

超音波後方散乱波のウェーブレット解析による材料欠陥評価*

西野 精一^{*1}, 塩澤 和章^{*1}, 宮永 浩二^{*2}
新 甚博之^{*3}, 川上 智毅^{*3}, 林 義忠^{*3}

Evaluation of Small Defects by Wavelet Analysis of Scattering Ultrasonic

Seiichi NISHINO^{*4}, Kazuaki SHIOZAWA, Kouzi MIYANAGA,
Hiroyuki SHINJIN, Tomoki KAWAKAMI and Yoshitada HAYASHI^{*4} Department of Mechanical and Intellectual Systems Engineering, Toyama University,
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

Nondestructive evaluation method of the density and mean diameter of small defects in the material using wavelet analysis of scattering ultrasonic waves was developed. The relationship between scattering ultrasonic frequency characteristics (noise energy and center of the frequency) and defects characteristics (diameter and volume density) was determined by numerical calculations. Scattering ultrasonic was detected using 50 MHz focused transducer for Al-Si sintered materials; relative density were 99.56%, 99.52% and 99.22%, mean pore diameter were about 2 μm . From the experimental results, it was found that the defects characteristics can be evaluated from the wavelet analysis of scattering ultrasonic.

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

1. 緒言

高温強度部材の信頼性評価のためクリープキャビティ等の材料内部の欠陥の非破壊評価が重要な課題とされている⁽¹⁾。中でも超音波法は材料内部の欠陥や損傷を非破壊的に評価できる有力な方法として研究、開発が行われている。従来、超音波を利用した欠陥評価法としては、材料底面からの反射波の解析により得られる音速や減衰率、周波数解析結果等を利用する方法^{(2),(3)}や、材料内部の欠陥からの後方散乱波を周波数解析して求めたノイズエネルギー等をパラメータとする方法^{(4),(5)}が提案されている。これらの方法は超音波が通過した領域の平均的な欠陥密度等の情報を得るというものである。実際の構造物の場合、欠陥が存在または発生する箇所は溶接部や応力集中部等であるため、欠陥が局所的に存在したり、分布が不均一であることが多い。従って、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も必要であると考えられる。ウェーブレット解析は時間的情報を失うことなく周波数解析を行うことができる信号処理方法であり、本方法を超音波解析に利用することにより欠陥密度等の分布を考慮した評価の可能性があると考えられる。

本研究では超音波の後方散乱波をウェーブレット解析することによる欠陥評価法の開発を目的に、数値解析により平均欠陥直径および密度と後方散乱波の周波数特性の関係を求め、同関係に基づく粉末焼結体の評価について検討した。

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合金粉末焼結体である。粉末の平均粒径は85 μm であり、ホットプレスにより表2に示した相対密度99.56%から99.22%の3種類の供試材を用意した。各供試材には図1に示すような直径2 μm 程度の欠陥が存在している。表1に示した相対密度 ρ はアルキメデス法で測定した値であり、欠陥の平均直径 d と体積密度 N (単位体積当たりの欠陥数)は、各材の断面の走査型電子顕微鏡写真(0.1 mm^2)を画像処理することにより求めた。超音波計測に用いた試験片形状は直径9mm、長さ10mmの円柱状のものである。また、欠陥密度が局所的に存在する状態を模擬するため、欠陥を有する直径9mm、長さ3.4mmのAl-Si粉末焼結材料(相対密度99.21%)を工業用純Al(直径9mm長さ3.2mm)ではさんだ状態で拡散接合した試験片も実験に供した。なお、拡散接合は接合面を鏡面状に研磨後、温度573K、圧縮応力10MPaの条件で行った。

2.2 実験方法 後方散乱波の計測は50MHzの焦点付き縦波用探触子を用いて水浸法で行った。振

* 原稿受付 2004年5月20日。

^{*1} 正員、富山大学工学部(〒930-8555 富山市五福3190)。^{*2} 富山大学大学院 [現:(株)コスモサミット]。^{*3} 北陸電力(株)(〒930-0848 富山市久方町2-54)。

