

光ファイバセンサを用いた 複合材料構造の健全性診断技術

竹谷 元* 武田展雄†
高橋市弥** 榎本清志††
水口 周***

Structural Health Monitoring of Composite Structure by Using Optical Fiber Sensor

Hajime Takeya, Ichiya Takahashi, Shu Minakuchi, Nobuo Takeda, Kiyoshi Enomoto

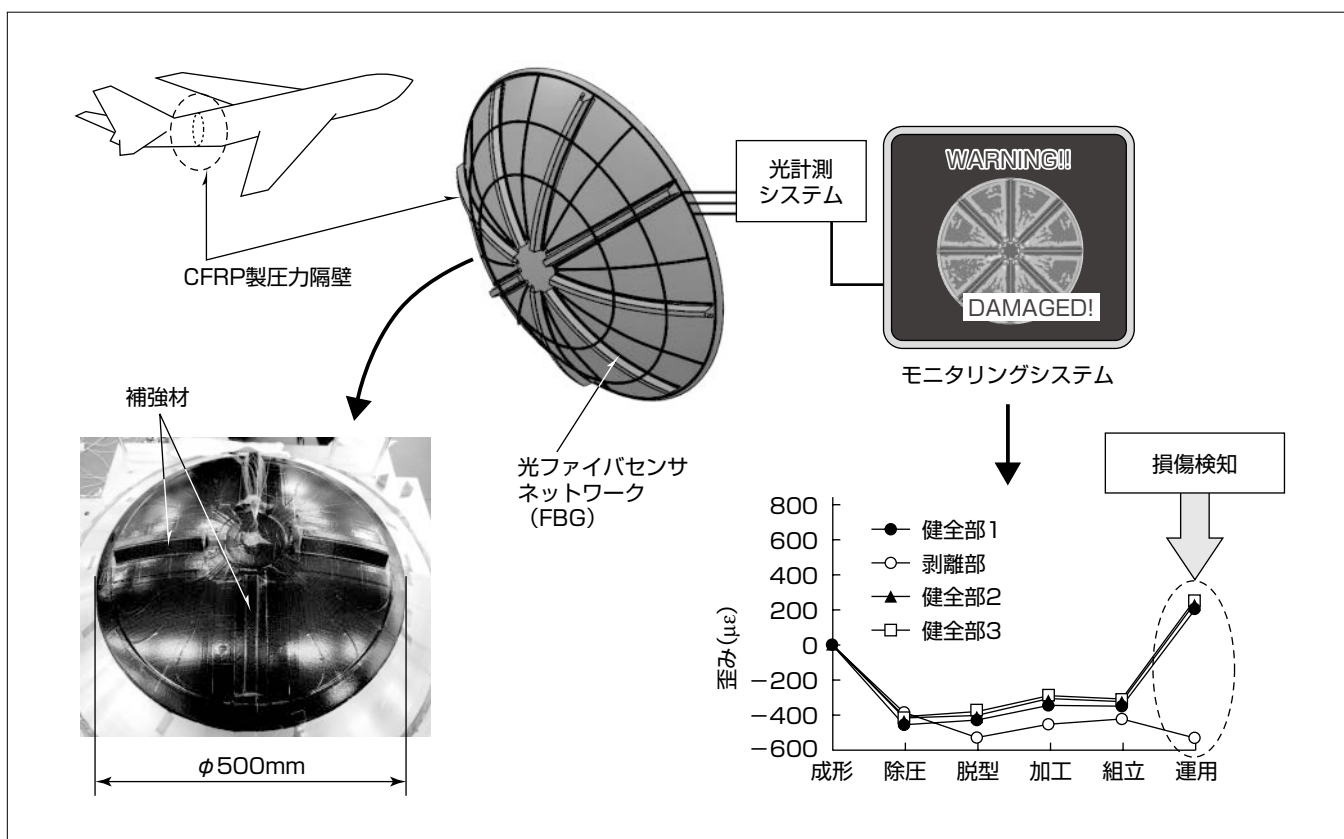
要 旨

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP) は、軽量・高強度の素材として注目されており、特に、航空機などの移動体に適用が進んできている。また、産業機器や民生機器についても、今後、徐々に高機能製品から適用が進んでいくものと考えられる。一方で、CFRPは炭素繊維をマトリックスの樹脂材料で硬化させた材料であることから、従来の金属材料と異なり、内部でクラックや剥離などの損傷が生じやすく、またその損傷も外観検査では見つけにくい、といった課題がある。

