研究論文

FBG センサを用いた CFRP 積層板中の
非軸対称熱残留ひずみの測定岡部 洋二^{*1}, 辻 良平^{*2}, 武田 展雄^{*3}

(2003 年 12 月 4 日受付)

Measurement of Non-Axisymmetric Thermal Residual Strain in
CFRP Laminates Using FBG SensorsYoji OKABE,^{*1} Ryohei TSUJI^{*2} and Nobuo TAKEDA^{*3}

(Received December 4, 2003)

Fiber Bragg grating (FBG) sensors are usually used for the measurement of axial strain. However, when a non-axisymmetric transverse strain is applied to the FBG sensor, the reflection spectrum from the sensor splits into two peaks because of the birefringence effect. Using this phenomenon, in this research, the FBG sensor was applied to the measurement of transverse thermal residual strain in CFRP laminates. First, the FBG sensor was compressed transversely in order to investigate the deformation of the reflection spectrum due to the birefringence effect. The wavelength shifts of the two peaks in the spectrum agreed with those calculated theoretically. Then, the FBG sensor was embedded into a CFRP cross-ply laminate, and the wavelength shifts of the two peaks were measured as the temperature of the laminate was changed. From the peak wavelengths, the non-axisymmetric component of the thermal residual strain in the laminate could be obtained in consideration of the birefringence effect and the strain transfer from the laminate to the optical fiber. Furthermore, the effect of the fiber coating on the measurement sensitivity was clarified theoretically.

1. 序 論

近年, 複合材料を用いた構造物の健全性や耐久性を評価・保証するための技術革新の一つとして, ヘルスモニ

タリング技術が注目を集めている。そのヘルスマニタリングシステムに使用するセンサとしては, 光ファイバセンサが有望視されている。これは, 光ファイバが繊維状で柔軟性を有し, 耐熱性も高いため, 複合材料中への埋め込みが容易だからである。さらに, 軽量かつ十分な強度を有し, 耐食性も高いため, 母材の力学的特性に及ぼす影響も小さい。また, 電磁誘導の影響を受けにくいいためノイズに強く, 引火・爆発の危険性も無い。これらの利点を生かし, 知的材料・構造システムに適した様々なタイプの光ファイバセンサが開発されている¹⁾。

それら光ファイバセンサの内, 複合材料構造のヘルスマニタリングへの適用が期待されているものの一つが, FBG (fiber Bragg grating) センサである。FBG センサは, 外見上は単なる光ファイバと同一であるが, ひずみや温度の絶対測定が可能であり, しかも 1 本の光ファイバに沿って複数のセンサ部を形成することが可能などといった利点を有している²⁾。

この FBG センサは, 光ファイバ軸方向のひずみに敏

^{*1} 東京大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻講師 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of Aeronautics and Astronautics,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*2} 豊田自動織機共和工場技術開発センター研究開発部 (474-8601 愛知県大府市共和町茶屋 8 番地)

Technology Development Center, Kyowa Plant,
Toyota Industries Corporation, 8 Chaya, Kyowachō, Obu, Aichi 474-8601, Japan

^{*3} 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻教授 (277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)
Professor, Department of Advanced Energy,
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan

Fig. 1 Fiber Bragg grating (FBG) sensor.

感であるため、一般には軸方向ひずみの測定に利用されている。さらに、FBG センサの反射光スペクトル形状は軸方向ひずみの不均一性にも敏感であるため、複合材料内部の損傷発生に伴う不均一ひずみ分布を利用して、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層板内のトランスバースクラックや層間剥離の検出にも適用が試みられている^{3,4)}。これらは FBG センサの軸方向ひずみへの感度の高さを利用しているが、それに対し、FBG センサに非軸対称な横方向ひずみが加わった場合には、複屈折効果によって反射光スペクトルが2個のピークに割れることも確認されている⁵⁻⁹⁾。よって、逆にこの現象を利用することで、軸方向だけではなく、横方向のひずみも計測可能になると考えられる。そこで本研究では、CFRP 積層板中に FBG センサを埋め込み、その反射光スペクトル形状を観察することで、積層板中に生じた熱残留ひずみの、光ファイバ軸に関して非軸対称な成分を複屈折効果によって計測することを試みる。この横方向熱残留ひずみは、従来の手法では非破壊で計測することが困難であり、本手法の確立は有意であると考えられる。

