

# リフレクトメトリーを用いた構造物損傷 モニタリング

倉嶋利雄

構造物の健全性を確保するためには、構造物の変形を、常時、的確に捉え、それに応じた適切な補修・補強を行うことが必要になる。ここで記述した、“構造物の健全性”とは、構造物の劣化・老朽化の程度というよりは、「この構造物は安心できるか、大丈夫であろうか」という“構造物の健康度”的な尺度を意味し、構造物の強度および耐久性を包含した大きな評価尺度を意味する。したがって、構造物の健全性を確保するための“構造物損傷モニタリング”がシステム化できていれば、構造物に損傷が発生した場合でも、損傷の程度を直ちに検出し、適切な段階で適切な補修・補強を行う、という構造物の維持管理機能が効率的に働く。すなわち、構造物損傷モニタリングシステムは、構造物の健全性を保ちながら、構造物本来の寿命まで安全に利用できることを保証する技術であり、さらに構造物のライフサイクルコスト（トータルコスト）を低減する技術として期待されている。中でも、近年、土木・建築・地盤工学の各分野で、光ファイバーひずみセンサーを用いた構造物損傷モニタリングへの関心が急速に高まっている。この主な理由は、光ファイバーひずみセンサーが、光ファイバー自体をセンサーとすることで、構造物全体の“健康度（健全性）”を容易に評価するための計測手段として期待されていることにある。例えば、土木構造物や地盤に、外見からはわかりにくい変形が生じている場合について考える。従来のひずみゲージを用いた計測方法では、センサーを設置した“点”の測定しか行えず、仮に変形箇所を事前に予測でき、その位置にセンサーを設置した場合でも、構造物全体の変形を広範囲に把握することには限界があった。しかし、光ファイバーセンサーは、光ファイバーをセンサーとして用いているため、適切な箇所に連続して光ファイ

バーと構造物を一体化させておけば、光ファイバーに沿った“線”の測定を行うことにより、構造物全体の健康度を従来より容易に評価できる可能性をもつという点で有利である。

本稿では、構造物損傷モニタリングの必要性、光ファイバーの長さ方向に生じたひずみの位置と大きさを計測することが可能な光ファイバーひずみ・損失統合型 OTDR<sup>1-6)</sup>、本測定器を構造物の損傷モニタリング手段として適用した場合の基礎実験<sup>7,8)</sup>、および、今後の課題について述べる。

## 1. 構造物監視用光ファイバーセンサーの現状

従来の構造物監視用光ファイバーセンサーの中でも、構造物の変形を連続的に評価できる光ファイバーセンサーは、OTDR (optical time domain reflectometry)<sup>9)</sup>の測定手法を用いて構造物の損傷の程度および損傷位置を評価している。図1に OTDR の測定手法を示す。光ファイバーに入射された光パルスは、光ファイバーを伝搬(速度  $v$ )する各位置でガラスに本質的に存在するわずかな屈折率のゆらぎにより散乱される。これを、レイリー散乱光という。散乱光の一部は後方散乱光として入射端側に戻るので、光パルスの入射してから後方散乱光を受信するまでの時間(遅延時間)  $t$  を測定することにより、後方散乱光の発生位置  $z$  ( $=vt/2$ ) が求められる。光損失変化は後方散乱光のパワー変化から測定され、フレネル反射光は光ファイバー断線時の屈折率変化位置における反射光として検出される。後方散乱光の特性(パワー、周波数など)が被測定物理量(例えば、構造物のひずみ)により変化するならば、OTDR を用いて被測定物理量の連続計測が可能となる。以下にこの手法の利点を挙げる。

- 1) 構造物の広範囲な損傷を連続的に監視できること
- 2) 光損失増加位置およびフレネル反射発生位置から構

NTT 情報流通基盤総合研究所 (〒180-8585 武蔵野市緑町 3-9-11)  
E-mail: kurasima@smart.netlab.ntt.co.jp

