

619 50MHz 超音波探触子を用いた後方散乱波ウェーブレット解析による材料欠陥評価

Void Evaluation by Wavelet Analysis of Scattering Ultrasonic Wave Using Transducer of 50MHz

○正 西野 精一 (富山大) 宮永 浩司 (富山大院) 正 塩澤 和章 (富山大)
新甚 博之 (北陸電力) 正 林 義忠 (北陸電力)

Seiichi NISHINO, Kazuaki SHIOZAWA, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555
Hiroyuki SHINJIN, Yoshitada HAYASHI, Hokuriku Electric Power Company, Hisakata-machi, Toyama 930-8686

Key Words: Non-destructive Evaluation, Ultrasonic, Wavelet, Void Density, Sintered Material

1. 緒言

超音波を利用した欠陥評価法は、材料底面からの反射波から得られる音速や減衰率を利用する方法が多く提案されている。これらの方法は超音波が通過した領域に存在する平均的な欠陥密度等の情報を評価するものである。一方、実機強度部材で発生する欠陥は応力集中部や溶接部近傍等に局所的に発生するため、信頼性の高い損傷評価のためには、欠陥密度の分布に関する情報も含んだ欠陥評価法の検討が必要と考えられる。

著者らはこれまでに、材料内部の欠陥からの反射波である後方散乱波を時間-周波数解析(ウェーブレット解析)をすることによる欠陥密度分布の評価法について報告した¹⁾。しかしながら、前報で利用した 20MHz 振動子による超音波で対象とした欠陥は直径 10~30 μm 程度のものであり、より小さな欠陥の評価のためには、より波長の短い高周波の超音波を利用する必要がある。

本研究では、微小な欠陥密度の分布評価を目的に 50MHz の振動子を用いた後方散乱波ウェーブレット解析法の検討を行った。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材 本研究で用いた供試材は、表 1 に示す化学組成の Al-Si 合金粉末焼結材(相対密度約 99%)である。粉末の平均粒径は 85 μm であり、金属顕微鏡写真から求めた平均欠陥径が 2.22, 2.45, 3.22 μm の 3 種類の試験片を用いた。超音波計測に用いた試験片は直径 9mm, 長さ 8mm の円柱状のものである。また、欠陥が局所的に存在する状態を模擬するため、Al 押出材と Al-Si 粉末合金焼結材とを拡散接合した材料も用意した。

2.2 実験方法 後方散乱波の計測には 50MHz の焦点付縦波用探触子を用い、水浸法で行った。試験片から探触子までの距離は 4mm とし、超音波波形の計測はデジタルオシロスコープによりサンプリング間隔 1ns で行った。後方散乱波解析は、表面波および底面波の影響を避けるため、表面波計測時から 1100ns 後から底面波計測時の 200ns 前までの範囲で行った。また、ウェーブレット解析には時間-周波数解析に適している点から Gabor 関数を用いた。なお、焦点付探触子を用いた場合、超音波の強度は、材料表面からの距離 x と、材料中の焦点距離 MP との関係により変化する。本研究では別に行った実験から材料中の超音波強度を次式から求めた。

$$P/P_0 = 0.7027 \{MP / (MP - x)\}^{0.1369} \quad \dots(1)$$

ここで P は表面から x の距離における超音波強度であり、 P_0 は入射波の強度である。

3. 数値解析結果

向井らは試験片表面から x の距離に存在する散乱体からの後方散乱波の角周波数 ω の成分 $P(x, \omega)$ は次式で与えられる

Table 1 Chemical compositions of tested material (wt. %).

Si	Cu	Fe	Zn	Al
10.45	2.13	0.775	0.534	bal.

ことを報告している²⁾。

$$P(x, \omega) = D \cdot N \cdot P_0(\omega) \sqrt{\left(\frac{d\gamma}{d\Omega}\right)_{L,\pi}} \cdot \exp(-2\alpha x) \quad \dots(2)$$

ここで、 $P_0(\omega)$ は入射波の角周波数 ω の成分、 $d\gamma/d\Omega$ は欠陥の微分散乱断面積、 α は減衰率、 N は欠陥密度、 D は定数である。本研究では、欠陥形状を球状として後方散乱波に対する微分散乱断面積を求め、減衰率は欠陥による散乱と粒界散乱とを考慮して算出した³⁾。

式(2)に基づき種々の欠陥径 d と密度 N に対する後方散乱波の数値計算を行った例を図 1 に示す。図中、 N の値は単位体積当たりの欠陥数[個/ m^3]を示す。図より欠陥径及び密度の変化に対応して後方散乱波の強度及び周波数特性が変化するこがわかる。

