

---

差動型ヘテロダイン検出による光散乱体の空間分布測定

---

(60550027)

昭和61年度科学研究費補助金(一般研究(C))研究成果報告書

昭和62年3月

研究代表者 **小松 進一**

(早稲田大学工学部教授)

## は し が き

オプトエレクトロニクス技術の進歩と光産業の発展に伴い、新しい光デバイスが種々考案され実用に供されるようになった。光コンピューターなどの未来技術の実現や光情報処理の実用化にとっても、より高性能のデバイスに対する要求も日増しに大きくなっており、これらに用いられる新しい光学材料の開発も盛んに行なわれるようになった。

一方において、マイクロエレクトロニクス分野においては、VLSIなどの集積度の向上とならんで素子の応答速度の高速化と機能の多様化、光素子の高感度化・高出力化・動作波長領域の拡大などのために、高純度・均質の新しい半導体材料の開発が望まれている。

本研究では、光ヘテロダイン法により微弱な散乱光を検出して、光学ガラスや結晶、および半導体材料内部の欠陥や不純物の空間分布を測定したり、拡散表面の形状測定を行なうための光プローブの基礎研究を行なった。

ここで用いられた光学系の基本系は、レーザードップラー速度測定で通常使用されている、差動型と呼ばれる光学系に類似している。ただし、ここではプローブ領域を光の波長程度にまで小さく絞っており、この状態では速度計としては使用できない。交差させた2本のレーザービームの一方を周波数シフトさせて、散乱光のビート成分を観測することにより、静止した散乱体を検出することができる。

周波数シフトした光を得る方法として、超音波セルと横ゼーマンレーザーの2つを検討し、測定の空間分解能やSN比についても実験的に検討したので、以下にその成果について述べる。

本研究を遂行するにあたり、文部省科学研究費補助金の援助を受けた。ご支援とご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表する。

## 研究組織

研究代表者： 小松進一 (早稲田大学理工学部教授)  
研究分担者： 大頭仁 (早稲田大学理工学部教授)  
研究分担者： 久米祐一郎 (早稲田大学理工学部助手；  
昭和60年度のみ分担)

## 研究経費

昭和60年度	1,700千円
昭和61年度	400千円
計	2,100千円

## 研究発表

### 口頭発表

1. 小松進一、須原浩之、鈴木直也、大頭仁：

28pZF10

「ゼーマンレーザーを用いるヘテロダイン光プローブ」

応用物理学会 (昭和62年 3月28日 発表予定)

2. S.Komatsu, H.Suhara and H.Ohzu

「Differential heterodyne optical probe  
using a Zeeman-laser」

ICO 14(14th General Assembly of

the International Commission for Optics)

(1987年 8月 発表予定)

## (研究成果の概要)

差動型ヘテロダイン光学系を用いて物体内部の光散乱体検出のための光プローブを構成し、その基本的な特性を検討し、かつ実験的に評価した。

互いに周波数の異なる2本のコヒーレントなレーザービームを、顕微鏡対物レンズなどの開口数の大きなレンズで絞り込み、焦点付近で交差させる。この微小な領域の中に、微小な粒子や構造的な欠陥、あるいは材料の不均質などがあって散乱光を生じさせるとき、この散乱光の強度には2つの光の周波数の差に等しい周波数のビート成分が含まれる。一方のビームにだけ含まれている散乱体からの散乱光にはビート成分が含まれず、また、それぞれのビームに含まれる複数の異なる散乱体間の干渉によって生ずるビート成分は、光強度を電流に変える光電面の受光角を十分に大きくとることにより抑えることができる。したがって、光電流のビート成分を検出しながらビームの交差領域または被検物体のいずれかを空間的に走査することによって、散乱体の分布を高いSN比でコントラスト良く映像化することが可能である。

周波数の異なるコヒーレントなレーザービームを得るためによく用いられるのは、ブラッグ回折を利用した音響光学セルである。ここでは、最初の実験において、40MHzの進行超音波セルを使って光プローブを構成し1.0 $\mu$ m程度の凹凸をもつ拡散表面の形状測定を行なった。実験の結果、3次元の形状測定に有効であることが確かめられたが、SN比については期待した程には良好とはいえなかった。これは、超音波の周波数が比較的高かったため、駆動回路から直接に受光系の電気回路に電波のかたちでまわりこむためと考えられる。シールドを完全にするか、周波数の異なる2台の超音波セルを使用してビートダウンした信号を検

出すことにより、まわり込みを抑制することが可能であるが、装置が複雑になるという欠点がある。

超音波セル以外の方法として、ゼーマンレーザーの使用が考えられる。磁場を加えたレーザーからはゼーマン効果によって、磁場の強さに比例して周波数がシフトしたコヒーレント光をとりだすことができる。ここでは、横ゼーマンレーザーを使い、振動方向が互いに直交した、異なる周波数の2本のレーザービームを得、位相板と偏向ビームスプリッターを用いた簡単な光学系で互いに干渉するようにしている。ビート周波数は87.5 kHzと低く電氣的に処理しやすい。ロックイン・アンプによる同期検出でさらにS/N比が向上した。

横ゼーマンレーザーを用いた光プローブでは、10  $\mu\text{m}$   $\phi$  のラテックス球をターゲットに用い、周囲にターゲット以外の粒子が存在するときに、その影響をどの程度までに抑制できるかを調べた。ガラス板の裏面にターゲットを置き、表面に多数の粒子をランダムに分布させた結果、1000個/ $\text{mm}^2$ 程度の粒子がある場合にもS/N比の良い測定が行なえた。光強度だけで検出する場合と比べて、顕著な改善がみられた。

この方法を赤外領域に拡張することにより、種々の半導体の欠陥検出にも有効であると考えられる。また、生体に影響を与えない程度の低強度の光で良いS/N比を得る方法としても有効であると考えられる。

ここでは、散乱光のビート成分を観測しているが、光強度のかわりに別な物理量を観測することも考えられる。

たとえば、光音響効果のように光吸収による熱的な効果によって発生する音波の観測に利用することが可能であろう。この場合に、差動型の光プローブを利用すると、非常に高い空間分解能の測定が可能になる。2本のビームが交差する部分でのみ、温度・密度の時間変動がおり、

その他の部分では定常状態を保つからである。これにより、通常のPASでは得ることの難しい深さ方向の分解能を得ることができる。

また、OBIICにおいては、光照射によって生じる光電流や光起電力を測定するが、この場合にも差動型ヘテロダイン光プローブを用いることにより、深さ方向の分解能が得られる。

このように、光以外の信号を検出するときは、2本のビームのそれぞれに含まれる複数の散乱体同志の干渉効果は、ディテクターの面積によらず問題とならなくなる。

光を検出に用いる場合でも、非線形光学効果を利用して、たとえば光混合によって生じる和または差の周波数成分を検出するときには散乱体間の干渉効果を防ぐことができる。

## 1. はじめに

本研究の目的は差動型ヘテロダイン光学系によって微弱な光散乱を引き起こす散乱体の空間的な分布を高精度かつ高分解能で非接触測定するための新しい方法を開発し、その基本的特性と性能の評価を実験・解析の両面から行なうことである。

具体的な手法としては、安定化横ゼーマンレーザーから周波数が互いに異なる2本のレーザービームをとりだし、交差させた後、微小領域に絞り込み、その中に存在する散乱体からの散乱光を十分に広い光電面で受光した後、狭帯域フィルターを用いて光ビート成分を検出することにより、周囲からの余分な迷光の影響を除去した高S/N比の測定が行なえることを確認する。

エレクトロニクスをはじめとする諸工業の近年の発展に伴い、工業材料の精密化が重要な課題となっており、本研究の手法は、光学ガラスや結晶、半導体材料の内部の欠陥や不純物、また表面の凹凸、さらに生体眼の水晶体内部の散乱体の検出に応用されることが期待される。

従来から微弱な散乱光の測定には、チョッパーによって入射光を強度変調し、これに同期して散乱光の信号強度を検波することが一般に行なわれている。このような方法では入射光ビームの全体を強度変調するために、入射光ビームが通過するすべての部分から生じる散乱光や、試料境界面からの強い反射光成分なども同じ周波数で変調されることになり、ノイズ成分を増加させる。

本方法では、周波数のわずかに異なる2本のレーザービームを微小領域中で交差させており、十分広い光電面を用いて散乱光を検出することによって、ビームが交差する微小領域だけが強度変調された光のプロープをつくりだすことができる。このプロープを空間的に走査することに

より散乱体の空間分布や試料表面の凹凸分布を、高いS/N比と空間分解能で測定することが可能となる。

用いられる光学系の配置はレーザードップラー速度計の差動型光学系と類似しているが、ドップラー速度計と違って、ビームの交差する領域を波長程度に小さくしてもビート信号のQ値が低下せず、また結像レンズを必要としないので収差の影響をうけない。

光ヘテロダイン検出は、レーザードップラー速度測定をはじめとして、光計測の様々な分野で広く使われており、重要な基本技術のひとつとなっている。最近では、電気信号の位相測定法と併用して鏡面を対象とした高精度干渉計測への応用が内外で盛んに行なわれている。

結像システムへの応用は藤井(1975)によるレンズなしの無収差結像系の研究が広く知られている。しかし、藤井の系は、物体全体を一樣な幅の広いビームで照明し、別に置かれた参照点光源を空間的に走査する、いわゆる局所ヘテロダイン方式であり、散乱が弱い場合には適していないと考えられる。本研究の差動型ヘテロダイン方式では、強い散乱光が得られる点で有利である。また、たとえば半導体材料の内部欠陥を検出するため光音響分光法の研究が盛んになってきたが(たとえば、谷田貝; 1983)、差動型の場合には、このように光以外の物理量を検出する場合にも容易に適用が可能である。

差動型ヘテロダイン光学系の散乱体検出への応用については、本研究の代表者(小松)が昭和54年度の文部省科研費奨励研究(A)の補助を受けて研究を始めてから、これまでにアクリル樹脂を試料として、表面形状測定用の光プローブとしての特性評価を行ない、2~3 $\mu$ m程度の分解能を得ている。しかしながら、これまでのシステムではレーザー光の周波数変調に超音波ブラッグセルを使用していることからビート周波数が高く(40MHz)、受信系のバンドパスフィルターのQ値を十



分に高くとれず、また超音波セルの駆動回路から空中を伝播してくる成分がノイズとなり、必ずしも満足なS N比が得られていなかった。今回使用したゼーマンレーザーによってビート周波数を87.5kHzと処理しやすい値に下げることが出来、またロックインアンプによる同期検出が行なえるようになったため、S N比を大幅に改善することができた。

## 2. ヘテロダイン光プローブの原理

互いに周波数の異なる2本のレーザービームを交差させた領域では、一般に、図1のように等間隔の干渉縞が生じ、縞に垂直な方向に等速度で移動する。このとき、交差領域内に小さな散乱体があると、干渉縞の通過に伴って散乱光の強度は一定の周波数で変化する。この周波数は2つの光の周波数  $f_1$ ,  $f_2$  の差  $\Delta f$  に等しく、より正確には、それぞれの周波数の散乱光同志のビートとして取り扱うべきものである。

散乱光強度の  $\Delta f$  成分のみに注目することにより、交差領域内の小さな散乱体の存在を感度良く検出することが可能であり、これを光プローブとして用いることができる。狭帯域フィルターとの併用により、迷光などの影響を抑制し、検出のS N比を向上させることが期待できる。

図1の光学配置は、レーザードップラー速度測定(LDV)で普通に用いられている差動型と呼ばれるものであるが、LDVでは交差領域内に多数の干渉縞が含まれることが本質的に重要であり、その本数によって速度測定の分解能が決定されるのに対して、光プローブとして用いる場合には、縞の本数は少ないほどビート信号のコントラストが良いので理想的には縞一色になることが望ましい点で異なっている。したがって光プローブとして用いる場合には、交差領域全体の大きさを波長のオー

ダーまで小さくすることができ、空間分解能が高い。

上述のように光ヘテロダイン検出によりビート成分だけをとらえるので、レーザービームの通り道の途中にある個々の散乱体の影響はショットノイズを別にすれば考慮する必要がなく、各ビームに別々に含まれている複数の散乱体からの光の干渉によって生じる  $\Delta f$  の成分の影響は、受光系の光電面の見込み角を大きくとることによって防ぐことができる。

差動型ヘテロダイン光プローブから得られるビート信号について、簡単な評価を行なってみる。いま、2つのレーザービームの角周波数を、それぞれ  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、光プローブの中にあるターゲットから光電面に届いた散乱光振幅のうち、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$  の成分をそれぞれ  $A_0$ 、 $B_0$  とする。