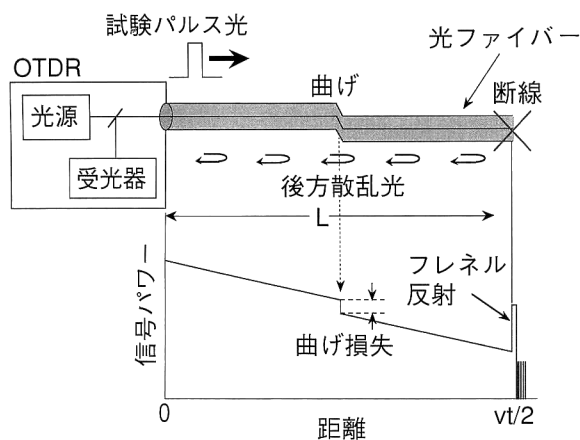


図1 OTDRの測定手法。

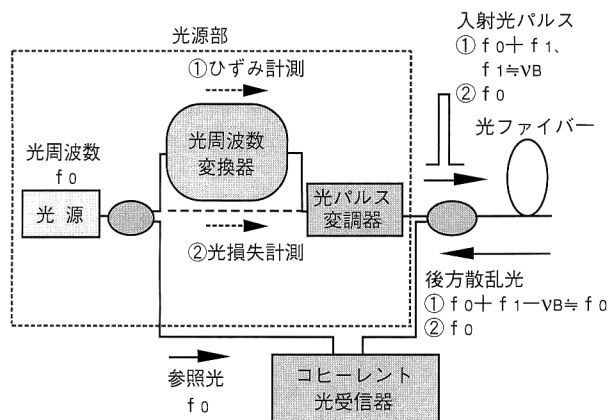


図2 ひずみ・損失統合型 OTDR の基本構成。

造物の損傷位置を特定できること

- 3) 造物から離れた位置で造物を遠隔監視できること

しかし、以下のような欠点も有している。

- 1) 損傷箇所において光損失が増加し、このため光ファイバー中を伝搬する光量が減衰するので、損傷箇所以遠の測定が不能、あるいは困難となること
- 2) 造物の損傷がかなり顕在化した後に初めて計測により把握されるため、損傷発生の初期段階に損傷の進行を予測することは困難であること

これらの欠点は、造物の損傷発生過程の現象を的確に捉えられないという点で、造物損傷モニタリングシステムとしての利用価値に大きな影響を与える。

## 2. 光ファイバーひずみ測定器の開発

### 2.1 ひずみ・損失統合型 OTDR

光ファイバーひずみ・損失統合型 OTDR<sup>1-6)</sup> は、本来、光通信線の長期信頼性を保証する上で必要な、光ファイバーに発生したひずみ・光損失分布を測定する手段として開発したものである<sup>10,11)</sup>。ひずみ・損失統合型 OTDR は、従

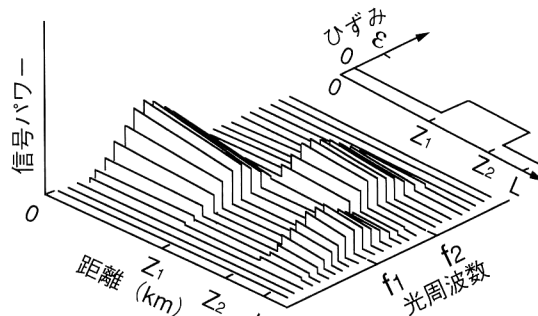


図3 ブリュアン散乱波形。

来の OTDR がもつ光損失測定機能に加え、光ファイバーの長さ方向に発生したひずみを連続的に測定可能である。したがって、造物と光ファイバーを一体化して造物に発生したひずみを光ファイバーを介して計測することができれば、造物が破壊に至る前に、造物に発生した損傷状態を評価することが可能になる。

図2 にひずみ・損失統合型 OTDR の基本構成を示す。本測定器は測定モードを切り替えることにより、光ファイバーのひずみ測定器 (①: BOTDR (Brillouin OTDR)), あるいは光損失測定器 (②: OTDR) として機能する。以下に本測定器の測定原理について簡単に説明する。

