

固体試料の表面および内部欠陥の熱波影像法

小林 武*・高 島 信 也*

Thermal wave imaging of surface and subsurface
defects in a solid sample

Takeshi KOBAYASHI and Nobuya TAKABATAKE

Abstract

Thermal wave imaging of surface and subsurface defects made artificially in a metal is performed by using gas-microphone and piezoelectric transducer detection techniques. Magnitude and phase images are presented. Experimental results of depth profiling for the subsurface defects agree qualitatively with the O-R theory⁽¹¹⁾.

1. は し が き

熱波影像法は光学的に不透明な固体試料の表面や表面下の傷や異質物を非破壊で検出する有力な方法として注目されている。^{1)~4)}熱波は強い減衰特性をもつ温度の伝搬波であり、強度変調した光ビームで試料表面を周期的に加熱することにより発生される。熱波の伝搬の深さを与える熱拡散長以内の距離に熱的不連続を与える欠陥があれば熱波は反射され、その結果、熱波の振幅および位相は欠陥が無い場合のそれらと異なった値になる。それ故、試料表面を光ビームで掃査して熱波の振幅あるいは位相の変化を検出することにより欠陥の影像を得ることができる。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、欠陥の深さの情報を得ることができることにある。

熱波はいろいろな方法で検出することができる。簡単で多くの実験に用いられている方法は検出器としてマイクロホン⁵⁾あるいは圧電変換器⁶⁾を用いるものである。マイクロホン検出法は試料表面近傍の気体が熱波により加熱されて発生する音響波を検出するものである。この音響波は試料の表面温度の交流成分に比例する。一方、圧電変換器検出法（以下において圧電検出法と記す）は試料の熱弾性効果により試料中に発生

する熱弾性波を試料の裏面に密着させた圧電変換器で検出する方法である。この他に光プローブ^{7,8)}あるいは赤外線検出器⁹⁾により試料表面温度を検出する方法や熱波による表面変形を光学的に検出する方法¹⁰⁾が開発されている。本論文は筆者らの製作した熱波影像検出装置とこれを用いて銅試料の表面および内部に機械的に作った欠陥の熱波影像をマイクロホン検出法と圧電検出法で測定した結果の報告である。

2. 測 定 原 理

角周波数 ω で強度変調した光ビームで試料の表面を周期的に加熱すれば試料内部に熱波が生ずる。この熱波は伝搬定数が $(1+i)/\mu$ で与えられる減衰特性を持つ温度の伝搬波であり、伝搬距離 x における温度 T_x は次のように与えられる。

$$T_x = T_0 e^{-(1+i)x/\mu} \quad (1)$$

ここで、 μ は熱波の伝搬の深さを与える量で熱拡散長といわれ次式で表わされる。

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

ここで、 α : 熱伝導率、 C : 比熱、 ρ : 密度である。試料の内部にこの熱拡散長程度の範囲内に熱的特性の異なる異質物などの欠陥があれば熱波は散乱される。熱

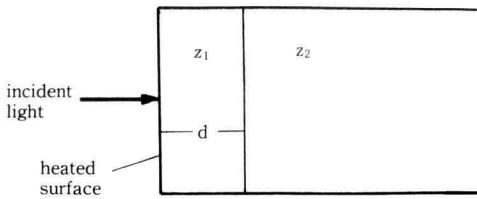


Fig. 1. Two layer model of a sample with an inhomogeneous thermal wave characteristic impedance.

波と欠陥との相互作用の情報は試料の表面温度あるいは熱波により試料内に誘起される熱弾性波の振幅および位相それぞれの中に含まれるので、これらを欠陥の影像信号とすることができる。

Opsal と Rosenzweig は熱的特性の異なる n 層一次元モデルの試料について表面温度および熱弾性波の解折を行っている¹¹⁾。その理論 (O-R 理論) によれば、Fig. 1 に示すような熱特性インピーダンスが Z_1 および Z_2 で与えられる二層系試料における表面温度と Z_2

