

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06112

研究課題名(和文) 動的せん断歪みの時空間解析による内部欠損の3次元形状評価に関する研究

研究課題名(英文) Non-destructive inspection of subsurface defects by the dynamic shear strain analysis

研究代表者

寺本 顕武 (Teramoto, Kenbu)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70207489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：現在、ガイド波を用いた非破壊検査手法が注目されている。しかしガイド波の多くは分散性の波である。そこでその影響を受けない「動的せん断ひずみ解析法」が提案された。特長は、(1)検査対象表面の法線方向と検査対象表面に沿う方向に関する、互いに直交する一対の動的面外せん断歪みからなる信号列の分散共分散行列の行列式を利用している。欠損のないところでは、上記の一対の動的面外せん断歪みが互いに線形従属の関係にあるが、欠損近傍では、入射波と散乱波が重畳し、線形性が破綻する。その結果、行列式の値の分布にもとづき、周波数や伝搬速度とは独立に再放射源の近接場領域の撮像を可能にしている。

研究成果の概要(英文)：The dynamic shear strain analysis is developed to detect the evanescent wave field which is scattered by a finite defect in a plate. Lamb wave propagation in the transversely isotropic materials is characterized by the prominent directivity of wave energy transfer along the fibers. Consequently, it is difficult to define the location of defects by using the arriving time of reflected signals. However, in the boundary region being perpendicular with the stress-free boundary conditions are assumed. As a result of scattering on a defect edge, transmitted wave front and reflected wave front are overlapped with each other. Therefore, the linearity between the orthogonal pair of out-of-surface shear strains is violated. Therefore, by using the dynamic shear strain analysis, the violation of linearity arising on the boundary of defects yields the positive value of determinant of a covariance matrix which is composed of the orthogonal pair of the shear strains.

研究分野：計測工学

キーワード：非破壊検査 超音波計測 波動情報処理 時空間勾配解析 動的せん断歪み解析 ガイド波

1. 研究開始当初の背景

現在、複合材料は構造材料として多岐にわたって利用されている。中でも炭素繊維を用いた CFRP 薄板は軽量化が必要な構造材に多く使用されつつある。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 内部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、安全維持のためにも欠かすことができない。このような検査の場合、従来より超音波探傷法が用いられてきた。しかし、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は、波長の短い超音波を使用しなければならない。そのため、一度に検出する範囲が限定され、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。これらの欠点の解消を目的として、本研究ではガイド波の一つである A0 モードラム波を用いた非破壊検査に注目されている。ガイド波は薄板内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いる。

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、その進行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、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、亀裂や剥離、腐食箇所からの散乱波を検出することが困難になるという問題点がある。そのため、ガイド波を用いた亀裂の撮像法が研究されつつある。板にそって進む波を非破壊検査に利用する研究は、1990年代より、Cawley や Rose によって始められた。その後、日本でも川嶋、林らによって研究が進められてきた。しかし、多くの研究は、波の伝搬遅延時間と音速を計測し、その結果より、亀裂や欠損の位置や大きさ、形状を推定するタイプの非破壊検査手法であった。また、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がある。非常に面白い現象を利用した手法であるが、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。そのため、広帯域で対象を励振しなければならないが、また発生した多数のモードから当該モードを抽出する困難を伴っている。さらに、多層繊維強化複合材では、その枚数、繊維の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、寺本らによって「動的せん断ひずみ解析法」が提案された。当手法は、互いに直交する向きの面外せん断歪みの間の線形従属性に着目した手法で散乱波と入射波の波面が重畳する領域を検出することができると考えら

れていた。そのため、当手法には、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ことが予想された。一方、板材表面の変位を観測する手法として、画像計測技術をもちいたレーザシェアログラフィ法が良く知られている。この手法は、全視野の検査が素早く行えるため、実際に航空機の部材の点検に使用されている。レーザシェアログラフィ法は、測定対象にストレスを加え欠陥近傍で発生する面外変位を検出するもので、レーザの干渉により波長程度の変位の分布を一括計測する手法である。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下のとおりである。

- (1) 板材表面の法線方向の変位の時間微分と空間微分の間の線形性に着目し、A0 モードラム波の局所的な位相速度を計測する手法を開発し、局所位相速度計測の仕組みを数理的に明らかにし、数値実験に基づき、提案手法による局所位相速度計測と剥離領域の検出の能力を評価する。
 - (2) レーザシェアログラフィ法で用いられる位相シフト光学系を用いて微分干渉照明を実現し、対象表面の局所的な面外せん断歪みの計測する光学系を設計する。
- 両者が完成すると、我々が提案する「動的せん断歪み解析法」を現場においてリアルタイムで適用することができるようになる。

