電磁超音波共鳴法の減衰係数測定による
HIP 法で作製された SUS 304 のボイド検出*西田 秀高^{*1}, 山口 寛^{*2}, 吉田 政司^{*3}Detection of Micro-Voids by Evaluation for Attenuation Coefficient of
Ultrasonic Waves Using Electromagnetic Acoustic Resonance Method
on SUS 304 Fabricated by Hot Isostatic PressHidetaka NISHIDA^{*4}, Hiroshi YAMAGUCHI and Masashi YOSHIDA^{**} The Chugoku Electric Power Co., Inc. Technical Research Center,
3-9-1 Kagamiyama, Higashihiroshima City, 739-0046 Japan

It was evaluated creep damage by Electromagnetic Acoustic Resonance (EMAR), Noise Energy Method and Supersonic Spectroscopy (First Moment) Method on SUS 304 fabricated by Hot Isostatic Press (HIP) at 1 050°C. Attenuation coefficient of electromagnetically excited acoustic wave in HIP has been investigated with frequency between 1.1 MHz and 5.4 MHz. Attenuation coefficient of the shear wave of as low as $2.5 \times 10^{-4}/\mu\text{s}$ at 1.1 MHz has been detected by reducing diffraction loss and the loss due to transmission of the ultrasonic wave to the electromagnetic acoustic transducer through the mechanical contact. The attenuation coefficient increases in proportion with frequency up to 5.4 MHz on the samples (specimen) fabricated with the pressure of 170 MPa. On the other hand, on the samples (specimen) fabricated with pressure lower than 80 MPa, the attenuation coefficient increases rapidly above 4 MHz. The void area fraction has been found to increase as the pressure decreases, which may be responsible for the rapid increment of the ultrasonic attenuation of the samples (specimen) fabricated with pressure lower than 80 MPa. As a result, it was clear that EMAR is more sensitive one to detect creep voids than the other methods. So We hope it is possible to use the actual facilities in future.

Key Words: Ultrasonic Attenuation, Electromagnetic Acoustic Resonance (EMAR), SUS 304, Shear Wave, Diffraction Loss, Thermo Elastic Dissipation, Hot Isostatic Press, Creep Voids

1. 緒 言

現在, 全国で運転時間が 10 万時間を超えている火力発電所が半数を超え, 経年劣化の状態を適確に把握し適切な補修を行う必要性が高くなっており, その評価技術がますます重要になってきている。近年, 著者らの研究⁽¹⁾によりボイラ高温部溶接継手部の中には肉厚内部からクリープ損傷するものもあり, 外表面からのみの評価では寿命末期にならないと損傷がわからず, 信頼性確保の面から内部にあるマイクロオダの損傷検出をする必要性が増してきている。

しかし現状, 表面の劣化状態はレプリカ法やクリープ損傷診断システム⁽²⁾等により把握できるが, 溶接継手内部の状態はミリオダのき劣把握はできるもののクリープ等のマイクロオダの劣化は精度良く評価でき

ていない。最近, 電磁超音波共鳴法⁽³⁾(EMAR)によりクリープ損傷評価可能⁽⁴⁾等の文献が出ているが, 対象がクリープボイドの出にくい母材であり, クリープボイドを対象とした検出は行われていない。

元来, 超音波の減衰係数は金属材料の結晶粒径や, 転位密度などによって変化するため, 超音波減衰を測定することによって, これらのマイクロオダの物理量を非破壊的に測定することが可能であることか知られている^{(5)~(7)}。従来から圧電素子を用いた超音波の減衰測定が行われているが, その場合測定しようとしている試料内の超音波減衰に加えて, 探触子や音響結合剤内の減衰が同時に観測される。この減衰は探触子の圧着状態に敏感に依存するために, 正確な補正を行うことは困難である⁽⁸⁾。これに対し電磁超音波共鳴 (Electromagnetic Acoustic Resonance: EMAR) 法では探触子を試料に接触させずに, 超音波を励起・検出できる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。このため, EMAR 法による減衰測定では圧電素子を用いた減衰測定の場合とは異なって, 探触子や音響結合剤内の音波の減衰を考慮する必要がなく, 試料内の減衰係数を精密に測定することが可能である。しかしながら, EMAR 法では定在波の減衰

* 原稿受付 1998 年 12 月 24 日。

^{*1} 正員, 中国電力(株)技術研究センター (〒739-0046 東広島市鏡山 3-9-1)。^{*2} 中国電力(株)技術研究センター。^{*3} 住友金属テクノロジー(株) (〒660-0891 尼崎市扶桑町 1-8)。

