

# 極小ピッチ・マルチポイント型光ファイバひずみセンサの開発

布谷勝彦（(株)レーザック） 斉藤義弘（(株)レーザック）

町島祐一（(株)レーザック） 影山和郎（東京大学）

## Development of Multiplexed FBG Sensors with High Spatial Resolution

Katsuhiko NUNOTANI, Yoshihiro SAITO, Yuichi MACHIJIMA

LAZOC Incorporated

Kazuro KAGEYAMA, The University of Tokyo

Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) can measure the continuous strain distribution with less than 1mm pitch by the long FBG (Fiber Bragg Grating) sensor. This technology can be also applied to the multi-pointed strain measurement using hundreds of FBG sensors. We propose the strain and the load monitoring to evaluate the various FRP structure during/after manufacturing.

*Key Words* : FBG (Fiber Bragg Grating), OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry), Optical fiber, strain

### 1 はじめに

近年、航空宇宙機をはじめ、車両構造や風力発電ブレードなど、大型構造物へのFRPの適用が盛んに行われている。これら大型のFRP構造物は、長期間の使用を前提とされており、運用時の荷重状態や損傷時の荷重状態を明確に把握し、設計および製造管理に反映していくことが、FRP構造物の信頼性と安全性の向上へとつながる。そうした課題に対して、設置の自由度が高く、耐環境性に優れ、長期間にわたり絶対ひずみを計測可能な光ファイバ型ひずみセンサを適用し、FRP構造物のひずみや荷重状態のモニタが有用であると考えられる。本稿では、光ファイバの長手方向に発生したひずみを極めて高い空間分解能で測定することができる光周波数領域リフレクトメトリ (OFDR: Optical Frequency Domain Reflectometry) を用いた、長ゲージFBG (Fiber Bragg Grating) および多重化FBGによるひずみ計測技術を提案する。

### 2 計測原理

#### 2.1 FBG

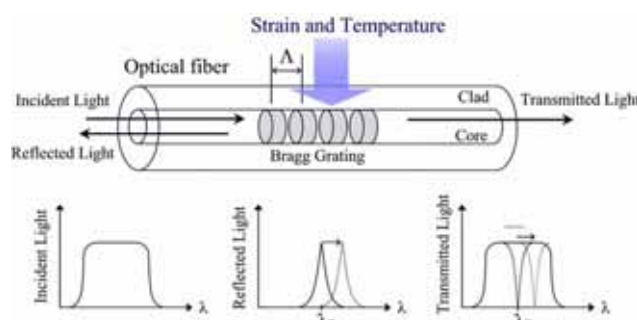


Fig.1 FBGのひずみ計測原理

FBG (Fiber Bragg Grating) は、Fig.1 に示すように、被覆外径 150  $\mu\text{m}$  程度の石英光ファイバのコア中に周期的な回折格子を有するもので、通信分野では光フィルタとしての機能を持たせた光ファイバ型デバイスとして用いられている。FBG は、回折格子を光ファイバ中に直接形成できるため、低損失、小型、高信頼性、転送用光ファイバとの整合性など、多くの利点を持つ。

Fig.1 に、FBG を用いたひずみ計測原理を示す。光が FBG に入射した場合、次の(1)式を満たす波長  $\lambda_B$  (ブラグ波長) で強い反射が生じ、その他の波長は透過する。

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

FBG のグレーティングの周期：  
光ファイバの有効屈折率：n

ここで、グレーティングの存在する部分にひずみが与えられると、 $\lambda_B$  が変化し、ブラッグ波長  $\lambda_B$  がひずみに比例して変化する。よって、FBG をひずみセンサとして利用することができる。

FBG センサが持つ利点として、長期間にわたって絶対ひずみを測定することが可能である。ひずみ計測には、ひずみゲージが利用されることが多いが、ひずみゲージを長時間用いると、ドリフトが生じるため、オフセットを行う必要がある。また、ひずみゲージは、作用するひずみによって、金属抵抗線、箔や半導体などの電気抵抗が、変化する原理を利用しているため、電磁ノイズの影響を受けやすい欠点がある。これに対して、FBG センサは、センサ部と伝送部ともに、光を利用しているため、電磁ノイズに影響されない。さらに、防爆性・耐久性を持ち、長距離伝送も可能である

