

ノッチ型欠陥を有する金属板中を伝搬する Lamb 波の観測

Observation of Lamb Wave in Metal Plate Having a notch type defect

○遠藤 智也^{*}, 今野 和彦^{*}

○Tomoya Endo^{*}, Kazuhiko Imano^{*}

^{*}秋田大学 大学院工学資源学研究科

^{*}Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード：超音波(Ultrasonic), Lamb 波(Lamb Wave), ノッチ型欠陥(notch type defect),
モード変換(Mode Conversion), 2次元 FFT(2 Dimension Fast Fourier Transform)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 大学院工学資源学研究科 電気電子工学専攻
今野和彦, Tel : 018-889-2420, Fax : 018-837-0406, E-mail : imano@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

工業製品や材料, 建築物の内部に発生する欠陥は重大な事故を引き起こす可能性がある。よって設備の安全確保のために, 事故が発生する以前に設備全体の腐食・減肉箇所を把握し, 交換などをする必要がある。これまでの探傷技術の1つに超音波探傷がある。この超音波探傷の方法は, パルス反射法や透過法を原理とした垂直探傷法が広く用いられている。しかしこの測定法では, 測定範囲が探触子の大きさに限られ, 測定がpoint-to-pointであるために1つの測定対象物を検査するにあたっては多くの時間を要してしまう。また, 超音波の波長よりも薄い試料への探傷は送波信号と受波信号波形とが重畳することから, 従来の方法では困難である。そこで近年, 伝搬時の拡散損失が少なく試料の水平方向へ長距離を伝搬するLamb波が, 有用な技術として, 超音波探傷への応用が期待されている¹⁾。

Lamb波は板の厚さ・材質などにより大きく伝搬特性が変化する。このことから, 腐食や減肉欠陥により生じる厚さの異なる箇所においての伝搬挙動はより複雑になり, このため正確な欠陥情報を得ることが困難になると考えられている²⁾。また, 厚さの異なる箇所での伝送波路においての伝搬の研究の多くは理論的であり, 少数の実験的な研究が存在する³⁾が減肉欠陥を想定した研究報告はまだない。これらのことから厚さの異なる箇所において伝搬特性を把握することはLamb波を非破壊検査に応用するうえで非常に有意義であると考えられる。

本研究では欠陥により厚さが変化することを想定した, ノッチ型欠陥を設けたアルミニウム板中においてLamb波を伝搬させ観測した結果について報告する。

2. Lamb波の発生原理

2-1 Rayleigh-Lamb方程式

Lamb 波は平板材料中を伝搬する超音波の周波数と平板材料の厚さによりその伝搬特性が大きく変化する速度分散性を有している。Lamb 波の伝搬特性を理論的に解釈するために波動方程式から Rayleigh-Lamb 方程式を導出する。平板中に縦波超音波が斜角入射する場合、 y 軸方向の振動成分である SH 波は発生しないため、 y 軸方向の振動成分は考慮する必要がなく、波動方程式上では x - z 平面の振動成分のみについて考えればよい。Lamb 波の伝搬特性を表す式は(1)式及び(2)式で表される。

$$\Delta\phi = \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{1}{c_L} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\Delta\psi = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{1}{c_T} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (2)$$

上式中で ρ は密度、 λ 及び μ はLame定数と呼ばれる定数で c_L は縦波音速、 c_T は横波音速を表す。上式を解くことで式(3)と式(4)及び式(5)が導かれる。

$$(S \text{モード}) \quad \frac{\tan k_\alpha d/2}{\tan k_\beta d/2} = -\frac{(k^2 - k_\beta^2)^2}{4k^2 k_\alpha k_\beta} \quad (3)$$

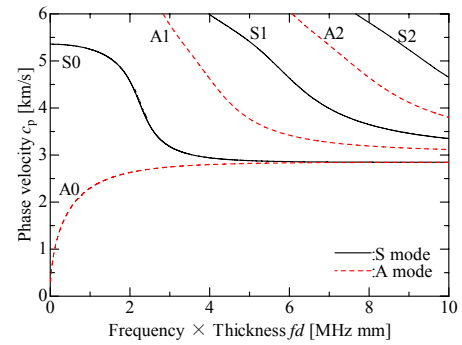
$$(A \text{モード}) \quad \frac{\tan k_\alpha d/2}{\tan k_\beta d/2} = -\frac{4k^2 k_\alpha k_\beta}{(k^2 - k_\beta^2)^2} \quad (4)$$

