

空中アレイ型探触子より発生させた Lamb 波による欠陥検出実験

Defect detection using Lamb wave generated by air-coupled array type transducer

○清水 彰人¹, 今野 和彦²

○Akito Shimizu¹, Kazuhiko Imano²

¹秋田大学 大学院工学資源学研究科

¹Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

²秋田大学 大学院理工学研究科

²Graduate School of Engineering Science, Akita University

キーワード:Lamb 波(Lamb wave), 空中超音波(Air-Coupled),アレイ型探触子(array type transducer),
欠陥検出(Defect detection),有限要素解析(Finite element analysis)

連絡先: 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 大学院理工学研究科

数理・電気電子情報学専攻 電気電子工学コース

今野和彦, Tel : 018-889-2490, Fax : 018-837-0406, E-mail : imanoken@ee.akita-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 構造物の非破壊検査には超音波が広く利用されている. 超音波の非破壊検査は垂直探傷法が一般的である. しかし, 垂直探傷法は波長より薄い試料の測定ができない. そこで平板中を伝搬する Lamb 波を用いた検査法がある. Lamb 波は減衰が少なく長距離伝搬が可能であり, 長い試料の測定に適している. Lamb 波を用いた検査法は探触子と試料の間に固体くさびを介する接触法が一般的である. しかし, 接触法は測定試料が制限されること, 測定試料ごとに角度の異なる固体くさびが必要となるなどの問題がある. これらの問題点を解決する一方法として空中超音波を用いた Lamb 波の発生が考えられる. しかし, 空中超音波を用いると空気と試料間の音響的不整合, 空気中における

超音波の減衰, 空中超音波は低周波を用いるため指向性が広いなどの問題がある. これらの問題点から空中超音波を用いた Lamb 波の研究はほとんど進められていない^{[1],[2],[3]}.

そこで本研究では, 50 個の探触子を用いて指向性が高く, 強力な空中超音波を平板に入射し Lamb 波の発生, 受波を行う. また, 大型の試料の欠陥の検出を想定し, アルミニウム平板に存在するノッチ型欠陥の検出を行う.

2. Lamb 波の伝搬特性

Lamb 波は一般的に板波と呼ばれるもので無限に広い固体板の中に縦波と横波が混在して生成される. Lamb 波の伝搬過程を Fig.1 に示す. 平板に対して斜角方向に縦波超音波を伝搬させると, 平板と空気の境界面で屈折する. このとき屈折した縦波超音波の一部が横波超音波

に変換される。境界面で分離した縦波と横波は平板の上下面で反射を繰り返し一部はモード変換しながら伝搬する。このようにして伝搬する波が Lamb 波である。

Lamb 波には伝搬モードとして Fig.2 に示すように、S モード(Symmetric mode)と A モード(Anti-symmetric mode)が存在する。S モードは板の上面と下面が対称に伸縮・屈曲を繰り返しながら伝搬し、A モードは非対称に伸縮・屈曲を繰り返しながら伝搬する。平板の上下面が自由境界面であることから S モードおよび A モードには高次伝搬モードが存在し基本モードから順に S0, S1, S2 . . . , A0, A1, A2, . . . と呼ばれている。

また、Lamb 波は試料の材質やその厚さ、超音波の周波数に依存して伝搬特性が大きく変化する。Rayleigh-Lamb 周波数方程式から Lamb 波の位相速度 c_p が求められる。ここで試料の厚さを d 、試料中の縦波音速と横波音速を c_L と c_T 、角周波数を ω とすると式(1)、式(2)が成り立つ。式(1)を満たす場合は S モード、式(2)を満たす場合は A モードとなる^{[4],[5]}。

$$\frac{\tan(k_1 d/2)}{\tan(k_2 d/2)} = -\frac{(k_0^2 - k_2^2)}{4k^2 k_1 k_2} \quad (1)$$

$$\frac{\tan(k_1 d/2)}{\tan(k_2 d/2)} = -\frac{4k^2 k_1 k_2}{(k_0^2 - k_2^2)^2} \quad (2)$$

$$c_p = \omega / k_0 \quad k_1 = \sqrt{(\omega / c_L)^2 - k_0^2} \quad k_2 = \sqrt{(\omega / c_T)^2 - k_0^2}$$

