

## 半導体レーザーの光音響効果を利用した 欠陥検出に関する研究

### Study on Defect Detection Using Photoacoustic Effect of Semiconductor Laser

山田 悦生<sup>†</sup>、津田 紀生<sup>††</sup>、山田 諄<sup>††</sup>

Etsuo YAMADA, Norio TSUDA, Jun YAMADA

Abstract : A *Photoacoustic Effect* is a phenomenon in which the acoustic waves are generated by the irradiation of the laser light modulated by the supersonic wave frequency. A Defect detection using the photoacoustic effect has been studied. A semiconductor laser which has a power of 10mW and is modulated by 40kHz is used as a light source. Though the photoacoustic signal is very low in this case, a small defect which has a diameter of about 1.5mm can be detected by finding the proper condition of an acoustic sensor which detects the photoacoustic signal. It has a high resolution in defect detection and some adjacent defects can be detected because the laser light can be focused to the extremely small spot.

#### 1. はじめに

物質の内部状態を非破壊で検査するためには一般に超音波が用いられる。これは媒質の音響インピーダンスの違いによる超音波の反射を利用したもので、超音波探傷法と呼ばれる。初期の超音波探傷法は、かなり寸法の大きい欠陥の検出に利用されており、対象物も大型か形状が簡単なものであったが、最近では超音波の発振技術や受信信号の処理技術が発展を遂げ、ほとんどすべての鋼製品の欠陥検出や溶接部の探傷など多くの分野で実用されている<sup>1)</sup>。また、検出できる欠陥の大きさも一般的なもので数 mm 程度にまで至っている。しかし、超音波のみによる検査ではセンサの面積程度の範囲で超音波が励起されるため、隣接した欠陥の分解検出において分解能があまり良くない。そのため最近ではレーザーの光音響効果を利用した欠陥検出が注目されている。光音響効果とは物質に断続光を照射することによって音

波が発生する現象をいう。一般には YAG レーザや CO<sub>2</sub> レーザなどといった比較的出力の大きいレーザーを光源として用いているが、装置が大型になり、対象物を破壊してしまうおそれがある。

そこで本研究では小型で出力の小さい半導体レーザーの光音響効果を利用して金属内部の欠陥を非破壊、非接触で検出することを試みた。しかし、半導体レーザーの出力が小さいために光音響信号は非常に小さく、通常、信号の検出にはロックインアンプを用いているが、その出力は数  $\mu V$  程度である。そこで、出来る限り大きな出力が得られるように、信号を検出する超音波センサの最適位置を知る必要がある。その結果から超音波センサの最適条件を求めることにより、欠陥検出が可能になった。

#### 2. 非破壊検査の原理

超音波は指向性が高く、かつ周波数が高くなるほど分解能が高くなるという性質を持っている。従って、物質に超音波を照射し、音響インピーダンスの違いによる反射波あるいは透過波を受信して非破壊的に欠陥を検出する超音波探傷法が古くから活用

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院 工学研究科  
電気電子工学専攻 (豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

されてきた<sup>2)</sup>。

## 2・1 音響インピーダンス

一般に音波の伝搬は音響インピーダンスによって特徴づけられる。音響インピーダンス  $Z$  は音圧  $P$  と体積速度  $SV$  の比で表される。

$$Z = \frac{P}{SV} \quad (1)$$

ここで  $S$  は断面積、 $V$  は粒子速度を表す。

固有音響インピーダンス  $Z_d$  は次式で表される。

$$Z_d = \frac{P}{V} \quad (2)$$

固有音響インピーダンスが大きいということは、小さな粒子速度で大きい圧力変動が媒質内で生ずることを意味する。よって金属等、硬い材質で固有音響インピーダンスは大きく、気体のように組織の粗い材質では小さい。ここで図1のように固有音響インピーダンスが異なる媒質に音波が入射する場合を考える。それぞれの媒質における音圧  $P$  と粒子速度  $V$  の比は次のように表される。

