

# 時間分割多重化による FBG 光ファイバセンサを用いたモニタリングシステム



所属名：飛鳥建設株式会社/復建調査設計株式会社  
 発表者：田村 琢之（飛鳥建設）

## 1. はじめに

我が国では、台風や近年多発している集中豪雨によって多くの法面崩壊や地すべりなどの災害が発生し、被害の発生が後を絶たない状況である。また、高度経済成長期時代に建設された道路、鉄道、電力施設などの社会インフラ施設の健全性を評価し、安全性と機能性の面からそれらの施設を効率的に更新していくことが重要となっている。こうした背景から、電気的なノイズの影響がなく、長期耐久性に優れた光ファイバセンシング技術を適用して、構造物の変状を早期に発見し、その安定性を常時監視したり、また社会インフラ施設の健全性を監視するためのモニタリング技術の開発と適用を進めている<sup>1)</sup>。

本稿では、時間分割多重化を採用した FBG 光ファイバ計測システムの概要とその特徴と、構造物のひずみや変位、ひび割れの挙動を計測するための FBG 光ファイバセンサとその測定精度及び Web を用いた監視システムについて述べる。

## 2. FBG 光ファイバセンシングの概要

### 2.1 FBG によるひずみの測定原理

FBG (Fibre Bragg Grating) は、図-1 に示すように光ファイバに紫外線を照射して一定周期の回折格子(グレーティング)を加工したもので、FBG に光を入射させると、グレーティング周期に応じた特定波長の反射光が戻ってくる。FBG 近傍の光ファイバに軸方向ひずみが発生し、FBG のグレーティング周期が変化すると、図-2 に示すように反射光の波長がシフトする性質がある。

反射光の波長シフトとひずみの関係は下式となる。

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - P_\epsilon) \Delta \epsilon$$

ここで、 $\lambda_B$ 、 $\Delta \lambda_B$ ：それぞれ FBG の反射波長と波長シフト、 $P_\epsilon$ ：実効光弾性係数、 $\Delta \epsilon$ ：付加されたひずみである。

### 2.2 時間分割多重化 (TDM) の概要と特徴

1 本の光ファイバに複数の FBG を直列に配置し、それぞれの FBG の反射波長を測定する方法には、測定する波長軸上に多重化する WDM (Wavelength Division Multiplexing) と時間軸上に多重化する TDM (Time Division Multiplexing)<sup>2)</sup>がある。

