

# 光音響信号と反射光信号の同時測定による 内部欠陥検出に関する研究

## Study on internal defective detection by simultaneous measurement of photoacoustic and reflected light signals

榊原 誓子<sup>†</sup> , 津田 紀生<sup>††</sup> , 山田 諄<sup>††</sup>

Seiko SAKAKIBARA , Norio TSUDA , Jun YAMADA

**Abstract:** Using a photoacoustic effect, a non-destructive and non-contact detection has been studied. In an earlier study, it has been seen that the sensitivity of the internal defective detection fall off due to surface condition. In order to improve the sensitivity, it was tried to compensate photoacoustic signal using reflected light. After relation between photoacoustic and reflected light signals was researched, an equation for compensation was led. To get total amount of reflected light in the equation, an angular distribution of reflected light was examined, and the number of photo diode necessary to compensate the photoacoustic signal was determined. Simultaneously measuring photoacoustic and reflected light signals, internal defect of aluminum sample was measured. As a result of compensation, it is possible to improve the sensitivity of internal defective detection.

### 1. はじめに

材料や部品などの試験方法として、引張試験・疲れ試験など、いわゆる破壊検査が広く使用されている。この検査で試験片あるいは多量生産品の同一ロットの代表としての抜取品に対しては破壊試験が適用できるが、今後使用する生産過程での材料や製品そのものに対しては、破壊することは出来ない。これに代わり現在用いられている試験法の非破壊検査は、材料・製品を傷つけたり、破壊したりすることなしに、すなわち試験対象物の原形と機能を変化させることなく、それらの状態、内部欠陥の有無と、その程度を調べるものである。<sup>1)</sup>

工業分野における鋳鋼品には、溶鋼中のガス体が凝固時に放出され、鋼の中に残留してできたもので、通常その丸穴の直径がφ2~3 mm程度までのピンホール(pin hole)やそれ以上のブローホール(blow hole)、そして鋳物の凝固収縮に伴う給油不十分の時に生ずる引け巣(shrinkage)などの内部欠陥が発生することがある。これらの内部欠陥検査には非破壊検査における超音波探傷法や放射線透過試験法が主に用いられている。

しかし、これらの検査法には改善すべき点や問題点がある。超音波探傷法では、試料材に探触子を当てるために接触式であり、非接触式で行う場合は試験材の全体、

または一部を水に浸すなどの必要があり、空間分解能はそれ程高くない。一方、放射透過試験では、空間分解能は高いが、高エネルギーのX線やγ線を用いるため、人体に有害であり、それを防ぐために、様々な管理基準が設けられたり、しゃへい材を使用したりするため、大型の装置や広範囲の安全領域を確保しなければならない。

そこで新しく光計測技術が開発され、その中の光音響効果を用いて内部欠陥検出を試みた。

過去の研究で、伝搬特性やエッジ効果など光音響効果の様々な特性を調べ、その結果、光音響効果によって発生する光音響信号はとてつもない微小な信号であるが、試料の表面がきれいな場合の内部欠陥検出は可能であることが分かっている。<sup>2)</sup> また、一次元検出だけでなく、スキャナーを用い全自動で二次元検出を行うことができた。<sup>3)</sup> 従来の非破壊検査に比べ光音響効果の非破壊検査では、非破壊・非接触で検出し半導体レーザを用いることで、装置が小型化でき、空間分解能はレーザの光の集光径で決まるので高分解能が得られた。

しかし、試料の表面に汚れや傷がある場合、表面の光の吸収率の違いにより光音響信号に影響が出て、内部欠陥検出感度が低下してしまう。

そこで本研究では、この光音響効果による内部欠陥検出の検出感度を向上させるべく研究に取り組んできた。その光音響信号の補正方法として、試料表面で吸収されなかった反射光の光量を測定し、内部欠陥検出感度の向上を考えた。

† 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)

†† 愛知工業大学 電気学科電子工学専攻 (豊田市)