E-mail: snishino@eng.toyama-u.ac.jp

動子と試験片表面との距離を 4mm とし、超音波波形の計測はデジタルオシロスコープを用いサンプリング間隔 1ns で行った。後方散乱波解析は、表面反射波及び底面反射波の影響を避けるため、表面反射波計測時の 1000ns 後から底面反射波計測時の 100ns 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一周波数解析に適している点から Gabor 関数を用いた⁽⁶⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 後方散乱波の数値解析結果 向井ら^{(7),(8)}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としている。

$$P(x, \omega) = D \cdot P_0(\omega) \sqrt{\left(\frac{d\gamma}{d\Omega}\right)_{L\pi}} \cdot \exp(-2\alpha x) \dots (1)$$

ここで、 $P_0(\omega)$ は入射波の角周波数 ω の成分、 $d\gamma/d\Omega$ は微分散乱断面積、 α は減衰率、 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^{(8),(9)}。なお、式(1)では後方散乱波が他の欠陥で多重散乱することにより発生する散乱波については考慮していない。

式(1)に基づき種々の欠陥直径 d と欠陥体積密度 N に対する後方散乱波の数値計算を行った例を図 2 に示す。なお、数値計算は $D=1$ として行った。図より欠陥直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とがわかる。

後方散乱波の周波数解析結果から欠陥直径及び体

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

Si	Cu	Fe	Zn	Al
10.45	2.13	0.775	0.534	bal.

Table 2 Relative density, mean pore diameter and volume density of sintered Al-Si alloy.

No.	Relative density ρ (%)	Mean pore diameter d (μm)	Volume density N (m^{-3})
A	99.56	2.45	5.71×10^{14}
B	99.52	2.22	5.38×10^{14}
C	99.22	3.22	4.46×10^{14}

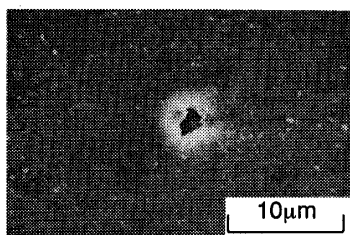


Fig.1 Typical example of pore in the material (99.52%).

ラメータとして同図の面積として定義したノイズエネルギーおよび重心周波数と欠陥直径及び密度との関係について検討した。

図 3 に種々の欠陥密度に対するノイズエネルギーと欠陥直径との関係を示す。図よりノイズエネルギーは欠陥直径の増加に伴い増加後減少することがわかる。これは、欠陥直径の増加に伴う散乱断面積の増加と減衰率の増加の重畳によるものである。ここでは、ノイズエネルギーと欠陥直径との関係を図中の曲線で示すような次式の正規分布曲線で近似した。

$$E = A \exp\left(-\frac{(d-B)^2}{C}\right) \dots (2)$$

ここで、 E はノイズエネルギー、 d は欠陥直径、 A, B, C は係数である。

図 4 に式(2)による近似で得られた深さ $x=5, 6, 7, 8\text{mm}$ からの各後方散乱波に対する係数 A, B, C と欠陥体積密度 N との関係を示す。図より、いずれの係数も両対数線図上で直線関係を示すことがわかる。また、係数 A は x に依存して変化しているが、 B と C は x の依存性は認められず、次式で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} B &= 1.02 \times 10^{-3} N^{-0.167} \\ C &= 2.59 \times 10^{-7} N^{-0.333} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

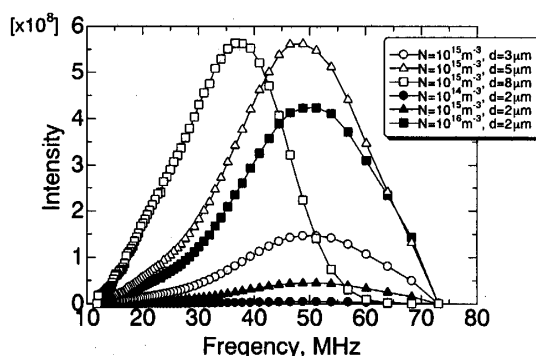


Fig.2 Numerical solution of the scattering spectrum for various density and diameter of pore.

