



単層CFRP板の繊維配向角の同定方法に関する基礎的実験

メタデータ	<p>言語: jpn</p> <p>出版者: 日本機械学会</p> <p>公開日: 2016-02-04</p> <p>キーワード (Ja):</p> <p>キーワード (En): CFRP Plate, Fiber orientation angle, Time-averaged digital holographic Interferometry, Mode of vibration</p> <p>作成者: 松本, 大樹, 小川, 世大</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p>
URL	<p>http://hdl.handle.net/10258/3854</p>

単層CFRP板の繊維配向角の同定方法に関する基礎的実験

その他（別言語等） のタイトル	Experimental research for identification method of fiber orientation angle of single layer CFRP plate
著者	松本 大樹, 小川 世大
雑誌名	Dynamics & Design Conference
巻	2015
発行年	2015-08-24
URL	http://hdl.handle.net/10258/3854

単層 CFRP 板の繊維配向角の同定方法に関する基礎的実験

松本 大樹^{*1}, 小川 世大^{*2}

Experimental research for identification method of fiber orientation angle of single layer CFRP plate

Hiroki MATSUMOTO^{*1} and Seidai OGAWA^{*2}

^{*1} Muroran Institute of Technology, Div. of Mechanical Systems and Materials Engineering
27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, Hokkaido 050-8585, Japan

Received 29 June 2015

Abstract

This study performs to measure fiber orientation angles of single layer CFRP plates by acoustic excitation. In order to confirm the vibration mode of the CFRP plate, the laser doppler velocimeter and a time-averaged digital holographic interference device are produced. These devices are able to find the natural frequency and vibration modes of the plate in the same time. In the experiment, it is confirmed that the node line of the vibration mode is able to determine the fiber orientation angle. The aspect ratio of the plate and the order of the vibration mode have much influence on the accuracy of fiber orientation angle identification. In this study, it is clear that using the higher order of the vibration mode is effective to reduce the range of the error of the identification of the fiber orientation angle.

Key Words : CFRP Plate, Fiber orientation angle, Time-averaged digital horographic Interferometry, Mode of vibration

1. 緒 言

近年, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) は様々な工業製品の筐体や部品で利用されることが増えている。例えば, 航空機の機体や自動車部品, カメラなどの部品など, 利用範囲が広がっている。これは CFRP が金属材料に比べて比重は小さく, 比強度が高いためであり, 軽量化のメリットが大きい製品に多く用いられている。また, CFRP に限らず, 他のプラスチック製品においても, ガラス繊維により強化する場合もあり, 複合材料を用いた工業製品が多く見られるようになってきた。このような素材は, 繊維方向により強度に異方性を持つこととなり, その特性をコンピュータシミュレーションする場合には困難を伴う場合も出てきている。また, 素材物性は繊維配向角によって大きく異なることとなる。そのため, 製造時の繊維方向の確認手法が開発されてきた。例えば, 堀川ら (堀川, 寺岡, 1978) は直接観察により撮影した画像を用いて, 変形中の板材にある短繊維の配向角分布を確率密度関数の評価により明らかにしている。また, 堀川, 寺岡 (堀川, 寺岡, 1980) による別の研究では, 接写した画像から, FRP 中の繊維配向角の繊維をフランホーファー回折像から明らかにする方法が示されている。武田 (武田, 1991) は独自の光学系による画像から配向度を明らかにする手法を提案している。その他にも, X 線を用いる方法や, 走査型顕微鏡による方法が取られるが, いずれも直接観察による手法によるもので, 局所的な配向角を対象としたものである。本研究では CFRP 薄板を対象とするが, この素材は薄いために CT での観測は困難なものであった。また, 不透明な素材のため X 線などを用いる必要があり簡易な計測方法が求められている。

そこで, 本研究では, 繊維配向角の同定に力学的な手法が適用可能かどうかを検討する。具体的には曲げ振動の振動モードの変化を観測し, 繊維配向角との関係を検討することで, 同定が可能かどうかを検討する。この手

^{*1} 正員, 室蘭工業大学 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

^{*2} 学生員, 室蘭工業大学 大学院

E-mail: h_matsu@mmm.muroran-it.ac.jp

法によれば、マクロスケールでの繊維配向角の評価ができると考えられ、より簡便な素材の特性評価につながる
と考えている。

3. 実験装置および実験方法

3・1 試験片

本研究では、CFRP 薄板を対象とし、その振動モードを観測することで繊維配向角の同定を目指す。CFRP 薄板
は単層で、厚さは 0.1mm 程度である。実験はあらかじめおよそその繊維配向角がわかるように、公称の繊維方向
が示された素材から、角度を定めて切り出している。図 1 に CFRP 薄板の固定状況と、繊維配向角の定義を示す。
繊維配向角は θ で示し、板の長手方向を 90 度とする。また、表 1 に切り出した試験片の諸元を示す。

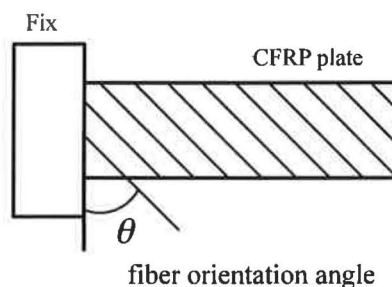


Fig. 1 Definition of Fiber orientation angle θ and support condition of CFRP plate.

