

金属の表面および内部欠陥の光音響 影像信号の測定

小林 武・高畠 信也・向當 庸一・河野 裕

Photoacoustic imaging of surface and
subsurface defects in a metal

Takeshi KOBAYASHI, Nobuya TAKABATAKE, Youich KOUTOU
and Yutaka KOUNO

Abstract

Photoacoustic imaging of surface and subsurface defects in a metal is performed by means of piezoelectric detection scheme. Magnitude and phase images are presented.

1. は し が き

光音響効果は物質の光学および熱的特性の情報を与えるので、気体、液体、あるいは固体の分光学的研究に用いられている¹⁾。この効果の重要な応用の一つに固体の内部にある構造欠陥や異質物に関する非破壊検査法がある。強度変調された光ビームを試料の表面にあてて試料を周期的に加熱すると、変調周波数に同期した音響波ならびに熱波が生ずる。このような音響波や熱波、あるいは両者と試料内の異質物との相互作用を検出して異質物の影像を得る方法が光音響影像法²⁾である。特に熱波との相互作用を利用するものは熱波影像法³⁾といわれる。熱波は強い減衰特性をもつ熱エネルギーの伝搬波である。その進入の深さを与える熱拡散長以内の距離に熱的異質物があれば熱波は散乱され、試料の表面温度や光音響波に変化を与える。それ故、試料表面を鋭い光ビームで二次元掃引し、その結果生ずる表面温度、あるいは光音響信号の変化を検出することにより、異質物の影像を得ることができる。このような熱波影像法は Rosencwaig によって示され⁴⁾、金属⁵⁾やセラミック⁶⁾の試料について、表面下の物質構造の影像の測定が報告されている。熱波影像法の特徴は、熱拡散長は変調周波数の平方根に反比例し

て変化するので、影像の深さ方向の情報と得ることができることである。

熱波影像信号は試料の表面温度をガスマイクロホン、光プローブ、あるいは赤外線検出器を用いて測定する方法か、または圧電変換器を用いて試料内部を伝搬する音響波を検出する方法で得ることができる⁷⁾。音響波検出方式で得られる影像信号は試料の熱特性に加えて弾性特性も関係するので、表面温度測定方式に比べて信号解析がむずかしい。しかしながら、音響波検出方式は他の方式に比べて、(1) 圧電変換器を試料に密着させるだけで簡単に信号検出ができる、(2) 高い光変調周波数を用いる微細構造の影像の測定に適する、などの長所を有する。

本論文は圧電検出器を用いた音響波検出方式によりアルミニウム (Al) 試料の表面および内部欠陥の影像信号を測定した結果の報告である。内部欠陥として、試料の材質 (Al) と熱および弾性特性の著しく異なる空気の場合と、熱特性は異なるが弾性特性の差異が小さい鉛の場合の影像信号との比較を行った。

2. 測 定 原 理

強度変調した光ビームを試料の表面に照射するとき生ずる熱波は伝搬定数が $(1+i)/\mu$ である減衰波である。定数 μ は熱拡散長といわれ、次式で表わされる。

$$\mu = \left(\frac{2\kappa}{\omega\rho c} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 ω : 変調角周波数、 ρ : 密度、 c : 比熱、 κ : 熱伝導率、である。試料の内部にこの熱拡散長程度の範囲に局部的な熱的異質物があれば、熱波は散乱される。熱波と異質物との相互作用の情報は試料の温度ならびに励起される音響波に含まれているので、これらを異質物の影像信号として利用できる。

Opsal と Rosencwaig は弾性的には等質であるが、熱的特性の異なる n 層一次元モデルについて、熱的不連続による熱波の反射の結果生ずる表面温度ならびに試料内を伝搬する音響波の解析を行っている⁸⁾。音響波においては、第2層目以後の物質の熱的情報は試料表面が自由条件を満す場合に得られ、固定条件では得られないことを示した。

Fig. 1 のような熱伝導率 κ_1 , κ_2 の二層系における音響波 ϕ_{inh} と二層が等質 ($\kappa_1 = \kappa_2$) の場合の音響波 ϕ_h の比は次のように与えられる (ref (8) 式 (25))。

$$\frac{\phi_{inh}}{\phi_h} = \frac{z_1}{z_1^{in}} + \left(\frac{z_2^2 - z_1^2}{z_1 z_2} \right) \left(\frac{1 + \tanh(1+i) \frac{d}{\mu_1}}{1 + \frac{z_1}{z_2} \tanh(1+i) \frac{d}{\mu_1}} \right) e^{-(1+i) \frac{d}{\mu_1}} \quad (2)$$

