

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号

第28号

2. 研究課題名

光ファイバセンシングによる広域社会基盤施設の高精度変状監視システムの開発

3. 研究期間（平成21年度～平成22年度）

4. 代表者及び研究代表者，分担研究者

代表者	熊谷 幸樹	飛島建設株式会社技術研究所・上席研究員
研究代表者	熊谷 幸樹	飛島建設株式会社技術研究所・上席研究員
分担研究者	田村 琢之	飛島建設株式会社技術研究所・主任研究員
分担研究者	塩谷 智基	京都大学大学院工学研究科・准教授
分担研究者	上明戸 昇	飛島建設株式会社技術研究所・副主任研究員

5. 補助金交付総額 16,550千円（研究期間：平成21年度～平成22年度）

6. 研究・技術開発の目的

TDM方式FBGとBOTDRの二つの光センシング技術を融合させることにより、迅速な災害復旧や効率的な維持管理のために不可欠となる広域社会基盤施設の健全性を全域において高精度に長期間計測できる変状監視システムを開発する。

7. 研究・技術開発の内容と成果

7.1. 概要

適切な維持管理により道路や鉄道等の広域社会基盤施設を延命化するには、損傷や変状の発生位置とその程度を迅速にかつ正確に把握することが重要である。延命化のための構造物のヘルスマonitoringに用いられる代表的な光ファイバセンシング技術として、BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) 技術と FBG (Fiber Bragg Grating) 技術が挙げられる。BOTDR 技術は、光ファイバ上に生じるひずみを 10km 以上の長距離において連続的に計測できる特長がある。しかし、ひずみ測定の再現性は、最大 $\pm 100\mu$ であり、長大トンネル等における巨視的なひずみ分布のモニタリングに用いられることが多い。一方、FBG 技術は、光ファイバ上に配置された FBG の位置におけるひずみを $\pm 5\mu$ の精度で計測できる特長がある。また、波長分割多重化方式 (WDM) 方式ではなく、時間分割多重化 (TDM) 方式の FBG 技術を用いることで、1本の光ファイバ上に最大 100 点の FBG を配置し計測することができる。両光ファイバセンシング技術の特徴を表 1 に示す。

表 1 FBG 方式と BOTDR 方式の光ファイバセンシング技術の特徴

	BOTDR 方式	FBG 方式
計測原理	光ファイバに生じるひずみを、ブリルアン散乱光の波長の変化として計測 ²⁾	FBG 素子に生じるひずみを、ブラッグ波長の変化として計測 ¹⁾
ひずみ計測位置	光ファイバ上の全ての位置	光ファイバ上の FBG 素子の位置
計測精度	$\pm 100\mu$ (再現性)	$\pm 5\mu$
信号伝送距離	最大 80km	最大 9km

光ファイバセンシング技術に関する用語の説明は、「7.10. 技術用語の説明」に示す。

しかし、分布荷重や多くの集中荷重を受ける構造物上のひずみ分布を計測する場合、BOTDR または FBG の一方の技術のみでは、ひずみ分布全体を正確に計測できないという課題がある。この課題を解決するため、TDM 方式 FBG 技術と BOTDR 技術を統合運用することにより高精度で連続的なひずみ計測値を得るための研究開発を進めてきた。

図 1 に、本研究を用いた変状監視システムの概要を示す。FBG が書き込まれた 1 本の光ファイバを計測対象構造物に設置し、制御用 PC で光スイッチを自動で切替えることにより、TDM 方式 FBG 技術によるひずみ計測と BOTDR 技術によるひずみ計測を交互に行う。制御

用 PC 上で, TDM 方式 FBG 技術により計測された高精度で離散的なひずみデータを用いて, BOTDR 技術により計測された連続的なひずみデータを補正することによって, より精度の高いひずみ分布を求める.

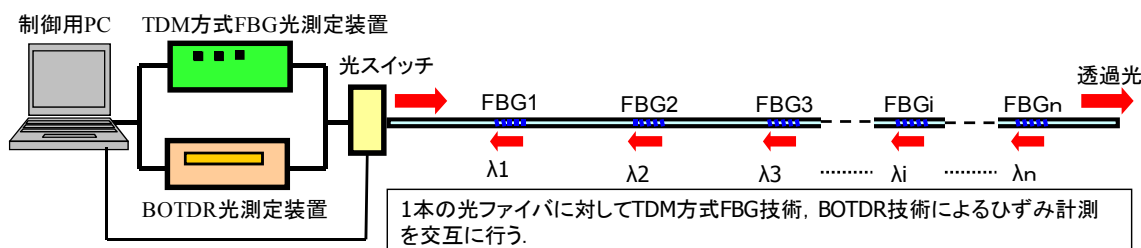


図1 FBG 技術と BOTDR 技術の統合運用による変状監視システムの概要

以下に, 技術開発の内容・成果の概要を示す.

- ① 両技術の統合運用のための光学的要件の明確化と実験による検証
- ② ひずみ分布が連続的に変化する条件での BOTDR 計測値の誤差の理論的検証
- ③ 実験による計測誤差のシミュレーション結果の検証
- ④ 高精度なひずみ分布を得るための解析方法の検討
- ⑤ 統合運用のための制御ソフトウェアおよびデータ処理ソフトウェアの開発
- ⑥ 高精度変状監視システム用光ファイバセンサの開発
- ⑦ 高精度変状監視システムの適用の方向性
- ⑧ 高精度変状監視システムの機能総括

7.2. 両技術の統合運用のための光学的要件の明確化と実験による検証

7.2.1. 光学的要件の明確化

FBG 技術による計測は, 光ファイバのコアに書きこまれた回折格子の周期的な変化をもつ FBG 素子の位置で, 光ファイバの一端から入射されたパルス光の内特定の波長成分の光を反射する. 一方, BOTDR 技術による計測でブリルアン散乱光を観測する際, 散乱光の強度が小さくなると, 計測誤差が生じる. 両者は, とともに光損失が最も少ない C バンド (1530-1570 nm) と呼ばれる波長帯を計測に使用するため, FBG 計測と BOTDR 計測が相互に影響を与えないよう, まず BOTDR 計測の使用波長帯を厳密に確認した. 図 2 のように, BOTDR 計測の入射光は 1,550 nm であり, 散乱光は ± 10 GHz シフトする. これは 0.08 nm の波長シフトに相当する. さらにひずみにより, 波長は 0.4 pm ($=10^{-3}$ nm) シフトする.

したがって、BOTDR 計測のためにおよそ 1,549 nm から 1,551 nm の範囲の波長帯を確保しておけば、FBG 計測における観測光のスペクトル幅を考慮しても、上記の範囲の外側で FBG 計測を行えば、相互の干渉は生じないことを明らかにした。また、この条件を持つ FBG を配置した光ファイバに対し、両技術による計測実験を実施し、ともに計測が可能であることを確認した。

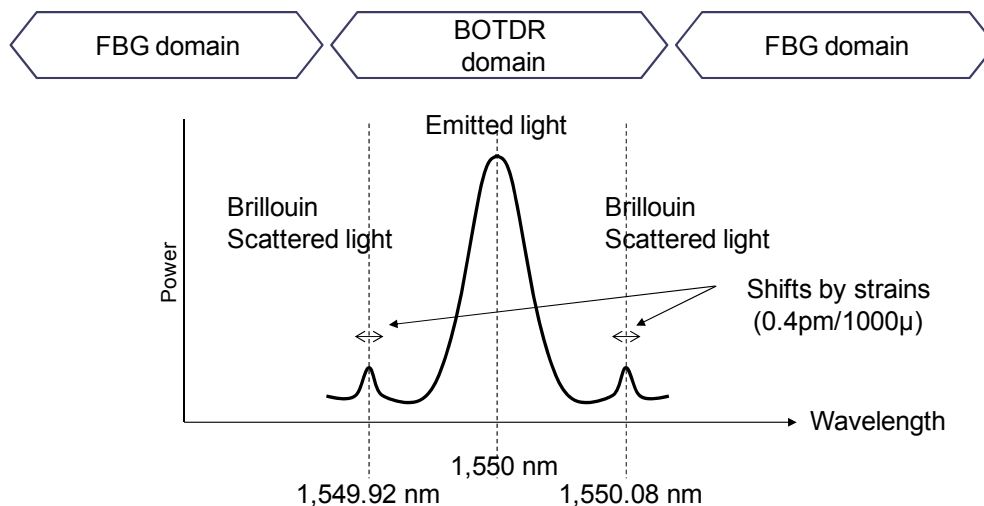


図 2 FBG 計測と BOTDR 計測における波長帯の分割使用

7.2.2. 光学的要件の実験による検証

図 3 のように、3 つの FBG を含む光ファイバの後方に、BOTDR 用ファイバを接続し、これにひずみを与え、FBG の存在による BOTDR 計測の障害の有無を確認した。

(1) 計測システムの概要

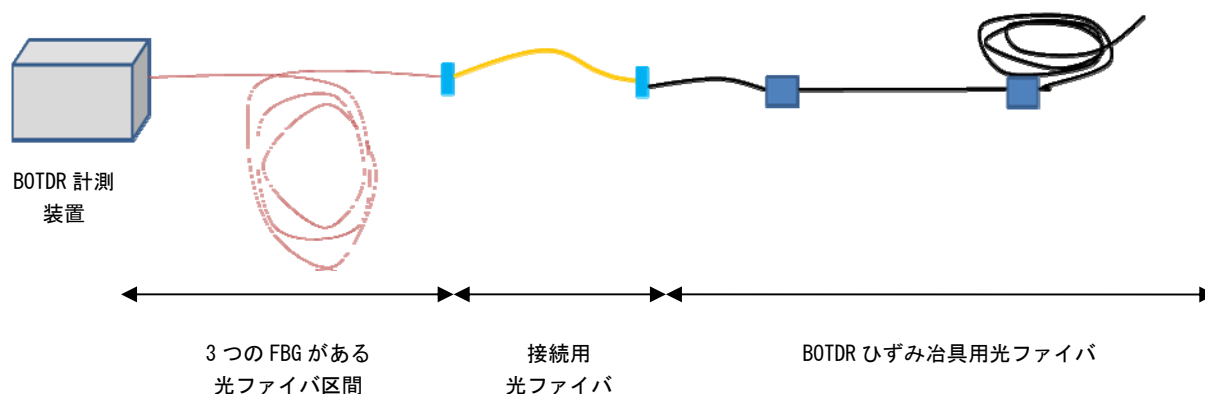


図 3 計測システムの概要

(2) FBG 仕様

表 2 と写真 1 に示す，中心波長 1546nm，5m 間隔，全長 15m のポリイミド被覆光ファイバ素線を使用した。

表 2 FBG の仕様

Central wavelength (in vacuum)	nm	1546
Central wavelength accuracy	±nm	0.5
-3dB bandwidth	nm	0.07
Bandwidth tolerance	±nm	0.01
Sidelobe suppression	dB & nm	>10 (next nearest)



写真 1 使用した FBG の外観

(3) BOTDR ひずみ治具

ひずみを与える治具は，被覆された光ファイバを，写真 2，写真 3 の専用の治具で 2 箇所締め付け，把持した状態で緊張力を与える装置である。



写真2 ひずみ治具外観

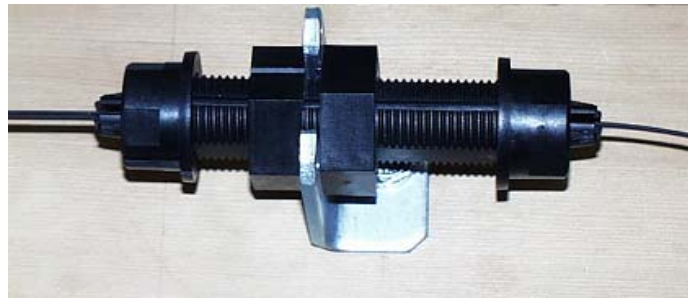


写真3 ひずみ治具拡大写真

(4) 計測結果

BOTDR 計測装置 N8510 (株アドバンテスト社製) による計測結果は、図4の通りである。写真4, 写真5に計測試験状況を示す。ひずみ治具によりひずみを与えた結果が、図中の○印のように現れた。なお、FBGが存在する光ファイバ区間(図中「飛島ファイバ」)では、ポリイミド被覆の拘束によるブリルアン散乱が確認されているが、実験による変化は発生していない。

