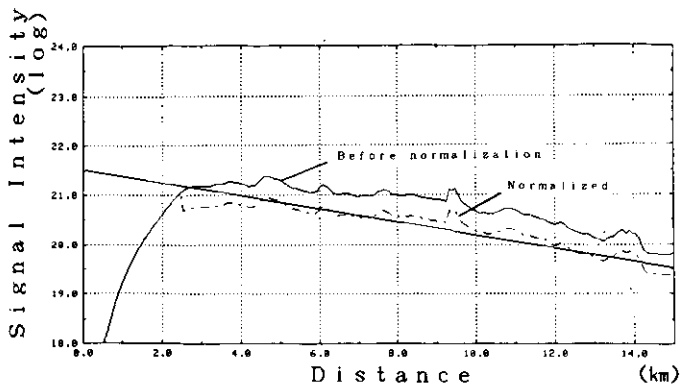


図5 受信信号パワーの規格化

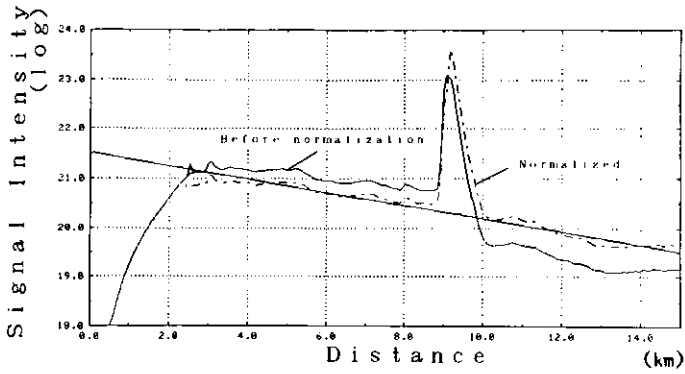


図6 受信信号パワーの規格化

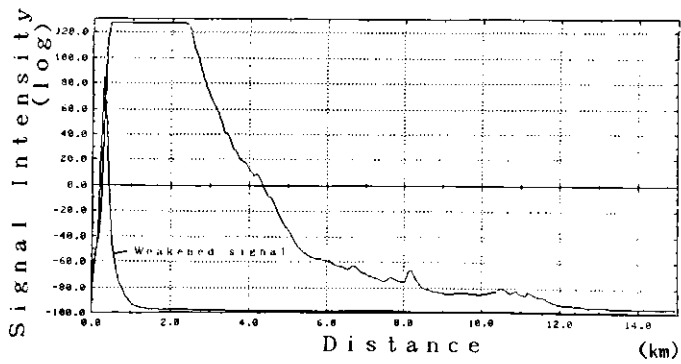


図7 微弱信号の例

要である。しかし、これを定めることは実はそれほど簡単でない。ここでは、信号のS/N比が1となる距離を観測可能距離と定義し、信号値がA/D変換器の1LSBになる平均的な距離で与えられると仮定した。(通常、観測では、受信信号を積算したものを信号として用いている(この報告のデータでは100~200回積算)ので、観測可能距離はもっと延びているはずであるが)。そして、この観測可能距離で信号が0.2LSB以下のものを捨てる方法をとった。

3. 画像修復の結果

(1) 対話形式の画像処理

すでに開発されている計算機対話形式の画像処理プログラムに²⁾、2節で述べた修復法を追加した。その流れを図8に示している。特に異常ピーク値の検出を、流れのどの段階で行うについては問題が残っているが、ここでは、図8に示すようにレーザー光の減衰補正前の信号の対数をとった値について行っている。なお、プログラムは、神戸大学総合情報処理センターのNEAC・ACOS900とグラフィック端末を用いてFORTRANで記述している。

(2) 画像修復の例

まず、図1をここでの方法で修復した結果を図9.1に示す。一画像のレーザー掃引時間は15分である。図9.2は同じ地域を続く15分で折り返し掃引した結果である。図9.3には対応する地域(正方形は9km四方)の地図を示した。図9.1、2より、水平スキャニング画像で問題となった点は一応解決されていると判断される。しかしながら、これらの画像のみでは、濃度の高い部分が、固定物なのか流動物なのかを判定することはできないので、地上における各種の固定障害物との対応をつけておく必要がある。たとえば、図9.1、2の両画像で共通して見られる左斜めの曲線は、図9.3に記入しているように高圧送電線の配置とよく一致する。また当日の風は北東から約2m[S]であったが、この方向と、図9.1、2での高濃度分布の流れ方向がよく一致している。なお、レーザーレーダーの1画面スキャニングには約15分掛かっている。ゆえに、本来は、この観測時間中での物質の移動についての補正を加えることが必要であるが³⁾、ここではそれは行っていない。

図10.1と図10.2(正方形は6km四方)も同様な観測結果で、風は北北東、約2[m/s]であり、高濃度分布の流れ方向とよく一致する。

図11.1~3(正方形は5km四方)も同様な結果であるが、この時はほとんど無風であって、高濃度分布は団塊状で、少しずつ変形しているようである。

4. あとがき

水平スキャニングによる広域観測のレーザーレーダー画像で生じる問題点は2節で述べたソフトウェア的手法により一応の解決をみた。今後、より多くのデータに適用して更に改良を重ねる必要があるが、現時点で残っている問題としては、次のことがあげられる。

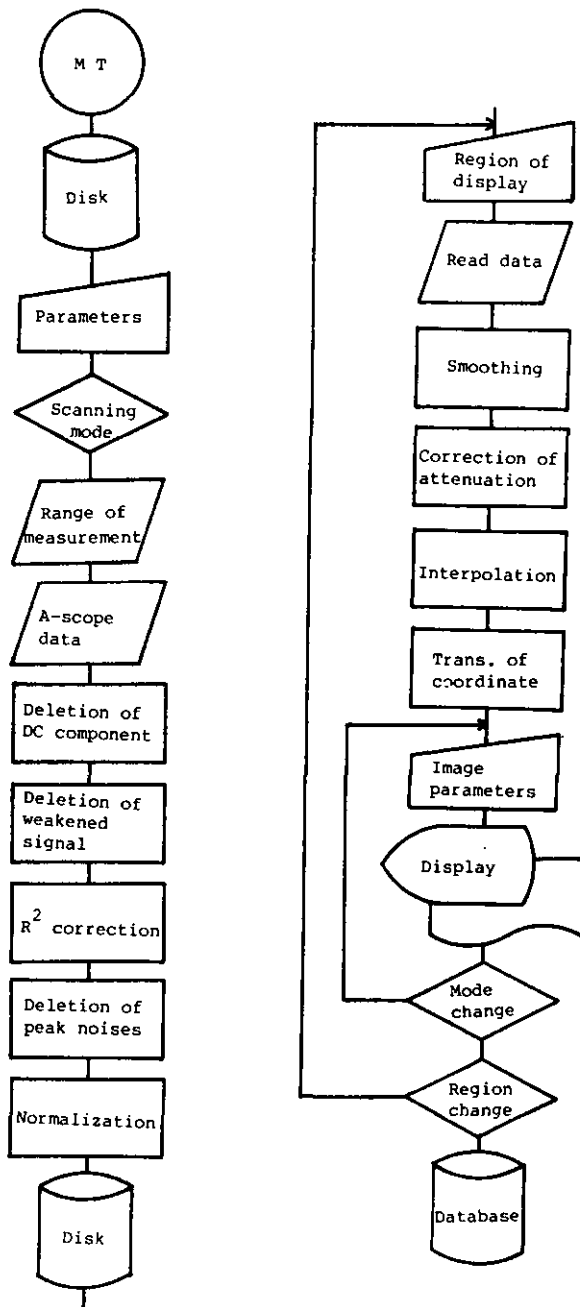


図8 画像処理プログラムの流れ

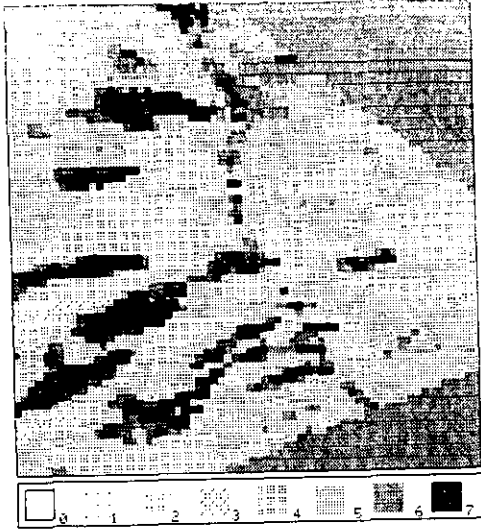


図9.1 図1の修復結果



図9.2 図9.1につづく観測結果

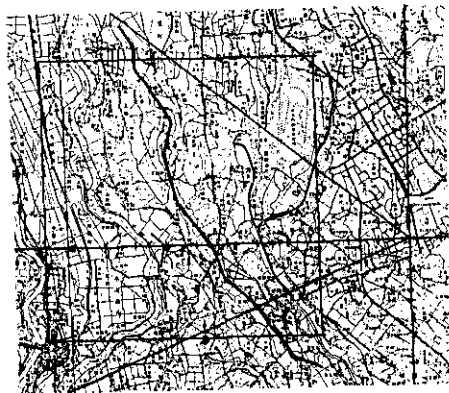


図9.3 図9.1, 9.2の地図

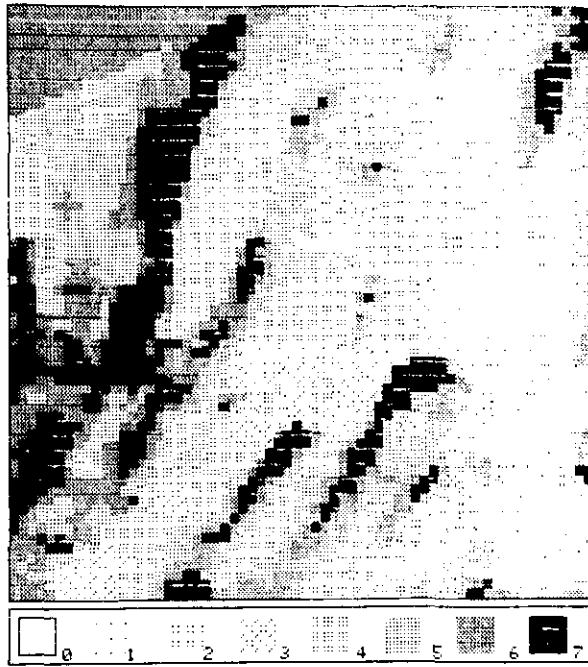


図10.1 観測結果の例

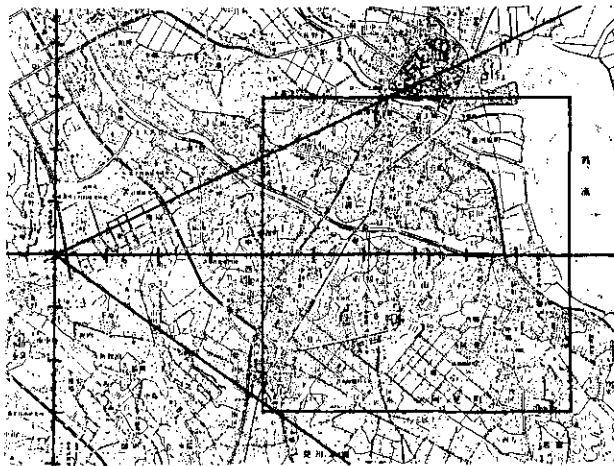


図10.2 図10.1の地図

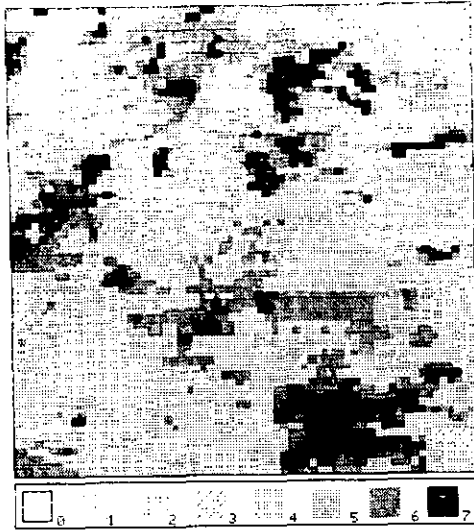


図11.1 観測結果の例

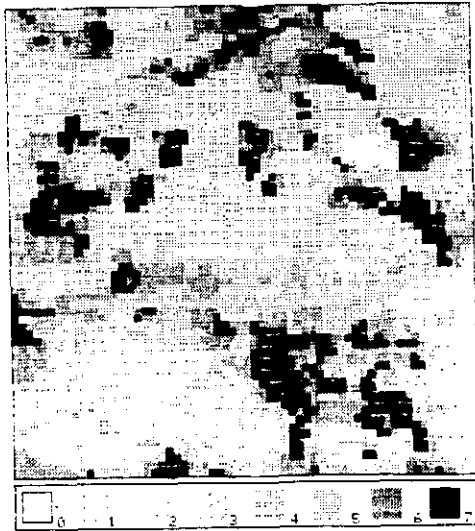


図11.2 図11.1につづく観測結果

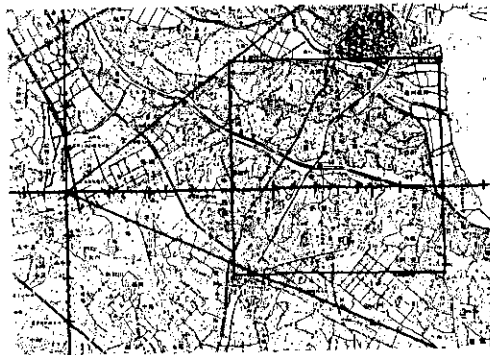


図11.3 図11.1, 11.2の地図

- (i) 地上固定障害物の画像と、浮遊エアロゾルの画像のカラー化による区別、
- (ii) 大気中でのレーザー光減衰の地域差の考慮、
- (iii) スキャニング時間中の浮遊物質移動の補正、
- (iv) 画像メッシュの増加、これに伴う計算量及び記憶容量増加への対応。

すでにレーザーレーダー画像を効率よく条件検索を行うための画像データベースのプロトタイプも開発しており⁶⁾、今後これも含めて検討を進めたい。

謝 辞

この研究の遂行に当たりご配慮いただいた、(故)奥田典夫部長、竹内延夫室長、安岡善文、清水浩、笹野泰弘の研究員にお礼申し上げます。

引 用 文 献

- 1) 国立公害研究所(1982): 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究. 国立公害研究所研究報告, 第34号.
- 2) 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. 1) の125-141.
- 3) 安岡善文, R. M. Haralick(1982): リモートセンシング画像におけるピーク雑音の除去. 本報告書II-8.
- 4) 奥野忠一他(1971): 多変量解析法. 日科技連.
- 5) 笹野泰弘・広原寿英・山崎哲夫・清水浩・竹内延夫・奥田典夫(1982): 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. 1) の167-181.
- 6) 北村新三・正道之男(1981): レーザーレーダー画像のデータベース作成. 文部省科学研究「環境科学特別研究報告集, B91-R52-3, 197-203.

II-5

大型レーザーレーダーによる広域エアロゾル分布の計測
——高品質画像データの収集のための測定方法、データ処理法の検討——

中根英昭¹・笹野泰弘¹・杉本伸夫¹
松井一郎²・清水 浩¹・竹内延夫¹

Measurement of Wide Area Aerosol Distribution by Large Laser Radar
——measurement and data processing methods for collection of high
quality image data——

Hideaki NAKANE¹, Yasuhiro SASANO¹, Nobuo SUGIMOTO¹,
Ichiro MATSUI², Hiroshi SHIMIZU¹ and Nobuo TAKEUCHI¹

要 旨

大型レーザーレーダーによって、常に信頼性の高いエアロゾル分布パターンデータを得ることを目的として、データ処理方法の改善を行った。改善の重点は障害物や高濃度汚染の影響の除去に置いた。

その結果として得られたエアロゾル分布パターンデータは、十分なS/N比を持ち、かつ物理的にも妥当なものである。

Abstract

Data processing methods for collection of reliable aerosol distribution pattern data obtained by the large laser radar ——LAMP lidar—— were improved. Improvements were carried out to remove the effects of obstructions and high-density pollutants.

It is shown that the obtained aerosol distribution patterns are physically reasonable with good signal-to-noise ratio.

1. はじめに

筆者らの先の報告¹⁾において大型レーザーレーダーは半径50kmまでの広域エアロゾル分布データを得る性能を持っていることを示した。しかし、定常的に信頼性の高いデータを得るには、測定方

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

法の検討およびデータ処理方法の改善が課題として残されていた。

とくに、レーザーレーダーを水平に掃引して広域エアロゾル分布を求める場合には次の3点が問題となっていた。

- i) 鉄塔・送電線等の障害物から反射された信号の影響の除去。
- ii) 排煙等の高濃度のエアロゾルによる著しい減衰や障害物の背後の信号の一部欠損に対する補正。
- iii) レーザーパワーの変動による信号強度の変動の補正。

これらの問題を解決するために、データ処理プログラムの改善を行った。この結果、十分なS/N比を持ち、排出源や風向との対応の良い、物理的に妥当なエアロゾル分布パターンデータを得ることができるようになった。

2. レーザーレーダーによるエアロゾル分布の測定

測定領域に障害物や高濃度のエアロゾルが全くない場合、測定によって得られた生データからエアロゾル分布パターンを得る手続きは以下のようなになる²⁾。

- i) 直流成分の除去
- ii) レーザーパワーによる規格化
- iii) 距離自乗補正
- iv) 減衰補正
- v) 極座標から直交座標への変換
- vi) 画像(エアロゾル分布パターンデータ)の表示

上の手続きのみによって画像を得た例を図1に示す。放射状の縞模様が入り、下部に送電線のパターンが現れている。良質の画像の得られない原因には、送電線、鉄塔などの障害物の影響がある。具体的に述べると、

- i) 障害物によってレーザー光が反射されるため、画像上に障害物のパターンが現れる、
- ii) 障害物や高濃度のエアロゾルの後方では信号が弱められ、エアロゾル濃度が見かけ上非常に小さく表される、

の二点である。

この章では、図1に示したエアロゾル分布パターンが得られる過程を示し、データ処理の中で用いられる概念、データ取得およびデータ処理上の問題点を明らかにする。

2.1 レーザーレーダーによって得られたデータの検討

レーザーレーダーを用いて受信される、距離 R からの信号強度 $P_r(R)$ は、

$$P_r(R) = P_0 \cdot K \cdot \beta(R) \cdot T(R)^2 / R^2 + P_b \quad (1)$$

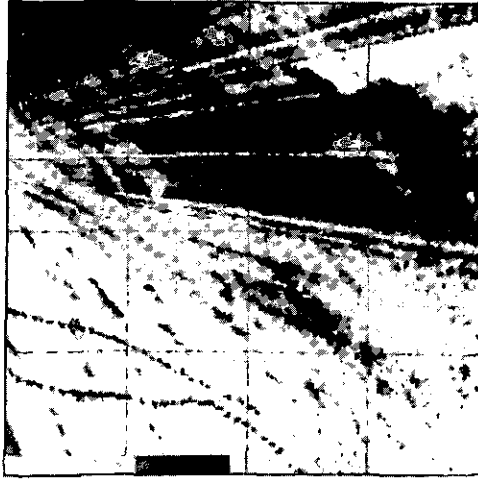


図1 エアロゾル分布パターン
レーザー出力のみによる規格化によって得た画像。

と表される²⁾。ここで、 P_0 はレーザー出力パワー、 K はレーザーパルス幅と望遠鏡の口径によって決まる定数、 $\beta(R)$ は距離 R における体積後方散乱係数、 $T(R)$ は距離 R までの大気の透過率、 P_B は背景光パワーである。 $T(R)$ は距離 R における減衰係数 $\alpha(R)$ を用いて、

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

と表される。

測定は1982年2月8日、10時46分及び13時35分より22.5分間行った。測定の目的は国立公害研の東方向(方位角 $65^\circ \sim 155^\circ$) 30km圏のエアロゾル分布を得ることである。測定に係るパラメータを表1に示す。レーザーレーダー信号はトランジェントレコーダー(岩通製DM902)によって処理された。それによってデジタル化された値を用いると式(1)は、

$$P_{ij} = P_{0j} \cdot K \cdot \beta_{ij} \cdot T_{ij}^2 / R_j^2 + P_{Bj} \quad (3)$$

表1 測定に関するパラメータ

サンプリングゲート時間	200ns	($\Delta R = 30m$)
ワード数	2048	($R = 0 \sim 60km$)
カウント数	1350	($\Delta \theta = 1.1mrad$)
積算パルス数	25	
スキャン速度	$4^\circ/min$	
スキャン範囲	方位角	$65^\circ \sim 115^\circ$
	高度角	0°

ΔR : 空間分解能

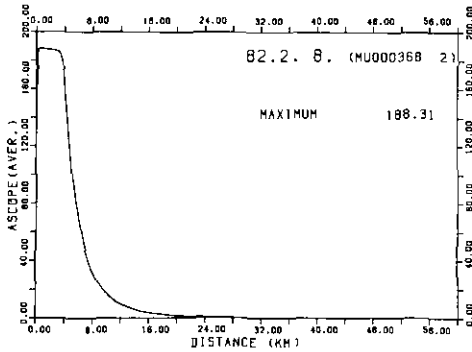
R : 距離

$\Delta \theta$: 角度分解能

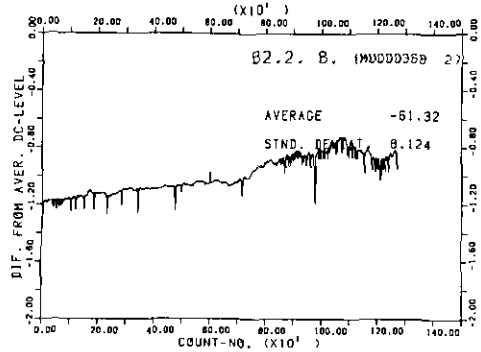
と表される。ここで i は距離方向の i ワード目のデータを表す添字であり、 j は方位角方向の j カウント目のデータを表す添字である。

測定された生データの質を検討するために、データチェックプログラムを用いて次の量を計算し、図2に示した。

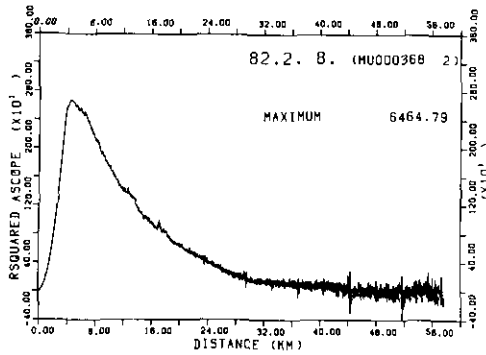
(a) 平均Aスコープ: $\langle P_i \rangle$



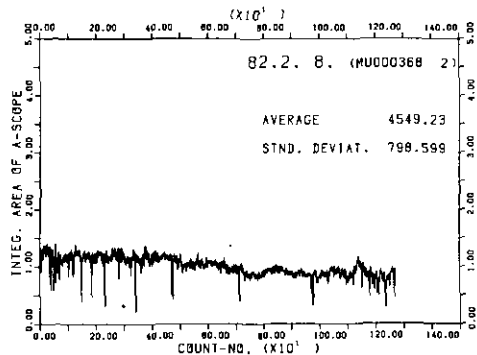
(a) 平均Aスコープ



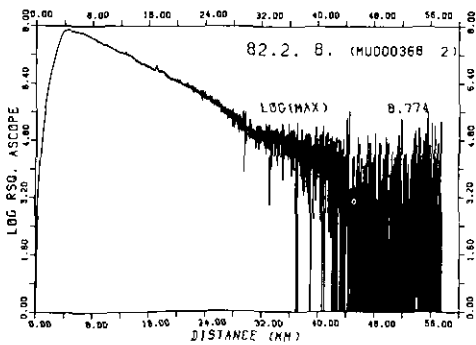
(d) 背景光パワー



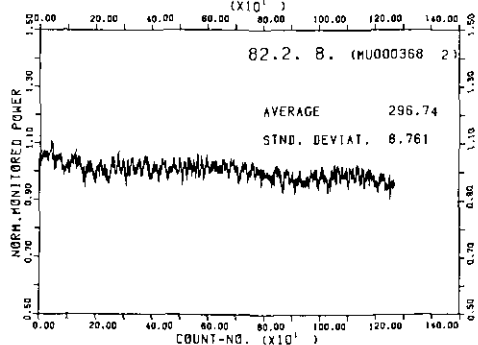
(b) 距離自乗補正平均Aスコープ



(e) 積算Aスコープ



(c) 距離自乗補正Aスコープの対数



(f) レーザー出力

図2 データチェックプログラムの出力結果

$$\langle P_i \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_{ij} - \bar{P}_{Bj}) \quad (4)$$

ここで、 N は方位角方向のカウント数であり、測定例では、 $N=1350$ である。 \bar{P}_{Bj} は後に示す。

(b) 距離自乗補正平均Aスコープ： $\langle P_i^{SQ} \rangle$

$$\langle P_i^{SQ} \rangle = \langle P_i \rangle R_i^2 \quad (5)$$

(c) 距離自乗補正平均Aスコープの対数： $\langle Q_i \rangle$

$$\langle Q_i \rangle = \ln \{ \langle P_i \rangle R_i^2 \} \quad (6)$$

(d) 背景光パワー： \bar{P}_{Bj}

$$\bar{P}_{Bj} = \frac{1}{m} \sum_{i=n-m+1, n} P_{ij} \quad (7)$$

ここで、 n は距離方向のワード数である。背景光パワーは式(7)によって、最後の m ワードの信号強度の平均として決定した。測定例に対しては $m=100$ として処理した。

(e) 積算Aスコープ： S_j

$$S_j = \sum_{R_i \geq 7.5 \text{ km}} (P_{ij} - \bar{P}_{Bj}) \quad (8)$$

S_j は、図2(a)の平均Aスコープ(7.5km以遠)の下の面積にあたる。

(f) レーザーパワー： P_{0j}

レーザーパワーはバイプラナダイオードを用いたレーザーエネルギーモニター¹⁾によって各カウント毎に測定したものを示した。

図2の(a)~(f)は得られたデータの概要を知ると共に、測定上の問題点、データ処理の際に考慮すべき点を知る上で有用である。

図2(a)の平均Aスコープを見ると、0 kmから5 kmまで信号強度が一定である。これは、トランジェントレコーダー(8 bit)によってデータを取り込む際に信号の大きさが255 LSBを越え、AD変換器を飽和させているためである。レーザーレーダー信号は、式(1)に示すように $1/R^2$ に比例する減衰と光の散乱に起因する減衰を受ける。視程が約40kmの場合、例えば3 kmにおける信号強度は30kmにおける信号強度の 3×10^4 倍にもなる。従って、30km圏の広域測定を行う際には、遠方でも十分な大きさの信号が得られるように近距離部分を飽和させて測定する必要がある。

図2(b)は距離自乗補正を行っているので遠距離部分のデータの概要を知ることが可能である。

図2(c)では、5 kmから30kmにかけて、 $\langle Q_i \rangle$ の直線的な減少が見られる。エアロゾルの光学的性質が一様と仮定でき、方位角について平均した減衰係数 $\bar{\alpha}(R)$ 、体積後方散乱係数 $\bar{\beta}(R)$ が定数と見なせるならば、式(6)は、

$$\langle Q_i \rangle = -2\alpha \cdot R + C \quad (9)$$

と表される。ここで、 α は $\bar{\alpha}(R)$ を動径方向に平均したものであり、 C は定数である。式(9)は、 $\langle Q_i \rangle$ の直線部分の傾きが平均的な減衰係数を与えることを示している。

図2(d)は背景光パワーによって生ずる直流成分の値をカウント毎に(方位角に対して)プロットしたものである。ピーク状に直流成分の値が下がっているのは、この方位角において背景光が障害物によってさえぎられることによる。また、ピーク状に上がっている場合は、直流成分を計算するワード数に相当する領域に、雲、排煙、鉄塔、建物等、強い信号を与えるものがあり、正しい直流成分が決定できなかったと考えられる。カウント数(方位角)によって直流成分が異なるのは主に、太陽のある方向とレーザーレーダーの指す方向の角度差の違いによる。夜間に測定した場合、このプロットは水平に引いた直線に近いものになる。

図2(e)の積算Aスコープは、障害物の存在する方位角で小さくなっていることを除けば、ほぼ一定値を示している。

図2(f)に示したレーザーパワーに大きな変動はない。しかし、周期の短い変動があるので、何らかの規格化を行わなければS/Nを下げる原因になる。

図2(a)~(f)に示した量について検討することによって、意味のある画像になり得るデータか否かを判断した。

2.2 エアロゾル分布パターンの作成

前節において検討されたデータからエアロゾル分布パターンを得るためには、減衰補正と、極座標から直交座標への変換を行う必要がある。現段階では、式(9)で得られた減衰係数の平均値 α を用い、次式によってエアロゾル濃度 C_{ij} を求めている。

$$C_{ij} \propto \beta_{ij} = (P_{ij} - \overline{P_{Bj}}) \cdot R_i^2 \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot R_i) / (P_{0j} \cdot K) \quad (10)$$

このようにして得られた極座標上のエアロゾル濃度から直交座標上の濃度を得る過程は、4章で詳述する。

3. データ処理方法の改善

前章に示したように、通常の方法では、障害物や高濃度汚染のため、画像に縞状の雑音が入る。この問題を解決するために、以下に述べるようなデータ処理方法の改善を行った。

3.1 障害物から反射された信号の除去

障害物によって反射された信号は一般に、平均Aスコープ(図2(a))の数倍から数10倍の値を持っているが、排煙等の高濃度のエアロゾルによる信号も同程度の値を持つことがある。両者を区別するためには、

- i) 本報告書II-4において平尾・北村が提案した統計的 t 検定によるピーク検出法の利用,
- ii) あらかじめ検出しておいた障害物の位置を記憶させておき、その位置のデータを周囲のデータによって内挿する方法,
- iii) 障害物による信号が鋭いピークを示すことを利用して、経験的に区別する方法,

が考えられる。i) は3方法の中で最も客観的に障害物による信号を検出する方法であるが、計算時間が長くなるという欠点がある。ii) は計算時間の点では有利であるが、測定領域やレーザーの仰角を変えるたびに障害物分布データを用意しなければならない。測定領域が同一の多数の観測データを処理する場合に適している。iii) は、例えば、次の手続きによって障害物による信号を取り除く方法である。レーザーレーダー信号($P_{ij} - \bar{P}_{Bij}$)のうち、各々の i において $\langle P_i \rangle$ より a 倍(例では $a = 3$) 以上の大きさを持つ信号 t_i を検出し、その前と後の m ワード(例では $m = 5$) の信号の平均値 \bar{t}_a , \bar{t}_b を求める。そして、レーザーレーダー信号 t_i が \bar{t}_a , \bar{t}_b のいずれの b 倍 ($b < a$, 例では $b = 1.5$) よりも大きい場合に t_i を障害物による信号と見なす。 a , b , m は経験的に決定する。この方法は簡便であるが、 a , b , m の値について明確な物理的根拠を示すことができない欠点を持っている。

現在のところルーチン測定を行う領域を確定していないこと、計算時間を節約する必要があることを考慮し、経験的方法によって処理している。図3(a)は、この方法によって障害物による信号を除去し、3.2で述べる方法によってレーザーレーダー信号の規格化を行うことによって得たエア

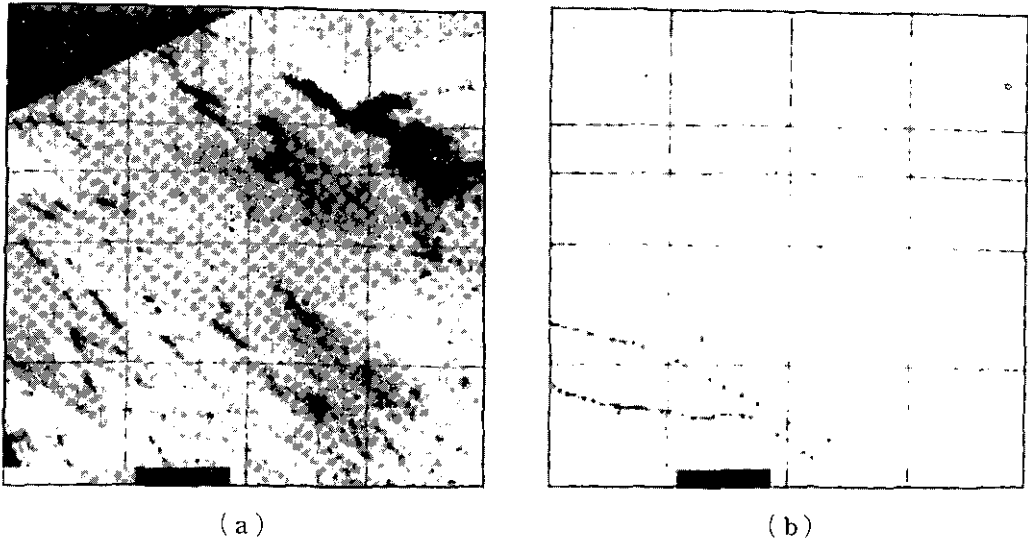


図3 (a)エアロゾル分布パターン。距離自乗補正Aスコープの面積によって規格化し、障害物の信号を除去することによって得た画像。(b)除去された障害物の分布

ロゾル分布図であり、図3(b)は除去された信号の分布図である。障害物による信号の除去は、送電線や鉄塔の存在する領域(左下部)について行った。取り除かれた信号の分布は実際の送電線の位置と良く一致している。エアロゾル分布図からは送電線のパターンが消えていること、送電線の部分の他はほとんど除去された信号のないことから、障害物による信号の除去率、他の信号に対する選択性は共に十分高いと考えて良い。

3.2 レーザーレーダー信号の規格化

レーザーレーダー信号が飽和している領域に障害物等のある場合、レーザーパワーによる規格化は有効ではない。飽和していない最初の信号に対応するワード数を i_{min} とすると、 $i \geq i_{min}$ におけるレーザーレーダー信号強度 $P_j(R_i)$ は、

$$P_j(R_i) = D_j \cdot P_{0j} \cdot K \cdot \beta_{ij} \cdot T_j(R_i)^2 / R_i^2 \quad (11)$$

と表される。ここで D_j は、飽和している領域で障害物等のために送受信光強度が減少する割合であり、 $T_j(R_i)$ は距離 R_i までの大気透過率である。A スコープ、距離自乗補正 A スコープ、それに対して減衰補正を加えたものの面積をそれぞれ S_j^A , S_j^R , S_j^C とすると、

$$\begin{aligned} S_j^A &= \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} P_j(R_i) \\ &= D_j \cdot P_{0j} \cdot K \cdot \sum_i \beta_{ij} \cdot T_j(R_i)^2 / R_i^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_j^R &= \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} P_j(R_i) \cdot R_i^2 \\ &= D_j \cdot P_{0j} \cdot K \cdot \sum_i \beta_{ij} \cdot T_j(R_i)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} S_j^C &= \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} P_j(R_i) R_i^2 T_j(R_i)^{-2} \\ &= D_j \cdot P_{0j} \cdot K \cdot \sum_i \beta_{ij} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。 i_{max} は処理すべき最も遠方の信号に対応するワード数である。式(12), (13), (14)の \sum_i より後の部分は、体積後方散乱係数の重みつき平均値に比例する量であるが、エアロゾルの光学的一様性を仮定すると、いずれも j に依存しない定数になる。 $\sum_i \beta_{ij} \cdot T_j(R_i)^2 / R_i^2$ では近距離部分の信号に大きな重みがあり、 $\sum_i \beta_{ij}$ では S/N が相対的に小さい遠方の信号にも等しい重みを与えることを考慮し、 $\sum_i \beta_{ij} \cdot T_j(R_i)^2$ を信号の規格化に用いることにした。 S_j^R を j について(方位角について)平均した値を S^R とすると、

$$D_j \cdot P_{0j} = \langle D_j \cdot P_{0j} \rangle \cdot \frac{S_j^R}{S^R} \quad (15)$$

となり、式(11)は、

$$P_j(R_i) = \langle D_j \cdot P_{0j} \rangle \cdot \frac{S_j^R}{S^R} \cdot K \cdot \beta_U \cdot T_j(R_i)^2 / R_i^2 \quad (16)$$

と表される。 $\langle D_j \cdot P_{0j} \rangle$ は $(D_j \cdot P_{0j})$ を j について平均したものである。式(16)ではレーザーパワーの変動、飽和領域における送受信光の減衰の両者の影響を排除できるように規格化されている。

距離自乗補正Aスコープの面積を用い、障害物による信号の除去を行って得られた画像が図3(a)である。図1と比較すると縞状の模様が少なくなっている。これは、飽和している領域の障害物、高濃度エアロゾルの影響が除去されたことによる。しかし、画像にする領域内に高濃度汚染や障害物がある場合に、その背後の信号が小さくなる問題は残る。

