

レーザー超音波可視化試験を用いたCFRP板の異方性弾性定数の推定

○群馬大学大学院理工学府 学生会員 森亜也華
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、強い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。そこで、本研究では、積層構造が異なる CFRP に対して、レーザー超音波可視化試験と異方性弾性波動論を駆使して弾性定数を推定する。そして、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) 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 試験片およびレーザー超音波可視化試験の概要

本研究では、図 1 に示すような CFRP 試験片 (東レ製 T700S) を実験・解析対象とする。大きさは x 方向の幅が 11cm, z 方向の深さが 2cm, y 方向の奥行きが 6cm で、密度は $\rho = 1568\text{kg/m}^3$ である。この時、弾性定数 $C_{IJ}(I, J = 1, \dots, 6)$ は不明であるが、CFRP 試験片は交互積層で、積層方向は z 方向であることは自明であるとする。この CFRP 試験片の A, B, C 面に対し、まず、レーザー超音波可視化試験¹⁾を実施した。レーザー超音波可視化試験では、A 面に対しては、中心周波数が 1MHz の垂直探触子を使用し、探触子を図 1 における B 面の左端から約 4.8cm の場所に設置した。B 面と C 面に対しては、中心周波数が 1MHz で入射角が 45° の斜角探触子を使用し、探触子を図 1 における A 面の、それぞれ手前の左端と奥の右端に設置した。

(2) レーザー超音波可視化試験結果

A, B, C 面の、各面におけるレーザー超音波可視化試験結果の一部を、図 2(a) にそれぞれ示す。図 2(a) それぞれの図より、A 面では、 x, y 方向に異なる速度で擬似 P 波 (qP 波)

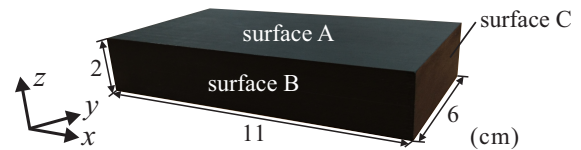


図 1 CFRP 試験片。

および擬似 S 波 (qS 波) が伝搬していることが確認できる。一方、B 面と C 面では、それぞれ x, y 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。このことから、A, B, C 面のいずれの面においても、CFRP 中を伝搬する超音波は同心円状に広がることなく、 x, y, z 方向の各方向に異なる速度で伝搬しており、異方性の影響を強く受けていることがわかる。

3. 異方性弾性波動論

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、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を可視化することができれば、CFRP 試験片全体の超音波伝搬挙動を把握でき、有意義である。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、弾性定数 $C_{IJ}(I, J = 1, \dots, 6)$ 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。

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

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

$$C_{33} = \rho V_{L-Z}^2 \quad (3)$$

$$C_{44} = \rho V_{T \perp ZL-Z}^2 = \rho V_{T \perp LC-C}^2 \quad (4)$$

$$C_{55} = \rho V_{T \perp ZC-Z}^2 = \rho V_{T \perp LC-L}^2 \quad (5)$$

$$C_{66} = \rho V_{T \perp ZL-L}^2 = \rho V_{T \perp ZC-C}^2 \quad (6)$$

$$C_{23} + C_{44} = \sqrt{(4\rho V_{L-ZC}^2 - C_{22} - C_{33} - 2C_{44})^2 - (C_{22} - C_{33})^2} / 2 \quad (7)$$

$$C_{13} + C_{55} = \sqrt{(4\rho V_{L-ZL}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{55})^2 - (C_{11} - C_{33})^2} / 2 \quad (8)$$

$$C_{12} + C_{66} = \sqrt{(4\rho V_{L-LC}^2 - C_{11} - C_{22} - 2C_{66})^2 - (C_{11} - C_{22})^2} / 2 \quad (9)$$

ここで、 $V_{L-L}, V_{L-C}, V_{L-Z}$ は、それぞれ x, y, z 方向に伝搬する縦波位相速度を表す。 $V_{T \perp ZL-Z}(= V_{T \perp LC-C})$ は y 方

向に振動し, z 方向に伝搬する横波位相速度 (z 方向に振動し, y 方向に伝搬する横波位相速度), $V_{T\perp ZC-Z}(=V_{T\perp LC-L})$ は x 方向に振動し, z 方向に伝搬する横波位相速度 (z 方向に振動し, x 方向に伝搬する横波位相速度), $V_{T\perp ZL-L}(=V_{T\perp ZC-C})$ は y 方向に振動し, x 方向に伝搬する横波位相速度 (x 方向に振動し, y 方向に伝搬する横波位相速度) を表す. そして, V_{L-ZC} , V_{L-ZL} , V_{L-LC} は, それぞれ y - z , x - z , x - y 面内を 45° 方向に伝搬する縦波位相速度を表している.

