

氏 名	齊 藤 保 典
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 4 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 55 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	NO <sub>2</sub> 濃度計測用差分吸収方式レーザレーダに関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 稲場 文男      東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 潮田 資勝

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 総 論

近年全地球規模での環境破壊が深刻化し、特に大気汚染については動の実態の解明が急がれている。大気汚染計測には従来より化学法が用いられてきたが、ポイントサンプリングであったり時間分解能が悪くウェットな方法であるため、よりアクティブな計測法の開発が強く望まれてきた。一方レーザレーダ計測では、非接触でドライな方法で三次元的に広域の遠隔計測を実時間で行え、特に差分吸収方式のレーザレーダは、大気汚染物質計測用として最も実用性に富むものと期待されている。

本研究はこのような背景を基に、大気汚染元凶物質の一つである NO<sub>2</sub>濃度計測用の差分吸収方式レーザレーダを取り上げ、実用化を目指して行った研究開発の成果をまとめたものである。NO<sub>2</sub>の濃度を確実に実時間で遠隔計測することの可能なシステムの研究開発は、その動の実態の把握を可能とし、制御・規制への道を開き、ひいては人類の生活環境の保全保護のために非常に重要で意義のあることと考えられる。

### 第 2 章 差分吸収方式レーザレーダの基本的検討

差分吸収方式レーザレーダの基本的な動作について、最小検出可能濃度の理論的な検討を行った。その結果、大気環境基準値程度の低濃度計測には計測全区間の平均値を求める長光路方式が、距離分解能を有する濃度分布計測には DIAL (Differential Absorption Lidar) 方式が有効であることを示した。さらに大気変動に由来する計測誤差の計算結果より、同時 2 波長方式が理想的な方法

であることを示した。

これらの考察から、同時2波長発振レーザー光源の開発を含め、動作が全て2波長同時に行われるようなシステムの開発が重要であることが指摘され、システム的设计・製作のための重要な指針が得られた。

### 第3章 長光路方式レーザーのための同時2波長発振可能な窒素励起色素レーザー光源の開発および動作特性

長光路方式の送信光源として、窒素レーザー励起色素レーザーについて検討を行い、励起用レーザーとして、エネルギー4.6 mJ、総合効率0.18%と、高効率で高出力の小型LC反転型窒素レーザーを製作した。さらに高効率化のためには残留抵抗値の低減化が重要なこと、光軸直交ガスフロー型で2~3倍の出力の伸びがあることなどを明らかにした。

次に、色素レーザーの波長同調法として干渉フィルタを共振器内に挿入する方法を提案し、有効性を実験的に検証した。また2枚の干渉フィルタを用いることで、2波長同調発振光を同時に同一光路上に得ることが出来た。図1に窒素レーザー励起同時2波長発振色素レーザーの同調スペクトル特性を示す。

これらの結果より、長光路方式の送信光源として実用可能で良好な特性を有する同時2波長発振色素レーザー光源が開発出来た。

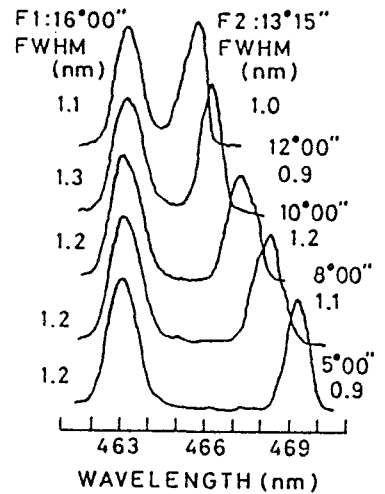


図1 窒素レーザー励起同時2波長発振色素レーザーの同調スペクトル特性

### 第4章 DIAL方式レーザーのための同時2波長発振可能なフラッシュランプ励起色素レーザーの開発および動作特性

DIAL方式の送信光源として、フラッシュランプ励起色素レーザーについて検討を行った。同軸型フラッシュランプを用い、放電回路内残留インダクタンスの低減化に注意して構成するなどの結果、従来のものにくらべ80~200nsもの放電光の立ち上がり時間が短縮され、良好な特性を持つ励起回路が得られた。また色素溶液と冷却水の温度差、色素溶液自身の温度が動作特性に及ぼす影響など、高出力・安定化に向けて技術的に重要な知見が得られ

