

群速度曲線を援用した一方向炭素繊維強化プラスチック中の欠陥に対する開口合成法

○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, 種々の構造物内部の欠陥の有無を調べる方法として, 超音波非破壊評価法が重要視されている. 超音波非破壊評価法の最終目的は, 欠陥の位置, 大きさ, 分布等を推定することにある. 欠陥推定法として, 開口合成法や逆散乱解析法が知られている. 特に, 開口合成法は, アルゴリズムも比較的単純であることから, 広く利用されているが, 一方向炭素繊維境界プラスチックのような音響異方性を示す材料中の欠陥に対する開口合成法はさほど行われていない. 実際, 音響異方性を示す材料中の欠陥に, 通常開口合成法のアルゴリズムを単に適用しただけでは, その推定に大きな誤差を含むこととなる. そこで, 本研究では, 異方性弾性波動論を開口合成法のアルゴリズムに適用した開口合成法の開発を行う. 以下では, まず, 開口合成法を実行するために必要な異方性弾性体中を伝搬する超音波の計測模擬波形をFDTD法により作成する. そして, ターゲットとする異方性弾性体の群速度曲線を作成し, 開口合成法アルゴリズムに適用する方法について述べる. 最後に数値解析結果を示し, 本手法の有用性について検討する.

2. FDTD法を用いた異方性弾性波動解析

以下では, 異方性材料として, 一方向炭素繊維強化プラスチックを扱う. 簡単のため, 面外方向を x_2 軸に取り説明する. 位置 \mathbf{x} , 時刻 t における面外波動場 $u_2(\mathbf{x}, t)$ に対する運動方程式, 構成方程式はそれぞれ次のように表される.

$$\rho u_2 = \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{44} & C_{46} \\ C_{64} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし, σ_{ij} は応力, ρ は密度, $C_{\alpha\beta}$ はフオークト表記された弾性定数, $(\dot{\quad})$ は時間微分を表す. ただし, 異方性弾性体では, C_{46}, C_{64} は等方弾性体の場合と異なりゼロとならないことに注意する. FDTD法では式(1)の運動方程式, および式(2)の構成方程式に対して, 速度と応力を差分格子上で互い違いに計算することで, 各時間ステップにおける差分格子上の未知量を求めていく. 面内波動場についても, 対応する運動方程式, 構成方程式を同様の手順で離散化することにより求まる. これらの詳細については, 文献¹⁾等を参照されたい.

3. 異方性弾性波動論と群速度曲線

(1) 異方性弾性波動論

異方性弾性体中を伝搬する超音波は, 強い音響異方性を示し, 位相速度や群速度は伝搬方向に依存する. そのため, 異方性材料を検査する前に, その異方性材料中を伝搬する超音波の方向依存性を明らかにしておくことが望ましい. 運動方程式に平面波を代入し, 物体力 b_i を無視すれば, 次のChristoffel方程式を得る.

$$(\Gamma_{ik}(\mathbf{n}) - \rho c^2 \delta_{ik}) d_k = 0 \quad (3)$$

ここで, δ_{ik} はクロネッカーデルタ, d_k は偏向方向ベクトル成分, \mathbf{n} は波動の伝搬方向ベクトル, Γ_{ik} はChristoffelテンソルである. 異方性弾性波動論では, 式(3)は固有値問題に帰着され, その固有値問題を解くと, m 番目の固有ベクトル d_k^m に対応した3つの固有値 $\lambda^m (= \rho(c^m)^2)$ ($m = 1, 2, 3$) が得られる. 各固有値 λ^m に対する位相速度 c^m は, $c^m = \sqrt{\lambda^m / \rho}$ で求まる. Christoffel方程式 $\Gamma_{ik}(\mathbf{n})$ は, 波動の伝搬方向ベクトル \mathbf{n} の関数であるため, 適当な \mathbf{n} を定めて式(3)を解けば, 波動の伝搬方向を \mathbf{n} とした場合の偏向方向 d_k^m , 位相速度 c^m を求めることができる.