今回の実験で、表2に示す仕様の3つのFBGが存在しても、その後方でBOTDRによるひずみ計測が可能であることを確認した。

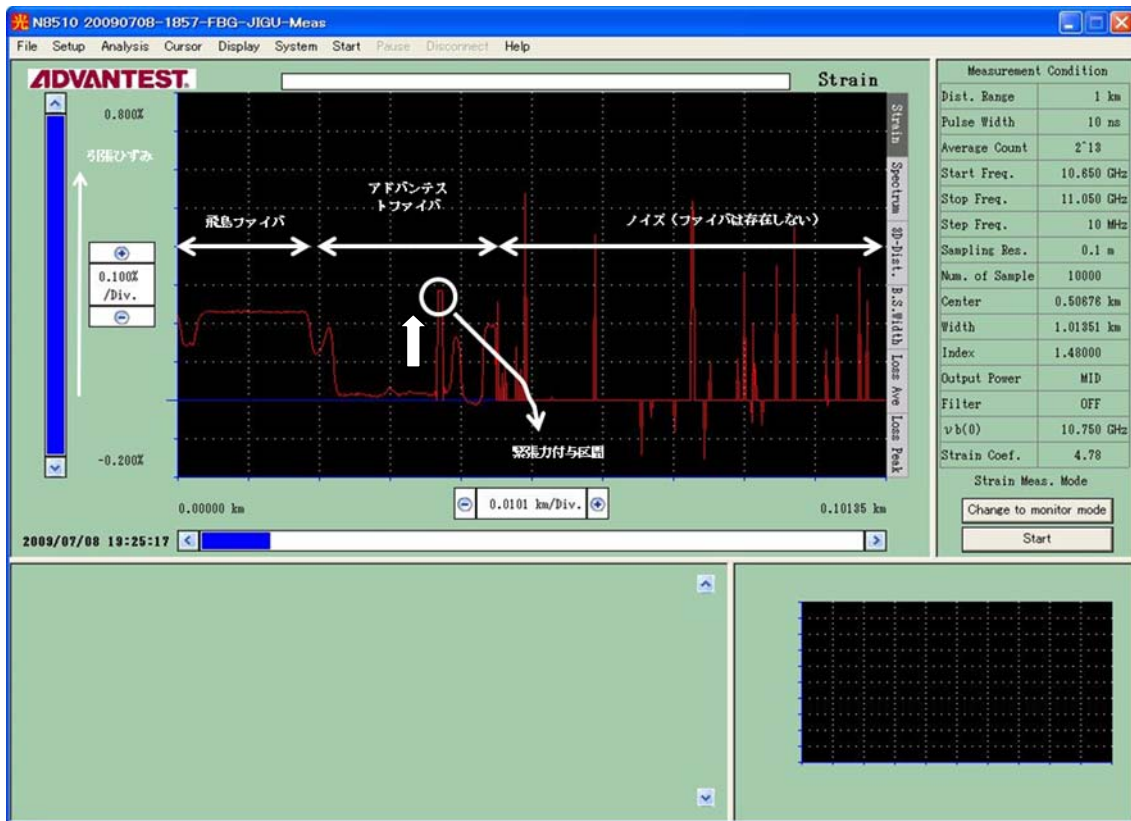


図 4 N8510 による計測結果



写真 4 試験状況

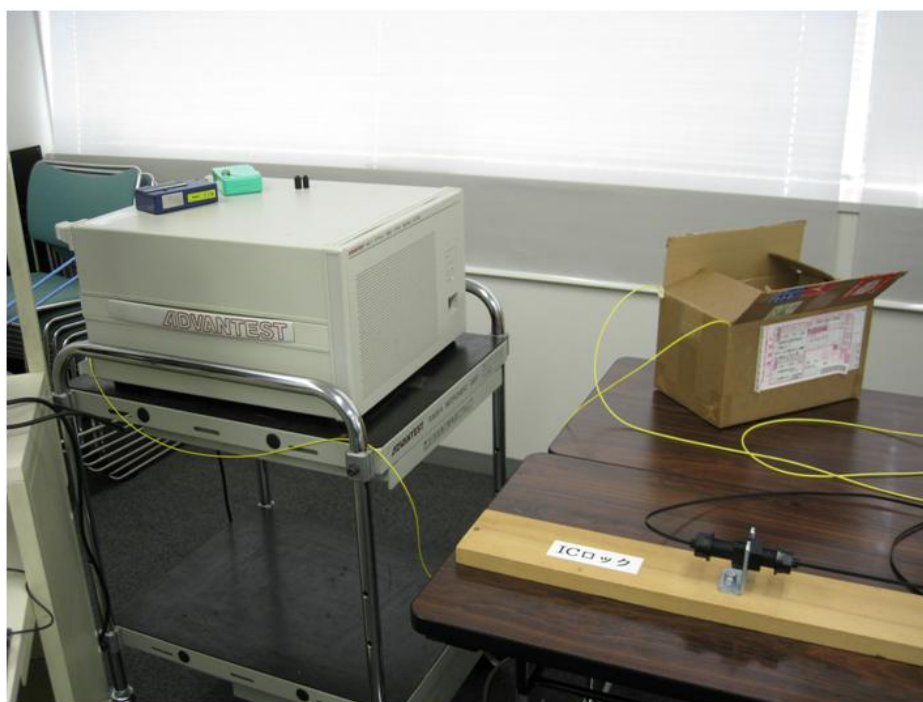


写真5 BOTDR 計測装置 (N8510, 左の装置)

7.3. ひずみ分布が連続的に変化する条件でのBOTDR計測値の誤差の理論的検証

7.3.1. BOTDR計測値の誤差の理論的検証

本変状監視システムを用いて両技術の計測データから高精度なひずみ分布を得るためには、まずFBG、BOTDRのそれぞれの技術による計測誤差の大きさや発現形態などのひずみ計測値の特徴を明らかにする必要がある。

BOTDR計測において、散乱光を発生させるパルス光は幅を持つため、ひずみ分布が光ファイバの長さ方向で変化する場合、パルス光の幅に依存する誤差が発生すると考えられている。この計測誤差の程度を把握するため、BOTDR技術によるひずみ計測のシミュレーションを実施した。

ブリルアン散乱光は、理論上、ローレンツ関数で表される。光ファイバにひずみを与えられたとき、スペクトルのピークは与えられたひずみに応じてシフトする。一般的に、BOTDR計測における誤差 100μ は、再現性を示しているが、これはサンプリング周波数間隔に支配される。サンプリング周波数は 5 MHz 程度であるが、これが 100μ に相当している。一方、入射光は光ファイバの長手方向のある幅をもって伝搬するが、観測されるスペクトルは、入射光の幅によって決定される範囲の反射光の合成スペクトルである。スペクトル $g_B(\nu)$ は (1) 式で表される。

$$g_B(\nu) = \int_z^{z+l} \frac{h}{1 + (\nu - \nu_B)^2 / (w/2)^2} dz, \quad (1)$$

- z : 光ファイバ上の位置
 l : 入射光の幅によって決定される幅
 ν_B : スペクトルのピークを示す周波数
 w : 半値全幅
 h : ブリルアン散乱光のパワー最大値

図 5 に、シミュレーション結果を示す。図 6 に示すひずみ分布を持つ光ファイバに対してパルス光が入射し、A の位置から C の位置に移動したときの、0.1m きざみの観測スペクトルの変化を表したものである。 h 、 w 、 l はそれぞれ 1、100MHz、2.0m としている。図 5 のように、観測スペクトルの形状は、観測光が存在する範囲のひずみ分布によって変化するため、スペクトルのピーク周波数から得られるひずみは、上記の範囲で実際に生じているひずみとは異なる。この結果より、サンプリング周波数に依存する誤差以外の誤差の発生の可能性が生じる可能性があることがわかった。

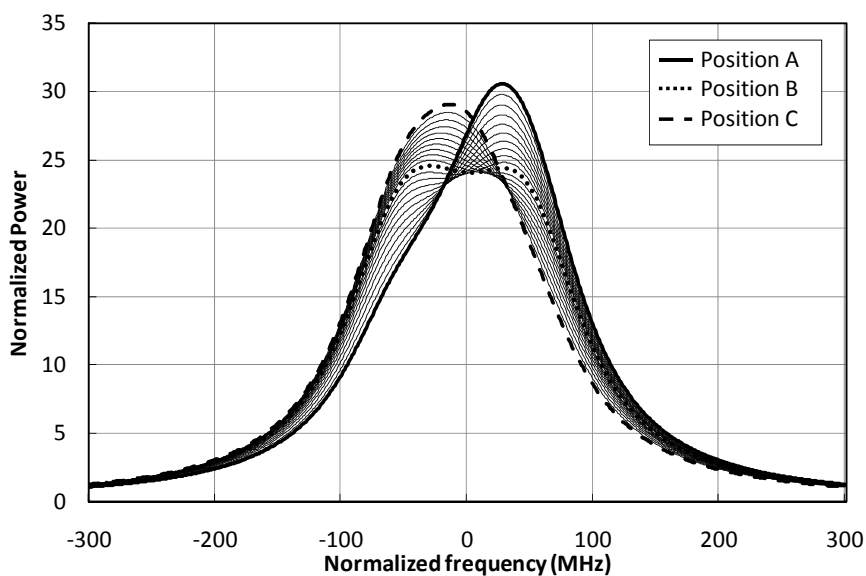


図 5 入射光の移動にともなう観測スペクトルの変化

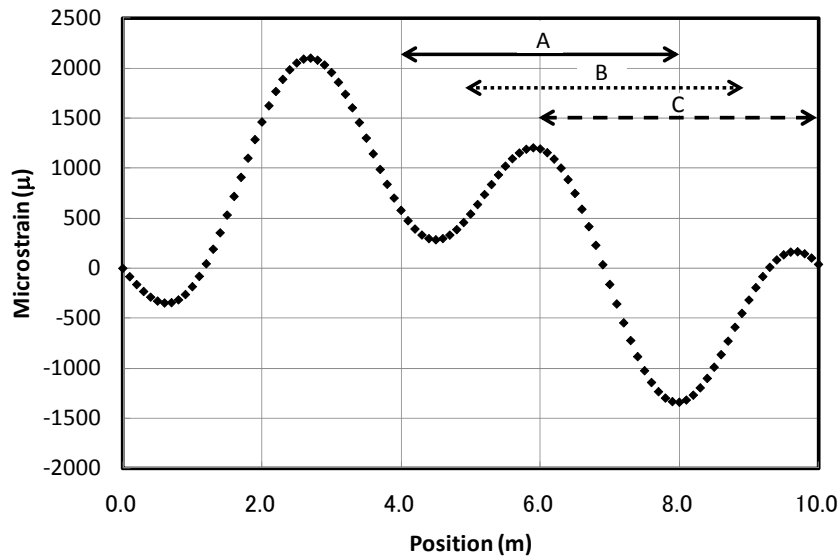


図6 想定ひずみ分布

7.4. シミュレーションによる理論上の誤差の確認

7.4.1. 条件設定

7.3.で示したように、BOTDR 技術によるひずみは、散乱光の観測範囲内のスペクトルを同時に観測するため、観測範囲のひずみの変化によっては再現性の最大 $\pm 100\mu$ を大きく越える計測誤差を発生する可能性がある。そのため、BOTDR 技術における計測誤差の特徴を把握することを目的とした検討をシミュレーションにより行なった。

シミュレーションは、前述の(1)式を用い、変形条件は、図7に示す次の3ケースとした。

Case1：片持梁とし、固定端におけるひずみが 500μ である場合

Case2：単純梁とし、中央のひずみが $1,000\mu$ である場合

Case3：両端固定梁とし、中央のひずみが $1,000\mu$ である場合

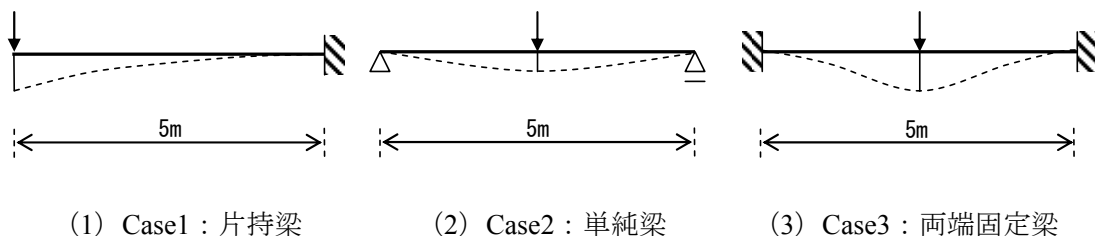


図7 検討対象とした梁構造のモデル

設定値を以下に記す.