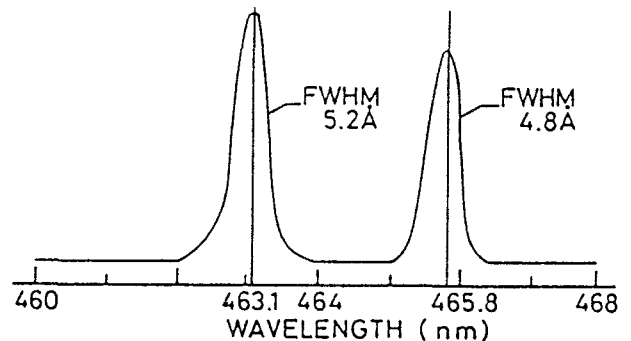


図2 フラッシュランプ励起同時2波長発振色素レーザーの同調スペクトル特性

た。

干渉フィルタ波長同調法を本色素レーザに適用し、ダブルプリズム同調法と比較した結果、発振スペクトル幅が $1/2$ 以下で2倍の出力強度を有する良好な特性の発振光が得られた。図2にフラッシュランプ励起同時2波長発振色素レーザの同調スペクトル特性を示す。本同調法は共振器構造が単純で波長同調も比較的容易なことから、DIAL方式のように固定した2波長を特に屋外で使用するような場合には、実用上有効な方法であると判断される。

### 第5章 NO<sub>2</sub>濃度計測用差分吸収方式レーザーダシステムの設計・製作

NO<sub>2</sub>濃度計測を目的として、差分吸収方式レーザーダシステムの設計・製作を行った。同時2波長長光路方式のシステムの構成を図3に、同時2波長DIAL方式のシステムの構成を図4に示す。送信光源に干渉フィルタ波長同調方式同時2波長発振色素レーザを用いたこと、受信・処理系においても2波長同時動作が可能であること、汎用性の高いマイクロコンピュータを使用したことなどが、本システムの特徴といえる。

処理プログラムは、計測器制御及びデータ収集プログラムと実時間解析処理プログラムからなり、約2分で1回の計測（100ショット積算）が可能で、これらの性能は実用上十分な利用価値を有するものと判断される。

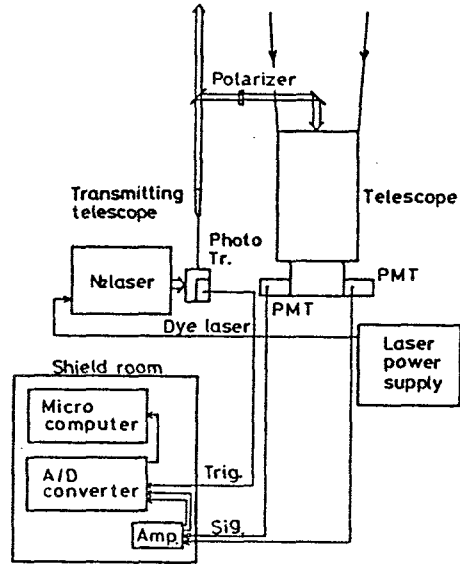


図3 窒素レーザ励起同時2波長長光路差分吸収方式レーザーダシステムの構成図

### 第6章 同時2波長差分吸収方式レーザーダシステムによるNO<sub>2</sub>の遠隔濃度計測

前章で製作した二つの差分吸収方式レーザーダシステムを用いて、実際の排煙内に含まれるNO<sub>2</sub>の遠隔濃度計測を試みた。

同時2波長長光路方式では、513m遠方の排煙内に含まれるNO<sub>2</sub>の遠隔濃度計測を試み、その時間変化を明瞭に捕らえることが出来た。計測結果の一例を図5に示す。計測誤差は、排煙