(2) 群速度曲線

一般に, 異方性材料中では, 位相速度と群速度は一致せず, 位相速度が異なる波動が複雑に干渉し, 群速度で伝搬する波面が形成される. よって, 数値解析結果の妥当性を確認する上では, 材料中を伝搬する波動の波面を追跡できると便利である. 異方性材料の場合, 次式を用いて群速度曲線を描くことができる.

$$g_j^m = \frac{1}{\rho c^m} C_{ijkl} d_i^m d_l^m n_k \quad (4)$$

式(4)において, 式(3)で定めた伝搬方向ベクトル \mathbf{n} , 偏向方向ベクトル d^m を与えれば, 対応する群速度 g_j^m を求めることができる.

4. 一方向炭素繊維強化プラスチック中の欠陥に対する開口合成法

通常開口合成法のアルゴリズムは, 超音波が等方・等速度に伝搬することを仮定している. そのため, 異方性弾性体中の欠陥推定に利用する場合, 精度の低下は免れない. そこで, 本研究では, 式(4)を援用した開口合成法を行うことで,

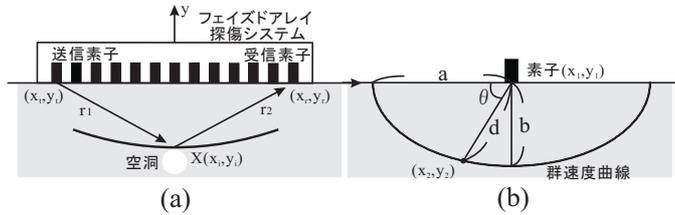


図1 フェイズドアレイ探傷を用いた場合の開口合成法 (a) 開口合成法アルゴリズム (b) 異方性を考慮した場合の開口合成法.

一方向炭素繊維強化プラスチック中の欠陥を推定する.

(1) 通常の開口合成法の原理

まず、通常の開口合成法の原理について簡単に説明しておく. 図1(a)のように (x_t, y_t) を超音波送信点, (x_r, y_r) を受信点とすると, 超音波は r_1, r_2 を伝播経路とする. このとき, 伝播距離 r_1, r_2 は欠陥上の点 $X(x_i, y_i)$ を用いてそれぞれ次のように表せる.

$$r_1 = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} \quad (5)$$

$$r_2 = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2} \quad (6)$$

時刻 t において波速 C_T の明瞭な散乱波が計測されたとすると, 超音波伝播距離 $r_1 + r_2$ に関して,

$$C_T t = r_1 + r_2 \quad (7)$$

が成り立つから, この式を満たす散乱源 $X(x_i, y_i)$ は送信点 (x_t, y_t) , 受信点 (x_r, y_r) を焦点とする楕円上のどこかに存在する. しかしながら, 単一の波形からはその位置を特定することはできないため, 複数の波形データを用いて, 欠陥の存在し得る楕円形を重ね合わせ, その位置を特定する. これらの操作は波形データの振幅値と同等であるため, 得られた振幅値が相対的に大きな点を欠陥位置とする.

(2) 群速度曲線の援用

一方向炭素繊維強化プラスチックのような異方性材料を対象とした場合, 一般に式(7)は成り立たない. なぜなら, 式(7)中の C_T は伝搬方向 \mathbf{n} の関数となるためである. そこで, 対象とする一方向炭素繊維強化プラスチック中の群速度曲線を援用し, 式(7)中の C_T を補正しながら開口合成法を実行する. ある素子に対する C_T の補正方法の概要を図1(b)に示す. 送信点 (x_1, y_1) から角度 θ 方向の点 (x_2, y_2) へ伝播する波速を C_2 とすれば, C_2 は前節で示した群速度曲線を描くことで求まる. 参考までに一方向炭素繊維強化プラスチックに対する qS2 波の群速度曲線の概略を図1(b)に示す. 群速度曲線より, 超音波送信角である θ 方向に対して, C_2 は異なる値を示すため, 開口合成の実行の際に, C_2 を随時補正することで, 欠陥像を再構成することができる.