ひずみ測定では、光ファイバー中のブリュアン散乱光の周波数が光ファイバーの長さ方向のひずみに比例して変化するという特性を利用する<sup>12,13)</sup>。ブリュアン散乱は、光ファイバー中で熱的に励起された音波との相互作用により入射光が散乱され、その周波数がシフトする現象である<sup>14)</sup>。NTT では、ブリュアン散乱光の周波数シフト量  $\nu_B$  が光ファイバーに発生したひずみに大きく依存することを見いだした<sup>12,13)</sup>。入射光源波長が  $1.55 \mu\text{m}$  の場合、 $\nu_B$  は約 10 GHz であり、 $\nu_B$  のひずみ依存性  $d\nu_B/d\varepsilon$  は約  $5 \text{ MHz}/10^{-4}$  である。 $\nu_B$  の変化を 1 MHz の精度で測定できれば、約  $2 \times 10^{-5}$  のひずみ測定精度を実現できることになる。したがって、光ファイバーの長さ方向の  $\nu_B$  分布がわかれば、光ファイバーに沿ったひずみ分布を求めることができる。ひずみ・損失統合型 OTDR では、ブリュアン散乱光を効率よく検出するために、光受信器の中でも高感度測定が可能なコヒーレント光受信器を使用する。コヒーレント光受信器では、受信信号 (後方散乱光) と参照光の周波数差が小さくなるように制御する必要がある。ブリュアン散乱光はその発生過程で周波数が  $-\nu_B$  だけシフトするため、光源 (参照光) の周波数  $f_0$  を光周波数変換器を用いてあらかじめ  $\nu_B$  に近い周波数  $+f_1$  ( $\equiv \nu_B$ ) だけシフトさせ、周波数  $f_0 + f_1$  の光パルスを入射させる。図3に示すように、入射する光パルスの周波数を変化させるごとに

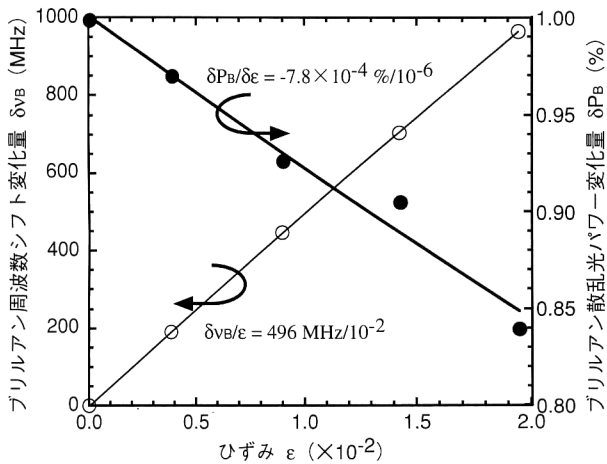


図4 ブリュアン周波数シフト・ブリュアン散乱光パワーのひずみ依存性.

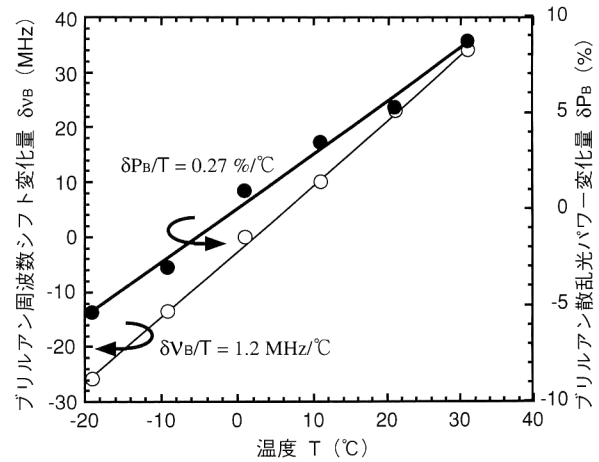


図5 ブリュアン周波数シフト・ブリュアン散乱光パワーの温度依存性.