このため、これらの課題を解決し、CFRP構造の更なる軽量化、高信頼化、メンテナンス性を向上させる技術の実現を狙って、光ファイバセンサを用いた複合材料のライフサイクルモニタリング技術・健全性診断技術の開発に取り

組んだ。光ファイバセンサは直径125 μm のガラス繊維であり、炭素繊維との同様の繊維状構造のため、CFRPの中に埋め込むのに適するとともに、CFRP部材のライフサイクルにわたる長期的な計測も可能である。

ここでは航空機の圧力隔壁を対象構造として選定し、約1/6スケールのCFRP製スケールモデルを作製して、損傷の検知実験に取り組んだ。その結果、全56点のFBG (Fiber Bragg Grating) 型光ファイバセンサを実装したCFRP製圧力隔壁スケールモデルで、部材のライフサイクルを通じた歪(ひず)み計測技術を確立するとともに、接着部の剥離の検知に成功し、健全性診断の基礎技術を確立した。今後、これらの技術の実用化に向けた研究開発に取り組んでいく。



光ファイバセンサによる損傷検知システムのイメージ

圧力隔壁(プレッシャバULKヘッド)のスケールモデル(図左下)に埋め込んだ光ファイバセンサによって接着部の剥離による歪みの変化の検知に成功した(図右下)。これによって、健全性診断の基礎技術を確立した。

1. ま え が き

代表的な複合材料である炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量・高強度の素材として注目されており、特に、航空機などの移動体に適用が進んできている。また、産業機器や民生機器についても、現在は素材のコストが高いことから制約はあるものの、今後徐々に高機能製品を対象に適用が進んでいくものと考えられる。一方で、CFRP は炭素繊維をマトリックスの樹脂材料で硬化させた材料であることから、従来の金属材料と異なり、内部でクラックや剥離などの損傷が生じやすく、またその損傷も外観検査では見つけにくい、といった課題がある。

これらの課題を解決するため、光ファイバセンサを用いた複合材料の検査・診断技術の開発に取り組んできた。光ファイバセンサは直径125 μm のガラス繊維であり、炭素繊維との同様の繊維状の構造のため、CFRPの中に埋め込むのに適する。図1は、光ファイバによる構造の健全性を診断するシステムのイメージを示したものである。図に示すように、構造に発生する損傷を光ファイバセンサによって監視できれば、高い信頼性が確保できるとともに、点検時の省力化を図ることができる。

本稿では、航空機のCFRP製の圧力隔壁を対象としてこれらの技術開発に取り組んだ結果を述べる。圧力隔壁は、航空機の客室内の圧力を保つための重要な構造部材であり、点検が困難な位置に設置されることから、光ファイバセンサの適用によって、高信頼化・点検の省力化が期待できる。

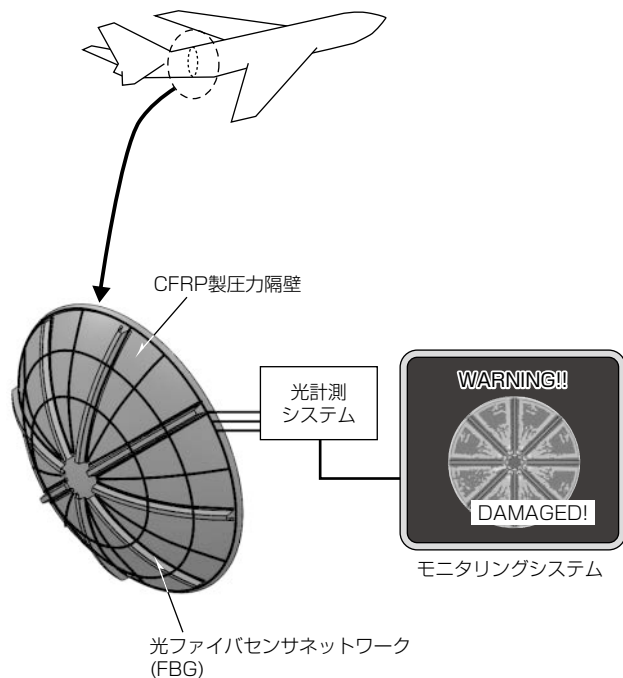


図1. 光ファイバによる構造の健全性を診断するシステムのイメージ

2. 光ファイバセンサの特長

ここでは、FBGと呼ばれるタイプの光ファイバセンサを用いる。FBGは、図2に示すように、光ファイバのコア中に屈折率の周期構造を作成したもので、波長帯域の狭い中心波長(λ_B)の反射光が得られるのが特長である。ここで、中心波長(λ_B)は、次式で表される。

