炭素繊維強化樹脂を伝搬する超音波の可視化とそのモデリング

中畑和之* 黄木景二* 永井政貴** 林 山**

Visualization of Ultrasonic Wave Propagation in Carbon Fiber Reinforced Plastic and Its Numerical Modeling

by

Kazuyuki NAKAHATA*, Keiji OGI*, Masaki NAGAI** and Shan LIN**

Key words: Carbon fiber reinforced plastic (CFRP), Ultrasonic wave, Visualization, Mesoscopic modeling, Elastic stiffness

1 緒 言

炭素繊維強化樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) は、航空宇宙産業をはじめとして、自動車、建設分野など様々な分野で利用が加速している。それに伴い、CFRP の品質や安全性を確保するための超音波検査の高度化が望まれている。CFRP の成形の方法は様々なものが提案されているが、現状の多くは、繊維に樹脂を含浸させたシート素材 (プリプレグ) を積層して作られる。この時、積層方向や枚数に依存して、成形後に異方性が生じる。一般的に、異方性材料中では超音波は屈曲し、また、層間で超音波は反射・屈折する。特に、近年現場導入が進んでいるフェーズドアレイ探傷¹⁾では、ターゲット位置での位相整合を期待して振動素子にディレイを与えて励起するが、CFRP では位相速度の方向依存性を考えてディレイを設定する必要がある。

本解説では、CFRP の数値モデルをできるだけ精密に作成し、それを用いた波動伝搬シミュレーション技術を紹介する。一般的に適用される超音波検査の周波数帯域は数 MHz 程度であり、CFRP 中の超音波の波長はミリメートルオーダーとなるから、プリプレグの厚さはこれより 1 オーダー以上小さい。検査対象領域となる CFRP をマクロスケールとするならば、積層構造をモデル化するにはメゾスケールまで扱う必要がある。このとき、プリプレグの弾性スティフネスがモデリングの精度に大きく関わる。そこで、本解説ではレーザー超音波法を用いて波動の伝搬を可視化し、これをもとにプリプレグの弾性定数を逆解析する手法²⁾を概説する。レーザー光を用いて超音波の伝搬を可視化する方法として、レーザードップラー振動計 (Laser Doppler Vibrometer: LDV) を用いて計測する方法³⁾が古くから提案されていたが、最近ではレーザー光の照射によって超音波を発生させ、それを可視化する方法⁴⁾も提案されている。ここでは、それぞれの方法を紹介し、可視化の特徴をまとめる。また、逆解析によって得られた弾性スティフネスを用いて、マルチプライ CFRP の数値モデルを作成し、有限要素法 (Finite Element Method: FEM) を用いて波動伝搬解析

を行う。ここで、マルチプライ CFRP 供試体の可視化結果を示し、モデルの妥当性を検証する。

2 波動伝搬の可視化方法

LDV 計測法と光音響計測法の 2 つのシステムを製作したので、ここでは、同じ対象材料に対して波動伝搬の可視化を行う。両手法を直接比較することで、それぞれの可視化の特徴を示す。なお、レーザーで超音波を励起したり、検出したりするのを含めて、非破壊検査の分野では一義的にレーザー超音波法と呼ぶことが多い。

2・1 LDV 計測法

LDV を用いて超音波を可視化するシステムを図 1(a) に示す。まず、パルスから電気信号を送信し、プローブを駆動することで超音波を発振する。表面を伝搬した超音波による表面変位を LDV (Polytec 社, NLV-2500-5) で記録する。LDV ヘッド部では、ヘリウムネオン光源から波長 633nm のレーザー光が照射され、ビームスプリッターによって測定ビームと参照ビームに分けられる。測定ビームは試験体で反射し、測定ビームと参照ビームが干渉する。このときのドップラーシフトから試験体表面の面外方向の速度が測定される。ヘッド部をラスタ走査し、試験体上の各点で波形を取得する。最終的に、すべての点の波形から同時刻の信号の振幅を抽出し、時刻毎に走査面にプロットすることで超音波の可視化を行う。ここで、使用した送信用プローブ (Olympus 社, V133-RM) は、中心周波数が 2.25MHz、直径が約 6.4mm である。LDV は、表面での光の散乱状況によってシグナルノイズ (S/N) 比が低下することがある。従って、ここでは、同位置で複数回計測を行い、得られた信号を加算平均することで、ノイズ低減を行っている。