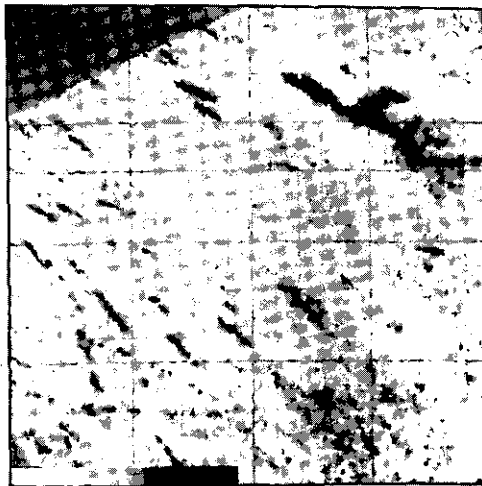
3.3 統計的t検定によるピークの検出とピーク間の区間ごとの信号の規格化

本報告書II-4で平尾・北村が述べている方法によって、高濃度汚染や障害物の背後の信号が小さくなる問題を解決することができる。すなわち、統計的t検定によって高濃度エアロゾルや障害物によるピーク状の信号を検出し、ピーク間の区間ごとに3.2で述べた方法によって信号強度の規格化を行うのである。

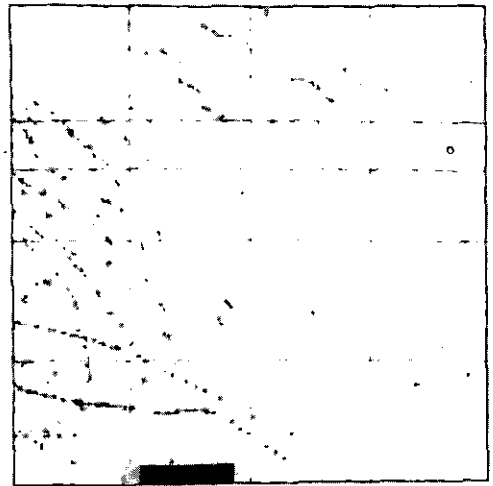
この方法で処理を行った画像を図4(a)に示す。高濃度汚染や障害物の背後のエアロゾル分布も求めることが可能になり、縞状の模様も消失している。

ここで、信号を規格化する3方法、

- i) レーザーパワーによる規格化、



(a)



(b)

図4 (a)エアロゾル分布パターン ピークの検出を行い、ピーク間ごとの規格を行って得た画像。(b)障害物及びピークの分布

- ii) R^2 補正Aスコープの面積による規格化,
- iii) ピークの間の区間ごとの規格化,

について比較する。

模式図, 図5において曲線 l は j カウント目のAスコープであり, 曲線 m は平均Aスコープとする。飽和がないと仮定して曲線 l を延長したものを破線で, 曲線 m を延長したものを二点鎖線で表す。地点A, C, Dに障害物または高濃度汚染によるピーク P_1, P_2, P_3 が生じたとする。但し, P_1 は, 実際には, 飽和のために検出できない。曲線 m はすでにレーザーパワーについて規格化されており, 0 kmでの信号強度は, 曲線 l のものと等しい $S(\text{LSB})$ であるとする。しかし, P_1 があるために, 平均Aスコープが飽和しなくなる地点Bでは曲線 m の信号強度は, 255 LSBより小さくなっており, レーザーパワーによって規格化しただけでは, 信号の規格化ができないことを示している。十分なS/Nを持ち画像にできる区間をB, Eの間とすると, ii) の方法では, 曲線 l のAスコープを R^2 補正した後BE間で積算し, それが曲線 m に同様な処理をしたものに等しくなるように, 曲線 l を規格化する。これによって, P_1 の影響は除かれるが, P_2, P_3 の影響は残る。しかし, iii) の方法では, ii) と同様な規格化をBとC, CとD, DとEの間で行い, すべてのピークの影響を取り除くことができる。しかし, C, Dにおいて信号の不連続が生ずるので適当な平滑化が必要である。

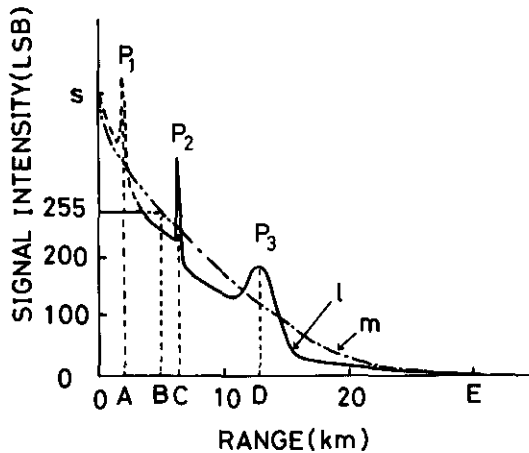


図5 信号の規格化の方法を比較するための模式図

m : 平均Aスコープ。 l : j カウント目のAスコープ。

4. エアロゾル分布画像データの信頼性

得られた画像の信頼性を評価するためには, 画像データのS/Nを求めるとともに, エアロゾル分布パターンの物理的妥当性, たとえば, 排出源や風向と対応しているか否かについて検討する必要がある。ここでは, 1982年2月8日のデータを例にとって検討を行う。

4.1 画像データのS/N

測定によって得られるデータは極座標上のエアロゾル濃度である。実例として取り上げた1982年2月8日の測定の場合は、動径方向に2048、角度方向に1350、従って2048×1350個のデータが得られている。この中から測定対象領域に対応する部分を取り出し、まず動径方向に N_r ワード、方位角方向に N_θ カウントの大きさをもった極座標に圧縮した(図6のProcess 1)。次に、極座標から直角座標への座標変換を行う(Process 2)。

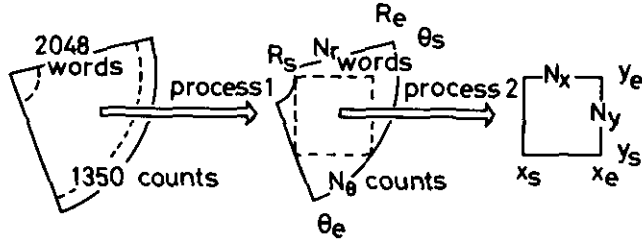


図6 極座標上のデータを直角座標上のデータに変換する方法

S/Nの計算は、Process 1とProcess 2の中で行う。まず、Process 1で画素(k, l)に圧縮される信号強度の分散 σ_{kl} と平均値 C_{kl} を求める。 σ_{kl} を雑音とみなし、 C_{kl} との比によって画素(k, l)上のデータのS/N、 $(SN)_{kl}$ を定義する。すなわち、

$$(SN)_{kl} = \frac{C_{kl}}{\sigma_{kl}} \quad (17)$$

である。ここで、

$$\sigma_{kl} = \left\{ \frac{\sum_m (C_{mkl} - C_{kl})^2}{N_{kl}(N_{kl} - 1)} \right\}^{1/2} \quad (18)$$

$$(m = 1, 2, \dots, N_{kl})$$

である。ここで、 C_{mkl} は画素(k, l)に圧縮されるエアロゾル濃度、 N_{kl} は画素(k, l)に圧縮されるデータの数である。

極座標上に等間隔に並んだデータでは、単位面積あたりのデータ数(データ密度) $\rho_{R\theta}$ が原点からの距離に反比例する。それに対して、直角座標上に等間隔に並んだデータの場合、データ密度 ρ_{XY} は一定である。従って、直角座標上のS/N、 $(SN)_{ij}$ は次のようにして求めることができる。

$$(SN)_{ij} = (\rho_{R\theta} / \rho_{XY})^{1/2} \cdot (SN)_{kl} \quad (19)$$

ここで、局所的なデータ密度 $\rho_{R\theta}$ は、

$$\rho_{R\theta} = \frac{N_r \cdot N_\theta}{(R_e - R_s) \cdot R \cdot (\theta_e - \theta_s)} \quad (20)$$

であり、 ρ_{XY} は

$$\rho_{XY} = \frac{N_X \cdot N_Y}{(X_e - X_s)(Y_e - Y_s)} \quad (21)$$

である。

このようにして得られた $(SN)_{ij}$ を平均し、S/Nの分布図を求め、データの信頼性の検討の資料とした。国立公害研究所の東方5km~25km、北に7km、南に13kmの領域のエアロゾル分布、図4に対するS/Nの分布図を図7に示す。大部のデータのS/Nが10以上あり、10レベルにスライスしたカラーグラフィックディスプレイによる表示に充分耐える画質をもっていることがわかる。また、本報告書II-3では、視程が50km以上の場合、15kmの距離でS/N=5を得るには約10ショットのレーザーパルスが必要であるという結果が得られている。この値は、積算回数やデータ密度を考慮するとS/N分布図上では約35になる。図7のS/N分布図でも、距離15km付近で30~40のS/Nが得られており、良い一致を示している。

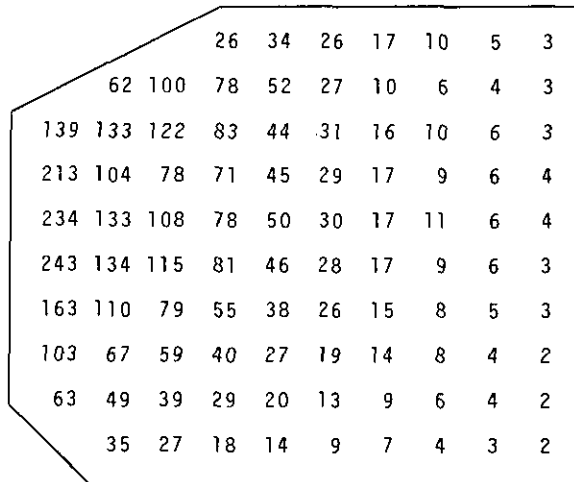
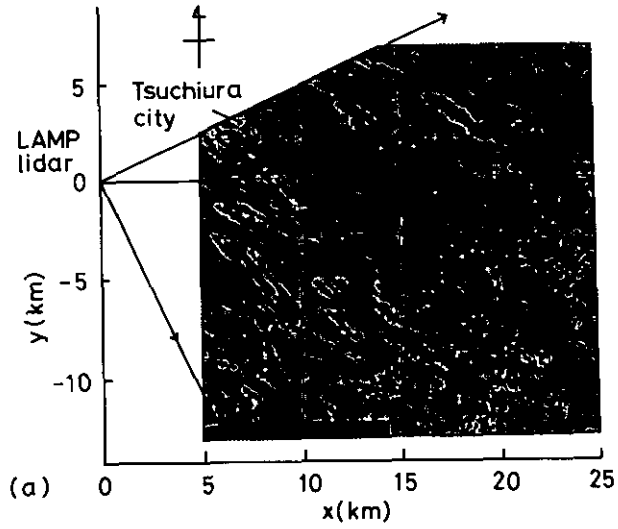


図7 S/Nの分布

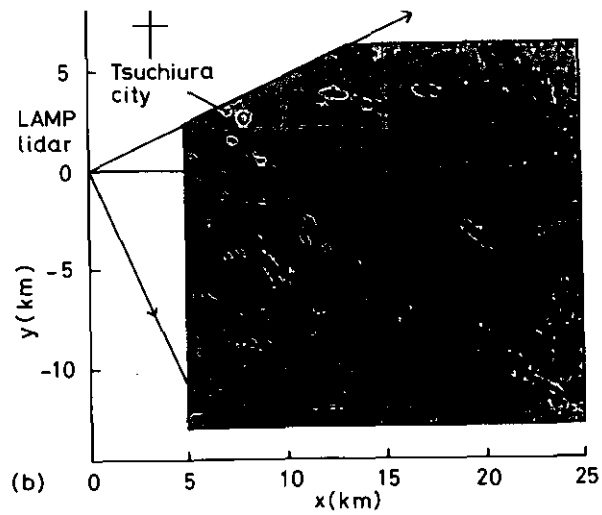
図4(a)に対応。

4.2 画像の実例およびエアロゾル分布パターンの物理的妥当性

1982年2月8日に2回の測定を行い、エアロゾル分布パターンを求めた。この日の天候は晴で日中は北西の風、視程は50km以上あった。図8の(a)、(b)はそれぞれ、10時46分、14時35分のデータである。図中に示したように画面の北西端には土浦があり、そのすぐ北には神立の工業団地がある。画面北部の出島には工場がある。10時46分には風向はNW、風速は5m/sであった。北西から



(a) 1982. 2. 8. 10:46. NW5.0m/s. 視程79km.



(b) 14:35. NW2.6m/s. 視程81km.

図8 エアロゾル分布の変化

南東方向に流れる高濃度エアロゾル分布パターンは、排出源に対応した物理的に妥当なものと言える。14時35分には、風向はNW、風速は2.6m/sになった。パターンは塊状に近くなり、風向との対応が不明瞭になっている。これは風速が小さくなったことによると思われる。このように、エアロゾル分布パターンの変化は、移流と拡散の寄与率の違いと関連があることを示唆している。

これまで見てきたように、得られた画像データはS/Nの面からも、排出源、風向との対応の面からも信頼性の高いものと考えて良い。

5. まとめ

エアロゾル分布パターンの信頼性の向上のために、測定上の問題点を検討するとともに、データ処理のためのプログラムの改善を行った。

その結果得られたエアロゾル分布は、通常の画像表示に必要なS/Nを持っている。また、エアロゾル分布パターンは排出源や風向などと良く対応した、物理的に妥当なものであることが明らかになった。

今後、減衰係数の空間分布を取り入れた減衰補正³⁾を行う等、データ処理方法を改善する必要がある。また、エアロゾル分布パターンについても、排出源、風向との対応だけではなく、大気の安定度や気象要素の鉛直分布、地形との対応について検討できるように、データの蓄積を進める必要がある。

なお、大型レーザーレーダーによる測定に協力して下さった桜井二三男氏に深謝する次第である。

参 照 文 献

- 1) 清水浩・松井一郎・笹野泰弘・竹内延夫・奥田典夫(1982): 大型レーザーレーダーの性能試験. 国立公害研究所研究報告, 第34号, 83-106.
- 2) 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.
- 3) Klett, J. D. (1981): Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. Appl. Opt., 20 (2), 211-220.

II-6

大型レーザーレーダーによる画像の強調と雑音除去

宮本定明¹・大井 紘²・内藤正明³

Enhancement and Noise Reduction of Images Obtained
by the Large Scale Laser Radar

Sadaaki MIYAMOTO¹, Ko OI² and Masaaki NAITO³

要 旨

大型レーザーレーダーにより得られた画像の質を向上させるため、デジタル画像処理の諸方法を適用した。すなわち、一様な濃度が大部分を占めるような画像に対し、ヒストグラム平坦化を行って、コントラストを明瞭にする方法、平滑化操作により、雑音の除去を行う方法、及び、平滑化画像と原画像の重ね合わせにより、強調と雑音除去を同時に行う方法を検討し、実際に、大型レーザーレーダーによって得られた画像に適用した。また、大気汚染のパターン表示にしばしば用いられる内挿法を利用した平滑化について考察した。

Abstract

Techniques of image processing are applied to pictures obtained by the large-scale laser radar to improve the quality of the image data. Gray scale transformation to a flat histogram is applied to sharpen the images. At the same time, an iterative smoothing method is used to remove noises. A normalized image derived from the smoothed picture is superimposed onto the original one to obtain a noiseless and enhanced image. Moreover, as an interpolation method applicable to the image processing a smoothing spline is considered.

1. はじめに

大型レーザーレーダーを用いて得られた大気の大観測データを表示するために様々な方法¹⁾が考えられている。中でも、空間においてレーザーレーダーの走査する断面を2次元平面に対応させ、得ら

-
1. 筑波大学 電子・情報工学系 〒305 茨城県新治郡桜村
University of Tsukuba, Institute of Information Sciences and Electronics, Sakura, Niihari, Ibaraki 305 Japan. 国立公害研究所客員研究員 (昭和55~56年度)
 2. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町
The National Institute for Environmental Studies, Environmental Information Division, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan
 3. 同 総合解析部
The National Institute for Environmental Studies, System Analysis and Planning Division

れた信号の強度を画素の濃淡として表す画像表現は最も一般的なものであろう。

ところで、データを画像に表現する上において考えなければならない様々な問題点がある。一つは、データに含まれている情報をいかに効率よく画像に表現するかということであって、濃度のスケールリングの問題に関連している。一般に、得られた信号を濃淡に表すには、信号の強さをいくつかのレベルに量子化しなければならないが、この量子化の方法が良くないと、信号に含まれている情報が画像に現れない。

いま一つの問題として、画像に含まれる雑音の処理がある。雑音の生じる原因として、ハードウェアに起因するもの、背景光など大気特性により必然的に生じるもの、障害物によるものなどが挙げられる。これらの雑音のうち、ハードウェアによるものは機器の改良により、障害物によるものは、その原因を明らかにすることによって²⁾改善されつつあるが、なお考察を進める必要がある。

これらの問題点に対する一方策として、画像処理の諸方法を適用することが考えられる。本稿では、上に述べた問題に対し、画像の強調および雑音の除去と呼ばれる手法を応用する。より具体的には、ヒストグラムの平坦化等によって、一様な濃度をもつ画像に含まれる情報を明らかにする。一方、平滑化によって、雑音を減少させる。後者の方法によれば、画像はより単純化され、結果的に現れるパターンがより明瞭になる。

これらの手法を大型レーザーレーダーにより得られた画像に適用し、その効果をみる。さらに、平滑化の一手法として、大気汚染のパターン表現のために用いられる内挿法^{3,4)}を利用した手法も考察する。

2. 画像の強調

レーザーレーダーにより得られた信号を画像の濃淡として出力する場合、出力機器にも依存するが、信号の強度を比較的少数の濃淡レベルに分割する必要が生じる。このとき、濃淡を決定する水準の間隔は、通常等しくとられる。しかしながら、時として、このような等間隔の水準が有効でない場合がある。

たとえば、図1のような信号を考えよう。この信号の x 軸及び y 軸を細かく分割する。 x 軸における一つ一つの小区間を画素と考え、そこにおける信号の値を一定とみなし、 y 軸方向のどの区間に属するかを決定して、画素の値と考える。 y 軸上の各々の小区間に属する画素の数を合計することによって、濃度のヒストグラム(図2)が得られる。図1のような信号に対しては、ヒストグラムは、中央部に急な峰をきずく。このようなデータに対して等間幅の水準 a_i , $i=1, 2, \dots, N$ を用いて量子化を行った場合、比較的少数の水準に画素の濃度が集中し、得られる画像は殆んど一様な濃度をもつようになる。すなわち、画像から得られる情報が少ない。

ヒストグラム平坦化^{5,6)}はこのような画像に対して有効な手段である。図2において、水準 i, j に対応するヒストグラムの面積を各々 s_i , s_j とすると、明らかに

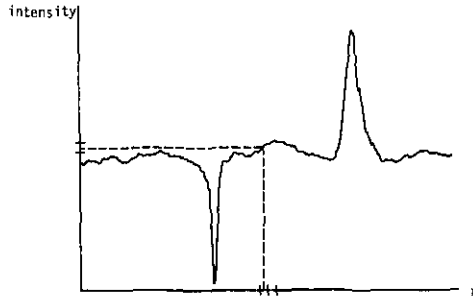


図1 中央部に急な峰をもつヒストグラムを有する信号の例

$$a_{i+1} - a_i = a_{j+1} - a_j,$$

$$s_i < s_j$$

であることに注意しよう。平坦化は水準 $a'_i, i=1, 2, \dots, N$ を一般に等間隔にとらないで、その水準に含まれるヒストグラムの面積がなるだけ等しいように選ぶ方法である。図3では

$$a'_i - a'_{i+1} > a'_j - a'_{j+1}$$

$$s'_i = s'_j$$

これによって得られる画像は、各濃度の画素数が相等しく、コントラストのはっきりしたものとなる。

図4は大型レーザーレーダーにより得られたデータを、ラインプリンターへの重ね打ちにより10レベルに量子化して出力したエアロゾルの水平分布画像の1例である*。観測は1981年11月12日8時に行われた。表示範囲は、国立公害研究所から真西に伸ばした半直線に沿って4~10km、また、この半直線から北に3km、南に2kmであり、仰角は1.9°であった。この図において右上のハイフンにより表されている部分は、レーザーレーダーの観測範囲にはいない、いわば欠損値を表わす。また、下方にななめにみえる白線は障害物により、実際には信号が得られていない部分である。この図では中央部に濃いパターンが表れているが、全体に黒っぽい画像であるような印象がある。

この図にヒストグラム平坦化を行ったのが図5である。図に見るように、中央部のパターンがよりはっきり表れ、かつ右上方に見られる濃い部分が明瞭になっている。全体的に画像のコントラストは強められている。

このようにヒストグラム変換の手法は画像に現れるパターンを明確にする上で有効であるが、一

*注 間隔が一定の場合の量子化水準のとり方は次の通りである。すなわち、画素の最大値と最小値の間を10のレベルに等間隔に分割する。

方、画像にみられる雑音をも強調し、画像を複雑化する傾向がある。そこで、次に平滑化による雑音の除去について考えよう。

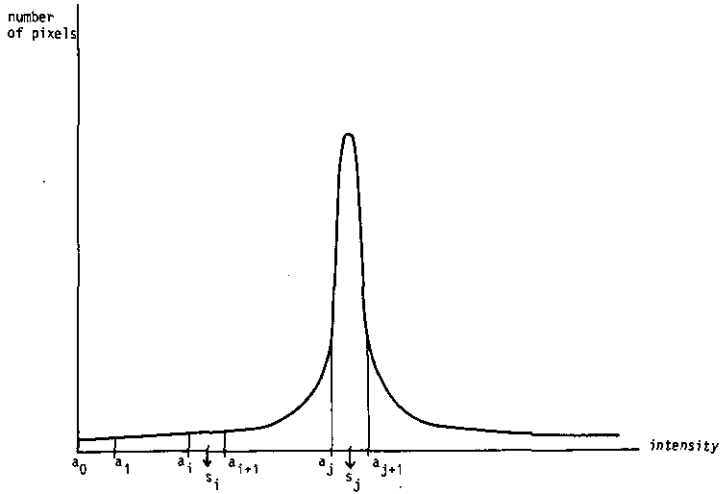


図2 等間隔のレベルによるヒストグラムの量子化

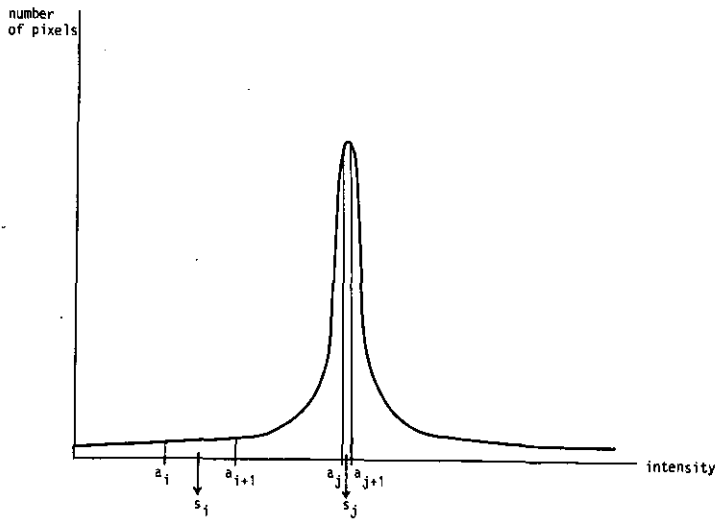


図3 各レベルに含まれる画素数が等しくなるような量子化

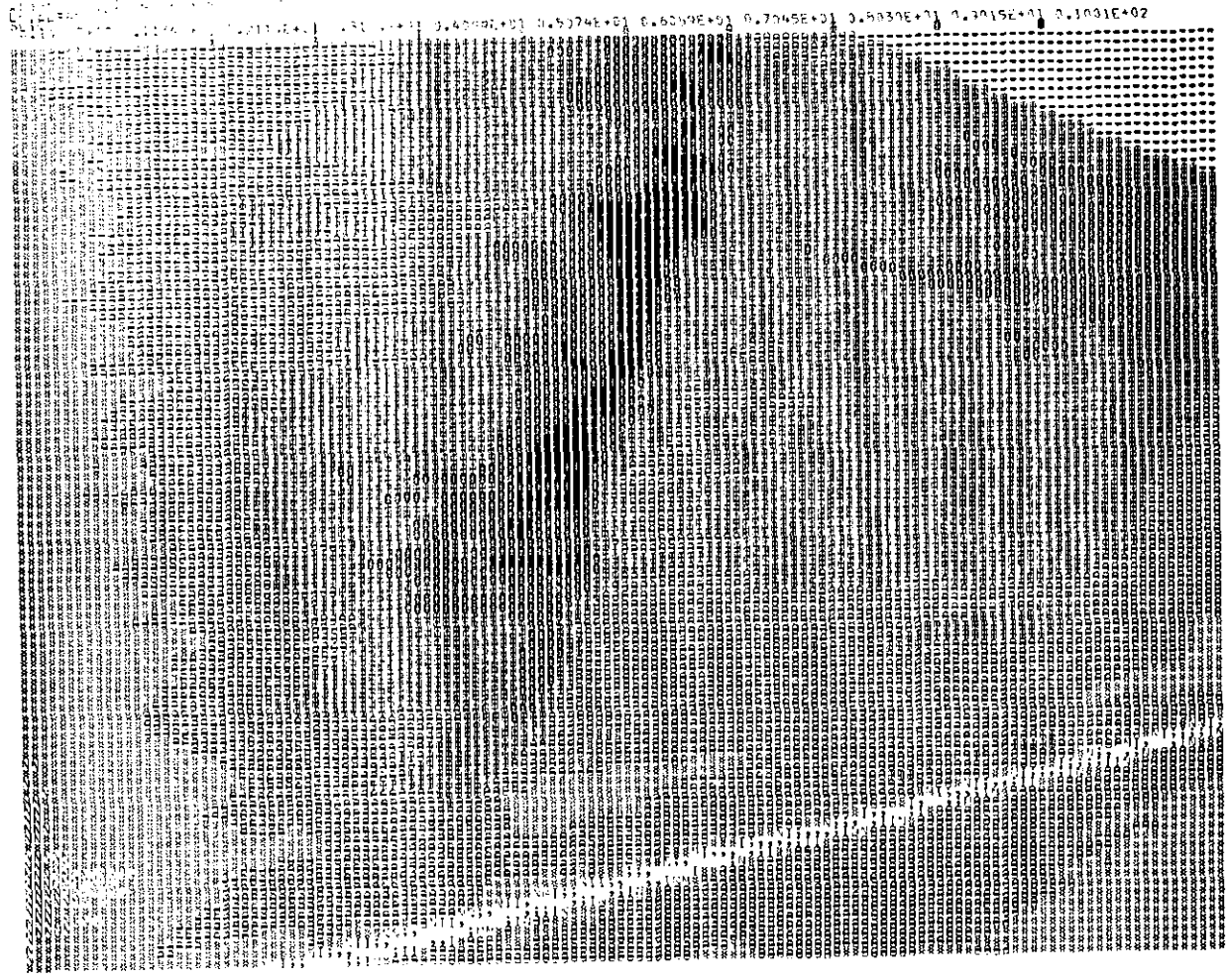


図4 10の量子化レベルをもつ水平分布画像の例

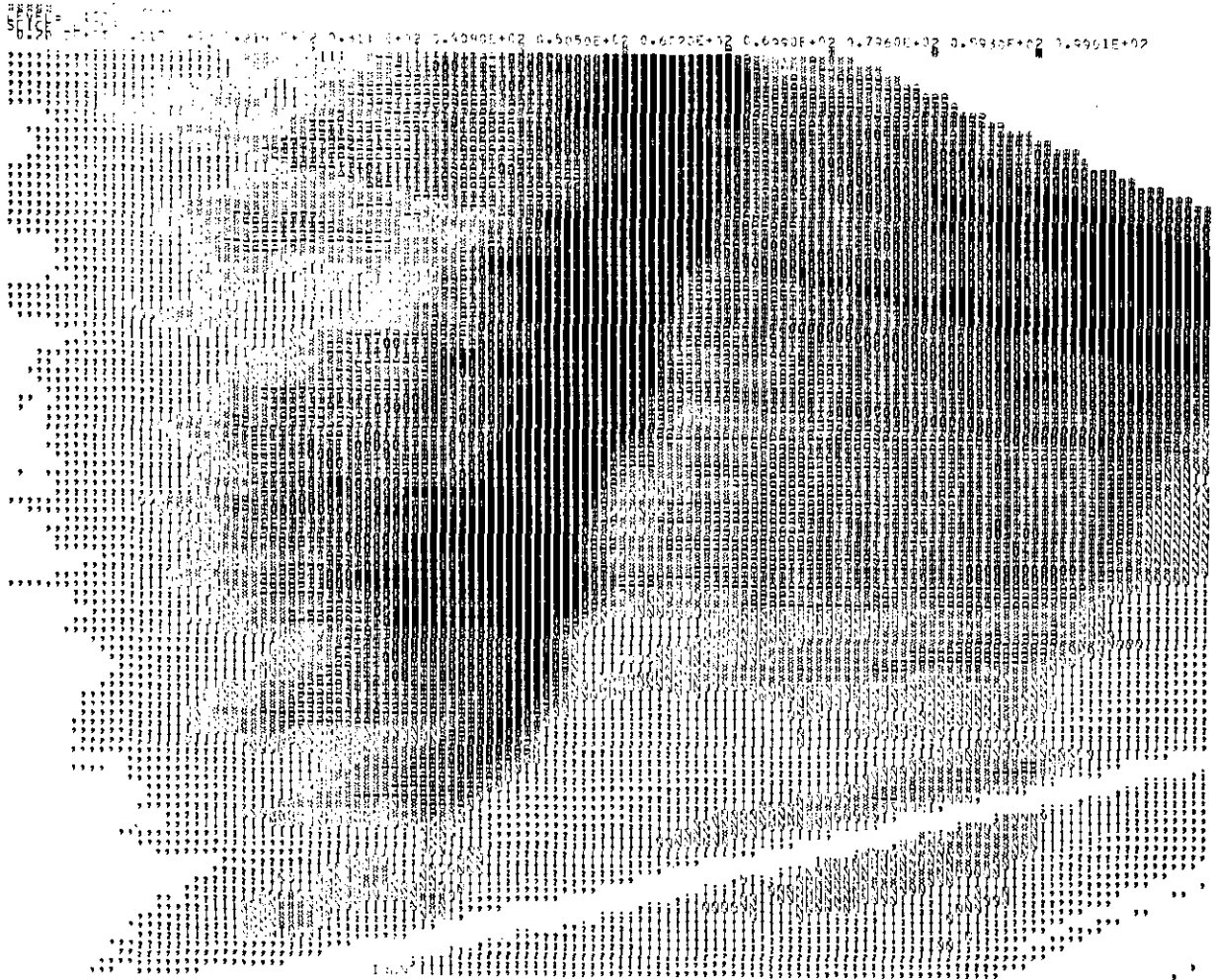


図5 図4にヒストグラム平坦化を行った結果

3. 平滑化による雑音の除去

平滑化の方法は、画面を平均化することで雑音の影響を少なくしようとするものである。代表的な操作として、ある画素の値を、それ自身及び隣接する八つの点の平均でおきかえるものがある。すなわち、変換前の画素を $f(i, j)$ とし、変換後の画素を $g(i, j)$ とするとき、次のようになる。

$$g(i, j) \leftarrow \frac{1}{9} [f(i, j) + f(i-1, j) + f(i+1, j) \\ + f(i, j-1) + f(i, j+1) + f(i-1, j-1) \\ + f(i-1, j+1) + f(i+1, j-1) + f(i+1, j+1)]$$

この操作を、局所的な重み行列

$$D = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

によって表す。この記法を用いれば、たてよこに隣接する4点を用いた平滑化は次のように表される。

$$D = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

これを一般化すると、隣接9点に重み D_{ij} を乗じて平均する重み付き平均化は、次のように表される。

$$g(i, j) \leftarrow \frac{1}{\sum_{\substack{i-1 \leq k \leq i+1 \\ j-1 \leq l \leq j+1}} D_{kl}} [D_{ij} f(i, j) + D_{i-1, j} f(i-1, j) + D_{i+1, j} f(i+1, j) + D_{i, j-1} f(i, j-1) \\ + D_{i, j+1} f(i, j+1) + D_{i-1, j-1} f(i-1, j-1) + D_{i-1, j+1} f(i-1, j+1) \\ + D_{i+1, j-1} f(i+1, j-1) + D_{i+1, j+1} f(i+1, j+1)]$$

重み行列を用いれば

$$D = \frac{1}{\sum_{\substack{i-1 \leq k \leq i+1 \\ j-1 \leq l \leq j+1}} D_{kl}} \begin{bmatrix} D_{i-1, j-1} & D_{i, j-1} & D_{i+1, j-1} \\ D_{i-1, j} & D_{i, j} & D_{i+1, j} \\ D_{i-1, j+1} & D_{i, j+1} & D_{i+1, j+1} \end{bmatrix}$$

平滑化によれば、雑音の影響は少なくなるが、一方、画像にとらえられている対象の輪郭（エッジ）がぼけるという欠点がある。この点を考慮して、エッジや線分などの情報を保存しつつ雑音除去を行う手法が開発されている。

Lev, Zucker, Rosenfeld⁸⁾による雑音画像の逐次平滑化はその一つである。この方法では、重み付き行列の各成分を、エッジや線分に対応するような12の行列の重み付き平均で表し、この平均をとるときの重みを、原画像がエッジや線分に近いかどうかの情報を利用してadaptiveに決定する、いわば局所的な適応平滑化アルゴリズムが用いられている。このアルゴリズムの詳細についてはここでは省略するが、画像近傍Aが次のような値をもつとき平滑化のための重み行列がどのような形になるかを2,3あげて参考とする⁸⁾

(1) Aがエッジの場合：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow D = \frac{1}{24} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 3 & 4 & 3 \\ 4 & 4 & 4 \end{pmatrix}$$

(2) Aが線分の場合：

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow D = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(3) Aが傾斜を表す場合：

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow D = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

この手法を図4の画像に適用して得られた画像を図6に示す。図6は黒っぽく、全体的な印象としては原画像と余り異ならないが、濃い部分が幾分拡大し、輪郭が単純化されている点が認められる。

図7は、大型レーザーレーダーにより1982年2月8日午前11時にとられたエアロゾル水平分布画像で、土浦、霞ヶ浦を含む東方向の20km×20kmの領域をとらえている。この図では、やはり様な濃度の部分が多く、濃い部分がわずかに見られる程度である。

これに上記の平滑化を行くと、図8のようになる。この図では、量子化レベルが変わるとともに濃度の高い部分の面積が広がっている。濃淡はかなり明確になり、右上部の濃度の高い部分は、より強調されてみえる*。

