超音波定在波音場下における鋭敏色法およびSénarmont法を用いた 固体中の応力測定

今 野 和 彦*

Measurement of Stress in Glass Sample Using Sensitive Tint and Sénarmont Method under the Ultrasonic Standing Field

Kazuhiko Imano†

Visualization and quantification of stress distribution in solids caused by ultrasonic standing waves is described. A strobe photoelastic system was improved for quantitative measurements of the stress associated with ultrasonic wave field. The stress field distribution and its value associated with the ultrasonic standing wave at the frequency from 54.30 kHz to 2.15905 MHz in glass was observed by the sensitive color method and the Sénarmont method. The measured value is shown with the frequency at 54.30 kHz at the center of the sample. As a result, by the sensitive color method, the distribution of stress value and the stress polarity are clearly visualized in red and blue colors, and by the Sénarmont method, the stress of several hundred kPa (603 kPa) can be quantitatively obtained at center position of the glass sample. As the results, improved photoelastic system introducing sensitive tint and Sénarmont method has the possibility of the quantitative measurement of the stress in glass sample.

Keywords : sensitive tint method, Sénarmont method, birefringence, retardation, standing wave

1. はじめに

ガラスはさまざまな分野で広範に使用されている材料であり、材料としての評価特に任意の位置の応力を知ることは材料評価や寿命推定などの分野で重要である。ガラス中の応力を超音波の情報から定量評価することは、非破壊検査の重要な問題の一つである。しかし、超音波の物質中での音圧の伝搬によって生ずる応力（以下応力）を定量的に観察する方法は十分確立されているとはいえない [1]。Negishiらはガラスの内部を光弾性法によって観察し、定在波の存在が存在する音場における基本モードや高次モードのLamb波を可視化している [2]。この方法はLamb波の観測には有効であるが、光弾性法であるため音波の伝搬に伴う応力の極性に関わらず、応力のある部分が同じように観測されてしまう。また、この実験から応力の定量的な測定は行われていない。

著者らは光学的手法を用いて水中や固体中の音圧情報を定量的に測定する方法を検討してきているが、主として伝搬中の超音波の動的な音波伝搬を測定対象としてきており、[3] [4] 最近ではガラスの中のLamb波の分布を実験と波数解析によって明らかにしており、可視化されない位置にも複数のLamb波が存在することを明らかにしている [5]。

本報告では、上記と異なり、鋭敏色法とSénarmont法の手法を使用して、ガラス試料内の定在波、即ち定常的に存在する

応力によって生ずる応力場の可視化とその大きさの定量計測の可能性について述べる。この方法により、ガラス試料内部の応力の極性（圧縮または引張）を判別できることを述べるとともにSénarmont法の手法 [4] を用いたガラス試料の音圧の定量計測について述べる。これら2つ方法による実験結果を総合することにより、ガラス試料内の応力の符号とその大きさを非接触で取得でき、本システムの定量測定システムとしての可能性と課題について述べる。

2. サンプルと測定システム

固体材料内の超音波の音場すなわち音圧分布によって引き起こされる応力場を視覚化するためガラスを試料として実験をおこなった。ガラス試料の形状と寸法を図1に示す。縦・横50.0 mm、厚さ16.2 mmの合成石英の側面に長さ30.0 mm、幅5.0 mm、厚さ1.0 mmのく形の圧電セラミック変換器 (FujiCeramics:M-6) を合成石英ソーダガラス試料表面に導電ペースト（藤倉化成株式会社, Dotite, D-753）を用いて貼り付けた。この構成でガラス試料中に定在波が発生する時の共振周波数は44.93 kHz, 54.30 kHz, 342.88 kHz, 890.19 kHz, 1.26730 MHzおよび2.15899 MHzであった。これらの周波数では上述のように応力場は定在波状態になる。ここで、周波数の桁数が異なっているが、細かくチューニングして可視化できる周波数を探した結果で、これ以外の周波数では定在波がみられず、画像も得られない。

図2は、このときのガラスとトランスデューサのアドミタンスと位相特性を示しており、数十kHzから2.3 MHz程度まで定在波の送受波に感度があることがわかる。この図でアドミタンス値にピークが複数みられるが、このピーク間の周波数幅

令和2年4月7日受付；令和2年5月11日受理

* 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

〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町1-1

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

Figure 1 Shape and dimensions of glass plate and piezo ceramic transducer.