2. FBG センサ

FBG センサとは、Fig. 1 に示すように、光ファイバ中の光が伝播するコア部において、軸方向に屈折率を周期的に変化させてブラッグ格子を形成したものであり、通常その格子間隔は約 $0.5 \mu\text{m}$ である。この FBG センサに広帯域の光を入射させると、ブラッグ格子に対応したブラッグ波長での狭帯域の光のみが反射して戻ってきて、それ以外の成分は透過していく。そのブラッグ波長 λ_B は、格子間隔を Λ 、平均屈折率を n とすると、以下の式で表される。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

Fig. 2 Birefringence effect on a FBG sensor.

Fig. 3 Experimental setup for the transverse compression test.

この Λ と n は、軸方向ひずみと温度に依存して変化するため、ブラッグ波長 λ_B のシフト量から、軸方向ひずみまたは温度変化を検出できる⁹⁾。

しかしこの FBG センサに、光ファイバの軸に関して非軸対称な、軸に垂直な横方向ひずみが生じた場合、複屈折効果で2個の異なるブラッグ波長が現れるため、反射光スペクトルの形状に変化が生じる。その原理としては、光ファイバに非軸対称な応力が加わると、光ファイバの軸に垂直な断面内における2個の主軸方向 x_p と x_q に沿って、屈折率が異なる値 n_p と n_q を持つ。そのため、光は Fig. 2 に示すように、 x_p と x_q を法線とする2つの主軸面に沿って偏光した状態で伝播していく。すると、それぞれの偏光面での屈折率が異なるため、それぞれの反射光のブラッグ波長も異なり、反射光スペクトルには2個のピークが現れる⁶⁾。

3. 圧縮試験による複屈折効果の確認

上述の複屈折効果を利用して、CFRP 積層板中に生じた熱残留ひずみのうち、光ファイバ軸に関して非軸対称な成分の測定を試みるが、まず、FBG センサを CFRP 積層板に埋め込む前に、FBG センサ単体に直接横方向の圧縮荷重を掛け、複屈折効果による反射光スペクトルの形状変化を確認した。

Fig. 4 Reflection spectra measured under transverse compression load.

Fig. 5 Wavelength shifts of the peaks obtained from the compression test and the theoretical analysis.

その実験システムを Fig. 3 に示す。2 枚のスライドガラスで FBG センサをダミー用光ファイバと共に挟み、ゴム板を介して、両面から小型試験機 (Rheometric Scientific, Inc., MiniMat2000) を用いて準静的な圧縮荷重を掛ける。ダミー用光ファイバは、2 枚のスライドガラスを平行に保つために使用している。用いた FBG センサは、樹脂被覆を除去した通常のサイズ (日立電線 (株)、クラッド径: $125\ \mu\text{m}$ 、コア径: $10\ \mu\text{m}$) のもので、グレーティング長は $10\ \text{mm}$ である。FBG センサには ASE 光源 (安藤電気 (株)、AQ 4310 (155)) から光を入射させ、FBG からの反射光スペクトルを光スペクトラムアナライザ (安藤電気 (株)、AQ 6317) で観察する。

その圧縮荷重過程中に測定した反射光スペクトルを Fig. 4 に示す。約 $2\ \text{N/mm}$ 付近でスペクトルが 2 個の

Fig. 6 Analysis model for the optical fiber submitted to concentrated force.

