

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 28 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18885

研究課題名（和文）超音波伝搬の非接触観察による3次元弾性定数の推定

研究課題名（英文）Noninvasive and noncontact measurement of elastic constants of solid using ultrasonic wave field visualization

研究代表者

中畑 和之（Nakahata, Kazuyuki）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：20380256

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、部材表面を伝搬する超音波の可視化(Wavefield data)を数値的に処理し、材料を切り出すことなく異方性弾性体中の3次元弾性定数を求める方法を提案し、それを検証することを目的とする。Wavefield dataを得るために、レーザードップラー振動計を用いて計測する方法と光音響効果を利用した方法の2つを構築した。材料表面のWavefield dataを記録し、そのデータに時空間フーリエ変換を施すことによって、その面内の全方向の位相速度(P波、2種類のS波)を抽出する。複数方向の3種類の位相速度から独立な弾性定数を求める最適化問題を構築し、最小二乗法でこれを求める方法である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法の特徴は、基本的には対象から試験片を切り出すことなく、原位置で異方性材料の弾性定数を求める事ができる点にある。波面から識別可能なスローネス曲面が抽出できれば、材料の設置状況や表面凹凸等の影響によらないロバストな推定法である。また、超音波の波長とLDVのスキャンエリアを調整することで任意のスケールの平均弾性定数が推定できるスケラブルな評価法であり、学術あるいは産業応用の観点からも非常に有意義な研究である。今後は、空気超音波プローブを用いた場合の超音波のシグナルノイズ比を向上させ、産業応用を目指したい。

研究成果の概要（英文）：The elastic stiffness constants are fundamental parameters for industrial components and have to be determined before use. In this research, the elastic constants of the anisotropic material were estimated from visualization data. Here we implemented two types of visualization methods. One was based on ultrasonic detection using the laser doppler vibrometer, and the other was on an ultrasonic generation due to laser irradiation. Each method outputs slightly different visualization data, therefore we should use them after understanding their characteristics. The elastic stiffness determination method was achieved by performing a space-wavenumber Fourier transform (FT) on the wavefield data. Herein, the independent elastic moduli in a target material were determined using an optimization processing and the wavenumber domain data obtained by FT. The advantage of the proposed method is that the ultrasonic wave measurement is only performed on the target material surface.

研究分野：非破壊検査

キーワード：音響異方性 レーザー 弾性定数 光音響 非接触・非踏襲 逆解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

応力-ひずみ関係を結びつける弾性スティフネス(弾性定数)は、強度評価だけでなく、その経年変化をモニタリングすることで健全度評価の指標としても使われている。通常、弾性定数を求めるには試験片を対象から切り出し、静的試験や動的試験(共振法等)によって計測する¹⁾。しかし、供用中の構造部材となると試験片を切り出すのは困難で、しかも切り出したとしても原位置の温度状態等が変わってしまうえば供用時の弾性定数が正しく評価できないといった問題がある。また、航空宇宙産業をはじめとして、自動車、建設分野など様々な分野で利用が加速している炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)は、一方向強化材では横等方性、マルチプライ材では疑似等方性と呼ばれる異方性が出現する。これらの材料は、等方性材料とは異なり 3 つ以上の弾性スティフネスの要素を同時に推定することになる。このように、原位置で切り出すこと無く、異方性構造部材の弾性定数を推定する効果的の方法が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、部材表面を伝搬する超音波の可視化(Wavefield data)を数値的に処理し、材料を切り出すことなく 3 次元弾性定数を求める方法を提案²⁾し、それを検証することを目的とする。本手法の特徴は、超音波の波長と可視化エリアを変えることができるため、金属粒・CFRP のようなメソスケールの非均質材料やコンクリート等の大型材料まで、波動が伝搬する範囲の平均弾性定数を測定できることである。Wavefield data を得るために、本研究では 2 種類のシステムを研究室内で自作した。1 つは、レーザードップラー振動計(Laser Doppler Vibrometer: LDV)を用いて計測する方法³⁾であり、これは古くから提案されていたものである。最近ではレーザ光の照射によって超音波を発生させ、それを可視化する光音響法⁴⁾も提案されている。ここでは、それぞれの方法をトレースし、双方の可視化が実現できるようなシステムを構築した。本報告では、光音響法の装置を用いて CFRP の弾性スティフネスの推定を行った例を示し、この推定結果の精度について述べる。