E mail: 455084@pnet.energia.co.jp

を測定しているため、試料内部での超音波減衰を求めためには超音波が試料全体に拡がっていく効果を補正する必要がある。また、EMAR 法では試料と探触子の非接触測定が可能であるが、現実には探触子を試料に接触させて測定が行われており、接触による減衰が起きる。

今回、著者らは高温等方加圧(Hot Isostatic Press: HIP)処理により、人工ボイドが含まれた SUS 304 試験材を作製し⁽¹¹⁾、上述した超音波の拡散効果と探触子の接触による減衰を押さえることによって、試料内部のマイクロオーダの劣化つまり人工的に造られたボイドによる超音波減衰を測定することを試みた。その結果、EMAR 法は現在実機使用されている超音波ノイズエネルギー法⁽¹²⁾や超音波スペクトロスコピー法(一次モーメント)⁽¹³⁾に比べてボイドそのものに対する感度が高いことが確認でき、今後溶接継手部のクリープ損傷診断に適用の可能性があることがわかった。

2. 試料作製

SUS 304 試験片を HIP 処理により作製した。SUS 304 粉末には平均粒径が 10 μm (最大粒径 44 μm 以下)のものをを用いた。作製した試料のサイズは $\phi 40\text{ mm} \times 10\text{ t}$ で HIP 処理温度は 1050°C で保持時間は 2 時間、プレス圧は試料 A, B, C, D に対して、それぞれ 20 MPa, 40 MPa, 80 MPa, および 170 MPa である。また EMAR 測定は中央部から $10 \times 20 \times 10\text{ mm}^3$ の形状に試験片を切り出し、表面をバフ研磨によって凹凸が 1000 Å (0.1 μm) 以下になるまで研磨した試料で行った。

図 1 は HIP 処理試料をバフ研磨した後、王水によって表面をエッチングした試料の SEM 像である。試

Fig. 1 SEM images of SUS 304 fabricated by hot isostatic press with pressure of (a) 20 MPa, (b) 40 MPa, (c) 80 MPa and (d) 170 MPa

料は、いずれも、粒径が 10 μm 前後の細かい結晶粒からなっている。HIP 処理圧が最も小さい試料 A では、直径数ミクロンの多数のボイドがみえる。このボイドは、エッチングを行う前にも観測され、HIP 処理時にできるすきまであると考えられる。HIP 処理時の圧力がふえるにつれて、ボイドのサイズが小さくなり、また密度も小さくなっていく。なお HIP 処理試料を切り出して試料内部の SEM 観察も行ったが表面と内部とで、結晶粒径やボイドのサイズ、密度には違いは見られなかった。

表 1 には試料面からレプリカを採取し、SEM 像を画像解析処理することによってボイド面積率を求めた結果を示す。ボイド面積率の算出は、試験片中央部から 3 領域(0.3 mm²/1 領域)を抽出しその平均値をとっている。HIP 処理時の圧力が高くなるにつれてボイド面積率が 0.21, 0.16, 0.13, 0.04% と小さくなっているのがわかる。

3. 各ボイド検出手法による測定

3.1 EMAR 法による測定 図 2 に超音波の励起に使用する電磁超音波探触子(Electromagnetic Acoustic Transducer: EMAT)の構造を示す。EMAT はトラック状に巻かれたコイルと一対の永久磁石から構成されている。コイルに高周波電流を流すと試料表面に渦電流が励起され、永久磁石が作る静磁場との相互作用によってローレンツ力が発生する。ローレンツ力は表面に平行な方向に働き横波の起震源となる。受信原理は発信の逆過程に従う。

Table 1 Void area fraction of each samples

SampleNO.	Pressure(MPa)	Void Area Fraction (%)
A	20	0.21
B	40	0.16
C	80	0.13
D	170	0.04

Fig. 2 Lorentz force mechanism for shear-wave excitation by electromagnetic acoustic transducer (EMAT)

