The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	擬似Scholte波を用いた片側に水が接する平板内の損傷検出
Author(s)	林, 高弘; 藤島, 礼
Citation	日本金属学会誌. 2017, 81(2), p. 71-79
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/84505
rights	©2017（公社）日本金属学会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

日本金属学会誌 第 81 巻 第 2 号(2017)71-79

擬似 Scholte 波を用いた片側に水が接する平板内の損傷検出*1

林　高弘*2　藤島　礼*3

京都大学大学院工学研究科

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 81, No. 2 (2017), pp. 71-79
© 2016 The Japan Institute of Metals and Materials

Defect Detection in a Plate Loaded with Water on a Single Surface using Quasi-Scholte Wave

T. Hayashi*2 and R. Fujishima*3

Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto 615-8540

Ultrasonic guided waves achieve non-destructive inspection of thin plates. However, issues such as large energy leakage and attenuation often plague guided wave inspection of storage tanks and pipes filled with fluid. This study experimentally investigated the non-destructive testing of a water-loaded flat aluminum alloy plate through the application of a quasi-Scholte (QS) wave that propagated along the fluid-plate interface without experiencing attenuation due to leakage. A QS wave was confirmed as having been generated and propagated in a plate loaded with water on the bottom surface using ultrasonic incidence and detection at the top water-free surface. Two-dimensional Fourier transform images of the waveforms revealed reflection of the QS wave from a defect as well as a forward incident QS wave. The visualization results experimentally confirmed—via measurements of waves in water using a laser Doppler vibrometer—that QS waves propagated along a plate surface, while scattered waves were generated by defects. [doi:10.2320/jinstmet.J2016058]

(Received October 11, 2016; Accepted October 19, 2016; Published December 16, 2016)

Keywords: non-destructive testing, guided waves, quasi-Scholte wave, two dimensional Fourier transform, visualization

1. 緒　言

薄板状の構造に対し，板厚よりも波長の長い弾性波を入射すると板に沿って伝搬する弾性波モードが観測される．この弾性波モードはガイド波と呼ばれ，板断面内の閉鎖領域にエネルギが閉じ込められて長手方向に伝搬するため，バルク波に比べ拡散によるエネルギ低下が少なく，長距離伝搬が可能となる[1-2]．非破壊材料評価の分野では，このガイド波の長距離伝搬特性を利用して，長尺構造物の高効率検査への適用が検討されてきた．例えば，ラム波の薄板検査への適用は，1950年代から進められており，主に製鋼ラインに適用された[1]．1990年代になると大型の配管検査への適用を目指した検査装置が開発された[3-8]．また近年では，断面が複雑な形状の鉄道レールのような棒状構造への適用についての研究がすすめられている[9-13]．

ガイド波は，速度の異なる多数のモードが薄板状構造中を伝搬し，それぞれに速度分散があることから，一般的に速度分散の小さな１つのモードを選択的に励振・受信することによって，受信波形の解析を容易にした上で，検査を行っている．しかし，タンクや配管などに水などの液体が満たされている場合のように，薄板状構造に漏えい媒体が接している場合には，これまで使用していたガイド波モードが，液中に漏洩することで長距離伝搬特性が失われ，検査に利用できなくなることがたびたび起こる．そこで，著者らは周囲に液体の漏えい媒体が存在する薄板状構造に対し，液体と薄板との界面を伝搬する擬似 Scholte (QS) 波が漏えいによる減衰がゼロとなることに着目し，半解析的有限要素法 (Semi-Analytical Finite Element method, SAFE) による数値計算を用いてその特性を議論してきた[14,15]．

半無限の均質一様な弾性体が表面力ゼロの表面境界を有する場合，断面内に振動成分を有し表面に沿って伝搬するレイリー波が現れる．一方，半無限の均質一様な弾性体の表面に半無限の完全流体が接する場合，断面内に振動成分を有する Scholte 波と呼ばれるモードが現れる．この Scholte 波は，弾性体と完全流体との界面に沿って伝搬するガイド波モードであり，流体中の音速で伝搬し，流体への漏えいによる減衰が無い．またレイリー波同様，速度分散がなく高周波ほどエネルギが界面に集中することが，理論的にも実験的にも証明されている[1,14-18]．一方，薄板の片側もしくは両側に半無限の完全流体が接している場合にも，弾性体と完全流体との間を伝搬するモードは存在するが，板厚の影響を受けて速度分散性を有する．そのため，このモードは Scholte 波と区別して，擬似 Scholte (QS) 波と呼ばれている．

文献14, 15) において SAFE による数値計算を使って示した

*1 Mater. Trans. **57** (2016) 1602-1608 に掲載
*2 Corresponding Author, Email: hayashi@kuaeroKyoto-u.ac.jp
*3 京都大学大学院生 (Graduate Student, Kyoto University)

J-STAGE Advance Publication date : December 16, 2016

通り，断面内を振動するA0モードやS0モードのようなこれまで広く利用されてきたモードは漏えい減衰により，長距離伝搬すると測定できないほど小さくなる．一方で，漏えい減衰のないQS波は薄板状材料の長距離検査に利用できる潜在能力を有している．そこで，本報では，水などの流体で満たされた配管やタンクなどに現れる腐食のような内壁の損傷を検出することを目標とし，QS波の適用可能性を実験的に検討する．

2. 片側に水が負荷された薄板を伝搬するQS波の特性

水などの流体で満たされた配管やタンクを想定し，ここでは均質一様なアルミニウム合金平板(縦波音速 6400 m/s，横波音速 3100 m/s，密度 2.7 kg/m^3，板厚 d)の片面に水(音速 1500 m/s，密度 1.0 kg/m^3)が接している状況を考える．このとき，位相速度分散曲線，群速度分散曲線，減衰曲線は文献14)に従ってSAFEにより計算でき，それぞれFig. 1(a)，(b)，(c)のように求められる．ここで，図中の実線は水が平板の片側にある場合の結果であり，その比較として水がない場合のラム波の分散曲線を破線で示した．横軸は周波数×板厚積 fd とした．ここで示した fd 帯域において，水がない場合は，板厚中心に対して反対称の振動分布を有するA0モードと対称の振動分布を有するS0モードが存在している．一方，水が平板の片面に接している場合には，A0モードに似た曲線およびS0モードに似た曲線とともに，太い実線で示したモードが現れているのが分かる．この太い実線のモードがQS波であり，500 kHz mm 以上の高 fd 帯域では，板厚の影響を受けず速度分散が無いが，400 kHz mm 以下の低 fd 帯域では，板厚の影響を大きく受け速度分散が大きいことが分かる．しかし，Fig. 1(c)に見られるように，漏えいによる減衰はすべての fd 帯域でゼロであり，他のモードに比べ長距離伝搬の可能性が高いと考えられる．細い実線のモードは，位相速度・群速度分散曲線において，水のない場合のA0モード，S0モードの曲線によく似ているが，水が片側にある場合には振動分布が板厚中心に対して反対称や対称ではないことから，ここではそれぞれをA0-like，S0-likeモードと呼ぶ．

