

速報

鋭敏色法による固体中の Lamb 波伝搬画像からの
超音波速度の定量計測

今野 和彦*

(2018.7.3 受理)

Quantitative Measurement of Ultrasonic Velocity Using Lamb wave Image by the Sensitive Tint Method

Kazuhiko IMANO*

Quantitative measurements of ultrasonic velocity is tried from an ultrasonic image data obtained by the strobe photo-elastic method incorporating the sensitive tint method. Lamb wave lunched in the glass around 2 MHz is imaged by the strobe photo elastic method introducing sensitive tint method. Ultrasonic wave field image that were processed with integration, subtraction and normalization was obtained to develop the contrast of image. In the sensitive tint image, the sound pressure polarity of the Lamb wave are indicated by red and blue, respectively. Using RGB data of S1 and A1 images, phase velocity versus frequency is analyzed to the wavenumber by the FFT to obtain the ultrasonic Lamb wave velocity. The agreement between the experiment and the analysis result revealed that this method can quantitatively measure the ultrasonic Lamb wave velocity.

Keywords: Strobe photo elastic method, Sensitive tint method, Ultrasonic sound imaging, Wavenumber analysis, Phase velocity

固体中に超音波を送波した場合の音場をストロボ光弾性法と鋭敏色法を組み合わせた方法によって観測し、得られた画像データから定量的な計測を試みた。ガラス中に 2 MHz 程度のバースト正弦波の超音波を送波し、ストロボ光弾性法および鋭敏色法により Lamb 波の伝搬画像を取得した。得られた画像は積分、差分および正規化処理を施し、超音波波面の高コントラスト化を行った。得られた画像では Lamb 波の音圧の極の正負に対応してそれぞれ干渉色が赤および青で表示される。この画像の RGB データを用いて、特定の部位の音速を求めするために、フーリエ変換による波数解析を行い、例としてガラス板中を伝搬する S1 と A1 モードの Lamb 波を対象として 1.5-2.5 MHz の周波数に対する位相速度の特性を求めた。この結果は Lamb 波の速度分散の理論計算値とよく一致し、超音波画像から位相速度の定量計測が可能であることを述べた。

キーワード: ストロボ光弾性法, 鋭敏色法, 超音波画像, 波数解析, 位相速度

1. はじめに

光学的に音場を観測す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^{1,2)}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る^{1,2)}。ガラスなどの光を透過する固体に超音波を送波したときの Lamb 波の伝搬過程の可視化は物体中の音場の解釈に有用である。

先行研究³⁻⁷⁾では、ストロボ光弾性法による Lamb 波の可視

化の報告などがされている。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、筆者らは Lamb 波の伝搬の時間推移と音圧極性を同時に可視化する目的で、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データを数値的に処理することで Lamb 波群の伝搬が高感度で画像化でき、音圧の極性すなわち伝搬媒質中での音波による伝搬方向での引張および圧縮が干渉色の観測から容易に判別できることを報告している⁸⁻¹⁰⁾。

一般にこれら方法で得られる画像は Lamb 波の伝搬の全体的な把握には有用であるが、音圧や音速などの定量的な情報は得られない。特に音速に関しては通常、音響的に送受波を行っ

* 秋田大学 大学院工学資源学研究所

〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1 番 1 号

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

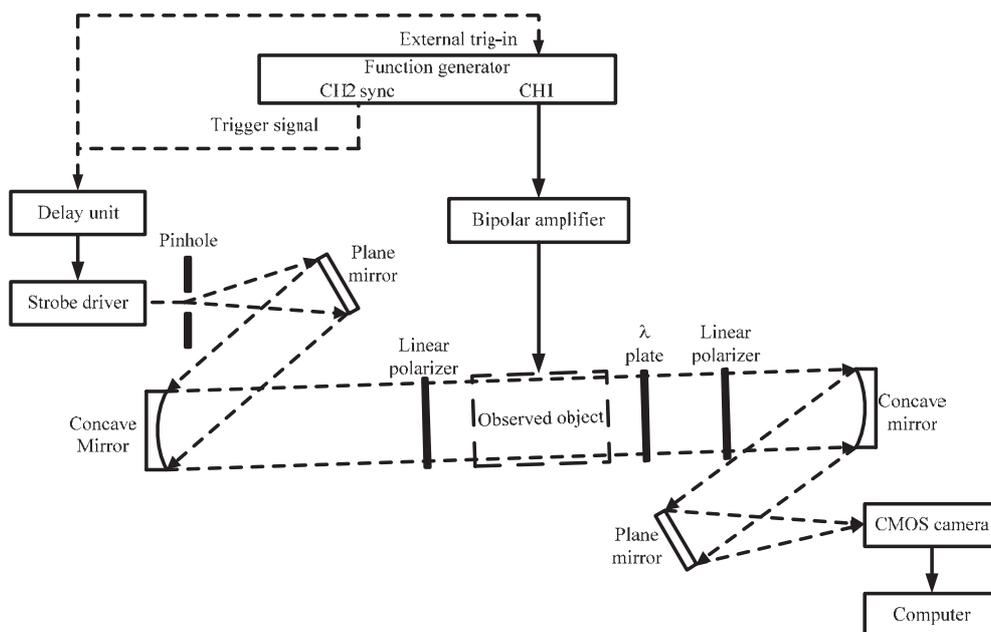


Fig. 1 Strobe photoelastic imaging system introducing sensitive tint method.