Table 1 Mechanical properties of the optical fiber.⁽¹⁾

Young's modulus E_f (GPa)	73.1
Poisson's ratio ν_f	0.16
Thermal expansion coefficient α_f ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	0.5

ピークに割れ始め、それぞれのピークは無負荷状態での最大ピークの約半分の高さになっていることがわかる。そして、圧縮荷重の増加に伴い、2 個のピーク間の距離が増大していく様子が確認できる。そこで、それぞれのピークにおいて、最大値の 90% の高さにおける中心波長をピーク波長 (λ_p , λ_q) と定義し、圧縮荷重に対してプロットしたものを Fig. 5 に示す。ピーク間距離が荷重に対して線形に増加していることがわかる。

4. 複屈折効果の理論解析との比較

次に、実験的に示された横圧縮荷重とスペクトルの割れとの関係を、理論解析により検証した。まず始めに Fig. 6 に示すように、光ファイバ (半径: a) の軸に垂直な x 軸方向に集中荷重 P が加わった場合の光ファイバ中心のコア部における応力を、2 次元問題として Airy の応力関数を用いて計算する。この場合の中心部分での応力成分は、次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$\sigma_x^{\text{core}} = -\frac{3P}{\pi a}, \quad \sigma_y^{\text{core}} = \frac{P}{\pi a}, \quad \tau_{xy}^{\text{core}} = 0 \quad (2)$$

ここで、光ファイバ断面内における平面ひずみ状態 ($\varepsilon_z = 0$) を仮定し、応力成分 σ_x^{core} と σ_y^{core} からひずみ成分 $\varepsilon_x^{\text{core}}$ と $\varepsilon_y^{\text{core}}$ を求める。その際に用いた光ファイバの物性値⁽¹⁾を Table 1 に示す。

これらのひずみ成分を用いて、温度が定常で軸方向ひずみ $\varepsilon_z^{\text{core}}$ とせん断ひずみ $\varepsilon_{xy}^{\text{core}}$ が 0 の場合の、各主軸方向の屈折率変化が次の通りに表される⁽¹¹⁾。

Fig. 7 Analysis model for the optical fiber embedded in a unidirectional CFRP laminate under non-axisymmetric strain.

$$\begin{aligned} \Delta n_p &= -\frac{n_0^3}{2} \left\{ (p_{11} + p_{12}) \frac{\epsilon_x^{\text{core}} + \epsilon_y^{\text{core}}}{2} \right. \\ &\quad \left. + (p_{11} - p_{12}) \frac{|\epsilon_x^{\text{core}} - \epsilon_y^{\text{core}}|}{2} \right\} \\ \Delta n_q &= -\frac{n_0^3}{2} \left\{ (p_{11} + p_{12}) \frac{\epsilon_x^{\text{core}} + \epsilon_y^{\text{core}}}{2} \right. \\ &\quad \left. - (p_{11} - p_{12}) \frac{|\epsilon_x^{\text{core}} - \epsilon_y^{\text{core}}|}{2} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 n_0 は初期の平均屈折率、 p_{11} と p_{12} は光弾性定数である。今、軸方向ひずみ ϵ_z^{core} が 0 と仮定しているので、ピーク波長の変化 $\Delta\lambda$ と屈折率変化 Δn は次式の関係にある。ここで、 λ_0 は初期のブラッグ波長である。

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = \Delta n/n_0 \quad (4)$$

よって、式(4)と式(3)から、横圧縮荷重下でのピーク波長のシフト量を計算することができる。

この計算手順に基づいて計算したピーク波長も、Fig. 5に示す。実験結果と比較すると、長波長側のピーク波長シフト量に若干のずれが見られる。しかし短波長側のピークはほぼ一定であるのに対し、長波長側のピークは荷重に比例して増加していくといった傾向をよく再現している。よって、反射光スペクトルの割れは複屈折効果によって説明できることが明らかとなった。

5. 光ファイバと積層板とのひずみ伝達

ここで、光ファイバのコア部における、光ファイバ軸に垂直な主ひずみを ϵ_p^{core} と ϵ_q^{core} で表し、そのコア部における非軸対称ひずみ成分 ϵ_d^{core} を次式で定義する。

$$\epsilon_d^{\text{core}} = |\epsilon_p^{\text{core}} - \epsilon_q^{\text{core}}|/2 \quad (5)$$

すると、2個のブラッグ波長 λ_p 、 λ_q と次の関係で表される^{5,7,8)}。

Table 2 Mechanical properties of T800H/3631 unidirectional laminates.^{12,13)} The direction of carbon fibers is expressed by the index 1.

