

令和 3 年 5 月 8 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04172

研究課題名(和文)円環型微分干渉照明を用いたコーシーの積分定理にもとづく欠陥検出に関する研究

研究課題名(英文) Defect inspection method based on Cauchy's integral theorem using a circular differential coherent illumination

研究代表者

寺本 顕武 (KENBU, TERAMOTO)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：70207489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、極座標系で表現された波動方程式を因数分解することによって導出される点波源拘束偏微分方程式を利用した非破壊検査手法を提案している。それぞれの項は、波源から円環状に発散する波面と波源に集束する波面を表している。このようにして得られたベクトル微分方程式が、点波源拘束微分方程式である。この微分方程式は、波動場を表すスカラーポテンシャルの勾配がポテンシャル自身とその時間微分の線形結合で表されることを示している。ポテンシャルの係数が波動場の位相速度ベクトル場の発散で与えられ、その勾配とポテンシャル自身の相互相関演算により位相速度ベクトル場の発散を取り出すことができ、点波源の位置を特定する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、複合薄板材料が様々な構造物において利用されている。その中でも炭素繊維強化樹脂薄板は軽量化と強度が求められる部材に多く使用されつつある。多層繊維強化複合材では枚数や配向の違いによって弾性率(テンソル量)が変化するため、均質な等方性弾性体の場合と比較して精密な欠損像の再構成が困難であった。本研究は、点波源拘束偏微分方程式を用いることにより、超音波非破壊検査とは全く異なる原理にもとづき、波長や音速に左右されずに板材中の欠損位置を特定できる画期的な方法である。

研究成果の概要(英文)：Guided elastic waves are used for the non-destructive evaluation of plate-like structures. In recent years, manufacturing based on composites has increased gradually. However, the elastic wave dynamics in such materials is considerably more complicated. The conventional time-of-flight technique is not reliable for locating the defects even in isotropic plates because of the dispersiveness in the Lamb wave propagation. Avoiding difficulties caused by the dispersiveness, this paper proposes a novel imaging method based on the point-source constrained partial differential equation in order to reconstruct the silhouette image of the subsurface defects. A theoretical analysis of the proposed method is developed for single point-like defect in the isotropic plate. Numerical evaluation and several experimental results are presented to verify the image reconstruction process of the subsurface defects in the CFRP plates.

研究分野：計測工学

キーワード：超音波撮像 点波源拘束偏微分方程式 波動情報処理 非破壊検査 異方性弾性体 ガイド波

## 1. 研究開始当初の背景

薄板構造材の非破壊検査は、さまざまな産業分野において安全の維持や保全のため非常に重要である。近年、複合薄板材料が様々な構造物において利用されている。その中でも炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 以下 CFRP と略記)薄板は軽量化と強度が求められる部材に多く使用されつつある。例えば、航空機では、翼や胴体など主要な構造材に使用されており、CFRP 中に発生する層間剥離や亀裂の発生をいち早く検出することが、安全維持のために必要である。現在、超音波探傷法が一般的に用いられているが、小さな傷や表面近傍あるいは薄板中に発生した欠損を検出するために短い波長を用いなければならないため、一度に検出できる範囲が限定され、検査に要する時間およびコストが高くなり高い頻度での検査が難しいとされている。この欠点の解消を目的として、ガイド波の一つであるラム波を用いた非破壊検査手法が注目されている。ガイド波は薄板材を導波路として進行するためエネルギー減衰が小さく、欠損がなければ非常に遠いところまで伝搬するという特徴をもっており、一度に広い範囲の観測を可能にする。また導波路中に欠損がある場合は局所的にエネルギーが散逸し、その伝搬に影響を及ぼすため、ガイド波の波面を時々刻々解析することで欠損の存在を特定できることが推測される。しかしガイド波の多くは分散性の波であり、亀裂や剥離、腐食箇所からの散乱波を捉えることが難しいという問題点がある。その理由は、音速が周波数と板厚によって変化するため波面の進行とともに入射パルスの形状が崩れるからである。この問題点を解消するための手法の一つが、Prada らによって提案されている群速度がゼロになるラム波のモードを利用した撮像手法である。材質および板材の厚さによって、ゼロ群速度モードを実現する周波数が異なるため、広帯域で対象を励振させ発生した多数のモードから当該モードを抽出している。ところが、多層繊維強化複合材では枚数や配向の違いによって弾性率(テンソル量)が変化するため、均質な等方性弾性体の場合と比較して精密な欠損像の再構成が困難であった。そこで、材料の弾性率の違いによらない性質を用いた亀裂の撮像法として、寺本らは、基盤研究 C 15560360, 17560375, 22560421, 15K06112 を通して「動的せん断ひずみ解析法」を提案している。当手法は、互いに直交する向きに面外せん断歪みの間の線形従属性を用いて散乱波と入射波の波面が重畳する領域を検出するものである。しかしながら、2 つ以上の独立した平面波が重畳すると、亀裂が存在しないにも関わらず大きな背景値が出力され、亀裂の有無の判別が困難になる問題点がある。