Fig. 2(a)-(c)は，それぞれFig. 1中の(a)-(c)点に対する振動分布を示した図である．図は横10d，縦6d とし，上部には板厚 d のアルミニウム合金平板が位置しており，図の下部には深さ5d の水領域を示した．格子点の移動量がその点における変位を表し，濃淡は上下方向の変位の絶対値を示す．(a)200 kHz mm ではラム波A0モードのような屈曲する振動が板厚全体に分布しているが，水中では振動が平板界面に沿って分布している．(b)400 kHz mm では，(a)と同様に板全体を振動する屈曲モードが確認できるが，水中の振動分布は(a)よりも平板表面から離れた距離まで分布していた．これは，弾性体が半無限体の場合に現れるScholte波において周波数を上げると液体―固体界面にエネルギがより集中するという現象と反対の傾向を示している．また，(c)800 kHz mm では平板上部にはほとんど振動がなく，下部の水との界面に振動が集中している．この fd 値以上の領域において，fd 値が上がるにつれて，振動は平板と水の界面に集中する傾向にあった．ま

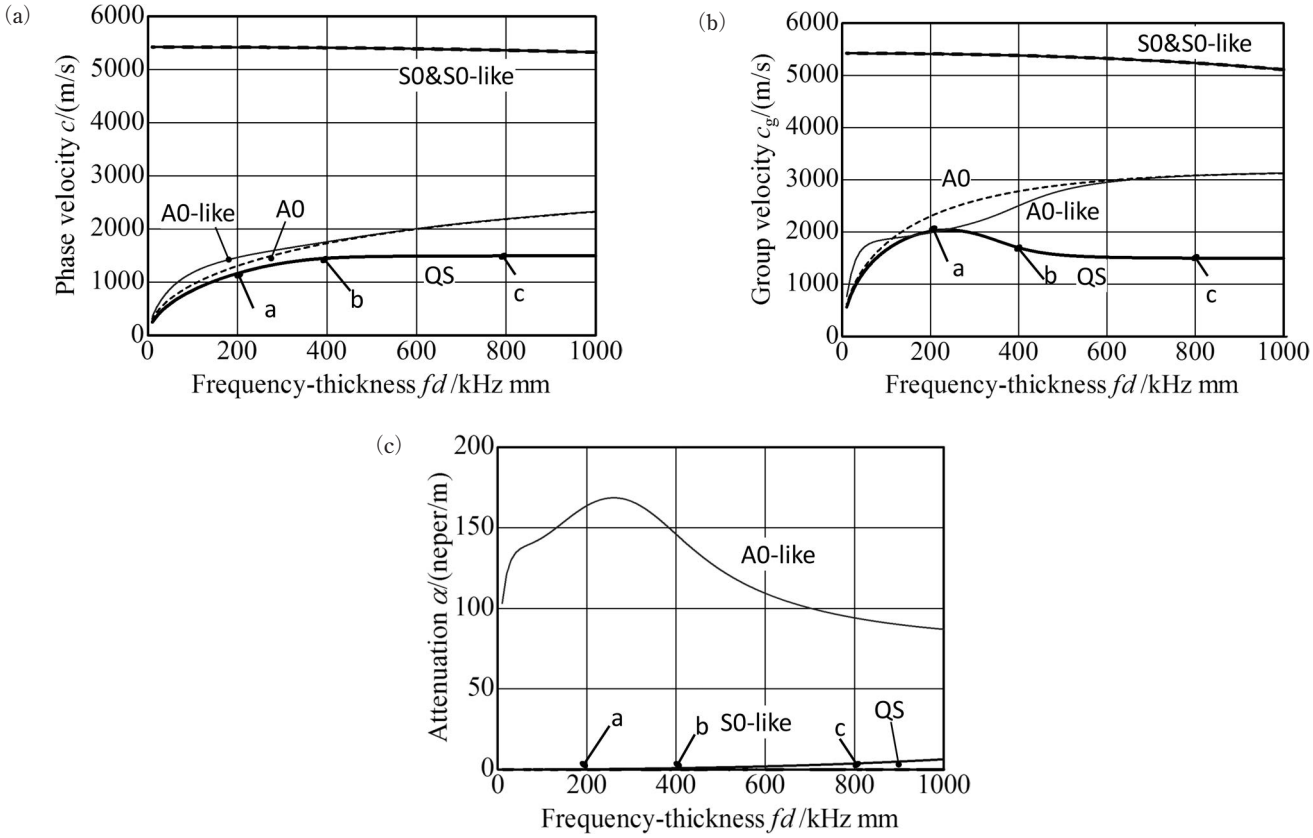

Fig. 1　Dispersion curves for an aluminum plate with thickness d. Solid lines: a water-loaded plate on a single surface. Dashed lines: a water-free plate. (a) Phase velocity. (b) Group velocity. (c) Attenuation

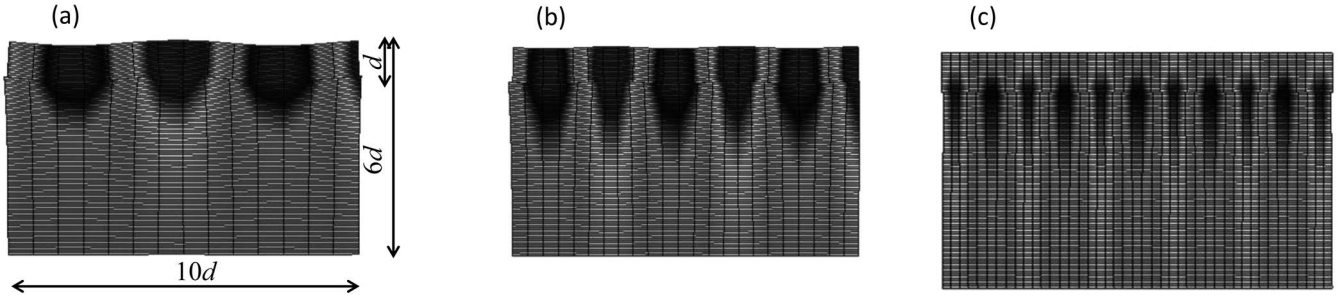

Fig. 2　Displacement distributions for QS waves at three different *fd* values. (a) 200 kHz mm. (b) 400 kHz mm. (c) 800 kHz mm