3. 研究の方法

弾性定数を推定する原理は次の通りである。材料表面に現れる超音波の Wavefield data を記録する。そのデータに時空間フーリエ変換を施すことによって、その面内の全方向の位相速度(P波, 2 種類の S 波)を抽出する。位相速度と弾性定数は Christoffel 方程式⁵⁾を用いて陽な形で表すことができるため、複数方向の 3 種類の位相速度から独立な弾性定数を求める最適化問題を構築し、最小二乗法でこれを求める。この報告書では、CFRP のプリプレグの弾性スティフネスを求める方法を例として示す。プリプレグ 1 枚の厚さはおよそ 100 μm 程度であるため、これを同一方向に複数枚成形してバルク材とし、これを用いて弾性スティフネスの推定を行った。推定したパラメータの検証方法としては、その弾性スティフネスの値を用いた CFRP の数値モデルを作成し、数値シミュレーションによって波動伝搬を計算する。これを、計測によって得られた Wavefield data と比較し、波動の拡がりや伝搬速度から精度の検証を行う。

(1) 光音響計測法

非常に短いパルス幅でレーザー光を物質に照射すると短時間に熱膨張が生じ、これによって応力波が生じる。発生した超音波領域の応力波は光音響波と呼ばれる。光音響計測法のシステムを図 1 に示す。レーザー光源(Litron 社, Nano L90-100)によって、100Hz の繰り返し周波数で、波長 532nm、パルス幅 4ns のレーザー光を発生している。光源の出射口で計測したパルスエネルギーは、およそ 1mJ である。発生したレーザー光は、光ファイバーを通じて対象材料の表面に照射される。CFRP のような工業材料の場合、表面で光音響効果が顕著である⁶⁾。発生した光音響波は、照射点から離れた位置に設置した超音波プローブによって検出される。ここでの超音波プローブは受信専用として用いられ、LDV 計測法で送信用に用いたものと同じである。検出された信号はアンプによって増幅され、DAQ でデジタル化されて記録される。ファイバーを平行移動させることによってラスタ走査を行う。ここで、送信と受信を逆にしても等しい波形が得られるという動弾性問題の相反性を利用する。すなわち、プローブでの受信波形は、プローブから発生した超音波信号であると仮定する。各点で得られた信号から同時刻の信号の振幅を抽出し、それをプロットすることで超音波の可視化、すなわち Wavefield data の取得を行う。

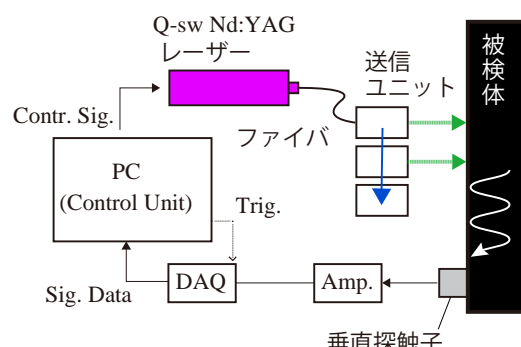


図 1: 光音響効果を利用した超音波の可視化方法

(2) 一方向に積層した CFRP 供試体

図 2(a)に示すように、プリプレグを同じ方向に 200 枚積層した CFRP 供試体 $[(0^\circ)_{200}]$ を作製した。母材はエポキシ樹脂であり、炭素繊維は東レの T800S を用いた。供試体の x_1, x_2, x_3 方向の長さは、それぞれ 20.0 mm, 50.4 mm, 50.4 mm である。炭素繊維の直径は約 6 μm であり、繊維の含有率は約 60%、炭素繊維と樹脂の密度はそれぞれ 1.8 と 1.4 g/cm³ である。ここでは、図 2(b)に示す x_2-x_3 面を可視化面 A、図 2(c)に示す x_2-x_1 面を可視化面 B とし、それらの面でレーザー