次に EMAT によって励起された、板厚方向に伝搬する超音波を考える。この超音波は板の両面で反射を繰返し多重エコーを形成する。超音波の周波数を走査すると、半波長が板厚の整数倍と等しくなったときに、すべての反射波の位相が一致する。このとき、多重エコーは共鳴を起こし、振幅スペクトルがピークを示す。この周波数を共鳴周波数と呼ぶ。 n 次の共鳴周波数 f_n は音速 c と板厚 d を用いて次式で与えられる。

$$f_n = nc/2d \dots\dots\dots (1)$$

共鳴周波数から音速あるいは板厚を測定する方法を共鳴法と呼ぶ。共鳴法はとくに薄板の音速測定に有効であるが、従来の圧電探触子を用いた共鳴法では探触子-音響結合剤-試料といった複合共鳴モードとなるために複雑な補正が要求される。しかし探触子に非接触測定が可能な EMAT を用いることで試料内だけの共鳴スペクトルが得られる。これが電磁超音波共鳴 (EMAR) 法である。

EMAR 法では共鳴波を励起した後、励起源を止め共鳴波強度の時間変化を測定することによって超音波の減衰係数を測定することが可能である。EMAR 法を用いた減衰測定におけるエネルギー損失の起源としては次の四つが考えられる。

- (1) 試料(固体)内の減衰
- (2) EMAT との接触による減衰
- (3) EMAT との電気-機械結合による損失
- (4) 超音波の回折による損失

(1) は、マイクロオーダーな起源による試料(固体)内部での超音波の減衰であり、今回測定しようとしているものである。詳細は「4. 考察」の章で述べる。

(2) は試料と EMAT との機械的な接触による超音波減衰である。電磁超音波法は原理的には、試料と EMAT が非接触で超音波の励起と検出をすることができるが、EMAT を空間的に支持する必要があるため、実際には試料上に EMAT を固定して測定している。そのために EMAT との接触による超音波減衰が避けられない。その場合でも EMAR 法では圧電素子の場合とは異なって、EMAT と試料の間の音響結合をとる必要がないので接触による超音波減衰を大幅に小さくすることが可能である。

(3) の電気-機械結合による超音波減衰は EMAT による超音波励起の逆過程でありこれによって超音波の検出を行っている。しかしこの過程によって超音波の減衰が起こる。電気-機械結合による減衰係数 a_e は荻ら⁽¹⁴⁾ によって求められており次式で与えられる。

$$a_e = sB_0^2/2r \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 B_0 は磁束密度、 r は密度、 s は電気伝導度で

ある。 $B_0=1.0$ T と仮定し SUS 304 の値として $s=1.4 \times 10^6$ [S/m]、 $r=7900$ kg/cm³ を用いると、 $a_e=1.0 \times 10^{-4}$ [1/μs] となる。

(4) の回折による損失は EMAT によって励起された共鳴波が試料全体に拡散していくための損失であり、損失の大きさは EMAT の有効面積と試料の面積の両方に依存する。荻たちは拡散による損失量を有限要素法を用いた計算から求めて、補正を行っているが、彼らの計算によれば、拡散による減衰は、減衰係数に換算して 1×10^{-2} [1/μs] オーダの大きな値⁽¹¹⁾ となる。今回の SUS 304 の場合には、求めようとしているマイクロオーダーの試料内部減衰係数は後で示すように 1×10^{-4} [1/μs] オーダの小さな量であり、回折損失をふくむ減衰曲線から回折の効果を数値的に補正して試料内部の損失を求めることは困難であった。そこで回折による損失を低減させるために、著者らは EMAT と接触する試料面の面積が EMAT の有効面積とほぼ同じ大きさになるように、試料を切断して測定を行った。

3・2 超音波ノイズエネルギー法による測定⁽¹²⁾

測定方法等詳細は文献⁽¹²⁾ によるが、今回使用した装置の仕様は、50 MHz のパルサ・レシーバ、20-40 MHz 周波数帯域のパワースペクトルアナライザ、デジタルオシロスコープ、広帯域探触子、パーソナルコンピュータで構成される。探触子は垂直探触子 (15 MHz) を使い、接触媒体は市販のミシン油を用い試験片中央部を測定した。

3・3 超音波スペクトロスコーピー法による測定⁽¹³⁾

測定方法等詳細は文献⁽¹³⁾ によるが、今回使用した装置の仕様は以下のとおりである。広域帯の超音波による水浸法を使用し、試験部に対して適度に細かいピッチで試験対象範囲の時間領域波形を採取した。そして表面エコーと底面エコーの間に現れる後方散乱波信号(特に今回は一次モーメントを適用)を分析してクリープ損傷評価を行った。

探触子；点集束形縦波探触子(公称周波数 10 MHz, 公称焦点距離 3 in, 実測焦点距離 104 mm, 振動子径 0.375 in)