4. 画像解析による弾性定数の推定

弾性定数 C_{IJ} ($I, J = 1, \dots, 6$) を推定するためには, 密度 ρ は既知であることから, 式 (1)-(9) の超音波の位相速度 V を各々, 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し, 異方性弾性波動論を用いて, これら超音波の位相速度を推定し, その結果を式 (1)-(9) 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, エッジ処理を行うことで, 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. 以上より, 画像解析で推定した CFRP の弾性定数は, $C_{11} = 78.42$, $C_{22} = 69.07$, $C_{33} = 15.25$, $C_{12} = 8.331$, $C_{13} = 12.00$, $C_{23} = 12.07$, $C_{44} = 7.197$, $C_{55} = 9.657$, $C_{66} = 5.472$ GPa である.

5. EFIT を用いた数値シミュレーションの実行

(1) 動弾性有限積分法 (EFIT)

前節で推定した弾性定数を用いて, EFIT 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. EFIT は時間領域差分法 (FDTD 法) の一種として知られている. 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して計算を実施するが, EFIT 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出発点とする. 詳細については文献²⁾等を参照されたい.

(2) 数値解析結果

A, B, C 面の, 各面における解析結果の一部を図 2(b) にそれぞれ示す. 図 2(b) は, 図 2(a) におけるレーザー超音波可視化試験結果と同時刻における超音波伝搬解析結果を示している. EFIT による解析で用いたパラメーターは, セル長 $\Delta d = 8.3 \times 10^{-5}$ (m) とし, 時間増分は, A 面におい

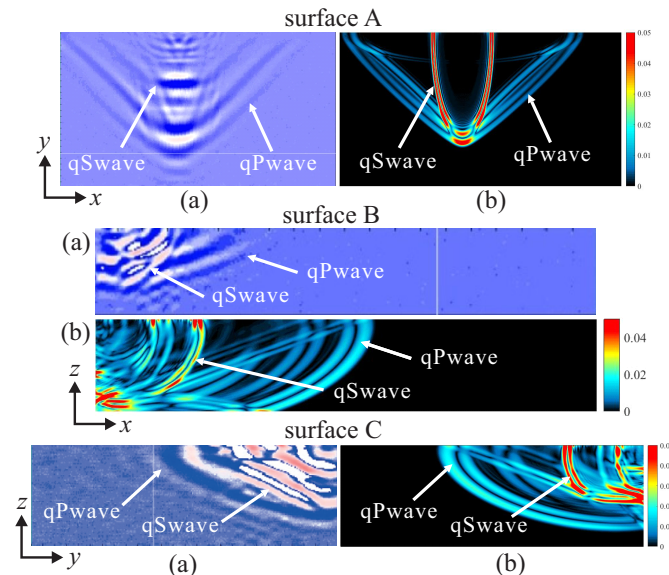


図 2 A, B, C 面での超音波伝搬の様子 (a) レーザー超音波可視化試験結果 (b) EFIT シミュレーション結果.

ては $\Delta t = 8.0 \times 10^{-10}$ (s), B 面と C 面においては $\Delta t = 1.6 \times 10^{-9}$ (s) とした. なお, 解析結果は, 粒子速度の絶対を示していることに注意する. 図 2(b) より, A 面では, qP 波および qS 波が x, y 方向に異なる速度で伝搬しており, B 面と C 面では, qP 波がそれぞれ x, y 方向に速く伝搬していることが確認できる. この傾向は, 図 2(a) 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ことがわかる. また, 図 2(a) のように, レーザー超音波可視化試験結果では, 現状の使用機器の性能上, 空間解像度が粗く, 波面が上手く可視化できていない箇所がある. しかしながら, レーザー超音波可視化試験結果より弾性定数を推定し, 推定した弾性定数を用いて, EFIT による数値シミュレーションを実行すれば, 図 2(b) のように, CFRP 試験片全体の波面を明瞭に可視化でき, 超音波伝搬挙動を把握することができる.

6. おわりに

レーザー超音波可視化試験結果, および異方性弾性波動論を駆使した新しい弾性定数推定手法を開発した. 実際に, 本手法を用いて, CFRP のおよその弾性定数を推定し, 推定した弾性定数を用いた EFIT シミュレーションを実施することにより, 本手法の有効性を示した. なお, 発表当日は, 異なる積層構造を持つ CFRP に対しての結果等についても示す予定である. 今後は, 本手法のさらなる高精度化を目指す.

謝辞

本研究のレーザー超音波可視化試験結果においては, 株式会社 IHI エアロスペースにご協力頂きました. この場をお借りして, 感謝申し上げます.

参考文献

- 1) <http://www.tsukubatech.co.jp>
- 2) 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.