

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系  
先端エネルギー工学専攻

2004 年度修士論文

FW 成形 CFRP 複合材タンクの  
埋め込み FBG センサを用いたヘルスマニタリング

Health monitoring of  
filament wound CFRP composite tank  
using embedded FBG sensors

学籍番号	3 6 2 0 7
氏名	林 健太郎
指導教員	武田展雄教授

( 2005 年 2 月 14 日提出 )

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 複合材料	1
1.2 材料の知能化とヘルスマニタリング	1
1.3 本研究の目的	2
<b>第 2 章 細径 FBG センサを用いたモニタリング手法</b>	<b>4</b>
2.1 光ファイバブラッググレーティング (FBG)	4
2.2 細径 FBG センサ	6
2.3 反射光スペクトルの中心波長シフト	8
2.4 反射光スペクトルの形状変化	10
<b>第 3 章 埋め込み FBG センサによる FBG タンクのモニタリング実験</b>	<b>12</b>
3.1 FW タンクへの FBG センサの埋め込み	12
3.1.1 FW タンク	12
3.1.2 FBG センサの埋め込み	14
3.1.3 光計測装置	18
3.1.4 光ファイバの融着技術	19
3.2 成形モニタリング	21
3.2.1 成形モニタリングの概要	21
3.2.2 成形モニタリングの結果	22
3.3 耐圧試験モニタリング	26
3.3.1 耐圧試験の概要	26
3.3.2 耐圧試験モニタリングの結果	27
3.4 本章のまとめ	31
<b>第 4 章 スペクトルの理論的解析と検証</b>	<b>32</b>
4.1 光ファイバに加わるひずみの計算	33
4.2 モード結合理論によるスペクトル解析	38
4.3 解析結果を考慮したモニタリング結果の考察	42
4.4 本章のまとめ	43
<b>第 5 章 結論</b>	<b>44</b>

Appendix A	細径 FBG センサの物性値	46
Appendix B	ユーザサブルーチンのプログラム	47
Appendix C	ひずみや温度変化に対するブラッグ波長の変化	51
Appendix D	モード結合理論および行列伝達法を利用した解法	55
	参考文献	58
	本論文に関する学会発表	60
	謝辞	61

# 第 1 章 序論

## 1.1 複合材料

複合材料は、2 種類以上の異なる材料を組み合わせることによって形成される、個々の材料にはない特性を持たせた材料である。複数の材料を組み合わせにより優れたものを作り出すという発想は古くから存在し、粘土や日干しレンガから始まり合板、ゴム、コンクリート材、合金などに至るまで、用途に適した材料を創造し、その機能を活用することで、我々の暮らしにおいて大きな役割を果たしてきた。

近年の科学技術の進歩により、材料に対してもますます厳しい要求がなされることになった。特に航空宇宙分野においては、過酷な環境下で使用されることに加え、構造の軽量化がそのまま性能の向上へと結びつくため、新しい材料への期待が高く、複合材料の発展に大きく関与してきた。その中で、ガラスや炭素などで形成された強化繊維を樹脂で固めた繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics, FRP）が注目、開発され、現在では航空機や宇宙機をはじめとして、圧力容器やスポーツ用品など、数多くの場面で幅広く使用されている。

FRP には大きな特徴が 2 つある。その 1 つは軽くて強い材料だということである。例えば、炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP）の比強度（材料強度を密度で割ったもの）は  $10 \times 10^6 \text{cm}$  以上であり、アルミニウム合金の比強度約  $2 \times 10^6 \text{cm}$  と比べて大きく、より軽量、高強度であることがわかる。もうひとつの特徴は、目的に応じて設計できる材料であるという点である。FRP は繊維を母材で固めた構造のため、繊維の方向によって強度や弾性率が異なる。この性質を利用し、強度が必要とされる方向へ繊維を配向させることで、等方性材料と比べて無駄のない構造となり、軽量化にもつながる。また、繊維や母材の種類を変えることにより、耐熱性、耐腐食性、寸法安定性などの特性を持たせることも可能であり、用途に合わせた材料設計が行える。

## 1.2 材料の知能化とヘルスマニタリング

多くの利点がある FRP であるが、欠点も存在する。FRP には層間剥離やトランスバースクラックといった従来の金属材料には見られない特殊な内部損傷が生じ、またその損傷過程も完全には解明されていない。このことがこの材料を実構造物へ適用する際の障壁にもなっている。現在は損傷検出手法として超音波や X 線が利用されているが、構造物の大きさによっては検査が困難であり、また構造物の運用中は検査できない。また現実には、構造物が機能している間に生じた損傷が重大な事故を招く事態も十分考えられる。そこで、材料自体に生物のような知覚、判断、応答の機能を持たせる「スマートマテリアル」という概念が注目されている。これは、人間

でいう神経、脳、筋肉に相当する、センサ、プロセッサ、アクチュエータの3要素を材料に組み込み、損傷を検知し、損傷状態を判断し、それに対する応答を行う機能を材料自身に持たせるというものである。これにより、安全性や信頼性を更に向上させた複合材料を生み出すことができる。しかし、最初から全ての機能を組み合わせたスマート材料を開発することは困難であり、まずは個々の技術を確立させることが必要である。

スマートマテリアルの実現に向けての第一段階として、構造物の健全性をリアルタイムで監視する「ヘルスマモニタリング」の研究が進められているが、それに用いられるセンサとして、光ファイバセンサが注目されている。光ファイバセンサは小型、軽量、低損失性、無誘導性、耐環境性、幾何学的柔軟性などの特性を持ち、また光ファイバ自体も通信分野の発達とともに大きく活用の幅が広がっていることから、従来のひずみゲージなどの電氣的計測に替わる新しい計測システムとして期待される。

### 1.3 本研究の目的

光ファイバでひずみや温度を計測する方法として、光ファイバブラッググレーティング (FBG) を利用したセンサがある。この FBG センサは、反射波長 (ブラッグ波長) のひずみや温度に対する依存性を利用したもので、高精度な計測が可能であり、強電界下や放射線下、火気厳禁の環境化など、従来のセンサでは測定が難しい環境において適用されはじめている。航空宇宙分野においても、ロケットの燃料タンクの表面に FBG センサを貼り付け、ひずみや温度の計測が行われた例がある<sup>[1,2]</sup>。

また、不均一なひずみ分布や非軸対称ひずみに対する FBG の応答から、CFRP 内部に埋め込んだ FBG センサを用いて内部損傷の検知を行うことも考えられている。2000 年には従来の光ファイバに比べて細径の FBG センサ<sup>[3]</sup>が開発されたことにより、材料強度に悪影響を与えることなく容易に CFRP 内へ埋め込むことが可能となった。この細径 FBG センサを CFRP 積層板に埋め込んで、トランスバースクラックや層間剥離などの損傷による FBG の応答の変化に関する研究が行われており、有限要素解析による理論的な検討も行われている<sup>[4,5,6]</sup>。

ところで、FBG センサを用いたヘルスマモニタリングを実現するためには、これまでに得られた研究成果を踏まえて FBG センサによる構造物のモニタリングを実際の構造物に適用し、ヘルスマモニタリングのシステムとしてのノウハウを会得するとともに新たな問題点の洗い出しを行うことが必要になる。また、FBG センサによるヘルスマモニタリングの実現に向けてアピールを行うことも重要である。これまでに複合材構造物のリアルタイムなモニタリングを試みた例として、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発を進めている再使用ロケット実験機 (RVT) の複合材液体水素 (LH<sub>2</sub>) タンクに FBG センサを埋め込み、燃焼試験や離着陸実験においてタンクのひずみ計測の実施と、そのためのシステム開発および運用が行われた。

そこで本研究では次の試みとして、株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペースとの共同研

究によりフィラメントワインディング (FW) 製法の CFRP 小型複合材タンクに FBG センサを埋め込み、成形時および耐圧試験時のモニタリングを行う。今回のモニタリングにおける特徴として、細径 FBG を埋め込む、成形中のモニタリングを行う、内部損傷の検知を試みる、といった点が挙げられる。

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、FBG センサによるひずみ、温度計測および損傷検知の原理について説明する。第 3 章ではまず、モニタリングを行う FW 製法 CFRP タンクと、その内部への FBG センサの埋め込みについて説明する。次に成形中のモニタリング結果について述べ、その考察を行う。最後に耐圧試験におけるモニタリングの結果を述べ、ひずみ計測が正しく行われていることを示すとともに、スペクトル形状の変化について考察を行う。そして第 4 章では、有限要素モデルを用いたタンクの構造解析から FBG センサに加わるひずみを求めて反射光スペクトルを理論的に計算し、スペクトルの変化について検証を行い、実験で得られた結果の妥当性を評価する。最後に第 5 章で全体のまとめを行い、今後の展望について述べる。

## 第2章 細径 FBG センサを用いた モニタリング手法

### 2.1 光ファイバブラッググレーティング (FBG)

光ファイバは、光の伝わる部分であるコア (Core) と、その周囲にあってコアよりも屈折率の低いクラッド (Cladding) から構成される (Fig. 2.1)。光はコアとクラッドの境界面で全反射しながら伝播する。コアとクラッドは、一般的に石英ガラスで作られており、コア部分には酸化ゲルマニウム ( $\text{GeO}_2$ ) などを加えることにより屈折率を上げている。また、クラッドの外側にはファイバの保護のため被覆が施されており、ポリイミドや UV 硬化樹脂などが使用されている。一般的な光ファイバはクラッド径が  $125\mu\text{m}$  であり、被覆を含めると外径は  $150\mu\text{m} \sim 250\mu\text{m}$  程度である。

FBG は、光ファイバのコアに紫外線を照射して Fig. 2.2 のような周期的な屈折率変化 (Bragg 格子) を書き込んだものである。これは回折格子として働き、この部分に広い波長帯域の光が入射すると、Fig. 2.3 のように特定の波長 (Bragg 波長) で強い反射が生じ、その他の波長の光は透過するという性質を持つ。Bragg 波長  $\lambda_B$  は、有効屈折率  $n$  と格子間隔  $d$  を用いて、次の式で表される。

$$\lambda_B = 2nd \quad (2.1)$$

FBG は大容量光ファイバ通信システムを支える波長多重 (Wavelength Division Multiplexing) 技術に欠かすことのできないデバイスであるが、Bragg 波長はひずみや温度変化に対する依存性を持っており、これを計測に利用したのが FBG センサである。FBG にひずみや温度変化が加わると、 $n$  や  $d$  が変化し、その結果 Bragg 波長のシフトが起こる。よって波長シフトを計測することにより、ひずみセンサや温度センサとして利用することができる。

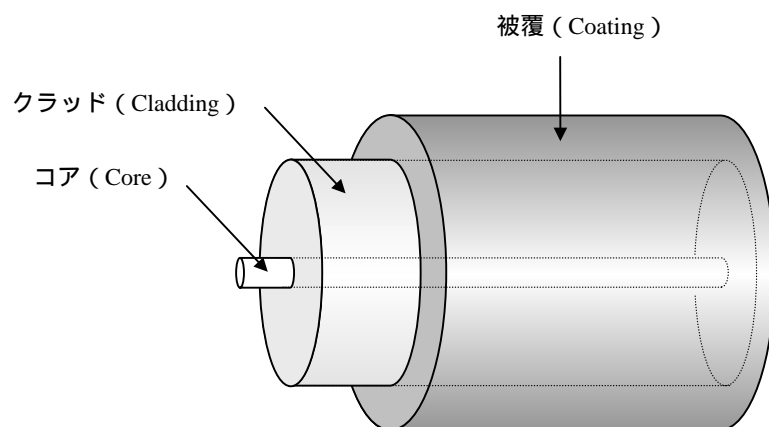


Fig. 2.1 光ファイバ

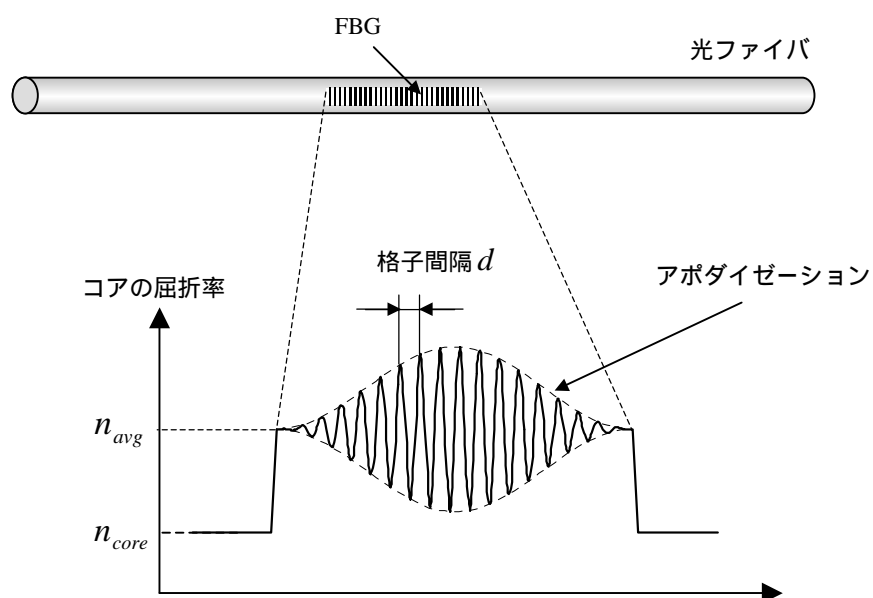


Fig. 2.2 FBG の屈折率変化



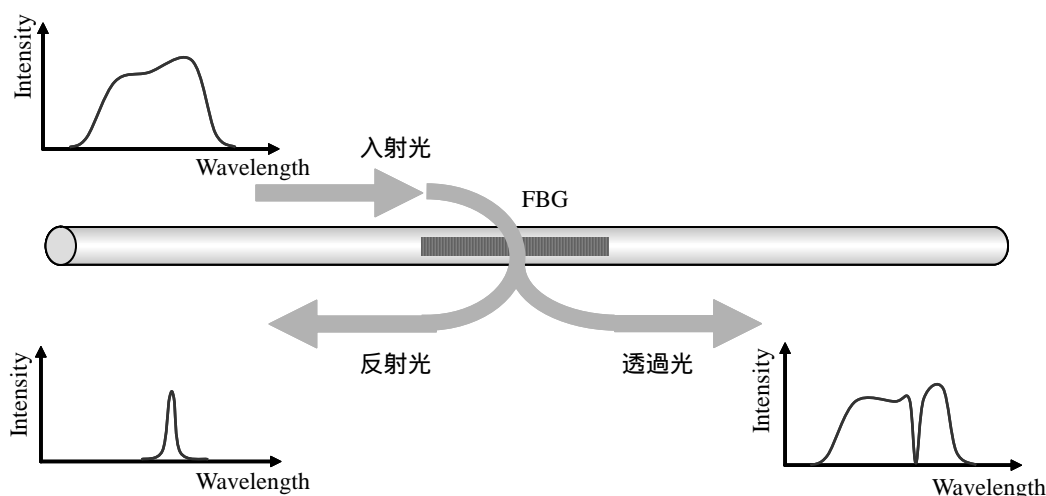


Fig. 2.3 FBG の性質

## 2.2 細径 FBG センサ

複合材構造物の内部に発生する微視的損傷を検出するためには、FBG センサを材料内部に埋め込む必要がある。しかし通常の光ファイバはクラッド径  $125\mu\text{m}$ 、コーティング外径  $150 \sim 250\mu\text{m}$  であり、一枚の厚さが約  $125\mu\text{m}$  の CFRP プリプレグで作成される積層構造の間に埋め込むことは、積層板の機械的特性を大きく低下させる可能性がある。

そこで東京大学と日立電線(株)は、細径 FBG センサとよばれる非常に径の細い FBG センサを開発した<sup>[3]</sup>。この細径 FBG センサは、ポリイミド被覆を含めた外径が  $52\mu\text{m}$  であり、被覆を除去することなく CFRP 積層中に容易に埋め込むことが可能である。本研究で使用した細径 FBG センサの物性値を Appendix A に示す。

細径光ファイバと、被覆を剥いだ通常径光ファイバを CFRP 積層板中に埋め込み、断面観察を行った。Fig.2.5 に示すように、通常径の光ファイバでは周囲に樹脂リッチ部が存在しているのに対し、細径光ファイバでは樹脂リッチ部がほとんど確認されず、光ファイバが炭素繊維と並んできれいに埋め込まれているのが確認された。したがって、細径 FBG センサは埋め込みによる母材 (CFRP) への影響を極めて低くすることができると思われる。

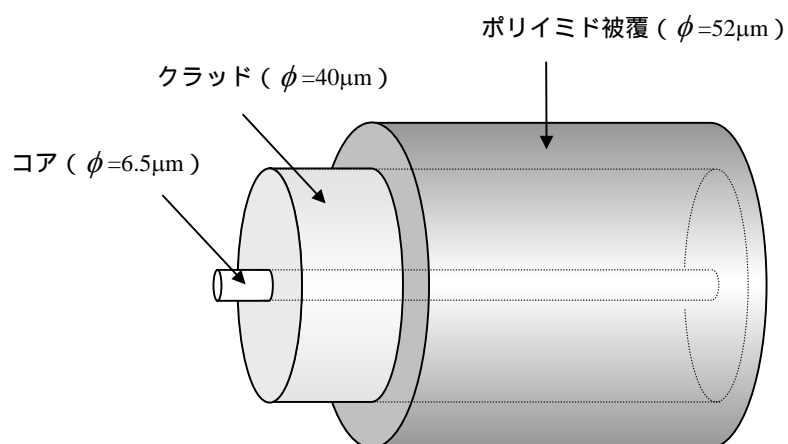
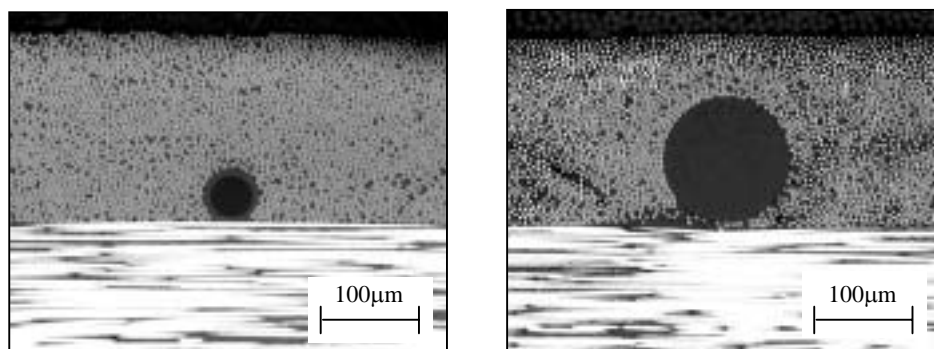


Fig. 2.4 細径光ファイバ



< 細径 (被覆つき) >

< 通常径 (被覆除去) >

Fig. 2.5 光ファイバの埋め込まれた CFRP 積層板の断面

## 2.3 反射光スペクトルの中心波長シフト

FBG で反射された光のスペクトルは通常約 0.2 ~ 0.3nm の幅をもっており、2.4 節で後述するように FBG に加わる様々なひずみによってスペクトル形状が変化しスペクトル幅も広がる。そこで Fig. 2.6 のように、強度が最大強度の半分になる波長を 2 点とり、その中間の波長を反射光スペクトルの中心波長として定める。

