

レーザー超音波可視化試験を用いた疑似等方性積層CFRP板に対する動的な弾性定数の推定

群馬大学 大学院理工学府 学生会員 ○大芦健太
群馬大学 大学院理工学府 正会員 斎藤隆泰

1. はじめに

近年, 構造材料として炭素繊維強化プラスチック (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) の利用が進んでいる. CFRP は, 軽量で高い引張り強度を有する等, 力学的に優れた特性を示すものの, 任意の積層構造を持つため, 複雑な音響異方性の性質を示す. そのため, CFRP 中の欠陥を通常の超音波非破壊評価法で探傷した場合, 音響異方性の影響で, 探傷精度が大きく低下する可能性がある. CFRP の音響異方性の性質を明らかにするためには, 弾性定数を決定する必要がある. 従来の異方性材料に対する弾性定数推定手法は, 試験体の一部の切断や, 水浸探傷が必要となる等の方策が取られており, 比較的手間がかかる方法となっている. そのような中, 著者らのグループでは, レーザー超音波を用いて弾性定数を効率よく求める新たな方法を提案している¹⁾²⁾. そこで, 本研究では, その方法を用いて疑似等方性積層 CFRP 板に対して, 動的な弾性定数を推定することを試みる. 以下では, 推定した弾性定数を用いて, FDTD 法による数値シミュレーションを実行し, 解析結果をレーザー超音波可視化試験結果と比較することで, 本手法の妥当性について検討する.

2. レーザー超音波可視化試験

(1) CFRP 試験板とレーザー超音波可視化試験の概要

まず, レーザー超音波可視化試験について説明する. レーザー超音波可視化試験は, 図 1(a) のような LUVE(Laser Ultrasonic Visualization Equipment) と呼ばれる計測装置を用いて実施した. 受信探触子は試験板上部に垂直に設置し, その中心周波数は 200KHz と設定した. レーザー超音波可視化試験では, パルスレーザーを試験板の表面に照射し, 熱膨張を発生させることで, 超音波を伝搬させる. レーザー超音波可視化試験の様子は図 1(b) に示す通りである. また, 研究対象とする CFRP 試験板は, 図 2(a) のような東邦テナックス社製のものであり, 密度は $\rho = 1560\text{kg/m}^3$ である. 大きさは x_1 方向, x_2 方向の幅 300mm, x_3 方向の深さが 13.6mm である. この時弾性定数 $C_{\alpha\beta}(\alpha, \beta = 1, \dots, 6)$ は不明であるが, 炭素繊維は図 2(a) のように $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ の順で配向され, 疑似等方性の性質を持つことだけは既知であるとする.

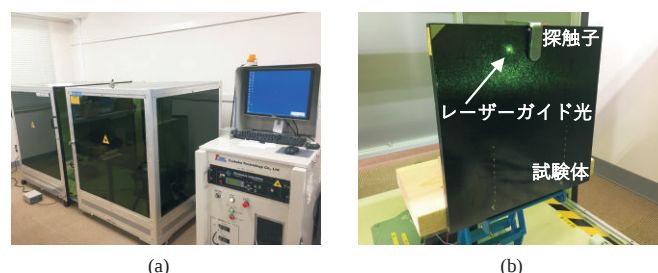


図 1 レーザー超音波可視化試験 (a) 計測装置 LUVE(Laser Ultrasonic Visualization Equipment) (b) 実際のレーザー超音波可視化試験の様子.

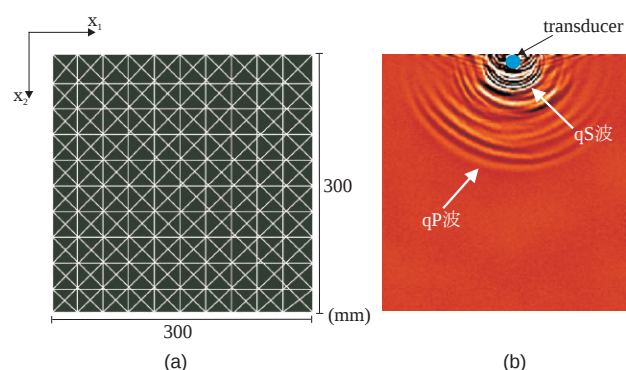


図 2 CFRP 中を伝搬する超音波の可視化 (a) 疑似等方性積層 CFRP 板 (b) レーザー超音波可視化試験結果.

