

# 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

## A Monitoring System using FBG Optical Fibre Sensors by Time Division Multiplexing

小林 薫<sup>\*1</sup> 松元 和伸<sup>\*1</sup> 塩谷 智基<sup>\*1</sup> 熊谷 幸樹<sup>\*1</sup> 田村 琢之<sup>\*1</sup>  
Kaoru Kobayashi Kazunobu Matsumoto Tomoki Shiotani Koki Kumagai Takuyuki Tamura  
阿保 寿郎<sup>\*1</sup> 本山 寛<sup>\*1</sup> 柏木 克之<sup>\*2</sup> 加藤 一幸<sup>\*2</sup>  
Toshiro Abo Hiroshi Motoyama Yoshiyuki Kashiwagi Kazuyuki Kato

### 【要旨】

電気的なノイズの影響がなく、長期耐久性に優れたFBG光ファイバセンサは、台風や集中豪雨に起因した法面崩壊の遠隔監視や、道路、鉄道および電力施設などの社会インフラ施設の健全性をモニタリングするための計測技術として優れた性能を有している。本稿では、国内で一般的に用いられている波長分割多重化とは異なる方式である、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特徴を示し、室内試験結果からFBG光ファイバセンサが高い測定精度を有することを示した。さらに、本計測システムをダム切土法面の動態監視に適用し、長期的な現場計測に対する実用性とFBG光ファイバセンサの長期耐久性を示した。

【キーワード】 光ファイバセンシング FBG 時間分割多重化 モニタリング 計測

## 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、人災などの被害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て老朽化が進んでいる道路、鉄道および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、筆者らは、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、法面変状を早期に発見し、その安定性を常時監視することや、社会インフラ施設の健全性を遠隔監視するためのモニタリング技術の開発を進めている<sup>1),2)</sup>。

本稿では、時間分割多重化（以下、TDMと記す）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、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測定精度について述べ

るとともに、ダム本体建設工事における切土法面の長期挙動監視に多数のFBG光ファイバセンサを適用した結果について述べる。

## 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<sup>3)</sup>

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。

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad (1)$$

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

1. 防災R&Dセンター 技術研究所 2. 四国支店 志河川ダム作業所

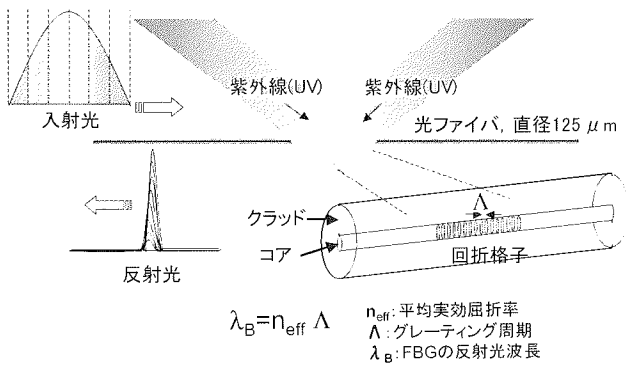


図-1 FBGによるひずみ測定イメージ

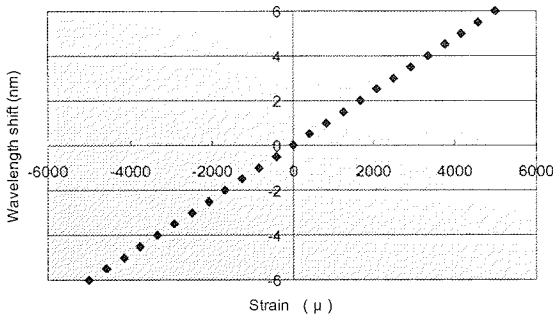


図-2 FBGにおけるひずみと波長シフトの関係

## 2.2 TDMの概要と特徴

1本の光ファイバに複数個のFBGを直列に配置し、それぞれのFBGから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>3)</sup>がある。

WDMでは、図-3に示すように、光強度の減衰の小さい波長帯(Cバンド, 1550nm付近)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ち、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からの反射波長が異なることを利用して、どの位置に配列されたFBGであるかを識別する。このため、この方式では、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4,200μとなるが、20個直列配置した場合のそれは約2,100μ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って複数個の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極めて小さい場合、1本の光ファイバに最大100個までFBGを直列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の測定範囲が10,000μである。このように、TDMでは、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、計測システムの配列設計がWDMよりも容易であり、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。

