

強化ガラスのレーザプロービングによる音速測定

Measurement of ultrasonic velocity for the tempered glass using laser probing method

○赤塚 雅史*, 今野 和彦*

○Masafumi Akatsuka*, Kazuhiko Imano*

*秋田大学 大学院理工学研究科

*Graduate School of Engineering Science, Akita University

キーワード：レーザプロービング法(Laser probing method), 反射法(Reflection method), 強化ガラス(Tempered glass), 残留応力(Residual stress), 音速(Sound velocity), 位相傾き(Phase slope), 欠陥検出(Defect detection)

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

超音波を用いた固体検査の場合、一般的に超音波プローブなどの送受波器が用いられる。しかし有限寸法を持つ超音波変換器による受波の場合、受波信号は受波面で平均され空間分解能が低下し、微小な欠陥などは検出できないことがある。そのため、mm オーダ以下の検査は容易ではないのが現状であり、微小領域における検査法が必要とされている。

また、検査対象の健全性や品質評価に、残留応力の測定によるものがある^[1]。残留応力は試料に外力を加えた際に、それに反する力(応力)が、外力を取り除いた後にも残ったものである。板ガラスの表層に残留応力を意図的に発生させ、ガラス表面の強化を施したものが強化ガラスであるが、これは残留応力を有効に利用したものである。強化ガラスにおいて、意図する残

留応力が適切に発生しているかを把握することは安全の上で重要である。つまり、表層残留応力の測定によって強化ガラスの健全性評価や品質評価を行う検査としての新しい方法が期待できる。

筆者らは微小な領域の特性を観測する目的で、固体試料中の超音波によって位相変調されたレーザ光をプローブに用いた方法について検討し、試料内部の超音波波形、伝搬速度および位相などの超音波伝搬特性の観測が可能であり、き裂などの欠陥検出に用いることができることを明らかにしている^{[2][3]}。この方法は超音波変換器などの有限寸法の問題がなく、レーザ光のビームスポットサイズ(20 μm)程度の高い空間分解能が得られるメリットがあり、上述の微小領域での測定が可能である^[3]。

本報告ではこの方法を応用し、強化ガラス表

層の残留応力領域を伝搬する超音波を、反射法によるレーザプロービングにより測定し、表層残留応力と伝搬超音波の音速の関係について検討し、新しい非破壊検査法としての本方法の可能性について述べる。

2. レーザを用いた音速測定システム

2.1 測定システム

Fig.1 にレーザ光を用いて反射法によって残留応力が超音波音速に及ぼす影響を測定するシステム^{[2][3]}を示す。発振器からバースト正弦波信号 30 波を繰り返し周期 10 ms で発振させ、これをバイポーラ増幅器 (NF HSA4101) に入力して 100 V 程度まで増幅する。バースト正弦波の周波数は圧電振動子の共振周波数 5 MHz に設定している。強化ガラス表面には圧電振動子としてレイリー波探触子 (ジャパンプローブ : 5Z10×10R) が取り付けられており、バイポーラ増幅器で増幅された信号が印加され、強化ガラス表面にレイリー波が伝搬する。レイリー波は、伝搬媒質の表面を伝搬する性質があり、試料表面の特性を調べるのに都合がよい。強化ガラス表面を伝搬するレイリー波は、ガラス端部の残留応力によって強化された領域を通過するが、この時にビーム径が 20 μm のレーザビーム光 (He-Ne Laser) を計測対象部分に照射する。ここで、円偏光板を試料に入射するレーザ光と、反射したレーザ光にそれぞれ 1 枚ずつ挿入し、強化ガラス表面残留応力層で反射したレーザ光波面の偏光成分を光センサ (Avalanche Photodiode : APD) により受光する。試料表面を伝搬するレイリー波により伝搬媒質の密度変化により誘電率の変化が生じ、レーザ反射光は偏波面の回転を受けるとともに、強化ガラス表層の残留応力によって複屈折を生じ、この両者による屈折率変化によって偏光した光により位相変調されて光センサ (APD) で受光される^[2-6]。すなわち強化ガラス表層で反射したレー

