

光音響効果を用いた内部欠陥検出の自動化に関する研究

Study on automation of internal defect detection by photoacoustic effect

大江貴之[†], 名和靖彦^{††}, 津田紀生^{†††}, 山田諄^{†††}

Takayuki Oe, Yasuhiko Nawa, Norio Tsuda, Jun Yamada

Abstract : A non-contact and non destructive internal defect could be detected by a low power semiconductor laser and a ultrasonic sensor using a photoacoustic effect. But the sensitivity of the ultrasonic sensor is low for detecting the photoacoustic signal. To detect the photoacoustic signal, a self-coupling effect of another semiconductor laser was used. The self-coupling sensor has high spatial resolution in comparison with the ultrasonic sensor. It takes a lot of time to detect detail defect profile manually. Then an automatic of internal defect detection by photoacoustic effect has been studied, in which X-Y auto stage and oscilloscope are connected to personal computer. It is found that by automatic measurement in defect detection the detective sensitivity becomes to be high and the processing time becomes to be short.

1. はじめに

工業製品の品質化や不良率の減少が望まれている現代では、材料内部の欠陥をあらかじめ知る必要がある。内部欠陥を調べるのに最も確実なのは切断してみる方法であるが、この方法では全品検査ができない。したがって、現在は内部欠陥検出法として超音波探傷法や放射線透過試験法といった非破壊試験法が用いられている¹⁾。しかし、非破壊試験法は全数検査ができない問題点がある。超音波探傷法は、試験材に探触子を当てるため接触式であり、空間分解能もそれ程高くはない。一方、放射線透過試験法では、非破壊・非接触で測定ができ、空間分解能も高いが、高エネルギーの X 線や γ 線を用いるため、人体に害を及ぼす。それを防ぐために、装置が大型で高価になる。

本研究は、小型の半導体レーザー(LD)を用いて光音響効果²⁾により試料の内部欠陥を検出することを試みた。従

来は空中超音波センサを用いていたが、別の LD の自己結合効果³⁾を用いた微小振動センサを用いることにより試料表面の振動を直接観測でき、現在までに、自己結合型微小振動センサは、数 nm 程度の微小振動を検出できることが分かっている⁴⁾。自己結合型微小振動センサを用いると、空中超音波センサと比べ検出感度が 2 倍以上良く、空間分解能が高いため、検出感度が向上した。しかし、空間分解能の向上に伴い、測定間隔が細かくなったため、検出時間は増加した。そこで、本システムをパソコンで制御し自動化することにより、自動測定システムを構築し、検出感度の更なる向上と測定時間の短縮化を目指した。その結果、従来に比べ検出感度がさらに向上し、検出時間も大幅に短縮することができた。

2. 検出原理

2.1 光音響効果

光音響効果の原理を説明するための模式図を図 1 に示す。物質にレーザー光を照射したとき、吸収された光エネルギーは、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なる。物質に周期的な断続光を照射すると、物質表面で光エネルギーの吸収が起こり、表面の温度が局部的に上昇・下降を繰り返

† 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)
† † 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気・材料工学専攻 (豊田市)
† † † 愛知工業大学 工学部 電気学科
電子工学専攻 (豊田市)

す。これにより、物質表面がわずかながら膨張と収縮を繰り返し、物質の外部に起こる表面波と内部に圧力として伝わる内面波の 2 つの波が発生する。この音響的反応は、物質に照射される光の断続周波数に等しい周波数の縦波として伝搬する。この現象を光音響効果と呼ぶ。

