光音響法の円弧状表面欠陥検出への応用*

遠 藤 春 男^{*1}, 樋 渡 洋 一 郎^{*1}, 星 宮 務^{*2}Application of Photoacoustic Method to Detection
of Arc-Shaped Surface Defect

Haruo ENDO, Yoichiro HIWATASHI and Tsutomu HOSHIMIYA

The estimation of surface defect shape has been demonstrated by photoacoustic (PA) microscope using specimen with an artificially made surface defect. The shape of the defect introduced for measurement is arc with a number of aspect ratio. Furthermore, in order to establish PA signal dependence on defect depth, a simulated defect the depth of which is linearly increasing is fabricated on a metal plate by mechanical processing. The results show that imaging of defects by PA microscopy enable precise determination of both location of edges and configuration of the defect.

Key Words: Photoacoustic Microscope, Nondestructive Inspection, Optical Engineering, Optical Measurement, Photoacoustic Image, Arc-shaped Surface Defect, Defect Configuration

1. 結 言

一般構造物の破壊強度を確保するために、その構造物に発生するき裂や欠陥の検出、さらにそれらの位置、形状および寸法を精度よく測定することが大変重要視されている。物体中の複雑でさまざまな形状の欠陥を検出する非破壊検査には、X線法、超音波法等種々の測定方法の研究が実用上主流に行われている。近年、非破壊検査法として注目されている方法として、サーモグラフィ法⁽¹⁾や電気ポテンシャル法⁽²⁾があげられる。サーモグラフィ法は、物体表面中の欠陥等の位置等の検知には、より迅速で簡便ではあるが、表面欠陥の形状測定にはかなり困難であると思われる。一方電気ポテンシャル法はき裂や欠陥形状の測定および定量的測定に多く使用されている。しかし、この方法は表面き裂形状測定のために数点の電気ポテンシャル値を必要とし、き裂の表面長さの推定には実験値と境界要素法等の各種数値解析処理を行うことによって、その推定を行っている。

著者らは、欠陥検出の目的のために新たな非破壊検

査のツールとして光音響法を用いて、表面欠陥の光音響信号強度が表面の信号よりも強く生じることから、表面欠陥検出に対し、十分に有効であることを明らかにした。これまで、磁気ヘッド中の内部欠陥⁽³⁾、単一の表面矩形欠陥⁽⁴⁾および複合欠陥⁽⁵⁾の検出を行っている。その結果、磁気ヘッドにおいては約2 μmまでの分解能を達成しており、単一および複合欠陥においてもその検出は可能であり、接近している欠陥に対してもその欠陥端の位置特定ができることを報告している。

本報告では、光音響法を適用して表面欠陥形状の推定を目的として、アスペクト比が異なる数種類の円弧状欠陥を人工的に平板表面に作製した。その欠陥により生ずる光音響信号を検出し、それによる光音響信号の強さから欠陥形状の推定を試み、本方法の適用性について報告する。光音響法を適用した表面欠陥の測定ならびに形状の推定に関する報告は著者らの知る範囲ではほとんど見当たらない。

2. 光音響顕微鏡の原理

前報⁽⁴⁾で報告しているので、ここでは簡単に説明する。周期的に変調されたレーザ光をレンズ等の光学系で試料の表面の一部に収束させる。この光の照射によ

* 原稿受付 1997 年 3 月 3 日。

^{*1} 正員、東北学院大学工学部(〒985 多賀城市中央 1-13-1)。^{*2} 東北学院大学工学部。

り試料に取り込まれた光エネルギーの一部は試料内部に発熱を伴い、試料表面に、周期的な温度上昇が生じる。これにより試料表面に接している気体が暖められて温度境界層ができ、それが断熱的に膨張することにより、周囲気体に疎密波を発生させる。これをマイクロフォンで検出する。ここで、光音響顕微鏡を特徴づけるパラメータとして、熱拡散長 μ_{th} があり、

$$\mu_{th} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \rho C f}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。

ここで、 λ, ρ, C, f はそれぞれ試料の熱伝導率、密度、比熱、変調周波数である。熱拡散長は変調の一周期の間に発生した熱が、伝導によって試料中に拡散してゆく範囲を表している。