3. 研究の方法

本研究は、次の項目に従って実施された。

- (1) 薄板を伝搬する A0 モードラム波による波動場をモデル化し、波動方程式にもとづく解析を実施し、中空円板状の層間剥離が薄板材料中に生じた場合の、A0 モードラム波の波動場の厳密解を導出する。
- (2) 厳密解にもとづき、互いに直交する動的な面外せん断歪みの共分散行列の行列式が、剥離近傍の近接散乱場を抽出することを理論的に明らかにし、相関剥離直上の局所位相速度場の計測手法を確立する。
- (3) 人工的に、薄板に層間剥離を作成し、ラム波を発生させ、その波動を観測し、上記の計算モデルを適用させ、剥離部の映像化の実験を行う。
- (4) 微分干渉照明を実現し、対象表面の局所的な面外せん断歪みの計測を試みる。

4. 研究成果

上記の(1)-(4)に従って、それぞれ成果を示す。

4.1. 厳密解の導出

ここでは薄板中の円筒形の微小欠損を想定し、欠損で散乱される波動場の導出してみ

よう. 図 1 に示されるように, 厚さ d の均質な板材の底面に半径 a 深さ d_1 の中空円筒を仮定する. また, 自由境界条件の下で存在する反対称ゼロ次モードラム波(A0 モードラム波)が左から入射する場合を考える. ここで, 入射波の波長を λ , すなわち波数を $k(=2\pi/\lambda)$ とすると, 観測点 $Q(\vec{OQ} = \mathbf{r})$ において入射平面波によって励起される A0 モードラム波による動的面外変位は, ベッセル関数 $J_n(\cdot)$ を用いて次式で与えられる.

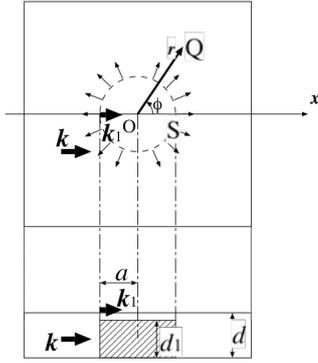


図 1 板材中の中空欠損のモデル, O: 空洞円柱中心, a : 空洞円柱半径, S: 空洞円柱境界, \mathbf{k} : 入射ラム波の波数ベクトル, \mathbf{k}_1 : 空洞円柱直上を伝搬するラム波の波数ベクトル, d : 基板厚さ, d_1 : 欠損深さ

$$f_i(\mathbf{r}, t) = \left(J_0(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n J_n(kr) \cos(n\phi) \right) \cdot \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

なお, $r = |\mathbf{r}|$ である. つぎに, 第一種 n 次ハンケル関数 $H_n^{(1)}(\cdot)$ を用いると $r > a$ の領域における散乱波動場は次式で表される. また, 空洞円柱直上, $r < a$ における波動場は内向きに伝搬する波面の重ね合わせで次のように与えられる.

$$f_s(\mathbf{r}, t) = \left(A_0 H_0^{(1)}(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(kr) \cos(n\phi) \right) \cdot \exp(-i\omega t) \quad (2)$$

$$f_t(\mathbf{r}, t) = \left(B_0 J_0(k_1 r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_n(k_1 r) \cos(n\phi) \right) \cdot \exp(-i\omega t) \quad (3)$$

ここで k_1 は空洞円柱直上を伝搬する A0 モードラム波の波数を示している. 図 1 に示される空洞円柱境界 S では変位について次に示す連続性が成り立っている.

$$f_i(\mathbf{r}, t) + f_s(\mathbf{r}, t) = f_t(\mathbf{r}, t) \quad (4)$$

さらに, 空洞円柱境界 S に対する法線方向 \mathbf{n} に関する勾配について次に示す連続性が成り立っている.

$$\nabla(f_i(\mathbf{r}, t) + f_s(\mathbf{r}, t))^T \mathbf{n} = \nabla f_t(\mathbf{r}, t)^T \mathbf{n} \quad (5)$$

その結果, (1), (2)式および(3)式のそれぞれ対応する次数の係数同士を比較することにより, 散乱波動場の各係数は次のように定ま

る.

$$A_n = -\frac{\frac{k_1}{k} - 1}{\frac{k_1}{k} + 1} i^n \frac{\frac{d}{da} J_n(ka)}{\frac{d}{da} H_n^{(1)}(ka)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

