

氏 名	佐 藤 卓 蔵
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 55 年 9 月 10 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 40 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了
学位論文題目	高出力固体レーザの遠隔計測への応用に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 稲場 文男      東北大学教授 高橋 正 東北大学教授 柴田 幸男      東北大学教授 御子柴宣夫

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 総 論

第 1 章では、本研究の背景と目的および本研究の概要を述べる。

近年、大型タンカーの衝突等による油の流出事故や船舶からの不法投棄などによる海洋油汚染が続出し、世界的な問題となっている。このような状況にともない、世界的に海洋や湖沼、河川における油汚染監視技術の確立が急がれている。これまでも赤外放射計など受動的的手法によって汚染油を遠隔測定し、汚染分布図を作ることが行なわれていた。これらの受動的な油汚染遠隔計測方式は、汚染がかなり広い範囲にわたっている広域監視用としてはすぐれている。しかし、これらの方式は空間分解能が悪く、しかも汚染物質の判別も困難である。海洋や種々の水域における油汚染の防除体制を組み、被害を最小にするには汚染物質の判別は是非共欠くことの出来ない重要課題である。

上のような従来の受動的方式の短所を補うものの一つとして、能動的な実時間遠隔測定用レーザーレーダが挙げられる。これは指向性のすぐれた強力なレーザー光を遠方の物質に照射すると、物質からはその物質固有の蛍光およびラマン散乱光が放出されることを利用したもので、レーザーレーダを用いてその散乱スペクトルを分光分析すると遠方にある物質の種類判別や濃度測定が可能となる。しかし、油に関していえば油の蛍光スペクトルはかなり波長的に幅広いものであるので、従来広く用いられている光検出器である光電子増倍管を使用して或る狭い波長範囲のみを測定す

る方法では油の種類判別は困難である。

これに対し著者は、レーザレーダの光検出器としてオプティカル・マルチチャンネル・アナライザ（OMA）を用いることを提案し、油の蛍光およびラマン散乱スペクトルの広い波長範囲を短時間に測定し、汚染油の高速検知および油の種類判別をも可能にする方式を開発した。また、レーザレーダの光源としてQ-スイッチNd:YAGレーザの可視部第2高調波（532 nm）と紫外部第4高調波（266 nm）の二波長を用いることにより、汚染物質からの後方散乱スペクトルに関する情報量を増し、汚染油検知の確度を向上させるようにした。さらに、パルス信号光が到来したときだけ検出器が動作するように、ゲート同期電圧を検出器に印加して計測するパルス同期方式を適用することにより、太陽光などの背景光雑音を除去して昼間測定をも夜間測定と同様実施出来るようにした。

上記したことから明らかなように、本研究の目的はレーザ送信器から生じる高出力のコヒーレントパルス光を用いて、海洋、湖沼、河川などにおける油汚染物質からの後方散乱光を分光分析することにより汚染油の種類を判別し、さらにこれらの汚染状態を実時間遠隔計測するレーザレーダシステムを研究試作するとともに、その実用的動作法を確立することである。

## 第2章 油類の遠隔計測のためのレーザレーダの基本的特性

第2章では、多波長で発振する連続発振アルゴンレーザを光源として、油の散乱スペクトルを測定し油の光学的特性についての知見を得る。油の散乱スペクトル強度から求められた光散乱断面積をもとに、レーザレーダにより受信される信号強度が計算できる。次いで信号対雑音比を計算しレーザレーダの性能に関して検討を行ない、油汚染遠隔測定用レーザレーダシステムの設計指針を得る。