後方散乱波の周波数解析結果から欠陥の直径および密度を推定するため、図 1 の面積として定義したノイズエネルギー及び重心周波数と欠陥径及び密度との関係について検討した。図 2 に種々の欠陥密度に対するノイズエネルギーと欠陥径との関係を示す。図よりノイズエネルギーは欠陥径の増加に伴い増加後減少し、距離 x によっても変化するこがわかる。ここでは、数値解析結果を図中の曲線で示すような正規分布曲線で近似し、欠陥径 d 及び密度 N 、距離 x とノイズエネルギー E との関係として次式を得た。

$$E = D \cdot N^{-2.089x+0.5558} \exp\left\{-\frac{(d - 1.018 \times 10^{-3} N^{-0.1668})^2}{25.81 \times 10^{-7} N^{-0.3334}} - 17.42x + 5.260\right\} \cdot \dots(3)$$

ここで、 D の値は実験結果との対応から 5.78×10^{-11} とした。

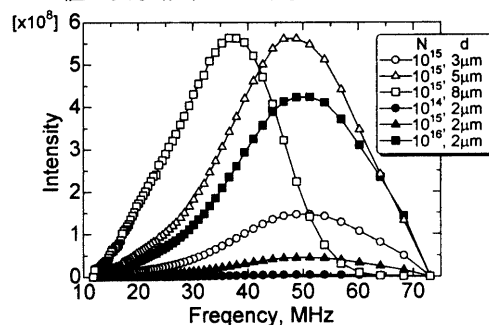


Fig.1 Numerical solution of scattering spectrum for various density and diameter of void.

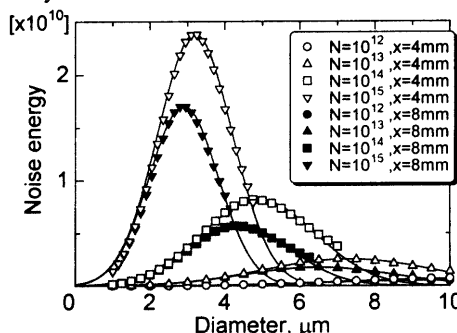


Fig.2 Relationship between noise energy and void diameter for various void density.

表面からの距離 $x=6\text{mm}$ における後方散乱波の重心周波数と欠陥径との関係を図3に示す。なお、重心周波数の距離 x に対する依存性はあまり認められなかった。図より重心周波数は欠陥径の増加に伴い低下することがわかる。ここでは、後方散乱波の重心周波数と表面波のそれとの差 ΔG と欠陥径 d 及び密度 N との関係を次式で近似した。

$$\Delta G = 33.75 \times 10^{12} N^{0.608} d^4 \quad \dots(4)$$

なお、式(3)及び(4)を用いて、ノイズエネルギー E 、重心周波数 G から欠陥径と欠陥密度の推定が可能であるが、近似精度の関係から適用範囲は限定されており、例えば、欠陥径 d が $2\mu\text{m}$ の場合は欠陥密度 N が約 $10^{13} \sim 10^{16}$ 個/ m^3 の範囲で推定可能である。

4. 実験結果および考察

4.1 後方散乱波ウェーブレット解析結果 図4に実験で得られた後方散乱波と同波形のウェーブレット解析で得られた各時間における Scale とウェーブレット係数との関係を示す。ここで、Scale とウェーブレット係数との関係は、周波数と強度との関係に対応する。図より、後方散乱波の周波数特性が時間により変化していることがわかる。

後方散乱波のウェーブレット変換結果から式(3)及び式(4)により求めた表面からの距離 x に対する欠陥径及び相対密度の推定結果を図5に示す。図中の実線はそれぞれ金属顕微鏡写真及びアルキメデス法で求めた実測値である。図より推定した欠陥径及び相対密度の値は表面からの距離により変動がみられる。これは欠陥の存在が深さに異なることを反映していると考えられる。図中実線で示した実測値は推定値のほぼ平均的な値となっており、推定は妥当なものであると考えられる。

4.2 拡散接合材の後方散乱波ウェーブレット解析結果

図6にAl押し出し材とAl-Si焼結材とを拡散接合した材料から得られた後方散乱波のウェーブレット解析結果を示す。図より欠陥の存在しないAl材部では後方散乱波はほとんど計測されず、Al-Si焼結材部では大きな後方散乱波が生じていることがわかる。Al-Si焼結材部の後方散乱波のウェーブレット

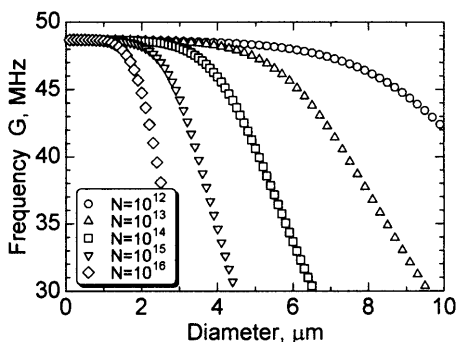


Fig.3 Relationship between center frequency of scattering ultrasonic and void diameter.