## 2. 光音響効果と内部欠陥検出の原理

### 2.1 光音響効果の原理

光音響効果の原理図を図 1 に示す。光音響効果とは、周期的な断続光を物質に照射すると、その物質表面で光エネルギーの吸収が起こり、局部的に温度が上昇・下降を繰り返すため、表面が膨張と収縮を繰り返して、物質の外部に起こる表面波と物質の内部に圧力として伝搬する内面波の 2 つの音波が発生する現象である。この音響的反応は物質に照射された断続周波数に等しい周波数の縦波が伝搬する。本研究では、断続周波数を超音波の周波数にしたため、音響的反応もまた超音波となり発生する。この発生した超音波のことを光音響信号と呼ぶ。

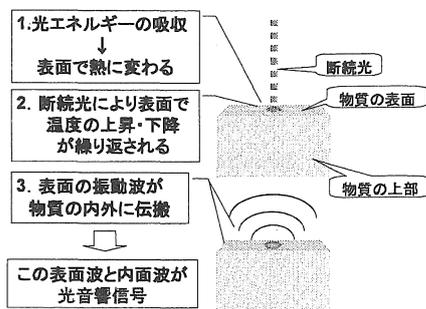


図 1 光音響効果の原理

### 2.2 内部欠陥検出の原理

内部欠陥検出の原理図を図 2 に示す。内部欠陥検出は、超音波探傷法の垂直探傷法と同様の原理で行える。これは超音波の周波数を持った光音響信号の内面波を用い、音響インピーダンスの差により、境界面において反射波と透過波に分離することを利用する。

この現象を利用すると、光音響信号が物質内を伝搬していく過程で、光音響信号の伝搬は、非欠陥部であるなら物質の裏面が境界面となり、内部に空気などがある欠陥部では、その箇所が境界面となり音響インピーダンスの違いから、反射波と透過波に分離する。このそれぞれの反射波の光音響信号を測定する。つまり、非欠陥部の様に物質の裏面が境界面になった反射波よりも、欠陥部のように物質の途中にある欠陥部が境界面になることで、伝搬距離が短くなり減衰が少なく、その結果大きな反射波として光音響信号が返ってくるため、欠陥の検出が可能となる。

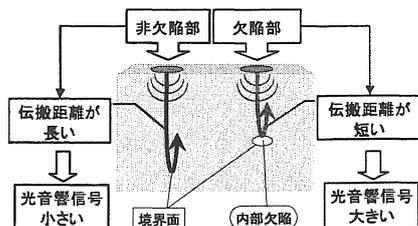


図 2 内部欠陥検出の原理

## 3. 内部欠陥検出の測定方法

### 3.1 測定装置

上部から見た測定装置の概略図を図 3 に示す。まず変調回路で 40kHz の周波数で直接方形波電流変調し、半導体レーザー(LD:波長 830nm、最大出力 40mW、SHARP 製、LTD015MD)を発振する。LD は出力 20mW で駆動させ、レンズ(直径 10 mm、焦点距離 20 mm、集光距離 50 mm、スポット径 0.1 mm)を通して、試料に対して 45° の角度で断続光が照射され、表面に光音響効果が発生させる。また参照信号として、変調回路からロックインアンプに信号を送り同期をとる。

次に、空中超音波センサ(村田製作所製、MA40SAR)を最も感度が良い、試料表面に垂直方向の 8.4 mm に設置し、光音響効果によって発生した光音響信号を検出し、ロックインアンプ((株)エヌエフ回路ブロック製、5600A)で測定値を 5 回計測、平均値を結果とした。

同時に、フォトダイオード(PD:浜松ホトニクス製、S2506-2)で反射光量を測定する。PD は試料の集光点を基準に LD と反対側の 45° に設置した。試料から PD までの距離は 50 mm とした。この検出した信号値を、電圧利得 100 倍の増幅回路に通し、オシロスコープで振幅値を測定する。また図 4 に示す様に、試料表面の集光点を中心に XYZ 座標を定義する。

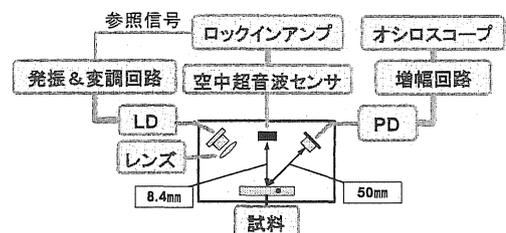


図 3 測定装置の概略図

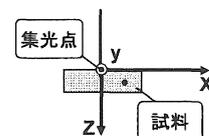


図 4 XYZ 座標定義

### 3.2 測定試料

測定試料は図 5 に示すように、縦 20 mm、横 60 mm、厚さ 3 mm の大きさで試料の上部から表面に影響の無いように 1~2 mm の穴を開け、内部に擬似欠陥を作り、試料表面上を 20 mm の範囲で表面を X 方向に水平に一次元走査して測定した。

