レーザー解説

半導体・固体レーザーの計測分野への応用

小林 喬 郎*

(1990年7月18日 受理)

Applications of Semiconductor and Solid State Lasers in Optical Sensing

Takao KOBAYASHI*

(Received July 18, 1990)

Semiconductor laser and diode-pumped solid state laser techniques are reviewed concerning remote sensing and precision instrumentation. First, the basic principles of remote range detection using these lasers are compared for a pulse method, intensity modulation method, random modulation method, and frequency modulated (FM) heterodyne method. These methods are applied to lidar (laser radar) for detecting the spatial distributions of atmospheric aerosol particles. The FM heterodyne method is capable of accurate measurement of both absolute range and displacement when widely tunable diode lasers are used. As potential applications of diode-pumped solid state lasers, a coherent lidar and a space lidar as well as an interferometer antenna of gravitational waves are introduced.

Key Words: Semiconductor laser, Solid state laser, Remote sensing, Lidar, Interferometer.

1. はじめに

レーザー光は単色性や空間的コヒーレンス特性、高出力性や短パルス特性、さらには広帯域波長可変など、他の電磁波源では見られない優れた特性を備えている。それらを活かした光計測技術は多岐の分野に応用されており、その利用形態として、非接触、非破壊、遠隔的な計測システムの構成が可能である。また、高精度で多次元空間情報や物質情報が短時間ないし実時間で得られることが特徴である^{1,2)}。しかしながら、従来の主なレーザー応用技術では、大型で高価かつ大電力を要し、また肉眼に対して安全性を欠く波長域のレーザー装置を利用してき

たため、適用可能な分野が限定されてきたとも考えられる。

これに対して、最近の高出力半導体レーザーやダイオード（半導体レーザー）励起固体レーザーは高効率で、小型、堅牢、小消費電力で長寿命特性などを特長としている³⁾。これらの利用によって、装置全体の小型軽量化や安定化による高信頼化や安全性が増大することになる。すなわち、これは電気通信分野における真空管の時代からトランジスタ時代への変遷に対応しており、光通信や光情報処理分野に続いて、光計測分野においても新しい応用分野の拡大が期待される。

そこで本文では、半導体レーザーとダイオー

* 福井大学工学部電子工学科 (〒910 福井市文京3-9-1)

* Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University (3-9-1 Bunkyo, Fukui 910)

Fig.1 Schematic arrangements of laser range detection (a) and comparison of signal processing methods, (b)-(d).

ト励起固体レーザーの光応用計測分野での基本的な計測技法を分類し、とくに遠隔計測(リモートセンシング)や高精度干渉計測法を中心に、新しい研究開発の例を示し、私見を含めて概説したい。

2. 高出力半導体レーザーによるセンシング技術

半導体レーザー(LD)は他のレーザーと比較して出力が小さく、CW動作が基本であるため、センシングに利用する場合には、独特な技術が必要となる。すなわち、LDは注入電流を変化することによって直接的に出力や周波数が変調可能であるため、この特性を利用することが重要となる。まず、Fig.1にLDを用いた距離や速度の計測法における信号処理技術の分類を示す。

2.1 パルス法

この方式は、従来よりパルスレーザーに利用されている距離の測定法で、Fig.1(b)に測定の原理図を示す。パルス動作のLDからのパルス光を物体に照射し、反射光または散乱光を集光して光検出器により光電変換し、送信パルス信号と受信パルス信号の時間差 t_d により物体までの距離を求める方式で、インパルス法とも呼ばれる。半導体レーザーでは利得が小さいため、パルス駆動やQスイッチ、モード同期動作などによるピーク出力の増大率が約10倍程度であり、固体レーザーと比較して極めて小さい。このため単一パルスでの測定ではエネルギーが不足するため、多数パルスでの測定値を積算し平均化する検出法によって高感度化が達成される。

この方法での距離測定の分解能は、

$$\Delta \ell = c (\Delta t_p + \Delta t_d) / 2 \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 Δt_p は光パルスの立上がり時間のバラツキ、 Δt_d は検出器を含む測定系のパルスの立上がり時間のバラツキである。モード同期法により10~50psの短時間幅のパルス光が得られているが⁴⁾、高速のAPD(Avalanche Photo-Diode)とTAC(時間-振幅変換器)を用いることが必要であり、現状では $\Delta t_p \sim 1\text{ps}$ 、 $\Delta t_d \sim 1\text{ps}$ として、分解能 $\Delta \ell = 0.3\text{mm}$ となる。この方式は干渉法のような高精度を必要とする測定には適さないが、技術的簡便さのため応用範囲は広い。