一般的な計測設定値とし、周波数 ν のステップを 10MHz, ブリルアン散乱光の中心周波数 ν_B を 10.75GHz, パルス幅を 20ns, 読取分解能を 0.05m とした. また, (1) 式に必要な残りの設定値は計測誤差の特徴を確かめるための仮定値とし, ブリルアン散乱光のパワー最大値 h を 1, 半値全幅 ω を 100MHz とした. シミュレーションにおける BOTDR 技術のひずみ計算方法を以下に記す.

- 1) 光ファイバの各地点における, それぞれの変形条件から決まる理論上のひずみ値を用いて散乱光ゲインスペクトルを 0.05m 毎に求める.
- 2) パルス幅 20ns から定まる散乱光の観測範囲 ΔZ を 2m とするブリルアン散乱光のパワースペクトルを, 散乱光ゲインスペクトルの積分により求める.
- 3) ブリルアン散乱光のパワースペクトル $G(\nu)$ は 10MHz 毎 (200 μ 毎) の離散値で観測される値であるため, 3 次スプライン補間により連続関数に置き換え, ピーク値に対応する周波数 ν を求める.
- 4) 周波数シフト量を求め, 0.05MHz/ μ の関係から BOTDR 技術によるひずみのシミュレーション値を求める.

7.4.2. シミュレーション結果

図 8 から図 10 に, Case1 から Case3 に対する BOTDR 技術によるひずみ分布のシミュレーション結果を示す. それぞれのケースにおける理論上のひずみ値は, 図に示す載荷位置をひずみ分布の変化点として, 直線的に変化する. これに対して, BOTDR 技術によるシミュレーション値は, Case2 と Case3 の載荷位置付近と Case1 から Case3 の端部付近で計測誤差を生じた. その大きさは, Case1 の右端では 270 μ , Case2 の中央では 205 μ , 両端部では 100 μ , Case3 の中央では 410 μ , 両端部では 705 μ であった. これは, BOTDR 計測で観測される散乱光のパワースペクトルが, (1) 式で示される散乱光の観測範囲のゲインスペクトルを同時に観測するためであると考えられる. ひずみ分布の変化点では, その近傍のひずみ値の影響により, BOTDR によるひずみとの乖離が見られている. また, 端部では, 計測値が存在しない計測範囲外のひずみを 0 として観測することが計測誤差を生じる原因であると考えられる.

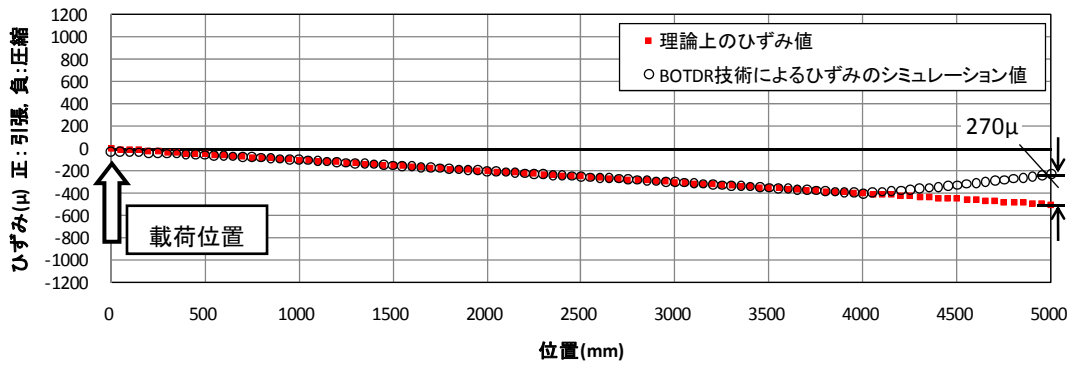


図 8 BOTDR 技術によるひずみ分布のシミュレーション結果 (Case1)

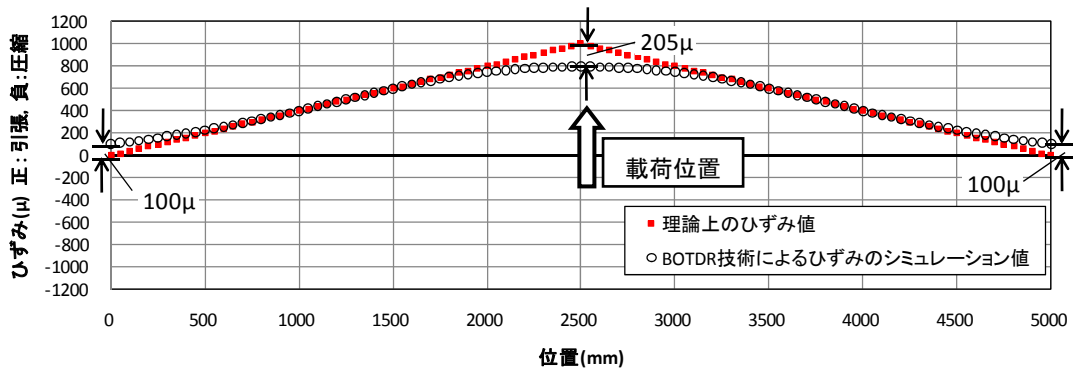


図 9 BOTDR 技術によるひずみ分布のシミュレーション結果 (Case2)

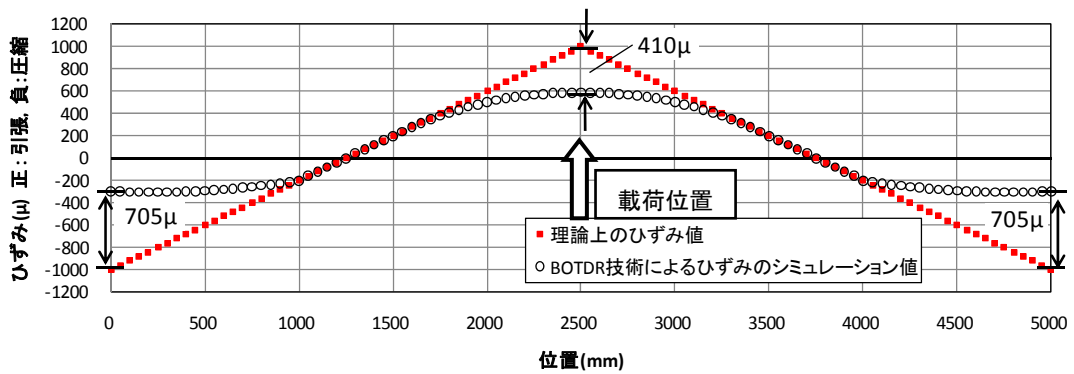


図 10 BOTDR 技術によるひずみ分布のシミュレーション結果 (Case3)

7.5. 実験による計測誤差のシミュレーション結果の検証 (H21年度実施)

7.5.1. 実験条件

シミュレーションによって得られた BOTDR 計測におけるひずみの計測誤差の特徴と、

FBG の計測精度について、H21 年度に、FBG 技術、BOTDR 技術によるひずみ計測実験により確認した。実験には、長さ 6.0m、フランジ幅 100mm (厚さ 6mm)、ウェブ幅 100mm (厚さ 8mm) の H 型鋼を用いた。図 11 に、H 型鋼に取り付けたセンサと計測機器の構成を示す。

H 型鋼に生じるひずみに対する、光ファイバの被覆によるすべりの影響を少なくするため、光ファイバの素線 (コア直径 8.4 μ m, クラッド外径 125 \pm 2 μ m, コーティング外径 155 \pm 5 μ m, ポリイミド被覆) を、シアノアクリレート系接着剤により H 型鋼のフランジ中央に貼り付けた。BOTDR 技術では中心波長 1,550nm のパルスに対して発生するブリルアン散乱光を観測するため、想定されるひずみを考慮して FBG の中心波長を 1,546nm とし、それぞれの計測手法で使用する波長帯が重ならないようにした。

BOTDR 光測定装置は、アドバンテスト社の N8510 を用いた。BOTDR 技術によるひずみの計測条件は、周波数ステップを 10MHz, パルス幅を 20ns, 読取分解能を 0.05m とした。FBG 光測定装置は、インセンシス社の FSI ユニット (OEM-1040-S-422) を用いた。FBG によるひずみ計測位置は、H 型鋼の端部から 0.4m, 2.4m, 4.4m の 3 箇所とし、2m 間隔とした。また、電気式ひずみゲージを 0.2m 間隔とし、光ファイバケーブルの中心線から両側 10mm の位置にシアノアクリレート系接着剤により貼り付け (52 センサ), 1 対の電気式ひずみゲージの平均値を H 型鋼に生じたひずみとみなして光ファイバ計測値と比較した。

H 型鋼の変形条件は図 7 に示す Case1 から Case3 の 3 ケースとした。図 12 に H 型鋼の固定条件と载荷箇所を示す。H 型鋼はフランジが側面となるよう配置し、ジャッキ (0.5MN センターホール型ジャッキ) の先に直径 6mm, 長さ 100mm の円筒形治具を取り付け、H 型鋼への载荷条件が点となるようにした。写真 6 に Case3 におけるひずみ計測実験の状況を示す。このケースでは、光ファイバを貼り付けた H 型鋼の両端部は治具を用いて試験台に固定した。また、H 型鋼を変形させるためのジャッキは H 型鋼の中央に設置した。なお、いずれのケースにおいても、ジャッキおよび試験台は、H 型鋼の载荷時に動かないようボルトを用いて床に固定した。FBG 計測と BOTDR 計測に用いた計測装置の仕様を、表 3, 表 4 に示す。

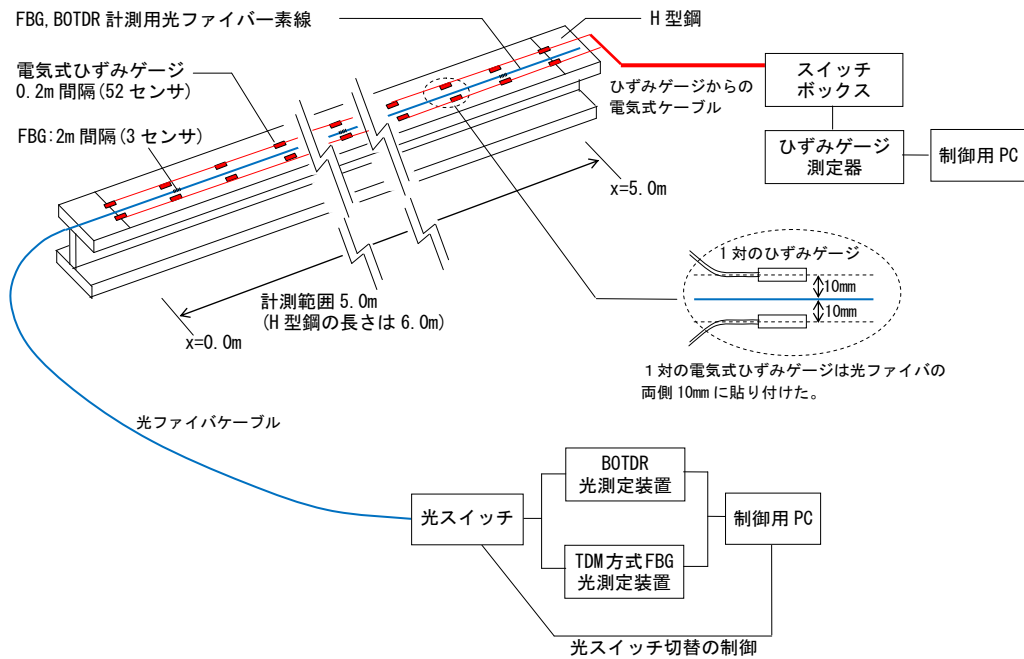
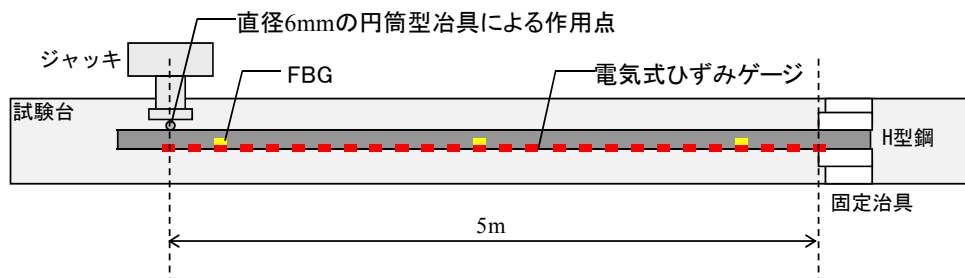
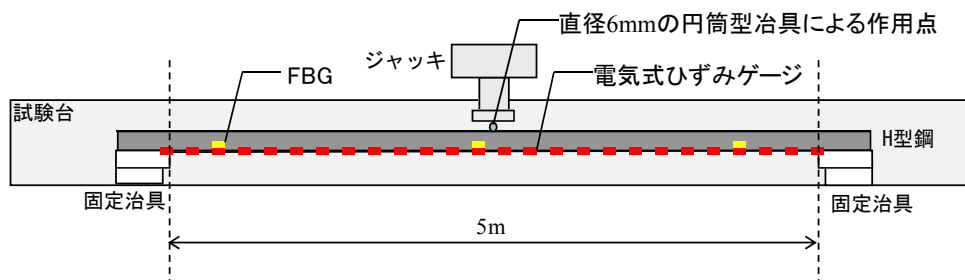