まず、アルゴンレーザの可視および紫外光を利用するレーザラマン分光計を用いて測定した各種油のラマン散乱並びに蛍光スペクトルについて述べる。レーザラマン分光計で得られた、灯油、軽油、重油の散乱スペクトルを図1に示す。この場合の励起光源は、波長514.5 nmのアルゴンレーザである。灯油はラマン散乱スペクトルのみを示す。軽油の場合は、灯油のスペクトルと異なりラマン散乱光の他に蛍光をも放出するようになり、蛍光スペクトルの上にラマン散乱スペクトルが乗った形になる。さらに、重油では蛍光スペクトルのみが観測されている。しかし、紫外レーザ光励起の場合には、これらの油はすべて蛍光スペクトルを生じることが認められた。これらの散乱又は発光スペクトルの全体の形が短時間で測定されるならば、汚染油の種類判別が容易になるものと考えられる。

次に、灯油の最も強いラマン線 $2,820\text{ cm}^{-1}$ を計測する場合のレーザレーダの信号対雑音比を計算し、レーザレーダの性能を定量的に検討した。それによると、連続発振レーザを光源とする場合は、太陽光による背景光雑音が大きく、昼間での屋外測定は困難であることが判った。一方、光源にパルスコヒーレント光を用い、ゲート同期検出方式を採用したレーザレーダシステムの信号対雑音比S/Nの計算結果の一例を示したのが図2である。この図からも明らかなように、パルスレーザを光源とし、ゲート同期検出方式を採用することにより背景光雑音を除去すると、昼間で

も動作可能な油遠隔計測用レーザレーダシステムを建設できることが判る。

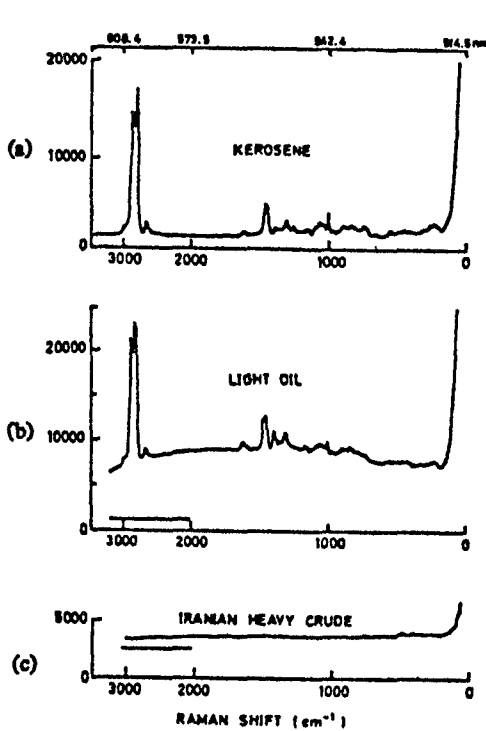


図1 灯油，軽油および重油の可視レーザ励起発光スペクトル

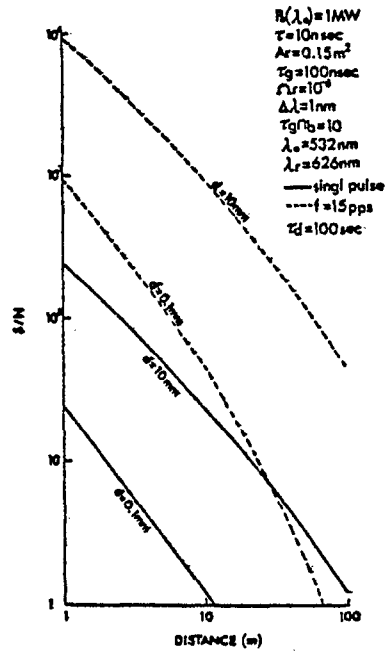


図2 灯油のラマン散乱光に対するレーザレーダシステムの信号対雑音比S/Nの距離依存性。光源はQ-スイッチNd:YAGレーザの第2高調波(532 nm)とする。実線はレーザパルス1発の場合(レーザパルス幅 $\tau = 10$  nsec, ゲート時間 $\tau_g = 100$  nsec), 点線は測定時間を100 sec(レーザ繰返し数15 pps)とした場合である。測定は昼間とする。