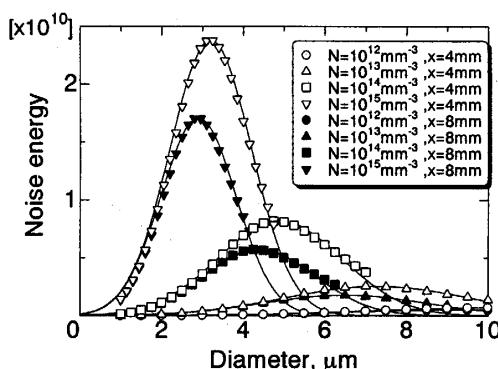


Fig.3 Relationship between noise energy and pore diameter of scattering ultrasonic.

係数 A と欠陥密度 N の関係を次式で近似した際の係数 a および指数 b と x との関係を図5に示す。

$$A = e^a x^b \dots\dots\dots (4)$$

図より係数 a および b と N との間には直線関係が認められ、それぞれを近似することにより次式を得た。

$$\left. \begin{aligned} a &= -17.42x + 5.26 \\ b &= -2.09x + 0.556 \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

以上より、式(2)に式(3),(4),(5)を代入することにより

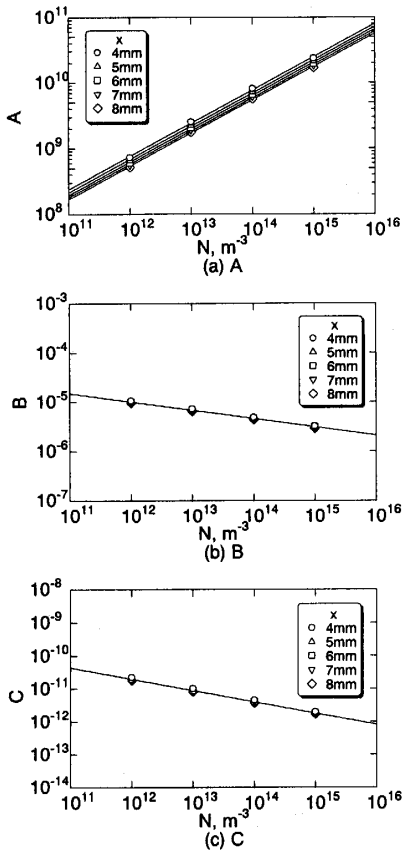


Fig.4 Relationship between coefficient A, B, C and volume density of pore, N .

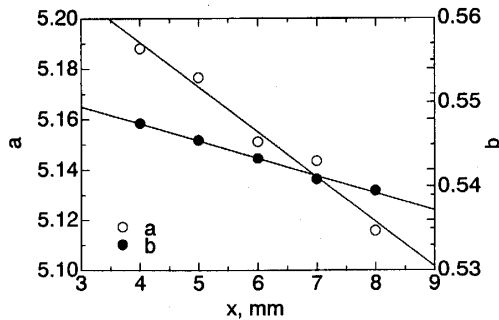


Fig.5 Relationship between coefficient a, b and distance from specimen surface, x .

ノイズエネルギー E と欠陥密度 N 並びに欠陥直径 d との関係は次式で表すことができる。

$$E = DN^{-2.09x+0.556} \exp \left\{ \frac{-(d - 1.02 \times 10^{-3} N^{-0.167})^2}{2.59 \times 10^{-7} N^{-0.333}} - 17.42x + 5.26 \right\} \dots\dots (6)$$

ここで、 D の値は実験結果との対応から 5.64×10^{-11} とした。

一方、後方散乱波の重心周波数は欠陥直径の増加に伴い低下した。図6に後方散乱波の重心周波数と表面反射波のそれとの差 ΔG と欠陥直径との関係を示す。図より両者は両対数グラフ上ではほぼ直線関係にあることから、 ΔG と欠陥直径 d および N との関係を次式で近似した。

$$\Delta G = 33.75 \times 10^{12} N^{0.608} d^4 \dots\dots (7)$$

以上より、後方散乱波を周波数解析することにより得られるノイズエネルギーと重心周波数から式(6)と式(7)より欠陥の直径や体積密度の推定が可能である。なお、式(6)および式(7)は数値解析結果の近似式

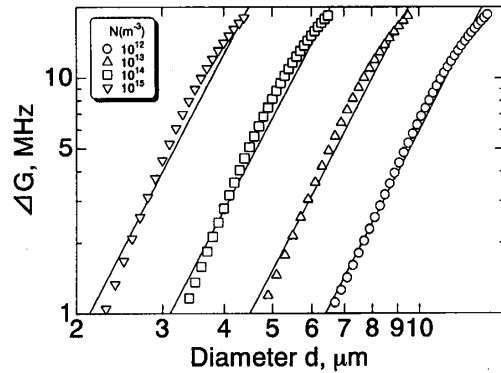


Fig.6 Relationship between variation of center frequency of scattering ultrasonic and pore diameter for various pore density.