ここで、 $\mu_{1,2}$: 第1, 2層の熱拡散長、 d : 第一層の厚さ

$$z_{1,2} = (1+i) \frac{\kappa_{1,2}}{\mu_{1,2}} \quad (3)$$

$$z_1^{in} = z_1 \frac{z_2 + z_1 \tanh(1+i) \frac{d}{\mu_1}}{z_1 + z_2 \tanh(1+i) \frac{d}{\mu_1}} \quad (4)$$

である。 $z_{1,2}$ は第1, 第2層それぞれの熱波特性インピーダンス、 z_1^{in} は第1層からみた熱波入力インピー

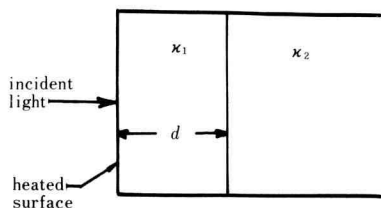


Fig. 1. Two layer model of a sample with a non-homogeneous thermal conductivity.

ダンスである。式 (2)~(4) からわかるように、 ϕ_{inh}/ϕ_h の振幅および位相角はともに熱伝導率の比 κ_1/κ_2 の関数である。それゆえ、検出される音響波の振幅からも、また位相からも、第2層目の物質の熱的情報を得ることができる。

試料物質の中の熱的異質物の影像を得るには、強度変調した細い光ビームで試料表面を二次元に掃引して光音響波を発生させ、圧電変換器で検出して得られる出力電圧をロックイン増幅器に加えて振幅出力、あるいは位相出力を記録すればよい。

3. 実験

3.1 測定系

本実験に用いた光音響影像信号測定系のブロック図を Fig. 2 に示す。光源には波長 830 [nm]、出力 20 [mW] の半導体レーザを用いた。光ビームをコリメータ、ビームエキスパンダを通し、対物レンズで絞って試料面上に焦点を結ばせた。ビームスポットの大きさは、IR センサで測定して約 0.5 [mm] である。光ビームの強度変調はレーザ発振を電氣的に断続させる方法で行った。試料ホルダの中におさめた圧電変換器 (PZT) の上に試料を置き、その周辺をスプリングで押えて固定する。試料と PZT をシリコングリス膜を介して密着させ、両者の間の音響的整合を良くしている。X-Y ステージを用いて試料を1点1点二次元に移動させて影像信号を得るようにした。PZT の出力電圧をロックインアンプに入力し、影像信号の振幅成分および位相成分の出力を取り出し、それぞれを X-Y プロッタで記録した。

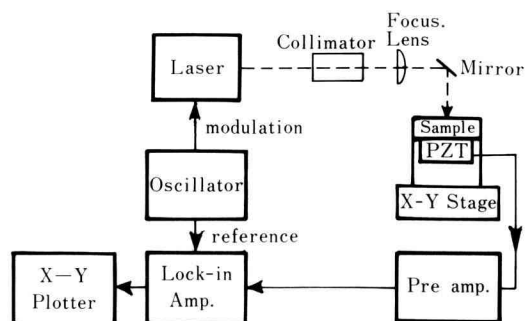


Fig. 2. Experimental arrangement.

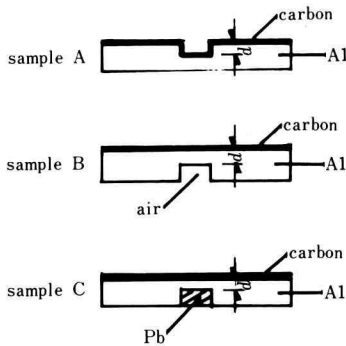


Fig. 3. Geometry of samples.

