

鋭敏色法によるA2モードLamb波の可視化

保坂 儒人¹, 今野 和彦²

Sensitive Tint Visualization of A2 Mode Lamb Waves

Yoshito HOSAKA¹ and Kazuhiko IMANO²

Propagation of higher order mode Lamb waves of 2 MHz in a glass plate is visualized using a strobe photoelastic system introducing sensitive tint visualization method. The birefringence from stresses causes the interference of color while the Lamb waves propagation. Time transition of ultrasonic waves propagation can be observed by varying the timing of strobe pulse light. A2 mode Lamb waves are selectively excited using oblique incidence by the wedge. Incidence angle was adjusted by the phase velocity calculated by the Rayleigh-Lamb frequency equation. Obtained bitmap image from the visualization system and CMOS camera are processed to enhance the contrast. Directions of applied forces were determined using image of static stresses. Lamb waves in the glass are clearly visualized with the polarity of sound pressure.

Keywords : Strobe photoelastic method, Sensitive tint method, Visualization, Ultrasonic waves, Lamb waves, Subtraction image

1. はじめに

近年、構造物などの非破壊検査には超音波が広く利用されている。一般的な方法として検査対象に超音波を送波し、その反射波の伝搬時間、波形や周波数成分などから検査対象の健全性を評価するものがあり、これはパルスエコー法と呼ばれている¹⁾。しかし、このような検査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、検査対象内部における伝搬過程が把握されていない。超音波が媒質を伝搬する際には散乱、減衰やモード変換などが発生し複雑な伝搬特性を示す^{2,3)}。このため、超音波の音場を可視化することで非破壊検査結果の理解を容易にしたり、検査の信頼性の向上をさせたりすることが可能であると考えられる。

通常、超音波の音場を実験的に可視化するには、音場にマイクロフォンなどの物理センサを配置してそのセンサを走査しながら測定される電圧値などにより音圧分布などの音場を推定する方法がある。特に水などの流体内部の音場を得るにはこの方法が一般的に利用されている。しかし、この方法では物理センサ自体が音場を乱すことがあるため実際の音場とは異なるものが得られる可能性がある。また、金属などの固体中には物理センサを配置することができないという欠点もあるため、物理センサを使用せずに非接触で音場を得る方法が有効である⁴⁾。

非接触で音場を得る方法の一つに音波と光の相互作用を利用

した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^{5,6)}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^{7,8)}、ガラスなどの光を透過する固体に超音波を送波し、その伝搬過程を正確に可視化することが可能である。特に本論文の実験で使用したガラスは音速値などにおいて、構造物に利用されている鋼と類似の特性をもっているため可視化結果は金属体中の音場の解釈に有用である。特に複雑な伝搬特性を示す超音波の一種として、平板中でモード変換を繰り返しながら一定のパターンを作って伝搬するLamb波がある。先行研究^{9,12)}では、ストロボ光弾性法によりLamb波を可視化した報告がされている。しかし、従来のストロボ光弾性法では音圧の絶対値に応じた撮影画像の輝度の変化のみが得られ、音圧の極性を可視化するには偏光子の回転などの機械的操作が必要となり実験手順が複雑となる。このため、Lamb波の伝搬の時間推移と音圧極性を同時に可視化した報告は行われていない。一方、静的な応力の方向を判別する方法としては鋭敏色法¹³⁾が利用されている。これは応力の方向を複屈折の干渉色の変化として可視化する方法である。この方法を超音波の可視化に利用した研究報告^{14,15)}ではガラス中の共振を可視化しており、バースト正弦波を使用した場合などの過渡状態の可視化例はない。また、これらのような研究報告では音波と光の相互作用を意図的に大きくして可視化を行っている場合が多い。特に過渡状態の可視化では、数百～数千Vのバースト正弦波で圧電振動子を駆動するなどして、高感度な可視化を行っている。しかし、このような駆動条件では圧電振動子や媒質の非線形性が大きく現れるという問題がある。そこで、比較的低い電圧で圧電振動子を駆動して超音波伝搬画像を撮影し、その画像データを差分画像処理すれば、音波と光の相互作用が小さくても超音波の伝搬過程を可視化できると考えられる¹⁶⁾。

