

## 半導体レーザー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

### Study on Two-Dimensional Scanning of Non-Destructive Sensor by Photoacoustic Effect of Semiconductor Laser.

川島 一朗<sup>†</sup> , 津田 紀生<sup>††</sup> , 山田 諄<sup>††</sup>

Ichiro KAWASHIMA , Norio TSUDA , Jun YAMADA

Abstract : The non-contact inside defect sensor that causes no change of surface and operates at high speed is demand for the product inspection. Then, the proto-type system which is able to detect the inside defect of sample with non-destruction and non-contact using photoacoustic effect of semiconductor laser has been developed. As a result, this sensor has a resistance for noise as the measurement circuit is carefully designed. This system can automatically detect the defect of the two-dimensional plane using the scanning mirror and the control circuit. The scanning result is displayed with the image so that the defect is easily comprehended.

#### 1. はじめに

今日の産業界に於ける工場でのインラインプロセスでの製品検査として、非接触で製品表面を変質させることなく高速に製品内部欠陥を検出するセンサが要求されている<sup>(1)</sup>。

現在、放射線又は超音波等を利用した非破壊計測が実用化されている。放射線計測では、非破壊・非接触で測定できるという長所があるが、人体に対して有害な放射線を利用しているため安全性の点で問題がある。また、超音波計測は小型という特徴があるが、分解能が低いために隣接した欠陥検出には向かない。

一方、半導体レーザーによる光音響効果を利用して物質の内部欠陥を非破壊、非接触で測定する研究が行われてきた。ここでは出力の小さい半導体レーザーを用いているため、試料表面を変質させてしまう恐れがない。今までに、光音響信号の伝搬の様子を詳細に調べることにより、可能な限り大きな光音響信号が得られる空中超音波センサ位置を求め、実際に、出力 10mW の小型半導体レーザーであっても欠陥検出が可能であることが分かった。<sup>(2)</sup> また、隣接した欠陥の検出にも成功した。さらに、レーザー出力に対する光音響信号の変化、レーザー光照射角度に対する光音響信号の変化、空中超音波センサに関する特性を詳細に調べ、光音響効果を利用した非破壊センサの最適化を行った結果、低いレーザー出力でも高い光音響信号を得ることができ、安定して欠陥検出を行えるようになった<sup>(3)</sup>。

しかし、市販ロックインアンプを使用しているため

に測定時間が長く掛かり、二次元平面を走査することが困難であるなど、実用的ではない。

そこで本研究では、半導体レーザーの光音響効果を利用して物質の内部欠陥を非破壊・非接触で自動測定するシステムの開発を目指し、測定時間を短縮するために市販ロックインアンプに代わる専用の測定回路を試作し、二次元走査のための測定装置及び制御装置を試作したので、その結果について報告する。

#### 2. 光音響効果

光音響効果による欠陥検出の原理は以前の論文<sup>(1), (3)</sup>に詳しく掲載されているため、ここでは簡単に原理を説明する。試料表面に照射された直接電流変調されたレーザー光は、試料表面に吸収され、熱エネルギーへと変換される。すると、表面温度が変化し、試料表面が膨張・伸縮し、それによって生じた空気振動が音波を発生させる。これを光音響信号という。この光音響信号は試料内部と外部方向に伝搬する。このとき、試料裏面で反射する光音響信号と、内部欠陥で反射する光音響信号は伝搬距離が異なるために減衰量に差が生じる。この光音響信号の差から内部欠陥検出が可能である。

#### 3. 一次元検出

##### 3.1 実験装置

実験装置は小型で出力の小さい半導体レーザーと空中超音波センサ、市販ロックインアンプに代わる専用の測定回路などを使用して簡単にシステムを構成した。測定試料として縦 20mm、横 60mm、厚さ 1mm、3mm、5mm、19mm のアルミニウム板を用いた。欠陥試料には欠陥の代用として測定試料表面から深さ 1.0mm の位置にドリルで直径 1.8mm の穴を開けた。