ブリュアン散乱光 ( $f_0 + f_1 - \nu_B \approx f_0$ ) を測定し、光ファイバーの各位置で散乱光パワーが最大となる  $\nu_B$  を求める. 具体的には、図3では、 $0 < z < Z_1$  および  $Z_2 < z < L$  の区間では、入射光が  $f_0 + f_1$  のとき  $\nu_B$  が最大となり、 $Z_1 < z < Z_2$  の間では、入射光が  $f_0 + f_2$  のとき  $\nu_B$  が最大となる. このように位置ごとのひずみにしたがって  $\nu_B$  の値が異なるので、 $\nu_B$  の値を  $\nu_B$  のひずみ係数を用いてひずみの値に換算して、光ファイバーのひずみを求める.

光損失測定では、従来の OTDR と同様に、レイリー散乱光の強度が光損失により変化するという特性を利用する. レイリー散乱光は周波数の変換を伴わないため、図2②に示すように、光周波数変換器を使用せずに周波数  $f_0$  の光パルスを光ファイバーに入射させ、光ファイバー中のレイリー散乱光をコヒーレント光受信器で受信する.

ひずみおよび光損失の発生位置は、光パルスを光ファイバーに入射させてから後方散乱光が受信部で検出されるまでの時間差を測定することにより特定する. 距離分解能は、光パルスのパルス幅に依存する. 現在、ひずみ測定精度  $\pm 3 \times 10^{-5}$  (周波数測定精度  $\pm 1.5$  MHz)、距離分解能 1 m のひずみ分布測定が実現されている<sup>4)</sup>.

## 2.2 ひずみ測定精度の高精度化

$\nu_B$  のひずみ依存性  $d\nu_B/d\varepsilon$  ( $\approx 5$  MHz/ $10^{-4}$ ) を用いた光ファイバーひずみセンサーでは、 $\nu_B$  の温度依存性  $d\nu_B/dT$  がひずみ測定誤差要因になる.  $\nu_B$  の温度依存性  $d\nu_B/dT$  ( $\approx 1$  MHz/ $^{\circ}\text{C}$ ) を考慮すると、温度  $1^{\circ}\text{C}$  の変動は  $2 \times 10^{-5}$  のひずみ測定誤差を生じさせることがわかる.

最近、 $\nu_B$  のひずみ・温度依存性に加えて、ブリュアン散乱光パワー  $P_B$  のひずみ・温度依存性も測定することにより、光ファイバーのひずみと温度を同時に測定する方法が提案されている<sup>5,6,15)</sup>.  $\nu_B$  および  $P_B$  の変化  $\delta\nu_B$ ,  $\delta P_B$  が光フ

ァイバーのひずみ変化  $\delta\varepsilon$  と温度変化  $\delta T$  の両方の変化より生じたとすると、下記の式が成立する.

$$\delta\nu_B = C_1\delta\varepsilon + C_2\delta T \quad (1)$$

$$\delta P_B/P_B = C_3\delta\varepsilon + C_4\delta T \quad (2)$$

ここで、 $C_1$  および  $C_2$  は、それぞれ、 $\nu_B$  のひずみ依存性  $d\nu_B/d\varepsilon$  と温度依存性  $d\nu_B/dT$  である. 同様に、 $C_3$  および  $C_4$  は、それぞれ、 $P_B$  のひずみ依存性  $dP_B/d\varepsilon$  と温度依存性  $dP_B/dT$  である. あらかじめ、 $C_1 \sim C_4$  を求めておけば、BOTDR を用いて  $\delta\nu_B$  と  $dP_B/P_B$  を測定することにより、 $\delta\varepsilon$  と  $\delta T$  をパラメーターとする式(1), (2)からなる連立方程式を成立させることができる. この連立方程式を、光ファイバーの長さ方向の各位置について解くことにより、 $\delta\varepsilon$  と  $\delta T$  を区別して、かつ同時に連続したひずみ・温度分布を求めることができる. 光源波長  $1.55 \mu\text{m}$  の場合、 $C_1 \sim C_4$  の値は、BOTDR を用いて下記のように測定されている<sup>3,6)</sup>. このときの  $\nu_B \cdot P_B$  のひずみ依存性と温度依存性の測定結果を図4, 5に示す. ここで使用した光ファイバーは光通信に用いられている外径  $250 \mu\text{m}$  の UV 被覆光ファイバーである.

