

レーザーสキャンによる複合材料中の超音波伝搬の可視化

愛媛大学大学院 学生員 ○瀬々大樹, 溝上尚弥
愛媛大学大学院 正 員 中畑和之

1. はじめに

炭素繊維強化樹脂 (CFRP) は、金属に比べて軽量で、剛性、耐疲労性、耐摩耗性等が優れ、航空機等の工業製品だけでなく、土木建設材料として利用されつつある。CFRP 材料は成形時に内部剥離やボイドなどのきずが生じ、また、使用時においても力学的な負荷によって、内部に損傷が生じることから、超音波探傷技術の高度化が望まれている。しかし、CFRP のように特定の方向が強化されている場合は材料異方性を示すことから、超音波もそれに依存して伝搬速度が方向によって異なる¹⁾。また、アングルプライや平織り等の複合構造となれば、層間で超音波が透過・反射するために、超音波の伝搬は複雑になる。本研究では、CFRP 中を伝搬する超音波をレーザー Doppler 振動計 (LDV) を用いて可視化し、超音波の伝搬特性について調査する。さらに、スキャンした波形をフーリエ変換によって波数領域に変換したとき、それが逆速度分布 (位相速度の逆数) となることを利用し、CFRP 供試体の弾性定数の推定を試みる。

2. LDV による波動場の可視化

図-1 に示すように、炭素繊維が x_3 方向に配向した CFRP 供試体について、超音波の伝搬を調べる。マトリクスはエポキシ樹脂であり、炭素繊維は東レの T800S を用いた。炭素繊維の径は約 $7\mu\text{m}$ であり、繊維の含有率は約 60%，供試体の密度は 1640kg/m^3 である。供試体の x_1, x_2, x_3 方向の長さは、それぞれ 20.02mm , 50.35mm , 50.35mm である。ここでは、超音波の伝搬を LDV を用いて可視化²⁾ する。超音波プローブを供試体の側面に固定し、別の表面にレーザーを照射することで、超音波プローブから発せられた超音波による面外振動の伝達をピックアップするものである。ここでは、Polytec 社製の LDV を用い、プローブは中心周波数が 2.25MHz 、直径が 5mm のジャンププローブ製のものをを用いた。また、スキャンピッチは 0.15mm とし、Doppler 信号はサンプリングレート 125MHz で受信している。ここでは、1 測点あたり 1000 回の加算平均を行っている。

LDV を用いて計測面 A を可視化したときの結果を図-2 に示す。表面の面外変位を、その面で最大となる振幅値で正規化してカラーで表している。ここでは、 x_1 方向と x_3 方向の測定点数を 265 と 335 とした。図-2 より x_3 方向が卓越して音速が大きいことがわかる。また、計測面 B と C を可視化したときの結果を

図-3 に示す。ここでは、水平方向と垂直方向の測定点数を 200 と 130 とした。図-3(a) より、計測面 B でも x_3 方向の音速が大きく、繊維に直交する x_2 方向は音速が小さいことがわかる。図-3(b) に示す計測面 C では、超音波は等方的な拡がりを示している。超音波の波長は炭素繊維径に比べて十分大きいため、炭素繊維自体による散乱波は小さく、マクロレベルでは均質異方性としてモデル化が可能であることがわかる。

3. 時空間フーリエ変換による逆速度曲面の算出

レーザーの走査方向を x_1-x_2 面内とすると、各点で時間 t の面外振動変位 u_3 が得られる。ここでは、時空間にそれぞれフーリエ変換を施すことで、 x_1-x_2 面内の各方向の位相速度が抽出できることを示す。いま、時間 t および空間 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ について、以下のフーリエ変換を考える。

$$U_3(k_1, k_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_3(x_1, x_2, t) \times \exp\{-i(k_1x_1 + k_2x_2 - \omega t)\} dx_1 dx_2 dt \quad (1)$$