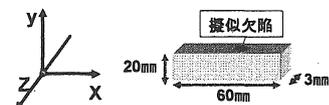


図 5 測定試料

4.反射光量による補正計測

4.1 補正の原理

光音響信号は発生の原理から光の吸収率と反射光信号との関係を考え、そこから補正式を導き、光音響信号の補正を行い、内部欠陥検出の感度向上を目指した。

試料は表面に反射率の大きく違う黒と白の塗料を付けたアルミニウムである。その結果を図6に示す。

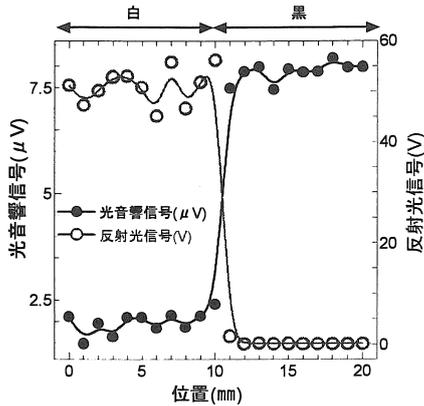


図6 光音響信号と反射光信号の関係

図6では、光音響信号が増加すると、反射光信号は減少し、逆に光音響信号は減少すると、反射光信号は増加している。つまり、光音響信号が光の吸収率に比例しているため、反射光信号とは反比例の関係にあると考えられる。よって導かれた補正式は式(1)である。

光音響信号補正值

$$= \text{光音響信号} / (\text{入射光信号} - \text{全反射光信号} \times \alpha) \quad \text{式(1)}$$

( $\alpha$  : 全反射光信号を考慮するための重み係数、  
入射光信号 : 入射レーザー光の光量を示す信号)

4.2 反射光信号の角度分布測定

式(1)に必要な全反射光信号を測定するために、PDを無数に置くのは実用的ではないため、各種試料の反射光信号の角度分布測定を行い、それに基づいて数点に絞ってPDを配置した。

ここで、図4のXYZ座標で、試料表面に垂直でレーザー光軸を含む平面、XZ平面上の角度を $\theta$ とし、その垂直方向を $\theta = 0^\circ$  水平方向を $\theta = 90^\circ$ と定義する。ここではPD(浜松ホトニクス製、S1223)を1つ、図7に示すように、 $\theta$ 方向に半円状に走査し反射光信号を測定した。

図8はアルミニウムを、図9は白い紙を試料とした測定結果である。 $\theta = 90^\circ$ は装置の関係上測定は行えなかったが、反射光信号が少なく省略できると考えた。また、分布の形状を見るため、結果を最大値で規格化したものを示す。図8の実線はガウス分布、図9は多項式近似を

