

# GFRPの音弾性効果と損傷による音速変化

## Acoustoelastic Effect of GFRP and its Velocity Change due to Damage

小 堀 修 身

Osami KOBORI

### 概 要

不飽和ポリエステルを用いた成形材を供試料として単軸負荷を加えて、負荷による音速変化（音弾性効果）を測定した。結果は幾分ばらつきもみられるが音弾性則が仮定できる。縦波、および2つの直交する方向に偏る横波の音弾性定数はいずれも負である。また段階的に負荷した後除荷して各段階の縦波伝播速度を測定した。負荷ひずみが0.01%を越えた付近から初期音速は急に減少しはじめた。この付近は応力ひずみ関係の直線性がはずれる位置に対応している。これらをもとに材料の損傷との関係性を評価する手法を検討する。

### 1. はじめに

複合材料は異種素材の組み合わせによってそれぞれでは達し得ない性能を発現させようとするが、材質的には異方性であり異種材の複合の課程で、はく離やボイドなどの内部欠陥が発生しやすい。また複合材料は応用に即して材料が設計されるため材料と構造（製品）の完成が同時である。そのため製品の非破壊検査はきわめて重要である。超音波を利用する非破壊検査はFRPの欠陥、製品不良、はく離、硬化度など多くの不具合を検出できる手法として知られている（例えば1・2を参照）。複合材料科自身の研究は近年破壊挙動のシミュレーションや界面のミクロな特性に関する問題に注目が集められているようであるが、実験的に超音波を利用した最近の研究としては、成形時の硬化反応による材料定数の測定<sup>(3)</sup>、腐食劣化の測定<sup>(4)</sup>、損傷評価<sup>(5)</sup>などが報告されていて実用的な非破壊評価法の確立が模索されている段階と思われる。

本研究は一般的な異方性材料への超音波（音弾性）応力測定法の検討であり、また複合材料の強度と関連する層間、界面層ではく離の非破壊的評価への超音波の適用を検討しようとしている。これまでに一方向長繊維FRPの音弾性関係<sup>(6)</sup>、<sup>(7)</sup>、や応力測定例<sup>(8)</sup>を報告したが、応力（ひずみ）の増加とともに観察されるはく離やファイバーの損傷による音速変化の検討は不十分であった。ここでは与ひずみによる縦波音速変化の測定結果を示し損傷との関係の中間報告とする。引き続き横波の音速異方性の測定し結果と併せて損傷の非破壊的評価方法の可能性を検討しようとしている。

## 2. 試料の初期異方性と切り出し

試料は、不飽和ポリエステルを母材としこれにカットされたガラス繊維（3~20mm）を混練してから熱と圧力によって成形できる化学増粘材で増粘された成形（BMC成形）材である。母材の不飽和ポリエステルが低収縮なので寸法制度と安定性が得られる。外観もきれいなのが特徴となっている。ここではメーカー（ヤマハリビングテック（株））より提供された2種類について実験に行った（Table参照）。最初に使用した試料Aはガラス含有10%、最終硬化温度140度のプレス成形品でありピンクの色づけがされている。追加して利用した試料Bは、ガラス含有5%で後日制作されたうすい青色の製品である。

試料の初期状態を把握するために試料Aの板材（300×350mm）の数カ所で超音波の伝播速度を測定した。試料平面上で縦波や横波センサを360度回転させて音速測定値から初期音響異方性の程度とその主軸方向を調べた。実験にはSing-Around音速測定装置を、超音波の送受信には探触子（縦波用パナメトリクス製V155、横波用KGK製5C10N、いずれも共振周波数5MHz）を用いた。縦波の反射エコーは第3反射波まで観察されるが、横波は減衰が大きく第2反射波にたいしてゲートをかけるトリガー電圧が十分でないとして、第1反射波のシングアラウンド周期のみが有効な測定値と考えた。そのため横波音速値は、第1反射波とシングアラウンド装置の遅延時間との差から伝播時間を求めた。これには測定系全体の誤差も含めた補正値を考慮した。