本論文では、ガラス平板に2MHzのA2モードLamb波を発生させた際の音波の伝搬過程を可視化している。可視化手法に

平成28年10月26日受付；平成29年2月27日受理

1 秋田大学大学院 工学資源学研究所 電気電子工学専攻
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University 1-1, Tegata Gakuen-machi, Akita 010-8502, Japan

2 秋田大学大学院 理工学研究所 数理・電気電子情報学専攻 電気電子工学コース

〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

Graduate School of Engineering Science, Akita University 1-1, Tegata Gakuen-machi, Akita 010-8502, Japan

は従来のストロボ光弾性法に鋭敏色法を組み込んだシステムを使用し、このシステムによって撮影した画像をコンピュータで数値的に処理することでLamb波群が高感度化された画像が得られる。得られた可視化結果と静的な外力印加時の干渉色の観察結果を比較し、音圧の引張・圧縮方向の可視化について検討を行っている。また、可視化画像から送波したモードがA2モードであることを定量的に確認している。これらの結果から、本論文で示す可視化システムにより音圧の極性を含めてLamb波の伝搬の可視化が可能であることを述べる。

2. Lamb波の伝搬特性と励振方法

Figure 1の平板の図において、 z 軸方向に変位しながら x 軸方向へLamb波が伝搬する場合を仮定すると、この弾性波には x 軸対称に伸縮・屈曲しながら伝搬するモード(Sモード)と、非対称に伸縮・屈曲しながら伝搬するモード(Aモード)があり、それぞれに高次のモードが存在する。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¹⁷⁾。

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

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

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

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

任意の周波数における位相速度および群速度の値を得るためには、式(1)および式(2)を満たすときの周波数と速度による軌跡、すなわちLamb波の分散曲線を描けばよい。平板の厚さ、縦波音速および横波音速を後述の可視化実験で使用する値である $d = 4.02$ mm、 $c_L = 5500$ m/sおよび $c_T = 3200$ m/sとして、Rayleigh-Lamb周波数方程式により分散曲線を描いた結果をFigure 2(a)および(b)に示す。この図から、Lamb波は周波数や伝搬モードの変化に対して位相速度と群速度が大きく変化する速度分散性を持っていることが分かる。

本論文ではLamb波を超音波の斜め入射により励起する。励起に使用する探触子の材料は縦波音速 $c = 2460$ m/sのポリエーテルイミドである。このとき、入射角を式(4)に示すSnellの法則の式を満たす角度 θ_c に設定すれば、任意の位相速度 c_p のLamb波を効率良く励起することができ、これを位相整合条件という。

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

Figure 2(a)の位相速度分散曲線の値と式(4)を利用して最適な入射角の分散曲線を描いた結果をFigure 2(c)に示す。Figure 2の分散曲線よりA2モードを例にとると、このモードは他のモードとの干渉がなく実験が容易なため、以下ではA2モードLamb波を可視化対象とする。入射する超音波の周波数が2 MHzであるとき、A2モードLamb波の位相速度は4800 m/s、群速度は2380 m/sおよび入射角は31°となる。

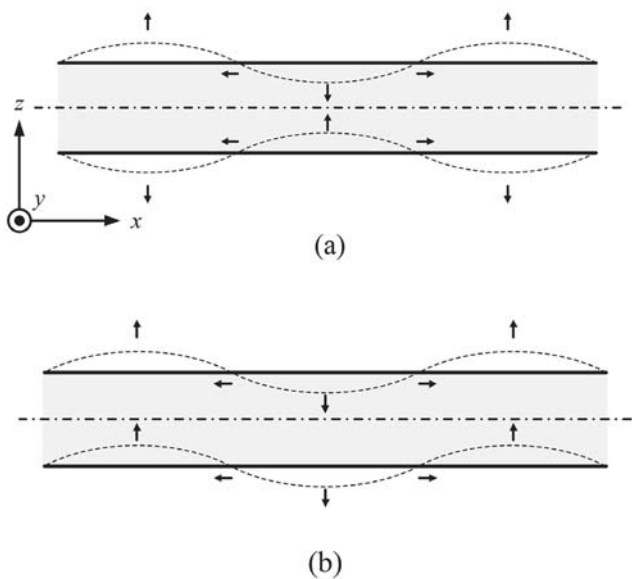


Figure 1 Mode of Lamb waves.