Table 1 Parameters of Single Layer CFRP Plate

angle θ [deg]	length [mm]	width [mm]	thickness [mm]	mass [g]
0	50.15	9.85	0.119	0.077
15	50.25	9.95	0.121	0.077
30	50.55	10.55	0.118	0.082
45	50.50	10.05	0.116	0.077
60	50.50	10.20	0.115	0.078
75	50.65	10.30	0.117	0.081
90	50.25	10.10	0.113	0.076
0	50.10	15.00	0.116	0.113
15	50.10	15.20	0.116	0.114
30	50.20	15.40	0.115	0.113
45	50.00	15.00	0.116	0.116
60	50.20	15.15	0.124	0.119
75	49.80	14.95	0.124	0.114
90	50.10	14.80	0.118	0.114

3・2 実験装置および実験方法

試験片を加振し、その振動モードを可視化し、振動モードの節線と繊維配向角との関係を検討することで、繊維配向角の同定を目指す。

実験においては、片持ちで支持した単層 CFRP 薄板は、音波によって加振される。振動モードの確認のために、時間平均ホログラフィ干渉法による光学的な手法と、LDV (Laser Doppler Velocimeter) を用いる。図 2 に実験装

置の概略図を示す。試験片を固定し、スピーカからの音波を放射し、光学系により時間平均ホログラフィ干渉法によって振動モードを可視化する。同時に LDV により振動振幅を計測する。時間平均ホログラフィ干渉法では、原理上、振動モードの位相情報は観測できないため、位相を確認するために、LDV と加振波形とのクロススペクトルを計測する。加振用のスピーカは CFRP 板の側方とし、板先端から振動板までの距離を 60mm とする。光学系の光源には He-Ne レーザを用いており、波長は $0.6328\mu\text{m}$ である。この光学系はレンズレスホログラフィ干渉法を用いるため、参照光と物体光の光源はスペイシャルフィルタを用いて点光源としている。

実験では、振動モードの可視化に先立ち、音波の周波数を 0～1300Hz までスイープさせて試験片を加振し、試験片の応答を LDV により計測し、試験片の固有振動数を確認する。図 3 に LDV の計測点を示す。計測結果の例を図 4 に示す。

次に、応答振幅のピークの振動数を固有振動数と見立てて、その振動数で純音により試験片を加振し、時間平均ホログラフィ干渉法により振動モードを可視化する。

最後に、観測された振動モードの画像から振動モードの節を同定し、節線を画像処理により直線認識させ、節線の角度を定量化する。この節線の角度と、公称値の繊維配向角と比較することで、同定精度を検討する

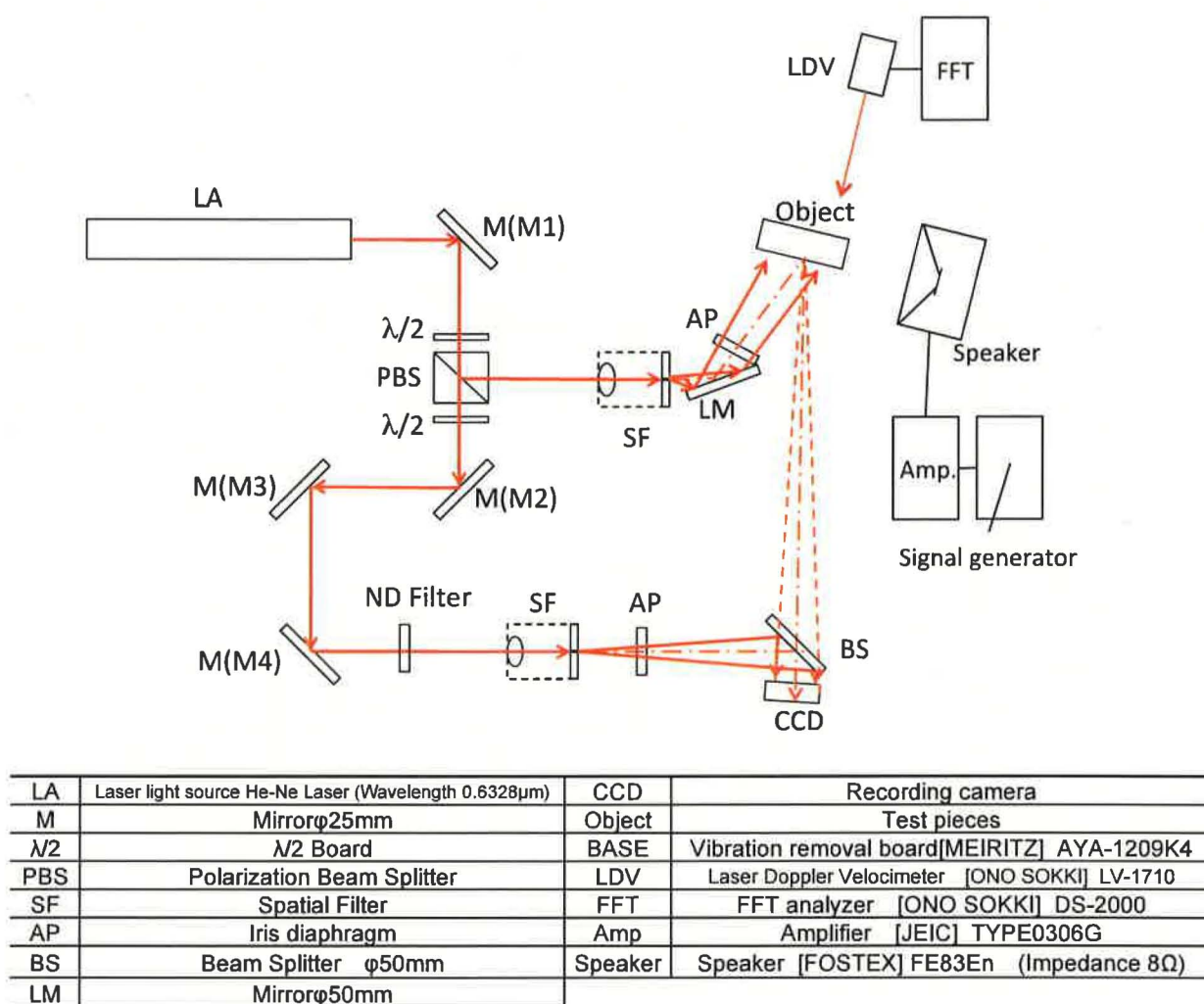


Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus (optical system of time averaged holographic interferometry).

