

令和元年6月12日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06376

研究課題名(和文) 定量計測をめざしたデジタル光弾性法システムの構築に関する研究

研究課題名(英文) Research on the quantitative measurement of elastic/plastic properties for the ultrasonic wave using laser probing method

研究代表者

今野 和彦 (Imano, Kazuhiko)

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60125705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光を用いて音の場に影響を与えずに音場を観測するストロボ光弾性法のデジタル化を行うと共に鋭敏色法とセナルモン法導入による新しい定量計測法とそのシステムの構築を行った。MHz帯超音波を対象とし、固体内での外部から或いは内部応力による光弾性現象に起因する複屈折による偏光現象から静的なひずみ量の計測と、動的応力である音波の両者を同時に可視化し、定量的なデータが得られる画像データが得られた。構築したデジタル化システムを用いて光弾性現象のデータの取得し音波伝搬の可視化と同時に固体の弾性特性とその異方性、残留応力分布などの計測を行い、材料や非破壊検査分野での新たな方法の一つの提案ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シュリーレン法や光弾性法で得られる画像の差分画像の取得法を開発し、得られた光信号データをCMOSカメラでデジタル化した。また、カラー画像のためRGB信号を個別に取り出すことが可能なため信号の輝度だけでなく後述の鋭敏色法のように固体内部の応力分布を色(干渉色)で表示する方法に対しても、デジタル的な方法で干渉色が得られる。これを用いて従来の波長板を用いて得ていた干渉色の情報およびRGB信号から変換して得られる画像の輝度信号および色信号からデジタル的に光弾性法、鋭敏色法およびセナルモン法を適用して超音波の動的応力の観測を可能にし、データ全てをデジタルの信号処理を行い、定量計測を可能にした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we digitize the stroboscopic photoelastic method that observes the sound field without affecting the sound field using light, and construct a new quantitative measurement method and its system by introducing the sensitive color method and the senalmon method. Targeting MHz-band ultrasonic waves, simultaneous measurement of static strain amount from polarization phenomenon due to birefringence due to photoelasticity from outside or internal stress in solid, and acoustic wave as dynamic stress simultaneously. The image data from which quantitative data were obtained was obtained. Acquisition of data of photoelastic phenomena using the constructed digitization system and visualization of sound wave propagation while measuring elastic properties of solid and its anisotropy, residual stress distribution etc., new in materials and nondestructive inspection field. One proposal of the method was made.

研究分野：超音波工学

キーワード：シュリーレン法 光弾性法 鋭敏色法 セナルモン法 差分画像 デジタル化 定量計測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

申請者がめざしている超音波音場の観測法として、ストロボ光を用いて音の場に影響を与えずに音場を観測するストロボ光弾性法のデジタル化を行うと共に鋭敏色法とセナルモン法を導入して超音波の定量計測とそのシステムの構築を行ってきた。上記の方法は医用や非破壊検査に用いる MHz 帯超音波を対象とし、特にガラスやアクリルなど透明な固体物質内での外部から或いは内部応力による光弾性現象に起因する複屈折による偏光現象から静的なひずみ量の計測と、動的応力である音波の両者を光弾性法によって同時に可視化可能にしたものである。これらの方法は音場全体の把握に有効であるが、波動の情報として振幅、位相の両方の情報がないと伝搬特性を明らかにできないため音場の細部の音圧や音波の位相についての定量的な情報は得られない。また、ガラス中を伝搬する超音波の可視化像、例えばシュリーレン法のような可視化方法からでは、画像データをデジタル化しても小さな領域の欠陥や音場媒質の不均一については定性的な情報しか得られない。さらに音場媒質内の“点”の情報が得られれば、閉口き裂、ポイドおよび剥離などが検出できると考えられるが、現状ではレーザービーム光のように細長いビームを長距離伝搬させる技術は確立していない。また、有限の大きさを持つ超音波変換器（プローブなど）を用いることによって点状の欠陥や不均一は有限な面積の受波器で空間的に平均化されこれらを検出できないことがある。さらに、物質内での音波の非線形性などを利用した観測では音圧や位相及び周波数特性の定量的な情報は得られない。また、波動の特徴の一つである、音波の伝搬時の回折に伴って位相が進む（遅れ）という現象の解明も必要となる。

このような状況にあって、本研究はこれらの情報を得るためにはどのようにしたらよいかという問題提起を行い、これが研究の目的でもある。これらの解明のため以下に述べるレーザー光をプローブとして用いた定量計測を目的としたシステムの開発の必要性が重要と考え、新しい測定法を開発する必要性が高まっている。