中心波長は式 (2.1) のように表されるが、ここで屈折率  $n$  や格子間隔  $d$  は FBG に加わる軸方向ひずみや軸に垂直な方向のひずみ、およびの温度変化の影響によって値が変化する。仮に、FBG センサに均一な軸方向ひずみ  $\varepsilon$  と温度変化  $\Delta T$  のみ加わる場合には、シフト量  $\Delta\lambda$  を表す式は以下のように求められる<sup>[7]</sup>。(Appendix C 参照。)

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \left[ 1 - \frac{n_0^2}{2} \{P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})\} \right] \varepsilon + \left\{ \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dT} + \frac{n_0^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \alpha \right\} \Delta T \quad (2.2)$$

ここで、 $\lambda_0$  はひずみや温度変化のない状態での Bragg 波長、 $P_{11}$  と  $P_{12}$  はポッケル定数、 $\alpha$  は光ファイバのガラスの熱膨張係数、 $\nu$  はガラスのポアソン比である。この式からわかるように、反射光スペクトルの中心波長はひずみ  $\varepsilon$  および温度変化  $\Delta T$  に対してそれぞれ線形にシフトする。したがって、波長シフト量を測定することで、軸方向ひずみまたは温度変化量を知ることができる。

しかし、ひずみと温度変化が同時に加わる場合には両方の影響を受けた波長シフトが生じる。本研究においても、成形モニタリングにおいてひずみと温度変化が同時に加わる。そのため正しいひずみ・温度を得るためには、複数のセンサを用いてそれらの切り分けを行う必要がある。そこで本研究では Fig. 2.7 に示すように、FBG をポリイミドチューブの中に入れて母材のひずみが FBG に加わらないようにした温度用センサを作成した。これを FBG センサと同時に埋め込んで計測を行い、そのまま埋め込んだ FBG センサの波長シフト量から温度用センサの波長シフト量を引くことで、ひずみによる波長シフト量を得ることができる。

Table 2.1 に、本研究で使用したものと同型の通常径 FBG センサおよび細径 FBG センサの、ひずみおよび温度変化に対する波長シフト量を測定した結果である。以降、波長からひずみおよび温度を算出する際にはこの値を使用する。ひずみに対する波長シフト量は通常径 FBG と細径 FBG で違いは無いが、温度変化に対する波長シフト量は若干の違いがあり、これは  $dn/dT$  の値に差があるためと考えられる。

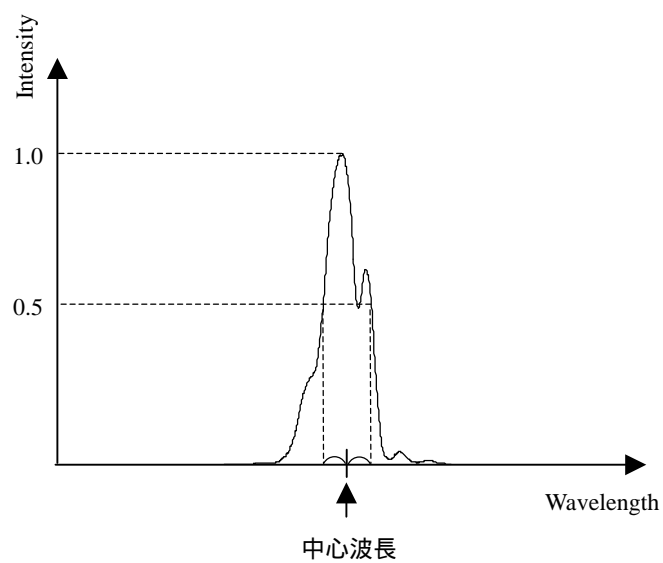


Fig. 2.6 中心波長の定め方

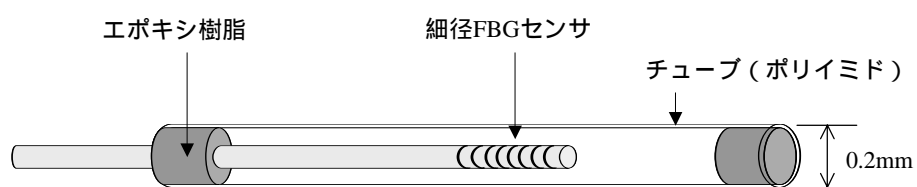


Fig. 2.7 温度計測用 FBG センサ

Table. 2.1 ひずみおよび温度変化に対する反射光スペクトルの波長シフト量

	通常径 FBG センサ	細径 FBG センサ
ひずみ $1\mu\epsilon$ あたり	$0.00121\text{nm}/\mu\epsilon$ ( $826\mu\epsilon/\text{nm}$ )	$0.00121\text{nm}/\mu\epsilon$ ( $826\mu\epsilon/\text{nm}$ )
温度変化 $1^\circ\text{C}$ あたり	$0.0101\text{nm}/^\circ\text{C}$ ( $99.0^\circ\text{C}/\text{nm}$ )	$0.0107\text{nm}/^\circ\text{C}$ ( $93.2^\circ\text{C}/\text{nm}$ )

## 2.4 反射光スペクトルの形状変化

前節で説明したように、軸方向のみに均一なひずみが加わった場合は、反射光スペクトルは形状が変化することなく波長のみがシフトする。しかし、不均一なひずみが加わった場合や、軸に垂直な方向から非軸対称なひずみを受けた場合は、反射光スペクトルの形状が変化する。

Fig. 2.8 のように、FBG の埋め込まれた部分の CFRP にトランスバースクラックなどの損傷が発生すると、FBG センサに加わるひずみは不均一になる。この場合、FBG の各部分によって Bragg 波長が異なり、さまざまな波長の光が反射するため、反射光スペクトルの形状は複雑に変化する。この性質を利用して、スペクトルの形状変化を観察することで損傷を検知することが可能である。実際に過去の研究においては、細径 FBG センサを CFRP 積層板に埋め込み、トランスバースクラックの発生および増加とともに反射光スペクトルの形状が崩れる実験結果が得られており、また有限要素解析によるスペクトル計算においても同様の結果が示されている<sup>[4,5]</sup>。

一方 Fig. 2.9 のように、軸に垂直な方向に非軸対称なひずみが加わった場合、偏光方向によって屈折率が異なる状態になる「複屈折」という現象が発生する。したがって、Bragg 波長も偏光方向によって異なることになり、このため反射光スペクトルはピークが 2 つに分離しスペクトル幅が広がるように変形する。

CFRP に埋め込んだ FBG センサには、成形時の熱残留応力によって非軸対称なひずみが加わるため、複屈折が起こり、スペクトル形状が変化する。この熱残留応力によるスペクトル変化は通常径の FBG センサよりも細径の FBG センサの方が緩やかであることが明らかにされており<sup>[8]</sup>、後のモニタリングに及ぼす影響も減少する。この点も細径 FBG センサが埋め込みに適している点のひとつといえる。また逆に、スペクトル形状の変化から熱残留応力を求める研究も行われている。

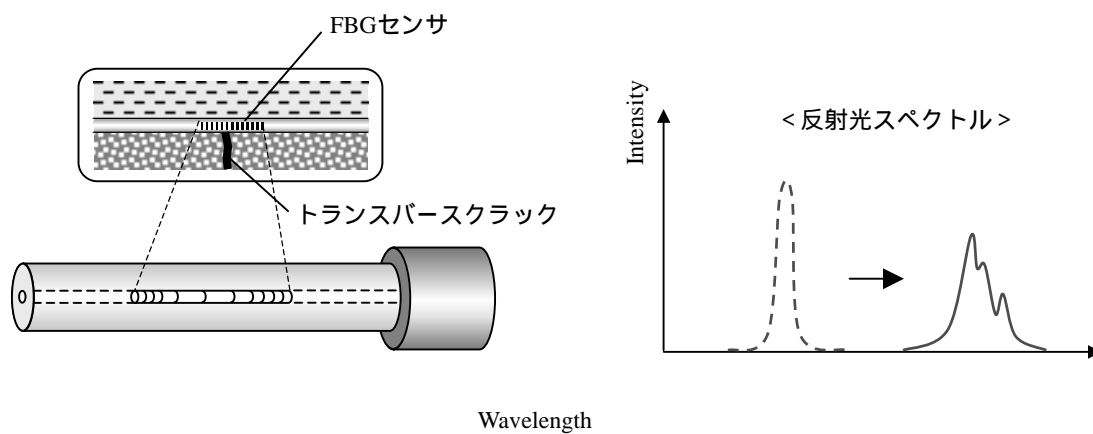


Fig. 2.8 トランスバースクラックの発生による不均一ひずみとスペクトル形状の変化

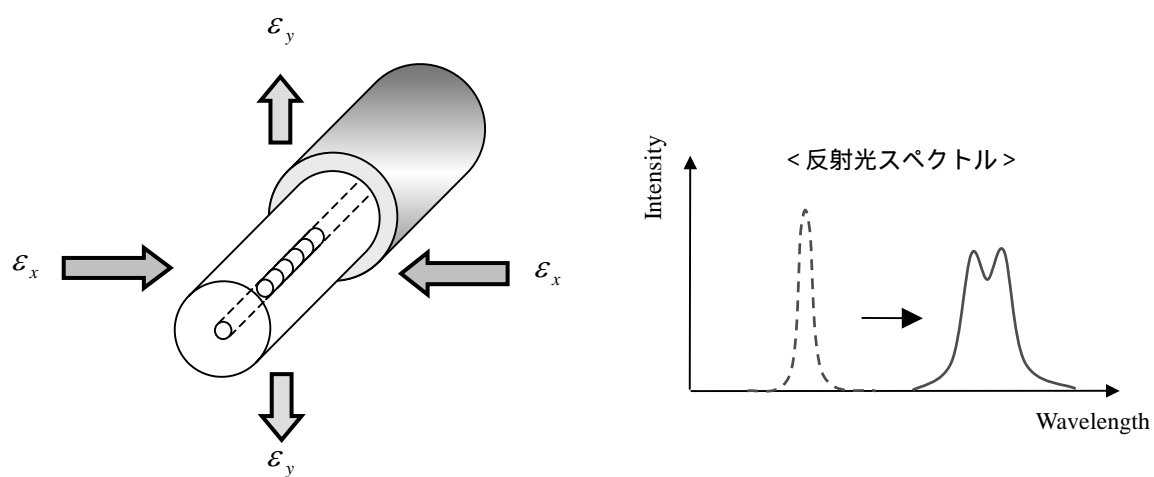


Fig. 2.9 非軸対称の垂直ひずみによる複屈折とスペクトル形状の変化

## 第3章 埋め込みFBG センサによる FW タンクのモニタリング実験

### 3.1 FW タンクへのFBG センサの埋め込み

#### 3.1.1 FW タンク

ロケットの燃料タンクは、軽量化および再使用に向けてのメンテナンスを容易にするため、従来の金属製から複合材料製にすることが提案され、研究が進んでいる。本研究でモニタリングを行ったのは、フィラメントワインディング法で製造された小型 CFRP タンクである。

フィラメントワインディング (FW) 法は、主に圧力容器などに使用される、繊維強化複合材料の製造方法の1つである。Fig. 3.1 のように、マンドレルとよばれる型を回転させ、その上に樹脂を含浸させた繊維を巻きつけていき、積層後にキュア炉に入れて高温で硬化させる。この方法は、繊維を切断することなく連続して積層するため繊維強度を有効に生かすことが可能であり、繊維の巻き数や角度をコントロールすることで必要な強度を容易に持たせることができる。

本研究でモニタリングを行った FW タンクの概要図を Fig. 3.2 に示す。タンクの内側にはゴム製のライナがあり、気密性を保つ役割を果たしている。ライナの外側にはヘリカル層と呼ばれる CFRP 層が全体に2層巻かれ、タンク内部に圧力を加えたときに最も大きな力のかかるシリンダー一部には、更にフープ層が2層巻かれている。今回のタンクは、フープ層の繊維破断により破壊に至るような強度設計がされている。そのためフープ方向のひずみが最も重要なモニタリングの対象となる。

また、複合材料製の圧力容器では、過度な力が加わった際の繊維破断による破壊の他に、破壊に至らなくともトランスバースクラックなどの微視的損傷を通して内容物が漏洩するという事態も懸念される。そのため、微視的損傷の検知も構造物の健全性を確認する上で重要な点の一つである。

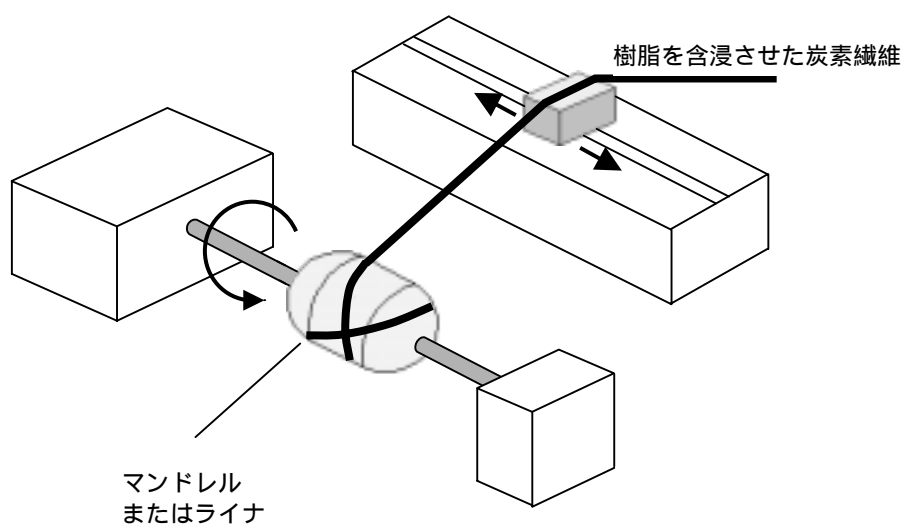


Fig. 3.1 フィラメントワインディング法

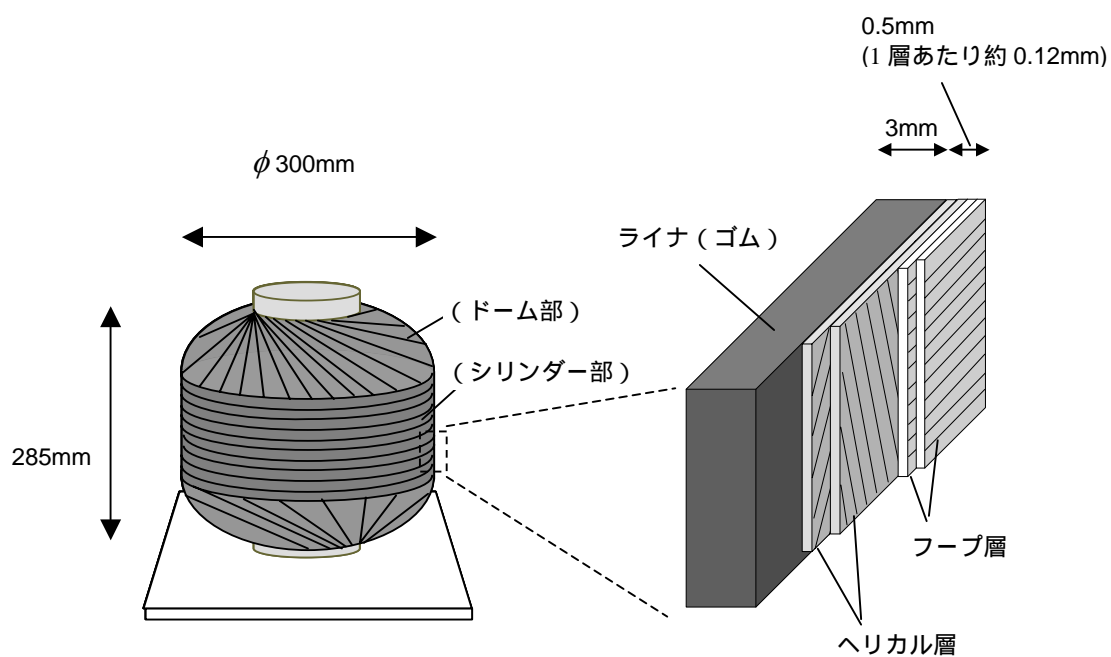


Fig. 3.2 モニタリングを行う FW タンク



### 3.1.2 FBG センサの埋め込み

本研究では、この FW タンクに FBG センサを埋め込み、硬化成形中のひずみ・温度計測、および耐圧試験中のひずみ計測と、微視的損傷の検知を目的としたモニタリングを行った。以下、FBG の埋め込みから成形までの過程を順に述べる。

FBG センサは、ヘリカル層まで巻き終えたタンクのシリンダー部に、Fig. 3.3 のようにフープ方向に巻きつける形で設置した。その上からフープ層を施工することで、FBG センサはヘリカル層とフープ層に挟まれる形で埋め込まれることになり、破壊箇所であるシリンダー部のフープ方向のひずみ計測と、ヘリカル層に現れるトランスバースクラックの検出が可能になると考えられる。また、光ファイバがフープ層の炭素繊維と平行になるため成形時に無理なく埋め込まれ、タンク自体の機械的特性に及ぼす影響を抑えることができる。Fig. 3.4 にタンクに埋め込まれた光ファイバの断面写真を示す。通常径光ファイバでは周囲に多少の樹脂リッチ部が見られるが、細径の場合はきれいに埋め込まれていることがわかる。

埋め込んだ FBG センサの種類を Table 3.1 に示す。細径 FBG センサは、90 度ごとに合計 4 本設置した。また、細径との比較のため通常径の FBG センサを 2 本、成形時計測の温度補償のため Fig. 2.7 で示した温度用 FBG センサを 2 本設置した。

FBG センサの位置を固定した光ファイバは、フープ方向に 1 週ほど巻いた後、ヘリカル層の炭素繊維に沿うような形でドーム部へ出した。成形モニタリングで光を通すファイバは、Fig. 3.5 のように曲率の大きな曲げができるだけ発生しないようにボス(金属部分)や軸に巻きつけながら、硬化時の真空引きのためにシールされる位置の外側まで出した。特に段差があるところをファイバが通過するときは、真空引きを行った際にファイバに極端な曲げが発生し大きな光の損失が起こる恐れがあるため、特に細心の注意を払った。

成形モニタリングに使用する光ファイバは、成形後に切断されてしまい耐圧試験モニタリングには使用できない。そのため、耐圧試験モニタリングで光を通すファイバは、Fig. 3.6 に示すように成形時のファイバを取り出した方とは逆側のドーム部に小さく巻いて貼り付けておき、成形後バックを除去した後にほどいて使用できるようにした。このとき、貼り付けておいたファイバが成形中に流れ出る樹脂によって固まってしまうのを防ぐため、テフロンシートで保護し樹脂が入り込まないようにした。

このような FBG の設置方法のため、FBG の両側に光ファイバがつながっている細径 FBG センサは成形および耐圧試験の両方でモニタリングを行うことができるが、通常径 FBG および温度計測用 FBG は片側のみであるためどちらかのモニタリングしか行えない。そのため、温度用 FBG は成形時のみ、通常径 FBG センサは耐圧試験のみでモニタリングを行うことにした。