また、群速度 c_g は式(3)で定義される。

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c_p^2}{c_p - fd \times \frac{dc_p}{d(fd)}} \quad (3)$$

本研究では構造材料として用いられることが多いアルミニウム平板を測定試料とする。試料の厚さ $d=2.00$ mm、縦波音速 $c_L=6420$ m/s、横波

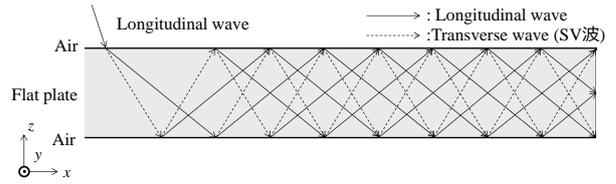


Fig.1 Lamb 波の伝搬過程

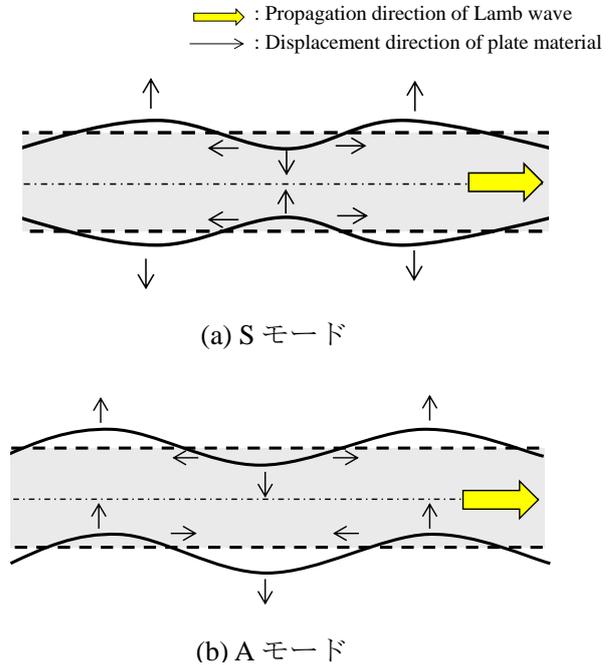
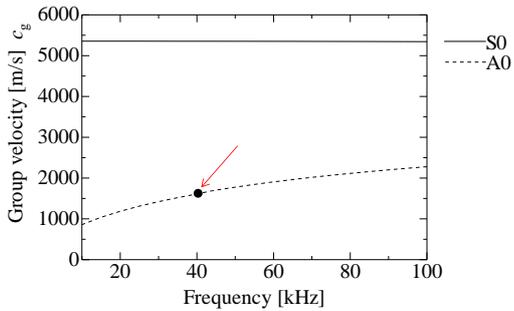


Fig.2 Lamb 波の伝搬モード

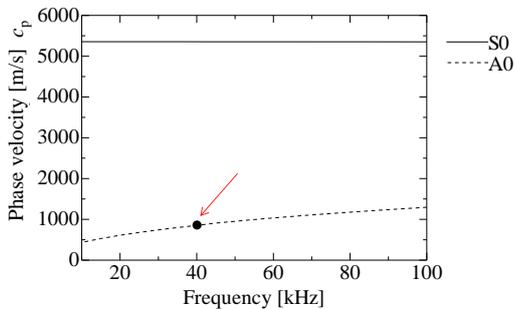
音速 $c_T=3040$ m/s^[6]として Rayleigh-Lamb 方程式を用いて位相速度および群速度の分散曲線を Fig.3 に示す。また Lamb 波は超音波の斜角入射により発生する。このとき、空気中の縦波音速 $c_A=343$ m/s として、効率よく Lamb 波が発生する臨界角 θ を式(4)に示すスネルの法則を変形した式を用いて算出する。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c_A}{c_p}\right) \quad (4)$$

式(4)と Fig.3(b)を用いて臨界角の分散曲線を Fig.4 に示す。この図から、入射する超音波の周波数が 40.5 kHz であるとき、A0 モードの臨界角は 23.8 度となる。