3. 実験装置

3.1 光音響セル 本実験で用いた光音響セルは密閉形音響セルである。これは前報⁽³⁾にて報告した放電加工による欠陥作製において、目的とする形状が的確に得られているかなどの問題点があるため、機械加工による正確な欠陥形状の作製を行った。試料の作製上、試験片を貼り合わせて作製するため前報で用いた準開放型セルでは、貼り合わせた面から気体が入り込むことが考えられる。このために、図1に示すようなセルを作製した。セル本体は黄銅で構成してある。本セルでは、試料表面測定室とマイクロフォン室をそれぞれ別々に設けた。両室は細長い溝を通してつながれている。レーザー光は図中のガラス窓を通して照

Fig. 1 Schematic diagram of the photoacoustic cell

Fig. 2 Specimen size and defect geometry

射され、測定部はOリングを用いることで密封されている。Oリングの内径は約50 mmで、試料室の深さは試験片の厚さと同じ10 mmである。試料室内の周囲気体に発生した疎密波は図中でハッチングにより示している細い溝を通して圧力を伝達し、高感度のコンデンサ・マイクロフォンにより信号を取り込んでいく。また、この細長い溝により、散乱光がマイクロフォンの振動板にあたらないように配慮してある。さらに、リークバルブはOリング内が密閉状態であるため、試料へのセルの取付けやマイクロフォンの取付けの際、内部の圧力が大きく変化してマイクロフォンを傷めるのを防ぐために設置してある。

3.2 試験片 試料にはアルミニウムの矩形板を用いた。その大きさは、 $40 \times 40 \times 10^{-3}$ mmである。正確な欠陥形状を作製するために、試料のほぼ中央部にスリット状の欠陥を機械加工により導入した。なお、試験片は $40 \times 20 \times 10^{-3}$ mmの2枚の試料を貼り合わせてある。本実験の目的のために各々のアスペクト比 a/c を変化させた。その値は $a/c = 0.19, 0.25, 0.31, 0.5, 0.63$ である。それらを図2に示す。さらに、光音響信号の欠陥深さ依存性を知るために、深さが直線的に増加する表面欠陥も作製した。作製した2種類の欠陥寸法は、表面長さと最大深さがそれぞれ、20 mmと4 mm、および15 mmと6 mmである。その形状を図3に示す。

Fig. 3 Cross sectional views of defects with linearly increasing depth

Fig. 4 Configuration of experimental system

3・3 試験装置 光音響顕微鏡は試料を局部的に加熱するためのレーザ光源と集光光学系、試料または光ビームを走査させるための機械系、光音響信号を検出・増幅し、画像として表示・記録するための電気系とコンピュータからなっている。図4に光音響顕微鏡の基本的構成の概略図を示す。励起用光源としてアルゴン・レーザを使用し、そのレーザ光はメカニカル・チョッパによって、一定周波数に変調される。光ビームの走査にはX-Yオプティカル・スキャナを用いた。一定周波数で変調されたビーム光は光学顕微鏡により絞られて、セル内の試料表面上に照射される。試料は光を吸収し、密閉された空間内で熱膨張によって発生した周期的な圧力変化がマイクロフォンにより検出され、ロックインアンプにより変調信号と同期検波されて光音響信号の振幅と位相差がコンピュータに取り込まれる。

4. 実験結果および考察

本実験に適用した、変調周波数 f は90, 180, 360 Hzである。さらに、円弧状表面欠陥部の測定位置は欠陥が軸対称形であることを考慮して、欠陥端部を含んで片側の欠陥最深部近傍までとした。オプティカル・スキャナによる測定範囲は約 5×5 mmで、測定

時間は約10分程度である。図5はアスペクト比 $a/c = 0.19$ で変調周波数 $f = 180$ Hzでの表面欠陥端部を含む得られた光音響像である。図の左側は試料表面にレーザビームを走査して得られた光音響信号の振幅を画像として表示したものである。一方右図は振幅像の走査線(図中の白線)の光音響信号強度を走査線的位置に対して表示したものである。また、光音響信号強度は図上部にカラーバーとして示してある。図5中央部に明るい(強い)光音響像が確認される。これが表面欠陥端部の光音響像であることが確認される。位置的に、表面欠陥部の深さは下側に行くほど深くなっている。図5(a)の振幅像において、周囲の信号強度よりも、欠陥部が高い信号強度を示していることから、明りょうに欠陥が識別できる。さらに、その信号の強度を示す色彩が欠陥深さの増加とともに変化しているのが視覚的に確認できる。また図5(a)からアスペクト比が小さいのにもかかわらず、おおよそであるが欠陥端部の位置確認も可能と思われる。図5(b-1, 2)はそれぞれ図5(a-1)中のA-A'およびB-B'線上の信号強度を示している。これらの図から、欠陥の深さが浅いところの位置(図b-1)におけるその信号強度の高さは欠陥深さの深いところの位置(b-2)に比べ低い信号が得られている。しかし、これらの図から、欠陥深さ

