

Title	多重モードラム波からの単一モードの抽出と欠陥検出への応用
Author(s)	林, 高弘; 川嶋, 紘一郎
Citation	日本機械学会論文集A編. 2001, 67(664), p. 1959-1965
Version Type	AM
URL	https://hdl.handle.net/11094/88620
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

多重モードラム波からの単一モードの抽出と欠陥検出への応用*

林 高弘^{*1} 川嶋紘一郎^{*1}

Extraction of a single mode from multiple modes of Lamb wave and its application to defect detection

Takahiro HAYASHI, Koichiro KAWASHIMA

Lamb waves generally consist of many dispersive modes, which makes mode identification difficult. This study describes the extraction of a single mode from multiple modes. The single mode extraction is based on two dimensional Fast Fourier Transform (2D FFT) in time and space, signal filtering and 2D inverse FFT. Air-coupled ultrasonic technique were adopted for non-contact fast measurements. Using this technique, the A0 and S0 modes were clearly detected in preliminary tests of intact plates. Furthermore, multiple reflections of the A0 mode, which were shown only in the computer simulation, were experimentally confirmed in reflection tests of plates with a square notch. In the reflection tests, two reflected waves were extracted in the intervals corresponding to notch widths.

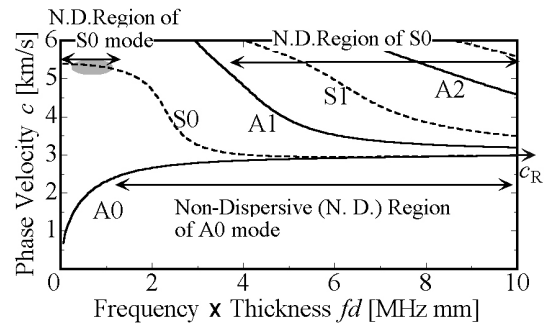
Key Words: Ultrasonic Inspection, Nondestructive Inspection, Fast Fourier Transform, Lamb wave, Signal Filtering, Air-coupled Ultrasonic

1. 緒言

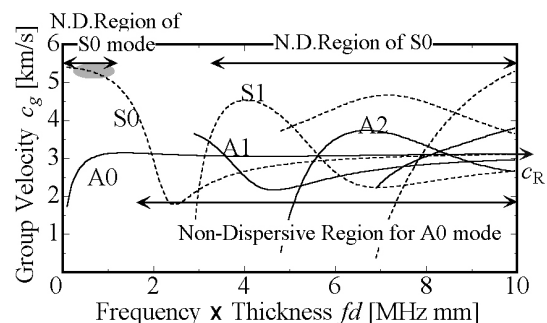
薄板や薄肉円管中を屈曲・伸縮運動しながら板面に沿って進行するラム波は低減衰で長距離を伝ばする。そのため長い伝ば経路内に存在する欠陥を一度に検査することができ、パイプラインなどの大領域の非破壊検査に有効である⁽¹⁾⁽²⁾。通常、斜角ウェッジや水を介して、板表面に超音波を斜め入射する斜角探触子法が用いられてきたが、近年ではレーザー超音波法⁽³⁾や空気結合超音波法⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾などの完全非接触手法によるラム波励起および受信技術が開発されている。

しかしラム波は薄板の材質や板厚、周波数によって伝ば特性が大きく変化する。すなわち、位相速度および群速度が周波数に依存する速度分散性が強く、音速の異なる複数モードの波が同時に伝ばする。これらは受信波形の解釈を難解にし、非破壊検査への応用を妨げる原因となっている。図1(a)(b)にそれぞれラム波の位相速度と群速度の分散曲線を示す。横軸は周波数 f と板厚 d の積、縦軸はそれぞれ位相速度 c と群速度 c_g である。図中の曲線の傾きが大きいほど分散性が大きいことを表し、またある fd 値に対して曲線の本数が多いほどその fd 値での多数のラム波モードが存在するこ

とを示している。分散性が大きいと入射パルス波が伝ば距離とともに変形し、多数のモードが存在すると受信波形に多数のモード波が重畳する。このため、受信波形から伝ばしたラム波の種類を同定することは極め



