

時間反転波を用いたL字型CFRP中の欠陥検出方法の検討

○群馬大学大学院理工学府 学生会員 前原 佑
群馬大学大学院理工学府 正会員 齋藤隆泰

1. はじめに

近年、炭素繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) の、航空宇宙、土木・建設分野等への応用が進められている。今後、単なる薄板としての構造に留まらず、L字型等の様々な形状に加工した上での利用が検討されている。CFRPは、軽量で高強度、耐腐食性の性質を示す一方で、その積層構造が原因で、音響異方性を示し、力学特性が複雑であることが知られている。例えばL字型CFRPでは、成形・加工時の外部圧力状態や、接着不良が原因で、L字型の屈曲部分において層間剥離が生じる可能性が指摘されている。しかしながら、屈曲部分に存在する層間剥離に、従来の超音波探傷試験を適用する場合、CFRPの強い音響異方性が原因で、欠陥からの散乱波の挙動は極めて複雑となり、検査精度の低下を招く危険性がある。このような中、著者らは、2次元問題を対象に、L字型CFRP中の欠陥検出方法について時間反転波を用いた検討を行ってきた。¹⁾ 本研究では、その成果の一部を3次元問題へと拡張する。以下では、解くべき問題等について簡単に説明し、数値解析例を示すことで、本手法の有効性について検討する。

2. 解くべき問題

図1のようなL字型形状のCFRPを考える。本解析で対象とする元々のCFRPは、繊維方向が一方向に配向された一方向CFRPとし、それをL字形に屈曲させたものである。図1(b)のL字型CFRP中の灰色曲線は、繊維の配向方向を示す。欠陥は、図1(a)中の赤枠で示し、厚さ1.92mm、奥行10.2mmの空洞に見立てている。L字型CFRPに設置したフェーズドアレイ探触子(素子数:16点)より、超音波の送受信を想定し、欠陥検出を行う。なお、アレイ素子からの超音波は簡単のため、点波源でモデル化している。

3. 時間反転法

時間反転法²⁾は、弾性波伝搬の時間に対する可逆性を利用したものである。欠陥の位置ベクトルを \mathbf{r}_0 、散乱波の受信点の位置ベクトルを \mathbf{r} とする。時刻 t_0 、位置 \mathbf{r}_0 で発生した欠陥からの散乱波が、時刻 t 、受信点 \mathbf{r} で計測されるとき、その応答はグリーン関数 $G(\mathbf{r}_0, t_0 | \mathbf{r}, t)$ を用いて表すことができる。ここで、時間に対する可逆性より、グリーン関数は、

$$G(\mathbf{r}_0, t_0 | \mathbf{r}, t) = G(\mathbf{r}_0, t | \mathbf{r}, t_0) \quad (1)$$

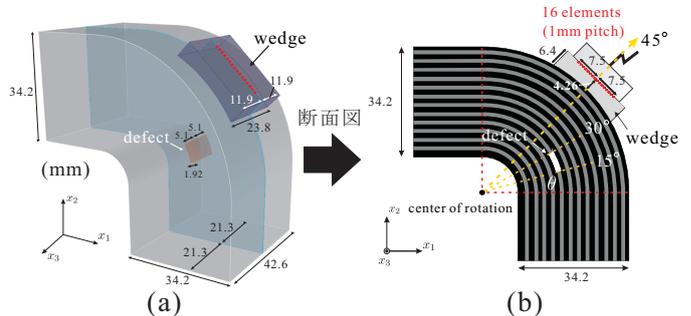


図1 L字型CFRP解析モデル (a) 透視図 (b) 断面図。

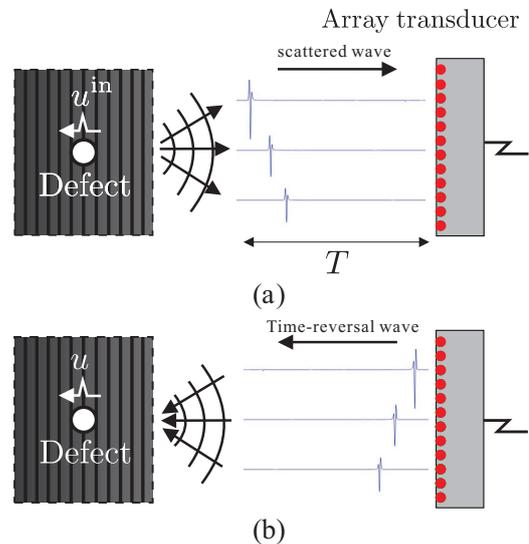


図2 時間反転法の概念図 (a) 欠陥からの散乱波をアレイ素子で受信 (b) アレイ素子から時間反転波を再送信。

と表すことができる。アレイ素子の総数を M とすると、欠陥を散乱源(ソース点)と考えた時の i 番目の散乱波の受信点($i = 1, \dots, M$)で観測される波動は次のように表される。