(2) レーザー超音波可視化試験結果

図 2(b) にレーザー超音波可視化試験結果の一例を示す. 図 2(b) は図 2(a) における x_1 - x_2 面での CFRP 試験板を伝搬する超音波を可視化した結果を示している. CFRP 試験板を伝搬する超音波として, 等方に伝搬する疑似 P 波 (qP 波), および対応する疑似 S 波 (qS 波) を確認することができる. CFRP 試験板を伝搬する超音波は, x_1 - x_2 面については異方性の影響をさほど受けてはなく, 等方に伝搬していることがわかる. また, 図 2(b) より, 超音波の波長は, 炭素繊維径に比べて十分大きいので, 炭素繊維自体による散乱波は見受けられず, マクロレベルでは, その影響はさほど考えなくて良いことがわかる.

3. 画像解析による弾性定数の推定

(1) 弾性定数推定のための基礎式

レーザー超音波可視化試験では, CFRP 試験板表面を伝搬する超音波しか可視化できない. そのため, より詳細な超音波の伝搬現象を確認するためには, CFRP 試験板の弾性定数を推定し, 推定した弾性定数を用いた数値シミュレー

Key Words: 疑似等方性積層 CFRP 板, 弾性定数推定法, レーザー超音波可視化試験

〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 群馬大学 大学院理工学府 TEL. 0277-30-1610 FAX. 0277-30-1610

表-1 CFRP 試験板の密度と推定した弾性定数結果.

$\rho(\text{kg/m}^3)$	C_{11}	C_{22}	C_{66}	$C_{12}(\text{GPa})$
1560.0	54.9	54.9	4.83	44.8

ションにより超音波伝搬の全体像を把握する必要がある. そこで, 本研究では, 2 節で説明したレーザー超音波可視化試験結果を利用して, 弾性定数を推定することを試みる. CFRP 試験板中を伝搬する超音波の伝搬速度を, 次節で述べる画像解析により決定できれば, 例えば, 2 次元解析において必要な弾性定数 $C_{11}, C_{22}, C_{66}, C_{12}$ は, Christoffel 方程式を解くことで次のように求めることができる.

$$C_{11} = \rho V_{L-L}^2 \quad (1)$$

$$C_{22} = \rho V_{L-C}^2 \quad (2)$$

$$C_{66} = \rho V_{T \perp ZL-L}^2 = \rho V_{T \perp ZC-C}^2 \quad (3)$$

$$C_{12} = -C_{66} + \sqrt{(4\rho V_{L-L}^2 - C_{11} - C_{22} - 2C_{66})^2 - (C_{11} - C_{22})^2} / 2 \quad (4)$$

ここで, V_{L-L} は x_1 方向に伝搬する縦波位相速度, V_{L-C} は x_2 方向に伝搬する縦波位相速度, $V_{T \perp ZL-L}(= V_{T \perp ZC-C})$ は x_2 方向に振動し, x_1 方向に伝搬する横波位相速度 (x_1 方向に振動し, x_2 方向に伝搬する横波位相速度), V_{L-LC} は x_1 - x_2 面内を 45° 方向に伝搬する縦波位相速度を表す.

(2) 画像解析による弾性定数の推定

弾性定数 $C_{11}, C_{22}, C_{66}, C_{12}$ を推定するためには, 式 (1)-(4) の超音波の位相速度 $V_{L-L}, V_{L-C}, V_{T \perp ZL-L}, V_{L-LC}$ を求めればよい. 本研究ではレーザー超音波可視化試験結果を画像解析することにより, これら超音波の位相速度を推定し, その結果を (1)-(4) に代入することで弾性定数を決定する. レーザー超音波可視化試験による弾性定数の推定手順は次のとおりである. まず, レーザー超音波可視化試験結果のデータは, 映像で出力されるので, それらを各時間ステップ毎の画像データとして出力する. 次にそれらの画像について, エッジ処理を行い, 画像データから超音波の波面を抽出する. このとき, 時刻が異なる 2 つの画像データを用意し, それぞれの画像について 1 つの着目画素を設定する. そして, それぞれのケースについて, qP 波, qS 波がどのように伝搬したかを画像の差分結果から割り出す. その結果を用いて, 2 枚の画像の着目画素位置の差から各超音波の伝搬距離を計算し, データ測定点における時間差から超音波の位相速度を測定する. ただし, レーザー超音波可視化試験結果の波面は群速度であるため, x_1 - x_2 面内を 45° 方向に伝搬する V_{L-LC} を求める場合には, 垂直方向に伝搬する $V_{L-L}, V_{L-C}, V_{T \perp ZL-L}$ とは別途, 群速度から位相速度を求める必要があることに注意する. 以上より, 本研究で求めた弾性定数 $C_{11}, C_{22}, C_{66}, C_{12}$ の一例を表-1 に示す.