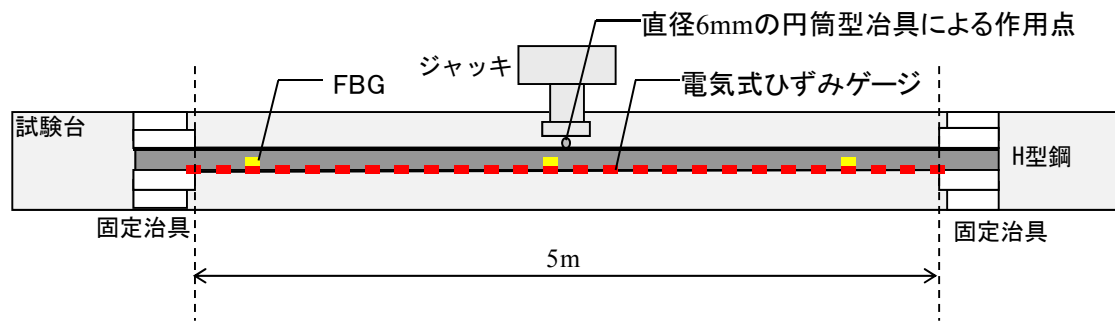
図 11 H 型鋼へ取り付けられたセンサと計測機器の構成



(1) Case1:片持梁



(2) Case2:単純梁



(3) Case3:両端固定梁

図 12 H型鋼の固定条件と載荷箇所

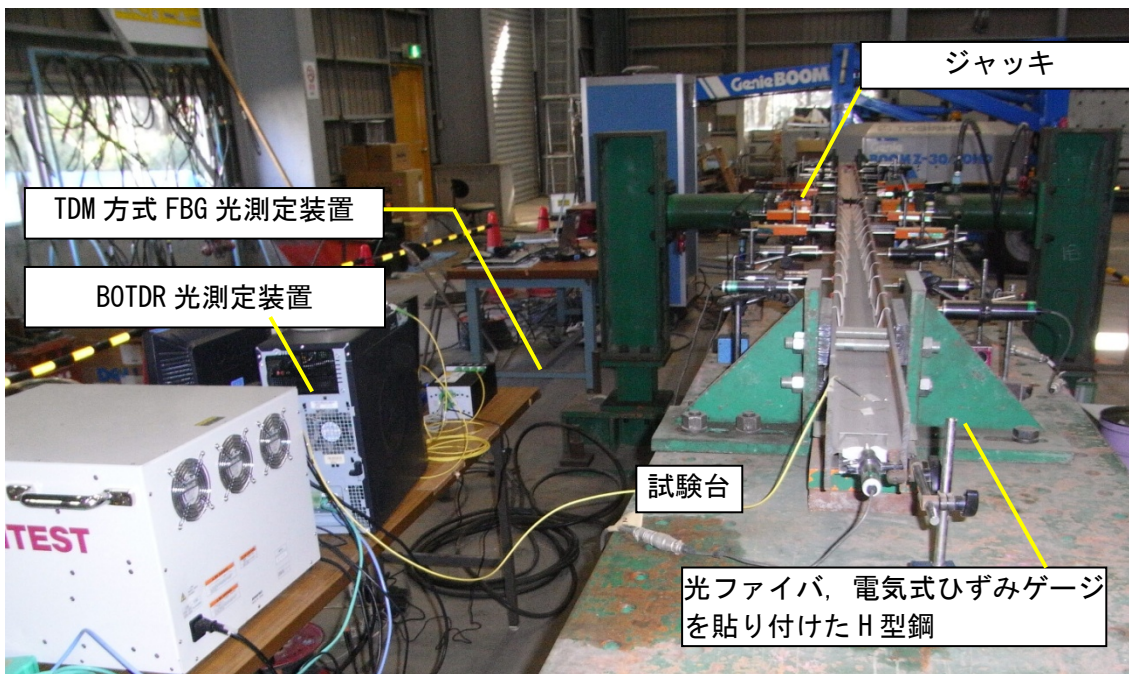


写真 6 Case3 におけるひずみ計測実験の状況

表 3 FBG 計測装置の主な仕様

型番	OEM-1040-S-422
チャンネル数	4
最大接続センサ数	100
測定範囲	$\pm 4500 \mu$
ひずみ分解能	0.8μ
温度分解能	0.1°C
最大サンプリング周波数	500Hz (接続センサ数により変化)
チャンネル切り替え時間	10s (機器の切り替え動作時間 75ms)
仕様電圧	10v – 36V DC, 110 – 240 V AC
消費電力	3W (定常状態)
インターフェース	USB
重量	3.0 Kg
寸法	240 X 120 X 97 mm
光接続端子	E2000APC
動作温度	0 to 60°C
保管温度	-40 to 65°C
許容湿度	5 to 95% RH (結露がないこと)

表 4 BOTDR 計測装置の主な仕様

BOTDR 計測装置は(株)アドバンテスト製 N8510 を使用した。

■測定機能	<ul style="list-style-type: none"> ・歪み距離分布 ・ブリルアン散乱スペクトラム ・ブリルアン散乱損失分布
■測定波長	1,550nm 帯
■測定再現性	±100με 以下
■歪み測定範囲	100με ～ 15,000με
■歪み測定リニアリティ	±4×10 ⁻³
■測定ポイント数	最大 100,000 ポイント
■AC 電源入力	AC100V - AC120V, 50Hz/60Hz AC220V - AC240V, 50Hz/60Hz (AC100V 系, AC220V 系に自動切り替え)
■消費電力	200VA 以下
■外形寸法	約 430 (W) ×266 (H) ×500 (D) mm 突起部を除く
■質量	27 kg 以下
■使用環境	温度範囲 : +10 ～ +40℃ 相対湿度 : 85%以下 (結露なきこと)
■保存環境	温度範囲 : 0 ～ +50℃ 相対湿度 : 85%以下 (結露なきこと)

7.5.2. 実験結果

図 13 から図 15 に、Case1 から Case3 における FBG 技術と BOTDR 技術、および電気式ひずみゲージによるひずみ計測実験結果を示す。図より以下のことが分かる。

- 1) BOTDR 技術によるひずみ (Δ) 分布は、電気式ひずみゲージによるひずみ (\blacksquare) と比べて、Case1 の右端では 290μ 、Case2 の中央では 139μ 、左端では 259μ 、右端では 49μ 、Case3 の中央では 301μ 、左端では 324μ 、右端では 461μ の計測誤差を生じた。計測誤差の大きさは、Case2、Case3 の両端部においてばらつきがあるものの、概ね数百 μ でひずみの変化点や端部に生じていた。そのため、シミュレーションで明らかにした BOTDR 技術におけるひずみの計測誤差の特徴を、ひずみ計測実験においても確認できたと考えられる。

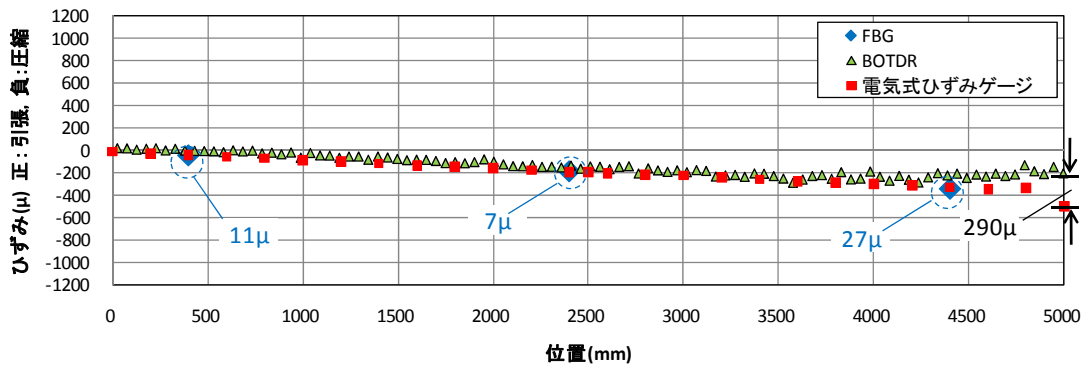


図 13 ひずみ計測実験結果 (Case1)

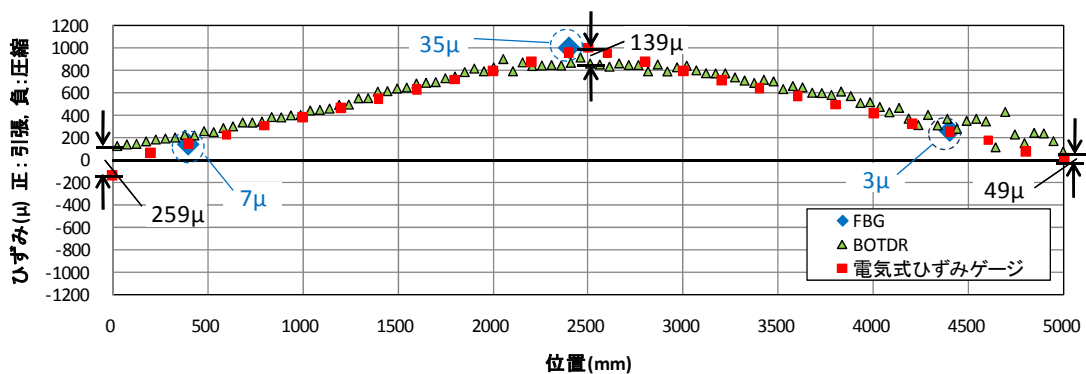


図 14 ひずみ計測実験結果 (Case2)

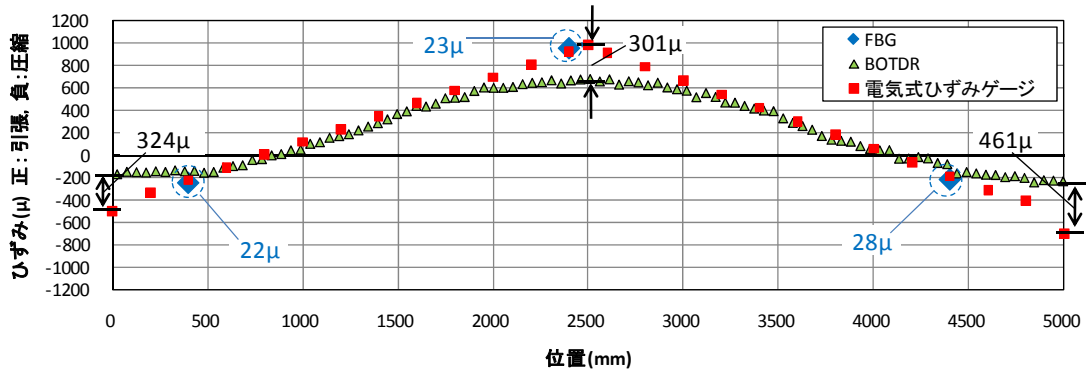


図 15 ひずみ計測実験結果 (Case3)