ザ光には、レイリー波と試料表面の残留応力の両方の情報が含まれており、光センサ (APD) により受光することでそれらの情報を同時に取得することができる。光センサ (APD) から取得した信号は音圧に比例した超音波時間波形として得られ^[4]、この信号を Vector Signal Analyzer (VSA) に入力する。入力された信号は直交位相検波され、超音波位相のデータを取得、位相データの変化率から音速の比を求める。詳細については 2.3 節、2.4 節にて記述する。

2.2 測定対象の強化ガラスについて

Fig.2 (a) は実験に使用した強化ガラス試料は (フロートガラス, 300 mm×200 mm×5 mm) の寸法である。また, Fig.2 (b) は同試料の鋭敏色法^[7]による観測結果図であり, 測定対象範囲を拡大している。前述のように試料表面にはレイリー波探触子 (14 mm×25 mm×20 mm) が取り付けられている。試料の強化ガラスは辺に沿うように残留応力が存在しており, 辺に沿って強化されていることが分かる。赤色は音波の伝搬方向に対する圧縮応力 (-), 青色は引張応力 (+) に対応している。また, ガラス端部では一部強力な引張残留応力が存在するため, その領域は青→緑に色が変化して観測されている。応力符号に関しては事前に板ガラス試料に圧縮と引張力を加え鋭敏色との関係を確認している。

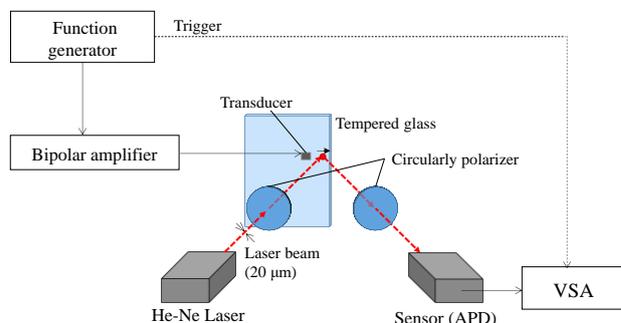


Fig.1 レーザプロービングによる反射法を用いた残留応力が超音波音速に及ぼす影響を測定するシステム

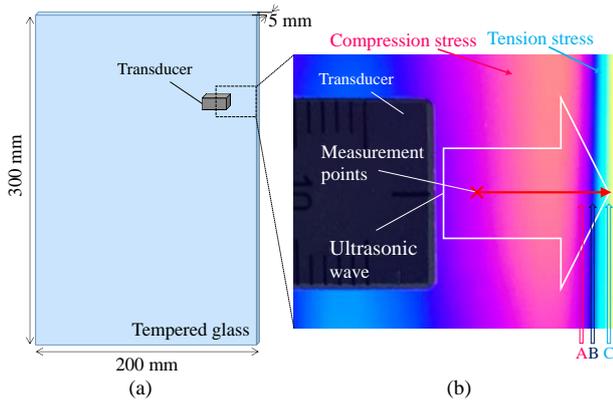


Fig.2 (a) 測定試料（強化ガラス）の寸法図，
(b) 測定試料の鋭敏色画像（測定範囲を拡大）

2.3 信号処理方法

前述のように実験では強化ガラス表面に超音波を伝搬させ、ガラス端部の残留応力領域にレーザを照射し、その反射光を光センサ（APD）によって受光する。測定システムにおいて入力の光強度と光センサ（APD）の電圧出力は電流－電圧変換および対数変換によってほぼ直線関係になっており、音圧と比例関係にあることが確かめられている^[4]。光センサ（APD）で得られた音圧に比例した出力電圧波形は Vector Signal Analyzer (VSA) に入力され、直交同期検波が行われデータが複素化される。光センサ（APD）で得られる信号を $x(t)$ とすると、これは電圧信号であるため信号は実部のみである。直交位相検波を行うとその実部である I 信号 $[\text{Re}(x(t))]$ と直交する Q 成分、すなわち虚部データ信号 $[\text{Im}(x(t))]$ が得られ、複素化された信号波 $\hat{x}(t)$ は

$$\hat{x}(t) = [\text{Re}(x(t))] + j[\text{Im}(x(t))] \quad (1)$$

と表される。この信号から $x(t)$ の位相 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{[\text{Im}(x(t))]}{[\text{Re}(x(t))]} \right] \quad (2)$$