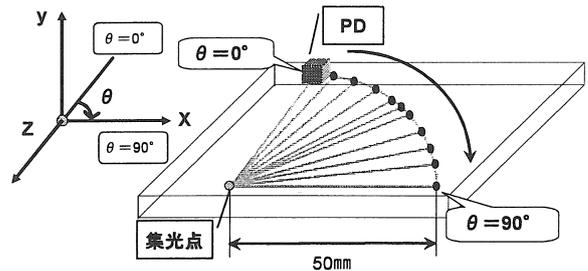


図7 PDの半円走査装置

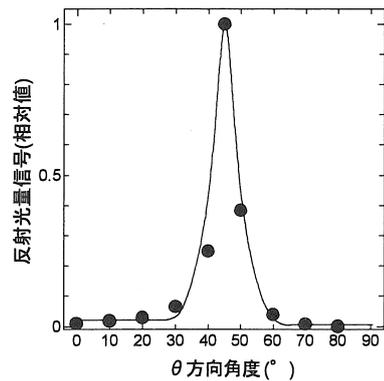


図8 鏡面反射分布

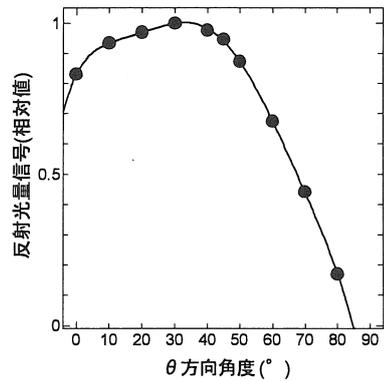


図9 拡散反射分布

示している。

この結果を見ると分かるように、反射光信号の分布は鏡面反射と拡散反射の2種類の分布形状が確認された。光音響信号を補正するためには、全反射光信号をなるべく正確に測定しなければならず、この2つの形状に対応するPDの配置を検討した結果を次に述べる。

4.3 立体角反射補正法

立体角反射補正の装置の概略図を図10に示す。まず4.2と同様に、図4のXYZ座標にXZ平面上の角度を $\theta$ とし、更に試料表面に垂直でレーザー光軸を含む水平面と直角な面内をYZ平面上の角度 $\phi$ とし、その-Z方向を $\phi = 0^\circ$ 、これに垂直な方向を $\phi = 90^\circ$ と定義する。

4.2の結果から、両反射分布の全反射光信号測定に対

応するには、 $\theta = 20^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  の 3 点で近似が可能であると考えられる。

しかし同時に測定する場合、 $\theta = 20^\circ$  の反射光は空中超音波センサにより遮断されてしまう。よって、PD を  $\phi = 35^\circ$  の傾きをつけ配置することにした。ここで、試料表面から PD までの距離は同様の 50 mm とする。

また斜め上部に傾けることにより反射光信号は減少するため、 $\phi = 0^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$  に PD を配置し、反射光信号の補正をした。

この配置を用いて、全反射光信号の近似を算出するために 2 種類の方法を考えた。

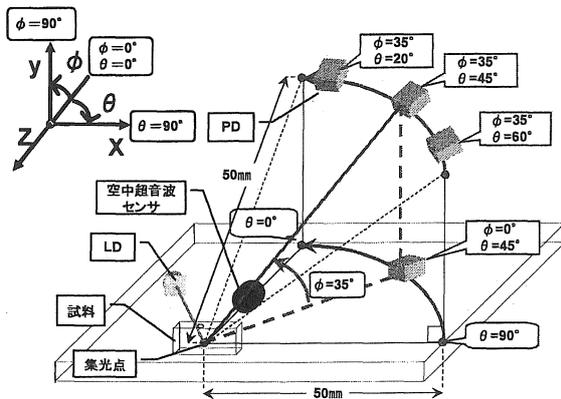


図 10 立体角を用いた内部欠陥検出装置

(A) 倍率補正

まず、 $\phi = 35^\circ$  の 3 点の PD の測定値を用いて  $\theta$  方向の反射光信号の角度分布図を描き、この反射光信号角度分布図の最大の反射光信号と半値幅をかけ積分値を求める。

$$[\text{最大の反射光信号} \times \text{半値幅}] = [\phi = 35^\circ \text{ の反射光信号の積分値}] \quad \text{式(2)}$$

また、反射光が球面状に反射すると仮定して、反射光信号の補正のための倍率を求める。

$$V_{\phi=0^\circ, \theta=45^\circ} / V_{\phi=35^\circ, \theta=45^\circ} = [\text{補正倍率}] \quad \text{式(3)}$$

ここで、 $\theta$  方向の分布と  $\phi$  方向分布が相似であると考えると、式(2)と式(3)より

$$[\phi = 35^\circ \text{ の反射光信号の積分値}] \times [\text{補正倍率}] = [\text{全反射光信号}] \quad \text{式(4)}$$

よって、式(4)で求めた全反射光信号を式(1)の補正式に代入して補正を試みた。

(B) 立体角補正

(A)と同様に  $\phi = 35^\circ$  の  $\theta$  方向の角度分布図を描く。次に、 $\phi = 35^\circ$  の平均反射光信号  $\bar{V}_{\phi=35^\circ}$  を求める。

$$\bar{V}_{\phi=35^\circ} = [\text{最大の反射光量 } V_{\phi=35^\circ} \times \text{半値幅}] / 90^\circ \quad \text{式(5)}$$