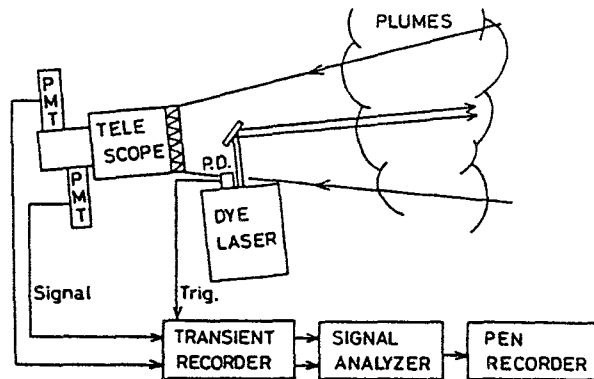


図4 フラッシュランプ励起同時2波長DIAL方式レーザーダシステムの構成図

がない場合で約±25ppb・km以下、排煙時には約±70ppb・kmと環境基準値程度の低濃度計測にも十分適応可能なシステムであることが実験的に確認された。同時2波長DIAL方式では、150m先のゴミ焼却炉の排煙内に含まれるNO<sub>2</sub>の遠隔濃度分布計測を試みた。計測結果例を図6に示す。距離分解能75mまたは45mで排煙中心にピーク値を持つ濃度分布が明瞭に示された。高エネルギー色素レーザーの使用により、距離分解能を有した濃度分布計測が可能になることを明らかにした。

これらの実験値を基に計測誤差の理論的な検討を行い、ショットノイズ成分が支配的であること、計測対象物質の物理的状態の時間変化と計測時間との兼ね合いが重要であることなどが示され、高精度計測へ向けての重要な指針を得た。

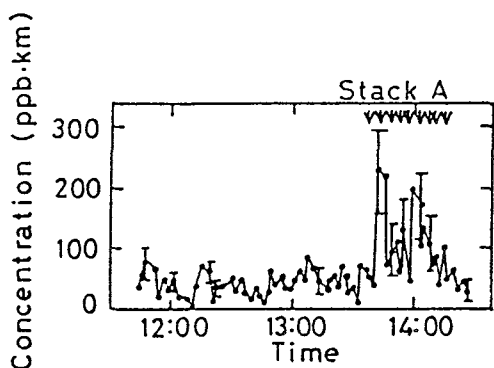


図5 排煙内NO<sub>2</sub>濃度時間変化計測例

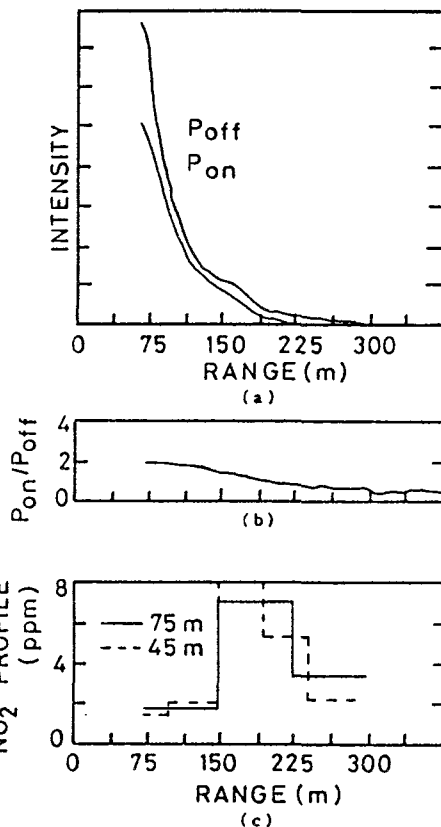


図6 排煙内NO<sub>2</sub>濃度分布計測例；  
(a) 2波長受信光強度、  
(b) 2波長の比、  
(c) NO<sub>2</sub>濃度分布

## 第7章 結 論

本研究で得られた主な成果は次の通りである。

- 1) 理論的な検討の結果、大気汚染物質の濃度計測には差分吸収方式レーザーレーダが適していることが示された。また計測誤差の低減化を計るためには、送信から処理までの全動作が2波長同時動作可能なシステムにすることが必須の条件である。
- 2) 長光路方式の送信光源として実用性に富む窒素レーザー励起色素レーザーを、またDIAL方式の送信光源として高エネルギー特性を有するフラッシュランプ励起色素レーザーを製作して用いた。さらに、色素レーザーの波長同調法として、干渉フィルタを共振器に内挿して用いる方法を提案し、有用性を実験的に示すと共に、本同調法を用いて同時2波長発振色素レーザーの開発に成功した。
- 3) NO<sub>2</sub>濃度計測用差分吸収方式レーザーレーダシステムの設計・試作を行った。本システムの最