以上のようにして全ての FBG の設置および光ファイバの保護を行った後、フープ層をシリンダー部に積層し、成形時の真空引きのためバックを装着した。

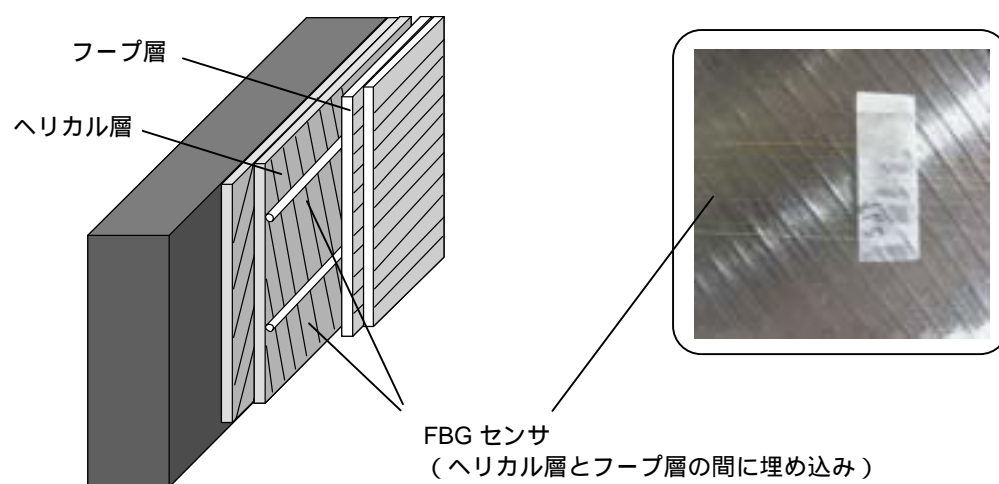


Fig. 3.3 FBG センサの埋め込み

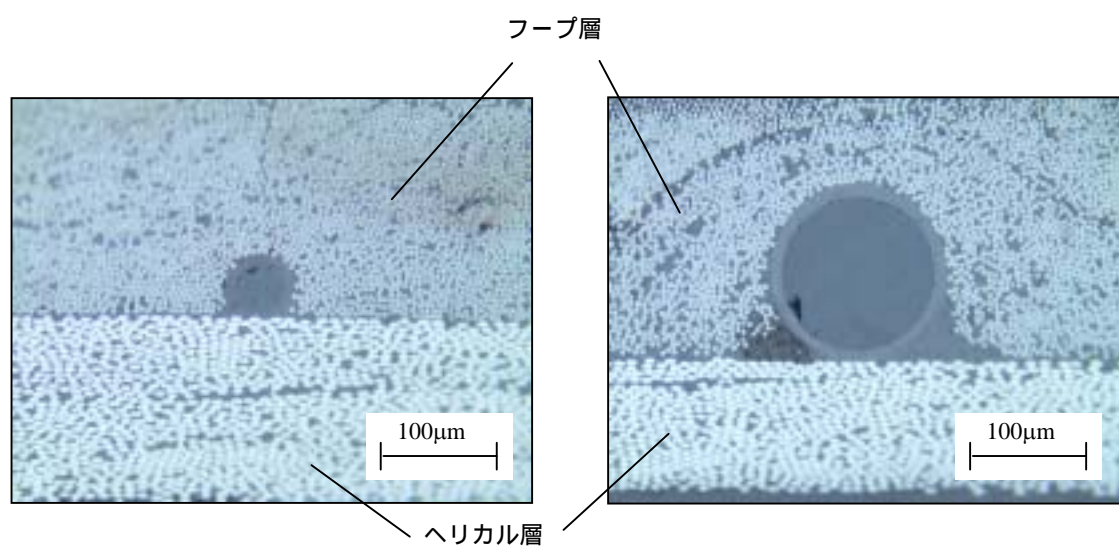
Fig. 3.4 FW タンクに埋め込まれた光ファイバの断面写真  
(左が細径、右が通常径)

Table 3.1 埋め込まれた FBG センサの種類

FBG 番号	種類	成形	耐圧試験
	細径		
	細径		
	細径		
	細径	×	
	通常径	×	
	通常径	×	
	温度計測		×
	温度計測		×

\* は計測、× は未計測

&lt; タンク上面図 &gt;

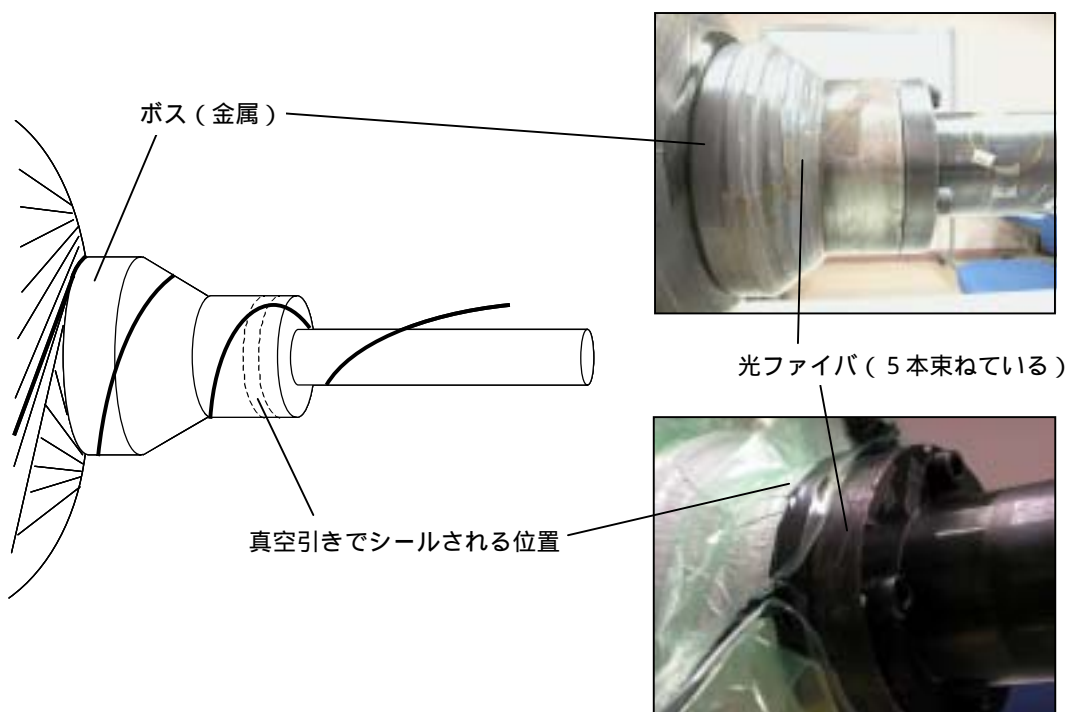
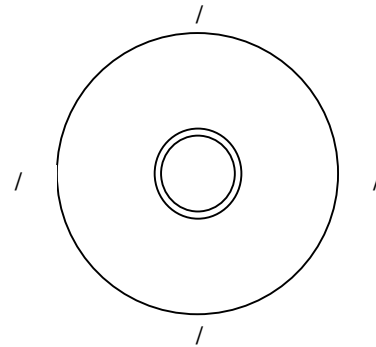


Fig. 3.5 成形モニタリングで光を通すファイバの取り出し

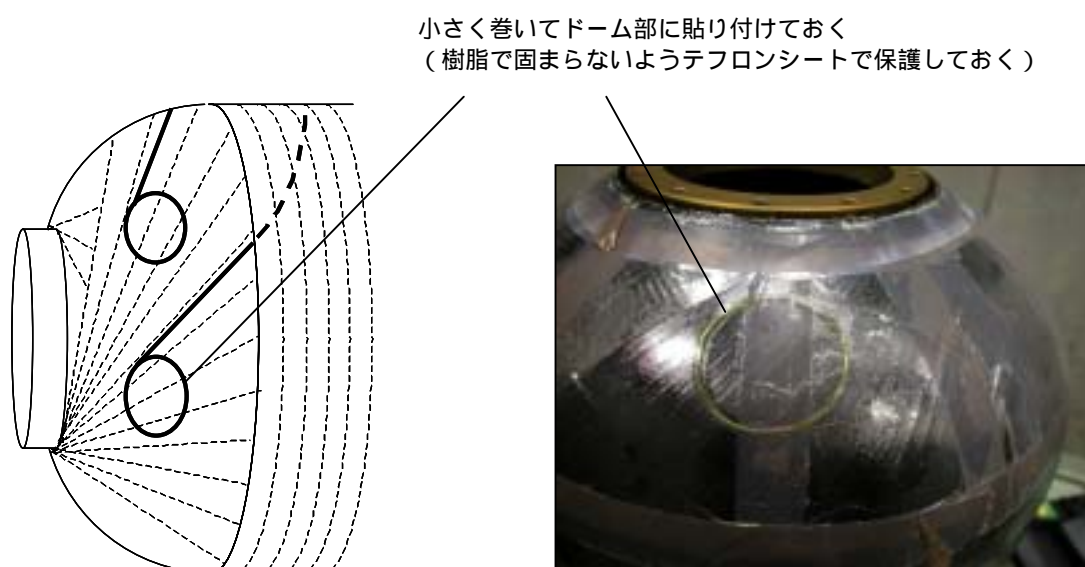


Fig. 3.6 耐圧試験用の光ファイバの保護

### 3.1.3 光計測装置

本研究で使用した光計測装置の全体図を Fig. 3.7 に示す。FBG センサへ入射する光は、ASE 光源 (Amplified Spontaneous Emission、AQ4315A、安藤電気 (株)) を使用した。この光源は本実験における Bragg 波長のシフト範囲である 1550nm ~ 1570nm 付近において十分な出力がある。光源から出力された光は、光サーキュレータを通過して光チャンネルセクタ (AQ3450、安藤電気 (株)) へ送られ、選択されたチャンネルに接続されている FBG センサに入射される。FBG で反射された光は再び光サーキュレータを通過し、光スペクトラムアナライザ (AQ6331、安藤電気 (株)) に送られ、測定される。光チャンネルセクタおよび光スペクトラムアナライザは GPIB (General Purpose Interface Bus) によって制御を行う。制御プログラムは LabVIEW 6.1 (National Instruments Corporation) を用いて、成形モニタリングおよび耐圧試験モニタリングのそれぞれに合わせたプログラムを記述した。

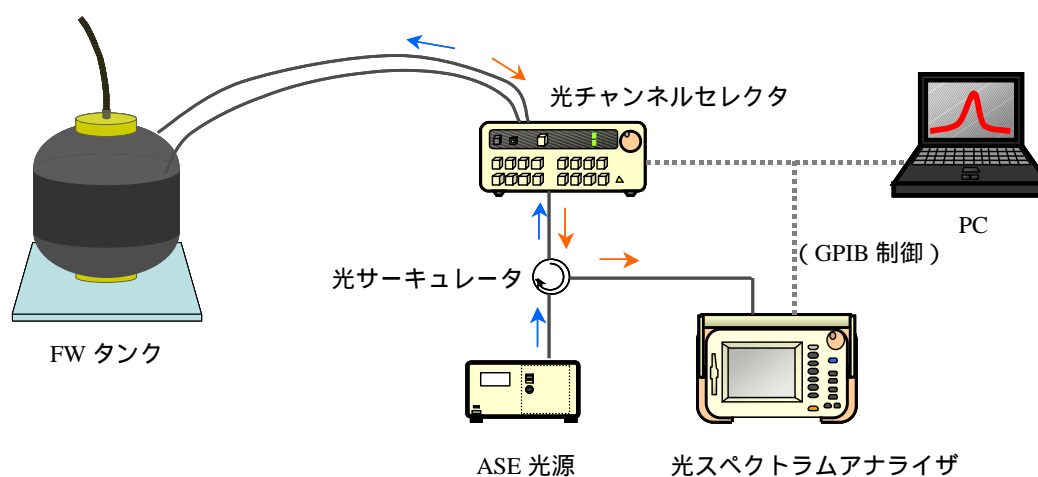


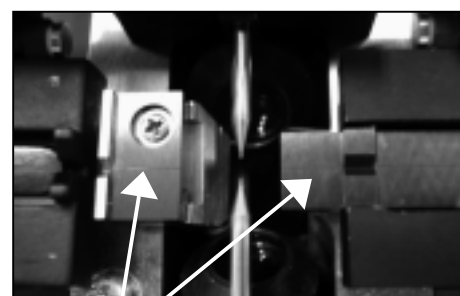
Fig. 3.7 光計測システム

### 3.1.4 光ファイバの融着技術

タンクに埋め込まれた細径 FBG センサに光を入射し、反射光を測定するためには細径光ファイバと通常径光ファイバを接続する必要がある。ヘリカル層の上に細径 FBG を設置した後にフープ層を巻いて真空成形を行うという手順を考慮すると、細径光ファイバの接続は測定の直前に行った方が作業性がよいが、細径光ファイバは新しく開発された特殊な光ファイバであるため、簡易に着脱可能なコネクタは未だ開発されていない。そこで、細径光ファイバと通常径光ファイバを融着することで接続し、計測を可能にする技術を開発した。

融着機はコア直視型融着接続機 S182A (古河電工(株))を使用した。Fig. 3.8 に融着機の全体写真を示す。被覆を除去して端面をきれいに出した光ファイバを融着機の V 溝に固定し、光軸を合わせてアーク放電することにより融着を行うが、細径光ファイバと通常径光ファイバを直接融着することはできない。これは両者の径に大きな差があるため光ファイバの熱容量が極端に異なり、適切なアーク放電強度を設定できないためである。そこで本研究では Fig. 3.9 に示すように、間に 80 $\mu$ m (中間径) の光ファイバを挟み、2 段階に分けて融着を行った。Fig. 3.10 に融着された異径光ファイバの写真を示す。

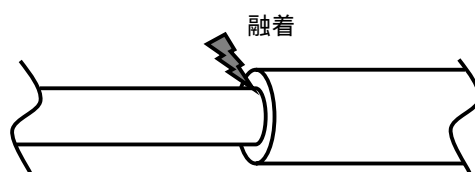
この作業は、現段階では非常に難易度が高く熟練を要する作業であり、場所や時間に制限のある環境では作業性が悪い。また異径融着による光のパワーロスも大きく、最良でも約 30% のパワーロスが発生する。細径光ファイバの接続は、今後の細径 FBG センサを用いた研究に対する課題点として挙げられる。



細径光ファイバ用V溝

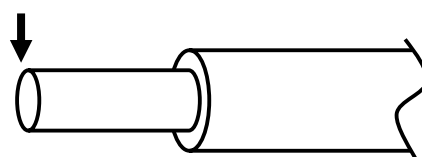
Fig. 3.8 光ファイバ融着接続機

### 1. 中間径-通常径光ファイバ融着



### 2. 中間径光ファイバ切断

光ファイバクリーパーを使用して切断



### 3. 細径-中間径光ファイバ融着

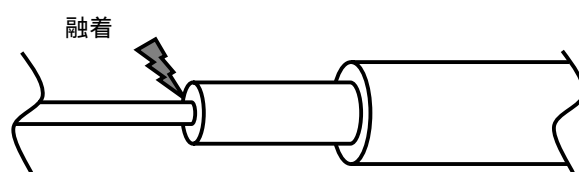


Fig. 3.9 細径 通常径の融着手順

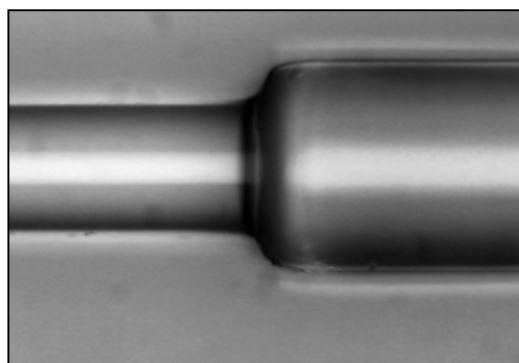


Fig. 3.10 融着された異径光ファイバ

## 3.2 成形モニタリング

### 3.2.1 成形モニタリングの概要

CFRP 複合材構造物は、高温で樹脂を硬化させて成形するため、成形後の構造物には幾らかの熱残留ひずみが生じている。使用する環境によっては、熱残留ひずみによって微視的損傷が進展することも考えられ、機械的特性を低下させてしまう可能性も否定できないのに対し、熱残留ひずみを非破壊で計測する有効な方法はこれまで存在しなかった。

埋め込み FBG センサは、硬化成形中のモニタリングが可能であるという点も特長のひとつである。本研究におけるモニタリングでは、FW タンクの硬化成形中に反射光スペクトルを連続的に測定し、成形過程における FW タンクの膨張圧縮および温度変化を計測するとともに、熱残留ひずみが原因で生じる複屈折の影響によってスペクトルの形状がどのように変化するかを調べた。

フープ層まで巻き終えた FW タンクは、バックされ真空引きを行った後、高温炉に入れて成形された。計測した FBG センサは Table 3.1 に示した通りであり、埋め込まれた細径 FBG センサ 4 本のうち 3 本でひずみ計測を行い、温度用 FBG センサ 2 本でタンクの CFRP 内部の温度を計測した。更にバックの外に FBG センサを 1 本設置して炉内の温度を計測し、材料内部の温度との比較を行った。細径 FBG センサを 4 本のうち 3 本しか計測できなかったのは、高温炉と計測系をつなぐ延長光ファイバが 6 チャンネル分しかなく、それ以上の数の FBG 計測ができないためである。計測は 60 秒ごとに、成形開始から終了までの 42 時間行った。

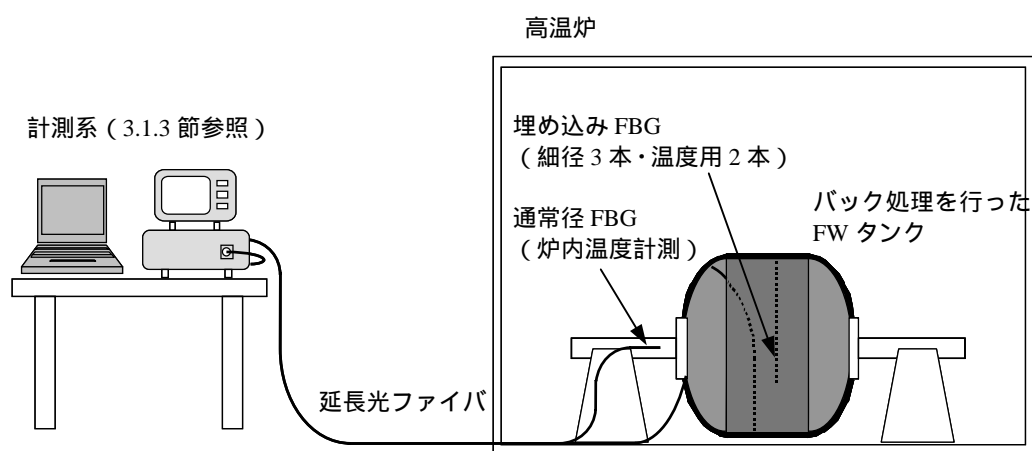


Fig. 3.11 成形モニタリングの概要図



### 3.2.2 成形モニタリングの結果

計測開始時を基準とした、3本の埋め込み細径 FBG センサにおける時間に対する波長シフト量を Fig. 3.12 に示す。この図において、横軸は成形開始を 0、成形終了を 1 として規格化された時間であり、縦軸は計測開始時を基準とした波長シフト量である。この波長シフト量は 2.3 節で説明したように、ひずみによるものと温度変化によるものを合わせたシフト量である。