ここで、 $\theta$  方向の分布は  $\phi$  方向に対して相似と考えると、式(6)が仮定できる。

$$V_{\phi=35^\circ} / \bar{V}_{\phi=35^\circ} = [\text{const.}] \quad \text{式(6)}$$

これを用い、 $\theta$  方向の  $\phi = 0^\circ$  の平均反射光信号  $\bar{V}_{\phi=0^\circ}$  が、式(7)で求められる。

$$\bar{V}_{\phi=0^\circ} = V_{\theta=0^\circ} (V_{\phi=35^\circ} / \bar{V}_{\phi=35^\circ}) \quad \text{式(7)}$$

( $\because V_{\phi=0^\circ} = V_{\theta=45^\circ}$ )

$\bar{V}_{\phi=0^\circ}$  を用いて、 $\phi = 0^\circ$  での平均反射光信号  $\bar{V}_{\phi=0^\circ}$  を描き、式(5)と同様の方法で式(8)を用いて平均反射光信号  $\bar{V}$  を求める。

[平均の反射光信号  $\bar{V}$ ]

$$= [\text{最大の反射光信号 } \bar{V}_{\phi=0^\circ} \times \text{半値幅}] / 180^\circ \quad \text{式(8)}$$

測定は球面体の 4 分の 1 空間の範囲で行っているので、球面立体角  $\pi$  と、PD の立体角を用いて、式(9)で全反射光信号が求められる。

[全反射光信号]

$$= \{ \pi / (S/r^2) \} \times [\text{平均反射光信号 } \bar{V}] \quad \text{式(9)}$$

( $\because$  PD の受光面の面積  $S = 2.77 \text{ mm} \times 2.77 \text{ mm}$ 、  
集光点から PD 間の距離  $r = 50 \text{ mm}$ )

この全反射光信号を式(1)に代入し補正を試みた。

4.4 立体角反射補正の測定結果

(A)倍率と(B)立体角で求めた各全反射光信号を用いて、式(1)に代入、光音響信号補正值を求め、両方法で欠陥検出感度が上がるか比較・検討した。ここで、入射光信号は直接 PD で測定した結果の 11.9V を代入する。

代表例として試料材料にアルミニウムを用いた結果を図 11~13 に示す。試料表面はキズや汚れがある。また、図中の垂直な二本線でできた枠は内部欠陥がある部分を示す。この場合、内部欠陥は一つである。

図 11 の補正前では、欠陥部以外でも光音響信号が大きく出る位置があり、欠陥部と非欠陥部の区別がつかなくなっている。この試料を用いて、(A)倍率補正と(B)立体角補正を行った結果、図 12 や図 13 の様に、欠陥部のみが大きく浮き出る結果が得られた。

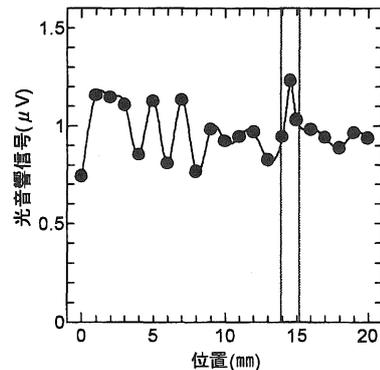


図 11 補正前

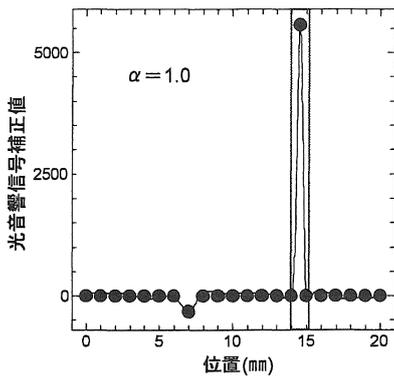


図 12 (A)倍率補正後

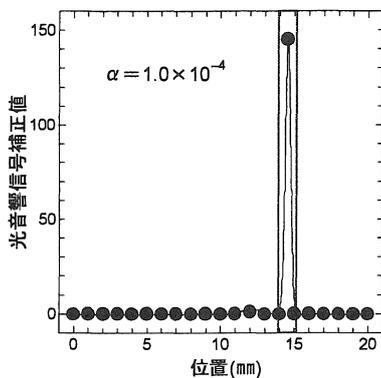


図 13 (B)立体角補正後

以上の結果から考察すると、PD で同時測定し補正式を用いることにより、(A)倍率補正と(B)立体角補正の両補正方法において、光音響信号が補正され内部欠陥検出感度が向上したと考えられる。

