レーザー誘起熱弾性波によるアルミニウムブロック内 円筒型空洞の位置の測定

谷山 哲哉, 庄司 貴彦*

日本大学理工学部 電気工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

* 日本大学大学院 理工学研究科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

Location of a Cylindrical Hollow in an Aluminum Block by Making Use of the Laser Induced Thermo Elastic Wave

Tetsuya TANIYAMA and Takahiko SHOUJI*

Department of Electrical Engineering, College of Science and Technology, Nihon University,

1-8-14 Surugadai, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308

* Department of Electrical Engineering, Graduate School of Science and Technology, Nihon University,

1-8-14 Surugadai, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308

(Received May 20, 2002)

Irradiation of intensity modulated laser beam to a aluminum block induces the thermo elastic wave. We have studied to detect the defect and to evaluate its depth from the metal surface by measuring the phase of the induced thermo elastic wave with PZT attached at the back side of the aluminum block. We made it possible to detect the defect but could not evaluate its depth. In the present work, we have discussed the method to evaluate the depth of the defect in an aluminum specimen having a cylindrical hollow between 0.8×10^{-3} m and 2.0×10^{-3} m of diameter. The results have shown that both the diameter of the cylindrical hollows and its depth from the surface can be determined with the modulation frequency 12 kHz for the depth less than 1×10^{-3} m.

Key Words: Thermal elastic wave, Images, CO₂-laser, Non-destructive testing

1. まえがき

この数年来, レーザー誘起熱弾性波による金属ブロック内の欠陥検出と金属板の厚さ測定に関する研究を重ねてきた。既に, 欠陥検出では内部に円筒型空洞を設けたアルミニウムのブロックを試料として, この空洞の画像をコンピュータのディスプレイ上に描かせることができており, この画像は熱弾性波の空洞による散乱波の振幅と位相差の場所的分布を計算した結果と良く一致することを示した^{1,2)}。しかし, この時点では測定結果と計算結果との照合だけを目的としたため, 空洞の大きさとこれが位置する深さを画像から決定することは今後の課題として残してきた。今回はブロック内部に存在する円筒型空洞の直径とこれが位置するブロック表面からの深さを決定する方法について検討した。

主な問題点は(1)S/N比高めて明瞭な画像を得る為に, 如何にして熱弾性波の振幅を高めるか, (2)ブロックの表面とPZTとの接触状態の再現性を如何にして高め, 毎回得られるデータのばらつきを小さくするかであった。(1)については金属板の厚さ測定³⁻⁵⁾を行うために使用した高感度のPZTと改良を重ねた試料の保持方法によって解決した。(2)については多くのカップリング剤を実験的に検討し,

シリコンオイルを使用して空洞による位相の変化と深さ並びに空洞の直径との間に規則性を見いだすことが出来る段階にまで達した。

本論文では, 熱弾性波の振幅と位相差による空洞の画像から, 空洞の直径と空洞が存在するブロック表面からの深さを決定する方法について述べる。

2. 実験装置

Fig. 1に測定装置の概略図を示す。光源はパワー20 W, CW型CO₂レーザーである。ビームの直径は 4.2×10^{-3} mである。レーザー光をAO変調器(変調素子IntrAction Corp. GE-4030, ドライバーIntrAction Corp. AGE-406B1)で矩形波変調した。これを焦点距離0.1 mのZnSeレンズで集光直径 2.6×10^{-4} mに集光し, 試料の表面に垂直に照射した。変調器を通して実際に試料に照射されるパワーは8 Wであるから, パワー密度は 1.5×10^8 W/m²と算定される。変調周波数は10 Hzから100 kHzまで良好な矩形波が得られている。試料の裏面にPZTセンサーを取り付け, ロックインアンプ(NF回路設計ブロック5610B)で熱弾性波の位相差と振幅を測定した。ロックインアンプの参照信号はAO変調器に与えた信号と同位相のものである。

Fig. 1 Experimental setup.