Fig. 5 Photoacoustic images for edge of arc-shaped defect [$a/c = 0.19$, $f = 180$ Hz, ordinate of Fig. (b-1), (b-2) and (b-3) are shown in arbitrary unit]

Fig. 6 Photoacoustic images for edge of arc-shaped defect [$a/c = 0.5$, $f = 90$ Hz, ordinate of Fig. (b-1), (b-2) and (b-3) are shown in arbitrary unit]

を反映した信号強度が示されているが、その欠陥深さの推移については明白に示されていない。そこで図(a-2)におけるC-C'線上の信号強度分布を示したのが図(b-3)である。信号強度は欠陥端部から深さの増加に伴い徐々に高くなり、多少の変動は見られるもののその信号分布の形状は定性的に円弧状欠陥の形状に近いものと思われる。次に、アスペクト比を大きくしたときの光音響像を示す。図6はアスペクト比 $a/c=0.5$ で変調周波数 $f=90$ Hz の光音響像である。図6においても欠陥の深さは下部に行くほど深くなっている。それぞれの図の配置は先ほどの図5と同様である。図6も同様に、欠陥の深さが浅い位置(図b-1)と欠陥深さの深いところの位置(b-2)より得られた信号強度にも欠陥深さを反映した信号強度が示されている。さらに、図6(b-3)から得られた信号強度分布の形状を見ると、アスペクト比が大きいため、その信号の立上りは急激であり、円弧状欠陥の深さを反映した形状を示していることがわかる。図6(b-3)から、欠陥端を特定することは先の図5よりも容易である。

図7, 8は変調周波数の変化による信号強度分布形状へ及ぼす影響を調べるために示した図である。図7はアスペクト比 $a/c=0.19$ で変調周波数 $f=90, 180,$

360 Hz における光音響像である。振幅像の図(a-1)から(a-3)を見てわかるように、変調周波数が大きくなるに従い、その画像は鮮明化してきている。これは式(1)より f の項が大きくなると熱拡散長 μ_{th} が小さくなるためである。それぞれの振幅像に対し、表面欠陥に沿って信号強度分布を取り出したのが図(b-1)から(b-3)である。信号強度分布に多少の変動は見られるものの欠陥端部から徐々に信号が強くなってきており、変調周波数が大きくなるに従いその信号がなめらかになってきていることがわかる。これらの図から変調周波数による信号強度分布の形状には影響はないものと思われる。図8はアスペクト比 $a/c=0.63$ で条件は先程の図7と同様に配置してある。図(b-1)から(b-3)より、アスペクト比 a/c の値が大きいため欠陥端における信号強度の立上りは急激であることが確認できる。このため欠陥端の特定は容易にできることがわかる。変調周波数による信号強度分布形状への影響を見ると、アスペクト比 a/c の大きな値に対しても図7と同様に信号強度分布形状には、影響がないことがわかる。上述より変調周波数の変化による信号強度分布の形状にはその影響がないことが示されたことにより、変調周波数を一定として、その信号強度分布がアスペ

Fig. 7 Photoacoustic images for edge of arc-shaped defect [$a/c=0.19$, ordinate of Fig. (b-1), (b-2) and (b-3) are shown in arbitrary unit]

Fig. 8 Photoacoustic images for edge of arc-shaped defect [$a/c=0.63$, ordinate of Fig. (b-1), (b-2) and (b-3) are shown in arbitrary unit]