(a) phase velocity



(b) Group velocity

Fig.1 Dispersion curves for an aluminum plate. ($c_L=6300\text{m/s}$, $c_T=3100\text{m/s}$)

*原稿受付 年月日。

^{*1}正員,名古屋工業大学機械工学科(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。

E-mail: hayashi@megw.mech.nitech.ac.jp

て困難となる．実際には，単一のパルス波形として励起・受信が容易な非分散性領域（図1中の灰色領域）のS0モードに限って，薄板材料の検査に用いられる．

図1の分散曲線から，ラム波A0モードは広い fd 領域において分散性が弱い特長を持っていることが分かる．しかしながら，A0モードの位相速度 c_{A0} はレイリー波音速 c_R 以下であるため，斜角ウェッジや水を用いた斜角入射では励起や受信が困難である．図2は高分子斜角ウェッジ（音速 $c_W=2520\text{m/s}$ ）と空気（ $c_W=340\text{m/s}$ ）に対する臨界角（ $\theta=\sin^{-1}(c_W/c)$ ）によってラム波分散曲線を表したものである．高分子斜角ウェッジを用いた場合，A0モードの臨界角が非常に大きくなり，実際には用いることができない．そのため，臨界角から離れた角度で使用することになり，単一のA0モードは励起・受信ができずS0モードやその他の高次モードが重畳する．特にプラスチックなどの音速の低い材料ではA0モードの速度も低くなり，A0モードの利用が困難となる．そこで著者らは，音響結合媒質が空気である空気結合超音波法を用いると，図2のようにA0モードの臨界角が適切な値になることを利用して，単一のA0モードを励起・受信できることを示した⁽⁶⁾．このとき入射波の fd 領域はA1モードのカットオフ周波数近傍を用いている．さらに高 fd 領域を用いる場合，空気結合超音波法によって臨界角の問題は解決されるが，お互いの臨界角が近づくため，S0モードやA1，S1モードといった高次モードの重畳が避けられない．

そこで本研究では，多点波形観測と2次元フーリエ変換および逆変換を用いて，多数のモードが重畳する時間波形から単一モードを抽出する手法について述べる．さらに，複数モード重畳のため受信波形からの識別が困難であった溝状欠陥端部からの多重反射A0モード波を，A0モードの抽出により識別可能にし，反射A0モード波の伝ば時間差から溝幅を測定できることを示す．

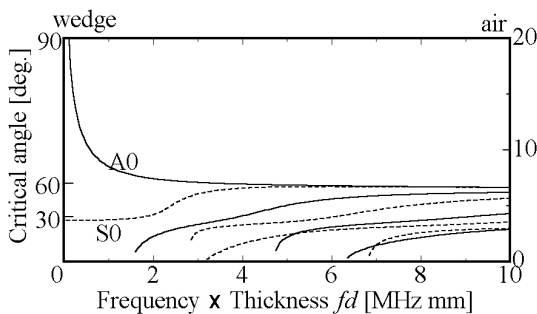
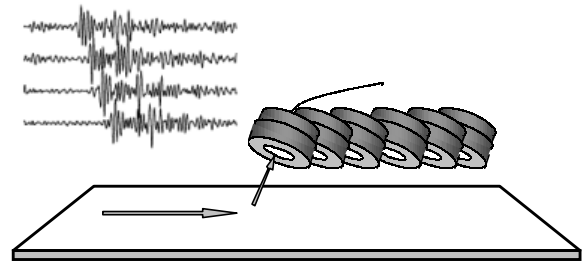


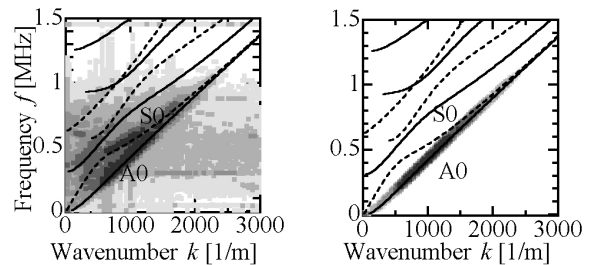
Fig.2 Dispersion curves described by critical angles.