2) FBG 技術によるひずみ (◆) 計測値は、電気式ひずみゲージによるひずみ (■) と比べて、Case1 では 7~27 μ 、Case2 では 3~35 μ 、Case3 では 22~28 μ の計測誤差を生じた。また、発生した計測誤差は 3 μ から 35 μ の範囲で分布しているため、平均的に発生する計測誤差は 18 μ であると考えられる。このとき、FBG における計測誤差の平均である 18 μ は十分小さいため、統合運用において、BOTDR 技術から得られたひずみ分布をより高い精度のひずみ分布とするための補正值として使用できると考えられる。

7.6. 高精度なひずみ分布を得るための解析方法の検討

7.6.1. シミュレーションによる解析方法の有効性の確認

次に、高精度なひずみ分布を得るための解析手法の検討を行なった。解析は、誤差が小さな FBG 計測値を制約条件として BOTDR 計測値の最適化を行った。

まず最初に、BOTDR のシミュレーションデータに対し、試行的に 12 次の多項式を目的関数とし、FBG 計測値に BOTDR 計測値の 100 倍の重みを与え、最小二乗法により目的関数を求めることとした。本解析手法の適用によるシミュレーションは、以下の手順により実施した。

- ① 長さ 10m の構造物が変形した際のひずみ分布を仮定し、これに対して BOTDR 計測を行った場合のひずみ分布を計算で求めた。また、FBG 計測のひずみは 2m の間隔で配置した FBG 素子の位置での値とした。
- ② FBG 計測のひずみデータと BOTDR 計測のひずみデータに対し本解析手法を適用し、得られたひずみ分布と解析前の BOTDR 計測のひずみ分布を比較した。解析条件として、ひずみ分布全体を 1 つの多項式で近似するため、仮定したひずみ分布

の形状を考慮し 12 次の多項式を目的関数とした。また、FBG 計測のひずみデータに与える重みは BOTDR 計測のひずみデータの 100 倍とした。

この結果、図 16 に示すように、BOTDR 計算値のひずみ分布の極値点付近に生じている最大 300 μ の誤差は、本解析手法の適用により 100 μ 程度まで低減することを確認した。

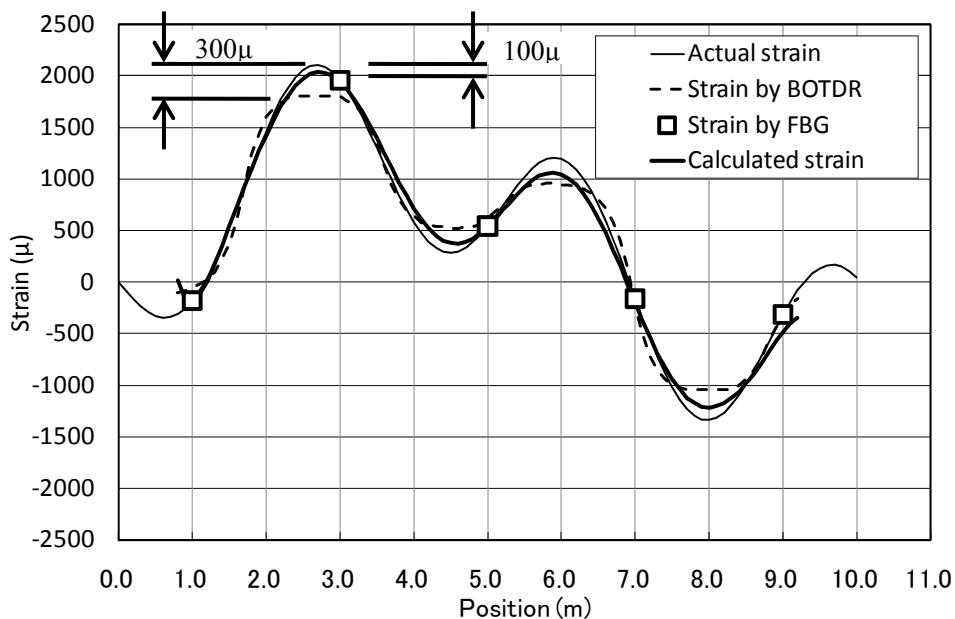


図 16 解析結果

7.6.2. 解析方法の実験による検証

H22 年度に実施した室内実験結果に、本解析手法を適用した。図 17 に実験装置の概要を、写真 7 に実験状況を示す。12m の長さの H 型鋼（100×100×6×8）のフランジの中央にひずみゲージと光ファイバセンサを接着した。スパン長を 10m とし、H 型鋼中央のひずみが 500 μ となるよう 3 点曲げ载荷を行った。このときのひずみゲージの計測値を基準とし、光ファイバ計測値を比較した。なお、実構造物では計測範囲が長距離となる場合があり、計測範囲全体の計測値に多項式近似を行うと、適切な次数が決定できない。そこで、計測範囲を分割し、各区間で個別に近似計算を行うことにより、各区間の多項式に適切な次数を設定できるようにした。本検討での区間距離は FBG 計測値を含む 2m とし、4 次の多項式近似とした。

図 18 にひずみ計測結果および解析結果を、図 19 にひずみゲージ位置でのひずみ計測誤差を示す。計測位置が 5.5m～9.5m の範囲では、BOTDR 計測値の誤差は 2 μ ～21 μ とともに小さく、本解析手法による誤差の低減効果は見られない。一方、計測位置が 0.5m～4.5m

の範囲では、BOTDR 計測値の誤差は $30\mu\sim 52\mu$ と比較的大きく、解析処理後は $0\mu\sim 27\mu$ と小さくなり、低減効果が見られた。なお、5m の計測位置では、BOTDR 計測値の誤差は 83μ と大きいですが、補正に用いる FBG 計測値がこの付近に無いため、本解析手法による誤差の低減効果は見られない。以上の結果から、BOTDR 計測のひずみ分布の補正に用いる FBG 素子の配置により、効果は異なるものの、全体としては本解析手法により高精度なひずみ分布を求められることが明らかとなった。さらに高精度なひずみ分布を得るためには、ひずみ分布の変化点になると予測される位置の近傍に FBG 素子を密に配置することが効果的である。

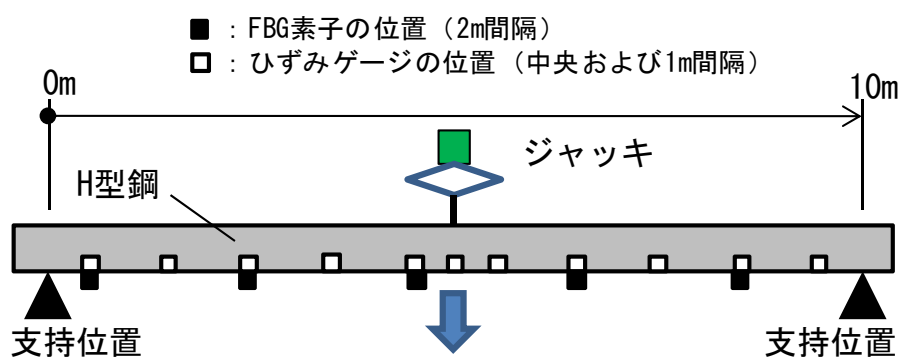


図 17 実験装置の概要

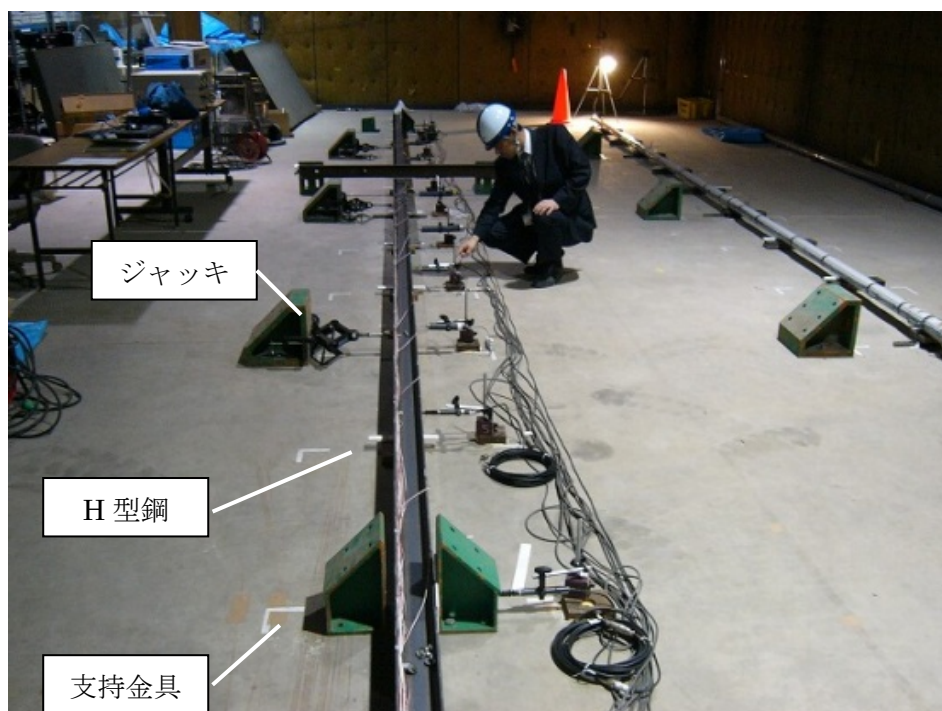


写真 7 実験状況

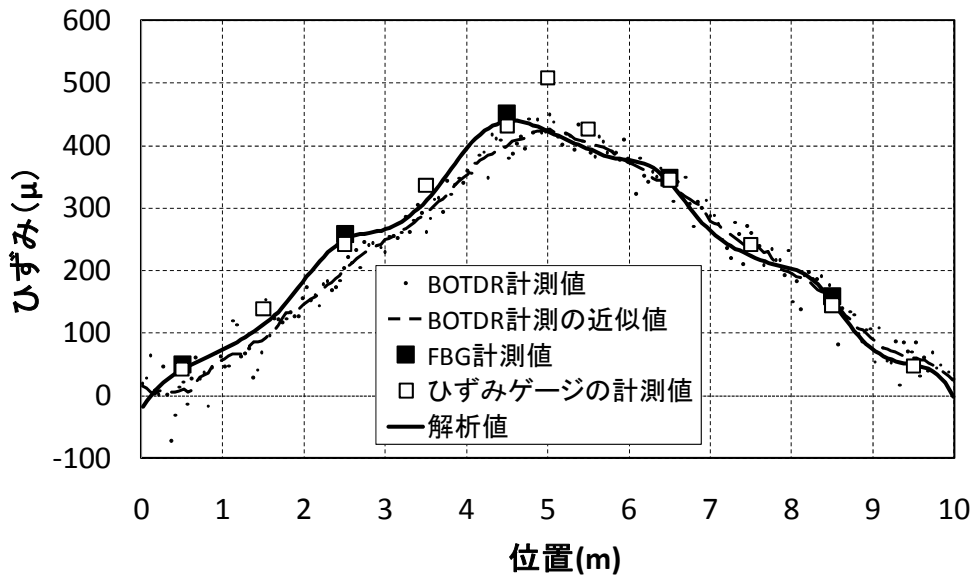


図 18 ひずみ計測結果および解析結果

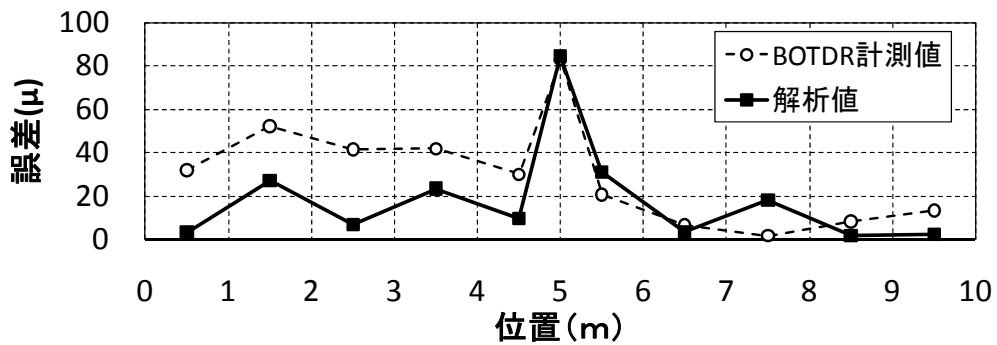


図 19 ひずみゲージ位置でのひずみ計測誤差

このように、本解析方法をひずみ実験データへ適用した結果、ひずみ計測の高精度化に有効であることがわかった。本解析方法は、区間毎に次数を固定した関数のフィッティングを行うため汎用性があり、あとに述べるソフトウェアによる計算にかかる時間は約 20 秒であり短時間で計算ができる利点がある。図 20 に、区間分割後補正計算をする場合の計算例を示す。