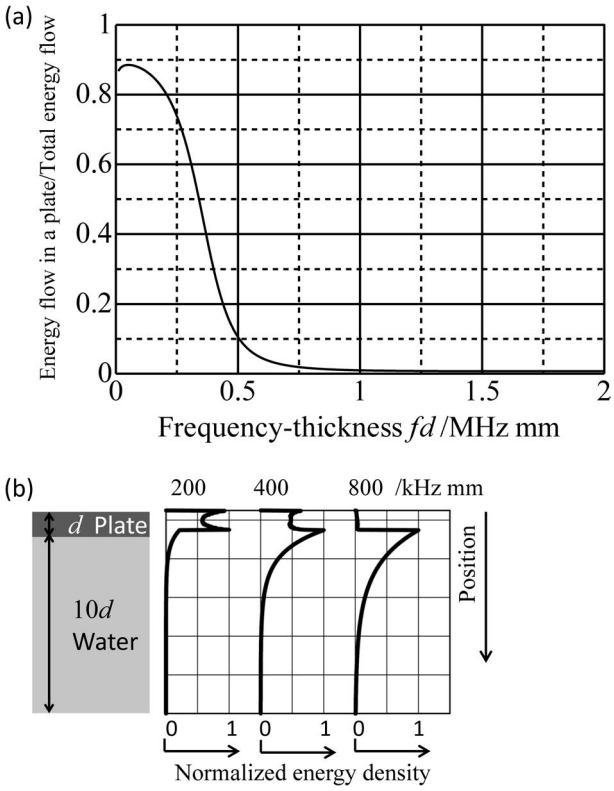

Fig. 3　Energy flow for a QS wave. (a) Energy flow rate. (b) Energy flow distributions

た，位相速度および群速度分散曲線もほぼ平坦で分散性がないことから，*fd* = 800 kHz mm 以上では，平板の厚みの影響はほとんどなく，半無限弾性体と半無限流体の界面を伝搬する Scholte 波とほとんど同じ挙動を示したと考えられる．

Fig. 2 の振動分布や文献15)からも分かるように，QS 波は周波数によって振動分布が大きく異なる．このことは，薄板に発生する損傷の検出感度が周波数によって大きく異なることを意味する．そのことを明らかにするため，Fig. 3 に QS 波のエネルギ密度分布から算出される(a)薄板内のエネルギ流束率と(b)断面内のエネルギ密度分布を示す．(a)は QS 波の全体エネルギ流束に対する板内を伝搬するエネルギ流束の割合を示している．500 kHz mm を超えると全体のエネルギ量の10%以下のエネルギしか薄板内に存在せず，高 *fd* 値ほど小さくなる．このことは，高 *fd* 値において損傷からの反射波が小さくなることを意味している．逆に，200 kHz mm 以下では全体のエネルギの80%以上が薄板内に存在し，エネルギの点では薄板の非破壊検査に向いていると考えられる．しかし，Fig. 1(a), (b)に示されるように，200 kHz mm 以下の低周波数帯域における QS 波は速度分散が大きいという難点があり，非常に長い距離を伝搬させて検査するのは難しいかもしれない．(b)は200 kHz mm, 400 kHz mm, 800 kHz mm の 3 つの *fd* 値に対し，板厚断面および水中のエネルギ密度の分布を示した図である．のちに示す通り，上面のエネルギ分布がゼロに近い800 kHz mm の場合は，上面からの加振による QS 波の励振はほぼ不可能であることが予想される．

3.　実　　験

3.1　計測システム

平板と水の界面を伝搬する QS 波を測定するため，Fig. 4 に示すような実験装置を用いた．500 mm×400 mm×100 mm のアクリル水槽を水で満たし，その上にアルミニウム合金平板(400 mm×100 mm×2 mm)を載せ，アルミ平板の端部に設置した超音波縦波トランスデューサにより振動を入射した．100 kHz の中心周波数特性を持つものと，200 kHz の中心周波数特性を持つ 2 種類のトランスデューサを用い，超音波パルサーレシーバー（Japan probe 社：JPR-10B）より100 kHz および200 kHz で 3 サイクルの矩形バースト波を印加することで，それぞれの中心周波数を持つバースト波を励振した．

一般にラム波 A0モードや S0モードを励振する場合，超音波トランスデューサと平板の間に斜角ウェッジを利用することにより，単一モードを高効率で励振できることが知られている．この時，ウェッジ中の縦波音速を c_w, 平板中の所望のラム波の位相速度を c とすると，

$$\sin\theta = c_w/c. \tag{1}$$

を満たす入射角 θ となるよう斜角ウェッジの形状は決定される．しかし Fig. 1 に示されているように，QS 波の位相速度は水の音速以下となっており，一方で一般にウェッジとして利用される固体材料の縦波音速 c_w は水の音速よりも大きい．これらの事実から，QS 波を効率よく励振する適切な入射角は存在せず，QS 波を励振するために斜角ウェッジを利用できないことが分かる．そこで，ここでは，超音波トランスデューサと平板の間に，アクリルのバッファを設置した(Fig. 4)．このアクリルバッファは，本実験で励振する 100 kHz および 200 kHz の A0モードおよび QS 波の最小波長の1/2より小さい幅 2 mm の矩形突起がついており，この突起が平板に接触することで平板上に線音源が形成される．このバッファ

