

氏 名	松 井 一 郎
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 2 月 12 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 53 年 3 月 八戸工業大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	レーザーレーダによる大気汚染計測に関する研究
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

大気汚染現象の遠隔計測の最大の目標は汚染物質や気体などの分布状態を優れた空間分解能と時間分解能力をもって連続的に行うことができることである。このことは従来のポイントサンプリング手法によって多くの場所や設定や移動、さらには飛翔体や多くの労力、時間を必要とすることから不可能である。遠隔計測手法の一つであるレーザーレーダは、レーザー発振器が発明された直後から研究開発が始められており、これらの先駆的な研究によってレーザーレーダは大気構造を観測するために極めて有用な装置であることが明らかにされてきた。

本研究ではミー散乱レーザーレーダによって観測される大気構造が大気汚染現象と密接な関係にあることを着目し、大気汚染現象の観測ならびに解析を目的としたミー散乱レーザーレーダ装置の開発研究を行い、かつ、試作した 4 種類の開発された装置を用いて実験的検討を行い、その有用性を示したものである。

第 2 章 ミー散乱レーザーレーダの基本的動作と大気汚染計測への応用

レーザーレーダの動作原理をレーザーレーダ方程式を用いて説明し、装置の性能評価に必要な理論式を示した。さらに、これまで試みられてきたミー散乱レーザーレーダの研究成果にもとづいて大気計測への応用例に関する考察と検討を行った。また、装置の形態と測定対象の範囲についても検討し、観測された大気現象とその意義についてまとめた。

第3章 ミー散乱レーザーレーダー計測技術の高精度化

レーザーレーダーの測定精度の向上を目的として信号処理方式および幾何光学的効率関数について詳しい検討を行った。信号処理部にコンピュータを用いるレーザーレーダー装置では、光電子増倍管からアナログ信号をコンピュータに取り込むために行うA/D変換器による量子化誤差が測定精度に大きく影響している。そこで、量子化誤差を改善するために信号圧縮方式、複数のA/D変換器による方式、積算処理による方式の3種類の方式を理論的および実験的に検証した。その結果、これらの方式をレーザーレーダー装置の仕様に対応して適宜用いることにより、量子化誤差が改善され測定精度が向上することが明らかになった。幾何光学的効率関数は送信光ビームと受信望遠鏡の視野との距離における重なりを示す関数である。近距離においては重なりが小さいため、例えば鉛直方向に光学系を固定した装置では、地上付近の低高度の測定は困難であった。そこで、幾何光学的効率関数の理論モデルを作成し、近距離においても重なりが大きくなる送光方式を考案した。この送光方式は、従来からの送光方式である二軸型と同軸型の中間位置からレーザーレーダーの送光を行う型である。この送光方式を用いた実験結果と理論モデルの計算値はよく一致しており、低層大気構造の観測の測定精度の向上が図れることが実証された。

第4章 移動観測用ミー散乱レーザーレーダー装置の試作開発

所定の観測地点まで移動が可能な移動型の2種類の装置の試作開発を行った。パルス半導体レーザーレーダー装置は光源にGaAlAsのパルス半導体レーザー（ピーク出力75W、最大繰返し1kHz）を使用しているが、パルス半導体レーザーはピーク出力が小さいため高速繰返し発振に対応した信号処理装置が不可欠である。本研究では高速積算機能を有したトランジェントレコーダを新規に開発して使用した。この装置の特徴は、Nb:YAGレーザー等を使用した従来の装置と比較して形状が小型・軽量であり、フラッシュランプなどの消耗品の交換の必要が無ことからメンテナンスフリーで使用できることである。車載型レーザーレーダー装置はレーザーレーダー装置一式を大型バスに搭載して移動ができるように設計している。レーザーにはNd:YAGレーザーを使用しており、出力エネルギー100mJ/pulse、最大繰返し発振数40pps（pulse per second）である。レーザー発振器と受信望遠鏡が掃引できる架台に取り付けられており、掃引測定および任意の方向に固定した測定が可能である。この装置では、走行時の振動からレーザー発振器、コンピュータ等の精密機器を保護するために防振対策が施されており、所定の性能が得られていることを確認した。