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

この式から分かるように、中心波長は、まず、周期構造のピッチ(Λ)によって変化することから、中心波長を観測しておけば、その変化から回折格子のピッチの変化、つまり構造の歪みを計測することができる。一方、屈折率(n)が温度依存性を持つことから、あらかじめ温度と中心波長の関係を求めておくことによって、逆に中心波長の変化から構造の温度を知ることができる。温度と歪みが同時に変化する場合も考えられるが、構造から独立した温度センサを近傍に配置することによって、温度と歪みの計測が可能である⁽¹⁾。

このFBGを用いたセンサは、光ファイバであることから非常に小型軽量であり、熱遮断性に優れ、電磁ノイズ影響を受けにくいなどの特長を持つ。

これらのメリットに加えて、FBGセンサは、多点での計測に適するものである。図3は構造に貼り付けたFBGセンサを模式的に示したものであるが、図に示したように1本の光ファイバに、わずかに中心波長を変えたFBGセンサを実装することが可能である。計測される反射波長スペクトルから、どのFBGセンサの中心波長がどのくらい変化したのかを計測すれば、各点での温度又は歪みを知ることができる。用いる光源の種類などによって変化するが、1本の光ファイバ中に40点程度のセンサを配置することが可能なため、熱電対や歪みゲージなどの温度・歪みセンサと比べて配線数を大幅に削減ことができ、質量や設置にかかる時間を削減可能である。

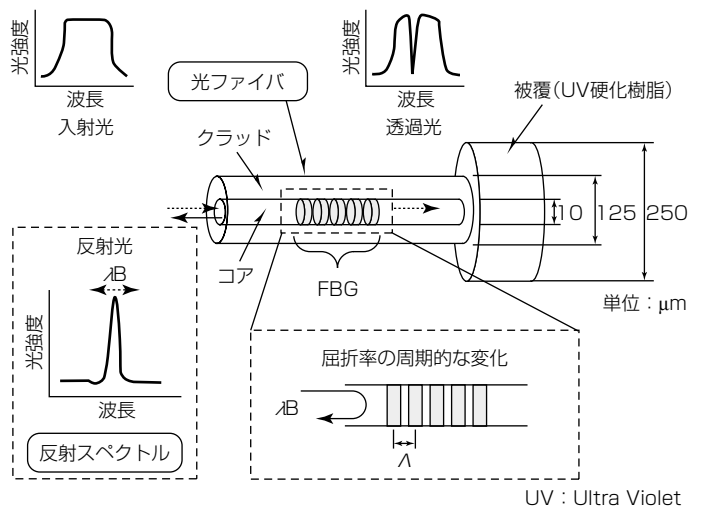


図2. FBGセンサの構造

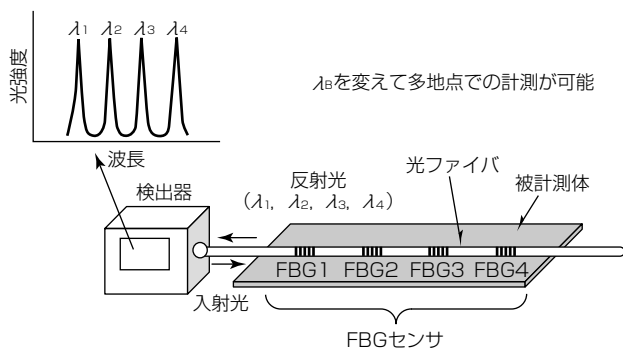


図 3. FBGセンサによる多点計測のイメージ

3. 複合材料構造への適用

3.1 ライフサイクルモニタリング

光ファイバセンサは、歪みゲージと異なり、長期にわたる歪みの継続計測が可能である。これは、FBGセンサが中心波長から歪みを導出するためで、中心波長は歪みと温度でしか変化しないため、温度の補正をかけるだけで、成形から加工・組立て、運用、メンテナンス・補修まで含めて、ライフサイクルを通じた計測が可能である。具体的には、次のモニタリングが可能である。