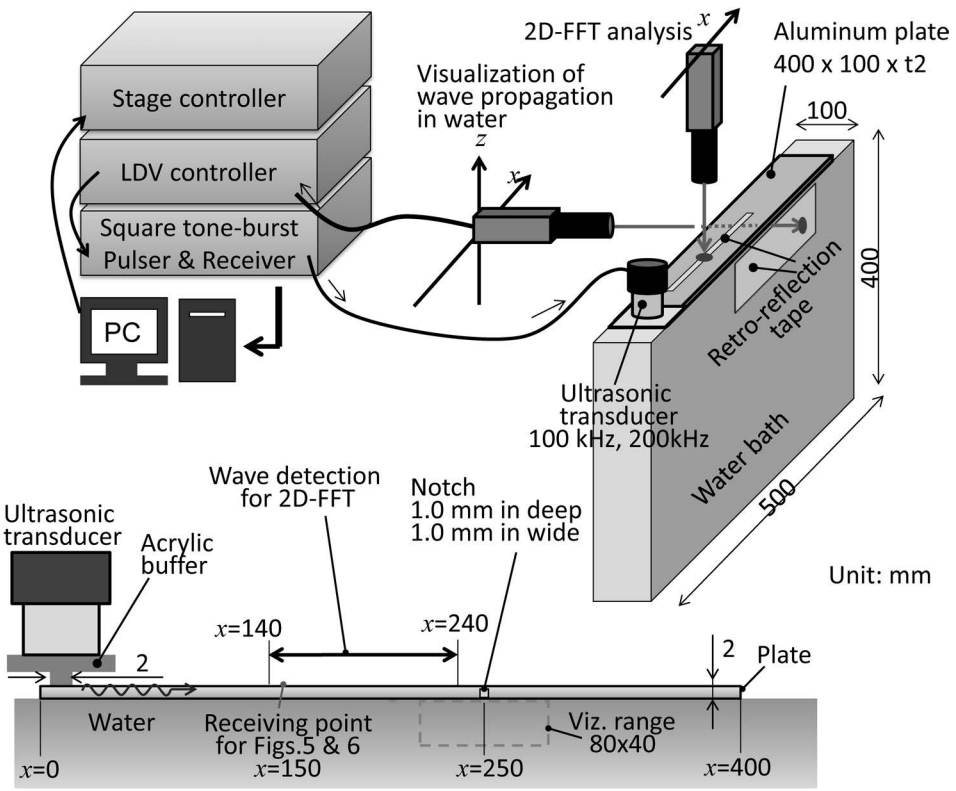

Fig. 4 Experimental set-up and measurement conditions.

による線音源を平板左端部($x=0$ とする)近傍に設置すると，平板内を長手方向(図中$\pm x$方向)に伝搬する波動と，$-x$方向に伝搬して端面($x=0$)で反射した波動に分かれ，これらが重畳して増幅する．

初めに，平板中を伝搬する波を，平板の上表面においてLDV(小野測器，LV-1710)によって板厚方向の振動を検出した．平板上表面の計測位置には安定したレーザ振動計測のため．再帰反射テープを貼りつけた．これにより，LDVを自動ステージに設置して連続計測が可能となり，次節において$x=$140 mm～240 mm間の多点で振動計測を行った．次に，水槽の側面からレーザ光を水中に入射し，水槽の反対側面に密着させた再帰反射テープからの反射光を受光することで，水中を伝搬する粗密波を検出した．これは，水の振動に起因する粗密の変化によって，水の屈折率がわずかに変化することを利用している[19,20]．図中に示した水中80 mm×40 mmの領域に対し，多点で波形を計測することによって，その領域の波動伝搬を可視化することができる．

3.2 二次元フーリエ変換によるモード解析

初めに，平板上面の振動を検出した結果を示す．Fig. 5は，ノッチのない平板に対し，$x=150$ mmで検出された波形であり，上からそれぞれ(a)水が接していない平板に100 kHzを入射したとき，(b)水が接している平板に100kHzを入射したとき，(c)水が接していない平板に200 kHzを入射したとき，(d)水が接している平板に200 kHzを入射したときを示す．

(a)において，80μs～200μs間に位置する波束は，Fig. 1(b)の群速度分散曲線より判断すると，トランスデューサから発信して約150 mm伝搬したA0モードであると考えられる．また(a)中の第2波は，$+x$方向に伝搬したA0モードが平板右端($x=400$ mm)で反射して$-x$方向に伝搬し検出された波束であり，第3波はその波が左端($x=0$)で再度反射した波束である．(b)では，(a)の波束よりもやや遅い時刻に第1波と第2波が現れた．Fig. 1(b)の群速度分散曲線では，A0モードおよびQS波は200 kHz mmにおいていずれも約2100 m/sであり，この2つのモードの可能性が考えられる．しかし，水が接している場合A0モードの減衰はFig. 1(c)から極めて大きいことから，このモードはQS波であると推定される．このことは，後の2D-FFTによるモード解析で明らかになる．200 kHzのバースト波を利用した(c)，(d)においては，(a)，(b)の時と用いたトランスデューサが異なっており高電圧の印加が必要であったので，その影響を受けトランスデューサに印加している時刻0-50 usに電磁ノイズが現れた．その後，水のない(c)においては50 μs～150 μs間に，第1波が現れ，250 μs

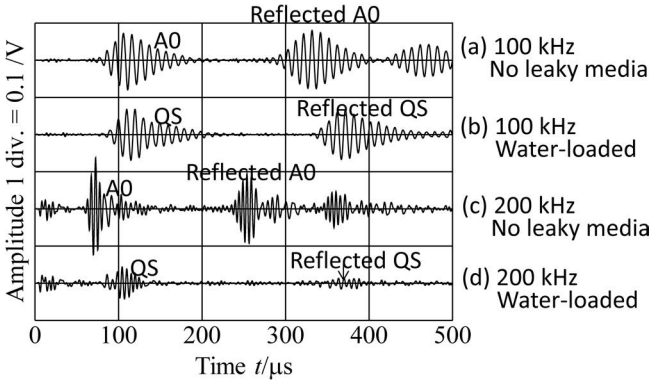

Fig. 5 Waveforms for an intact plate.

あたりの第 2 波，350 μs あたりの第 3 波が観測された．これらは Fig. 1(b)の群速度分散曲線から明らかに A0モードであると特定できる．水が接している(d)においては，(c)より少し遅い100 μs あたりに第 1 波が現れており，第 2 波は350 μs に現れている．これらは(c)の A0モードの到達時刻よりやや遅いので，Fig. 1(b)の群速度から QS 波であると考えられる．

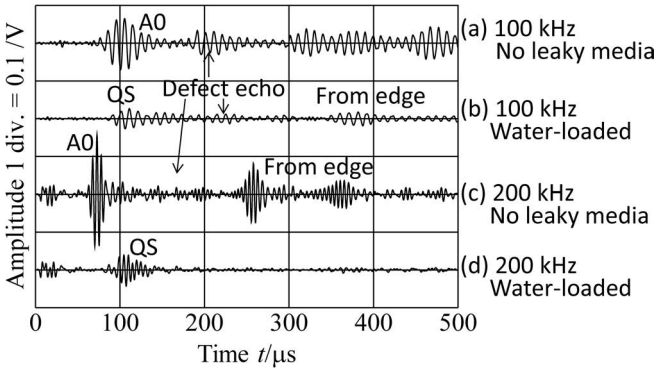

Fig. 6　Waveforms for a defected plate.