### 2. 研究の目的

超音波を含む音波の観測方法として従来から、ハイドロホン等の物理的なセンサを音場に直接挿入する方法やシュリーレン法等の光学的観測法が用いられているが音圧、位相等は定量化されるに至っていない。本研究は、レーザー光を用いて超音波の音場に影響を与えずにレーザー光を用いて  $\mu\text{m}$  オーダの“点”の領域の超音波特性の定量的な観測をめざす。このため従来の音波の有限領域の平均値情報ではなく点の情報を得るためレーザー光源、フォトセンサ、精密な位置決め・移動装置、位相計測装置からなるシステムを構築する。この方法で光センサから得られる時間波形からはスペクトルを、振幅から音圧を、位相（位相スペクトル）からは音波の伝搬に伴う位相を mdeg. 精度で定量的に計測する。すなわち、有限の大きさを持つ超音波変換器で得られる情報は何を表しているのかというこれまで論じられていない問題に対しての解を得ることをめざすものであり、音速測定の際の音波の位相変化等の原因など波動の根本的な問題を実験から定量データによって明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

上述の波動と計測の問題を考察するための情報を得る方法として、レーザープローブ法による測定法を検討してきた。この方法はレーザー光の細いビーム ( $\approx 20 \mu\text{m}$ ) を用いて、これを走査することによって超音波の音速、位相および周波数スペクトルを点で測定を行うことを考え、その検討を行った。

後述のようにレーザー光を用いた PMMA 内のスリットの加工部付近の加工による残留応力分布による音速変化の測定を行った際の測定システムの構築をおこなった。He-Ne レーザからのレーザー光が試料中を透過する際に超音波変換器 (Transducer) から放射された音波の音圧及び残留応力によって位相変調される。すなわち、超音波そのものの情報（既知）と共に残留応力によって生ずる複屈折の両方の情報取得し、光センサ (APD) で受光される。この時の APD 出力は音圧波形と相似であり、水中、空中及びガラス試料で音圧と APD 出力が線形関係であることが確かめられており、光学的に音圧の測定が可能であることが確かめられている。レーザー光は連続発振させ、音波の駆動と波形観測装置の同期を取れば容易に音圧波形が観測できる。き裂などの欠陥がある場合、APD 出力時間波形スペクトルに高調波が観測される。さらに、セナルモン法によって測定された残留応力と mdeg. オーダの精度で計測した音波の位相変化の関係を測定したものでスリット下部（残留応力の最大点及び塑性変形部分）付近の残留応力の圧縮および引張の変化率に対応して音波の位相の遅れと進みが観測できることがわかる。これをスリットの有無による位相変化の比として測定した。このときの位相変化は、音波の位相速度と比例関係があり、位相速度の変化と考えられ、今後なお検討が必要である。上述のように本方法は、光の点によって音波の伝搬特性を“点”で、特に音波の位相を mdeg. の精度で測定できるという他に類をみない方法である。後述の様に他の光学的な方法と組み合わせることによって定量的なデータが得られる方法に発展させることができる。

## 4. 研究成果

### 4-1. はじめに

レーザー光をプローブに用いた固体内部観測の方法を検討し [5]-[9], 試料内部の音波波形, 伝搬速度および位相などの超音波伝搬特性を観測できることを明らかにした[2][4]. この方法では超音波変換器のサイズの問題がなく, レーザ光のビームスポットサイズ程度の高い空間分解が得られる特長があり, 上述の微小な領域の観測が可能である. 本研究ではガラス[1], アクリル試料 (PMMA) 中及びアルミニウムに対する実験結果を示す. (注: 文中の引用文献は発表した論文に対応する)

### 4-2. レーザ光による音波の観測システム

観測システムについては文献に示す[2][3][4]. 発振器から周波数 5 MHz のバースト正弦波信号 15 波を発振させ, パイポラ増幅器 (NF HSA4101) に入力, 100 V 程度まで増幅し, 矩形圧電振動子 (Fuji Ceramics: C-9) に印加する. 試料中に送波された超音波は試料のスリット付近を伝搬するが, この時にビーム径 20 $\mu$ m のレーザー光 (He-Ne) を観測対象部分に照射し, 試料を透過したレーザー光を APD (Avalanche Photodiode) センサで受光する. レーザ光は試料中を伝搬する超音波によって位相変調されるとともに, 試料中残留応力によって複屈折を生じる. すなわち試料を透過したレーザー光は音波と試料中の残留応力の両方の情報を含んでおり, APD センサにより受光することで両者の情報を取り出すことができる. 本発表では超音波位相の測定から試料の音速を求める方法を採用している. 位相変化は音速の変化がない場合, 音波伝搬距離の変化の単純な一次関数であるためこれから音速の推定や補間が容易である. 残留応力のない部分と存在する部分の位相変化の傾きをそれぞれ  $a$  および  $a'$  とすると両者の音速比  $c'/c$  との間に  $c'/c = a/a'$  (1) の関係がある.