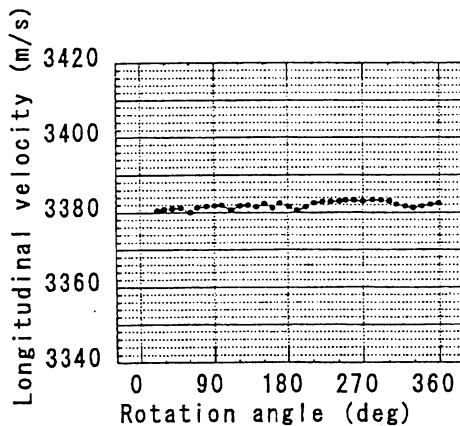


Fig.1 Longitudinal velocity change due to the transducer rotation

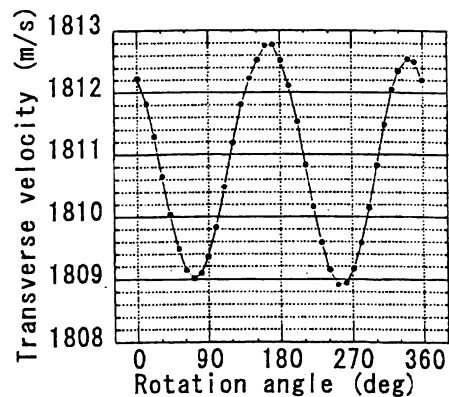


Fig.2 Transverse velocity change due to the transducer rotation

縦波はいずれの位置でもセンサーの回転によらずほぼ一定の値を示す（Fig.1）。横波音速分布は偏り方向を回転させるにつれて音速が変化し、最大音速 $V_{20}$ と最小音速 $V_{10}$ が現れる（Fig.2）。これら最大音速と最小音速は回転角90度ごとに現われ、180度を1周期としてほぼ同じ値を繰り返している。従って、異方性の主軸は-20度方向、70度方向の2方向であると推定した。このような傾向やその数値は試料Aの全体の端部を除いた場所ではほぼ同様になっている。この主軸方向を試料板上に図示するとFig.3の点線となる。結果の数値並

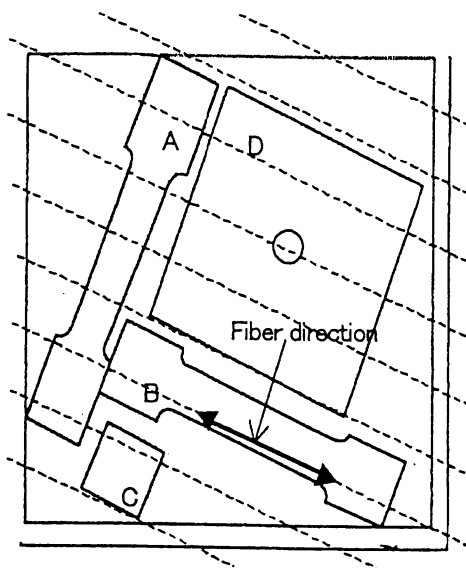
びに音速差から計算した組織音響異方性の程度をTable2にまとめた。

Table1 Test sample

	試料A	試料B
成型法	BMC	BMC
ガラス含有	10%	5%
色付け	ピンク	ブルー
母材	不飽和ポリエステル	

Table 2 Velocity and anisotropy of sample A

縦波音速	$V_{L0}=3381.9$ m/s
横波最大音速	$V_{20}=1812.6$ m/s
縦波最小音速	$V_{10}=1809.0$ m/s
組織音響異方性	$B_0=0.2$ %



### 3. 音弾性効果の測定

試料に引張り負荷を加えてそれによる音速変化を測定するための試験片としてFig.3に示した2つの主軸方向から図中に示すような短冊形の試験片A（最大音速方向と平行、試料名称A-Aと称する）、B（最小音速と平行、試料名称A-B）およびCを切り出した（図中に付した記号A、Bはこの供試料A板材の切り出し方向を示すもので後述する損傷の実験に使用する試料Bとは異なる）。予備的に引張り力を加えて弾性領域が1MPa以下で0.055%のひずみとなることを調べてから負荷による音速変化の実験を行った。