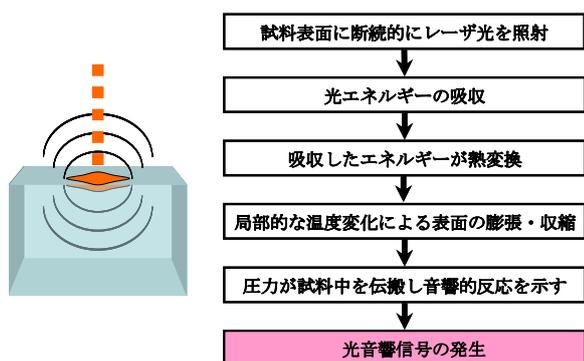


図 1. 光音響効果の原理

2.2 内部欠陥検出

光音響効果を用いて内部欠陥を検出する原理図を図 2 に示す。ある周波数で変調されたレーザー光を試料表面に照射した時、非欠陥部では、試料表面から内部に向かって伝搬した光音響信号は、試料裏面の媒質境界面で空気と金属の音響インピーダンスの違いにより、ほぼ全反射する。反射した光音響信号は試料表面で検出される。欠陥部では試料内部にある空気の気泡等が欠陥であるため音響インピーダンスの違いにより、内部方向に伝搬する光音響信号は、欠陥前面でほぼ全反射し、試料表面で検出される。しかし、非欠陥部において光音響信号は試料裏面で反射するため、試料表面に近い位置にある欠陥前面で反射する欠陥部と比べると、光音響信号の伝搬距離が長いので減衰が大きい。このことから、光音響信号は非欠陥部と比べ欠陥部の方が大きくなる。

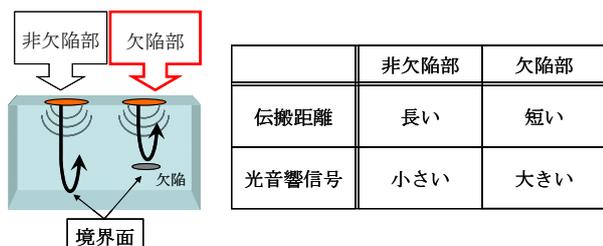


図 2. 内部欠陥検出の原理

2.3 自己結合効果

自己結合型微小振動センサに用いられている自己結

合効果の原理について説明する。LD は外部共振器を使用せず、半導体結晶の劈開面を共振器として用いている。劈開面における光の反射率は約 3 割程度と低く透過率が高い。そのため LD の出力光が反射面(試料)に当たると散乱し、散乱光の一部が劈開面を透過して活性領域に戻りやすくなる。戻り光と LD の出力光が活性領域内で干渉して、光出力がわずかに増減する。

光出力が最も増加するのは、LD の出射面と反射面との距離 L とレーザーの発振波長 λ との関係から、式(1)の共振条件により決定される。 n は定在波数(整数)である。

$$L = n \times \frac{\lambda}{2} \dots \dots \dots (1)$$

この光出力がわずかに増減する現象を自己結合効果という。この現象は、これまで各種の応用技術に影響を及ぼす雑音(戻り光ノイズ)として取り除こうとされてきたが、本研究では、光音響効果と併せてこの自己結合効果を積極的に利用している。

3. 自動計測

3.1 測定システム

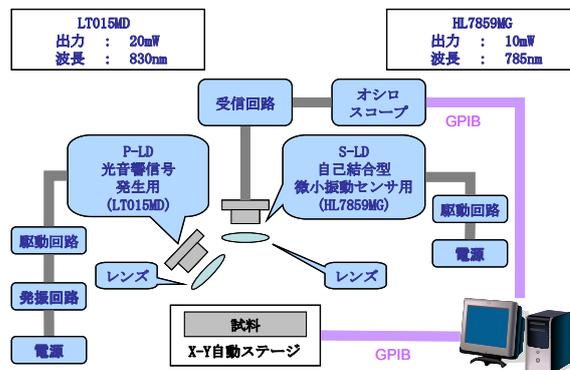


図 3. 測定システム

本研究に用いた測定システムの概略図を図 3 に示す。本システムでは、2 つの LD を使用するため説明上、光音響発生用の LD を P-LD(Photoacoustic LD)、自己結合型微小振動センサ用の LD を S-LD(Self-Coupled LD)とする。まず、発振回路で任意の周波数の方形波を発振させる。その後、駆動回路を通して、P-LD として、波長 830nm の SHARP 製 LT015MD を出力 20mW で駆動させる。その LD 光を直径 10mm、焦点距離 20mm のレンズで 50 mm 先に集光させ、試料に対して斜め 45 度の位置から照射させ、光音響効果を生じさせる。レーザー光の試料表面におけるス