## 2. 研究の目的

この「動的せん断ひずみ解析法」が内包する問題点を解決することを目的として点波源を取り囲む領域の位相速度ベクトル場の発散(divergence)にもとづく欠損の検出手法を提案することをゴールにさだめ、以下の二つを目的としている。

- (1) 薄板材を伝搬するラム波による波動場に注目し、板材内の欠損を再放射源とする散乱波が従う、時空間偏微分方程式を導出し、それに基づいて局所的な位相速度ベクトル場の発散を導出する仕組みを、数理的に明らかにし、数理的なモデルを用いて欠損検出の能力を評価する。
- (2) 等方性材料および直交異方性材料の板材に人工的に欠損をほどこし、ラム波をこれらの板材に照射し、そのときの板材表面に変位を光学的に非接触で計測し、観測されたデータに対して、(1)で提案される手法を適用し、欠損検出の能力を実験的に評価する。

## 3. 研究の方法

本研究はつぎの項目に従って遂行された。

- (1) 等方性弾性体薄板材を伝搬する狭帯域 A0 モードラム波による波動場をモデル化し、波動場を支配する波動方程式から、欠損からの散乱波の振る舞いを記述する時空間偏微分方程式を導出し、位相速度ベクトル場の発散がどのように表されるのかを数理的に明らかにする。
- (2) 等方性材料および直交異方性材料の板材に人工的に欠損をほどこし、ラム波をこれらの板材に照射し、そのときの板材表面に変位を光学的に非接触で計測し、観測されたデータに対して、(1)で提案される手法を適用し、「動的せん断ひずみ解析法」が内包する問題点が解決されていることを確認した。

## 4. 研究成果

上記の(1)(2)に従って、それぞれ成果を示す。

### 4.1 点波源拘束偏微分方程式に基づく欠損検出の原理

均質な等方性板材表面の原点に点波源を設定し、自由境界条件の下で存在する A0 モードラム波の角周波数 $\omega$ の成分に着目する。A0 モードラム波は 2 次元の波動場を形成するため、法線方向の変位を $u(\mathbf{r}, t)$ で表現すると、波源を含まない領域では波動方程式

$$\nabla^2 u(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1)$$

が成り立つ。これを円筒座標系で表現すると

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) u(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2)$$

である。ここで、 $\mathbf{r} = (r \cos \phi \ r \sin \phi)^T$  で表される位置ベクトルである。 $c$  は位相速度の絶対値である。また、波源が原点に位置する場合の波動場の軸対称性を考慮すると、方位角  $\phi$  に関する偏微分がゼロとなるため、次の偏微分方程式

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) u(r, t) = 0 \quad (3)$$

が得られる。ここで、

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} u(r, t) = -\omega^2 u(r, t), \quad \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} = \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} \right)^2 - \frac{1}{4r^2} \quad (4)$$

の関係を用いると(3)式は、

$$\left( \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} \right)^2 + \left( \frac{1}{4r^2 \omega^2} - \frac{1}{c^2} \right) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) u(r, t) = 0 \quad (5)$$

と変形でき、次のように因数分解できる。

$$\left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} + \sqrt{\frac{1}{c^2} - \frac{1}{4r^2 \omega^2}} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} - \sqrt{\frac{1}{c^2} - \frac{1}{4r^2 \omega^2}} \frac{\partial}{\partial t} \right) u(r, t) = 0 \quad (6)$$