= Z_1 とした一層系試料の場合の表面温度の比 M_T および熱弾性波の比 M_E はそれぞれ次のように与えられる。

1) 表面温度比 M_T :

$$M_T = \frac{(Z_1/Z_2) + \tanh(1+i)d/\mu_1}{1 + (Z_1/Z_2)\tanh(1+i)d/\mu_1} \quad (3)$$

2) 熱弾性波比 M_E (自由表面条件の場合) :

$$M_E = M_T \left\{ 1 + \left(\frac{Z_1^2 - Z_2^2}{Z_1 Z_2} \right) \times \frac{1 + \tanh(1+i)d/\mu_1}{(Z_1/Z_2) + \tanh(1+i)d/\mu_1} e^{-(1+i)d/\mu_1} \right\} \quad (4)$$

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

$$Z_{1,2} = (1+i) \frac{\chi_{1,2}}{\mu_{1,2}} \quad (5)$$

である。式 (4), (5) からわかるように、 M_T および

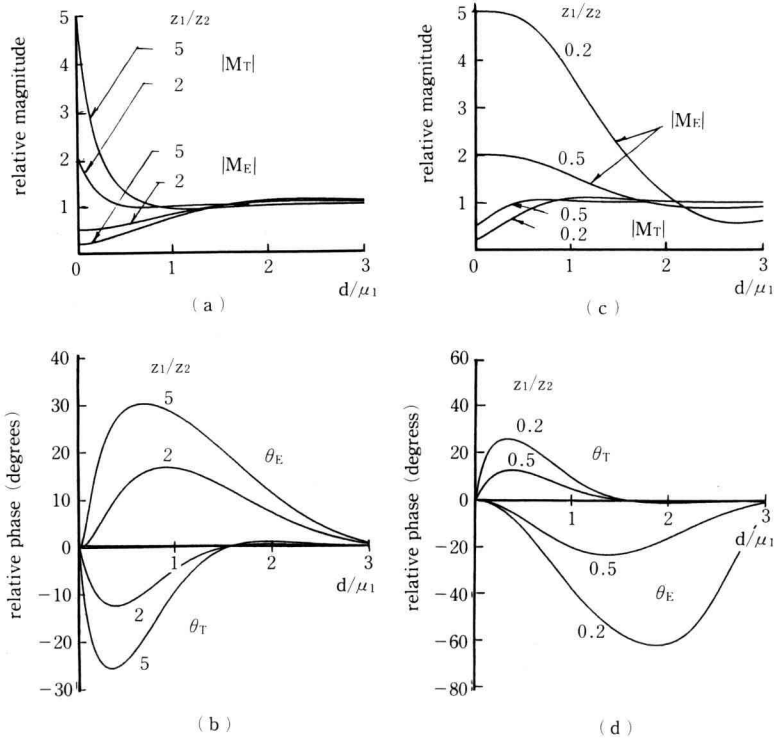


Fig. 2. Relative magnitudes and relative phases vs. d/μ_1

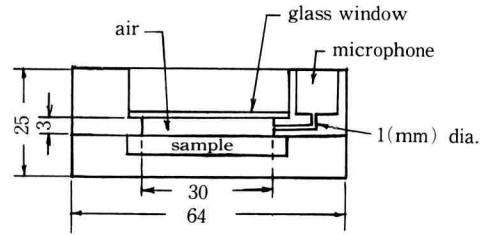
M_E それぞれの振幅および位相はともに熱波特性インピーダンスの比 Z_1/Z_2 の関数であり、振幅および位相のいずれからでも第2層の熱的情報を得ることができる。Fig. 2に Z_1/Z_2 の値が 2, 5, 1/2, および 1/5 の場合について M_T および M_E それぞれの振幅 $|M_T|$, $|M_E|$ および位相 θ_T, θ_E の d/μ_1 に対する特性を計算した結果を示す。