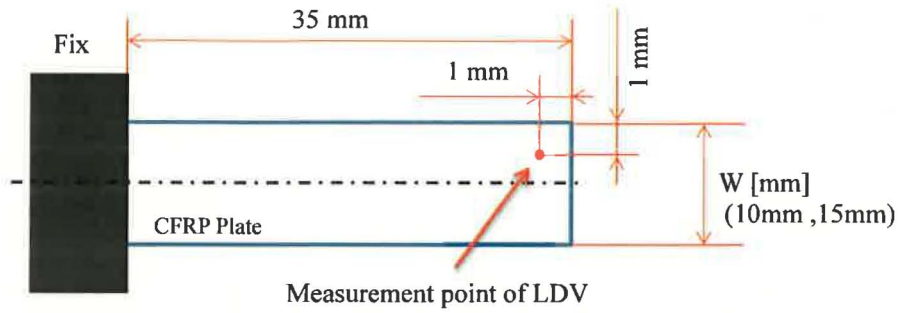


Fig. 3 Measurement point of LDV. Cantilever length is 35mm and width of test pieces are 10 and 15mm.

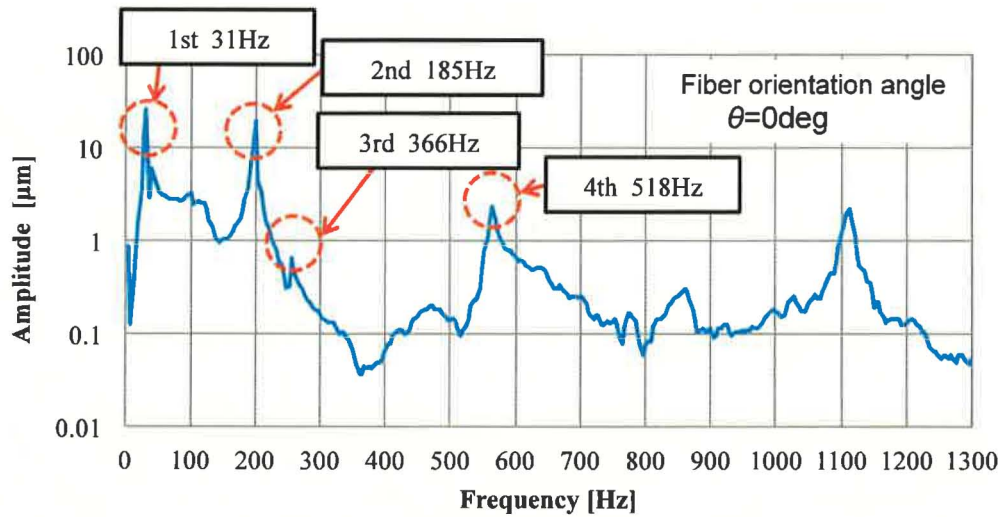


Fig. 4 Example of frequency response of CFRP thin plate that has 0deg fiber orientation angle.

3・3 時間平均ホログラフィ干渉法

本研究では、レンズレスフーリエ変換ホログラムを利用する。図2に示した光学系において物体からの反射光と点光源からの参照光とを干渉させて、CCDに記録し、記録されたスペックルを2次元フーリエ変換することで、像を再生する。このため、高速に像が再生でき、実験中にほぼリアルタイムで像は再生され、干渉縞を確認することが可能である。

CCDにおいて記録される画像は、物体から反射された反射光源からの距離と等しい距離を伝搬してきた点光源からの参照光との干渉となる。物体から距離 L 離れたスクリーン上での振幅 $U(X,Y)$ と、点光源からの回折場の振幅 $R(X,Y)$ は、フレネル回折積分によりそれぞれ以下のように表現される。

$$\begin{aligned}
 U(X,Y) &= A \exp\left\{i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda L}\right\} \iint f(x,y) \exp\left\{i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda L}\right\} \exp\left\{-i2\pi \frac{xX + yY}{\lambda L}\right\} dx dy \\
 &= A \exp\left\{i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda L}\right\} \mathfrak{F}\left[f(x,y) \exp\left\{i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda L}\right\}\right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 $f(x,y)$ は物体光の強度分布、 x,y は物体面座標系、 X,Y はスクリーン座標系（すなわち CCD）、 λ は光の波長、 i は虚数単位、 A は複素定数である。また、 $\mathfrak{F}[\dots]$ は2次元フーリエ変換の演算を示す。 x,y 面の座標 (a,b) に存在する点光源の強度は $\delta(x-a, y-b)$ で表され、同じくフレネル回折積分で表現すると、

$$\begin{aligned}
R(X,Y) &= A \exp \left\{ i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda L} \right\} \iint \delta(x-a, y-b) \exp \left\{ i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda L} \right\} \exp \left\{ -i2\pi \frac{xX + yY}{\lambda L} \right\} dx dy \\
&= A \exp \left\{ i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda L} \right\} \exp \left\{ i\pi \frac{a^2 + b^2}{\lambda L} \right\} \exp \left\{ -i2\pi \frac{aX + bY}{\lambda L} \right\}
\end{aligned} \tag{2}$$