### 第3章 レーザレーダ用パルス固体レーザの高性能化

第3章ではレーザレーダの光源として有望な高出力のパルスレーザの動作特性の測定結果を中心に検討を加え、最適光源の選定指針を得る。

Q-スイッチルビーレーザの場合には、Q-スイッチ素子として回転プリズムと可飽和色素セルを併用することにより、図3に示すようにピーク出力が約1 GWの高出力で安定なジャイアントパルスを得ることができる。

また、Q-スイッチルビーレーザとその第2高調波光で励起された色素レーザ光のADP結晶による光混合により、紫外域(3044Å~3272Å, 2535Å付近)で波長可変なコヒーレント光を得た。特に、図4に示すように2535Å付近の光混合の位相整合温度が常温であるという点が特長である。

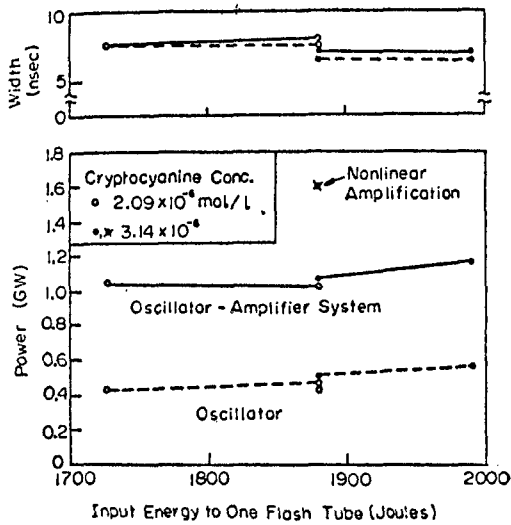


図3 Q-スイッチルビーレーザーのパルス幅と出力尖頭値の実験結果。点線は発振段のみ、実線は発振段-増幅段系の場合

一方、Q-スイッチ  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  レーザでは Q-スイッチ素子としては  $\text{KD}^*\text{P}$  ポッケルセルを用いて、出力 20 MW、くり返し周波数 30 pps の、高安定な出力特性を得ることができる (図5)。

高出力パルスレーザーの実験結果を検討してみると、Q-スイッチルビーレーザーは出力は最も大きくとれるが、繰返し周波数が低く、また色素レーザーやその混合波は波長可変であるが同様の問題がある。一方、Q-スイッチ  $\text{Nd}:\text{YAG}$  レーザは、パルス発振の繰返し周波数も高く、しかも出力の安定度も良好であるが、波長が近赤外 ( $1.06 \mu\text{m}$  付近) であるという点で検出感度にやや不十分な点がある。第2章で明らかにしたように汚染油の遠隔計測には、紫外ないし可視のコヒーレント光で励起することが望ましい。

以上の諸点を考慮すると、Q-スイッチ  $\text{Nd}:\text{YAG}$  レーザの第2高調波 (可視部 532 nm) および第4高調波 (紫外部 266 nm) を本論文の目的とするレーザーレーダの光源とすることができれば、その波長、検出感度、繰返し動作などの点で満足すべきものが得られるものと考えられる。

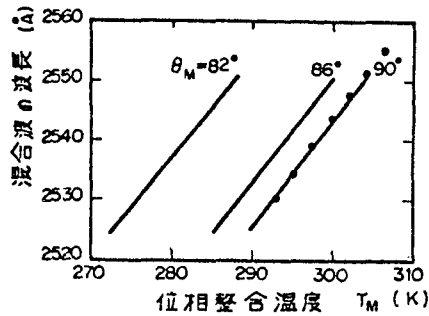


図4 ルビーレーザー光と色素レーザー光の光混合同調曲線と実験値。(黒丸、 $\theta_M = 90^\circ$  のとき)