<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)

### 3. 2 専用測定回路

試作した専用測定回路は、図 1 に示されるようにレーザ駆動部とセンサアンプ、市販ロックインアンプと同等の動作をする REF 回路等から構成されている。

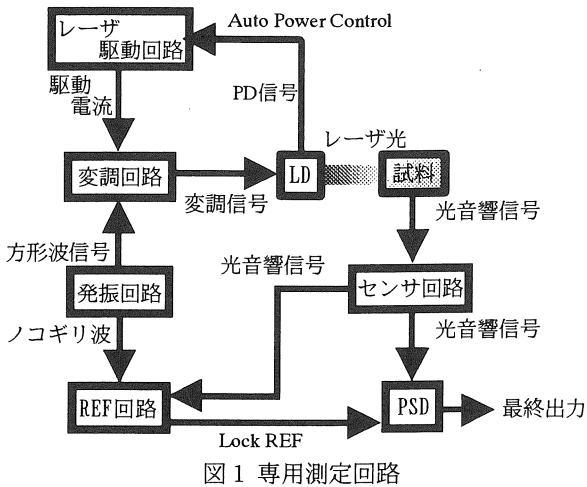


図 1 専用測定回路

レーザ駆動部については以前の論文に掲載されているのでここではセンサ回路と REF 回路について述べる。REF 回路は半導体レーザの変調信号の位相を光音響信号と同相にし、これを Lock REF 信号として PSD へと出力する。センサ回路は空中超音波センサから受信された光音響信号はノイズも含んでおり、また、光音響信号自体の振幅が  $2 \sim 4 \mu\text{V}$  程度と極めて微小なため、アクティブバンドパスフィルタを通し光音響信号と異なる周波数成分のノイズを除去し増幅して REF 回路及び PSD (掛け算回路) に出力する。しかし、光音響信号と同周波数であるが非同相のノイズ成分も増幅してしまうので、PSD (掛け算及び平滑回路) において Lock REF 信号 (方形波) と増幅された光音響信号とを掛け合わせて、非同相なノイズ成分も除去している。

この専用測定回路により、測定開始時のみレーザの変調信号との位相調整をしているので高速に内部欠陥検出が可能となった。

### 3. 3 アクティブバンドパスフィルタ

専用測定回路では、市販ロックインアンプと同様にアクティブバンドパスフィルタにて光音響信号とは異なる周波数のノイズ成分を取り除いている。また、6 次アクティブバンドパスフィルタにすることで Q 値の向上を図った。

図 2 に専用測定回路、市販ロックインアンプそれぞれの特性を示す。市販ロックインアンプでは、 $Q=1$  なのに対し、試作した専用測定回路では  $Q=206$  と非常に高い Q 値を持っていることがわかる。以上の結果から市販ロックインアンプよりも専用測定回路の方が極めて高い選択度で光音響信号とは異なる周波数のノイズ成分を取り除いていると言える。

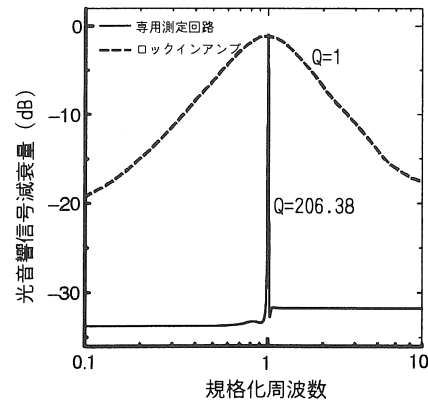


図 2 アクティブバンドパスフィルタ特性

### 3. 4 試料の厚さの違いによる定在波特性

これまでの研究で、光音響信号は定在波を形成することが分かっている。この定在波が試料の表面と裏面の反射によるものか、試料とセンサとの反射によるものかを調べるため、材料の厚さを変えて定在波を測定した。厚さ 1mm、3mm、5mm、19mm の試料を用い、非欠陥部における定在波特性を測定した結果を図 3 に示す。