スクリーン座標系 (CCD) の面では式(1)と(2)の干渉により強度分布が決まるので、

$$I(X,Y) = |R(X,Y) + U(X,Y)|^2 = |R|^2 + |U|^2 + R^*U + RU^* \tag{3}$$

この式の1次回折光 R^*U を計算すると、

$$\begin{aligned}
R^*U &= A \exp \left\{ -i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda L} \right\} \exp \left\{ -i\pi \frac{a^2 + b^2}{\lambda L} \right\} \exp \left\{ i2\pi \frac{aX + bY}{\lambda L} \right\} \\
&\quad \times \exp \left\{ i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda L} \right\} \Im \left[f(x,y) \exp \left\{ i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda L} \right\} \right] \\
&= A \exp \left\{ -i\pi \frac{a^2 + b^2}{\lambda L} \right\} \exp \left\{ i2\pi \frac{aX + bY}{\lambda L} \right\} \Im \left[f(x,y) \exp \left\{ i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda L} \right\} \right]
\end{aligned} \tag{4}$$

となる。撮影したホログラムの再生は、上記の方法と同様に2次元フーリエ変換により物体像が再生される。すなわち、ホログラム面に入射した光が回折され、フレネル回折積分により再生面 (ξ, η) 上で再生されるが、上記のように2次元フーリエ変換で求められ、その1次回折光の強度分布は、

$$I_1(\xi, \eta) = \Im [R^*U] = \exp \left\{ -i\pi \frac{a^2 + b^2}{\lambda L} \right\} f(\xi + a, \eta + b) \exp \left\{ i\pi \frac{(\xi + a)^2 + (\eta + b)^2}{\lambda L} \right\} \tag{5}$$

再生像の振幅分布は、物体の複素振幅を $-a, -b$ だけずらしたものととして得られる。

一方、物体が振動している場合、物体光の強度分布は、物体の振動に伴って変動する位相分布が正弦的に変化するので、 $U(X,Y,t) = \Im [f(x,y) \exp(i\Omega \sin \omega t)]$ と書ける。ここで、最終的な強度を計算する際に無関係な位相因子は省略している。このときのスクリーン上の1次回折光の強度は、露光時間で積分したものになるので、シャッタ関数 $w(t)$ を用いて、時間平均ホログラム強度は (高井, 2009),

$$I_h(X,Y) = \int w(t) I(X,Y,t) dt = \int w(t) R^*U(X,Y,t) dt \tag{6}$$

再生像の振幅強度分布は、

$$I_R(\xi, \eta) = \left| \Im [R^*U] \right|^2 \tag{7}$$

であり、一定因子を省略し、1周期 $0 \sim T$ まで時間平均すると、

$$I_R(\xi, \eta) = |f(\xi - a, \eta - b)|^2 \left| \frac{1}{T} \int_0^T \exp(i\Omega \sin \omega t) dt \right|^2 = |f(\xi - a, \eta - b)|^2 J_0^2(\Omega) \tag{8}$$

$f(\xi - a, \eta - b)$ は物体が静止しているときの再生像の輝度であるから、第1種ベッセル関数 $J_0(\Omega) = 0$ の場合の Ω が暗い干渉縞と対応するため、干渉縞の位置はベッセル関数の解により決まることになる。また、物体の振幅 d 、波長 λ 、光の入射角 θ_1 、反射角 θ_2 とすると $\Omega = 2\pi(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)/\lambda$ で与えられる。したがって、物体の変位量 d は、

$$d = \frac{\lambda \Omega}{2\pi(\cos \theta_1 + \sin \theta_1)} \tag{9}$$

により求められる。

撮影時に時間平均をとるために、露光時間を物体の運動周期よりも十分長い時間をもって撮影する。以上により、時間平均ホログラフィ干渉法により物体の振幅に応じた干渉縞が得られる。この手法によると、節となる部分は変位がないために、明るく撮影されることとなり、節線を観測するために適した手法となっている。

3・3 直線認識の手法

時間平均ホログラフィ干渉法によって得られた画像において、最も輝度が高くなる部分が節線となり、その節線の角度を求めるために、画像処理により直線認識し、その角度を定量化する。再生画像は256階調の点群で構成されている。この画像をMatlabによりエッジ抽出を行い、節線を構成する点群のエッジとなっている点を抽出する。この際に輝度の閾値は認識対象の直線が多くなりすぎないように調整している。直線認識にはハフ変換（末松，2000）を用いる。図5にハフ変換の概念図を示す。