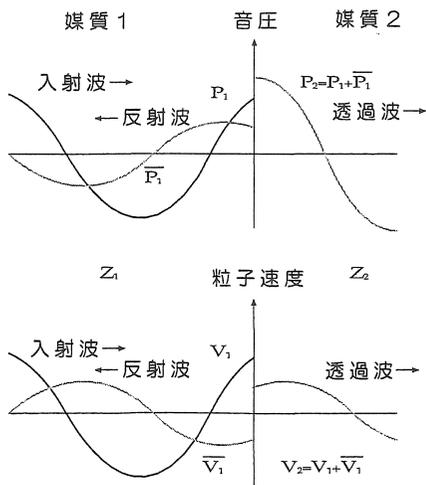


図1 媒質の境界面における音波

$$\begin{aligned} P_1 &= Z_1 V_1 \\ \bar{P}_1 &= -Z_1 \bar{V}_1 \\ P_2 &= Z_2 V_2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで反射波の音圧と粒子速度を  $\bar{P}_1$ 、 $\bar{V}_1$  とする。反射波の入射波に対する圧力比、あるいは粒子速度

の比である反射係数  $R$  を求めると次のようになる。

$$R = \frac{\bar{P}_1}{P_1} = \frac{-\bar{V}_1}{V_1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

インピーダンスの違いが大きければ反射係数  $R$  の絶対値が大きいため、反射波は大きく、透過波は小さい。気体と液体、または固体との固有音響インピーダンスの差は大きいので、気体中から液体や固体中には、もちろんその逆の場合でも音波はほとんど進入しない。この音波の反射を利用して各種の探傷法が開発されている<sup>3)</sup>。

## 2・2 超音波探傷法

超音波探傷法では検知可能な欠陥の大きさは波長の1/2程度までであるため、分解能を上げるためには数百kHz以上の高周波を使用しなければならない。使用周波数を高くすると、分解能は向上するが、超音波の振幅が小さくなるため出力も小さくなってしまう。

超音波探傷法の中でも最も一般的なパルス反射法による探傷は図2に示すように超音波パルス送信器からの電圧を送波器で超音波振動に変え、試料内を伝搬して底面から反射して戻ってくるまでの受波信号を同じ受波器で受信する<sup>4)</sup>。

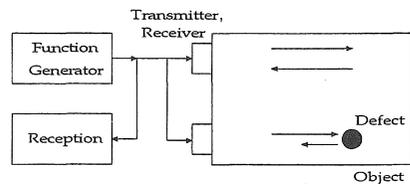


図2 パルス反射法

## 2・3 光音響効果

### 2・3・1 光音響効果の原理

光音響信号の発生原理を図3に示す。超音波の周波数で変調をかけたレーザーを試料に照射すると、試料に光エネルギーの一部が吸収される。吸収されたエネルギーは、ルミネッセンス(発光)、励起過程、あるいは欠陥生成などに消費される以外は熱に変換される。レーザーが断続光であるので、その吸収率に比例した熱が物質の表面及び内部で発生し、それに伴う温度変化により、照射光の周期で物質近傍の雰囲気気体が熱せられるとともに、試料内にも熱ひずみ

波が生じる。その結果、圧力が変化して空気振動、つまり超音波が発生する。この現象を光音響効果という<sup>4)</sup>。

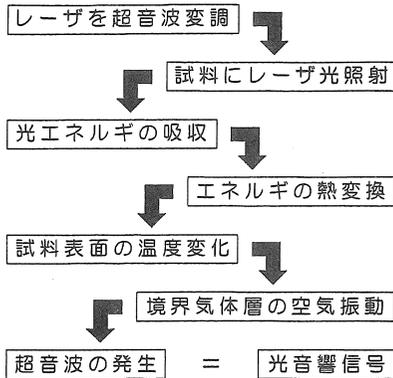


図3 光音響効果の原理

2・3・2 光音響効果による欠陥検出

光音響効果による欠陥検出のモデルを図4に示す。一般に計測に用いるレーザーは出力が小さく物質内部にまで透過しないため、物質の表面状態の測定がほとんどであるが、超音波で変調をかけた半導体レーザーを用いれば、発生した超音波が物質内部にまで透過する。物質が例えばアルミのような金属である場合、空気中に対して音響インピーダンスが高いため金属中を伝搬する超音波は気体との境界面でほぼ全反射する。つまり試料表面付近に欠陥があればその点での反射周期は速く、その減衰が小さいため、結果として大きな光音響信号が得られる。