また、温度計測用 FBG センサで得られた時間に対する波長シフト量を Fig. 3.13 に示す。これを Table 2.1 の値を用いて温度変化量に変換すると Fig. 3.14 のようになる。高温炉のプログラムで設定された硬化温度は 1 段階目が 110、2 段階目が 125 であり、いずれの FBG センサによっても温度変化が正しく計測されたことがわかる。温度下降中に勾配の不連続な点があるが、これはこの時刻に炉の扉を開けたため、急激に温度が下がったのが原因である。また 2 本の FBG センサの比較から、タンク内部の温度変化は高温炉の温度変化と比べると緩やかであり、炉内と同じ温度に達するまでには若干の時間的な遅れがあることがわかる。

Fig. 3.12 の波長シフト量から、Fig. 3.13 のチューブに入れた細径 FBG の波長シフト量を引くことにより、FBG センサのひずみによる波長シフト量が得られる。温度と同様に、それを Table 2.1 の値を用いてひずみ量に変換した結果を Fig. 3.15 に示す。ここで、3 本の FBG センサでそれぞれひずみ量に差があるが、その理由として、成形開始直後は樹脂がまだ硬化していないため FBG センサが完全には固定されておらず、埋め込んだ際に生じた光ファイバの緩みや曲げによって、タンクの膨張による FBG への引張ひずみの加わり方に個体差が生じるのが原因だと考えられる。そこで、成形時間が半分経過して温度が下がり始める直前の状態におけるひずみを基準にしてグラフを書き直すと、Fig. 3.16 のように成形開始直後を除いてひずみ量の変化の様子がよく一致する結果が得られた。したがって、樹脂が硬化した後はタンクのフープ方向ひずみの変化量が正しく計測されていると考えられる。ただ成形終了直前にもひずみ量にややばらつきが見られた。この時点では樹脂は完全に硬化しているため光ファイバの緩みなどは考えられず、他の何らかの原因によるものと思われるが現在のところは不明である。

埋め込まれた細径 FBG センサのスペクトル形状変化を Fig. 3.17 に示す。成形開始後、温度の上昇とともにスペクトル幅の広がりがみられた。このことから、設定された硬化温度に到達する前に既に複屈折が発生していることがわかる。その理由は明らかではないが、考察される原因としては、FW 成形による曲面の積層という特殊な状況のため複雑な熱膨張ひずみが発生し、ヘリカル層とフープ層の間に埋め込まれた FBG センサに非軸対称なひずみが加わっているということが考えられる。ちなみに成形過程での温度上昇中におけるスペクトル形状変化は平面の積層板においては発生しないことがわかっている<sup>[8]</sup>。

成形終了後のスペクトルは、成形前と比べてスペクトル幅が大きく広がった。したがって、大きな熱残留ひずみが最終的に発生していることがわかる。また、光の強度の低下は、光ファイバのタンクの外への取り出し口付近などで樹脂の硬化により微小な曲げ(マイクロベンド)が起こり、光のロスが発生しているためと考えられる。

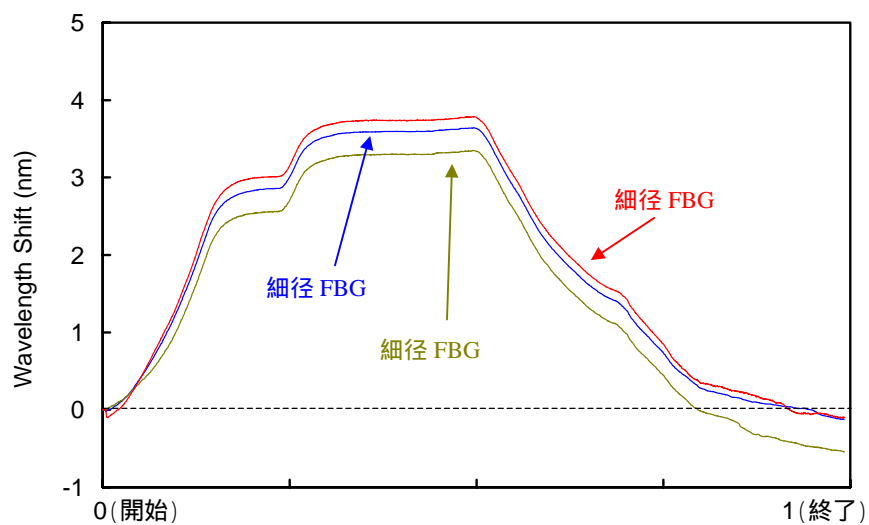


Fig. 3.12 成形モニタリングにおける埋め込み FBG センサの波長シフト

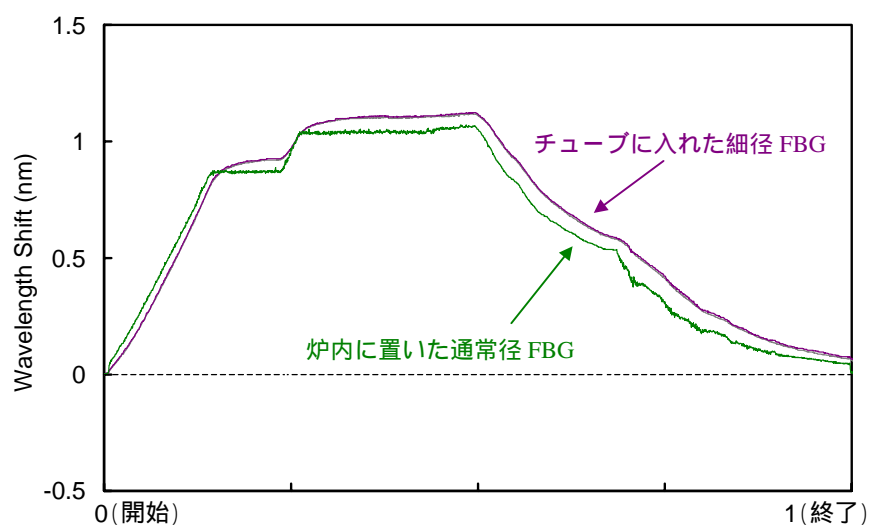


Fig. 3.13 成形モニタリングにおける温度計測用 FBG センサの波長シフト

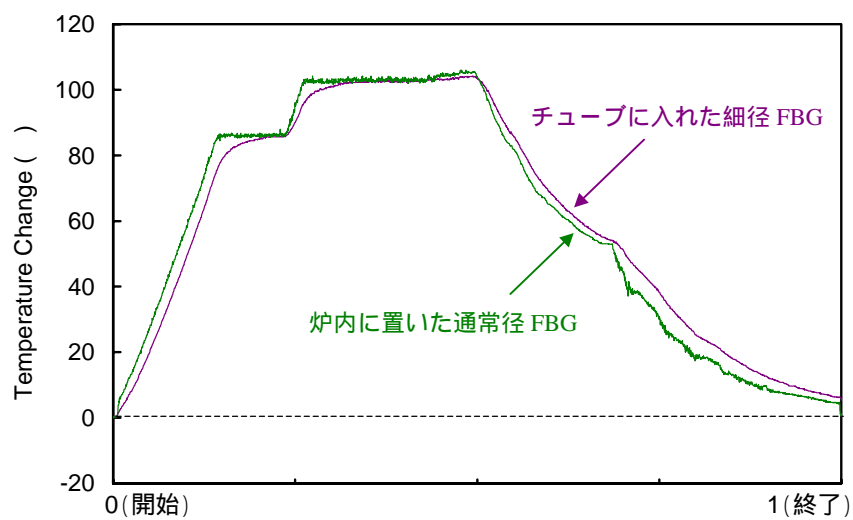


Fig. 3.14 温度用 FBG の波長シフト量から求められた温度変化量

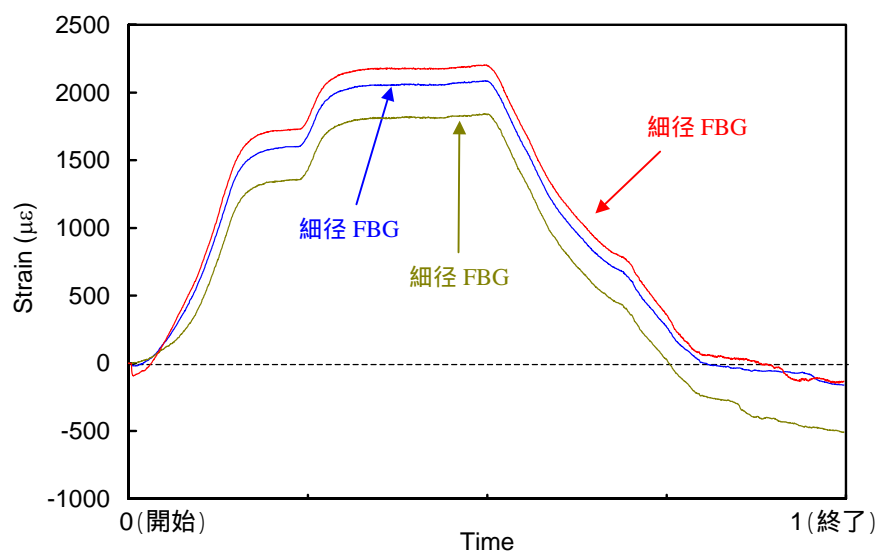


Fig. 3.15 温度補正後の埋め込み FBG の波長シフト量から求めたひずみ量

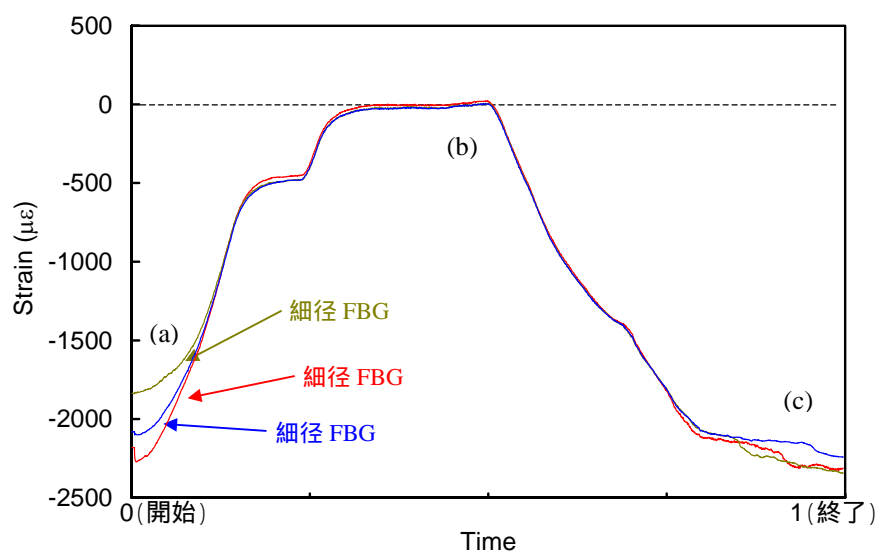


Fig. 3.16 成形時間が半分経過したときのひずみを基準にした場合のひずみ量

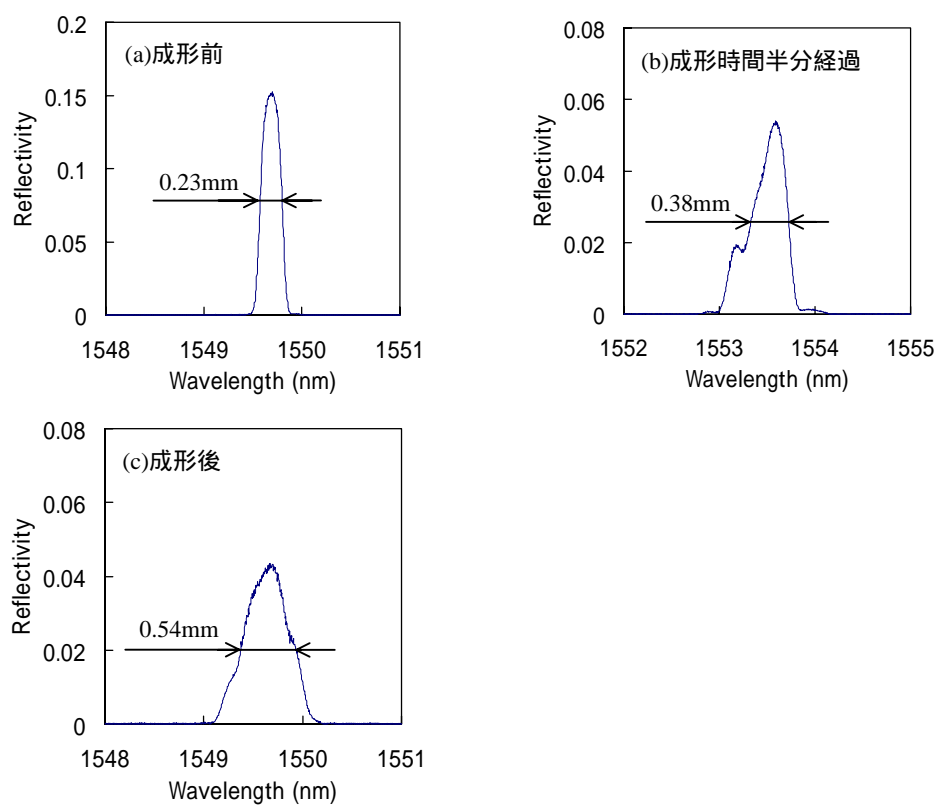


Fig. 3.17 成形中のスペクトル形状と幅の変化

( 細径 FBG , (a) ~ (c) は Fig. 3.16 参照 )

### 3.3 耐圧試験モニタリング

#### 3.3.1 耐圧試験の概要

成形終了後、FBG センサの埋め込まれた FW タンクの性能評価と、FBG センサのひずみ計測およびクラック検出の機能を実証する目的で、耐圧試験を実施した。耐圧試験では、タンク内に水圧を加え、1.5MPa まで加圧し 0MPa まで減圧する、次に 2.5MPa まで加圧し 0MPa まで減圧する、を繰り返して 4.5MPa までの加圧および減圧を行った。その後破壊まで圧力を上昇させ、破壊試験が行われた。

加圧および減圧は 0.5MPa ごとのステップで行われた。各ステップ毎に、タンク表面の 8 箇所に貼り付けられたひずみゲージによってタンクのフープ方向ひずみが計測された。スペクトルの測定は、埋め込まれた細径 FBG センサ 4 本と通常径 FBG センサ 2 本の計 6 本について行い、同様に 0.5MPa のステップ毎に測定を行った。

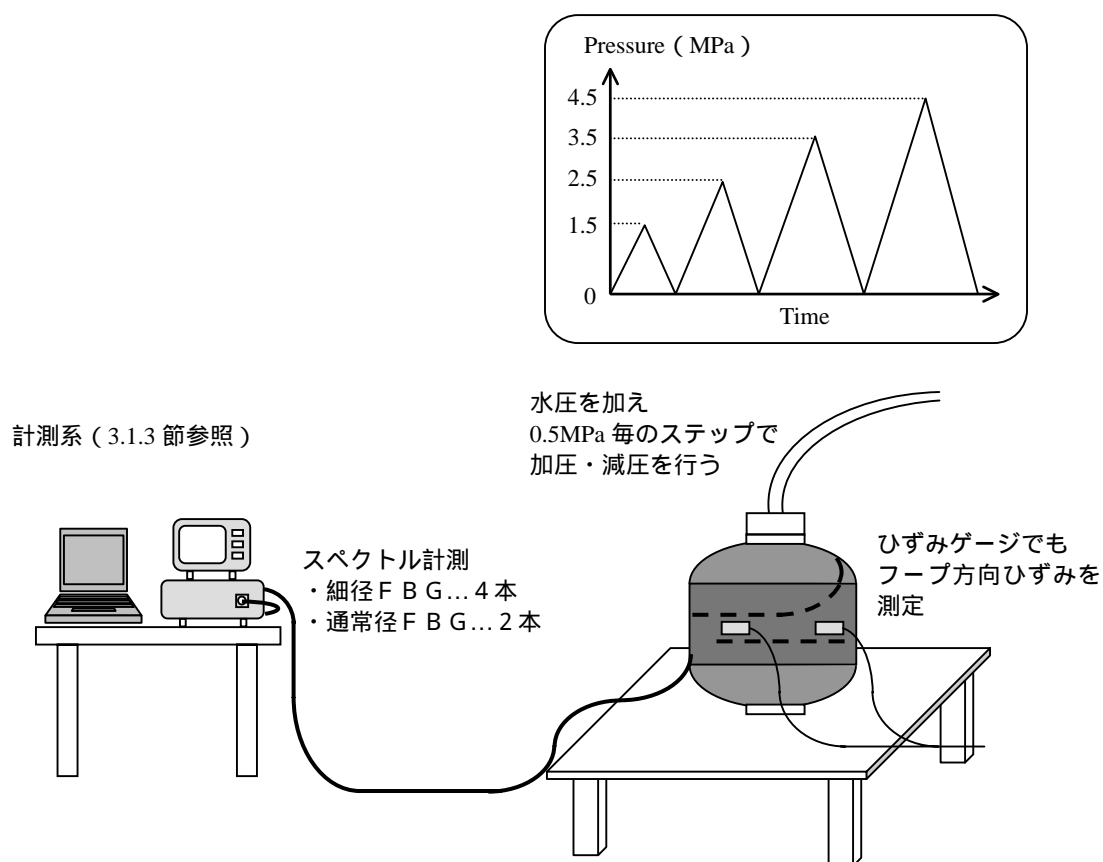


Fig. 3.18 耐圧試験モニタリングの概要図

### 3.3.2 耐圧試験モニタリングの結果

Fig. 3.19 に、タンクの各ステップで測定されたスペクトルの中心波長のシフト量を示す。中心波長は Fig. 2.6 に示した方法で定めた。いずれの FBG センサにおいてもタンク圧に比例して中心波長がシフトしており、またその傾きについては FBG センサ間での違いはなくほぼ同じであった。しかし、通常径 FBG センサでは 4.5MPa まで問題なく測定されているのに対して、細径 FBG センサでは 3.5MPa 付近から中心波長が不安定になる傾向がみられた。これは、タンク圧が上昇するにつれて光の強度が大きく低下し相対的にノイズが大きくなったため、Fig. 2.6 のように中心波長を定める際にノイズの影響を受け、誤った中心波長が求められてしまったのが原因である。したがって、今後はスペクトルの状態によって中心波長の定め方を変えるなどの対策が必要である。

波長シフト量を Table 2.1 の値を用いてひずみ値に変換したものを Fig. 3.20 に示す。また、比較のためにひずみゲージで計測されたひずみの平均値を点線で示す。このように、FBG センサで測定されたひずみは、ひずみゲージで測定されたひずみとほぼ一致しており、FBG センサによるひずみのモニタリングが問題なく行われたことがわかる。