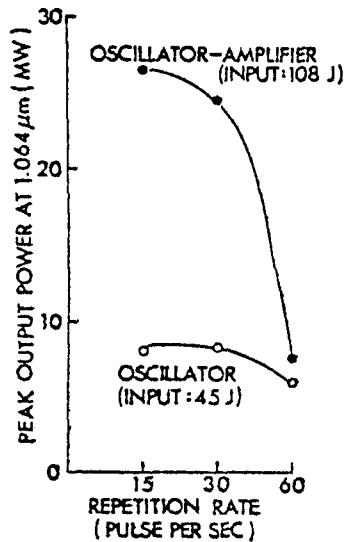


図5 Q-スイッチ YAG レーザの発振パルスと増幅パルスのピーク出力の測定値。

#### 第4章 レーザレーダ用短波長光パルスのための高調波発生装置と動作特性

第4章では、第3章の実験結果とその検討に基づいて、汚染油遠隔計測用レーザレーダの光源の第一候補として挙げられるQ-スイッチNd:YAGレーザの第2高調波および第4高調波を出来るだけ効率良くしかも安定に発生するための方式とそれらの出力特性について、実験的並びに理論的に追求した。

実験結果によると、CD\*Aの温度同調方式による第2高調波の出力は5MW、さらにこの第2高調波よりもう一段ADPの温度同調方式によって得られる第2高調波、すなわち第4高調波に対応する出力も1MWという高出力が、30ppsの高繰り返しで得られた。これらの出力特性はレーザレーダの光源として十分好ましいもので、高い実用性を備えているものと考えられる。

しかし、その出力の時間的変化を測定してみると、高調波発生用結晶の温度によってかなり異なる振舞いを示すことが判った。そこで、この高調波出力の時間的変化特性を理論的に考察し実験的に比較した結果、それらは全て基本波光による結晶の加熱効果に起因することが明らかになった。さらにその結果、パルス発振における定常状態で出力が最大で安定な高調波発生を行なう方法を見出した。それは、最初温度制御用オープンの温度 $T_0$ を使用する結晶の位相整合温度 $T_M$ に比べて基本波光の加熱による結晶の温度上昇分 $T_a$ だけ低くしておく( $T_0 = T_M - T_a$ )方法である。その結果、高速繰り返しパルス入射光の場合でも、結晶の温度が一定の時間定常的な位相整合温度に達するため高調波出力が最大になる訳である。このことは、図6のQ-スイッチYAGレーザの第2高調波出力の時間的変化の実験及び計算結果をみると理解できる。また、2段階の第2高調波発生により第4高調波発生を行なうための第2段階目の第2高調波発生用にADP(位相整合温度 $T_M = 52.2^\circ\text{C}$ )を用いた場合にも、同様な現象が確認された。

以上の動作特性の具体的検討により、Q-スイッチNd:YAGレーザの第2高調波および第4高調波は、出力、繰り返しおよび安定度の点で本研究の目的とする油汚染遠隔測定用レーザレーダの光源として最も有用であることが判った。

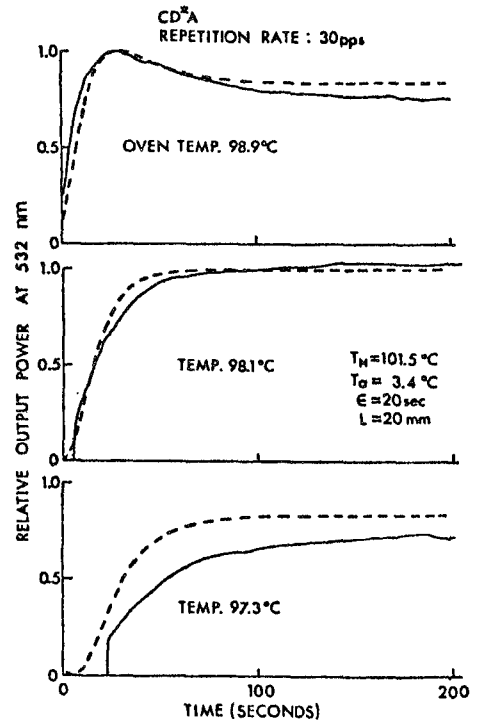


図6 Q-スイッチYAGレーザの第2高調波出力の時間的変化の実験結果(実線)と計算結果(点線)。(パルス繰り返し周波数:30pps,第2高調波発生用結晶:CD\*A)