5. 数値解析例

数値解析例を示す. 図2(a),(b)のような $20\text{mm} \times 50\text{mm}$ の一方向炭素繊維強化プラスチック中の円筒空洞を再構成す

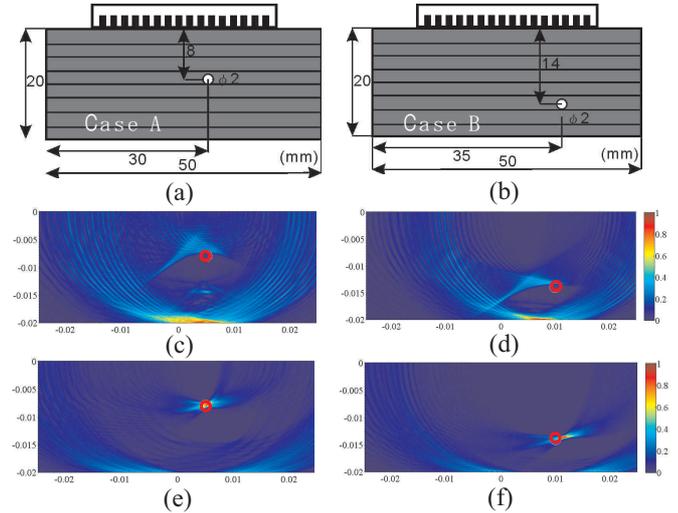


図2 開口合成結果:(a),(b)異なる欠陥位置に対する解析モデル,(c)-(d)通常の開口合成結果 (e)-(f)群速度曲線を援用した場合の開口合成結果.

る. 円筒空洞はそれぞれ図2(a),(b)にてそれぞれ異なる位置に存在する(それぞれ case A, case B とする). 想定する探傷条件は, 素子数 16, 素子幅 0.5mm, 素子間隔 2mm とし, アレイの水平方向中央は試験体中央と一致するとした. なお, 入射波形は中心周波数 2MHz のリッカー波で与えた. 2節で述べた FDTD 法を用いて各素子における受信模擬波形を求め, その結果に対して, 開口合成法を行った. case A, case B それぞれに対する結果を図2(c),(e)(左列) および (d),(f)(右列) に示す. ただし, 図2(c),(d)(中央行) は通常の開口合成法による結果を, 図2(e),(f)(下行) は, 異方性を考慮し, 群速度曲線を援用した場合の結果をそれぞれ示している. なお, 図2(c)-(f) いずれにおいても, 実際の円筒空洞位置を赤丸印で示してある. 図2(c),(d) より, 通常の開口合成法を行った場合は, いずれも欠陥位置を正しく特定できていないことがわかる. 一方, 図2(e),(f) より, 群速度曲線を援用した場合は欠陥位置を正しく特定できていることがわかる. これより, 群速度曲線を援用した場合の開口合成法の有効性を示すことができた.

6. おわりに

一方向炭素繊維強化プラスチック中の円筒空洞に対して, 群速度曲線を援用して開口合成法を行う方法について示した. 解析の対象として, 純面外波動である qS2 波のみを扱った場合を示し, 精度良く開口合成法を行うことができた. 今後は, 純面内波動である qP 波, qS1 波を扱った場合や一般の 3次元異方性弾性体を扱う場合について検討する予定である. また, 開口合成法の高速化も今後の課題である.

参考文献

- 1) 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.
- 2) 木本和志・松江剛士・廣瀬壮一: 数値シミュレーションを用いた開口合成法の欠陥形状再構成能に関する研究, 応用力学論文集, Vol.7, pp.91-96, 2004.