次に、スペクトル形状の変化についての結果を示す。ここでは形状変化を判別しやすくするために、縦軸を対数で表している。Fig. 3.21 は、細径 FBG センサにおけるタンク圧の上昇に対するスペクトル形状変化を示したものである。圧力が上昇するにつれて、フープ方向ひずみにより波長がシフトするのに加え、スペクトルの強度低下と、スペクトル幅が広がりピークが複数に分裂していく様子がみられた。強度低下の原因はまだ解明されていないが、タンク圧が 4.5MPa に達すると光の強度が非常に小さくなってしまい反射光がほとんど識別できなくなってしまうため、光のロスを防ぐことは今後の重要な課題である。スペクトル幅の広がりについては、タンクが内圧を受けて膨張する際に、ヘリカル層とフープ層の境界に埋め込まれた FBG センサが非軸対称なひずみを受け、複屈折が発生しているためである。更に圧力が 3.5MPa に達すると、スペクトルのピークの裾が複雑な形状となり、幅が大きく広がっているのが観察された。この変化はタンク圧力の低い時点では発生していない。したがって、圧力が上昇してヘリカル層にクラックが入り、FBG センサに不均一なひずみ分布が加わったために発生した形状変化であると考えられる。実際に、試験後にタンクを切り出して詳細な観察を行った結果、ヘリカル層にクラックが入っているのが観察された (Fig. 3.23)。また、加圧後に 0MPa まで減圧した状態でのスペクトルを比較したものを Fig. 3.22 に示す。2.5MPa まで加圧した後の減圧後のスペクトルは耐圧試験開始前のスペクトルとほぼ同じ形状であるが、3.5MPa 以上加圧した後の減圧後のスペクトルは Fig. 3.21 と同じようにピークの裾が複雑に広がる形状変化が観察された。この結果から、タンク圧が 3.5MPa に達する段階で FBG センサ付近のヘリカル層にクラックが発生し、それを減圧後のスペクトルの形状変化から検知することができたといえる。

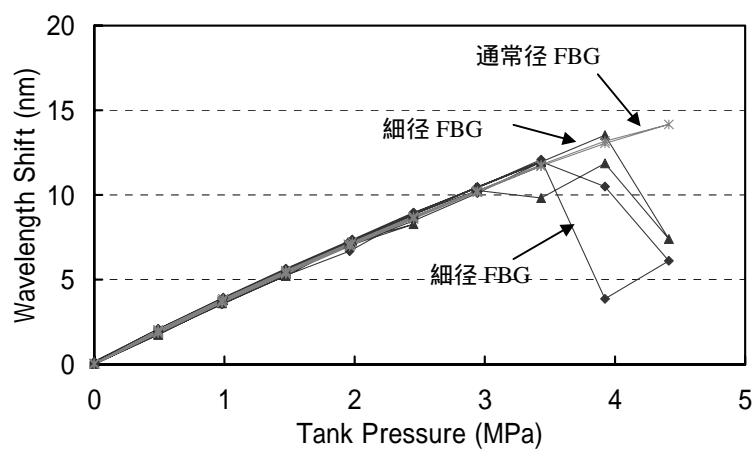


Fig. 3.19 タンク圧に対するスペクトルの中心波長シフト量

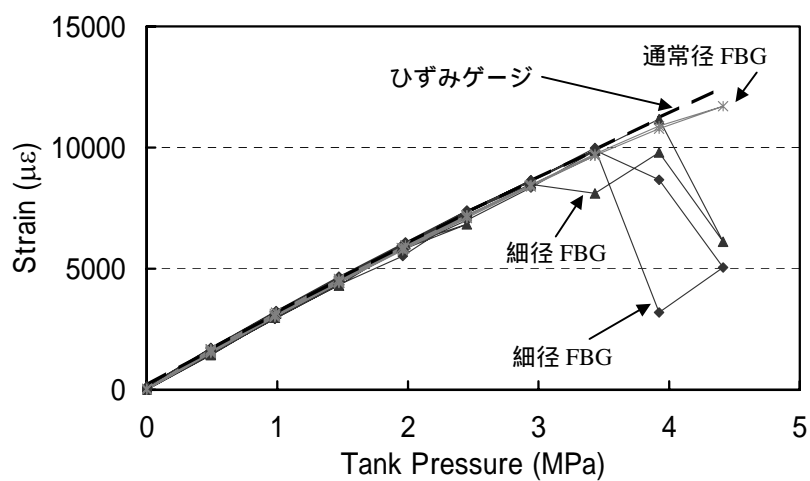


Fig. 3.20 タンク圧に対するフープ方向ひずみ

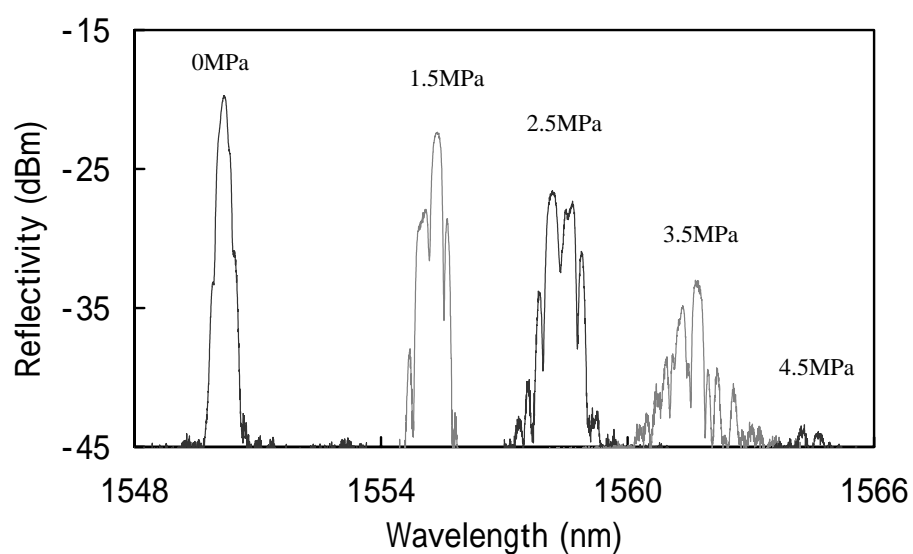


Fig. 3.21 タンク圧の上昇に対するスペクトル形状の変化

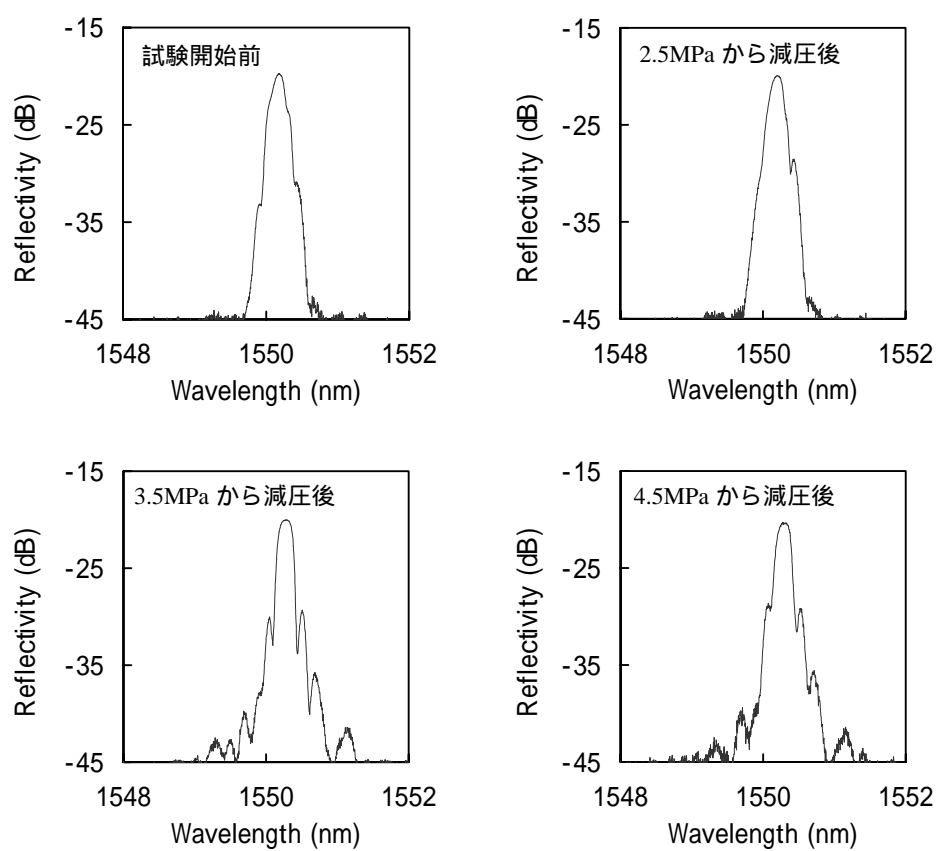


Fig. 3.22 減圧後のスペクトル形状の比較



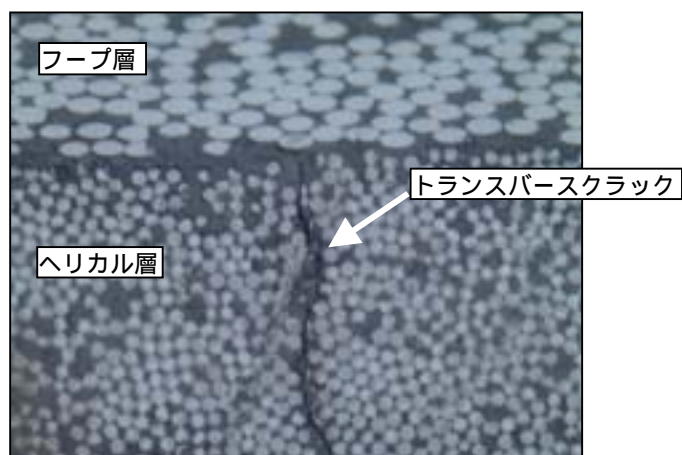


Fig. 3.23 試験後に観察されたヘリカル層のクラック

### 3.4 本章のまとめ

本章では FW 成形の CFRP 複合材タンクに FBG センサを埋め込み、成形中および耐圧試験においてモニタリングを行った。

3.1 節では、モニタリング対象の FW タンクについて説明し、フープ方向ひずみの計測およびヘリカル層に現れるトランスバースクラックの検出を目的とした FBG センサの埋め込み位置や、成形時および耐圧試験時の計測のための光ファイバの保護方法について述べた。また、光計測系や細径 通常径の融着技術について説明を行った。

3.2 節では、成形時のモニタリング結果について述べた。温度補償を行った後のスペクトルの波長シフト量は、樹脂の硬化後においてはタンクのひずみを精度よく計測できていることを示した。また成形が進むにつれて、複屈折によってスペクトル幅が広がることを示し、複屈折が発生する理由について考察を加えた。

3.3 節では、耐圧試験におけるモニタリング結果について述べた。埋め込まれた FBG センサによって、タンクのフープ方向ひずみが精度よく測定されていることを示した。また、スペクトル形状の変化について考察し、クラックの発生により変化したスペクトル形状がタンクの減圧後でも計測できることを示した。

以上のように本研究のモニタリング試験では良好な結果を得ることができたが、加圧過程における光のロスが大きすぎるなど、今後に向けての課題点も挙げられた。スペクトル形状の変化については、更に理論的な考察を加えるために、第 4 章で解析を行い検証する。

## 第4章 スペクトルの理論的解析と検証

第3章では、埋め込みFBGセンサを用いて成形中および耐圧試験中のモニタリングを行い、測定された反射光スペクトルについて考察を行った。本章では、実験で得られた反射光スペクトルの形状変化を確認するために、複屈折やトランスバースクラックによる影響を考慮した数値解析手法を提案する。解析の手順をFig. 4.1に示す。まず、有限要素モデルを用いて、タンク全体のモデルと埋め込み位置周辺の拡大モデルの2段階の解析によりクラック近傍における光ファイバのコアにかかる3方向のひずみの軸方向分布を求める。次に、得られたひずみ分布から屈折率の軸方向分布を計算する。最後に得られた屈折率変化から、モード結合理論を適用し、行列伝達法を用いた数値的解法により光の反射率を計算し、スペクトルを求める。

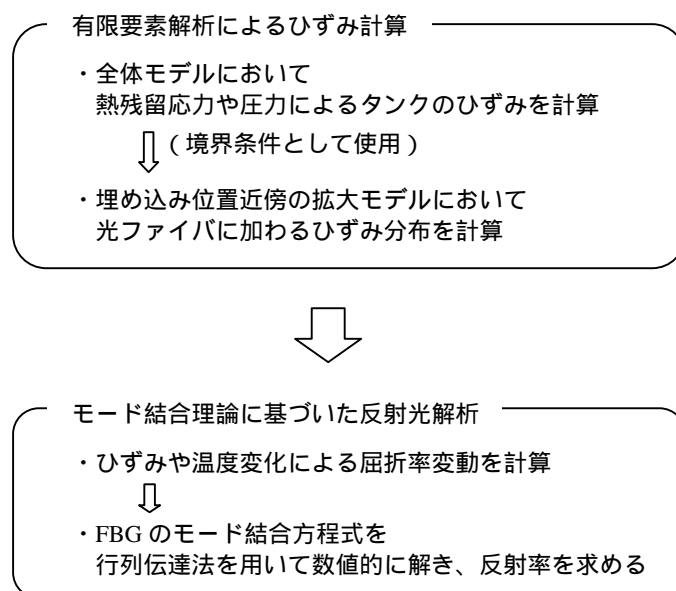


Fig. 4.1 スペクトル解析の手順

## 4.1 光ファイバに加わるひずみ分布の計算

最初に、成形終了時および耐圧試験の各圧力において光ファイバのコアに加わるひずみの計算を行った。本来であれば、積層構成や光ファイバの埋め込み位置、損傷の発生状況などを忠実に再現したタンクのモデルを構成して計算を行うべきであるが、今回のFWタンクのような大きな構造物のモデルにおいて光ファイバにかかるひずみ分布のような微小な部分の詳細な解析を行うのは、莫大な手間と時間がかかり効率的ではない。そこで本研究の解析では、有限要素モデルをFig. 4.2に示す全体モデルと、Fig. 4.3に示す拡大モデルの2段階に分けてひずみ計算を行った。計算は汎用FEMソフトABAQUS6.4-4を使用した。

まず、Fig. 4.2に示すようなタンク全体を模した有限要素モデルにおいて、成形中の硬化温度（125℃）を基準（無ひずみ状態）とした、成形終了時（25℃）およびその後の0.5MPa毎の内圧に対して、タンクに加わるひずみを計算した。このような基準の取り方をしたのは、成形過程において硬化温度で樹脂が硬化し、その時点から熱残留ひずみが発生し始めると仮定しているためである。このモデルは、タンクの対称性を考慮し、タンク断面のモデルを2次元軸対称モデルとして構成した。そのため3次元モデルに比べて非常に短時間での計算が可能である。しかし、ヘリカル層では機械的物性の主軸方向（繊維方向によって決まる）が軸対称平面上にはないため、各層ごとに物性値をそのまま用いることはできない。またドーム部分においては、Fig. 4.4に示すように位置によって材料の主軸方向が回転し繊維方向も異なるため、物性値そのものが変化する。その解決策として、ヘリカル層の物性値の投入に際してユーザサブルーチン（User Subroutines）を導入した。ユーザサブルーチンは、FORTRAN言語で記述したプログラムによって柔軟にモデルの拡張を行えるABAQUSに搭載された機能であり、本解析ではORIENT、UMAT、UEXPANの3つのユーザサブルーチンを導入した<sup>[9]</sup>。ORIENTは材料の主軸方向をモデル自体の軸方向からの回転マトリックスとして与えることができるサブルーチンである。これを用いて物性値の主軸方向がFig. 4.4のようにドーム部の接線方向となるように定義した。またUMATおよびUEXPANはひずみおよび熱膨張についての物性値をある程度自由に定義することができるサブルーチンである。ここではヘリカル層の各位置における繊維方向を、モデル面における座標の関数として予め与えておき、近似的に面内主軸における物性値を定義した。ユーザサブルーチンのプログラムをAppendix Bに記載する。

次に、Fig. 4.3に示すようなシリンダー部の一部を拡大して平板とみなしたモデルにおいて、埋め込まれた光ファイバおよびトランスバースクラックを表現し、クラックの近傍で光ファイバのコアに加わるひずみの軸方向分布を計算した。ここでは、先の全体モデルで得られたひずみを変位境界条件として与えることにより、成形後および各タンク圧力時における計算を行った。

以上の2段階の計算により、以降のスペクトル解析に必要となる軸方向ひずみ $\varepsilon_1$ 、軸に垂直な方向のひずみ $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、およびせん断ひずみ $\varepsilon_{23}$ の、軸方向分布を求めた。

有限要素解析によるひずみ計算の結果を以下に示す。Fig. 4.5 は、耐圧試験の各圧力において、実際にひずみゲージで測定されたひずみと、全体モデルにおいて計算されたシリンダー部のフープ方向ひずみを比較したものである。このように解析で求められたひずみは実験結果とほぼ一致しており、この有限要素モデルの妥当性が示されている。ただし実験結果では、微小ではあるがタンク圧が上昇するにつれてひずみの増加量が減るという非線形性が見られた。これは FW タンクの幾何学的非線形性、もしくは CFRP の応力 ひずみ関係における非線形性によるものだと考えられるが、モデルにおいてこれを忠実に再現することはできなかった。しかしその差は小さいものであり、以降のスペクトル解析に大きな誤差を与えるものではない。

次に、拡大モデルによって計算された、光ファイバのコアにかかるひずみ分布について述べる。ここでは例として、0MPa におけるひずみ分布（熱残留ひずみ）を Fig. 4.6 に、3.5MPa におけるひずみ分布を Fig. 4.7 にそれぞれ示す。座標が 0 の位置にクラックが入っている。いずれのひずみ成分についても、クラックの影響でひずみが増減する範囲はクラックの前後 0.3mm 以内であることがわかる。また Fig. 4.6 と Fig. 4.7 を比較すると、各成分においてひずみの増減の傾向が逆になっている。したがって、0MPa においては熱残留応力によるひずみ分布であるのに対し、タンク圧が上昇するにつれてそのひずみによる影響が熱残留ひずみによる影響を上回り、このように違ったひずみ増減の傾向になるということがわかった。

