

超音波支援による測定法の研究

(異種金属拡散接合部における欠陥面積の測定)

Measuring method of Defects using Ultrasonic testing

(Measurement of Defect areas on Diffusion bonding joints of Dissimilar metals)

- 田村 賢一*, 小野沢 元久*
○ Kenichi TAMURA, Motohisa ONOZAWA,

* 日本大学 * Nihon University.

キーワード: 超音波探傷試験(Ultrasonic testing), 欠陥(Defects), 評価(Evaluation), 異種金属拡散接合部(Diffusion bonding joints)

連絡先: 〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1 日本大学工学部機械工学科 田村賢一
Tel. & Fax. : 024-956-8773, E-mail: tamura@mech.ce.nihon-u.ac.jp

1. 緒言

異材の精密接合が可能な拡散接合法は各種部品への実用化が進んでいる。しかし接合部には接合条件によって未接合部やボイド、剥離などの欠陥が生じ、最近の精密部品では微小欠陥でも破壊や不良の原因となることがある。そこで本研究室では、超音波による拡散接合部の定量的な欠陥検出と接合プロセスの制御を目的として研究を進めている¹⁻³⁾。

接合面における超音波は、欠陥および接合面で材料相互の音響インピーダンスの違いにより反射する。同材接合部における超音波による欠陥部からの反射率は、照射面積中に1つの欠陥がある場合にはErmolov⁴⁾によって解析され、欠陥の形状と大きさによって反射能率が異なることを明らかにした。例えば、接合面に1つのスリット欠陥がある場合、欠陥幅 w と超音波の波長 λ との比が $w/\lambda \geq 0.2$ では、反射率は欠陥面積に依存し、 $w/\lambda \leq 0.2$ では周波数に依存することを示した。一方、照射面積中に多数のスリット欠陥が等間隔である場合の反射率は、欠陥間隔を l とすれば $l/\lambda \geq 1.0$ のとき欠陥面積率に依存することを定量的に解析し、実験結果も一致した^{5,6)}。

本研究では、超音波による異種拡散接合面の微小な欠陥面積の自動制御による測定のための基礎デ

ータを確立することを目的として、超音波の反射率に及ぼす欠陥の幅と間隔、及び超音波の周波数の影響について欠陥面積をパラメータにして検討した。

2. 供試材と実験方法

供試材はS45Cと純Tiである。Table 1に供試材と欠陥としての空気の音響特性を示す。

Fig. 1に試験片寸法と探傷方法を示す。上部試験片にはTiを、下部にはS45Cを用いた。また探触子は縦波用垂直型(周波数 $f=2, 5, 10\text{MHz}$ 、振動子径 $\phi 10\text{mm}$)であり、超音波がほぼ平面波となる遠距離音場域になるように上部試験片の長さを決定した。接触面は上部試験片をバフ研磨仕上げ(最大高さ $Ry=0.3\mu\text{m}$)一定とした。下部試験片の接触面は、レーザ加工やミゾフライスを用いて欠陥幅 $w=30\sim 800\mu\text{m}$ 、欠陥間隔 $l=100\sim 1700\mu\text{m}$ 、欠陥深さ t

Table 1 Acoustic properties of materials.

Material	Density ρ (10^3kg/m^3)	Wave velocity C (m/s)	Acoustic impedance Z ($10^6\text{kg/m}^2\text{s}$)
Ti	4.6	5910	27.2
S45C	7.8	5880	45.9
Defect (Air)	0.0012	340	0.0004

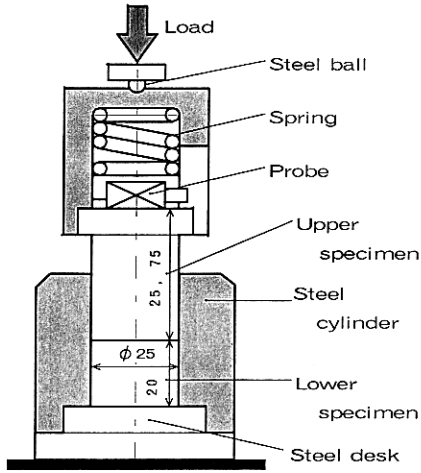


Fig. 1 Size of specimen and apparatus.

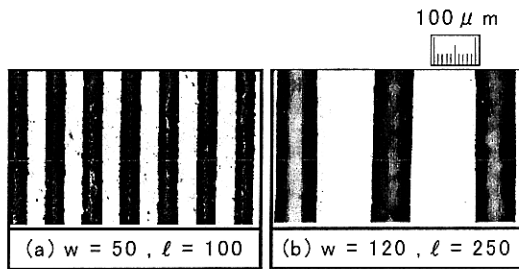


Fig. 2 Contact surface of lower specimens.