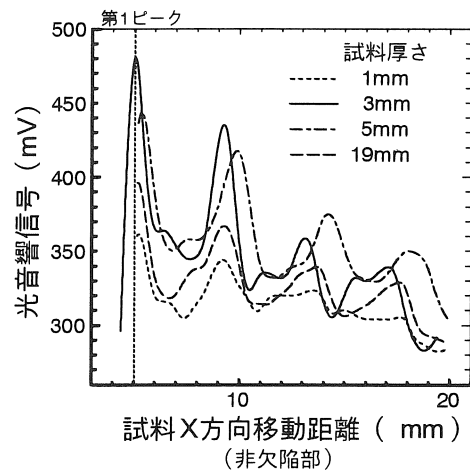


図 3 試料の厚さの違いによる定在波特性

その結果、定在波の第 1 ピークは試料厚さに依存しないことが分かった。以上の結果、試料を変えた場合においても試料-センサ間距離が一定であれば問題なく内部欠陥検出は可能であると言える。

### 3. 5 内部欠陥検出結果

市販ロックインアンプと専用測定回路を用いて内部欠陥を測定した結果を図 4 に示す。図中のグレーの部分欠陥部を示してあり、市販ロックインアンプ、専用測定回路どちらの装置を用いた場合でも LD、試料、空中超音波センサは同じ物を用いた。両方の結果共、ちょうど欠陥部分にピークが見られることから内部欠陥が検出できていることが分かる。また、欠陥部以外の光音響信号の変動分は数回同じ条件で測定しても同様の傾向が見られたため、試料の表面状態によるものと考えられる。欠陥検出の感度を示す S/N の計算式を式 (1) に示す。

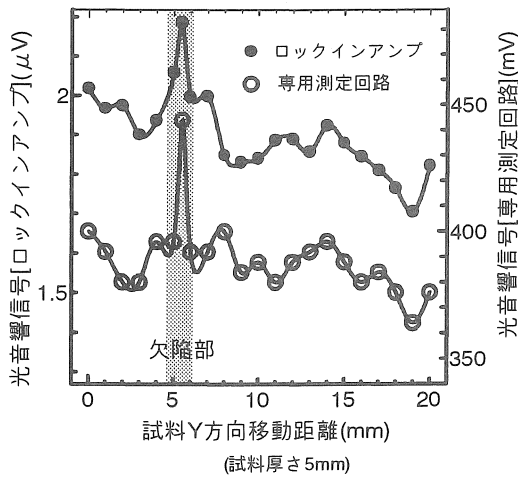


図4 内部欠陥検出結果

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{\text{欠陥部最大値} - \text{非欠陥部変動平均値}}{\text{非欠陥部最大値} - \text{非欠陥部最小値}} \quad (1)$$

これより、S/N は市販ロックインアンプの 0.28dB に比べ専用測定回路では 3.37dB と高い S/N であることから、従来よりもより強いノイズ耐性を持っているといえる。

#### 4. 二次元検出

##### 4.1 実験装置

二次元走査に用いた実験装置の概略図を図5に示す。センサと試料間に置かれた振動ミラーを振らせ、それに X-Y ステージの移動を同期させて試料を Y 方向に移動させることによって二次元測定を行う。