(a) 群速度



(b) 位相速度

Fig.3 速度分散曲線

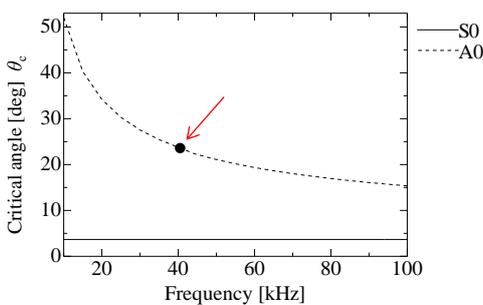


Fig.4 臨界角分散曲線

3. Lamb 波の欠陥検出

3.1 実験システム

本研究で用いる探触子を Fig.5, その角度特性を Fig.6 に示す. さらに 50 個の探触子を Fig.7 のように配置し, 並列に接続して駆動させる. また静電容量が大きくなることを防ぐためインダクタを並列に接続する. その角度特性を Fig.8 に示す. 探触子を 50 個用いたことで指向性が鋭くなり超音波を広がることなく入射させることが可能となる. 測定システムを Fig.9 に示す. 測定試料はアルミニウム平板を用いる.

発振器(NF WF1974)より電圧 20.0 V_{p-p} , 周波数 40.5 kHz , バースト正弦波 5 波を発生させ, 探触子に印加する. アルミニウム平板中を伝搬する Lamb 波をレーザドップラ振動計 (GRAPHTEC AT0023 AT3700) で測定しオシロスコープ (Agilent DSOX-3014A) で振動速度波形を取得する. 伝搬距離は 300 mm と設定した. また有限要素解析を行い実験結果との比較を行う.

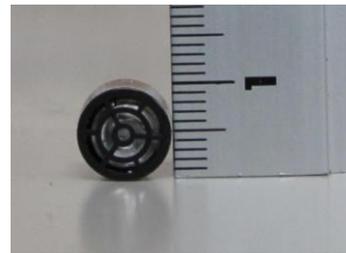


Fig.5 探触子

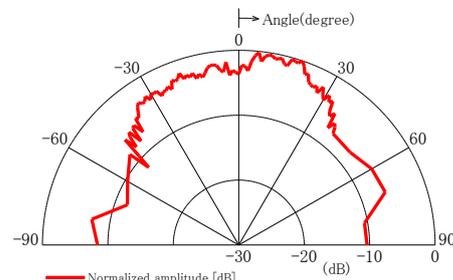


Fig.6 探触子 1 個の角度



Fig.7 50 個の探触子

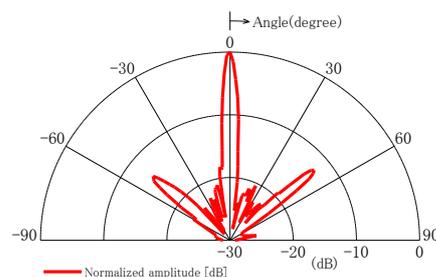


Fig.8 探触子 50 個の角度特性

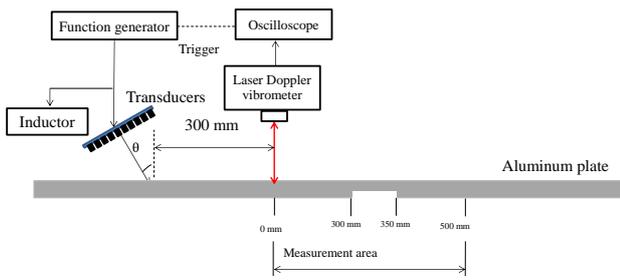
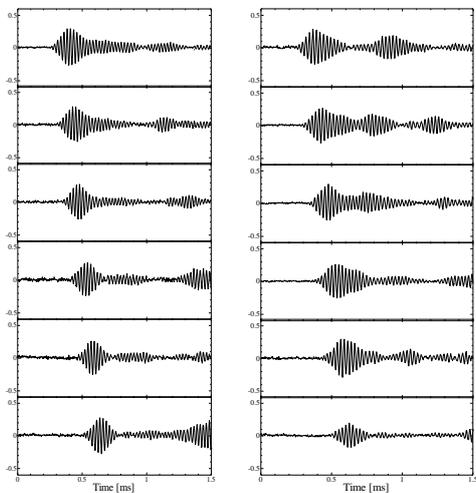