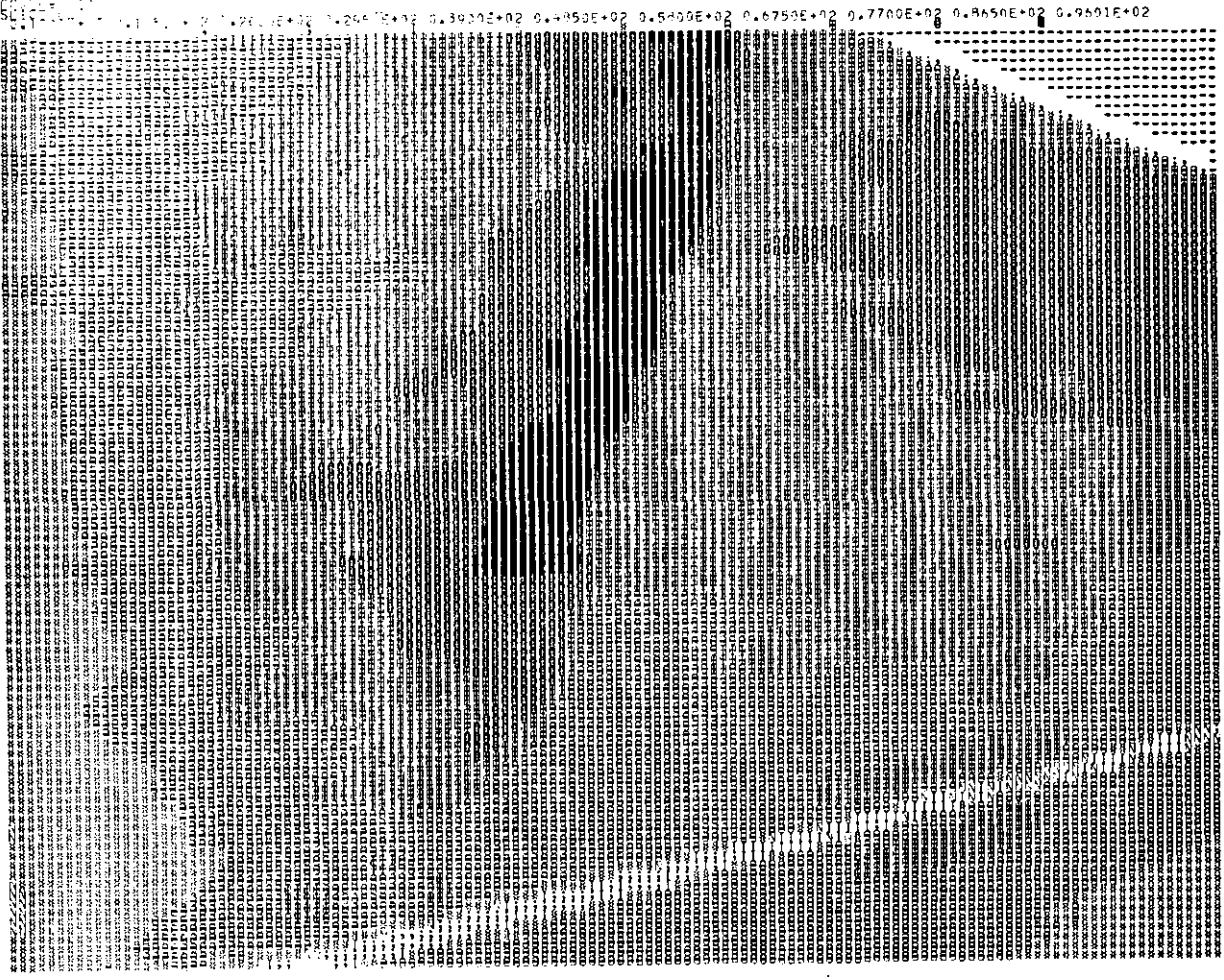


図6 図4に対しエッジ保存反復フィルターによる平滑化を行った結果

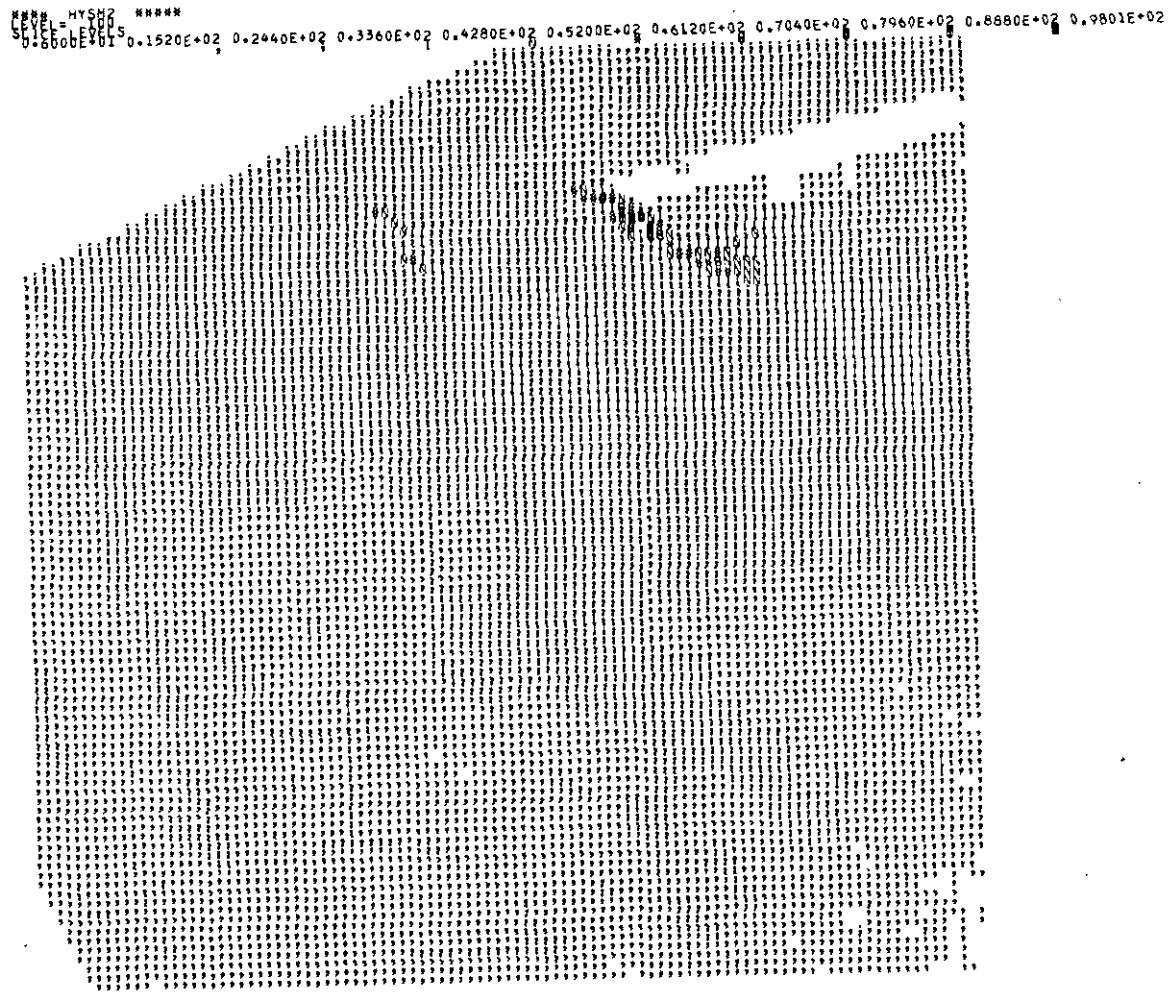


図7 土浦, 霞ヶ浦方面の水平分布画像

**** ITEM1 *****
LEVEL=LEDBS
0.100E+01 0.670E+01 0.124E+02 0.181E+02 0.238E+02 0.295E+02 0.352E+02 0.409E+02 0.466E+02 0.523E+02 0.580E+02

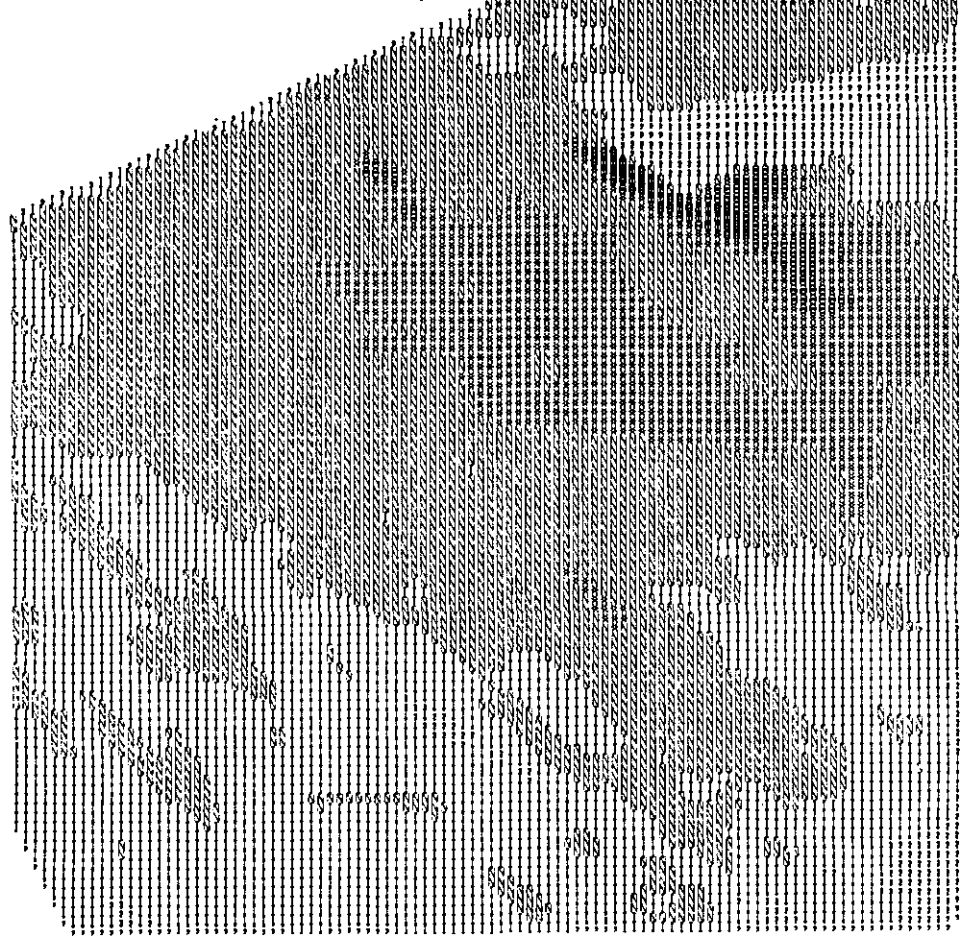


図8 図7に対し、エッジ保存反復フィルターによる平滑化を行った結果

4. 画像の重ね合わせによる強調と雑音除去

平滑化の方法によれば、雑音の影響は少なくなり、画像は単純化されるが、一方、原画像の形状が歪み、もとの情報が保存されない。この点を考慮し、原画像の情報を保存しつつ同時に雑音の除去を行う方法として、平滑化画像を単調変換した画像と原画像との重ね合わせが考えられる。

平滑化された画像のパターンは、原画像より単純化され、かつ雑音が少ない。一方、原画像において、注目すべき部分は、高濃度部分である。これらのことを利用して、平滑化画像を原画像に対するフィルターとして用いることを考える。すなわち、平滑化画像において、ある程度濃度の低い部分は、原画像の情報を通過させず、他の部分については、通過させる。すなわち、平滑化画像の画素の集合を SI とし、濃度の低い部分を M とするとき、 $(i, j) \in M$ なら $g(i, j) = 0$ 、 $(i, j) \in SI - M$ なら $g(i, j) = 1$ となる関数 g を考え、原画像 $f(i, j)$ に対して、 g を重ね合わせて出力 $h(i, j) = g(i, j) f(i, j)$ を得る。この操作を一般化して、次のような単調変換を考えることができる。いま、平滑化された画像のヒストグラムを m 個のレベルに量子化し、それぞれのレベルに属する画素の集合を、濃度の低いほうから M_1, M_2, \dots, M_m とする。実数、 $a_1 < a_2 < \dots < a_m = 1$ をとり、画素 (i, j) の濃度がレベル M_k に属するとき、 $g(i, j) = a_k$ となる重み関数 g をとる。原画像 $f(i, j)$ に対して g を重ね合わせて、出力

$$h(i, j) = g(i, j) f(i, j)$$

を得る。

図9は、図6を単調変換し、図4に重ね合わせて得られた結果である。ここでは、

$$m = 2, a_1 = 0.5, a_2 = 1,$$

$M_2 = \{\text{図6において、面積が全画面の} 1/3 \text{に相当する濃度の高い部分}\}$ 、 $M_1 = \{\text{残りの部分}\}$ と選ぶことによる。得られた図では、パターンは単純化され、濃度の高い部分が強調されている。コントラストの点では、図5に近いような印象を受ける。

5. 平滑化スプラインについて

大気汚染のパターン生成のため、スプライン等の内挿法を用いた例が近年、報告されている^{3), 4)}。スプラインを用いた内挿法には、様々な種類があり、雑音を含むデータの平滑化に適したものが、de Boor⁹⁾により述べられているので簡単に紹介しよう。

いま、未知関数 $g: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ が加法的雑音 ϵ とともに観測されるものとする。すなわち、データ点を x_1, x_2, \dots, x_N とするとき、観測 y_i :

$$y_i = g(x_i) + \epsilon_i$$

*この高濃度の部分は工業地帯の風下に対応し、実際に大気汚染である可能性が大きいとみられる。

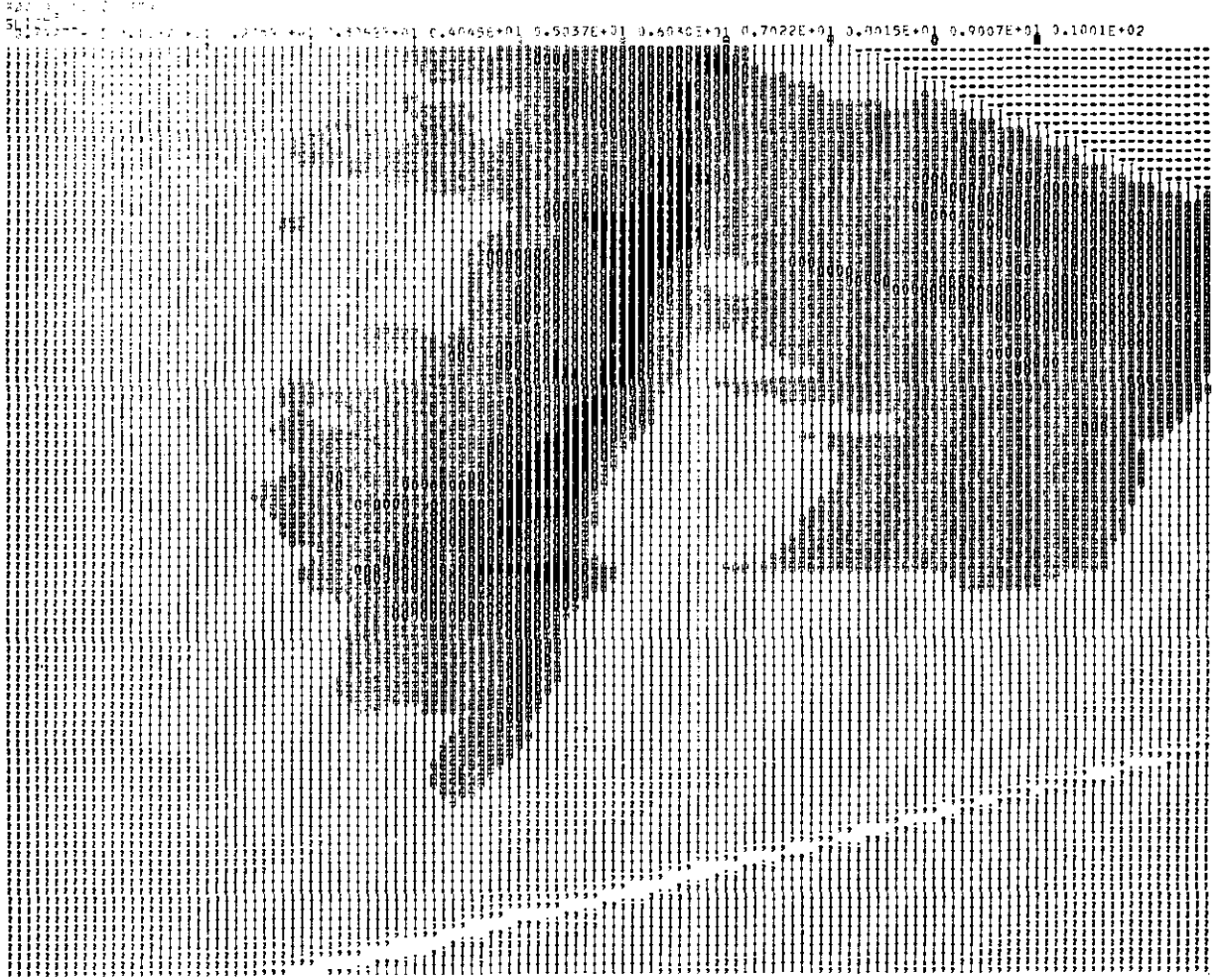


図9 図6の画像に単調変換を施し、図4の原画像に重ね合わせた結果

が与えられていると仮定する。 ϵ_i の分散を $(\delta\epsilon_i)^2$ とし、 y_i から g を推定したいとする。このために、次の評価関数を最小化する関数 f を求めることを考える。

$$J_p(f) = p \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\delta\epsilon_i} \right)^2 + (1-p) \int_{x_1}^{x_N} (f^{(m)}(t))^2 dt \quad (0 < p < 1)$$

ここで、 p は実パラメータ、 $f^{(m)}(t)$ は f の m 階導関数である。最小化は m 回微分可能な関数のクラス D^m 上で行われる。上式第1項は、データへの最小二乗あてはめに対応し、第2項は平滑化の程度を表す。パラメータ p を変化させることで、最小二乗あてはめと平滑化のどちらを重点的に行うかが選択できる。この最適化問題の解 f_p は第 $2m$ 次のスプラインで、節点が x_2, \dots, x_{N-1} , かつ自然境界条件

$$f_p^{(j)}(x_1) = f_p^{(j)}(x_N) = 0, \quad j = m, \dots, 2m-2$$

をもつことが証明されている⁹⁾。

De Boor⁹⁾では、この計算を行う際、問題を上のものと等価な最適化問題に変換して扱っている。すなわち、次の問題を考えている。

$$\text{minimize}_{f \in D^n} \int_{x_1}^{x_N} (f^{(m)}(t))^2 dt$$

subject to

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\delta\epsilon_i} \right)^2 \leq S$$

先の式における p を変える代わりに、 S を変化させることで平滑化の程度を調節することができる。

図10は、階段関数（図の細線で表示）

$$g(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 0.3 \\ 1 & 0.3 < x \leq 0.6 \\ 0 & 0.6 < x \leq 1.0 \end{cases}$$

に正規分布をもつ加法的雑音 ϵ 、($\bar{\epsilon}_i = 0.0$, $\delta\epsilon_i = 0.1$, $x_i = i\Delta x$, $\Delta x = 0.02$, $1 \leq i \leq 50$)を加えたデータを小三角形で表している。平滑化スプラインにより得られた曲線は破線で示されている。パラメータは $S = 100.0$ を用いた。

評価関数 $J_p(f)$ に含まれている雑音 ϵ_i の分散が i とともに変化し得ることから、この平滑化法は、雑音の分散が空間に依存して変化する場合などに有効である。また、パラメータ S を変化させることで、平滑化の度を調節することができる。画像データに適用する場合、画像の縦方向と横方向にそれぞれ平滑化を行い、両者の平均をとる方法、原データの性質に基づき、走査の半径方向に平

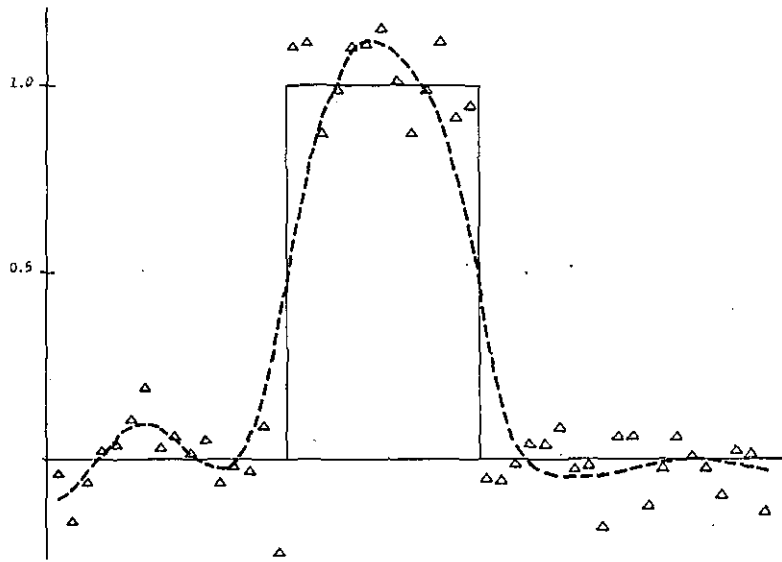


図10 雑音を含むデータに対するスプライン平滑化
 原関数は、細線で示された階段関数
 小三角形は、加法的雑音を加えることにより得られたデータ、破線は平滑化の結果を表す。

平滑化を行う方法などが考えられるが、さらに検討の必要があろう。

6. おわりに

本稿では、主として、標準的な画像処理の手法をレーザーレーダーによるデータに適用してみた、どのような効果が得られるかを調べた。今後の研究方向としては、パターンの特徴抽出等や、画像情報の圧縮、また、大気汚染の解明において重要なパラメータを画像から自動的に評価することなどが考えられる。この際、レーザーレーダーによる画像は、これまで画像処理の対象とされてきたものとは、かなり性質が異なるため、方法論的な検討を更にすすめる必要があろう。

本報告の2節、3節において利用したヒストグラム平坦化および逐次平滑化のプログラムは、電子技術総合研究所において開発された画像処理サブルーチンパッケージSPIDERに収められているサブルーチンHGEQ1と、ITEN1である。また、この画像処理プログラムを国立公害研究所に導入する労をとられた、国立公害研究所環境情報部・安岡善文氏および、計算を行っていただいた千葉工業大学(現ソード電算機システム(株))吉沢照幸氏に謝意を表す。

引用文献

- 1) 清水浩・笹野泰弘・安岡善文・松戸修・竹内延夫・奥田典夫(1980): 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, 国立公害研究所研究報告第16号, 計測車レーザーレーダーによる大気汚

染遠隔計測, 51-67.

- 2) 平尾浩司・北村新三・笹野泰弘・竹内延夫(1982): 統計的手法を用いたレーザーレーダー画像の画質向上法. 第26回システムと制御発表講演会講演論文集, 167-168.
- 3) 篠原正則・内藤正明(1980): スプライン法による大気汚染2次元分布の推定. 環境情報科学, 9, 62-64.
- 4)* 藤原正弘・大井絃・新藤純子(1982): 大気汚染濃度分布パターンのスプライン法による推定法, および大気汚染測定局の最適配置——既存システムの検討. それぞれ環境技術, 11, 643-649および788-794.
- 5) Hall, E.L., R.P.Kruger, S.J.Dwyer, D.L.Hall, R.W.Maclaren and G.S.Lodwich (1971): A survey of preprocessing and feature extraction techniques for radiographic images. *IEEE Trans, Comput.*, C-20, 1032-1044.
- 6) 電子技術総合研究所(1980). 画像処理サブルーチン・パッケージ SPIDER User's Manual,
- 7) Frei, W. (1977): Image enhancement by histogram hyperbolization. *Computer Graphics and Image Processing*, 6, 286-294.
- 8) Lev, A., S.W.Zucker and A.Rosenfeld (1977): Iterative enhancement of noisy images. *IEEE Trans. SMC*, SMC-7, 435-442.
- 9) De Boor, C. (1978): *A practical guide to splines*. Springer-Verlag.

*本報告書報文10は、本文献の内容を一部含んでいる。

II-7

中赤外半導体レーザーを用いた汚染気体の
高感度計測装置の基本特性

新井敏弘^{1,3}・佐藤平道¹・中根英昭²
竹内延夫²

Fundamental Performance of Highly Sensitive Instrument
for Air-Pollutant Measurement by Middle-Infrared
Semiconductor Diode Laser

Toshihiro ARAI^{1,3}, Toshimichi SATO¹, Hideaki NAKANE²
and Nobuo TAKEUCHI²

要 旨

長光路吸収法を用いた汚染気体の高感度検出法における2波長差分測定、周波数変調1次導関数法、2次導関数法を比較し、2次導関数法が最も高感度検出に適していることを明らかにした。

野外で使用できる高感度検出装置の製作を目的として、基礎実験用の装置を設計・製作し、その基本特性を測定した。装置の特長は、参照セルを周波数の安定化のためばかりでなく、レーザー出力強度の変動の補正にも用い、レーザーの多波長発振の影響を取り除けるようにしたところにある。レーザーの周波数同調率や変調条件、周波数安定化について特性を調べ、最適条件設定に必要なデータを得た。

Abstract

In long-path absorption methods, three detection techniques — two-wavelength differential absorption, frequency-modulated first-derivative and frequency-modulated second-derivative (FMSD) detections — were compared, and the FMSD was found to be the most suitable.

A prototype instrument for outdoor, highly sensitive measurement was designed and constructed, and its fundamental performance abilities were measured. The system had

-
1. 筑波大学物理工学系 〒305 茨城県新治郡桜村天王台
Institute of Applied Physics, University of Tsukuba, Sakuramura, Niiharigun, Ibaraki 305
 2. 国立公害研究所 大気環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町
The National Institute for Environmental Studies, Atmospheric Environment Division, Tsukuba, Ibaraki 305
 3. 国立公害研究所 客員研究員 (昭和55-56年度)
Visiting Fellow of The Institute for Environmental Studies (1980-1981)

the following features: (1) the ability of frequency stabilization based on frequency-locking on a sample gas transition line in a reference cell, (2) the correction of laser power variation and (3) elimination of influence of multi-wavelength oscillation.

The tuning rate of the laser frequency, the determination of optimum modulation conditions, and frequency stability were measured, and the results showed good agreement with the theoretical estimation.

1. はじめに

二酸化窒素、二酸化硫黄、オキシダントなど重要な大気汚染物質の環境基準濃度は、数10 ppb程度である。このような低濃度を正確に測定するには、1 ppb程度の濃度測定可能な、高感度測定法が必要である。また、汚染気体の空間分布や空間的に平均された濃度を測定することができれば、大気汚染現象を理解する上で有効である。さらに、小型で安価な装置であれば、野外調査や多くの測定点の設置という目的に適している。

大気汚染気体の測定装置には、測定手法で分類すると、大きく分けて、ポイントサンプリング方式、レーザーレーダー方式、その中間に位置づけられる長光路吸収方式がある。これらの方式は、上にあげた多様な要求に照らすと、それぞれ一長一短がある。ポイントサンプリング方式は小型で安価、かつ信頼性が高いという長所があるが、地上の一点しか測定できないので、空間的な代表性に問題がある。レーザーレーダー方式（差分吸収レーザーレーダー方式）は、広い空間を距離分解能を持って測定できるが、高い感度を得るには装置も大がかりで複雑なものにならざるを得ない。長光路方式では、大気汚染気体濃度の空間的平均値が得られ、しかも、比較的小型の装置で高感度の測定が可能である。従って、大気汚染現象を総合的に解明するためには上の3方法を相補的に用いることが重要である。

本報文で取り上げる長光路吸収方式は、汚染気体の吸収線に同調したレーザー光の減衰量から、その濃度が求められること——ランベルト・ベールの法則——を基本原理としている。そして、その装置は、レーザーを用いた光源部分、レーザー光を導き折り返すための光学系部分、レーザー光の減衰量を測定する検出系部分から構成されている。

大気汚染気体の一部（NO₂、SO₂、O₃、ケトンなど）は、可視または近紫外領域に電子遷移に基づく吸収を持っている。しかし、CO、NO、炭化水素は、可視・近紫外領域に吸収を持たないので、赤外領域における振動遷移による吸収を利用して検出する必要がある。検出器の性能を比較すると、可視・近紫外領域で用いられる光電子増倍管は雑音等価入力において優れている。次に、光源となる代表的な波長可変レーザーについて比較する。可視・近紫外領域で発振する波長可変レーザーである色素レーザーは大型で複雑な構成になっている。それに対して、赤外領域の代表的な波長可変レーザーである鉛化合物半導体レーザーは、出力は小さいが、小型で構成が比較的単純である。また、電流を変えることによって容易に波長を変えることができる上に、連続波動作（CW動作）

が容易に得られる。このため、波長変調（周波数変調）を用いた導関数法による計測に適している。このことは、第2章で述べるように、長光路吸収法における検出感度の向上を図る際、非常に重要な要素である。

鉛化合物半導体レーザーを光源とする汚染気体の測定は、HinkleyらがPbSnTe半導体レーザーを用いて自動車排気ガスを吸引してCO、NO、C₂H₄、H₂Oの濃度を測定したことに始まる¹⁾。野外での長光路吸収測定の例としてはCO、NO、C₂H₄、SO₂などの例がある^{2,3,4)}。最近Reidらは、多重光路セル中に測定気体を吸引する方法で測定精度の向上をはかり、SO₂、N₂Oで1ppb⁵⁾、NH₃で0.1ppb⁶⁾、O₃で0.5ppb⁶⁾、NO₂で100ppt⁷⁾の感度を得ている。

筆者らは、鉛化合物半導体レーザーを用いた周波数変調法の有効性を考慮し、これを長光路吸収方式と組み合わせた大気汚染気体野外計測システムの開発を計画した。

半導体レーザーを用いた長光路吸収方式で技術的に問題になる点として、

- 1) レーザーの発振波長の安定化と分子の吸収極大への同調、
- 2) 透過光に比べ微少な吸収の検出
- 3) レーザー出力の変動および、大気状態の変動
- 4) 測定気体以外の物質によるレーザー光の吸収の影響

が挙げられる。これらの問題を解決するための手段として、1)に対しては、分子の吸収線を用いたレーザーの発振波長のロック⁸⁾、2)、4)に対しては、二次導関数法¹⁾、3)に対しては、透過率とその二次導関数の比をとること¹⁾が行われている。しかし、この方法や、単にレーザー出力で規格化する方法では、レーザーが多波長発振している場合、正しい規格化を行うことができない。問題点4)に関しては、レーザーの発振波長の安定化を行わず、波長掃引し、汚染気体のスペクトルを得ることによって濃度を測定する方法⁹⁾も試みられている。筆者らは、検出方法の比較検討を行い、測定気体による微少な吸収量に比例した量を高感度で安定して測るために、レーザー発振波長を分子の吸収極大にロックし、2次導関数法によって検出する方式を採用した。レーザーパワーの変動の補正に関しては、レーザーが多モード発振している場合にも正しく信号の規格化を行える方法を提案した。それは、周波数の安定化に用いる参照セル内の気体による吸収の2次導関数信号によって規格化する方法である。この方法は、また、波長のわずかな変動を補正する可能性を持っている。

以上の検討結果に基づいて装置を構成し、COを例にとって基礎特性の測定を行った。本文では、測定方法についての理論的検討と、装置の構成、測定結果について述べる。

2. 理論的検討

本章では、まず、長光路吸収法の原理について簡単に述べる。次にレーザー光に対して微小な吸収量を検出する方法として、二波長差分吸収法と変調法を比較検討する。変調法については、その理論的基礎について検討した後、とくに一次導関数法と二次導関数法を取り上げ、感度（最小検出濃度）について議論する。各手法の比較にあたっては、理論的な最小検出濃度のみではなく、測定

上の誤差，レーザー発振周波数の変動を考慮している。最後に，レーザーが多モード発振（多波長発振）している場合にその影響を除去する方法を提案する。

2.1 長光路吸収法の原理

長光路吸収法の原理を図1に示す。光源（レーザー）から出た光は反射鏡によって折り返され，長さ l の光路を通して検出器に達する。そして，光路中の気体による光の吸収量から平均濃度が求められる。

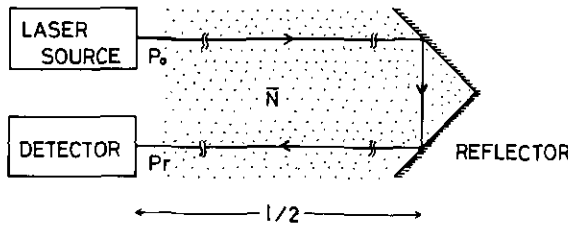


図1 長光路吸収の原理図

周波数 ν における受信々号 $P_r(\nu)$ は，

$$P_r(\nu) = K(\nu) \cdot P_0(\nu) \cdot T_a(\nu) \cdot T(\nu) \quad (1a)$$

と表される¹⁾。ここで， $P_0(\nu)$ は送信光強度， $K(\nu)$ はシステム全体の効率， $T(\nu)$ は測定気体の平均透過率， $T_a(\nu)$ は測定気体以外の物質による光の吸収，散乱のための減衰を表す。 $T(\nu)$ は，光路長 l ，減衰係数 $a(\nu)$ を用いて，

$$T(\nu) = \exp[-a(\nu)l] \quad (1)$$

と表される。ここで，光路中の測定気体の平均濃度 \bar{N} を，光源からの距離 r における測定気体の濃度 $N(r)$ を用いて，

$$\bar{N} = \frac{1}{l} \int_0^l N(r) dr \quad (2)$$

と定義すると，式(1)は，

$$T(\nu) = \exp[-\bar{N}\sigma(\nu)l] \quad (3)$$

と表される。ここで， $\sigma(\nu)$ は測定気体の吸収面積である。測定気体の吸収によらない光の吸収・散乱による減衰係数を $K(\nu, r)$ とすると， $T_a(\nu)$ は，

$$T_a(\nu) = \exp[-\int_0^l K(\nu, r) dr] \quad (4)$$

と表される。式(1)を、測定気体に関係のある部分と関係のない部分に整理すると、

$$P_r(\nu) = A(\nu) \exp[-\bar{N}\sigma(\nu)l] \quad (5)$$

となる。ここで、

$$A(\nu) = K(\nu) P_0(\nu) T_a(\nu) \quad (6)$$

である。

長光路吸収法では、測定気体の平均濃度 \bar{N} に関する情報は透過率 $\exp[-\bar{N}\sigma(\nu)l]$ に含まれる。低濃度の測定気体に対しては、

$$\exp[-\bar{N}\sigma(\nu)l] \approx 1 - \bar{N}\sigma(\nu)l \quad (7)$$

となり、 \bar{N} を含む項は1に対して極めて小さな量となる。そこで、測定精度を高めるためには、 $\bar{N}\sigma(\nu)l$ に直接比例する量を検出するような手法を採用する必要がある。

長光路吸収法において提案されている手法——2波長差分吸収法、周波数変調法——の特徴について次節以下で検討する。

2.2 2波長差分吸収法

2波長差分吸収法は、測定気体の共鳴吸収波長(周波数 ν_1)とその近くで非共鳴の波長(周波数 ν_2)の2波長を用いて \bar{N} を求める方法である。

ν_2 は非共鳴周波数であるので、吸収断面積の差 σ_d は、

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \sigma(\nu_1) - \sigma(\nu_2) \\ &\approx \sigma(\nu_1) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ここで、式(5)を用いて透過率 $T(\nu_1)$ 、 $T(\nu_2)$ の比を求めると次式によって \bar{N} が求められる。

$$\begin{aligned} \bar{N} &= (1/\sigma_d l) \ln[A(\nu_1)P_r(\nu_2)/A(\nu_2)P_r(\nu_1)] \\ &= (1/\sigma_d l) \ln[T(\nu_2)/T(\nu_1)] \end{aligned} \quad (9)$$

低濃度では、 $T(\nu_2)/T(\nu_1) \approx 1$ であるので、

$$\delta T = T(\nu_2) - T(\nu_1) \quad (10)$$

とおくと、

$$\bar{N} \approx (1/\sigma_d l) (\delta T / T(\nu_1)) \quad (11)$$

のように、 \bar{N} が δT を用いて表される。

ここで、2波長差分吸収法の検出限界（最小検出濃度 \bar{N}_{\min} ）について検討する。中赤外領域（COの吸収波長は4.4~5.0 μm ）における主な雑音は検出器雑音である。検出器の等価雑音信号をNEP（ $\text{WHz}^{-1/2}$ ）、検出器の周波数帯域を $B(\text{Hz})$ とすると、信号雑音比（S/N）は、

$$S/N = A\delta T / (NEP \cdot \sqrt{2B}) \quad (12)$$

である¹⁾。ここで帯域幅が2倍されているのは、2波長を使用しているためである。

許容される最小のS/Nを $(S/N)_{\min}$ とすると、最小検出濃度 \bar{N}_{\min} は、式(5)、(11)、(12)より、

$$\bar{N}_{\min} = \frac{1}{\sigma_{dl}} \cdot (S/N)_{\min} \cdot \frac{NEP \cdot \sqrt{2B}}{A(\nu_1)} \quad (13)$$

で与えられる。

以上の議論では、透過率 $T(\nu_1)$ 、 $T(\nu_2)$ は誤差を含まないと仮定していた。 $T(\nu_1)$ 、 $T(\nu_2)$ は受信々号 $P_r(\nu_1)$ 、 $P_r(\nu_2)$ を $A(\nu_1)$ 、 $A(\nu_2)$ —— $A(\nu) = K(\nu) \cdot T_d(\nu) \cdot P_o(\nu)$ ——で割って求められる。光源（レーザー）出力 $P_o(\nu_0)$ 、 $P_o(\nu_2)$ の測定を十分な精度（誤差が $A(\nu_1) \cdot \delta T$ に対して無視できる精度）で測定するのは困難であるので $T(\nu_1)$ 、 $T(\nu_2)$ は誤差を含んでいる。 $T(\nu_1)$ 、 $T(\nu_2)$ の誤差 ϵ_1 、 ϵ_2 には相関がないと考えられるので \bar{N}_{\min} は、

$$\bar{N}_{\min} = \frac{1}{\sigma_{dl}} \cdot (S/N)_{\min} \cdot \left(\frac{NEP^2 \cdot 2B}{A(\nu_1)^2} + \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

である。従って、実際の最小検出濃度は、検出器感度、光源の出力等で決まる雑音と、測定気体の透過率を求める際に生ずる誤差の大きな方で決定される。

2.3 周波数変調法

周波数変調法（波長変調法）は、周波数 ν を

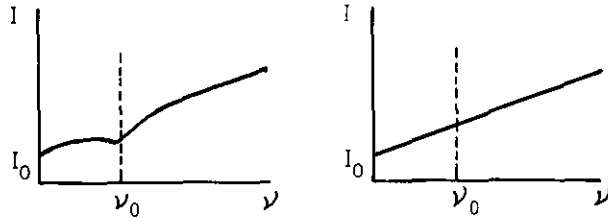
$$\nu = \bar{\nu} + a \sin \omega t \quad (15)$$