さらに, 空洞円柱直上を伝搬する波動場の係数は,

$$B_n = \frac{2}{\frac{k_1}{k} + 1} i^n \frac{\frac{d}{da} J_n(ka)}{\frac{d}{da} J_n(k_1 a)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

で与えられる. ここでは微小欠損すなわち十分小さい ($ka \ll 1$) 空洞円柱が仮定されているので, ハンケル関数およびベッセル関数に対してつぎの近似が成り立つことが知られている.

$$\frac{d}{da} J_0(ka) = -k J_1(ka) \cong -k \left(\frac{1}{2} ka \right),$$

$$\frac{d}{da} J_n(ka) = k J_{n-1}(ka) - \frac{n}{a} J_n(ka) \cong \frac{1}{a} \frac{1}{\Gamma(n)} \left(\frac{ka}{2} \right)^n,$$

$$\frac{d}{da} H_0^{(1)}(ka) = -k H_1^{(1)}(ka) \cong -ik \left(\frac{1}{2} ka \right)^{-1},$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{da} H_n^{(1)}(ka) &= -k H_{n+1}^{(1)}(ka) + \frac{n}{a} H_n^{(1)}(ka) \\ &\cong -\frac{i}{a\pi} \Gamma(n+1) \left(\frac{ka}{2} \right)^{-n} \end{aligned} \quad (8)$$

これらの近似を用いると空洞円柱まわりの散乱波動場と空洞円柱直上を伝搬する波動場は, それぞれ次の近似がなされる.

$$\begin{aligned} f_s(\mathbf{r}, t) &\cong \frac{k_1 - k}{k_1 + k} \left(-i\pi \left(\frac{ka}{2} \right)^2 H_0^{(1)}(kr) \right. \\ &\quad \left. - 2\pi \left(\frac{ka}{2} \right)^2 H_1^{(1)}(kr) \cos(\phi) \right) \\ &\quad \cdot \exp(-i\omega t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$f_t(\mathbf{r}, t) \cong \frac{2k_1}{k_1 + k} \left(\frac{k^2}{k_1^2} J_0(k_1 r) + 2i \frac{k}{k_1} J_1(k_1 r) \cos(\phi) \right) \cdot \exp(-i\omega t) \quad (10)$$

以上の議論にもとづき, 微小欠損まわりの散乱波動場と空洞円柱直上を伝搬する波動場の振幅の RMS 値をそれぞれ図 2(1)と(2)に示す. なお後述の音響実験条件を考慮し空洞円柱の周囲の長さを入射した A0 モードラム波の波長の比を $2\pi a/\lambda = 1/8$, 空洞円柱直上とそれ以外の領域での A0 モードラム波の波長の比を $k_1/k = 14$ としている. 図に示されるように空洞円柱の周長が波長と比較して十分小さくなると, 空洞円柱が双極子として作用し, 散乱波動場がレイリー散乱の態様を示す事が確認できる. つまり, 散乱波動場は, 欠損のごく近傍で大きな値を持つが, 離れるに従って, 急速にその振幅が減少することがしめされる. このことは, 超音波非破壊検査において, 波長より小さな欠陥の検出が困難であることを示している. なお, 縦軸横軸とも入射波の波長 λ で正規化されている. また空洞円柱直上の波動場は, $x = 0$ において振幅が最も小さくなっていることが示されている.

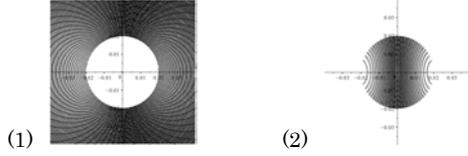


図 2 (1)板材中に作成した空洞円柱まわりの散乱波動場の振幅の RMS 値の分布 (2)空洞円柱直上の波動場の振幅の RMS 値の分布,
なお a : 空洞円柱半径, k : 入射ラム波の波数, k_1 : 空洞円柱直上を伝搬するラム波の波数としたとき, $ka=1/8$, $k_1/k=14$ が仮定されている。

4. 2. 位相速度ベクトル場の再構成

均質な板材表面の原点に波源を設定し, 自由境界条件の下で存在する反対称ゼロ次モードラム波 (A0 モードラム波) に着目する. 等方性媒質の板材に発生するラム波のモードのうち, A0 モードのみが横波より遅い位相速度を有する. A0 モードラム波は, 低周波領域では, 位相速度が周波数と板の厚さの積の平方根に比例して変化するため板が薄くなるにつれて波長が短くなり, 薄板中に発生した層間剥離領域を検出するのに有利となる。