3. 実 験

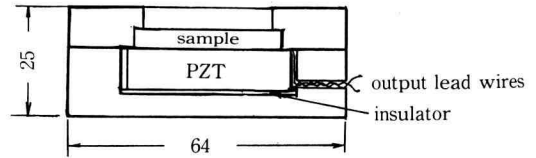
3.1 実験装置

本実験に用いた測定系のブロック図を Fig. 3 に示す。光源には波長 333~529(nm) 出力 150(mW) のアルゴンイオンレーザを用いた。光ビームの強度変調はチョッピング周波数が $10(Hz) \sim 2(kHz)$ の機械式チョッパにより行った。セル内の試料の表面におけるビームスポットは直径約 $50(\mu m)$ である。セル内の検出器 (マイクロホンあるいは圧電変換器) から出力される影像信号を前置増幅器で増幅した後ロックイン増幅器に入力し、影像信号の振幅出力および位相出力を取り出す。これら両出力をそれぞれ A/D 変換器でデジタル信号に変換してパーソナルコンピュータに取り込み、ビームスポットの位置の関数として X-Y プロッタあるいはフィルムレコーダに出力させる。セルを取り付けた X-Y ステージにより試料を二次元にステップ状に移動させ、試料上の所定の範囲の影像信号を得るようにした。X-Y ステージはパーソナルコンピュータで制御される。

Fig. 4 に本実験に用いた2つのセルの構造を示す。Cell 1 はマイクロホン検出法、Cell 2 は圧電検出法に用いる。Cell 1 において、マイクロホンは感度 $-65 (dB)/0.1(Pa)$ のエレクトレット型マイクロホンである。試料の上の空洞を直径 $30(mm) \times$ 高さ $3(mm)$ と



(a) Cell 1 (gas-microphone detection)



(b) Cell 2 (piezoelectric transducer detection)

Fig. 4. Construction of the cells

し、側面にあけた直径 $1(mm)$ の孔でマイクロホンを空洞に連続している。空洞を密閉するためのガラスには光吸収のない石英ガラス (厚さ $1(mm)$) を用いた。また、Cell 2 においては圧電変換器として電圧出力係数 $28.9(Vm/N)$ の PZT (直径 $40(mm)$, 厚さ $10(mm)$) を用いた。試料と PZT をシリコングリスを介して密着させ、両者の間の音響結合を良くしている。

3.2 実験結果および検討

[1] 内部欠陥の影像

内部欠陥の検出実験に用いた試料を Fig. 5 に示す。厚さ $3(mm)$, 直径 $35(mm)$ の銅板に直径 $5(mm)$ の孔をあけ、欠陥物質として鉛を溶しこんだものである。試料表面から鉛の境界までの深さ d は一方は 0.35

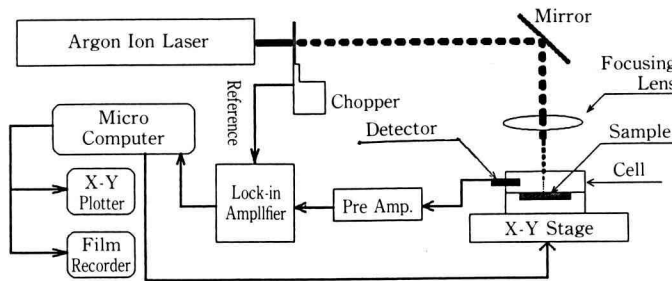


Fig. 3. Block diagram of the experimental setup

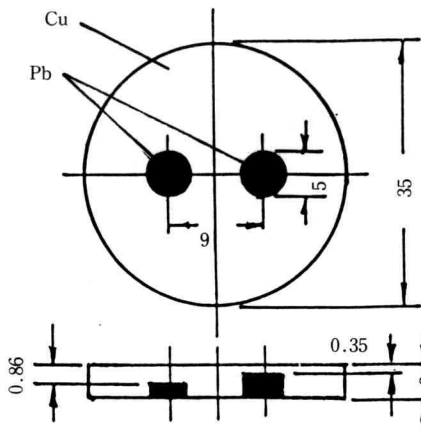


Fig. 5. Geometry of the sample with subsurface defects.