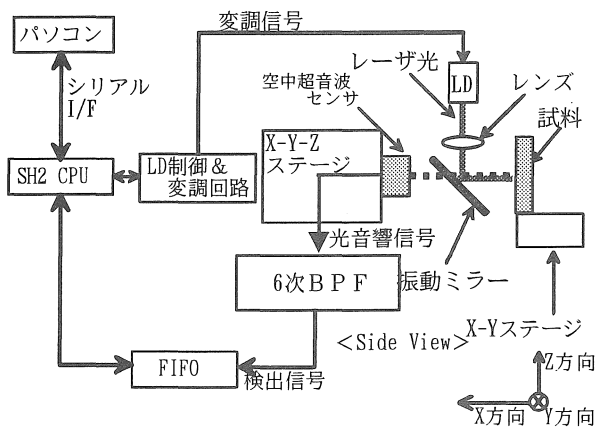


図5 実験装置の概略図

検出された光音響信号は 6 次 BPF を通してもノイズ成分を含んでいるために、FIFO に入力される前段で全波整流回路によって平滑される。図中の FIFO では光音響信号中に含まれる雑音除去のため光音響信号を同一の振動ミラー位置で 8 回サンプリングしている。また、サンプリングと同期して振動ミラーも同時に制御している。FIFO にて取り込まれたデータは SH2-CPU にて、8 回平均され、パソコンへとシリアル I/F を介してデータを

転送している。SH2-CPU は演算とデータの転送だけでなく、X-Y ステージの制御とそれに同期させて FIFO も制御している。パソコンでは制御プログラムが基本実験装置全体を制御しつつデータを蓄積し、画像処理プログラムで測定結果を光音響信号の大きさごとに色分けする事によって、グラフィカルに表示する。なお、半導体レーザー(LD)と空中超音波センサ、また 6 次 BPF、LD 変調回路は共に二次元検出で用いた物をそのまま使用した。

##### 4.2 測定試料

測定試料として図6に示すように縦 20mm、横 60mm、厚さ 3mm のアルミニウム板を用いた。図中のグレーで示してある部分が欠陥部で、破線で囲ってある部分が走査領域(縦約 6 mm、横 20 mm)を意味している。レーザー光走査位置は試料のほぼ中央である。欠陥試料には欠陥の代用として測定試料表面から深さ 1.0mm の位置にドリルで直径 1.8mm の穴を開けた。また試料は無地と表面を黒で塗装した物を用いた。

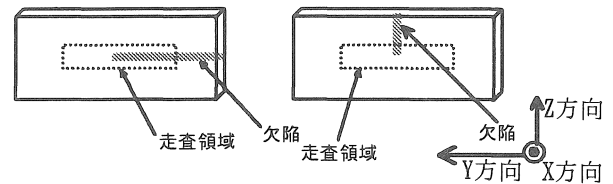


図6 測定試料

##### 4.3 振動ミラー反射角度特性

レーザー光を上下に照射するための振動ミラーの制御電圧に対する反射角度特性の測定結果を図7に示す。

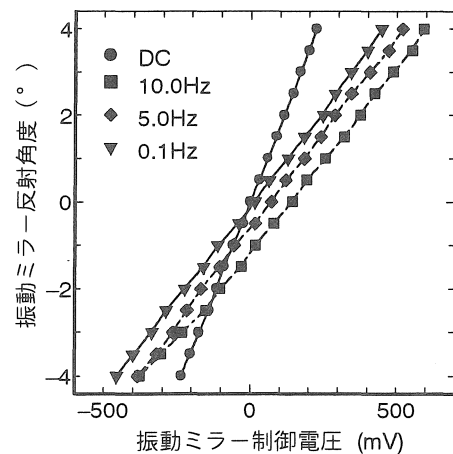


図7 振動ミラー反射角度特性

ここで、図中のパラメータは制御電圧の駆動周波数である。それぞれ振動ミラー制御信号が直流時と、交流時について測定した。その結果交流時より直流時の傾きが急で、差が見られた。また、駆動周波数が 0.1Hz など低いときは一様な特性を示しているが、周波数が 10Hz と高くなるにつれて、振動ミラー反射角度が低下していることが分かる。これは、振動ミラーを可動コイルで制御

しているためだと考えられる。そのため、振動ミラーを制御するときは制御周波数に応じて電圧を補正する必要がある。なお、現在の二次元走査では、0.1Hz にて制御している。