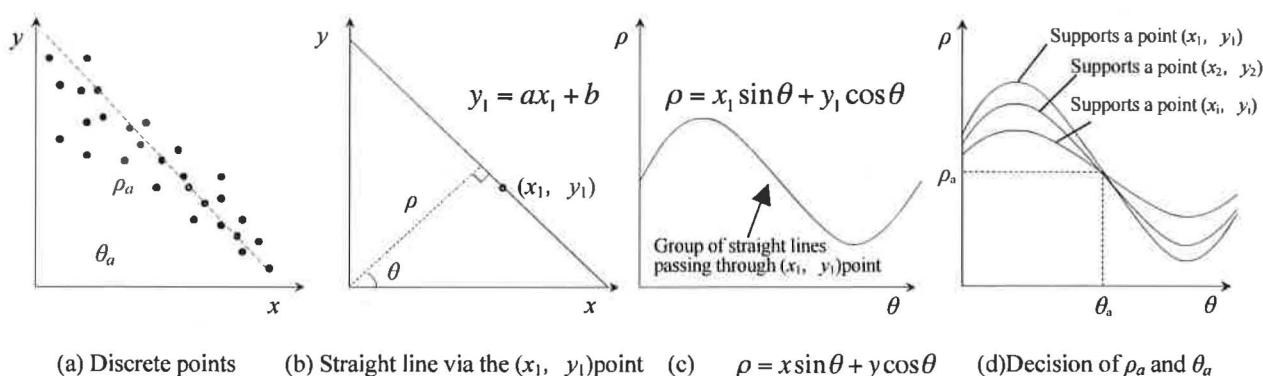


Fig.5 Theory of Hough transform

まず、図5(a)のような点群がある画像を考える。この点群のある一点 (x_1, y_1) を通るある一つの直線は次式で表される。

$$y_1 = ax_1 + b \quad (10)$$

この直線は、図5(b)に示すように原点からの垂線の長さ ρ と垂線が x 軸となす角 θ を用いれば、次のようにも表すことができる。

$$\rho_1 = x_1 \sin \theta_1 + y_1 \cos \theta_1 \quad (11)$$

この時に得られる (θ_1, ρ_1) を図5(c)のような (θ, ρ) の座標系にプロットする。さらに、点 (x_1, y_1) を通る直線は無数に存在するが、 θ を $0 \sim 2\pi$ まで変化させて上記のように座標変換すると、図5(c)のような曲線状のプロットができる。同様に、他の点 (x_2, y_2) についても、その点を通る直線に対応する (θ, ρ) の点群をプロットすると、図5(d)のように複数の曲線状のプロットが重なることになる。図5(d)のプロットのそれぞれの点は、図(b)での1本の直線を表しているため、図5(d)で最大の頻度をもつ共通点 (θ_a, ρ_a) を得れば、その値を持つ直線はそれぞれの点を通る直線のうち共通する直線となる。この θ_a の値を用いれば、直線の角度が得られる。

4. 繊維配向角同定

4・1 時間平均ホログラフィ干渉法による振動モードの可視化結果

図6に時間平均ホログラフィ干渉法による単層CFRP薄板の振動モードの可視化結果を示す。供試体は幅10mm、厚さ0.1mm、片持ちの長さ35mmの場合で、繊維配向角を0度から90度まで15度刻みで変更したものである。図6はそれぞれの試験片において得られた固有振動数を低周波数から順番に次数を定めて、共振させた場合の振

動モードの可視化結果である。1次モードの可視化結果を見ると、0degでは干渉縞が長手方向に対して垂直になっており、曲げ振動が起きていることがわかる。

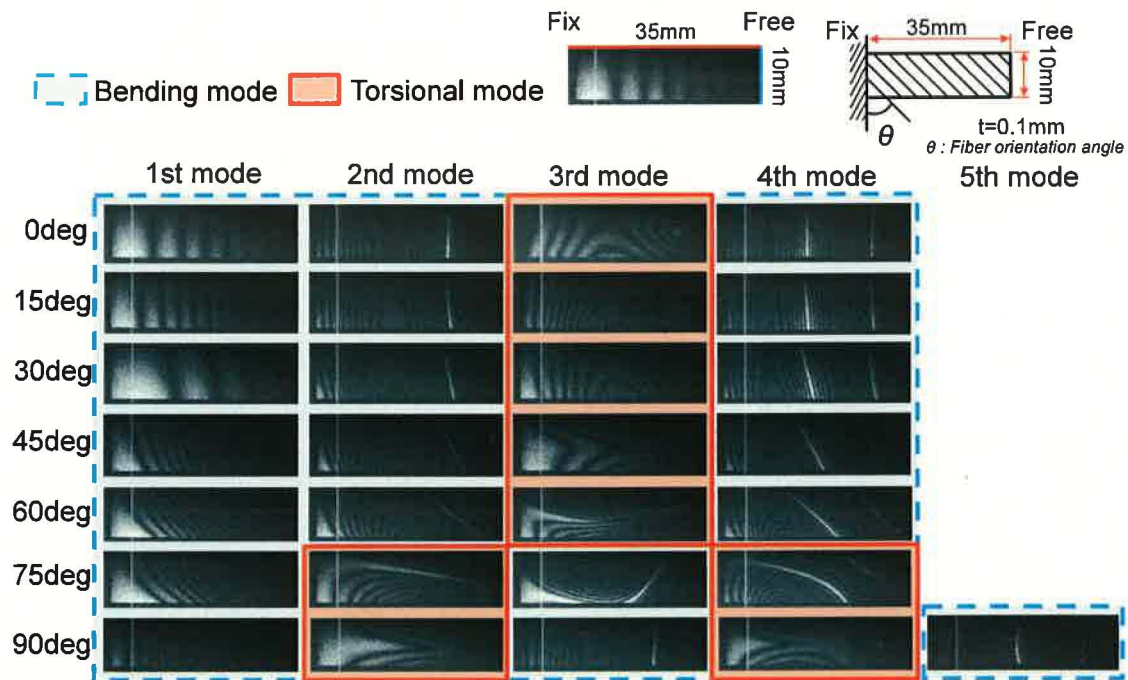


Fig. 6 Vibration modes of CFRP plates. Plate size is 35mm length and 10mm width.