第5章 長期間観測用ミー散乱レーザーレーダー装置の試作開発

低層大気構造の連続観測を目的として2種類の装置の試作開発を行った。大気混合層観測用ミー散乱レーザーレーダーの大気混合層の連続観測に必要な事項を考慮した上で設計試作された装置である。レーザーレーダーにはルビーレーザを使用しており、出力エネルギー1J/pulse、1分1パルスの繰返し発振を行う。この装置の特徴は、無人運転による自動連続観測を可能にしており、さらに、操作、メンテナンスについても簡単に行えるようにしたことである。低層大気観測用ミー散乱レーザーレーダー装置は低高度からの低層大気構造の観測を目的としたものである。レーザーに

はNd:YAGレーザーの2高調波を使用しており、出力エネルギー50mJ/pulse、繰返し発振数10ppsである。都市域で発生する高濃度大気汚染現象の解明を行うためには、地上から排出される汚染質の挙動が重要な要素となっている。このため、ミー散乱レーザーレーダーによる大気構造の観測を地上付近の低高度から精度よく行うことが要求される。この装置の特徴は、第3章で新たに考案した幾何光学的効率関数を改善する手法を用いて低高度からの観測を可能としたことである。

第6章 自動車道路近似における粉塵およびエアロゾル分布の計測

自動車道路において行った2種類の観測結果について示す。まず、冬期の寒冷積雪地帯の自動車道路上でスパイクタイヤによって発生する高濃度粉塵の大気中での挙動を捉える観測を行った。そのため、パルス半導体ミー散乱レーザーレーダー装置を道路脇に送信光ビームが鉛直方向になるように設置し、道路から発生する粉塵の高度分布の時間変化を測定した。同時に、粉塵計による測定を地面と建物の屋上で行った。観測の結果、幹線道路と平行な風向時に高濃度の粉塵が高度300mまで舞上げながら、道路上を流されて行くことを捉えることができた。粉塵計で測定された粉塵濃度とレーザーレーダー信号から得られた粉塵濃度の相関係数は0.75であった。次に、道路からの自動車排ガス中のエアロゾルの拡散現象の観測を車載型ミー散乱装置を用いておこなった。観測にはレーザーレーダー装置を道路から直角方向に離れた地点に設置し、測定角度を水平方向に設定して、道路から直角方向に拡散して行くエアロゾルの分布状態の測定を行った。その結果、交通流に対応して間欠的にエアロゾルの高濃度が出現している様子を捉えると共に、その高濃度エアロゾルが風下方向に拡散しながら輸送されて行く現象をも観測することができた。

第7章 低層大気構造の観測にもとづく大気汚染現象計測への応用

地上から排出されるエアロゾルや汚染気体の上空への拡散状態は、低層大気構造に支配されている。このことから、低層大気構造の詳しい観測は大気汚染の解明のための重要な要素となる。本章ではまず、低層大気構造をミー散乱レーザーレーダーを用いたエアロゾル濃度分布から検出する手法について検証実験を行った。そのため、大気混合層観測用ミー散乱レーザーレーダー装置を用いて13日間の観測結果と低層ゾンデによる気温の高度分布との比較を行った。その結果、エアロゾル濃度分布の濃度勾配から検出した混合層上端の高度と温度逆転層高度はよい一致を示すことが判った。この手法を用いて、約1か月に亘り冬期都市域で行った低層大気構造観測用ミー散乱レーザーレーダー装置の測定データより低層大気構造の日変化を求めた。観測結果より、晴れた日は、日中に混合層が発達し、日最大混合層高度は約1000mとなり、夜間には都市境界層が形成され、その高度は約200mであることが分かった。さらに、冬期に都市域で発生する高濃度大気汚染現象と低層大気構造との関連性を検討した。解析は夜間の都市大気境界層の高さと風速の積の逆数で定義される停滞係数をパラメータとして、NO_xおよびNO₂「高濃度日」が説明できることを示した。これより、夜間の高濃度の発現が全日平均の高濃度発生に大きく寄与していることが明らかとなった。さらに、ミー散乱レーザーレーダーによる観測データはNO₂の高濃度日発生予報のために有用な新しい方式を提案しうるということが確かめられた。