## 第5章 汚染油遠隔計測用レーザレーダシステムの設計・試作

第5章では、Q-スイッチNd:YAGレーザの第2高調波並びに第4高調波を光源とする汚染油遠隔計測用レーザレーダシステムの設計及び試作について詳細に述べる。

本研究において設計・試作を行なった汚染油遠隔計測用レーザレーダシステムの構成は図7に示すように、次の各部から成る。

光源部：Q-スイッチNd:YAGレーザの第2高調波（532 nm），及び第4高調波，送信望遠鏡部

受信部：口径500 mmφのカセグレン式反射望遠鏡，分光器，検出器および信号処理部からなるオプティカル マルチチャンネル アナライザ（OMA）

システム制御部およびデータ処理部：ミニコンピュータ，テレタイプ，インタフェース，フロッピディスクなど，

表示部：X-Yシンクロスコープ，X-Yレコーダ，グラフィックディスプレイ

レーザレーダの光源としては，高繰返しで高ピーク出力が期待できるQ-スイッチNd:YAGレーザの第2高調波および第4高調波を用いた。この二波長は油類を励起するのに適している上に，一台のレーザ装置で発振が可能で，高感度の検出器も一台で足りることが利点として上げられる。

受信信号検出には，必要とする広い波長範囲にわたる後方散乱スペクトルを高速で観測でき，

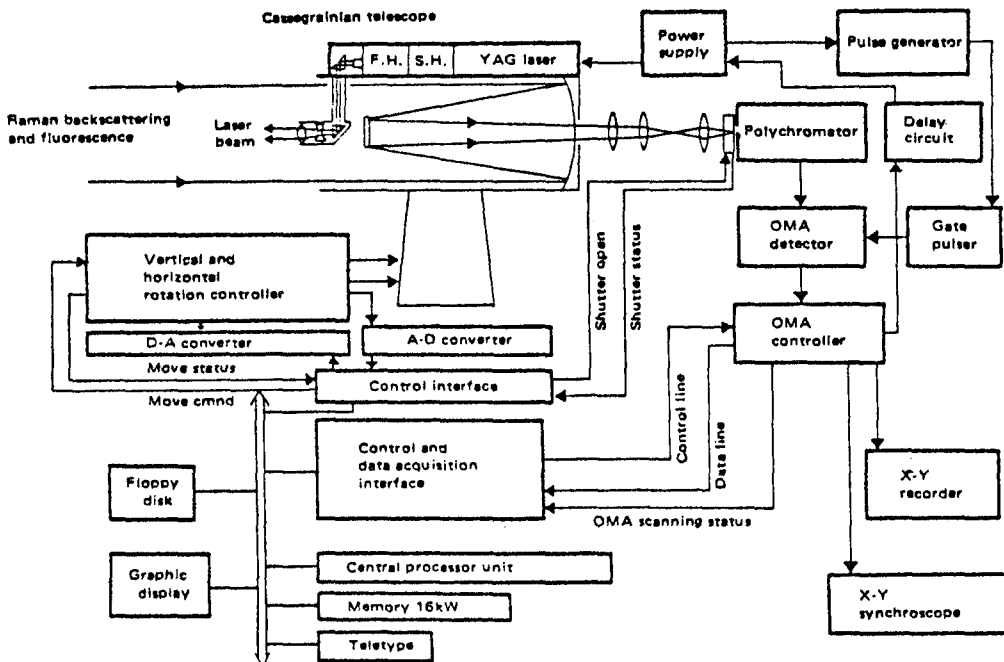


図7 汚染油遠隔計測用レーザレーダシステムの基本的構成を示すブロック図

スペクトル全体の形を把握することにより被測定物質の判別が容易になる点でOMAを採用した。また、信号光検出に当ってはパルスレーザー光源とのゲート同期検出方式を用いることによって、背景光雑音を除去し屋間の測定も可能であることを確かめた。