4. 4 ミラー角度対光音響信号特性

振動ミラーの制御信号として、周波数が 0.1Hz から 5Hz のノコギリ波を用いたときの光音響信号の測定結果を図 8 に示す。

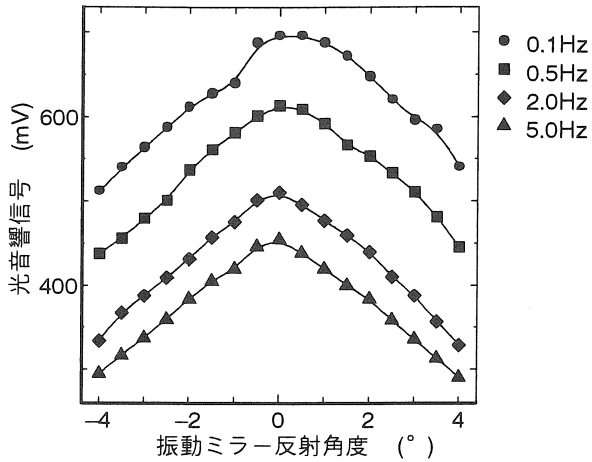


図 8 ミラー角度対光音響信号交流特性

その結果、制御周波数が低いほど光音響信号は一樣に大きくなり、制御周波数が高いほど光音響信号は小さくなっていく。これは、制御周波数が高いと単位時間あたりに試料表面に吸収される光エネルギーの量が減少したためだと考えられる。また、振動ミラー反射角度が 0 度の時に光音響信号のピークが見られ、振動ミラー反射角度が大きくなるにつれて光音響信号が減衰している。これは、振動ミラー反射角度が大きくなるにつれて、レンズの集光距離が延びて、照射面のスポット径が大きくなるために、発生する光音響信号が減衰するものだと考えられる。

4. 5 制御回路及び制御プログラム

4. 5. 1 制御回路

制御回路のブロック図を図 9 に示す。二次元走査結果を表示するパソコンと測定試料が置かれている X-Y ステージコントローラとはそれぞれ CH1、CH0 のシリアル I/F で接続され、FIFO とは後に述べるアドレスバス制御線と FIFO 動作制御線とで接続されている。パソコンとはシリアル I/F で接続され、パソコンから制御信号を SH2-CPU へと送信することにより二次元走査を行う。

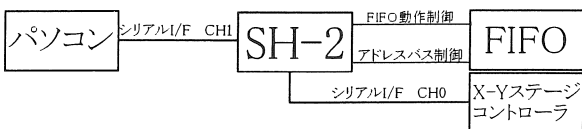


図 9 制御回路のブロック図

制御回路の構成は非常に簡単化されていて、SH2 と FIFO が接続されているのは FIFO 動作制御とアドレスバス制御のみである。FIFO 動作制御は FIFO の起動と停止を司り、アドレスバス制御は FIFO から読み込まれるデータのシリアル送信の関係上、12bit データを上位 8bit と下位 8bit へと分割送信する時のデータの上位、下位を指定する信号と、データの状態を制御する信号、及びデータ線である。このように単純に信号線を接続することによって SH2 による FIFO の制御を単純化すると同時に SH2 制御プログラムを簡略化した。

SH-2 と周辺機器とのデータ転送には DMA 転送を用いている。DMA 転送によってデータ転送の高速化と高効率化を同時に実現できるばかりでなく、制御プログラムの簡略化も図ることが出来る。さらに、DMA 転送は CPU と独立して行えるので、CPU は DMA 転送中に別の処理をすることができ、非常に効率良く基本実験装置を制御することが可能となった。DMA 転送チャンネルは X-Y ステージコントローラの送受信に 2ch、FIFO からのデータ受信に 1ch、パソコンへのデータ送信に 1ch の合計 4ch 使用している。

4. 5. 2 制御回路の動作

制御回路の動作を説明するためのフローチャートを図 10 に示す。パソコンから走査開始信号が送信されると、制御回路は FIFO に FIFO Start 信号を送信する。すると、FIFO が動作を開始し、振動ミラーを制御しつつ光音響信号をサンプリングする。FIFO が停止すると、