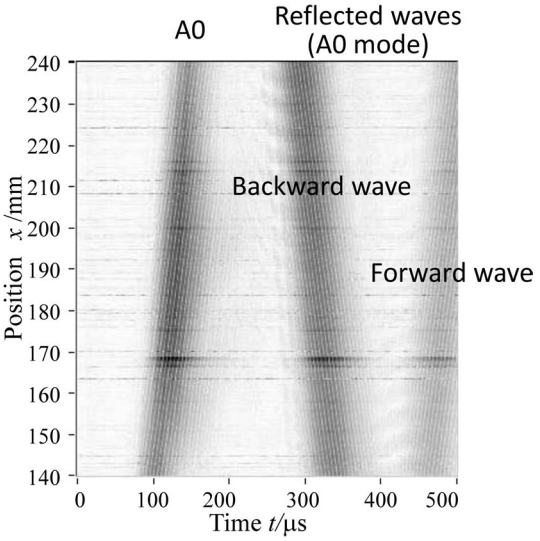

Fig. 7　t–x image for a water-free intact plate.

次に，x = 250 mm の位置に矩形のノッチがある人工傷試験片に対し，同じ条件で受信した波形を Fig. 6 に示す．第 1 波はいずれも同じ時間位置に観測され，これらはそれぞれ A0 モードおよび QS 波であると推定される．その後，100 kHz の場合には，第 1 波と第 2 波との間に小さな波が現れた．これは人工傷からの反射波と考えられる．一方，200kHz の場合には，SN 比が小さいため，そのような人工傷からのものと推定される反射波は明瞭に得られなかった．

Fig. 5, 6 では 1 つの受信波形に対し波束の時間位置と群速度データからモードを推定した．しかしながら，Fig. 5(b)の第 1 波のモード，Fig. 6 における欠陥からの反射波の存在やそのモードなどは断定できていない．そこで，二次元フーリエ変換を用い，多数の波形データからより詳細なモード解析を行う．

Fig. 7 は人工傷のないアルミニウム合金平板に対し，水が接していない状態で板の上面の異なる401点で受信した波形の絶対値を，横軸時間，縦軸 x 方向位置として表示した t–x 分布図である．波形の測定位置は，Fig. 4 に示されている通り，板幅の中央の，x = 140 mm から x = 240 mm までの区間を0.25 mm 間隔で区切った401点とした．入射波は100 kHz，3 サイクルであり，Fig. 5(a)の波形は Fig. 7 中の x = 150 mm のデータに対応している．この分布図中には 3 本の黒い帯状領域が確認できる．これらの帯の傾きは群速度に対応し，左から $+x$ 方向に伝搬する入射 A0モード，右端面で反射して $-x$ 方向に伝搬する A0モード，さらに，左端面で反射して $+x$ 方向に伝搬する A0モードであることが分かる．

この401個の波形を時間(t)方向および空間(x)方向でフーリエ変換し，その絶対値をとると，Fig. 8(a)のような二次元フーリエ変換(f–k)像が得られる．図中破線は，Fig. 1(a)の位相速度分散曲線を，厚さ2 mm のアルミ平板に対し f–k 表記で示したものである．x 方向データは，正負の波数(k)領域に変換することができ，$+k$ 領域が $+x$ 方向に伝搬する進行波，$-k$ 領域が $-x$ 方向に伝搬する後進波を示す．Fig. 7 に示される測定波形には，進行波も後進波も含まれるので，Fig. 8(a)中に

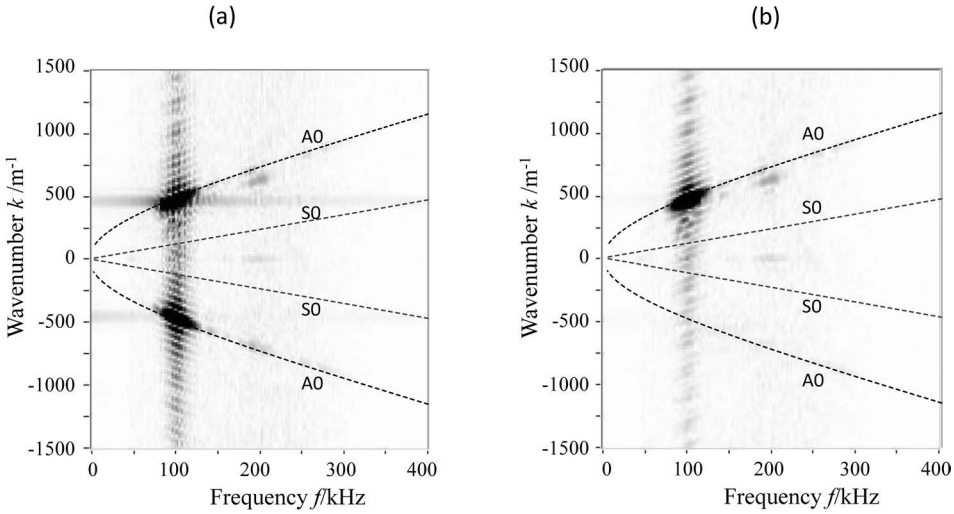

Fig. 8　f–k images for a water-fee intact plate. (a) Whole waveforms. (b) Extracted waveforms from 0 to 250 μs

は±kいずれの領域にも振幅の大きな部分が存在している．この理論分散曲線と二次元フーリエ変換の分布図から，測定された波形は確かにA0モードであることが分かる．また，Fig. 7の波形のうち，0から250 μsの間の波形のみを利用して得られた二次元フーリエ変換像をFig. 8(b)に示す．0～250 μsには反射波が存在しないため，Fig. 8(b)中では+kの領域のみに振幅の大きな部分が現れ，Fig. 7中左の黒い帯状領域が+x方向に伝搬するA0モードであることがここからも確認できる．

次に100 kHzの場合の結果を比較するため，Fig. 9に(a)水なし，傷なし，(b)水なし，傷あり，(c)水あり，傷なし，(d)水あり，傷ありの場合の測定波形のt-x図を示す．(a)はFig. 7と同じ図である．傷がない試験平板に対し，水の有無による違いを示す(a)と(c)を比較すると，それぞれ進行波および後進波の黒い帯状領域が見られ，その傾きが若干異なることが分かる．これは，Fig. 4(b)に示した群速度分散曲線において200 kHz mm(=100 kHz×2 mm)において，QS波の群速度が水のない場合のA0モードよりも少し小さいという結果によく一致している．次に傷の有無による違いを示す(a)と(b)を比較すると，第1波の黒い帯状領域以降に波形の乱れが生じていることが分かる．また，同様に(c)と(d)を比較した場合も，第1波を示す帯状領域以降に乱れが見られる．これらは，損傷に起因するものであり，損傷からのわずかな反射波を示していると考えられる．