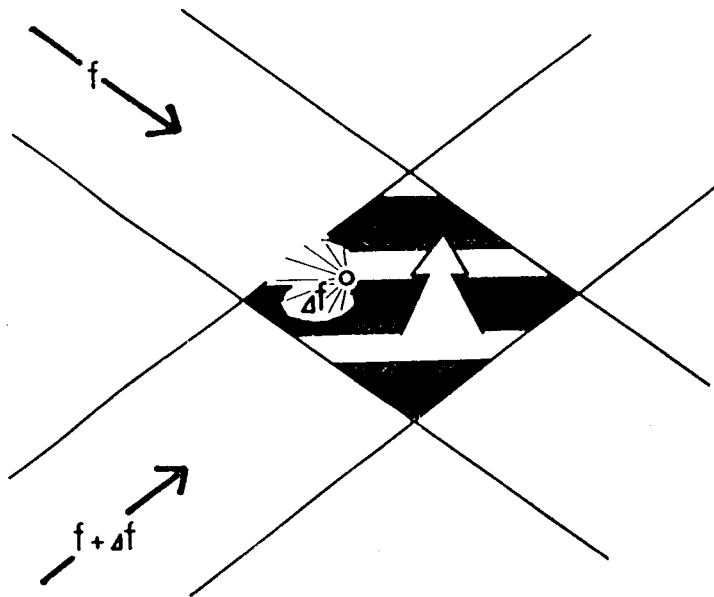


図 1 光プローブの形成

また、プローブの外にあるターゲット以外の散乱体による散乱光振幅を同様に  $A_n$ 、 $B_m$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $m = 1, 2, \dots, M$ ) とする。さらに、光電面上の点Pまでの各散乱体からの距離を、それぞれ  $r_0$ 、 $r_n$ 、 $r_m$  とすると、点Pにおける各散乱光の合計  $U(P)$  は、次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned}
 U(P) = & A_0 \exp(ikr_0)/r_0 \exp(-i\omega_1 t) + B_0 \exp(ikr_0)/r_0 \exp(-\omega_2 t) \\
 & + \sum A_n \exp(ikr_n)/r_n \exp(-i\omega_1 t) \\
 & + \sum B_m \exp(ikr_m)/r_m \exp(-i\omega_2 t)
 \end{aligned}$$

ここで2つの周波数の差は光の周波数に比べて十分小さいので波数  $k$  は同じ値  $2\pi/\lambda$  で与えられるものとした。また、プローブ内に散乱体が2つ以上ある場合は、第1項および第2項が総和で表わされる。

この点における光強度  $I(P)$  は

$$I(P) = |U(P)|^2$$

であり、光強度に比例する光電流  $i(t)$  は、受光面全体にわたっての積分で与えられるから、比例定数は除いて

$$i(t) = \int_A I(P) dS$$

となる。 $i(t)$  に含まれる  $\Delta f = (\omega_1 - \omega_2) / 2\pi$  の成分の大きさを評価することにより、光プローブとしての空間分解能やSN比を計

算することができ、受光面の大きさやターゲット以外の散乱体の密度などの与える影響を調べることができる。

光プローブの空間分解能は、交差したプローブ領域そのものの大きさと光電面が広いために生じる分解能の両者のどちらか小さい方で与えられる。散乱体の密度が小さいときは主として前者で分解能が決定されるのに対して、密度が大きくて複数の散乱体間の干渉が問題となるときは後者を考慮する必要がある。前者は集束レーザービームの断面形状で決定されるので比較的とらえやすい。ここでは、散乱体同志の干渉効果が分解能に与える影響を調べるために、後者について考察する。受光面を大きくすることにより得られる空間分解能を簡単に評価するために、いま、プローブ内部に2つの同じ種類の散乱体が存在し、その他にはないものとする。まず光軸方向の分解能を評価するために、2つの散乱体は光軸上にあり、受光面からの距離は  $R$  と  $R + \Delta R$  とする。これらの2つの散乱体を新たな光源として光電面上には、これらの干渉によりフレネルゾーンプレートのような干渉縞が現われることになる。2つのビームの周波数に差がある場合には、干渉縞の明暗が時間とともに定在波のように振動をする。

光電流を光電面全体で積分するので、この信号のコントラストは縞の総本数の増加に伴って減少する。暗い縞で区切られた各輪帯の面積は等しく、これに含まれる光エネルギーは等しいものとみなす。中心部の面積は輪帯の半分である。暗い縞の位置では2光源からの光路差が  $\lambda/2$  の奇数倍 ( $m = 2n - 1$ ;  $n = 1, 2, \dots$ ) になる。 $n$  番目の暗縞が受光面の外周と一致するとビート信号のコントラストはゼロになる。同様に  $n \pm 1/2$  の明縞が一致するときもゼロになることが分かる。この付近でコントラストが極大になるのは  $n \pm 1/4$  のところであり、ビート信号の最大値と最小値からコントラストを求めると、それぞれ、

$$2/[(4n-1)\pi]、2/[(4n-3)\pi]$$

であり、この付近でのコントラストは、高々

$$1/[(2n-1)\pi]$$

と表現することができる。m番目の暗縞の半径は、

$$r_m = [(2m-1)\lambda/\Delta R]^2 R$$

であり、光電面の半径をdとすると、これに含まれる暗縞の最大次数nは、 $(2n-1)=(d/R)^2 \Delta R/\lambda$  の関係を満たし、ビート信号のコントラストは

$$C_L = 4\lambda F^2/(\pi \Delta R)、$$

逆にコントラスト  $C_L$  を与える間隔

$$\Delta R_r = 4\lambda F^2/(\pi C_L)$$

によって分解能の目安が与えられる。

$F=1$ 、 $\lambda=0.6\mu\text{m}$  の場合に、コントラストが半分になるのは、 $\Delta R_r=1.5\mu\text{m}$  のときであり、 $1/(\pi)$  になるのは  $2.4\mu\text{m}$ 、 $1/(9\pi)$  になるのは  $21.6\mu\text{m}$  のときである。粗い見積もりであるが、 $\Delta R_r$  を光軸方向の分解能の目安にすることができる。

面内方向の分解能も同じような干渉縞の考え方で見積もりをすること

ができる。2光源が面内方向に  $\Delta x$  だけ離れていると、光電面上にできる干渉縞の周期は  $R\lambda/\Delta x$  だから、明暗対を1本と数えたときの縞の総本数  $n$  は

$$n = 2d\Delta x / (R\lambda)$$

であり、このときのコントラストは高々

$$C_T = 1/(n\pi) = F\lambda/(\pi\Delta x)$$

である。逆に  $1/n$  のコントラストを与える  $\Delta x_r$  は、

$$\Delta x_r = \lambda F / (\pi C_T)$$

で、これにより分解能の目安が与えられる。

$F=1$ 、 $\lambda=0.6\mu\text{m}$  のとき、コントラストが  $1/2$ 、 $1/(2\pi)$ 、および、 $1/(10\pi)$  になるのは、それぞれ、 $0.38$ 、 $1.2$ 、そして  $6.0\mu\text{m}$  のときである。

次に別々のビーム含まれる2つの散乱体間の干渉効果を考えてみよう。この場合には、受光面上の干渉縞は横移動し、同心円状の干渉縞の場合には中心からわき出し、または吸い込みがおきる。

面内方向に2つの散乱体があるときは、干渉縞の総本数が  $m$  のとき、ビート信号のコントラストは

$$C_T^* = 1/(m\pi) = \lambda F / (\pi\Delta x)$$

であり、コントラスト  $C_T^*$  を与える間隔はプローブ内の場合と同じく

$$\Delta x_T^* = \lambda F / (\pi C_T^*)$$

となり、分解能の目安を与える。

光軸方向については、 $n$  番目の暗縞がちょうど含まれるところでコントラストが極大になる。ここでのコントラスト  $C_L^*$  は

$$C_L^* = 2 / [(2n-1)\pi] = 8\lambda F^2 / (\pi \Delta R)$$

で、プローブ内の場合の2倍となる。したがって、コントラスト  $C_L^*$  を与える光軸方向の間隔は、

$$\Delta R_T^* = 8\lambda F^2 / (\pi C_L^*)$$

となり、これもプローブ内の場合の2倍となる。

$F=1$ 、 $\lambda=0.6\mu\text{m}$  のとき、コントラストが  $1/2$ 、 $2/(3\pi)$ 、 $2/(19\pi)$  になる間隔は、それぞれ  $3.1$ 、 $7.2$ 、 $46\mu\text{m}$  であり、分解能の目安となる。

$D$  が大きくなると、光軸方向の分解能が面内方向と比べてとくに悪くなるのは通常のレンズによる結像の場合と同じである。

また、光電流の2乗を直接に検出するディテクターを使用したときは、上記のコントラストはそれぞれ二乗で小さくなり、光プローブのすそ野が狭くなるので空間分解能が向上する。

### 3. 超音波セルを用いたヘテロダイン光プローブ

周波数が $\Delta f$ だけ異なる2つのレーザービームを得るために、光音響効果を利用した周波数変調器を用い、凹凸のある表面の形状測定を行なった。光変調器は40 MHzのブラッグセルを使用し、0次と1次の回折光を取り出した。実験系の1例の概略を図2に示したが、この他に、偏向ビームスプリッターを用いずに、物体からの散乱光をレンズを通さずに直接フォトマルで受けるような配置についても試みた。

ビート信号の検出には、図3のような回路を用い、局部発振器出力とのミキシングにより7.8 MHzにビートダウンし、正弦波出力の振幅をオシロスコープで読みとった。

被検物体として、厚さ5.8 mmのガラス板に10  $\mu\text{m}$   $\phi$ のラテックス球を載せたものをターゲットとして使用し、光プローブの空間分解能とSNを調べた。走査はXYステージに物体を載せて行なった。結果は図4に示された通りで、x、y、zのそれぞれの方向の半値幅は、2.3、2.6、30  $\mu\text{m}$ であつた。変位の大きなところでも信号がゼロにならず、かなりのバイアス成分がのっていることがわかる。

次に、この光プローブを用いて、アクリル板のノコギリによる切断面の断面形状を測定してみた。切断面をx-y平面に置き、与えられた(x, y)座標に対して、プローブをz軸方向に移動させ、ビート成分が最大となる点をプロットした。

結果は、図5に示したとおりで、これから分かるように物体の表面形状の測定に有効であることが確かめられたが、SN比については、必ずしも良好とは言えず、散乱光のないときにも、信号にバイアス成分が重なっている。これは、超音波の周波数が高いのでブラッグセルの駆動回路から受光系の電気回路に、空中を伝わって40 MHzの成分がまわり



こむためと考えられる。シールドを完全に行なうか、周波数の異なる光変調器を2つのビームのそれぞれに用い、ビートダウンした低周波成分を検出すれば、これを防ぐことが可能と考えられるが、装置が複雑になるという欠点がある。