この方式の応用例として、10m程度の近距離の測距装置があり⁵⁾、尖頭出力1W、パルス幅5ns、平均50 μW のLD出力で、粗面物体に対して分解能 $\pm 1\text{mm}$ が得られている。また、自動車の障害物探知用のレーザーレーダーにも利用されており⁶⁾、尖頭出力25W、パルス幅15nsのLD光で、リトロフレクターに対して100mの距離まで精度0.8mの測距が可能となっている。また、大気中のエアロゾル計測用のライダー(レーザーレーダー)では、尖頭出力75W、パルス幅60ns、PRF(パルス繰返し周波数)1kHzで、

最大測定距離は約500mとなっている⁷⁾。このシステムは小型軽量で乗用車で可搬であり、また移動計測も可能であるため、道路上の粉塵の鉛直分布や拡散の計測などに利用されている。

次に、パルス動作における良好指数として、レーザー出力の利用効率を次のように定義する。

$$\eta_p = P_{av} / P_o \\ = (P_p / P_o) \tau f \quad (2)$$

ここで、 P_o はCW最大出力、 P_{av} はパルス動作の平均出力、 P_p は尖頭出力、 τ はパルス幅、 f はPRFで、 $\tau \cdot f$ はパルスのデューティ比に対応している。ライダーの場合には通常のLDではパルス出力増大率(P_p / P_o)は約10倍程度と限定されるため、分解能を上げる目的から τ を50ns程度、 $f=1\text{kHz}$ とするとデューティ比は 5×10^{-5} 、出力利用効率は $\eta_p = 5 \times 10^{-4}$ と極めて小さくなり、十分なSN比と感度が得られない。これは、信号の記録のためのトランジェントデジタイザーの信号積算に要するデジタル処理時間が長く、現状では f が1kHz以下に制限されることが原因である。

そこで、我々はアナログスイッチと積分器を用いて、時間軸が64チャンネルのボックスカー積分器(メモリー)を開発した。 $\tau=100\text{ns}$ 、 $f=10^5\text{Hz}$ 以上に高速繰返し動作を可能にして、 $\tau f=10^{-2}$ 、出力利用効率を $\eta_p=10^{-1}$ 以上に高めることによって、LD計測に適したアナログ信号処理法として、小型ミー散乱方式LDライダーに利用した⁸⁾。Fig.2にそのライダーのシステム構成を示す。 $P_o=100\text{mW}$ 、 $P_p=1\text{W}$ のLDを用いて、大気のエアロゾル分布が約1kmの高度まで測定可能である。さらに、多チャンネル化と高感度化が可能となるものと考えられる。

2.2 強度変調法

強度変調法はFig. 1(c)に示すように、CW動作のLDに正弦波などの周期的な強度変調を加え、送信変調信号に対する受信信号の位相差

Fig.2 Block diagram of the Mie diode-lidar using a high PRF analog multi-channel memory.

を測定することによって時間差と距離を求める方法である。強度変調の周波数を f_m 、受信光の位相差を ϕ とすれば、物体の距離は

$$R = (N + \phi) \lambda_m / 2 \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 N は整数値、 λ_m は変調波の空間波長で、大気中の光速を c とすれば、 $\lambda_m = c / f_m$ となる。この方法は、従来からHe-NeやHe-CdレーザーやLEDを光源として、コーナリフレクターを反射鏡とした測距儀に利用されており⁹⁾、空間波長 λ_m を変えて位相差を複数回測定することによって整数値 N が求められる。この方式は、無変調時のLDの最大出力に対し変調時の平均出力は50%であり、出力利用効率が $\eta_p=0.5$ とパルス法と比べて大きい。高感度で遠距離測定が可能なのが特徴である。

Fig.3に粗面散乱体の測距儀として、LDの強度変調法を用いた装置の例を示す¹⁰⁾。変調周波数 $f_m=f_1=272\text{MHz}$ と高周波として高精度化を画り、さらに変調電流による干渉雑音を除去して信号対雑音比を上げるため、2次高調波成分 $2f_1$ に対してAPD中でヘテロダイン検波することにより、高感度特性を実現している。その結果、粗面散乱体に対して距離20mで $\pm 1\text{mm}$ の高精度特性が得られている。また、我々の実

Fig.3 Schematic diagram of a distance meter¹⁰⁾: OS, oscillator; DBM, double balanced mixer; FDM, frequency doubler; M, mirror; P, prism.