大の特徴は、送信光源に同時2波長発振色素レーザーを用いたことで、送信から処理までの全動作が同時2波長動作可能になったことである。

4) 同時2波長長光路方式を用いて、513m遠方の排煙内NO<sub>2</sub>の濃度計測を行った。その結果、排煙時に対応して高濃度NO<sub>2</sub>の時間的变化が示されると共に、低出力の色素レーザーを用いても吸収長を長く取ることにより、環境基準値程度の低濃度計測にも十分対応が可能であることが明らかになった。

5) 同時2波長DIAL方式を用いて、150m遠方のゴミ焼却炉の排煙内NO<sub>2</sub>の濃度分布計測を行った。その結果、排煙中心のピーク値を持つ濃度分布(距離分解能45mおよび75m)が明瞭に示されると共に、高エネルギー色素レーザーの使用により、距離分解能を有した濃度分布計測が可能になることを明らかにした。

最後に本研究で得られた成果が、この美しい地球環境を21世紀以降の未来まで永續させるための一助となることを願い結びとする。

## 審査結果の要旨

レーザー光を大気中に発射して微量成分分子の遠隔計測を行うレーザーレーダは、レーザーの優れた応用の一つとして、近年各国で研究開発が進められている。この間、高出力レーザーをはじめ各種の光検出技術や信号処理法などが開発され、レーザーレーダの性能向上に貢献して来たが、これらの技術の総合的な検討に基づいて、大気中に拡散した微量な NO<sub>2</sub> 分子濃度のレーザーによる実時間遠隔測定法の実用的開発が強く望まれていた。

著者はこのような観点から、波長可変色素レーザーの発振線を制御して NO<sub>2</sub> 分子の可視域の吸収スペクトルの内部と外部の 2 波長に同調させ、その両者の受信光信号の差から濃度を算定する差分吸収方式に着目し、装置の設計、試作を行って、動作特性を詳細に明らかにすると共に、NO<sub>2</sub> 濃度の遠隔計測が可能であることを実証した。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編 7 章よりなる。

第 1 章は総論である。第 2 章では、差分吸収方式レーザーレーダの最小検出可能濃度の理論的解析に基づいて、大気環境基準値程度の低濃度計測には計測全区間の平均値を求める長光路方式が、また距離情報を備えた濃度分布計測には大気中に浮遊する微小粉塵粒子などによるミー散乱現象を組合せた距離分解方式が実用上有効であることを論じている。

第 3 章では、長光路方式用の送信光源として N<sub>2</sub> レーザ励起色素レーザーの設計、試作を行い、所定の 2 波長に同調した発振出力を同時に同一光路上で得るために、2 枚の干渉フィルタを巧みに組合せる方法を考案している。この方法は大気の視程などが短時間で変動する場合には、レーザーレーダの実用動作上有用なもので、重要な成果といえる。

第 4 章は、さらに距離分解方式用に開発した強力なフラッシュランプ励起色素レーザーについて、発振特性と共に述べたものである。

第 5 章では、NO<sub>2</sub> 濃度計測を目的として設計、製作を行ったレーザーレーダ装置の構成、動作・信号処理法について詳述しており、前記の 2 つの方式に対し、実用に供し得る性能が得られたことを明らかにしている。

第 6 章では、試作したレーザーレーダを用いて試みた野外の NO<sub>2</sub> 濃度計測実験の定量的な結果を記し、測定誤差の検討を行っている。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、可視域の色素レーザーを利用して大気中の NO<sub>2</sub> 濃度の実時間遠隔計測を行う差分吸収方式レーザーレーダ装置を研究、開発し、その動作特性を明らかにすると共に、幾つかの興味ある知見を得たもので、電子工学ならびにレーザー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。