2. 単一モードラム波抽出の基本概念

単一モードラム波抽出の概念を図3に示す．まず，ラム波伝播方向の多数の等間隔点において，ラム波の時間波形を収録する（図3(a)）．受信波形を時間軸および空間軸においてフーリエ変換を行うことにより，波数 k と周波数 f の2次元フーリエ変換像（ k - f 分布図）を得る（図3(b)）．この k - f 分布図に対し，所望のモードのみを残しその他のモードを除去するフィルタ関数 $F(k, f)$ を施す．このときフィルタ関数 $F(k, f)$ は理論的に求められる k - f 分布図上の分散曲線（図3(b)中の曲線）をもとに決定される．フィルタリング後の k - f 分布図（図3(c)）に2次元フーリエ逆変換を施すことによって，単一モードラム波の抽出波形（図3(d)）を得る．

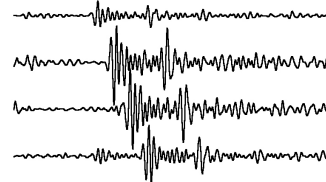


(a) Wave detection at regularly spaced points



(b) k - f distribution image

(c) k - f image after filtering



(d) Filtered waveforms

Fig.3 Key concept of single mode extraction.

3. 実験方法

本実験では5.0mmのアルミニウム平板を用いて，A0モードを抽出を試みる．ラム波の励起には，十分なエネルギーを与えるために斜角探触子を用いた．ラム波の受信には走査を容易にするため，非接触法である空気結合超音波法を採用した．斜角探触子には

Panametrics 社製 V402SB と 60° の入射角になるよう切り出した特殊ポリイミドブロック ($c_w=2520\text{m/s}$) を組み合わせて構成し、カプラントと 500gf の荷重によって板表面に付着させた。受信探触子には空中超音波探触子 MicroAcoustic 社製 Model BATTM-1 を用い、自動ステージによって位置制御を行った。入射探触子 V402SB は中心周波数が約 2.0MHz の広帯域センサーである。しかし、受信側で空中を伝ばする際、高周波成分の減衰が大きいため、受信波形の中心周波数は約 0.5MHz であった。入射角および受信角は $fd=0.5\text{MHz} \times 5.0\text{mm}$ の場合の臨界角に合わせて、それぞれ 60° と 8° に設定した。Model BATTM-1 はコンデンサ型の空中超音波探触子であり、Cooknell 社製チャージアンプによってバイアス電圧を供給している。パルサーとレシーバーにはそれぞれ RITEC SP-801 と BR-640 を用い、サンプリング周波数 10MHz、加算平均 256 回で波形をデジタル収録した。走査点はラム波伝播方向に 1.0mm 刻みで 100 点とした。LabView を用いた自動制御により走査を行うため、現在データ収録に要する時間は 1 点につき 1 秒程度である。将来的には DSP 技術の発展によりさらに速くなることが期待でき、100 点のデータ収録は計測上大きな問題とされないものと考えられる。

フィルタ関数 $F(k, f)$ には次のハニング窓関数を用いた。

$$F(k, f) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos\left\{\frac{2\pi(k - k_x)}{w}\right\}, & |k - k_x| < \frac{w}{2} \\ 0, & |k - k_x| > \frac{w}{2} \end{cases} \quad (1)$$

すなわち、周波数 f に対して理論的に求められるモード X ($X=A_0, S_0, \dots$) の波数 k_x を中心とするハニング窓で、所望のモード X のみを保持するように与えている。 w は窓の幅であり、 $w=50, 200, 350$ [m^{-1}] を用いた。

4. 実験結果

4.1 欠陥のない平板を用いた単一モードラム波の抽出
 欠陥のないアルミニウム平板 (A1100PM24, $500 \times 100 \times 5$ mm) を用い、ラム波伝ば方向に 1.0mm ステップの 100 点でラム波波形を収録し、A0 モードと S0 モードの抽出を行った。図 4 に探触子位置および試験片寸法を示す。ラム波の伝ば距離は観測開始点 (1 点目) で 231mm、100 点目で 330mm である。

図 5 に 25, 50, 75 点目の 3 点の観測点における受信波形を表す。入射角と受信角は A0 モードの位相速度をもとに決定しているため、A0 モードが第一波に大き