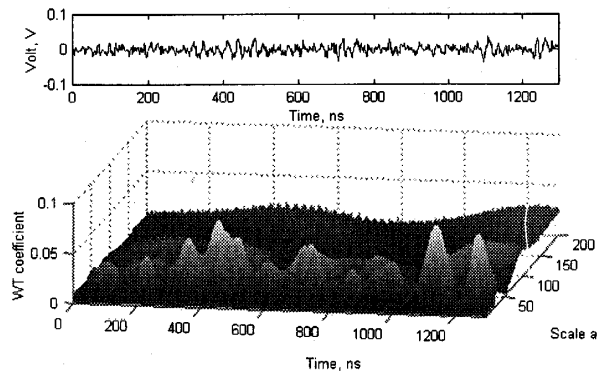


Fig.7 Example of scattering ultrasonic waveform and the result of wavelet transformation of sintered material (99.52%).

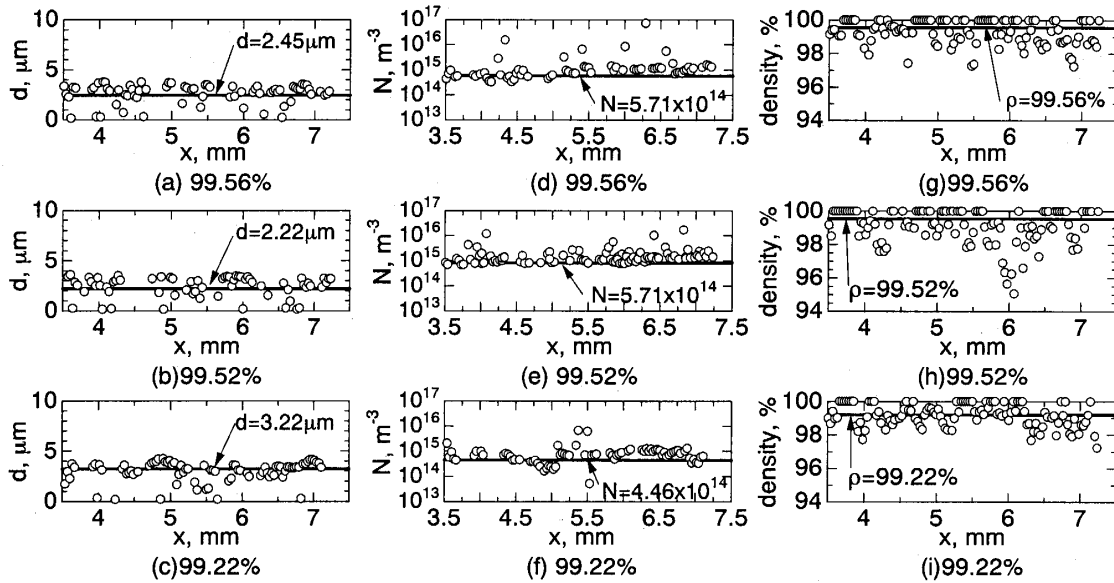


Fig.8 Relationship between diameter, volume density relative density and distance from specimen surface for various relative density.