Figure 2 Admittance response and phase characteristic of the transducer with glass plate.

Δf は音波がガラス試料を往復する時間 ΔT の逆数に対応し、この Δf の測定から試料内での音波の伝搬速度 c が求められるが、 Δf の精度が低く、この方法から音速 c は求めていない。本方法のように広帯域にわたって定在波を求めるような場合、圧電変換器の帯域が広帯域でない限り、上記の方法は適していない。

図3は、定在波音波によって引き起こされる試料中の応力場の可視化システムを示している。まず、ガラスサンプルを2つの凹面鏡（直径80.0 mm，焦点距離1000 mm）の間に置き、発振器（KEYSIGHT TECHNOLOGIES, 33600A）ch.1からの励起電圧信号をバイポーラアンプ（NF Corp., BA4825）で50Vppに増幅し、ガラス試料上の圧電変換器に印加する。発光時間が70 nsのパルス白色光（菅原研究所, NP-1A）をピンホールを通して球面波とし、平面鏡で反射させて右側の凹面鏡に入射させる。コリメートされた白色光は、直線偏光子を通過した後、ガラス試料内を伝搬し、応力場によって複屈折が生じ、リタデーション R が生じる。その後、直線検光子を通過した後、上述の複屈折によるリタデーションが生じた光は凹面鏡、平面鏡を経てCMOSカメラ（ARTRAY, ARTCAM-2000CMV-USB3）によって受光される。この時、ストロボ光の発光周期は発振器（ch.2）によって制御され、50-100Hzにしてある。また、試料の両側の2枚の偏光子（偏光子、検光子）はクロスニコル状態にするように設定してあり、音が存在しないとき、すなわち応力が零のときは、得られる画像は光が2枚の偏光子によって遮断されるため暗いままである。定在波の音波が存在するとガラス試料内に応力分布ができ、これらに対応して複屈折が起こり、検光子を通過する光が生じ、後述の様な定在波分布、すなわち応力分布の画像が得られる。これは光弾性法及び鋭敏色法と[7-8]同じである。本システムでは応力場の高感度の濃淡色の視覚化を取得するために、検光子とガラス試料の間に λ リターダー（ルケオ製、一波長板550 nm，80.0 mm ϕ ）を挿入することによって、この波長におけるRGBカラー信号から赤（R）

Figure 3 Visualization system of pulsed strobe-sensitive tint imaging system for the stress field of ultrasonic wave in the glass sample. Sensitive tint plate is fixed. Analyzer was rotated to find the light and dark point b 0.1°

と青 (B) の干渉色を得ることができる。この条件では緑 (G) はその成分がほぼ 0 になっており、試料に応力がないとき (音波の定在波がないとき) 画面全体が青 (B) と赤色 (R) の干渉色である青紫色にみえる。上述のように、これが通常の鋭敏色法 [6] [7] [8] の原理でもある。X 軸に対して 45 度の直線偏光での白色のストロボスコープ照明が使用される。すなわち、RGB の色の要素を全て含む光源を用いる必要がある。実験では、圧電振動子の励起電圧は、バースト間隔が 10 ms の 100 サイクルのバースト正弦波になるように設定しており、連続点灯しているようにみえる。ストロボ光のタイミングは、パルス遅延ジェネレーター (菅原研究所, FG-310) を用いて任意に設定でき、これを連続的に変化させれば試料内での伝搬、すなわち動的な音波の観測ができる [6] [7]。本実験では発光周波数を 100 Hz として定在波を観測している。これは上述のように連続光を使用するのと同様であり、白色光であれば連続点灯する光源でも代用できる。本システムは観測の目的によって静的または動的な音波の観測に切り替えて測定するため、連続光ではなくストロボ白色光源を使用している。