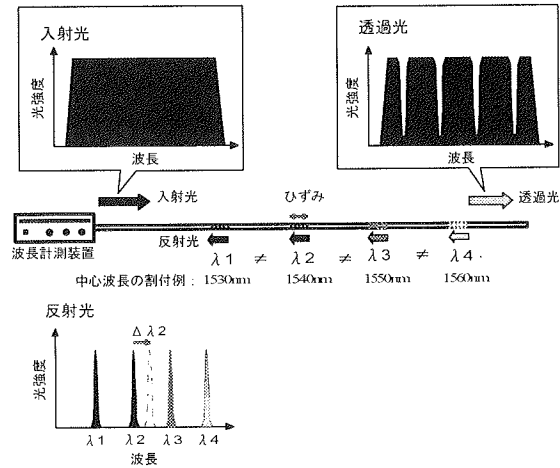


図-3 WDMによる多重化の概要

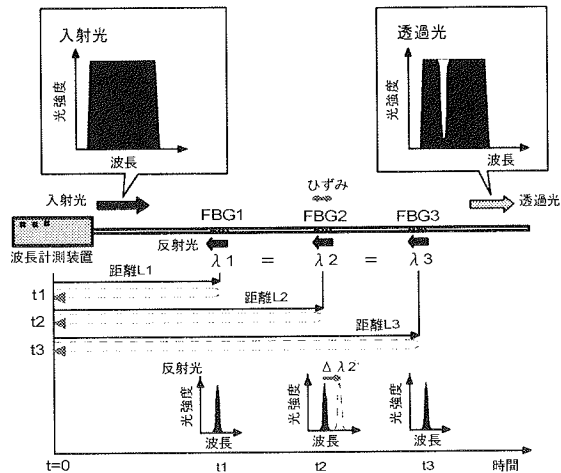


図-4 TDMによる多重化の概要

表-1 TDMによる光測定器の特徴

項目	TDMによる光測定器 (FS1ユニット)の性能諸元	備考
最大センサ数 / 1チャンネル	100	融着やコネクタなどでの光損失が極めて小さい場合
動的計測の最大周波数	センサ100個の場合で100Hz	FS1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 μ センサ数に関係なく一定	WDMでは、測定範囲はセンサ数に依存する。
測定分解能	0.8 μ	
測定精度	±5 μ	
動作温度	-10°C ~ 40°C	
最大測定距離	~9 km	
最小測定間隔	1.3 m	

### 3. FBG 光ファイバセンサ

ここでは、コンクリート構造物などのひずみや変形を計測するための各種 FBG 光ファイバセンサの概要とその測定精度について述べる。

#### 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、一定間隔（標準間隔；2.5m, 5.0m）で FBG が配置された直径約 2mm のワイヤー状のセンサで、固定点間に位置する FBG のひずみの変化から、コンクリートや岩盤の 2 点間の相対変位を計測するのに適したセンサである。このセンサの設置手順は以下の通りである。まず被測定物にアンカーボルトで専用金具を固定し、次に専用金具にセンサを巻き付け、ケーブルに 2,000  $\mu$  程度の初期緊張を付与して固定する。

FBG ケーブルセンサの測定精度を検証するため、H 形鋼にスパン長 5m で本センサを設置し、軸方向変位を -4mm から 12mm の範囲で 1mm ごとに強制変位として与える室内試験を行った。与えた強制変位は、高感度変位計（測定精度：0.002mm）により測定した。なお、実験中の室内温度は 20°C で一定である。