のように変調して、信号を検出する方法である。ここで、 $\bar{\nu}$ は変調中心周波数、 a は変調振幅、 ω は変調角周波数である。この方法の長所は、第1に、ベースラインの波長依存性を自動的に補正すること、第2に、 $\bar{N}\sigma_l$ に比例する量を直接測定することにある。

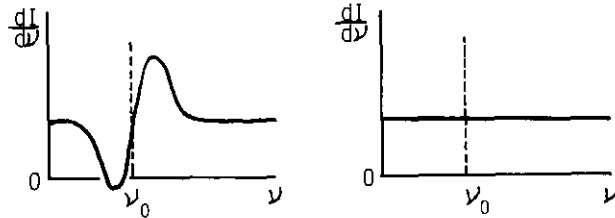
ベースラインの波長依存性は $A(\nu)$ の波長依存性から生ずる。周波数変調法は周波数導関数法とも呼ばれ、後に示すように、信号の ω 成分、 2ω 成分は近似的にはそれぞれ信号の1次及び2次導関数にあたる。従って、図2に示すように、 $A(\nu)$ が直線的な周波数依存性を持つ場合、1次導関数信号では一定値に、2次導関数信号では0になる。

この方法によって $\bar{N}\sigma_l$ に比例する量を直接求められることは、周波数変調法ではスペクトルの波長導関数を測定することから定性的に理解することができる。しかし、正確な理解や、感度の検討のためには定量的な取り扱いが必要である。

LOCK-IN DETECTION



FIRST DERIVATIVE



SECOND DERIVATIVE

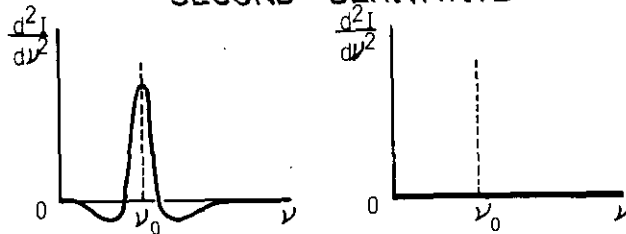


図2 周波数変調法による信号分の変化

吸収スペクトルの形は気体の圧力によって異なる。それは低圧(≦数 Torr)ではドップラー拡がりによって決まる線幅をもったガウス型になり、高圧(≧数10 Torr)では衝突幅を持ったローレンツ型になる。以下、ガウス型の場合について議論を進めるが、ローレンツ型の場合も結論はほとんど変わらない。

ドップラー拡がりによって線形が決まる場合、吸収係数 $\alpha(\nu)$ は、

$$\alpha(\nu) = \bar{N}\sigma \exp(-\ln 2(\nu - \nu_0)^2/\gamma_D^2) \quad (16)$$

で表される。但し、 σ は吸収極大における吸収断面積、 ν_0 は吸収線の中心周波数、 γ_D はドップラー拡がりの半値半幅である。ここで、

$$\left. \begin{aligned} x &= (\nu - \nu_0)/\gamma_D \\ \bar{x} &= (\bar{\nu} - \nu_0)/\gamma_D \\ z &= a/\gamma_D \end{aligned} \right\} (17)$$

$$\bar{a}(v) = a(v) / \bar{N}\sigma \quad]$$

とおくと、式 (15) は、

$$x = \bar{x} + z \sin \omega t \quad (18)$$

式 (16) は

$$\bar{a}(x) = \exp(-x^2 \ln 2) \quad (19)$$

と表される。周波数変調法の場合、測定器(ロックインアンプ)によって得られるものは、受信々号の sine 成分、cos 成分である。これを求めるために、受信々号 $P_r(x)$ をフーリエ級数に展開すると次のようになる。

$$\begin{aligned} P_r(x) &= A\tilde{T}(x) \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} [P_{2m}(x) \cos(2m\omega t) + P_{2m+1}(x) \sin\{(2m+1)\omega t\}] \\ &= A[T_0(\bar{x})/2 + \sum_{m=1}^{\infty} T_{2m}(\bar{x}) \cos(2m\omega t) \\ &\quad + \sum_{m=0}^{\infty} T_{2m+1}(\bar{x}) \sin\{(2m+1)\omega t\}] \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 A は $A(v)$ (一定と仮定) に等しく、また $\tilde{T}(x)$ は $T(v)$ に等しい。フーリエ成分 $T_n(\bar{x})$ は、

$$T_n(\bar{x}) = (-1)^{\{n/2\}} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{z^{n+2r}}{2^{n+2r-1}} \frac{1}{r!(n+r)!} \cdot \tilde{T}^{(n+2r)}(x) \quad (21)$$

によって吸収線型の導関数 $T^{(n)}(\bar{x})$ と関係づけられる。ただし、 $[n/2]$ の $[]$ はガウスの記号であり、

$$T^{(n)}(\bar{x}) = [d^n T(x)/dx^n]_{x=\bar{x}} \quad (22)$$

$$\tilde{T}(x) = \exp[-\bar{N}\sigma \cdot l\bar{a}(x)] \quad (23)$$

である。

実際の測定では信号の ω 成分 $AT_1(\bar{x})$ 、 2ω 成分 $AT_2(\bar{x})$ を求めるのであるが、 $T_1(\bar{x})$ 、 $T_2(\bar{x})$ は、

$$T_1(\bar{x}) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{z^{2r+1}}{2^r} \cdot \frac{1}{r!(r+1)!} \cdot T^{(2r+1)}(\bar{x}) \quad (24)$$

$$T_2(\bar{x}) = (-1) \cdot \sum_{r=0}^{\infty} \frac{z^{2r+2}}{2^{2r+1}} \cdot \frac{1}{r!(r+2)!} \cdot T^{(2r+2)}(\bar{x}) \quad (25)$$

である。 $z \ll 1$ の場合すなわち、変調振幅 a が吸収線幅 γ_D に比べて小さい場合、 $T_1(\bar{x})$ 、 $T_2(\bar{x})$ は、

$$T_1(\bar{x}) \simeq z \cdot T^{(1)}(\bar{x}) \quad (26)$$

$$T_2(\bar{x}) \simeq \frac{z^2}{4} T^{(2)}(\bar{x}) \quad (27)$$

となり、透過率の1次導関数、2次導関数に比例する。このことから、

$$P_1(\bar{x}) = AT_1(\bar{x}) \quad (28)$$

$$P_2(\bar{x}) = AT_2(\bar{x}) \quad (29)$$

は慣用的に、1次導関数出力、2次導関数出力と呼ばれている。

低濃度気体で $\bar{N}\sigma l \ll 1$ が成立するとき、式(23)は、

$$\tilde{T}(x) = 1 - \bar{N}\sigma l \bar{a}(x) \quad (30)$$

となる。この場合、1次および2次導関数出力は、式(24)、(25)より、

$$P_1(\bar{x}) = A(-\bar{N}\sigma l) \sum_{r=0}^{\infty} \frac{z^{2r+1}}{2^{2r}} \cdot \frac{1}{r!(r+1)!} \bar{a}^{(2r+1)}(\bar{x}) \quad (31)$$

$$P_2(\bar{x}) = A(-\bar{N}\sigma l) \sum_{r=0}^{\infty} \frac{z^{2r+2}}{2^{2r+1}} \cdot \frac{1}{r!(r+2)!} \bar{a}^{(2r+2)}(\bar{x}) \quad (32)$$

となる。このことは、1次、2次導関数出力を検出する測定法は $\bar{N}\sigma l$ に比例する量を直接検出する方法であることを意味する。 $z \ll 1$ の場合には、式(31)、(32)の第1項だけをとって、

$$P_2(\bar{x}) \simeq A \cdot \bar{N}\sigma l \cdot (z^2/4)(2\ln 2)(2\bar{x} \ln 2 - 1) \exp(-\bar{x}^2 \ln 2) \quad (34)$$

$$P_1(\bar{x}) \simeq A \cdot \bar{N}\sigma l \cdot z \cdot (2\bar{x} \ln 2) \exp(-\bar{x}^2 \ln 2) \quad (33)$$

となる。従って、 $P_1(\bar{x})$ または $P_2(\bar{x})$ の測定によって \bar{N} を求めることができる。

変調量 a が γ_D と比較して十分小さいと見なせない場合 ($z \ll 1$ でない場合) には上の議論は適用できない。この場合、フーリエ成分 $\tilde{T}_n(x)$ は、

$$\tilde{T}_n(\bar{x}) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \tilde{T}(x) \begin{cases} \sin(ny) \\ \cos(ny) \end{cases} dy \quad (35)$$

によって直接求める必要がある。

$\bar{N}\sigma l = 0.017 \ll 1$ (0.01 Torr のCO を $l = 10$ cm で測定する場合を想定) に対し、式(35)を用いて、 $|T_1(\bar{x})|$ 、 $|T_2(\bar{x})|$ を数値計算すると、 $|T_1(\bar{x})|$ は $\bar{x} = 1.35$ 、 $z = 1.6$ で最大値、

$$|T_1(\bar{x})| = 0.570 \bar{N}\sigma l \quad (36)$$

をとり (図3参照)、 $|T_2(\bar{x})|$ は $\bar{x} = 0$ 、 $z = 2.1$ で最大値、

$$|T_2(\bar{x})| = 0.435 \bar{N}\sigma l \quad (37)$$

をとる (図4参照)。最大のS/Nが得られるのは $z < 1$ の場合であるので、実際の測定に使用する条件における検討は、式 (35) または式 (36), (37) を用いて行う必要がある。

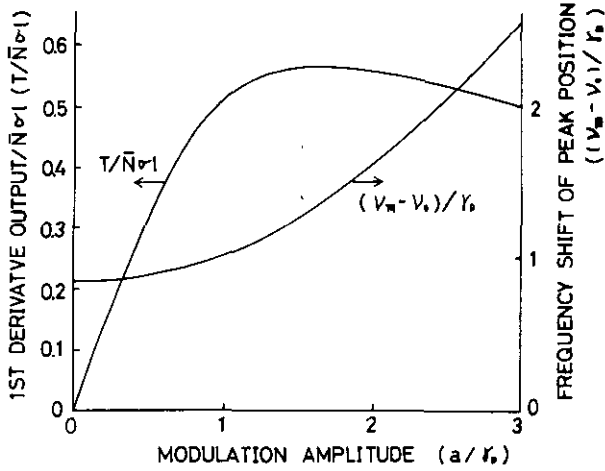


図3 周波数変調法における1次導関数ピーク出力とピークをとる周波数の変調量依存性

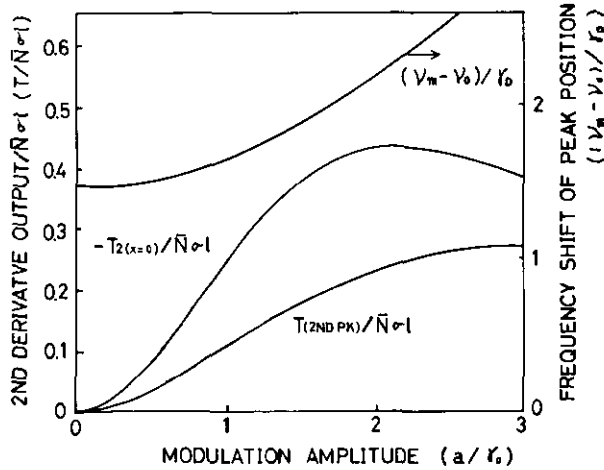


図4 周波数変調法における2次導関数出力の第1及び第2ピーク出力と第2ピークを示す周波数の変調量依存性

許容される最小のS/Nを $(S/N)_{\min}$ とすると、1次導関数法の場合は、

$$\bar{N}_{\min} = (NEP)\sqrt{B}(S/N)_{\min} / (0.570\sigma lA) \quad (38)$$

2次導関数法の場合は、

$$\bar{N}_{\min} = (NEP)\sqrt{B}(S/N)_{\min}/(0.435\sigma lA) \quad (39)$$

が最小検出濃度になる。

2.4 検出感度の比較

この節では光源、出力、システム効率、検出器で決まる感度、透過率を得る際に生ずる誤差、波長変動の影響を考慮し、2波長差分吸収法、1次導関数法、2次導関数法の感度を比較する。

前節までの結果をまとめると、最小検出濃度 \bar{N}_{\min} は、

(2波長差分吸収法)

$$\bar{N}_{\min} = N_m \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}{2\epsilon_d^2}\right)^{1/2} \quad (40)$$

(1次導関数法)

$$\bar{N}_{\min} = N_m \cdot \frac{1}{0.570} \cdot (1 + \epsilon^2)^{1/2} \quad (41)$$

(2次導関数法)

$$\bar{N}_{\min} = N_m \cdot \frac{1}{0.435} \cdot (1 + \epsilon^2)^{1/2} \quad (42)$$

となる。ただし、

$$N_m = (NEP)(S/N)_{\min} \sqrt{B}/(\sigma lA(\nu))$$

$$\epsilon_d = \frac{NEP \cdot \sqrt{B}}{A(\nu)}$$

ϵ : レーザー出力による規格化の際に生ずる誤差である。

実際の例を用いて、各方法の N_{\min} を比較する。 $NEP=1 \times 10^{-11}$ W/Hz^{1/2}, $B=1$ Hz, $(S/N)_{\min}=10$, $K(\nu)=1$, $P_0(\nu)=100 \mu$ W, $T_a(\nu)=1$, $l=10$ cm, $\sigma=5.23 \times 10^{-18}$ cm² (COのR(21)の吸収線)の場合、 $N_m=1.9 \times 10^{10}$ cm⁻³ となる。式(41), (42)中の ϵ は1に比較して無視できる。従って、1次導関数法の $\bar{N}_{\min}=3.3 \times 10^{10}$ cm⁻³ (1.3ppb), 2次導関数法の $\bar{N}_{\min}=4.4 \times 10^{10}$ cm⁻³ (1.8ppb)となる。2波長差分吸収法の場合は、括弧中の第2項が問題となる。この例では $\epsilon_d=10^{-7}$ であるが、 ϵ_1 , ϵ_2 は光源出力を0.1%の精度で測定したとしても 10^{-4} である。したがって括弧中の第2項は1に比べ、はるかに大きな値になる。この場合、 $\bar{N}_{\min}=2.7 \times 10^{13}$ cm⁻³ (1.1ppm) となり、導関数法の場合より、検出感度が3桁悪くなる。

次に、1次導関数信号と2次導関数信号に対する周波数変動の影響を比較検討する。周波数が \bar{x} から $\bar{x} + \Delta x$ に変わった時、吸収係数の i 次導関数 $\bar{a}^{(i)}(\bar{x})$ の変化分を $\Delta \bar{a}^{(i)}$ とする。1次導関数信

号の場合、最大値をとる周波数では、

$$[\Delta \bar{a}^{(1)}/\bar{a}^{(1)}]_{x=1.35} = -1.13 \Delta x \quad (43)$$

2次導関数の場合、最大値をとる周波数では、

$$[\Delta \bar{a}^{(2)}/\bar{a}^{(2)}]_{x=0} = -2.08 (\Delta x)^2 \quad (44)$$

である。周波数の変動による誤差を5%以内に抑えるには、1次導関数法では、 Δx を $\gamma_D/23$ 以下に抑える必要があるが、2次導関数法では、 $\gamma_D/6.5$ 以下に抑えれば十分である。また、2次導関数法は1次導関数法に比べ、より安定に周波数をロックすることができる。従って、上の議論以上に、2次導関数法の方が周波数変動に対して安定な方法である。

以上の結論をまとめると、2波長差分吸収法は光源出力変動を補正する際に大きな誤差が生じる点で不利であり、1次導関数法は、周波数変動による誤差が大きい点で問題がある。従って、この3方式の中では、2次導関数法が最も感度の良い測定法と結論することができる。

2.5 多波長発振の影響の除去

透過率 $A(\nu)$ は、受信々号 $P_r(\nu)$ を $A(\nu)$ で割って得られる。システム効率を1とし、測定気体以外の物質によるレーザー光の吸収・散乱の影響を無視すれば、 $A(\nu)$ はレーザー出力 $P_0(\nu)$ に一致する。従って、 $T(\nu)$ は受信々号 $P_r(\nu)$ をレーザー出力 $P_0(\nu)$ で割って求められる。

上の議論は、レーザーが単一波長（周波数）で発振している場合には正しいが、レーザーが多波長発振している場合には妥当でない。例として、レーザーが2周波数で発振しており、一方は測定気体の吸収線中心に共鳴しており、他方は吸収線から離れている場合を考える。共鳴周波数を ν_{on} 、非共鳴周波数を ν_{off} とする。全レーザーパワー P_T は、

$$P_T = P_0(\nu_{on}) + P_0(\nu_{off}) \quad (45)$$

である。ところが、透過率の2次導関数信号 $T_2(\nu)$ は、 $T(\nu)$

$$T(\nu) \simeq \frac{P_r(\nu)}{P_0(\nu_{on})} \quad (46)$$

と式(35)から、

$$T_2(\nu) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \bar{T}(x) \cos(2y) dy \quad (47)$$

によって求められる。ここで x は、

$$x = (\nu - \nu_{on})/\gamma_D \quad (48)$$

である。式(45)によって $T(\nu_{on})$ を求める際に、 $P_0(\nu_{on})$ ではなく、全レーザー出力 P_T を用いる

と、 $T_2(\nu)$ が実際の値よりも小さくなってしまふ。

ν_{on} の成分だけを取り出す手法としては、フィルターを通す方法が最も一般的であるが、この場合は、使用する ν_{on} の数のフィルターを用意しなければならない。そこで、すべての ν_{on} で使用が可能で、しかも簡便な方法を提案する。それは、送信光の一部を分けて、濃度既知の測定気体の入った参照セルに通し、これから得られた2次導関数信号 $P_{2,ref}$ によって規格化する方法である。最大信号強度の得られる変調量では、 $P_{2,ref}$ は、

$$P_{2,ref} = kA(\nu_{on}) \cdot N_{ref} \cdot l_{ref} \times 0.435 \quad (49)$$

である。ここで、 k はビームスプリッターの分配率であり、 N_{ref} は参照セル内の気体の濃度、 l_{ref} は参照セルの長さである。測定対象の気体による吸収から得られた2次導関数信号を $P_2(\nu_{on})$ とすると

$$P_2(\nu_{on}) = (1-k)A(\nu_{on}) \cdot \bar{N} \cdot l \times 0.435 \quad (50)$$

が成立するので、 \bar{N} は、

$$\bar{N} = \frac{P_2(\nu_{on}) \cdot k \cdot l_{ref} \cdot N_{ref}}{P_{2,ref} \cdot (1-k) \cdot l} \quad (51)$$

によって求められる。この式からわかることは、周波数の変動による $P_2(\nu_{on})$ 、 $P_{2,ref}$ の相対的な変動が等しいことを考慮すると、波長変動の影響が打ち消されることである。従って、ここで提案した方法は、単に ν_{on} を簡便に選択するのみならず、光源の周波数の変動をも補正する方法である。

3. 装置の製作

中赤外領域の鉛化合物半導体レーザーを光源とした長光路吸収法測定装置を、CO気体を測定対象として設計製作した。

CO気体は大気中に約1ppm存在し、自動車排ガスが主たる発生源である。道路端で測定することを目的とし、その第一段階として長光路吸収法の基礎動作特性を実験室段階で測定するためにこの研究が行われた。

3.1 装置設計の方針

装置は次の方針に基づいて設計された：

- 1) 移動、動作の容易さを考慮して、半導体レーザーの冷却にはリサイクル型の冷却器を用いた。
- 2) 長光路吸収法の検出法としては、周波数変調2次導関数法を採用する。
- 3) 周波数の変動を防ぐために、参照セルに測定気体を封入し、その吸収線に周波数を固定する。
- 4) レーザー光源の出力変動を補正し、周波数が吸収線と一致しないモードのレーザー光の影響を排除するために、参照セルを通過した信号分の2次導関数成分で受光信号(2次導関数成分)を規格化する。

以上の方針で設計された装置は図5の構成をしている。なお、この装置は必要な機能を満たすように、設計された後、各部分毎に製作または部品を購入し、全体をアSEMBルされた。以下、

- A. 光源部
- B. 光学系・試料部
- C. 検出・信号処理部

に大別して、システムの概要を紹介する。

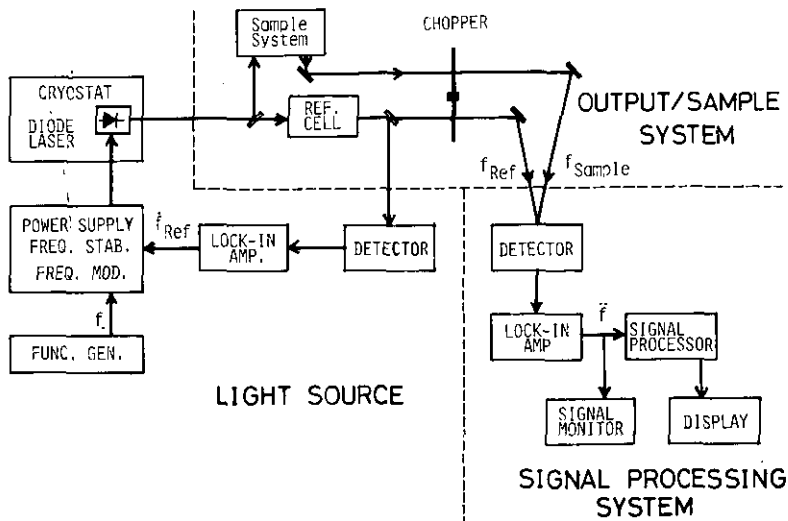


図5 装置構成図

3.2 光源部

CO 気体は $4.4 \sim 5.0 \mu\text{m}$ に振動遷移の共鳴吸収を持つので、組成比 x によって $4.1 \sim 8.4 \mu\text{m}$ で同調可能⁹⁾な $\text{Pb Si}_{1-x} \text{Se}_x$ 半導体素子を選択した。素子は富士通製の $\text{Pb}_{0.82} \text{Se}_{0.18}$ 半導体レーザーを用いた。それは、図6のようなホモ接合構造をしており $20 \sim 40 \text{K}$ に冷却して使用される。発振波

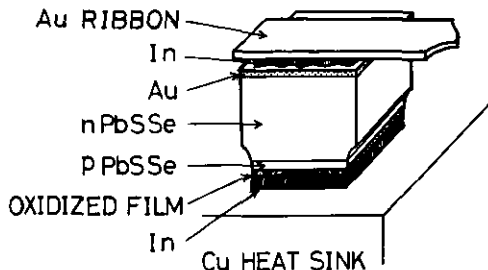


図6 半導体レーザー素子の構造

長範囲は4.5~4.7 μm , レーザー出力は最大200 μW である。冷却装置としてはクローズループの冷却器 CRYOCOOLER 21SC (CTI-CRYOGENICS社製) に、防震型のクライオスタット (製作は大阪酸素工業) を取り付け使用した (図7)。防震構造をとっており、到達温度は20Kであった。温度の制御には温度コントローラー CTS-R (分光電子製) を使用した。これは、クライオスタットのレーザー素子マウントに埋めこまれた Si 温度センサーと設定温度を比較して20~100Kの範囲で温度を制御できる性能を持っている。温度の安定度は最適調整時に 2×10^{-3} K である。レーザー電源としては、半導体レーザー波長制御用に設計された ELS 15SX (エコー電子製) を用いた。本電源は電流掃引、関数発生器からの変調波重畳、電流を固定して変調信号の検波出力を一定とするフィードバック機能 (発振波長を分子の吸収線等にロックできる) を有する。

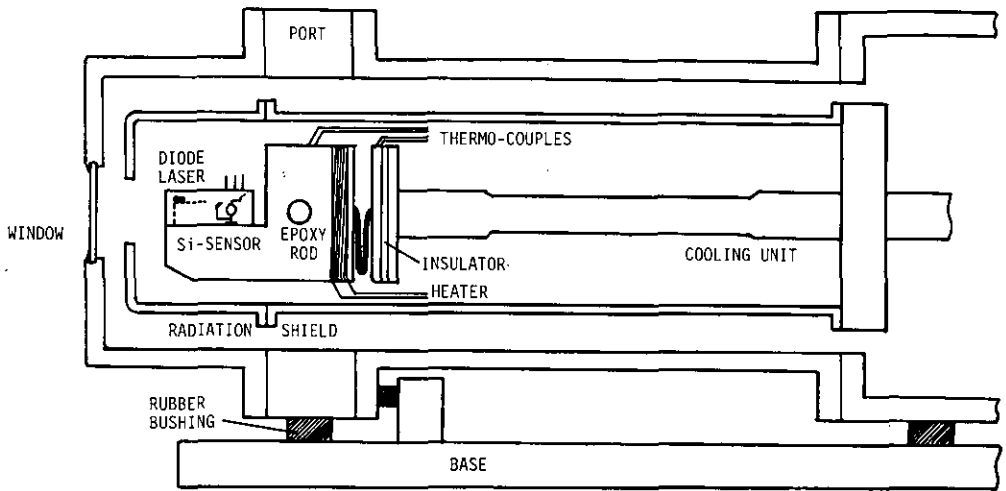


図7 レーザー素子のマウント(クライオスタット)の構成図

周波数安定化は、CO 気体を封入した参照セルを通過した変調信号の1次導関数を取り、その信号をレーザー電源 ELS15SX にフィードバックする方法によって行った。この周波数安定化回路は HgCdTe 検出器 (77K), プリアンプ, ロックインアンプ (NF 回路ブロック LI-575) によって構成されている。

3.3 光学系・試料部

半導体レーザーから発振したレーザー光は図8に示した光学系によって、平行光にされ、試料セル (または野外光路) へ行く光と CO 気体を封入した参照セルを通過する部分に分けられる。それぞれのセルを通過したレーザー光は HgCdTe 光伝導型半導体検出器 (Det. 1, Det. 2) によって受光され電気信号に変えられる。Det. 1によって受信された信号から、ロックインアンプ (NF 回路ブロック, LI-571) によって2次導関数信号を検出する。チョッパーによって試料セルの信号と参

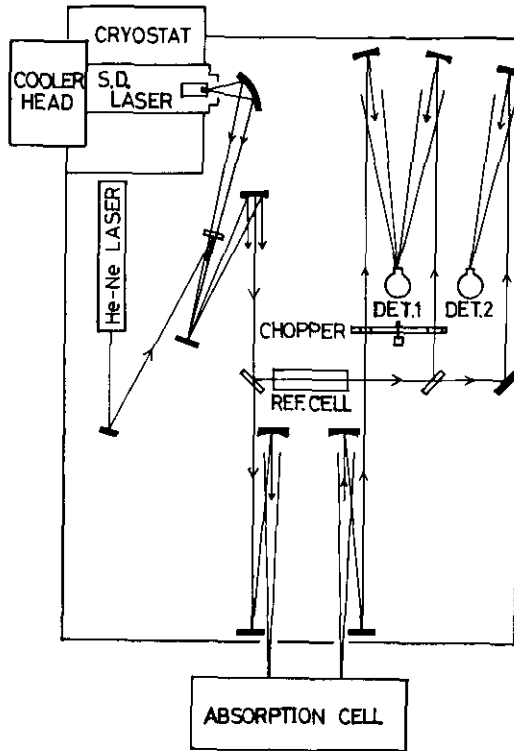


図8 光学系及び試料部配置図

照セルの信号が交互に切りかえられ、その比をとることによって、前節式(51)の $P_{r,2}(\nu_{0n})/P_{2,ref}$ が求められる機構となっている。Det. 2の信号から参照セルの1次導関数信号を取り出し、周波数安定化のフィードバック回路へ供給する。試料セルへの光路は平行光として受け渡すようになっており、多重光路試料セルにも、野外の光路にも容易に適用できる構造となっている。

3.4 検出・信号処理部

Det. 1によって受光された光による信号からは、ロックインアンプで2次導関数信号が検出され、設定された時定数によって平均化される。この出力信号はレコーダーでモニターされると同時にA/Dコンバーターに導入され、マイコンで処理される。測定信号と参照セル信号はチョッパーの周波数に同期して、マイコン内で切替えて演算処理される。

全体の装置諸元を表1にまとめた。

表1 装置仕様の概要

レーザー	鉛化合物半導体レーザー (富士通製)
レーザー媒質 波長 出力エネルギー n-PbSSe のキャリア濃度 構造	Pb _{0.82} Se _{0.18} 4.5~4.7 μm 0 ~ 150 μW ~5×10 ¹⁸ cm ⁻³ ホモ接合構造
冷却器	CRYOCOOLER 21SC (CTI-CRYOGENICS社製)
熱媒体 冷却システム 到達温度	Heガス (class A) 循環型密閉式システム 15K以下 (単体のみ) 19.5K以下 (電極接続時)
温度コントローラー	CTS-R (分光電子研究所社製)
温度センサー 動作範囲 安定度	Si温度センサー 20K~100K 最大 2/1000K
半導体レーザー用電源	ELS 15SX (エコー電子製)
出力電流 電流安定度 リップル 掃引速度 (自己掃引) 外部掃引入力 外部変調入力 外部制御入力	0~1.5A (極性切替可) 1×10 ⁻⁴ /AC±10% 10 μV _{rms} 0.01mA/s~10mA/s 正弦波, 三角波, 鋸歯状波, 入力 0~+1V, 60~1kHz 0~1V _{p-p} (600Ω), 100Hz~10kHz ±10V _{max} , GAIN 0~20 dB, 応答速度 1ms
Function Generator	458A型 (菊水電子工業製)
発振周波数 発振出力 発振波形	0.01Hz~100kHz 0~30V _{p-p} (600Ω) 正弦波, 三角波, 方形波, スロープ可変波
検出器	Det.1; MC2-1000-B-MY1, Det.2; HC 105CH-JTS3 (富士通製)
検知素子材料 素子寸法 視野角 窓材 動作温度	HgCdTe 1.0mm×1.0mm, 0.5mm×0.5mm 60° , 50° 無反射コーティング・Ge 77K
前置増幅器	EPA-1000 (エコー電子製)
バンド幅 L.P.F. H.P.F. 入力インピーダンス 入力換算雑音	DC~1MHz (-3dB) 10kHz, 100kHz, 1MHz DC, 10Hz, 100Hz 100Ω 15 μV _{rms}

表 1 (つづき)

増幅度 直線性 バイアス電流	20, 30, 40dB 10V _{p-p} 0~50mA
Lock-in-Amp.	LI-574 (NF 回路設計ブロック製)
バンド幅 感度 直流最大入力電圧 入力インピーダンス L.P.F. H.P.F. 減衰傾度 ダイナミックリザーブ 時定数 等価雑音帯域幅 雑音除去比 参照入力電圧 参照入力周波数 応答時間	1Hz~100kHz (-3dB) 100nV~5mV (OUT PUT EXP×1) ±100VDC 100MΩ±11%, 20 pF 以下 FLAT, 10kHz, 1kHz, 100Hz, EXT FLAT, 10Hz, 100Hz, 1kHz, EXT 12dB/oct 74dB (sens.100nV~500μV, ×1) 49dB (sens.1mV~5mV, ×1) 10ms.~100s. 最小 (τ=100s.) 0.005Hz 最大 53dB (1kHz 帯域幅白色雑音で規定) 100mV _{p-p} ~200V _{p-p} 1Hz~50kHz (10s.+60サイクル) 以下
Lock-in-Amp.	LI-575 (LF 回路設計ブロック製)
バンド幅 感度 最大入力電圧 入力インピーダンス ダイナミックリザーブ 時定数 減衰傾度 等価雑音帯域幅 参照入力電圧 参照入力周波数 高調波除去率	0.5Hz~200kHz 10μV~500mV/F.S (OUTPUT, BPFQ×1) DC±200V, AC±15V 100MΩ // 40pF 以下 最大 100dB 1.25ms.~125s. 6dB/oct, 12dB/oct 最小 0.002Hz, (A出力, τ×1/4, 12dB/oct) 0.3V~30V _{p-p} 0.5Hz~200kHz 55dB 以上

4. 実験結果と検討

本章では、製作した測定装置に関してその性能の試験結果を示し、その結果の検討を行う。

4.1 光源の特性

半導体レーザーの基本特性である出力特性と同調特性を測定した。

Si センサーで測定した素子動作温度をパラメーターとして、レーザー出力の注入電流依存性を求め、図 9 に示した。レーザー出力は図 5 の Det.1 によって測定した。レーザー素子はホモ接合構造であ

るので、屈折率の相違による光学的閉じこめやフェルミ・エネルギーの相違による電子閉じこめが十分でなく、発振モード構造が複雑で、図9のような挙動を示す。動作温度が上昇すると出力が減少すると同時に出力曲線も平坦となる。これは後に述べるように、レーザーのゲインが下がって単一モード発振に近づくからであろう。

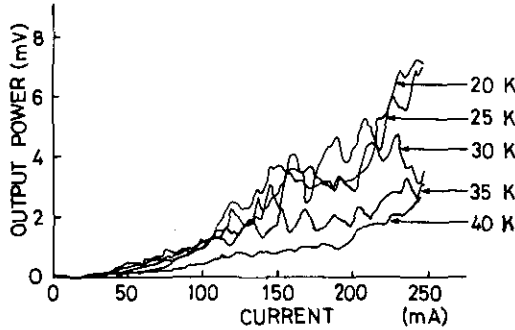


図9 各動作温度における半導体レーザーの出力特性 (Det. 1 で検出)

次に各温度における同調特性のうち、20K、40Kのものを図10、図11に示す。データは、図5の sample system の位置に分光器をおいて測定した。20Kでは、多数のモードで発振すると同時に同調特性のデータの傾き ($\Delta\lambda/\Delta i$) も複雑な形をする。一方、40Kでは単一モードで発振しており曲線の形も単純となる。

同一モード内の電流同調率は i (電流) ≥ 100 mA のとき、20Kで $\Delta\nu/\Delta i: 35 \text{ cm}^{-1}/\text{A}$, $\Delta\lambda/\Delta i: 0.075 \mu\text{m}/\text{A}$ 40Kで $\Delta\nu/\Delta i: 90.6 \text{ cm}^{-1}/\text{A}$, $\Delta\lambda/\Delta i: 0.185 \mu\text{m}/\text{A}$ である。また20Kと40Kでの CW 動作の

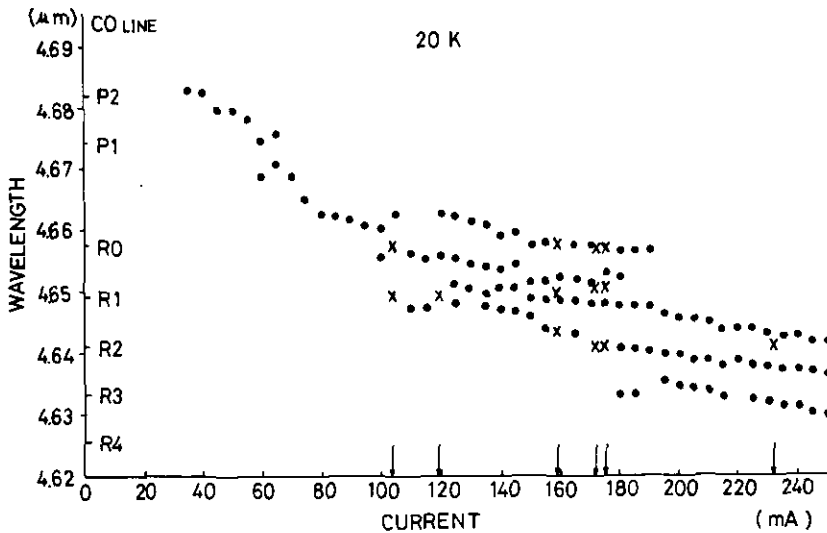


図10 20Kにおける $\text{PbS}_{0.82}\text{Se}_{0.18}$ 半導体レーザーの同調特性

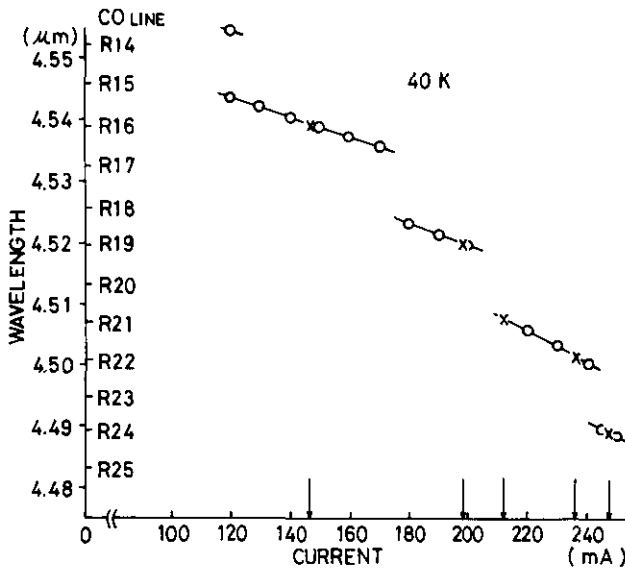


図11 40 Kにおける Pb S_{0.82} Se_{0.18} 半導体レーザーの同調特性

発振周波数の変化は約 57cm^{-1} (7.1meV)、波長にして $0.12\mu\text{m}$ ($4.64\mu\text{m}\rightarrow 4.52\mu\text{m}$)である。温度による変化 $2.85\text{cm}^{-1}/\text{K}$ は、エネルギーギャップの変化に対応する。これは図11で各発振波長を滑らかに結んだ直線に相当する。この直線の傾きは単一モード内の同調率の約2.6倍に相当するので、単一モードの温度同調率は、40 Kでは $1.1\text{cm}^{-1}/\text{K}$ に相当する。これは報告されている値(約 $1\text{cm}^{-1}/\text{K}$)と一致する。