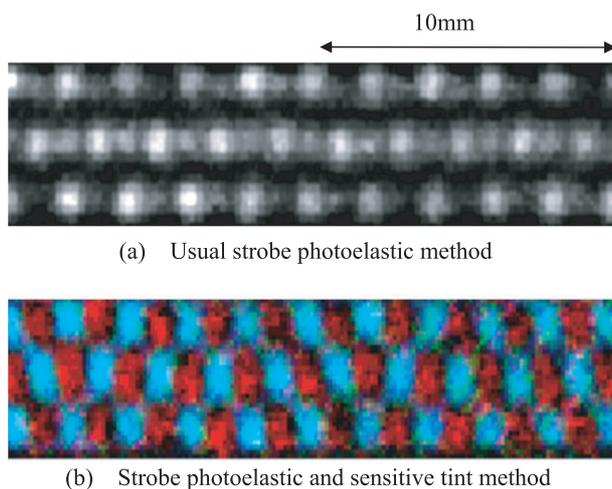


Fig. 2 Comparison of photo elastic image and sensitive tint image of S1 mode Lamb wave.

て求めるが、音速がわからないと Lamb 波のモードが特定できないことや非破壊試験に用いるには予めモードの特定が必要になるなどの問題がある。

本報告では、文献 8-10 と同じシステムから得られる画像データから複数の Lamb 波のモードの位相速度を求める方法について述べ、従来、画像の特徴から 2 桁程度の音速推定精度だったものを 4 桁程度まで定量的に画像計測可能であることを述べる。

2. 実験システムとデータ取得法

Fig. 1 はストロボ光弾性法に鋭敏色法を組み込んだ実験システム⁸⁻¹⁰⁾を示したもので、2 枚の凹面鏡（焦点距離：1000 mm）で平行光とした白色光は偏光子を通過する。この時 2 枚の直線偏光板を直交ニコル状態にし、その間に被検体を配置する。偏

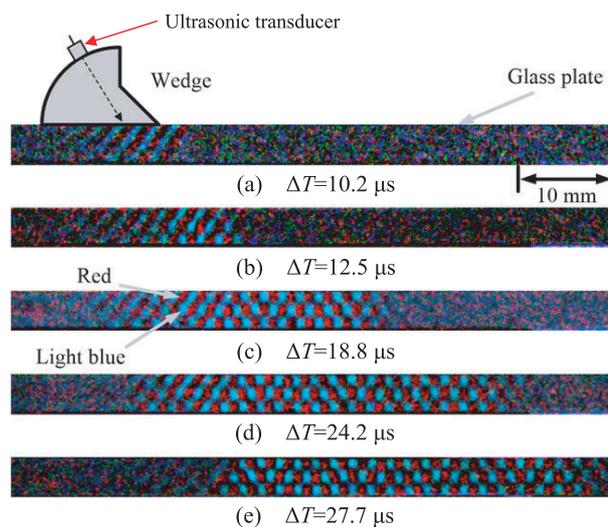


Fig. 3 S1 Lamb wave propagation in glass plate against the time. (a) 10.2 μ s, (b) 12.5 μ s, (c) 18.8 μ s (d) 24.2 μ s and (e) 27.7 μ s.

光子を通過した光は被検体に入射し、応力が存在する部分で複屈折する。この複屈折した光はもう 1 枚の直線偏光板である検光子を通過する。検光子を通過した光をコンピュータに接続した CMOS カメラ (Artray ARTCAM-200CMV-USB3) で画像として取得した。画像データは輝度、RGB のデジタルデータである。また、光源にストロボを使用し、ストロボが発光するタイミングと圧電振動子に電圧を印加するタイミングを調整すれば、超音波伝搬の様子を動画でも観測できる⁸⁻¹⁰⁾。

鋭敏色法は被検体と検光子との間に一波長板 (λ plate: 570 nm) を追加したもので、複屈折による位相差の変化が干渉色の変化として現れ、また光の進み位相と遅れ位相で色の変化が異なるので超音波の正負の極性判別が可能である¹¹⁾。Fig. 2