Fig. 10はFig. 8(b)と同様に0から250 μs間のデータを二次元フーリエ変換したf-k図である．0～250 μs間には平板端面(x=400 mm)からの反射波は含まれておらず，探触子からの入射波および傷からの反射波が含まれている．(a)-(d)はFig. 9(a)-(d)を変換した図である．傷がない(a), (c)では−k領域に振幅の大きな領域が見られず，反射波が存在しないことを示しているが，(b), (d)では−k領域に振幅の大きな領域が現れており，これらは傷からの反射波である．さらに，破線で示された分散曲線データより，反射波は，水がない(b)の場合ではA0モードを示しており，水が接している(d)の場合ではQS波であることが分かる．

次に200 kHzのトランスデューサを用いて入射した場合について，Fig. 9, Fig. 10に対応する結果をFig. 11，Fig. 12に示す．Fig. 11(a)と(c)の黒い帯状領域の傾きがFig. 1(b)中の200 kHz×2 mm(=400 kHz mm)の群速度に対応しており，それぞれ出現しているモードがA0モード，QS波であることが分かる．傷がある(b)の場合には，(a)では見られない波形の乱れが生じており，傷からの反射波の影響であることが分かる．一方，(d)の場合にはSN比が小さいため，そのような反射による波形の乱れは確認できなかった．この波形のうち，入射波と傷からのエコーが含まれると考えられる0～200 μsを抽出して求めたf-k図がFig. 12である．傷がない(a), (c)の場合には，入射A0モードおよび入射QS波のみが確認できるが，傷がある(b)の場合にはわずかに−k領域にA0モードの振幅が大きな領域が確認できる．同じく傷がある(d)の場合には，QS波の反射波は非常に小さく，この図中にはほとんど見ることができない．これは，2章で考察した通り，上面に現れる振動エネルギの割合に起因するものであり，2 mmのアルミニウム平板に対して200 kHzでの探傷は，100 kHzでの探傷に比べ，難しくなることを意味している．また，いずれの図にも表れるk=0における帯状の領域は，変動しない位相を表しており，Fig. 11のt=0近傍にみられる電磁ノイ

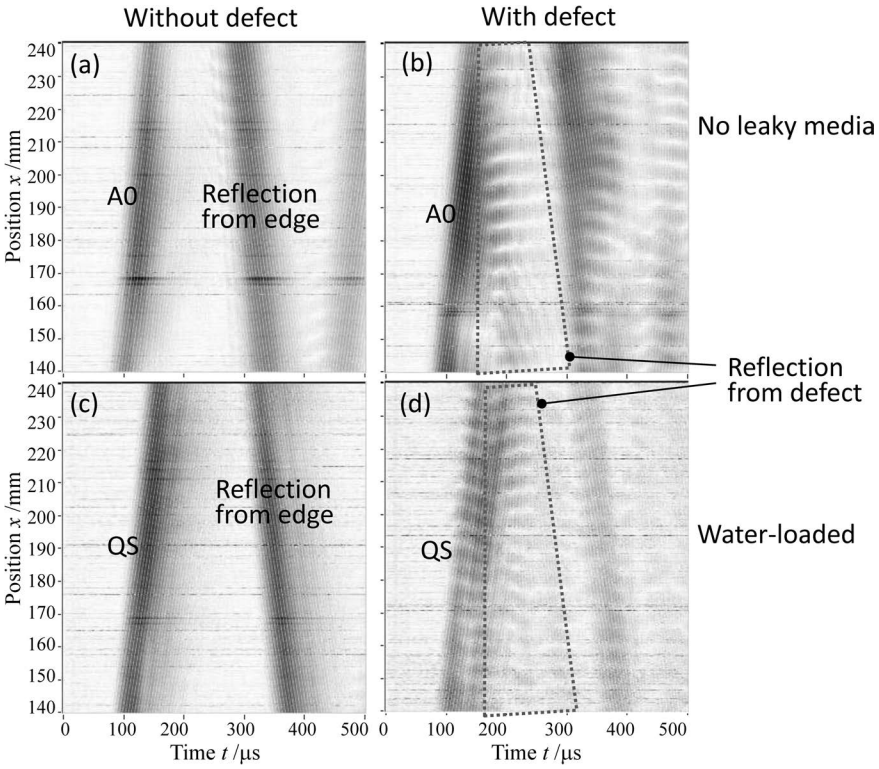

Fig. 9 t-x images for 100 kHz incidence. (a) a water-free intact plate, (b) a water-free defected plate, (c) a water-loaded intact plate, (d) a water-loaded defected plate.

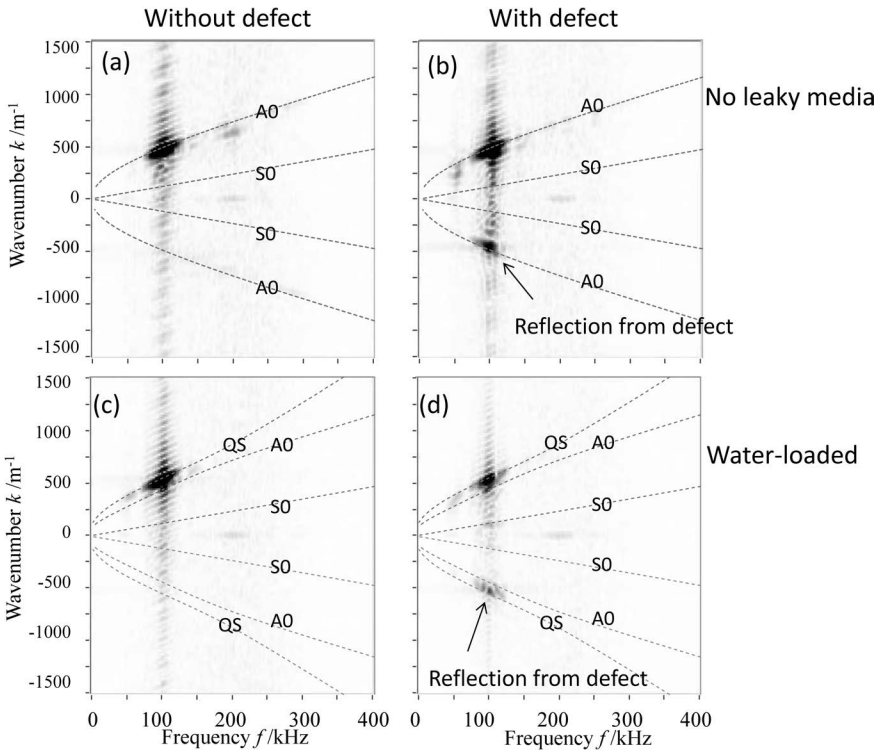

Fig. 10　*f*-*k* images for 100 kHz incidence. (a) a water-free intact plate, (b) a water-free defected plate, (c) a water-loaded intact plate, (d) a water-loaded defected plate.