Elastic moduli (GPa)	E_1	148
	E_2	9.57
	G_{12}	4.50
Poisson's ratios	ν_{12}	0.356
	ν_{23}	0.49
Thermal expansion coefficients ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	α_1	-0.6
	α_2	36

$$|\lambda_p - \lambda_q| = n_0^2 \lambda_0 (p_{12} - p_{11}) \epsilon_d^{\text{core}} \quad (6)$$

よって、測定した反射光スペクトルの2個のピーク波長から、光ファイバのコアにおける非軸対称ひずみ成分 ϵ_d^{core} を求めることが可能となる。

しかし、光ファイバのコアにおけるひずみと、光ファイバが埋め込まれた積層板中のひずみは異なる。そのため、光ファイバコアでの ϵ_d^{core} と、積層板での非軸対称ひずみ成分 $\epsilon_d^{\text{laminate}}$ との関係を求める必要がある。そこでまず、厚さと幅が十分大きなCFRP一方向材中に、繊維に平行に光ファイバが埋め込まれていると仮定して、 ϵ_d^{core} と無限遠での非軸対称ひずみ成分 ϵ_d^∞ との関係を応力関数を用いて求める。

今、Fig. 7のように光ファイバの中心を原点として座標系を設定すると、応力関数を用いることで、積層板内および光ファイバ内の応力は次式で表される¹¹⁾。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -2 \left(\chi_1^i + \frac{2\chi_2^i}{r^2} + \frac{3\chi_3^i}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= 2 \left(\chi_1^i + 6\chi_2^i r^2 + \frac{3\chi_3^i}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= 2 \left(\chi_1^i + 3\chi_2^i r^2 - \frac{\chi_3^i}{r^2} - \frac{3\chi_4^i}{r^4} \right) \cos 2\theta \end{aligned} \quad (7)$$

$i = \text{Laminate or Optical Fiber}$

ここで、 $\chi_1^i \sim \chi_4^i$ は、積層板と光ファイバについてそれぞれ4個ずつの未知定数である。これらを、下記の境界条件を用いることで求めていく。

- (a) $r=0$ において、応力が有限の値を持つ。
- (b) 無限遠 ($r \rightarrow \infty$) において、応力が有限の値を持つ。
- (c) 光ファイバと積層板の界面において、変位 (u_r , u_θ) および半径方向の応力 (σ_r , $\tau_{r\theta}$) が連続である。
- (d) 無限遠における半径方向のひずみは次式で与え

られる。

$$\epsilon_r|_{r \rightarrow \infty} = \epsilon_d^{\infty} \cos 2\theta \quad (8)$$

そこで、CFRP に T 800 H/3631 (東レ(株)) を用いた場合について計算を行った。その際、CFRP には Table 2 の物性値^{12,13)} を、光ファイバには Table 1 の物性値を用いた。その結果、光ファイバコアと積層板無限遠での非軸対称ひずみ成分の伝達係数 $k_d = \epsilon_d^{\text{core}} / \epsilon_d^{\infty}$ は、下記の値となった。

$$k_d = 0.1570 \quad (9)$$

ただし、この応力関数を用いた計算は、一方向材の無限体にのみ適用できるが、実際に熱残留ひずみの測定対象とするものは繊維方向の異なる層から成る積層板であり、光ファイバが埋め込まれた層には厚さ方向の制限がある。そこで、応力関数によって求めた式(9)が直交積層板にも適用できるかどうかを確認するため、2次元 FEM 解析による計算結果と比較を行った。

Fig. 8 2D model of the cross-ply laminate with an optical fiber for FEM analysis.