$$h_i^D(\mathbf{r}_0, t) = \int_{S_i} G(\mathbf{r}_0, t_0 | \mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (2)$$

ここで、 S_i は散乱波受信領域である。式(2)で示した波動を、図2(b)のように計測時間 T で時間反転させ、対象材料に再送信する。散乱源における波動は次のような畳み込みで表される。

$$h_i^D(\mathbf{r}_0, t, T) = h_i(\mathbf{r}_0, t) * h_i(\mathbf{r}_0, T - t) \quad (3)$$

アレイ素子は M 個あるから、それぞれの寄与を重ね合わせると、

$$P(\mathbf{r}_0, t, T) = \sum_{i=1}^M h_i^D(\mathbf{r}_0, t, T) \quad (4)$$

となる。時間反転波をそれぞれの受信点から送信すれば、

時刻 T 後には \mathbf{r}_0 の位置で P が最大値をとる. すなわち, 時間反転法は, 時間反転波の収束位置から欠陥位置を特定する方法である. ここでは, 有限要素法を用いて, 欠陥からの散乱波 $h_i(\mathbf{r}_0, t)$ を取得し, 時間反転させることで式 (4) の P を解析的に求める.

4. 有限要素法を用いた異方性弾性波動解析

三次元異方性弾性波動問題を考える. 弾性波変位 $u_i(\mathbf{x}, t)$ は位置 \mathbf{x} , 時刻 t において, 物体力を無視すると, それぞれ次の運動方程式と構成式を満足する.

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{x}, t) = \rho \ddot{u}_i(\mathbf{x}, t) \quad (\text{運動方程式}) \quad (5)$$

$$\sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) = C_{ijkl} u_{l,k}(\mathbf{x}, t) \quad (\text{構成式}) \quad (6)$$

ここで, $\sigma_{ij}(\mathbf{x}, t)$ は応力, ρ は異方性材料の密度, $[\cdot]_{,i}$ は空間微分を, $[\cdot]_{,t}$ は時間に関する微分を表す. また, C_{ijkl} は弾性定数を表す. ただし, 弾性定数 C_{ijkl} は, 実際にはフォークト標記された弾性定数 $c_{\alpha\beta}$ を用いると便利である. 変位 $u_i(\mathbf{x}, t)$ を求める数値解析手法には Galerkin 法を用いたボクセル有限要素法 (FEM) を用いる. 陽解法で解くために, 式 (5) の運動方程式に式 (6) の構成式を代入し, 空間・時間方向の離散化をすると, 次の式を得る.

$$\begin{aligned} \{u_i\}_{n+1} = & - [(\Delta t^2[M]^{-1}[K] + 2[E]) \{u_i\}_n \\ & - \{u_i\}_{n-1} + (\Delta t)^2[M]^{-1}\{T_i\}] \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, $[K]$ は全体剛性マトリクス, $\{u_i\}$ は節点変位ベクトル, $[M]$ は全体質量マトリクス, $\{T_i\}$ は表面力ベクトル, Δt は時間増分, $[E]$ は単位行列である. 式 (7) に初期条件を代入し, 逐次的に解くことで第 n ステップにおける変位 $\{u_i\}_n$ を得ることができる.

5. L字屈曲部のモデル化

CFRP の音響異方性は, CFRP 中の繊維の配向に依存する. そのため CFRP の屈曲部分のモデル化には繊維方向に応じた弾性定数を求める必要がある. ここで, 屈曲部分の繊維方向は図 1(b) 中の灰色曲線で示すように, 連続的に変化すると考えれば, 弾性定数の変化も連続であると考えられる. そこで, 弾性定数を図 1(b) における鉛直領域からの角度 θ の関数で導出し, 屈曲角に対応した各有限要素に振り分けることで, 屈曲部分の音響異方性を適切に評価する. これらの詳細については, 文献¹⁾等を参照されたい.