4.2 導関数出力波形

CO 気体の $v''=0\rightarrow v'=1$, $R(0)$ の遷移 ($\tilde{\nu}=2147.084\text{cm}^{-1}$) について、半導体レーザーを電流掃引して得られた直接検波波形、一次導関数波形、二次導関数波形を図12に示す。直接検波波形の場合は励起光をチョッパーでチョップしてロックイン増幅器を使用した。周波数変調の場合では変調電流と1 mA、変調周波数を1 kHzとして測定した。半導体レーザーの動作温度を20 Kに設定し、試料として1 TorrのCOを10 cmのセルに封入して使用した。COのR(0)におけるドップラー幅(全幅)は150 MHzであるのでこの図から、電流同調率を求めると $960\text{MHz}/\text{mA}$ ($=32\text{cm}^{-1}/\text{A}$)となる。これは前小節で求めた $35\text{cm}^{-1}/\text{A}$ とほぼ等しい。図12からわかるように高次導関数波形になるにしたがい、両裾の傾きが平坦となる。出力波形の変動は主として発振波長のふらつきによる。

4.3 一次導関数出力の変調振幅依存性

一次導関数波形の出力を周波数変調の変調周波数振幅をかえて測定した結果を図13に示す。変調周波数は1 kHzである。この最大値、最大値をとるときの周波数、吸収曲線の中心の周波数の差を

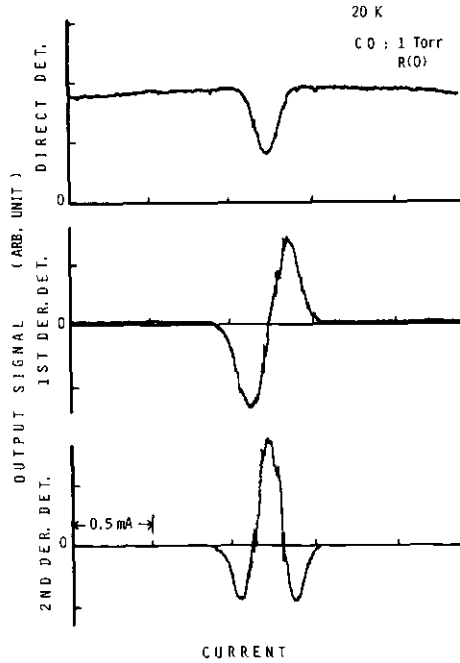


図12 直接検波出力と周波数変調1次微分, 2次微分出力の波形の比較 (20K, COの $v''=0 \rightarrow v'=1$, R(0)吸収線に同調)

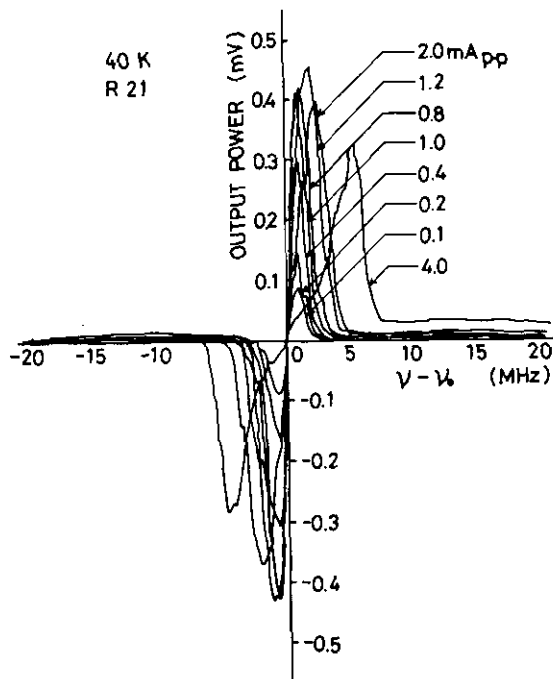


図13 変調電流をパラメーターとしたときの周波数変調1次微分出力波形 (40K, COの $v''=0 \rightarrow v'=1$, R(21)吸収線に同調)

変調振幅に対してプロットすると図3と同様の波形が得られる。

4.4 2次導関数出力の変調振幅依存性

半導体レーザーを変調周波数 1 kHz, 40 K で動作させ, CO 分子の $v''=0 \rightarrow v'=1$, R(21) の遷移 ($\bar{\nu}=2218.747\text{cm}^{-1}$) について 2 次導関数出力の変調電流依存性を調べた。最大出力は吸収線のライン中央 ($\nu=\nu_0$) で得られる。最大出力を電流変調量に対してプロットした結果を図14に⊙印で示した。圧力 $P=1$ Torr の場合に図4 ($P=0.01$ Torr; $\bar{N}ol$ が異なるので a/γ_D に対するピーク位置がわずかにずれる) と同じ計算を行い, 測定値と合うように調節した結果が図14の実線である。縦軸は, 入力 1 に対する導関数出力を Nol で規格化したものを目盛っている (2, 3 節参照)。横軸には対応する変調振幅 (ドップラー幅 γ_D で規格化) を上側に記した。R(21) の遷移では $\gamma_D=155$ MHz であるので, 1 kHz の変調に対し, 電流変調率は 310MHz/mA ($10.3\text{cm}^{-1}/\text{A}$) となり, DC 的にゆっくりと変化させた場合に比べ, 約 1/3 である。この相違はレーザー素子の熱容量の影響によるものと思われる。レーザー素子温度が 20 K の場合も, R(0) の遷移を用いて測定が行われ, ほぼ同じ特性が得られている。

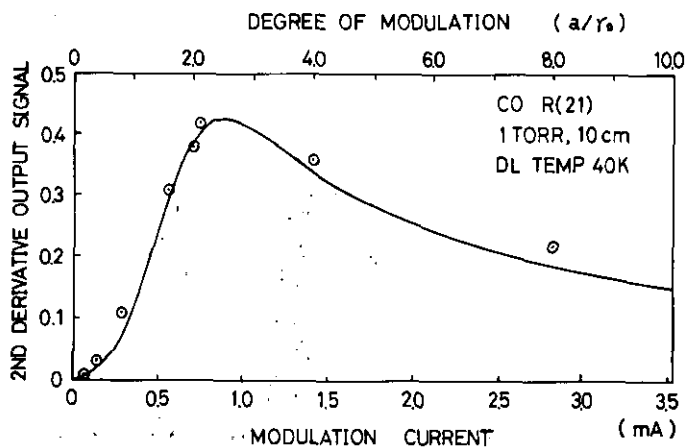
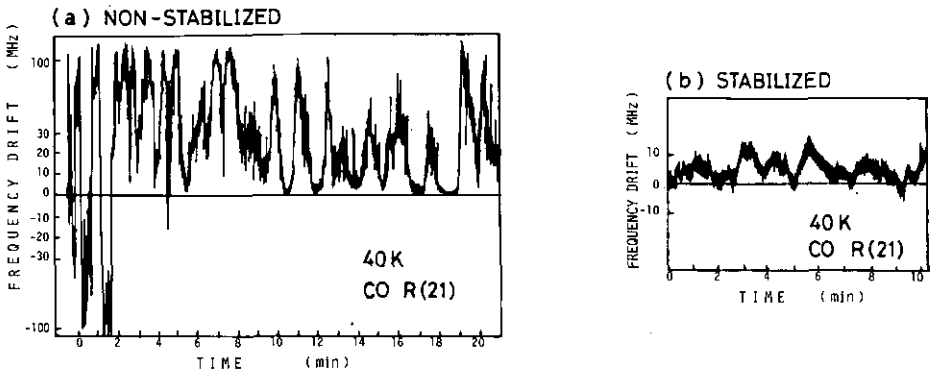


図14 周波数変調 2 次微分のピーク出力と変調電流との関係 (10 cm の吸収セルに CO 1 Torr を導入し, $v''=0 \rightarrow v'=1$, R(21) の吸収線に同調, レーザー動作温度は 40 K) 図中の実線は最適フィットの計算値。その変調量を上側横軸に示した。

4.5 周波数安定化装置の特性

ビームスプリッターによって分けられたレーザー光のうち, 参照セルを通過して Det. 2 で電気信号に変換された成分の 1 次微分出力をロックインアンプで取出す (図 5)。この 1 次導関数信号を周波数安定化電源にフィードバックし, S 字型の 1 次微分波形 (図 12) の中央 (吸収線中心) の値をとるように比較基準値を設定した。この実験では比例制御 (P), 積分制御 (I), 微分制御 (D), とその

組合せであるP-I, P-I-Dのうち最も簡単なPを使用した。40Kで動作させた半導体レーザーの周波数変動（一次導関数信号強度の時間変化）を図15に示した。動作電流は約210mAで、COのR(21)に合わせてあり、変調電流は0.8mA、変調周波数は1kHz、ロックインアンプの時定数は1秒であった。フィードバックをかけなかったときの発振周波数の変動を図15(a)に、フィードバックをかけたときの挙動を図15(b)に示した。図15(a)では発振周波数が吸収線のラインセンターを中心に約2分間変動した後、プラス側（高周波側）へS字状の1次導関数曲線を超えてはずれていく様子が現れている。COのR(21)のドップラー幅は155MHz（半値全幅）であり、変調電流0.8mA ($a/\gamma_D = 1.6$)では周波数偏倚 $(\nu - \nu_0)/\gamma_D$ が ± 1.35 のとき極大極小を示すので、変動出力の最大幅は210MHzに対応する。フィードバックをかけた場合には変動は20MHz (± 10 MHz)の範囲内に入る（S字状の中央部では周波数偏倚に敏感であることの補正をとりいれてある）。発振周波数は2189 cm^{-1} であるので、周波数の相対変動は $\pm 1.5 \times 10^{-7}$ よりも小さい。これは、ドップラー拡がり 10^{-6} の大きさであるので、安定度（標準偏差を使用するので $\pm 1.5 \times 10^{-7}$ よりよくなる）としては十分である。



(a) フィードバックループをかけない(フリーランニングの)とき。

(b) フィードバックをかけたとき。

図15 発振周波数の安定性

4.6 2次導関数出力と濃度の関係

長さ10cmのセルにCOガスを導入し、2次導関数出力を圧力（濃度）をかえて測定した結果を図16に示す。電流変調は周波数1kHz、電流変調量0.8mAで行った。測定した線は、R(0)（半導体レーザー動作温度20K）、R(16)（40K）、R(21)（40K）の3本である。この3本の線の吸収周波数、吸収強度などを表2に示す^{10),11)}。本測定では、参照セル信号で規格していないので、図16では、最大出力が1となるように規格化した。図での実線は表2の値を用いて、式(31)、(32)を用いた計算値である。これから、高濃度を測定するには吸収係数の小さい吸収線を、低濃度を測定するには吸収係数の大きい吸収線を用いる必要があることがわかる。R(21)の吸収線について、低濃度の部

分を拡大し、図17に示す。圧力の測定はピラニーゲージで行った。濃度と2次導関数出力が良い比例関係にあることがわかる。

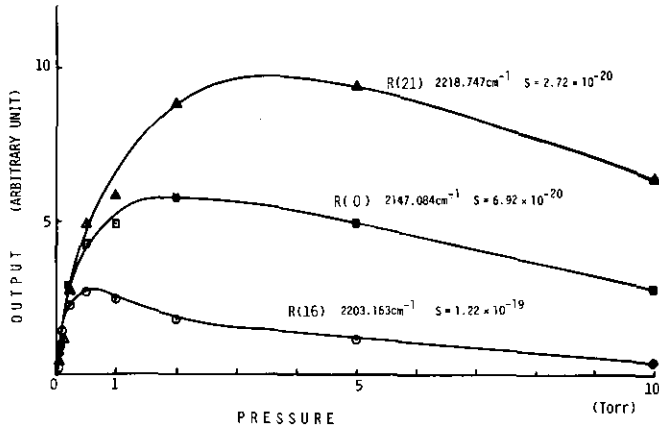


図16 吸収長10 cmのCO 試料セルを用いて $v''=0 \rightarrow v'=1$ の $R(0)$, $R(16)$, $R(21)$ 線におけるCO濃度(圧力)と周波数変調2次微分出力との関係

表2 吸収線パラメータ¹³⁾

吸 収 線	遷移周波数	ドップラー幅 (γ_D , 半値半幅, MHz)	吸収強度 (cm^2)
$R(0) (v''=0 \rightarrow v'=1)$	2147.084 cm^{-1}	74.9	6.92×10^{-20}
$R(16) (v''=1 \rightarrow v'=1)$	2203.163 cm^{-1}	76.9	1.22×10^{-19}
$R(21) (v''=0 \rightarrow v'=1)$	2218.747 cm^{-1}	77.5	2.72×10^{-20}

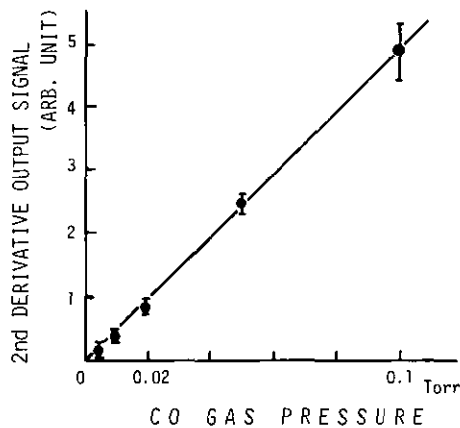


図17 図16の $R(21)$ 吸収線の低濃度側の拡大図

4.7 測定のS/Nの検討

図17の測定の各点でのS/Nの解析結果を図18に示す。低圧側の直線部分では雑音は主として検出器からの雑音で支配され、測定対象の気体圧力と良い比例関係を持つ。測定では $S/N=10$ は 3mTorr (4 ppm) のときである。計算値 (1.6 ppb, 2.4 節, ただし $NEP=2 \times 10^{-10} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$) との差の2500倍は変調電流量が最適値からずれていること、光学系の効率が1でないこと、信号光が検出器受光面 (1mm×1mm) 上に完全に絞られていないことなどによるものと思われる。一方、高圧側でS/Nが一定値 (約100) を示すのは、S/Nがレーザー発振波長の安定性で決められているからである。図では R(21) の測定なので、 $\gamma_D=77.5 \text{ MHz}$ である。周波数安定化時 ($\pm 10 \text{ MHz}$, 4.5 節参照) にはガウス型の変動は 1.15×10^{-2} 程度であり、逆数87は一定となったS/N (~ 100) とほぼ一致する。

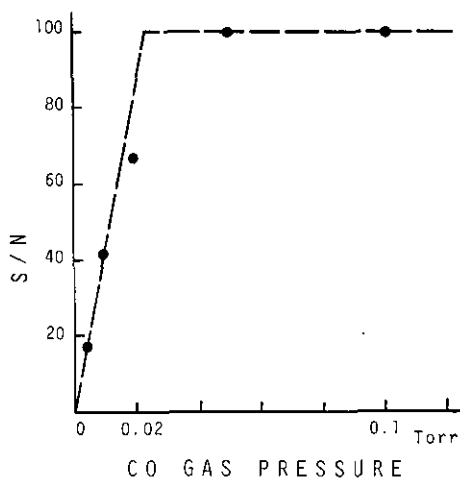


図18 図17と同じ条件における周波数変調2次微分出力のS/N値

5. まとめ

高感度検出を目的とした長光路吸収法の検出法として、2波長差分吸収法、周波数変調1次導関数法、同2次導関数法の理論的検討を行った。出力や周波数の変動がない理想的な状態では、3検出法ともほぼ同じ感度を与えるが、2波長差分吸収法はレーザー出力による規格化の際の誤差が大きく、周波数変調1次導関数法はレーザー発振周波数の固定が困難であり、周波数変動の影響が大きいため、2次導関数法が最も優れていることを示した。

これらの理論的検討に基づき、試作装置を用いて基礎特性を測定した。周波数同調率 (ゆっくりした同調) と変調同調率 (1kHz) の間には3倍の差が見られたが、これは熱的応答が遅いためであると思われる。変調電流をパラメータとして2次導関数波形を測定し、理論と良く一致すること、参照セル (COを封入) の圧力が1Torrのときには、周波数変調量がドップラー幅の2.5倍のときに出力が最大となることを確かめた。さらに、周波数安定化回路が、比例制御を用いただけで、 ± 1.5

$\times 10^{-7}$ の安定度に達し、実用上、十分であるが、S/Nの最大値(実験では約100)は周波数の変動によって制限されていることがわかった。

この研究で、参照セルを通った2次導関数出力で受信々号を規格化し、1次導関数出力を用いて周波数をロックする手法が最適であることが明らかとなった。さらに高感度の検出を行うには、NEPの小さい検出器の使用、光学系の透過率の改善、検出器の受光面への信号光の収束効率の改善などが必要であることが判明した。

本装置の製作にあたっては、周波数安定化装置について大井みさお氏(工業技術院計量研究所)に、半導体レーザー素子について篠原爾司氏(富士通研究所)にお世話になったことを記し、感謝する。

引用文献

- 1) Hinkley, E. D., R. T. Ku and P. L. Kelley (1976): *Topics in Appl. Phys. vol. 14, Laser Monitoring of the Atmosphere*, Chapt. 6. E. D. Hinkley ed., Springer Verlag, New York.
- 2) Hinkley, E. D. (1972): Tunable infrared lasers and their applications to their pollution measurements. *Opto-Electronics*, **4**, 69.
- 3) Hinkley, E. D. (1976): Laser spectroscopic instrumentation and techniques: long-path monitoring by resonance absorption. *Opt. and Quant. Electronics*, **8**, 155-167.
- 4) Ku, R. T., E. D. Hinkley and J. O. Sample (1975): Long-path monitoring of atmospheric carbon monoxide with a tunable diode laser system. *Appl. Opt.*, **14**, 854-861.
- 5) Reid, J., B. K. Garside, J. Shewchun, M. El-Sherbiny and E. A. Ballid (1977): High sensitivity point monitoring of atmospheric gases employing tunable diode lasers. *Appl. Opt.*, **17**, 1806-1810.
- 6) El-Sherbiny, M., E. A. Ballik, J. Shewchun, B. K. Garside and J. Reid (1979): High sensitivity point monitoring of ozone, and high resolution spectroscopy of the ν_3 band of ozone using a tunable semiconductor diode laser. *Appl. Opt.*, **18**, 1198-1203.
- 7) Reid, J., M. El-Sherbiny, B. K. Garside and E. A. Ballik (1980): Sensitivity limits of a tunable diode Laser spectrometer, with application to the detection of NO_2 at the 100-ppt level. *Appl. Opt.* **19**, 3349-3354.
- 8) Sano, H., R. Koga, M. Kosaka and K. Shinohara (1981): High sensitivity short-path monitoring of trace gases employing PbSnTe tunable diode laser. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 2145-2153.
- 9) Kressel, H. and J. K. Butler (1977): *Semiconductor lasers and heterojunction LEDs*, Academic Press, New York.
- 10) McClatchey, R. A., W. S. Benedict, S. A. Clough, D. E. Burch, R. F. Calfee, K. Fox, L. S. Rotman and J. S. Garing (1973): *AFCRL atmospheric absorption line parameters compilation*, Air Force Cambridge Research Lab., AFCRL-TR-73-0096.
- 11) Rothman, L. S. (1981): *AFGL atmospheric absorption line parameters compilation: 1980 version*, *Appl. Opt.*, **20**, 791-795.

II-8

リモートセンシング画像におけるピーク
雑音の除去*

安岡善文¹・R.M. Haralick²

Peak Noise Removal in Remote Sensing Image

Yoshifumi YASUOKA¹ and R.M. Haralick²

要 旨

リモートセンシング画像における走査線雑音、粒状雑音などのピーク状雑音を統計的に検出し、除去する方式を提案した。本方式では、画像が小領域において多項式近似モデルに従うと仮定し、各画素がその近傍領域において推定された画像モデルから著しくはずれているか否かを統計的に検査することによりピーク度を判定する。航空機により収集された走査線雑音を有するマルチスペクトルスキャナ画像に本方式を適用し、良好な結果を得た。

Abstract

A peak noise removal method based on local gray tone statistics is introduced for detecting and removing scan line noise and salty noise in remotely sensed image data. Each pixel in an image is statistically tested to determine if it belongs to the same gray tone intensity surface as its neighborhood pixels. If its gray tone is out of the 95 per cent confidence interval estimated from the neighborhood gray tone, it is judged as peak noise and its value is replaced by the gray tone value estimated from the neighboring pixels. In order to estimate the gray tone statistics, an assumption is made that the neighborhood region is described by a linear or quadratic facet surface model. It is also shown that this method can be successfully applied to scan line noise removal by taking a one-dimensional neighborhood.

1. はじめに

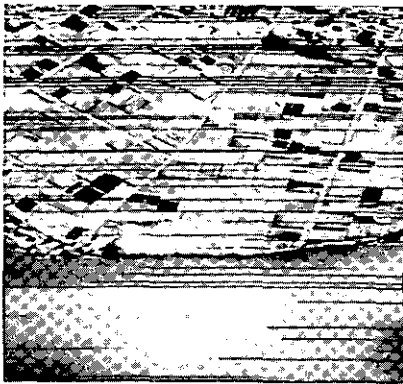
人工衛星、航空機などを利用したリモートセンシングは広い範囲にわたる環境対象を同時的、時

* 本研究は一部、Y. Yasuoka and R.M. Haralick: Peak Noise Removal by a Facet Model. Pattern Recognition (to be appeared) において発表される。

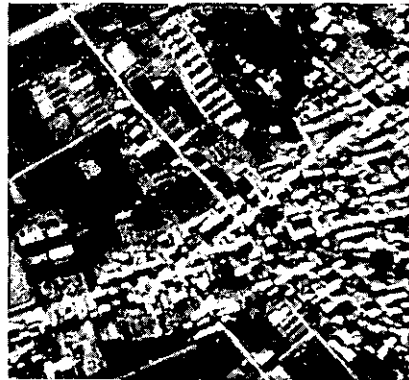
1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川
The National Institute for Environmental Studies, Onogawa, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305
2. ヴァージニア工科大学 電気工学科
Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA

系列的に観測することができるため、これを水環境、森林環境などの計測、評価に利用する試みがなされている。水域、陸域のリモートセンシングでは通常、多重分光走査装置（マルチスペクトルスキャナ：MSS）などの走査型装置が用いられるが、これらの装置により得られる画像ではしばしば、システムの電源電圧変動などに起因するとみられる走査線雑音、粒状雑音などのピーク状（スパイク状）雑音が観測される。これらの雑音は、リモートセンシング画像からの水質分布推定、土地利用分類といった処理、解析において、推定誤差、誤分類などを生ずるため、その除去が不可欠である。

ピーク雑音は、その値が近傍における画像濃度と著しく異なることを特徴としており（図1）、ガウス性雑音と違って、通常の平均化、平滑化処理ではその影響が近傍に拡大してしまうため、個別に検出してこれを除去しなければならない。ピーク雑音を除去する方法として、近傍における画像濃度の中央値（メディアン）を利用するメディアンフィルタが提案されている¹⁾。しかしながらメディアンフィルタでは、すべての画素について、その近傍の画像濃度の中央値を割り当てるため、画像中のエッジ部や微細構造がボケるなど画像の劣化を伴い、定量的な解析においては必ずしも適当とはいえない。花泉ら²⁾は、航空機MSS 画像中の走査線雑音を除去するために、各走査線上の画像濃度を前後の走査線の値と比較する適応ピーク除去法（APR法）を提案しているが、この方法ではピーク度判定のための適切な閾値の設定が難しいため、実用上の問題点がある。



(a) 走査線の欠落



(b) 電源の不安定さに起因する走査線上のランダム雑音

図1 走査線雑音の例

本研究では、画像中の各画素に対して、近傍領域における画像の濃度特性及びその空間分布特性から、ピーク度を統計的に検定する方式を検討した。すなわち、画像は小領域において多項式近似モデルに従うと仮定し、

- (i) 各画素に対し、その近傍領域において画像モデル（多項式近似モデル）を推定し、得られ

たモデルから画像濃度の推定値を求める。

(ii) 推定値と実際の濃度値を統計的に比較し、画素が近傍と同一のモデルに属するか否かを検定する。

(iii) 画素が近傍と同一のモデルに属さない、すなわちその値が近傍における画像濃度と著しく異なる場合、ピーク雑音と判定し、その値を推定値で置き換える。

以上の手順によりピーク雑音の検出、除去を行った。

2. ピーク度の評価

2.1 画像の多項式近似モデル

画像濃度のピーク度を評価するに際しては、その近傍における画像濃度との異なり具合（濃度特性）に加えて、画像濃度の空間配置（空間特性）を考慮しなければならない。例えば図2に示される一次元の例において、(a), (b)ともに中央の値は“5”であり近傍の画像濃度は{1, 2, 3, 4}であるが、“5”の値のピーク度は異なる。すなわち図2(a)では近傍の画像濃度の空間変化が滑らかであるため、中央の値はピーク雑音と判断されるが、(b)では近傍の濃度変化が大きいいため、ピーク雑音とは判断されない。本研究では、画像の多項式近似モデル (facet model^{(3),(4)}) を利用して、画像濃度の空間特性を記述することを行った。

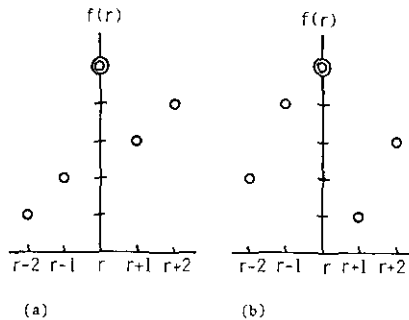


図2 ピーク雑音の空間分布依存性

画像の座標系を (r, c) とし、画像を $f(r, c)$ 、画素 (r, c) の近傍を N_{rc} で表す。 N_{rc} は (r, c) を含まないものとする。 N_{rc} において画像 f は一次多項式、

$$f(r, c) = a + \beta r + \gamma c + \epsilon(r, c) \quad (1)$$

に従うものとする。ここで $\epsilon(r, c)$ は互いに独立な正規雑音であって、 $E[\epsilon] = 0$ 、 $V[\epsilon] = \sigma^2$ とする。すなわち一次多項式近似モデルでは、画像は平面により近似される。一般に画像を n 次元多項式 ($n \geq 2$) で近似することができるが、本稿では一次元の場合についてのみ示す。多次元への拡張は容易である。(1)式において平面のパラメータ a, β, γ は、最小二乗法により、

$$S_e = \sum_{(r,c) \in N_{rc}} (\hat{\alpha} + \hat{\beta}r + \hat{\gamma}c - f(r,c))^2 \quad (2)$$

を最小とする $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ により推定される。(以後、混乱のない限り $\sum \sum$ は $(r,c) \in N_{rc}$ における和を示すものとする。) 今、一般性を失うことなく、近傍 N_{rc} を (r,c) に関して対称に選び、その中心 (r,c) を座標系の原点とおけば、

$$\sum \sum r = \sum \sum c = 0$$

を得る。この時、 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ 及び S_e は(2)式より、

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= \sum \sum f/n = a + \sum \sum \epsilon/n \\ \hat{\beta} &= \sum \sum fr / \sum \sum r^2 = \beta + \sum \sum \epsilon r / \sum \sum r^2 \\ \hat{\gamma} &= \sum \sum fc / \sum \sum c^2 = \gamma + \sum \sum \epsilon c / \sum \sum c^2 \end{aligned} \quad (3)$$

及び

$$\begin{aligned} S_e &= \sum \sum \{ (\hat{\alpha} - a) + (\hat{\beta} - \beta)r + (\hat{\gamma} - \gamma)c - \epsilon \}^2 \\ &= \sum \sum \epsilon^2 - (\hat{\alpha} - a)^2 \cdot n - (\hat{\beta} - \beta)^2 \cdot \sum \sum r^2 - (\hat{\gamma} - \gamma)^2 \sum \sum c^2 \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる。ここで n は N_{rc} の要素数である。

2.2 ピーク雑音

近傍 N_{rc} における画像濃度の推定値 $f(r,c)$ は、(3)式で得られる $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ を用いて、

$$\hat{f}(r,c) = \hat{\alpha} + \hat{\beta}r + \hat{\gamma}c \quad (5)$$

と書ける。(5)式より原点における画像濃度の推定値 $\hat{f}(0,0)$ は、

$$\hat{f}(0,0) = \hat{\alpha}. \quad (6)$$

画像濃度 $f(0,0)$ がピーク雑音であるか否かの判定は、 $f(0,0)$ が近傍 N_{rc} における画像モデル((5)式)と同一のモデルに属するかどうか、すなわち、仮説

$$H_0: \hat{f}(0,0) = f(0,0) \quad (7)$$

を検定することにより行う。仮説 H_0 が棄却された時、 $f(0,0)$ は近傍と異なった画像濃度を有するピーク雑音であると判定される。

3. ピーク雑音の除去

3.1 誤差の評価

近傍 N_{rc} におけるモデルの推定値 $\hat{f}(0,0)$ と実現値 $f(0,0)$ の差 $e(0,0)$ は(3)式を用いて、

$$\begin{aligned} e(0,0) &= \hat{f}(0,0) - f(0,0) = \bar{\alpha} - \alpha - \epsilon(0,0) \\ &= \sum \sum \epsilon/n - \epsilon(0,0) \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられる。今もし、 $f(0,0)$ が近傍 N_{rc} と同一のモデルに属する、即ち仮説 H_0 が成り立つとすると、 $\epsilon(r,c)$ ($\epsilon(0,0)$ も含めて) が正規分布に従うことから、誤差 $e(0,0)$ の分布も正規となる。さらに(8)式より、 $e(0,0)$ の平均および分散はそれぞれ、

$$\begin{aligned} E[e(0,0)] &= 0, \\ V[e(0,0)] &= \left(1 + \frac{1}{n}\right) \sigma^2 \end{aligned} \quad (9)$$

で与えられるから、 $e(0,0)$ は平均値 0、分散 $(1+1/n)\sigma^2$ の正規分布に従う。すなわち、

$$u = \frac{e(0,0)}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) \sigma^2}} = \frac{\hat{f}(0,0) - f(0,0)}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) \sigma^2}} \quad (10)$$

とすると、 u は標準正規分布 $N(0,1)$ に従う。

(10)式において σ^2 は正規雑音 $\epsilon(r,c)$ の母集団分散であって未知である。(10)式を評価するためには、 σ^2 の不偏分散を推定しなければならない。(4)式より、推定誤差の総和 S_e の期待値は、

$$E[S_e] = n\sigma^2 - 3\sigma^2 \quad (11)$$

で与えられる。 $V_e = S_e/(n-3)$ とおくと、

$$E[V_e] = \sigma^2$$

より V_e は σ^2 の不偏分散となる。

3.2 ピーク雑音の検定

(10)式における母分散 σ^2 を不偏分散 V_e で置き換えると、

$$t = \frac{\hat{f}(0,0) - f(0,0)}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) V_e}} \quad (12)$$

が自由度 $(n-3)$ の t 分布に従うことから⁽⁵⁾、(6)式の仮説 $H_0: \hat{f}(0,0) = f(0,0)$ の検定は、(12)式より計算される t を t 分布表と比較することにより行われる。今 5% の有意水準をとると、

$$|t| > t(n-3; 0.05) \tag{13}$$

の時、 H_0 は棄却される。すなわち、 $f(0,0)$ は近傍とは異なった母集団に属するピーク雑音と判定され、その値 $f(0,0)$ は推定値 $\hat{f}(0,0)$ により置き換えられる。

また、式(12)より $f(0,0)$ の95%の信頼区間は、

$$\begin{aligned} \hat{f}(0,0) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) V_e \cdot t(n-3; 0.05)} \\ < f(0,0) < \\ \hat{f}(0,0) + \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) V_e \cdot t(n-3; 0.05)} \end{aligned} \tag{14}$$

で与えられる。すなわち(13)式によるピーク雑音の判定は、いいかえれば、実際の画像濃度 $f(0,0)$ が、近傍から推定される画像濃度の95%信頼区間((14)式)からはずれるか否かを判定することにより行われる。

3.3 走査線雑音の除去

MSS画像においてしばしばみられる走査線欠落などの雑音は、走査線に垂直な一次元の近傍領域を選ぶことにより、一次元のピーク雑音とみなすことができる。本節では特別な場合として、一次元の近傍領域に対するピーク雑音の除去について示す。

一次元近傍を N_r とし、画像は一次多項式、

$$f(r) = \alpha + \beta r + \epsilon(r) \tag{15}$$

に従うものとする。この時(14)式の直線パラメータ α, β は、最小二乗法により、

$$S_e = \sum_{r \in N_r} (\hat{\alpha} + \hat{\beta} r - f(r))^2 \tag{16}$$

を最小とする $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ として、

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= \sum f/n = \alpha + \frac{1}{n} \sum \epsilon \\ \hat{\beta} &= \sum fr / \sum r^2 = \beta + \sum \epsilon r / \sum r^2 \end{aligned} \tag{17}$$

により、またこの時 S_e は、

$$\begin{aligned} S_e &= \sum_{r \in N_r} e^2(r) = \sum (\hat{f}(r) - f(r))^2 \\ &= \sum \epsilon^2 - (\hat{\alpha} - \alpha)^2 n - (\hat{\beta} - \beta)^2 \sum r^2 \end{aligned} \tag{18}$$

により与えられる。さらに

$$E[S_e] = (n-2)\sigma^2 \quad (19)$$

より $S_e/(n-2)$ が σ^2 の不偏推定値であることから、帰無仮説 $H_0: \hat{f}(0) = f(0)$ の検定は、前節二次元の場合と同様に、

$$|t| = \frac{|\hat{f}(0) - f(0)|}{\sqrt{(1 + \frac{1}{n})S_e/(n-2)}} > t(n-2; 0.05) \quad (20)$$

により行われる。

〔例〕 図 2 (a), (b) に示された一次元の例についてピーク性の検定を行う。ここでは、近傍 N_r として 4 点 $\{-2, -1, 1, 2\}$ を用いる。また $f(0) = 5$ である。

(a) 式(16), (17)より、

$$\hat{f}(r) = 2.5 + 0.7r, \quad S_e = 0.1,$$

さらに 式(19)より

$$|t| = \frac{|5.0 - 2.5|}{\sqrt{(1 + \frac{1}{4}) \times 0.1/2}} = 10.0 > 4.30 = t(2; 0.05)$$

従って、 $f(0) = 5$ は、ピーク雑音と判定され、推定値 $\hat{f}(0) = 2.5$ で置き換えられる。

(b) 同様に、

$$\hat{f}(r) = 2.5 - 0.1r, \quad S_e = 4.9$$

より

$$|t| = \frac{|5.0 - 2.5|}{\sqrt{(1 + \frac{1}{4})4.9/2}} = 1.36 < 4.30 = t(2; 0.05)$$

従って、 $f(0) = 5$ は、ピーク雑音とは判定されない。

4. リモートセンシング画像の走査線雑音除去への応用

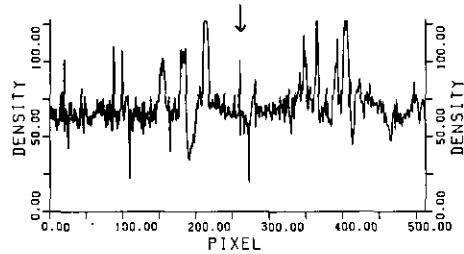
ピーク雑音除去を航空機搭載の多重分光走査装置 (MSS) により収集された走査線雑音を有する画像に適用した。図 3 に処理前の原画像を、図 4 に処理結果を示す。図 3 及び図 4 において、(a) は画像、(b), (c) はそれぞれ、画像中に示された垂直線及び矢印で示される水平線に沿った濃度分布、また (d) は (a) における画像を適当な閾値によって二値 (白黒) 画像化し、雑音除去の効果を明瞭に

したものである。図4(d)において、図3(d)に示される走査線雑音が除去されているのがわかる。ここでは、近傍 N_{rc} として走査線に垂直な一次元近傍 $\{(-2,0), (-1,0), (1,0), (2,0)\}$ を選び有意水準10%による検定を行った。

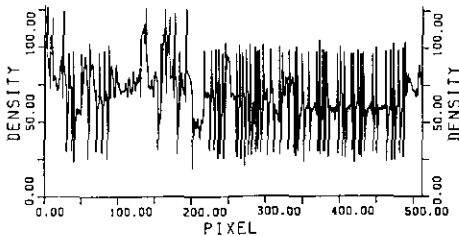
図3(d)及び図4(d)に示されるように、走査線雑音はほぼ除去されており、またエッジ部においても画像の劣化は生じていない。全画素中、ピーク雑音と判定され、推定値によって置換された画素数は10.95%であった。図5に、図3(a)の画像中でピーク雑音と判定された画素を示す。図5に示されるように、一部で走査線雑音以外の画素が雑音と判定され、推定値により置き換えられている。有意水準の値を下げる（5%もしくは1%）ことによりこの誤判定を減らすことができるが、その場合逆に、走査線雑音であるにもかかわらず、ピーク雑音と判定しない場合が増加する。ここでは走査線雑音を除去することを第1目標として有意水準10%を用いた。



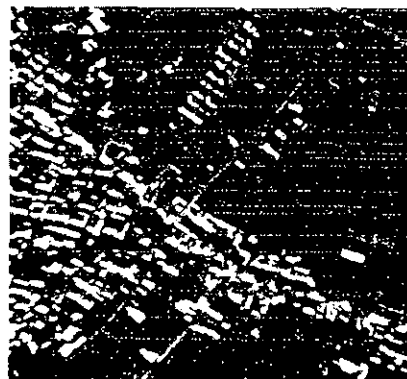
(a) 原画像



(b) 図(a)中に示される垂直線に沿った画像濃度分布

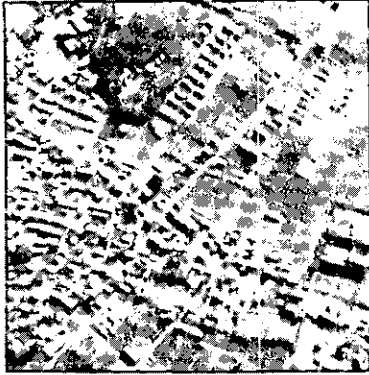


(c) 図(b)中の矢印で示される水平線に沿った画像濃度分布

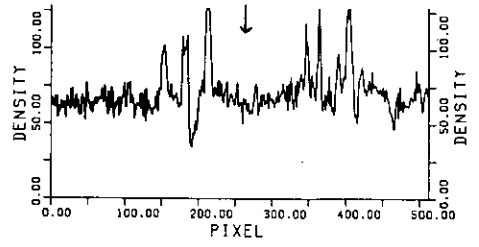


(d) 図(a)中の走査線雑音を明瞭にするために二値化した画像

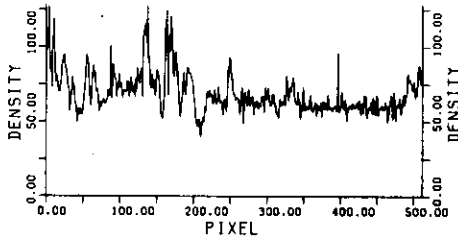
図3 走査線雑音を有するMSS画像



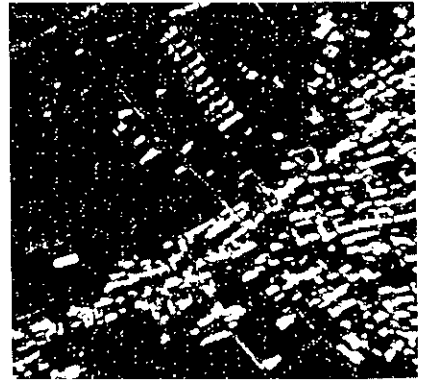
(a) 図3(a)に示される画像の処理結果



(b) 図(a)中に示される垂直線に沿った画像濃度分布



(c) 図(b)中に示される水平線に沿った画像濃度分布



(d) 図(a)に示される画像の二値化画像

図4 走査線雑音除去の処理結果

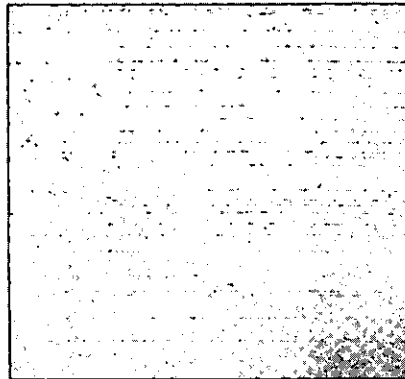


図5 走査線雑音除去の処理により推定値で置き換えられた(除去された)画素

5. ま と め

リモートセンシング画像における走査線雑音、粒状雑音などのピーク状雑音を統計的に検出し、除去する方式を提案した。本方式は、(i) 近傍の濃度分布の空間特性を考慮してピーク度が判定されるため、適応性に富み、チクスタ性の強い画像においても有効である、(ii) 各画素個別にピーク性の判定を行うため画像の劣化を伴わない、(iii) 高次の多項式近似モデル (facet model) を用いることにより、より複雑な画像への適応性に富む、(iv) 有意水準によってピーク度の評価が統計的に決められるため、閾値の設定を必要とせず、自動化処理が可能である、などの利点を有し、ピーク状雑音の除去に有効と考えられる。

参 考 文 献

- 1) W.K.Pratt (1978): Digital Image Processing. Wiley, New York.
- 2) 花泉 弘他(1980): スキャンオーバーラップを利用したMSS画像データの雑音除去. 計測自動制御学会論文集, 16, 880-885.
- 3) R.M.Haralick (1980): Edge and region analysis for digital image data. Computer Graphics and Image Processing, 12, 60-73.
- 4) R.M.Haralick, et. al. (1981): A facet model for image data. Computer Graphics and Image Processing, 15, 113-129.
- 5) 奥野忠一他(1971): 多変量解析法. 日科技連.