### 4-3. 位相測定結果

上述の方法から傾きの変化から位相変化の比を求める. 0.5 mm すなわち 500 点の位相データの回帰直線から位相の傾き  $a'$  を求め, 残留応力の存在しない部分の位相の傾きを  $a$  として式 (1) の関係から音速比  $c'/c$  を算出し, 同様の方法で位相の傾きから残留湯応力が求められた.

また, 反射法を用いて同様の実験を行った. 音波により位相変調されたレーザー光は光センサ (APD) で受光される. すなわち強化ガラス表層で反射したレーザー光には, 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, 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, レーザ光の位相のデータを取得し, このデータから位相変化を求める. 詳細については後述する.

### 4-4. 測定対象の強化ガラスについて

上述のシステムを使用して強化ガラス試料 (フロートガラス, 300 mm  $\times$  200 mm  $\times$  5 mm) について同様の実験を行った. 最初に鋭敏色法で内部応力が資料の端部に集中していることを確認した. 前述のように試料表面にはレイリー波探触子 (14 mm  $\times$  25 mm  $\times$  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. 結果は応力分布を色に対応させて可視化した. 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, その領域は目視でも色の変化として観測できる. 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.

### 4-5. 信号処理方法

前述のように実験では強化ガラス表面に Rayleigh 波を伝搬させ, ガラス端部の残留応力領域にレーザーを照射し, 2 枚の偏光板 (偏光子および検光子) を通して 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 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[6]. APD で得られた音圧に比例した出力電圧波形は VSA に入力され, 直交同期検波が行われデータが複雑化される. 得られたデータから位相の情報を求め式(4)により位相変化の比を求める.

このとき, 位相の傾きをそれぞれ  $a$  および  $a'$  とすると, 位相変化の比から残留応力に対応する出力が得られる.

### 4-6 データ取得法および表示法[6][7]

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ー光を照射し, 測定範囲内において 1  $\mu$ 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, 位相比を求める.

上述のように実験では光センサ (APD) からの超音波時間波形を 1  $\mu$ 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。位相測定結果の波形から VSA により位相を読み取り、8001 点のデータとしてまとめてこのデータから回帰直線を求めて位相の傾きの比較を行った。この結果、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、上述の同じシステムによる結果を拡大してみると、全体を通して傾きが変化している。前述のように位相データは 1  $\mu$  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、それぞれの位相変化を得て式(1)の関係から位相変化 ( $1/(d\theta/d\theta')$ ) を算出する。

#### 4 - 7 応力分布測定結果

次に反射法システムを用いた実験によって得られた強化ガラス表面残留応力と位相の関係を示す。右軸には残留応力値をとっている。残留応力値はレーザ光の入力側と反射光側に直線偏光板 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。リタデーション  $R$  と残留応力値  $\sigma$  の間には、 $R = \sigma \beta t$  (7) で表される関係がある。光弾性係数  $\beta$  (強化ガラス:  $2.6 \times 10^{-12}$  Pa $^{-1}$ ) および試料の厚さ  $t$  ( $=5 \times 10^{-3}$  m) を(7)式を変形した  $\sigma = R/\beta t$  (8)に代入し、リタデーション  $R$  から残留応力値  $\sigma$  [MPa] を求めている。これはセナルモン法という光学的に確立された手法である。

この実験の結果においても前述の実験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、測定開始点から応力のない部分 (A 点) (文献 2 参照) に圧縮応力 (-) が存在している。応力の極性が切り替わる部分 (B 点) 付近に応力の極性が転換する領域があり、以降ガラスの端部付近までは引張応力 (+) が存在している。ガラス端部 (C 点) には引張応力が強くかかっており、鋭敏色の色の変化がみられる。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。黒線で示した位相変化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位相が 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、応力の極性変化が位相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位相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光のような“点” (20  $\mu$  m) をプローブとして用いた測定で位相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 - 8 まとめ

レーザ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位相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位相が大きく変化することを確認した。このような急激な試料中位相の変化は、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ビーム径 (20  $\mu$  m) 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位相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。

#### 4 - 9 おわりに

本研究では音波の伝搬に及ぼす固体内部の残留応力のような通常の超音波測定では情報が得られないような場合に、光と音波の相互作用によって生じる音波の振幅や位相情報からこれらを測定できる方法の提案を行った。この結果、透過法や反射法でこれらを測定できる可能性を明らかにし、材料分野や非破壊分野での新しい方法として確立しうることを示した。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

1. 鈴木海里, 今野和彦, "有限要素法および鋭敏色法を用いた厚さが緩やかに変化するガラス板中の Lamb 波の伝搬解析", 日本素材物性学会誌 日本素材物性学会誌, Vol.30, No.1/2, pp.27-32 2019.
2. 赤塚雅史, 今野和彦, "レーザプロービング法による強化ガラス表面の Rayleigh 波位相と残

留応力の関係 ”, 日本素材物性学会論文誌 日本素材物性学会誌, Vol.30, No.1/2, pp.23-26 2019.