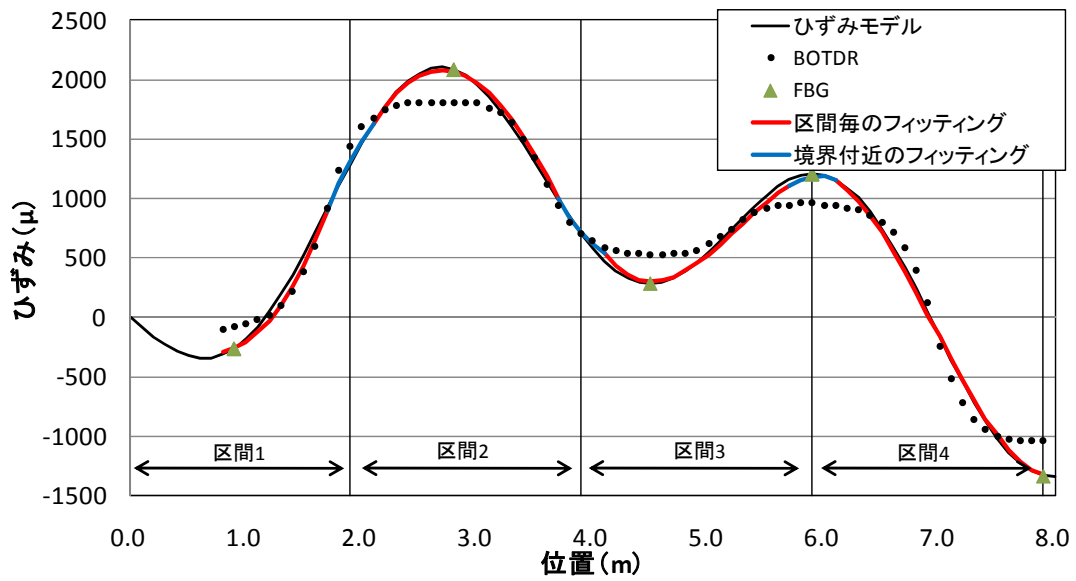


図 20 新たな解析方法による計算例

7.7. 統合運用のための制御ソフトウェアおよびデータ処理ソフトウェアの開発

高精度変状監視システムとして 2 つの光ファイバセンシング技術を統合運用するため、以下の機能を持つソフトウェアを開発した（図 21，写真 8，写真 9）。

- ① 1 本の光ファイバに対し両技術の計測機器を接続し，自動交互の計測制御
- ② 計測結果をデータベース化
- ③ 解析によるデータ処理
- ④ 解析結果のグラフ表示

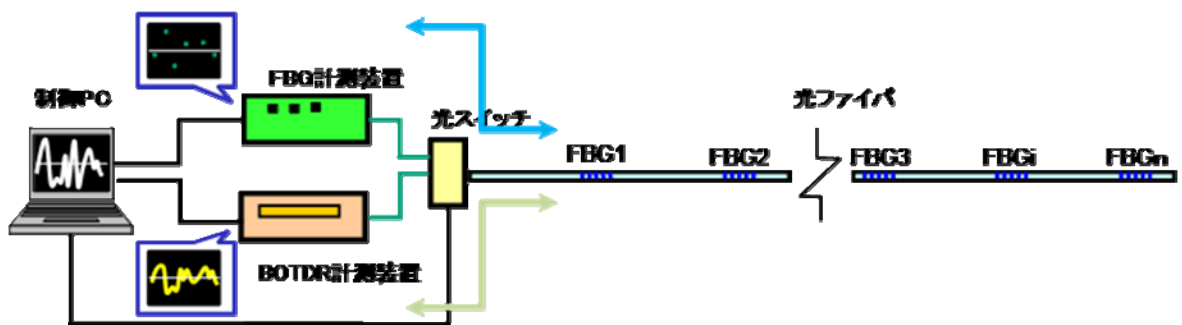


図 21 ソフトウェア機能の概念図



写真 8 計測システム (H21 年度実験時)

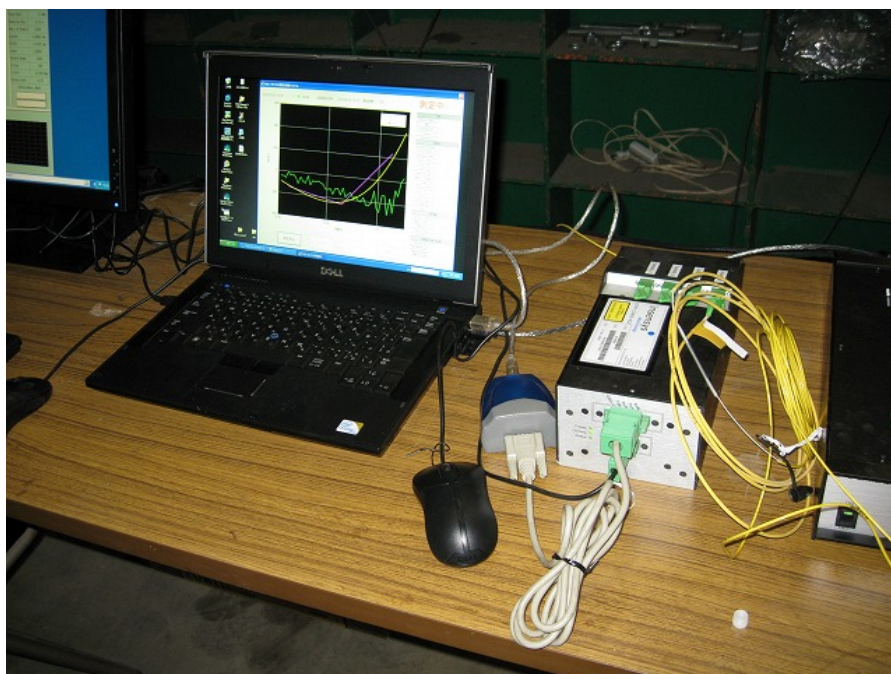


写真 9 制御 PC での解析結果表示

平成 22 年度は、さらに実用化に向けた機能を追加した。特に遠隔地からのリモート制御機能を考慮した機能追加を行った。この機能追加により、制御 PC、各計測装置間を VPN で接続し、遠隔地にある制御 PC から各計測装置をリモート制御することができるようになった。その他の改良項目として監視ソフトの完成度を高めるため、以下の機能を追加した (図 22)。

- ① BOTDR・FBG の単独計測機能
- ② 補正計算の差替え機能
- ③ 初期値計測の分離
- ④ しきい値に対応する処理
- ⑤ 日報、週報の自動出力機能の追加
- ⑥ PC による計測制御と光スイッチ制御の分離

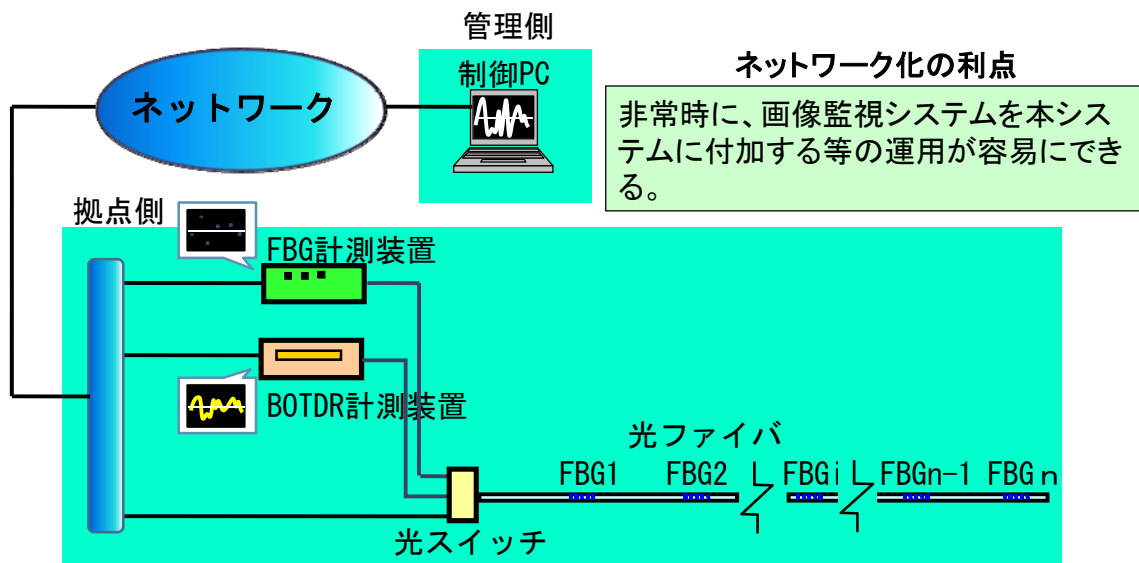


図 22 VPN を活用したリモート制御の概要

7.8. 高精度変状監視システム用光ファイバセンサの開発

7.8.1. センサの光損失特性の確認

H21年度に実施した室内試験は、H型鋼に生じるひずみに対する、光ファイバの被覆によるすべりの影響を少なくするため、写真10のように、光ファイバの素線 (コア直径 $8.4\mu\text{m}$, クラッド外径 $125\pm 2\mu\text{m}$, コーティング外径 $155\pm 5\mu\text{m}$, ポリイミド被覆) を、シアノアクリレ

ート系接着剤によりH型鋼のフランジ中央に貼り付けた。その結果、図22のように、接着の影響とみられる大きな光損失(6mで約4dB)が発生し、長大構造物への適用が困難となった。また、素線そのものは、物理的な衝撃など外部環境に対して十分な耐久性を持たないため、H22年度に光損失特性の改善とあわせて、耐久性の高い実用的なセンサを開発した。



写真10 光ファイバ素線を用いた室内試験 (H21年度)

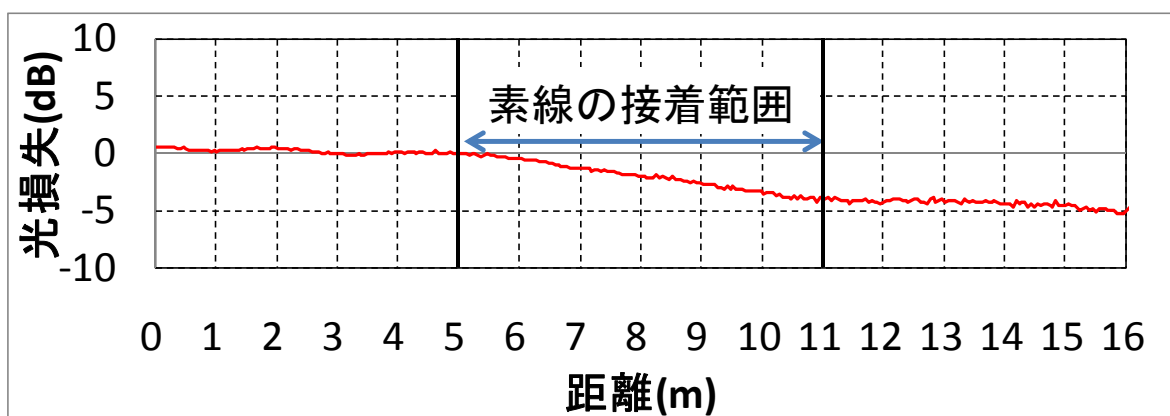


図 22 素線をセンサとして用いた場合の光損失特性

7.8.2. 実用に適したセンサの開発

H22年度に、大規模な実構造物へ適用するため長距離でも光損失が少なく、また損傷に強

い光ファイバとして光ファイバ素線を FRP で被覆した光ファイバセンサを開発した。

開発した光ファイバセンサは、写真 11 のような矩形断面 5mm×2mm の FRP 被覆付きで、衝撃など外部環境に対する耐久性が高く、設置も容易である。H22 年度の室内試験では、これを H 型鋼の側面に接着して使用した（写真 11，写真 12）。