$$c_p = \frac{\omega}{k} \quad (5)$$

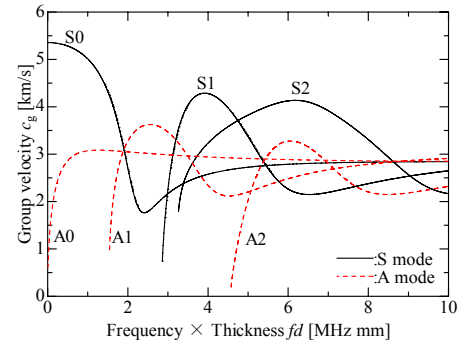
この式中の k は波数 $[\text{m}^{-1}]$ 、 ω は角周波数 $[\text{rad/s}]$ 、 c_p は位相速度を表し、(3)式及び(4)式を Rayleigh-Lamb 方程式と呼ぶ。Rayleigh-Lamb 方程式を用いることでLamb波の理論的な位相速度 c_p を算出できる。また、群速度 c_g は次式で表される。

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c_p^2}{c_p - fd \cdot \frac{dc_p}{d(fd)}} \quad (6)$$

Rayleigh-Lamb方程式から算出した位相速度 c_p および群速度 c_g のアルミニウム平板(縦波音速： $c_L = 6410 \text{ m/s}$ 、横波音速： $c_T = 3040 \text{ m/s}$)における速度分散曲線をFig.1(a), (b)に示す。Fig. 1(a), (b)より周波数 f と平板の板厚 d の積 fd により位相速度 c_p と群速度 c_g が変化する速度分散性を確認できる。また、 fd の小さい領域では基本伝搬モードのみ存在するが fd の大きい領域になると、複数の高次伝搬モードが同時に伝搬するため複雑な伝搬挙動をする。



(a) 位相速度



(b) 群速度

Fig.1 速度分散曲線

2-2 斜角入射法におけるLamb波の発生原理と臨界角 θ_c の分散曲線

Lamb波は位相整合条件を満たした角度で斜角入射した場合に最も効率よく発生させることができる。この斜角入射角度は臨界角 θ_c と呼ばれSnellの法則より次式で算出することができる。

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{c_w}{c_p} \quad (7)$$

ここで c_w はくさびの縦波音速(エポキシ樹脂, くさび内縦波音速: 2500 m/s), c_p はLamb波の位相速度を表す. Fig.2 にアルミニウム平板における臨界角 θ_c の分散曲線を示す.

アルミニウム平板の板厚 d を1.0mm, 周波数 f を2.0 MHz, 入射角を 72° (A0モード)に設定し, $fd = 2.0 \text{ MHz mm}$ の領域におけるLamb波を励起し実験を行う.

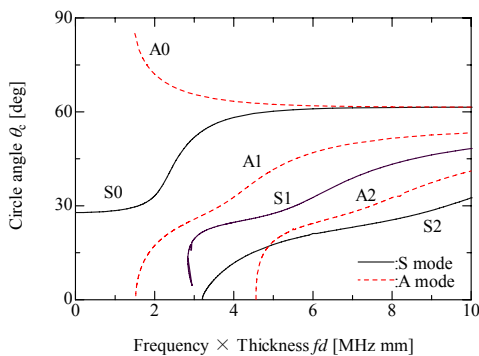


Fig.2 臨界角 θ_c の分散曲線

3. アルミニウム平板中のLamb波の測定実験

3-1 測定システム

本研究で用いるLamb波の測定システムをFig.3に示す. 電圧を130 V_{pp}, 周波数 $f = 2.0 \text{ MHz}$ とし, バーストサイン波10波を斜角探触子に印加する. Lamb波発生地点におけるアルミニウム板の板厚 d を1.0 mm, 斜角探触子の角度を 72 deg とし, $fd = 2.0 \text{ MHz mm}$ の領域におけるA0モードのLamb波を励起する.

板中を伝搬するLamb波をレーザドップラ振動計により表面の振動速度を検出する. 実験に使用したアルミニウム板は探触子の端を $x = 0 \text{ mm}$ とし, $x = 30 \text{ mm}$ の地点にノッチ型欠陥が設けてある. 走査範囲は探触子の端から30 mmと欠陥部を含め, 欠陥部を伝搬後の30 mmの範囲とした.