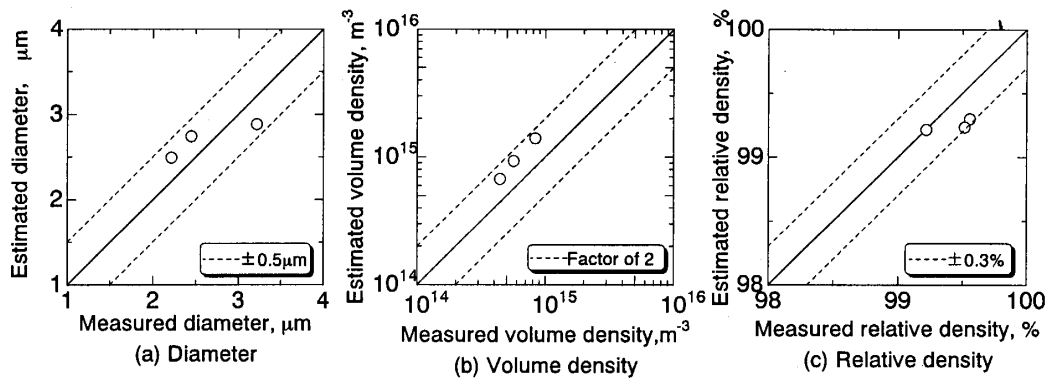


Fig.9 Comparison between estimated value and measured value.

であり近似精度は欠陥直径と欠陥体積密度の組み合わせにより変化する。式(6)および式(7)の有効範囲を欠陥直径と欠陥体積密度に対する近似精度が $\pm 20\%$ 以下の範囲とした場合、欠陥直径 $1\sim 10\mu\text{m}$ における有効範囲は相対密度で $99\%\sim 99.99\%$ となることを確認している。

3.2 後方散乱波解析ウェーブレット解析結果 図7にAl-Si粉末焼結材から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の例を示す。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は時間、すなわち表面からの深さにより変化しており、スケール $20\sim 30$ の範囲(周波数 $50\sim 35\text{MHz}$ に相当)でウェーブレット係数の大きい領域が認められる。

ウェーブレット変換結果から得られたノイズエネ

ルギと重心周波数を式(6)と式(7)に代入して求めた試験片表面からの各深さに対する欠陥直径、欠陥密度並びに両者から算出した相対密度を図8に示す。図中の数値および実線は断面写真の画像処理により求めた欠陥の平均径と欠陥密度並びにアルキメデス法で求めた相対密度を示す。図より、後方散乱波のウェーブレット解析で得られた欠陥直径や欠陥体積密度並びに相対密度は深さにより変動しているがその平均値は画像処理やアルキメデス法で求めた実測値とほぼ同程度であることがわかる。後方散乱波より求めた値が大きく変動している原因は、推定に用いた式(6)と式(7)が単一の直径の欠陥が均一に分布している状態に対して求めたものであるのに対して、実際の材料内部の欠陥には直径の分布や欠陥密度の不均一性が存在するためであると推察される。

図9に各供試材で得られた後方散乱波のウェーブレット解析結果から求めた平均の欠陥直径、欠陥密

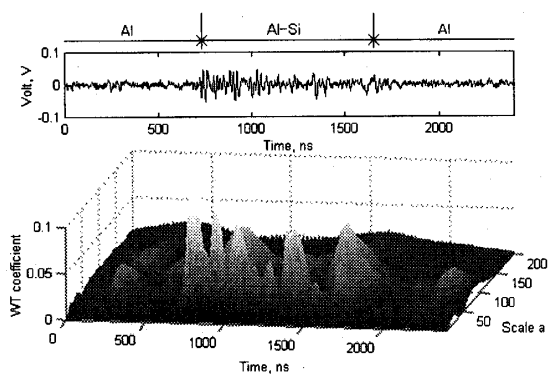


Fig.10 Scattering wave and wavelet transformation for diffusion bonded sintered material.

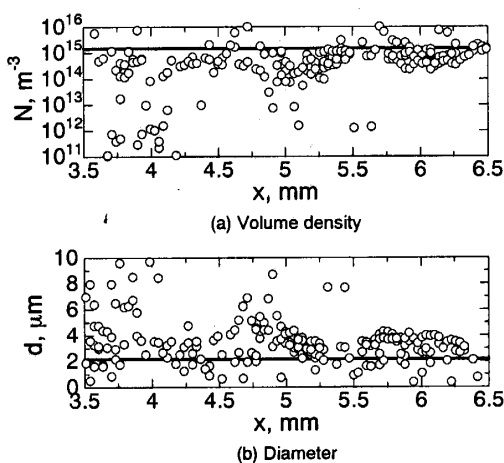


Fig.11 Valiation of pore diameter, volumedensity and distance from specimen surface for diffusion bonded sintered material.