その結果、原点を波源とする円筒波は、

$$\frac{\partial}{\partial \phi} u(\mathbf{r}, t) = 0, \quad \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} + \sqrt{\frac{1}{c^2} - \frac{1}{4r^2 \omega^2}} \frac{\partial}{\partial t} \right) u(r, t) = 0 \quad (7)$$

を満たす。上式より等価なベクトル場の微分方程式

$$\nabla u(\mathbf{r}, t) = -\frac{\mathbf{r}}{c \|\mathbf{r}\|} \left( \frac{c}{2 \|\mathbf{r}\|} u(\mathbf{r}, t) + \sqrt{1 - \frac{c^2}{4 \|\mathbf{r}\|^2 \omega^2}} \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \right) \quad (8)$$

が導出される。点波源が  $\mathbf{r}_0$  にある場合、位置ベクトル  $\mathbf{r}$  を  $\mathbf{r}_0$  からの距離  $r = \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|$  と方向ベクトル  $\mathbf{r} - \mathbf{r}_0$  が  $x$  軸となす角  $\phi$  を用いて

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\| \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} \quad (9)$$

で表現し、(8)式の  $\mathbf{r}$  に  $\mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ 、 $r$  に  $\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|$  を代入することにより

$$\nabla u(\mathbf{r}, t) = -\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{c \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|} \left( \frac{c}{2 \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|} u(\mathbf{r}, t) + \sqrt{1 - \frac{c^2}{4 \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|^2 \omega^2}} \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \right) = 0 \quad (10)$$

が得られる。これが点波源拘束微分方程式である。一方、 $\mathbf{r}_0$  に位置する波源からの円筒波の位相速度ベクトル場は

$$\mathbf{c}(\mathbf{r}) = c \cdot \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|} \quad (11)$$

で与えられ、その結果、位相速度ベクトル場の発散は

$$\nabla \cdot \mathbf{c}(\mathbf{r}) = \frac{c}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|} \quad (12)$$

である。これを(10)式に代入すると

$$\nabla u(\mathbf{r}, t) = -\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{c\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|} \left( \frac{1}{2}(\nabla \cdot \mathbf{c}(\mathbf{r}))u(\mathbf{r}, t) + \sqrt{1 - \frac{c^2}{4\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0\|^2\omega^2}} \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \right) \quad (13)$$

が得られる。ここで $\nabla u(\mathbf{r}, t)$ は、動径方向 $\mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ と $\mathbf{r}_0$ 周りの角度方向の偏微分で表現される勾配ベクトルである。さらに、法線方向の変位とその時間微分との相互相関がゼロとなることを用いると、法線方向の変位とその勾配との相互相関は、つぎのように表すことができる。

$$\Phi_{ru}(\mathbf{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial r} \cdot u(\mathbf{r}, t) dt = -\frac{c_r(\mathbf{r})}{2\|\mathbf{c}(\mathbf{r})\|^2} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{c}(\mathbf{r})) \cdot \Phi_{uu}(\mathbf{r}) \quad (14)$$

$$\Phi_{\phi u}(\mathbf{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial \phi} \cdot u(\mathbf{r}, t) dt = -\frac{c_\phi(\mathbf{r})}{2\|\mathbf{c}(\mathbf{r})\|^2} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{c}(\mathbf{r})) \cdot \Phi_{uu}(\mathbf{r}) \quad (15)$$

なお $\Phi_{uu}(\mathbf{r})$ は $u(\mathbf{r}, t)$ の自己相関関数である。また $c_r(\mathbf{r})$ と $c_\phi(\mathbf{r})$ は、それぞれ位相速度ベクトル $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ の動径成分と方位成分である。ここで次の相互相関

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(\mathbf{r}, t) \cdot \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial t} dt = 0 \quad (16)$$

がゼロとなることを利用すると

$$\begin{pmatrix} \Phi_{ru}(\mathbf{r}) \\ \Phi_{\phi u}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} = \frac{(\nabla \cdot \mathbf{c}(\mathbf{r}))\Phi_{uu}}{2\|\mathbf{c}(\mathbf{r})\|^2} \mathbf{c}(\mathbf{r}) \quad (17)$$