6. 数値解析例

以下, 数値解析例を示す. まず, 計測実験の代わりに, 数値解析を用いて欠陥からの散乱波を求める (順解析). L字型 CFRP を有限要素数 1723425 個のボクセル要素で離散化し, 時間増分 Δt は $\Delta t=0.1(\text{ns})$ とした. ここで, CFRP の密度は $\rho=1600(\text{kg/m}^3)$, 鉛直領域の弾性定数を $c_{11}=16.34$, $c_{12}=3.72$, $c_{13}=4.96$, $c_{22}=155.43$, $c_{23}=3.72$,

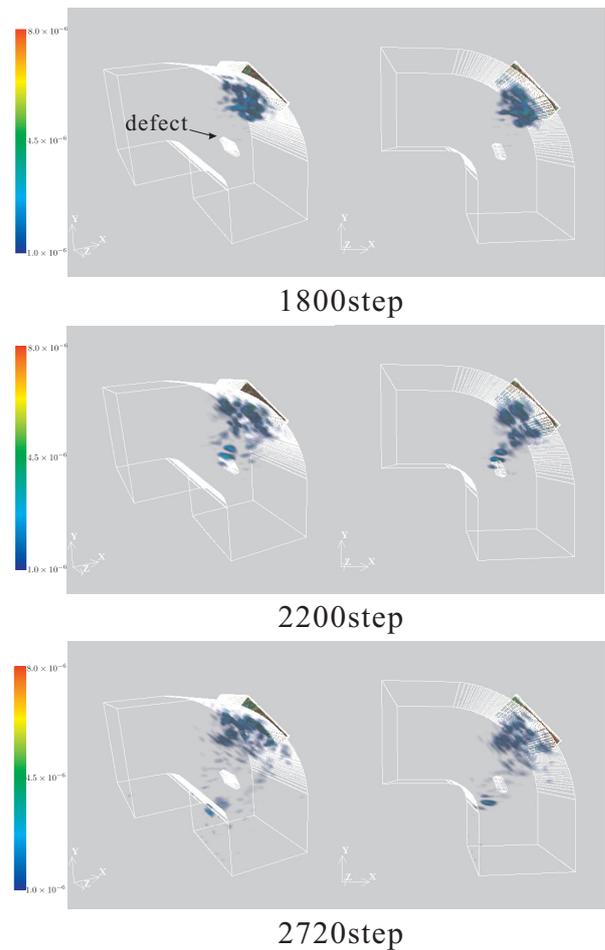


図3 各ステップにおける逆解析結果 $|u|$.

$c_{33}=16.34$, $c_{44}=7.48$, $c_{55}=3.37$, $c_{66}=7.48$ (単位は GPa) で与えた. 入射波は, 超音波フェーズドアレイ探触子の左端より 8 点目のアレイ素子から, 中心周波数 500kHz の Ricker 波を 1 波, 図 1(b) の黄色点線で示すように, 垂直に与えた. 全アレイ素子で欠陥からの散乱波を受信し, 時間反転波を各アレイ素子で再入射する (逆解析). 逆解析結果を図 3 に示す. ここで, 識別がしやすいよう, 欠陥位置を白枠で示してある. 図 3 の 2200step より, 時間反転波は欠陥近傍で収束し, 欠陥位置を概ね特定できていることがわかる.

7. 結論および今後の課題

本研究では, L字型 CFRP 中の欠陥に対して, 時間反転波を用いた 3 次元逆解析結果を示した. 有限要素法によって, L字型 CFRP 中に存在する欠陥からの散乱波を取得し, 得られた散乱波を時間反転させ再入射することで, 概ね欠陥を検出することができた. このことから, 本手法は, 音響異方性の性質が変化する材料に対して有用性があると言える. 今後は, 高精度化や実際の計測波形を用いた場合の妥当性について検討する予定である.

参考文献

- 1) 前原佑, 齋藤隆泰: 時間反転法を用いた L 字型 CFRP 中の欠陥形状再構成, 計算数理工学論文集, Vol.18, pp.47-52, 2018.
- 2) K. Kimoto, K. Nakahata and T. Saitoh: An elastodynamic computational time-reversal method for shape reconstruction of traction-free scatterers, *Wave Motion*, Vol.72, pp.23-40, 2017.