

光音響効果を利用した非破壊センサに関する研究

Study on Nondestructive Sensor Using Photoacoustic Effect

寺田 英敏[†]、 津田 紀生[‡]、 山田 諄[‡]
Hidetoshi TERADA, Norio TSUDA, Jun YAMADA

Abstract: Using a photoacoustic effect, a non-destructive and non-contact sensor has been studied. This paper reports on the optimization of defect detection system with a semiconductor laser to get larger photoacoustic signal. Photoacoustic signal increases with increasing laser power. Photoacoustic signal modulated by pulse wave is greater than that by sinusoidal wave. This system has a higher resolution than the other ultrasonic test system. It is confirmed that the defect completely shut in sample can be detected.

1. はじめに

非破壊・非接触計測技術は測定物を破壊することなく、また計測時に接触することなく内部状態を把握する技術であり、多くの分野で要求されている⁽¹⁾。

現在、放射線計測や超音波計測などが実際に実用化されている。放射線計測は非破壊・非接触の計測技術であり高分解能を得ているが、人体に有害である放射線を使用していること、装置が大がかりであり高価であることなどの欠点がある。また、超音波計測では一般に小型で簡便であるが、分解能が低く、隣接した欠陥の検出に不向きであることなど万能ではない。また、両計測技術は工場内のオンラインセンサへの応用例はほとんどない。

本研究では半導体レーザーと光音響効果を利用して非破壊・非接触の計測システムを試作した。半導体レーザーは出力が小さく一般には表面計測に使用されているが、光音響効果を利用することで内部診断が可能となる。また、他のレーザーと比較した場合、小型、安価であり、レーザー出力も低い被測定物を破壊してしまうという恐れもない。

今までに本研究では光音響信号の伝搬の様子を詳

細に調べる事により、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^(2,3)。また、非常に隣接した欠陥の検出にも成功した。しかし、この装置では測定した光音響信号の振幅が極めて小さい事や、市販のロックインアンプを用いているために測定時間が長い事など、実用的ではない。今後の実用化に向け、測定時間を短縮させるための専用の測定回路を開発しなければならない。

このため、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、また、空中超音波センサに関する特性などについて調べ、光音響効果を利用した非破壊センサの最適化のための研究を行った。

2. 光音響効果

2.1 光音響診断

現在、レーザー光の光音響効果を利用した非破壊・非接触の計測技術が注目されている。実際、本研究以外ではYAGレーザーやCO₂レーザー等の大出力レーザーを利用した欠陥検出システムが研究されている。

YAGレーザーを用いたシステム⁽⁴⁾は、2つのYAGレーザーと干渉計を使用してシステムを構成している。原理はYAGレーザーをパルス発振させ試料に照射し光

[†] 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 電子工学科 (豊田市)

音響効果によって音波を発生させる。光音響効果による試料表面の微小振動を、もう1つのCWのYAGレーザーとファブリペロー干渉計によってレーザー光のドップラーシフトを観測し、欠陥エコーを検出するシステムである。この装置では非破壊・非接触によって物体の内部欠陥を高分解能で検出することに成功しているが、2つのYAGレーザーとファブリペロー干渉計を使用しているため、装置が大がかりで高価であることや、光軸調整が困難である事が難点である。

また、CO₂レーザーを用いたもの⁽⁶⁾は、CO₂レーザーをパルス発振させ光音響効果によって音波を発生させる。光音響効果によって発生した熱弾性振動を試料裏面に貼り付けた圧電素子 (PZT) を使用して検出するシステムである。このシステムでは、金属疲労の非破壊検出に成功している。しかし、大がかりなCO₂レーザーを使用していることや、被測定物に対し接触式の計測技術であることなどが問題である。

2・2 光音響効果による欠陥検出の原理

光音響効果による欠陥検出の原理は以前の論文^(2,3)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。

光音響効果とは物体に断続光を照射することにより音波が発生する現象である。レーザー光照射によって発生した光音響信号は試料内部を往復する形で伝搬する。ここで、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には伝搬距離が異なるため減衰の差が生じる事になる。この減衰の差を検出することにより内部欠陥を検出する。

現在実用化されている超音波診断法ではセンサを試料に接触させているために非接触の測定はできない。また、センサは一般的なもので直径が10mm以上であるために微小な欠陥や隣接した欠陥の分解検出は困難である。しかし、本研究では、音波の発生源はレーザー光をレンズによって集光したスポット (直径約0.2mm) であるため、空間的分解能は高く隣接した欠陥の検出も可能である。また、光音響信号の検出には空中超音波センサを使用しているためにこちらも試料に接触することはない。