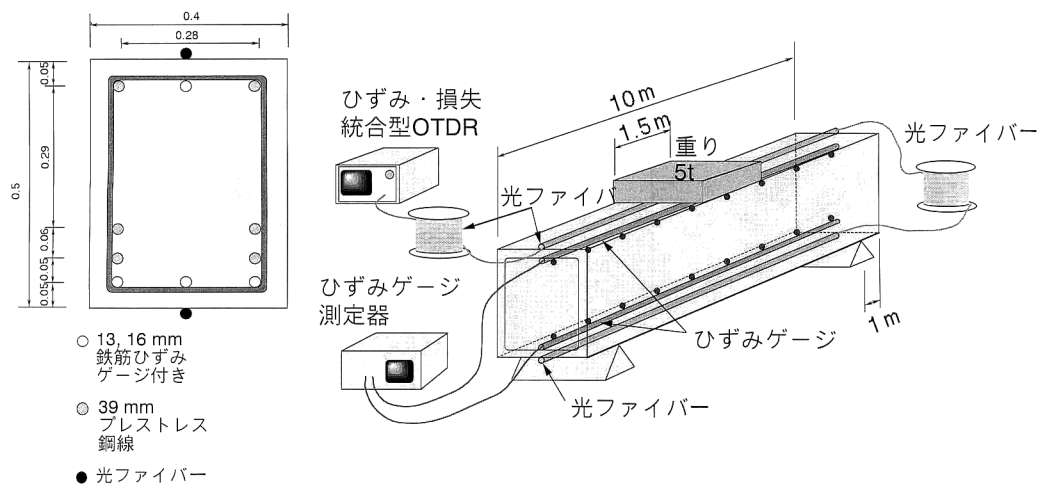
$$C_1 = 496 \text{ MHz}/10^{-2} \quad (3)$$

$$C_2 = 1.2 \text{ MHz}/^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

$$C_3 = -7.8 \times 10^{-4} \% / 10^{-6} \quad (5)$$

$$C_4 = 0.27 \% / ^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

上述したひずみと温度の同時測定に関する提案は、光ファイバー中のブリュアン散乱光をひずみセンサーとして使用する際の温度誤差補正手段として有望である. Parker らによるひずみ・温度同時測定に関する実証実験<sup>15)</sup>では、ひずみ測定精度  $1 \times 10^{-4}$ 、温度測定精度  $4^{\circ}\text{C}$ 、距離分解能 40 m、測定可能距離 1200 m が実現されている. ここで、提案されているひずみ・温度同時測定法をセンサーとして利