(a) Symmetrical mode, (b) Asymmetrical mode.

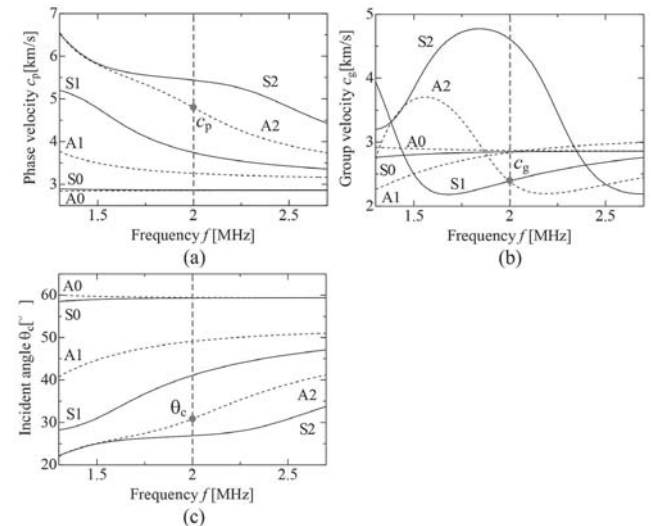


Figure 2 Dispersion curves of Lamb waves.

(a) Phase velocity, (b) Group velocity, (c) Incident angle.

3. 可視化手法

はじめに鋭敏色法において外力の印加方向における干渉色の变化を観察した。直交ニコル状態で光弾性現象を観察する際、複屈折のリターデーションを R 、光源の波長を λ とすると検光子の透過率は関数 $\sin^2(\pi R/\lambda)$ に対応して変化する¹⁸⁾。波長 λ を 700.0 nm (赤色)、546.1 nm (緑色) および 435.8 nm (青色) としリターデーション R が変化するときの関数 $\sin^2(\pi R/\lambda)$ のグラフを描いた結果を Figure 3 に示す。図に示すようにリターデーションが大きくなると、光の波長に応じて透過率が変化することが分かる。このことから、光源に白色光を利用すると透過光の色が変化することが分かる。Figure 4 に示すように検光子の前に 550 nm 程度のリターデーションをもつ鋭敏色板を追加すると、応力複屈折のリターデーションの変化に応じて検光子透過光の色が変化する。この原理を利用して応力を観察する方法を鋭敏色法という¹⁹⁾。応力がない状態では緑色の光の透過率はほぼ零であるため、鋭敏色法では試験物に応力複屈折が発生していない部分の色が赤紫色となる。この観察では、デジタルカメラ (Canon PowerShot G11) により撮影を行う。

Figure 5 に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システムを示す。ストロボ装置はアルゴン管による白色光源であり、放電ユニット (Sugawara Lab. NPL-2) と電源ユニット (Sugawara Lab. NP-1A) で構成されている。放電ユニットの閃光時間は 75 ns、放電管入力は 17 mJ/flash である。ストロボ光はピンホールで拡散し、凹面鏡で平行光となる。この平行光が直線偏光板を通してガラス平板に入射する。偏光子、ガラス平板、鋭敏色板および検光子を透過した平行光を再び凹面鏡で集束させて、CMOSカメラ (Artray ARTCAM-2000CMV-USB3) で画像を取得する。このカメラにより、24 bit カラーのビットマップデータが得られる。

Lamb 波の発生に使用する超音波探触子には、発振器

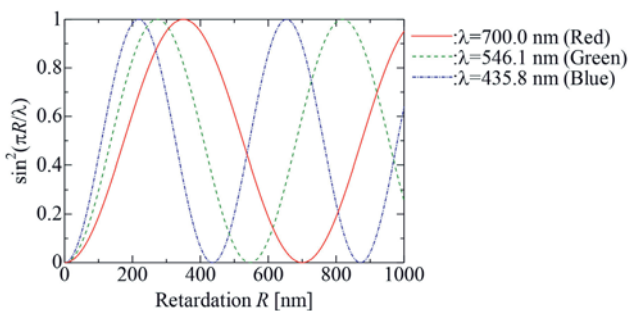


Figure 3 Graph of function $\sin^2(\pi R/\lambda)$.