3. 実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。装置は半導体レー

ザ、空中超音波センサ、ロックインアンプなどから構成されている。

光源は以前の論文とは異なり波長830nm 最大出力30mWの半導体レーザー (SHRAP 製 LT015MD) を使用し、方形波変調をかけて発振させる。レーザー光はレンズ (直径10mm、焦点距離50mm) によってスポット径約0.2mmに集光し自動XYステージ (シグマ光機製 MINI-60XY) 上に固定した被測定試料に照射する。発生した光音響信号の検出には空中超音波センサ (村田製作所製 MA40S4R、MA40B8R、MA200A1) を使用した。空中超音波センサの出力はロックインアンプ (エヌエフ回路設計ブロック製 5600A) に取り込む。ロックインアンプにはあらかじめ制御・変調回路からレーザー光の変調周期と同じ参照信号を与え、同じ周波数成分のみを測定する。

なお、実験装置はパソコンによって制御しているため、円滑な測定とデータ処理が可能である。

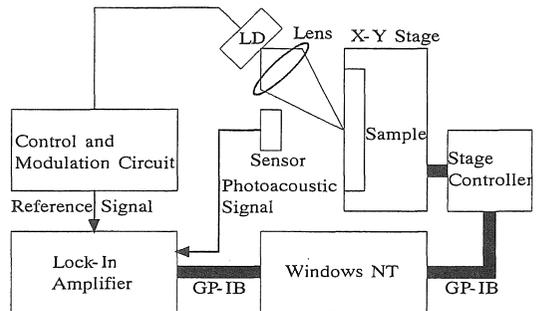


図1 実験装置概略図

4. 測定結果

4・1 レーザ出力依存性

光音響信号のレーザー出力依存性を図2に示す。光音響信号はレーザー出力に比例する形で増加していくことが分かる。レーザー光の方形波変調と正弦波変調を比較した場合、正弦波に比べ方形波の出力が1割程度大きいことが分かる。これは変調波形の平均エネルギーの違いによるものと考えられる。また、両変調波形ともレーザー出力25mW以降では光音響信号が飽和傾向を示している。これは試料表面の温度変化がレーザー光の変調周期に追従しないことが考えられるが詳細は分かっておらず、今後、さらに高出力の半導体レーザーを使用して測定する必要がある。

この結果から変調波形は方形波、レーザー出力は25mWに設定した。

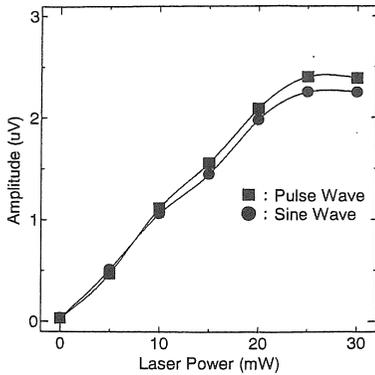


図2 レーザ出力特性

4・2 角度特性

より大きな光音響信号を得るためには空中超音波センサ設置角度(図3)、及びレーザ光照射角度(図4)は重要な要素となる。センサ角度及びレーザ光照射角度と光音響信号の関係を図5に示す。

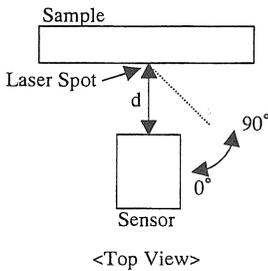


図3 空中超音波センサ設置角度

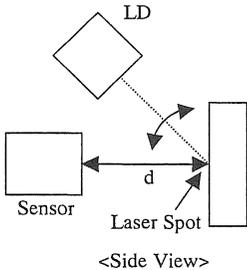


図4 レーザ光照射角度

図5よりレーザ光照射角度を変化させ45°に設置した場合には0°に比べ5%しか減少しなかった。一方、センサ角度を45°に設置したときは60%以上減少した。光音響信号は空中超音波センサの設置角度に大きく依存していることが分かる。

光音響信号の減少の原因はレーザ光のスポットの面積が変化すること、また、光音響信号は前面に強

い指向性を持っているために空中超音波センサの設置角度によって大きく変化すると考えられる。

この結果から半導体レーザと空中超音波センサは共に試料正面に設置することが望ましいと考えられる。しかし、両者を一体化させるのは困難であるため、空中超音波センサの設置角度を0°、レーザ光照射角度を45°とし、なるべく大きな光音響信号が得られるような設定とした。