ポット径をナイフエッジ法により測定したところ、約 0.1mm であった。一方、S-LD として、波長 780nm の HITACHI 製 HL7859MG を出力 10mW で連続発振させ、直径 10mm、焦点距離 10mm のレンズで 20 mm 先に集光させて試料に対して垂直に照射させる。これらの光を試料表面上で一点に照射することにより、自己結合効果を起こし、測定用の S-LD に内蔵の PD で光音響信号を検出し、受信回路において、I-V 変換回路で電流を電圧に変換後、増幅し、オシロスコープで測定した。試料は X-Y 自動ステージ(シグマ光機株式会社:MINI-5P)に固定してあり正面から横方向に 20mm、1 次元走査させる。パソコンとオシロスコープ、X-Y ステージコントローラを GPIB ケーブルで接続し、全てパソコン上で内部欠陥検出測定ができるように構成した。

本システムは、測定装置の振動による測定精度低下が考えられるため、装置を一体化させ、振動を抑える設計にして自動化した。一体化させた図 4 に示す。振動に強くするために厚さ 1cm のアルミ板の上に、全てのステージを固定して一体化とした。試料を固定しているステージは、X-Y 自動ステージが固定してある。光音響信号発生用の LD が固定してあるステージは、高さ調節用の Z ステージとその上に、照射角度を調整できる回転ステージが固定してある。自己結合型微小振動センサ用のステージは X-Y 手動ステージが固定してある。P-LD と試料との焦点距離を調整した後に、S-LD と試料の焦点距離を調整する。そして、最後に P-LD と S-LD を試料表面上の一点に照射することにより自己結合効果を起こし、欠陥検出が可能となる。

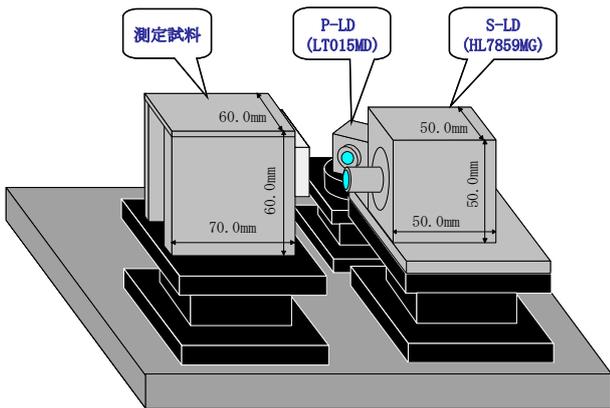


図 4. 測定システムの拡大図

3.2 測定回路

P-LD は電流を流す事で発振をさせることができるが、LD の光出力を一定に保つため、LD 駆動回路を用いて発振させた。P-LD 駆動回路には駆動専用の IC (IR3C02) を用いて回路を構成した。P-LD の光出力は 20mW になるようにした。発振回路は MAXIM 社の MAX038 を使用したファンク

ションジェネレータキットを使用した。この回路は、0.1Hz~20MHz の矩形波を出力することが可能である。トランジスタによりレーザの駆動電流を吸取ることにより変調をかけている。

S-LD 駆動回路は、定電圧回路と定電流回路により構成されている。電源と定電流回路の間に定電圧源として、ツェナーダイオードとトランジスタを用いることにより一定電圧を取り出している。これは電源電圧の変動による影響を除くためである。LD 駆動回路の定出力電流は、可変抵抗により調整ができるようにした。