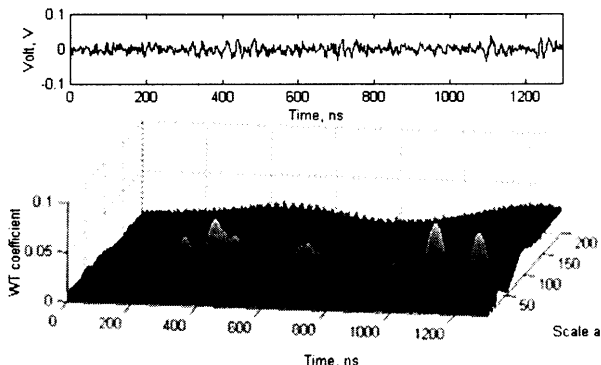


Fig.4 Example of scattering ultrasonic and the result of wavelet transformation (99.22%, $d=3.22\mu\text{m}$).

ット解析結果から推定した欠陥径及び欠陥密度と深さとの関係を図7に示す。図より、Al-Si焼結材部での推定値の平均的な値と実測値とはほぼ対応していることがわかる。従って、 $2\mu\text{m}$ 程度の欠陥が局所的に存在する材料の欠陥分布評価にも本方法が有効であると思われる。

結言省略

参考文献

- (1) 西野, ほか5名, 2000年度年次大会講演論文集 Vol.Ⅲ, (2000), 309-310
- (2) 向井, ほか4名, 日本非破壊検査協会 平成7年度秋季大会講演概要集, (1995), 129-134
- (3) 向井, ほか1名, 工業材料, 42(1994), 126-131

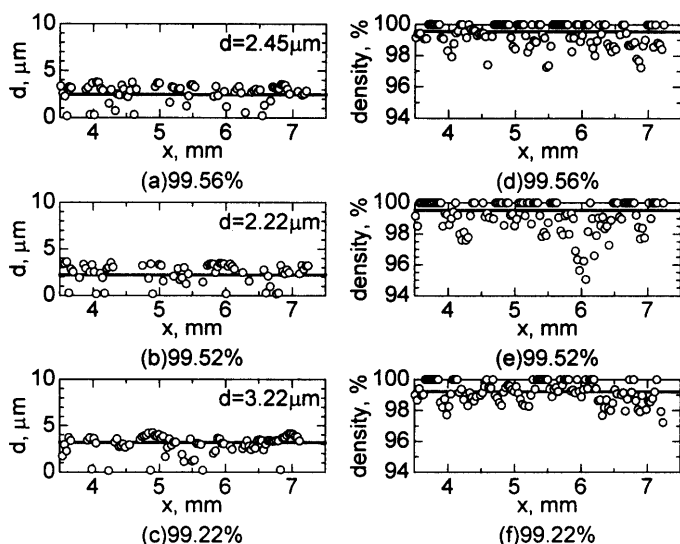


Fig.5 Void diameter and density estimated with wavelet analysis of scattering ultrasonic of sintered materials.

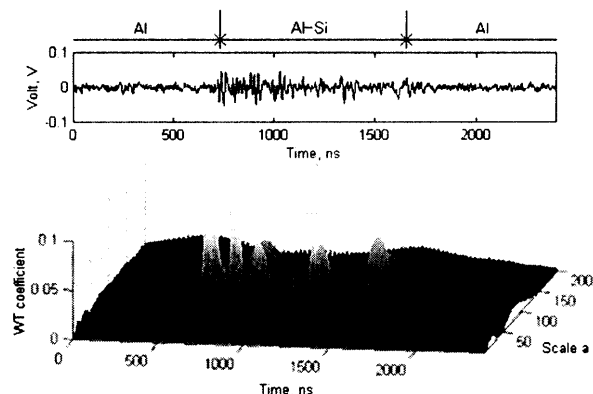


Fig.6 Scattering ultrasonic and the result of wavelet transformation of diffusion-welded materials.

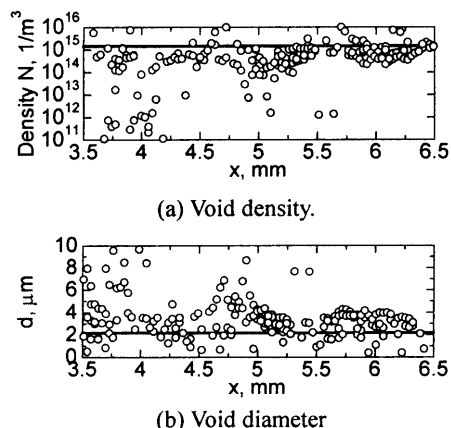


Fig.7 Void density and diameter estimated with wavelet analysis of scattering ultrasonic of diffusion-welded material.