測定範囲；試験片中央部

測定ピッチ；0.25 mm

解析パラメータ；一次モーメント

$$= \left(\int S(f) \cdot f df \right) / \left(\int S(f) df \right)$$

S ：後方散乱波の大きさ

f ：周波数

4. 実験結果

図3には、試料Dを $10 \times 20 \text{ mm}^2$ に切断後、励起周波数を1 MHzから5 MHzまで走査して、共鳴スペクトルを測定した結果を示す。黒丸印で示すように、等間隔にピークが現れている。これが、厚さ方向に進行する横波による共鳴ピークであり、ピークの間隔から音速を求めると、3150 m/sとなる。

図4に4.2 MHzの共鳴周数で減衰曲線を測定した結果を示す。図4(a)は切断前の $\phi 40 \times 10t$ の形状の試料Dの中央部にEMATをおいて減衰係数を測定した場合であり、図4(b)は同じ試料の中央部から $10 \times 20 \text{ mm}^2$ の形状を切り出した試料を用いて測定した結果である。いずれも周波数4.2 MHzの正弦波を200 μs の時間だけ発振させ(バースト波)で共鳴波を励起し、図4(a)では時間幅が20 μs のゲートで図4(b)では時間幅が50 μs のゲートで積分した超音波強度を、励起波を止めてからの時間に対してプロットしたものである。

図4(a)では、信号が急激に減衰し、約180 μs 後に強度が零になり、その後再び信号が現れている。この急激な減衰は、EMATによって励起された共鳴波が横方向に拡散していくためであり、また再び信号が現れるのは試料端部で反射した波が、中央部にもどってくるためであると考えられる。

超音波の減衰は減衰係数 a を用いて、次の指数関数で表すことができる。

$$I(t) = I_0 \exp(-at) \quad \dots\dots\dots (3)$$

図4(a)の実線は最初の急激な減衰領域を式(3)でフィッティングを行った結果である。得られた減衰係数は $1.4 \times 10^{-2}/\mu\text{s}$ である。一方、図4(b)から求められた減衰係数は $2.7 \times 10^{-3}/\mu\text{s}$ である。両者の差が、超音波の回折によるみかけの超音波減衰と考えられる。以後の実験結果は回折による影響を少なくするために、試料を $10 \times 20 \text{ mm}^2$ に切断した後に測定したものである。

図4(c)はEMATと試料の接触による超音波減衰を低減するため、EMAT上に面積が $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ で厚さが0.1 mmの紙のスペーサを置き、試料の中央部分を浮かした状態で減衰係数を測定した結果である。なお図4(a)と(b)のスペクトルはいずれも試料を両面テープを用いてEMAT上に固定させて測定したものである。図4(c)では減衰係数は $4 \times 10^{-4}/\mu\text{s}$ にまで小さくなっている。

図5(a), (b), (c), (d)および(e)は、それぞれ、1.1 MHz, 2.2 MHz, 3.6 MHz, 4.2 MHz, および5.4 MHzの周波数で、試料Dの超音波減衰係数を測定した結果を示す。周波数が大きくなるにつれて超音波が早く減衰することがわかる。

なお、図5(a)の減衰曲線では周期が180 μs の振動構造がみられるが、これは1.1 MHz近傍の周波数で板厚方向に進行する横波とは別の波が共鳴し、その波との干渉によるうねりが現れていると考える。

Fig. 3 Resonance pattern of electromagnetically excited ultrasonic wave on SUS 304 plate with thickness of 10 mm fabricated by hot isostatic press with pressure of 170 MPa

Fig. 4 Ring down curves of ultrasonic wave in SUS 304 with the shape of (a) $\phi 40 \times 10$ (b) $10 \times 20 \times 10$ and (c) $10 \times 20 \times 10$ measured by using EMAT with effective area of $10 \times 14 \text{ mm}^2$

図6は試料Dの減衰係数を周波数に対してプロットした結果である。黒丸印は実験値で、白丸印は式(2)より算出した電気-機械結合による損失 $1 \times 10^{-4}/\mu\text{s}$ を、補正した結果である。減衰係数は周波数に対してほぼ線形に変化しているが、電気-機械結合による損失を補正した場合には減衰係数は原点を通る直線上

Fig. 5 Ring down curves of ultrasonic wave in sample D with the shape $10 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$ measured by using EMAT with effective area of $10 \times 14 \text{ mm}^2$