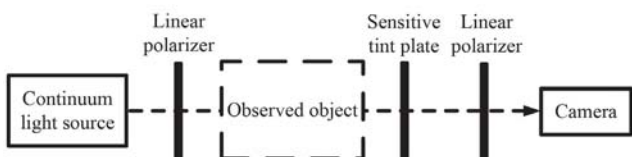


Figure 4 Static stresses visualization system using sensitive tint method.

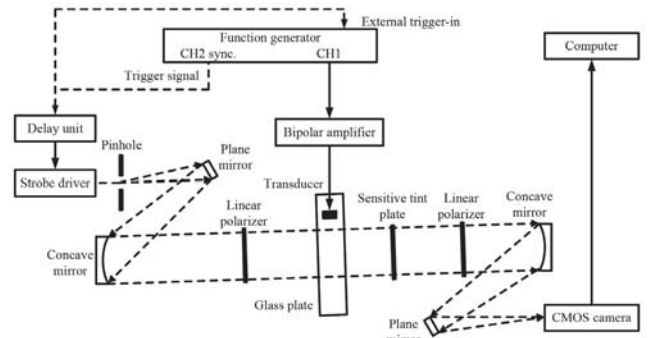


Figure 5 Ultrasonic wave visualization system using strobe photoelastic method and sensitive tint method.

(Keysight Tech. 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}、波数 30 のバースト正弦波の駆動電圧信号を印加する。くさび内部での音圧は 500 kPa 程度である。数百～数千 V_{pp} の電圧で駆動すれば後述の画像処理を行わなくても音波を高感度に可視化できると考えられるが、高い電圧を使用したことによる探触子および音場媒質の弾性的な非線形性の発生を抑制するために、これらの影響がないと考えられる電圧値を設定している。電圧を印加するタイミングとストロボ装置が動作するタイミングは発振器によって同期され、電圧印加と発光の繰返し周期は 10 ms と設定している。遅延装置 (Sugawara Lab. FG-310) の時間を ΔT と設定すると、電圧を印加してからストロボ光源を任意の時間 ΔT だけ遅延して発光する。この装置はトリガ信号を 10 ns 単位で遅延させることができ、 ΔT を連続的に変化させることによって伝搬の推移が可視化できる。

Figure 5 の可視化システムによって撮影される画像の例 (以下、超音波画像) を Figure 6 (a) に示す。この画像において超音波の波面はコントラストが小さくほとんど見えない。これは探触子を 100 V_{pp} で駆動しており、音圧と光の相互作用が小さいためである。このため、超音波画像と Figure 6 (b) に示すような超音波が伝搬していない画像 (以下、背景画像) を利用

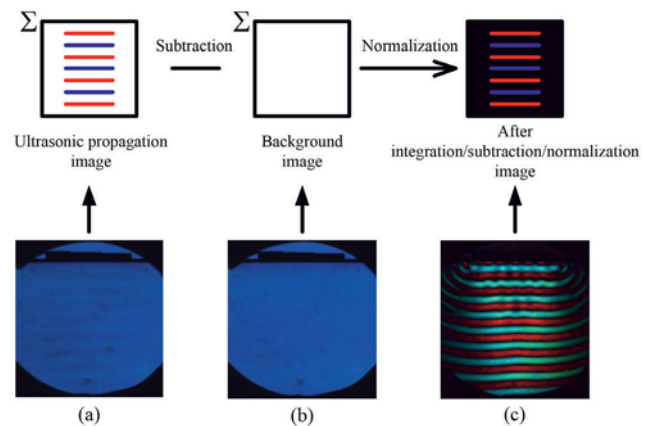


Figure 6 Image processing method to enhance the ultrasonic propagation image. (a) With sound, (b) Without sound, (c) Processed image.