(mm), 他方は 0.86(mm) である。以下において、これら 2 つの鉛を欠陥と呼び、浅い方を欠陥 1、深い方を欠陥 2 とする。強度変調した光ビームで試料表面を掃査し、変調周波数 f をかえて 2 つの欠陥の影像信号をマイクロホン検出法および圧電検出法で測定した。Fig. 6 に $f=70(\text{Hz})$ と $280(\text{Hz})$ で測定された振幅影像および位相影像を示す。(a) はマイクロホン検出法、(b) は圧電検出法で得られた影像である。影像中のパルスは試料表面の傷によるものである。両検出法による影像を比較すれば、 $f=70(\text{Hz})$ の場合、マイクロホン検出法では振幅影像は欠陥 1 の影像だけで欠陥 2 は検出されないが、位相影像では両欠陥が検出されている。一方、圧電検出法では振幅および位相影像とも両欠陥を検出している。また、 $f=280(\text{Hz})$ においてはマイクロホン検出法の場合振幅および位相影像と

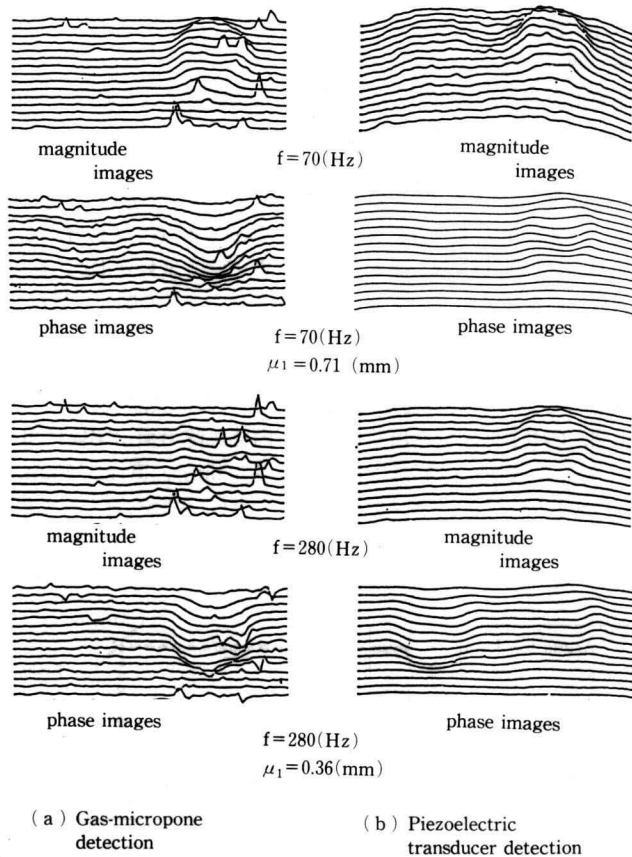


Fig. 6. Thermal wave images of two subsurface defects measured with the gas-microphone and piezoelectric transducer detection methods.

も欠陥1のみであるのに対し、圧電検出法では振幅映像は欠陥1のみであるが位相映像は両欠陥を検出している。以下にこれらの測定結果について考察する。

試料における銅と鉛の熱波特性インピーダンスの比は $Z_1/Z_2=3.3$ であり、また銅の熱拡散長 μ_1 は $f=70(\text{Hz})$ で $\mu_1=0.71(\text{mm})$ 、 $f=280(\text{Hz})$ で $\mu_1=0.36(\text{mm})$ である。欠陥1と欠陥2に対する d/μ_1 の値は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 f=70(\text{Hz}) \quad d/\mu_1 &= \begin{cases} 0.42 & (\text{欠陥1}) \\ 1.21 & (\text{欠陥2}) \end{cases} \\
 f=280(\text{Hz}) \quad d/\mu_1 &= \begin{cases} 0.97 & (\text{欠陥1}) \\ 2.39 & (\text{欠陥2}) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6}$$

一方、O-R理論に基づいて計算した Fig. 2 (a), (b) の振幅 ($|M_T|, |M_E|$) および位相 (θ_T, θ_E) 特性より振幅映像および位相映像信号を検出できる d/μ_1 の範囲を

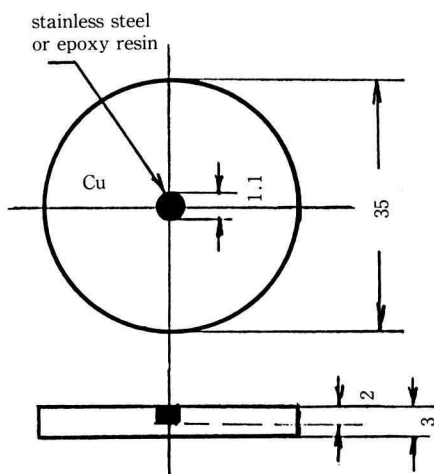


Fig. 7. Geometry of the sample with a surface defect.