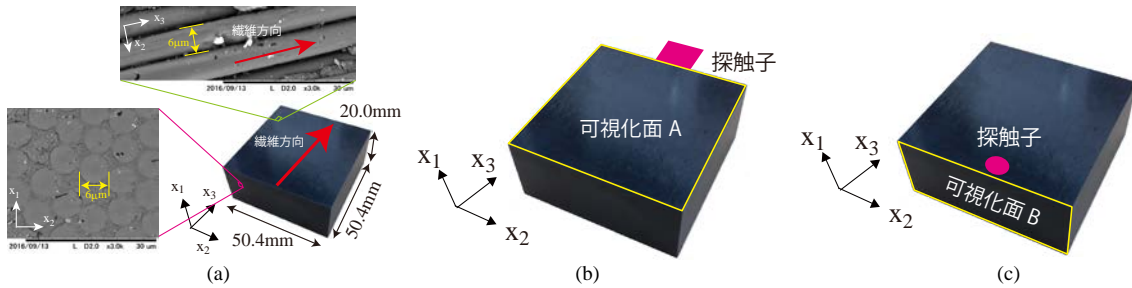


図 2: (a)同一方向にプリプレグを積層させた CFRP 供試体, (b)超音波の可視化面 A, (c)可視化面 B

光を送信／受信する．なお、探触子は、可視化面とは異なる別の面に設置している．

(3) 波動伝搬の可視化

光音響計測法におけるレーザー光の照射間隔は、およそ 0.15mm とする．光音響計測法を用いて可視化面 A と B を計測した結果を図 3 にそれぞれ示す²⁾．A 面は計測開始後 6μs 後、B 面は 8μs 後のスナップショットを示したものであり、全スナップを通じて最大となる振幅値で正規化してカラーで表している．図 3(左)より、縦波(P 波)が始めに観察され、その音速は繊維方向である x_3 方向が卓越して大きいことがわかる．また、時間が経つと、音速の小さい横波(S1 波)も観察でき、それは楕円状に広がっている．図 3(右)から、繊維方向に直交する断面 B では等方的な挙動を示す．炭素繊維自体による超音波の多重散乱の影響は小さく、この供試体は横等方性材料と仮定できる．次節では、図 3 の可視化結果をもとに、プリプレグの材料定数を逆解析する．

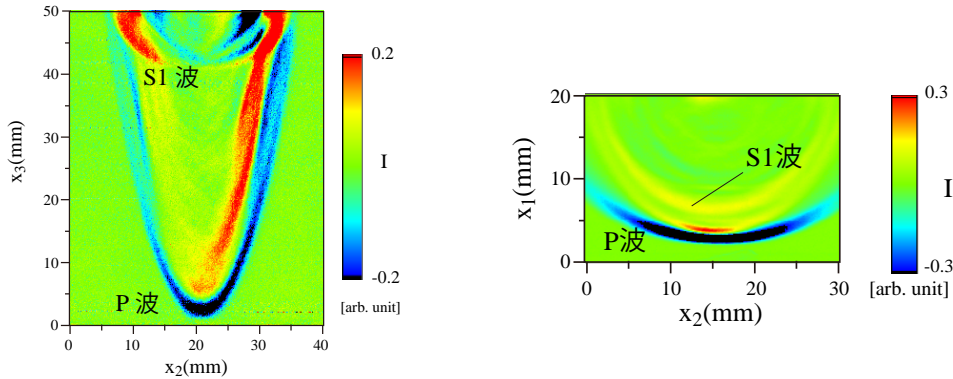


図 3: (左) A 面の可視化結果, (右) B 面の可視化結果

4. 研究成果

(1) 位相速度と弾性スティフネス

異方性材料の場合、波動の位相面の移動速度である位相速度と、エネルギーの伝搬速度である群速度の 2 種類が存在することが知られている．図 3 で示した可視化結果は、群速度で伝搬する波面が現れていることに注意されたい．ここでは、波動伝搬の可視化結果から弾性スティフネスを求める方法について述べる．弾性スティフネスは群速度ではなく、位相速度と関連づけられる． C_{ijkl} を弾性スティフネスマトリクスとする．これは 4 階のテンソルである．進行方向 \mathbf{n} に位相が進む場合の平面波は、以下の Christoffel 方程式⁵⁾を満足する．

$$\left(c_{iklm}n_k n_l - \rho v^2 \delta_{im}\right) d_m = 0, \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{d} は波動の偏向ベクトル、 v は位相速度、 δ_{im} はクロネッカーのデルタである．上式は、固有値が ρv^2 である固有方程式と見なすことができ、行列の対称性から 3 つの実数固有値とそれに対応する固有ベクトルが存在する．この固有方程式から求められる 3 つの v^α が、 $\alpha = P, S1, S2$ 波の位相速度に対応する．位相速度は、その逆数を表示することがあり、進行方向 \mathbf{n} における逆速度(スローネス)と速さを

$$s_i^\alpha = \frac{1}{v^\alpha} n_i, \quad s^\alpha = \sqrt{s_i^\alpha s_i^\alpha} \quad (2)$$