してコンピュータにより超音波の波面を明瞭にする差分処理を行う²⁰⁻²³⁾。本法で使用するストロボ装置は放電による発光を利用しているため、1回の発光毎に光量が変動している。そこで、超音波画像と背景画像を100枚程度撮影し、ビットマップ画像の各々の画素においてRGB値を加算し、平均することで光量の変動を抑制する。その後、この加算平均を行った2種類のビットマップデータの差分をとり、RGB各々の成分を正規化することでFigure 6(c)に示すような超音波の波面が明瞭である画像を得ることができる。

4. 可視化結果

Figure 7(a) および (b) にガラス平板へ外力を印加した際の応力を鋭敏色法により可視化した結果を示す。本実験では垂直応力を可視化しており、ガラス平板において縦方向の引張力および横方向の圧縮力は水色の干渉色で観察され、縦方向の圧縮力及び横方向の引張力はピンク色の干渉色で観察される。ピンク色の干渉色はリターデーションが550 nmより小さく、水色の干渉色はリターデーションが550 nmより大きいことを示している。このように外力の印加方向に応じて干渉色が変化するため、鋭敏色法により印加されている力の向きの判別が可能であることが分かる。

Figure 8にFigure 5で示した実験系を使用し遅延装置の設定時間 ΔT を11.2 μs から28.4 μs まで変化させた際のA2モードLamb波の可視化画像を示す。また、Figure 8(e)の可視化画像の色分布において、赤色を正の値、水色を負の値とした波形を抽出した結果をFigure 9(a)に示し、この波形を離散Fourier変換した結果をFigure 9(b)に示す。Figure 8の可視化結果から、 ΔT を変化させるとLamb波群がガラス平板の左から右へ伝搬する様子が可視化できることが分かる。Figure 7を参照すると、ガラス中において赤色(Red)で表示される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(Light blue)で表示される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り、ストロボ光弾性法に鋭敏色法を導入することによって超音波の音圧の極性を可視化できていることが分かる。

Figure 9(a)の伝搬距離に対する波形を離散Fourier変換す

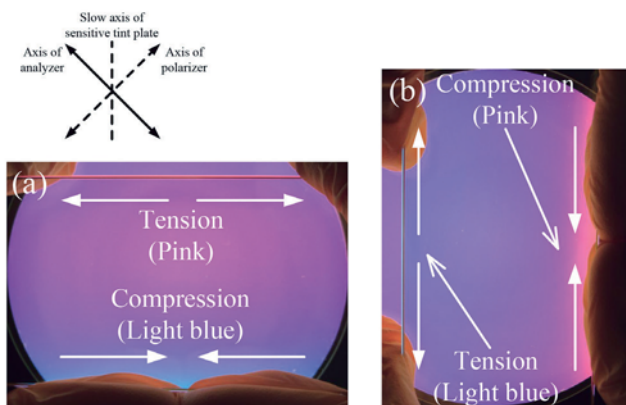


Figure 7 Visualization results of stresses of the glass plate using static sensitive tint method.
(a) Landscape, (b) Portrait.