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, 逆速度) を求める。

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

から、ある周波数 f における逆速度 $\mathbf{s} = (s_1, s_2)$ がプロットできる。CFRP 供試体は十分に厚く、特定の方向の位相速度に周波数依存性はないので、ここでは送信波の中心周波数付近の周波数を選んでプロットする。計測面 A~C の可視化結果を時空間フーリエ変換することで算出した逆速度の分布を図-4 に示す。ここで、赤い部分はその位相速度で伝搬する成分が多いことを示す。

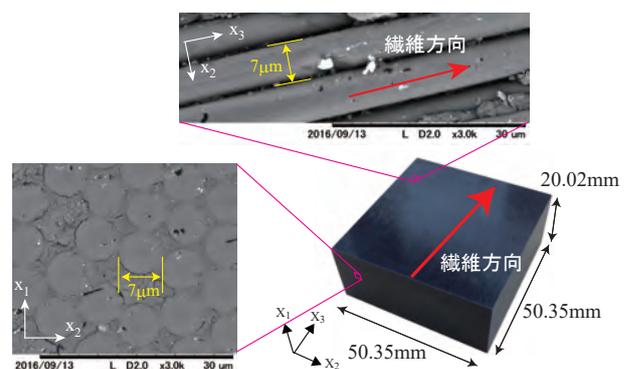


図-1 CFRP 供試体

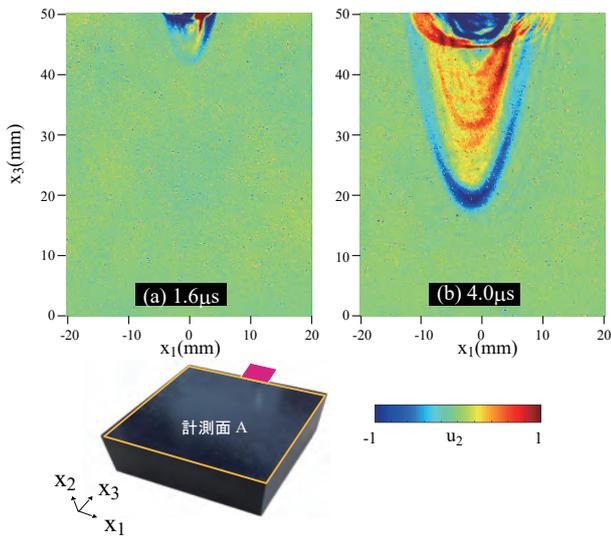


図-2 LDVによるCFRP供試体の計測面Aの可視化

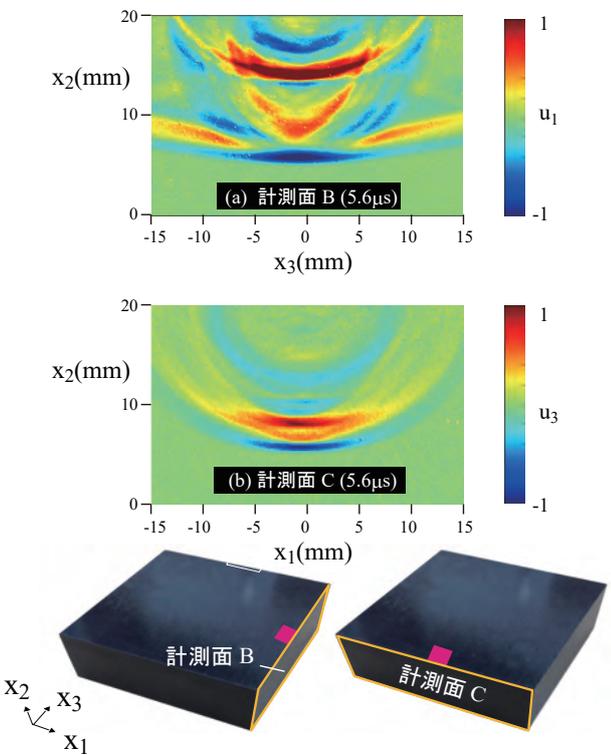


図-3 LDVによるCFRP供試体の計測面BとCの可視化

3.1 弾性定数の推定

LDVの可視化結果を見れば、繊維方向に直交する面(計測面C)では音響的に等方な振る舞いを示すことから、本CFRP試験体は横等方性材料と仮定できる。この場合、ある方向の位相速度と弾性スティフネス c_{ij} の関係は閉じた形³⁾で記述できる。ここでは、図-4に示す5点の逆速度 $S_A \sim S_E$ を用いて、弾性スティフネスを求めた。その結果を図-5(a)に示す。また、この弾性スティフネスを用いて、Christoffel方程式を解くことによって得られた逆速度分布と群速度を図-5(b)と(c)に示す。図-5(b)は、すべて $S_A \sim S_E$ を通っており、全方向の逆速度が再現できている。また、