Fig.9 実験システム

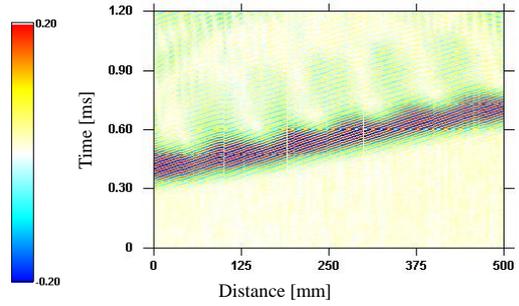
3.2 実験結果

取得した振動速度波形を Fig.10 に示す. さらに取得した振動速度波形を用いて作成した $x-t$ 分布を Fig.11 に示す. $x-t$ 分布とは測定した振動速度波形を並べていき測定位置 x [mm] に対する時間 t [ms] を表した分布である. 解析で取得した $x-t$ 分布を Fig.12 に示す. 結果を比較すると Fig.11(a), Fig.12(a)では反射波は確認できないが Fig.11(b), Fig.12(b)では反射波が確認できる. 欠陥を通過した後に反射波が観測できないことから欠陥からの反射だと考えられる. よって欠陥のない試料と比較することで検出が可能と考えられる. また欠陥のある 300 mm から 350 mm では振動速度が大きくなっている. これは欠陥によって Lamb 波が多重反射するため大きくなると考えられる.

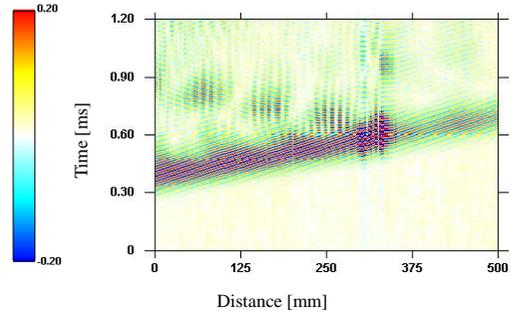


(a) 欠陥なし (b) 欠陥あり

Fig.10 振動速度波形

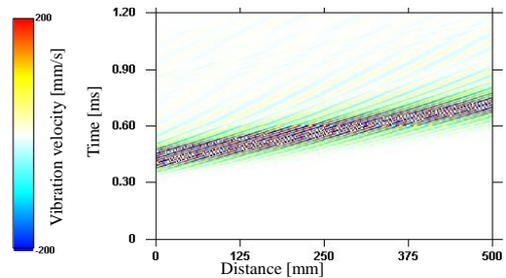


(a) 欠陥なし

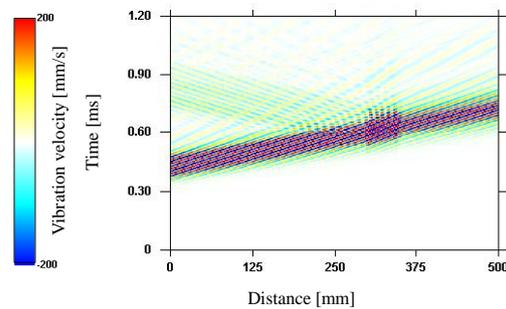


(b) 欠陥あり

Fig.11 実験結果



(a) 欠陥なし



(b) 欠陥あり

Fig.12 解析結果

4. おわりに

本研究では空中アレイ型探触子により発生させた Lamb 波を用いてアルミ平板の欠陥検出を行った。その結果、Lamb 波を用いて欠陥が検出できることを確認した。しかし、欠陥付近は多重反射の影響により複雑な伝搬をしていると考えられる。今後は欠陥の形状や厚さを変えて Lamb 波の伝搬挙動の解析、反射波の振幅変化があるかを行う。

《参考文献》

- [1] 中嶋淳皓, 西野秀郎: “線集束型空気結合超音波センサによる効率的円周 Lamb 波の励起” 日本機械学会, (2014)
- [2] 渡邊雅也: “MHz 帯空中超音波変換器を用いた金属板中の Lamb 波の検出” 第 26 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, pp433-434(2005)
- [3] 今野和彦: “超音波を用いたパイプ中でのガイド波の発生 = MHz帯空中超音波の非破壊試験への応用 =” 超音波TECNO, vol.21, no.6, pp95-99(2009)
- [4] 山本美明: “超音波基礎工学”, 日刊工業新聞社, pp.45-47,pp51-53(1981)
- [5] 富川義朗: “超音波エレクトロニクス振動論”, 朝倉書店, pp59-66(1988)
- [6] 超音波便覧編集委員会: “超音波便覧”, 丸善株式会社, pp.710-733(2013)