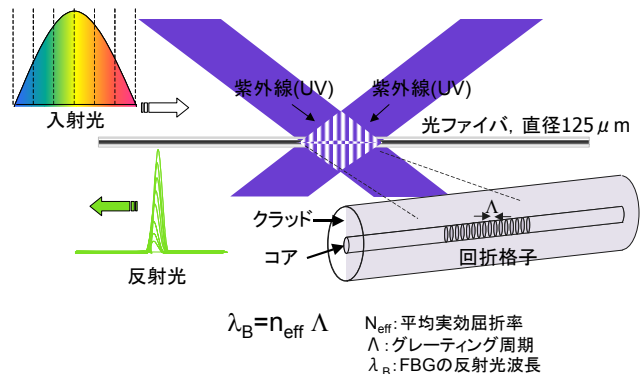


図-1 FBG によるひずみ測定の原理

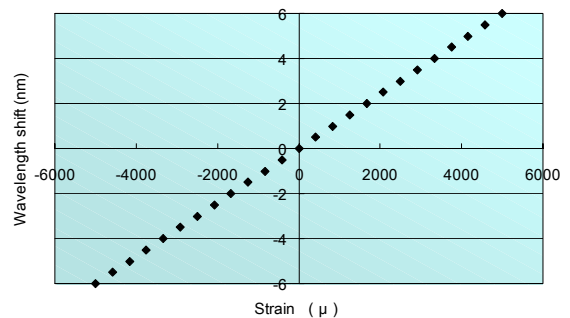


図-2 ひずみと波長シフトの関係

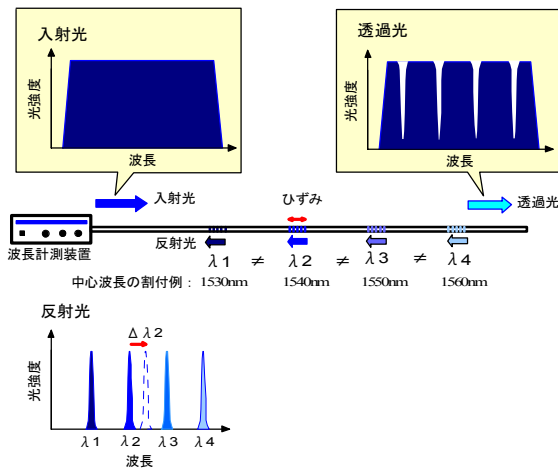


図-3 WDMによる多重化の概要

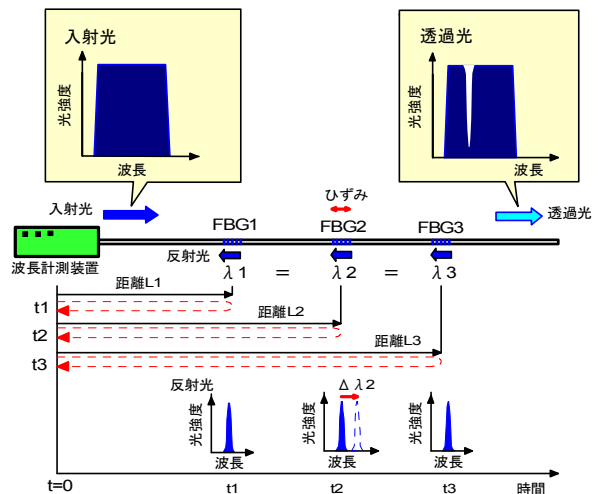


図-4 TDMによる多重化の概要

WDMでは、図-3に示すように、光強度の減衰が小さいC(1500nm)バンド帯において、複数のFBGがそれぞれ特定のグレーティング周期を持っており、反射波長はFBGごとに異なる。WDMによる波長計測では、それぞれのFBGの反射波長が異なることを利用して、FBGを識別する。このため、各FBGのひずみ測定範囲はFBGの個数が増えるほど狭くなる。例えば、10個のFBGを直列配置した場合、FBGの測定可能なひずみ範囲は約4,200 $\mu$ となるが、20個直列配置した場合のそれは約2,100 $\mu$ と半減してしまう。一方、TDMでは、図-4に示すように、それぞれのFBGからの反射光の時間差によりFBGを識別する。したがって、同一のグレーティング周期をもったFBGを1本の光ファイバに直列で多数配置することができる。この方式では、表-1に示すように、融着やコネクタ接続による光損失がない場合、1本の光ファイバに最大100個FBGを直列に配置することができる。また、WDMとは異なり、直列配置されたFBGの個数に関係なく、それぞれのFBGの測定範囲は最大10,000 $\mu$ と一定である。このように、TDMではおよそ同一の反射波長を持つ多数のFBGを直列配置できることから、計測システムの設計がWDMよりも単純となり、またFBGの製造と計測システムの設計に関わる費用を低減することができる。

表-1 TDMによるFSIユニットの特徴

項目	FSIユニット (TDM方式の光波長測定器)	備考
最大センサ数 /1チャンネル	100	融着やコネクタ接続などでの光損失がない場合
動的計測の 最大周波数	センサ100個の場合で100Hz	FSIユニットが、最大2,000Hzまでの高周波数対応の仕様の場合
	センサ10個の場合で500Hz	
	センサ1個の場合で2000Hz	
測定範囲	10,000 $\mu$ センサ数に関係なく一定	WDMでは、ひずみ測定範囲はセンサ数に依存する。
測定分解能	0.8 $\mu$	
測定精度	$\pm 5\mu$	
動作温度	-20 $^{\circ}$ C $\sim$ 80 $^{\circ}$ C	
最大測定距離	$\sim 9$ km	
最小測定間隔	1.3 m	

### 3. FBG光ファイバセンサ

コンクリートなどの構造物のひずみや変形を計測するために、TDMによるFBGを用いて各種のFBG光ファイバセンサを開発し、その測定精度の検証試験を実施している。

#### 3.1 FBGケーブルセンサ

写真-1に、FBGケーブルセンサを示す。FBGケーブルセンサは、軸方向に一定間隔(標準間隔;2.5m, 5.0m)でFBGを配置した直径約2mmのケーブル状のセンサで、固定金具間のFBGのひずみ変化から2点間の変位量を計測するセンサである。対象構造物にアンカーボルトで専用金具を固定し、専用金具にセンサを巻き付け、収縮側の測定範囲を確保するため2,000 $\mu$ 程度の初期緊張を付与して固定する。

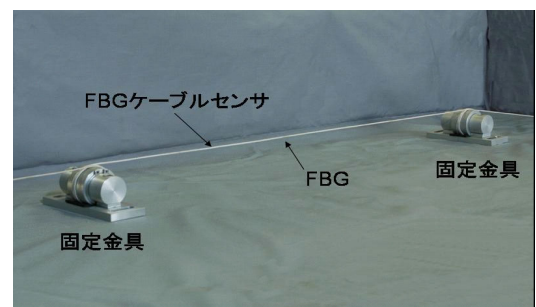


写真-1 FBGケーブルセンサ

FBG ケーブルセンサの測定精度を検証するため、センサ長 5m で本センサを設置し、軸方向に-4mm から 12mm の範囲で 1mm ごとに変位量を与え、FBG の波長変化量を計測する室内試験を行った。与えた変位量は、高感度変位計（東京測器研究所、CDP-25）により測定した。なお、実験中の室内温度は 20℃ で一定である。図-5 に、FBG ケーブルセンサに与えた変位量と波長変化量から算出した変位量の関係を示す。非直線性は、変位 12mm に対し 0.7%RO であり、センサ長 5m で 0.084mm（ひずみで 17 μ）の誤差に相当することを確認した。