2・2 光音響計測法

非常に短いパルス幅でレーザー光を物質に照射すると短時間に熱膨張が生じ、これによって応力波が生じる。発生した超音波領域の応力波は光音響波と呼ばれる。光音響計測法のシステムを図 1(b) に示す。レーザー光源 (Litron 社, Nano L90-100) によって、100Hz の繰り返し

+ 原稿受理 令和2年2月26日 Received Feb. 26, 2020 ©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 愛媛大学大学院 理工学研究科 〒790-8577 松山市文京町
Graduate School of Engineering and Science, Ehime University, Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

** 電力中央研究所 材料科学研究所 〒240-0196 横須賀市長坂
Central Research Institute of Electric Power Industry, Nagasaki, Yokosuka, 240-0196

図 1 (a) LDV を利用した超音波伝搬の可視化方法, (b) 光音響効果を利用した超音波の可視化方法

し周波数で、波長 532nm、パルス幅 4ns のレーザー光を発振している。光源の出射口で計測したパルスエネルギーは、およそ 1mJ である。発振したレーザー光は、光ファイバーを通じて対象材料の表面に照射される。CFRP のような工業材料の場合、表面で光音響効果が顕著である⁵⁾。発生した光音響波は、照射点から離れた位置に設置した超音波プローブによって検出される。ここでの超音波プローブは受信専用として用いられ、LDV 計測法と同じものである。検出された信号はアンプによって増幅され、DAQ でデジタル化されて記録される。ファイバーを平行移動させることによってラスタ走査を行う。ここで、送信と受信を逆にしても等しい波形が得られるという動弾性問題の相反性を利用する。すなわち、プローブでの受信波形は、プローブから発生した超音波信号であると仮定する。各点で得られた信号から同時刻の信号の振幅を抽出し、それをプロットすることで超音波の可視化を行う。

3 CFRP の波動伝搬の可視化

3.1 一方向に積層した CFRP 供試体

図 2(a)に示すように、プリプレグを同じ方向に 200 枚積層した CFRP 供試体 $[(0^\circ)_{200}]$ を作製した。母材はエポキシ樹脂であり、炭素繊維は東レの T800S を用いた。供試体の x_1, x_2, x_3 方向の長さは、それぞれ 20.0 mm, 50.4 mm, 50.4 mm である。炭素繊維の直径は約 $6\mu\text{m}$ であり、繊維の含有率は約 60 %、炭素繊維と樹脂の密度はそれぞれ 1.8 と 1.4 g/cm^3 である。ここでは、図 2(b)に示す x_2-x_3

図 2 (a)同一方向にプリプレグを積層させた CFRP 供試体, (b)超音波の可視化面 A, (c)超音波の可視化面 B

面を可視化面 A、図 2(c)に示す x_2-x_1 面を可視化面 B とし、それらの面でレーザー光を送信／受信する。なお、探触子は、可視化面とは異なる別の面に設置している。

3.2 波動伝搬の可視化結果

LDV 計測法におけるレーザー光の受信間隔と、光音響計測法におけるレーザー光の照射間隔は、いずれもおよそ 0.15mm とする。LDV 計測法と光音響計測法を用いて可視化面 A を計測した結果を、図 3(a)と(b)にそれぞれ示す²⁾。計測開始後 $6\mu\text{s}$ 後のスナップショットを示したものであり、全スナップを通じて最大となる振幅値で正規化してカラーで表している。図 3 より、縦波(P 波)が始めに観察され、その音速は繊維方向である x_3 方向が卓越して大きいことがわかる。また、時間が経つと、音速の小さい横波(S1 波)も観察でき、それは楕円状に広がっている。 x_3 軸に対して左右の音圧が異なるが、これは探触子面と供試体表面が完全に平行ではなく、接触圧力が一様ではないことによるものと考えられる。ここで、図 3(a)と(b)の違いを調べる。P 波の伝搬はほぼ同じように見えるが、LDV 計測法(図 3(a))では S1 波の x_3 方向の波面が明確に現れているのに対して、光音響計測法(図 3(b))

図3 CFRP 供試体の面 A の超音波伝搬の可視化結果(6 μ s 時). (a) LDV 計測法, (b) 光音響計測法

ではそれが不鮮明である.