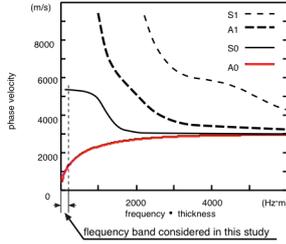


図 3 S45C 鋼板を伝搬するラム波の位相速度の分散曲線. 縦軸: 位相速度, 横軸: 板厚と周波数の積

今, x 軸となす角が θ 方向に伝搬する反対称ゼロ次モードラム波に着目する. 波源が ω_0 を中心とする狭帯域信号

$$w(t) = \int_{\omega_0 - \Delta\omega}^{\omega_0 + \Delta\omega} A(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (11)$$

で駆動されるものとし, 帯域内では位相速度が $c(\omega_0)$ ほぼ一定とみなすことができるものと仮定する. このとき, 点 (x, y) における板材表面の z 方向の変位は

$$u_z(x, y, t) = w\left(t - \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{c(\omega_0)}\right) \quad (12)$$

で表すことができる. つづいて, 粒子速度の z 方向の成分は, $u_z(x, y, t)$ を時間に関し微分することにより, 次式で与えられる.

$$v_z(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial t} u_z(x, y, t) = \dot{w}\left(t - \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{c(\omega)}\right) \quad (13)$$

ここで $\dot{w}(t)$ は $w(t)$ の時間微分を表し,

$$\dot{w}(t) = \int_{\omega_0 - \Delta\omega}^{\omega_0 + \Delta\omega} j\omega A(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (14)$$

で与えられる. z 方向の変位の x および y 方向の空間微分, すなわち, 面外せん断ひずみは, $v_z(x, y, t)$ を用いて次のように与えられる.

$$u_{zx}(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial x} u_z(x, y, t) = -\frac{\cos \theta}{c(\omega_0)} v_z(x, y, t) \quad (15)$$

$$u_{zy}(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial y} u_z(x, y, t) = -\frac{\sin \theta}{c(\omega_0)} v_z(x, y, t) \quad (16)$$

観測点近傍での法線方向の粒子速度と一對の互いに直交する面外せん断歪みの間の線形従属性を評価するため, 時間相関に基づく手法を採用した. 法線方向の粒子速度に関する自己相関関数は

$$\phi_{tt} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_z(x, y, t) v_z^*(x, y, t) dt \quad (17)$$

で与えられる. さらに (15) (16) 式で示される線形従属性より,

$$\begin{aligned} \phi_{xx} &= \frac{\cos^2 \theta}{v(\omega_0)^2} \phi_{tt}, & \phi_{yy} &= \frac{\sin^2 \theta}{v(\omega_0)^2} \phi_{tt}, \\ \phi_{xt} &= -\frac{\cos \theta}{v(\omega_0)} \phi_{tt}, & \phi_{yt} &= -\frac{\sin \theta}{v(\omega_0)} \phi_{tt} \end{aligned} \quad (18)$$

が得られ, 観測点 (x, y) における位相速度の絶対値, 波面の進行方向 θ はそれぞれ次のように導出される.

$$|v(\omega_0)| = \sqrt{\frac{\phi_{tt}}{\phi_{xx} + \phi_{yy}}}, \quad \theta = \arctan \frac{\phi_{yt}}{\phi_{xt}} \quad (19)$$

4. 3. 裏面欠損の撮像

動的せん断歪み解析に基づく撮像手法を概念実証モデルに適用し, CFRP に人工的に発生させた亀裂の近接場の像再構成を行った. 図 4(1)に概念実証モデル全景, (2)にブロックダイヤグラムと供試体を示す. 振動検出用プローブ (a) は, キヤノン社製の DS-80 であり, マイケルソン干渉計で変位を検出する. 応答周波数の上限は 500kHz, 高さ方向の変位の分解能の公称値は 0.08nm であり, レーザの波長は 650nm であり, ビームのフットプリントの直径は, 約 1.5mm である. 送波子 (b) には, ランジュバン振動子を用い, 中心周波数 29kHz のモノパルスを印加する. 供試体 (c) は, 一辺 300mm 厚さ 2.3mm の CFRP 板である. またレーザ光の反射率を高めるため, 観測領域全体は, 厚さ 12 μ m のアルミニウム箔に覆われている. その結果, 観測される法線方向の変位とは, 検査対象を伝搬する入射ラム波動場と裏面欠損による近接散乱場によって励振されたアルミニウム箔の変位のことである. 概念実証実験で用いた CFRP は, 炭素繊維の平織にエポキシのマトリックスをなじませた板材である. 広辞苑によれば平織とは, 経糸と緯糸を交互に上下に交叉させた織物である. そのため, 繊維