受信望遠鏡としてカセグレン式反射望遠鏡を用い、送受信光の光学軸を同軸構造にして光軸調整を容易にし、かつ近距離測定が可能な光学系を構成した。

さらに、実時間遠隔計測を目指しレーザーレーダシステムの制御およびデータ処理の自動化を出来るだけ行った。また、システム全体をレーザーレーダ室とレーザー電源および制御室の二つに分け、それぞれ移動実験室化して、今後の各地野外での実地観測の便に供した。

## 第6章 汚染油遠隔計測用レーザーレーダシステムの動作実験

第6章では、試作したレーザーレーダシステムを用いた屋外および野外における汚染油の遠隔計測の動作実験とその結果の検討について述べる。

屋外実験は研究所の構内で行ないさらに野外実験を瀬戸内海に面した港で行なった。実験の様相を図8に示す。野外実験で得られた測定結果の一例を図9に示す。この場合の実験は、油槽に海水を入れた上に軽油と重油をそれぞれ浮かべた2個の油槽を5m程度離して並列におき、その上を光源としてのNd:YAGレーザーの第2高調波がミニコンピュータのプログラムにより自動的に連続スキャンするようにして行った。図9の(a)が海水、(b)が軽油、(c)がA重油の後方散乱スペクトルのグラフィックディスプレイ表示を示したものである。この図からも明らかなように、海水の上に油が浮かんでいるときは海水のみの散乱スペクトルとは異なることから、海面からの後方散乱スペクトルを観測することにより油の検出、種類の識別が可能であることが判る。また、光源としてNd:YAGレーザーの第4高調波を用いた場合にも、油の蛍光スペクトルが海水の散乱スペクトルと異なることが確認された。

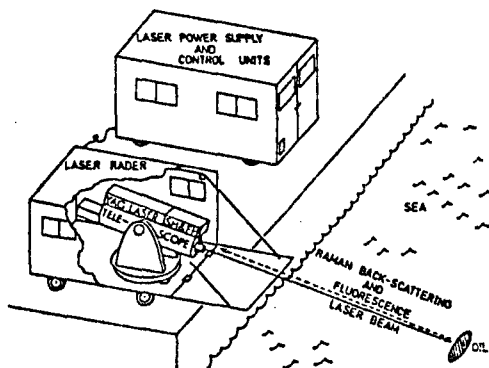


図8 移動実験室形レーザーレーダシステムを用いた汚染油遠隔測定の実験図

次に、実際の受信信号強度をもとに、レーザーレーダの信号対雑音比を計算した結果を図10に示す。この図から、重油の検出にはNd:YAGレーザーの第2高調波である可視光を用いる方が第4高調波である紫外光を用いるより有利であるということが言える。薄い灯油と軽油の検出には、光源としてNd:YAGレーザーの第4高調波を用い、それらの蛍光を測定する方式が実用的である。

実際の動作実験によって、散乱スペクトルが海水のものとは異なり透明な灯油から黒い重油までの各種油のかなり薄い膜からの散乱スペクトルが測定できることが明らかになった。特に重油の薄い膜の蛍光測定には、励起光としては可視光であるNd:YAGレーザーの第2高調波が有効であり、紫外光である第4高調波を用いた場合よりも測定可能距離を延ばすことができることが判明