Fig. 6 Frequency dependence of attenuation coefficient of sample D

に並んでいることがわかる。

図7は40 MPaの圧力でHIP処理を行った試料Aの減衰曲線を測定した結果である。図4(c)に示された同じ周波数における試料Dの超音波減衰と比較して、試料Aでは超音波が早く減衰していることがわかる。図8は試料A, B, C, Dの減衰係数を周波数に対してプロットした結果である。周波数が4 MHz以下では四つの試料の減衰係数の違いは小さいが、4 MHz以上では差が大きくなっており、またHIP圧力の小さいものほど減衰係数が大きくなっているのがわかる。

図9に周波数4.2, 4.4, 4.7 MHzをパラメータに、ポイド面積率と減衰係数の関係を示した。ポイド面積

Fig. 7 Ring down curves of ultrasonic wave in sample A with the shape $10 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$ measured by using EMAT with effective area of $10 \times 14 \text{ mm}^2$

Fig. 8 Frequency dependence of attenuation coefficient of samples A, B, C and D

率が大きくなると減衰係数も大きくなり、その直線近似の傾きは 4.7 MHz が最も大きい。また重相関係数 R^2 はいずれの周波数でも 0.9 以上あり相関は強い。

図 10 に EMAR(4.7 MHz)、超音波ノイズエネルギー法、超音波スペクトロスコピー法(一次モーメント)をパラメータにボイド面積率と減衰係数の関係を示した。なお、縦軸はサンプル D(ボイド面積率 0.04%)で規格化した。EMAR、ノイズエネルギー法はいずれも正の強い相関(0.8 以上)があるが、その直線近似の傾きは EMAR がノイズエネルギー法の 1.5 倍ある。なおスペクトロスコピー法(一次モーメント)はほとんど変化していなかった。

5. 考 察

固体内の超音波減衰の起源として熱弾性効果、ボイドによる散乱、粒界による散乱、および転位による散乱が考えられる。

$$a = a_{t-e} + a_{\text{void}} + a_{GB} + a_{\text{dis}} \quad (4)$$

熱弾性効果による減衰 a_{t-e} は、周波数 f に比例する吸収を与える⁽¹⁴⁾。

$$a_{t-e}(f) = a \times f \quad (5)$$

ここで、 a は定数である。

ボイドによる散乱はボイド半径の二乗に比例して大きくなることが知られている。周波数依存性は単純なべき乗では表されないが、低周波では小さく 5 MHz 付近から急激に大きくなることが前田たちの計算で示されている⁽¹⁵⁾。

粒界による減衰 $a_{GB}(f)$ は次式で与えられ、周波数の四乗に比例する⁽¹⁶⁾。

$$a_{GB}(f) = S \times D^3 \times f^4 \quad (6)$$

ここで、 S は散乱因子、 D は平均粒径である。Bhatia and Moore⁽¹⁶⁾ は鉄に対する S の値を $1.29 \times$

$10^{-10} \mu\text{s}^3/\mu\text{m}^3$ と見積もっている。この鉄の値を SUS 304 に代用し、図 1 に示した結果から平均粒径を $10 \mu\text{m}$ とすると、粒界散乱による減衰係数 $a_{GB}(f)$ は 5 MHz で $8 \times 10^{-5}/\mu\text{s}$ となる。これは、今回観測された 5 MHz での試料 D の減衰係数 $8 \times 10^{-4}/\mu\text{s}$ に比べて約 1 けた小さい値であり、粒界散乱の減衰への寄与は今回の実験では無視してよいであろう。

転位による減衰 $a_{\text{dis}}(f)$ は次式で与えられ、周波数の二乗に比例する⁽¹⁷⁾。

$$a_{\text{dis}}(f) = [16GBb^2/\pi^4 C^2] \lambda L^4 f^2 \quad (7)$$

G は、横弾性係数、 B は摩擦係数、 λ は転位密度、 L は転位ループ長さ、 b は転位の Gurgers vector で、 C は転位による張力である。

今回、図 7 に示したように試料 D では、減衰係数は周波数に比例することが明らかになったが、この減衰は周波数依存性から、熱弾性効果による減衰であると考えられる。一方、試料 A, B, C では 4 MHz より高周波数側で減衰が大きくなることが示された。高周波数側で減衰が大きくなる原因としては、転位とボイドによる散乱が考えられる。ところで、試料 D では、減衰が周波数に比例していることから、転位による減衰は無視できると考えられる。また試料 A, B, C, D はすべて HIP 処理で作製されているため、試料 A, B, C が試料 D に比べて、転位が多くなることは考えられず、転位による減衰はこれらの試料でも無視できる。一方、ボイド面積率は表 1 に示したように、HIP 処理時の圧力が低くなるにつれて大きくなっている。したがって HIP 処理時の圧力が下がるにつれて、超音波減衰が増大する原因としてはボイドによる散乱が考えられる。