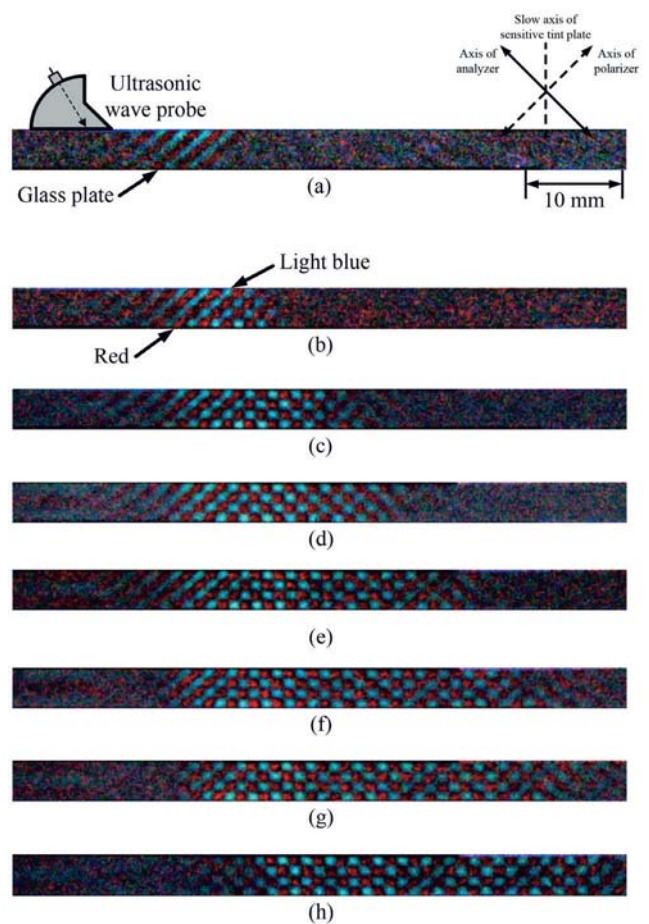


Figure 8 Visualization results of propagation of Lamb waves in the glass plate using strobe photoelastic method and sensitive tint method.
(a) $\Delta T = 11.2 \mu\text{s}$, (b) $\Delta T = 13.2 \mu\text{s}$, (c) $\Delta T = 16.7 \mu\text{s}$,
(d) $\Delta T = 18.3 \mu\text{s}$, (e) $\Delta T = 21.6 \mu\text{s}$, (f) $\Delta T = 24.8 \mu\text{s}$,
(g) $\Delta T = 26.0 \mu\text{s}$, (h) $\Delta T = 28.4 \mu\text{s}$

るとFigure 9(b)のように波数スペクトルが得られる。このスペクトルが最大値を示す時の横軸の値は420 m^{-1} であり、この値の逆数はLamb波の位相速度の波長 $\lambda (=0.0024 \text{ m})$ となる。この値と斜め入射させた超音波の周波数の値 $f = 2 \text{ MHz}$ によって位相速度 $c_p = f\lambda$ を計算すると4800 m/s となり、分散曲線から得られるA2モードLamb波の位相速度と一致するため、この結果から実験で可視化できたLamb波はA2モードであるということがいえる。

ΔT を25.0 μs に固定して、Figure 2(c)の入射角分散曲線に沿って周波数 f および入射角 θ を変化させながら画像を取得した際のLamb波のパターンをFigure 10に示す。周波数が高くなるにつれてLamb波のパターンの間隔が狭くなっていく様子が確認できる。これらの画像からも同様に、伝搬距離に対する波形を抽出して位相速度を計算し、Figure 2(a)の位相速度分散曲線と重ねあわせたグラフをFigure 11に示す。実験によって得られた位相速度の特性は、Figure 2(a)の位相速度分散曲線の特性と同様になっていることが分かる。計算結果と実験結果の誤差を低減するためには、より空間分解能の高いCMOSカメラを使用して可視化を行うことなどが考えられる。

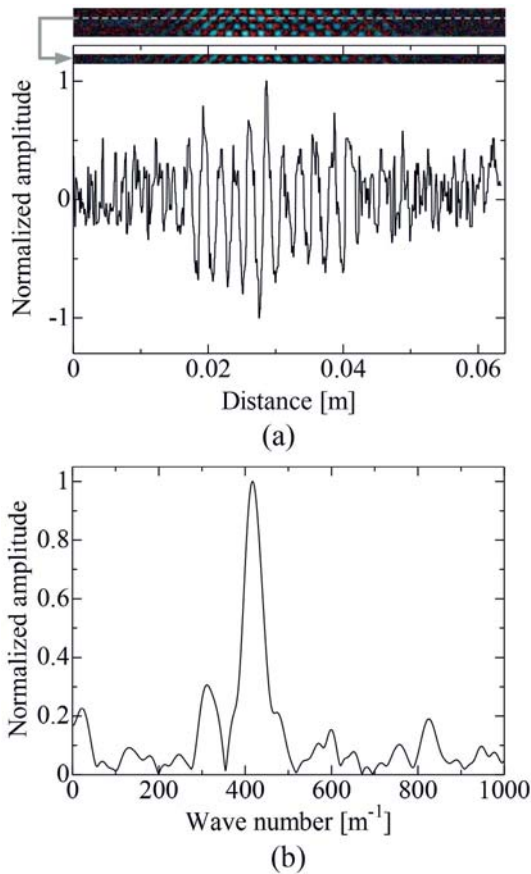


Figure 9 Waveform and DFT from the result of visualization of Figure 8 (e).

