

# レーザー超音波法による FRP 中の超音波伝搬の可視化と弾性定数の推定の試み

愛媛大学 学生員 ○溝上尚弥  
 愛媛大学 正員 中畑和之  
 群馬大学 正員 斎藤隆泰

## 1. まえがき

繊維強化樹脂 (FRP) は、金属に比べて軽量で、剛性、耐疲労性、耐摩耗性等が優れ、土木建設材料としても利用されつつある。FRP 材料の産業応用に伴い、非破壊検査技術の高度化が望まれている。超音波探傷を行う場合、特定の方向が強化されている FRP 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<sup>1)</sup>。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、炭素繊維強化樹脂 (CFRP) 中を伝搬する超音波をレーザードップラー振動計 (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、炭素繊維の径は約  $7\mu\text{m}$  である。繊維の含有率は約 60 %、供試体の密度は  $1640\text{kg/m}^3$  である。ここでは、超音波の伝搬を LDV を用いて可視化<sup>2)</sup> 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 のジャパンプローブ製のものを用いた。また、スキャンピッチは 0.15mm とし、ドップラー信号はサンプリングレート 125MHz で受信している。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

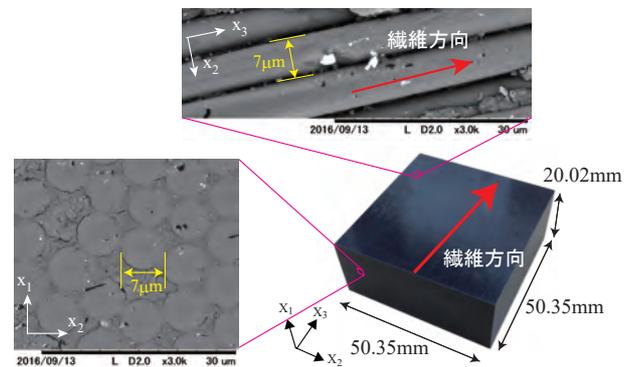


図-1 CFRP 供試体

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  $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2)$  について、以下のフーリエ変換を考える。

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

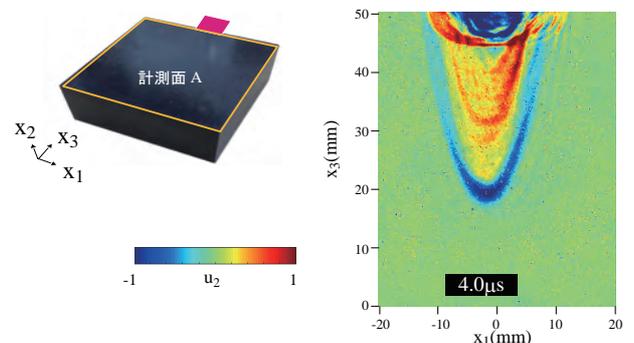


図-2 LDV による CFRP 供試体の計測面 A の可視化

**Key Words:** レーザー超音波法, 繊維強化樹脂 (FRP), 弾性定数推定, 波動可視化

〒790 - 8577 愛媛県松山市文京町 3 愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻, FAX 089-927-9812

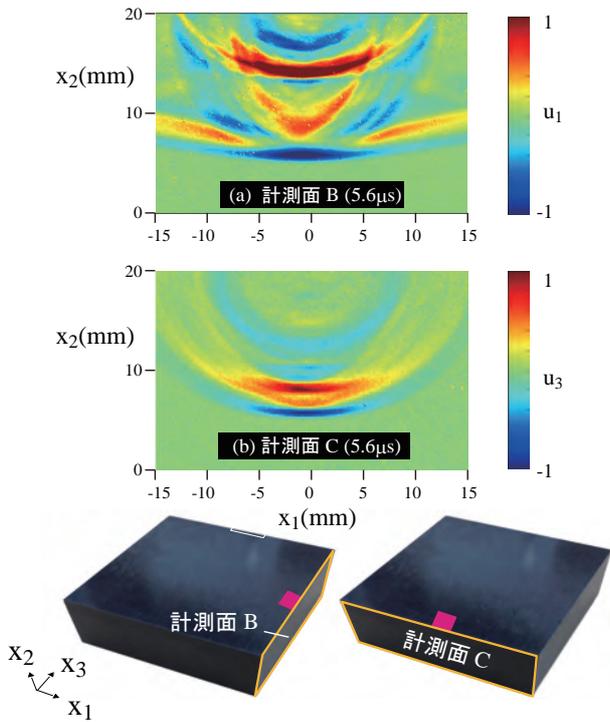


図-3 LDVによるCFRP供試体の計測面BとCの可視化

ここで、角振動数 $\omega$ 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。

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

から、ある周波数 $f$ における逆速度 $s = (s_1, s_2)$ 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。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。

4. 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 $c_{ij}$ の関係は陽な形<sup>3)</sup>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広がっていることがわかる。

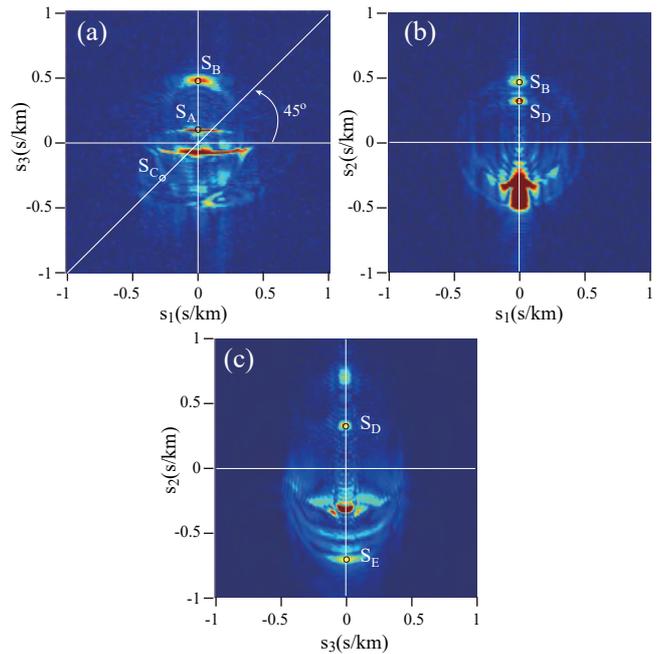


図-4 時空間フーリエ変換によって算出した逆速度曲面

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

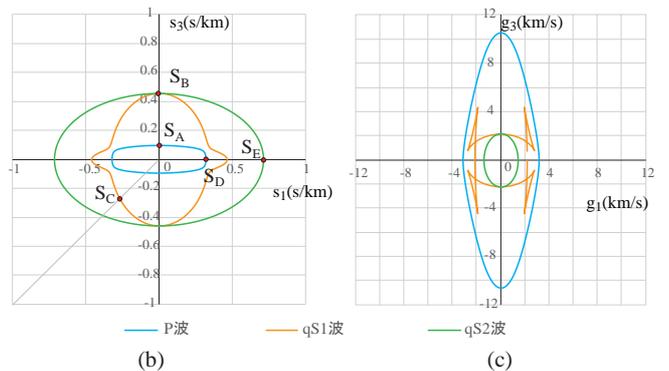


図-5 (a) 推定した弾性定数と、それに基づいて計算した (b) 位相速度と (c) 群速度分布

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.