Fig.4 Block diagram of a diode laser RM-CW lidar (transmitter, receiver and processor parts)¹²⁾.

Fig.5 Relation between the integration of lidar A-scope signal and suspended-particle concentration (SPM) along a road¹³⁾.

験例でもほぼ同様な結果が得られているが¹¹⁾, とくにAPDの時間応答の光強度による不安定性が測定誤差の要因となっているため, 今後この改善が望まれる。

2.3 擬似ランダム変調法

さらに, CWレーザーにより距離測定が可能な動作法として, Fig.1(d)に示した擬似ランダム変調(RM-CW)法が検討されている。送信光強度をM系列と呼ばれるランダムコードで変調を加え, 送信信号と受信信号の相関をとることによって, 受信信号の時間応答関数, すなわち距離変化が求められる。この方式はとくにライダーのように空間分布したターゲットに対し距離分解した測定が可能なのが特徴である。距離分解能は変調信号の最短ゲート幅によって決定される。

Fig.4にRM-CW方式のLDライダーのシステム構成例を示す¹²⁾。出力50mW, 波長780nmのLDに変調信号(最短ゲート幅200ns)を加え, 空間分解能30mで距離1kmに至る大気のアロゾル粒子によるミ-散乱の検出が可能となっている¹³⁾。この測定方式もLDの平均出力は無変調時の50%で, 出力利用効率が $\eta_p = 0.5$ と大きく, 高感度特性が得られている。

このRM-CW方式LDライダーは小型で自動計測が容易である。Fig.5に都市域道路上で本ライダーにより求められた体積後方散乱係数と粉塵計による粉塵粒子(SPM)の濃度とCOガス濃度の時間変化の比較結果を示す¹³⁾。これにより, SPM値とライダー値がよく一致していることが示された。このため, このライダーは道路上やトンネル内の粒子状物質の濃度分布測定に用いられ, また雲の移動パターンより風速と風向の測定など¹⁴⁾への実用化が進められている。

2.4 周波数変調干渉法

以上の計測法は直接検出法を用いて受信光強度を測定するものであった。LDは注入電流を変化させることによって発振周波数の変調(FM)が容易なのが特徴である。そこで, このLDのFM特性を利用し, ヘテロダイン検波法を用いたコヒーレント計測法による物体の距離や変位, 表面粗さや形状, 速度などの高精度センサーが研究開発されている^{2,15)}。ここでは,

Fig.6 Basic arrangement of an FM heterodyne interferometer¹⁶⁾.

Fig.7 Temporal change in optical signal and reference frequencies and the beat signal.

距離と変位を同時に計測する方法として、我々が検討しているFMヘテロダイン法について示す。

Fig.6にFMヘテロダイン法の光学系の構成を示す¹⁶⁾。全体としてマイケルソン干渉計に類似の構成であり、ビームスプリッターにより参照光と物体からの後方散乱信号光とが重畳され、干渉光が光検出器で検波される。Fig.7にLD光の周波数変化と干渉光、すなわちビート信号の波形を示す。単一モード発振のLD光周波数を注入電流により鋸歯状波(または三角波)にFMを加えると、参照光と信号光の瞬時周波数に差があるため、ビート信号が発生する。ビート波の位相変化から物体の距離と変位を測定するのがこの方式の原理である。すなわち、ビート信号の全位相偏移を Φ 、波数(カウント数)を N 、位相を ϕ とすると、物体の距離は L を参照光路長として

$$\begin{aligned} R &= (c\Phi/2\Delta\nu) + L \\ &= (N + \phi)\lambda_e/2 + L \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、 $\Phi = 2\pi(N + \phi)$ で、 $\Delta\nu$ はFM偏移量、 $\lambda_e = c/\Delta\nu$ はFM変調された光波の等価波長である。すなわち、 L と λ_e を決定しておけば、 N と ϕ の値の測定より絶対距離 R が求まる。ここで、(4)式は前述の強度変調法の測距式(2)と極めて類似していることに注目されたい。

また、LD光のFM時の基準周波数 ν_0 でのビート信号の位相 ϕ の変化 $\Delta\phi$ を測定することにより、物体の微小変位 d は次式により求められる。

$$\begin{aligned} d &= c\Delta\phi/(4\pi\nu_0) \\ &= (\Delta\phi/2\pi) \cdot \lambda_0/2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 λ_0 は基準波長である。すなわち、ビート信号の位相はターゲットの $\lambda_0/2$ の変位に対し 2π radだけ変化することになり、波長以下の微小変位の測定が可能になる。