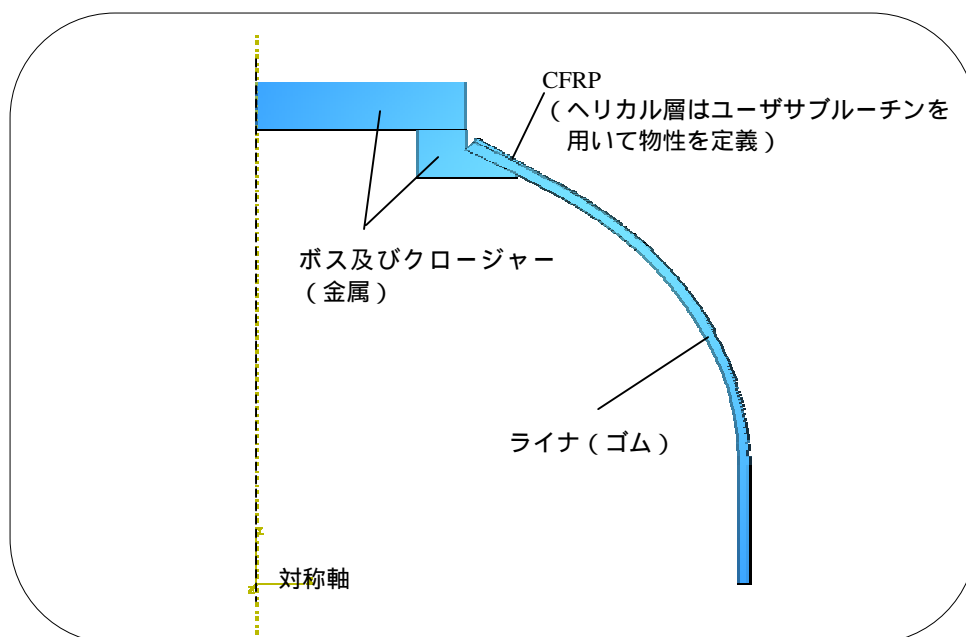


Fig. 4.2 FW タンクの全体軸対称モデル

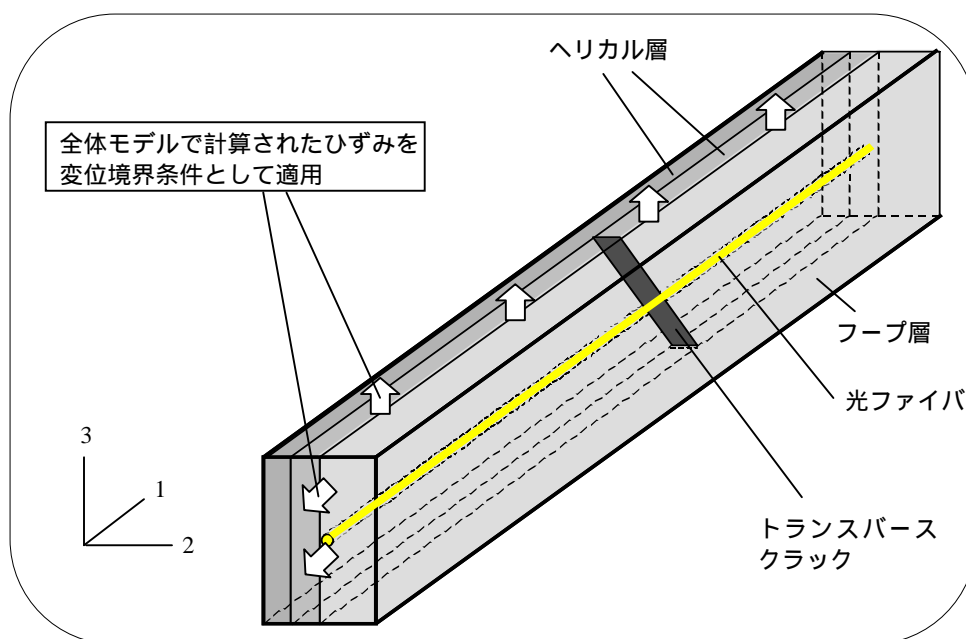


Fig. 4.3 シリンダー部の拡大モデル

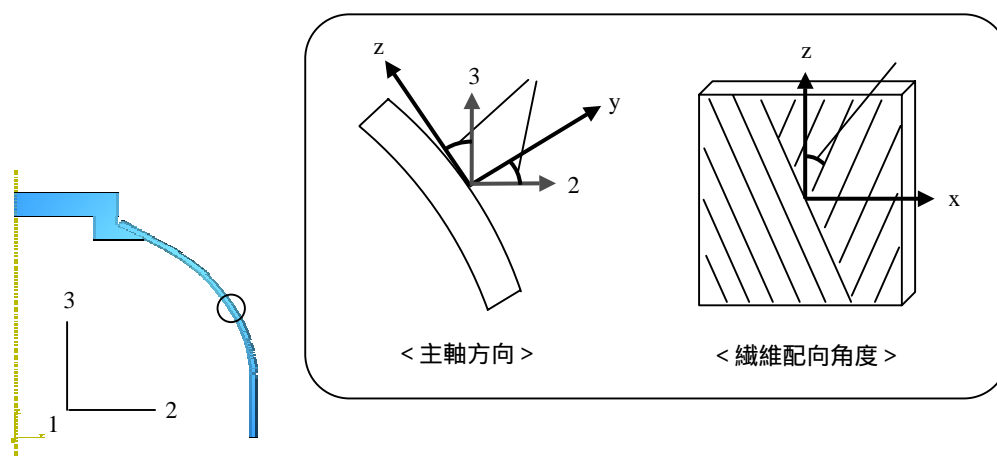


Fig. 4.4 ヘリカル層の繊維配向角および主軸方向の位置による違い

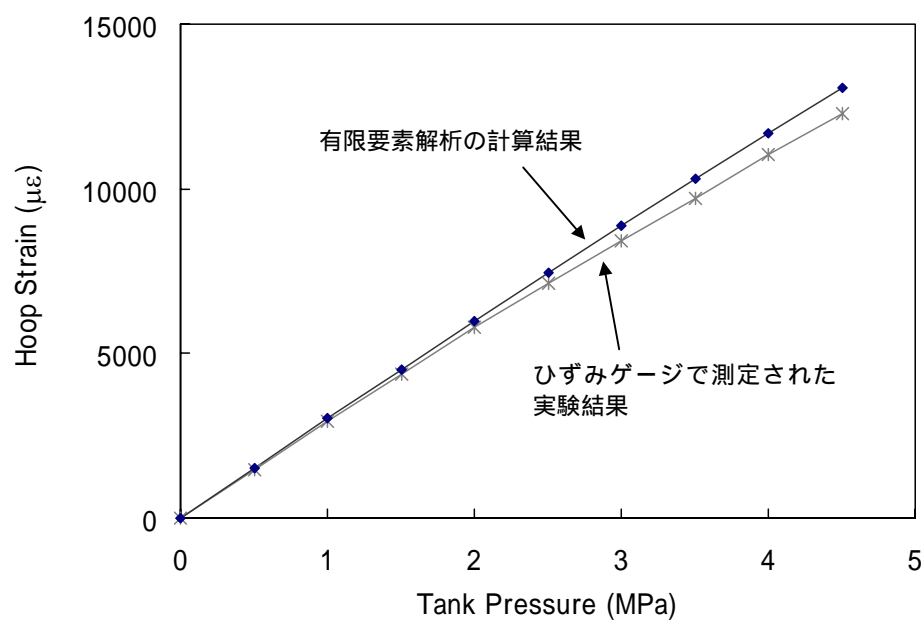


Fig. 4.5 実験と解析におけるフープ方向ひずみの比較

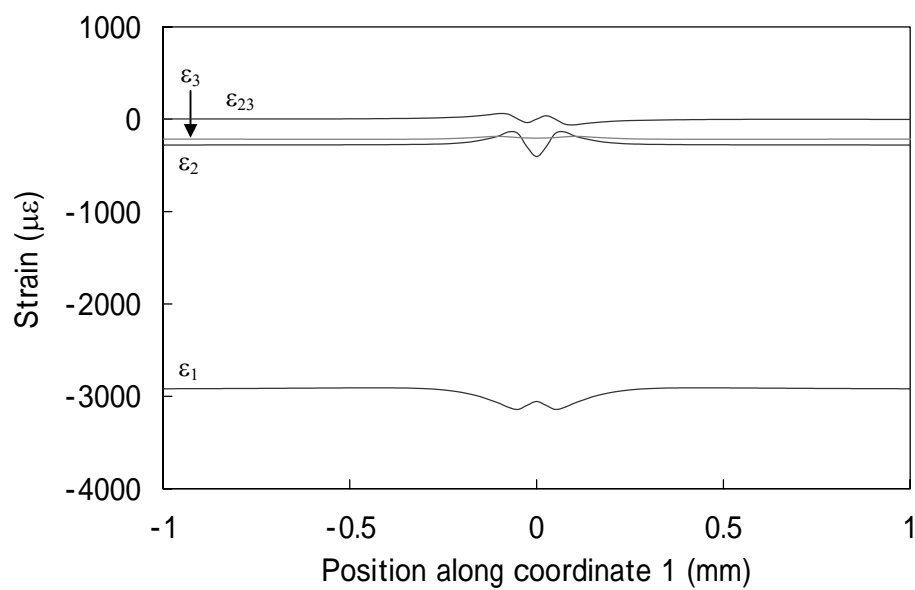


Fig. 4.6 クラック周辺におけるひずみ分布 (0MPa)

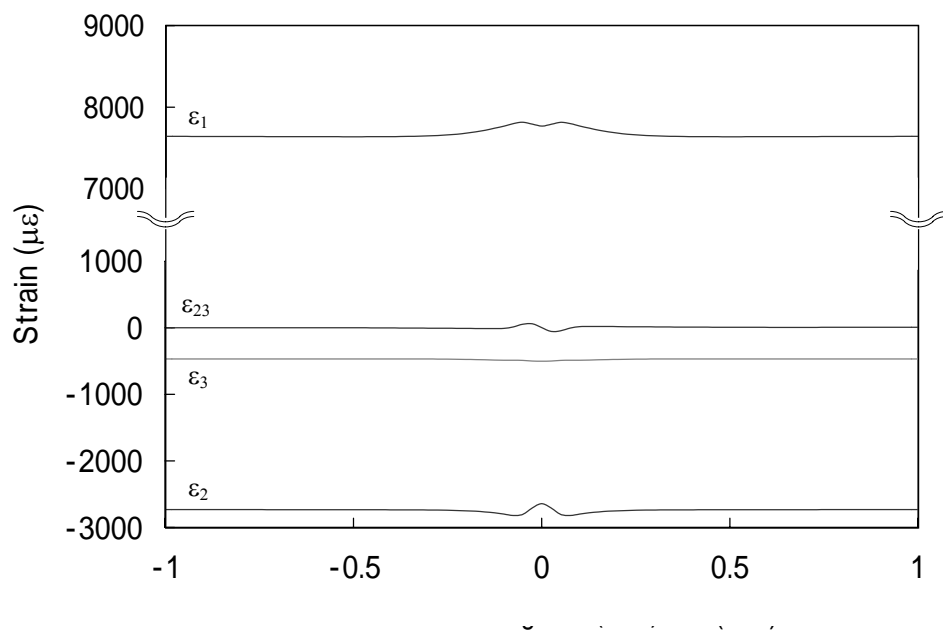


Fig. 4.7 クラック周辺におけるひずみ分布 (3.5MPa)



## 4.2 モード結合理論によるスペクトル解析

第2章で述べたように、FBGは光ファイバのコアに周期的な屈折率構造を持ち、特定の波長帯域の光のみを反射することができる。FBGの屈折率構造と光の反射率の関係は、モード結合理論を適用して入射光と反射光の結合を考え、理論的に導くことができる<sup>[10]</sup>。FBGのモード結合方程式を解くことにより波長に対する反射率が求められ、反射光スペクトルを出すことができるが、具体的なモード結合方程式の導出と、行列伝達法を用いた方程式の解法については、Appendix Dで詳しく説明する。本節では、前節で得られたひずみ分布がFBGに加わった場合に、理論的にスペクトル形状がどのように変化するかを調べた。

本解析に使用した、FBGにひずみが加わる前の初期状態におけるスペクトル形状をFig. 4.8に示す。これはモニタリング試験で埋め込んだ細径FBG（Table 3.1参照）の初期スペクトルを基にしたものである。このFBGにひずみが加わった場合のスペクトル形状について計算を行った。以下に求められたスペクトル形状を示す。ここでは第3章で得られた実験結果と比較することを考え、タンク圧が0MPa、2.5MPaおよび3.5MPaのときに、それぞれFig. 4.9のようにクラックがない場合および3種類の位置にクラックがある場合の計4つの場合について、計算されたスペクトルを示す。

Fig. 4.10～Fig. 4.12はそれぞれ、タンク圧が0MPa、2.5MPaおよび3.5MPaの場合に解析で得られたスペクトルである。これらのスペクトルを比較すると、次の2つのことがわかる。まずひとつは、タンク圧が上昇するにつれてスペクトル幅が広がり、ピークが2つに分裂していくことである。この変化はクラックがどの位置にある場合においても同様に見られる。これは、タンク圧の上昇とともにFBGに加わるひずみの非軸対称性が強まることにより、複屈折の効果も増大するためである。もう1つは、同じタンク圧でも、クラックの位置によってスペクトルピークの裾の広がり方が違うことである。裾の広がり方は、クラックがFBGの中央に当たる部分のヘリカル層で発生した場合が最も顕著に現れ、クラック位置がFBGの端の方になるほど小さくなる。この傾向はいずれのタンク圧においても見られる。これはFBGのアポダイゼーションにより、グレーティングによる屈折率変化の幅が最も大きなFBGの中央に近いほど、ひずみ分布による影響を受けやすくなるためである。図中のCのようにクラックがFBGの端の方にある場合はほとんどスペクトルに変化はなく、実際の計測においてはノイズの影響により判別は難しいと思われる。

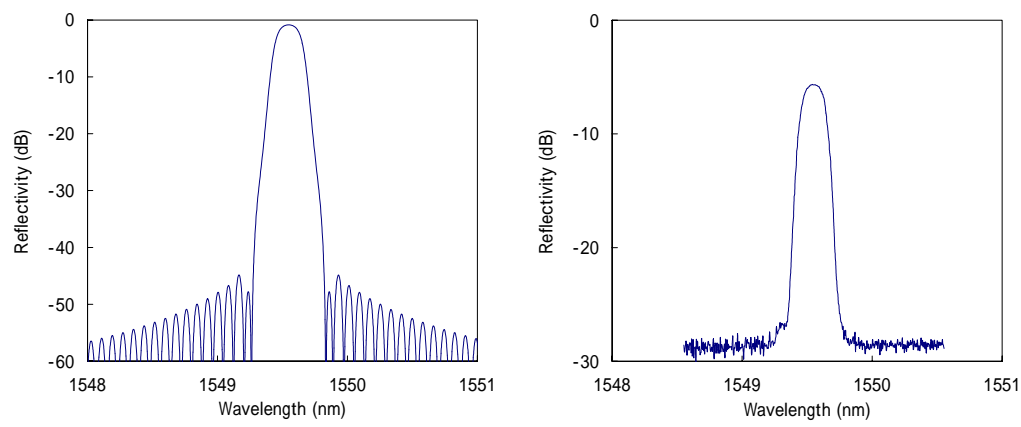


Fig. 4.8 解析に使用した細径 FBG の初期スペクトル（左）と  
基になった細径 FBG の初期スペクトル（右）

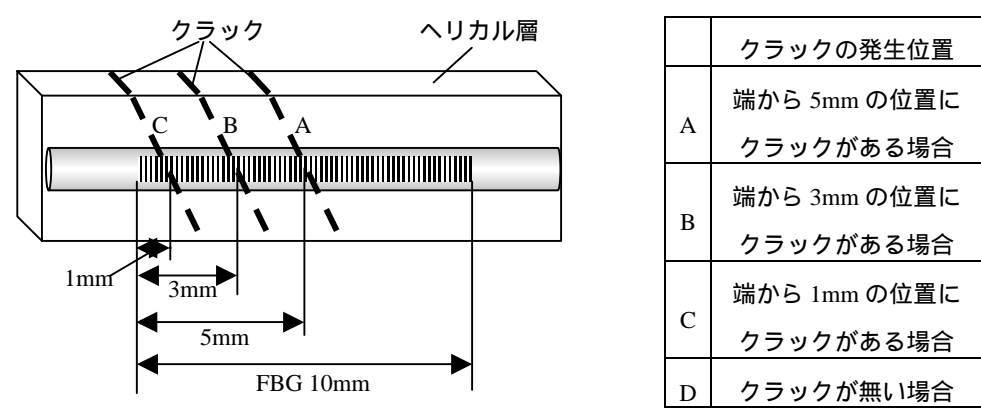


Fig. 4.9 解析におけるクラックの位置と記号

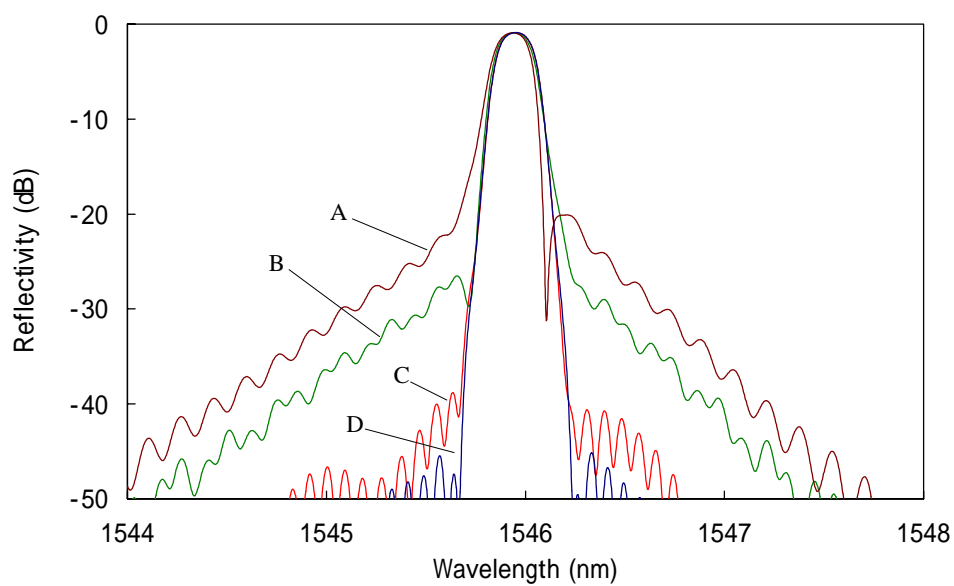


Fig. 4.10 解析により求められたスペクトル (0MPa、A～DはFig. 4.9に対応)

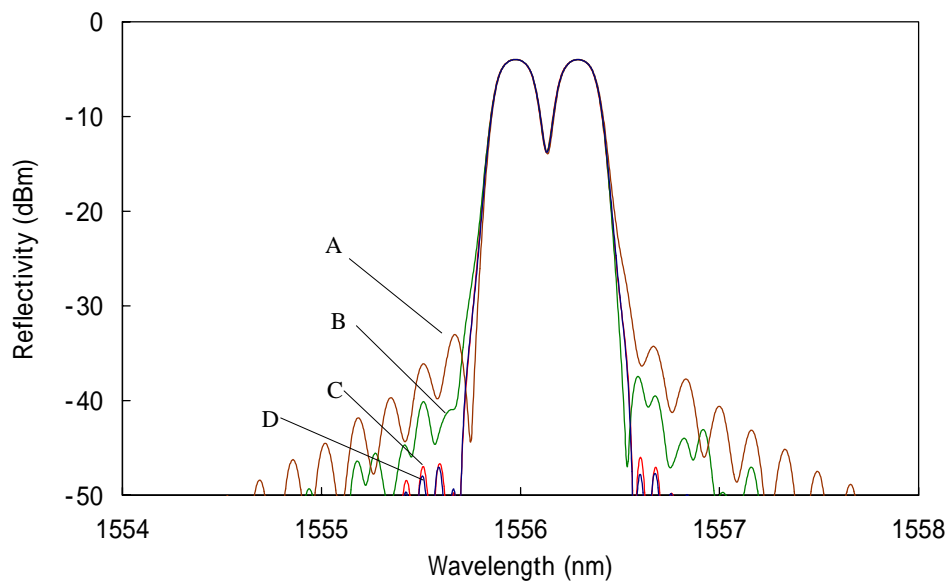


Fig. 4.11 解析により求められたスペクトル (2.5MPa、A～DはFig. 4.9に対応)