Fig. 2にPZTセンサー部の概略図を示した。PZT素子は直径 2×10^{-2} m厚さ 2.5×10^{-4} mの円板型のPZTを直径 4×10^{-2} m厚さ 5×10^{-4} mの真鍮円板に両者の中心を合わせて接着したユニモルフ構造のもの(京セラKBS30DAIC)である。 5×10^{-2} m角で厚さ 1.6×10^{-3} mの二枚のエポキシ板でスポンジを挟んだ板を作製し、PZT素子のPZT面をエポキシ板にシリコンゴムで固定した。このPZTセンサー部をX-Y移動台(オプテックDP-700)にスクリウネジを使用して図中に示したように2個所で固定した。試料はPZTセンサー部の真鍮円板上に置くだけである。試料と真鍮円板の境界面にシリコンオイルをカップリング剤として使用した。測定を重ねて試行錯誤した結果、現在の処この支持方法によって最も明瞭な画像が得られ、また再現性の高

Fig. 2 Structure of PZT sensor.

い結果が得られている。

試料はアルミニウムのブロックである。Fig. 3(a)に示したように横幅 $W = 6 \times 10^{-2}$ m, 奥行き $D = 1 \times 10^{-2}$ m, 厚さ $H = 1 \times 10^{-2}$ mとした。アルミニウム純度は99.5 %である。Fig. 3(b)に示したようにブロックの内部に直径 d , 長さはブロックの奥行き D に等しい円筒型空洞を設けた。ブロックの表面から空洞の表面までの距離を深さとする。従ってブロックの表面から空洞の中心までの距離は $z + d/2$ となる。 z と d の値を変えてそれぞれ10個の試料を作製した。ブロックの表面は布で磨いただけである。

3. 実験結果

Fig. 4(a)とFig. 4(b)はレーザー光の変調周波数12 kHzによりアルミニウムブロック内部にある円筒型空洞を熱弾性波の振幅と位相差の二次元画像である。空洞の直径 $d = 2.0 \times 10^{-3}$ m, 深さ $z = 0.15 \times 10^{-3}$ mで得た結果の一例で、(a)は振幅、(b)は位相差による画像である。レーザー光の照射位置の掃引方法はFig. 3(a)に示したようにX軸 $= 0 \times 10^{-3}$ mから 5×10^{-3} mに向かって照射位置をピッチ 5×10^{-5} m, 速度 9×10^{-5} m/sで移動しながら101個所で測定し、1ラインとする。1ライン測定終了するたびにY軸方向 $Y = 0 \times 10^{-3}$ mから 5×10^{-3} mへ向かってピッチ 5×10^{-4} mだけ移動させ、次のラインを掃引する。これを11ライン測定した。尚、 $X = 0 \times 10^{-3}$ mと $Y = 0 \times 10^{-3}$ mはレーザー光の掃引を開始した照射位置と言う意味である。振幅の分布を見ると二つの山の間に谷が形成されている。空洞の中心は谷底の直下に位置し、この谷に沿って空洞がある。位相差には振幅の谷に一致する位置に溝が生じている。空洞から充分離れた位置の位相差はほぼ一様で、150度遅れであった。

Fig. 5は位相差の画像Fig. 3(b)から11ライン中の1ラインを抜き出したものである。空洞の中心が存在する位置における位相差は空洞がない部分よりも $\phi = \phi_c - \phi_d$ だけ遅れている。レーザー光の照射位置が空洞の中心真上に一致したときの位相差 ϕ_c は空洞がない部分の位相差 ϕ_d よりも遅れる。この $\phi = \phi_c - \phi_d$ は空洞の存在による位相の遅れと考えられる。

Fig. 6は空洞の直径が 2.0×10^{-3} mの場合について、深さ z と空洞による位相の変化量 ϕ との関係を図中に示した6点

Fig. 3 Cross section of sample for hole in aluminum block.

Fig. 4 (a) Thermal elastic wave distribution of amplitude.

Fig. 4 (b) Thermal elastic wave distribution of phase angle.

Fig. 5 Definition of $\phi = \phi_c - \phi_d$.