II-9

遠隔計測による湖水域の水質分布計測
— 回帰分析を用いた大気補正と水質推定* —

安岡善文¹・宮崎忠国¹

Remote Sensing of Water Quality in the Lake — Atmospheric Correction
and Water Quality Estimation by Regression Analysis —

Yoshifumi YASUOKA¹ and Tadakuni MIYAZAKI¹

要 旨

人工衛星(LANDSAT)を利用した水質の分布計測について新しい方式を提案し、特に、水質推定モデルの構成に不可欠な、大気的光路輝度及び透過率の評価について検討した。まず、LANDSATデータと水面直上において計測した分光放射輝度の回帰分析により大気的光路輝度及び透過率を推定する。つぎに水面で実測した水質データと大気補正を行ったLANDSATデータの回帰分析から水質推定モデルを構成する。実験対象水域として、茨城県霞ヶ浦を選び、LANDSATの飛来に同期して、水質データ、分光放射輝度の計測実験を実施した。さらに得られたデータから水質推定モデルを構成、透明度、SSの分布図を作成した。

Abstract

Remote sensing is regarded as a potentially effective data source for the measurement of water quality and for the environmental evaluation of water bodies. In this paper, the water quality measurement by LANDSAT multispectral scanner data is described. The discussion emphasizes the estimation of the model for water quality measurement as well as the evaluation of path radiance and transmittance in the atmosphere. First, the path radiance and the transmittance were evaluated based on linear regression analysis between the LANDSAT MSS data and the radiance data measured above the water surface. Next, a model for estimating water quality was derived based on linear regression analysis between the water quality parameters monitored on the lake and the LANDSAT MSS data after atmospheric correction utilizing the evaluated path radiance and transmittance. The transparency and the suspended sediment concentration were mapped from the LANDSAT MSS images by the estimated model.

* 本研究の概要は、日本リモートセンシング学会誌、vol 2-3, 51-62 (1982) に発表したものである。
1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川
The National Institute for Environmental Studies Onogawa, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

1. はじめに

本研究は、人工衛星を利用して湖水域の水質分布を計測することを目的とし、特に、水質定量に及ぼす影響の大きい大気による効果について評価、検討を行った。

広い範囲にわたる水域の環境状態を計測する手法として人工衛星、航空機を利用した遠隔計測が知られている¹⁾。水質の遠隔計測では、水中の物質によって選択的に散乱、反射あるいは吸収された太陽光を分光計測し、その分光特性から水中の物質の組成や量を推定する。水中の物質が光の分光特性に及ぼす影響については、数多くの研究がなされており、例えば、Morel²⁾は水中の物質及び大気が光の分光特性に及ぼす影響を検証している。また Austin³⁾はメキシコ湾において海水中の物質と分光特性の関係を実験的に示し、岡見ら⁴⁾は霞ヶ浦において水質と水面直下及び直上の上方向輝度の関係を回帰分析により調べた。

一方、高々度からの水質の遠隔計測では、水中からの反射光が微弱であるうえに、大気による散乱光や水面での反射光などが雑音として加わるため、水質を定量的に計測することは必ずしも容易ではない。特に大気の散乱光（光路輝度）は、水域において、人工衛星の検出器に検知される全輝度の80%程度を占めると推測され⁵⁾、その影響は極めて大きい。このために、大気の影響を除去し、水質推定を行う試みもなされている。Gordon⁵⁾は、 $0.7\mu\text{m}$ 以上の波長帯においては、水中からの情報が含まれず大気、水面のみによる信号である、との仮定のもとに、その波長帯の信号を利用して大気の散乱による影響を評価、除去する方法を提案している。Onitsukaら⁶⁾は同様の仮定のもとに、LANDSATバンド7($0.8\sim 1.2\mu\text{m}$)の信号を利用して大気、水面の影響を取り除く方法を示した。しかしながら湖沼などのように水質の濃度が高い水域では、近赤外域でも水中の情報を含むことが多く、上記の方法は必ずしも有効ではない。上野ら⁶⁾は大気の理論モデルに基づいて、その影響を評価する方法を検討しているが、実際の大気ではその構造が複雑で、影響も一様でないため、理論的にこれを除去することは容易ではない。

本研究では、遠隔計測により湖水域の水質分布を推定することを目的として、人工衛星(LANDSAT)データと湖上で実測された水質データとの回帰分析を行い、遠隔計測データから水質を推定するための統計モデルを構成した。特に大気の影響を評価するために、水面直上において計測した分光放射輝度とLANDSAT輝度データの回帰分析を行い、大気の透過率及び光路輝度を推定した。つぎに推定された透過率と光路輝度を用いて大気補正を行ったLANDSATデータと水質データの回帰分析から水質推定モデルを構成した。データ収集実験を、LANDSATの飛来に同期して茨城県霞ヶ浦において、ヘイズの強い日及び快晴の日の2度実施し、両日のデータの比較から大気の水質推定に及ぼす影響について検討を行った。

2. LANDSATによる水質計測

2.1 LANDSAT輝度と水面分光反射率

水域の遠隔計測において、衛星もしくは航空機に搭載された光検出器に検知される光は、(i)水

中の物質により吸収、散乱され水面から上方に向う光、(ii) 水面で直接反射された光、および (iii) 水面まで到達せずに大気中で散乱された光、の3成分から構成される(図1)。水質に関する情報は、(i) の成分のみに含まれ、水質を定量的に計測するためには、検出器に検知された信号から、(ii) および(iii)の成分を除去しなければならない。

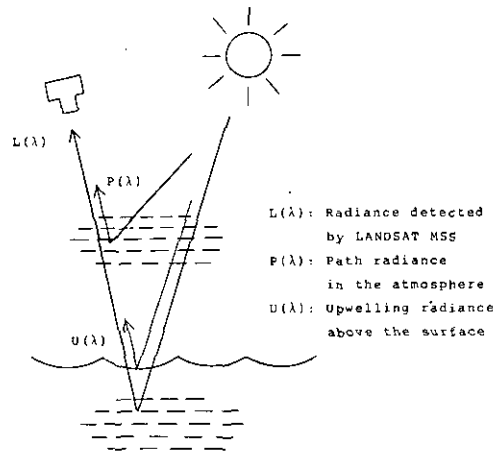


図1 水域の遠隔計測における三つの成分

LANDSAT MSS (多重分光走査装置) により検知される光の輝度 (LANDSAT 輝度) を $L(\lambda)$ 、水面直上での上方向分光放射輝度を $U(\lambda)$ 、大気の光路輝度を $P(\lambda)$ とすると、 $L(\lambda)$ は、

$$L(\lambda) = U(\lambda) \times \tau(\lambda) + P(\lambda) \quad (1)$$

で表される。ここで $\tau(\lambda)$ は大気の透過率である。(以後変数は混乱のない限り、波長を示す変数 λ を省略する。) (1) 式において、第一項 U は、前記 (i) および (ii) の成分の和であり、第二項 P は (iii) の成分である。水面での分光反射率 R を、水面直上における下方向照度 H を用いて、

$$R = \frac{U}{H} \quad (2)$$

とすると⁽³⁾⁽⁴⁾、(1) 式より、

$$R = \frac{(L - P)}{\tau \cdot H} \quad (3)$$

を得る。

LANDSAT 輝度から水質を定量にするためには、水面分光反射率 R と水質の間の関係を何らかの

形で推定しなければならない。本研究では、まず、水面直上で測定した分光放射輝度 U と、LANDSAT MSS画像上で湖上測定点に対応する点のLANDSAT輝度 L の回帰分析を行い、(1)式における透過率 τ 及び光路輝度 P を推定した。つぎに(3)式を用いてLANDSAT輝度 L より得られる水面分光反射率 R と各種水質間の回帰分析を行い、水質推定モデルを構成した。なお(3)式において、水面の照度 H は、湖上で水面直上分光反射率 U と同時に測定した白色標準反射板の反射光輝度 W を用いて、

$$H = \frac{\pi \cdot W}{\rho} \quad (4)$$

により求めた。ここで ρ は白色標準反射板の反射率であり、また白色標準反射板は完全拡散面(Lambertian surface)であると仮定した。

LANDSAT MSSの地上での分解能はおおよそ80mであり、LANDSAT輝度 L と湖面上の狭い範囲を測定した水面分光放射輝度 U とを直接対応づけることは困難であるが、ここでは水域での水質、さらには分光特性が急激に変化することがなく、MSS画像の一画素に相当する範囲内では一様とみなせる、と仮定した。また、LANDSATと太陽の位置関係から、水面による直上方向への太陽の直接反射光(sun glint)は少なく、水面分光放射輝度 U に占める直接反射光の割合は小さい、と仮定した。

2.2 データ収集実験の概要

LANDSAT MSSの撮影に同期して、茨城県霞ヶ浦において、水質調査及び水面分光放射輝度の測定等グラントルースデータの収集を行った。実験は大気による影響を比較、評価するために、ヘイズの強い1981年11月24日と快晴の1982年3月3日の2回実施した。収集したデータの概要は以下の通りである。

(1) マルチスペクトル画像データ：

LANDSAT 2号 MSS (11月24日)、

LANDSAT 3号 MSS (3月3日)、

(2) 水面および白色標準反射板の放射輝度：

高速スペクトルメータ⁸⁾、

(3) 水質：

SS(浮遊懸濁物質)、クロロフィル、透明度、水温。

図2に11月24日における湖上での測定点配置例を示す。測定地点では、LANDSAT MSS画像上で、その位置づけを正確に行うために、湖岸の目標物を対象としてマイクロコンパスにより三角測量を行った。位置づけの精度は、湖上で50~100m、LANDSAT画像上で1~2画素と考えられる。なお以後測定点 k をPt. k で表す。

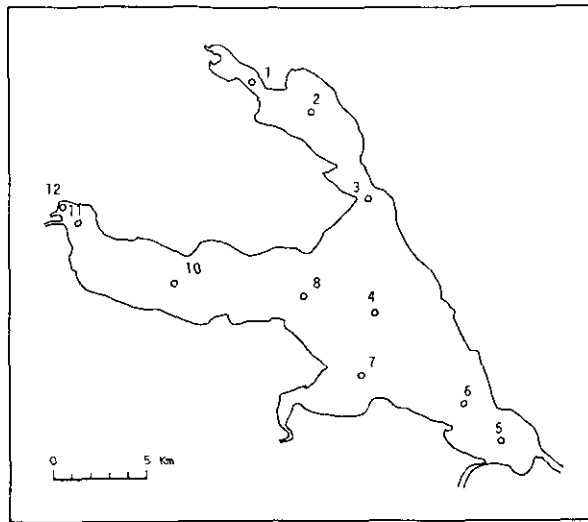


図2 湖上における実測地点の配置例(1981年11月24日)

水面及び白色標準反射板の分光放射輝度は、宮崎ら⁸⁾が開発した高速スペクトルメータにより測定した。スペクトルの走査波長帯域は $0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ 、波長分解能は 2nm 、走査時間は 1秒 である。本実験では、水面波の動きなどによる影響を除去するために、各測定につき 20 回連続走査し、その平均値を放射輝度として記録した。また測定に際して、スペクトルメータ受光部の水面及び白色標準反射板からの距離は 30cm とした。なお白色標準反射板は $40\text{cm}\times 40\text{cm}$ のアルミニウム板にEASTMAN白色反射コーティング⁹⁾を塗付したものを使用した。その反射率は対象とする波長帯域ではほぼ 1.0 とみなすことができる。図3及び図4に3月3日、Pt.6において測定された水面分光放射輝度 $U(\lambda)$ 、白色標準反射板の反射光輝度 $W(\lambda)$ の波長特性例を示す。また図5には同点の分光反射率 $R = U/H =$

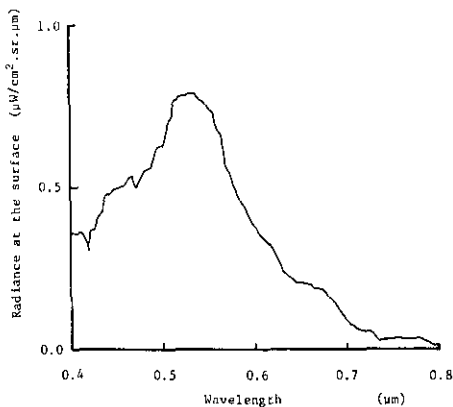


図3 水面分光放射輝度 $U(\lambda)$
(1982年3月3日, Pt.6)

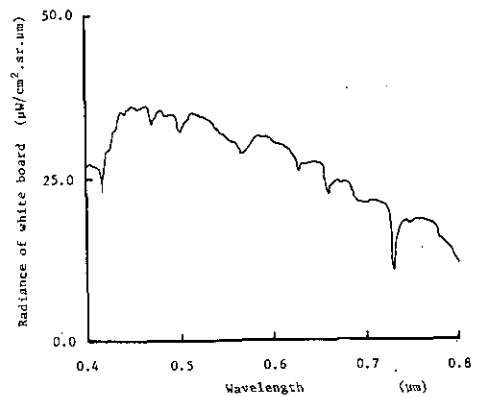


図4 白色標準反射板の反射光輝度 $W(\lambda)$
(1982年3月3日, Pt.6)

$\rho \cdot U/\pi \cdot W$ の波長特性例を示す。

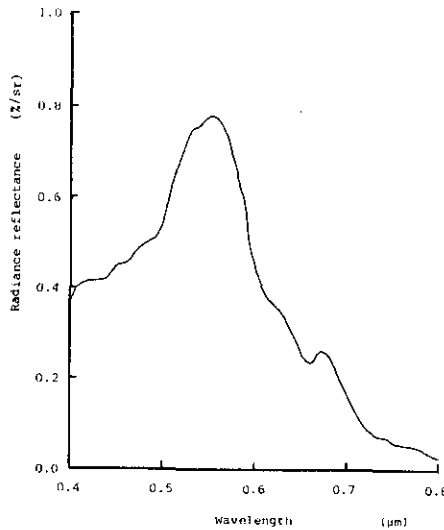


図5 水面分光反射率 $R=U/H$ (1982年3月3日, Pt.6)

3. 大気の透過率及び光路輝度の推定

3.1 LANDSAT 輝度と水面分光放射輝度の回帰分析

LANDSAT 輝度から水面の分光放射輝度 U 、さらには分光反射率 R を得るためには、(1)式における透過率 τ 及び光路輝度 P を推定しなければならない。ここでは、対象水域において透過率、光路輝度が一様であると仮定し、湖上の各測定点で得られる水面分光放射輝度 $\{U_k(i)\}$ と LANDSAT 輝度 $\{L_k(i)\}$ の回帰分析を行い、透過率、光路輝度を統計的に推定することを試みた。ここで $L_k(i)$ は測定点 k における MSS バンド i 画像の LANDSAT 輝度、 $U_k(i)$ は水面分光放射輝度で、連続的な分光特性 $U_k(\lambda)$ を MSS 各バンドの波長帯 (バンド4: $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 、バンド5: $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、バンド6: $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$) で積分した値である。

LANDSAT 輝度 $L(i)$ (測定点に関する添字は混乱のない限り省略する) は、MSS バンド i 画像の CCT カウント (磁気テープに記録された画像濃度) $N(i)$ から、

$$L(i) = (L^{\max}(i) - L^{\min}(i)) \times N(i) / 127 + L^{\min}(i) \quad (i=4, 5, 6) \quad (5)$$

により求めた。 $L^{\min}(i)$ 、 $L^{\max}(i)$ は MSS 各バンドにおける検出器の感度パラメータで、CCT カウントがそれぞれ 0 および 127 に対応する時の輝度である¹⁰⁾。表 1 に使用した $L^{\min}(i)$ および $L^{\max}(i)$ の値を示す¹¹⁾

表1 LANDSAT MSS検出器の感度パラメータ

MSS Band	LANDSAT-2			LANDSAT-3		
	4	5	6	4	5	6
Radiance						
L^{min} (mW/cm ² ·sr)	0.08	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03
L^{max} (mW/cm ² ·sr)	2.63	1.76	1.52	2.59	1.79	1.49

水面での分光放射輝度 $U_k(i)$ は各測定点における測定時刻の違い（太陽照度の違い）による影響を除去するために、白色標準反射板の輝度 $W_k(i)$ で補正した値

$$U'_k(i) = U_k(i) \times W_k(i) / W_k(i) \quad (6)$$

を用いた。ここで $W_k(i)$ は LANDSAT MSS の撮影とほぼ同時刻に測定された測定点 k における白色標準反射板の反射光輝度である。すなわち $U'_k(i)$ は、実験時間内で大気及び水域の条件が一定である（ $\tau, P, R=U/H$ が一定である）との仮定のもとで、LANDSAT 通過時刻における測定点 k での水面分光放射輝度の推定値と考えることができる。

得られた $\{L_k(i)\}$ と $\{U'_k(i)\}$ の相関解析を行い、回帰式

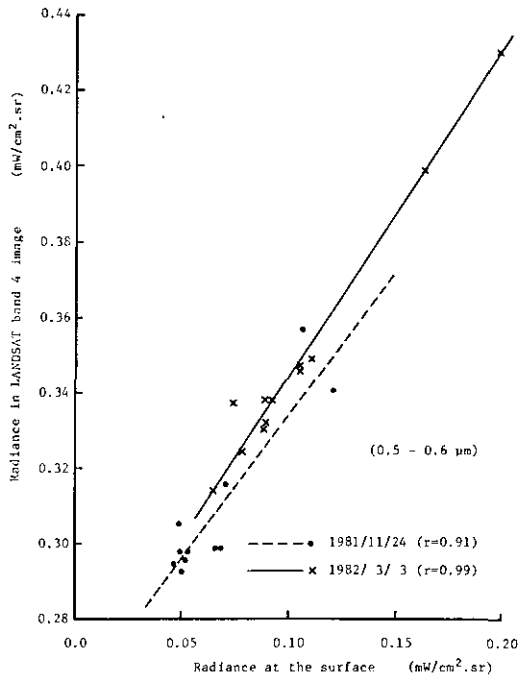
$$L(i) = a \times U(i) + b \quad (7)$$

を決定した。(1)式および(7)式から透過率 τ 及び光路輝度 P は、それぞれ、

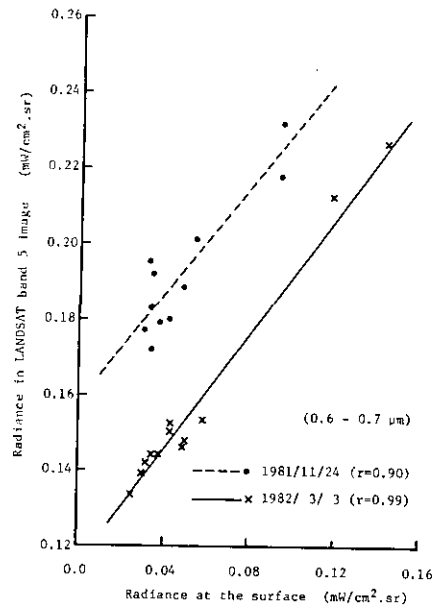
$$\tau = a, \quad P = b \quad (8)$$

により与えられる。図6に各バンドにおける LANDSAT 輝度 L と水面分光放射輝度 U の回帰式を示す。また表2に(8)式から得られた透過率及び光路輝度の推定値(95%の信頼区間)を示す。透過率については一般に予想される値よりやや高いが、光路輝度については Rogersら¹²⁾により測定された値とも概ね一致している。

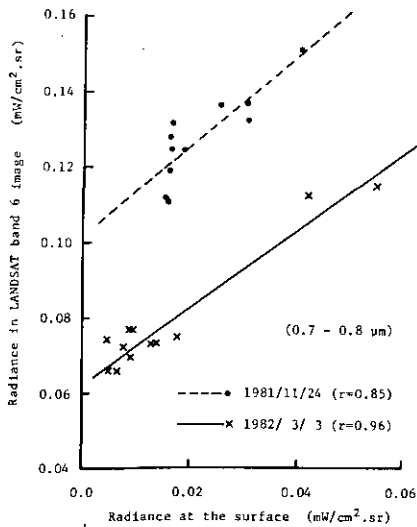
なお図6において、測定値のなかで常に特定の2点が他の点から外れる傾向にある。この2点は、湖内で汚濁の激しい土浦入江の Pt.11 及び Pt.12 (図1) に対応するが、これら測定値が外れた点を回帰分析に加えることは統計的推定の信頼度を欠くことが予想される。しかしながらここでは、(i) 回帰モデルに線形性 ((1)式) が仮定されている、(ii) 上記2点が回帰直線上からの外れ値ではない、(iii) 外れ値に物理的意味があり単なる測定誤差ではない、以上の理由により2点を回帰分析に加えた。



(a) バンド 4



(b) バンド 5



(c) バンド 6

図 6 LANDSAT輝度(L)と水面分光放射輝度(U)の回帰式

表2 透過率及び光路輝度の推定値 ($a=\tau$ =透過率, $b=P$ =光路輝度)

Coef. Band	1981/11/24		1982/3/3	
	a	b (mW/cm ² ·sr)	a	b (mW/cm ² ·sr)
4	0.77 (±0.27)	0.26 (±0.02)	0.86 (±0.10)	0.26 (±0.01)
5	0.72 (±0.26)	0.16 (±0.01)	0.78 (±0.08)	0.11 (±0.01)
6	1.17 (±0.56)	0.10 (±0.01)	1.01 (±0.21)	0.06 (±0.01)

3.2 ヘイズによる影響の評価

ヘイズの存在は一般に、透過率を低下させ、光路輝度を増加させる。すなわち、ヘイズが強い場合、(7)式の回帰式において、傾き a は小さく、切片 b は大きくなることが予想される。ここでは透過率、光路輝度に及ぼすヘイズの影響を調べるために、(7)式で推定される $a(=\tau)$ 及び $b(=P)$ について、11月24日、3月3日の値の差を統計的に検定した。11月24日、3月3日における回帰直線の傾き及び切片を a_1, b_1, a_2, b_2 とする。各バンドに対して、 a, b に関する帰無仮説

$$H_0: a_1(i) = a_2(i) \quad (i=4, 5, 6) \quad (9)$$

及び

$$H'_0: b_1(i) = b_2(i) \quad (i=4, 5, 6) \quad (10)$$

を検定した。

この結果、透過率に対応する傾き a については、全バンドにおいて両日の間に有意な差は認められなかった。(帰無仮説 H_0 は5%の有意水準で棄却されない。) また光路輝度に対応する切片 b については、バンド4において両日の間に差は認められなかったが、バンド5及び6で11月24日の値が3月3日の値より大きいことが示された。(バンド5, 6に対して帰無仮説 H'_0 が5%の有意水準で棄却される。) これは今回のデータに関しては、ヘイズによる透過率の顕著な変化はみられず、光路輝度にその影響が現れたことを示すものと考えられる。

また図6に示されるように水面での分光放射輝度とLANDSAT輝度の間の相関係数は11月24日、3月3日とも高く、ヘイズによる顕著な影響はみられない。これは、ヘイズが存在してもその分布がある程度一様であれば、水面の分光放射輝度とLANDSAT輝度の間の線形関係が大きく崩れることがないことを示し、従って、水面や水中に関する情報が必ずしも損なわれないことを示すものと考えられる。

4. 水質分布の推定

4.1 分光反射率分布の推定

水面における分光反射率は、(3)、(4)および(8)式を用いて、

$$R = \frac{\rho \cdot (L - b)}{(a \cdot \pi \cdot W)} \quad (11)$$

と書ける。前節で求めた a , b を用い LANDSAT 輝度 L から対象水域における水面分光反射率分布を求めた。白色標準反射板輝度 W としては、LANDSAT 通過とほぼ同時刻に測定した値を用い、また $\rho = 1.0$ を仮定した。例えば、3月3日の Pt. 6 におけるバンド 5 の分光反射率は、 $a = 0.78$, $b = 0.11$ ($\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$), $L_5(5) = 0.13$ ($\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$), $W_5(5) = 2.66$ ($\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$) より $R = 0.31$ ($\%/ \text{sr}$) を得る。

図7に3月3日における分光反射率分布の例を示す。図7(a)はLANDSATの原画像で、バンド4、5及び6にそれぞれ青、緑、赤を割り当て色表示したものである。また図7(b)は各バンドの分光反射率0~3.0($\%/ \text{sr}$)を同様に色表示したものである。(b)においては光路輝度が除去されているため、細部で画像が鮮明になっている。

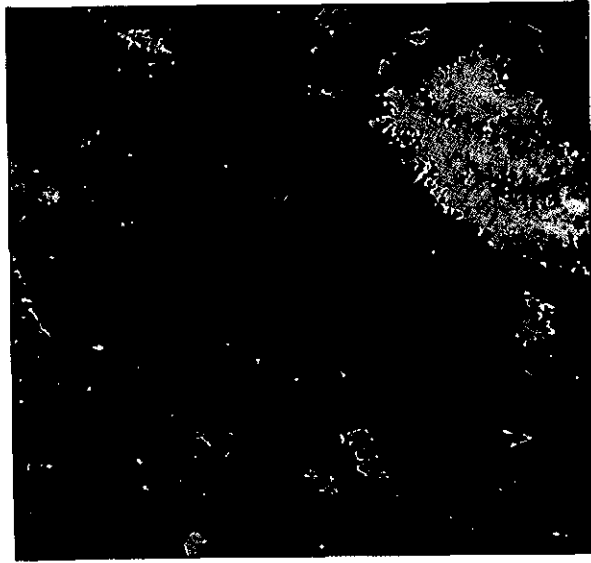
4.2 回帰分析による水質推定モデルの構成

遠隔計測されたデータから水質を定量するために、両者の回帰分析を行い統計モデルを構成する方法が提案されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。ここでは、光路輝度等大気の影響を受けないモデルを構成するために、LANDSAT MSS画像から推定される水面分光反射率((11)式)と水質との回帰分析を行った。

測定点 k における水質を y_k , (11)式でLANDSATデータから推定される分光反射率を $R_k(i)$ ($i = 4, 5, 6$) とする。 $\{y_k\}$ (及びその対数 $\{\log_e y_k\}$) と $\{R_k(i)\}$ に対して、

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad & y = \alpha R(i) + \beta && \text{(単回帰)} \\ \text{(ii)} \quad & y = \alpha R(i)/R(j) + \beta && \text{(バンド間の比)} \\ \text{(iii)} \quad & y = \alpha (R(i) - R(j))/(R(i) + R(j)) + \beta && \text{(バンド間の和と差の比)} \\ \text{(iv)} \quad & y = \sum \alpha_j R(j) && \text{(重回帰)} \end{aligned} \quad (12)$$

など114種類⁽¹⁷⁾の回帰式を仮定し、回帰係数を算出した。表3に各種水質と分光反射率の間の単相関係数(上記(i)を使用)を示す。表中下線は5%の有意水準で「相関なし」が棄却されることを示す。11月24日、3月3日とも透明度、SSは分光反射率と高い相関を有し、LANDSAT MSSによる水質定量の可能性が示された。ヘイズの強い11月24日においても水質と分光反射率の間の相関係数が大幅に低下しないのは、3.2節に示されたように、水面の分光放射輝度とLANDSAT輝度の間の線形関係がヘイズによって崩れていないことによると考えられる。



(a) LANDSAT MSS 原画像(青-バンド4, 緑-バンド5, 赤-バンド6で色表示)



(b) (a)の画像より推定された分光反射率分布(各バンドの分光反射率0~3.0(%/sr)を(a)と同様に色表示)

図7 分光反射率分布

表3 水質と分光反射率の相関係数（下線は5%の有意水準で「相関なし」が棄却されることを示す）

MSS band	1981/11/24			1982/3/3		
	4	5	6	4	5	6
Water quality						
Transparency	<u>-0.81</u>	<u>-0.82</u>	<u>-0.78</u>	<u>-0.96</u>	<u>-0.95</u>	<u>-0.91</u>
SS	<u>0.80</u>	<u>0.79</u>	<u>0.79</u>	<u>0.94</u>	<u>0.97</u>	<u>0.92</u>
Chlorophyll-a	-0.67	-0.57	-0.25	-0.30	-0.27	-0.31
Monitoring points	11			13		

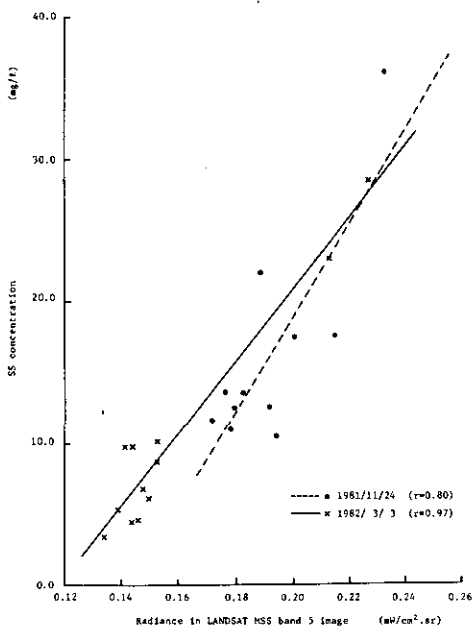
回帰式において上記(ii)~(iv)に示されるような複数のバンドを組合わせて利用する方法も提案されているが⁽⁴⁾、LANDSATデータでは、単回帰に比較し著しい改善はみられなかった。LANDSATデータでは各バンド間でデータの相関が非常に高く、このような場合は、複数バンドを組合わせる効果が少ないと考えられる。

クロロフィルについては両日とも良い相関が得られなかったが、これは(i)LANDSAT MSSの波長帯域が広く、クロロフィルの吸収帯、蛍光帯といった特徴的な分光特性を検出できない、(ii)LANDSAT MSSのゲインが低く、水質の微小な差を検出できない、などの理由によるものと考えられる。これらの特徴は、過去4年間霞ヶ浦で実施されたLANDSATによる水質計測の結果⁽¹⁴⁾とも一致した。

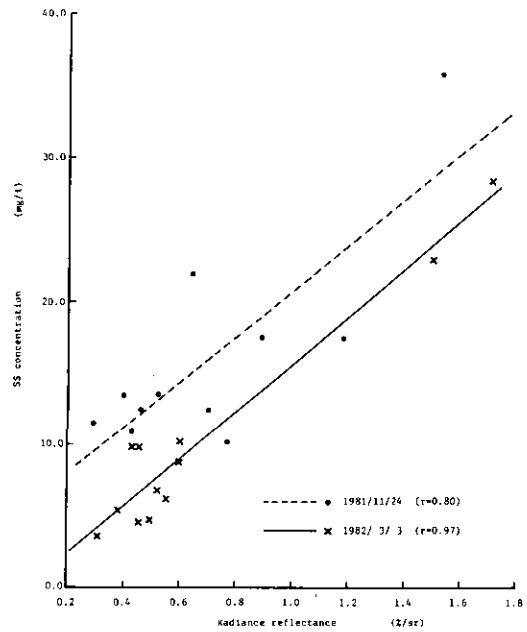
水質(SS)とLANDSAT MSS(バンド5)データの回帰式の例を図8に示す。図8(a)はSSとLANDSAT輝度 L (大気補正前)の回帰式、図8(b)はSSとLANDSAT輝度から推定された分光反射率 R の回帰式である。図8に示されるように、透過率、光路輝度による補正後は、異なった大気状況における回帰式が一致する傾向がみられる。これは大気による影響の補正を行うことにより、場所、時期によらないより安定な水質推定モデル構成の可能性を示すものと考えられる。図8(b)の回帰式から推定された霞ヶ浦全域のSS濃度分布図を図9に示す。図9(a)、(b)はそれぞれ11月24日、3月3日の推定分布図であるが、表示に際しては、(a)ではSS濃度10~30mg/lを、(b)では0~20mg/lを濃淡表示した。両日とも土浦入江(西部入江)及び高浜入浜(北西部入江)においてSS濃度が高く表示されているが、ここは河川からの濁水流入や浚渫工事のため底泥のまき上げが多い場所であり、現場の状況と一致している。

5. まとめ

LANDSAT MSS画像データから水質分布を計測することを目的として、LANDSATデータと水質データの回帰分析を行い、水質推定モデルを構成した。特に、水質の定量において問題となる大気の影響を除去するために、水面直上での分光放射輝度とLANDSAT輝度との回帰分析を行い、大気の透過率、光路輝度を推定した。つぎに大気補正を行ったLANDSATデータと水質の回帰分析を行い、水質推定モデルを構成した。この結果、SS、透明度についてはLANDSATデータから

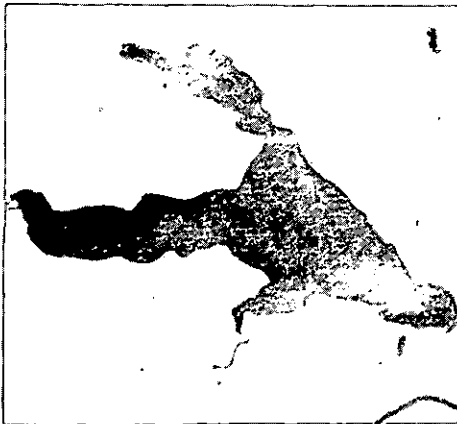


(a) SSとLANDSAT輝度の回帰式



(b) SSと分光反射率の回帰式

図8 SS(浮遊懸濁質)とLANDSAT MSSデータの回帰分析



(a) 1981年11月24日, 10~30mg/l



(b) 1982年3月3日, 0~20mg/l

図9 SSの推定分布図(図8(b)の回帰式を用いて推定)

推定された分光反射率と高い相関を有し、水質分布推定の可能性が示された。

今後さらに、水面における直接反射光の影響を考慮することにより、場所、時期によらない、より安定な水質推定モデルの構成が可能と考えられる。また本研究で示された大気透過率、光路輝

度の推定には常に水面分光放射輝度の測定が必要であり、必ずしも実用的とはいえない。より簡便な大気補正手法の開発が望まれる。

なお本研究では、データ収集、討論を通じて理化学研究所岡見登氏、岸野元彰氏、杉原滋彦氏の御協力を得た。各位に深く感謝する次第である。また本研究は一部、科学技術庁振興調整費「リモートセンシング技術の利用実証に関する研究」の一環として行った。

参 考 文 献

- 1) 宮崎忠国・大井 紘(1982): リモートセンシング技術による水質計測の現状. 国立公害研究所研究報告, 第34号, 29-42.
- 2) Morel, A.(1980): In-water and remote measurements of ocean color. *Boundary-Layer Meteorology*, **18**, 117-201.
- 3) Austin, R.W.(1980): Gulf of Mexico, ocean-color surface-truth measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, **18**, 269-286.
- 4) 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国(1982): 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質. *日本リモートセンシング学会誌*, **2** (1), 21-31.
- 5) Gordon, H.R. (1978): Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans. *Applied Optics*, **17**(10), 1631-1636.
- 6) Onitsuka, M., K.Ohta, N.Okami and J.R.Miller (1981): An approach to path radiance correction in MSS images. *Proc. of the 15 Intr. Symposium on Remote Sensing of Envir.*, 681-689.
- 7) 上野季夫編(1980): 大気効果除去システムの設計と大気・地表系の同定. JAFSA RS REPORT 804002, 日本造船振興財団.
- 8) 宮崎忠国・清水 浩・安岡善文(1980): 多用途高速スペクトルメータの設計. 文部省「環境科学」特別研究, 研究報告, B-62-R52, 13-21.
- 9) Grum, F. and G.W.Lucky (1968): Optical sphere paint and a working standard reflectance. *Applied Optics*, **7**(11), 2289-2294.
- 10) U.S.Geological Survey (1979): LANDSAT Data Users Handbook. U.S.Geological Survey, PP. 1-11 10-1.
- 11) Robinove, C.J., P.S.Chavez, D.Gehring and R.Holmgren (1981): Arid land monitoring using LANDSAT albedo difference image. *Remote Sensing of Env.*, **11**, 133-156.
- 12) Rogers, R.H., K.Peacock and S.Navinchanara (1974): Technics for collecting ERTS data for solar and atmospheric effects. 3rd ERTS-1 Symposium, vol.1, Tech sec (B) 1878-1804.
- 13) 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.
- 14) Yasuoka, Y. and T.Miyazaki (1981): Assessment and evaluation of water quality by remote sensing. Research related UNESCO's MAB Programm in Japan, 171-176.
- 15) 横山隆三: リモートセンシングによる水質環境調査. JAFSA RS REPORT 803002, 日本造船振興財団.
- 16) Kim, H.M., C.R.McClain and W.D.Hart (1979): Chlorophyll gradient map from high-altitude ocean-color-scanner data. *Applied Optics*, **18**, 3715-3716.