このように、光音響効果によって発生する光音響信号が物質内部の状態によって変化するため、小型かつ低出力のレーザーで物質内部の状態を測定することが可能となる。

本実験では、超音波の発生法や検出法に多少の違いはあるが、試料内部における超音波の伝搬の概念としてはパルス反射法を利用する。

前に述べた超音波探傷の場合、センサを試料に接触させて試料に直接超音波振動を与えているため、非接触での測定ができず、また、センサの大きさが一般的なもので直径10mm程度あるため、微少な欠陥の検出や隣接した欠陥の分解検出は不可能である。それに比べてこの光音響効果による欠陥検出法ではレーザーを試料に照射しているため非接触での検出が可能であり、また、レーザーを集光して試料表面

における超音波の発生源をほぼ一点にしているため、欠陥検出の空間的分解能は非常に高い。

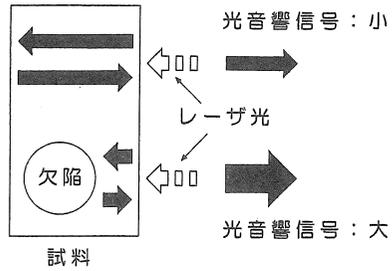


図4 光音響効果による欠陥検出

3. 測定方法

3・1 測定装置の概略

測定装置の概略図を図5に示す。光源として波長780[nm]、出力10[mW]の半導体レーザー(SHARP製LT021MD)を使用し、このレーザーを制御・変調回路で約40[kHz]の正弦波光で変調をかけて発振させる。変調周波数を40[kHz]に設定したのは、光音響信号を検出する超音波センサ(MURATA製MA40S4R)の感度が40[kHz]で最もよくなるからである。このレーザーを直径10[mm]、焦点距離15[mm]の集光レンズを用いて集光距離50[mm]、スポット径0.14[mm]に集光し、自動X-Yステージ上に置いた試料表面に照射する。光音響信号を検出する超音波センサは直径10[mm]で、これを試料前面に設置し、その出力をNF製のロックインアンプ5600Aに取り込む。ロックインアンプでは、あらかじめ制御・変調回路から参照信号として与えられたレーザーの変調周波数と同じ周波数をもつ光音響信号のみを増幅し、パーソナルコン

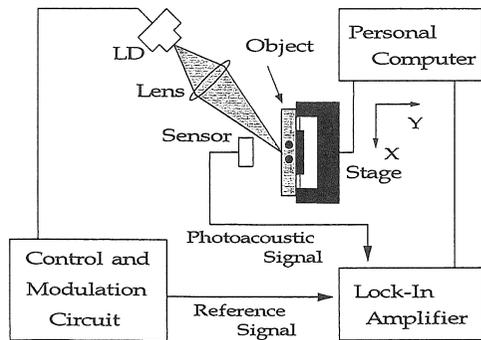


図5 測定装置概略図

コンピュータで制御している。初期の測定装置ではレーザを試料正面から照射し、センサを斜めに置いて測定を行っていたが、超音響信号が非常に小さく、十分な欠陥検出ができなかった。そこでセンサの位置を変化させて最大の出力が得られるセンサ位置を調べたところ、センサは試料正面に設置するのが良いとわかったため、現在ではレーザを斜め上方  $45^\circ$  から照射している。

### 3・2 測定回路

#### 3・2・1 LD 駆動回路

LD を発振させる駆動回路には市販の駆動用 IC(IR3C02)を用いている。半導体レーザの出力は周囲温度の変動で容易に変化するため、一般に駆動用 IC には、温度が変化しても一定の光出力が得られるように、モニタ光を検出して駆動電流にフィードバックする APC(Automatic Power Control)機能をもたせている。

