

音圧極性を含めた Lamb 波の可視化に関する実験的検討

Visualization Experiment on the Polarity of Sound Pressure Distribution for the Lamb Waves

○保坂 儒人¹, 今野 和彦²

○Yoshito Hosaka¹, 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: ストロボ光弾性法(Strobe Photoelastic Method), 鋭敏色法(Sensitive Tint Method)
可視化(Visualization), 差分画像(Subtraction Image), Lamb 波(Lamb Waves)

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

構造物などの非破壊検査には超音波が広く使用されている。通常は垂直探傷法が適用されることが多いが、特に平板などを検査する場合は探触子の走査に時間がかかるため効率的ではない。平板を検査する方法はガイド波によるものが有効であり、このガイド波の一種として Lamb 波がある。これまで Lamb 波を利用した非破壊検査に関する検討が行われ、固体内部における欠陥検出の可能性などが示されている^[1]。しかし、多くの報告では対象物表面において超音波の送受波を行っているため、その伝搬過程が把握できていない。正確な非破壊検査を行うためには、超音波の可視化により伝搬過程を明らかにすることが必要であると考えられる。

超音波の可視化手法としては有限要素法や

有限差分時間領域法などの電子計算機による数値解析手法が代表的であるが、振動源や伝搬媒質などを実物と同一にモデル化することは難しい。このような手法と異なるものとして実験的な可視化手法が有効であり、その一つにストロボ光弾性法がある。これは固体中の静的な応力を観察するために使用する光弾性法^[3]を、超音波による動的な応力の可視化のために改良したものであり、ガラスなどの光を透過する固体に超音波を送波し、その伝搬過程を可視化することが可能である。実際に超音波を送波して行うモデル実験であり、正確な可視化結果が得られると考えられる。

本報告では、ガラス平板に 2 MHz の S1 モードおよび A1 モード Lamb 波を送波した場合に、その伝搬過程をストロボ光弾性法と鋭敏色法

を組み合わせた可視化実験系により可視化を試みた結果について述べる。

2. Lamb 波の伝搬特性

Lamb 波には板状試料の厚さ方向において対称に伸縮・屈曲し伝搬するモード(Sモード)と、非対称に伸縮・屈曲し伝搬するモード(Aモード)があり、それぞれに高次のモードが存在する。Fig.1 は S1 モードと A1 モードの Lamb 波を有限要素解析したときの変位ベクトル図であり、平板が対称および非対称に変位していることが分かる。また、Lamb 波は平板の厚さ、音速および送波する超音波の周波数により波の位相速度および群速度が大きく変化する速度分散性を持ち、この特性は Rayleigh-Lamb 周波数方程式で表現される。平板の厚さを d 、平板中の縦波音速と横波音速を c_L と c_T 、送波する超音波の角周波数を ω とすると、SモードとAモードの Rayleigh-Lamb 周波数方程式は式(1)および

式(2)となる^[2]。

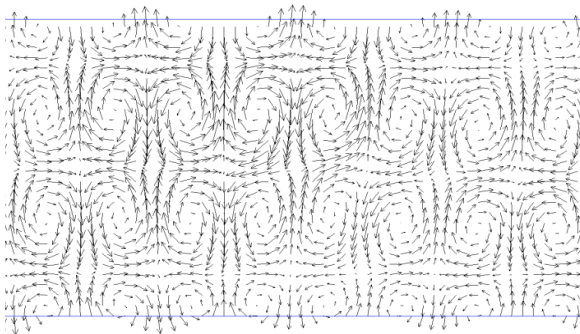
$$\frac{\tan(k_\alpha d/2)}{\tan(k_\beta d/2)} = -\frac{(k^2 - k_\beta^2)}{4k^2 k_\alpha k_\beta} \quad (1)$$

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

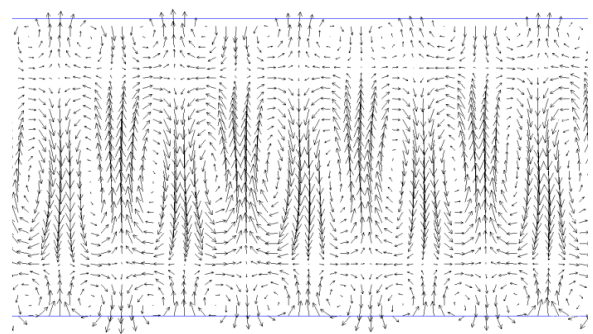
ただし、 $c_p = \omega/k$ 、 $k_\alpha = (\omega^2/c_L^2 - k^2)^{1/2}$ 、 $k_\beta = (\omega^2/c_T^2 - k^2)^{1/2}$ である。また、群速度 c_g は式(3)で定義される。