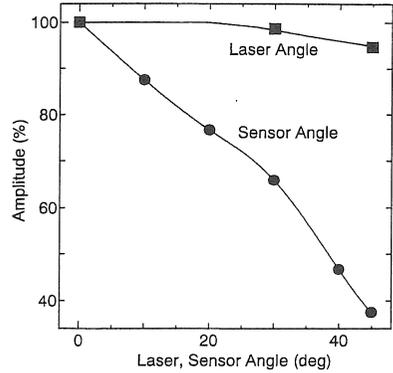


図5 角度特性

4・3 センサ位置特性

レーザ光照射点を中心とし、空中超音波センサの設置位置を左右に移動させた場合(図6)の光音響信号の様子を調べた。測定結果を図7に示す。

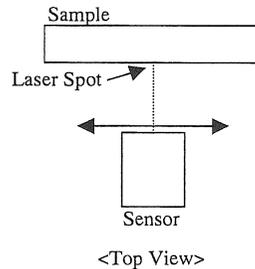


図6 空中超音波センサの位置

センサ中心がレーザスポットからセンサの半径程度移動した場合には光音響信号は55%程度に減少してしまうことが分かる。

センサは前面に感度が良いために光音響信号の発生源であるレーザスポットとセンサの中心軸を合わせることは重要となる。しかし、2mm程度のズレであれば光音響信号はピーク値の80%確保できるため、感度に大きな影響は無いと考えられる。

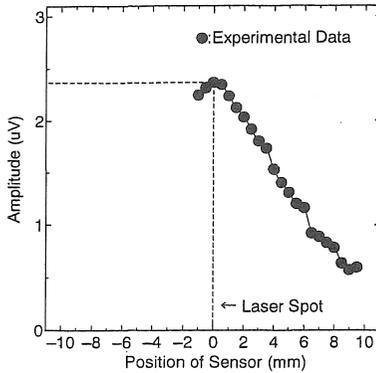


図 7 センサ位置特性

4・4 センサ別伝搬特性

空中超音波センサと試料の間隔を拡げていき、センサの大きさによる光音響信号の変化を調べた。測定結果を図 8 に示す。空中超音波センサは直径 10mm の小型センサと直径 16mm の大型センサの 2 種類のセンサについて調べた。

センサの大きさの違いによって光音響信号の振幅に差が生じていることが分かる。これは大型のセンサが広範囲に光音響信号を検出しているためである。また、それぞれのセンサに依らず、光音響信号の定在波の周期は同一であるため、センサの違いによる光音響信号の定在波への影響はない。

この結果から光音響信号の拡がり程度の大きさを持つ空中超音波センサが光音響信号の検出に有利であると言える。しかし、本研究装置では大型センサを使用した場合にはレーザー光がセンサによって遮られてしまうため、伝搬過程のピーク位置に設定できない。結果として、小型センサを使用し、伝搬過程の第 1 ピーク位置に設置した方が大きな光音響信号を得られることが分かった。

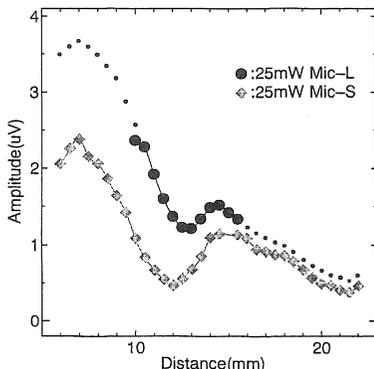


図 8 センサ別伝搬特性

4・5 変調周波数特性

半導体レーザーの変調周波数を変化させたときの光音響信号について調べた。変調周波数は 40kHz と 200kHz であり、測定結果を図 9 に示す。

発生する光音響信号の周波数はレーザー光の変調周波数と同一である。このため、変調周波数を変化させることによって定在波の周期が変化することが測定結果から分かる。また、同じ試料-センサ間距離であっても 200kHz 変調の方が 40kHz 変調に比べ光音響信号の振幅が小さくなっている。

40kHz と 200kHz の超音波の波長はそれぞれ 8.25mm と 1.65mm であり、測定結果の波長とほぼ一致する。また、一般に超音波は周波数の増加に伴い、空気中の減衰が大きくなる性質を持っているため、測定結果はそれを示していると考えられる。