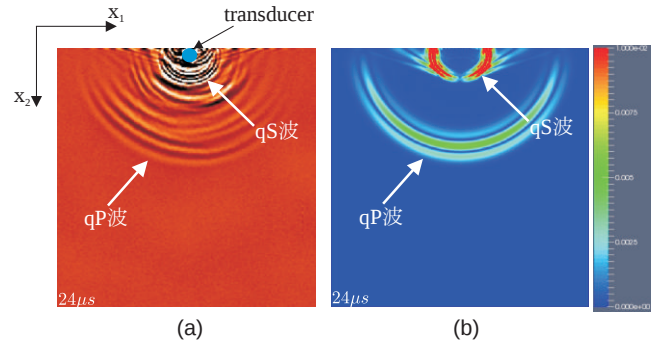


図 3 x_1 - x_2 面での超音波伝搬の様子 (a) レーザー超音波可視化試験結果 (b) FDTD 法によるシミュレーション結果.

4. FDTD 法による数値シミュレーションの実行

(1) 時間領域有限差分法 (FDTD 法)

3 節で求めた表-1 の弾性定数を用いて FDTD 法による数値シミュレーションを実行し, 解析結果をレーザー超音波可視化試験結果と比較することで, 本手法の妥当性を確認する. FDTD 法は, 各差分格子に対して, 変位や応力を互い違いに求めるスタッガード格子に対する格子点毎の計算を基本とする手法である. 詳細は文献³⁾等を参照されたい.

(2) 数値解析結果

解析結果の一例を図 3(b) に示す. 図 3(b) は, 2 節で示したレーザー超音波可視化試験結果 (図 3(a) に対応する) と同時刻における超音波伝搬解析結果を示している. なお, 解析結果は, x_1 方向と x_2 方向の粒子速度の絶対値を可視化している. 図 3(a) より, 試験板 x_1 - x_2 面上の上部中央に設置された受信探触子から超音波は入射され, 波動が等方に伝搬していることが見て取れる. 本研究で用いた CFRP 試験板は疑似等方性のため妥当な結果であると言える. 図 3(b) において, 波面伝搬の傾向は図 3(a) におけるレーザー超音波可視化試験結果とおおむね一致していることがわかる.

5. おわりに

疑似等方性積層 CFRP 板に対するレーザー超音波可視化試験を行った. レーザー超音波可視化試験結果を利用して, およその弾性定数を推定した. また, 弾性定数の推定結果から FDTD 法を用いた数値シミュレーションを行い, レーザー超音波可視化試験結果と比較することで本手法の妥当性を示した. 今後は, 本弾性定数推定法のさらなる高精度化を目指すことを行う. また, 数値シミュレーションを 3 次元に拡張し, ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) やその他の積層角を有した CFRP に対しての弾性定数の推定を行う予定である.

参考文献

- 1) T. Saitoh and A. Mori : Development of new elastic constant estimation method using the laser ultrasonic visualization testing, Civil, Architecture and Environmental Engineering, vol.1, pp. 669-674, DOI:10.1201/9781315116259-118, (2017)
- 2) 溝上尚弥・中畑和之・黄木景二・堤三佳・森亜也華・斎藤隆泰 : レーザースキャンによる音響異方性を有する CFRP 中の超音波の可視化と弾性スティフネスの推定, 土木学会論文集 A2(応用力学), 印刷中
- 3) 佐藤雅弘著 : FDTD 法による弾性振動・波動の解析入門, 森北出版株式会社, (2003)