Fig. 4、5にはA-A試料に対する縦波、横波の負荷による音速変化を示す。図中の縦軸は初期状態（音速 $V_0$ ）からの音速変化率 $\Delta V/V_0$ （ $\Delta V = V - V_0$ ）で表示している。また横波の偏り方向を示すために、負荷と平行な方向および垂直な方向をそれぞれT.wave//、T.wave $\perp$ と表してある（Fig.5）。

縦波、横波のいずれの場合も幾分ばらついてはいるが、全体の傾向として応力の増加に対して舵波や横波の音速が減少している。たとえば縦波ではおよそ2MPaで0.34m/s低下する。金属では明確な直線的变化の実験結果がいくつも報告されているが、この場合も全体の傾向として直線的变化と考えると、単軸の音弾性関係式（1）を仮定できる。

$$\frac{V' - V_0}{V_0} = K' \sigma \quad (1)$$

この場合試料A-Aについて最小二乗法で求めた傾き $K'$ の値は

$$\begin{aligned} K'_{L} &= -1.78 \times 10^{-4} \quad / \text{Mpa} \\ K'_{T1} &= -0.94 \times 10^{-4} \quad / \text{Mpa} \quad \cdots \cdots \text{（負荷と偏り方向が平行）} \\ K'_{T2} &= -0.75 \times 10^{-4} \quad / \text{Mpa} \quad \cdots \cdots \text{（負荷と偏り方向が垂直）} \end{aligned} \quad (2)$$