また, 可視化面 B における LDV 計測法と光音響計測法による計測開始後 8 μ s 後のスナップショットを, 図 4(a)と(b)にそれぞれ示す. 図 4 では, P 波と S1 波の波面は円に近いことから, 可視化面 B は等方面として波動が伝搬することがわかる. また, 図 3 と同様に, S1 波の波面は LDV 計測法の方が明確に現れている.

3.3 LDV 法と光音響法による可視化特性の比較

動弾性問題における相反定理をもとに, 両手法の違いについて考察してみる. 波動の計測において, 送信点と受信点を入れ替えたときに成立する関係を整理する. 動的つり合い状態を a と b とする. それぞれの状態における変位ベクトルを $\mathbf{u}^a$ と $\mathbf{u}^b$ とする. また, 応力テンソルを $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ としたとき, 座標系の基底ベクトル $\mathbf{e}_j$ で表した表面力ベクトルを $\mathbf{t}_i (= \tau_{ij} \mathbf{e}_j)$ とする. このとき, 状態 a と b は次の運動方程式を満たす.

$$\frac{\partial \mathbf{t}_i^a}{\partial x_i} = -\rho \omega^2 \mathbf{u}^a - \mathbf{f}^a \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{t}_i^b}{\partial x_i} = -\rho \omega^2 \mathbf{u}^b - \mathbf{f}^b \quad (2)$$

図4 CFRP 供試体の面 B の超音波伝搬の可視化結果(8 μ s 時). (a) LDV 計測法, (b) 光音響計測法

ここで, ρ は密度, ω は角周波数, $\mathbf{f}$ は物体力である. 上式では総和規約を適用する. 詳細⁹⁾は割愛するが, 式(1)と(2)から, 次式のような表面力と変位の内積からなる積分表現が導出できる.

$$\int_S \mathbf{t}^b(\mathbf{n}) \cdot \mathbf{u}^a dS = \int_S \mathbf{t}^a(\mathbf{n}) \cdot \mathbf{u}^b dS \quad (3)$$

ここで, $\mathbf{n}$ は S 上の法線ベクトルであり, 弾性スチフネスマトリクスは対称, 物体力はゼロであるとした.

さて, 図 5(a)に示す状態 a を LDV 計測法, 図 5(b)に示す状態 b を光音響計測法の応力・変形状態とする. いま, レーザーの照射領域は, 両者で同じ大きさであると仮定すると, 式(3)は次式となる.

$$u_1^a t_1^b + u_2^a t_2^b + u_3^a t_3^b = u_1^b t_1^a + u_2^b t_2^a + u_3^b t_3^a \quad (4)$$

状態 a では, 垂直探触子で表面に垂直応力だけが与えられるとすると, $t_2^a = t_3^a = 0$ と仮定できる. 従って上式は

$$u_1^b = \frac{t_1^b}{t_1^a} u_1^a + \frac{t_2^b}{t_1^a} u_2^a + \frac{t_3^b}{t_1^a} u_3^a \quad (5)$$

となる.

状態 a において, LDV の受信点では, $\mathbf{u}^a = (u_1^a, u_2^a, u_3^a)$

図5 (a)LDV 計測法における応力状態 (状態 a), (b)光音響計測法における応力状態 (状態 b)

で表される 3 次元的な変形があるが、実際に LDV で計測されるのは面外変位であるから、可視化面に現れるのは u_3^a だけである。また、状態 b において、レーザー光の照射点では、 $\mathbf{t}^b(\mathbf{n}) = (t_1^b, t_2^b, t_3^b)$ の 3 次元応力が発生する。従って、式(5)より、状態 a における LDV で計測される変位 u_3^a と、状態 b において垂直探触子で計測される変位 u_1^b は、一般には等しくはならない。図 3 と 4 で、光音響計測法において S1 波の振幅が小さかった理由としては、レーザー照射における t_3^b の発生が小さかったことが挙げられる。金属の場合、レーザー照射時において材料表面に対して垂直方向に発生する横波の指向性は非常に小さく、CFRP にも同様な傾向があると推定される。