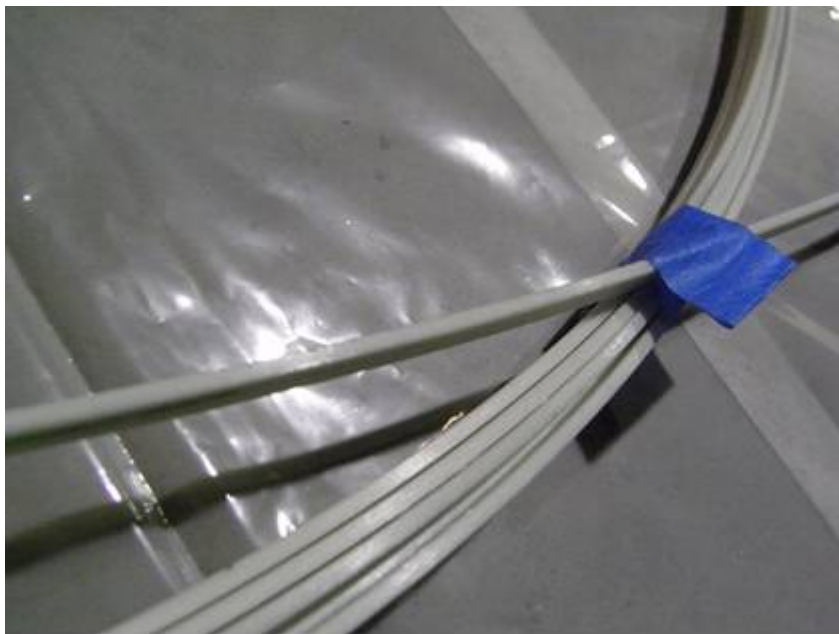


写真11 H22年度の室内試験に用いた光ファイバ素線



写真12 H型鋼の側面に接着した光ファイバセンサ（H22年度）

このセンサについて、光損失特性、計測精度の確認を行った。計測精度の確認結果は、7.6.2 に示したとおりである。ここでは、構造物（H 型鋼）に接着したときの光損失の改善の有無を確認するため、接着後の改良型光ファイバセンサの光損失特性を調べた結果を示す。H21 年度の検討に使用した光ファイバ素線では 6m で 4dB の減衰を生じていたが、H22 年度に改良した光ファイバセンサの光損失は、図 22 に示すように、0dB であった。この結果を含む諸条件から定まる計測可能な最大センサ長は 9km であり、大規模構造物へ適用できる結果を得た。

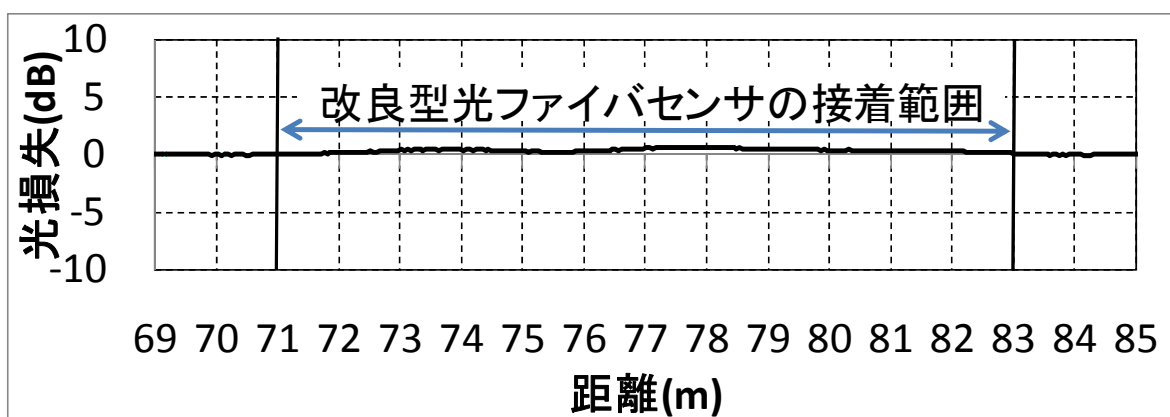


図 23 開発したセンサの光損失特性

7.9. 高精度変状監視システムの適用の方向性

高精度変状監視システムを用いた計測・モニタリングの適用方法について検討した結果を以下に示す。

7.9.1. 事例1：長大トンネルの変状監視

【適用方法案（図 24）】

- ・ トンネル天端を計測対象とし、トンネル縦断方向に高精度変状監視システム用光ファイバセンサを設置する。
- ・ 施工時に変形を生じた箇所には FBG を密に配置する。
- ・ 50m 毎にセンサ増設用の伝送用ケーブルを配置しておき、近傍でひび割れが生じた場合、分岐を利用して FBG 型ひび割れセンサを設置できるようにする。

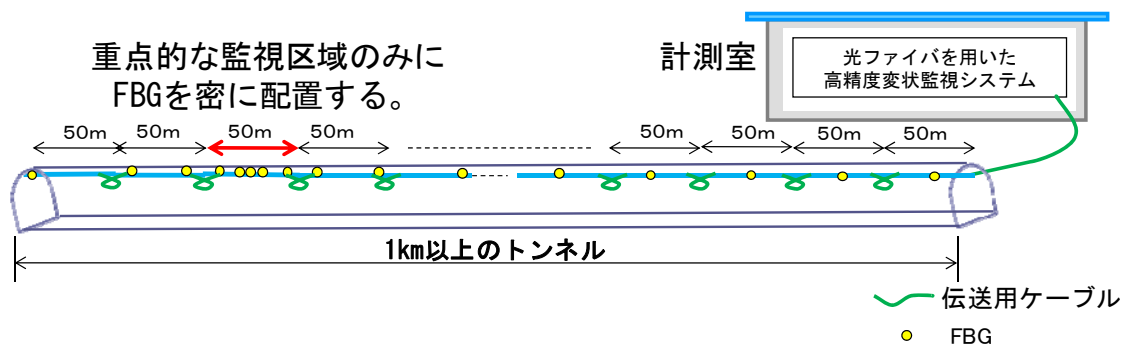


図 24 長大トンネルの変状監視の概要

【特長】

従来は FBG, BOTDR のどちらか一方の単独計測しかできなかったが、本技術を用いることにより、特定エリアの詳細なひずみ分布と全体把握のひずみ分布を同時に計測し監視できるようになる。センサの増設も容易にできる。

7.9.2. 事例2：山岳トンネルにおける発生断面力（軸力，曲げモーメント）の長期監視

【適用方法案（図 25）】

- ・ トンネル横断面方向に高精度変状監視システム用光ファイバセンサを地山側，内空側の 2 本平行に設置する。
- ・ 常時計測は BOTDR のみとする。
- ・ ひずみ分布に異常発生と判断された場所があれば，FBG 光測定器を追加し，FBG-BOTDR 融合計測を行う。

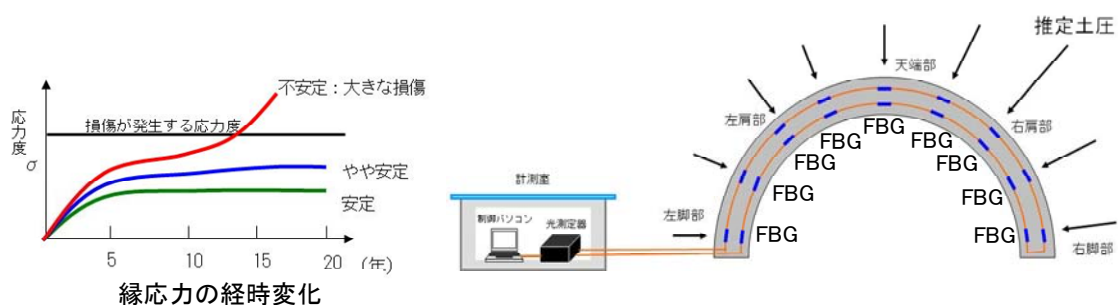


図 25 山岳トンネル発生断面力の長期監視の概要

【特長】

従来の計測では，BOTDR 計測のみでは数百 μ の誤差発生が懸念され，FBG 計測のみでは各計測点の間のひずみを測ることができないという問題があった。しかし，本技術を用いることにより，BOTDR のひずみ分布を FBG により高精度化することができ，従来より正

確な応力度分布の監視を行うことができるようになる。

7.9.3. 事例3：老朽化トンネルでのひび割れ計測に付随する健全性長期監視

【適用方法案（図 26）】

- ・ トンネル内に生じたひび割れ監視を主目的とするが、伝送ケーブルを高精度変状監視用光ファイバセンサとすることにより、全域のひずみ分布を定期計測する。
- ・ 常時計測は FBG センサによるひび割れ計測のみとする。
- ・ 1年に1回、BOTDR 光測定器を持ち込み、BOTDR 単独計測を行う。
- ・ 前年の BOTDR 計測によるひずみ分布と比較し、局所的な変化があれば、目視点検を行い、必要に応じて、伝送ケーブル部から FBG 計測器を増設する。

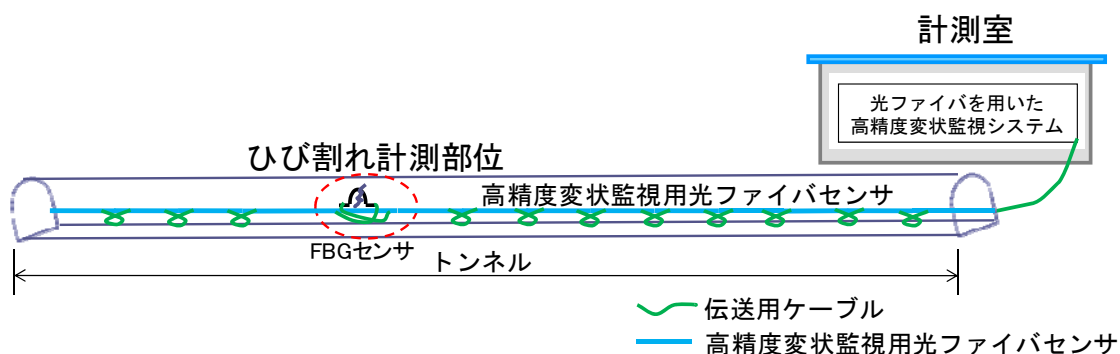


図 26 老朽化トンネルでのひび割れ計測に付随する健全性長期監視の概要

【特長】

従来は、FBG 計測を行う場合、伝送ケーブルをセンサとして使うことは困難であったが、本技術を用いることにより、トンネル坑口から FBG センサ設置箇所への伝送ケーブルを BOTDR 計測による変状監視センサとすることができる。

7.9.4. 事例4：鋼橋疲労のモニタリング

【適用方法案（図 27）】

鋼橋の橋脚、橋桁、床版、接合部に対する重要な損傷として、疲労亀裂および腐食損傷が挙げられる。このような計測において疲労発生の危険の高い箇所に FBG を密に配置し、常時計測を行う。