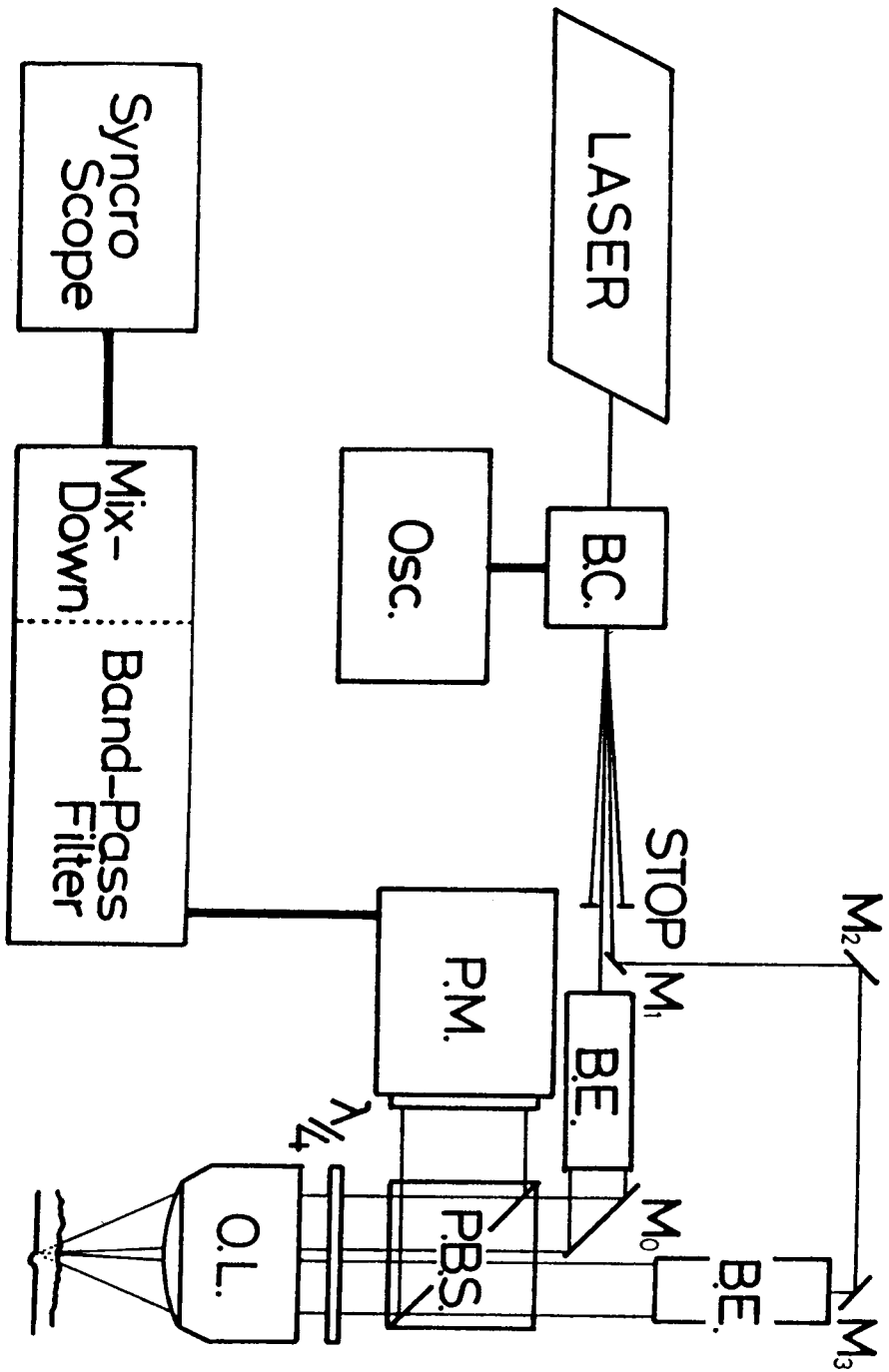


図 2 超音波セルを用いた光プローブ

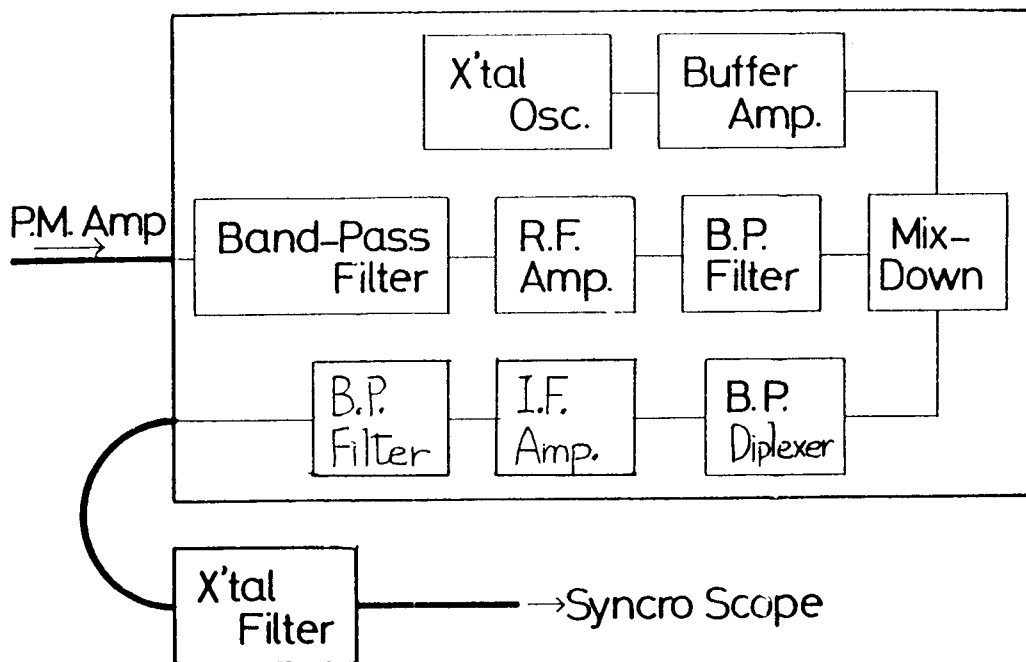


図 3 ビート信号検出回路

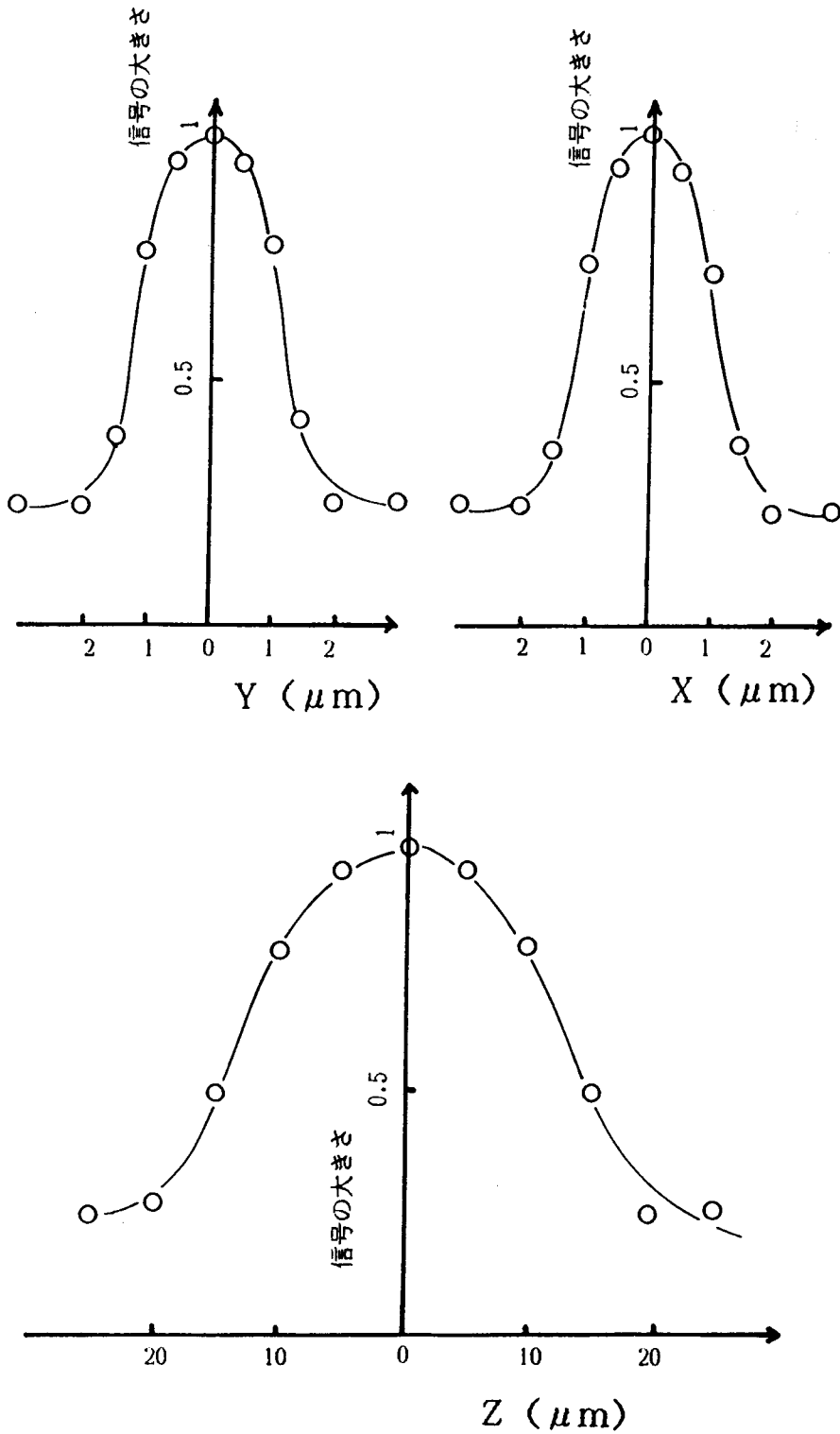


図 4 ビート信号の大きさの軸方向への変化

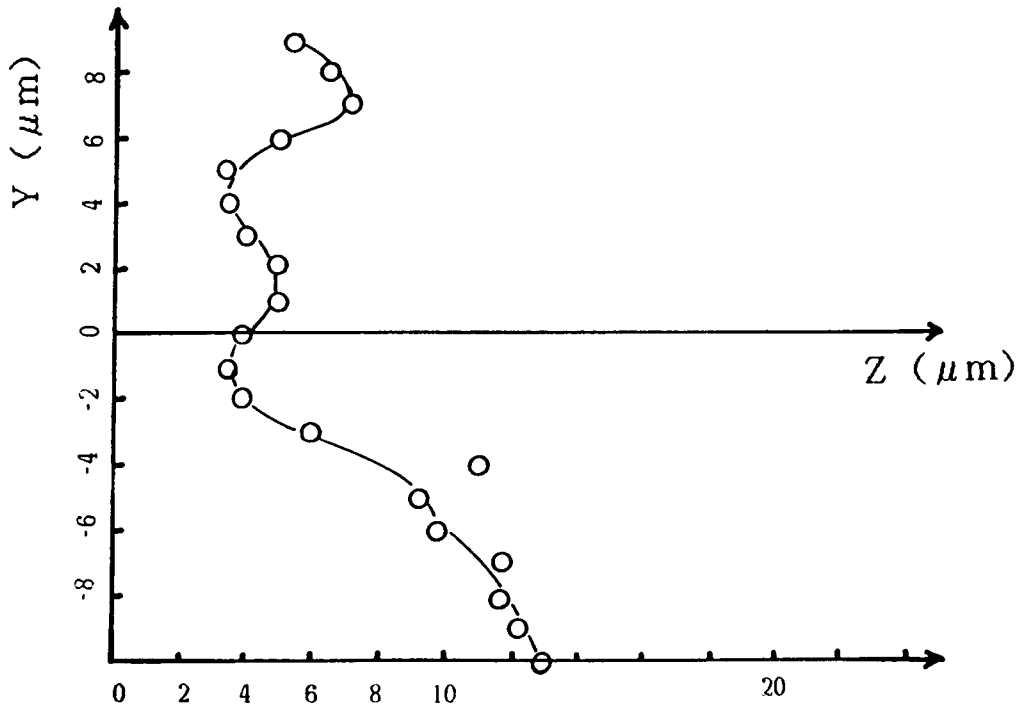
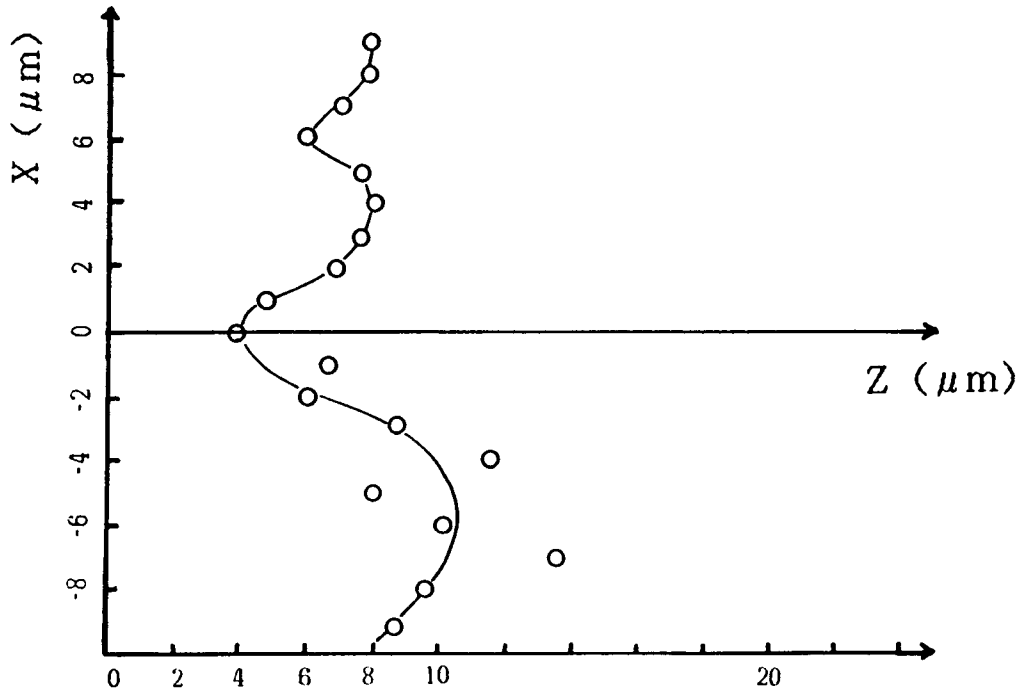