3. 今野和彦, 赤塚雅史, PMMA 中に存在する微小領域の残留応力と超音波位相との関係, 日本素材物性学会誌 日本素材物性学会誌, Vol.30, No.1/2, pp.18-22 (2019).
4. 今野和彦, 赤塚雅史, レーザ光を用いた超音波伝搬のプロローピ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, Vol.30, No.1/2, pp.6-10 2019.
5. 今野和彦, “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”, 日本画像学会誌, Vol.57, No.5 pp.525-528 2018.
6. Kairi.Suzuki and Kazuhiko Imano, “Sensitive Tint Visualization of Mode Variation of Lamb wave in the Gently Varying Thickness of Glass Plate”, Jour. Imag. Soc. Jpn., Vol.57, No.5, pp.529-532 2018.
7. 今野和彦, Senarmont 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.-, Oct. pp.265-267 2018.
8. 保坂儒人, 今野和彦, 鋭敏色法による A2 モード Lamb 波の可視化, 日本素材物性学会誌, 第 28 巻第 1/2 号, 19-24 (2017).
9. Y. Hosaka, K. Imano, “Sensitive Tint Visualization of Ultrasonic Propagation in the Glass with Crack”, Acoust. Sci. & Tech., Vol.38, No.3 pp.165-167 (2017).

〔学会発表〕(計 21 件)

1. 赤塚雅史, 今野和彦, “光学的手法による固体中残留応力の一観測法”, 日本音響学会春季研究発表会, 3-Q-36 2018.
2. 赤塚雅史, 今野和彦, “レーザプロローピングによる固体中残留応力が音速に及ぼす影響について”, 日本素材物性学会平成 30 年度研究発表会 B-1, pp.39-40, 2018.
3. 志賀宥太, 今野和彦, “サイディングによる振動特性の変化に関する研究”, 日本素材物性学会平成 30 年度研究発表会 B-2, pp.41-42, 2018.
4. 鈴木海里, 今野和彦, “鋭敏色法を用いた厚さが変化するガラス板中の Lamb 波の観測”, 日本素材物性学会平成 30 年度研究発表会 B-3, pp.43-44, 2018.
5. 信太拓都, 今野和彦, “超音波応力中伝搬による周波数特性の研究”, 日本素材物性学会平成 30 年度研究発表会 B-4, pp.45-46, 2018.
6. 赤塚雅史, 今野和彦, “強化ガラスのレーザプロローピングによる音速測定, 計測自動制御学会東北支部第 317 回研究集会, 317-11, 2018.
7. 赤塚雅史, 今野和彦, “レーザプロローピングによる Rayleigh 波位相と残留応力の関係 波位相と残留応力の関係”, 日本音響学会第 1 回東北地区音響研究会, 1 - 3, 2018.
8. 信太拓都, 今野和彦, “レーザ光による空中超音波場の可視化手法提案”, 日本音響学会 第 1 回東北地区音響研究会, 1 - 4, 2018.
9. 志賀宥太, 今野和彦, “サイディングおよび駆動電源のピーダス変化が圧電振動子の振動特性に及ぼす影響”, 日本音響学会第 1 回東北地区音響研究会, 1-5, 2018.
10. Yashima K. and Imano, K. (2017): Visualization and Quantification of Ultrasonic Field Using the Sensitive Tint Method and the Senarmont Method in the Glass, The Eighth International Conference of Material and Resources (ICMR2017) (Akita, Japan), p.390-3 (USB memory).
11. Akatuka M. and Imano, K. (2017): Experiments on Measurement of Ultrasonic Field by Light Deflection Method, The Eighth International conference of Material and Resources (ICMR2017) (Akita, Japan), p. 394-6 (USB memory).
12. Fujita, I., Fukuda M., and Imano, K. (2017): Detection of Second-Harmonic Ultrasonic Components from Micro Cracks Using Lame? Mode of Lamb Waves, The Eighth International Conference of Material and Resources (ICMR2017) (Akita, Japan), p. 386-9 (USB memory).
13. Iida, T. Fukuda M., and Imano, K. (2017): Method for Detection of Higher Harmonic Ultrasonic Components from a Micro Crack, The Eighth International Conference on Materials Engineering for Resources (ICMR2017) (Akita, Japan), p. 397-9 (USB memory)

他 8 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者 該当なし

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：赤塚雅史

ローマ字氏名：Akatsuka Masafumi

鈴木海里

Kairi Suzuki

信太拓都

Shida Takuto

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。