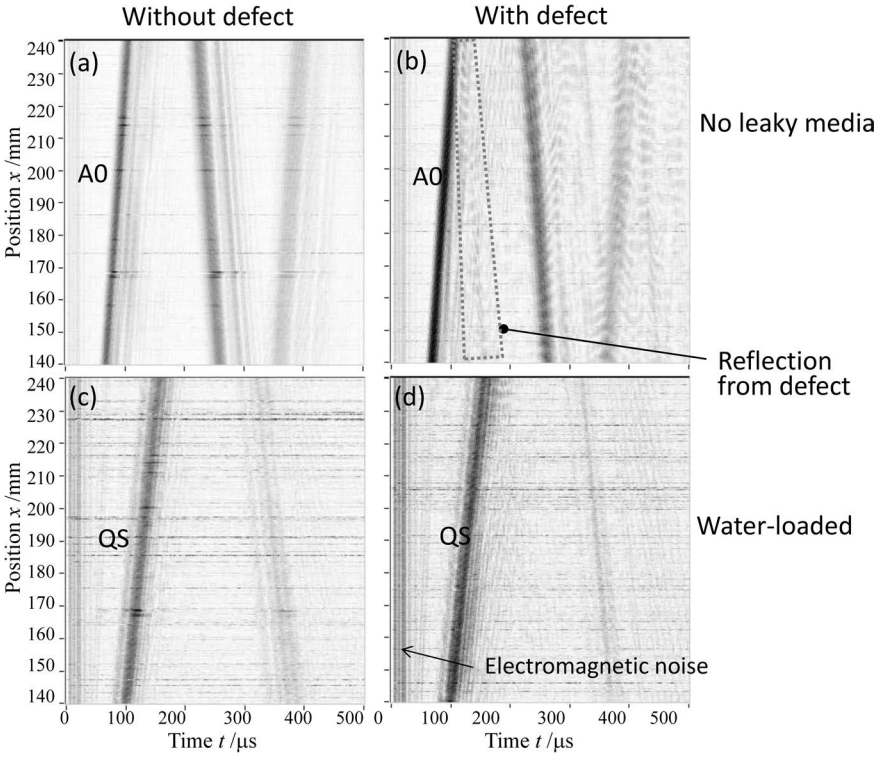

Fig. 11　*t*-*x* images for 200 kHz incidence. (a) a water-free intact plate, (b) a water-free defected plate, (c) a water-loaded intact plate, (d) a water-loaded defected plate.

ズによるものである．

以上の結果より，平板表面の垂直方向に振動を負荷した場合，水がない場合には A0 モードが卓越して現れるが，平板の片面に水が存在する場合には，A0 モードではなく，QS 波が卓越して伝搬することが実験的に示された．また，この QS 波は A0 モードと同様に傷において反射し，QS 波として伝搬して受信することが可能であることが分かった．ただし，QS 波は周波数によって上面に現れるエネルギ量が大きく異なるので，適切な周波数（ここでは100 kHz）を選択する必要がある．

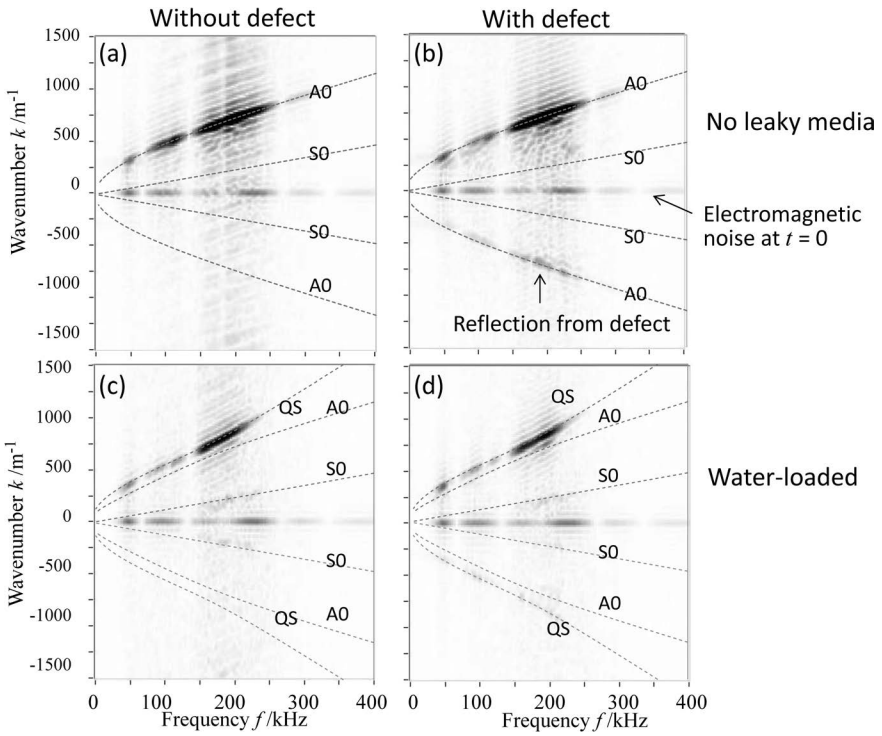

Fig. 12 *f*-*k* images for 200 kHz incidence. (a) a water-free intact plate, (b) a water-free defected plate, (c) a water-loaded intact plate, (d) a water-loaded defected plate.

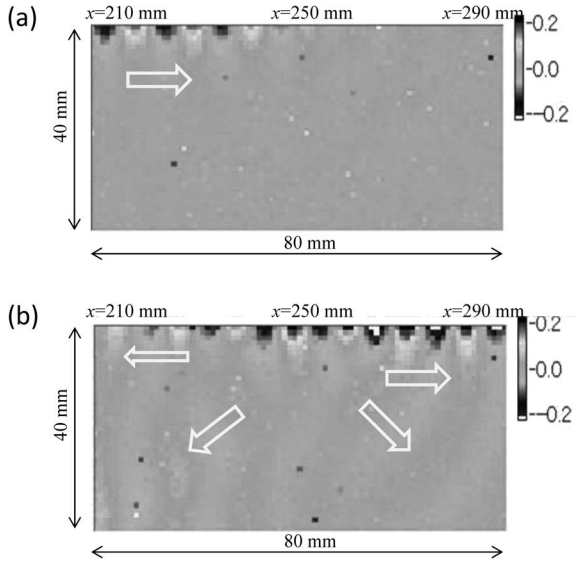

Fig. 13 Snapshots of wave propagation in water around a defect for 100 kHz incidence. (a) 590 μs. (b) 772 μs.