という関係が得られる。その結果

$$\Phi_{ru}^2(\mathbf{r}) + \Phi_{\phi u}^2(\mathbf{r}) = \frac{(\nabla \cdot \mathbf{c}(\mathbf{r}))^2 \Phi_{uu}^2}{4\|\mathbf{c}(\mathbf{r})\|^4} \|\mathbf{c}(\mathbf{r})\|^2 \quad (18)$$

で示される関係が得られる。さらに(9)式より

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial \phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (19)$$

の関係が成り立つ。これを(14)、(15)式に代入すると

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \Phi_{ru}(\mathbf{r}) \\ \Phi_{\phi u}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial u(\mathbf{r}, t)}{\partial y} \end{pmatrix} u(\mathbf{r}, t) dt \\ &= \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{xu}(\mathbf{r}) \\ \Phi_{yu}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

が成り立つことがわかる。その結果,(18)式の左辺は

$$\begin{aligned} \Phi_{ru}^2(\mathbf{r}) + \Phi_{\phi u}^2(\mathbf{r}) &= \begin{pmatrix} \Phi_{ru}(\mathbf{r}) & \Phi_{\phi u}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{ru}(\mathbf{r}) \\ \Phi_{\phi u}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \Phi_{xu}(\mathbf{r}) & \Phi_{yu}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{xu}(\mathbf{r}) \\ \Phi_{yu}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \Phi_{xu}(\mathbf{r}) & \Phi_{yu}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{xu}(\mathbf{r}) \\ \Phi_{yu}(\mathbf{r}) \end{pmatrix} = \Phi_{xu}^2(\mathbf{r}) + \Phi_{yu}^2(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (21)$$

である。これを用いると次の関係が得られる。

$$\frac{\Phi_{xu}^2(\mathbf{r}) + \Phi_{yu}^2(\mathbf{r})}{\Phi_{uu}^2} = \frac{(\nabla \cdot \mathbf{c}(\mathbf{r}))^2}{4\|\mathbf{c}(\mathbf{r})\|^2} \quad (22)$$

と表される。(22)式は、位相速度の絶対値が至る所で一定な等方性板材中に点波源が存在するとき、法線方向の変位 $u(\mathbf{r}, t)$ とその勾配ベクトル $\nabla u(\mathbf{r}, t)$ との相互相関関数の平方和と法線方向の変位の自己相関関数の平方に対する比が、位相速度ベクトル場の発散の平方に比例すること

を意味している。同時に、点波源の場合、位相速度ベクトル場の発散が波源近傍に局在している。その結果、(22) 式の左辺の値を用いて点状欠損を特定することができる。これが、本研究が提案する「点波源拘束偏微分方程式にもとづく」欠損検出の原理である。

#### 4.2 音響実験

本節では、まず、提案する『点波源拘束偏微分方程式にもとづく欠損検出手法』を等方性弾性材料である鋼板中の微小円筒欠損近傍の像再構成を行なっている。さらに、同手法を、直交異方性材料である、CFRP 板材中の微小円筒欠損近傍の像再構成および直線状欠損近傍の像再構成を行い、提案手法がCFRP板材に対しても有効であることを示している。ここではCFRPに対して行った実験について紹介する。冒頭で述べられているように、多層繊維強化複合材は、向きによって音速が異なる異方性を示す。本研究が提案する点波源拘束偏微分方程式に基づく手法が直交異方性材料中の欠損検出に対しても有効であることを示すため、CFRP板材中の欠損の撮像実験を行った。本実験で用いたCFRP板材は互いに直交する繊維の配向をもつ2層から成り立っている。そのため、Fig.1(1)が示す中心から菱形上に波面が伝搬する。繊維はx, y軸と平行に配向されており、軸に沿う向きのA0モードラム波の波長は $\lambda(0)=\lambda(90)=25\text{mm}$ 、間の45度方向に伝搬する波の波長は、 $\lambda(45)=22\text{mm}$ である。CFRPの板に直径1mmの貫通孔を2つあけ、欠損の撮像実験を行った。Fig.1(2)は欠損の形状および位置を示す。同図(3)はA0モード平面波を照射後800 $\mu\text{s}$ における法線方向の変位と値ゼロの等高線を示す。白矢印は、視察により観察された、波面の進行方向を示している。同図(3), (4)は、それぞれ、従来の動的せん断歪み解析法によって再構成された欠損のシルエットと(22)式の左辺の値を用いて再構成されたシルエット像および、線分AB, CDに沿った値の分布を示す。この実験においても、(2)に示されるように、異なる向きに進行する平面波が計測領域を通過している。同図(3), (4)のCDに沿った断面像を比較すると、前節の等方性板材に対する実験結果と同様、従来の手法では、ある一定の輝度値がプロットされているが、本研究が提案する点波源拘束偏微分方程式にもとづく手法による断面像では、全体として輝度値が低下し、細かな凹凸が現れている。また、同図(3)(4)の再構成シルエット像とABの沿った断面像を比較すると、本研究が提案する手法のほうが、鋭いピークが確認できる。しかし、前節の等方性板材に対する実験結果とは異なり、円筒欠損の外周にそったシルエット像が得られていない。同図(1)で観測された、位相速度の異方性に起因する散乱波の指向性が原因と考えられる。