### 3. 2 FBG π型センサ

写真-2 に示す FBG π型センサは、コンクリート構造物などのひび割れの開閉量を測定するセンサである。このセンサは中央に FBG が配置された曲線部と固定部で構成され、構造物のひび割れを跨いでアンカーにより固定する。このセンサの測定範囲は、±1.0 mm である。

図-6 に、±1mm の範囲で 0.1mm ごとに変位量を与えて測定精度を検証した試験結果を示す。与えた変位量は、高感度変位計（東京測器研究所、CDP-10）により測定し、実験中の室内温度は 20℃ で一定である。変位量と本センサで測定した変位測定における非直線性は、変位 1mm に対し 0.53%RO となった。これは、ひび割れ幅 1mm で 0.0053mm の誤差に相当する。

### 3. 3 FBG ストラップセンサ, FBG ポイントセンサ

写真-3 に示す FBG ストラップセンサは、幅 25mm の 2 層構造の薄板に一定間隔（標準間隔；2.5m, 5.0m）で FBG を軸方向に配置したセンサである。このセンサを、構造物の表面にエポキシ系接着剤で接着し表面ひずみを計測することができる。FBG ポイントセンサ（写真-4 参照）は、任意の計測箇所に設置し表面ひずみを計測するタイプである。これらのセンサの測定範囲は、±3,000 μ である。