積層構成は $[90_3/0_3/90_3]$ とし、 0° 層の中心に被覆を除去した光ファイバ (外径 $125 \mu\text{m}$) を埋め込んだ CFRP 直交積層板を考えて、Fig. 8 に示す 2 次元モデルを用い、硬化温度 (185°C) から室温 (20°C) まで温度を変化させた場合について、ABAQUS を用いて FEM 解析を行った。その結果得られた非軸対称ひずみ成分の分布を Fig. 9(a) に示す。次に、この結果と応力関数を用いた結果を比較する。そこで光ファイバを埋め込んでいない積層板について同様に FEM 解析を行い、その結果得られた 0° 層内でほぼ一様に生じている非軸対称熱残留ひずみ成分を、Fig. 7 の無限遠での境界条件として与え、応力関数を用いて計算した結果を Fig. 9(b) に示す。FEM による計算結果 (Fig. 9(a)) と比較すると、非軸対称ひずみ成分の分布はほぼ一致していることがわかる。これは、この積層構成において、 0° 層内の非軸対称ひずみ成分が光ファイバから離れて 90° 層に近づくにつれ一定値に収束していているので、この 0° 層が光ファイバに比べて無限体で近似できるほど十分に大きいと考えられるためである。ちなみに、FEM 解析において、光ファイバを埋め込んでいない積層板の 0° 層に生じる非軸対称ひずみ成分 $\epsilon_d^{\text{laminate}}$ と、光ファイバを埋め込んだ場合のコアに生じる非軸対称ひずみ ϵ_d^{core} との関係は、次式の結果となった。

$$\epsilon_d^{\text{core}} / \epsilon_d^{\text{laminate}} = 0.1564 \quad (10)$$

この値は、応力関数を用いた場合の伝達係数 (式(9)) とほぼ一致している。よって、この積層構成および光ファイバ埋め込み位置においては、 0° 層から光ファイバ

Fig. 9 Distribution of the non-axisymmetric strain ϵ_d around the embedded optical fiber: (a) calculated by FEM analysis; and (b) calculated using Airy's stress function.

Fig. 10 Reflection spectra from the embedded FBG sensor measured during the cure cycle: (a) during the heating process; and (b) during the cooling process.

コアへの非軸対称熱残留ひずみ成分の伝達が、式(9)を用いて十分に評価できることがわかった。

6. 直交積層板中の非軸対称熱残留ひずみ成分の測定

前述までの測定原理に基づき、実際にCFRP積層板内部での熱残留ひずみの非軸対称成分の測定を試みた。積層構成は前章の解析と同じく $[90_3/0_6/90_3]$ の直交積層とし、CFRPにはT 800 H/3631を用いた。そしてこの 0° 層の中心に、被覆を除去したFBGセンサ(クラッド径: $125\ \mu\text{m}$, コア径: $10\ \mu\text{m}$, グレーティング長: $10\ \text{mm}$)を埋め込んだ。

この積層板の成形中に測定した反射光スペクトルの測定結果をFig. 10に示す。昇温中においては、温度の上昇に伴って中心波長が長波長側にシフトしているが、まだ積層板の硬化前なので光ファイバに非軸対称ひずみが生じず、スペクトルは初期の形状を保ったままである。しかし、硬化後に冷却していくと、非軸対称熱残留ひずみが発生するため、温度の低下に伴ってスペクトル形状が変化し、室温状態(20°C)においてははっきりと2個のピークが表れていることが確認できる。

その成形後、恒温槽内に積層板を入れ、再び積層板の温度を変化させながら測定した反射光スペクトルをFig. 11に示す。加熱時には、温度上昇に伴って熱残留ひずみが解放されるため、スペクトル形状が初期形状に戻っていきつつあるが、冷却時には逆に熱残留ひずみの非軸対称性が強くなるため、すなわち式(5)で定義される

Fig. 11 Reflection spectra from the embedded FBG sensor measured as the temperature was changed after the manufacturing of the laminate: (a) during the heating of the laminate; and (b) during the cooling of the laminate.

Fig. 12 Wavelength shifts of the peaks in the spectra from the FBG sensor embedded in a CFRP cross-ply laminate.