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

厚さと音速を後述の可視化実験で使用するガラス平板の値、すなわち $d=4.02$ mm、 $c_L=5500$ m/s および $c_T=3200$ m/s として、Rayleigh-Lamb 周波数方程式を満たす ω と c_p および c_g の分散曲線を Fig.2 に示す。本報告では Lamb 波を超音波の

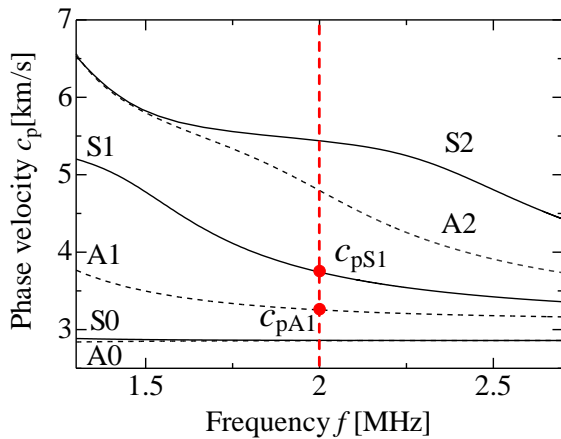


(a) S1 モード

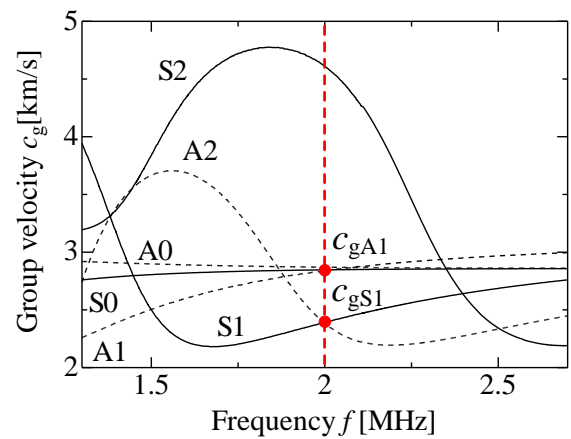


(b) A1 モード

Fig.1 Lamb 波送波時の変位ベクトル図



(a) 位相速度 c_p



(b) 群速度 c_g

Fig.2 Lamb 波の分散曲線

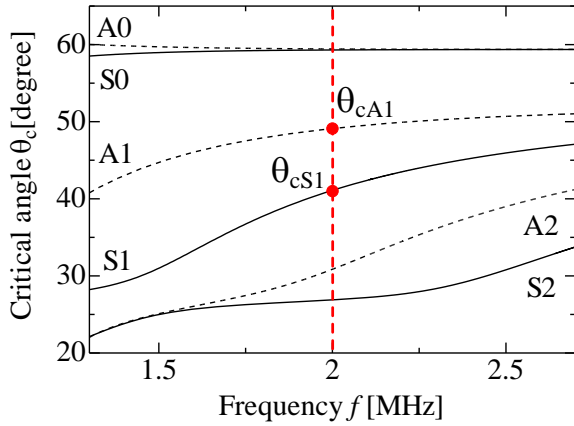


Fig.3 臨界角分散曲線

斜め入射により励起する．励起に使用するくさびの材料は縦波音速 $c=2460$ m/s のポリエーテルイミドである．このとき，入射角が式(4)に示すスネルの法則を変形した式を満たす臨界角 θ_c であれば，位相速度 c_p の Lamb 波を効率良く励起することができる．

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

Fig.2(a)の位相速度分散曲線と式(4)を利用して臨界角分散曲線を描いた結果を Fig.3 に示す．この図から，入射する超音波の周波数が 2 MHz であるとき，S1 および A1 モードの臨界角はそれぞれ 41 度および 49 度となる．