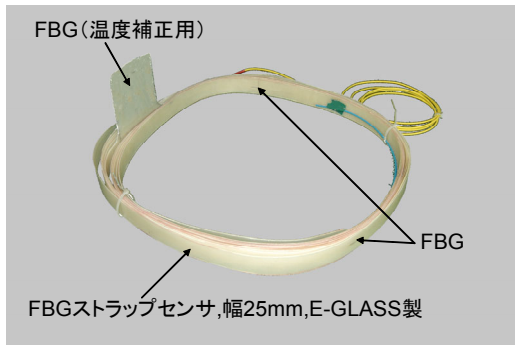


写真-3 FBG ストラップセンサ

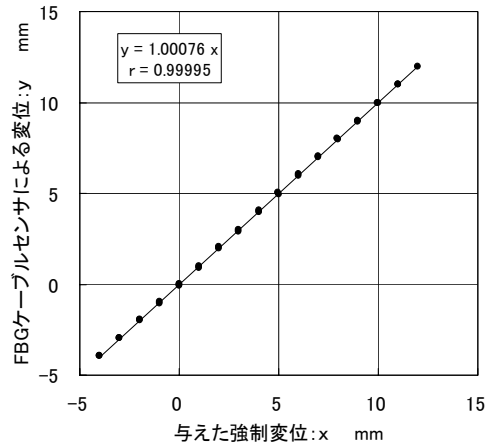


図-5 FBG ケーブルセンサの室内試験結果

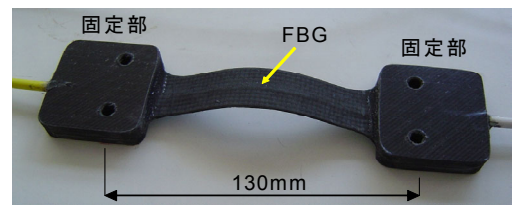


写真-2 FBG π型センサ：一軸型

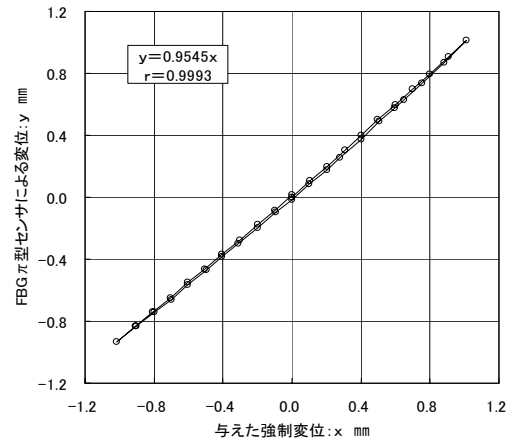


図-6 FBG π型センサの室内試験結果

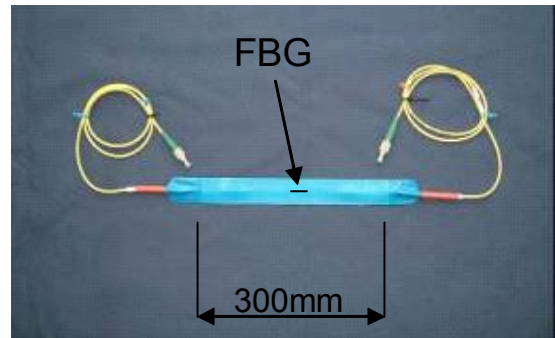


写真-4 FBG ポイントセンサ

#### 4. Web 監視システムの概要

変状が発生していたりまたは発生することが予測される構造物の計測・監視においては、変状の進行により構造物が損傷したり、また損傷による被害の発生を予防するために、常時監視とデータの収集により変状の進行を早期に発見し、計測データの収集・評価・解析に至る一連の処理を迅速に実施することが重要である。ファイバセンサを用いた計測監視では、Web を用いた監視システム（Tobishima Wide-Area structural Health Monitoring network System, T-WAHMS）を構築し長期計測・監視を実現している。

Web 監視システムは図-7 に示すように、各監視サイトで計測されたデータを直ちに防災監視センターのサーバへ転送し、クライアントはインターネット上でデータを常時監視することができる。各監視サイトで設定した管理基準値を超えたデータが計測されると、事前に登録されたアドレスに警報メールを送信し、監視結果に応じた対応を迅速に行なうことが可能となる。

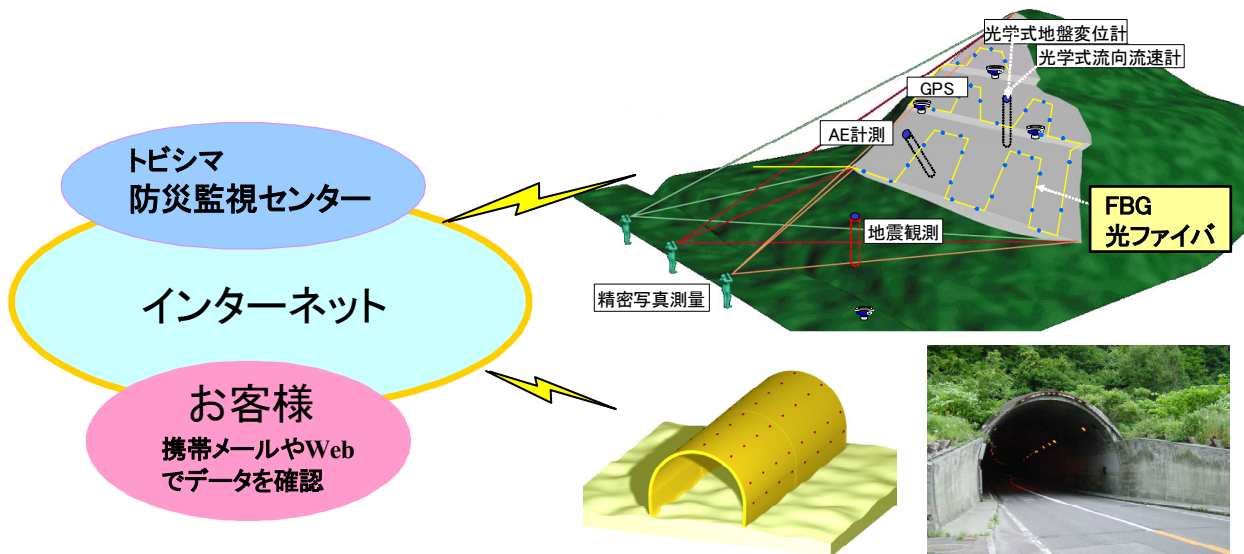


図-7 Web 監視システムの概要

Web 上の各監視サイトの初期画面では、計測データがリアルタイムに反映され、管理基準値を超えた場合には画面上の数値の色が管理レベルに応じて変化して異常を知らせる。また経時変化は、計測点を画面上で選択することによりグラフが閲覧できる

#### 5. おわりに

TDM による FBG 光ファイバセンサを用いた計測監視システムは、法面監視だけでなく様々な構造物の防災監視や、維持管理を目的とした健全性モニタリングに適用可能である。計測用途の拡大を目指し、今後新たな光ファイバセンサの開発に取り組んでいきたいと考えている。

#### 【参考文献】

- 1) 熊谷,塩谷,田村：時間分割多重化による FBG 光ファイバ計測システム,電力土木,No.323,pp.88-90, 2006.5.
- 2) Measures, R. M. : Structural Monitoring with Fiber Optic Technology, Academic Press, 2001.
- 3) 黒澤,横田：ファイバー光学の基礎,オプトロニクス社, 2003