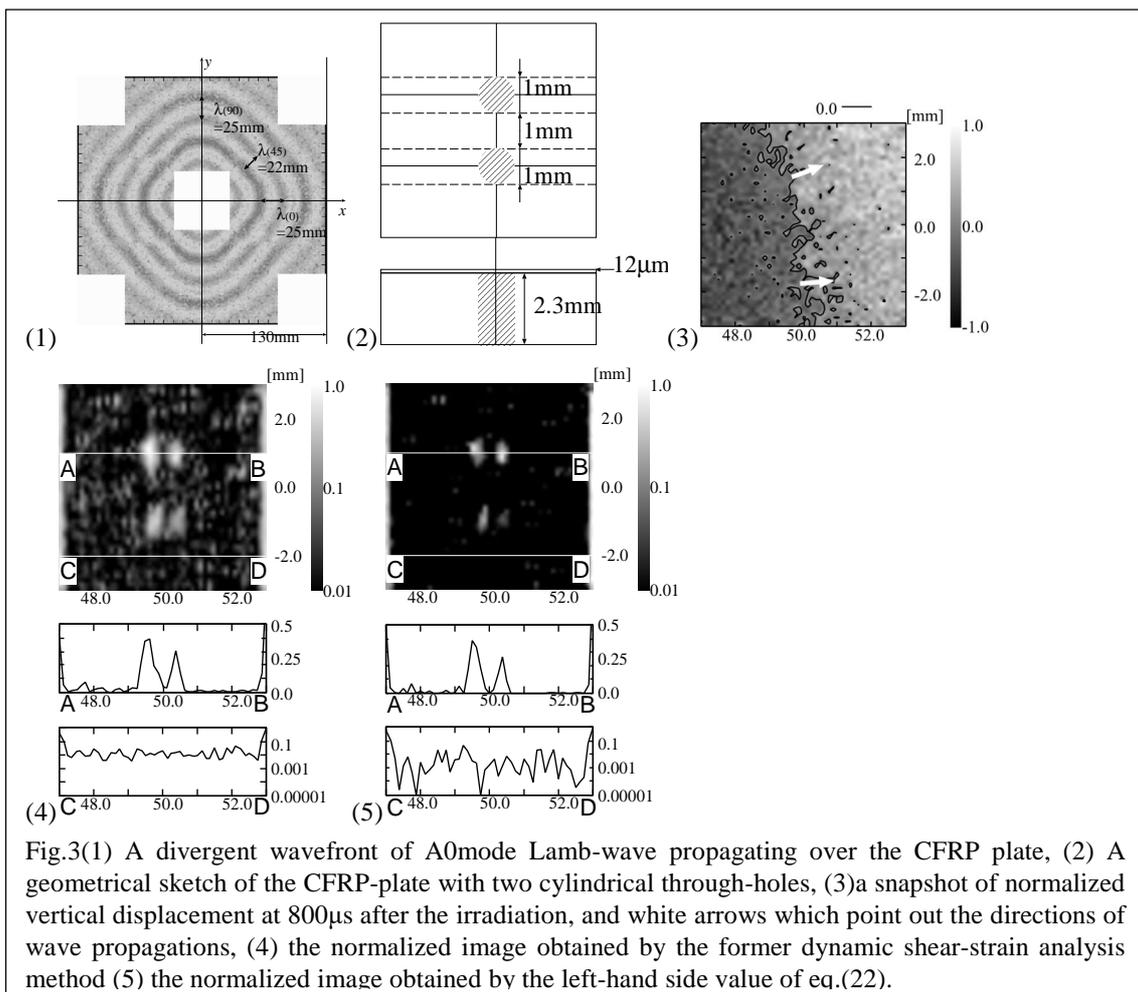


Fig.3(1) A divergent wavefront of A0mode Lamb-wave propagating over the CFRP plate, (2) A geometrical sketch of the CFRP-plate with two cylindrical through-holes, (3) a snapshot of normalized vertical displacement at 800 $\mu\text{s}$  after the irradiation, and white arrows which point out the directions of wave propagations, (4) the normalized image obtained by the former dynamic shear-strain analysis method (5) the normalized image obtained by the left-hand side value of eq.(22).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8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 Kenbu Teramoto, Haruka Ishibashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Inspection of subsurface defects in the composite materials by divergence-based analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of SICE2020	6. 最初と最後の頁 200,203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kenbu Teramoto, Haruka Ishibashi, Taku Mihara	4. 巻 -
2. 論文標題 Inspection of subsurface defects in CFRP-plate with using point-source constrained partial differential equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IUS46767.2020.9251817	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 石橋春香, 寺本 顕武	4. 巻 vol.5,6
2. 論文標題 位相速度ベクトル場のダイバージェンスに基づく等方性板材の非破壊検査	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 38,41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 石橋春香, 寺本 顕武	4. 巻 56
2. 論文標題 A0モードラム波動場の点波源拘束偏微分方程式にもとづく欠損のシルエット像再構成	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 217,226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kenbu Teramoto, Haruka Ishibashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Inspection of subsurface defects in the composite materials by divergence-based analysis over the phase velocity vector field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IUS2019	6. 最初と最後の頁 14,15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ULTSYM.2019.8925628	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 Kenbu Teramoto, Haruka Ishubashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Divergence based analysis for detecting subsurface defect in the plate like structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2019	6. 最初と最後の頁 1179,1182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 寺本 顕武, 石橋 春香	4. 巻 1
2. 論文標題 点波源拘束微分方程式に基づく直交異方性弾性体の非破壊検査	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第36回センシングフォーラム予稿集	6. 最初と最後の頁 41,47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 寺本 顕武, 石橋 春香	4. 巻 1