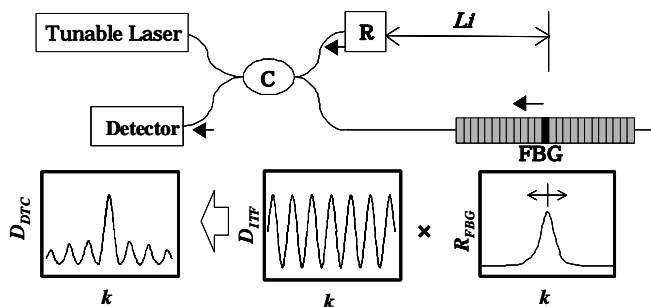
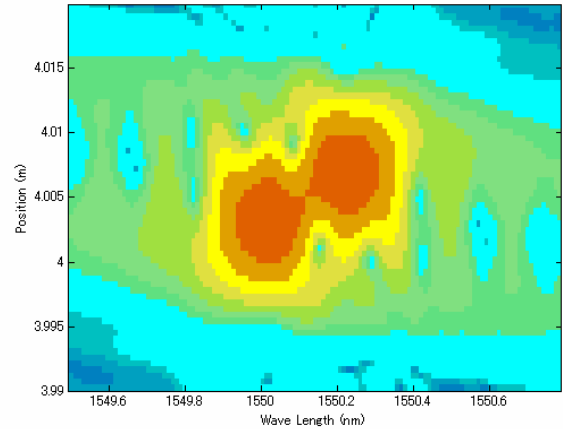


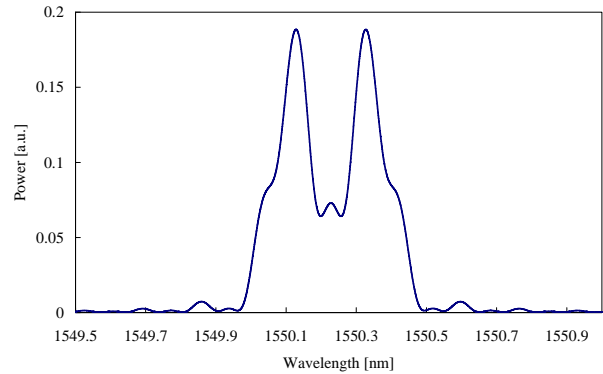
Fig.2 OFDR 概念図

## 2.2 OFDR を用いた FBG ひずみ分布測定システム

FBG によるひずみ計測では、一般的に光スペクトルアナライザが用いられる。光スペクトルアナライザは波長領域でのスペクトル分析を行い、そのスペクトルからピーク波長または中心波長を求めるものである。しかし、光スペクトルアナライザを用いた従来手法では、FBG センサのゲージ長内の歪み分布を計測することは出来ない。これに対して、OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)は、波長可変光源から光ファイバに光を入射させたときに、FBG センサからの反射光と、別経路(R)から来る反射光を干渉させることで、FBG センサからの反射光の距離差に比例した周波数成分を生じさせる



(b)OFDR



(a)従来手法

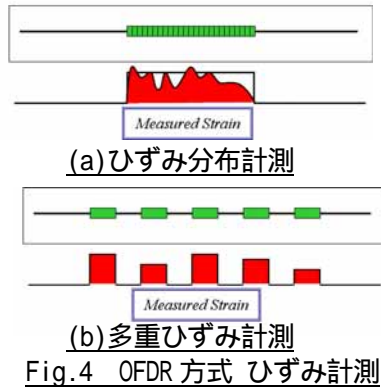
Fig.3 FBG センサ内でひずみ分布した場合の波長スペクトル

(fig.2 参照)。そこで、得られた反射光を周波数解析することで、ある距離における反射光成分を特定できる。よって、OFDR を用いた手法では、FBG センサのゲージ長内の歪み分布を計測することが可能になる (fig.4(a)参照)。

Fig.3 に、FBG センサのゲージ長内で歪み分布した場合の計測結果を示す。(a)図は従来手法による出力結果であり、ここに距離情報は無い。(b)図はOFDR による出力結果である。(b)図の横軸は波長、縦軸は距離、色調および濃淡は強度である。10 mm 長 FBG センサ内の各位置の波長スペクトルが得られ、4000 ~ 4005 mm までは 1550.1 nm、4005 ~ 4010 mm までは 1550.3 nm のブラッグ波長を持つことが分かる (ひずみに換算して約 200  $\mu$ )。なお、現行 OFDR システムでは、約 1mm の空間分解能を実現することが可能である。