本研究では試料内部の欠陥を検出するのにレーザの戻り光を利用するため、無変調発振による直流成分のみで使用した。S-LD の出力光は 10mW としている。

S-LD に内蔵のフォトダイオード (PD) で受信した光音響信号は、電流信号から電圧信号に変換する。この I-V 変換回路は、入力容量による位相遅れのために回路が発振しやすくなる。そのため、発振を止める方法として帰還抵抗と並列にコンデンサを入れた。I-V 変換回路は、OP アンプの入力端子が外部にさらされることになるが、入力端子には保護回路がないと不安がある。誤って電圧が加わったり、サージが入ったりすると OP アンプを壊してしまうこともある。このようなときのために、保護回路を用いた。光音響信号は小さいため、保護回路はダイオードの代わりに JFET をダイオード接続して用いた、JFET をダイオード接続して用いるには、ソースとドレインを単につなぐだけであり、非常に容易である。この I-V 変換回路の後に OP アンプによる 100 倍の増幅回路を接続した。

3.3 測定試料

測定に用いた試料は、縦 30 mm、横 60 mm、厚さ 3 mm のアルミ板に $\phi 1.8$ mm の円柱形の穴を試料上部より垂直に明け、擬似欠陥とした試料 A (図 5) と、縦 30 mm、横 60 mm、厚さ 1 mm のアルミ板を 3 枚密着させ、厚さ 3 mm として、中央のアルミ板をスライドさせることにより、任意の幅の擬似欠陥の大きさに変更できる試料 B (図 6) の 2 種類を用意した。

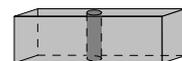


図 5. 試料 A (擬似欠陥 $\phi 1.8$ mm)

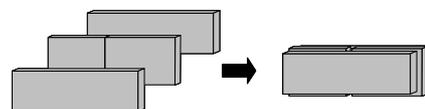


図 6. 試料 B (擬似欠陥 0.07 mm)

3・4 測定システム

制御プログラムとして、Microsoft Visual Basic を用いた。操作画面とフローチャートを図 7 に示す。操作画面上で、オート、マニュアルのいずれかを選択する。基本的には、オート設定で、測定間隔を設定し、測定ボタンをクリックすることにより動作する。このプログラムの流れをフローチャートに示す。自動測定のコマンドが実行されると、X-Y 自動ステージは初期位置へ移動し初期化される。その後、選択した間隔分だけステージが移動し、オシロスコープにより光音響信号を測定する。このとき、光音響信号は連続で 12 回測定し、その最大値と最小値を取り除いた 10 個のデータをパソコンに転送する。このプログラムは、ステージが 20mm の位置に達するまで繰り返され、20 mm に達した時点で終了する。20 mm と設定したのは、X-Y 自動ステージが 20 mm までしか移動できないからである。転送されるデータは、CSV 形式のファイルとして出力される。このデータをマクロ機能によって、Excel で自動的にグラフを作成する。