以上まとめると、LDV 計測法は、探触子からの放射波が材料表面を伝搬する様子を可視化するものであるが、表面での散乱光が安定しない場合に平均化処理が必要となる。一方、光音響計測法は散乱光ノイズの影響を受けにくい点で 1 回の照射でよく高速映像化が可能である。しかし、レーザー照射時の表面応力状態や受信センサの設置位置によっては、LDV 計測法と全く同じ可視化結果が得られるとは限らない。また、LDV 計測法ではパルサーによる励起信号が波長に影響するが、光音響計測法では照射レーザー光の特性によって波長が変化する。

3.4 CFRP を構成するプリプレグのモデル化

図 3 と 4 から、超音波は繊維方向の断面(可視化面 A)では音響異方的な伝搬挙動を、繊維方向に直交する断面(可視化面 B)では等方的な挙動を示すことから、この供試体は横等方性材料と仮定できる。また、炭素繊維自体による超音波の多重散乱の影響は小さい。これは、可視化面 A を伝搬する P 波の波長が約 4.6mm、可視化面 B の P 波が約 1.3mm 程度であることから、超音波の波長が炭素繊維の径に比べて十分に大きいためである。従って、非破壊検査で用いられる数 MHz のオーダーの周波数を想定して CFRP 中を伝搬する超音波の伝搬をモデル化するには、炭素繊維からの散乱を無視し、プリプレグ 1 層を均質異方性材料として考えても大きな問題はないと思われる。次節では、図 3 と 4 の可視化結果をもとに、プリプレグの材料定数を逆解析する。

4 プリプレグの弾性ティフネスの推定

4.1 位相速度と弾性スティフネス

異方性材料の場合、波動の位相面の移動速度である位相速度と、エネルギーの伝搬速度である群速度の 2 種類が存在することが知られている。図 3 と 4 で示した可視化結果は、群速度で伝搬する波面が現れていることに注意されたい。ここでは、波動伝搬の可視化結果から弾性スティフネスを求める方法について述べる。弾性スティフネスは群速度ではなく、位相速度と関連づけられる。 c_{ijkl} を弾性スティフネスマトリクスとする。これは 4 階のテンソルである。進行方向 $\mathbf{n}$ に位相が進む場合の平面

波は、以下の Christoffel 方程式⁸⁾を満足する。

$$(c_{iklm}n_kn_l - \rho v^2\delta_{im})d_m = 0, \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{d}$ は波動の偏向ベクトル、 v は位相速度、 δ_{im} はクロネッカーのデルタである。上式は、固有値が ρv^2 である固有方程式と見なすことができ、行列の対称性から 3 つの実数固有値とそれに対応する固有ベクトルが存在する。この固有方程式から求められる 3 つの v^α が、 $\alpha = P, S1, S2$ 波の位相速度に対応する。位相速度は、その逆数を表示することがあり、進行方向 $\mathbf{n}$ における逆速度(スローネス)と速さを

$$s_i^\alpha = \frac{1}{v^\alpha} n_i, \quad s^\alpha = \sqrt{s_i^\alpha s_i^\alpha} \quad (7)$$

と定義し、速さを全方位に渡って描いたものをスローネス曲面と呼ぶ。

CFRP 供試体は、横等方性材料であると仮定したので、推定すべき弾性スティフネスは、Voigt 標記⁸⁾を用いると $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}$ の 5 つである。ここで、可視化面 A (x_2-x_3 面内)を伝搬する波動を例にとって、固有方程式の解を具体的に記述してみる。 x_1 軸回りの回転角を θ とする。このとき A 面内の平面波の方向は $(n_1, n_2, n_3) = (0, \cos \theta, \sin \theta)$ となり、式(6)から次の 3 つの位相速度と C_{ij} との関係が求まる。

$$(v^P)^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\frac{1}{2}(C_{11} + C_{44})n_2^2 + \frac{1}{2}(C_{33} + C_{44})n_3^2}{\left[\frac{C_{11}^2 - 2C_{11}C_{44} + C_{44}^2}{n_2^4} + \frac{1}{2} \left(\frac{2C_{11}C_{44} - 2C_{11}C_{33} + 4C_{13}^2}{+8C_{13}C_{44} + 2C_{33}C_{44} + 2C_{44}^2} \right) n_2^2 n_3^2 + \frac{C_{33}^2 - 2C_{33}C_{44} + C_{44}^2}{n_3^4} \right]^{1/2}} \right\} \quad (8)$$