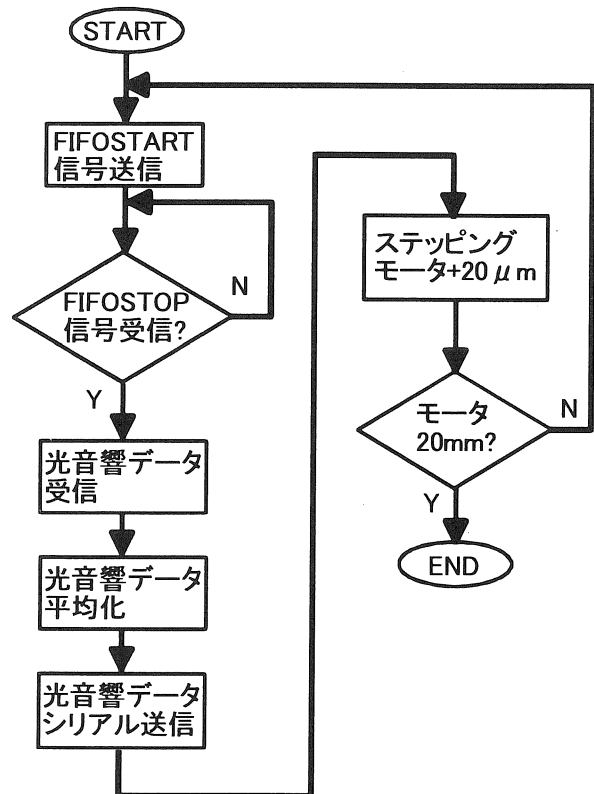


図 10 制御回路のフローチャート

SH2へFIFO Stop信号が送信される。SH2はFIFOからサンプリングデータを受信しそれをパソコンへと送信し、X-Yステージコントローラを介し試料を20 $\mu$ m移動させる。以下、それを試料の移動量が20mmになるまで繰り返す。

4.5.3 プログラムの概要

測定の自動化と同時に、測定結果のデータ処理の簡略化を実現するために画像処理プログラムと制御プログラムを開発した。なお、言語はVB(Visual Basic)を用いた。

制御プログラムはSH2-CPUに制御信号を送信することによって、パソコンから二次元走査を全自動で行うようにしたものである。二次元走査を行うには走査開始ボタンを押すだけでよく、後はすべてプログラムが光音響信号のサンプリングからステップモータの制御、サンプリングデータの平均化、サンプリングデータの保存を全て自動で行う。なお、このプログラムのシリアル通信部にMSCommを用いることによりプログラムを非常に簡略化できた。

画像処理プログラムは制御プログラムによって保存されたサンプリングデータを基に画像処理を行い、二次元走査結果をパソコンの画面に表示したときの一例を図11に示す。なお、二次元走査結果はカラーで表示されるが、ここでは紙面の都合で白黒にしてある。

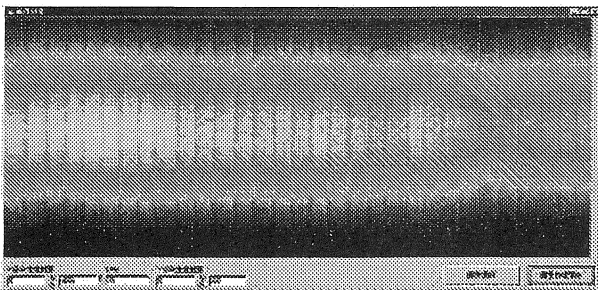


図11 画像処理結果の一例

これは、図6測定試料の走査領域に対応していて、縦約6mm、横20mmの大きさである。サンプリングデータはファイル数にすると2,000個もあるために処理を自動化しデータ処理の簡略化を実現した。