またノイズエネルギー法やスペクトロスコピー法に

Fig. 9 Relation between attenuation coefficient and void area fraction in samples A, B, C and D

Fig. 10 Comparison EMAR method with the other ones evaluating creep damage in samples A, B, C and D

比べ直線近似の傾きが大きいことは、ボイドに対する感度が高いことを示している。

そこで高感度の理由を推測すると、他の 2 法が同一周波数に関しては超音波 1 回限りの情報(ある周波数の超音波を 1 回試料に打ち込んだときの散乱波や反射波の強さの情報)を使うに対し、EMAR は同一周波数の超音波が試料中を何度も往復する間の情報を使うため、たとえわずかな情報でも増幅され減衰係数の増加となって現れると考える。

6. 結 論

電磁波超音波共鳴法を用いて、HIP 法で作製した SUS 304 の減衰係数を 1.1 MHz から 5.4 MHz の範囲で測定した。超音波の回折による減衰を低減させるためには、試料を EMAT の有効面積と同じ大きさに切断することが有効であることがわかった。また、EMAT と試料の接触による減衰を低減させるために、スペーサをはさんで試料を EMAT 上に浮かし、減衰曲線の測定を行うことにより、HIP 処理時の圧力が 170 MPa の試料で周波数が 1.1 MHz の横波に対し、 $2.5 \times 10^{-4}/\mu\text{s}$ という小さな減衰係数を観測することができた。さらに、電気-機械結合による補正を行うと、減衰係数が周波数に比例して大きくなることがわかった。

これらの方法をボイド面積率の異なる HIP 材に適用すると、周波数 4 MHz 以上でボイド面積率が大きくなるにつれて減衰係数が大きくなり、それらの間に強い相関があることが示された。また同時に、現在使用されている超音波ノイズエネルギー法や超音波スペクトロスコピー法と比較し、今回の実験ではボイドに対する感度は EMAR のほうが高いことを確認した。

本研究で用いた試験片を切断して回折の影響をなくす方法は実機では用いることができない。しかし大面積の EMAT を用いて広い範囲に超音波を励起し、その中心の狭い領域の超音波減衰を小さな EMAT で検出するなどの工夫をすれば実機適用の可能性があると考える。

文 献

- (1) 西田秀高・ほか 5 名, 第 36 回高温強度シンポジウム前刷集, (1998-12), 30-34.
- (2) 西田秀高・山口寛・ほか 2 名, 材料, **48**-1 (1999), 70-76.
- (3) 平尾雅彦・荻博次, 非破壊検査, No. 46-9 (1997), 649-654.
- (4) 平尾雅彦・荻博次・ほか 2 名, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, No. 96-10 (1996-10), 547-548.
- (5) Bhatia, A. B., *J. Acoust. Soc. Am.*, **31** (1958), 16-23.
- (6) Mason, W. P., *Physical Acoustics* **8** (1971), 347-357, Academic Press, New York.
- (7) 村上芳則・平尾雅彦・福岡秀和・三戸良亮, 機論, **58**-546, A (1992), 167-173.
- (8) Papadakis, E. P. (Thurston, R. N. and Pierce, A. D. 編), *Physical Acoustics*, vol. XIX (1988), 107-155, Academic Press, New York.
- (9) Hirao, M., Ogi, H. and Fukuoka, H., *Rev. Sci. Instrum.*, **64** (1993), 2129-2136.
- (10) 荻博次・平尾雅彦・福岡秀和, 機論, **60** 569, A (1994), 258-263.
- (11) 上野文義, 第 32 回高温強度シンポジウム前刷集, (1994-12), 144-148.
- (12) 中代雅士・芝田三郎・ほか 5 名, 材料, **45**-3 (1996), 321-327.
- (13) 動力プラント・構造物の余寿命評価技術, (1992), 89, 144, 日本機械学会.
- (14) Lucke, K., *J. Appl. Phys.*, **27** (1956), 1433-1443.
- (15) 前田宣喜・杉林卓也・山口篤憲・和田宇生, 非破壊検査 **46** (1997), 752-760.
- (16) Bhatia, A. B. and Moore, R. A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **31** (1959), 1140-1150.
- (17) Granato, A. and Lucke, K., *J. Appl. Phys.*, **27** (1956), 583-593.