と定義し、速さを全方位に渡って描いたものをスローネス曲面と呼ぶ．

CFRP 供試体は、横等方性材料であると仮定したので、推定すべき弾性スティフネスは、Voigt 標記⁵⁾を用いると $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}$ の 5 つである．ここで、可視化面 A (x_2-x_3 面内)を伝搬する波動を例にとり、固有方程式の解を具体的に記述してみる． x_1 軸回りの回転角を θ とする．このとき A 面内の平面波の方向は $(n_1, n_2, n_3) = (0, \cos \theta, \sin \theta)$ となり、式(1)から次の 3 つの位相速度と C_{ij} との関係が求まる．

$$(v^p)^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{1}{2}(C_{11} + C_{44})n_2^2 + \frac{1}{2}(C_{33} + C_{44})n_3^2 + \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} (C_{11}^2 - 2C_{11}C_{44} + C_{44}^2)n_2^4 \\ + (2C_{11}C_{44} - 2C_{11}C_{33} + 4C_{13}^2 \\ + 8C_{13}C_{44} + 2C_{33}C_{44} + 2C_{44}^2) n_2^2 n_3^2 \\ + (C_{33}^2 - 2C_{33}C_{44} + C_{44}^2)n_3^4 \end{array} \right]^{1/2} \right\} \quad (3)$$

$$(v^{s1})^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{1}{2}(C_{11} + C_{44})n_2^2 + \frac{1}{2}(C_{33} + C_{44})n_3^2 - \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} (C_{11}^2 - 2C_{11}C_{44} + C_{44}^2)n_2^4 \\ + (2C_{11}C_{44} - 2C_{11}C_{33} + 4C_{13}^2 \\ + 8C_{13}C_{44} + 2C_{33}C_{44} + 2C_{44}^2) n_2^2 n_3^2 \\ + (C_{33}^2 - 2C_{33}C_{44} + C_{44}^2)n_3^4 \end{array} \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

$$(v^{s2})^2 = \frac{1}{\rho} (C_{66}n_2^2 + C_{44}n_3^2) \quad (5)$$

これらの関係式から、 x_2-x_3 面内を伝搬するいくつかの方向の位相速度がわかれば、 C_{ij} が求まることになる。これ以外にも、他の可視化面で同様に、弾性スティフネスと位相速度の関係式が陽な形で表現できる。

(2) 弾性スティフネスの逆解析

レーザーの走査によって、各点で時間 t の振動変位が得られる。これらを元に、以下に示す波形処理によって波数 \mathbf{k} 空間から位相速度を抽出する。レーザーの走査方向を x_i-x_j 面内とすると、点 $\mathbf{x}=(x_i, x_j)$ で x_k 方向の振動変位 u_k が得られる(ただし、 $k \neq i, j$)。いま、次の時空間フーリエ変換を考える。

$$U_k(\mathbf{k}, \omega) = \iiint u_k(\mathbf{x}, t) \exp\{-i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)\} d\mathbf{x} dt \quad (6)$$

ここで、角振動数 ω は周波数 f と $\omega=2\pi f$ の線形の関係がある。得られた波数-周波数領域のデータから、位相速度の逆数(スローネス、 $s=1/v$)を求める。異方性材料の場合、伝搬方向によってスローネスが異なるので、次式のようにスローネス $\mathbf{s}=(s_i, s_j)$ はベクトル表示される。

$$\mathbf{s} = \frac{1}{2\pi f} \mathbf{k} \quad (7)$$

以上より、式(6)によって波数-周波数空間の値 U_k を計算した後、式(7)を用いて座標変換するとスローネス分布が得られる。可視化面 A の可視化結果(図 3)から算出したスローネス分布を図 4 に示す²⁾。ここで、 U_k の値は最大値が 1 になるように正規化しており、赤い部分はその位相速度で伝搬する成分が多いことを表す。

図 4(a)に示すように、 $\theta=90^\circ$ 方向 ($n_1, n_2, n_3 = (0, 0, 1)$) の位相速度を例として、弾性スティフネスを決定するプロセスを示す。式(8)~(10)より、

$$s^p = \sqrt{\rho/C_{33}}, \quad s^{s1} = s^{s2} = \sqrt{\rho/C_{44}} \quad (8)$$