#### 3・2・2 変調回路

波形発振には専用 IC(ICL8038)を使用して回路を簡単に構成した。この IC ではデジタル式で発振させた方形波を基本に積分器で三角波を得、その三角波を折れ線近似法という手法で正弦波に整形している。従って、正弦波出力は近似正弦波で、厳密には少しのひずみを伴っているが、見た目にはもちろん、実用に差し支えるほどではない。この回路では、出力として、基本波の方形波、積分波の三角波、そして近似正弦波の 3 波が同時に得られる。また、変調回路では駆動回路から多くの電流を吸い取るために、トランジスタ 2SC1815 を使ってダーリントン接続している。

### 3・3 レーザのスポット径

本実験ではレーザを小さなスポットに集光しているため、実用化されている超音波診断に比べて欠陥検出の空間的分解能が非常に高い。そこでレーザの正確なスポット径を図 6 に示す装置で測定した。ナイフエッジを図のように X-Y ステージに固定し、レーザを照射する。ステージの裏側にフォトダイオードを設置し、その出力をオシロスコープで読みとる。ステージを X 方向に動かしていくと、ナイフのエッジでレーザ光が徐々に遮断され、最終的には

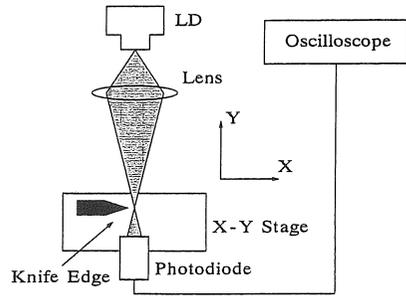


図 6 ビーム径測定装置概略図

全部が遮断される。これにより検出する光量が変化する。続いてステージの Y 方向を変化させ、ビーム径がいちばん小さい部分の前後で同じ測定を繰り返す。ビーム径がいちばん小さい部分での測定結果を図 7 に示す。

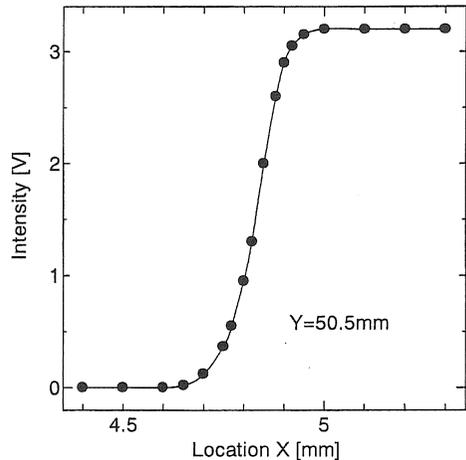


図 7 フォトダイオードで検出した光強度

これを微分すると図 8 のようになる。この図において、ピークの  $1/e$  になるときの幅がスポット径であり、その大きさは  $144[\mu\text{m}]$  である。これは短軸(X 方向)のスポット径で、Z 方向で同じ測定を行ったところ、長軸は  $206[\mu\text{m}]$  であった。本実験では、このレーザを斜め  $45^\circ$  から照射しているため、照射点におけるビーム径は、スポット径より大きくなる。照射点におけるビーム径が変わると、発生する超音波の振動面積が変化するため、出力レベルや欠陥検出における空間的分解能が変わってしまうおそれがある。そこで、図 5 の装置において Y 方向を変化させたときの超音響信号を検出してその変化を調べた。その結果を図 9 に示す。Y=50.5[mm]の前

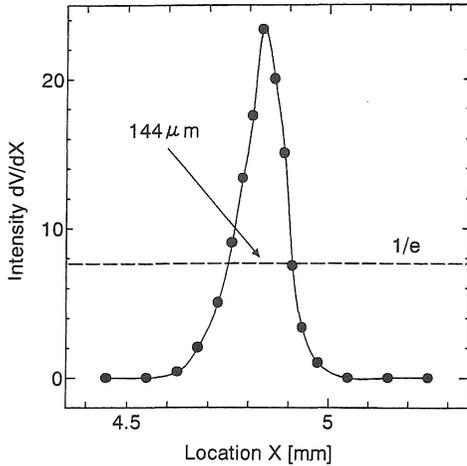


図8 ビーム径 (短軸)

後 1[mm]で信号の変動は 0.03[ $\mu$ V]未満と非常に小さく、この範囲内でビーム径が変化しても信号レベルの変動は無視できる。また、本研究において検出できる欠陥の大きさは現段階で 1.5[mm]程度までであるため、数十 $\mu$ m 程度ビーム径が変化しても欠陥検出における空間的分解能はほとんど変わらない。

