

レーザー超音波可視化試験を援用した 一方向炭素繊維強化プラスチックの弾性定数の推定

○群馬大学大学院理工学府
群馬大学大学院理工学府

学生会員 森亜也華
正会員 斎藤隆泰

1. はじめに

近年, CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) と呼ばれる炭素繊維強化プラスチックが注目されており, 様々な分野への応用が進んでいる. CFRP は, 軽量かつ高強度を有する等, 力学的に優れた特性を示すが, 一方で強い音響異方性を示すことで知られる. 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, 音響異方性の影響により, 探傷精度が大きく低下する可能性がある. また, CFRP はプリプレグと呼ばれる薄い炭素繊維シートを積層することで成形されるが, その積層角は, 様々である. よって超音波非破壊評価法を実行しようとしても, CFRP の弾性定数を特定できなければ超音波がどのような経路を辿るか判断できず, 探傷が難しい. そこで, 本研究では, レーザー超音波可視化試験を援用した新たな弾性定数推定法を考案する. また, 推定した弾性定数を用いて動弾性有限積分法(EFIT:Elastodynamic Finite Integration Technique)を用いた超音波伝搬シミュレーションを実行することで, 本手法の有効性について検討する.

2. レーザー超音波可視化試験

(1) CFRP 試験片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 LUVI(Laser Ultrasonic Visualizing Inspector) と呼ばれる計測装置を用いて実施した. 探触子の中心周波数は 1MHz, 入射角は 45° となるよう設定した. レーザー超音波可視化試験では, パルスレーザーを CFRP 試験片の表面に照射し, 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 試験片は, 図 2(a) のような東レ製 T800S-2592 であり, 密度は $\rho = 1600\text{kg/m}^3$ である. 大きさは x_1 方向の幅 50mm, x_3 方向の深さが 20mm であり, 試験片中央の深さ 15mm の位置に直径 2mm の貫通空洞(欠陥)を設けている. この時, 弾性定数 $C_{IJ}(I, J = 1, \dots, 6)$ は不明であるが, 炭素繊維は図 2(a) の x_1 方向に一方向で配向され, 横等方性の性質を持つことだけは既知であるとする.

(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_3 面での CFRP 試験片を伝

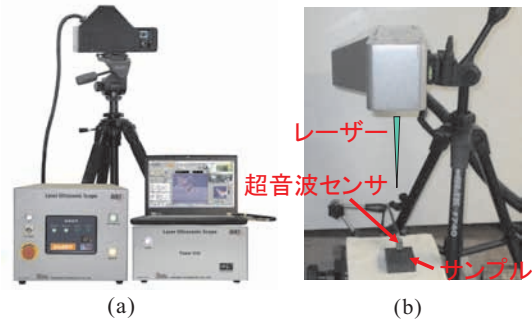


図 1 レーザー超音波可視化試験 (a) 計測装置 LUVI(Laser Ultrasonic Visualizing Inspector) (b) 実際のレーザー超音波可視化試験の様子.

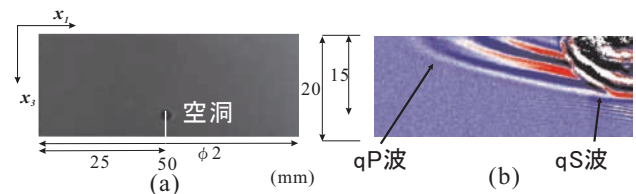


図 2 CFRP 中を伝搬する超音波の可視化 (a)CFRP 試験片 (b) レーザー超音波可視化試験結果.

搬する超音波を可視化した結果を示している. CFRP 試験片を伝搬する超音波として, x_1 方向に速く伝搬する擬似 P 波 (qP 波), および対応する擬似 S 波 (qS 波) を確認することができる. CFRP 試験片を伝搬する超音波は, 異方性の影響を強く受けることにより, x_1 方向 (繊維方向) に非常に速く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, その影響は異方性として扱えば良いことがわかる.

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 試験片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 試験片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 試験片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 $C_{11}, C_{33}, C_{55}, C_{13}$ は, Christoffel 方程式を解

表-1 CFRP 試験片の密度と推定した弾性定数結果.

$\rho(\text{kg/m}^3)$	C_{11}	C_{33}	C_{55}	$C_{13}(\text{GPa})$
1600.0	181.9	13.3	21.8	11.5

くことで次のように求めることができる.