$$(v^{S1})^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\frac{1}{2}(C_{11} + C_{44})n_2^2 + \frac{1}{2}(C_{33} + C_{44})n_3^2}{\left[\frac{C_{11}^2 - 2C_{11}C_{44} + C_{44}^2}{n_2^4} - \frac{1}{2} \left(\frac{2C_{11}C_{44} - 2C_{11}C_{33} + 4C_{13}^2}{+8C_{13}C_{44} + 2C_{33}C_{44} + 2C_{44}^2} \right) n_2^2 n_3^2 + \frac{C_{33}^2 - 2C_{33}C_{44} + C_{44}^2}{n_3^4} \right]^{1/2}} \right\} \quad (9)$$

$$(v^{S2})^2 = \frac{1}{\rho} (C_{66}n_2^2 + C_{44}n_3^2) \quad (10)$$

これらの関係式から、 x_2-x_3 面内を伝搬するいくつかの方向の位相速度がわかれば、 C_{ij} が求まることになる。これ以外にも、他の可視化面で同様に、弾性スティフネスと位相速度の関係式が陽な形で表現できる。

4.2 弾性スティフネスの逆解析

レーザーの走査によって、各点で時間 t の振動変位が得られる。これらを元に、以下に示す波形処理によって波数 $\mathbf{k}$ 空間から位相速度を抽出する。レーザーの走査方向を x_i-x_j 面内とすると、点 $\mathbf{x} = (x_i, x_j)$ で x_k 方向の振動変位 u_k が得られる(ただし、 $k \neq i, j$)。いま、次の時空間フーリエ変換を考える。

$$U_k(\mathbf{k}, \omega) = \iiint u_k(\mathbf{x}, t) \exp\{-i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)\} d\mathbf{x} dt \quad (11)$$

ここで、角振動数 ω は周波数 f と $\omega = 2\pi f$ の線形の関係があ

図 6 時空間フーリエ変換によって描画したスローネス分布. (a)可視化面 A, (b)可視化面 B

る. 得られた波数-周波数領域のデータから, 位相速度の逆数(スローネス, $s=1/v$)を求める. 異方性材料の場合, 伝搬方向によってスローネスが異なるので, 次式に示すようにスローネス $\mathbf{s}=(s_i, s_j)$ はベクトル表示される.

$$\mathbf{s} = \frac{1}{2\pi f} \mathbf{k} \quad (12)$$

以上より, 式(11)によって波数-周波数空間の値 U_k を計算した後, 式(12)を用いて座標変換するとスローネス分布が得られる. 可視化面 A の可視化結果(図 3)から算出したスローネス分布を図 6 に示す²⁾. ここで, U_k の値は最大値が 1 になるように正規化しており, 赤い部分はその位相速度で伝搬する成分が多いことを表す. なお, 位相速度分布が分かれば, 逆解析に使用する可視化データは LDV 計測でも光音響計測法でもどちらでもよい.

図 6(a)に示すように, $\theta=90^\circ$ 方向 ($n_1, n_2, n_3 = (0, 0, 1)$) の位相速度を例として, 弾性スティフネスを決定するプロセスを示す. 式(8)~(10)より,

$$s^P = \sqrt{\rho/C_{33}}, \quad s^{S1} = s^{S2} = \sqrt{\rho/C_{44}} \quad (13)$$

となる. すなわち, 図 6(a)中の s_a は上式の s^P , s_b は上式の s^{S1} に相当する. ここで, $s_a=0.096$ s/km, $s_b=0.473$ s/km と読み取ることができるので, 式(13)から $C_{33}=178$ GPa, $C_{44}=7.33$ GPa と計算できる. これ以外にも図 6(b)のような可視化面 B や他の面においても, 複数の方向でスローネスが観察できる. 求めるべき C_{ij} の個数は 5 つであり, これよりも多い複数方向の位相速度が得られるため, 通常は最適化問題を設定して 5 つの定数を決定することになる. ここで, 位相速度の計測値と式(8)~(10)に示す位相速度の差の二乗和が最小になるように C_{ij} を決定した結果, 次式のような弾性スティフネスが得られた.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 15.9 & 9.1 & 6.41 & 0 & 0 & 0 \\ & 15.9 & 6.41 & 0 & 0 & 0 \\ & & 181.0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 7.64 & 0 & 0 \\ & & & & 7.64 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & 3.38 \end{bmatrix} \text{ (GPa)} \quad (14)$$