の向きにそった2方向には速度が速く、それらの中間では遅くなる特性を示す。板材の中心に、中心周波数 29kHz のサイクルの振動を加え、140 μ s 後の板材の法線方向の変位を図 5 に示す。

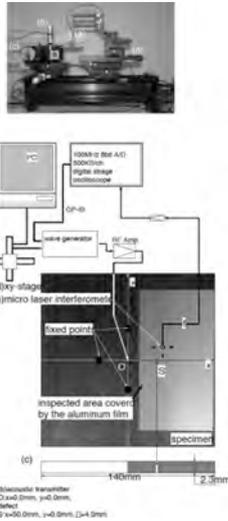


図 4 概念実証実験装置とブロックダイアグラム

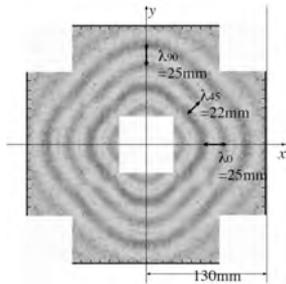


図 5 CFRP 薄板板材の中心に、中心周波数 29kHz のサイクルの振動を加え、140 μ s 後の板材の法線方向の変位

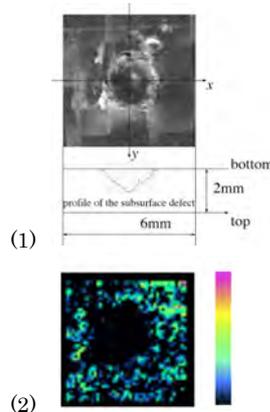


図 6 CFRP 薄板板材裏面に施した(1)欠損とそのプロフィール、(2)動的せん断歪み解析法によって再構成された欠損のシルエット。

さらにオリンパス社の LEXT OLS4000 3D Laser Measuring Microscope に計測した裏面欠損のプロファイルおよび写真を図 6(1)に示す。直

径 2mm 深さ 1.5mm の円錐形をしている。図 6(2)は、観測結果に対し、動的せん断歪み解析を施し、面外せん断歪みの分散共分散行列の行列式の値の分布を示したものである。正規化された画像から、裏面欠損との境界領域で発生した散乱場が検出されることが示されている。

4.4. 面外せん断歪み計測を実現する微分干渉照明光学系

本研究が提案する微分干渉照明は、位相シフト光学系を用いたマイケルソン干渉計をベースに構成されている。図 7 に微分干渉光を発生させる光学系を示す。

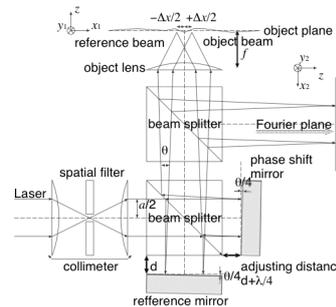


図 7 微分干渉照明光学系

図 7 の左下からレーザー光を入射し、コリメータを用いて、光軸にそって伝搬する平面波(平行光)に変換する。さらにビームスプリッターにより、2つの平面波(reference beam, object beam)に分離する。それぞれのビームに対して、 $\theta/4$ だけ傾けた枚の平面鏡(reference mirror, phase-shift mirror)で各ビームを反射させ、再度ビームスプリッターに入射し、互いに $\theta/2$ 傾いた2本の平面波を生成する。ここで、一方の平面鏡(phase shift mirror)を $1/4$ 波長ずらし、両ビームの位相を互いに反転させている。提案する光学系は、照射系と観測系において同一の対物レンズを用いる共焦点光学系を構成している。しかし、通常とは異なり観測部におけるピンホールフィルタを省いた構造となっている。その代わりに、提案するシステムは、回折場で観測された映像からフーリエ逆変換を用いて面外歪みの情報を再構成することを特徴としている。図 3 は、概念実証モデルの光学系の概略図である。光路に沿って、動作をつぎに述べる。まず(A)の半導体レーザーより、波長 514nm のコヒーレント光が照射される。(B)の spatial-filter (C)コリメータレンズを通して、平面波を発生させる。(D)の矩形開口により、断面が 3(mm)角のビームに整形する。(E)の偏光フィルタおよび(F)の $1/4$ 波長板を用いて円偏光ビームを発生させる。(H-1)の偏光ビームスプリッタにより、P 偏波、S 偏波のビームに分割する。(I-1)(J-1)(K-1)より、x 方向に微分干