II-10

大気汚染測定系の総合評価のための基礎的研究
——地上測定局網の評価と構成*——

大井 紘¹・新藤純子¹・藤原正弘²

A Fundamental Research for a Comparative Evaluation of Air-Pollution
Monitoring Systems
—An Evaluation and Synthesis of a Network of Monitoring Stations*—

Ko OI¹, Junko SHINDO¹ and Masahiro FUJIWARA²

要 旨

有効かつ経済的な大気汚染測定システムを構成するためには、レーザーレーダーを含む、諸測定システムの比較評価をする手順が確立されなければならない。

本報では、地上測定局システムの評価の基礎を与える方法を示す。

前半では、ある領域における大気汚染の連続的な濃度分布を推定する方法を提案する。離散的に設置された数の限られた濃度データを補間するための方法として、スプライン法を採用する。そして、この補間法により作成した濃度分布と真の分布との適合性を検討する手続き——この手続きにより、同時に、現存の測定網において、必要とされる測定局の数が求められる——を提案する。

後半では、既存の大気汚染測定網から取除くことが可能である測定局を選定する方法を提案する。この方法は、前半で論じる方法、特に、必要な測定局の数を求める方法に基づくものであり、代表的な汚染濃度分布について、取除き可能な測定局を、準最適な方法で、選定する。

提案された諸方法を関東地域のオキシダント濃度の実データに適用し、それらの有効性を検証する。

Abstract

For the planning of an efficient and economical air-pollution monitoring system,

* 本論分の一部は「環境技術」誌 vol.11, nos.9 & 11 (1982) に掲載されたものである。

1. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町
Environmental Information Division, The National Institute for Environmental Studies,
Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305
2. (前)厚生省環境衛生局 〒100 東京都千代田区霞が関、(現)大阪湾広域臨海環境整備センター
〒541 大阪市東区備後町
Formerly, Environmental Health Bureau, Ministry of Health and Welfare, Kasumigaseki,
Chiyoda, Tokyo, 100 and currently, Osaka Bay Environmental Regional Center for Waste
Reclamation, Bingo, Higashi, Osaka 541.

it is necessary to establish a procedure to evaluate and compare various kinds of systems, including a laser radar system. In this paper, methods giving a basis of the evaluation of a monitoring station system are shown.

First, a method to estimate the continuous distribution of air pollutant concentration in a region is proposed. In this method, a spline technique is employed to interpolate concentration data monitored at sparsely located stations. The method includes a procedure to examine the agreement of the concentration distribution through interpolation with a true distribution. Furthermore, this procedure finds the number of required stations among the existing ones.

Secondly, a method to select from existing air pollution monitoring stations those stations that can be removed is presented. The method is based on the procedure described above, especially to determine the number of required stations. By this method, stations to be removed are determined sub-optimally for typical distributions of pollutant concentration.

To show their usefulness, the methods are applied to real data of oxidant concentration in the Kanto region in Japan.

1. 緒 言

遠隔計測を含む測定法の環境問題における実用上の位置づけは、それぞれの方法の特徴と測定目的との関係において、経済性も考慮して、決まるべきものであろう。

従って、地上大気汚染濃度測定システムの今後のあり方を考えるとき、レーザーレーダーによる方法と、それと表裏をなすものとして、既成の地上測定局網による方法についても、信頼性と経済性が検討されなければならない。その結果に基づき、測定方式の選択が行われるべきである。このとき、特徴を補完させるように両方式を併用することも考えられよう。

よって、それぞれの方法について、信頼性の評価と向上、経済性の評価とそれに先立つ測定システムの最適化が十分に行われなければならない。

地上測定局網によれば、測定局の置かれている地点での測定値の信頼性という点では、レーザーレーダーによる方法の追従を許さないと考えられる。レーザーレーダーによる方法と比較の対象になるのは、i) 測定局の無い地点の測定値の推定(分布パターンの推定)の信頼性であり、ii) 経済性である。

本報では、地上測定局網について前半で測定局間の濃度分布パターンの推定法を提案し、この方法による推定の信頼性の評価方法を与える(2~5)。後半では、既存測定局網について局の最適配置法を示す。この方法により、システムの経済性を支配する測定局数を小さくすることを検討する手続きが与えられる(6~10)。

2. 濃度分布パターンの推定法の概説

大気汚染や水質汚濁などの測定データは、レーザーレーダーのような遠隔計測法による場合を除

き、平面上の離散的な数の限られた地点について得られるのが通常である。一方、環境汚染の評価及び対策においては、次の①-③の目的にデータを利用するので、汚染状況を2次元の分布パターンとして把握することが重要である。すなわち、

- ① 地域または水域全体の大気汚染状況や水質汚濁状況を推定する。
- ② 汚染分布の状況を視覚的に把握する。
- ③ 2次元メッシュ点上の汚染濃度値を推定し、メッシュデータで表された他の関係データとの間での関連解析等を行う。

離散的な濃度データから連続的濃度分布を推定するためのデータ補間法はいく種類か知られているが¹⁾、その一つとしてスプライン法がある。

渡津ら²⁾は、スプライン法によって作成された大気汚染の補間曲面と大気拡散式を用いて予測した濃度分布曲面とを比較することにより、スプライン法によるデータ補間法の精度を論じている。また、篠原ら³⁾は、大気汚染測定局の実測データの一部だけを用いてスプライン補間を行い、その計算結果と残りのデータとを比較することにより、この誤差を最小にするスプライン・パラメータの値を論じている。

本報前半では、大気汚染近似分布の、大西のスプライン法⁴⁾に基づく形成法と、必要な程度の近似になっているか否かの判定方法を提案する。また、この手続きにより、近似分布を得るに必要な測定局数が同時に求められる。さらに、大気汚染の実データに提案した形成法を適用して、妥当な近似曲面が得られることを示す。

3. スプライン法について

3.1 特徴

従来から用いられている分布パターンを得るための各種手法のうち、多項式補間、フーリエ級数などで補間する方法、多項式を用いる代りに、距離に応じた重みつき平均をとる方法については、いくつかの難点が指摘されている^{3,4)}。

これに対して、スプライン法は、測定局密度が小さくても、スプライン・パラメータによって滑らかな曲面を得ることが可能であり、また、測定局での測定値がそのまま補間分布曲面の値に採用されるなど、環境汚染データの補間法として望ましい特徴を有している³⁾。

3.2 計算方法

この方法の定式化と差分方程式へのおきかえについて、大西⁴⁾に基づいて述べる。この方法の直観的原理は篠原ら³⁾により与えられている。

座標軸 (x, y, z) を次のようにとる。2次元水平面 (x, y) 上のデータ点におけるデータの値に相当する高さを z とする。データ点 $(x, y) = (x_i, y_i)$, $(i=1, 2, \dots, N)$ において、それぞれ $z = z_i$, $(i=1, 2, \dots, N)$ となるような曲面 $z = Z(x, y)$ を求めることを考える。弾性体の微小変化学論において、歪エ

エネルギーと張力による伸びのエネルギーの和に比例する量として、式(1)が定義される。

$$E = \iint_{A'} \{(\Delta Z)^2 + \sigma(\nabla Z)^2\} dx dy \quad (1)$$

$$\left(\text{ただし, } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} \right)$$

σ は弾性板の歪エネルギーと張力による伸びのエネルギーの係数の比を表している。式(1)の積分の範囲 A' は、対象とする領域 A を含む適当に広い領域とする。 A' の境界 $\partial A'$ が、対象とする領域 A より、十分遠くにとられているならば、境界条件は、

$$\frac{\partial Z}{\partial n} = \Delta Z = 0 \quad \text{on } \partial A' \quad (2)$$

(ただし、 $\partial/\partial n$ は $\partial A'$ の外向き法線の方への微分)

とすればよい。

式(1)の変分を0とおくと、

$$\Delta^2 Z - \sigma \Delta Z = 0 \quad (3)$$

すなわち、 $Z(x, y)$ はデータ点においては、データ値をとり、 A において式(3)を満たし、境界 $\partial A'$ において、条件式(2)を満たすような関数として定まる。

実際の計算のために、式(3)を差分方程式におきかえる。

簡単のため、領域 A' 内に、正方形格子

$$\left. \begin{aligned} x &= X_\alpha \quad (\alpha=1, 2, \dots, p), \\ y &= Y_\beta \quad (\beta=1, 2, \dots, q), \\ X_\alpha - X_{\alpha-1} &= Y_\beta - Y_{\beta-1} = h, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

を考える。各格子点 (X_α, Y_β) に対して、代表領域 $\gamma_{\alpha, \beta}$ を

$$\left. \begin{aligned} X_\alpha - \frac{h}{2} &\leq x < X_\alpha + \frac{h}{2}, \\ Y_\beta - \frac{h}{2} &\leq y < Y_\beta + \frac{h}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と定義する。

式(3)は、次の二つの差分方程式におきかえられる。メッシュ $\gamma_{\alpha, \beta}$ の Z を $Z_{\alpha, \beta}$ とする。

$$\left. \begin{aligned} (Z_{\alpha-1, \beta} + Z_{\alpha+1, \beta} + Z_{\alpha, \beta-1} + Z_{\alpha, \beta+1} - 4Z_{\alpha, \beta})/h^2 &= V_{\alpha, \beta} \\ (V_{\alpha-1, \beta} + V_{\alpha+1, \beta} + V_{\alpha, \beta-1} + V_{\alpha, \beta+1} - 4V_{\alpha, \beta})/h^2 &= \sigma V_{\alpha, \beta} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、 $\gamma_{\alpha,\beta}$ がデータ点 (x_i, y_i) を含む場合には、補間曲面がデータ点を通ることを表す式(例えば式(7))

$$z_i = Z_{\alpha,\beta} + \frac{Z_{\alpha+1,\beta} - Z_{\alpha,\beta}}{h}(x_i - X_\alpha) + \frac{Z_{\alpha,\beta+1} - Z_{\alpha,\beta}}{h}(y_i - Y_\beta) \quad (7)$$

で、式(6)をおきかえる。または、データ点が $\gamma_{\alpha,\beta}$ の中心点にあると見なして、そのデータ点を通ることを表す式をおきかえる。結局、式(6)または式(7)から逐次近似法により解を求め、格子点での値を得ることができる。

3.3 計算上の条件

式(1)の計算の範囲 A' を長方形にとった。格子、境界条件、初期値は次の通りとした。

代表領域の幅を $h=1$ kmとした。代表領域(以下、メッシュと呼ぶ。)に一つのデータが存在するとき、それを、メッシュに与えるデータとして採用した。複数のデータが存在するときは、その算術平均を採用した。

境界条件として、境界における1次、2次の微分係数を0とした。つまり、 $Z_{1,\beta} = Z_{3,\beta}$ 、 $Z_{2,\beta} = Z_{3,\beta}$ (ただし、ここで $\beta=3, 4, \dots, q-2$)である。 $Z_{\alpha,1}$ 、 $Z_{\alpha,2}$ についても同様である。

領域 A' の四囲から、境界条件を与えるためのメッシュの2列分を除いた長方形領域を A とする。

スプライン法による計算を開始するとき、全格子点(境界各2列も含む)に次の方法により初期値 $Z_{\alpha,\beta}^0$ を与えた。データ点が存在するメッシュにおいては、

$$Z_{\alpha,\beta}^0 = \sum_{i=1}^a z_i/a$$

(ただし、 z_i はメッシュ $\gamma_{\alpha,\beta}$ に含まれるデータの値、 a はその数)

データ点が存在しないメッシュにおいては、

$$Z_{\alpha,\beta}^0 = \{(z_i)_1 \times d_2 + (z_i)_2 \times d_1\} / (d_1 + d_2)$$

(ただし、 $(z_i)_1$ 、 $(z_i)_2$ は格子点 (X_α, Y_β) に最も近い二つのデータ点のデータの値、 d_1 、 d_2 は格子点からそれぞれのデータ点までの距離の2乗。なお、最も近いデータ点が3個以上存在するときは、データ点につけられている番号の若いものから2個をとるとした。)

逐次近似の計算では、次の式が成立するとき収束したものとみなした。

$$\max_{(X_\alpha, Y_\beta) \in A} |Z_{\alpha,\beta}^i - Z_{\alpha,\beta}^{i+1}| < 10^{-3}$$

(ただし、 $Z_{\alpha,\beta}^i$ は、繰返し回数 i 回目ときの格子点 (X_α, Y_β) の値を示す。)

なお、この収束判定条件を満足しなくても、繰返し回数 i が500となったら、計算を打切った。

3.4 パラメータ σ の値の決定法

スプライン法を用いる場合、パラメータ σ の値によって、補間分布曲面の形状が異なる。篠原ら³⁾は、SO₂の実測データを補間した結果と実測値との比較から、 $\sigma=1$ 近辺がよい結果を与えたとしている。

本報では、次のような方法で σ の最適値を調べる。

① 領域 A に存在する N 個の測定局から、ランダムに1局を取除いて、補間曲面を作る。取除かれた局 i の測定値を Z_i 、補間によって得られた推定値を \hat{Z}_i とする。 N 局からランダムに1局取除く操作を J 回繰返し、次の値を求める。

$$\eta = \frac{\sum_{i \in \Omega} (\hat{z}_i - z_i)^2}{\sum_{i \in \Omega} (z_i - \bar{z})^2}$$

(ただし、 Ω は取除いた局の集合で、 Ω の要素の数は J 、また、 $\bar{z} = \frac{1}{J} \sum_{i \in \Omega} z_i$)

② 異なるいくつかの σ の値について、同じ Ω を用いて①の計算を行い、 η が小となる σ を選ぶ。

4. 補間の適用性の検証方法

スプライン法で汚染濃度が必要な程度に補間できているか否かの議論は、厳密には真の濃度分布がわからないと行えない。しかし、真の濃度分布は知りえないので、真の濃度分布に十分近いと推定される近似濃度分布(以下、これを近似分布という。)を得ることを考える。

本節では、近似分布のスプライン法による形成法と、必要な程度の近似になっているか否かの判定法を提案する。

4.1 近似分布の決定

いま、 $x-y$ 平面上の領域 A における真の濃度分布曲面を $P(x, y)$ とし、対象領域 A には N 個の測定局が存在するとする。 s を N 局から N 局を選び出す順列の一つとする。 i 番目の順列と特定する場合には、 $s(i)$ と記す。 n を全ての順列のうち、ランダムに選んだ順列の集合、また、その要素数とする。 $P_k^s(x, y)$ を s なる順列のうち k 番目までの測定局データをスプライン法で補間した曲面とする。さらに、 $P_k^{s*}(x, y)$ の比較曲面を

$$P_k^{s*}(x, y) = P_{k+r}^s(x, y) \quad (8)$$

で定義する。ただし、 r は1以上の整数。また、一般に関数 $F(x, y)$ の A 上の平均値を $[F]$ で表す。

$$[F] = \frac{1}{A} \iint_A F(x, y) dx dy$$

スプライン法による補間分布曲面 $P_k^s(x, y)$ と、これとの比較曲面 $P_k^{s*}(x, y)$ のへだたりを、 k を増大させつつ、評価する。へだたりの尺度を、

$$D_k^s = \frac{1}{A} \iint_A |P_k^s(x, y) - P_k^{s*}(x, y)| dx dy \quad (9)$$

とする。

D_k^s は、 $k \rightarrow$ 大のとき、 $P_k^s(x, y)$ が $P(x, y)$ に近づくなら D_k^s は零に近づく傾向を持つ。なぜならば、もし、 N が無限大であって、 k が大になるとき、

$$\frac{1}{A} \iint_A |P_k^s(x, y) - P(x, y)| dx dy \rightarrow 0 \quad (10)$$

とする。一方、次の式がなりたつ。

$$\begin{aligned} D_k^s &= \frac{1}{A} \iint_A |P_k^s(x, y) - P(x, y) - P_k^{s*}(x, y) + P(x, y)| dx dy \\ &\leq B_k^s + B_{k+r}^s \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、ここで、

$$B_k^s = \frac{1}{A} \iint_A |P_k^s(x, y) - P(x, y)| dx dy \quad (12)$$

$$B_{k+r}^s = \frac{1}{A} \iint_A |P_{k+r}^s(x, y) - P(x, y)| dx dy \quad (13)$$

よって、式(10)が成立つとすれば、式(11)の右辺の2項のそれぞれが零に近づくので、式(9)も零に近づく。

したがって、測定局が真の汚染濃度曲面 $P(x, y)$ の形状の特徴をとらえるだけ密に存在していれば、 $N!$ 個ある順列 s の多くのものについては、 D_k^s は k の増大につれて減少する傾向を持ち、零に近い値をとるであろう。

次に、 $P_k^{s*}(x, y)$ のそれ自身の平均値 $[P_k^{s*}]$ からのへだたりの程度を次式で定義する。

$$R_k^s = \frac{1}{A} \iint_A |P_k^{s*}(x, y) - [P_k^{s*}]| dx dy \quad (14)$$

$P_k^{s*}(x, y)$ が、 k の増大と共に、 $P(x, y)$ に近づくとすれば、 R_k^s も一定値に近づく。なぜならば、 N が無限大であって、 k が大になるとき、

$$\frac{1}{A} \iint_A |P_k^{s*}(x, y) - P(x, y)| dx dy \rightarrow 0 \quad (15)$$

としている。一方、

$$R = \frac{1}{A} \iint_A |P(x, y) - [P]| dx dy$$

とする。このとき、

$$\begin{aligned} & R_k^s - R \\ &= \frac{1}{A} \iint_A |P_k^{s*}(x, y) - P(x, y) - [P_k^{s*}] + [P] + P(x, y) - [P]| dx dy - R \\ &\leq \frac{1}{A} \iint_A |P_k^{s*}(x, y) - P(x, y)| dx dy + \frac{1}{A} \iint_A |[P_k^{s*}] - [P]| dx dy \end{aligned} \tag{16}$$

なる関係が成立つ。式(16)の右辺第2項は、

$$\left| \frac{1}{A} \iint_A \{P_k^{s*}(x, y) - P(x, y)\} dx dy \right|$$

と変形できる。式(15)により、式(16)の右辺は、 k が大になるにつれて、零に近づくので、 R_k^s は一定値 R に近づく。

近似分布は、次の考え方で定める。すなわち、ある順列 s をとったとき、十分長い k の区間 $[k', k'']$ に属する k について、 D_k^s/R が1より十分小なら、ある k の値についてのみ偶然 $P_k^s(x, y)$ と $P_{k+r}^s(x, y)$ との曲面が近づいたため D_k^s/R が小になるのではなく、式(11)における B_k^s と B_{k+r}^s が小になっているために、 D_k^s/R が上からおさえられて D_k^s/R が安定して小になっていると考える。 R はもとより知れないので、 R に近づく値 R_k^s をこれに代える。

結局、 D_k^s/R_k^s が十分長い区間 $[k', k'']$ で小でありつづけると、測定局の追加が、分布曲面のそれ自身の平均値からのへだたり(分布曲面の A 上での変化)に比べ、もはや、 $P_k^s(x, y)$ の分布曲面をわずかしが改良しえないだけ、 $P_k^s(x, y)$ が $P(x, y)$ に近づいたと考える。

n 個の順列のうち i 番目の順列 $s(i)$ についての D_k^s 、 R_k^s 、 $P_k^s(x, y)$ をそれぞれ、 $D_k^{s(i)}$ 、 $R_k^{s(i)}$ 、 $P_k^{s(i)}(x, y)$ とする。

n 個の順列 s を考えたとき、 $D_k^{s(i)}$ は $(R_k^{s(i)})$ も、 $s(i) \in n$ によって異なる。特定の $s(i)$ によって、測定局を増やしても、他の $s(j)$ に対して存在した十分長い区間 $[k', k'']$ が存在しないこともありうる。順列 $s(i)$ によっては、その終わり近くではじめて、分布曲面の特徴を支配している測定局があらわれることもあるからである。そのような順列を含みうる n 個の順列を、 N 個の測定局の順列のすべて($N!$ 個ある)からランダムに選び、 $D_k^{s(i)}/R_k^{s(i)}$ の各 k での平均値を m_k 、標準偏差を s_k とする。

m_k または $m_k + s_k$ の値が小でありつづける十分長い区間 $[k', k'']$ を考える。このような区間が存在するとき、 n 個あるうちの多くの $s(i)$ について濃度分布 $P_k^{s(i)}(x, y)$ 、 $k \in [k', k'']$ は真の濃度分布 $P(x, y)$ に近いと推定され、なおかつ、測定局の設置数は k' 個で不足がないものと推定される。

このとき、近似分布曲面 $P_a(x, y)$ は、次のものを採用すればよい。まず、 $s(i) \in n$ のうち、 $D_k^{s(i)}/$

$R_k^{s(i)}$ の値が、 $m_k + s_k$ よりも、 $[k', k'']$ の全てで小さな値をもつ順列 $s(i)$ を選び出す。その i の集合を m 、集合の要素数も m とすると、

$$P_a(x, y) = \frac{1}{mI} \sum_{i \in m} \sum_{k \in [k', k'']} P_k^{s(i)}(x, y) \quad (17)$$

(ただし、ここで、 I は $[k', k'']$ に属する整数の個数である。) そのほか、近似分布曲面として次のようなものを採用してもよい。

$$P_a(x, y) = \frac{1}{m} \sum_{i \in m} P_k^{s(i)}(x, y) \quad (18)$$

$$P_a(x, y) = P_N(x, y) \quad (19)$$

(ただし、 $N \geq k''$ のときに限る。また、 $P_N(x, y)$ はすべての測定局データを採用してスプライン法で得た曲面である。)

一方、このような近似分布が得られたならば、使用したスプライン補間法により、汚染濃度が十分補間され得たと推定される。

5. 実データへの適用

前節の方法の有効性を検討するために、この方法を実際の大気汚染測定データに適用する。有効性の検証には、起伏が顕著な濃度分布を用いるのが望ましいので、関東地域において、光化学スモッグが発生して、オキシダント濃度が高かった昭和49年8月3日のデータを採用した。この日の光化学スモッグの発生の継続時間(午前10時頃から午後5時頃まで)の中から、汚染パターンの異なる時刻 $t_1=10$ 時、 $t_2=12$ 時、 $t_3=14$ 時、 $t_4=16$ 時を選び出した。濃度分布をスプライン補間する領域 A は、東西73.92 km(東経139°10'0"から140°7'30"まで)、南北46.25 km(北緯35°24'0"から35°49'30"まで)の長方形の領域で、この中に図1に示す $N=55$ の測定局がある。領域 A' を、東西について45"ごとに66分割、南北について30"ごとに50分割してメッシュをつくった。この分割法は総理府統計局の経緯度法による1キロメッシュの形成法に基づいている。ひとつのメッシュの大きさは、厳密には、東西1.120 km、南北0.925 kmとなる。

5.1 パラメータ σ の決定

はじめに、3.4の方法に従って σ の値を決定する。

複数の分布曲面について σ の最適値を検討するため、上記データのうち、12時(t_2)と14時(t_3)におけるものを用いた。 $J=17$ とした。図2は η と σ の関係を表す。ランダムに取除いた局の中になたまま分布曲面の特徴を表す重要な数局が含まれていたため、 η の値が比較的大きくなった。 $\sigma=1.0 \sim 10.0$ では η はほぼ一定である。 σ の値として1.0から10.0の間のいずれかの値を採用すればよ

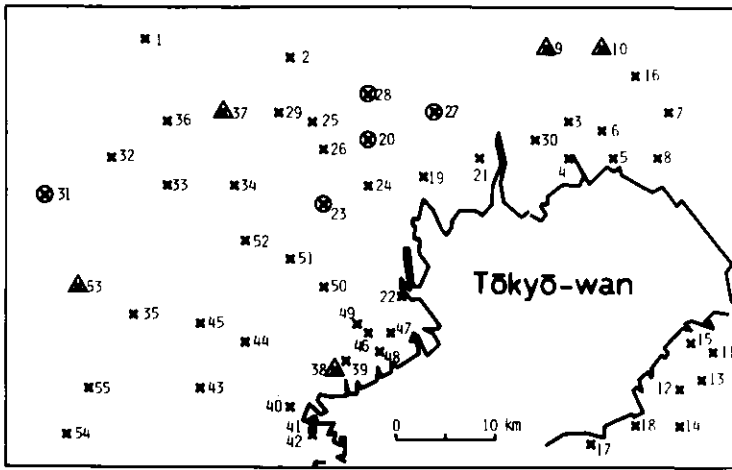


図1 スプライン法の適用性を検討する領域及び測定局

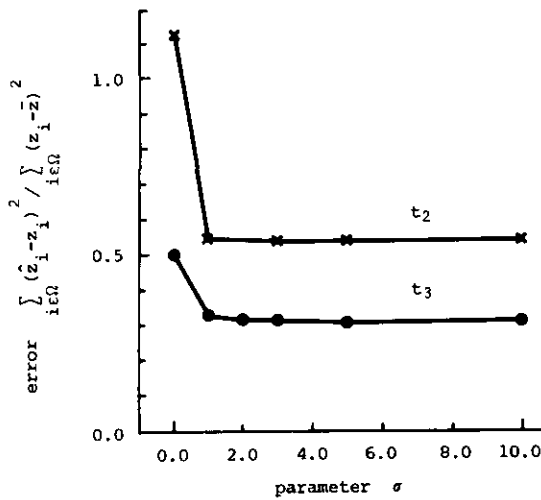


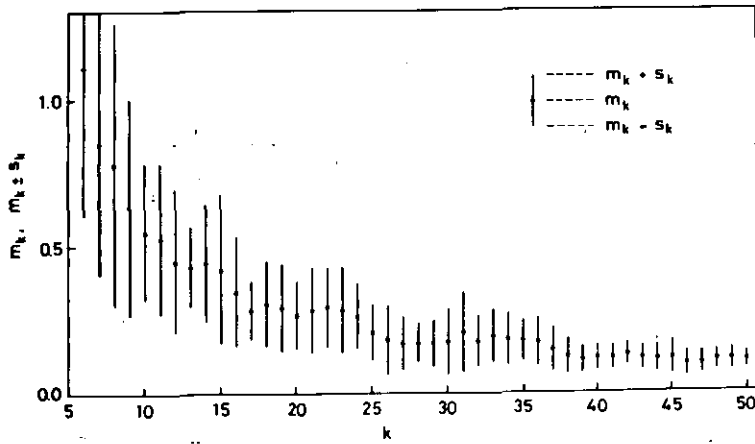
図2 パラメータ σ と補間法による推定値の誤差との関係

い。本報においては $\sigma=5.0$ を用いる。

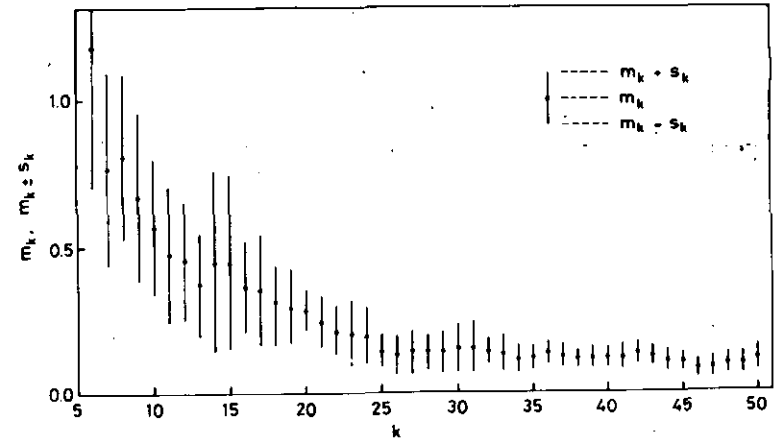
5.2 有効性の検討

(8)式の r として、 $r=5$, $r=1$ を用いる。順列を $n=10$ 個とったときの k における $s(i)$ による $D_k^{s(i)}/R_k^{s(i)}$ についての m_k と $m_k \pm s_k$ を $t_1 \sim t_4$ について、また $r=5$, $r=1$ について、図3～図6に示す。

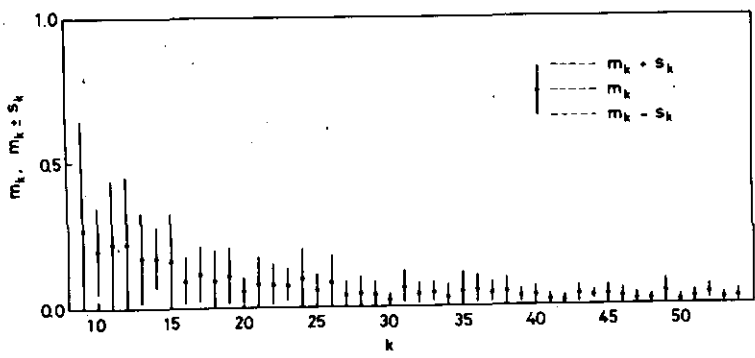
m_k , $m_k + s_k$ の k の増大に伴う減少挙動について観察する。図3～図6において、ある値までの k の増大に対しては m_k , $m_k + s_k$ の減少挙動が顕著に見られ、その値以上の k においては、 m_k , $m_k + s_k$ はほとんど一定の値で推移している。