3.2 試料

測定に用いた3種類の試料をFig. 3に示す。全ての試料は直径25 [mm]、厚さ2 [mm]のアルミニウム円板であり、それに測定の目的に応じた加工を施したものである。

試料Aは表面のキズの影像信号を観測する目的のもので、表面に幅3 [mm]、深さ0.1 [mm]から0.5 [mm]の溝をつけたものである。光エネルギーの吸収をよくするために表面にカーボン皮膜をつけた。

試料BとCは試料内部に存在する異質物の影像信号を観測する目的のものである。試料の裏面に幅3 [mm]の溝をもつ。試料表面から溝までの距離が0.2 [mm]から0.8 [mm]までのものを測定に用いた。試料Bは溝をつけたままのものであり、試料Cは溝に鉛を溶し込んだものである。試料Bでは溝の中の物質は空気であり、その熱特性ならびに弾性特性はアルミニウムのそれぞれと大きな差がある。これに対し試料Cの場合は弾性的特性の差が試料Bに比較してずっと小さい。両試料とも、試料Aと同様に表面にカーボン皮膜を付してある。

3.3 測定結果および検討

[1] 試料A

影像信号の測定を溝の深さ0.1 [mm]から0.5 [mm]の試料について行った。Fig. 4に、溝の深さ $d=0.4$ [mm]の試料について、変調周波数120 [Hz]で測定した二次元影像信号パターンを示す。Fig.(a)は振幅信号を、(b)は位相信号である。振幅信号は溝の縁から十分に離れた位置 (Alの熱拡散長0.51 [mm]の5倍以上) における振幅に対する相対値である。得られた信号は

溝の側面に対する分解能が低い。影像信号の分解能は光スポットの直径と熱拡散長の和で与えられる。本実験ではスポット径が約0.5 [mm]、120 [Hz]におけるAlの熱拡散長が0.51 [mm]であるので、分解能は約±1 [mm]である。この値は観測された信号波形から得られる値とほぼ一致する。他の試料においても同様な影像信号が得られた。

[2] 試料B

試料内部の異質物に対する影像信号は、式(1)に示されるように、表面からの距離 d と熱拡散長 μ_1 との比 d/μ_1 に依存する。ここでは $d/\mu_1=0.3\sim 3$ の範囲について測定した。Fig. 5に $d/\mu_1=0.3$ と0.7の場合に観測された影像信号の振幅および位相信号パターンを示す。熱波が溝と相互作用する範囲 $d/\mu_1 \leq 1$ にある試料についてFig. 5と同様の信号パターンが観測された。 $d/\mu_1=0.3\sim 0.98$ の範囲の測定において、溝の中心位置における相対振幅値は1.4~1.05、位相は $-45^\circ \sim -25^\circ$ が得られている。これに対し、 $d/\mu_1=3$ の試料では相対振幅値は0.2以下に減衰し、信号のS/N比の低下のために位相信号の測定が不能であった。

$d/\mu_1 > 1$ の場合、熱波は溝に到着するまでに減衰してしまうので、得られる影像信号は熱波には関係なく、試料表面で生じた音響波が溝の境界における大きな音響不連続性のために反射されて出力が低下すると考えられる。これに対し、 $d/\mu_1 < 1$ では、上記のような音響不連続性があるにもかかわらず相対振幅は1以上になっている。これは、検出された影像信号は試料表面部分で発生する音響波より、むしろ、溝内部に拡散した熱波が溝内部に密閉された空気を周期的に加熱することにより発生する音響波によるものであると考えられる。以下に、これについて考察する。

溝の中の空気は密閉されているので、ここで発生する音響波は固定表面条件におけるものとなる。一般に固定表面における音響波は自由表面におけるものに比べて極めて大きい。上記の溝内部の空気で発生する音響波と試料のアルミニウム表面 (自由表面) で発生する音響波の比 M は、Opsalら⁸⁾の解析結果を用いると次のように与えられる。

$$M = \frac{\alpha_2 \rho_1 C_1 \lambda_2}{2\pi \alpha_1 \rho_2 C_2 \mu_1} T_{th} T_{acous} e^{-\frac{d}{\mu_1}} \quad (5)$$

$$T_{th} = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2} \quad (6)$$

$$T_{acous} = \frac{4\rho_1 \rho_3 v_1 v_3}{(\rho_1 v_1 + \rho_2 v_3)^2} \quad (7)$$