表1 光音響信号と色の対応

光音響信号の大きさ(V)	表示色
0 ~ 0.3125	黒 ~ 青
0.3125 ~ 0.625	青 ~ 水
0.625 ~ 0.9375	水 ~ 緑
0.9375 ~ 1.25	緑 ~ 黄
1.25 ~ 1.5625	黄 ~ 赤
1.5625 ~ 1.875	赤 ~ ピンク
1.875 ~ 2.18	ピンク ~ 白
2.18 ~	白

2,000個のファイルの画像処理に掛かる時間は約3分である。また、光音響信号の大きさを表1に示したような色のグラデーションに対応させてあるために、直視的に試料の内部状態を把握することが可能である。

4.6 光音響信号の試料温度特性

二次元走査にて検出された光音響信号に温度特性が見られた。そのため、この特性が試料によるものなのか、又は試料以外のものなのかを調べるために、インキュベータ内に試料及び空中超音波センサ、又は空中超音波センサのみを設置してインキュベータ内の温度を10°Cから30°Cに変化させたときの光音響信号の出力変動を調べた。その結果を図12に示す。

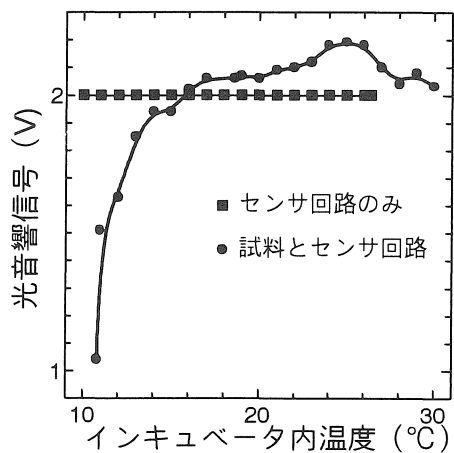


図12 光音響信号の試料温度特性

図中の「センサ回路のみ」は、インキュベータ内に空中超音波センサ回路を設置したときの光音響信号の出力変動特性を示す。なお、センサには光音響信号の代わりとして40kHzの超音波発振器を用い、それを疑似信号として与えた。図中の「試料とセンサ回路」は、インキュベータ内に試料及び空中超音波センサを設置したときの光音響信号の出力変動特性を示す。

その結果、「センサ回路のみ」では一定の光音響信号が得られていることから、センサ回路自体の温度変化による光音響信号の出力変動は見られなかった。また、「試料とセンサ回路」ではインキュベータ内の温度が10°Cから14°Cの時、光音響信号の変動が非常に大きく、それ以上になると光音響信号は飽和していることが分かる。

以上のことより、光音響信号の温度特性は試料温度に大きく依存していることが分かった。温度が10°Cから14°Cでの急な光音響信号の変動は、試料温度がある程度低温であると、吸収された光エネルギーが熱エネルギーへと変換され光音響信号を発生する過程で、その熱エネルギーのほとんどが外部へと放熱されてしまうために光音響信号の出力が大きく低下していると考えられる。

#### 4. 7 二次元走査結果

表面を黒く塗装した試料を用いて二次元走査を行った結果を図 13 に示す。これは、図 6 測定試料の走査領域に対応し、縦約 6 mm、横 20 mm の大きさである。欠陥は直径 1.6 mm、深さ 12 mm の穴を試料上部からあけ、それを疑似欠陥とした。図中の黒枠で囲ってある部分が欠陥部である。また、試料と空中超音波センサ回路は雰囲気温度の変動を抑えるためにインキュベータ内に設置しており、その時の雰囲気温度は 25°C に設定してある。

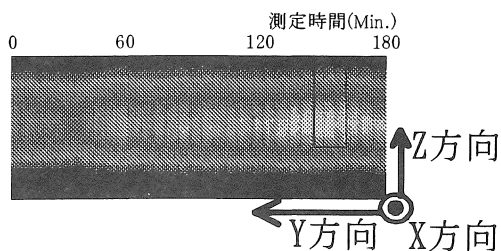


図 13 二次元走査結果 (試料黒塗り)