く受信された。本実験で用いた周波数 \times 板厚の領域 (fd 領域) は約 1 - 4 MHz mm であり、その領域における A0 モードと S0 モードの群速度を図 5 中に示す。群速度分散曲線から A0 モードの分散性はわずかであるが、S0 モードの分散性は著しいことが分かる。また S0 モード分散曲線中で比較的分散性の弱い $fd=2-3\text{MHzmm}$ では S0 モードは A0 モードより遅くなる。

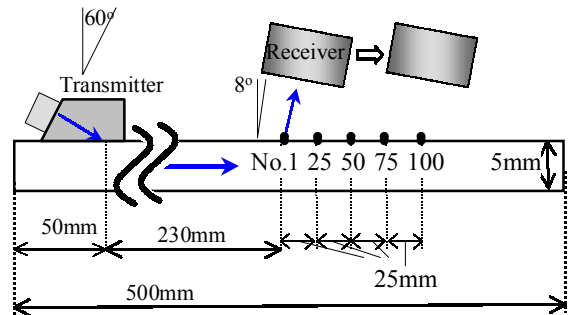


Fig. 4 Experimental set-up.

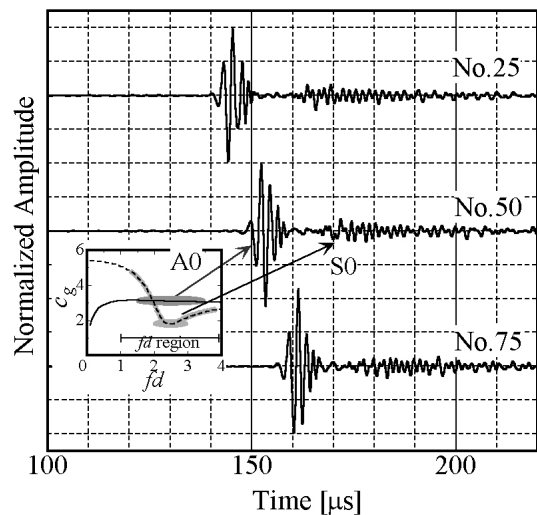


Fig. 5 Waveforms in intact plate tests.

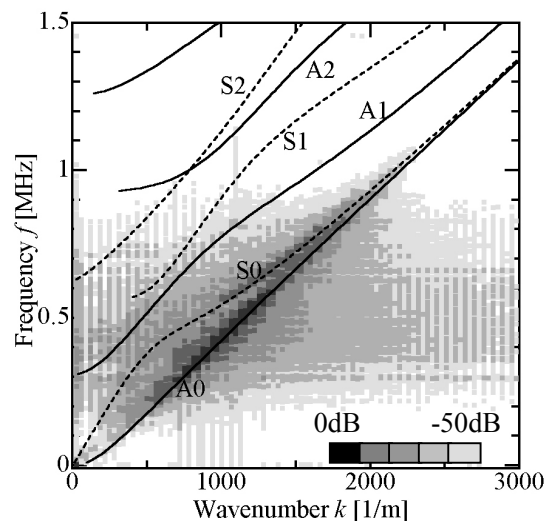


Fig. 6 k - f distribution image for intact-plate tests.

100 点の観測波形に 2 次元 FFT を施した k - f 分布図を 図 6 に示す．グレイスケールはスペクトル強度を、曲線はラム波の理論分散曲線を表す．これより、A0 モードが大きな強度で受信されていることが分かるが、A0 モードの曲線に近づくあたりで S0 モードも認められる．

式(1)のフィルタリング関数を用いて A0 モードおよび S0 モードを抽出するためのフィルタリングを施した後の k - f 分布図をそれぞれ 図 7(a)(b) に示す．このとき式(1)の窓の幅を $w=200 \text{ m}^{-1}$ とした．図 7 のようにフィルタリングされた k - f 分布図に、それぞれ 2 次元逆 FFT を行うことによって、図 8 のような A0 モード、S0 モードの抽出波形を得た．図 5 の原波形で見られた第二波の S0 モードが、図 8 中の A0 モード抽出波形では低減されていることが分かる．また、図 8 中の S0 モード抽出波形では、A0 モード波が小さくなっている．これらから本手法により単一モードの抽出が有効であることが示された．しかし、観測点が観測開始点および観測終端点に近くなるほど、原波形では見られなかった時間に明瞭な波形が現れた．たとえば 図 8 中では、25 点目および 75 点目の A0 モード抽出波形において A0 モードの現れる時刻以前に波形が見られる（図 8 点線内）．これは、空間方向の FFT において観測開始点と観測終端点を周期的に連結する際に生じる漏れ誤差のためである．