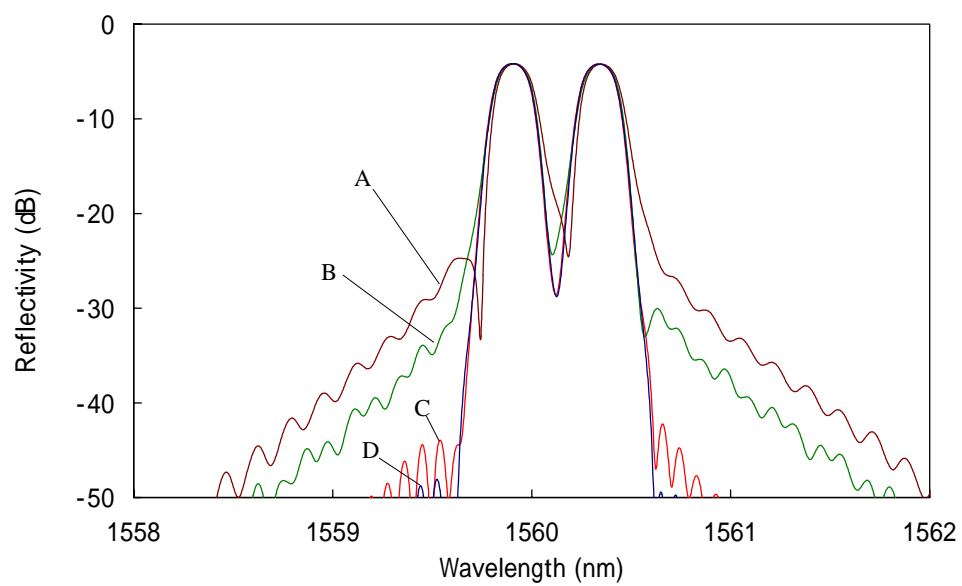


Fig. 4.12 解析により求められたスペクトル ( 3.5MPa、A ~ D は Fig. 4.9 に対応 )

### 4.3 解析結果を考慮したモニタリング結果の考察

4.1 節および 4.2 節では、各タンク圧力における反射光スペクトルを解析的に求めた。そこで本節では、解析で求められたスペクトルと比較し、第 3 章で得られたモニタリング実験の結果について考察を行う。

まず成形後のスペクトルについては、実験では Fig. 3.17 で示されたようにスペクトル幅が大きく広がったが、解析では Fig. 4.8 と Fig. 4.10 (D) を比べてわかるように、ほとんど広がりは見られなかった。ここで、解析では硬化温度を基準（無ひずみ状態）として計算を行っている。スペクトルの波長が実験と解析で異なっているのはこのためである。ところが実験では 3.2 節で述べた通り硬化温度に達する前からスペクトル形状が変化しており、既に何らかの原因で非軸対称なひずみが加わっていることがわかる。その影響で、解析には現れないひずみが硬化後の降温過程でも残ったままであり、スペクトル幅が広がったものと結論づけられる。昇温時に加わるひずみの原因は現在のところ明確でないため、それを解析で再現することはできないが、いずれにせよ単なる熱膨張ひずみ以外のひずみが加わっていることは明らかであり、その原因の解明は今後の課題のひとつであると言える。

次に、耐圧試験のスペクトル形状について述べる。解析において、非軸対称なひずみが光ファイバに加わったことによる複屈折の効果でスペクトル幅が広がりピークが分裂することが明らかになった。実験でも同様にタンク圧が上昇するにつれて同様の傾向が見られ、複屈折が強く発生したことがわかる。また実験では、3.5MPa まで加圧した後からスペクトルのピークの裾が複雑に広がり、その変化は 0MPa に減圧した後も観察された。このスペクトル形状は解析においてクラックが存在する場合に得られたスペクトルと似ており、このことから 3.5MPa へ加圧するときに FBG 付近のヘリカル層にクラックが入り、実験でそれを検知できたことがわかる。

## 4.4 本章のまとめ

本章では、実験で得られた反射光スペクトルの形状変化を確認するために、反射光スペクトルの理論的な解析を行った。

4.1 節では、2 段階の有限要素解析により、各タンク圧において光ファイバのコアに加わるひずみ分布を求めた。最初のモデルではタンク全体を 2 次元軸対象モデルとして構成し、ヘリカル層の物性値投入にはユーザサブルーチンを用いることで、タンクのひずみ分布を求めた。それを後の拡大モデルで境界条件として用いて、クラック周辺におけるコアのひずみ分布を計算した。

4.2 節では、FBG のモード結合方程式を解くことにより、4.1 節で得られたひずみ分布が FBG に加わったときの光の反射率を計算し、スペクトルを求めた。タンク圧が上昇するにつれて複屈折によりスペクトルの幅が広がることが確認された。また、ヘリカル層にクラックが入った場合はスペクトルのピークの裾が複雑に広がることがわかり、その広がり方はクラック位置が FBG の真ん中に近いほど大きくなることがわかった。

4.3 節では、解析結果を基に、第 3 章で得られたスペクトルの検証を行った。スペクトル形状の変化の比較から、実際の FW タンクでは成形時に熱残留ひずみ以外の何らかのひずみ加わっていることや、耐圧試験でヘリカル層に発生したクラックを検知できたことがわかった。

以上のように、計算によりスペクトルを求め実験結果と比較することで、実験で計測されたスペクトル形状の変化がどのような要因でもたらされたものであるかを確認し、埋め込み FBG センサによって FW タンクに発生するクラックの検出が可能であることを示すことができた。

## 第5章 結論

本研究では、FBG センサを用いたヘルスモニタリングの手法を実際の CFRP 複合材構造物に適用し、成果を得るとともに実用化に向けての問題点を洗い出すことを目的とした。株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペースとの共同研究として、FW 成形の CFRP 複合材タンクに細径 FBG センサを埋め込み、成形モニタリングおよび耐圧試験でのモニタリングを実施した。

FBG センサは、タンクのフープ方向ひずみの計測と、ヘリカル層に発生するトランスバースクラックの検知を目的として、ヘリカル層とフープ層の間にフープ方向に埋め込んだ。ここで、細径光ファイバは炭素繊維に沿ってきれいに埋め込まれたのに対し、通常径 FBG センサは樹脂リッチが発生しており、埋め込みには細径 FBG のほうが適していることがわかった。

成形モニタリングにおいて、埋め込み FBG センサの波長シフト量はひずみと温度の両方の影響を受けるため、温度用 FBG センサを同時に埋め込んで温度補償を行った。その結果、樹脂の硬化後においてタンクのひずみを精度よく計測できることを示した。また、成形過程においてスペクトル幅が広がる様子が観察された。耐圧試験のモニタリングにおいても、FBG センサによるひずみ計測が精度よく行われた。またタンク圧が上昇するとスペクトル幅が広がり、その後クラックを検知したと思われるスペクトル形状の変化が発生した。そして、その形状変化はタンク圧を下げてでも観察できることがわかった。

次に、スペクトルの理論的な解析を行った。有限要素解析によるひずみの計算では、計算の効率化のためにモデルを2つに分け、最初のモデルではタンク全体の2次元軸対称モデルを作成し、各タンク圧力におけるタンクのひずみを計算した。ここでは、ヘリカル層に物性値を投入する際にユーザサブルーチンを導入した。求められたひずみを後の拡大モデルに境界条件として適用し、クラック周辺において光ファイバのコアに加わるひずみ分布を計算した。その後、FBG のモード結合方程式を解くことにより、FBG にひずみ分布が加わったときのスペクトルを求めた。その結果、複屈折によってスペクトル幅が広がり、クラックの発生によってスペクトルのピークの裾が複雑に変化することがわかった。これにより、耐圧試験のモニタリングで観察されたスペクトル形状の変化は、クラックを検知したものであることが確認された。

以上のように、FW タンクに細径 FBG センサを埋め込んで実施された本研究のモニタリングは、ひずみ計測およびクラックの検知という当初の目的についてはいずれも良好な結果を得ることができた。しかし、実際にモニタリングを行うことで明らかになった問題点もいくつかある。

まず1つ目は、細径 FBG センサの取り扱いについてである。現在のところ、細径 FBG センサの取扱いは熟練を要する作業であり、慎重に扱わないと容易に切断してしまう。また、新しく開発された光ファイバであるため対応するデバイスが開発されておらず、融着などの特殊な方法を用いなければ計測が行えない。今後、細径 FBG センサを実構造物へ適用する上で、細径 FBG センサの取り扱いに関する作業性や汎用性の向上はなくてはならないものであることを実感した。

2つ目は、光の強度低下についてである。本研究のモニタリングでは、タンク圧が上昇するにつれて光の強度が急激に低下し、最終的に反射光スペクトルがノイズに埋もれてしまい判別できなくなってしまった。計測原理の特性上、ある程度の強度低下は計測に支障をきたすことはないが、今回のように反射光の測定が困難になるほどの強度低下は好ましくないため、強度低下の発生する原因を特定し、対策を行うことが必要である。

3つ目は、成形時のモニタリングで測定されたスペクトルの形状が、解析の結果と異なっている点である。本研究のモニタリングでは、FW タンクの成形において、硬化温度に達する前から何らかのひずみが FBG に加わることが明らかになった。これは平面の積層板では観測されない現象であり、原因は明らかになっていない。この現象について解明されれば、解析ではわからなかったひずみが成形後のモニタリングに及ぼす影響を抑えることができる。また逆に、FBG を用いた逆解析の手法<sup>[11]</sup>が確立されれば、スペクトルの形状変化から、FW タンクなどの構造物の成形において発生するひずみについて詳しく調べることもできるのではないと思われる。

以上のような課題が浮き彫りになったことも、本研究で実構造物のモニタリングを行って得られた成果のひとつである。これらの問題が解決され、FBG センサの埋め込みによるヘルスマニタリングが早期に実現することを、心から期待する。



## Appendix A 細径 FBG センサの物性値

本研究で使用した細径 FBG センサの物性値を以下に示す。

- ・細径光ファイバおよび被覆（ポリイミド）の力学的特性は以下の通りである。  
 なお、細径光ファイバおよび被覆は等方性材料として扱う。

Table A. 1 細径光ファイバの力学的特性

弾性率 (GPa)	$E$	73.1
ポアソン比	$\nu$	0.16
熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/$ )	$\alpha$	0.5

Table A. 2 被覆（ポリイミド）の力学的特性

弾性率 (GPa)	$E$	1.0
ポアソン比	$\nu$	0.25
熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/$ )	$\alpha$	15.0

- ・細径 FBG センサの光学特性は以下の通りである。

Table A. 3 細径 FBG センサの光学的特性

クラッド屈折率	$n_0$	1.458
比屈折率差 (%)	$\Delta$	0.65
光弾性定数	$P_{11}$	0.113
	$P_{12}$	0.252
格子間隔(nm)	$\Lambda$	529.697
アポダイゼーション		Gaussian
チャープ		なし
グレーティング長(mm)	$L$	10

## Appendix B ユーザサブルーチンのプログラム

4.1 節の有限要素解析では、Fig. 4.2 に示す全体モデルにおけるヘリカル層の物性値投入の際にユーザサブルーチンを導入した。ユーザサブルーチンのプログラムは FORTRAN 言語で記述される。本研究の解析で使したサブルーチンのプログラムを以下に示す。

( ABAQUS6.4-4 の解析マニュアルを参照<sup>[9]</sup> )

```

c      -----
c      subroutine ORIENT(t,noel,npt,layer,kspt,coords,basis,orname,nnodes,cnodes,jnnum)
c
c      include 'aba_param.inc'
c
c      character*80 orname
c
c      dimension t(3,3),coords(3),basis(3,3),cnodes(3,nnodes)
c      dimension jnnum(nnodes)
c
c
c      if(coords(2).gt.36.35) then
1      rotate = -1.2710E-12*coords(2)**6 + 8.3963E-10*coords(2)**5
2      -2.1260E-07*coords(2)**4 + 2.5348E-05*coords(2)**3
      -1.4102E-03*coords(2)**2 + 4.1150E-02*coords(2) - 0.46199
      else
      rotate = 0
      end if
c
c      t(1,1) = cos(-rotate)
c      t(2,1) = 0.0-sin(-rotate)
c      t(3,1) = 0
c      t(1,2) = sin(-rotate)
c      t(2,2) = cos(-rotate)
c      t(3,2) = 0
c      t(1,3) = 0
c      t(2,3) = 0
c      t(3,3) = 1
c
c      return
c      end
c
c      -----
c
c      subroutine UEXPAN(expan,dexpandt,temp,time,dttime,predef,dpred,statev,cmname,nstatv)
c
c      include 'aba_param.inc'
c
c      character*80 cmname,orname
c      dimension expan(*),dexpandt(*),temp(2),time(2),predef(*),dpred(*),statev(nstatv)
c
c

```

```

    expanx = 2.7E-7
    expany = 3.03E-5

c
    expan(1) = expany*temp(2)
    expan(2) = (expanx*cos(statev(1))**2+expany*sin(statev(1))**2)*temp(2)
    expan(3) = (expany*cos(statev(1))**2+expanx*sin(statev(1))**2)*temp(2)
    expan(4) = 0

c
    do k1=1,4
        dexpandt(k1) = 0
    end do

c
    return
end

c
c
c -----
c
    subroutine UMAT(stress,statev,ddsdde,sse,spd,scd,rpl,ddsddt,drplde,drpldt,
2  stran,dstran,time,dtime,temp,dtemp,predef,dpred,cmname,ndi,nshr,ntens,nstatv,
3  props,nprops,coords,drot,pnewdt,celent,dfgrd0,dfgrd1,noel,npt,layer,kspt,kstep,kinc)

c
    include 'aba_param.inc'

c
    character*80 cmname
    dimension stress(ntens),statev(nstatv),ddsdde(ntens,ntens),ddsddt(ntens),drplde(ntens),
1  stran(ntens),dstran(ntens),time(2),predef(1),dpred(1),
2  props(nprops),coords(3),drot(3,3),dfgrd0(3,3),dfgrd1(3,3)

c
    dimension dstres(ntens)

c
    dimension tmat1(6,6),tmat2(6,6),dmat(6,6),dmatA(6,6),dmatB(6,6)

c
    do k1=1,6
        do k2=1,6
            tmat1(k1,k2) = 0
            dmat(k1,k2) = 0
            dmatA(k1,k2) = 0
            dmatB(k1,k2) = 0
        end do
    end do

c
c <create winding angle matrix>
c
    if(cmname.eq.'CFRP(FW)') then
        if(coords(2).gt.36.35) then
            angle = 2.900227E-9*coords(1)**6 - 2.089398E-6*coords(1)**5
1          + 6.209291E-4*coords(1)**4 - 9.747491E-2*coords(1)**3
2          + 8.533178E0*coords(1)**2 - 3.959147E2*coords(1) + 7.6792E3
            else
                angle = 26.1
            end if
        else
            angle = 90
        end if
        statev(1) = angle /180.0 * 3.14

c

```

```

tmat1(1,1) = 1.0
tmat1(2,2) = cos(statev(1))**2
tmat1(3,3) = cos(statev(1))**2
tmat1(4,4) = cos(statev(1))
tmat1(5,5) = cos(statev(1))
tmat1(6,6) = cos(statev(1))**2 - sin(statev(1))**2
tmat1(2,3) = sin(statev(1))**2
tmat1(3,2) = sin(statev(1))**2
tmat1(2,6) = cos(statev(1))*sin(statev(1))
tmat1(3,6) = -cos(statev(1))*sin(statev(1))
tmat1(6,2) = -2*cos(statev(1))*sin(statev(1))
tmat1(6,3) = 2*cos(statev(1))*sin(statev(1))
tmat1(4,5) = sin(statev(1))
tmat1(5,4) = -sin(statev(1))

c
do k1=1,6
  do k2=1,6
    tmat2(k1,k2) = tmat1(k2,k1)
  end do
end do

c
c <create jacobian matrix>
c
ex = stran(2)*cos(statev(1))**2 + stran(3)*sin(statev(1))**2
e11 = 1200E9*ex + props(1)
delta = 1-2*props(4)*props(5)-props(6)**2-2*props(4)*props(5)*props(6)

c
dmat(1,1) = props(2)*(1-props(4)*props(5))/delta
dmat(2,2) = e11*(1-props(6)**2)/delta
dmat(3,3) = props(2)*(1-props(4)*props(5))/delta
dmat(1,2) = e11*(props(5)+props(5)*props(6))/delta
dmat(2,1) = e11*(props(5)+props(5)*props(6))/delta
dmat(2,3) = e11*(props(5)+props(5)*props(6))/delta
dmat(3,2) = e11*(props(5)+props(5)*props(6))/delta
dmat(1,3) = props(2)*(props(6)+props(4)*props(5))/delta
dmat(3,1) = props(2)*(props(6)+props(4)*props(5))/delta
dmat(4,4) = props(3)
dmat(5,5) = (dmat(1,1)-dmat(1,3))/2
dmat(6,6) = props(3)

c
do k1=1,6
  do k2=1,6
    do i1=1,6
      dmatA(k1,k2) = dmatA(k1,k2) + tmat2(k1,i1)*dmat(i1,k2)
    end do
  end do
end do

c
do k1=1,6
  do k2=1,6
    do i1=1,6
      dmatB(k1,k2) = dmatB(k1,k2) + dmatA(k1,i1)*tmat1(i1,k2)
    end do
  end do
end do

c
do k1=1,ntens

```

```

                do k2=1,ntens
                    ddsdde(k1,k2) = dmatB(k1,k2)
                end do
            end do
c
c <evaluate new stress tensor>
c
        do k1 = 1,ntens
            dstres(k1) = 0.0
            do k2 = 1,ntens
                dstres(k1) = dstres(k1) + ddsdde(k1,k2)*dstran(k2)
            end do
            stress(k1) = stress(k1) + dstres(k1)
        end do
c
        return
    end
c
c
c -----

```

## Appendix C ひずみや温度変化に対するブラッグ波長の変化

ここでは、光ファイバひずみや温度変化が加わった場合に、屈折率がどのように変化するかについて述べる。続いて、屈折率や格子間隔の変化とブラッグ波長の変化の関係について述べ、均一な軸方向ひずみや温度変化に対して波長が線形に変化することを示す。

### C.1 ひずみや温度変化による屈折率変動

光ファイバにひずみや温度変化が加わった場合、屈折率が変化する。これを光弾性効果とよぶ。光弾性効果とは本来、材料に応力が生じることによって屈折率の変化が生じる現象のことを差し、光弾性定数は一般的に応力と屈折率の関係を結びつける材料定数である。しかし、光弾性効果による屈折率変化がひずみによって記述することもでき<sup>[7]</sup>、FBGの反射光スペクトルに及ぼす影響を考える場合にはひずみと屈折率の関係式のほうが都合が良い。ひずみと屈折率の関係を表す材料定数はポッケル定数と呼ばれる。しかし、ひずみと屈折率の関係式は、応力と屈折率の関係式を变形して得られるものであり、本質的には同じものである。ここでは応力と屈折率の関係式から、ひずみと屈折率の関係式を求める。