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

$$C_{33} = \rho V_{L-Z}^2 \quad (2)$$

$$C_{55} = \rho V_{T \perp ZC-Z}^2 = \rho V_{T \perp LC-L}^2 \quad (3)$$

$$C_{13} = -C_{55}$$

$$+ \sqrt{(4\rho V_{L-ZL}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{55})^2 - (C_{11} - C_{33})^2} / 2 \quad (4)$$

ここで, V_{L-L} は x_1 方向に伝搬する縦波位相速度, V_{L-Z} は x_3 方向に伝搬する縦波位相速度, $V_{T \perp ZC-Z} (= V_{T \perp LC-L})$ は x_1 方向に振動し, x_3 方向に伝搬する横波位相速度 (x_3 方向に振動し, x_1 方向に伝搬する横波位相速度), V_{L-ZL} は x_1 - x_3 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 $C_{11}, C_{33}, C_{55}, C_{13}$ を推定するためには, 式 (1)-(4) の超音波の位相速度 $V_{L-L}, V_{L-Z}, V_{T \perp ZC-Z}, V_{L-ZL}$ 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, その結果を式 (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通りである. 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_3 面内を 45° 方向に伝搬する V_{L-ZL} を求める場合には, 垂直方向に伝搬する $V_{L-L}, V_{L-Z}, V_{T \perp ZC-Z}$ 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 $C_{11}, C_{33}, C_{55}, C_{13}$ の一例を表 1 に示す.

4. 超音波シミュレーションの実行

(1) 動弾性有限積分法 (EFIT: Elastodynamic Finite Integration Technique)

3 節で求めた表 1 の弾性定数を用いて動弾性有限積分法¹⁾による超音波伝搬解析を実行し, 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, 本手法の有効性を確

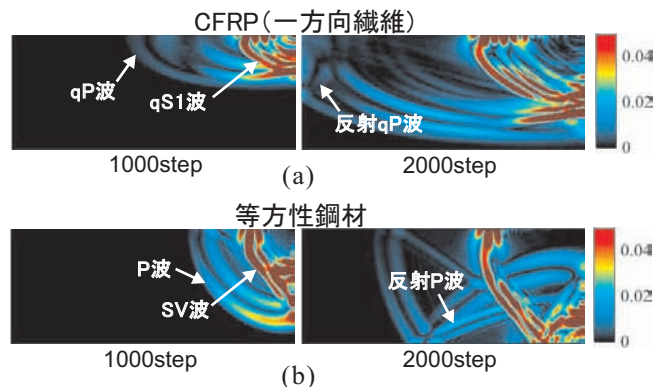


図 3 動弾性有限積分法を用いた CFRP および等方性鋼材中の超音波シミュレーション (a)CFRP の場合 (b) 等方性鋼材の場合.

認する. 動弾性有限積分法は, FDTD 法 (時間領域差分法) の一種であり, FDTD 法では, 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が, 動弾性有限積分法では, 解くべき差分方程式を各差分格子に渡って積分する手順を取る. 詳細は文献¹⁾等を参照されたい.

(2) 超音波シミュレーション結果

解析結果の一例を図 3(a),(b) に示す. 図 3(a) は, 異なる時刻における x_1 - x_3 面での CFRP の超音波伝搬解析結果を示している. なお, 比較のため, 等方性鋼材に対する結果も図 3(b) に示してある. ただし, いずれの結果も, 試験片中の空洞は考慮していないことに注意する. 図 3(a) より, 試験体上部右から超音波は入射され, 時間と共に超音波が伝搬していく様子を見て取れる. 超音波は, 一方向繊維の影響を強く受けて, 等方性鋼材の結果である図 3(b) に比べて x_1 方向に速く, 縦波である qP 波が伝搬することがわかる. この傾向は, 図 2(b) におけるレーザー超音波可視化試験結果と概ね一致している.

5. まとめと今後の課題

CFRP 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動弾性有限積分法を用いた超音波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, 弾性定数測定のための高精度化を目指すことを行う. また, 発表当日は, レーザー超音波可視化試験結果やシミュレーション結果の詳細も述べる予定である.

謝辞

本研究は平成 26 年度三菱財団自然科学研究助成の支援を得て行われました. また, レーザー超音波可視化試験は, つくばテクノロジー株式会社の協力により行われました.

参考文献

- 1) 中畑和之, 廣瀬壮一: 非均質異方性材料中の弾性波伝搬解析のためのイメージベース EFIT の開発と非破壊検査への応用, 応用力学論文集, Vol.12, pp.163-170, 2009.