ϵ_d^{core} が大きくなるため、スペクトルの分離ピーク間距離が増大している。そこで、測定した反射光スペクトルからピーク波長を抽出し、温度に対してプロットしたグラフをFig. 12に示す。約 50°C 以下の温度において、2個のピークが生じており、温度低下に伴ってピーク間の距離が広がっていることがわかる。ただし、極低温領域においては、ピークシフト量が減少し、温度変化に対して若干の非線形性が見られるが、これは、極低温領域では材料の熱膨張係数やFBGセンサの光学特性が変化するためであると考えられる¹⁴⁾。

これらのピーク波長から、式(6)を用いて光ファイバのコアにおける非軸対称ひずみ成分 ϵ_d^{core} を求め、さら

Fig. 13 Non-axisymmetric component of thermal residual strain obtained from the experiment and the FEM.

に、式(9)のひずみ伝達係数を用いて積層板の0°層に生じた非軸対称ひずみ成分 ϵ_a^0 を計算した。その際に式(6)で用いたFBGの光学パラメータの値は、 $n_0=1.449$ 、 $p_{11}=0.113$ 、 $p_{12}=0.252$ である。以上の手順で求めた各温度における ϵ_a^0 をFig. 13に示す。また、比較のため、同じ条件の下で2次元FEM解析によって計算した ϵ_a^0 も実線で示す。スペクトルの測定結果から求めた ϵ_a^0 は、FEM解析の結果よりも若干小さくなっているが、このずれは、計算に用いた材料物性やFBGセンサの光学特性の不正確さによるものと考えられる。しかも、Fig. 12に現れている非線形性に起因して、温度の低下につれてFEM解析結果からのずれが大きくなってきている。しかし、全体的にほぼ同程度の非軸対称ひずみとなっており、その変化の傾向も一致している。よって、FBGセンサの複屈折効果を利用することで、CFRP積層板内部の熱残留ひずみの非軸対称成分を測定可能であることが示された。

7. 複屈折効果への光ファイバ被覆の影響

本研究においては、複屈折効果の感度を向上させる目的で、光ファイバの樹脂被覆を除去したものを用いて、熱残留ひずみの測定を行ってきた。しかし、光ファイバの扱いやすさや耐久性の観点からは、ポリイミド等の樹脂で被覆されたものを用いた方が良いと考えられる。そこで本章では、光ファイバ被覆が複屈折効果にどのような影響を及ぼすかを、理論解析によって調べてみた。

まず、Fig. 7と同じ条件で、さらに光ファイバの外側に厚さ $12.5\mu\text{m}$ のポリイミド被覆が付いている場合を考え、無限遠に 0.9% の非軸対称ひずみが与えられた場合について応力関数を用いて解析を行った。計算に用いたポリイミドの力学的特性を、Table 3に示す。この

Table 3 Mechanical properties of the polyimide coating.

Young's modulus E_c (GPa)	1.5
Poisson's ratio ν_c	0.25
Thermal expansion coefficient α_c ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	15

● Uncoated Optical Fiber △ Polyimide Coated Optical Fiber

Fig. 14 Comparison of the strain distributions along x axis calculated using Airy's stress function between uncoated optical fiber and polyimide coated one.

解析によって得られた、 x 軸に沿ったひずみ成分の分布を、被覆がない場合の結果と共に、Fig. 14に示す。被覆がある場合には、被覆内部で急激なひずみの変化が生じていることがわかる。さらに、被覆が無い場合の非軸対称ひずみ成分の伝達係数は、式(9)で表されるように光ファイバ内で一定であるのに対し、被覆が有る場合の伝達係数は、次式で表されるように、半径方向の位置に依存してわずかに変化することがわかる。ここで、 r_{clad} はクラッドの半径である。

$$k_a = 0.1357 - 0.045(r/r_{\text{clad}})^2 \quad (11)$$

このように、被覆が有る場合の伝達係数は被覆が無い場合に比べて小さく、被覆によってひずみの非軸対称性が緩和されていることがわかる。

このような被覆の影響は、被覆の物性値に依存していると考えられるので、さらに、被覆のヤング率 E_c とポアソン比 ν_c の値を変えながら、非軸対称ひずみ成分の伝達を計算してみた。その結果得られた、被覆付きの場合の伝達係数 k_a^{coated} と被覆が無い場合の伝達係数