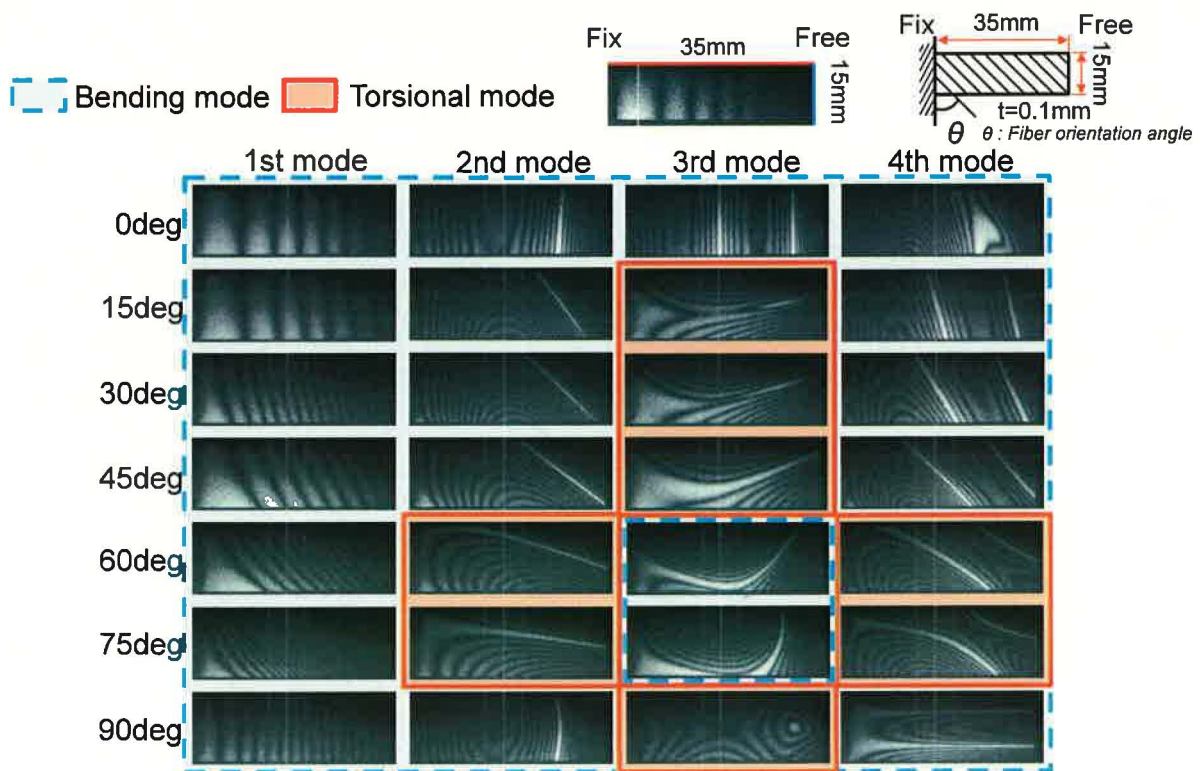


Fig. 7 Vibration modes of CFRP plates. Plate size is 35mm length and 15mm width.

自由端側の先端変位量は、固定側から数えて7本の暗線があるため、式(9)より7番目の0点のベッセル関数の解を用いて、およそ1.1[μm]となる。繊維配向角が変化すると干渉縞が材料長手方向に対して斜めになっていることがわかり、先端の変位は短手方向に対して傾いて振動していることがわかる。また、2次モードでは、自由端側に明るい筋が現れ、節線を確認することができる。節線の角度は繊維配向角に従って傾いているように見えるが、75degにおいては繊維配向角とは異なる向きに節線が現れている。この振動モードはLDVでの観測によって、短手方向では逆位相で振動していることが確かめられており、ねじれのモードになっている。こうしたモードは3次モードでも現れており、図中では赤枠で示している。また、75deg, 90degでは曲げモードが現れている。さらに次数の高い4次モードでは、繊維配向角が0~60degでは、節線は2本現れていることがわかる。90degの繊維配向角では、曲げの3次モードは5次モードとして観測されている。

次に、図7に幅15mmの試験片の実験結果を示す。試験片の幅が変わることで、ねじりモードの固有振動数が変化し、曲げモードとの固有振動数の大小関係が、幅10mmの場合と異なっていることがわかる。例えば、繊維配向角が0degの場合にはねじれモードは明確に観測できなかったが、60degにおいては、曲げの2次モードよりも低次でねじりモードが出現する。このように、試験片のアスペクト比が変わると、ねじりモードの現れかたや曲げ振動でも節線の角度が変化する事象が得られた。このことから、繊維配向角の同定においては、試験片形状への依存性が予想できる。

4・2 繊維配向角同定結果

時間平均ホログラフィ干渉法により得られた二次モードの画像に、ハフ変換による直線の検出を行い、繊維配向角が同定できるか確認する。直線認識に利用する振動モードは、曲げ2次モードと曲げ4次モードを用いる。これは、再生画像での節線のコントラストが高く、直線認識処理におけるエッジ抽出が容易になるメリットがあるためである。さらに節線のみを直線検出をするために、固定部側の明るい部分は切り取り、無視している。

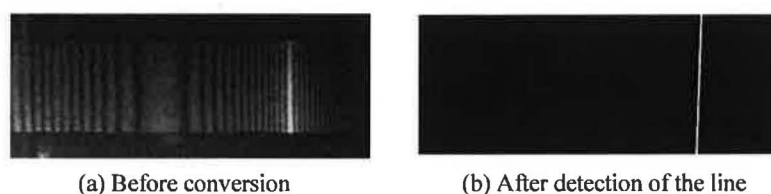


Fig.8 Detection result of the straight line of fiber orientation angle 0deg

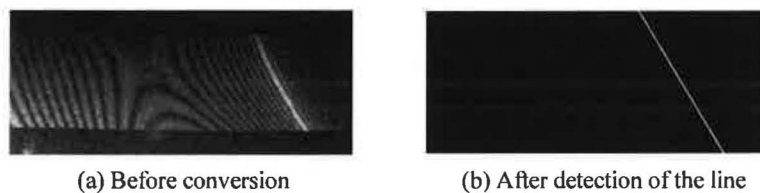


Fig.9 Detection result of the straight line of fiber orientation angle 45deg

Table 2 Angle and error of the straight line

繊維配向角 [deg]	検出後 直線の角度 [deg]	誤差 [deg]
0	1	1
15	11	4
30	10	20
45	32	13
60	57	3
75	80	5
90	0	90