と求められる。

超音波の伝搬速度 v は、音波の伝搬距離 l と伝搬時間 t_p から

$$v = l/t_p \quad (3)$$

で求められるが、後述の実験方法のように $1 \mu\text{m}$ 程度の音波伝搬路の差に対応する時間差から音速を求める場合、音波伝搬距離の変化 Δl と伝搬時間差 Δt_p から

$$v = \Delta l / \Delta t_p \quad (4)$$

となり、 Δt_p が 10^{-10} s オーダとなりこれを精度良く測定することは容易ではなく、音速の測定精度も当然高くない。

本研究では、式(2)で表される超音波信号の位相 θ の測定から音速を求める方法を採用している。正弦波信号の場合、伝搬路が1波長分(λ)変化すると位相は 2π ($=360^\circ$) 変化する。 Δl のときの位相変化 $\Delta\theta$ は次式となる。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} \quad (5)$$

この位相変化は音速変化がなければの単純な一次関数であるため、この関係を利用して音速の推定や補間が容易である。残留応力のない領域と存在する領域の傾きをそれぞれ a および a' とすると、両者の音速比 c'/c との間に次式の関係がある。

$$\frac{c'}{c} = \frac{a}{a'} \quad (6)$$

本研究では、距離に対する位相の変化すなわち位相の傾きから音速を求めている。なお、この方法によれば位相測定の分解能が、時間波形から音波伝搬時間変化を測定するよりも高い分解能で測定できるメリットがある。また、実験における位相の分解能は、用いた VSA の仕様から 10^{-3} deg.である。

以下では、強化ガラス表面の残留応力領域を伝搬する超音波の音速測定から、残留応力と音速の関係について検討する。

3. 実験結果

3.1 データ取得法

実験では試料に超音波が伝搬している状態で振動子から4 mm 離れた位置にレーザ光を照

射し, Fig.2 (b)における白抜き矢印の範囲(8 mm)において $1\ \mu\text{m}$ ずつ計 8001 点の反射光を光センサ (APD) で受光する。光センサ (APD) から得られた超音波時間波形データ $x(t)$ は VSA に入力し 2.3 節で述べた方法によって 8001 点の位相データとして取得し, 音速比を求める。

上述のように実験では Fig.3 のような光センサ (APD) からの超音波時間波形を $1\ \mu\text{m}$ 間隔で 8001 点取得している。なお, レーザの入出力光を観測する都合でレイリー波探触子から 4 mm 離している。Fig.3 の波形から VSA により位相を読み取り, 8001 点のデータとしてまとめたものが Fig.4 (a)である。Fig.4 (b)および(c)はそれぞれ Fig.4 (a)の 0 mm~1 mm の範囲の位相データの拡大図, 5.75 mm~6.75 mm の範囲の位相データの拡大図である。Fig.4 (a)について一見するとデータ全体を通して傾きが単一であるように見えるが, Fig.4 (b)や(c)のように一部拡大してみると, 全体を通して傾きが変化している。ここで式(6)より, 傾きが大きいほど音速は低くなり, 傾きが小さいほど音速は高くなる。前述のように位相データは $1\ \mu\text{m}$ 毎に取得しており, 1 mm 毎, すなわち 1000 点の位相データの回帰直線から位相の傾き (a および a')を求め, 式(6)の関係から音速比 c'/c を算出する。