3. 実験方法

Fig.4 に本報告で使用する可視化実験系を示す．2 枚の直線偏光板は直交ニコル状態とし，検光子の前に λ 板を追加して鋭敏色法で Lamb 波の可視化を行う．発振器(KEYSIGHT 33600A)とバイポーラ増幅器(NF HSA4101)により周波数 2 MHz，振幅 100 V_{pp} のバースト正弦波 30 波の電圧信号を圧電振動子に入力する．電圧信号を入力するタイミングと白色光を発光するストロボ装置(Sugawara Lab. NPL-2)が動作するタイミングは繰り返し周期 10 ms で同期する．遅延装置(Sugawara Lab. FG-310)の時間 ΔT を変化させることで任意の時刻の音場が可視化でき， ΔT を連続的に変化させると音波の伝搬の推移

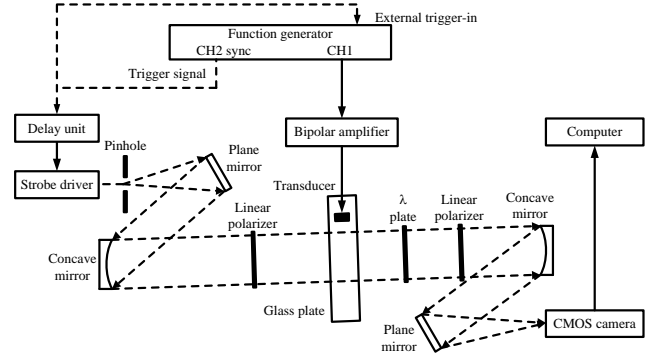


Fig.4 可視化実験系

が可視化可能となる．可視化結果は CMOS カメラ (Artray ARTCAM-2000CMV-USB3) で取得する．CMOS カメラで得られた画像には差分画像処理を施し，超音波の波面を明瞭にしている^[4]．

4. 実験結果

Fig.5 と Fig.6 に Fig.4 で示した実験系を使用し ΔT を 12.5, 16.2, 20.5, 24.0 および 32.6 μ s と変化させた場合の S1 モードおよび A1 モード Lamb 波の可視化画像を示す．

5. 考察

Fig.5 と Fig.6 の可視化結果から， ΔT を長くすると S1 および A1 モードの Lamb 波がガラス平板の左から右へ伝搬の様子が観測できることが分かる．ガラス中の超音波の波面において，赤色の部分は超音波による縦方向の圧縮力および横方向の引張力，水色の部分は超音波による縦方向の引張力および横方向の圧縮力である．従って，従来のストロボ光弾性法では判別できない超音波の音圧の極性を可視化できていることが分かる．

電圧信号を印加してから超音波がガラス平板に入射するまでの時間は 10 μ s 程度である．このため， $\Delta T=12.5$ μ s では超音波がガラス平板に 5 波程度入射している．特に Fig.5(a)を参照すると， $\Delta T=12.5$ μ s で S1 モード Lamb 波のパターンが現れているので，5 波程度で Lamb 波を励起できることが考えられる．