図5 アクリル板の断面形状

#### 4. ゼーマンレーザーを用いたヘテロダイン光プローブ

前章で述べたように、超音波セルを用いた光プローブでは必ずしも高いSN比を得ることができなかつた。ここでは、横ゼーマンレーザー（朝日分光：STZL2）を用いた光プローブについて検討を加える。横ゼーマンレーザーからは、永久磁石の磁場によるゼーマン効果によって、周波数がわずかに異なるレーザー光を取りだすことができ、これらは互いに偏波面が直交した直線偏光となっている。差周波数が低く、また電気的な駆動源がないので、まわり込み効果によるバイアス成分の重畳が少なく、ロックインアンプによる同期検出も可能である。したがって、SN比の高い測定が期待できる。しかも簡単な偏光光学系の使用により、2周波光の分離と干渉が小さなスペースで容易に行なえる長所がある。

光学系は、主として図6のような配置を使用したが、このほかに偏波面の直交した2つの直線偏光成分を分離するのにウォラストンプリズムを用いた系についても試みた。今回使用したゼーマンレーザーの差周波数は87.5kHzであった。この周波数の光ビートをフォトマルで光電変換し、光電流をロックインアンプで同期検波した。参照信号はゼーマンレーザーから取りだされており、これは45°の方向にいた偏光板を通した2周波光をフォトダイオードで検出した信号であり、光プローブからの信号と正確に同期しているものと考えられる。

図6の光学系により、水平方向に振動している成分だけがフォトマルに入射してビート信号をつくるが、フォトマルの直前に置いた絞りで受光面積を調節している。

被検物体として、前の章と同じ厚さ5.8mmのガラス板の片面にラテックス球を1つ付着させ、反対側の面には多数のラテックス球をラン

ダムに配置した。粒子密度  $\alpha$  は 0、1000、5000 個/mm<sup>2</sup> の3通りに選んだ。

面内方向に物体を走査したときのビート成分の変化を図7～9に示す。パラメータとして受光面の直径  $\phi$  をとり、1mm と 8mm の場合を比較している。8mm の分解能が若干良い程度で顕著な差異は見られないが、これは被検体が10 $\mu$ m  $\phi$  と大きいためであると考えられる。1 $\mu$ m  $\phi$  程度の試料を用いて精密に調べる必要がある。

光軸方向に物体を走査したときの同様な実験結果を図10～12に示す。

光ヘテロダイン法がプローブ外の粒子の影響をうけにくいことを確認するために、光強度だけを観測したデータ ( $\Delta f = 0$ ) との比較を行なった結果を次に示した。図13～15が面内方向、図16～18が光軸方向のデータである。とくに光軸方向の分解能における光ヘテロダイン法の効果が顕著である。

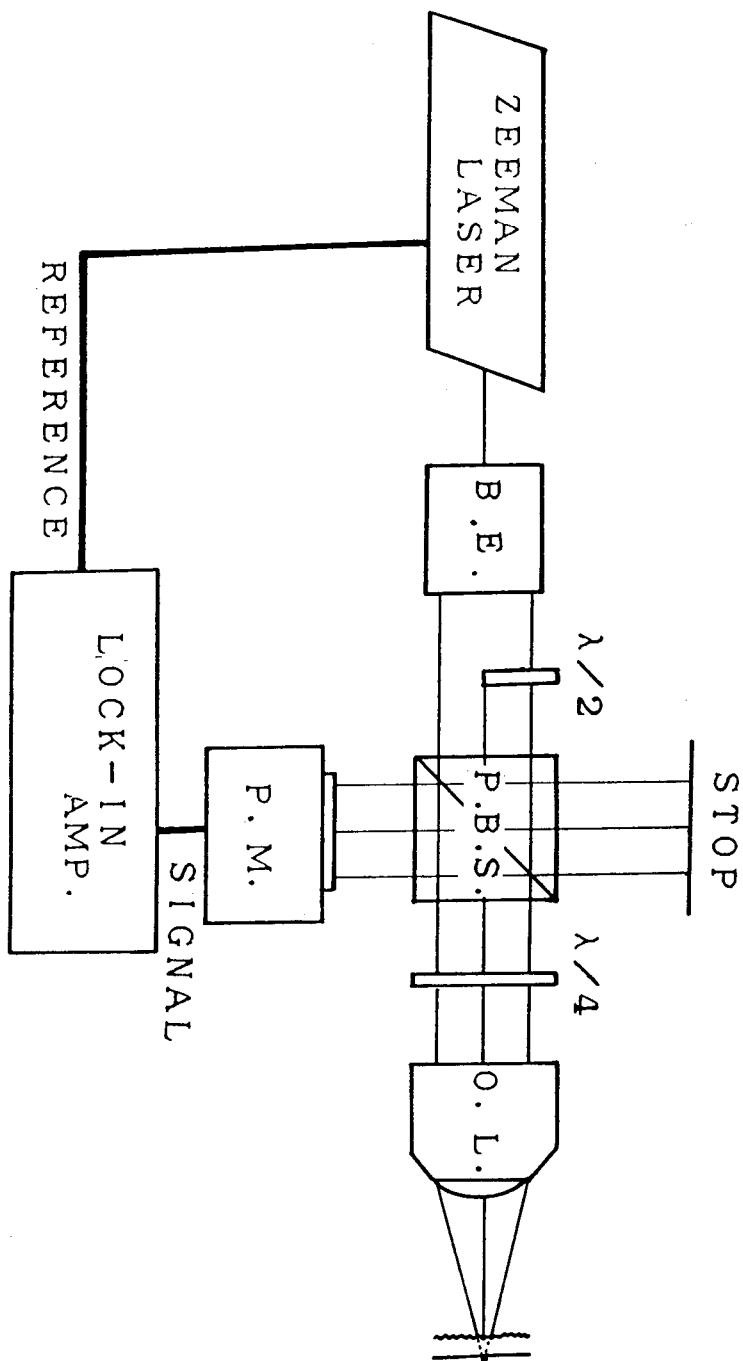


図6 横ゼーマンレーザーを用いる光プローブ



グローブ外散乱密度 0 (個/mm<sup>2</sup>)

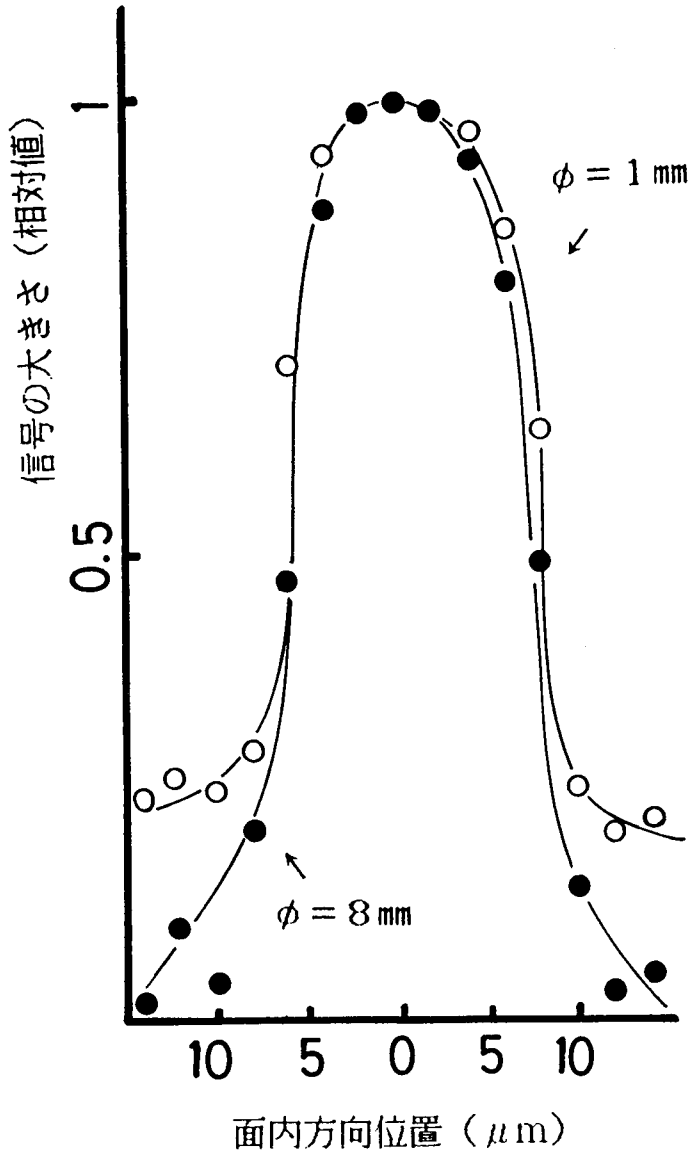


図7 ビート信号の大きさ  
(面内方向;  $\alpha = 0$ )

プローブ外散乱密度1000 (個/mm<sup>2</sup>)

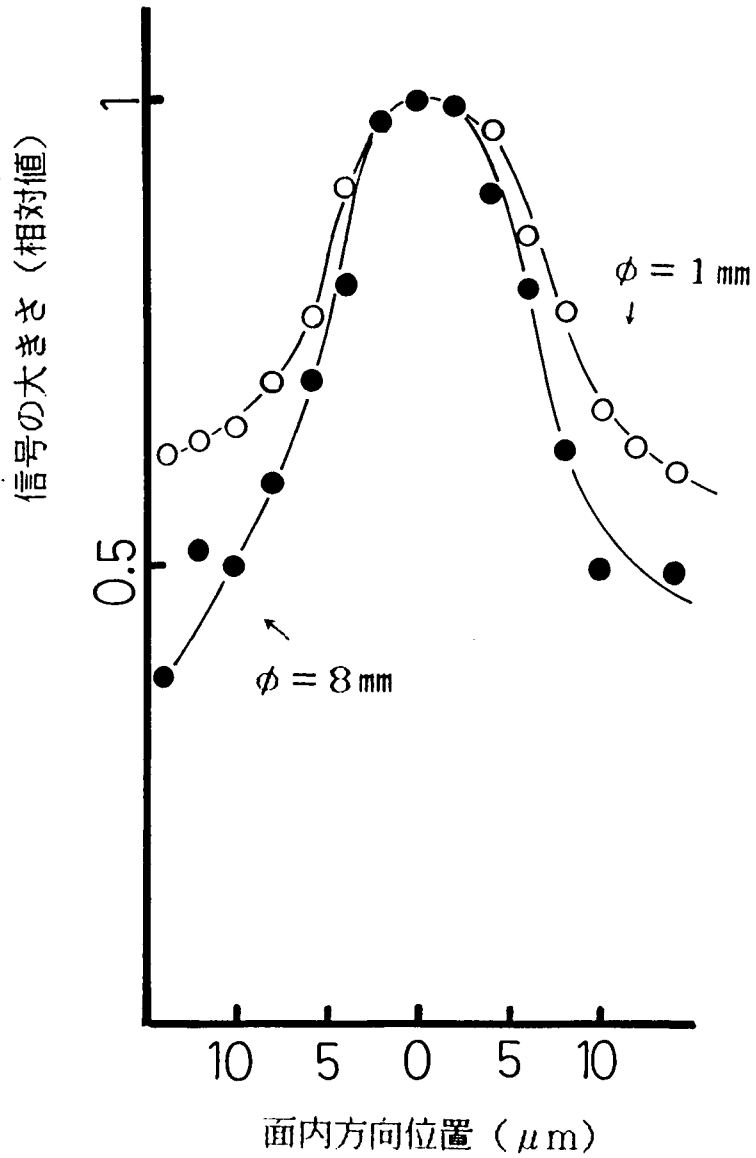


図 8 ビート信号の大きさ  
(面内方向;  $\alpha = 1000$ )

プローブ外散乱密度5000 (個/mm<sup>2</sup>)