(1) 成形工程

CFRPの加熱・加圧成形の熱歪みをモニタリングすることで、成形プロセスの安定性・再現性を確認できる。

(2) 加工・組立て

穴あけや外周部の整形など加工時の不良や、組立て時の変形の確認ができる。

(3) 運用

運用時の損傷発生を検知できる。

(4) メンテナンス・補修

メンテナンス時の損傷確認、補修部の健全性を確認できる。

これらの各段階での歪み計測は、要素実験によって確認済みである⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。3.2節では、(3)の運用時の損傷検知実験について述べる。

3.2 圧力隔壁スケールモデルでの健全性診断技術の実証

圧力隔壁は、旅客機の客室内の圧力を支えているもので、大型の旅客機では直径3mサイズの規模になる。ここでは健全性診断技術の実証のため、約1/6スケールのCFRP製圧力隔壁モデルを製作し、損傷検知の実験に取り組んだ。

3.2.1 試作品の形状

4本の補強部材を接着したφ500mmの球面形状で、周辺に設置した孔を介してボルトで固定される。板厚は均一部が炭素繊維4層の約0.4mmで、周辺のボルト固定部と中央の増厚部は12層の1.2mmとした。FBGセンサはCFRPの層間及び補強材接着内部の全56点を実装した。また、圧力隔壁に発生する損傷は、補強材の端部が剥がれるというケースを想定した。ここでは、あらかじめ補強材接着部に難接着性の樹脂フィルムを挿入して接着していない領域を作

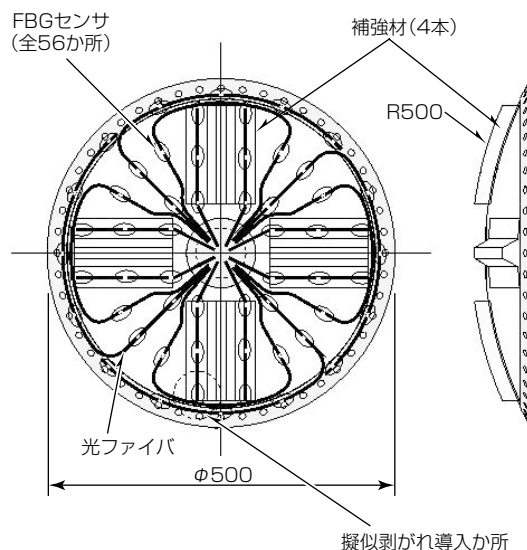


図 4. CFRP製圧力隔壁の形状及びFBGセンサ配置

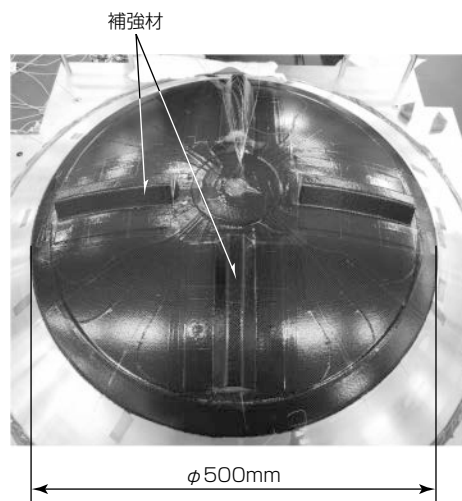


図 5. CFRP製圧力隔壁試作品

りこむことによって模擬した。図4は試作品の形状及びFBGセンサの配置を示したものである。図5は成形後の試作品の外観である。

3.2.2 試験装置の構成

圧力隔壁は、運用時には客室側の圧力と高高度の気圧との差圧が加わる。このため、図6に示すように真空チャンバに取り付け、凸面側を排気することによって大気圧が加わる構成とした。光ファイバはハーメチックポートから、チャンバ外へ取り出し、光計測器へ接続した。光計測器は広帯域の光源とフォトダイオードアレーを用いた波長モニタ及び光スイッチで構成している。図7に示したように電源及びデータ読み取り用のパソコンを接続すれば実験が可能のようにケースに収納する構成とした。大きさは270×180×240(mm)とコンパクトなサイズを実現している。