の変調周波数について求めた結果である。両対数で表示すると、 z が 7×10^{-4} m以下では9 kHzから20 kHzまでの変調周波数の変化に対する ϕ の変化が小さく、 ϕ と z との関係は一本の直線に収まる。しかし、 z を 7×10^{-4} m以上になると各変調周波数において直線から外れると同時に ϕ のばらつきが広がる。この6点の変調周波数の中で12 kHzが z の変化に対して最も直線性が高い結果を得たので、以下の測定は12 kHzで行った。

Fig. 7は空洞の直径 d を図中に示した4点について、深さ z と位相差 ϕ との関係を両対数グラフで示した結果である。それぞれの直径 d において、 z と ϕ との関係を直線化するこ

Fig. 6 Relation between the phase angle ϕ of thermal elastic wave and depth z .

Fig. 7 Relation between the phase angle ϕ of thermal elastic wave and depth z .

とができた。同じ深さ z であれば空洞の直径 d が大きいほど位相差 ϕ は大きいことが判る。

Fig. 8はFig. 7の図中に縦の点線で示した4箇所の深さ z において、空洞の直径 d と位相差 ϕ との関係を求めた結果である。 d と ϕ は比例関係にある。

Fig. 9はFig. 8の結果に基づいて、さらにFig. 7を (d/z) と位相差 ϕ との関係に整理して等間隔グラフに示したものである。この特性から $\phi = 2.5 (d/z)$ の関係が得られた。

Fig. 10に振幅 Q と位相差 ϕ の場所的分布と空洞の関係を図示した。振幅は双山で、この双山の頂上間の距離を s とする。Fig. 9と同様に空洞の直径 d と深さ z の積 dz と s との関係を求めた結果をFig. 11に示す。 s と dz は比例関係にあり、 $(s - 0.56) = 2.4 dz$ の関係式が得られた。

Fig. 12はシリコンオイルを使用した場合(●)としない場合(○)との比較である。シリコンオイルを使用したことにより位相差 ϕ と z との関係を明瞭にすることができたと同時にデータの再現性を高めることもできた。

4. 検 討

4.1 空洞による位相の変化量 $\phi = \phi_c - \phi_d$ について

厚さ 1×10^{-2} mのブロックの背面でPZTが検出する熱弾

Fig. 8 Relation between the phase angle ϕ of thermal elastic wave and diameter d .

Fig. 9 Relation between the phase angle ϕ of thermal elastic wave and d/z .

Fig. 10 Definition of s .

性波の振幅は 1×10^{-3} V オーダーとなる。従って、 S/N 比を高めて明瞭な画像を得るために少しでも大きい振幅が得られる変調周波数に設定した。試料にPZTを取りつけて変調周波数を変化させると9 kHzから20 kHzまでに幾つかの

Fig. 11 Relation between the s and dz .

Fig. 12 Effect of using silicon oil for coupling sample and PZT.

共振点がある。これらはPZTの半径方向振動モードの共振である。この点の近傍に変調周波数を設定すると、大きな振幅で明瞭な画像を得ることが出来る。この設定した変調周波数における位相差で ϕ_d が決定される。Fig. 3(b)に示した一例では150度遅れであったが、毎回の変調周波数の設定でこの値は異なり一定しない。しかし、この ϕ_d をベースとしてこの上に空洞による位相の遅れが重畳されることになるので、 ϕ_d を何処に設定しても空洞による位相の変化量 $\phi = \phi_c - \phi_d$ は変わらない。

4.2 空洞の直径 d とその位置する深さ z の決定について
空洞による位相差の変化分 ϕ は空洞の直径 d と深さ z により、 $\phi = 2.5(d/z)$ で示された。振幅 Q の双山の間隔 s は空洞の直径 d と深さ z との積に比例し、 $(s - 0.74) = 2.56 dz$ で示された。これら二式の適用範囲は、 z についてはFig. 6から $z < 0.7 \times 10^{-3}$ m、 d についてはFig. 8から $d < 2.0 \times 10^{-3}$ m、 d/z についてはFig. 9から $d/z = 13$ では $d = 2.0 \times 10^{-3}$ mのデータしかないので $1 < d/z < 10$ 、 dz はFig. 11から $0.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 < dz < 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ に限定されたと考えたほうが安全である。