4.2 空間方向データの処理 漏れ誤差による抽出波形の乱れを取り除くため、観測データ列の空間方向に前後端がゼロになるようなハンニング窓を施した．その時の A0 モード抽出結果を図 9 に示す．図 5 および 図 8 と同様に、1~100 点における抽出波形のうち 25、50、75 点目の 3 点のみを表す．図 8 で示した同一地点の A0 モード抽出波形に比べ、50 点目に関しては漏れ誤差による異常波形を大幅に低減させることができた．しかし、25 点目および 75 点目に関しては完全に除去することはできず、漏れ誤差の小さい観測中央点である 50 点目位置で波形解析を行うべきである．

測定上観測点はできる限り少ない方がよい．しかし、そうすると FFT による漏れ誤差や有効データ欠落による分解能の低下が起こる．図 10 に 20 点から 100 点の観測波形を用いたときの A0 モード抽出波形を示す．それぞれ 4.1 節で行った観測波形の中央点（50 点目位置）より左右 50 点の計 100 点、左右 40 点の計 80 点、同様に 60 点、40 点、20 点を用いた時の中央点での A0 モード抽出結果である．観測点が減少するにつれて振幅は減少している．漏れ誤差による異常波形が現れたのは観測点数が 60 以下の場合であった．観測

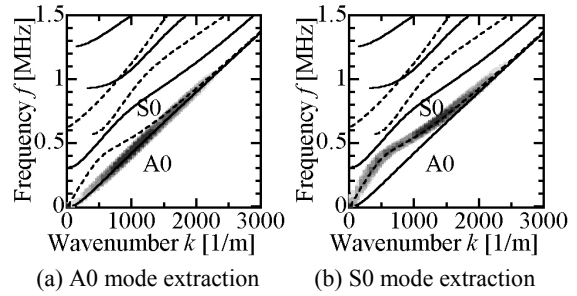


Fig.7 k - f image after filtering.

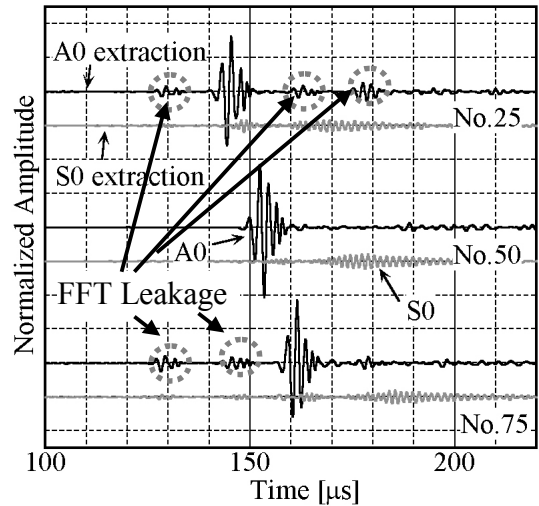


Fig.8 Filtered waveforms in A0 and S0 extraction tests.

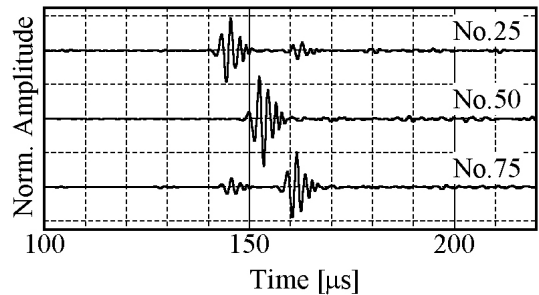


Fig.9 Waveforms when Hanning window is applied to the sequences in the space direction.