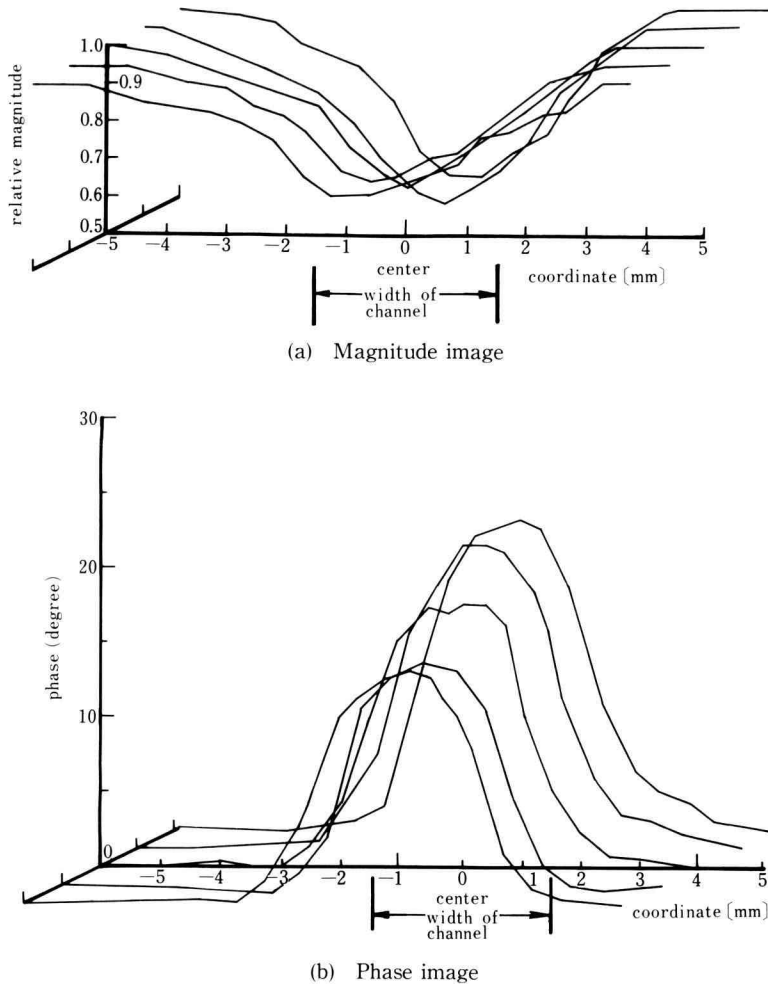


Fig. 4. Magnitude and phase images of surface channel (Sample A). Depth of the channel $d=0.4$ [mm].

ここで、 α : 体積膨張率, v : 音速度, T_{th} : Al から空気への熱エネルギー透過率, T_{acous} : 空気から PZT への音響エネルギー透過率である。添字 1, 2, 3 は, それぞれ, Al, 空気および PZT に対応する。

式 (5)~(7) に Al と空気の各定数を代入し, PZT の音響インピーダンス $\rho_3 v_3$ を 50×10^6 [$\text{N} \cdot \text{S} \cdot \text{m}^{-3}$] と仮定して計算すれば, $M \approx 2.1e^{-d/\mu_1}$ となる。 $d/\mu_1=0.7$ のとき $M \approx 1.04$ となり, 実測された値と同じ程度となる。

[3] 試料 C

この試料の影像対象は鉛であり, アルミニウムとの境界における熱的不連続性ならびに音響的不連続性は

試料 B に比べてはるかに小さい。アルミニウムと鉛の熱波インピーダンス比は 3.3, 音響インピーダンス比は 0.56 である。

影像信号の測定を $d/\mu_1=0.55 \sim 1.15$ の範囲で行った。観測された振巾および位相信号は試料 A, B の場合と同様に鉛の側面分解能が ± 1 [mm] 程度であった。得られた影像信号の相対振幅および位相角と d/μ_1 の関係を Fig. 6 に示す。図中, 黒丸は相対振幅, 白丸は位相角の測定値である。破線は式 (1) を用い, 熱波特性インピーダンス比 $z_1/z_2=3.3$ として計算した値である。計算値ではアルミニウムと鉛の間の弾性特性の差による効果は入っていないが, 実測値と同じ程度