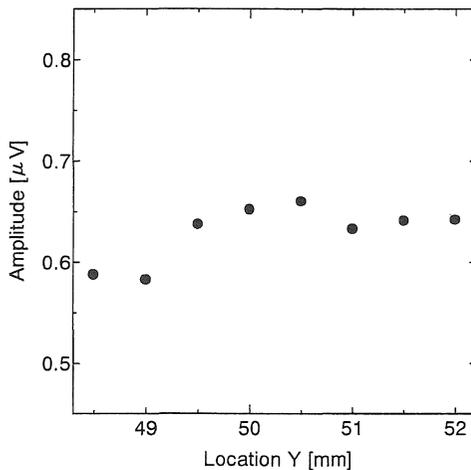


図9 スポット周辺の信号のパラツキ

#### 4. 光音響信号の変調周波数特性

本実験では 40[kHz]で感度が最も良くなる超音波センサを用いているが、実際には多少の誤差がある。そこで、光音響信号の変調周波数特性を測定した。

試料-センサ間距離  $d=7$ [mm]を基準に 2[mm]づつ変化させて、各々の点で周波数特性を調べた。セン

サ角  $\theta$  は  $0^\circ$  に固定した。その測定結果を図 10 に示す。 $d=11$ [mm]までは特性が比較的是っきりしており、共振周波数が 40.2~40.3[kHz]と特性に大きな変化はない。センサがそれ以上離れると信号のピークがつぶれてしまい、特に  $d=21$ [mm]では、若干 40[kHz]前後で信号が増加しているのがわかるが、信号の変動が小さく、共振周波数が特定できない。距離が離れると信号のピークがつぶれてしまうのは、超音波は一般に距離の 2 乗に比例して減衰するからである。しかし、 $d=7$ [mm]のときを除いて全体的に 40.3[kHz]を中心に  $\pm 0.1$ [kHz]の範囲では信号の変動が数十 nV 程度であり、この程度の信号の変動は測定誤差内にある。 $d=7$ [mm]のとき  $f=40.3$ [kHz]で最も光音響信号の振幅が大きいため、測定では試料-センサ間距離  $d=7$ [mm]、変調周波数  $f=40.3$ [kHz]に設定して行うことにする。

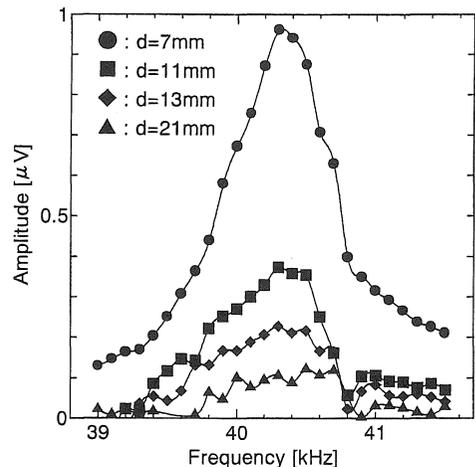


図10 光音響信号の変調周波数特性

#### 5. 欠陥検出

まず、センサを斜めに置いたときの欠陥検出結果を図 11 に示す。試料としてアルミ板を用い、表面を研磨している。厚さは 3[mm]、欠陥として試料表面から深さ 1.2[mm]の点を中心に直径 1.8[mm]の穴を 2 つあけた。2 つの欠陥の隙間は 1.2[mm]となっている。この場合、欠陥のないところでの信号の変動分に対して欠陥信号の大きさが 2 倍程度と小さく、この程度の欠陥を検出するのが限界であった。