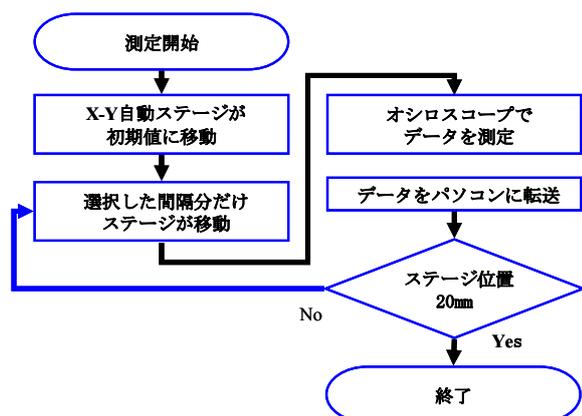


図 7. 測定走査画面とフローチャート

3・4 手動測定と自動測定の比較

本システムを自動化したことにより、従来の手動測定欠陥と自動測定結果を比較する。手動測定結果を図 8 に、自動測定結果を図 9 に示す。

測定試料は、試料 A を用いた。自動測定の光音響信号

値が手動測定時に比べて大きな値になっているのは、受信回路の後に 100 倍の増幅回路を用いているためである。その点を考慮して比較する。

自動化したことにより、装置周辺を無人化することができ安定した測定が可能となった。これまでの測定方法では、非欠陥部の信号平均値に対して欠陥部の最大信号値は 1.97 倍であったのに対し、自動化したことにより 3.84 倍の値となり、より欠陥が顕著に現れるようになった。これは、細かい測定ができるため、欠陥部のピーク値を確実に得ることができたことと、装置を無人化することにより、振動を取り除けたからである。また、信号値を直接入力する必要もなくなったので、入力ミスもなくなり、より正確な測定が可能となった。手動測定と自動測定の主な結果を表 1 に示す。測定時間も、従来の 30% の時間で、測定の処理も従来の 3% の時間で可能となった。トータル時間も従来の 24% の時間でできるようになり、大幅な時間短縮と精度向上を実現できた。

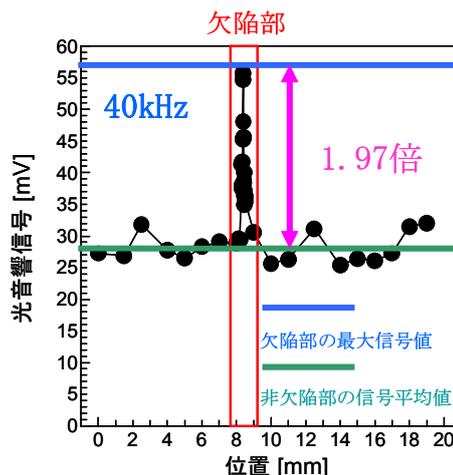


図 8. 手動測定結果

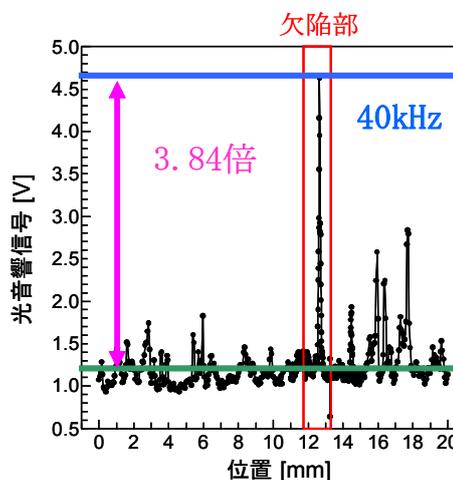


図 9. 自動測定結果

表.1 手動測定と自動測定の比較

	手動測定	自動測定
欠陥部の最大信号値	55.7mV	4.63V
非欠陥部の平均信号値	28.2mV	1.21V
倍率	1.97倍	3.84倍
測定時間比率	1	0.30
処理時間比率	1	0.03
トータル時間比率	1	0.24

3.5 周波数特性

自己結合型微小振動センサは周波数を制限するものがないので内部欠陥の周波数特性を測定した。欠陥を測定する前に、測定回路の周波数特性を調べた。図 10 に示したように測定回路は、10Hz から約 200kHz までは平坦な周波数特性で、200kHz を超えると利得が減少し、3 dB 遮

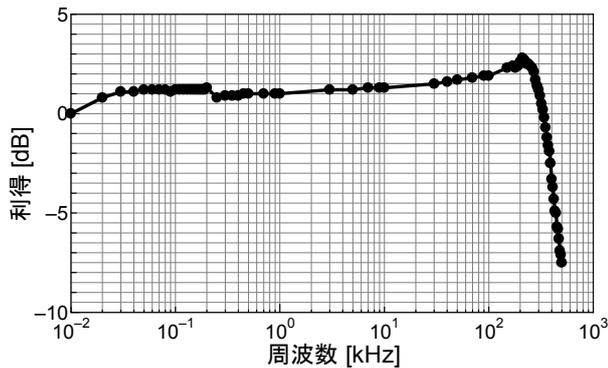


図 10. 回路の周波数特性

断周波数は 350kHz であった。この測定可能な周波数において、光音響信号が周波数に対してどのように影響するのかを検討した。測定方法は、以下の式より算出した。

$$\text{光音響信号} = 20\log\left(\frac{\text{各周波数における光音響信号}}{10\text{Hzでの非欠陥部における出力電圧}}\right) \cdot (2)$$