表 3.1 に各種金属の試料を用いた場合、表 3.2 に非金属の試料を用いた場合の重み係数  $\alpha$  の内部欠陥検出可能な許容範囲をまとめる。この2つの表を見ると、補正式にある重み係数  $\alpha$  の範囲が狭くばらつきが多く、補正方法を確立するまでには至らなかった。その原因として、この両補正方法に用いた球面状の反射が一定ではなく(A)倍率補正では  $\phi = 0^\circ$  分布と  $\phi = 35^\circ$  分布が違うと考えられ、(B)立体角補正では式(6)が一定ではないと考えられる。

表 1 金属の重み係数  $\alpha$  の許容範囲

試料名	(A)倍率補正	(B)立体角補正
アルミニウム	0.999830~1.000019	$0.900000 \times 10^{-4} \sim 1.00008 \times 10^{-4}$
真鍮	7.6500~7.6702	$1.1000 \times 10^{-6} \sim 1.1675 \times 10^{-6}$
銅	2.6360~2.6629	$7.400 \times 10^{-4} \sim 7.414 \times 10^{-4}$

表 2 非金属の重み係数  $\alpha$  の許容範囲

試料名	(A)倍率補正	(B)立体角補正
アクリル板	1.608~1.611	$4.070 \times 10^{-2} \sim 4.081 \times 10^{-2}$

また表 2 のアクリル板(アクリル樹脂)の音響インピーダンスは  $3.3 \times 10^6$  [Ns/s]と低く、非金属のため物質内の

減衰が大きく、光音響信号が小さくなってしまふことから、レーザー光の吸収率の高い黒色を用いても内部欠陥のみを完全に検出することは困難であると考えられる。

超音波探傷法と同様に、銅や真鍮は音響インピーダンスが  $39.3 \times 10^6$  [Ns/s]と  $40.4 \times 10^6$  [Ns/s]とアルミニウムの  $17.1 \times 10^6$  [Ns/s]よりも高いが、結晶粒子の関係で光音響信号の伝搬が悪く、検出感度は補正式により向上したが、重み係数  $\alpha$  のばらつきが大きいと考えられる。

この結果から、光音響効果による内部欠陥検出は、光音響信号の伝搬や減衰、音響インピーダンスを考慮に入れ、更に、補正に用いる反射光信号の角度分布の関係から、アルミニウムが最も内部欠陥検出感度向上の糸口が発見されるのではと考えた。よって、基本とするアルミニウムに限定して内部欠陥検出感度の向上を目指した。

#### 4.5 鏡面反射に対する補正法

鏡面反射に対する補正装置の概略図に図 14 に示す。4.3 の結果から、多種の材料に対応できるものではなく、アルミニウムに限定して行うことにした。アルミニウムは鏡面反射をすることが分かっている。鏡面反射の全反射光信号を測定するためには PD を  $\theta = 30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  の3点に配置するのが最適と考えられた。ここで鏡面反射の分布の形状を利用すると、 $\theta = 45^\circ$  を軸にして左右対称の分布であるため、 $\theta = 30^\circ$  での反射光信号は  $\theta = 60^\circ$  の反射光信号とほぼ等しい。そこで、全反射光信号の誤差を抑えるため  $\theta = 45^\circ$  と  $\theta = 60^\circ$  の間の  $\theta = 52^\circ$  を配置に加えた。測定対象を限定する代わりに配置する PD を一つ減らし、算出方法を簡略にした。

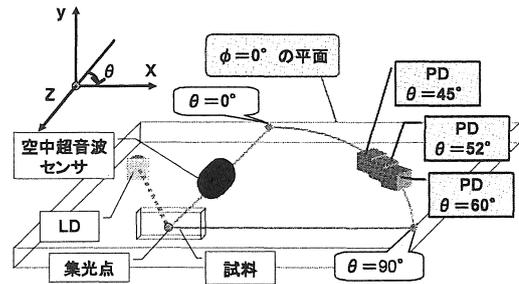


図 14 鏡面反射に対する補正の装置

算出方法は、まず測定した PD3 点の反射光信号と  $\theta = 45^\circ$  を軸に  $\theta = 30^\circ$  を  $\theta = 60^\circ$  に、 $\theta = 52^\circ$  を  $\theta = 38^\circ$  に折り返してグラフを書く。このグラフより、式(2)と同様に、式(10)で全反射光信号を求めることが出来る。