図-5(c)の群速度曲面は、LDVによる可視化結果(図-2と3)の波面をよく表しており、超音波が群速度に従って、それぞれの方向に異なる速度で拡がっていることがわかる。

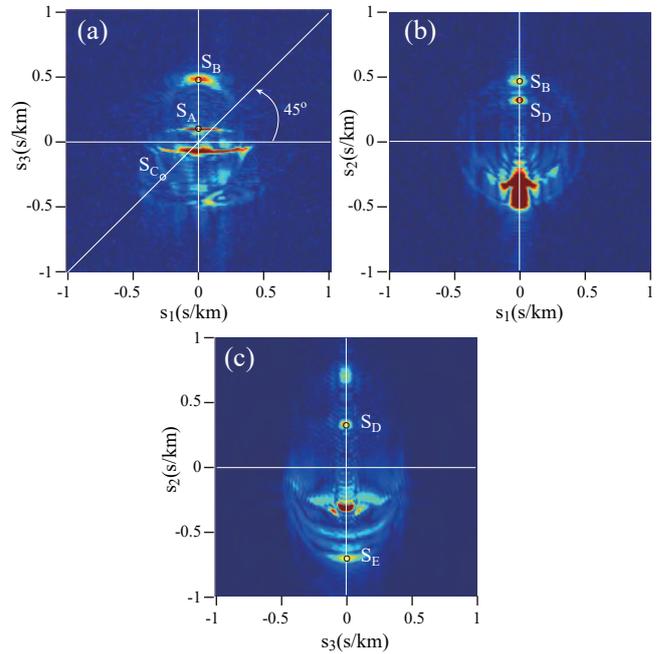


図-4 時空間フーリエ変換によって算出した逆速度曲面

$$C = \begin{bmatrix} 16.0 & 9.5 & 6.2 & 0 & 0 & 0 \\ & 16.0 & 6.2 & 0 & 0 & 0 \\ & & 181.7 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 7.8 & 0 & 0 \\ \text{Sym.} & & & & 7.8 & 0 \\ & & & & & 3.3 \end{bmatrix} \text{ (GPa)}$$

(a)

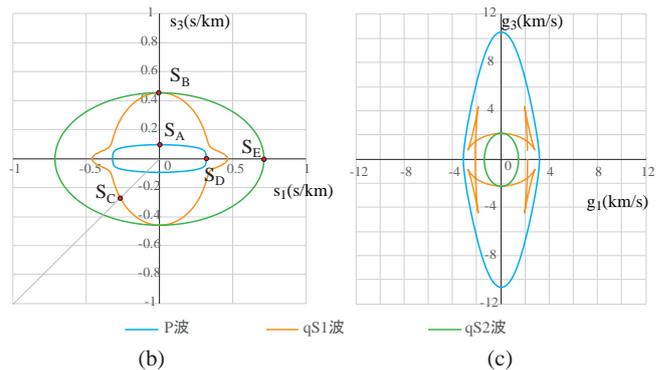


図-5 (a) 推定した弾性定数とそれに基づいて計算した (b) 位相速度と (c) 群速度分布

参考文献

- 1) R. M. Christensen(著), 岡部 朋永・矢代 茂樹(訳), 複合材料の力学, 共立出版, 2015.
- 2) B. Koehler, M. Barth, P. Krueger, F. Schubert, Grain structure visualization with surface skimming ultrasonic waves detected by laser vibrometry, Appl. Phys. Lett., Vol.101, pp.074101, 2012.
- 3) B. A. Auld, Acoustic Fields and Waves in Solids, Volume 1, Krieger Publishing, 1990.