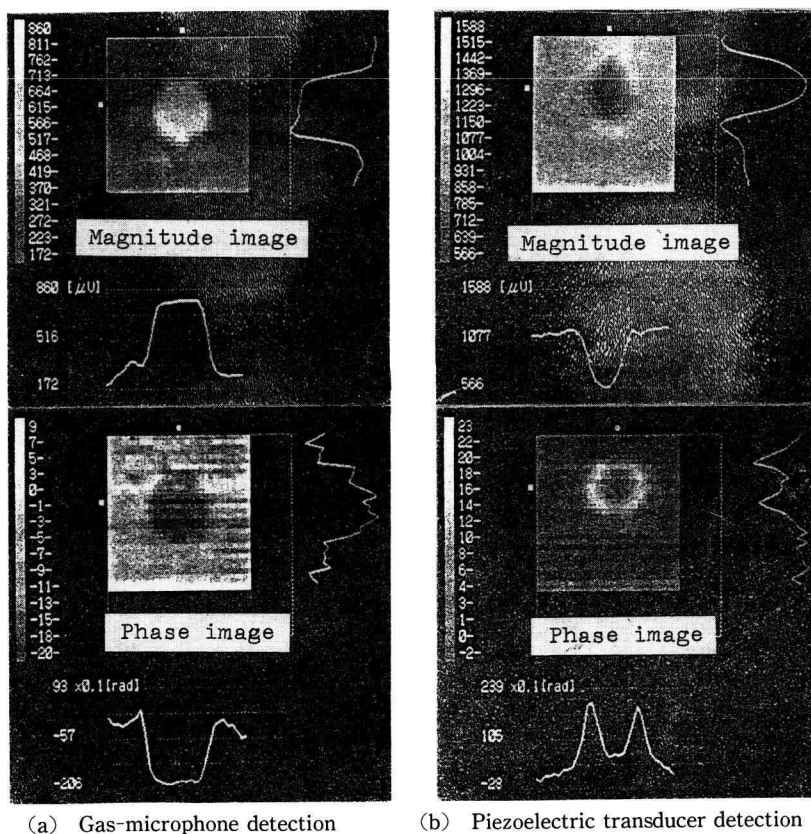


Fig. 8. Thermal wave images of a surface defect (stainless steel) measured with the gas-microphone and the piezoelectric transducer detection methods. Modulation frequency is 1040 (Hz).

求めれば概略次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{マイクロホン検出法 } d/\mu_1 < \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ (振幅影像 } |M_T|) \\ 1.5 \text{ (位相影像 } \theta_T) \end{array} \right\} \\ \text{圧電検出法 } d/\mu_1 < \left\{ \begin{array}{l} 1.5 \text{ (振幅影像 } |M_E|) \\ 2.5 \text{ (位相影像 } \theta_E) \end{array} \right\} \end{array} \right\} (7)$$

式(6)と(7)を比較すれば、例えば、マイクロホン検出法の場合欠陥2の振幅影像は $f=70$ [Hz]で、また位相影像は $f=280$ [Hz]で検出できないのに対し、圧電検出法では検出できることがわかる。測定結果はO-R理論に定性的に一致している。

[2] 表面欠陥の影像

Fig. 7に表面欠陥の影像測定に用いた試料を示す。厚さ3(mm)の銅板の中心に直径1.1(mm)、深さ2(mm)の孔を明け、それにステンレス線を打ち込んだものとエポキシ樹脂を注入して硬化させたものを試料として用いた。Fig. 8は変調周波数 $f=1,040$ (Hz)にて測定したステンレスの振幅および位相影像を色表示したものである。Fig. 8(a)はマイクロホン検出法、(b)は圧電検出法によるものである。影像信号レベルが高いところは白、低いところは黒くなっている。圧電検出法で得られた影像はマイクロホン検出法のそれに比べて不鮮明である。その理由としては銅板とステンレスの境界面における音響結合の不完全さが考えられる。ステンレスの代わりにエポキシ樹脂を注入し硬化さ