式(2)に示したように、欠陥箇所と非欠陥箇所の 2 箇所の光音響信号を測定し、10 Hz の非欠陥部における出力電圧で割ることにより、光音響信号の各周波数における変化を検討した。その結果を図 11 に示す。200kHz 付近までは、欠陥部、非欠陥部のどちらも、光音響信号に変化は見られないがそれ以降小さくなった。欠陥部と非欠陥部を比較すると、どちらも同様な周波数特性を示したが、欠陥部のほうが約 5[dB]大きくなっている。よって、測定可能範囲であれば、どの周波数においても欠陥検出が可能であることが言える。200kHz 以上でも 350kHz 付近までは測定可能であるが、光音響信号が小さくなり、

S/Nが悪くなる。これは、測定回路の周波数特性が 350kHz までしかないためである。

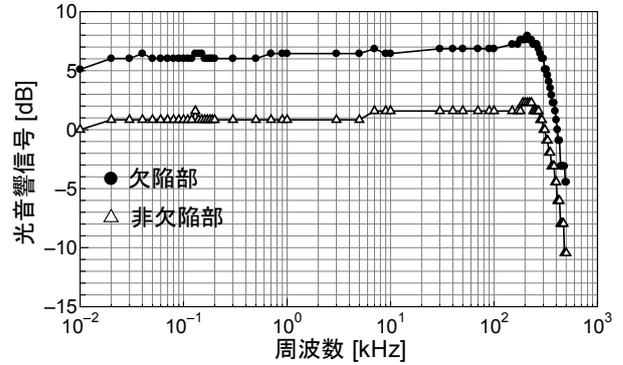


図 11. 光音響信号の周波数特性

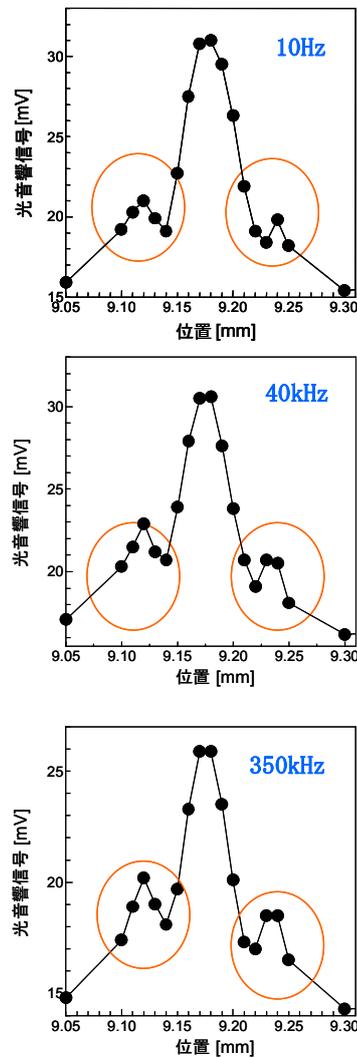


図 12. 欠陥検出結果

欠陥部の幅が 0.07 mm の試料 B を用いて、10Hz から 350kHz の各周波数において測定した結果を図 12 に示す。

10Hz から 350kHz において、どの周波数においても 0.07 mm という非常に小さな欠陥でも検出が可能であり図 12 の円で示したようにエッジ効果が現れた。欠陥部の大きさは測定間隔 0.01 mm 以内の精度で測定できる。このことから、エッジのはっきりした欠陥では、欠陥の大きさを正確に測定することができるといえる。

4. エッジ効果

図 13 は①非欠陥部、②エッジ付近、③欠陥部のそれぞれに P-LD 光を当てたときの試料内部に伝搬する音響波を表している。表 2 は、反射面の場所、伝搬距離の長短、光音響信号の大小を表している。