Fig.4 (a)上部には測定範囲の鋭敏色画像を表示している (Fig.2 (b)の白抜き矢印の範囲)。

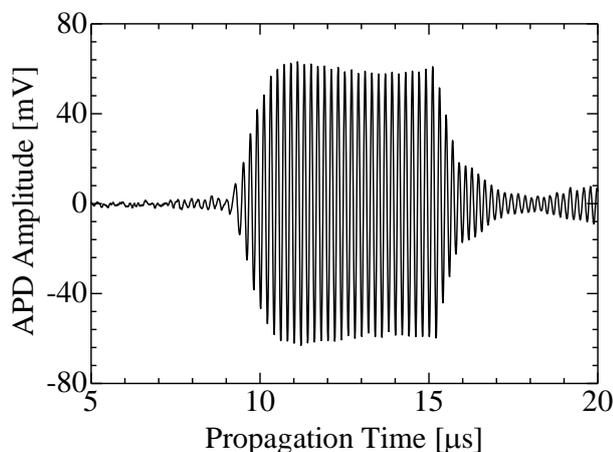


Fig.3 光センサ (APD) で取得した音圧に比例した超音波時間波形の一例

3.2 実験結果

Fig.5 に実験によって得られた強化ガラス表面残留応力と音速の関係を示す。右軸には残留応力値をとっている。残留応力値は Fig.1 の測定システムに直線偏光板 2 枚と $\lambda/4$ 波長板を挿入, 各測定位置におけるリタデーション R (複屈折量) を測定し算出している^[4]。リタデーション R と残留応力値 σ の間には,

$$R = \sigma \beta t \quad (7)$$

で表される関係がある。光弾性係数 β (強化ガラス: $2.6 \times 10^{-12}\ \text{Pa}^{-1}$) および試料の厚さ t ($=5 \times 10^{-3}\ \text{m}$) を(7)式を変形した

$$\sigma = R / \beta t \quad (8)$$

に代入し, リタデーション R から残留応力値 σ [MPa] を求めている。これはセナルモン法^[8]という光学的に確立された手法である。

Fig.5 においても Fig.4 (a)と同様に上部に測定位置と対応する鋭敏色画像を表示している。鋭敏色画像に着目すると, 測定開始点から 6 mm (A 点) 付近の位置まで赤色の圧縮応力 (-) が存在している。6.5 mm (B 点) 付近に応力の極性が転換する領域があり, 以降 8 mm までは引張応力 (+) が存在している。8.5 mm 付近 (C 点) には引張応力が強くかかっており, 鋭敏色