図 7 逆解析によって再構成したスローネス曲線. (a)可視化面 A, (b)可視化面 B

4.3 プリプレグの弾性スティフネス

式(14)の弾性スティフネスを用いて再現された各可視化面のスローネス曲面を図 7 に示す. 図 6 ではスローネスが部分的に現れていたが, 図 7 はそれらを含む全体の曲面が再現できており, 最適な最小二乗解が得られているといえる. また, 可視化面 B (x_2-x_1) は等方性と仮定しているため, 図 7(b)におけるスローネス曲面は円形として再構成されている. 式(14)の弾性スティフネスを用いて, 次節で示す陽的有限要素法を実行したときの波動伝搬シミュレーション結果を図 8 に示す. 図 8(a)と(b)は, 可視化面 A と B をそれぞれ再現したものである. P 波速度は, 計測実験で見られたように x_3 方向に卓越して大きい. また, 光音響計測法では見られず LDV 計測法で観察された S1 波の波面も明確に現れていることがわかる.

図 8 (a) CFRP 数値モデルの A 面の面外変位(5 μ s 時), (b)数値モデルの B 面の面外変位(8 μ s 時)

5 メゾスケール構造を考慮した解析とその検証

5.1 数値解析法

ここでは有限要素法(FEM)を用いて波動伝搬シミュレーションを行う。超音波伝搬の場合、波長に比べて1オーダー以上小さい要素サイズが必要であり、一般的には要素数が多くなる。従って、並列計算による高速化を導入しやすい陽的有限要素法²⁾を採用する。時間方向の離散化を中心差分とすると、次式に示すような代入計算で変位が逐次求められる。

$$d^{k+1} = (2 - \Delta t^2 [\tilde{M}]^{-1} [K]) d^k + \Delta t^2 [\tilde{M}]^{-1} f^k - d^{k-1} \quad (15)$$

ここで、 $[K]$ は剛性行列、 $[\tilde{M}]$ は対角化した質量行列、 d は変位を節点番号順に並べたベクトルである。式(15)は、現在の時刻ステップ k における値と Δt 前のステップ $k-1$ の値を用いて、 Δt 後のステップ $k+1$ における変位が求められる更新方法であることを表している。

5.2 マルチプライ CFRP

図 9(a)に示すようなマルチプライ積層の CFRP 供試体を作製し、このモデル化を行う。この供試体は、プリプレグを 45° , 0° , 90° , -45° 方向に 144 層重ね合わせ、中央面で鏡面对称となるように積層している $[(45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ)_{18}]_s$ 。この供試体は疑似等方材とも呼ばれており、 x_2 - x_3 面に等方的な性質が現れるようにしたものである。この供試体の質量は 78.1g、密度は 1591kg/m^3 であり、供試体の寸法は $x_1=18.73\text{mm}$, $x_2=50.1\text{mm}$, $x_3=51.1\text{mm}$ である。

一方、この供試体の 3 次元数値モデルを作成するために、FEM では CFRP の各層に異なった弾性スティフネス C_{ij} を与える。プリプレグの C_{ij} の値は式(14)で推定できているので、異方性の主軸を回転させながら、各層に弾性スティフネスを設定する。ここでは、CFRP 供試体の一部($x_1=19\text{mm}$, $x_2=20\text{mm}$, $x_3=20\text{mm}$)をモデル化した。

図 9 (a)マルチプライ CFRP 供試体と (b)プリプレグの積層構成を考慮した有限要素モデル。

5.3 波動伝搬の可視化とシミュレーションとの比較

図 9(a)に示す x_2 - x_3 面にレーザー光を照射し、光音響計測法による可視化を行った。レーザー光の照射間隔はおよそ 0.1mm であり、照射点数が 439×431 である。可視化結果を図 10 に示す。 x_2 - x_3 面では、縦波の波面は同心円を描いており、等方的な性質が波動伝搬にも表れている。ただし、右下 45° 方向へ伝搬する超音波の振幅が大きい。これは第一層の繊維の配向方向が 45° であるから、表層の影響が強く現れているためである。