$w=50, 100 \mu\text{m}$ の擬似欠陥を設け、#2000 の耐水紙で $R_y \approx 0.5 \mu\text{m}$ に研磨した。

Fig. 2 に欠陥形状の一例を示す。接触面は実験前にアセトンを用いて超音波洗浄を行った。

実験は、圧縮試験機で擬似接合状態になる 120MPa の荷重を负荷し、超音波を接触面に垂直入射して接触面からの反射エコー高さを測定した。

Fig. 3 で示すように、縦波用垂直探触子の超音波ビームは遠距離音場域では振動子径よりも拡がる。このビーム照射面積 S_0 は探触子の周波数と振動子径および入射側材料の音速と接合面までの距離で決まる。また S_f は S_0 中の欠陥面積である。以下、 S_f/S_0 を欠陥面積率という。

3. 実験結果と考察

Fig. 4 に接触面における超音波の反射率 R と無次元化した欠陥間隔 l/λ の関係を欠陥面積率 S_f/S_0 をパラメータにして示す。反射率 R は接触面からの反射エコー高さ F と上部試験片単体の底面からの基準反射エコー高さ B の dB 差を反射率 (%) で表示し

た。図中の曲線は式(1)⁵⁾から求めた計算値である。

$$R = r - N \quad (\%) \quad (1)$$

ここで r は異種材料の接触面における周波数にのみ依存した反射率であり、式(2)⁷⁾から求まる。

$$r = \sqrt{\frac{\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 + \left\{\frac{2\pi CZ_1 Z_2 \ell^2}{(Z_1 + Z_2)\lambda E'k(\ell - w)}\right\}^2}{1 + \left\{\frac{2\pi CZ_1 Z_2 \ell^2}{(Z_1 + Z_2)\lambda E'k(\ell - w)}\right\}^2}} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

式中の Z_1 と Z_2 は超音波の入射側と透過側の各材料の音響インピーダンス、 C は超音波の入射材料の音速、 E' はポアソン比を考慮したヤング率、 k はバネ定数。

また N は欠陥面積率を考慮した反射率で、式(3)から求まる。

$$N = [1 - \{R_f \cdot S_f / S_0 + R_a(1 - S_f / S_0)\}] \cdot (1 - e^{-2\ell/\lambda}) \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

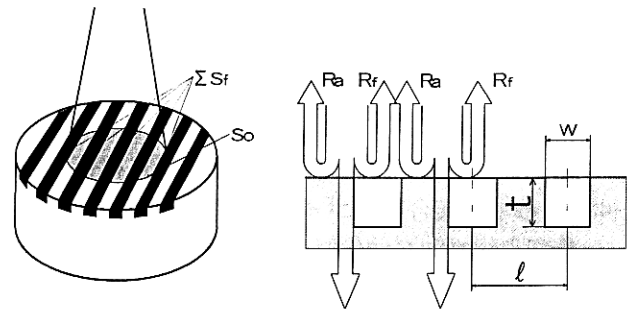


Fig. 3 Ultrasonic beam and reflective echoes on lower specimen.

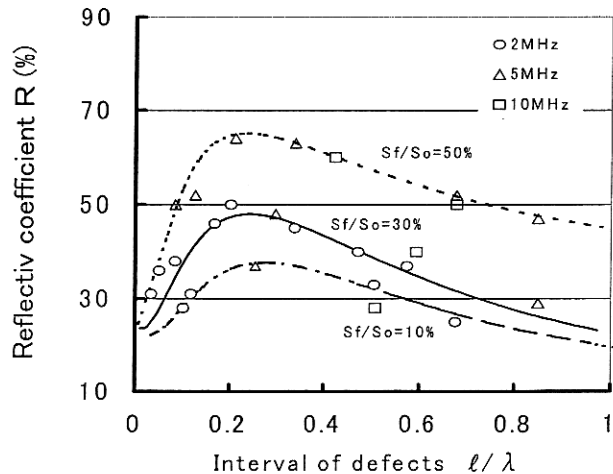


Fig. 4 Relation of reflective coefficient R to interval of defects l/λ .

式中のRfとRaは欠陥と接合部の音圧反射率であり、式(4)から求まる。

$$R_f, R_a = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \quad (4)$$

異材接合部における超音波は、Fig. 3で示すように音響インピーダンス差により欠陥と接合界面で反射する。接合部の反射率Rは、式(1)から求まり、欠陥がないときは約25.4%となる。Fig. 4で示すように、欠陥間隔 $l/\lambda \leq 1.0$ の領域で欠陥がある場合の反射率は、欠陥面積率 S_f/S_o が大きいほど高くなっているが、最大値は S_f/S_o に関係なく欠陥間隔 $l/\lambda \approx 0.2$ 付近となっている。反射率は、 $l/\lambda \leq 0.2$ では欠陥間隔 l/λ に対してほぼ比例関係となり、また $l/\lambda \geq 0.2$ では逆に反比例の傾向を示している。このように欠陥間隔 $l/\lambda \leq 1.0$ の領域の反射率は欠陥間隔 l によって変化し、欠陥面積率 S_f/S_o 一定でも波長 λ すなわち探触子の周波数に依存するので、欠陥面積を求める上で考慮する必要がある。また図では示していないが、 $l/\lambda \geq 1.0$ の領域における反射率は式(3)で示した欠陥面積率が主体となるので欠陥面積に依存する。このときの反射率は欠陥面積率で決まり、欠陥間隔 l とは無関係に接合面の理論音圧反射率に漸近して一定値となる。