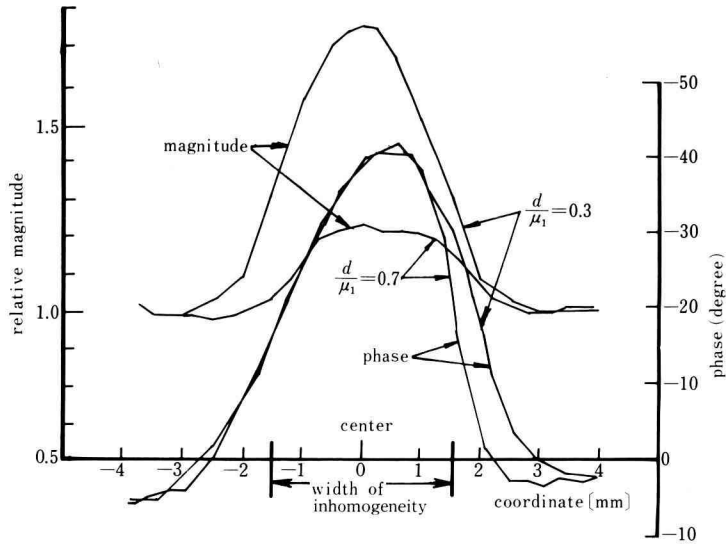


Fig. 5. Magnitude and phase of image signals (Sample B).

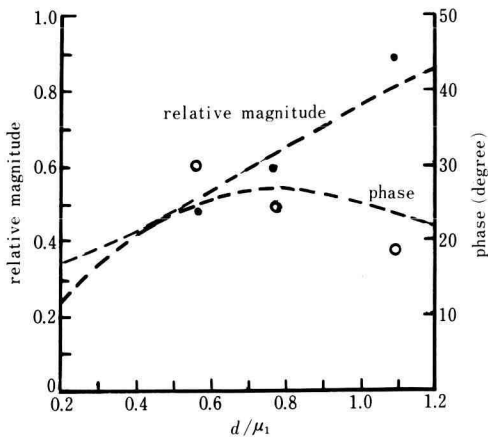


Fig. 6. Measured values of relative magnitude and phase $v \cdot s d/\mu_1$ (Sample C).
 ●; relative magnitude, ○: phase. Broken lines are calculated from eq. (2) for $Z_1/Z_2 = 3.3$.

の大きさである。

4. む す び

圧電変換器を用いた光音響影像検出方式によりアルミニウム試料の表面および内部の構造欠陥に対する光音響影像信号を測定した。これらの影像信号は熱波

と欠陥との相互作用が音響波の振幅ならびに位相を変調する結果であり、振幅および位相のいずれの変化も影像信号として用いることができる。

試料 B のような内部欠陥の物質が空気中、その熱弾性特性が周囲物質 (Al) のそれと大きく異なる場合には、欠陥部分に拡散した熱波による強い音響波が励起され、これが影像信号に大きく影響を与えることを示した。このような音響波は固体の内部に熱源があるときに励起される音響波と同様であるので、上記の効果を内部熱源効果と名づけることにする。試料 C のように欠陥 (Pb) と周囲物質 (Al) の熱弾性特性に差が小さい場合は内部熱源効果が小さく、Fig. 1 に示すような、熱波特性インピーダンスの差のみを考慮した二層モデルで得られる影像信号に近いものとなる。

影像分解能は熱拡散長の大きさで定まる。熱拡散長は光ビームの変調周波数の平方根に反比例するので、分解能を高めるには変調周波数を高めなければならないが、同時に影像が得られる欠陥の深さも小さくなる。本実験は熱拡散長が 0.5~0.7 [mm] の範囲で行った。測定された影像信号から見積った分解能も熱拡散長程度である。

参 考 文 献

- 1) A. Rosencwaig: Photoacoustics and Photo-

- acoustic Spectroscopy John Wiley & Sons.
New York (1980).
- 2) Y.H. Wong, R.L. Thomas and G.F. Hawkins:
Appl. Phys. Lett. **32**, 538 (1978).
 - 3) A. Rosencwaig: J. Appl. Phys. **51**, 2210 (1980).
 - 4) A. Rosencwaig: in Optoacoustic Spectroscopy
and Detection, edited by Yoh-Han Pao Academic
Press New York (1977).
 - 5) G. Busse: Appl. Phys. Lett. **35**, 759 (1979).
 - 6) Y.H. Wong, R.L. Thomas and G.F. Hawkins:
Appl. Phys. Lett. **32**, 538 (1978).
 - 7) J.C. Murphy, J.W. MacLachan and L.C.
Aamodt: IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect.
Freq. Conf. UFFC-33 529 (1986).
 - 8) J. Opsal and A. Rosencwaig: J. Appl. Phys. **53**,
4240 (1982).