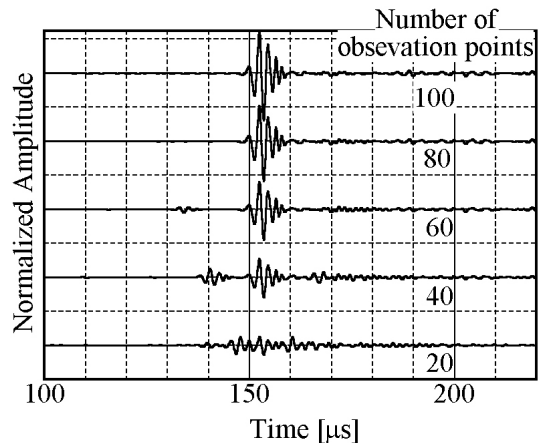


Fig.10 Comparison of waveforms for different number of observation points.

波形が最も少ない 20 点の場合には，A0 モード波形も明瞭ではなく，漏れ誤差以外に分解能の低下が起こっていることが分かる．これらより，以下の抽出にはすべて 100 の波形を用い，空間方向にハンギング窓を施してから行った．

4.3 フィルタ関数による抽出波形の変化 抽出波形はフィルタ関数に大きく依存する．そこで本節では，式(1)のハンギング窓関数の窓の幅 w を 50, 200, 350 にした時の A0 モード抽出波形を比較する．図 11 に 50 点目位置における抽出波形を示す．また図 12 にそれぞれの窓幅を用いた時のフィルタ処理後の k - f 分布図を示す．窓幅が狭すぎる $w=50$ の場合，抽出波形が小さくなる上，漏れ誤差による異常波形も見られた．また窓幅が広い $w=350$ の場合，S0 モードの重畳がわずかに見られた．これらより，以下の抽出結果はすべて窓幅 $w=200$ を用いる．

4.4 矩形溝状欠陥からの反射波の抽出 以上のような欠陥のない平板中をラム波が伝ばする場合，ラム波の種類は同定しやすい．しかしながら，平板中に層間剥離や表面腐食などの欠陥が存在する場合，受信波形には異なる経路を通過したさまざまなモードのラム波が検出され，経路を判断し欠陥情報を得るのは容易ではない．本節では矩形の溝状欠陥を有するアルミニウム平板を対象としたラム波 A0 モードの抽出を行い伝ば経路を検討する．

著者らは文献(7)(8)の中で，数値計算によって，層間剥離がある場合に層間剥離部でラム波が多重反射を起こすことを示した．同様の現象は矩形溝状欠陥でも得られる．幅 30mm の矩形の溝状欠陥のあるアルミニウム平板に，3 章の実験方法に従いラム波を励起した場合の数値計算結果を図 13 に示す．左から伝ばしたラム波 A0 モードは溝状欠陥の左端で反射波と欠陥内への透過波に分かれている（図 13(b)）．欠陥内を伝ばした後，欠陥の右端で再び欠陥内への反射波と右方への透過波に分離する（図 13(c)）．その欠陥内への反射波は再び欠陥左端において反射波と透過波に分離する（図 13(c)）．この繰り返しが多重反射として現れる．しかし，欠陥端部での反射波は単一の A0 モードだけではなく，他のモードも重畳した乱れた波形になっている．そのため観測波形では多重反射パルス波を確認することができず，有効な欠陥情報を得ることは困難である．

そこで，このような矩形溝状欠陥に対して A0 モードの抽出を行い，欠陥端部での反射波を識別する．反射波の検出を行う際，図 14 中に示したような探触子位置で反射波を観測した．図 15 に矩形溝状欠陥幅

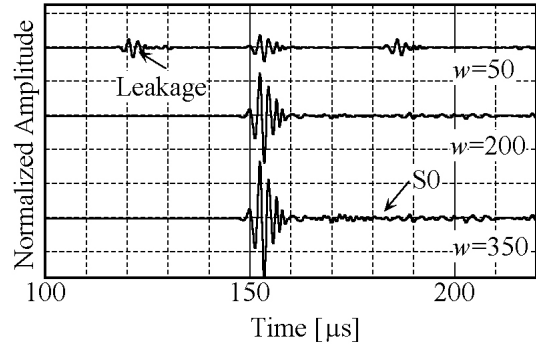


Fig11 Comparison of waveforms for different widow widths.