コンクリート梁の断面図  
 図6 コンクリート梁の実験系。

実験系

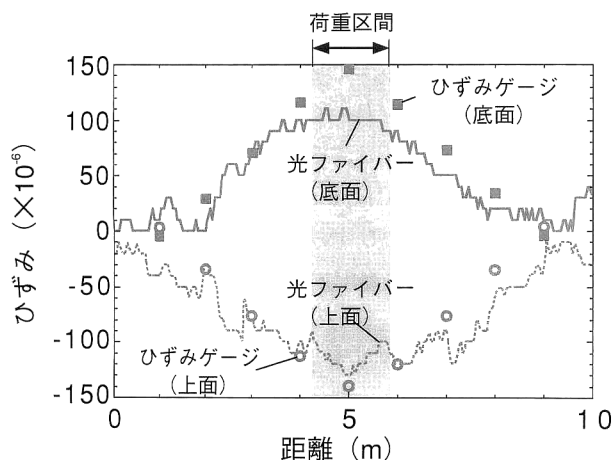


図7 コンクリート梁のひずみ分布測定結果。

### 3.1 コンクリート梁試験

図6にコンクリート梁を用いた曲げ実験系とコンクリート梁の断面図を示す。モデル実験は、コンクリート梁(横0.4m×高さ0.5m×長さ10m)の表面の長さ方向に光ファイバーを貼り付け、梁の中央に重さ5tの荷重を加えることにより曲げを発生させ、そのときに梁に発生するひずみを、梁に貼り付けた光ファイバーとひずみ・損失統合型OTDRを用いて測定するというものである。同時に、ひずみゲージを設置し、光ファイバーを用いて測定したひずみの値との比較を行った。

コンクリート梁の変形方法は、2点支持されたコンクリート梁の中央に重さ5tの重り(長さ1.5m×幅1.5m×高さ0.2m)を載せることにより行った。モデル実験に使用した光ファイバーは、光通信に使用されている光ファイバー心線であり、コンクリート梁の上面および底面の長さ方向に貼り付けた。また、ひずみゲージはコンクリート梁内の鉄筋に1m間隔で貼り付けた。

コンクリート梁を用いた曲げ試験の試験結果の一例を図7に示す。■、および、●がコンクリート梁における下側および上側の鉄筋に1m間隔で貼り付けたひずみゲージによる各ポイントごとのひずみの測定結果であり、点線および実線がコンクリート梁の上面および下面に貼り付けた光ファイバーによるひずみ分布測定結果である。光ファイバーとひずみゲージが貼り付けられている位置がコンクリート梁の高さ方向で0.05mだけ離れているため、ひずみゲージにより測定されたひずみの値をコンクリート梁の上面および底面の位置のひずみに換算することにより、光ファイバーおよびひずみゲージを用いて測定されたひずみの値の比較を行った。図7から、光ファイバーの長さ方向の連

用し、その適用分野を拡大するためには、ひずみ・温度変化の位置特定を容易にするための距離分解能の向上が必要である。今後、本測定法のよりいっそうの高精度測定化、高距離分解能化が望まれる。

次章に、 $v_B$ のひずみ依存性のみを使用することにより、構造物に発生したひずみを光ファイバーを介して測定したモデル実験について紹介する。

### 3. 光ファイバーひずみセンサーを用いた基礎実験

光ファイバー中のブリュアン散乱光を用いた光ファイバーひずみセンサーの実用性を検証するため、弾性変形領域における比較的微小なひずみ計測を目的としたコンクリート梁試験<sup>7)</sup>、比較的大ひずみ状態におけるひずみ測定値の定量的な評価を目的としたアルミパイプ試験<sup>8)</sup>の結果について紹介する。

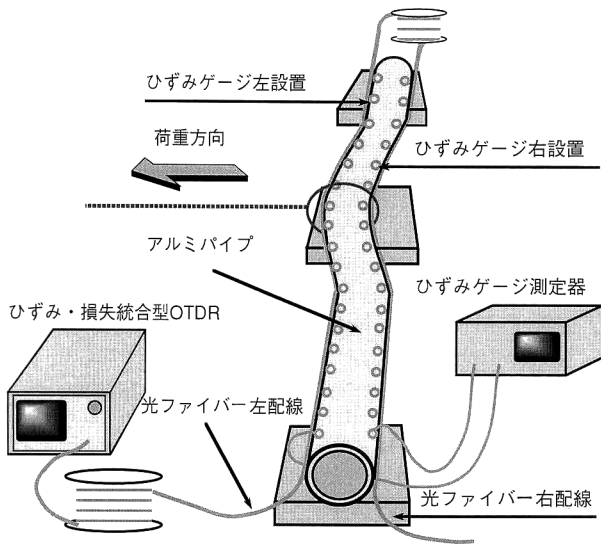


図8 アルミパイプの曲げ試験系。

連続的なひずみ分布測定結果とひずみゲージによる各ポイントごとのひずみの測定結果が、ひずみ・損失統合型 OTDR のひずみ測定性能範囲内(ひずみ測定精度 $\pm 30 \times 10^{-6}$ )ではほぼ同様な値を示していることがわかった、以上のことから、コンクリート構造物に発生したひずみ分布を測定する手段として、本測定器を用いた光ファイバーのひずみ分布測定が有効であることを明らかにした。