このFMヘテロダイン法の特徴は、上述の絶対距離の測定と変位の同時測定が可能なことである。また、この方式は従来のマイクロ波レーダー技術でのビート周波数を計測して距離を求めるFM-CW法と類似しているが、後者の方式を光領域に適用しても測定精度は低く、FMヘテロダイン法の方が2桁以上も高精度となる。

動作実験の例として、波長780nm、出力15mWの単一モード発振のLDを用いて周波数偏移 $\Delta\nu \approx 50\text{GHz}$ とし、この値を他のマイケルソン干渉計で同時計測することにより、 $R = 0.2 \sim 1.7\text{m}$ の距離で誤差 $7 \sim 9\mu\text{m}$ 、測距精度 9×10^{-6} 、また変位測定では分解能 $0.1 \sim 1\text{nm}$ の高精度特性が得られている¹⁶⁾。

この様なFMヘテロダイン法及び他のFM干渉法はコヒーレント計測法であるため、光検出器上での干渉波の波面の一様性の必要性より空間的コヒーレンス特性と、さらに光波の干渉長に関する時間的コヒーレンス特性が必要となる。後者は、現状のLDではスペクトル幅 $\delta\nu =$

10MHzではコヒーレンス長 $l_c = 30\text{m}$ の距離が限界であるが、 $\delta\nu = 100\text{Hz}$ の狭スペクトルLDでは $l_c = 3\text{km}$ まで測定できることになる。

今後、LDの連続的なFM偏移量 $\Delta\nu$ が1 THz以上の広帯域周波数可変LDの実現が望まれ、これによって距離測定精度が大幅に改善できる。さらに物体の移動速度や3次元形状の計測などへの応用や、ライダーでの空間分布したターゲットの距離分解した測定などへの応用も可能となるものと考えられる。

以上、LDでの遠隔計測法を分類して示してきたが、これらは自由空間での測定が主であったが、さらに光ファイバー等の導波路中でのセンシングへの応用やLD周波数の変化を利用した物質の分光計測も可能であるが、ここでは省略する。

3. ダイオード励起固体レーザーによるセンシング

光計測分野において、ダイオード励起固体レーザーは半導体レーザーと比較すると次の特徴がある^{3,17)}。

- (1) 周波数が安定でスペクトル幅が狭く、コヒーレンス度が高い。
- (2) Qスイッチ動作により高出力パルスが容易に得られる。
- (3) 発振出力及び増幅器利得が大きいこと。

次にこれらの特性を利用する新しい応用分野について示したい。

3.1 コヒーレントライダー

大気のアエロゾル粒子のドップラーシフトを利用して、風速や風向、晴天乱流や竜巻などを遠方よりヘテロダイン検出するコヒーレントライダーは、以前より波長 $10\mu\text{m}$ 帯の CO_2 レーザーを用いて大型のシステム構成で実験が行われてきた^{17,18,19)}。この様なシステムを自動車や船舶、航空機や衛星に載せて前方向の詳細な気象データを実時間で得ることは、安全運行や気象予測などの面からも、今後重要になるものと考えられる。

Fig.8 Diagram of a Nd:YAG coherent laser radar system²⁰⁾.

Fig.9 Estimated radial wind velocity vs. range²⁰⁾.

Fig.8にパルス動作のNd:YAG固体レーザーを用いたコヒーレントライダーシステムの構成を示す²⁰⁾。発振器(局発)はダイオード励起の単一モード発振で出力30mWの小型Nd:YAG(MINI-YAG)レーザーで、周波数安定度は1MHz以上である。出力光はアイソレーターを通り、200MHzのAOM(光音響変調器)で周波数シフトが加えられ、放電管励起のスラブYAG増幅器で64dBの高利得で増幅されて、出力5mJで、幅 $0.5\mu\text{s}$ のパルス出力が得られる。この出力は望遠鏡(20cm直径)とビーム掃引ミラーを通り、大気へ送出される。大気からの後方散乱光は、同じ望遠鏡で集光され、単一モード光ファイバーに入り、ファイバー結合器で発振器(局発)光と重ね合わされ、InGaAs光検出器でヘテロダイン検波される。ビート信号は高速デ