第 8 章 結 論

本研究で得られた主な成果は次の通りである。

1) 測定精度向上のための技術開発として、A/D 変換器の量子化誤差を改善し、ダイナミックレンジの広いレーザーレーダー信号を高精度で計測する手法の開発を行った。また、幾何光学的効率関数を改善し、近距離（低高度）からの測定精度の向上を図る手法の開発を行った。

2) 大気汚染計測を目的とした 4 種類のミー散乱レーザーレーダー装置の試作開発を行った。まず、移動観測用ミー散乱レーザーレーダー装置として、パルス半導体レーザーを用いた小型、軽量のパルス半導体ミー散乱レーザーレーダー装置、車への搭載を可能にした車載型ミー散乱レーザーレーダー装置の試作開発を行った。次に、長期間観測用ミー散乱レーザーレーダー装置として、大気混合層の連続観測を目的とした大気混合層観測用ミー散乱レーザーレーダー装置、低高度からの測定を可能にした低層大気観測用ミー散乱レーザーレーダー装置の試作開発を行った。

3) 移動観測用ミー散乱レーザーレーダー装置で自動車道路近傍における粉塵およびエアロゾル分布の計測を行い、道路粉塵の鉛直拡散の観測および自動車排ガス中のエアロゾルの水平拡散の観測より、粉塵またはエアロゾルをトレーサーとして大気拡散、移流現象を捉えることのできることを示した。

4) 低層大気観測用ミー散乱レーザーレーダー装置でエアロゾル濃度の高度・時間分布の計測から低層大気構造（混合層、接地逆転層、都市境界層）を検出できることを検証し、都市域で発生する高濃度大気汚染現象と低層大気構造との関連性を明らかにした。さらに、高濃度の発生予測の精度向上に寄与できることが確かめられた。

本研究では大気現象の遠隔計測技術の一つであるミー散乱レーザーレーダーの実用化を目指して、測定精度向上法の開発、装置の設計と試作、大気汚染現象把握のための応用観測を一貫して行った。これらの結果から、大気汚染現象の把握や予測などの大気汚染計測にミー散乱レーザーレーダーが十分に実用可能であることを明らかにした。

審査結果の要旨

レーザー光を大気中に発射して大気構造の遠隔計測を行うレーザーレーダーは、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。これまで、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、レーザーレーダー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、大気構造やその動態と密接な関係にある大気汚染現象の実時間遠隔計測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、対汚染現象の観測・解析を目的としたミー散乱方式レーザーレーダー装置の試作研究を行い、自動車道路近似における粉塵やエアロゾルの空気分布を計測すると共に、大気混合層や低層大気構造と汚染ガス分布の間に相関のあることなどを見出した。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、ミー散乱レーザーレーダーの動作原理と装置の性能評価を行う方法について論じている。

第3章では、デジタル化した信号処理装置の測定精度を向上させる方法を理論的に追求すると共に、実験的に詳細に検討している。また、送受信望遠鏡の効率関数の理論モデルを構築し、その最適化の方法を提案している。

第4章では、2種類の移動観測用ミー散乱方式レーザーレーダー装置の設計試作について記しており、これらは共に特性の検討および性能試験の結果から、十分実用性を有していることが明らかにしている。

第5章では、大気混合層および低層大気観測用のミー散乱方式レーザーレーダーの設計試作と、それらの動作性能の試験結果について述べている。

第6章は、第4章で述べた試作装置を用いて行った冬季の自動車スパイクタイヤ使用に起因する高濃度粉塵の鉛直分布と自動車排気ガス中のエアロゾルの水平分布の測定結果を記述したもので、実用上重要な成果といえる。

第7章では、第5章の試作装置によって得られた低層大気構造の計測結果とその解析から都市域におけるNO_xを主体とする大気汚染ガス濃度とその構造と相関性を有することを具体的に論じている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、ミー散乱方式に基づくレーザーレーダーを試作開発して、大気汚染計測に関する研究を行い、いくつかの重要な知見を得たものであって、電子光学ならびに光エレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。