また, この欠陥部の幅を $\Delta x = 3 \text{ mm}$, 厚さを $\Delta d = 0.7, 0.5, 0.3 \text{ mm}$ とし, 厚さの変化による

伝搬挙動を検討し, 次に欠陥部の厚さ $\Delta d = 0.5 \text{ mm}$, 幅 $\Delta x = 1 \text{ mm}$ とし, 幅の変化による伝搬挙動について検討する.

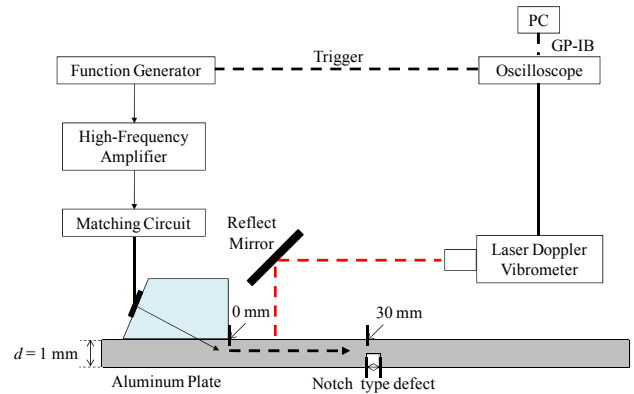


Fig.3 測定システム

3-2 測定結果

Fig.3の測定システムより得られた受波波形の例をFig.4へ, それを伝搬距離-時間元分布($x-t$ 分布)をFig.5に示す. Fig.4の受波波形や, Fig.5の $x-t$ 分布図より, 波の伝搬の様子が分かる. しかし, Lamb波は同時に多数の伝搬モードが存在するため, 受波波形そのものからLamb波の伝搬モードを判別するのは困難である. そこで厚さの異なる箇所へLamb波が入射する前後の領域における $x-t$ 分布について位相速度 c_p によるモード判別を行い, Lamb波の伝搬モードについて検討する.

3-3 伝搬モード判別法および判別結果

Lamb波のモード判別法として, Lamb波の位相速度によるモード判別法である2次元フーリエ変換法を用いてモード判別を行った. 受波波形の $x-t$ 分布をそれぞれの軸に対してフーリエ変換を行うことで波数-周波数分布($k-f$ 分布)を作成し, 位相速度の分散曲線から得られる $k-f$ 領域分散曲線と比較することでモード判別を行う. それぞれの実験結果におけるモード判別を行った結果をFig.6~9に示す.

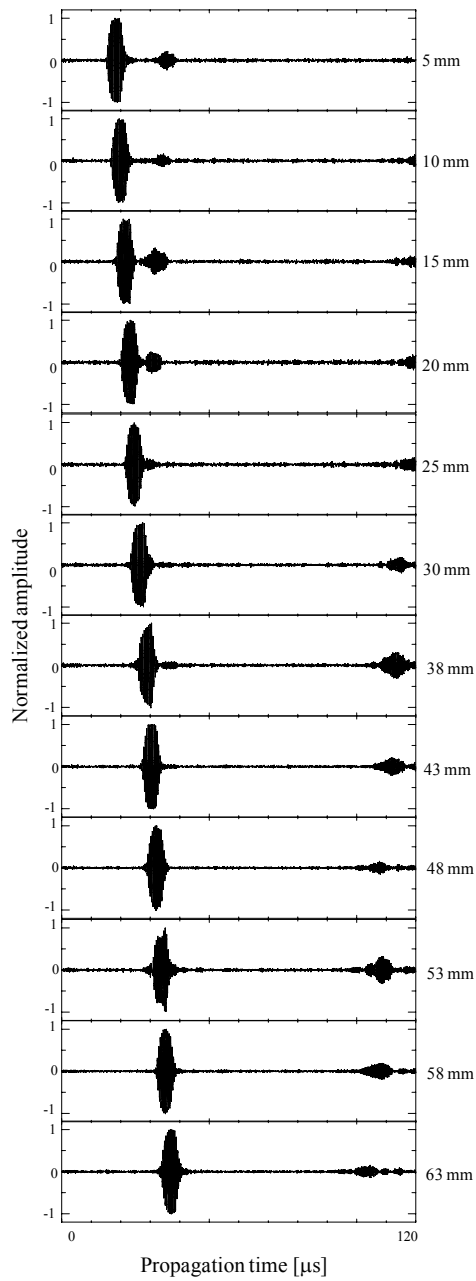


Fig.4 受波波形の一例($\Delta x = 3$ mm, $\Delta d = 0.7$ mm)