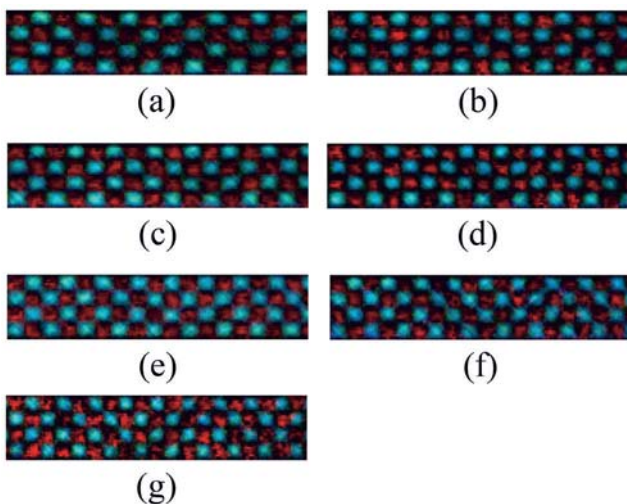


Figure 10 Changing of patterns of Lamb waves. (a) $f = 1.881$ MHz, $\theta = 29^\circ$, (b) $f = 1.949$ MHz, $\theta = 30^\circ$, (c) $f = 2.008$ MHz, $\theta = 31^\circ$, (d) $f = 2.067$ MHz, $\theta = 32^\circ$, (e) $f = 2.119$ MHz, $\theta = 33^\circ$, (f) $f = 2.174$ MHz, $\theta = 34^\circ$, (g) $f = 2.231$ MHz, $\theta = 35^\circ$.

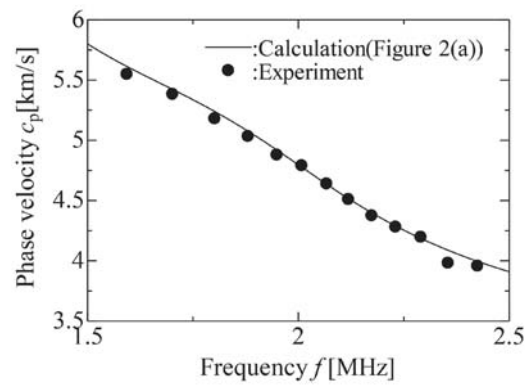


Figure 11 Phase velocity of A2 mode Lamb waves.

5. おわりに

ストロボ光弾性法と鋭敏色法を使用して、ガラス平板中を伝搬するA2モードLamb波の可視化を行った。CMOSカメラによって得られた超音波画像において画素のRGB値に対して数値的な処理をそれぞれ行い、Lamb波の波面が明瞭である画像を取得した。音圧の印加方向については鋭敏色法において静的な荷重を加えた際における色の変化を参考にした。これらの結果、従来のストロボ光弾性法では困難であった音圧極性の可視化が実現できた。さらにA2モードLamb波の伝搬過程を可視化することができた。また、可視化結果から伝搬モードの判別を定量的に行うことができた。

今後の課題として、伝搬路に欠陥が存在する場合のLamb波の伝搬過程の可視化や、不均一な厚さを持つ平板中のLamb波の可視化などが挙げられる。また、静的荷重による複屈折量と超音波の音圧による複屈折量を比較し、音圧の定量計測に関する検討を行うことも考えられる。

謝辞

本研究は、科学研究費(16K06376)の援助を受けた。

参考文献

- 1) 日本学術振興会：“超音波探傷法,” 日刊工業新聞社, pp. 2-3 (1974).
- 2) K. Imano: “Experimental Study on the Mode Conversion of Lamb Waves in a Metal Plate of Stepped Thickness Using Optical Detection,” *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, Vol.17, No.2, pp.201-204 (2010).
- 3) K. Imano and T. Endo: “Experimental Study on the Mode Conversion of Lamb Wave Using a Metal Plate Having a Notch Type Defect,” *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, Vol.19, No.1/2, pp.20-23 (2013).
- 4) 今野和彦：“レーザー光をプローブとして用いる超音波音場観測,” *光学*, 44巻, No.12, pp.488-493 (2015).
- 5) 山崎良一・三浦基弘, “光弾性実験構造解析,” 日刊工業新聞社, pp.35-42 (1997).
- 6) 梅崎栄作：“光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望,” *精密工学会誌*, Vol.79, No.7, pp.607-608 (2013).