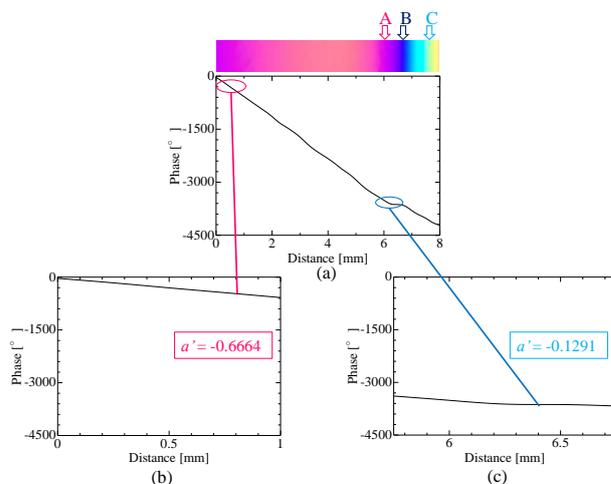


Fig.4 (a) 位相距離特性, (b) 0 mm~1 mm 範囲の位相距離特性拡大図, (c) 5.75 mm~6.75 mm 範囲の位相距離特性拡大図

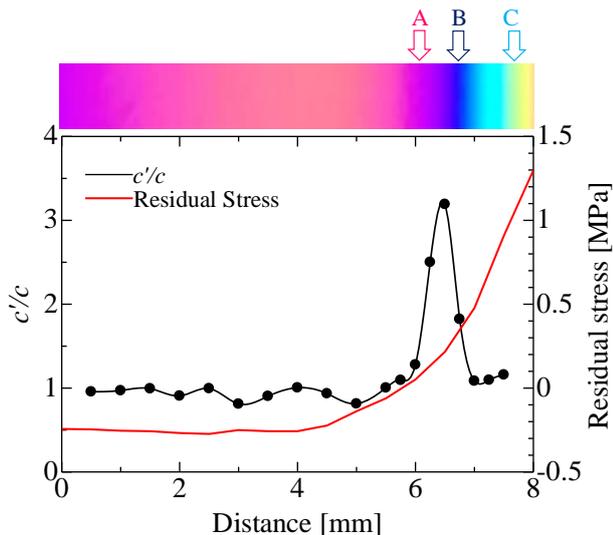


Fig.5 強化ガラス表層残留応力と音速の関係

の青色→緑色→黄色と変化している。グラフ内赤色の線で示した残留応力値のデータも鋭敏色に対応している。黒線で示した音速データと赤線で示した残留応力値のデータを比較すると、B点付近の残留応力変化率の大きい領域において音速が3倍程度変化している。また、B点付近は応力の極性が転換する領域でもあり、応力の極性変化が音速に影響を与えている可能性も考えられる。また、A点のような単一応力の働いている領域ではB点で観測されるような急激な音速の変化はみられない。

以上の結果から、本実験のような方法で局所的な残留応力領域を超音波長（5 MHz の場合、 $\lambda=0.56$ mm）よりも十分に小さな寸法を有するレーザー光のような“点”（20 μm ）をプローブとして用いた測定で音速比の変化に着目して、残留応力の分布やその符号を検出できる可能性がある。

4. おわりに

レーザー光をプローブに用いて、強化ガラスの表層残留応力がガラス表面を伝搬する超音波の音速に与える影響を反射法により観測した。その結果、残留応力変化率の大きい領域において音速が3倍程度変化することを確認した。こ

のような急激な試料中音速の変化は、強化ガラスのように意図的に試料に残留応力を発生させ強化する場合に有効であるが、意図せず試料に発生した残留応力による場合、試料の予期せぬき裂や破断の発生につながるため、早期の発見が必要である。

本研究で行ったレーザープロービングは、超音波の波長（5 MHz の場合、 $\lambda=0.56$ mm）よりも十分に小さなレーザービーム径（20 μm ）を持つことが特長である。従来の試験ではプローブのサイズが有限であることもあり、見落とす可能性の高い欠陥や物質試料の物性変化などを、本方法を用いて検出できると考えられる。また、超音波時間波形の位相データから音速を求める方法についても、 10^{-3} deg の高分解能で測定ができるメリットがある。このような特長から、本研究の方法は非破壊検査の新たな手法として有効であると考えられる。

なお、残留応力値と音速の比較を行うため、リタレーション計測を行うことができるよう、透明物質である強化ガラスを例に実験を行っているが、不透明物質についても同様の実験方法を応用していくことが可能であるため、今後実験を行う予定である。

《参考文献》

- [1] 川嶋紘一郎：“ものづくりのための超音波非破壊材料評価・検査” 養賢堂(2009)
- [2] 今野和彦：“光偏向法を用いた固体試料の内部き裂の2次高調波超音波検出の一方法” 素材物性学雑誌, 27 巻 1/2 号, pp.6-9(2016)
- [3] 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 12 号, pp.488-493 (2015)
- [4] 今野和彦, 赤塚雅史：“レーザー光を用いた超音波伝搬のプロービングによる固体試料中の残留応力の一評価法” 日本素材物性学会誌, 30 巻 1/2 号, 印刷中(2018)

[5] T. Sakoda, Y. Sonoda : “Transmission and Detection of Light Diffraction Signal by Low-Frequency Ultrasonic Wave” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Volume 42, pp.5821-5825(2003)

[6] 園田義人：“光学的フーリエ変換による可聴音の直接検出のための光学系の検討” 日本音響学会誌, 62 卷 8 号, pp.571-579(2006)

[7] 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, 27 卷 1/2 号, pp.20-24(2016)

[8] 鶴田匡夫：“応用光学Ⅱ” 培風館, pp.192-194(1990)