Figure C.1 のような光ファイバ座標系  $xyz$  とひずみの主軸  $pqr$  を考える。本研究のように光ファイバを繊維と平行して埋め込む場合、光ファイバの座標系  $z$  とひずみの主軸  $r$  は同方向と仮定して差し支えない。応力によって誘起される  $p$  方向の屈折率変化を  $\Delta n_p$ 、 $q$  方向の屈折率変化を  $\Delta n_q$  とすると、応力と屈折率の関係式は次のように表される<sup>[12]</sup>。

$$\begin{aligned}\Delta n_p &= C_1 \sigma_p + C_2 (\sigma_q + \sigma_r) \\ \Delta n_q &= C_1 \sigma_q + C_2 (\sigma_p + \sigma_r)\end{aligned}\quad (\text{C.1})$$

ここで  $\sigma_p$ 、 $\sigma_q$ 、 $\sigma_r$  は主応力であり、また  $C_1$ 、 $C_2$  は光弾性定数であり材料によって固有の値である。

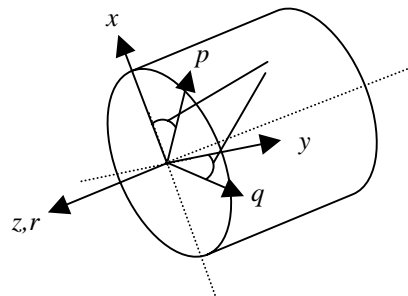


Figure C.1 光ファイバの座標系

光ファイバは等方性材料であるので、熱ひずみを考慮したひずみと応力の関係式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ \varepsilon_q \\ \varepsilon_r \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_p \\ \sigma_q \\ \sigma_r \end{bmatrix} + \alpha \Delta T \quad (\text{C.2})$$

ここで  $E$  は光ファイバの弾性率、 $\nu$  は光ファイバのポアソン比、 $\alpha$  は光ファイバの熱膨張係数、そして  $\Delta T$  は基準温度からの温度変化量である。(C.2) 式を応力を左辺にして書き直すと、

$$\begin{bmatrix} \sigma_p \\ \sigma_q \\ \sigma_r \end{bmatrix} = \frac{E}{2\nu^2 + \nu - 1} \begin{bmatrix} \nu - 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & \nu - 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & \nu - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_p - \alpha \Delta T \\ \varepsilon_q - \alpha \Delta T \\ \varepsilon_r - \alpha \Delta T \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

そして、(C.3) 式を (C.1) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} \Delta n_p &= -\frac{n^3}{2} \{ p_{11} \varepsilon_p + p_{12} (\varepsilon_q + \varepsilon_r) - (p_{11} + 2p_{12}) \alpha \Delta T \} \\ \Delta n_q &= -\frac{n^3}{2} \{ p_{11} \varepsilon_q + p_{12} (\varepsilon_p + \varepsilon_r) - (p_{11} + 2p_{12}) \alpha \Delta T \} \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} p_{11} &= -\frac{2E\{(\nu - 1)C_1 - 2\nu C_2\}}{n^3(2\nu^2 + \nu - 1)} \\ p_{12} &= \frac{2E(\nu C_1 + C_2)}{n^3(2\nu^2 + \nu - 1)} \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

と置いた。この  $p_{11} \cdot p_{12}$  がポツケル定数であり、ひずみと屈折率の関係を結ぶ材料定数である。

次に、応力の主軸である  $pqr$  系から、光ファイバの座標系である  $xyz$  系への座標変換を行う。Figure C.1 にあるように、 $x$  軸と  $p$  軸、および  $y$  軸と  $q$  軸の角度が  $\theta$  であるとする、

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \varepsilon_q &= \varepsilon_x \sin^2 \theta + \varepsilon_y \cos^2 \theta - \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ 0 = \gamma_{pq} &= -(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

となる。(C.4) 式に (C.6) 式を代入して、整理すると次の式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta n_p &= -\frac{n^3}{2} \left\{ p_{12} \varepsilon_z + (p_{11} + p_{12}) \varepsilon_h + \frac{p_{11} - p_{12}}{2} \varepsilon_d - (p_{11} + 2p_{12}) \alpha \Delta T \right\} \\ \Delta n_q &= -\frac{n^3}{2} \left\{ p_{12} \varepsilon_z + (p_{11} + p_{12}) \varepsilon_h - \frac{p_{11} - p_{12}}{2} \varepsilon_d - (p_{11} + 2p_{12}) \alpha \Delta T \right\} \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

ここで、

$$\varepsilon_h = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \quad \varepsilon_d = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (\text{C.8})$$

である。更に、応力が一定のもとでの屈折率の温度依存項である  $dn/dT$  を加えて、 $\Delta n_p$  と  $\Delta n_q$  は以下のように表現される。

$$\begin{aligned} \Delta n_p &= -\frac{n^3}{2} \left\{ p_{12}\varepsilon_z + (p_{11} + p_{12})\varepsilon_h - \left\{ \frac{2}{n^3} \frac{dn}{dT} + (p_{11} + 2p_{12})\alpha\Delta T \right\} + \frac{p_{11} - p_{12}}{2} \varepsilon_d \right\} \\ \Delta n_q &= -\frac{n^3}{2} \left\{ p_{12}\varepsilon_z + (p_{11} + p_{12})\varepsilon_h - \left\{ \frac{2}{n^3} \frac{dn}{dT} + (p_{11} + 2p_{12})\alpha\Delta T \right\} - \frac{p_{11} - p_{12}}{2} \varepsilon_d \right\} \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

式 (C.9) から 2 つのことがわかる。まず 1 つは、屈折率がひずみに関して線形に変化することである。そしてもう 1 つは、非軸対称なひずみ成分  $\varepsilon_d$  がある場合、 $p$  方向の屈折率と  $q$  方向の屈折率が異なる値になることである。これが、複屈折が発生する原因である。

## C.2 ひずみや温度変化によるブラッグ波長の変化

ここでは簡単のため、例として FBG に均一な軸方向ひずみ  $\varepsilon$  のみが加わった場合を考える。

本編中のブラッグ波長を表す式 (2.1) において、均一な軸方向ひずみ  $\varepsilon$  が加わったときの变化分をそれぞれ  $\Delta\lambda$ 、 $\Delta n$ 、 $\Delta d$  とすると、次の式が成り立つ。

$$(\lambda + \Delta\lambda) = 2(n + \Delta n)(d + \Delta d) \quad (\text{C.10})$$

ここで、 $\Delta d \ll d$  であるから、微小項を無視して式 (C.10) から次の式が得られる。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta d}{d} \quad (\text{C.11})$$

$\Delta n$  については式 (C.9) から、 $\varepsilon_z = \varepsilon$  および  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu\varepsilon$  とすることにより

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2} \{ p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}) \} \varepsilon \quad (\text{C.12})$$

が得られ、さらに  $\Delta d$  については

$$\Delta d = \varepsilon d \quad (\text{C.13})$$



であるから、式 (C.12) および式 (C.13) を式 (C.11) に代入すれば、

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left[ 1 - \frac{n^3}{2} \{ p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}) \} \right] \varepsilon \quad (\text{C.14})$$

となる。したがって、ひずみ  $\varepsilon$  に対して、ブラッグ波長  $\lambda$  が線形にシフトすることがわかる。このため、ブラッグ波長の変化量を測定することにより、FBG に加わっている軸方向ひずみを知ることができる。

## Appendix D モード結合理論および行列伝達法を利用した解法

ここでは、FBG の反射光スペクトルを計算するときに用いられるモード結合理論と、モード結合方程式を解くために利用する行列伝達法について説明する<sup>[13,14]</sup>。

### D.1 モード結合理論

モード結合理論は、2 つの平行した導波路 1、2 を持つ系が存在した場合、導波路それぞれの単独モードを用いて全体のモードを導き、全体系の電磁界の様子を解析する手法である。

2 つの導波路モードの電磁界ベクトルを  $\tilde{E}_p$  および  $\tilde{H}_p$  ( $p=1,2$ ) と表し、平面波を仮定して以下のように表現する。

$$\tilde{E}_p = E_p(x, y) \exp(i\beta_p z) \quad (\text{D.1})$$

$$\tilde{H}_p = H_p(x, y) \exp(i\beta_p z) \quad (\text{D.2})$$

ここで、 $\beta_p$  は各モードの伝播定数である。これらの電磁界ベクトルはマクスウェル方程式を満たす。

$$\nabla \times \tilde{E}_p = -i\omega\mu_0 \tilde{H}_p \quad (\text{D.3})$$

$$\nabla \times \tilde{H}_p = -i\omega\varepsilon_0 N_p^2 \tilde{E}_p \quad (\text{D.4})$$

ここで  $\mu_0$ 、 $\varepsilon_0$  はそれぞれ真空中の透磁率と誘電率、 $\omega$  は光ファイバを伝播する光の各周波数、そして  $N_1(x, y)$ 、 $N_2(x, y)$  は導波路 1 および 2 のみの屈折率分布である。

この系全体の電磁界ベクトルは、1 と 2 のモードの線形結合として表される。

$$\tilde{E} = A(z)\tilde{E}_1 + B(z)\tilde{E}_2 \quad (\text{D.5})$$

$$\tilde{H} = A(z)\tilde{H}_1 + B(z)\tilde{H}_2 \quad (\text{D.6})$$

系全体の電磁界ベクトルもマクスウェルの方程式を満たさなければならないので、

$$\nabla \times \tilde{E} = -i\omega\mu_0 \tilde{H} \quad (\text{D.7})$$

$$\nabla \times \tilde{H} = -i\omega\varepsilon_0 N^2 \tilde{E} \quad (\text{D.8})$$

ここで、

- ・系全体の光のパワーは無損失である
- ・FBG を考え、モード 1 を前進波、モード 2 を後進波とする

という仮定を置き、(D.1) ~ (D.8) 式を用いて、変形すると次のような式が得られる。

$$\frac{dA}{dz} = -i\kappa_G B \exp(2i\varphi z) \quad (\text{D.9})$$

$$\frac{dB}{dz} = i\kappa_G A \exp(-2i\varphi z) \quad (\text{D.10})$$

ここで、 $\kappa_G$  はモード結合定数であり、その値はグレーティングの形状や位相および屈折率などによって決まる。また、 $\varphi$  は位相の整合状態を表すパラメータであり、次の式で表される。

$$\varphi = \beta - \frac{\pi}{d} \quad (\text{D.11})$$

ここで  $d$  はグレーティングの格子間隔である。

(D.9) 式および (D.10) 式がモード結合方程式である。この方程式を解くことにより、 $A(z)$  と  $B(z)$  を求めることができる。 $A(z)$  と  $B(z)$  はそれぞれ前進波および後進波の振幅であるから、FBG の入射端を  $z=0$  とすれば、 $B(0)$  が FBG の反射光の大きさを表している。

## D.2 行列伝達法による解法

上記のように、モード結合方程式 (D.9)(D.10) を解くことによって FBG の反射率を求めることができる。しかし、グレーティングにアポダイゼーションやチャープが存在する場合や、不均一なひずみによって屈折率分布が存在する場合には、モード結合定数  $\kappa_G$  が位置  $z$  の関数として変化するため、方程式を解析的に解くことはできない。そこで、行列伝達法を利用して近似的に解を求める。行列伝達法はグレーティング全体を、区間内は均一とみなした  $N$  個のセグメントの集合として近似し、各セグメントにおける伝達行列を掛け合わせることで全体の反射光を計算する手法である。

まず、モード結合方程式 (D.9)(D.10) の一般解は、次のようになる。

$$A(z) = C_1 \exp[(\alpha + i\varphi)z] + C_2 \exp[-(\alpha + i\varphi)z] \quad (\text{D.12})$$

$$B(z) = -\frac{\alpha + i\varphi}{i\kappa} C_1 \exp[-(\alpha + i\varphi)z] - \frac{-\alpha + i\varphi}{i\kappa} C_2 \exp[(\alpha + i\varphi)z] \quad (\text{D.13})$$

$$\kappa = \kappa_G \exp\left(-i\frac{2\pi}{d}z\right) \quad (\text{D.14})$$

$$\alpha = \sqrt{\kappa_G^2 - \varphi^2} \quad (\text{D.15})$$

そして、FBG 全体の長さを  $L$  とすると、(D.12)(D.13)式から以下のような関係式が成立する。

$$\begin{Bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ b^* & a^* \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{Bmatrix} \quad (\text{D.16})$$

$$a = \exp(i\varphi L) \left\{ \cosh(\alpha L) - i \frac{\varphi}{\alpha} \sinh(\alpha L) \right\} \quad (\text{D.17})$$

$$b = -i \exp(i\varphi L) \frac{K_G}{\alpha} \sinh(\alpha L) \quad (\text{D.18})$$

次に、FBG を  $N$  個のセグメントに分割した場合を考える。このとき  $j$  番目のセグメントにおける伝達行列  $F_j$  は、そのセグメントの長さを  $\Delta z_j$  として、次のようになる。

$$F_j = \begin{pmatrix} a_j & b_j \\ b_j^* & a_j^* \end{pmatrix} \quad (\text{D.19})$$

$$a_j = \exp(i\varphi \Delta z_j) \left\{ \cosh(\alpha \Delta z_j) - i \frac{\varphi}{\alpha} \sinh(\alpha \Delta z_j) \right\} \quad (\text{D.20})$$

$$b_j = -i \exp(i\varphi \Delta z_j) \frac{K_G}{\alpha} \sinh(\alpha \Delta z_j) \quad (\text{D.21})$$

したがって、全体の伝達行列  $F$  は、

$$F = F_N \cdot F_{N-1} \cdot \dots \cdot F_j \cdot \dots \cdot F_1 \quad (\text{D.22})$$

となり、

$$\begin{Bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{Bmatrix} = F \begin{Bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{Bmatrix} \quad (\text{D.23})$$

である。

したがって、入射端  $z=0$  から入射する前進波の振幅を  $A(0)=1$  とおき、反対側の端  $z=L$  から入射する後進波の振幅を  $B(L)=0$  とおけば、透過光や反射光の大きさを表す  $A(L)$  および  $B(0)$  が容易に求まる。

この方法で注意すべき点は、分割数  $N$  を任意に大きくはできないことである。なぜなら、非常に短い FBG に対してはモード結合理論の前提である摂動の考え方が成り立たないからである。

また複屈折がある場合は、前進波・後進波ともに  $p$  方向と  $q$  方向の2つのモードがあるが、互いに直交しているため  $p$  方向  $q$  方向間のモード結合定数は無視できるほど小さい。したがって、それぞれについてモード結合方程式を解き、解を重ね合わせることで最終的な反射率が求められる。

## 参考文献

- [1] E.W.Baumann, R.S.Becker, P.J.Ellerbrock, and S.W.Jacobs, "DC-XA structural health monitoring system," Proc. SPIE, 3044, 195-206,1997.
- [2] P.J.Ellerbrock, "DC-XA Structural Health Monitoring Fiber-Optic Based Strain Measurement System," Proc. SPIE, 3044, 207-218,1997.
- [3] K.Satori, K.Fukuchi, Y.Kurosawa, A.Hongo, and N.Takeda, "Polyimide-coated small-diameter optical fiber sensors for embedding in composite laminate structures," Proc. SPIE, 4328, 285-294, 2001.
- [4] Y. Okabe, T. Mizutani, S. Yashiro and N. Takeda, "Detection of microscopic damages in composite laminates with embedded small-diameter FBG sensors," Composite Science and Technology, 62(7-8), 951-958, 2002.
- [5] T. Mizutani, Y. Okabe, and N. Takeda, "Quantitative evaluation of transverse cracks in carbon fiber reinforced plastic quasi-isotropic laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors," Smart Material and Structures, 12(6), 898-903, 2003.
- [6] S. Takeda, Y. Okabe and N. Takeda, "Delamination detection of in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors," Composites Part A, 33(7), 971-980, 2002.
- [7] R.J.Van Steenkiste and G.S.Springer, *Strain and Temperature Measurement with FIBER OPTIC SENSORS* (TECHNOPMIC Publication, 1997).
- [8] Y. Okabe, S. Yashiro, R. Tsuji, T. Mizutani, and N. Takeda, "Effect of thermal residual stress on the reflection spectrum from fiber Bragg grating sensors embedded in CFRP laminates," Composites Part A, 33, 991-999, 2002.
- [9] ABAQUS Version 6.4 Analysis User's Manual, Volume : User Subroutines & Parametric Studies
- [10] S. Huang, M. LeBlanc, M. M. Ohn and R. M. Measures, "Bragg intragrating structural sensing", Appl. Optics, 34(22), 5003-5009, 1995.

- [11] R. Feced, M. N. Zervas and M. A. Muried, "An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings," *J. Quantam Electron.*, 35(8), 1105-1115, 1999.
- [12] A. S. Kobayashi, *Handbook of Experimrntal Mechanics* (Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1987).
- [13] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Boston; Artech House, 1999).
- [14] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (San Diego: Academic Press, 1999)

## 本論文に関する学会発表

K. Hayashi, T. Mizutani, Y. Okabe and N. Takeda, “Strain and Temperature Measurement of Cryogenic Composite Tanks using FBG sensors”, 8th Japan International SAMPE Symposium, 2003.

林健太郎、水谷忠均、岡部洋二、武田展雄、“FBG センサを用いた複合材構造物の温度補償ヘルスマニタリング” 題 11 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2003) 2003.

K. Hayashi, T. Mizutani, Y. Okabe and N. Takeda, “Health Monitoring, of a Filament Wound CFRP Composite Tank with Embedded FBG Sensors”, 5th Joint Canada-Japan Workshop on Composites, 2004.

林健太郎、水谷忠均、岡部洋二、武田展雄、“FW-CFRP 複合材製タンクの埋め込み FBG センサを用いたヘルスマニタリング” 題 12 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2004) 2004.

## 謝辞

武田研究室に在籍して間もなく3年になります。この間、実に多くの物事を学び、貴重な経験をさせていただき、充実した生活を送ることができました。特に、実際に現場と接しながらの研究を行ったことは、今後社会に出る上でこれ以上ない経験になったと実感しております。

指導教官である武田展雄教授には、研究を通して多くのご指導をいただきました。心よりお礼を申し上げます。また岡部洋二講師には、研究を進める上で様々な助言や手助けをしていただきました。心より感謝いたします。

水谷忠均氏には、先輩として、また共同研究者として、3年間の研究生活の全てにおいて大変お世話になりました。また西隆史氏には、様々な面で研究のサポートをしていただきました。この修士論文は、お二人の助力なしでは完成できなかったと思っております。お二人には深く感謝するとともに、多大なご心労とご迷惑をおかけしたことをお詫びいたします。

武田真一氏、野田淳二氏、矢代茂樹氏、平田祐介氏、天野正太郎氏、石井健介氏、玉上久雄氏、山本健晴氏、吉村彰記氏には、先輩として多くの助言いただきました。感謝の意を表します。

また、株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペースの並木文春様、田中耕太郎様には、共同研究者として多くのお力添えをいただき、大変感謝しております。

そして、同期である高橋市弥氏、西川雅章氏、水口周氏とは、お互い協力しあい、共に楽しい研究生活を送ることができました。深く感謝するとともに、今後も進路は違えどお互い精進して有意義な生活が送れることを願っています。

最後に、研究生活でお世話になった皆様をはじめ、家族や友人など、私を応援してくださった多くの方々に深い感謝の意を表します。

2005年2月 林 健太郎