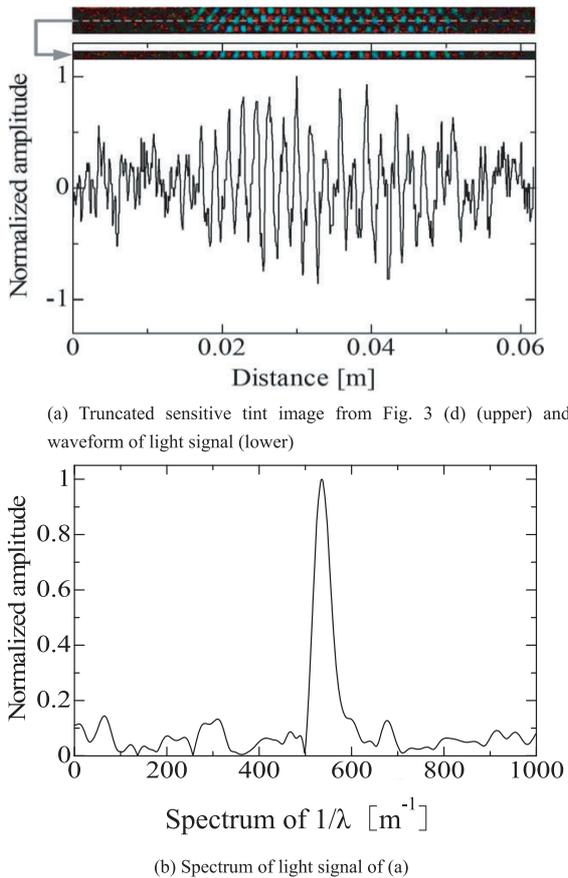


Fig. 4 Waveform of light signal of S1 Lamb wave from sensitive tint image (a) and its spectrum of $1/\lambda$ (b).

(a), (b)はそれぞれ厚さ 4 mm のホウケイ酸ガラス板中の 2 MHz の Lamb 波の S1 モードの通常の光弾性画像(a)と鋭敏色法による画像(b)である。実験条件や試料は文献 10 と同様であり、圧電振動子からガラス板試料中にくさび (wedge) 用い、そのくさびの角度を変えて特定の Lamb 波を励起する。Fig. 2(b)では赤色が音波の伝搬方向 (水平方向で左から右側へ伝搬) における圧縮 (-), 青色が引張 (+) であることが明瞭に観測できることがわかる。このシステムではさらに、超音波が伝搬していない画像 (以下、背景画像) を取得し、両者を用いて差分処理⁸⁻¹⁰⁾ 鋭および鋭敏色法を導入したシステムによって観測した画像から処理による波面の高コントラスト化をはかって音圧の極性が色の違いにより可視化できる。

Fig. 3 は 2 MHz バースト正弦波 30 波の S1 モード Lamb 波伝搬の時間経過の例を示したものである。図(a)~(e)は超音波振動子駆動後の時刻 ΔT を表しており、時間経過と共に波群が図の左から右側に伝搬していることがわかる。この場合の試料表面に対する音波の入射角度はくさび (wedge) を用いて S1 モードの臨界角である 41° に設定している。

3. 画像データ処理

Fig. 4 は Fig. 3 のように得られた画像の輝度 (Y 信号) または RGB データを取り出し、圧縮を赤 (-), 引張を青 (+) に対応させこれを輝度データ (Y 信号) に変換した波形を示

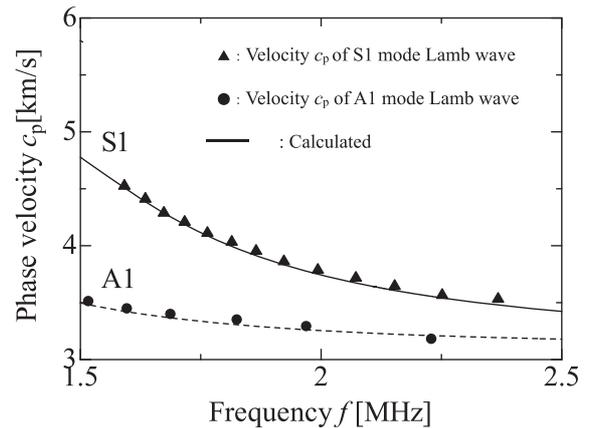


Fig. 5 Phase velocity of S1 and A1 Lamb wave obtained from spectrum analysis of light signal.