【測定項目】

ひずみ分布の計測および監視を FBG および BOTDR 計測により行う。疲労損傷の破断な

ど異常感知，亀裂発生 of 監視を行う。

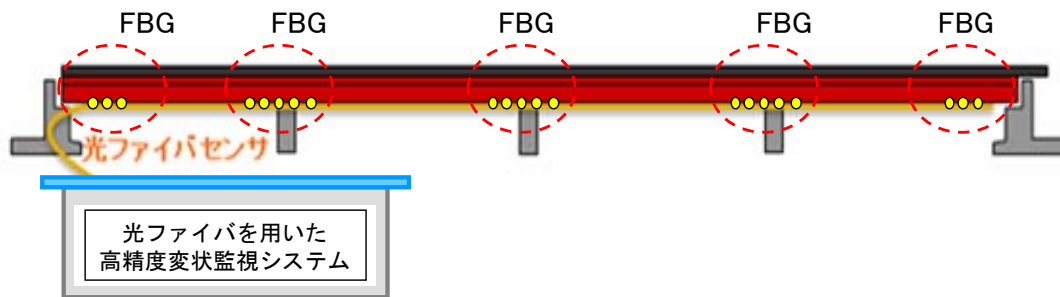


図 27 鋼橋疲労のモニタリングの概要

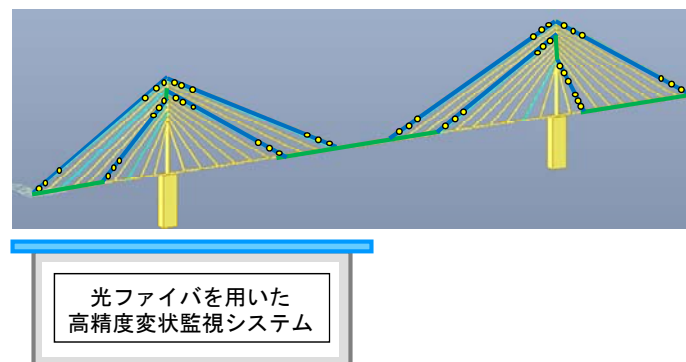
7.9.5. 事例5：橋梁におけるケーブル材のモニタリング

【適用方法案（図 28）】

プレストレストコンクリート橋における PC 鋼材（内ケーブルおよび外ケーブル），斜張橋における斜材ケーブル，吊床版橋における吊りケーブルについて，ケーブルの軸方向ひずみが引張降伏値に近づいているか監視する．ひずみの増加箇所，管理基準値を超えた箇所を特定し，目視点検，対策を実施する．

【特長】

BOTDR によるひずみ分布計測により，それらの損傷の発生や進行，拡大などによるひずみ増加を測定対象の全範囲で計測できる．さらに損傷の危険が高い端部固定箇所付近に FBG を密に配置し，詳細なひずみ分布を行う．



- FBG
- 高精度変状監視用光ファイバセンサ
- 伝送用ケーブル

図 28 橋梁におけるケーブル材のモニタリング

7.9.6. 事例6：エリアモニタリングシステム

【適用方法案（図 29）】

エリア内にある複数の建造物のひずみ分布を FBG，BOTDR 方式により常時計測する。

【特長】

光ファイバ計測の特徴の一つに伝送経路が長いという利点がある（本開発システムは FBG100 個を設置したケーブルで 9km の計測ができる）。その利点を生かした計測として指定エリア内にある複数のトンネルおよび橋梁を一元管理した長期モニタリングを行う。エリアとしてのトンネルおよび橋梁の健全性を一括して監視する。

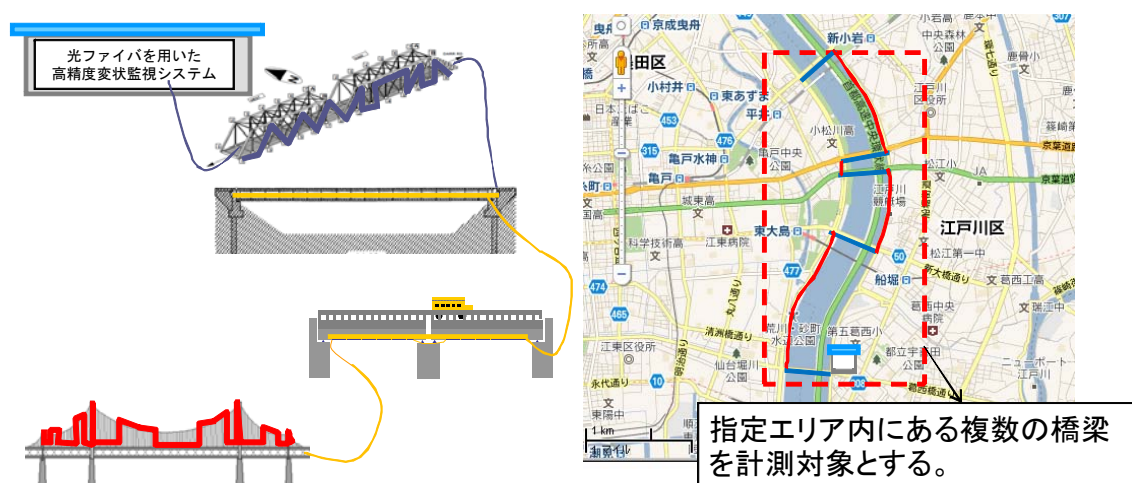


図 29 エリアモニタリングシステムの概要

7.10. 高精度変状監視システムの機能総括

最大計測長 : 9km

ひずみの計測精度 : $100 \mu \varepsilon$ 以下

※FBGを密に配置した場合

※BOTDR単体計測ではひずみ分布により数百 μ の誤差を発生する場合がある。FBG-BOTDR融合計測では、このような誤差を実用上有効な 100μ 以下とする。

ひずみの計測範囲 : 3000μ

センサ仕様 : FRP被覆（断面形状 $5\text{mm} \times 2\text{mm}$ ）

変状監視ソフトの機能

- ・1本の光ファイバに対しTDM方式FBGとBOTDRの2つの光ファイバセンシング技術の計測機器を接続し、自動交互の計測の制御を行う。
- ・計測結果をデータベース化する。
- ・両計測値を用いた解析・データ処理とグラフ表示を行う。
- ・リモート制御による計測制御を行う。

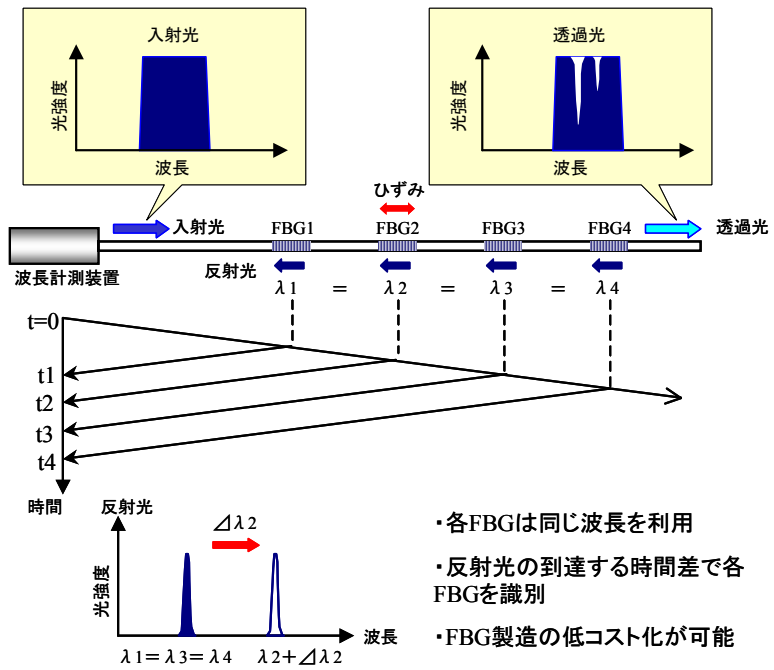
7.11. 技術用語の説明

以下に、光ファイバセンシング技術に関する用語の内容を示す。

用語	内容
光ファイバセンシング技術 (光ファイバセンサ)	<p>光ファイバセンサは、光ファイバを計測信号の伝送路として利用するものと、光ファイバ自体をセンサとして利用するものがある。光ファイバにセンサの機能を持たせるもののうち、光ファイバの端部から光を入射して戻ってくる散乱光を利用するセンサと、光ファイバの一部のみに感度を持たせるものに大別される。前者のうちの代表的なセンサの1つに、Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) がある。また後者の代表的なセンサは、Fiber Bragg Grating (FBG) 光ファイバセンサである。光ファイバセンサは、無誘導性により、雷や高圧電流等によるノイズが生じず、データの信頼性低下を防ぐことができる。また信号伝送時の低損失性により、光測定器や制御 PC を設置する計測室を計測箇所の近傍に設置できない状況でも計測システムを構築することが可能である。さらに光ファイバはガラス製であり本質的に耐久性が高いことから、従来の電気式計測に比べ、長期間の使用にも十分耐えうる性能を持っている。</p>
Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR)	<p>BOTDR は、光ファイバの端部から光を入射した際に発生するブリルアン散乱光の周波数が、光ファイバに生じたひずみの変化にしたがい、変化する性質を利用し、ひずみを計測する技術である。光ファイバ全体がひずみや温度の変化に対し感度を持つが、ひずみの計測誤差は約 100μ である。ひずみ分布により、計測誤差はさらに大きくなる。また、実質的な距離分解能は最小 1m である。</p>
Fiber Bragg Grating (FBG) センサ	<p>Fiber Bragg Grating (FBG) は、光ファイバに紫外線を照射して一定周期の回折格子を加工したもので、FBG に光を入射させると、特定の波長の反射光が戻ってくる。FBG の位置で光ファイバに軸方向のひずみが発生し、FBG の格子間隔が変化すると、反射光の波長がシフトする。この性質を用いて、ひずみを計測する</p>

	<p>センサを、FBG 光ファイバセンサという。計測誤差は、5μ 以下である。</p>
<p>波長分割多重化方式 (WDM) 方式, 時間分割多重化 (TDM) 方式</p>	<p>1 本に光ファイバに複数の 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波長分割多重化 (WDM) 方式と, 時間軸上に多重化する時間分割多重化 (TDM) 方式がある。WDM では, 光減衰が小さい C バンド帯で, 複数の FBG がそれぞれ特定の格子間隔となっており, 反射波長が異なる。限られた幅の C バンド帯を分割して多重化するため, FBG の多重化数に限界がある。これに対し TDM 方式では, 同一ファイバ上に配置された FBG の識別を, 各 FBG からの反射光の到達時間差で行うため, 同一の反射波長をもった 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。この方式では光損失がない場合, 1 本の光ファイバに最大 100 個の FBG を直列に配置することができる。また波長分割多重化方式 (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 の測定範囲は最大約 $9,000\mu$ と一定である。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。</p> <div data-bbox="555 1464 1310 1980"> <p>波長計測装置</p> <p>入射光</p> <p>透過光</p> <p>ひずみ</p> <p>FBG1</p> <p>FBG2</p> <p>FBG3</p> <p>FBG4</p> <p>透過光</p> <p>反射光</p> <p>$\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq \lambda_4$</p> <p>反射光</p> <p>$\Delta\lambda_2$</p> <p>$\lambda_1$ λ_2 λ_3 λ_4</p> <p>波長</p> <ul style="list-style-type: none"> ・各FBGは異なる波長を利用 ・反射光の波長域の違いから各FBGを区別 ・FBG製造コストの低下が困難 </div>

WDM 方式による多重化の概念



WDM 方式による多重化の概念

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名，巻号数，論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
STRUCTURAL FAULTS & REPAIR 2010, Hybrid Strain Monitoring System by Means of Two Different Fibre Optic Sensors	2010.6.	The University of Edinburgh	Takuyuki Tamura, Tomoki Shiotani, Koki Kumagai, Noboru Kamiakito
第45回光波センシング技術研究会講 演論文集別冊, FBG-BOTDR 技術の統 合運用によるひずみ分布計測の実験 的検証ーひずみ分布の計測精度向上 のための基礎実験ー	2010.6.	応用物理学 会・光波センシ ング技術研究 会	上明戸昇, 熊谷 幸樹, 田村琢 之, 塩谷智基
平成23年度全国大会 第66回年次学 術講演会講演概要集, FBG-BOTDR 統 合技術における高精度ひずみ分布の 解析手法の提案	2011.9.予定	土木学会	上明戸昇, 田村 琢之, 熊谷幸樹, 塩谷智基

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類，番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
なし				

10. 成果の実用化の見通し

平成22年12月に、飛鳥建設のトンネル工事現場で試験適用を始めており、現地適用での有効性を確認中である。今後、現地検証を踏まえて、本システムを大規模建設構造物の維持管理のモニタリングに積極的に活用していきたいと考えている。

11. その他

なし.