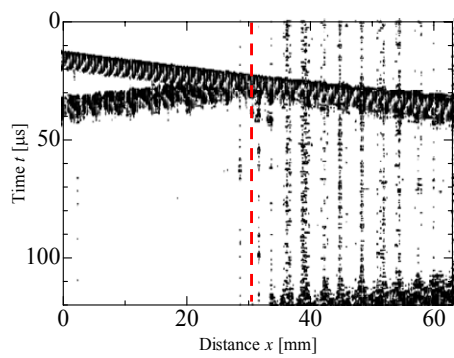
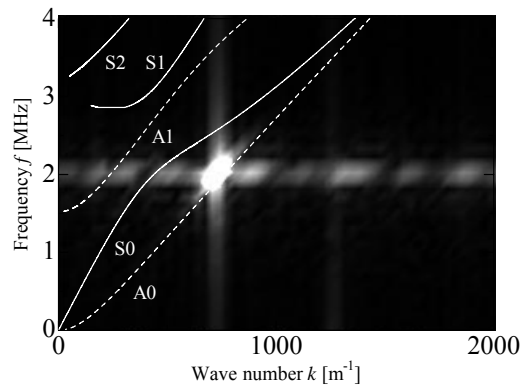
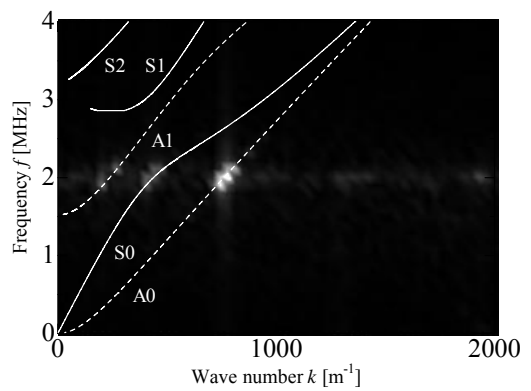


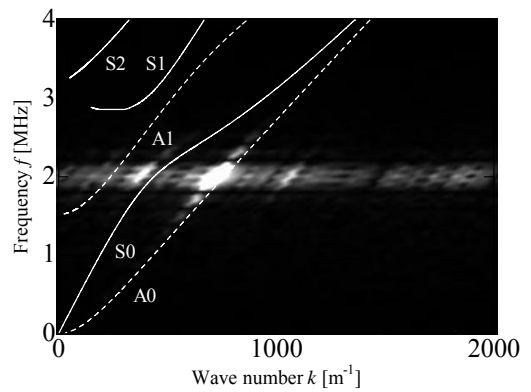
Fig.5 $x-t$ 分布の一例($\Delta x = 3$ mm, $\Delta d = 0.7$ mm)



(a) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 10 \sim 20$ μ s
(入射波)

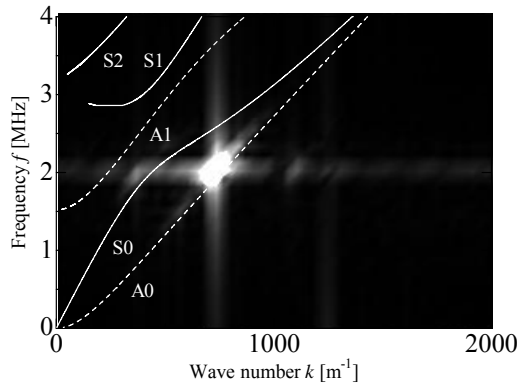


(b) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 30 \sim 40$ μ s
(反射波)

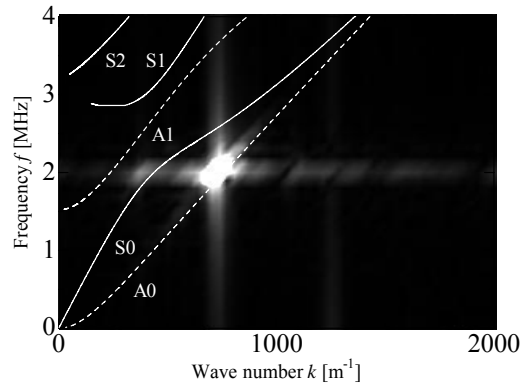


(c) $x = 33 \sim 63$ mm, $t = 20 \sim 40$ μ s
(透過波)