3.2.3 損傷検知実験

CFRP製圧力隔壁のスケールモデルに実装した光ファイバセンサで計測される歪みの変化を図8に示す。横軸はラ

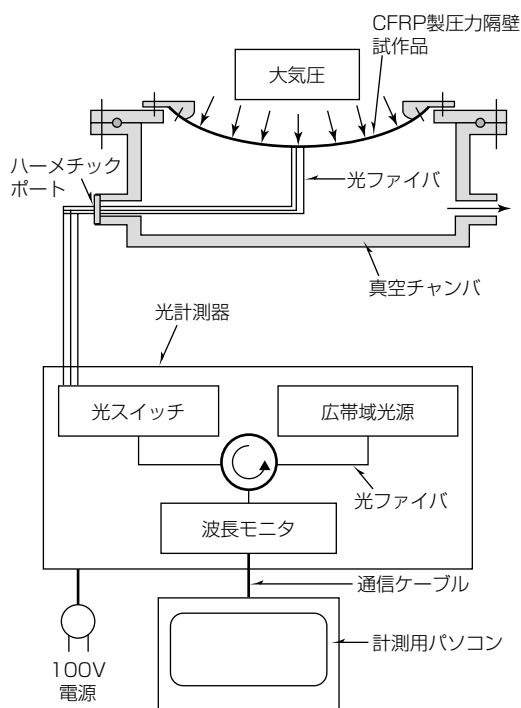


図 6. 試験装置の構成



図 7. 光計測器試作品

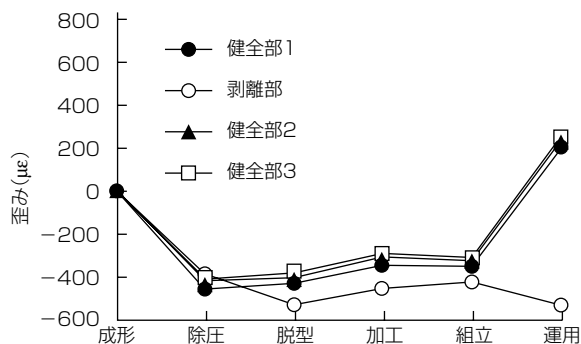


図 8. ライフサイクル歪みモニタリングの試験結果

ライフサイクルの各段階を示している。補強材を接着していない領域の歪み変化は、脱型時から他の欠陥のない領域のセンサと差異が生じ始め、運用の大きな荷重がかかる場合は、他のセンサが大きく歪んでいるのに対してほぼ変化を

示さず、はっきりと違いが認められた。これは、接着部の剥離によって補強材に力が加わらなくなり、歪みが生じなくなったためである。この結果から、埋め込んだセンサの歪み値を観測することによって、損傷の発生を検知可能であることを実験的に示すことができた。

4. むすび

CFRPの更なる軽量化や高信頼化，メンテナンス性の向上等を狙い，光ファイバセンサ(FBG)を使った健全性診断技術の開発に取り組んだ。具体的な構造として，航空機の圧力隔壁を選定し，そのCFRP製1/6スケールモデルで，全56点のFBGセンサを実装し，CFRP部材のライフサイクルを通じた歪み計測技術を確立するとともに，接着剥離を模擬した損傷部の検知に成功した。これによって健全性診断技術の開発に成功した。今後，これら技術の実用化に向けた研究開発に取り組んでいく。

この研究は，経済産業省「航空機・宇宙産業イノベーションプログラム」のうち，中核的要素技術研究として位置付けられた「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「複合材構造健全性診断技術開発」の一環として，一般財団法人 素形材センターとの契約に基づき実施したものである。

参考文献

- (1) Takeya, H., et al.: Monitoring of a Structural Panel for Space Satellite Using FBG Sensor, Proceedings of the first European Workshop on Structural Health Monitoring, 919~925 (2002)
- (2) Sekine, K., et al.: Life cycle strain mapping of composite airframe structures by using FBG sensors, Proc. SPIE 7981, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011, 79812K-1~13 (2011)
- (3) Takahashi I., et al.: Structural health monitoring of CFRP airframe structures using fiber-optic-based strain mapping, Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, 834531-1~11 (2012)
- (4) Takahashi I., et al.: Life cycle strain monitoring of composite airframe structures by FBG sensors, Proc. SPIE 8695, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013, 869512-1~12 (2013)
- (5) 高橋市弥, ほか: 光ファイバセンサを用いたライフサイクルストレインマッピングによる 複合材構造の健全性診断技術の開発, 第37回複合材料シンポジウム, 93~94 (2012)