クト比 a/c の違いを明確に示しているかどうかを見るために、変調周波数 $f=360$ Hz としてアスペクト比 $a/c=0.25, 0.31, 0.63$ における光音響像を図9に示す。振幅像の図(a-1)から(a-3)へとなるに従いアスペクト比 a/c の値が高くなっている。この振幅像から円弧状欠陥の深さの変化による光音響信号強度の違いが色彩の違いとして観察される。さらに、信号強度を確認するために、それぞれのアスペクト比を持つ欠陥の音響像に対し、その欠陥に沿って得られた信号強度分布の図を(b-1)から(b-3)に示す。これらよりアスペクト比 $a/c=0.25$ は緩やかな信号の立上りを示し、 $a/c=0.31$ から 0.63 と大きくなるに従いその信号強度分布は円弧状欠陥の形状の深さを反映して高くなっていることがわかる。これは、光音響に見られるエッジ効果⁽⁶⁾とレーザが欠陥内に侵入し、欠陥深さの変化に伴う欠陥内壁での光吸収の変化のためと考えられる。このことから、アスペクト比の異なる円弧状欠陥に対し、定性的にその信号強度分布はその表面欠陥の形状を示していることがわかる。さらに、図10は光音響信号の欠陥深さの依存性を知るために、欠陥の長さの増加とともにその深さが直線的に増加する表面欠

Fig.9 Photoacoustic images for edge of arc-shaped defect for each aspect ratio [$f=360$ Hz, ordinate of Fig. (b-1), (b-2) and (b-3) are shown in arbitrary unit]

陥の光音響像を示したものである。図10は欠陥全体の光音響像を得るために、4箇所ほどの領域を測定して、その像を組合せたものである。変調周波数は90 Hzで、欠陥の最大深さは4 mmである。振幅像の図10(a)において、欠陥に沿って得られた信号強度を図10(b)に示す。図10より、直線的に深さが増加している欠陥に対し得られた信号強度はその深さに依存して増加していることがわかった。また、本文中には示されていないが、欠陥の最大深さが6 mmの光音響信号は最大深さ4 mmに対し、その欠陥のこう配は大きな傾斜を有しているため、信号強度分布は最大深さ4 mmの欠陥の信号強度よりも大きなこう配で立上がり、直線的に深さに対応して増加した。このことから、表面欠陥の深さおよびその形状推定は可能であることが示される。なお、光音響信号と表面欠陥に関する理論的考察は既に報告しているので、本報では別報⁽⁷⁾に譲る。

5. 結 言

本研究は文献(7)の手法を用い、材料工学的に表面欠陥の形状を正確に測定するという観点からさらに詳細な検討を加えたもので、以下の結論を得た。

- (1) それぞれのアスペクト比における試料に対し欠陥深さの相違が光音響信号の空間分布の相違として確認できた。
- (2) 欠陥深さが表面欠陥長さに対して変化している欠陥の検出は可能であり、欠陥端の特定もできることがわかった。
- (3) 得られた信号強度分布より、アスペクト比を反映した欠陥の形状が確認できた。また、信号の画像

Fig.10 Photoacoustic signal variation along defect with linearly increasing depth [$f=90$ Hz, maximum depth=4 mm, ordinate of Fig. (b) is shown in arbitrary unit]

は変調周波数を上げるに従って先鋭化するが、信号分布形状は変調周波数に影響されないことがわかった。

(4) 欠陥長さに対し、直線的に深さが増加する欠陥の光音響像から、その信号強度はその深さに依存し正の相関を有することがわかった。

本研究の遂行において、東北学院大学工学部学生の向井君、菅原君、大友君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば、阪上隆英・小倉敬二・山中秀介, 機論, 59-565, A

(1993), 2155-2162.

- (2) 例えば, 大路清嗣・久保司郎・ほか2名, 材料, 35-395 (1986), 942-947.

- (3) Hoshimiya, T., Ohta, M. and Kojima, M. (Bicanic, D. 編), *Photoacoustic and Photothermal Phenomena* III, (1992), 553, Springer Verlag, Heidelberg.

- (4) 遠藤春男・樋渡洋一郎・星宮 務, 機論, 62-596, A (1996), 1111-1116.

- (5) 遠藤春男・樋渡洋一郎・星宮 務, 機論, 63-608, A (1997), 870-876.

- (6) Hangyo, M., Nakashima, Sh., ほか2名, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 25 (1986), 376-379.

- (7) Hoshimiya, T., Endo, H. and Hiwatashi, Y., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35, Part 1, No. 5B (1996), 2916-2920.