その結果、欠陥部分周辺の光音響信号が増加していることが分かる。図 8 に示したように、中心部の光音響信号にピークが見られる。また図中に見られる規則的な光音響信号の変動は、インキュベータ内の微小(19.4°C から 20.4°C)な温度変化のために生じている。

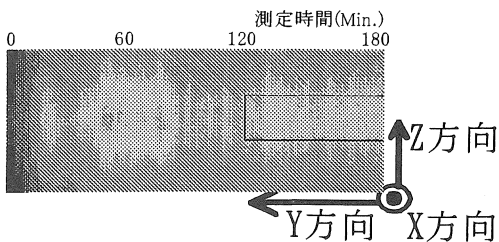


図 14 二次元走査結果 (試料無地)

二次元走査での欠陥検出特性を図 14 に示す。これも同様に図 6 測定試料の走査領域に対応し、縦約 6 mm、横 20 mm の大きさである。図中の黒枠で囲ってある部分が欠陥部である。試料表面は黒塗りしていない。欠陥は直径 1.8 mm、深さ 18 mm の穴を試料右側面からあけ、それを疑似欠陥とした。また、試料と空中超音波センサはインキュベータ内には置いていない。その結果、欠陥部分周辺の光音響信号が増加していることが分かる。左部に見られる光音響信号の上昇分は、試料表面の色合いによるものと考えられる。左端部に見られる光音響信号の減衰は雰囲気温度が低かったためであると考えられる。また、図 8 に示したように中心部の光音響信号にピークが見られる。

#### 5. 総括

本研究に於いて、一次元検出では、半導体レーザーを用いた光音響効果による非接触・非破壊センサの測定時間を短縮するために、市販ロックインアンプに代わる専用

の測定回路を試作した。また、二次元走査では、非常に簡単な操作で二次元走査が行えるよう専用の制御装置を試作した。それに伴い、検出結果から測定試料の内部状態が容易に把握できるように、検出結果を画像で表示するためのプログラムの開発も行った。

この結果、一次元検出では、専用測定回路を試作することによって、従来の市販ロックインアンプを用いた測定装置よりも高速に欠陥検出を行うことに成功した。センサ回路には 6 次アクティブバンドパスフィルタと多段増幅回路を用いることによって 100dB 以上の利得を得ることができ、従来の測定装置よりも強いノイズ耐性を示した。

二次元走査に於いても、専用の制御装置を試作することによって、全自動で二次元走査を行うことができ、二次元走査結果を画像にて表示するために直ちに試料内部の状態を把握することも可能となった。

今後の課題として、二次元走査を高速化すること、試料の表面状態及び温度特性に依存しない測定が行えるようにすることなどが考えられる。

測定時間は現在 6 mm × 20 mm の二次元走査で 3 時間程度要している。本研究では測定面の分解能を非常に細かく分割して行っており、また専用制御回路とパーソナルコンピュータとをシリアルインタフェースにて接続しているため多くの測定時間が必要となっている。これは、測定面の分解能をセンサの分解能程度まで下げることと、専用制御回路とパーソナルコンピュータとのインタフェースをシリアルインタフェースから USB インタフェースにすることによって解決できると考えられる。

本研究に於いて、試料表面から発生する光音響信号が試料の表面状態だけでなく、試料自身の温度変化にも大きく依存することが分かった。このため光音響信号を空中超音波センサが受信するときに、試料の温度変化及び試料の表面状態による変動分を補正する必要がある。

#### 謝辞

本研究は、日東学術振興財団の助成を受けたものであり、ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 日本電気学会、非破壊計測技術、朝倉書店、1990
- 2) 山田悦生、山田諄、津田紀生、古橋秀夫、内田悦行、半導体レーザーの光音響効果を利用した欠陥検出と伝搬特性、電気学会論文誌、Vol.119-C、No.1、1999
- 3) 寺田英敏、津田紀生、山田諄、光音響効果を利用した非破壊センサに関する研究、愛知工業大学研究報告 No.35、2000

(受理 平成 14 年 3 月 19 日)