度および両者から算出した相対密度と実測値との比較を示す。図より、欠陥直径の推定値と実測値との差は $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下であり、欠陥密度の推定値は係数2の範囲内で推定が可能であり、相対密度は $\pm 0.3\%$ 程度の精度で実測値と対応していることがわかる。すなわち、後方散乱波のウェーブレット解析により直径 $2\mu\text{m}$ 程度の欠陥の高精度の評価が可能であると考えられる。

3.3 後方散乱波解析ウェーブレット解析による欠陥分布評価 欠陥の存在しないAl材と欠陥を有するAl-Si粉末焼結体を拡散接合した材料を用いて超音波後方散乱波による欠陥密度分布評価について検討した。

図10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結果を示す。図より後方散乱波は欠陥の存在するAl-Si粉末焼結体の部分で多く発生しており、それに伴いその箇所でのウェーブレット係数も大きな値を示している。なお、同図の約1750nsで認められるAl材とAl-Si粉末焼結体の拡散接合界面からの散乱波の大きさがと約750ns付近のそれと比

較して小さい理由は、散乱後に粉末焼結材中を通過する際に減衰するためであると考えられる。

後方散乱波が認められたAl-Si粉末焼結体の箇所のウェーブレット解析結果を用いてノイズエネルギーと重心周波数から欠陥直径及び密度の推定を行った結果を図11に示す。図中の実線は画像処理により求めた欠陥直径と体積密度の実測値を示す。図より、推定結果は実測値と良い対応を示すことがわかる。従って、超音波後方散乱波をウェーブレット解析することにより実機の応力集中部や溶接部等で局所的に存在する欠陥の評価も可能と考えられる。

4. 結 言

超音波後方散乱波のウェーブレット解析により、微小な欠陥を評価する方法を開発するため、後方散乱波の数値解析とそれに基づき50MHz焦点付き探触子を用いたAl-Si合金粉末焼結体の欠陥評価を行い、以下の結論を得た。

(1) 数値解析の結果、後方散乱波のノイズエネルギー E と重心周波数の変化量 ΔG から欠陥の直径 d 、欠陥密度 N を推定する式を導いた。

$$E = DN^{-2.09x+0.556} \exp \left\{ \frac{-(d - 1.02 \times 10^{-3} N^{-0.167})^2}{2.59 \times 10^{-7} N^{-0.333}} - 17.42x + 5.26 \right\} \dots (6)$$

$$\Delta G = 33.75 \times 10^{12} N^{0.608} d^4 \dots (7)$$

(2) Al-Si合金粉末焼結材の後方散乱波ウェーブレット解析で得られるノイズエネルギーと重心周波数を用いて推定した欠陥直径、欠陥体積密度及び相対密度は実測値とよい対応が認められた。

(3) Al-Si粉末焼結材とAl押し材を拡散接合した材料の計測で、後方散乱波のウェーブレット解析により局所的に欠陥が存在する材料の欠陥評価が可能であることが明らかとなった。

文 献

- (1) 例えば動力プラント・構造物の余寿命評価技術, 日本機械学会編, 技報堂出版, (1992), 46-53.
- (2) 岡崎正和, 橋本昌光, 佐田隆, 材料, **41-471** (1992), 1729-1735.
- (3) 高坪純治, 山本重之, 機論, **57-536, A** (1991), 796-803.
- (4) 中代雅士, 米山弘志, 芝田三郎, 大友暁, 日本學術振興会耐熱金属材料第123委員会研究報告, **30-2** (1989), 131-143.
- (5) 井上祐嗣, 岸本喜久雄, 中西智明, 堀讓治, 非破壊検査, **46-3** (1997), 206-213.
- (6) 向井一弘, 今中拓一, 工業材料, **42-15** (1994), 126-131.
- (7) 向井一弘, 吉村剛, 末治純, 今中拓一, 塩屋政博, 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
- (8) E.Domany, J.A.Kumhamsl, J. of App. Phys., 48-7 (1997), 2804-2811
- (9) 向井一弘, 塩屋政博, 吉村剛, 今中拓一, 日本非破壊検査協会平成7年度春季大会講演概要集, (1995), 125-130
-