となる。すなわち、図 4(a)中の s_a は上式の s^p 、 s_b は上式の s^{s1} に相当する。ここで、 $s_a=0.096$ s/km、 $s_b=0.473$ s/km と読み取ることができるので、式(3)から $C_{33}=178$ GPa、 $C_{44}=7.33$ GPa と計算できる。これ以外にも図 4(b)のような可視化面 B や他の面においても、複数の方向でスローネスが観察できる。求めるべき C_{ij} の個数は 5 つであり、これよりも多い複数方向の位相速度が得られるため、通常は最適化問題を設定して 5 つの定数を決定することになる。ここで、位相速度の計測値と式(3)~(5)に示す位相速度の差の二乗和が最小になるように C_{ij} を決定した結果、次式のような弾性スティフネスが得られた。

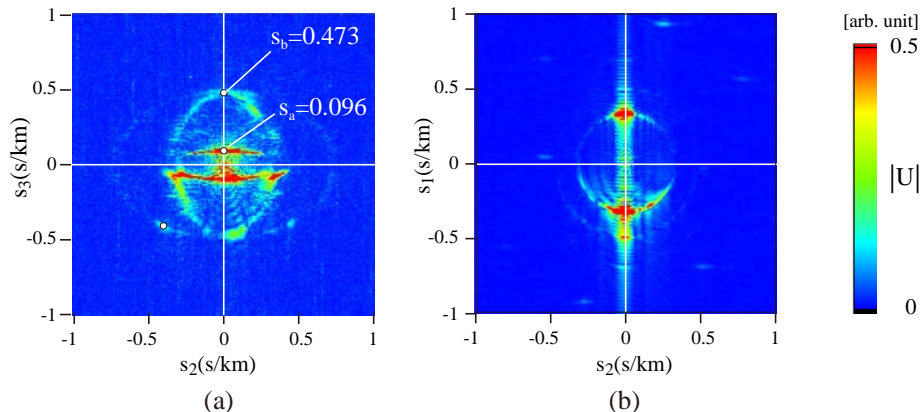


図 4: 時空間フーリエ変換によって描画したスローネス分布。(a)可視化面 A, (b)可視化面 B

$$C = \begin{pmatrix} 15.9 & 9.1 & 6.41 & 0 & 0 & 0 \\ & 15.9 & 6.41 & 0 & 0 & 0 \\ & & 181.0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 7.64 & 0 & 0 \\ & & & & 7.64 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & 3.38 \end{pmatrix} \text{ (GPa)} \quad (9)$$

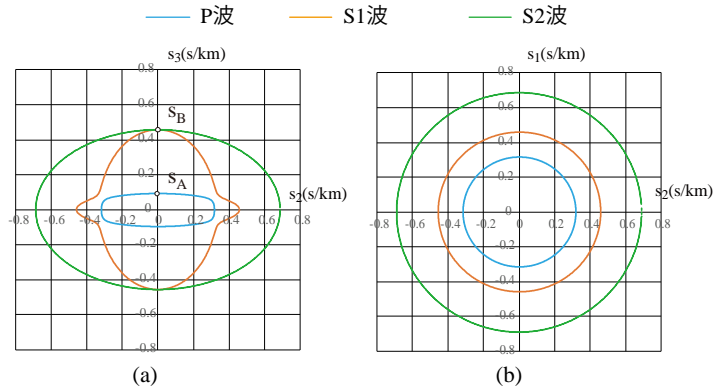


図 5: 逆解析によって再構成したスローネス曲線. (a)可視化面 A, (b)可視化面 B

(3)弾性スティフネスの検証

式(9)の弾性スティフネスを用いて再現された各可視化面のスローネス曲面を図 5 に示す. 図 4 ではスローネスが部分的に現れていたが, 図 5 はそれらを含む全体の曲面が再現できている, 最適な最小二乗解が得られているといえる. 式(9)の弾性スティフネスを用いて, 陽的有限要素法を実行したときの波動伝搬シミュレーション結果を図 6 に示す. 図 6(a)と(b)は, 可視化面 A と B をそれぞれ再現したものである. P 波速度は, 計測実験で見られたように x_3 方向に卓越して大きい. 可視化結果が同等の結果を示すことから, 弾性スティフネスは精度良く推定できているといえる.