以上の二つの関係式から、 s と ϕ を測定で求めれば d と z を決定することが出来る。空洞の直径は
 $d = 0.395 \sqrt{(s - 0.74)\phi} \times 10^{-3}$ m から、深さは

$z = 0.988\sqrt{(s-0.74)/\phi} \times 10^{-3} \text{ m}$ から求められる。

4.3 d/z と dz について

z と d は ϕ と s の測定により一応決定できる段階に至った。しかし、次の二点をさらに検討する必要がある。(1) Fig. 13 に示したように d/z は $2\tan\theta$ を意味するので、 ϕ はこれに比例することになる。この点に関して、比例係数の 2.5 deg は熱弾性波の伝搬経路の変化によるものと考えている。(2) dz は図中に示した三角形の面積を意味する。 $(s-0.74) = 2.56 dz$ は $dz=0$ の場合にも s は $0.74 \times 10^{-3} \text{ m}$ なる値を持つことになる。これは空洞の有無とは無関係にレーザー光の照点部分に起因する問題と考えられる。 $0.74 \times 10^{-3} \text{ m}$ は s と同方向の距離、 $2.56 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ は z と同方向の距離の逆数と考えられるが、未だこれらを定める要因は判っていない。これら二つの定数と 2.5 deg が何によって決定されるか明確にすることが今後の課題となる。

4.4 カップリング剤の効果について

Fig. 12 からカップリング剤として使用したシリコンオイルの効果は明瞭である。この実験では試料を PZT の上に置くだけとしたために、試料と PZT とのカップリング剤が必要となった。従って、試料と PZT とを密着させる圧力をかければ、シリコンオイルを使用する必要はない。以前は圧力をかける方式のセンサー部を使用していたが、取扱が面倒なことから試料の寸法が制限されることから今回の方式に改めた。

Fig. 13 Definition of d/z and dz .

5. まとめ

アルミニウムブロックの内部に存在する空洞の直径とその位置する深さを求める方法について実験的に検討した結果を要約する。

- 1) 位相差 ϕ と空洞の深さ z 及び空洞の直径 d との間に $\phi = 2.5 (d/z)$ なる関係がある。
- 2) 振幅 Q の s と空洞の直径 d 及び深さ z との間に $(s-0.74) = 2.56 dz$ なる関係がある。
- 3) 空洞の直径は $d = 0.395\sqrt{(s-0.74)\phi} \times 10^{-3} \text{ m}$ 、深さは $z = 0.988\sqrt{(s-0.74)/\phi} \times 10^{-3} \text{ m}$ から決定できる。
- 4) 適用範囲は $z < 0.7 \times 10^{-3} \text{ m}$, $d < 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$, $1 < d/z < 10$, $0.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 < dz < 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ である。
- 5) カップリング剤の効果は大である。シリコンオイルが適当であった。

以上の実験結果はアルミニウムブロック内に設けた円筒型空洞の中心軸に対してレーザー光を垂直な方向に走査した場合に成立する (Fig. 3 参照)。この他 Cu と Brass についてもアルミニウムと同様の振幅並びに位相差による画像が得られており、上記 1)~3) に示した関係式の数値が変わるであろうと考えている。ここで得た結果がアルミニウム以外の金属においても成立するか否か検討を急いでいる。尚、レーザーの種類は熱弾性波が得られるものであれば、 CO_2 レーザーでなくても良い。

最後にこの研究を進めるに当たり、実験の遂行にご協力下さった大学院生 (現在、東光電気工事株式会社勤務) 高野 大吾君と卒業研究生 松本 浩孝君に深く感謝する。

参考文献

- 1) 谷山 哲哉, 鈴木 薫, 中田 順治: レーザー研究 **18** (1990) 61.
- 2) 谷山 哲哉: レーザー研究 **24** (1996) 1099.
- 3) W. Jackson and N. M. Amer: J. Appl. Phys. **51** (1980) 3343.
- 4) 谷山 哲哉: レーザー研究 **28** (2000) 112.
- 5) 谷山 哲哉, 高野 大吾: レーザー研究 **29** (2001) 169.