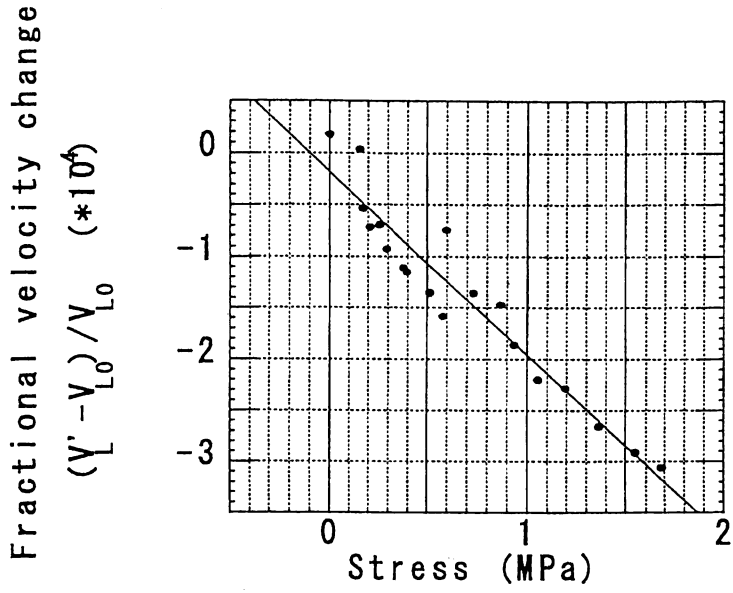


Fig.4 Longitudinal velocity change due to the applied stress

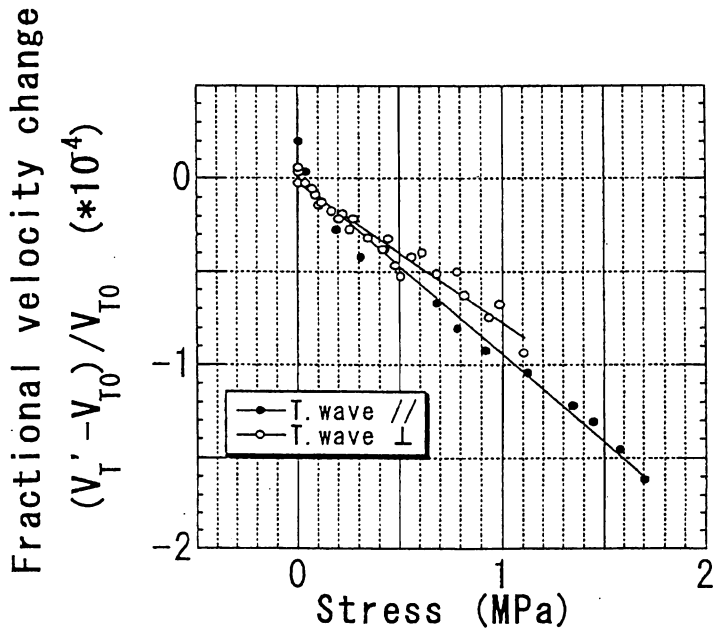


Fig.5 Transverse velocity change due to the applied stress

であるが、単軸引張力による板厚の変化も無視できない。板の長手（主軸）方向のヤング率  $E_1$ 、ポアソン  $\nu_{12}$  を用いて板厚  $d$  を  $d = d_0(1 - \nu_{12}\sigma/E_1)$  と表せば、真の音弾性定数  $K$  は

$$\therefore K = K' - \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad (3)$$

として補正される。ひずみゲージ法によって実測された試料A-Aのヤング率  $E_1 = 17.0\text{Gpa}$ 、およびポアソン比  $\nu_{12} = 0.32$  を用いると、真の音弾性定数はTable 2 のようになる。Table 3 には比較のためにEpoxy樹脂や別のGFRPの例も示しておいた（表中の  $\alpha$  は負荷方向と横波最大音速方向のなす角度をあらわす）。高分子材料や複合材料はいずれも音弾性定数が負の結果が得られている。セラミックス材でも同様の報告がある。多くの金属では負荷と平行な横波の音弾性定数が負で今回のFRPと類似の現象（音速が減少）を示している。しかし負荷に垂直な横波と縦波の音弾性定数は金属では正の値に対して、今回の実験や先の報告<sup>(8)</sup>でもFRPは負となっている。

Table3 Acoustoelastic constant ( $\times 10^{-4}/\text{MPa}$ )

		$K_L$	$K_{T1}$	$K_{T2}$
Epoxy <sup>(8)</sup>		-2.46	-4.45	-2.25
GFRP <sup>(8)</sup>	$\alpha = 0^\circ$	-0.21	-0.22	-0.16
	$\alpha = 90^\circ$	-1.23	-2.35	-0.98
In this paper	$\alpha = 90^\circ$	-1.96	-1.13	-0.94

#### 4. 損傷による音速変化

提供された試料B (Table 1 参照) は板厚7.7mmで大きさ500×390mmであった。切り出し前に初期異方性の方向を確認のため横波センサーを回転させて音速の測定を行った。結果を示すFig.6は周囲が回転角(度)で縦軸が音速(m/s)である。最大音速は80,260度、最小音速は170,350度方向で音速値も先の試料Aと幾分異なっている。この主軸方向にあわせて引張試験のための試料を切り出し短冊形に加工した。はじめに応力-ひずみ関係の測定を破断まで行った (Fig. 7)。試料B-1は応力22.3MPaで破断しこの時のひずみは0.018%であった。応力-ひずみ関係はFig. 7のB点付近まで直線的であり、やがて曲線的変化となる。このときのひずみが0.007%である。この結果を参照して別の試料B-2を切り出して初期値から段階的に図中の各点A (ひずみ0.02%), B (0.07%), C (0.09%), D (0.10%), E (0.11%) まで負荷し、除荷後に取り出してそれぞれの段階での音速を測定した。Fig 8 にその測定結果を示した。各段階での縦波の初期音速がセンサーの回転角によって変化しているの以下で以下の測定もすべて回転角による変化を詳細に調べた。初期音速は0度から90度にかけて上昇傾向を示した。ひずみ0.07%でほぼ一定、その後はひずみの増加につれて