そこで、センサ位置を色々に変化させて実験を重ね、光音響信号が最も大きく得られた位置、即ちセ

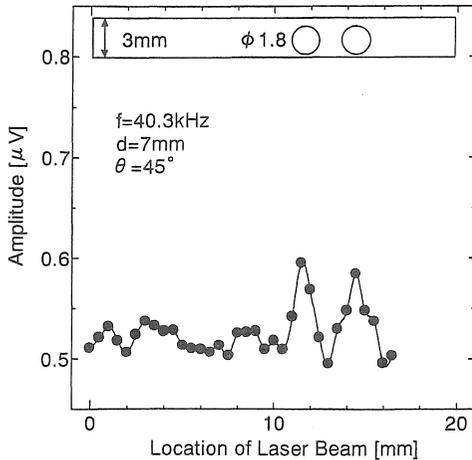


図 1 1 欠陥検出 ( $\theta = 45^\circ$ )

ンサを正面に置いたときの欠陥検出結果を図 1 2 に示す。試料は先程と同じで、レーザーの走査方向を左右対称にしている。ドット○が欠陥のない試料を用いた場合の測定結果でその平均値は  $1.02[\mu\text{V}]$  であり、信号の変動は  $0.05[\mu\text{V}]$  程度である。ドット●が欠陥の存在する試料を用いた場合の測定結果で、試料に欠陥が存在すると振幅信号に大きな変化が現れ、明らかにその位置に欠陥が存在するという事が確認でき、変動分に対する欠陥信号の大きさは 4 倍にまで達している。よって、この変化分から、現在の半分程度、即ち約  $1[\text{mm}]$  の欠陥まで検出の可能性があると予測される。また、欠陥信号の半値幅は最大約  $2[\text{mm}]$  で、欠陥の直径  $1.8[\text{mm}]$  に対して欠陥信号の拡がりは  $0.2[\text{mm}]$  となり、欠陥検出の空間的分解能は非常に高い。欠陥信号が拡がりを持ってしま

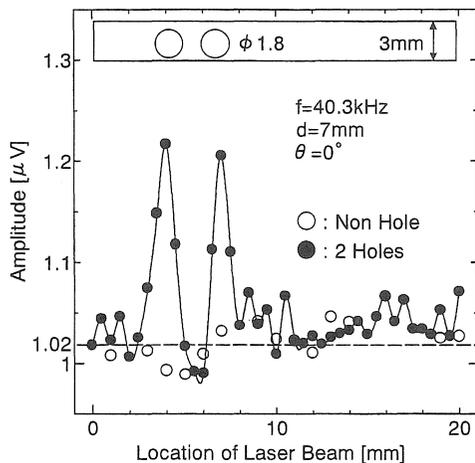


図 1 2 欠陥検出 ( $\theta = 0^\circ$ )

う原因としては、内部を伝わる超音波は拡がりを持ち、欠陥から少し離れたところでも超音波がすぐ近くにある欠陥で反射されて信号が増加するためであると考えられる。この結果から、隣接した欠陥が存在しても  $0.2[\text{mm}]$  程度の隙間があれば分解検出も可能であると予測される。

## 6. 総括

本研究ではレーザーの光音響効果を利用して物質内部の欠陥を非破壊、非接触で検出することを目的とした。物質の内部検査を行う場合、一般には光源として YAG レーザや  $\text{CO}_2$  レーザのような比較的输出の大きいレーザーを用いているが、本研究の結果から、小型で出力の小さい半導体レーザーを用いることでも十分に物質内部の欠陥を検出することが可能であることがわかった。

実用化されている超音波探傷器では欠陥検出の分解能は波長の  $1/2$  程度までであり、小さな欠陥を検出するためには数百 kHz 以上の高周波を使用しなければならない。本実験では  $40[\text{kHz}]$  で直径  $1.5[\text{mm}]$  程度の欠陥が検出できるので、超音波のみの場合に比べると周波数が低いにも関わらず分解能は非常に高い。また、隣接した欠陥を検出する場合、それぞれの欠陥信号の半値幅が確認できれば分解検出も可能であることがわかった。空間的分解能が非常に高い一番の要因は、レーザー光をスポットに集光して試料に照射することにより、超音波の発生源をほぼ一点にしていることである。

## 参考文献

- 1) 丹羽 登：超音波計測 pp.65-69
- 2) 中村 義一、河村 末久：表面測定技術とその応用 p.131
- 3) 三井田 惇郎：音響工学 pp.20-22
- 4) 光応用計測技術調査研究委員会：光計測のニーズとシーズ p.71

(受理 平成10年 3月20日)