2. 論文標題 点波源拘束偏微分方程式にもとづく 板材の非破壊検査	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第27回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 81,86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 K.Teramoto, H. Ishibashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Dynamic Shear Strain Analysis for Reconstructing Silhouette of Subsurface Defects in the Orthotropic Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the 6th Japna-US NDT symposium	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K.Teramoto, H. Ishibashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Dynamic shear strain analysis for reconstructing divergence of the phase velocity vector field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of SICE 2018	6. 最初と最後の頁 1332-1337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 K.Teramoto
2. 発表標題 Inspection of subsurface defects in the composite materials by divergence-based analysis
3. 学会等名 SICE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Teramoto
2. 発表標題 Inspection of subsurface defects in CFRP-plate with using point-source constrained partial differential equation
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonic Symposium 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺本 顕武
2. 発表標題 Lp空間での波動伝搬とグリーン関数
3. 学会等名 第37回センシングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺本 顕武
2. 発表標題 Lp 空間によるラム波の伝搬近似
3. 学会等名 第 28 回 超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruka Ishibashi
2. 発表標題 Inspection of subsurface defects in the composite materials by divergence-based analysis over the phase velocity vector field
3. 学会等名 IEEE IUS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenbu Teramoto
2. 発表標題 Divergence based analysis for detecting subsurface defect in the plate like structure
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺本 顕武
2. 発表標題 点波源拘束微分方程式に基づく直交異方性弾性体の非破壊検査
3. 学会等名 第36回センシングフォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺本 顕武
2. 発表標題 点波源拘束偏微分方程式にもとづく 板材の非破壊検査
3. 学会等名 第27回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋春香
2. 発表標題 位相速度ベクトル場のダイバージェンスにもとづく非破壊検査
3. 学会等名 第35回センシングフォーラム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 寺本 顕武, 椿 広計	4. 発行年 2018年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 277
3. 書名 計測のための統計	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ようこそ センシングの世界へ  
<https://sites.google.com/terremotolab.net/terremotolab/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------