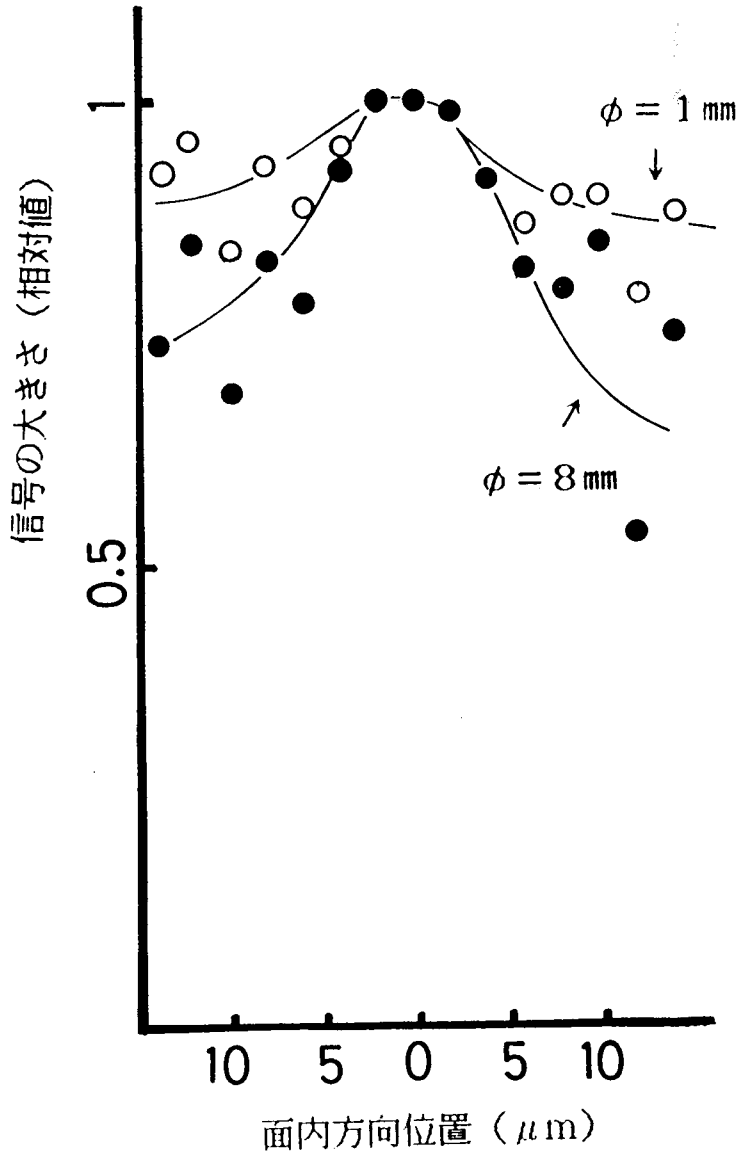


図9 ビート信号の大きさ  
(面内方向;  $\alpha = 5000$ )

プローブ外散乱密度 0 (個/mm<sup>2</sup>)

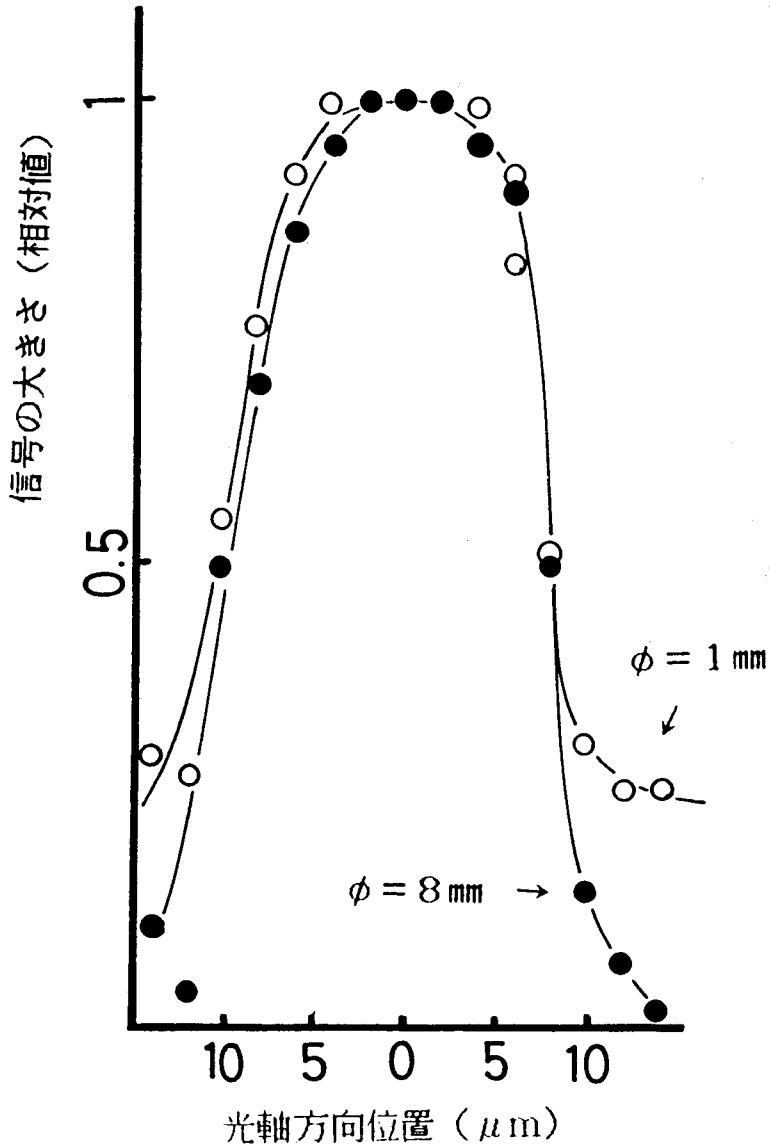


図 10 ビート信号の大きさ

(光軸方向;  $\alpha = 0$ )

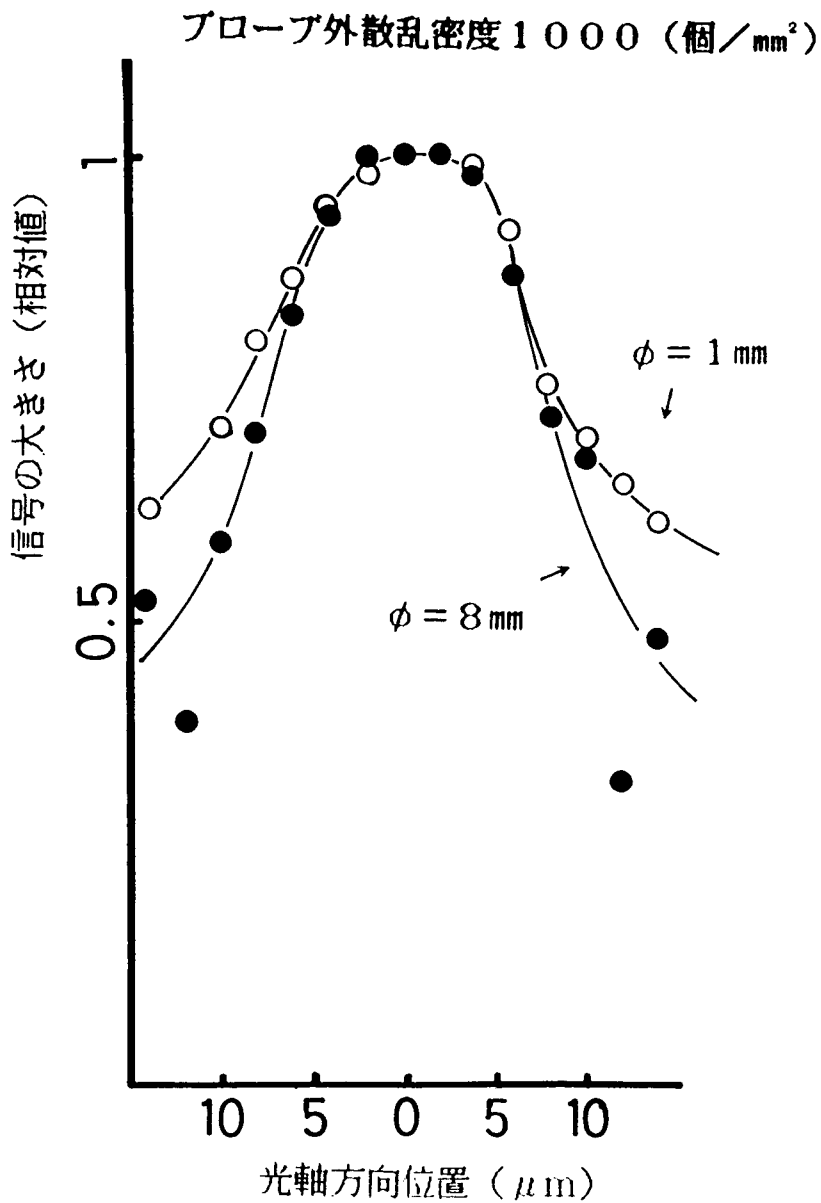


図 1.1 ビート信号の大きさ  
(光軸方向;  $\alpha = 1000$ )

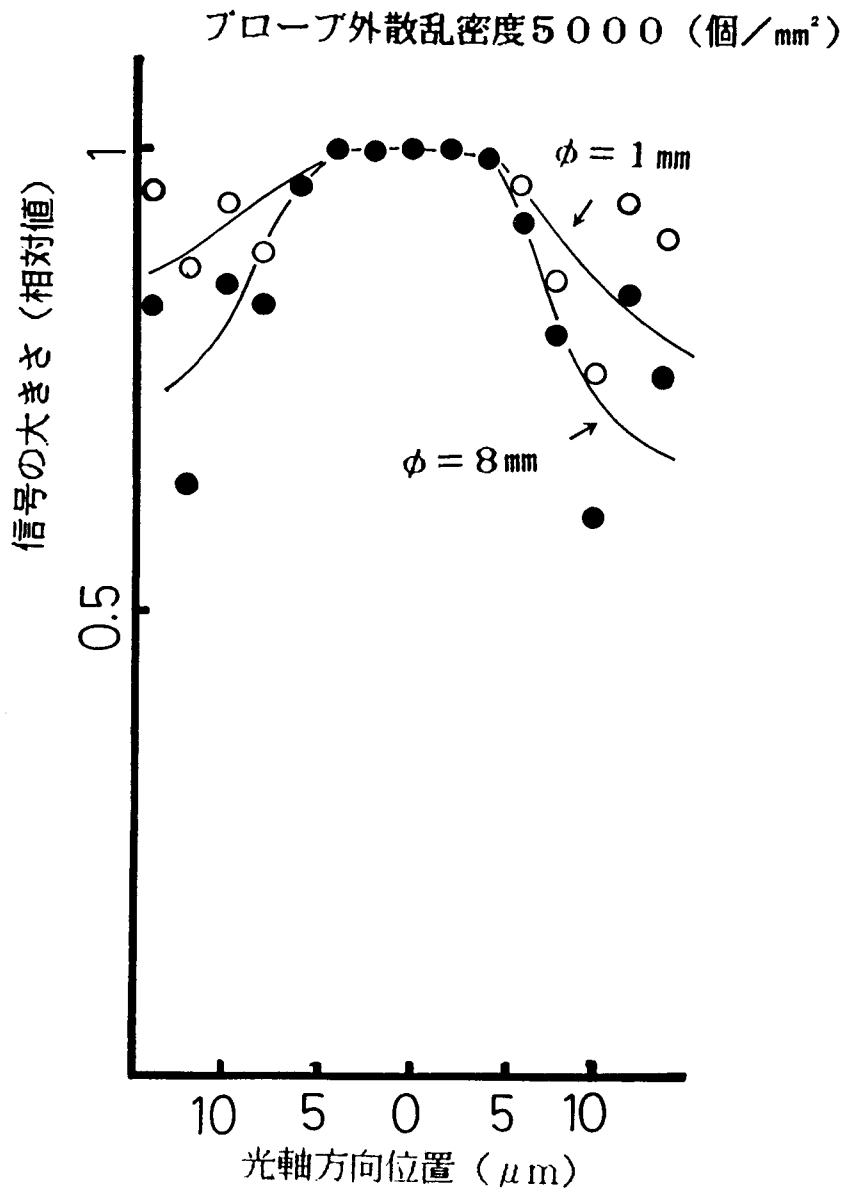


図 1. 2 ビート信号の大きさ  
(光軸方向;  $\alpha = 5000$ )

プローブ外散乱密度 0 (個/mm<sup>2</sup>)