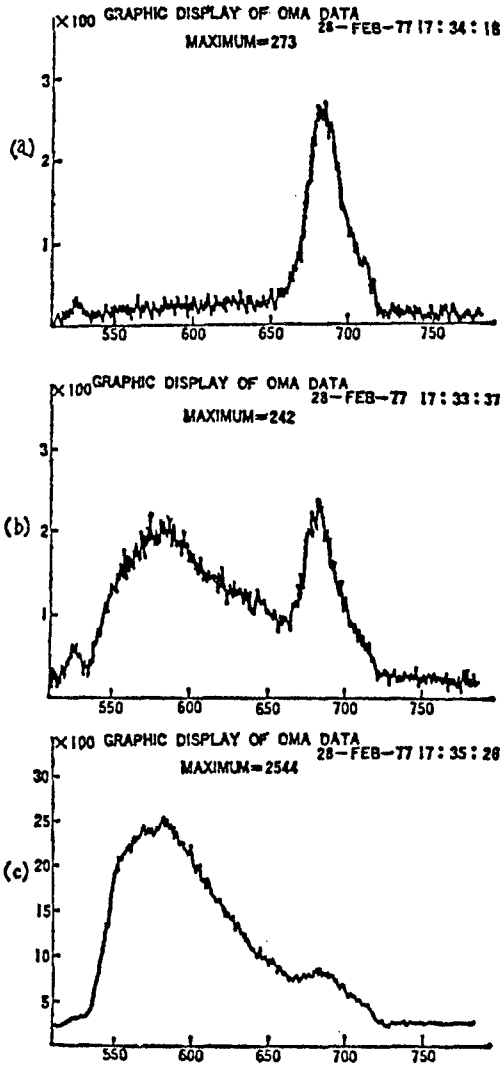


図9 Nd:YAGレーザーの第2高調波を用いたレーザーレーダシステムの連続スキャン動作で得られた(a)海水, (b)軽油, (c)A重油の後方散乱スペクトルの測定結果 (測定距離: 30 m, OMA走査数: 10回)。横軸: 波長 nm。

した。しかも、昼夜の区別なく観測できるということから、本論文において試作開発したレーザーレーダシステムは汚染油遠隔測定用として高い実用性を有するものと考えられる。

## 第7章 結論

第7章は本論文の結論であり、内容全体の総括と共に今後の研究開発課題について述べるもの

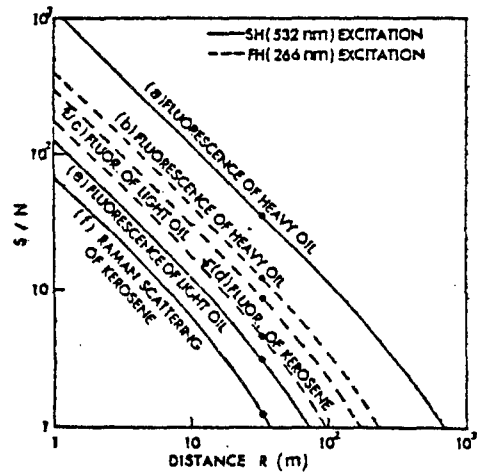


図10 Nd:YAGレーザーを用いる汚染油遠隔計測用レーザーレーダシステムの信号対雑音比 (実線は光源をNd:YAGレーザーの第2高調波とした場合, 点線が光源をNd:YAGレーザーの第4高調波とした場合のOMA走査数1回当たりのS/N, 第2高調波の出力3 MW, 第4高調波の出力300 KW, 黒丸は測定距離33mに対する実験値を示す)

- (a) A重油の蛍光 (重油の厚さ: 20  $\mu\text{m}$ )
- (b) A重油の蛍光 (重油の厚さ: 20  $\mu\text{m}$ )
- (c) 軽油の蛍光 (軽油の厚さ: 20  $\mu\text{m}$ )
- (d) 灯油の蛍光 (灯油の厚さ: 20  $\mu\text{m}$ )
- (e) 軽油の蛍光 (軽油の厚さ: 1 cm)
- (f) 灯油のラマン散乱光 (灯油の厚さ: 1 cm)