Fig.7 および 8 に $\Delta T=24.0$ μ s の時の可視化画

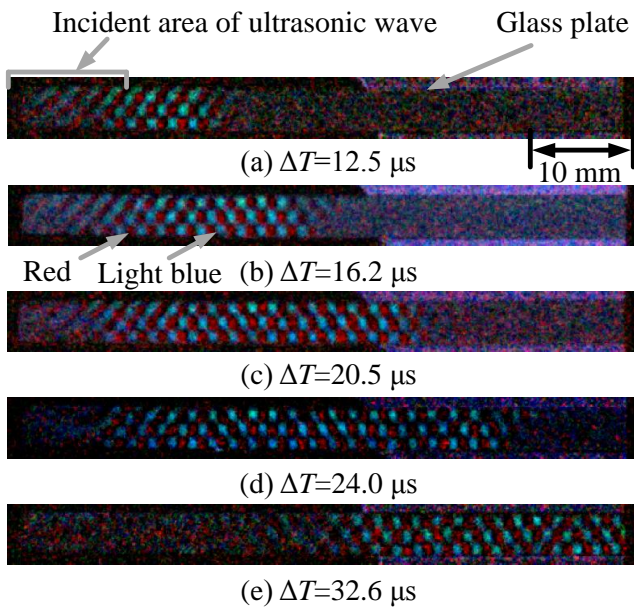


Fig.5 S1 モード Lamb 波の可視化結果

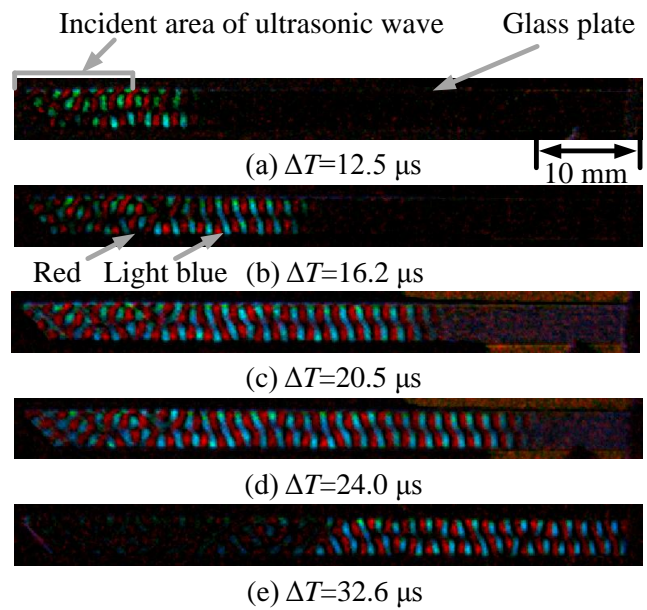


Fig.6 A1 モード Lamb 波の可視化結果

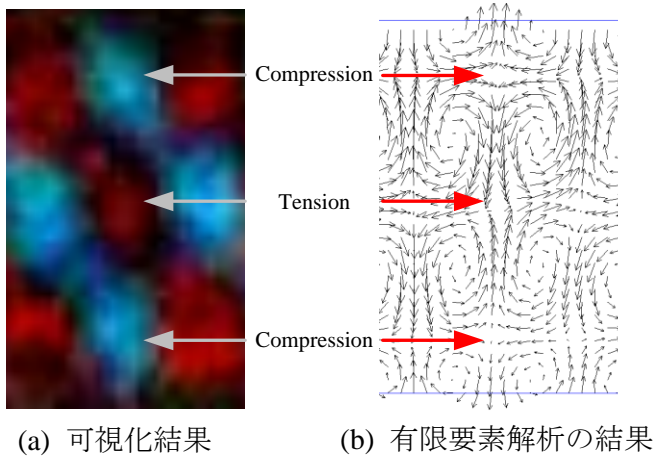


Fig.7 可視化結果と解析結果の比較
(S1 モード)

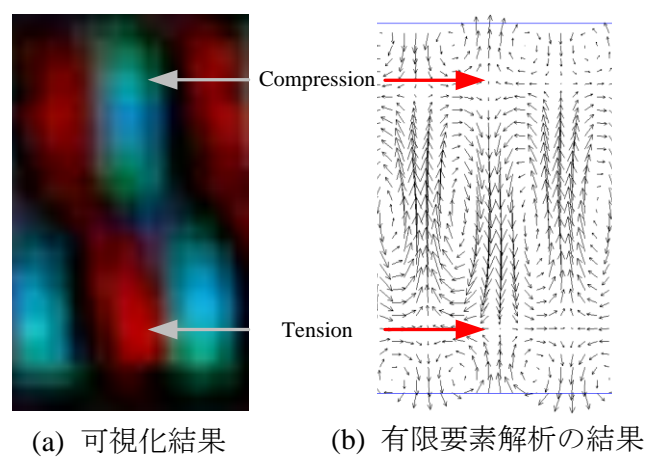


Fig.8 可視化結果と解析結果の比較
(A1 モード)

像におけるガラス平板部の拡大図と有限要素解析の結果を示す。可視化画像から得られる超音波の応力方向と解析結果から得られる変位ベクトルの方向が一致していることが分かる。

6. おわりに

ストロボ光弾性法と鋭敏色法を利用して、ガラス平板中を伝搬する Lamb 波の可視化を行った。この結果、S1 および A1 モードの Lamb 波の伝搬過程を、音圧極性を含めて可視化することができた。

今後の課題として、伝搬路に欠陥が存在する場合の Lamb 波の伝搬挙動の可視化や、零や負

の群速度を有する Lamb 波の可視化などが挙げられる。

《参考文献》

- [1] K. Imano and T. Endo : Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour., Vol.19, No.1/2, pp.20-23(2013).
- [2] 梅崎栄作 : 精密工学会誌, Vol.79, No.7, pp.607-608(2013).
- [3] 山本美明 : “超音波基礎工学”, 日刊工業新聞社, pp.45-47(1981).
- [4] 保坂儒人, 今野和彦 : 素材物性学雑誌, 第27巻, 第1/2号, pp.20-24(2016).