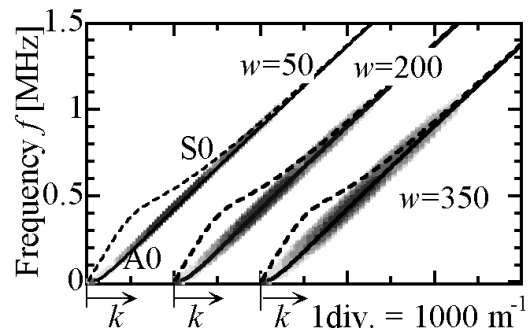


Fig.12 k - f image after filtering by different window widths.

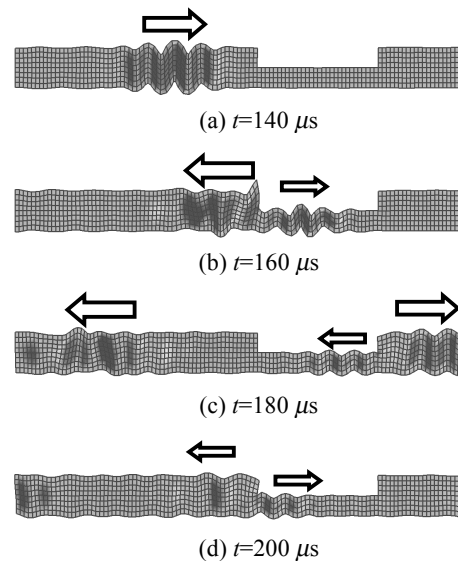


Fig.13 Calculation results of A0 mode propagation around a square notch.

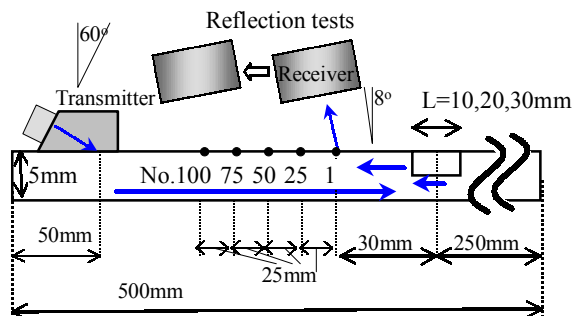


Fig.14 Experimental set-up in reflection tests.

$L=10\text{mm}$, 20mm , 30mm の場合に対する受信原波形 (黒色) およびフィルタ透過後波形 (灰色) を左から 25 点目位置, 50 点目位置, 75 点目位置について示す. それぞれフィルタ処理後波形の振幅値は 2 倍にして表した. 図 16 に原波形の k - f 分布図を示す. 図 6 で示された欠陥が無い場合の透過波形の k - f 分布図に比べ, S_0 , A_1 , S_1 といったさまざまなモードのラム波が発生していることが分かる. 受信原波形 (図 15 黒色) では, 点線で囲まれた部分の波形のために, 多重反射波が識別できない. しかし, フィルタ透過後波形 (図 15 灰色) では, 点線で囲まれた部分の波形が除去されているため, 溝状欠陥の左端部での第一反射波 (大矢印) と溝状欠陥の右端部での第二反射波 (小矢印) が明確になっている. これらの時間間隔は溝幅に比例しており, ラム波を利用して溝状欠陥幅の情報が得られることを示している. 相互相関法によって, フィルタ透過後に現れた 2 つの反射波形の時間間隔を計算した結果を図 17 に示す. これらは漏れ誤差の少ない 41 点目から 60 点目の中央 20 点での計算結果の平均値である. 溝状部分の厚みは 2.5mm であることから, $f_d=0.5\text{MHz} \times 2.5\text{mm}$ での A_0 モードの群速度 (3142m/s) から求めた理論値を図 17 中の直線に示す. これらは良い一致を示しており, ラム波の多点計測と A_0 モードの抽出により欠陥幅の概寸が求められる.

5. 結言

複数モードが重畳するラム波受信波形から, 単一モードを抽出する手法を提示した. その中で多点でのラム波観測には, 非接触超音波法である空気結合超音波法を用いることにより走査を容易にした. 単一モード抽出の有効性を欠陥の無いアルミニウム平板と, 矩形の溝状欠陥を有する平板を用いて確かめた. 欠陥の無い平板における実験では, 効果的に A_0 モードと S_0 モードの抽出が可能であることが示された. また, 溝状欠陥を有する平板における実験では, A_0 モードを抽出することによって, 欠陥端部の反射波を識別でき, 溝状欠陥幅が測定できることが明らかとなった.