したものである。この場合、信号の振幅の赤が図の縦軸の振幅の+側、青が振幅の-側に対応している。図(a)上部には Fig. 3(d)の画像解析した部分 (最上部の図の白点線部) を切り取ったものを示している。この波形をフーリエ変換したものが Fig. 4(b)である。図の横軸は $1/\lambda$ を示している。この図のピークは $1/\lambda = 534 \text{ m}^{-1}$ にあり、 $\lambda = 1.873 \times 10^{-3} \text{ m}$ が得られる。超音波周波数 f が 2 MHz の場合、位相速度 v_p は、 $v_p = f\lambda = 2 \times 10^6 \times 1.873 \times 10^{-3} = 3746 \text{ m/s}$ となり、レイリー・ラム方程式¹²⁾ から計算される位相速度 3740 m/s とほぼ一致している。同様の手順で周波数を 1.5~2.5 MHz の範囲で変化させ各周波数で位相速度を求める。また、A1 モードについてもくさびの角度を 49° に変えて同様の手法で位相速度が求められる。この他のモードについてもくさびの角度を変えて選択的に特定のモードを励起することによって同様の手法が適用できることを確認している。

Fig. 5 は例として S1 および A1 モードについて、1.5~2.5 MHz の範囲で位相速度を求めたものである。図中の実線は計算値であり、 \blacktriangle と \bullet はそれぞれ S1 および A1 モードについての測定値である。この結果から、画像データから求めた Lamb 波の位相速度は計算値と最大誤差でも 1% 以内の差で求められることがわかる。本方法ではくさびの角度を変えることにより、S0 および A0 といった基本はモードに加えて、S2, A2, S3, A3 などの Lamb 波の位相速度測定においても同じ精度で音速が求められている。

4. おわりに

光弾性実験システムに一波長板を追加して鋭敏色システムとして、圧電振動子によってガラス中に 2MHz 領域の超音波を送波し、CMOS カメラでガラス内部の超音波伝搬が観測できることを示した。さらに画像撮影時のデータを用いて、波数 ($1/\lambda$) の解析をすることによって Lamb 波の位相速度が定量的に求められることを示した。通常、位相速度は音波の送受波を行って時間と伝搬距離から求められるが、本論文で述べた方法は音場を確認しながら定量的にこれを実行できるという利点

がある。

今後、今回行っていない音圧の定量化を複屈折量から定量的に測定することや、RGB 信号の G 成分のデータ処理の際に 0 とおくことによって鋭敏色板（一波長板）を省略した改良型のシステムを用いて定量計測ができるシステムに発展させたい。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費（JP16K06376）の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) R. Yamazaki and M. Miura, "Structure analysis by photoelastic experiments," Nikkan Kougyou Sinbunsha, Tokyo, pp. 35-42 (1997) [in Japanese].
- 2) E. Umesaki, "Stress Distribution Measurement Techniques Using Photoelasticity: Current Status and Future Prospects," The Japan Society of Precision Engineering, **79**, pp. 607-608 (2013) [in Japanese].
- 3) K. Yamamoto, "Optical Visualization of Ultrasonic Waves: The Schlieren Technique, the Fresnel Method, the Photoelastic Method and the Sensitive Tint Visualization Method Applied to See Acoustic Fields," Technical Report of The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, US2012-25, pp. 29-34 (2012) [in Japanese].
- 4) H.U. Li and K. Negishi, "Visualization of Lamb mode patterns in a glass plate," *Ultrasonics*, **32**, pp. 243-248 (1994).
- 5) K. Negishi and H.U. Li, "Strobo-Photoelastic Visualization of Lamb Waves with Negative Group Velocity Propagation on a Glass Plate," *Japanese Journal of Applied Physics*, **35**, Pt. 1, pp. 3175-3176 (1996).
- 6) 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," *Japanese Journal of Applied Physics*, **48**, 07GC06 (2009).

- 7) 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," *Acoustic Science & Technique*, **31**, pp. 185-187 (2010).
- 8) Y. Hosaka and K. Imano, "Visualization of Ultrasonic Wave Propagation in Solid by the Sensitive Tint Method," *Journal of the Imaging Society of Japan*, **54**, pp. 416-420 (2015).
- 9) Y. Hosaka and K. Imano, "Sensitive Tint Visualization of A2 Mode Lamb Waves," *International Journal of Materials Engineering for Resources*, **28**, pp. 19-24 (2017).
- 10) Y. Hosaka and K. Imano, "Sensitive tint visualization system for Lamb waves propagation in a glass plate," *Acoustic Science & Technique*, **38**, pp. 165-167 (2017).
- 11) T. Kishi, "Utilization Technology of Strain Detector," *NEW GLASS TECHNOLOGY*, **5**, pp. 47-62, (1986) [in Japanese].
- 12) B.A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids," Vol. II, Chap. 10, John Wiley & Sons, New York, pp. 76-80 (1973).



今野 和彦

1979 年秋田大学鉱山学部電子工学科を卒業。1979 年同大助手。1997 年同大工学資源学部電気電子工学科教授、現在に至る。この間、主として超音波計測、超音波デバイスの研究に従事。博士（工学）。1986 年日本音響学会粟屋潔学術奨励賞受賞。日本音響学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、非破壊検査協会、IEEE、ASA、日本画像学会などに所属。