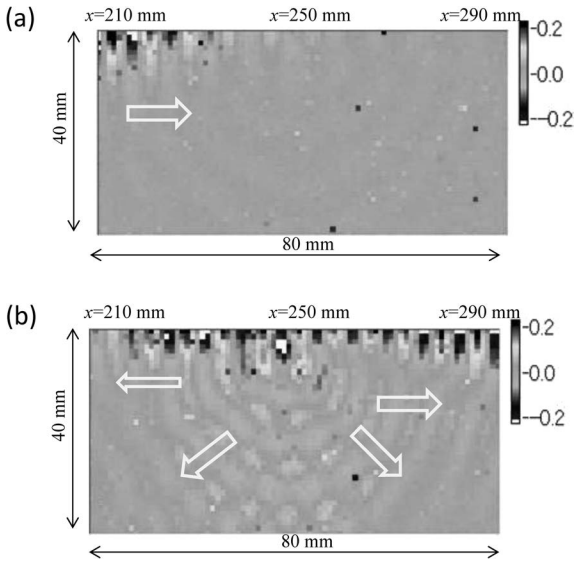

Fig. 14 Snapshots of wave propagation in water around a defect for 200 kHz incidence. (a) 590 μs. (b) 772 μs.

3.3 水中伝搬波動場の可視化

前節では平板表面を伝搬する波動を検出して，QS 波の解析を行った．LDV による計測では，水中にレーザ光を照射することによって伝搬経路内の屈折率の変化を捉えることができ，その結果，水中を伝搬する超音波を可視化することができる．そこで，本節においては薄板近傍を伝搬する波動をレーザ計測によって可視化し，損傷における散乱波を観察する．

測定領域は，Fig. 4 中に示した通り，人工傷を中心に長手方向に80 mm，深さ方向に40 mm の領域とした． Fig. 13 は 100 kHz のバースト波を入射した場合に得られるある 2 つの時刻における振動分布である．計測データ全体の絶対値の最大値を 1 とし，図中に示すように，0.2以上を黒，−0.2以下を白で表した．(a)590 μs では，平板の下面と水との境界に沿って伝搬する QS 波が左から右に伝搬している様子が確認できる．その QS 波が人工傷を透過したのちの(b)772 μs では，多くの QS 波のエネルギはそのまま透過して右に伝搬しているが，一部がモード変換し水中に放射している様子が見て取れる．その放射した波は中央の傷位置から半円状に伝搬し，一部は QS 波の反射波として左向きに伝搬した．

200 kHz を入射波とした場合の同じ位置，同時刻の振動分布を Fig. 14 に示す．100 kHz の場合より波長の短い QS 波が右向きに伝搬し，傷の位置で放射状に散乱している様子が分かる．前節 Figs. 11, 12 の平板表面での測定では，QS 波による反射波がほとんど測定されなかったが，入射した QS 波は傷に大きく反応して伝搬していることが分かる．ただし，この周波数帯域において平板上面での QS 波の振動エネルギが小さく測定が困難であったと考えられる．

4. 結　　言

水で満たされたタンクやパイプを想定し，水に片側を接した平板に対して水の外面からの超音波入射により発生するガイド波モードを実験的に検討し，内面傷からの反射波を測定した．群速度分散曲線や減衰曲線から推定されるとおり，水がない場合には，平板への垂直入射により A0モードが測定され，水が接した平板では QS 波が測定された．また，二次元フーリエ変換像により傷からの QS 波の反射が明瞭に確認された．さらに，水中を伝搬する波動場を LDV により計測することにより水中波動場の可視化を行い，平板と水との境界に沿って伝搬する QS 波および傷での散乱波の伝搬を実験的に確認した．また，2 mm のアルミニウム合金平板を用いた今回の実験の場合，100 kHz では損傷からの反射波が測定されたが，200 kHz の場合にはほとんど測定できなかった．これは，水のない面に QS 波の振動が分布する割合が周波数によって異なるためである．これより，QS 波を用いた損傷評価では，適切な周波数を選択することが重要であると言える．

本研究の一部は，科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(15K12473)の支援により行われた．

文　　献

1) I. A. Viktorov: *Rayleigh and Lamb Waves*, (Plenum press, New York, 1967).
2) J. L. Rose: *Ultrasonic Waves in Solid Media*, (Cambridge University Press, 1999).
3) D. N. Alleyne, B. Pavlakovic, M. J. S. Lowe and P. Cawley: Insight **43**(2001) 93–96, 101.
4) P. J. Mudge: Insight **43**(2001) 74–77.
5) P. Cawley, M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne, B. Pavlakovic and P. Wilcox: Mater. Eval. **61**(2003) 66–74.
6) J. L. Rose: J. Press. Vessel Technol. **124**(2002) 273–282.
7) T. Hayashi and M. Murase: J. Acoust. Soc. Am. **117**(2005) 2134–2140.
8) T. Hayashi, M. Nagao and M. Murase: J. Solid Mech. Mater. Eng. **2**(2008) 888–899.
9) T. Hayashi, W.-J. Song and J. L. Rose: Ultrasonics **41**(2003) 175–183.
10) T. Hayashi, C. Tamayama and M. Murase: Ultrasonics **44**(2006) 17–24.
11) T. Hayashi, M. Murase and T. Abe: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, **26**(2007) 169–176.
12) P. W. Loveday: J. Nondestruct. Eval. **31**(2012) 303–309.
13) S. Mariani, T. Nguyen, R. R. Phillips, P. Kijanka, F. Lanza di Scalea, W. J. Staszewski, M. Fateh and G. Carr: Struct. Heal. Monit. **12**(2013) 539–548.
14) T. Hayashi and D. Inoue: Ultrasonics **54**(2014) 1460–1469.
15) D. Inoue and T. Hayashi: Ultrasonics **62**(2015) 80–88.
16) S. I. Rokhlin, D. E. Chimenti and A. H. Nayfeh: J. Acoust. Soc. Am. **85**(1989) 1074–1080.
17) D. E. Chimenti and S. I. Rokhlin: J. Acoust. Soc. Am. **88**(1990) 1603–1611.
18) V. Dayal and V. K. Kinra: J. Acoust. Soc. Am. **85**(1989) 2268–2276.
19) K. Nakamura: Technical report of IEICE, US2001-**9**(2001) 15–20, in Japanese.
20) I. Solodov, D. Döring and G. Busse: Appl. Opt. **48**(2009) C33–C37.