また、OFDR を用いた手法の距離情報を得られる利点を応用すると、fig.4(b)のように 1 本の光ファイバに多数の FBG センサを配置させ、それぞれのひずみを測定することができる。特に、低反射率の FBG センサを用いると、広帯域光源を用いた従来の波長

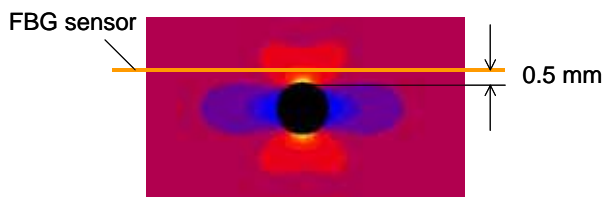
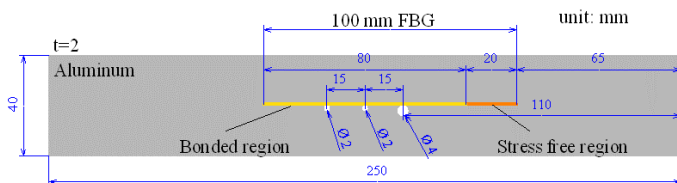
分割多重 (WDM) に比べて、より多くのセンサを多重化できる。WDM では約 30 点なのに対して、OFDR を用いると、800 点程度の FBG センサを多重化できることが実証されている。また、OFDR 方式の利用は、同じブラッグ波長の FBG センサの使用が可能となり、大量生産によるコストダウンも期待できる。



### 3 ひずみ分布計測

#### 3.1 計測方法

Fig.5に示すように、厚さ5mmのアルミ試験片に、直径4mmの円孔1箇所と直径2mmの円孔2箇所を空け、応力集中部を設け、ゲージ長100mmのFBGセンサを円孔に隣接する箇所に接着固定した。3.0kNの静的引張を与えた。また、Fig.5に、有限要素法より算出された直径2mm孔近傍の応力集中の様子を示す。



#### 3.1 計測結果

Fig.6に、OFDRシステムを用いて、計測したひずみ値と有限要素法により算出したひずみ値を示す。

精度よく整合性があるデータが計測されており、すなわち1mm以下でひずみ分布を計測していることがわかる。よって、OFDR方式を用いた長ゲージFBGを適用することにより、FBGに沿ったひずみを空間的に連続かつ高い分解能で計測が可能である。

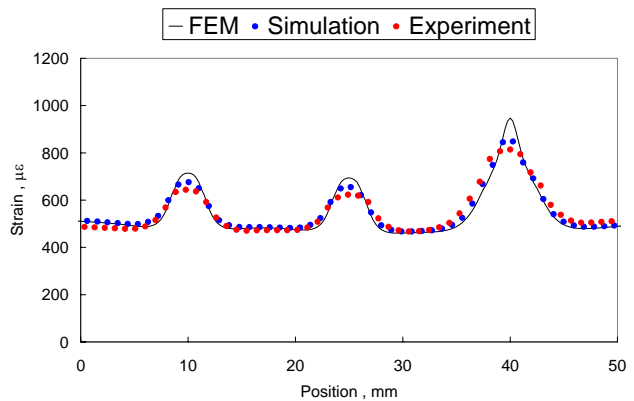


Fig.6 FEMとFBG計測ひずみの比較

Table.1 OFDR方式ひずみ計測仕様

	分布計測	多重計測
外径	150 μm	
ひずみ分解能	1 μ	
ゲージ長	約100mm	10 ~ 30mm
空間分解能	約1mm	-
計測点数	-	800点
耐熱温度	200	

### 4 FRP 構造物へのFBGセンサの適用

FBG ひずみセンサは、上述のように、石英光ファイバ型のセンサであるため、設置の自由度が高く、耐環境性、長期安定性に優れている。主要特性をTable.1に示す。

FBG センサは、電気抵抗式のひずみゲージと同様に、被計測物表面に容易に接着することが可能である。また、FBG センサの外観は、外径150 μm程度の柔軟な光ファイバであるため、プリプレグ成型やVaRTM成型等の成型過程において、繊維の層間に埋設することも可能であり、硬化過程の加熱、多くの溶剤にも耐えることが可能である。繊維の積層過程でFBGセンサを埋設すれば、成型後の残留ひずみの計測や成型中のモニタリングへの応用も期待できる。

#### 謝辞

JAXA 井川氏、東京大学 村山助教授からは、ご指導と適切なご助言を頂き、感謝いたします。