CMOS カメラで取得されたデジタル音場画像データは、デジタルカメラのメモリからコンピュータに転送される。コンピュータのメモリに転送されたデータは、画像のコントラストを高めるための処理が行われる。すなわち、1) 通常の応力場の画像を取得し、光源の変動を排除するために、100 枚の画像を統合し、平均化し、さらに正規化する。次に 2) 同じプロセスで音波のない背景画像として取得される。次に、応力場画像から背景画像を差し引いて、1) と 2) の差分画像を作成する。これらの手順を使用して、高コントラストの応力フィールド画像を取得できる [6] [7] [8]。

図 3 において、鋭敏色法で使用する λ リターダー (一波長板) の代わりに $1/4$ 波長リターダー ($1/4$ 波長板) を挿入すると、Sénarmont 法による実験が可能なシステムに変更できる [4]。すなわち図 3 において λ 板を $1/4$ λ 板として、検光子を回転させると輝度分布が変化する。このとき任意の測定点において輝度が明るくなる点を探す。Sénarmont 法では、リターションの大きさは検光子の回転角度に比例し、検光子の回転によって輝度が最小になるまでの検光子回転角 θ から測定点でのリターション R の大きさが次式によって求められる [4] [9] [10-12]。

$$R = \frac{\lambda p}{180^\circ} \theta \quad (1)$$

上式で λp は光の波長で、本実験の場合は 580 nm となる。ガラス試料中の応力 σ は、

$$\sigma = \frac{R}{CL} = \frac{\lambda p}{180CL} \theta = k \theta \quad (2)$$

と求められる。ここで、 C はガラス試料の光弾性係数、 L は試料の厚さである。 k は比例定数で後述の様に求めている [4]。その方法は文献 3 で述べているが、まず、バイスを使用してガラス試料とバイスの間にロードセルを挟んで、圧力値を測定しながら既知の圧力 ($f = 203 \sim 326$ N) をガラス試料に加え、そのときの検光子の回転角度 θ を測定して実験的に k の値を求めている。これは式 (2) から光弾性係数 C はガラスおよび製法に

よって 20-30% 程度異なるため測定値も同程度の差が出るという理由による。本実験では上述のように応力を決定することが可能であり、上述の鋭敏色法の画像で測定位置を参照すれば、ガラス試料の任意の点での応力 σ の大きさをその極性を含めて得ることができる。

3. 実験結果と検討

図 4 にガラス試料内に起こる音波による共振の周波数が 44.93 kHz, 54.30 kHz, 342.88 kHz, 890.19 kHz, 1.26730 MHz, および 2.15899 MHz の場合の鋭敏色法による定在波画像によって引き起こされる応力場をそれぞれ示す。超音波は試料の左から右へ伝搬させている。図 4 には、赤と青の明るい点がみられる、赤い点 (X 方向の引張) は正の応力に対応し、青い点は負 (X 方向の圧縮) の応力に対応する。この画像においてガラスの共振周波数 54.30 kHz の定在波 (図 4(b)) を例に取ることによって引き起こされる応力の場合、ガラス試料の中心での応力 σ の大きさは 603 kPa であり、この瞬間に応力は正の極性の応力である。

図 5 は、検光子の回転角度 θ と応力 σ の計算された比例定数 k を示している。図 5 から、式 (2) の比例定数 k は図 5 の k の測定点の平均値を用いて $k = 67 \text{ kPa}/^\circ$ と決定した。共振周波数 54.30 kHz でアナライザーの回転角度を変更したときの輝度を図 6 に示す。測定点はガラスの中心である。測定の結果、検

Figure 4 Stress field caused by standing wave visualized in color by the sensitive tint method

Figure 5 Proofreading of relationship between analyzer rotation angle and magnitude of stress