本手法は, 波面から識別可能なスローネス曲面が抽出できれば, 材料の設置状況や表面凹凸等の影響によらないロバストな推定法である. 当初は空気超音波プローブを用いて音波を送信し, LDV による音波の受信を組み合わせた完全非接触な検査法の確立を目指していたが, 空気超音波プローブでは固体内に入射する音波のエネルギーが小さく, LDV 計測時の S/N が芳しくないため断念した. 現在は, 光音響計測法に空気超音波プローブを適用して, Wavefield data が得られるかを検証中である. 概ね当初の予定通りに研究が遂行できた.

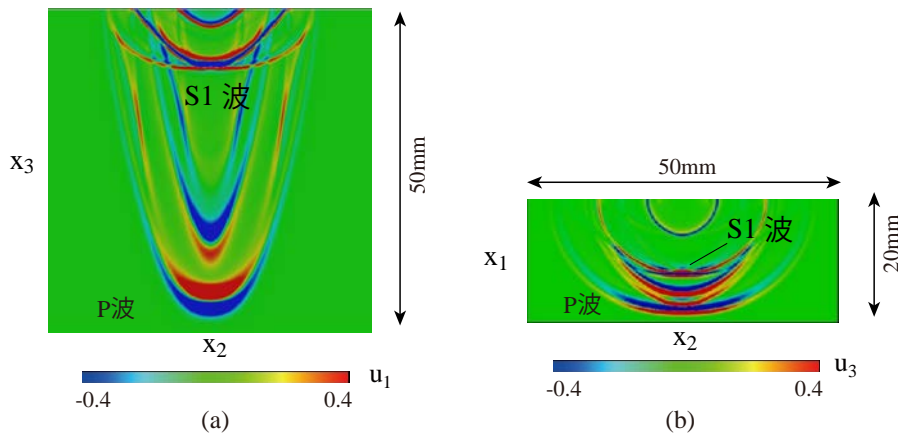


図 6: (a) CFRP 数値モデルの A 面の面外変位(5 μ s 時), (b)数値モデルの B 面の面外変位(8 μ s 時)

参考文献

- 1) 日本規格協会 : JIS Z2280 金属材料のヤング率試験方法
- 2) K. Nakahata, Y. Amano, K. Ogi, K. Mizukami, T. Saitoh, Three-dimensional ultrasonic wave simulation in laminated CFRP using elastic parameters determined from wavefield data, Composite Part B, Vol.176, 107018, 2019.
- 3) B. Koehler, M. Kehlenbach, R. Bilgam, Acoustical Imaging / Optical Measurement and Visualization of Transient Ultrasonic Wave Fields, Vol.27, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- 4) S. Yashiro, J. Takatsubo, H. Miyauchi, N. Toyama, A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan, NDT & E International, Vol.41, pp.137-144, 2008.
- 5) B. A. Auld, Acoustic Fields and Waves in Solids Volume 1, Krieger Publishing Company, USA, 1990.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中畑和之, 天野裕維, 溝田裕久, 斎藤隆泰, 木本和志	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 Wavefieldデータを利用した数値モデルの構築と時間反転イメージングへの応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2	6. 最初と最後の頁 I_71-I_81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuyuki Nakahata, Yuui Amano, Keiji Ogi, Koichi Mizukami, Takahiro Saitoh	4. 巻 176
2. 論文標題 Three-dimensional ultrasonic wave simulation in laminated CFRP using elastic parameters determined from wavefield data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Composites Part B	6. 最初と最後の頁 107018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesb.2019.107018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuyuki Nakahata, Kazuki Karakawa, Keiji Ogi, Koichi Mizukami, Satoshi Wada, Takeshi Namita, Tsuyoshi Shiina	4. 巻 98
2. 論文標題 Three-dimensional SAFT imaging for anisotropic materials using photoacoustic microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 82-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultras.2019.05.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 天野裕維, 中畑和之
2. 発表標題 レーザー超音波法を用いた異方性材料の弾性定数の非侵襲計測
3. 学会等名 日本音響学会 秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Nakahata, Kazuki Karakawa
2. 発表標題 Photoacoustic imaging method using SAFT algorithm for material with acoustic anisotropy
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 秋季講演大会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中畑和之, 唐川和輝, 天野裕維
2. 発表標題 超音響波を利用した弾性スティフネスの推定とCFRP の内部剥離のイメージング
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第39 回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 天野裕維, 中畑和之
2. 発表標題 レーザーを用いた超音波可視化法に関する一考察～レーザー照射型と受信型による可視化結果の比較～
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2019年度第1回 超音波部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----