### 3.2 アルミパイプ試験

図8にアルミパイプ曲げ試験系を示す。パイプの全長は18mである。パイプの長さ方向に光ファイバーを貼り付け(パイプ断面を測定器側から見たときの左右側面)、それと垂直方向に荷重を加えてパイプを変形させた。実験では、パイプの中心位置に段階的に荷重を加えたときのパイプ長さ方向のひずみを、ひずみ・損失 OTDR を用いて測定した。

測定結果の一例を図9に示す。●、○がアルミパイプにおける左側面・右側面に1m間隔で貼り付けたひずみゲージによる各ポイントごとのひずみ測定値であり、実線・破線が同じくパイプにおける左側面・右側面に貼り付けた光ファイバーの長さ方向のひずみ測定値である。図9から光ファイバーおよびひずみゲージによるひずみ測定値が、パイプ左右側面とも同様な値を示していることがわかった。図10にアルミパイプの長さ方向で最大のひずみを観測した位置9.5mの各荷重における光ファイバー、ひずみゲージによる測定値  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_g$  の関係を示す。図10より光ファイバーによる計測値とひずみゲージによる計測値との間には線形関係が認められるので、光ファイバーを用いて間接的に構造物のひずみの値が推定できることが確認された。

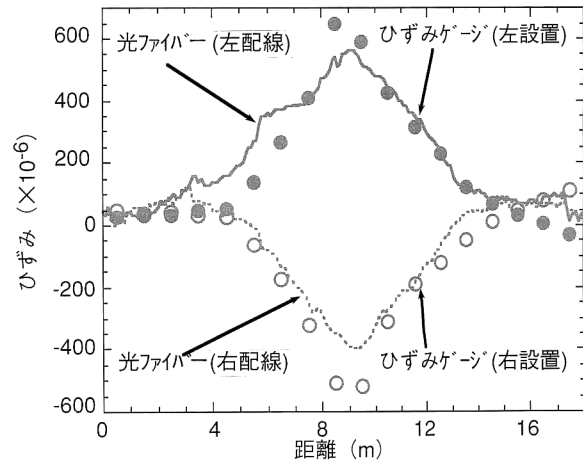


図9 アルミパイプのひずみ測定結果。

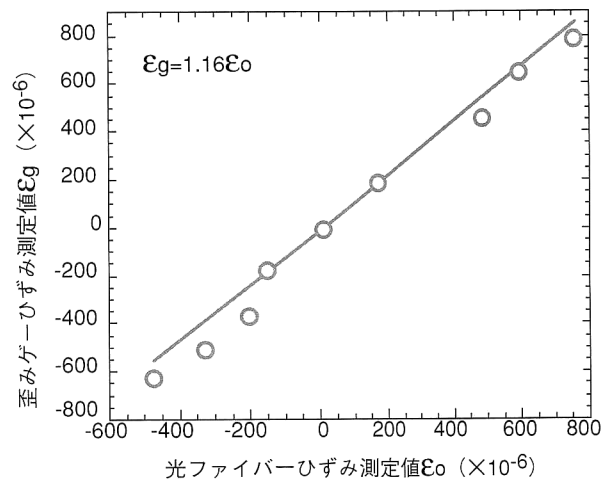


図10 ひずみ測定値の比較。

筆者らが通信用光ファイバーの保守・監視用測定技術として開発を行ってきた“光ファイバーのひずみ測定技術”が、本報告の中で述べたように、従来存在し得なかった大型構造物の連続的なひずみセンサーとして、今日、大きく注目されようとしている。これは、近年、岩盤崩落事故や土石流災害など、地盤に関連する事故・災害が相次いで発生し、そのたびに多くの尊い人命が失われていること、さらに、このような災害が他の地域で再び起きないという保証がないためである。また、構造物についても、構造物の健全性を診断するための技術を確立することができれば、効率的な維持管理(点検・補修・補強など)を実現すること、さらに、老朽化および地震被災構造物の倒壊・破壊の可能性を未然に予測することができ、人命・財産を最大限守ることが可能になる。