謝辞

最後に, 実験遂行にあたり協力を頂いた名古屋工業大学大場利紀氏に謝意を表す.

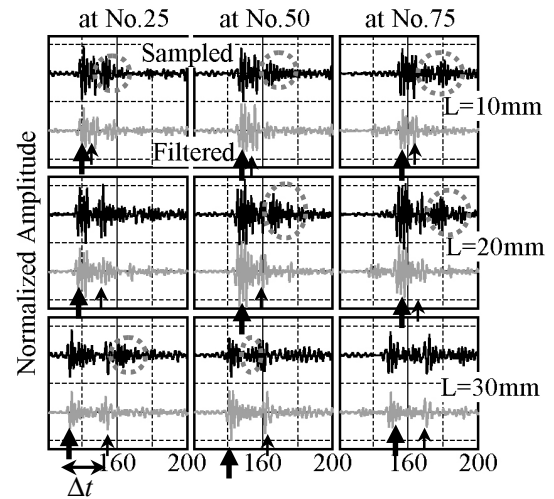


Fig.15 Sampled and filtered signals for different notch widths and different observation points. (Large arrow indicates the reflected wave from the left edge of notch, and small arrow from the right edge.)

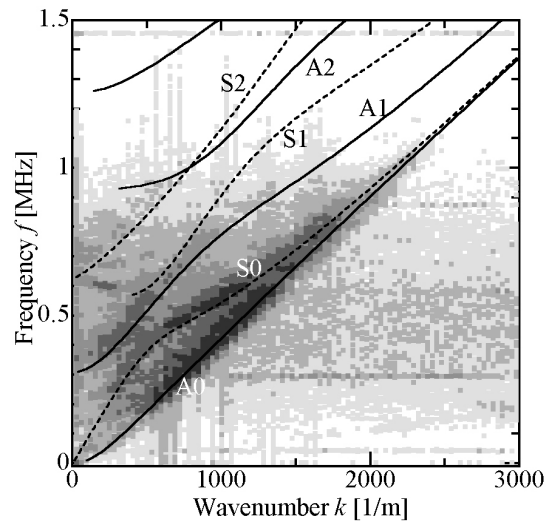


Fig.16 k - f image for reflection tests.

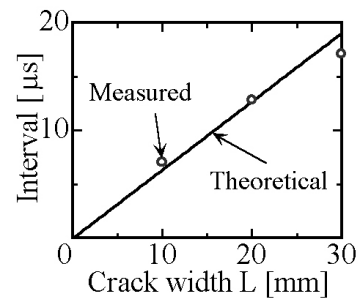


Fig.17 Intervals of reflected waves for different notch widths.

文 献

- (1) Viktrov I. A., Rayleigh and Lamb Waves, (1967) Plenum
- (2) Rose J. L., Ultrasonic waves in solid media, (1999) Cambridge
- (3) Scruby C.B. and Drain L.E., Laser Ultrasonics Techniques and Applications, (1990) Adam Hilger
- (4) Shindel D. W. and Hunchins D. A., *Ultrasonics* **33**-1 (1995), 11
- (5) 林高弘, 川嶋紘一郎, 遠藤茂寿, 日本非破壊検査協会, 新素材シンポジウム講演論文集, (2000), 7
- (6) 林高弘, 川嶋紘一郎, 鈴木一貴, 新井和吉, 遠藤茂寿, 非破壊検査, **50**-2 (2001), 108
- (7) 林高弘, 川嶋紘一郎, 日本非破壊検査平成 11 年度秋季大会講演概要集, (2000), 1
- (8) Hayashi T, Kawashima K., J. Acoust Soc. Ame. Submitted.
- (9) 林高弘, 琵琶志朗, Choi J. C., 遠藤茂寿, 日本機械学会論文集 **65**-630 (1999), 210
- (10) Hayashi T. Endoh S., *Ultrasonics*, **38** (2000), 770
- (11) Eisenhardt C., Jacobs J. and Qu J., Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (2000)