デジタルオシロスコープで記録して、時間波形をフーリエ変換することによりドップラー周波数の時間変化、すなわち風速の距離分布が求められる。

Fig.9に、このシステムで求められた水平より傾角 8° での光軸方向の風速の距離による変化の様子を示す。10パルスの積算により約3.75kmまで他の機器を用いた風速の観測値と一致しているが、それより遠方では誤差が大きくなっていることが分る。

この様に、5mJと小出力の固体レーザーと光ファイバーを用いた高安定かつ小型な構成で高感度のヘテロダイン検波方式ライダーが実現され、風速やエアロゾル分布が短時間に計測できることが実証された²¹⁾。さらに、LD励起YAG増幅器によるシステムの全固体化や波長 $1.5\mu\text{m}$ 以上の肉眼に安全な領域での固体レーザーによるコヒーレントライダーの実用化が注目される。

3.2 スペースライダー²²⁻²⁴⁾

最近に至り地球規模での環境破壊や気候変動が、緊急に解決を要する課題として取り上げられてきた。その解決の第一歩として、地球全域の大気や海洋の要素を高度分解して計測するシステムの開発が必要である。とくに、大気中の水蒸気、雲、雪氷粒子の輸送の解明のために、水蒸気や風、気温の高度分布についての情報が必要とされる。また、エアロゾルや微量汚染物質のグローバルな分布の計測などが主要課題となっている。

NASA(米航空宇宙局)では、地球観測のための衛星利用のEOS(Earth Observation System)計画に重点を置いており、その中でレーザーを衛星に搭載して地球大気を遠隔計測するスペースライダーが主要な役割を占めている²⁴⁾。EOS計画でのLAWS(Laser Atmospheric Wind Sounder)センサーは、1998年に打ち上げ予定であり、大気の風を遠隔計測するコヒーレントライダーである。高度約800kmの極軌道衛星から地表の一地点に対して、前方と後方の二方向

からレーザー光を打ち出し、ドップラーシフトを測定して風速と風向のベクトルを高度1kmの分解能で測定する。光源として最初は赤外 CO_2 レーザーを準備しているが、寿命や電力、重量の条件より波長 $2\sim 3\mu\text{m}$ の固体レーザーも開発目標とされている。これによって数値天気予報の精度の大幅な改善や気候変動の解明などを目指している。

また、Table Iにスペースライダーの観測対象と必要なレーザー波長と出力特性を示す。これはLASA(Laser Atmospheric Sounder)センサーで詳しく検討されたものである²⁵⁾。観測対象として雲高、大気境界層(PBL)の高度、対流圏と成層圏のエアロゾル分布、水蒸気の積算量(Column)と高度分布(Profile)、気圧、温度、オゾンの高度分布が挙げられており、ミー散乱方式に加えてDIAL(差分吸収ライダー)方式が用いられる。

レーザーとして小型軽量で高効率、かつ長寿命、高信頼の新型固体レーザーの研究開発が進展している。このLASAセンサーはEOSでは中止となったが、スペースシャトルでの実験“LITE”(Lidar In-Space Tech. Exp.)計画などで、それらの実現のための研究が活発に進められている。このようにスペースライダーは90年代から21世紀にかけての地球大気環境の強力な観測システムとしての実現の可能性が高まってきており、ダイオード励起固体レーザーへの期待が極めて大きい。

3.3 重力波干渉計

ダイオード励起固体レーザーはスペクトル幅が極めて狭く安定であり、プラズマ振動などのノイズが無い特性を利用して、量子雑音限界の超高感度レーザー干渉計センサーへの応用が可能である。超新星爆発などによって発生する重力波を検出する“アンテナ”として、光路長が数100m～数kmのレーザー干渉計を設置し、その光路長の重力波による変化を相対変位 $\Delta l/l=10^{-21}$ 以下と極めて高感度で測定するものである。そのための光源として、CW出力約1

Table I Space lidar system requirements.