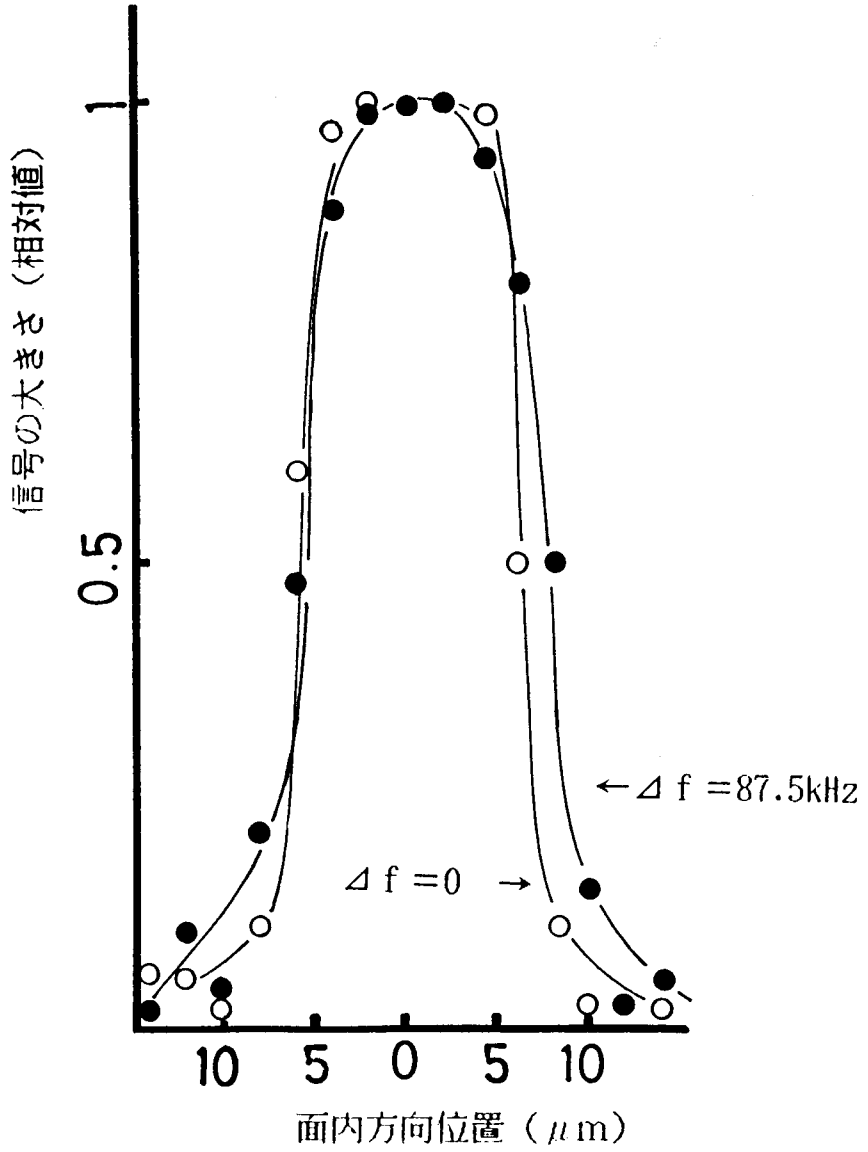


図 1.3 光強度法とヘテロダイン法の比較  
(面内方向;  $\alpha = 0$ )

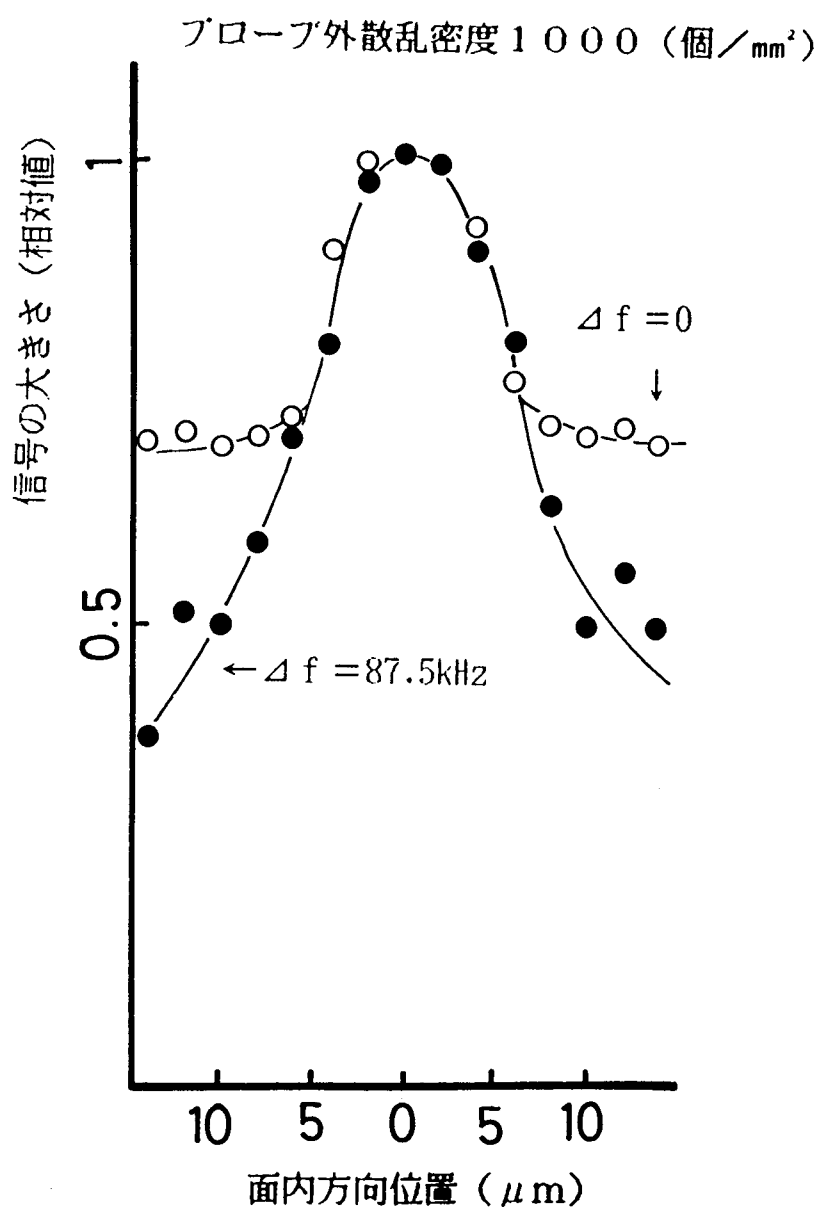


図 1 4 光強度法とヘテロダイン法の比較  
(面内方向;  $\alpha = 1000$ )



プローブ外散乱密度5000 (個/mm<sup>2</sup>)

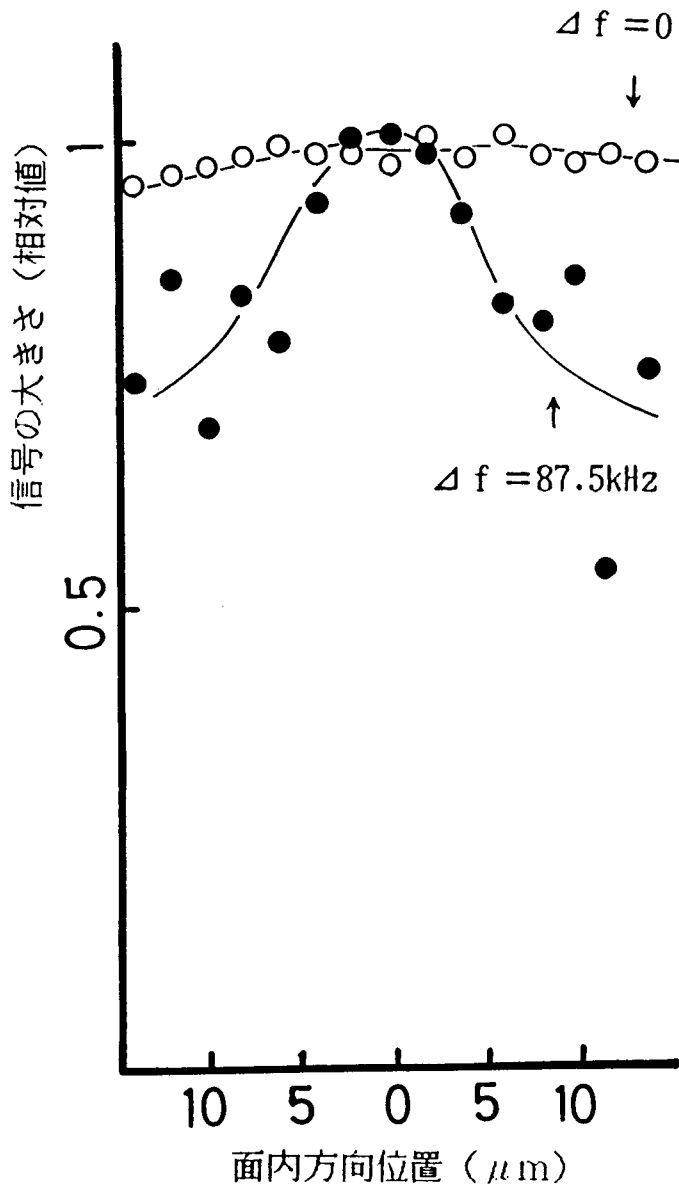


図 1 5 光強度法とヘテロダイン法の比較

(面内方向;  $\alpha = 5000$ )

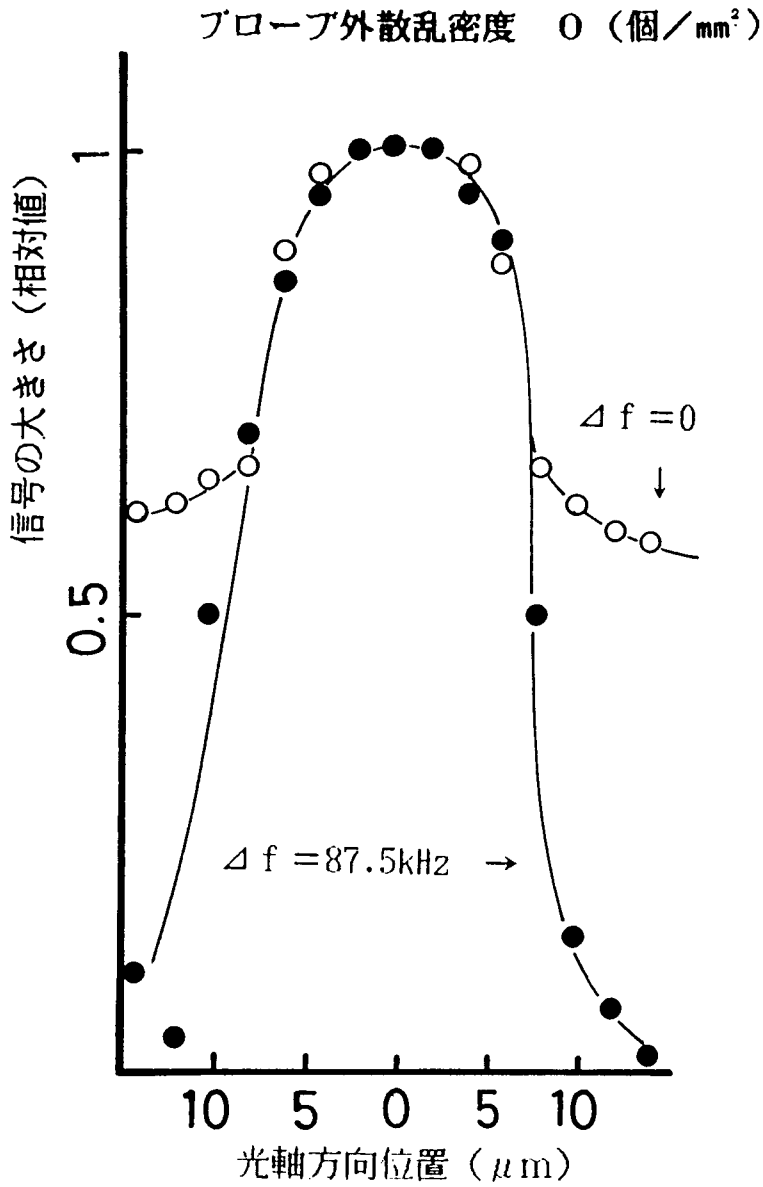


図 1.6 光強度法とヘテロダイン法の比較  
(光軸方向;  $\alpha = 0$ )

プローブ外散乱密度1000 (個/mm<sup>2</sup>)