渉させる照明光を発生させる。(I-2)(J-2)(K-2)より、y 方向に微分干渉させる照明光を発生させる。(K-3)のビームスプリッターにより、両微分干渉照明光を合成する。(K-4)のビームスプリッターにより、照明用とモニタ用に分割する(L)の対物レンズにより微分干渉照明光を(M)の対象物体表面に収束させる。対象表面での散乱光を再び(L)の対物レンズを通し、回折場を発生させる。(H-2)の偏光ビームスプリッタにより、P 偏波、S 偏波に分割し、ラインセンサを用いて、両回折場を観測する。

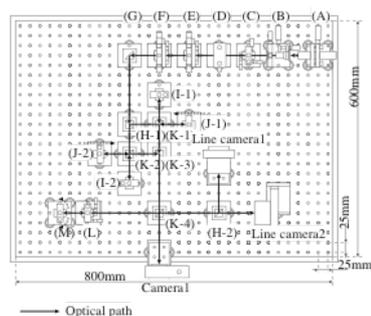


図 8 概念実証モデル

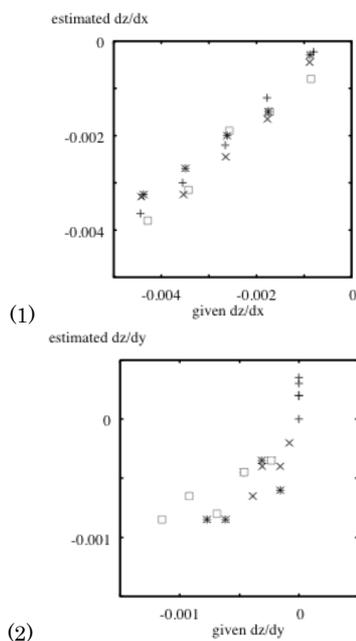


図 9 与えられた勾配と再構成された勾配
(1) $\partial z/\partial x$, (2) $\partial z/\partial y$, +:role 角 $\beta = 0.0(\text{rad})$,
x:role 角 $\beta = 0.0873(\text{rad})$, *:role 角
 $\beta = 0.175(\text{rad})$, □:role 角 $\beta = 0.262(\text{rad})$

また、勾配ベクトルと再構成された勾配ベクトルを role 角が 0, 5.0, 10.0 と 15.0 度の場合の変化について図 7 にプロットする。(1)が x 方向、(2)が y 方向の勾配のプロットである。プロット結果より、概ね正しく勾配が再構成されていることが示されているが、5/1000rad 程度のばらつきが発生してい

ることも同時に示されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 寺本 顕武, "動的せん断ひずみ解析法にもとづく微小欠損近傍の散乱場の観測", 超音波テクノ, vol.29, No.2, pp.1-4, 日本工業出版, (2017)
- ② 石橋, 寺本 顕武, "ガイド波の動的面外変位と勾配に基づく塗膜下欠損と塗膜剥離の検出", 超音波テクノ, vol.28, No.1, pp.1-4, 日本工業出版, (2016)

[学会発表] (計 12 件)

- ① K.Teramoto, Haruka Ishibashi, "Dynamic shear strain analysis for detection of defects in the transversely isotropic material," Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, pp.906-911, (2017)
- ② Haruka Ishibashi, K.Teramoto, "Dynamic shear strain analysis for silhouette reconstruction of defects in anisotropic laminated composites," Proceedings of 2017 International Ultrasonic Symposium, ID1179, (2017)
- ③ K.Teramoto, H.Nishiwaki, "Gradient reconstruction from diffraction images obtained by Differential coherent illumination," Proceedings of the SICE Annual Conference 2016, pp.1147-1151, (2016)
- ④ 寺本 顕武, "A0 モードラム波の局所位相速度計測による層間剥離の非破壊検査", 第 32 回計測自動制御学会計測部門大会センシングフォーラム予稿集, pp.41-46, (2015)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他] ホームページ等

<https://sites.google.com/site/terremoto-lab/home>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺本 顕武 (TERAMOTO, Kenbu)

佐賀大学・工学系研究科・教授

研究者番号: 70207489

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し