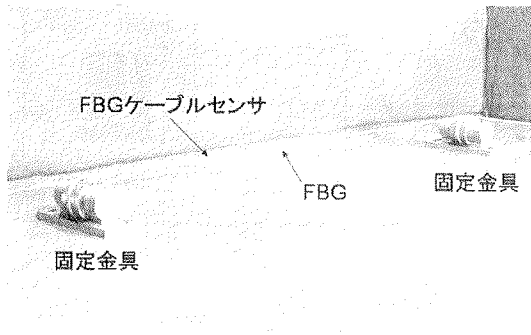


写真-1 FBG ケーブルセンサ

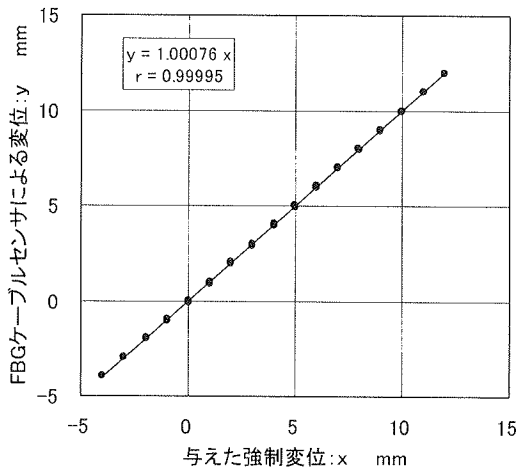


図-5 FBG ケーブルセンサの室内試験結果

図-5に、FBG ケーブルセンサに与えた強制変位と FBG の波長シフトから算出した変位の関係を示す。強制変位と本センサで測定した変位間における非直線性は、変位 12mm に対し 0.7%RO となった。これは、スパン長 5m で 0.084mm（ひずみで 17  $\mu$ ）の誤差に相当する。

#### 3.2 FBG $\pi$ 型センサ

写真-2に示す FBG  $\pi$  型センサは、トンネル覆工などのコンクリート構造物における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 CFRP(炭素繊維補強熱硬化性樹脂)製で、中央に FBG が配置された曲線部と固定部から構成され、被測定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、 $\pm 1.0$  mm である。

図-6に、 $\pm 1$ mm の範囲で 0.1mm ごとに強制変位を与えて測定精度を検証した試験結果を示す。与えた強制変位は、高感度変位計（測定精度：0.001mm）により測定した。実験中の室内温度は 20°C で一定である。強制変位と本センサで測定した変位間における非直線性は、変位 1mm に対し 0.58%RO となった。これは、ひび割れ幅 1mm に対して 0.006mm の誤差に相当する。

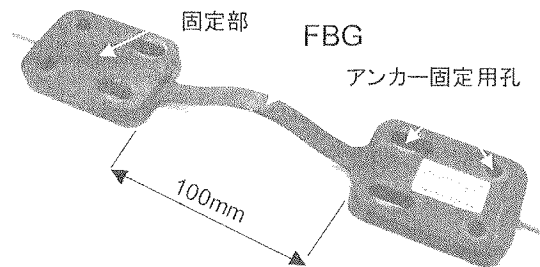


写真-2 FBG  $\pi$  型センサ：一軸型

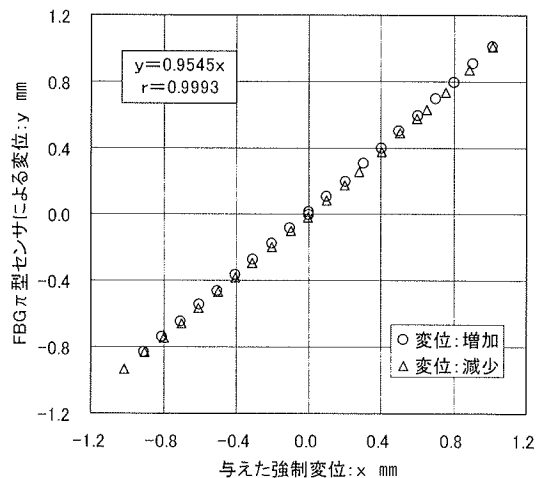


図-6 FBG  $\pi$  型センサの室内試験結果

### 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、E-GLASS(電気絶縁性の汎用ガラスファイバ)製の2層構造の薄板に一定間隔(標準間隔; 2.5m, 5.0m)でFBGが直列配置されたセンサである。このセンサは、被測定物の表面にエポキシ系接着剤などで固着させてそのひずみを計測する。このセンサには、測定箇所ごとに別々に固定して表面ひずみを計測するタイプのFBGポイントセンサ(写真-4参照)もある。これらのセンサの測定範囲は、 $\pm 3,000 \mu$ である。

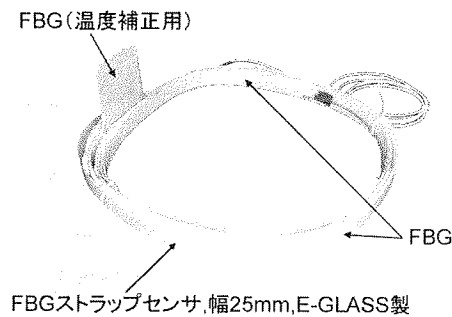


写真-3 FBGストラップセンサ

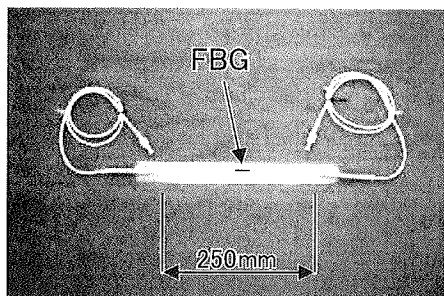


写真-4 FBGポイントセンサ

### 4. ダム切土法面の長期動態観測への適用事例<sup>4)</sup>

万が一崩壊した場合には多大な被害や工程への悪影響が発生する岩盤法面の計測管理では、計測データの収集・評価・解析に至る一連の処理の迅速化や省力化を図る一方、法面変状を早期に発見し、その進展状況を常時監視することによって法面崩壊などによる災害を未然に防ぐことが重要である。