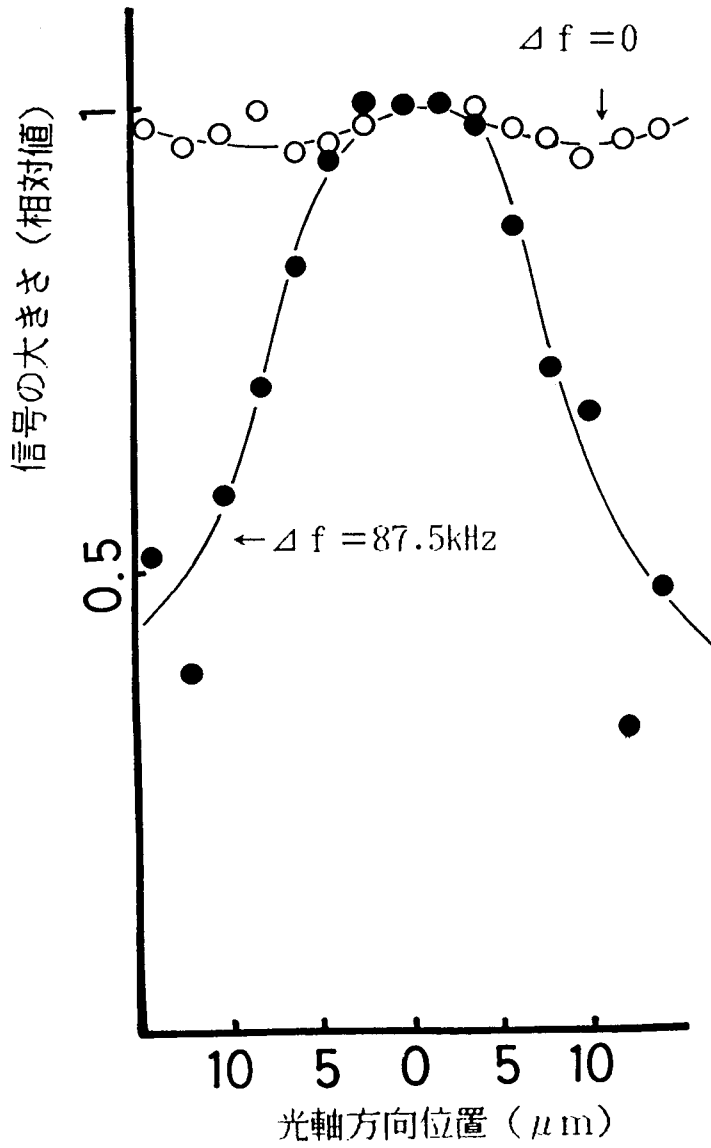


図 1.7 光強度法とヘテロダイン法の比較  
(光軸方向;  $\alpha = 1000$ )

プローブ外散乱密度5000 (個/mm<sup>2</sup>)

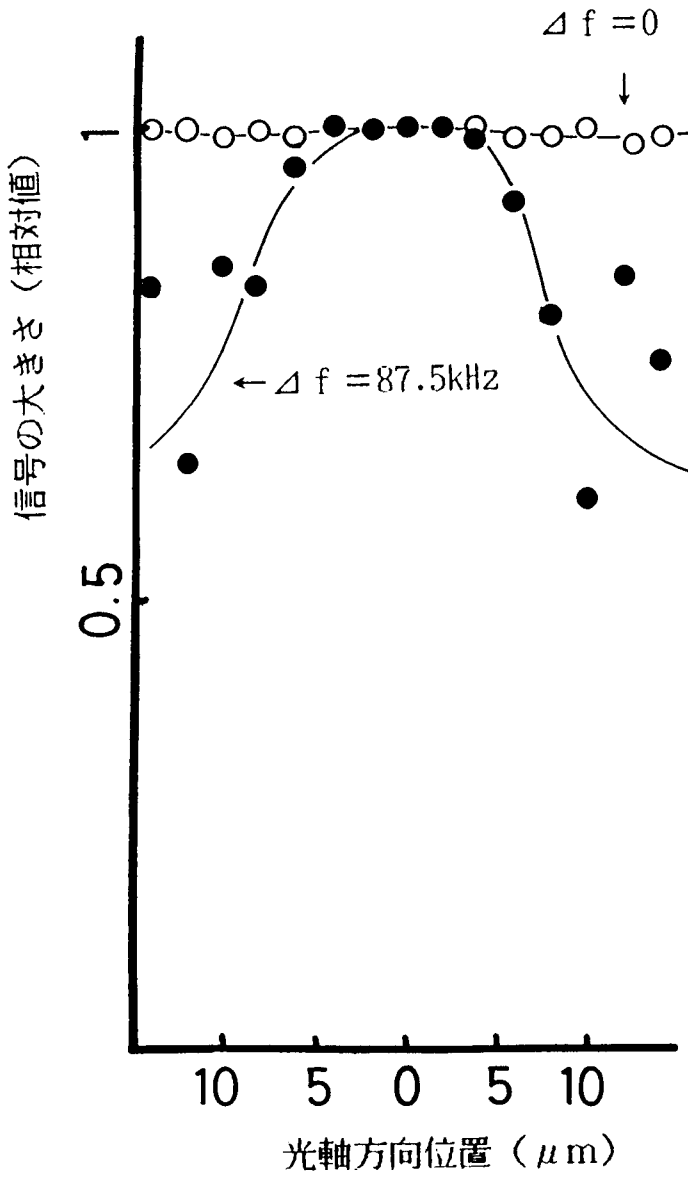


図 1 8 光強度法とヘテロダイン法の比較

(光軸方向;  $\alpha = 5000$ )

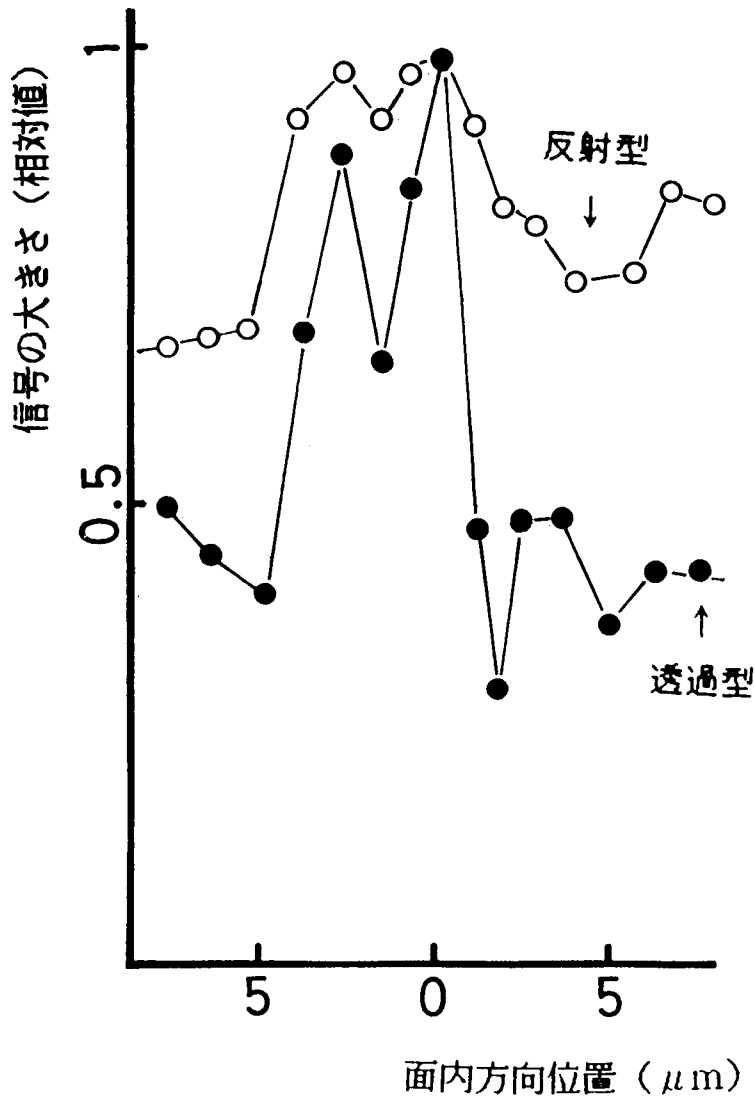


図 1 9 反射型と透過型の比較  
(面内方向;  $\alpha = 0$ )

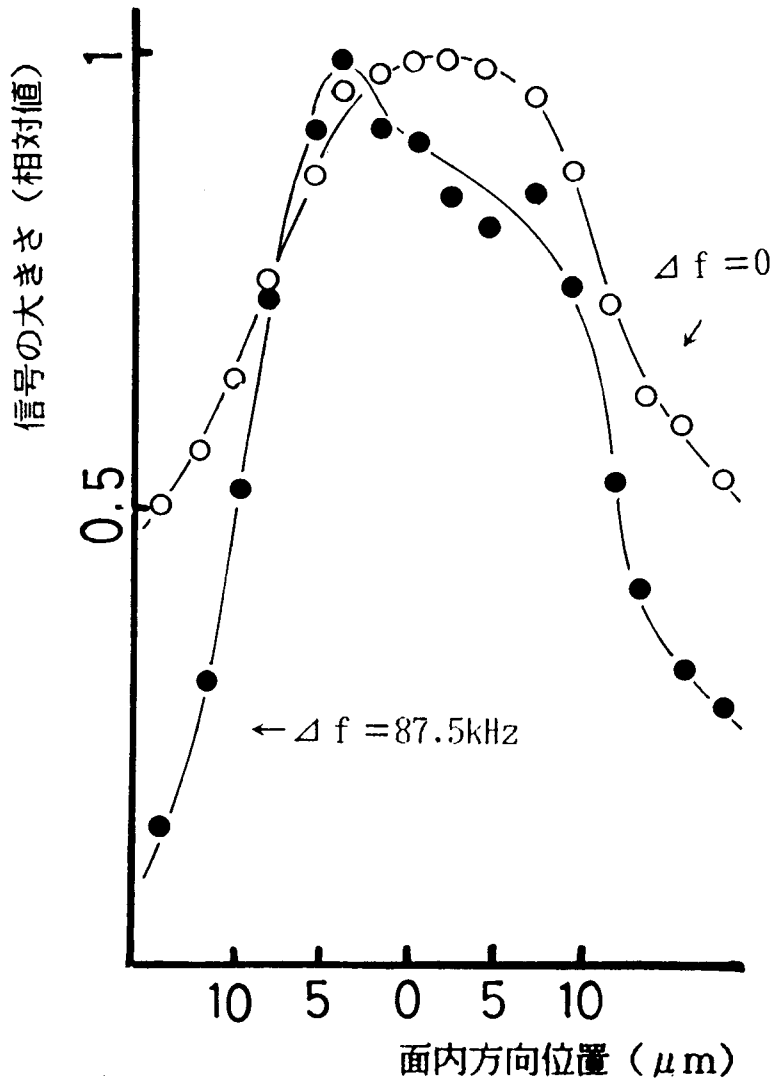


図 20 光強度法とヘテロダイン法の比較

(面内方向;  $\alpha = 0$ ; 前方散乱)

[光強度法はチョッパー(200Hz)を使用]

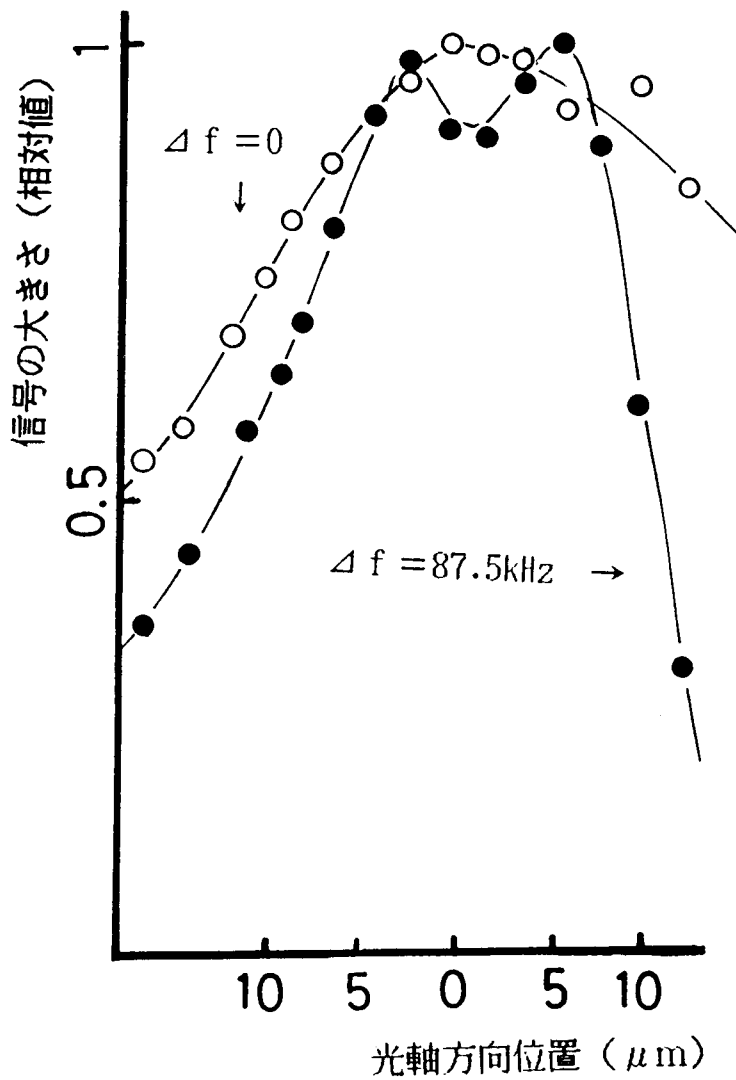


図 2.1 光強度法とヘテロダイン法の比較

(光軸方向;  $\alpha = 0$ ; 前方散乱)