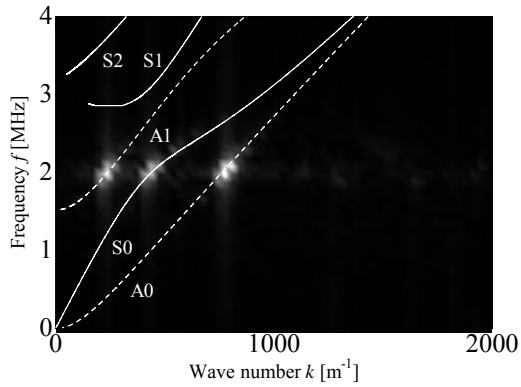
Fig.6 次元 FFT ($\Delta d = 0.7$ mm, $\Delta x = 3$ mm)



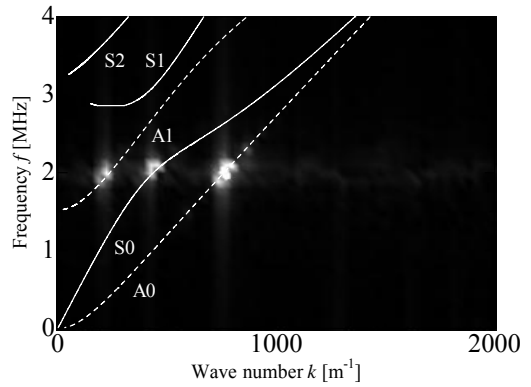
(a) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 10 \sim 20$ μ s
(入射波)



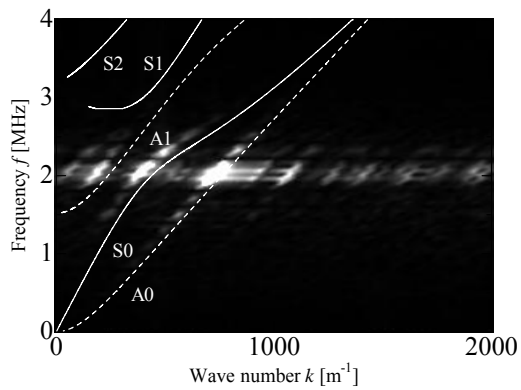
(a) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 10 \sim 20$ μ s
(入射波)



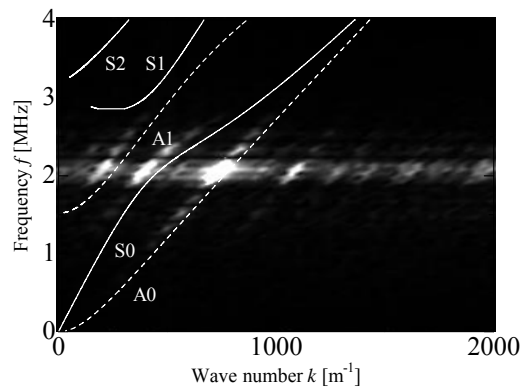
(b) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 30 \sim 40$ μ s
(反射波)



(b) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 30 \sim 40$ μ s
(反射波)



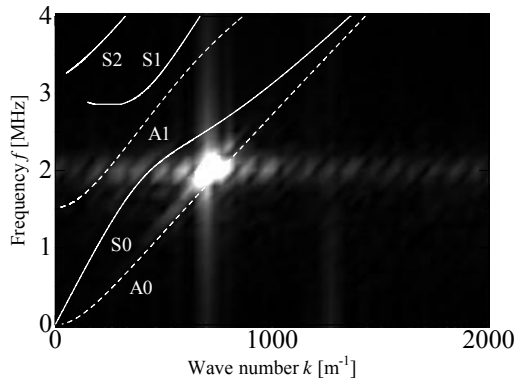
(c) $x = 33 \sim 63$ mm, $t = 20 \sim 40$ μ s
(透過波)



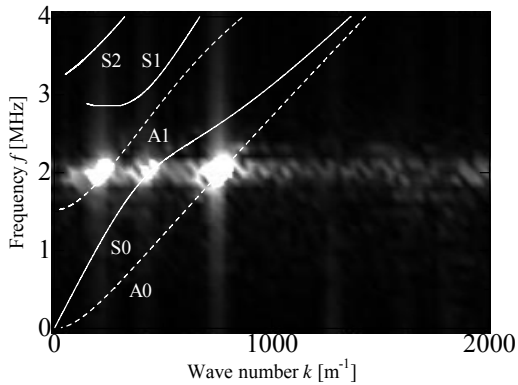
(c) $x = 33 \sim 63$ mm, $t = 20 \sim 40$ μ s
(透過波)