まず、2次モードでの直線認識の結果を説明する。図8、9に直線認識結果の例を示す。試験片幅は10mmである。図(a)は再生画像で、図(b)は直線認識された節線である。表2に認識された直線の角度を示す。曲げの2次モードでは誤差が20degと大きく、繊維配向角90degでは0degの場合と同じモードになるため、判別できない結果となった。

この結果より、曲げの2次モードでは試験片形状の影響が大きいものと考えた。そこで、さらに高次の振動モードを利用することを考え、3次モード以上のモードでの同定を試みる。図10、11に直線認識に利用する振動モードの可視化結果を示す。

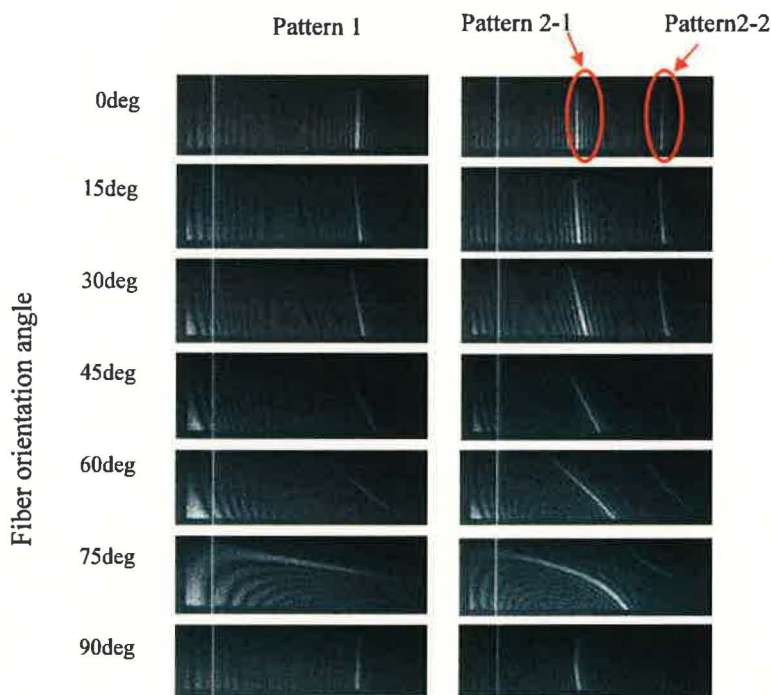


Fig. 10 Vibration modes of CFRP plates. Plate size is 35 mm length and 10 mm

図10、11に示すように、2種類のモードを採用したが、一つは節線が一本のもので、高次モードでは2本の節線があるものを採用した。節線が一本の場合を選択したものを Pattern 1, 2本の節線を持つ振動モードの節線のうち、固定端側を選択した場合を Pattern 2-1, 自由端側を採用した場合を Pattern 2-2 とよぶ。図10には試験片の突き出し長さが35mm, 幅10mmの試験片の結果を、図11には突き出し長さ35mm, 幅15mmの試験片の結果を示す。これらの結果より、節線を直線認識させた。図12、13に、それぞれ注目した節線から得られた直線認識結果を示す。図12を見ると、緑の直線で示した同定誤差がないことを意味する直線から、いずれのプロットもずれていることがわかる。また、いずれの Pattern 1, Pattern 2 のいずれの節線を選択しても、誤差は最大20degほどであることがわかる。一方、図13を見ると、試験片の幅が15mmの場合には、Pattern 2-1, Pattern 2-2 のいずれにおいても、節線の角度は繊維配向角に沿った角度で認識されていることがわかった。しかしながら、Pattern 1での誤差は大きい。このことから、繊維配向角の認識には高次の振動モードを採用する必要があると考えられるが、図12の結果では高次モードでも同定精度が変わらない結果から考えて、試験片のアスペクト比の依存性が大きいことが伺える。

以上のことから、繊維配向角を振動モードの節線で同定するためには、試験片のアスペクト比の最適化と採用する振動モードの選択の最適化が必要であることがわかった。特に低次モードでの直線認識結果は形状の影響を強く受けることが考えられ、比較的高次のモードを選択することが同定の精度を向上させることにつながると考えられる。

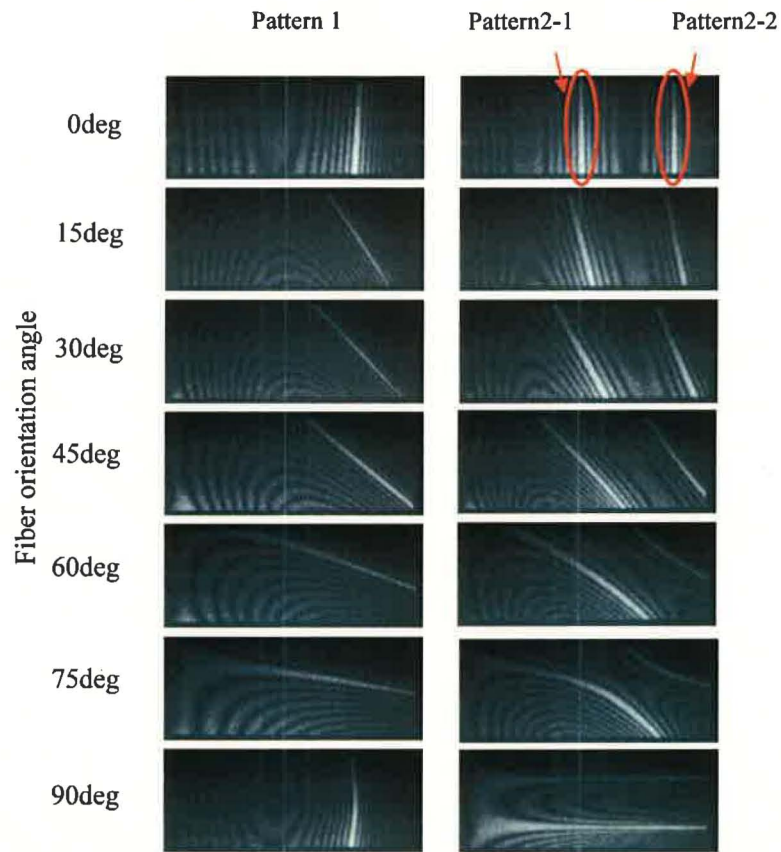


Fig. 11 Vibration modes of CFRP plates. Plate size is 35 mm length and 15 mm width.