[光強度法はチョッパー(200Hz)を使用]

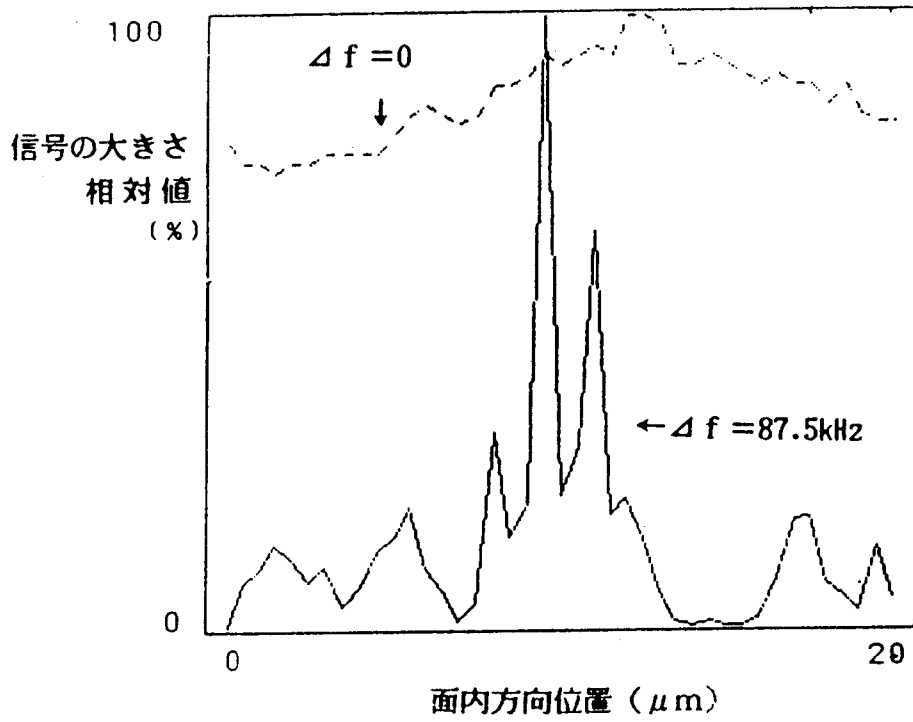


図 2 2 光強度法とヘテロダイン法の比較  
(面内方向; 後方散乱)



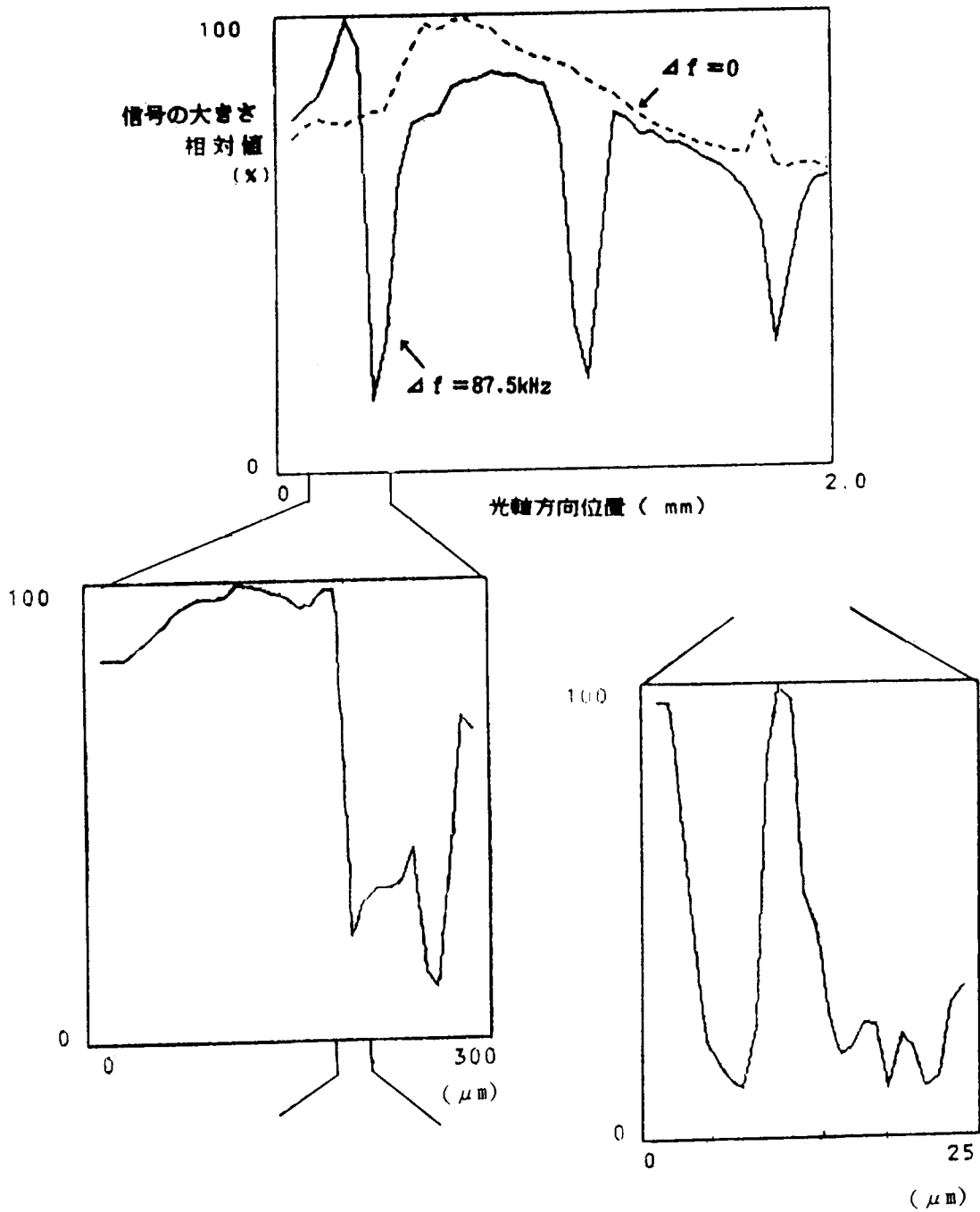


図 2 3 スライドガラスの測定データ

(光軸方向の変化；3つの凹部のうち両端がスライドガラスの前面と後面に対応している。下の2つは上の図を拡大したもの。くぼみの底に鋭いピークがみられる。)

## 5. その他の応用

ここでは、ヘテロダイン光プローブの基本的特性を調べるための基礎実験を中心に行ない、表面の凹凸分布の測定と物体内部の小さな散乱体の分布測定への応用の可能性を探ってきた。今後、どこまで小さな散乱体の検出ができるか、その限界を明らかにしたうえで、応用の可能性を広げていきたい。

今までに使用してきたレーザーは、Ar レーザーと He-Ne レーザーであるが、使用する光の波長を変えることにより測定対象がますますのと思われる。たとえば、この方法を赤外領域に拡張することにより、半導体材料の欠陥検出への用途が広がると考えられる。

また、生体のように強い光の使用が制限される試料に対して、弱い光を用いて高いS/N比の測定を行なえる可能性もある。

さらに、散乱光のビート信号を検出するかわりに、光強度以外の物理量を観測することも考えられる。たとえば、光音響法のように、光吸収に伴う熱的効果によって生じる音波を観測するところに、本方法を利用することが可能であろう。光音響法に差動型光プローブを適用すると、高い空間分解能、とくに深さ方向への分解能を得ることができる。2つのレーザービームが交わる領域においてのみ、温度や密度の時間変化がおき、ビームの通り道など他の部分では定常状態を保つため、音波が発生しないのである。この場合には、散乱光の検出で若干問題になった各ビームに含まれる複数の散乱体の間の干渉効果は、全く問題にならずディテクターの面積も小さくて構わない。このようなことから、通常の光音響法では得ることの難しい深さ方向の分解能を容易に得られることが期待される。

これと同様なことが、光照射によって生じる光電流や光起電力を測定

して半導体の欠陥検出に用いる O B I C (Optical Beam Induced Contrast) 法においても期待できる。

上述のように、コヒーレントな光以外を検出するときは、2つのビームのそれぞれに含まれる複数の散乱体同志の干渉効果は、ディテクターの面積によらず無視できる。光を検出に用いる場合でも、入射光のコヒーレンス長を短く制限したり、非線形光学効果を利用して、たとえば光混合によって生じる和周波数あるいは差周波数成分を検出するときには散乱体同士の干渉効果を抑制することができる。

## 6. おわりに

本研究を遂行するにあたり、当研究室で卒業研究および修士研究を行なった 伊藤利之、桜井 豊、鈴木直也、須原浩之 の諸君に、研究協力者として実験補助をお願いした。付記して感謝の意を表す。

付録 1 : 小松進一、須原浩之、鈴木直也、大頭仁

「ゼーマンレーザーを用いるヘテロダイン光プローブ」

応用物理学会 28pZF10

付録 2 : S.Komatsu, H.Suhara and H.Ohzu

「Differential heterodyne optical probe

using a Zeeman-laser」

# ゼーマンレーザーを用いるヘテロダイン光プローブ

Zeman Laser Heterodyne Optical Probe

早大理工

小松達一、須原啓之、鈴木直也、大頭 仁

Waseda University

Shin'ichi KOMATSU, Hiroyuki SUHARA, Naoya SUZUKI and Hitoshi OHZU

(はじめに) 差動型ヘテロダイン光学系を用いて物体内部の光散乱体検出のための光プローブを構成し、その基本的な特性を実験的に評価した。

(構成) 横ゼーマンレーザーから周波数の異なる2本のビームをとり出し、対物レンズで絞りこみ焦点付近で交差させる。この微小領域内の粒子からの散乱光による光電流はΔVのビート信号をふくむ。一方のビーム内の粒子からの散乱光はビート信号を含まず、複数の粒子間の干渉の結果生ずるビート成分も、光電面を見込む立体角を十分大きくとることでより抑えることができる。受光信号をロックイン検出することにより、さらにSN比を向上させることができる。

(結果) 10μm のラテックス線をターゲットに用い、図2の結果を得た。光強度のみの測定(ΔV=0)と比べて、ターゲット以外の粒子数が多い場合(1000個/mm<sup>2</sup>)にもSN比の良い測定が行える。本研究の一部は文部省科研費(No. 605550027)の助成により行われた。

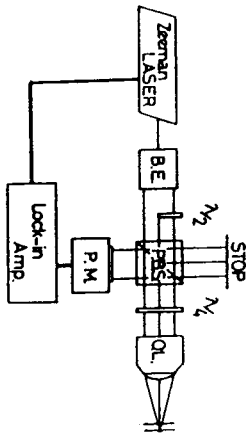


図1：光プローブの構成

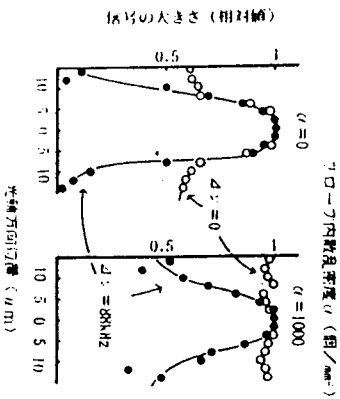


図2：実験結果の一例

**Differential heterodyne optical probe  
using a Zeeman-laser**

**S.Komatsu, H.Suhara and H.Ohzu**

Department of Applied Physics,  
School of Science and Engineering,  
Waseda University

3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 160, Japan

(Abstract)

A laser heterodyne probing system is constructed to measure the distribution of light-scattering particles or defects fixed within a partially transparent object, and the fundamental properties of the system are examined experimentally.

The optical part of this system is similar to the differential laser Doppler velocimeter in which a probe volume is formed by crossing two converging laser beams at some finite angle, besides the probe volume in this case can be made so small that it is occupied with only one interference fringe in a most extreme case.

The two beams has been frequency-shifted to each other, therefore the photo-current due to the light scattered by a particle within the probe volume contains a beat signal whose center frequency is equal to the

frequency shift. Since a light-scattering particle existing in only one beam produces no beat signal and the beat signal possibly produced by the interference effect among some particles outside the probe volume can be suppressed with sufficiently large photo-detecting angle, the beat detection gives a higher signal to noise ratio compared with conventional light-intensity detection.

A Zeeman-laser is used to obtain two coherent beams whose frequencies are mutually shifted by a small amount (88kHz). Because the beat frequency is fairly low, the signal detection can be performed easily with a lock-in amplifier. A simple optical unit consisting of some polarizing elements is required to separate the two orthogonally polarized beams with different frequencies.

Experimental results obtained with a latex sphere target shows that high SNR is achieved by the present method even when some interfering particles exist in front of the probe volume.