愛媛県西条市に位置する志河川ダムの左岸切土法面では、施工時から堰水試験までの約2年9ヶ月間の法面挙動の長期動態監視において、主要な測線にFBG光ファイバケーブルセンサを用いた切土法面の伸縮量などを計測監視した計測管理手法とWebを用いたモニタリングシステム(Tobishima Wide-Area structural Health Monitoring

network System, T-WAHMS: 仮称)を活用して法面変状の長期挙動監視を実施しており、以降では計測計画の概要と計測結果について述べる。

### 4.1 地質概要

図-7および図-8に示すように、本法面で掘削面に現れた岩盤は風化を受けたC<sub>L</sub>級の黒色片岩が主体である。図-7の点線で表されている深部位置には、黒色片岩と緑色片岩の境界が確認され、25~40°の下流傾斜で、境界面には50cm程度の劣化帯(D級)を伴っている。

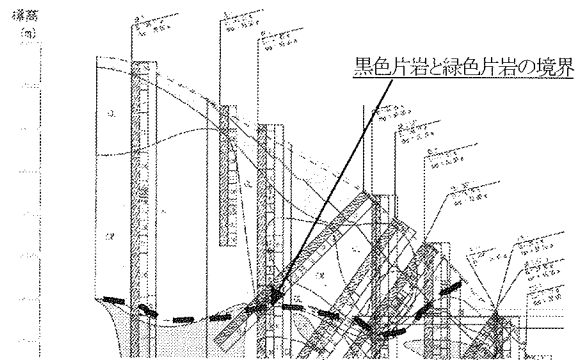


図-7 左岸地質断面図(ダム軸)