次に、FEM の 3 次元シミュレーション結果を示す。FEM はボクセル要素を利用し、そのサイズは $22\mu\text{m}$ 、時間ステップ Δt は 1.0ns とした。シミュレーションでは、探触子の径($\phi=6.3\text{mm}$)および設置位置は実験と同じになるようにした。ここでは、探触子の設置面で垂直応力を一様に与えることで超音波を発生させた。応力の波形は、中心周波数 2.25MHz のリッカーウエーブレット²⁾を用い

図 10 マルチプライ CFRP の表面を伝搬する超音波の可視化結果 (光音響計測法)。 (a) $2.0\mu\text{s}$, (b) $6.0\mu\text{s}$, (c) $10.0\mu\text{s}$ のときの面外変位。

図 11 マルチプライ CFRP モデル中を伝搬する超音波のシミュレーション結果. (a) 2.0 μ s, (b) 3.0 μ s, (c) 4.0 μ s のときの u_1 変位

て作成している. FEM による波動場の可視化結果図 11 にを示す. 図 10 で観察されたような斜め方向に伝搬する超音波の振幅が大きくなることが確認できた.

6 結 言

CFRP の超音波検査を高度化するには, 対象となる CFRP を伝搬する超音波の特性を把握する必要がある. 本解説では, まず, 波動伝搬を可視化する 2 つの手法について述べた. LDV 計測法は, 材料に設置した探触子からの放射された波動伝搬を非接触で計測できるが, 散乱光が安定しない場合は加算平均処理を行う必要があるため, 高速イメージングは容易ではない. 一方の光音響計測法は, レーザー光の照射によって発生した超音波をもとに可視化を行う方法であり, 1 点あたり 1 回の照射でよく高速に映像化が可能である. しかし, 動弾性相反

定理から, レーザー照射時に発生する応力や探触子の設置場所によって, 両手法の可視化結果は厳密には一致しないことを示した.

次に, この可視化結果を活用して, プリプレグの弾性ステイフネスを逆解析する方法を紹介した. このプリプレグを基にマルチプライ供試体を作製し, さらにこれを模擬した有限要素モデルを作成した, このモデルは, 層毎に異なる弾性ステイフネスが用いられており, 層厚や積層数等が考慮されている. 有限要素解析と計測による可視化結果を比較したところ, 波面や伝搬速度だけでなく, 局所的に振幅が大きくなることも再現できた. マクロスケールでみれば疑似等方性材料であるが, 超音波の伝搬は層構造や探触子の設置位置, 周波数等の影響が現れるため, メゾスケールでのモデル化が必要である.

本解説では, CFRP のモデル化の一例を示したが, 他の積層方法や, 繊維が湾曲している部分等についても, 手法の妥当性を検証していきたい.

レーザー超音波実験において, 愛媛大学大学院理工学研究科修士課程の天野裕維君の補助を受けました. また, 本研究は科研費 (挑戦的研究 18K18885, 中畑和之) の補助を受けました. 記して謝意を表します.

参 考 文 献

- 1) 特集 フェイズドアレイ超音波技術の最近の展開, 非破壊検査, Vol.56, No.10, pp.503-529, 2007.
- 2) K. Nakahata, Y. Amano, K. Ogi, K. Mizukami, T. Saitoh, Three-dimensional ultrasonic wave simulation in laminated CFRP using elastic parameters determined from wavefield data, Composite Part B, Vol.176, 107018, 2019.
- 3) B. Koehler, M. Kehlenbach, R. Bilgam, Acoustical Imaging / Optical Measurement and Visualization of Transient Ultrasonic Wave Fields, Vol.27, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- 4) S. Yashiro, J. Takatsubo, H. Miyauchi, N. Toyama, A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan, NDT & E International, Vol.41, pp.137-144, 2008.
- 5) K. Nakahata, K. Karakawa, K. Ogi, K. Mizukami, K. Ohira, M. Maruyama, S. Wada, T. Namita, T. Shiina, Three-dimensional SAFT imaging for anisotropic materials using photoacoustic microscopy, Ultrasonics, Vol.98, pp.82-87, 2019.
- 6) 高橋栄太, 中畑和之, 相反性を用いた構造部材の動的挙動の可視化と選択的波動モードによる欠陥検出, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.264-274, 2019.
- 7) T. Kundu, Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Engineering and Biological Material Characterization, CRC Press, 2003.
- 8) B. A. Auld, Acoustic Fields and Waves in Solids Volume 1, Krieger Publishing Company, Florida, USA, 1990.