Fig.7 2次元FFT ($\Delta d = 0.5$ mm, $\Delta x = 3$ mm)

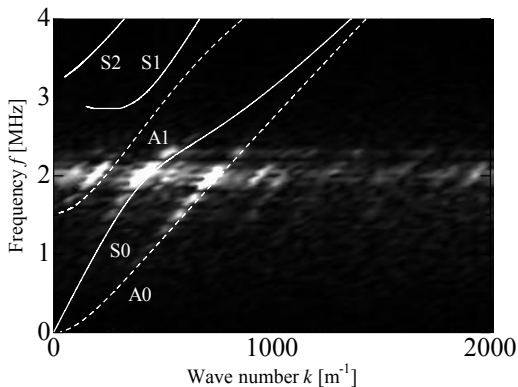
Fig.8 2次元FFT ($\Delta d = 0.3$ mm, $\Delta x = 3$ mm)



(a) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 10 \sim 20$ μ s
(入射波)

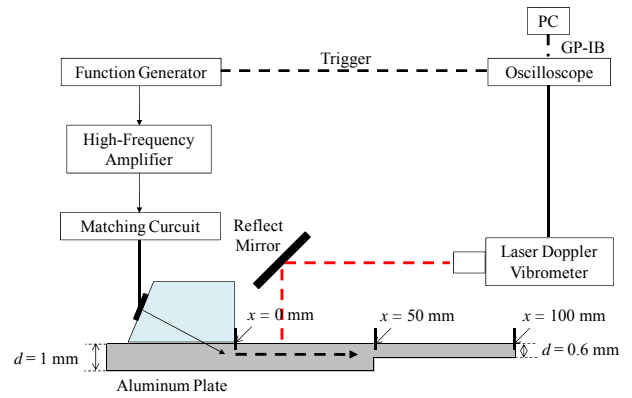


(b) $x = 0 \sim 30$ mm, $t = 30 \sim 40$ μ s
(反射波)

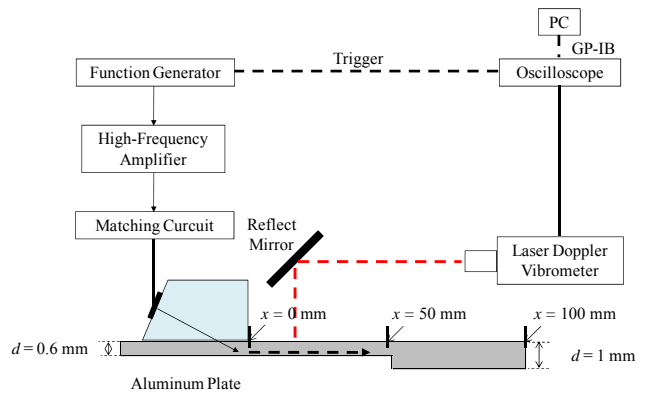


(c) $x = 31 \sim 61$ mm, $t = 20 \sim 40$ μ s
(透過波)

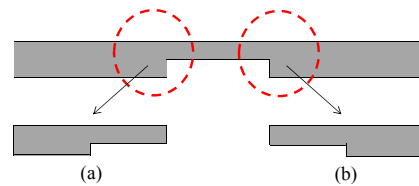
Fig.9 2次元FFT ($\Delta d = 0.5$ mm, $\Delta x = 1$ mm)



(a) 板厚が厚い方から薄い方へ入射
($d = 1$ mm から $d = 0.6$ mm)

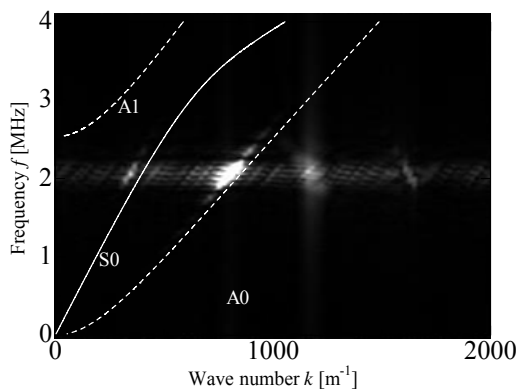


(b) 板厚が薄い方から厚い方へ入射
($d = 0.6$ mm から $d = 1$ mm)