Figure 6 Luminance at the center of the glass sample when changing the analyzer rotation angle ($f = 54.30$ kHz)

光子回転角度 θ は $9 \pm 0.1^\circ$ と求められ、定在波による応力の大きさは式(2) から次式のようにになる。

$$\sigma = k \theta = 603 \pm 20 \text{ kPa} \quad (3)$$

上述のように実験に用いたガラス試料の共振周波数 54.30 kHz の定在波によって引き起こされる応力は、試料の中心でその大きさは 603 kPa 程度で正の応力と求められる。

この方法では、 k の値が図 5 のように“ばらつき”が大きいため求められる応力の値にもばらつきがある。これは検光子の回転角を読み取るとき、目視によって明暗を判断しているのも一因であり、これらを光センサ等で定量的に測定することが必要となる。また、そのときの検光子の回転角度 θ の読み取り精度が 0.1° であるため、これらの改善によって精度が向上するものと考えられる。文献 4 で述べている圧電振動子の振動面の振動速度 u と試料のインピーダンス ρ 及び試料中の音速 c から本実験と同様の条件で応力 σ を求めると、595 kPa となり値は一致しないが図 5 の k の“ばらつき”の範囲で一致している。

今後これらの測定精度の検討を行うと共に k を決める他の方法についても検討したい。

4. 結論

定在波によって引き起こされる応力場は鋭敏色法を使用した視覚化でき、応力の大きさを Sénarmont 法を使用して測定できることを示した。2つの方法を組み合わせると試料中の任意の点の応力が測定できるシステムを実現できる可能性がある。今後、検光子の回転角度の読み取り精度の向上によって応力の大きさの測定精度向上を図りたい。本法はこれまで動的な音波の伝搬、すなわち動的な応力の時間的な変化を観測するシステムに対して定在波が生じている応力の極性と応力値を測定する方法として構築されたもので、両者の利点を活かした測定ができるシステムに発展させたい。

なお、本法は現在のところ透明物質にのみ適用可能であるが、不透明物質に関しては光の反射成分から行う“反射型 Sénarmont 法”の開発とその適用の可否について検討したい。

参考文献

- [1] 日本学術振興会、製鋼第19委員会、“超音速探傷法”，日刊工業新聞社，p.6（1974）
- [2] K. Negishi and H. U. Li, “Visualization of Lamb Waves mode pattern in a glass plate”, *Ultrasonics*, Vol.32, No.4, pp.243-248（1994）
- [3] 今野，“レーザ光をプローブとして用いる超音波音場観測”，光学，第44巻，12号，pp.488-493（2015）
- [4] 今野，Sénarmont法による超音波の音圧測定の一方法，電子情報通信学会論文誌，Vol.J101-A，No.10，pp.265-267（2018）
- [5] 鈴木，今野，“鋭敏色法を用いたガラス板中のLamb波の厚さ方向の分布に関する実験的検討”，日本音響学会誌，Vol.76，No.4，pp.203-206（2020）
- [6] 保坂，今野，“固体における超音波伝搬の鋭敏色法による可視化”，日本画像学会誌，Vol.54，No.5，pp.416-420（2015）
- [7] 保坂，今野，“A2モードのラム波の鋭敏色法による可視化”，日本素材物性学会誌，Vol.28，No.1/2，pp.19-24（2017）
- [8] 保坂，今野，“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）
- [9] 黒田，諏訪，“偏光顕微鏡と岩石鉱物”，共立出版，38-41，43-44（1968）
- [10] 岸井，“ひずみ検査器の利用技術Ⅳ：理論セナルモン法の原理と活用”，the Glass，No.20，pp.26-33（1991）
- [11] 坪井，“偏光顕微鏡”，岩波書店，147-158，163（1959）
- [12] K. Yamamoto, K. Izuno and M. Aoyanagi, “Sensitive tint visualization of resonance pattern in glass”, *AIP Conference Proceedings*, Vol.1433, pp.114-120（2011）