① 非欠陥部

試料内部の振動は試料裏面まで伝搬し反射した後に戻ってくるため、伝搬距離が長く、その結果、光音響信号が小さくなる。

② エッジ付近

P-LD の照射位置を欠陥部より少し遠ざけると、欠陥部の側面からの反射波も得られるため光音響信号が少し大きくなる。一方、欠陥箇所のエッジ部分で照射された P-LD 光による光音響信号は、試料内部を伝搬していくが、欠陥箇所のエッジ側面からの反射がないため、反射してくる信号も弱く、光音響信号は小さくなると思われる。

③ 欠陥部

試料内部の振動は欠陥部の境界面で反射した後に戻ってくるため、伝搬距離が一番短く、その結果、光音響信号も最大となる。

以上より、エッジのはっきりした欠陥に限り、エッジ

効果により欠陥の大きさを正確に測定できると言える。

5. まとめ

半導体レーザーの光音響効果を用いて金属試料内部の欠陥を非破壊・非接触で検出する時、自己結合型微小信号振動センサを用いて高分解能で自動検出できる小型のセンサシステムを試作し、従来の手動測定の結果と比較し検証した。

測定システムを自動化したことにより、装置周辺を無人化することができ安定した測定が可能となった。これまでの測定方法では、非欠陥部の信号平均値に対して欠陥部の最大信号値は 1.97 倍であったのに対し、自動化したことにより 3.84 倍の値となり、より欠陥が顕著に現れるようになった。また、データ処理に関して、信号値を直接入力する必要もなくなったので、入力ミスも無くなり、より正確な測定が可能となった。測定時間も、従来の 30%の時間で、測定の処理も従来の 3%の時間で可能となった。トータル時間も従来の 24%の時間でできるようになり、大幅な時間短縮と精度向上を実現できた。

自己結合型微小振動センサは、騒音に強く分解能も高いため、より小さな欠陥検出が可能であり、欠陥検出に優れていることが分かった。欠陥部断面が矩形の場合は、0.07 mm という非常に小さな欠陥を検出することができた。さらにエッジがはっきりしているとエッジ効果により、欠陥部の大きさを正確に測定することができた。以上より、半導体レーザーをそれぞれ光音響信号発生用と自己結合型微小振動センサを一体型の自動測定システムとして用いることにより小型でシリコンウェハなどの非常に小さな内部欠陥を検出するセンサシステムが可能である。このシステムは、非破壊・非接触・高分解能であり、全数検査が出来る優れたシステムであると言える。

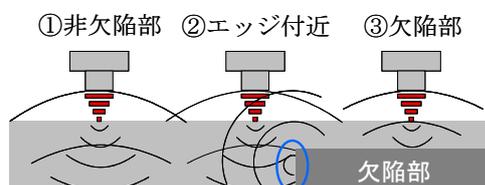


図 13. エッジ効果

表 2. エッジ効果の比較

	①非欠陥部	②エッジ付近	③欠陥部
反射面	試料裏面	試料裏面 + エッジ面 (側面)	欠陥部との境界面
伝搬距離	長い	中	短い
光音響信号	小	中	大

文 献

- 1) 日本非破壊検査協会編：「非破壊検査便覧」，(日刊工業新聞社, 1978.4)
- 2) 山田悦生・山田諄・津田紀生・古橋秀夫・内田悦行 共著：「半導体レーザー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 C, Vol.119-C, No.1 pp.15-20 (平成 11 年 1 月)
- 3) 坂本明紀・津田紀生・山田諄 共著：「面発光レーザーを用いた自己結合型距離計の特性」，電気学会論文誌 C, Vol.126-C, No.12, pp.1454-1459 (平成 18 年 12 月)
- 4) Y.Nawa, N.Tsuda, J.Yamada: "Study on Small Vibration Sensor by Self-Coupling of Semiconductor Laser", The 6th Asia Pacific Laser Symposium, 30 Ea4 (2008).

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)