縦波音速が回転角度とともに次第に低下している (Fig. 8 の0.09,0.10,0.11%の各ライン)。これを応力-ひずみ曲線と関連づけると、図中の記号●□▲データは応力-ひずみの直線部分、記号○■△は曲線的変化の部分での除荷後の結果であり、負荷ひずみの大きいほど音速変化も大きいといえる。センサーの回転角による音速変化の理由はハッキリしないがこの点が損傷とどのように関連するかを横波の測定結果と併せて引き続いて検討している。

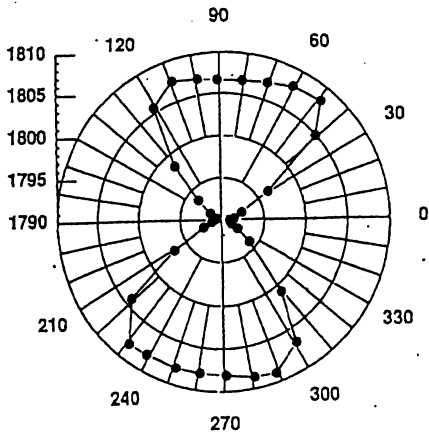


Fig.6 Transverse velocity  
And anisotropy

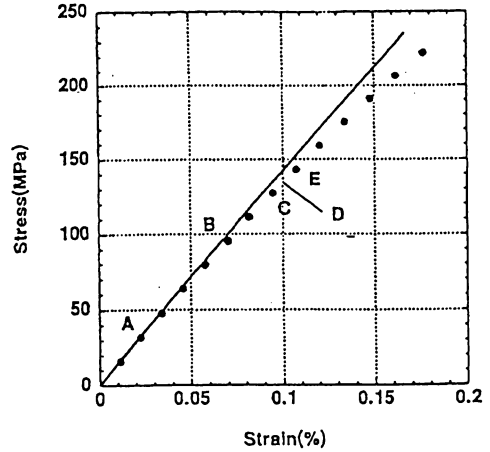


Fig.7 Stress-strain curve (Specimen B)

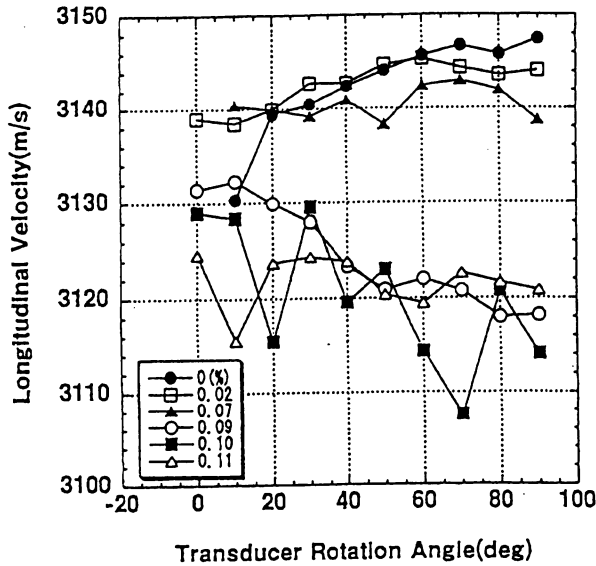


Fig.8 Longitudinal velocity change due to transducer  
Rotation angle (specimen B)

参考文献

- (1) 金原勲編, 高分子複合材料の非破壊試験・評価ハンドブック, Chap.4, 日本規格協会 (1995)
- (2) 宮入裕未ほか6名編, 複合材料の辞典Ⅱ6材料および製品検査, 朝倉書店 (1991)
- (3) 四方田重明ほか2名, 材料Vol.23 No255.1080 (1974)
- (4) 北条英光、大野ほか, ERPCon-Ex'98 概要集 B(1998)
- (5) 元木信弥ほか3名, 第28回FRPシンポジウムⅡ-33B (1999)
- (6) K.Ishihara et al, Proceedings of the 14<sup>th</sup> world conference on NDT, Vol.2,707(1996)
- (7) 小堀修身ほか2名, 第26回FRPシンポジウムⅡ-6B 70 (1996)
- (8) O. Kobori et al, Proceeding of the 8<sup>th</sup> Asia- pacific conference on NDT, 136 (1995)