200kHz の光音響信号は 40kHz の伝搬の様子や位相変化から図 9 の点線で示すような値を取ることが予想できる。しかし、使用した 200kHz のセンサは直径が 18.7mm であるため、現在の実験装置ではレーザー光を遮ってしまい、試料-センサ間距離を 12.5mm 以下に近づける事は困難であるため、予想される伝搬過程のピーク位置にセンサを設置することができない。

超音波診断において超音波の周波数を上げることは空間的な分解能の向上につながる。このため、光音響信号の変調周波数を高くすると、欠陥検出の空間的な分解能が向上すると考えられる。しかし、本システムにおいては 40kHz の変調周波数を用いた方が 200kHz 変調に比べ 2 倍以上大きな光音響信号の振幅を得る事ができる。この結果から変調周波数は 40kHz に設定したが、この点に関しては今後、様々な周波数について測定する必要がある。

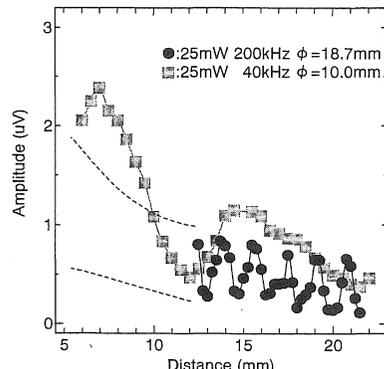


図 9 変調周波数特性

4・6 ミラー反射型レーザ照射

大型の空中超音波センサや 200kHz の空中超音波センサを使用する場合は、光音響信号の伝搬過程における第 1 ピークの位置に空中超音波センサを設置する必要がある。そのため試料と空中超音波センサの間隔を縮める必要がある。ミラーを使用してレーザ照射を照射 (図 10) する方法によって、試料と空中超音波センサの距離を縮め、光音響信号を測定した。測定結果を図 11 に示す。

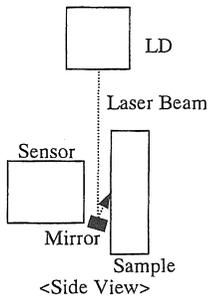


図 10 ミラー反射

測定結果から、4・4 の伝搬特性と比べ、光音響信号の定在波が大きく乱れていることが分かる。

光音響信号は音波であるため、音源である試料と検出器である空中超音波センサの間にミラーが存在する場合は、ミラーによって光音響信号に複雑な反射が起きると考えられる。このため、光音響信号の定在波が乱れる原因となったと言える。

この状態では正確に光音響信号を測定することができないため、ミラーを用いてレーザ光を試料に照射する方法では、試料とセンサの間隔を縮める適切な方法ではないと言える。

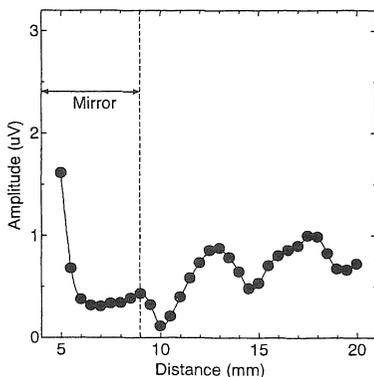


図 11 ミラー反射型伝搬特性

4・7 2 欠陥検出結果

本研究の結果から得られた配置により 2 つの欠陥を持つ試料を測定した結果を図 12 に示す。●は欠陥試料を測定した結果、○は無欠陥試料を測定した結果である。

測定試料は厚さ 3.0mm のアルミ板を用い、試料中央部に欠陥の代用として直径 1.8mm の穴が 2 つ開いている。この穴は試料上部から開けているためレーザ照射面は均一であり、欠陥による影響はない。

図 12 から試料内部に欠陥が存在するところでは光音響信号が大きく変化しており、この変化分は光音響信号の変動分に比べ明らかに大きく、欠陥による増加分であると言える。また、信号の変化分の中心は欠陥の中心に等しい事が確認でき、欠陥による信号の増加分の半値幅は欠陥のレーザ光走査方向に対する大きさに等しいことが分かる。光音響信号の変化から試料内部の欠陥の有無、欠陥のレーザ光走査方向に対する大きさが測定できる。