今後の光ファイバーセンサーの発展と普及のためには、光学系の簡便化・自動化・耐候性強化、3次元計測のための施工法の最適化などの技術的課題の解決と、光ファイバー

をセンサーとするための設計・製造・施工・保守などの一連のシステム化（いわゆる構造物のスマート化）に関する開発が必要である。構造物のスマート化に関してはさまざまな提案がなされているが、いったんその有効性が実証されれば、従来の製造・土木・建築業界におけるトータルコストパフォーマンスに対する波及効果は非常に大きく、一刻の猶予を許さない世界的な競争状態になる可能性を有している。

## 文 献

- 1) T. Kurashima, M. Tateda, K. Shimizu, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "A high performance OTDR for measuring distributed strain and optical loss," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, TuD. 3.7 (1996) pp. 2.215-2.218.
- 2) T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and optical loss measurement by randomizing the reference light polarization state," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9**(1997) 360-362.
- 3) T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Izumita, M. Tateda and Y. Koyamada: "Distributed strain measurement using BOTDR improved by taking account of temperature dependence of Brillouin scattering power," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, MO3C (1997) pp. 119-122.
- 4) T. Kurashima, T. Usu, K. Tanaka, A. Nobiki, M. Sato and K. Nakai: "Application of fiber optic distributed sensor for strain measurement in civil engineering," *Far East and Pacific Rim Symposium on Smart Materials, Structures, and MEMS*, SPIE, **3241** (1997) 247-258.
- 5) T. Horiguchi: "Brillouin scattering for measuring strain and temperature," *Optical Fiber Sensors Volume Four Applications, Analysis, and Future Trends*, eds. J. Dakin and B. Culshaw (Arrtech House, Boston, 1997) pp. 313-329.
- 6) T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Ohno, H. Izumita and H. Naruse: "Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, TuA11 (1998) pp. 149-150.
- 7) 倉嶋利雄: "片端から非破壊で光ファイバの歪み・損失を測定—歪み・損失統合型 OTDR の開発と地盤変形センシングへの応用—", *NTT 技術ジャーナル, R&D レポート* (1997) pp. 87-89.
- 8) 倉嶋利雄, 薄 知規, 田中郁昭, 佐藤昌志, 加賀谷芳之: "光ファイバセンサを用いたコンクリート構造物の歪み分布測定", *応用物理学会第 19 回光波センシング技術研究会, LST19-4* (1997) pp. 23-29.
- 9) M. K. Barnoski and S. M. Jensen: "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics," *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2112-2115.
- 10) 倉嶋利雄: "ブリルアン散乱を応用した光通信用ケーブルの歪分布測定", *電気学会電子・情報・システム部門大会* (1996) A-9-7.
- 11) N. Tomita, Y. Enomoto, K. Tanaka, T. Kurashima and K. Hogari: "Future targets and technologies for an optical fiber line remote testing system," *European Conference on Networks & Optical Communications (NOC)* (1997).
- 12) T. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda: "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **1** (1989) 107-108.
- 13) T. Kurashima, T. Horiguchi and M. Tateda: "Tensile strain effects on Brillouin frequency shift in single-mode fibers having pure silica and GeO<sub>2</sub>-doped cores," *International Conference on Integrated Optics and Optical Communication (IOOC)*, 21C4-2 (1989) pp. 70-71.
- 14) D. Cotter: "Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber," *J. Opt. Commun.*, **4** (1983) 10-19.
- 15) T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek and A. J. Rogers: "Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 787-789.

(1998 年 11 月 16 日受理)