せた試料ではより鮮明な影像が得られている。

銅とエポキシ樹脂試料について、銅とエポキシ樹脂の境界に対する分解能の変調周波数依存性を調べる目的で、試料平面の中心線上の影像信号を変調周波数40, 560, 2,000(Hz)において測定した。その結果をFig. 9に示す。図中に示す μ_{40} , μ_{560} , μ_{2000} は各変調周波数における銅の熱拡散長の大きさである。この測定においては光ビームスポットは50(μ m)で、試料の送りは1ステップ0.1[mm]とした。測定された影像信号は境界における端面効果¹²⁾による広がりを示し、変調周波数による差もやや認められる。

4. む す び

マイクロホンおよび圧電変換器を用いた2つの熱波検出方式により金属試料の表面および内部に作った熱的欠陥に対する熱波影像信号の測定結果を述べた。熱波の欠陥による散乱で生ずる振幅変化および位相変化のいずれも欠陥の影像信号として用いることができる。内部欠陥の影像測定の結果、(1)マイクロホン検出法および圧電検出法のいずれにおいても、位相影像信号は振幅影像信号より深い位置の欠陥を検出できる、(2)圧電検出法はマイクロホン検出法より深い位置の欠陥を検出できることが示された。この測定結果はOpsal-Rosencwaig理論から得られる結果に一致する。

謝 辞

卒業研究生小林秀樹君、竹中信治君および芳賀隆行君に試料の作成ならびに測定の助力をうけた。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) A. Rosencwaig: J. Appl. Phys. 51 2210 (1980).
- 2) A. Rosencwaig: Solid state Technology/ March (1982).
- 3) G. Busse: IEEE Trans. Sonics Ultrasonics SU-32 355 (1985).
- 4) D.N. Rose, D.C. Bryk, D.J. Thomas, R.L. Thomas, L.D. Favro, P.K. Kuo, L.J. Ingelhart, M.J. Lin and K.O. Legg; in Materials characterization for System Performance and

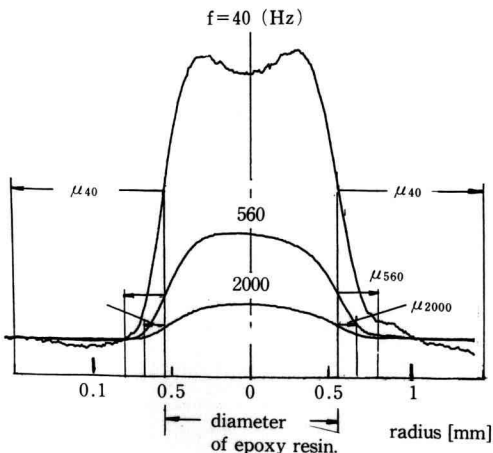


Fig. 9. Broadening of the thermal wave image signals at the boundary of copper and epoxy resin

- Reliability, edited by James W. McCauley and Volker Weiss Plenum Press (1986).
- 5) G. Busse and A. Ograbek ; J. Appl. Phys. **51** 3576 (1980).
 - 6) G. Busse and A. Rosencwaig : Appl. Phys. Lett. **36** 815 (1980).
 - 7) A.C. Boccara, D. Fournier and J. Badoz : Appl. Phys. Lett. **36** 130 (1980).
 - 8) J.C. Murphy and L.C. Aamodt : J. Appl. Phys. **51** 4580 (1980).
 - 9) H. Ermert, F.H. Dacol, R.L. Melcher and T. Baumann : Appl. Phys. Lett. **44** 1136 (1984).
 - 10) M. Kasai, T. Sawada, Y. Gohshi, T. Watanabe and K. Furuya ; Japan J. Appl. Phys. **25** (1986) Supplement 25-1 229.
 - 11) J. Opsal and A. Rosencwaig : J. Appl. Phys. **53** 4240 (1982).
 - 12) J.C. Murphy and L.C. Aamodt : Appl. Phys. Lett. **39** 519 (1981).