Object	Measurement Method	Wave length (μm)	Energy (J), PRF (Hz)
Cloud Heights	1 Wavelength	0.5-1.0	0.2, 10
PBL Height	1 Wavelength	0.5-1.0	0.1-1.0, $10^{\dagger}$
Stratospheric Aerosols	2 Wavelength	0.35 & 0.5-1.0	0.5-1.0, 10^*
Cloud Parameters	1 Wavelength	0.5-1.0	0.5-1.0, 10^*
Tropospheric Aerosols	2 Wavelength	0.5-1.0	0.5-1.0, 10^*
Column H_2O	2, DIAL	0.727	0.2-0.5, 10^*
Column H_2O	CW DIAL	10-11	5-10 W, $C^{\dagger}$
H_2O Profile	2, DIAL	0.727 or 0.93	1.0, 20^*
Surface Pressure	2, DIAL	0.76	0.5, 10^*
Pressure Profile	2, DIAL	0.76	0.5, 25^*
Temperat. Profile	2, DIAL	0.77	0.5, 50^*
O_3 Total	2, DIAL	0.3 or 9.6	1.0, $10^{\dagger}$
O_3 Profile	2, DIAL	0.3 or 9.6	1.0, $10^{\dagger}$

* $\dagger$ Telescope diameter is 1.25m and 1.0 m, respectively.

kWで周波数と位相が完全に制御されたレーザーの開発が必要であり、重力波により宇宙を観測する重力波天文台の実現の可能性が精力的に検討されている²⁶⁾。また、この超高感度レーザー干渉計における高出力固体レーザーや光学技術は、現在の光センシング技術にも大きな進展をもたらすものと考えられる。

4. 結び

以上、本文では半導体レーザーとダイオード励起固体レーザーによる遠隔計測法とその応用分野について概観してきた。最近これらのレーザー技術が急速に進展しているため、数年以内に前記の高出力、高安定特性が満足され、種々の新しいセンシング技術が出現することも夢ではないと考えられる。さらに、波長 $1.5\mu\text{m}$ 以上の“Eye Safe”の固体レーザーの発展によりレーザー利用の安全性が高められ、レーザー利用センシング技術の広い実用化が進展するものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 田幸敏治 他編：“光測定ハンドブック”，朝倉書店(1981)。

- 2) 光応用計測技術調査委員会編：“光計測のニーズとシーズ”，コロナ社(1987)。
- 3) R.L. Byer: Science, 239 (1988) 742.
- 4) 伊藤弘昌：レーザー研究, 15 (1987) 849.
- 5) I. Kaisto, J. Kostamovaara, M. Manninen and R. Mayzila: Appl. Opt. 22 (1983) 3258.
- 6) 柳沢利治, 福家俊, 齊田富三, 伊藤弘昌, 稲場文男：12回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, E2 (1988) 79.
- 7) 松井一郎, 清水浩, 杉本伸夫, 笹野泰弘, 浅井和弘：応用物理, 57 (1988) 407.
- 8) 佐々木孝夫, 牛島厚二, 山本雄大, 小林喬郎：13回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, C9 (1989) 59.
- 9) 須田教明：“電磁波測距儀”，森北出版 (1980)。
- 10) K. Seta and T. Ohishi: Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) L1969.
- 11) 角野和義, 他：電子情報通信学会論文誌 (投稿中)。
- 12) 竹内延夫, 馬場浩司, 桜井捷海, 上野敏行他：レーザー研究, 13 (1985) 353.
- 13) 竹内延夫編著, 国立公害研究所研究報告, 122, R-122-89 (1989)。
- 14) 阿保真, 長澤親生, 内野修：レーザー研究, 18 (1990) 341.
- 15) 小林喬郎：光学, 17 (1988) 279.
- 16) T. Kobayashi and J. Shudong: Digest of 1988 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (1988) 133.

- 17) R.L. Byer, E.K. Gustafson and R. Treb ed. :
"Tunable Solid State Lasers for Remote
Sensing", Springer-Verlag (1985).
- 18) J. W. Bilbro: Optical and Laser Remote
Sensing, Spring-Verlag (1983) 356.
- 19) R.M. Hardesty: Appl. Opt. 23 (1984) 2 545.
- 20) M.C. Kavaya, S.W. Henderson, J.R. Maggee,
C.P. Hale and R.M. Huffaker: Opt. Lett. 14
(1989) 776.
- 21) T.J. Kane, W.J. Kozlovsky, R.L. Byer and
C.E. Byvik: Opt. Lett. 12 (1987) 239.
- 22) 板部敏和: 光学, 18 (1989) 68.
- 23) 内野 修: レーザー研究, 17 (1989) 258.
- 24) R.J. Curran: IEEE Trans. on Geoscience and
Remote Sensing, 27 (1989) 154.
- 25) LASA Instrument Panel Report, NASA EOS,
Vol. II d (1987).
- 26) 総合研究(B), 研究成果報告書, "重力波の基
礎研究", 代表 早川幸男 (1990).