Fig. 15 Dependence of the transfer coefficient of the non-axisymmetric strain on the properties of the fiber coating.

k_d^{uncoated} の比 $k_d^{\text{coated}}/k_d^{\text{uncoated}}$ を Fig. 15 に示す. このグラフにおいて, 値が 1 以下の場合には, 被覆によってひずみの非軸対称性が緩和されていることを示している. Table 3 に示したポリミドの物性値付近では, 値が 1 以下になっており, 被覆が非軸対称性を緩和する方向に働いていることがわかる. しかしながら, 値が 1 以上の領域も存在しているので, その被覆の力学的特性を制御することで, 非軸対称性を増幅させることもでき, これによって複屈折効果による非軸対称ひずみ成分の測定感度を向上させることも可能であることがわかる.

8. 結 論

本研究では, FBG センサを CFRP 積層板に埋め込み, その複屈折効果を利用することで, 積層板内部の熱残留ひずみの非軸対称成分を測定することを試みた.

まず始めに, FBG センサに直接横方向の圧縮荷重を与え, 複屈折効果による反射光スペクトルの変形を実験的に確認した. そのスペクトル上の 2 個のピーク波長は, 理論解析によって再現することができ, スペクトルの 2 個のピークへの割れは, 複屈折効果によって生じることが確認できた.

次に, FBG センサを CFRP 直交積層板中に埋め込

み, 温度に依存した 2 個のピーク波長のシフトを測定し, 複屈折効果および光ファイバと積層板との間のひずみ伝達を考慮することで, CFRP 直交積層板中の熱残留ひずみの非軸対称成分が計測可能となった.

また, 光ファイバの樹脂被覆が測定感度に及ぼす影響についても, 理論解析によって明らかになった.

今後はさらに, スペクトルの中心波長のシフト量も考慮することで, 積層板中の 3 軸方向全ての熱残留応力を測定することを試みる予定である.

参 考 文 献

- 1) 武田展雄, 岡部洋二: 日本機械学会論文集(A編), **67**, 655 (2001), 24-29.
- 2) A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam & E. J. Friebele: *J. Lightwave Technol.*, **15**, 8 (1997), 1442-1463.
- 3) T. Mizutani, Y. Okabe & N. Takeda: *Smart Mater. Struct.*, **12**, 6 (2003), 898-903.
- 4) S. Takeda, Y. Okabe, T. Yamamoto & N. Takeda: *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 13 (2003), 1885-1894.
- 5) R.B. Wagreich, W.A. Atia, H. Singh & J.S. Sirakis: *Electron. Lett.*, **32**, 13 (1996), 1223-1224.
- 6) R. Gafsi & M.A. El-Sherif: *Opt. Fiber Technol.*, **6**, 3 (2000), 299-323.
- 7) A.-P. Zhang, B.-O. Guan, X.-M. Tao & H.-Y. Tam: *Opt. Commun.*, **206**, 1-3 (2002), 81-87.
- 8) J.A. Guemes & J.M. Menendez: *Compos. Sci. Technol.*, **62**, 7-8 (2002), 959-966.
- 9) Y. Okabe, S. Yashiro, R. Tsuji, T. Mizutani & N. Takeda: *Composites A*, **33**, 7 (2002), 991-999.
- 10) 小林繁夫, 近藤恭平: 弾性力学, 培風館 (1987), pp. 67-106.
- 11) R.J. Van Steenkiste & G.S. Springer: *Strain and Temperature Measurement with Fiber Optic Sensors*, Technomic, Lancaster (1997).
- 12) 小林訓史, 武田展雄: 強化プラスチック, **44**, 9 (1998), 343-347.
- 13) 武田展雄, 新妻秀規, 荻原慎二, 小林 昭: 材料システム, **14** (1995), 73-78.
- 14) T. Mizunami, H. Tatehata & H. Kawashima: *Meas. Sci. Technol.*, **12**, 7 (2001), 914-917.