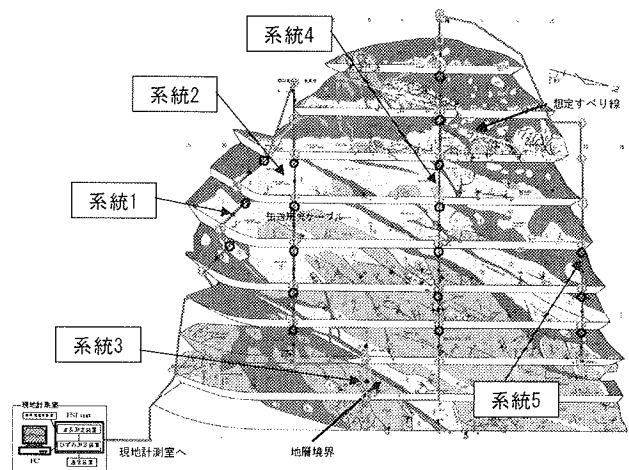


図-8 地質および計測器配置展開図

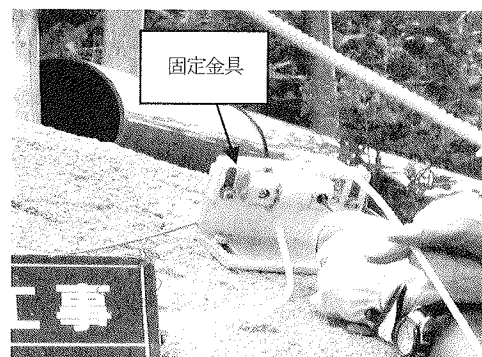


写真-5 固定端部の設置状況

トビシマ  
防災監視センター

インターネット

お客様  
携帯メールやWeb  
でデータを確認

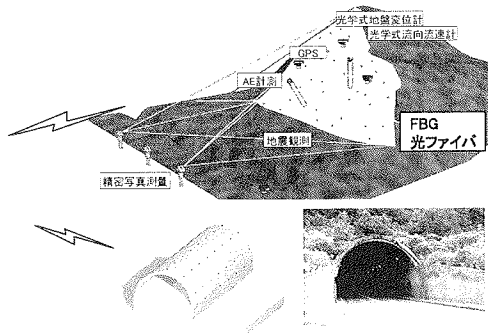


図-9 Web 監視システムの概要

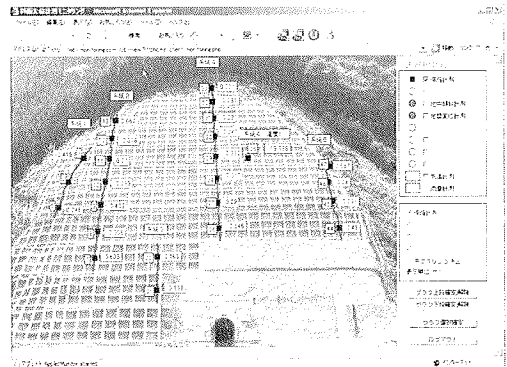


図-10 監視サイトごとの初期画面例

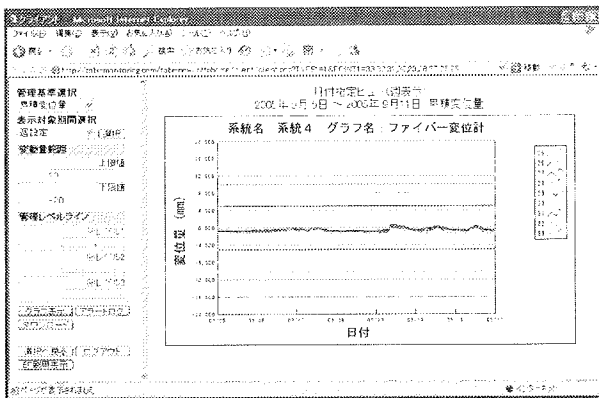


図-11 Web 上での経時変化グラフの表示例

また、表層部には風化したD級岩盤が厚く分布している。掘削面には、泥質部よりやや硬いが割れ目のある珪質(砂質)部が連続し、片立面と同方向～やや急傾斜の破碎部が頻繁に見られ、地質的には長期的に不安定化することが懸念される地質性状である。

#### 4.2 法面挙動監視計画の概要

今回設置したFBG光ファイバ伸縮計は、写真-5に示す固定金具で緊張されたFBGケーブルセンサの2点間のひずみ変化から相対変位を測定する計測器である。図-8に示すように、FBG光ファイバ伸縮計を、ダム軸を中心に計5系統(合計27測線)配置した。これらの内、系統1と系統3は、開口した地層境界層の挙動を監視する目的で、系統2、系統4および系統5は、法面全体の挙動を監視する目的で設置した。また、温度変化に伴ってFBG自身に発生するひずみを補正するため、無応力状態のFBGセンサをそれぞれの系統に沿って配置している。なお、系統2、系統4および系統5については、系統の最上部を固定端部とするため、掘削の影響範囲外の地山にそれぞれの固定端部を設けることとした。

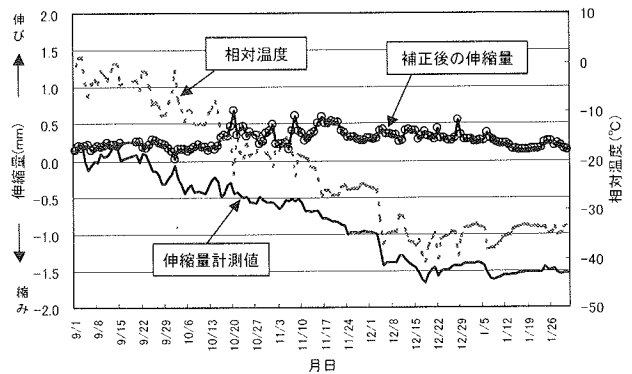


図-12 ダム軸最下部の計測結果

#### 4.3 Web 監視システムの概要

図-9に示すWeb監視システムでは、各監視サイトで計測されたデータは直ちに防災監視センターのサーバへ転送され、クライアントはインターネット上で現況を常時監視できる。各監視サイトで設定された管理基準値を超える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するとともに、防災監視センターで一元管理している管理者が計測データを分析し、管理レベルに応じた対応を迅速に提示することができる。

図-10は、Web上の各監視サイトでの初期画面例であり、計測データがリアルタイムに更新され、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、図-11に示す経時変化グラフは、任意の計測位置を画面上で選択すれば表示閲覧できる。なお、本法面監視サイトでは、通信速度の向上を目的として、携帯電話を用いた通信回線を使用してWeb監視システムの運用を行っている。