- 7) K. G. Hall: "Observing ultrasonic wave propagation by stroboscopic visualization methods," *Ultrasonics*, Vol.20, No.4, pp.159-167 (1982).
- 8) T. Mihara, S. Washimori, T. Hamashima and H. Tashiro: "Development of photoelastic ultrasonic visualization system using pulse laser for the evaluation of high frequency phased array system," Proc. 30th Symp. *Ultrasonic Electronics*, pp.55-56 (2009).
- 9) H. U. Li and K. Negishi: "Visualization of Lamb mode patterns in a glass plate," *Ultrasonics*, Vol.32, No.4, pp.243-248 (1994).
- 10) K. Negishi and H. U. Li: "Strobo-Photoelastic Visualization of Lamb Waves with Negative Group Velocity Propagation on a Glass Plate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.35, Pt. 1, No.5B, pp.3175-3176 (1996).
- 11) K. Nishimiya, K. Mizutani, N. Wakatsuki, T. Ebihara and K. Yamamoto: "Visualization of Mode Conversion of Lamb-Type Waves in Glass Plates Using Pulsed Light Source," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.48, No.7S, 07GC06 (2009).
- 12) K. Yamamoto, K. Nishimiya, N. Wakatsuki and K. Mizutani: "Optical visualization of coupling modes of leaky Lamb waves with negative group velocity in the solid/fluid/solid trilayer," *Acoust. Sci & Tech.* Vol.31, No.2, pp.185-187 (2010).
- 13) J. H. Yun, K. Kuboyama and T. Ougizawa: "High birefringence of poly (trimethylene terephthalate) spherulite," *Polymer*, Vol.47, No.5, pp.1715-1721 (2006).
- 14) K. Izuno and K. Yamamoto: "Sensitive tint visualization of resonance patterns in glass", Proc. 31th Symp. *Ultrasonic Electronics*, 3J-3, pp.449-450 (2010).
- 15) K. Yamamoto, K. Izuno and M. Aoyagi: "Sensitive tint visualization of resonance patterns in glass plate," *AIP Conf. Proc.*, Vol.1433, 1, (2012).
- 16) 保坂儒人, 今野和彦: "鋭敏色法による固体中を伝搬する超音波の可視化," *日本画像学会誌*, 第54巻, 第5号, pp.416-420 (2015).
- 17) B. A. Auld: "Acoustic Fields and Waves in Solids," Vol.2, Chap. 10, *John Wiley & Sons*, pp.76-80 (1973).
- 18) 辻 二郎, 西田正幸, 河田幸三: "光弾性実験法," *日刊工業新聞社*, pp.42-50 (1965).
- 19) 黒田吉益, 諏訪兼位: "偏光顕微鏡と岩石鉱物," *共立出版*, pp.38-43 (1983).
- 20) N. Kudo, H. Ouchi, K. Yamamoto, and H. Sekimizu: "A simple Schlieren system for visualizing a sound field of pulsed ultrasound," *Journal of Physics: Conference Series* 1, pp.146-149 (2004).
- 21) K. Imano: "Optical observation method for ultrasonic field using the shadowgraph introducing pulse inversion averaging," *IEICE Electronics Express*, Vol. 11, No. 17, pp.1-6 (2014).
- 22) Y. Hosaka and K. Imano: "Sensitive Tint Visualization of Ultrasonic Propagation in the Glass with a Crack," Proc. 36th Symp. *Ultrasonic Electronics*, 3P2-10, 2 pages (2015).
- 23) 保坂儒人, 今野和彦: "ストロボ光弾性法による固体中のき裂と残留応力中を伝搬する超音波の可視化," *素材物性学雑誌*, 第27巻, 第1/2号, pp.20-24 (2016).