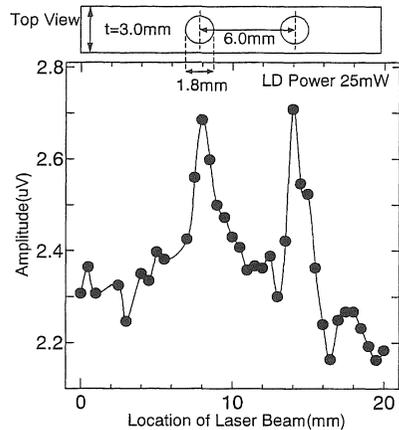


図 12 2 欠陥検出結果

4・8 密封型欠陥検出結果

実際の内部欠陥は試料内部に完全に隠れている。このため、完全に内部に隠れた欠陥の検出を行った。

完全に内部に隠れた欠陥は図 13 に示すように幅 6.5mm 高さ 10mm の穴の開いた試料を、穴のない試料によって貼り合わせることによって作成した。試料を貼り合わせた場合は境界面において、光音響信号の反射などを考慮しなければならないが、測定試料が密着していれば張り合わせによる影響はないことを実験により確認した。

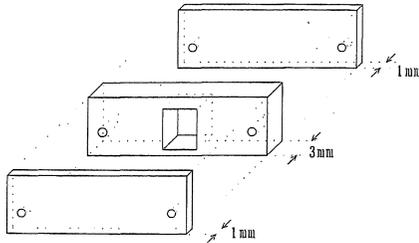


図 13 張り合わせ試料

張り合わせ試料による密封型試料の測定結果を図 14 に示す。図より完全に内部に隠れた欠陥であっても測定可能であることが分かる。欠陥の大きさも光音響信号の増加分の半値幅から 6.5mm と読みとることができ、4・7 の結果と同精度である。

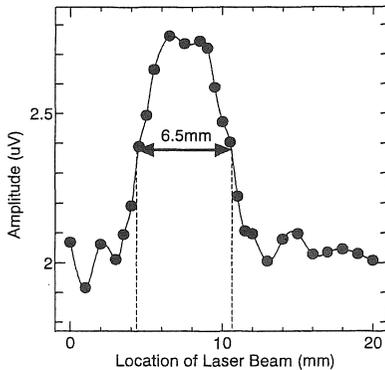


図 14 密封型欠陥検出結果

5. 総括

本研究では半導体レーザーによる光音響効果を利用して、非破壊・非接触による物体の内部診断をするシステムの試作と本測定システムにおける最適な欠陥検出条件を求めた。本研究の測定結果から光音響信号は光源である半導体レーザーの出力に比例して大きくなることが分かった。これはレーザー光エネルギーが大きくなるためであり、予測通りの結果であると言える。また正弦波変調に比べ、方形波変調の方が大きな光音響信号が得られることも分かった。しかし、半導体レーザーの出力が 25mW 以降では光音響信号が飽和する傾向が見られた。これはさらに出力を増加させ測定する必要があると言える。

また、実験装置の設定条件としては空中超音波センサの設置角度、及びレーザー光照射角度は試料正面、空中超音波センサは光音響信号の広がり程度の大き

さのものが最適であることが分かった。しかし、実験装置の構造上、全ての条件を満たすことはできず、本研究システムにおいて、より大きな光音響信号が得られる設定とし、欠陥検出を行った。

欠陥検出においては、他の超音波診断法に比べ低い周波数で高分解能が得ることができた。これは、レーザー光を集光し光音響信号の発生源を限りなく点に近づけていることや本研究において最適な条件を求めた事によるものである。また、完全に内部に隠れた欠陥の検出にも成功した。

今後の課題として、より小さな欠陥を実際に検出すること、また、測定のスPEEDアップ、測定の二次元化などが考えられる。

測定時間は現在 20mm の一次元走査で 7 分程度要している。本研究では市販のロックインアンプを使用しているため多くの時間が必要となっている。これは専用の測定回路を製作することによって解決できると考えられる。しかし、光音響信号の振幅は数 μV 程度であるため、回路設計には困難が予想される。

また、二次元化にはスキャンを行うモータのノイズによる光音響信号への影響を考慮しなければならない。

参考文献

- (1) 日本機械学会、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) 山田悦生、津田紀生、山田諄、愛知工業大学研究報告 No.33(1998)
- (4) 田中康夫、井澤靖和、レーザー超音波による材料中の内部欠陥の非接触検出、レーザー学会学術講演会第 20 回年次大会講演予稿集、21aV14,2000
- (5) 岩佐信一、森啓、鈴木薫、中田順治、レーザー誘起熱弾性振動による金属疲労の検出、レーザー学会学術講演会第 20 回年次大会講演予稿集、21aV16,2000

(受理 平成 12 年 3 月 18 日)