#### 4.4 長期的な法面挙動監視結果とその考察

図-12に、計測開始から5ヶ月間の系統4の最下端部における計測結果例を示す。なお、伸縮量は正が伸びを

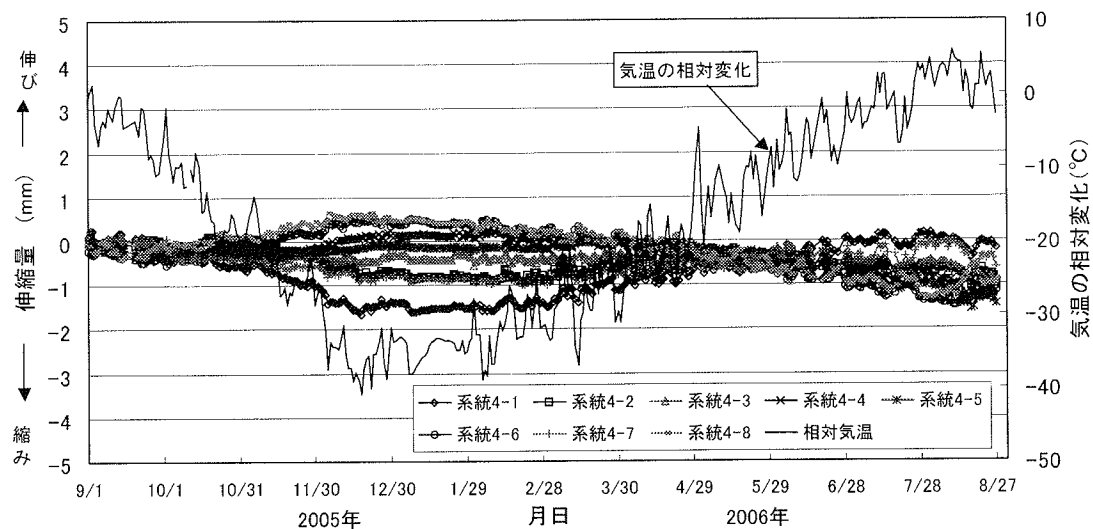


図-13 ダム軸上の系統4におけるFBG光ファイバ伸縮計の長期計測結果, 2005/9~2006/8

示す。本図より、この期間中では1.5mmの収縮変位が計測されていることがわかる。これは、伸縮計端部をコンクリート法枠に固定しているため、コンクリート法枠自身の温度変化に伴う変形を計測していたと考えられる。コンクリート法枠の線膨張係数を $10\mu\text{C}$ と仮定し、伸縮量を補正した結果を同図に示す。補正後の経時変化を見ると、収縮量は0.5mm以内で推移しており、この期間では変状の進展はなかったものと判断できる。

また、図-13には、系統4の全測線における伸縮量の計測開始後1年間の経時変化を相対気温の変化と併せて示す。この図から、各測線は気温変動に応じて収縮もしくは伸長しながら緩やかに変動し、2006年の8月末時点で約1mm程度の縮みで推移していることがわかる。

## 5. おわりに

今後は、多点計測が可能で、遠隔監視に適した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を、社会インフラ施設の健全性モニタリングにも適用

していきたいと考えている。そのため、現有計測器の改良改善を図るとともに、傾斜角、地下水位および地盤内変位などを計測するための計測器の開発にも取り組んでおり、平成18年度にはほぼ完成する予定である。

## 【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) 豊田, 阿部, 葛野, 礒田, 小林, 松元, 阿保, 松田: 画像処理技術に基づく安全監視手法の適用, とびしま技報, No.55, pp.135-140, 2006.
- 3) Measures, R. M.: Structural Monitoring with Fiber Optic Technology, Academic Press, pp.224-288, 2001.
- 4) 神谷, 青木, 柏木, 加藤, 松元, 熊谷: ダム切土法面の動態監視にWEB常時モニタリングシステムを適用, 地盤工学会, 第41回地盤工学研究発表会, pp.2249-2250, 2006.7.

**Summary** Optical fibre sensing has advantages; it is immune to electromagnetic fields and has excellent long-term durability. Therefore it is very suitable for monitoring civil-structures such as roads, railroads, sewers, and electric power stations. This paper describes the outline and special features of a monitoring system using FBG sensors by Time Division Multiplexing, which are proven to have high accuracy on the basis of laboratory tests. Moreover, this monitoring system has been applied to monitoring of cut slopes at a dam site under construction and proven to have the applicability to long-term field monitoring owing to the long-term durability of FBG sensors.

**【Keywords】** fibre optical sensing, FBG, time division multiplexing, monitoring, measurement