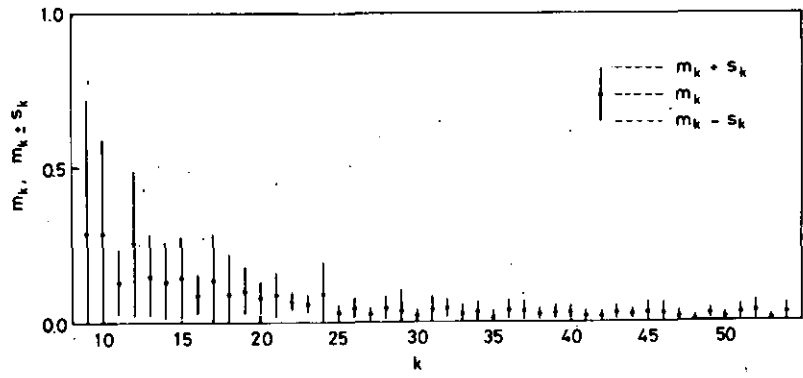
(a) $t=10$ 時, $r=5$



(a) $t=12$ 時, $r=5$



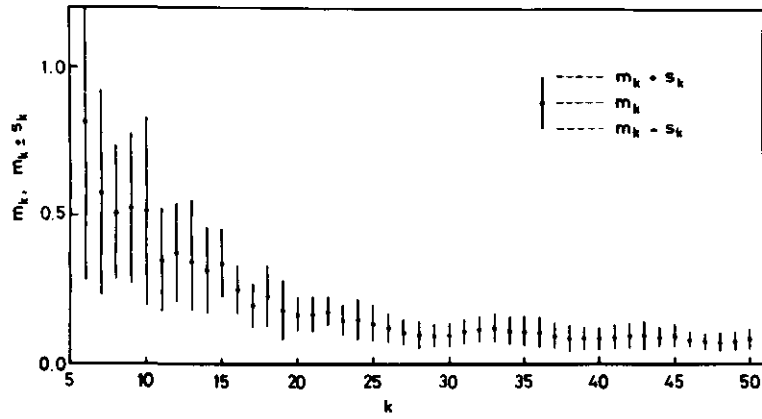
(b) $t=10$ 時, $r=1$



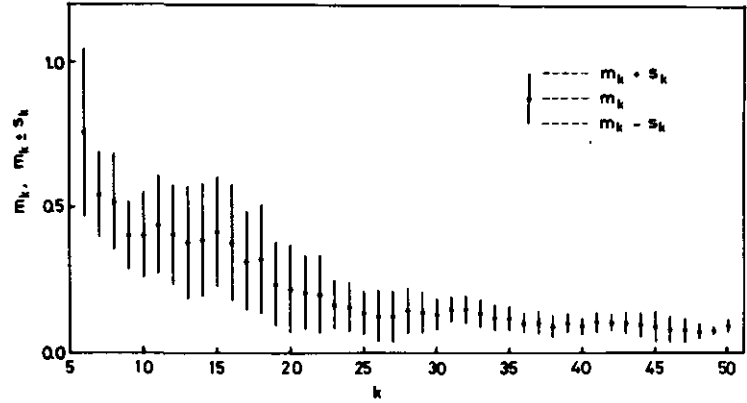
(b) $t=12$ 時, $r=1$

図3 k と $m_k, m_k \pm s_k$ との関係

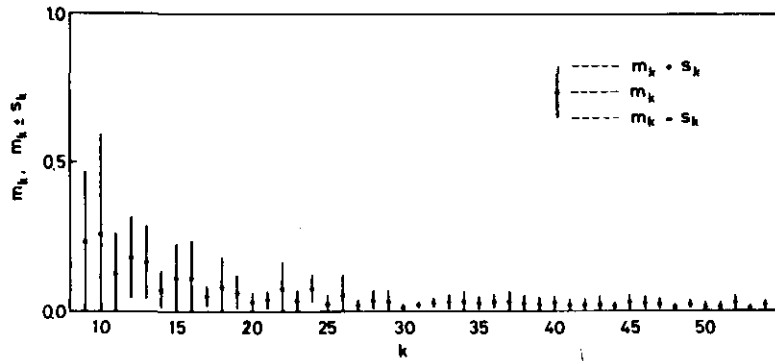
図4 k と $m_k, m_k \pm s_k$ との関係



(a) $t=14$ 時, $r=5$

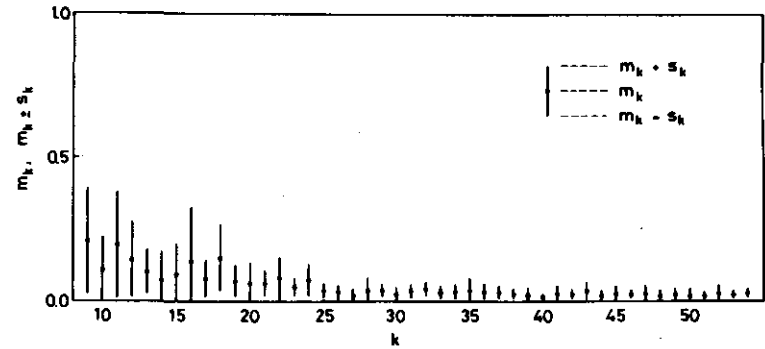


(a) $t=16$ 時, $r=5$



(b) $t=14$ 時, $r=1$

図5 k と m_k , $m_k \pm s_k$ との関係



(b) $t=16$ 時, $r=1$

図6 k と m_k , $m_k \pm s_k$ との関係

測定局のデータは必然的に測定誤差を持つ。 m_k, m_k+s_k が、ほぼ一定値を持つ k の区間では、この誤差が支配的要因になっていると思われる。よって、ここでは、この区間において、 $m_k < C_m, m_k + s_k < C_s$ を満たす小さい概数 C_m, C_s をとって、 m_k, m_k+s_k が十分小かどうかを判断する値とする(表2)。 $D_k^{s(i)}/R_k^{s(i)}$ の意味を考えれば、 $m_k < C_m, m_k+s_k < C_s$ を満たす k' の値だけの個数の測定局があれば、濃度分布の A 上の変化の程度に比べて、ある程度まで良い精度の近似濃度分布が得られていると考えられる。実用上は、 C_m, C_s の値は、個々の事例の目的に応じて設定されなければならない。

表2に、 $m_k < C_m$ または $m_k+s_k < C_s$ を満たす k の最小値(時刻 t_i における分布曲面に対するこの値を k'_i と表す。)を $r=5, r=1$ について示す。4通り求まる k'_i のうち、安全側をとって、最大のものを採用する。

表1 C_m, C_s の値

	C_m	C_s
$r=5$	0.15	0.3
$r=1$	0.05	0.1

表2 $m_k < C_m, m_k+s_k < C_s$ となる k の区間の最小値 k'_i

t_i	$r=5$		$r=1$		$\max(k'_i)$
	m_k	m_k+s_k	m_k	m_k+s_k	
10時	37	32	37	37	37
12時	25	24	25	25	25
14時	25	19	27	27	27
16時	25	23	25	25	25

一方、 m_k, m_k+s_k の k に対する挙動において、減少挙動の顕著な部分と、ほとんど一定値で推移している部分との間で、 m_k, m_k+s_k と k との関係には、「折れ曲がり点」が見出される。折れ曲がり点の k の値を、図3~図6から、 m_k の曲線と m_k+s_k の曲線の両方を併せて判断して求めた(表3)。

表3に示した結果は表2に示した k'_i と概ね同一である。

より直接的に補間分布曲面の k の増大に伴う挙動を検討するため、次の量 Y_k^s を考える。

表3 折れ曲がり点の k の値

t_i	$r=5$	$r=1$
10時	39	39
12時	25	25
14時	27	27
16時	25	25

$$Y_k^s = \frac{\frac{1}{A} \iint_A |P_k^s(x, y) - P_b^s(x, y)| dx dy}{\frac{1}{A} \iint_A |P_k^s(x, y) - [P_k^s]| dx dy} \quad (20)$$

ここで、 b は正の整数で $k \geq b+1$ 。

Y_k^s は b を固定して、 k を動かすとき、基準となる補間分布曲面 $P_b^s(x, y)$ からの k に対応する補間分布曲面 $P_k^s(x, y)$ のへだたりの程度を、 $P_k^s(x, y)$ と $[P_k^s]$ のへだたりとの比で表したものとなっている。

$b=5$ とし、 Y_k^s を計算した。 $n=10$ だけある順列のうち、主として次の二つの意味のどちらかで特徴的な順列—— k がある程度大のときには、 k の増大にかかわらず、 Y_k^s がほぼ一定となる順列、 k が N に近づいてから、大幅に Y_k^s の値が変化している順列——を 5 個選び出したものを、 t_2 について Y_k^s を図 7 に示す。図 7 より、濃度分布曲面の形の特徴を支配する測定局を順列の終わり近くで取込まない限り、 Y_k^s はある値に収束してゆく傾向があり、すなわち、 k 個程度の測定局のデータで近似曲面が得られていると見なせる。

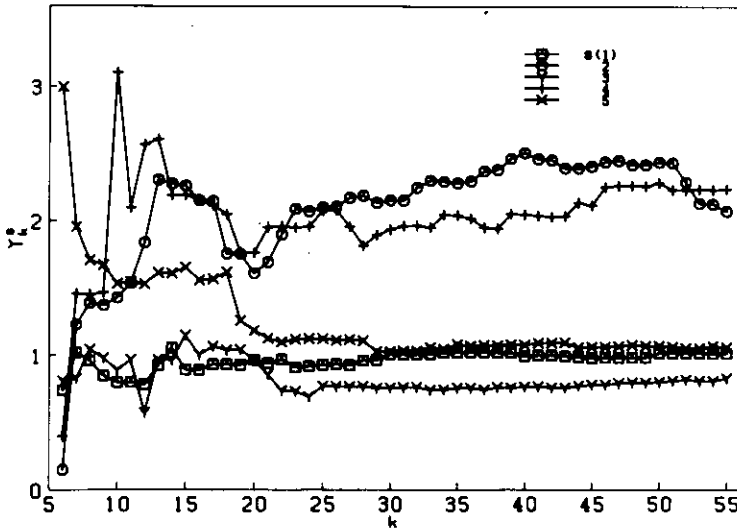


図 7 k とそれに伴う補間分布曲面の一定曲面形状への収束の挙動を表す関数 Y_k^s との関係 ($t=12$ 時)

6. 測定局の最適配置法の概説

環境汚染の測定局の適切な配置のあり方は、モニタリングの目的によって異なる。環境汚染のモニタリングの目的にはいくつかのものがある⁵⁾が、大別すると、

- ① 人間や生活環境に対する汚染ばく露の監視

② 発生源からの汚染物質の排出の監視

③ 汚染対策の評価等のための地域全体の汚染状況の把握

に分類できる。環境汚染の測定局の適切な配置の検討は、これらの目的に応じて行わねばならない。すなわち、①を目的にした場合には、人口の地域的分布状況等を勘案して、②を目的にした場合には、発生源からの汚染の影響が顕著に現れる場所を対象にして、③を目的にした場合では、地域全体の汚染濃度分布パターン⁵⁾の把握に適する場所を対象にして、測定局の設置を考える。しかし、実際の環境汚染モニタリングにおいては、それぞれの目的ごとに別個の測定局が設けられることは少なく、①～③の目的を合わせて満たそうとすることが多い。また、ある一つの目的を満たす測定局配置を検討すると、これが、結果として、他の目的をも満たす測定局であることも多い。たとえば、比較的大きな人口密度や多数の工場を有する都市域において③を目的とする測定局配置を考えると、①、②の目的も達するものであることも少なくない。したがって、以下本報では、③の目的を対象とした測定局配置について論じる。

測定局数が多ければ多いほど一般的には、真の濃度分布に近い濃度分布が得られるが、一方、その設置及び維持管理にそれだけ多くの費用を必要とするので、経済的観点からすれば、測定局の数は少ない方がよい。したがって、測定局の最適配置の問題はできるだけ少ない数の測定局で、できるだけ真の濃度分布に近い分布を推定するためには測定局をどう配置すればよいかを考える問題であると言える。

測定局の最適配置の問題は、現在、例えば、既存都市域における既存の測定局配置をより効率的、合理的なものに見直そうとする場合などにおいて行政的な重要課題となっている⁵⁾。

内藤⁵⁾と落合⁶⁾とは、大気拡散式を用いて予測した濃度分布を真の濃度分布とみなして、この分布を正しく再現する測定局の配置を検討した。

以下では、かなりの密度で測定局がすでに存在している場合において、その環境汚染の実測データを用いることにより、前半で述べた近似分布と必要な測定局数を求める方法に基づいて、削減可能局が存在するかどうかを調べ、それが存在する場合に、削減局を選定する方法を提案する。そして、この選定方法を実際のデータに適用し、この方法が有効であることを示す。新規測定局の最適配置は別の問題となる。

7. 測定局の最適削減法

本報前半によれば、対象地域 A 上で N 個の測定局が既設のとき、そのうちの必要な測定局の数を求めることができる。

4 により、 $m_k, m_k + s_k$ が小でありつづける十分長い区間 $[k', k'']$ が存在するとき、 n 個ある順列のうち、多くの $s(i)$ について濃度分布 $P_k^{s(i)}(x, y), k \in [k', k'']$ は真の濃度分布 $P(x, y)$ に近いと推定され、なおかつ、測定局の設置数は k' で不足がないと推定される。すなわち、 $N - k'$ 個の局は排除しても、モニタリングの目的は達しうると考えられる。既設の N 局のうち $N - k'$ 局を削減しても

良いとしたときに、どの局を選び出すかを以下で論ずる。

N 局から N 局を選び出す順列の全数 $N!$ 個の中には、 k' より少ない測定局データで補間の目的を達するものも有ると考えられるが、具体的にそのような順列を探し出そうとすると、 $N!$ 個の順列すべてについて総当たりに D_k/R_k を求めることになり、多量の計算をしなければならない。これを避けて、本報の考え方では、実用的立場から、 $N-k'$ 個のみの削減を行おうとするものである。

$N-k'$ 個の測定局を削減するとき、残された k' 個の局のデータで補間して作った補間曲面と、4の方法で作った真の分布の近似曲面 $P_a(x, y)$ との差が最小となる順列を用いることが、 k' 局で最大の効果をあげるために望ましい。

N 個の局のうち k' 個の局を残す組合せのすべてについて、この補間曲面の差を計算することは、事実上不可能である。なぜなら、 N 局から k' 局を取出す組合せの個数が通常膨大になるからである。たとえば、 $N=50$ 、 $k'=20$ として、その組合せ数は ${}_{50}C_{20}=4.7 \times 10^{13}$ となる。そこで、次節のような代替方法を提案する。いくつか典型的な濃度分布パターンデータに対して、それぞれ削減局を求めたのち、すべてのパターンに対して削減してよい局として、パターン毎の削減局に共通している局をとることとなる。

8. 削減局決定のための方法

現実的であって、近似的に最適に削減可能局を決定するための方法を以下に与える。

方法は、原理としては、まず、 N 個の全測定局の測定データを用いスプライン補間法で分布曲面を作成し、その曲面形から判断して、最も曲面形への影響が小さいと見られる局を取除き、残りの局の値を用いて再び補間分布曲面を作成する。この分布曲面が元の曲面と大差ないことを確認した後、次に影響の小さいと見られる局を取除き、同様の手続き繰返すものである。

具体的な方法の手順は次のとおりである。

- ① まず、補間に用いる測定局の集合 W_0 を

$$W_0 = \{N \text{局すべて}\}$$

とし、取除きの検討対象となる局の集合 w_0 を $w_0 = W_0$ とする。

- ② W_0 に対する補間分布曲面を $P_0(x, y)$ とする。

③ $P_0(x, y)$ 曲面の形状から判断して、 w_0 に属する局のうち曲面形状に与える影響の最も小さいと見られる1個の局を a とし、 $W_1 = W_0 - \{a\}$ 、また、 $w_0 - \{a\}$ を w_0 とする。すなわち、 a を取除く。 W_1 の測定局のデータの定める補間分布曲面を $P_1(x, y)$ とする。

$$\textcircled{4} \quad \zeta = \frac{\frac{1}{A} \iint_A |P_0(x, y) - P_1(x, y)| dx dy}{\frac{1}{A} \iint_A |P_0(x, y) - (P_0)| dx dy} \quad (21)$$

とが十分小さければ⑤へゆく。そうでなければ③へゆく（このとき、 a を取除くことをやめることになる。以後、 a は取除きの検討対象とならない）。

⑤（取除いた局の総数） $\geq N-k'$ あるいは、 w_0 が空ならば、⑥へゆく。そうでなければ W_1 を W_0 として②へゆく。

⑥ { N 局すべて}- W_1 に属する局を取除く。

測定局の分布曲面形状へ与える影響の大きさの見積りのために、 w_0 の座標 (x_i, y_i) をもつ測定局について次式の値を求め、この値の最小なる局を影響の最小なる局とする。

$$\max\left(\left|\frac{\partial^2 P_0(x_i, y_i)}{\partial x^2}\right|, \left|\frac{\partial^2 P_0(x_i, y_i)}{\partial y^2}\right|\right) \quad (22)$$

(22) 式の値の代りに、(23) 式

$$E = \iint_A \{(\Delta Z)^2 + \sigma(\nabla Z)^2\} dx dy \quad (23)$$

のうち歪エネルギーに相当する部分、すなわち $(\Delta Z)^2$ の値を用いてもよい。(式(23)において $Z(x, y)$ を $P_0(x, y)$ とおきかえる。)

いずれも、分布曲面の曲率の大きさを評価するものであり、どちらを用いても結果に本質的な差はないと思われる。

前記の方法中で手順④を設けている理由は、次のようである。ある測定局における濃度分布曲面の曲率が小さいからと言って、その測定局の取除きが分布曲面に有意な影響を及ぼさないとは限らない。なぜなら、その測定局の周辺のかかなり広い面積において他の測定局がないような場合などは、当該測定局の取除きは、分布曲面に重大な影響を与えることがあると考えられるからである。

9. 代表的濃度データを選択

十分長い時間（たとえば1年間）の中で濃度測定がされた時刻 t の全て（たとえば24/日×365日）のうちから、高い濃度が出現した時刻のデータのみを取出す。この選り出された時刻を t_1, t_2, \dots, t_n とする。汚染濃度が低い場合を選ばないのは、測定の意義が小さいこと、及びそれにもかかわらず、濃度曲面の起伏が小さいため、領域全体での平均濃度からのへだたり R が小であるので、かえって測定局を多く必要とする結果を与えるからである。

10. 実データへの適用

実際の測定データに、8の測定局取除きの手続きを適用する。用いたデータおよび対象領域は5と同じである。

分布曲面形状への影響の見積りには、式(22)を用いた。手順のステップ④のどの大きさの判断基準を0.05とした。

時刻 t_i における分布曲面について、手順を実行して、取除かれた順番に測定局に 1 から順に番号をつける。この番号を J_i とすると、

$$J_i < N - k_i$$

である番号で指定される測定局は取除き可能局である。その個数は $N - k_i$ 個、取除いた後の測定局の数は k_i である。用いたデータについての k_i は表 2 に示されている。表 4 では、各 t_i のそれぞれに

表 4 各測定局の J_i と削減可能局

局のコード	J_i				共通削減可能局	局のコード	J_i				共通削減可能局
	t_1	t_2	t_3	t_4			t_1	t_2	t_3	t_4	
1						31	7	1	7	11	○
2						32			8	12	
3		28	16			33		23			
4		11				34				6	
5		4	26			35		16	5		
6	1	27				36	3	3			△
7		30	18			37		14	2	13	
8	11	8	27			38		17	15	5	
9		6	3	10	△	39					
10		20	6	23	△	40	6				
11		12				41	5		25	28	
12	14	21		29		42			24	27	
13	4	22		7		43			21		
14		2	12			44	16	24		20	
15			10	18		45					
16		10				46				25	
17				15		47	13		23	16	
18		25	9			48					
19						49					
20	9	29	19	22	○	50			14	8	
21	10		13			51				24	△
22				19		52			17	14	
23	15	26	11	4	○	53		7	4	1	
24	8	18	20			54			1	3	
25						55		9		2	
26	18			17	○ ○	削減可能局数 ($N - k'$)	18	30	28	30	5 (10)
27	2	19	22	9							
28	17	5	28	21							
29	12	15		30							
30		13		26							

ついでに取除き可能局を示した。番号がついている局が各 t_i における取除き可能局である。全ての t_i について番号が付されている局を選び出せば、求める共通な5個の取除き可能局(以下、これを削減可能局と称す)が求められる。これを○印で示した。

各 t_i は高い汚染濃度が出現する時刻として選び出されたものであるが、このうち、 $t_1=10$ 時の場合は、光化学スモッグの発生が始まったばかりの段階であり、濃度分布曲面の起伏が他と比べてそれほど著しくない場合であるので、4で述べた理由により、取除き可能局を検討する対象から除外することも考えられる。その場合、前述の5局(○印を付したもの)に新たに追加される5個の削減可能局(表4中△印を付したもの)の合計10局である。

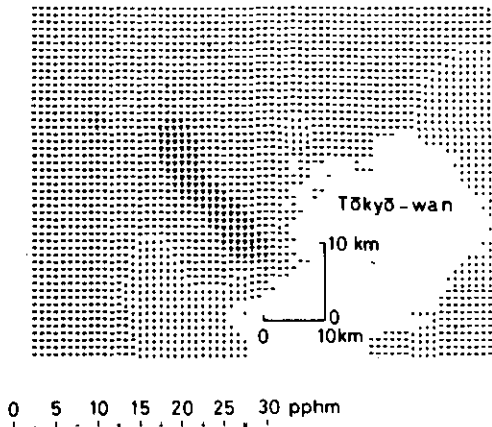
図1に、削減可能局と残りの測定局の位置関係を図示した。削減可能局については、前述と同じ意味の○印と△印で囲んで示した。

11. 結果の検討

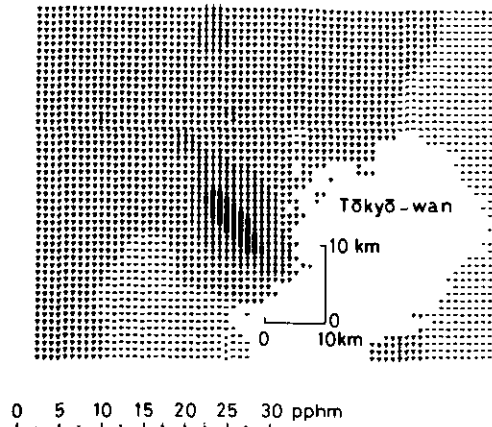
これまでに述べて来たところにより、取除いても結果(分布曲面)に大きな差をもたらさない測定局(削減可能局)が明らかとなった。このような測定局の有する条件としては、濃度ピークからはずれた地域で、濃度分布の2次微分の小さい地域、または測定局の配置密度が高い地域に存在するものであることが想定される。図8(a)~図11(a)は、それぞれ $t_1 \sim t_4$ について、全測定局のデータを用いて補間した近似分布曲面 $P_a(x, y)$ である。これらの図と対照すれば、図1において、求められた10個の削減可能局は、2次微分の大きい濃度分布曲面のピークから外れていることが分かる。

削減可能局が正しく指定されているか否かを検討するため、削減可能局として指定された局のデータを用いないで補間曲面を作成し、これを、全ての局(55局)のデータを用いて作成した補間曲面と比較して、差がないかどうかを調べる。図8(b)~図11(b)は、それぞれ $t_1 \sim t_4$ について、5個の削減可能局(表4で○印を付けた局)のデータを用いないで補間した分布曲面である。視覚的に、両者はほとんど同一の分布曲面に見える。すなわち、濃度の高い部分、低い部分は、それぞれ互いにはほぼ一致し、濃度等高線の概形も一致している。また、図8(c)~図11(c)は、それぞれ、 $t_1 \sim t_4$ における取除き可能局(表4中 J_i の番号がつけられているそれぞれ18, 30, 28, 30個の測定局)のデータを用いないで補間した分布曲面である。図8(a)~図11(a)の対応する分布曲面と対照しても上記の意味での視覚的差は、図8(b)~図11(b)のときよりも、やや大きいだけである。

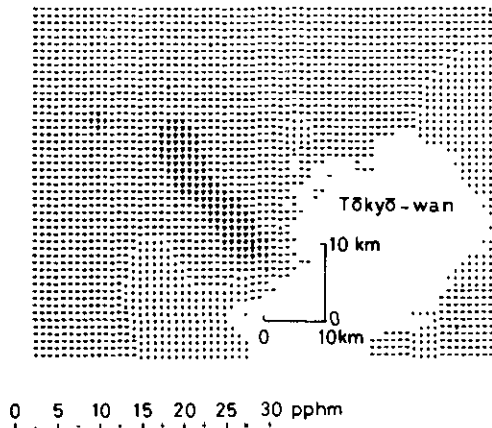
次に、削減可能局決定のためにデータを用いていない時刻についても調べる。同日の $t_i=13$ 時について、全測定局のデータを用いて補間した分布曲面、図12(a)と、削減可能局(表4で○印を付けられた5局)のデータを用いないで補間した分布曲面、図12(b)を比較する。この場合も両者に大きな差は認められない。



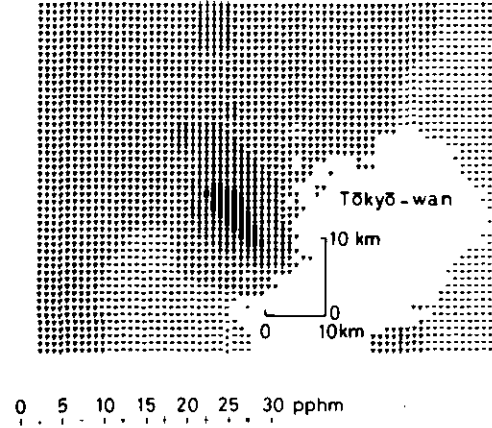
(a) $k=55$



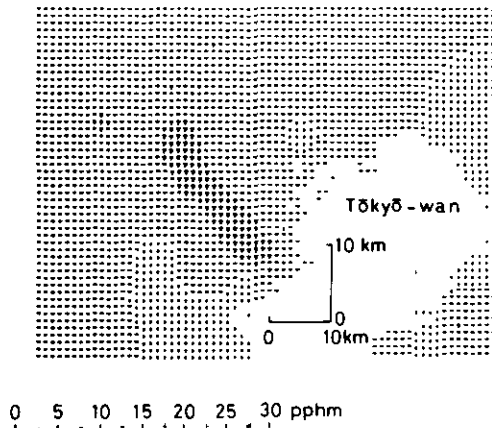
(a) $k=55$



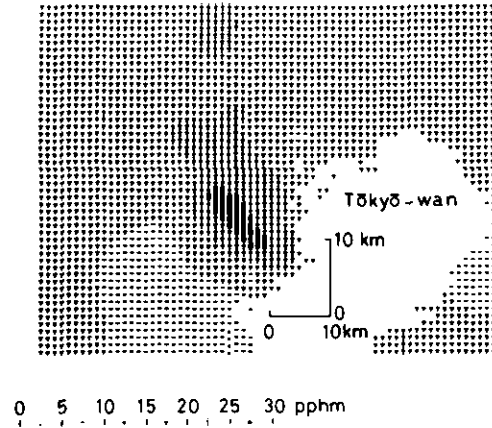
(b) $k=50$



(b) $k=50$



(c) $k=37$



(c) $k=25$

図8 補間分布曲面 $t=10$ 時

図9 補間分布曲面 $t=12$ 時

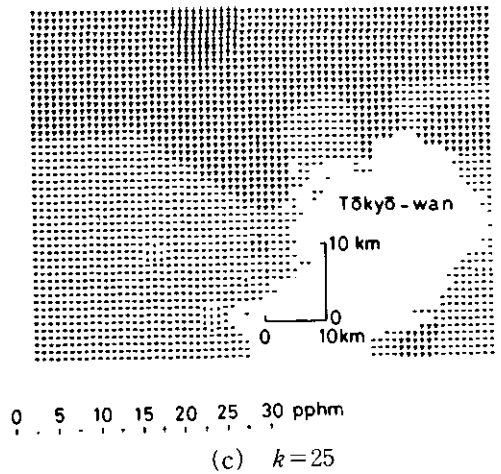
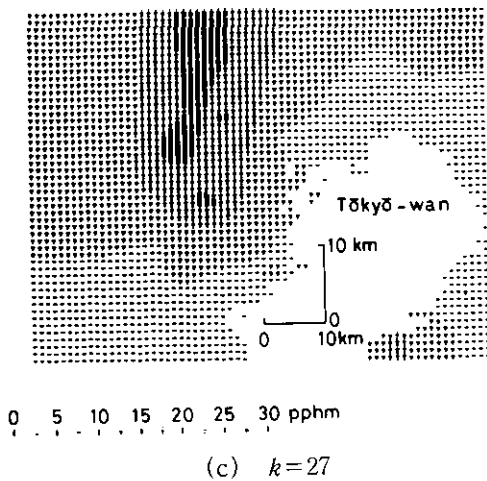
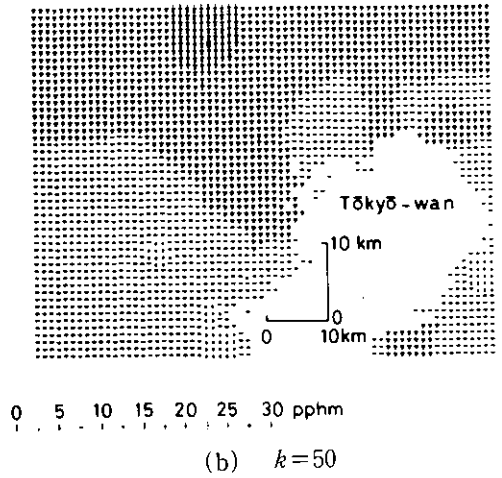
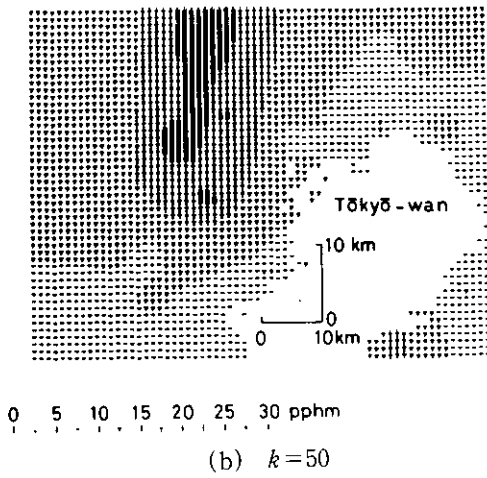
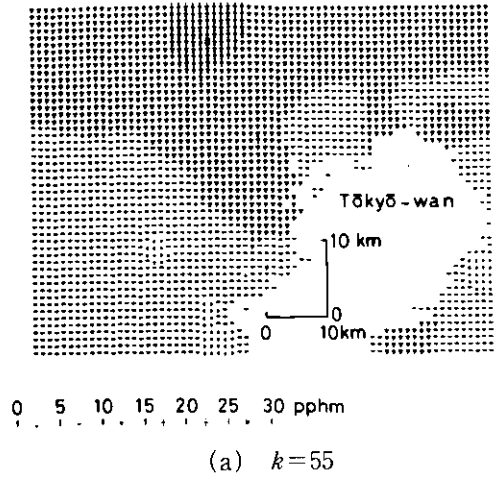
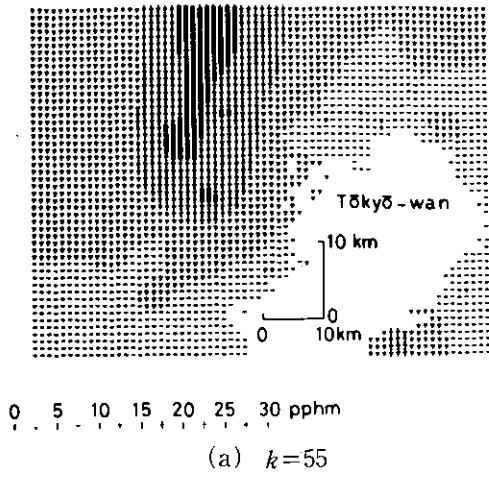


図10 補間分布曲面 $t=14$ 時

図11 補間分布曲面 $t=16$ 時

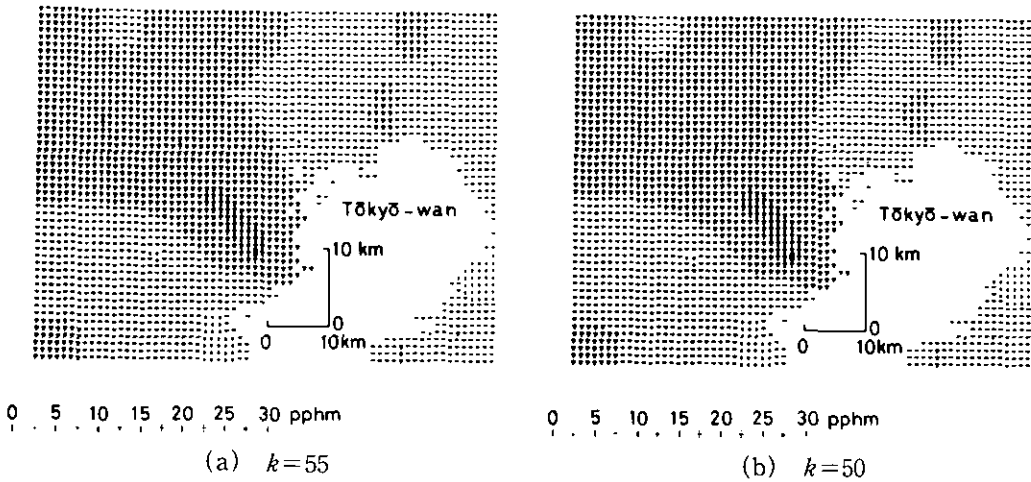


図12 補間分布曲面 $t=11$ 時

本報では、夏期の特定の日のオキシダントの濃度データを用いて検討しているが、これはオキシダントが太陽光線が強く、一定の気象条件下で生じるものであり、他の季節における検討は意義が小さいからである。

図1において削減局が、20、27、28番あるいは9、10番のように、隣合っているものもある。これらの局の上に、オキシダントピークが来た記録がないかを検討すること、安全のため、隣合った削減局のひとつを残しておくことなど、実務的配慮が必要であろう。

なお、本報における測定局の最適配置の考え方は、濃度分布パターンを適切に把握するのに必要な測定局配置という観点からの一つの考え方に過ぎない。一般論として測定局の最適配置を考えるには次の点の検討が必要である。すなわち、モニタリングの目的を検討し、それに応じた最適配置を考える必要があること。対象とする測定局の実際上の設置場所は測定局の維持管理のしやすさ等実務上の観点からの検討も必要であることなどである。したがって、本節において削減可能局として選定された測定局が実際のモニタリングシステムにおいて削減すべき測定局であるとするには、上記の検討が追加されねばならない。

12. 結 言

遠隔計測法も含めた、大気汚染測定と比較評価に資すべく、地上測定局方式に基づく分布パターンの生成とその評価、および、測定局の最適配置法につき検討した。

離散的な地点で測定された大気汚染データを2次元の分布パターンとして表すためのデータ補間法として、スプライン法を採用した。得られた補間分布曲面が近似分布曲面と見なせるかどうかを判断するための判断基準を与える手続きを提案した。この基準を実際の大気汚染データに適用することにより、スプライン法の大気汚染データの補間への適用性が良好であることを実証した。

また、この手続きにより、近似分布を得るに必要な最小の測定局数が、代表的な分布パターンごとに求められた。この最小数に基づき、既存の大気汚染測定局網に関し、削減可能局の実用的な準最適選定法を示した。この選定法を実際のデータに適用し、採用しうる方法であることを実証した。

地上測定局網について、分布パターンが十分な精度で推定されているか否かの判断のためには、上述の方法では、局が必要以上の個数存在していなければならない矛盾がある。このことは、新規に測定システムを建設するときは、判断法を非実用的なものにする。この難点を除くためには、i) レーザーレーダーで一時的に濃度分布パターンを測って、補間で得られた分布パターンの評価をすることのほか、ii) 移動式または、仮設の地上測定局を一時設けて、補間精度の評価をすることも考えられる。測定局の最適配置についても、同様の議論になるのは明らかであろう。

上の議論と関連して、濃度分布パターンの大略を測るために常時レーザーレーダーを用い、地上濃度の監視のために、地上測定局をいくつか置くという方式も考えられるであろう。

いずれにせよ、レーザーレーダーによる方式が、地表測定値とどの程度的一致を見るかを明らかにすることが、大気汚染測定システムの総合評価を行う上で不可欠である。

謝 辞

用いたデータは国立公害研究所環境データベースによる。同データベースにデータを提供された関係自治体をはじめ、同データベース関係者に謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) Gordin, W.R., G.J.McRae and J.H.Seinfeld (1979): A comparison of interpolation methods for sparse data: Application to wind and concentration fields. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 761-771.
- 2) 渡津秀孝・近藤 啓・富田 豊・大恵俊一郎(1980): スプライン補間による大気汚染評価とその精度について. 徳島大学工学部研究報告, No.25, 59-71.
- 3) 篠原正則・内藤正明(1980): スプライン法による大気汚染2次元分布の推定. *環境情報科学*, 9, 62-64.
- 4) 大西行雄(1975): スプライン法を用いた2次元補間について. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 31, 259-264.
- 5) Naito, M. and Ochiai, M.(1982): On optimal allocation of air monitoring stations. *Proceedings of the International Seminar on Air Quality Management and Related Energy Policy*, Seoul, Korea, 247-266.
- 6) 落合美紀子(1979): 環境モニタリング・ステーションの適正配置について. *環境情報科学*, 8, 83-85.

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第 1 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 — 霞ヶ浦を対象域として — 昭和51年度. (1977)
第 2 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/52年度 研究報告 (1978)

(改 称)

国立公害研究所研究報告

- 第 3 号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属 9 種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 — 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和52年度 中間報告. (1978)
- 第 5 号 芳香族炭化水素 — 窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究 — 昭和51/52年度 研究報告. (1978)
- 第 6 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(II) — 霞ヶ浦を中心として — 昭和53年度. (1979)
- 第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- 第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和52/53年度 研究報告. (1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 — 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和53年度 中間報告. (1979)
- 第 10 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/53年度 特別研究報告. (1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2 Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
(多摩川に発生するユスリカの研究
— 第 1 報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係 —
— 第 2 報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について —)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和53, 54年度 特別研究報告. (1980)
- 第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和54年度 特別研究報告. (1980)
- 第 16 号 計測車レーザ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 特別研究中間報告 — 環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究 (フィールド研究1). (1982)
- 第 33 号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 大気運動と大気拡散過程のシミュレーション — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 34 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 35 号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究. (1982)
- 第 36 号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究 — 昭和55, 56年度 特別研究報告. (1982)
- 第 37 号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究. (1982)
- 第 38 号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
(環境標準試料「地底質」の調製, 分析及び保証値)
- 第 39 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和56年度 特別研究報告. (1982)

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 – Progress report in 1978-1979. (1980)
- No.18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- No.19* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Lake current of Kasumigaura (Nishiura) – 1978-1979. (1981)
- No.20* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Geomorphological and 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 man's utilization of lake water resources – 1978-1979. (1981)
- No.25* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Growth characteristics of blue-green-algae, *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 Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
 Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- No.30* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1979-1980. (1982)
- No.31* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1980. (1981)
- No.32* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). (1982)
- No.33* Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Simulation of atmospheric motions and diffusion processes – Progress report in 1980. (1982)
- No.34* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1980. (1982)
- No.35* Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic. (1982)
- No.36* Studies on the method for long term environmental monitoring – Progress report in 1980-1981. (1982)
- No.37* Study on Supporting Technology for Systems Analysis of Environmental Policy. (1982)
- No.38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
- No.39* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1981. (1983)

* in Japanese