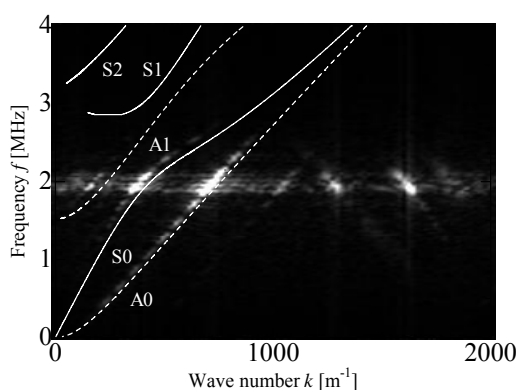


(c) ノッチ型欠陥を有するアルミニウム板と
段付きアルミニウム板の比較

Fig.10 段付きアルミニウム板における
測定システム



(a) 板厚が厚い方から薄い方へ入射
($d = 1 \text{ mm}$ から $d = 0.6 \text{ mm}$)



(b) 板厚が薄い方から厚い方へ入射
($d = 0.6 \text{ mm}$ から $d = 1 \text{ mm}$)

Fig.11 段付きアルミニウム板での
2次元FFT画像

3-4 考察

Fig.6~9の2次元フーリエ変換によるモード判別結果から、ノッチ型欠陥で反射する前の板厚 $d = 1.0 \text{ mm}$ の領域ではA0モードLamb波が伝搬しており、励起したA0モードに一致する。反射後の領域では Δd がいずれの場合においてもA0, S0, A1モードのLamb波が伝搬していることが考えられる。これは、伝搬している領域の板厚 d は変化していないため、欠陥部との境界の形状によりLamb波が反射した際に速度が分散してモード変換したためと考えられる。また、欠陥部を透過した後の領域においてもA0, S0, A1モードのLamb波が伝搬してい

ることが考えられる。これは、欠陥部に入射後及び欠陥部を透過後、板厚 d が変化するためモード変換が起こったためと考えられる。

ここで、欠陥部に入射した時と、欠陥部から元の板厚の領域に透過する時のLamb波の挙動について考察する。この2つの条件をFig.10(a)の段付きアルミニウム板の板厚が厚い方から薄い方へ伝搬する場合とFig.10(b)の段付きアルミニウム板の板厚が薄い方から厚い方へ伝搬する場合に分けて比較し検討する。段付きアルミニウム板においてA0モードLamb波を厚さが異なる領域に入射させたときのLamb波の伝搬モードの判別結果をFig.11に示す。Fig.11(a)よりA0, S0モードのLamb波が伝搬していることが考えられ、分散曲線より、周波数 $f = 2 \text{ MHz}$ 、板厚 $d = 0.6 \text{ mm}$ 、 $fd = 1.2 \text{ MHz mm}$ の領域ではA1モードのLamb波は存在し得ないことが分かる。このことから、ノッチ型欠陥に入射した段階ではA1モードは発生していないことが考えられる。また、Fig.11(b)よりA0, S0, A1モードのLamb波が伝搬していることが考えられ、これは板厚 d が変化したことで、モード変換を起こしたものと考えられる。これより、ノッチ型欠陥により板厚 d が小さくなった領域から元の板厚に戻る領域に透過した時にモード変換を起こしたのではないかと推測できる。

4.おわりに

本研究では、ノッチ型欠陥を設けたアルミニウム板中におけるLamb波を伝搬させた場合のLamb波の伝搬挙動について検討した。その結果、欠陥部境界で反射するときや、欠陥部で板厚が変化することで、A0モードLamb波の一部がS0, A1モードへモード変換する可能性を示した。今後は、解析を行い実験結果の妥当性を確かめることや、別のモデルを用いて検討を行うことが挙げられる。

<参考文献>

- 1) 西野秀郎：“非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望”，非破壊検査，52，12，
pp.654-661(2003)
- 2) 林高弘，川嶋紘一郎：“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”，日本機械学会論文集 A 編，67 卷，664 号，
pp.1959-1965(2001)
- 3) P.Marical, M.Ech-Cherif, EL-Kettani,
M.V.Predoi：“Guided wave in elastic plates with
Gaussian section variation: Experimental and
numerical results”，Ultrasonics, Vol.47,
pp.1-9(2007)