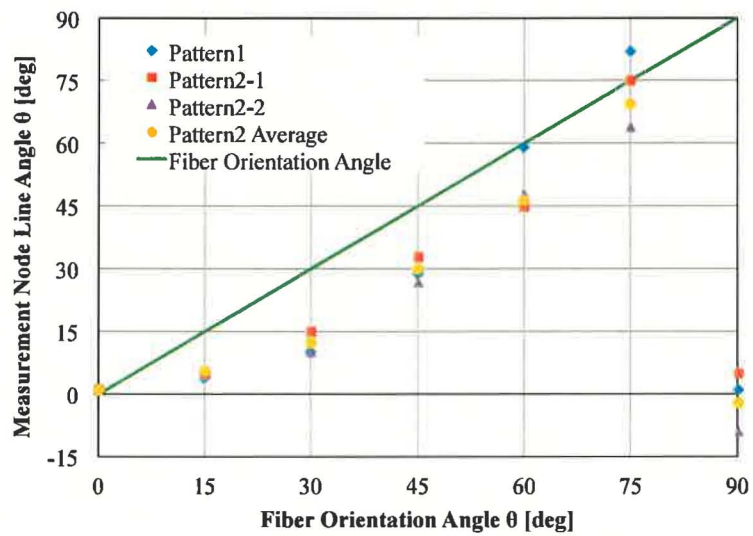


Fig. 12 Result of Identification of fiber orientation angle. Plate size is 35 mm length and 10 mm width.

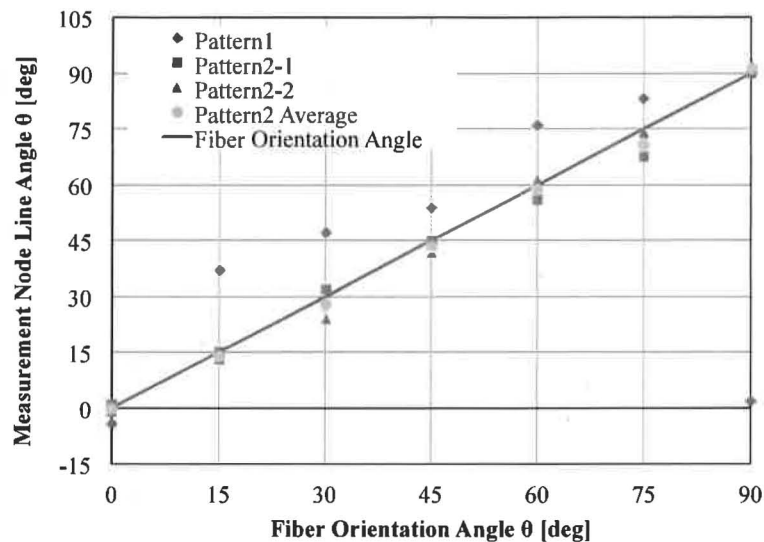


Fig. 13 Result of Identification of fiber orientation angle. Plate size is 35 mm length and 15 mm width.

5. 結 言

本研究では、CT では可視化の難しい薄い単層 CFRP 板の繊維配向角の同定を目指し、片持ち梁の横振動の振動モードを時間平均ホログラフィ干渉法により可視化し、その際に現れる節線の角度をハフ変換を用いて認識させた。その結果、以下のことが明らかになった。

1. レンズレス時間平均ホログラフィ干渉法は、デジタル処理により迅速に振動モードを可視化することが可能である。
2. ホログラムの再生画像の振動モードの節線を直線認識させ、その角度と繊維配向角との比較を行った。その結果、35x10mm の片持ち梁の試験片では最大 20deg の誤差が生じたが、35x15mm の試験片では、節線が 2 本ある高次モードの画像を処理することによって、5deg 以内で同定することができた。
3. 試験片のアスペクト比と採用する振動モードの影響が同定精度に大きな影響を及ぼすが、比較的アスペクト比は小さめで且つ高次モードを採用することで同定精度を上げることができると考えられる。

6. 文 献

- 末松良一，山田宏尚，画像処理工学，株式会社コロナ社（2000）
- 高井信勝，デジタルホログラフィによるホログラフィ振動解析，北海学園大学工学部研究報告(2009)，36，pp121-141
- 武田啓，繊維複合材における繊維配向度評価，繊維学会誌(1991)，Vol.47，No.1，P52-57
- 堀川明，寺岡文雄，一軸伸長過程における FRP 中の短繊維の配向角変化，繊維機械学会誌(1978)，Vol.31，No.10，T141-146
- 堀川明，寺岡文雄，FRP 中の繊維配向角評価法（第 1 報）ブラウンホフ解析像による繊維配向角評価の基礎，繊維機械学会誌(1980)，Vol.33，No.1，T1-6
- Pascal Picart, Julien Leval, Denis Mounier, Smuel Gougeon, Time-averaged digital holography, Optics letters(2003), Vol.28, No.20, p1900-1902
- Paul Smigielski, ホログラフィーによる計測と検査ー工業で使われるホログラフィー，株式会社 新技術コミュニケーションズ（1999）