[最大反射光信号  $\times$  半値幅]

$$= [\theta \text{ 方向の反射光信号積分値}] = [\text{全反射光信号}]$$

式(10)

この全反射光信号を式(1)に代入、光音響信号補正値を算出する。

4.6 鏡面反射に対する補正測定結果

図 15 に補正前、図 16 に鏡面反射に対する補正をした補正後のグラフの代表的な結果を示す。図 16 を見ると分かるように欠陥部が大きく浮き出る結果となった。

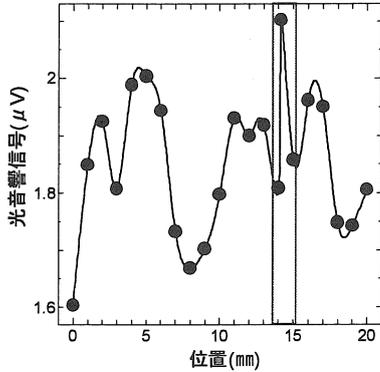


図 15 補正前

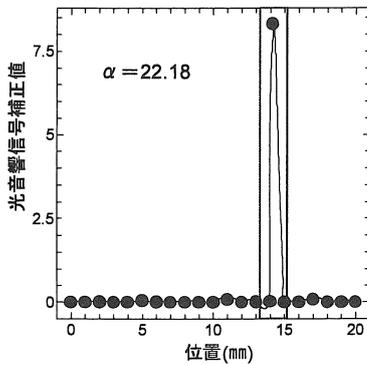


図 16 補正後

この結果の他に、幾つかの試料も同様に補正ができた。表 3 にそれら試料で欠陥が判別できる重み係数  $\alpha$  の許容範囲をまとめた。

表 3 重み係数  $\alpha$  の許容範囲

試料名	$\alpha$ の許容範囲
A	21.00~22.18
B	37.50~42.19
C	24.00~34.70
D	23.00~34.70
E	25.50~25.93

表 3 の結果を考察すると、4.3 の(A)倍率補正と(B)立体角補正に比べ、重み係数  $\alpha$  の許容範囲が広く、どの試料でも近い値になった。つまり、試料表面の状態に関係なく欠陥検出感度を向上できる可能性があると考えられる。

5.総括

現在、工業分野で実用化されている内部欠陥検出法には改善すべき点が幾つかある。その改善点を考慮した新たな光計測技術として、光音響効果は挙げられた。この物質内部の非破壊・非接触検査に光音響効果を用いようという研究が進められているレーザは、一般的に高出力の YAG レーザや CO<sub>2</sub> レーザである。しかし本研究の過去の成果では、低出力で小型の半導体レーザを用いて、実現し、高い空間分解能を持っている。

しかし光音響効果の原理により、その光音響信号がレーザの吸収率に影響されることから、試料表面状態が悪い場合、欠陥検出感度が低下してしまっていた。

そこで、本研究では、光音響信号と反射光信号との関係を探り出し、従来の内部欠陥検出が困難だった表面状態に汚れや傷がある試料でも、この関係から導き出した補正式を用いることで検出感度を向上させ内部欠陥検出ができる可能性があることが分かった。

更に内部欠陥検出の感度を向上させる為には、PD の数を増やし、全反射光信号をより正確に測定することが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：非破壊検査便覧, pp1, 日刊工業新聞社, 1979
- 2) 山田悦生、山田諄、津田紀生、古橋秀夫、内田悦行、半導体レーザの光音響効果を利用した欠陥検出と光音響信号の伝搬特性、電気学会論文誌、Vol.119-C、No.1、pp15-20、Jan.1999
- 3) 川島一郎、津田紀生、山田諄、半導体レーザの光音響効果を用いた非破壊センサの二次元走査に関する研究、愛知工業大学研究報告、No.37、pp41-46、Mar.2002

(受理 平成 18 年 3 月 18 日)