である。

本研究で新しく開発された汚染油遠隔計測用レーザレーダシステムの特徴を挙げてみると、

- (1) 可視および紫外コヒーレント光の二波長を光源とし、多チャンネル高速分光装置を検出部として使用することにより、測定対象物の分光学的特性の情報量を増し、汚染油の高速検知および種類の識別の精度を上げることができる、
  - (2) 光源としてパルス光源を使用したゲート同期検出方式を採用することにより、昼間の背景光雑音を除去し昼夜の区別なく常時測定ができる、
  - (3) 高速繰返し高出力パルス光源を使用したレーザレーダ部を種々の方向に回転することにより広域にわたる観測ができ、海洋における汚染油の実時間遠隔計測ができる
  - (4) システムの自動制御および自動データ処理が可能である、
- などである。

本研究により、実用的な汚染油遠隔計測用レーザレーダシステムの基盤が確立されたものと考えられる。今後本研究の成果をもとにシステムの小型軽量化をはかり、船舶あるいは航空機に搭載することによりより広い機動性を持たせることが出来れば、汚染油の広域実時間遠隔計測用レーザレーダとして多大の実用性を有することが期待できる。さらに、従来の受動的センサを搭載した人工衛星方式や航空機方式との共同観測により全世界的な油汚染情報の迅速かつ精確な収集および処理体制が整備され、海洋、湖沼などの環境保全に寄与することを望んで結びとする。

## 審査結果の要旨

レーザ・レーダは、レーザのすぐれた電子工学的応用の一つとして近年急速に実用化が進められている。特に、レーザ・レーダによる人類生存圏の環境情報の遠隔計測は、高分解能で実時間のデータ収集が可能な点で高く評価されているが、その応用はこれまでは主として大気圏内に向けられており、海洋や河川の油汚染の遠隔計測のための実用開発は殆んど試みられていなかった。

本研究はこのような課題に新たに取組んだもので、著者は強力な固体レーザのパルス光による各種の油のラマン散乱と蛍光を組合せた広い波長帯域にわたる分光的遠隔計測を実時間で行うレーザ・レーダシステムを研究開発し、その動作特性を実用的観点から明らかにした。本論文はその研究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、汚染油の分光学的特性に関する測定を行い、それらのデータをもとに、汚染油遠隔計測用レーザ・レーダの性能を総合的に解析して、その設計のための具体的方針を明確にしている。

第3章では、レーザ・レーダの光源として有用な幾つかの高出力パルス固体レーザについて実験的に比較検討を行い、本研究の目的には発振くり返し周波数が高くピーク出力の大きなQスイッチNd:YAGレーザの第2高調波および第4高調波を利用することが、最も適当であることを明らかにしている。

第4章では、第3章の結論にもとづいて可視域の第2高調波および紫外域の第4高調波を非線形光学結晶を用いて効率良く発生する方法を実験的に究明し、長時間にわたり安定な出力を得るために結晶の温度変化を補償する方策を新たに考案している。これらは実用上重要な成果である。

第5章では、上述の2波長を同時に利用する新しい方式の汚染油計測用レーザ・レーダシステムの設計および試作について記述しており、広い波長帯域にわたる微弱な受信信号の実時間検出、処理のために多元チャンネルの高感度分光分析装置を応用して、優れた性能が実現出来ることを明らかにしている。

第6章では、試作したレーザ・レーダシステムを車載して、瀬戸内海の湾内で行った実用試験結果をとりまとめて述べており、汚染油の遠隔計測に関する有用な知見が得られたことは高く評価される。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は海洋や河川の油汚染の遠隔分光計測を行うためのレーザ・レーダシステムを新たに開発し、その設計、製作に必要な資料を豊富に提供すると共に、その実用性を実験的に明らかにして、いくつかの重要な知見を加えたものであって、電子工学ならびにレーザ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。