なお $S_f/S_o=10\%$ で $l/\lambda=1$ 付近の反射率は、欠陥がない場合より低下している。この理由は以下のように考えている。実験では、超音波をTi側から入射しているので式(4)で示す接触部の音圧反射率 R_a の符号は+となり、欠陥の音圧反射率 R_f は-となる。検出している接触面の反射率は式(3)で示すように接触部と欠陥の総和であり、 $S_f/S_o=10\%$ では接触部からのものが主体となる。このため反射率は欠陥がない場合より低下し、示していないがシナプス波形の位相も反転する。

Fig. 5に、無次元化した欠陥幅 w/λ と欠陥間隔 l/λ の関係を欠陥面積率 S_f/S_o のパラメータで示す。両者の関係は比例的である。欠陥幅 $w/\lambda \leq 0.2$ でも、欠陥間隔 $l/\lambda \leq 1.0$ でも欠陥検出性が問題になり、欠陥面積率 S_f/S_o が小さいほど問題領域は大きくなる。

結局、Fig. 4とFig. 5で示したように欠陥幅 $w/\lambda \leq 0.2$ で欠陥間隔 $l/\lambda \leq 1.0$ の領域における反射率は、欠陥面積だけで決まらないので正確な欠陥の大きさの把握が難しくなる。しかし、使用する探触子の周波数と振動子径により波長とビーム照

射面積が変化するので、この領域か否かの確認を2、3種類の周波数を用いて行うことが重要であり、さらに探傷の領域を欠陥面積に依存する領域($w/\lambda > 0.2$ 、 $l/\lambda > 1.0$)にすることが肝要である。

4. 結言

超音波による異種金属接合部における欠陥検出性について以下のことが分かった。

- (1) 欠陥間隔 $l/\lambda \leq 1.0$ の領域の反射率は $l/\lambda = 0.2$ 付近で最大値を示し、 $l/\lambda \leq 0.2$ では l/λ の増加と共に上昇し、 $l/\lambda \geq 0.2$ では減少した後ほぼ一定値となる。この領域の反射率は欠陥面積率 S_f/S_o が一定でも波長 λ すなわち探触子の周波数に依存する。
- (2) $l/\lambda \geq 1.0$ の領域の反射率は、接合面の理論音圧反射率に漸近して一定値になり、欠陥面積率に依存する。
- (3) 異材接合部の評価では、接合面の反射率、欠陥面積率および位相の反転を考慮する必要がある。

文献

- 1) 山本、田村、小野沢；*鑄造工学*,70-12(1998)866.
- 2) 田村、小野沢；*溶接学会講演概要*,60(1997)180.
- 3) 杉山、他2名；*溶接学会講演概要*,69(2001)282.
- 4) L.N.Ermolov；*Non-destructive Testing*,(1972)87.
- 5) 飯田、他4名；*トライボロジスト*,37-1(1992)69.
- 6) 小野沢、他4名；*機論(C編)*,65-640(1999)4767.
- 7) J.M.Baik and R.B.Thompson；*Nondestructive Evaluation*,4-3/4(1984)177.

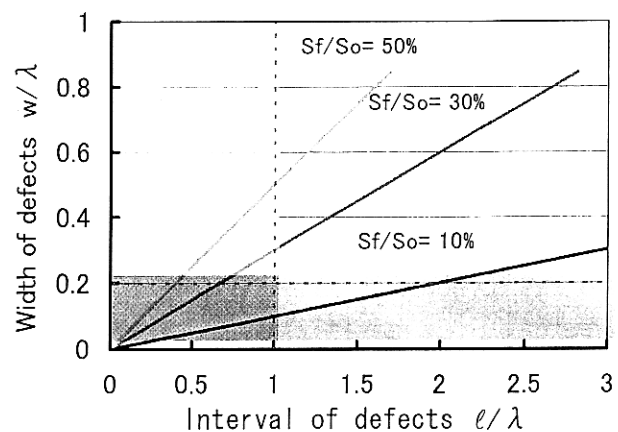


Fig. 5 Relation of width of defects w/λ to interval of defects l/λ .