

光ファイバを用いた歪分布計測

DISTRIBUTED STRAIN MEASUREMENT USING OPTICAL FIBER SENSOR

倉嶋利雄* 田中郁昭** 薄 知規**

Toshio KURASHIMA, Kuniaki TANAKA, Tomonori USU

We have developed a high performance optical time domain reflectometer (OTDR) for measuring both strain and optical loss distribution along a single-mode optical fiber. This is achieved by combining a Brillouin optical-fiber time domain reflectometer (BOTDR) and a coherent OTDR (COTDR). The BOTDR analyzes changes in the Brillouin frequency shift caused by strain. The COTDR detects changes in the Rayleigh scattering power caused by optical loss. The combined OTDR has the potential to expand the sensor application area of monitoring systems using optical fiber sensors. This includes those designed for large building diagnostics, which require complicated instruments including many electric wires and a considerable amount of electric power to monitor strain using conventional strain gauges. This paper describes a new technique for measuring distributed strain using the combined OTDR.

Keywords : Optical fiber sensor, Strain, Brillouin scattering

1. まえがき

大型構造物に蓄積された歪を正確に評価することは、構造物の信頼性を診断する上で極めて重要な課題である。今日、重要構造物では、歪の発生状態を常時監視し、異常が確認された場合に即時に対応するためのモニタリングシステムの構築が強く望まれている。構造物表面に歪ゲージを点在させて張り付ける、従来の歪評価方法では連続的な歪計測は困難であった。本報告は、著者らが世界で初めて開発した分布型光ファイバセンサを用いて、構造物の歪を連続的に計測する手法を提案するものである。本センサは、従来、個別の測定器であった光ファイバ歪分布測定器（Brillouin optical time domain reflectometer : BOTDR）と光損失分布測定器（Coherent optical time domain reflectometer : COTDR）を効果的に一体化し、高距離分解能歪分布計測・高ダイナミックレンジ光損失分布計測を可能とした高性能統合型 OTDR⁽¹⁾ である。本論では、高性能統合型 OTDR の紹介と、本測定器を用いた歪分布測定例について述べる。

2. 光ファイバセンサの利用法

光ファイバセンサは、光ファイバの利用という観点から分類すると、光ファイバを被測定物理量の情報を含んだ信号の伝送路として用いる離散的なセンシング方式と、光ファイバ自体をセンサとして用いる連続的なセンシング方式の2種類に大別される。どちらも光ファイバの利点である低損失性、無誘導性、細径、軽量等の特徴を生かし、長距離、広域にわたって分布する被測定物理量の計測を目的とするものである。特に、後者の連続的分布型光ファイバセンサは、光ファイバ長さ方向の任意の点が、それぞれ外的要因に対してセンサ機能を持つため、光ファイバに沿った被測定物理量を連続的に計測可能である。これまでに提案されている連続的分布センシング方法の大部分は、OTDR (Optical time domain reflectometry)⁽²⁾ の測定手法を使用している。OTDR の測定手法は、入射されたパルス光が光ファイバを伝搬中に各種の光散乱要因により、一部後方散乱された光のパワーを時間分解測定するものである。従って、光ファイバの後方散乱

* 正会員 NTTアクセス網研究所 光加入者ケーブルシステム研究部

** NTTアクセス網研究所 光加入者ケーブルシステム研究部

係数、損失、あるいは、伝搬光の偏光状態等が、被測定物理量により変化するならば、OTDRを用いて被測定物理量の連続分布センシングが可能となる。これらの方法の中で、レイリー散乱光⁽³⁾やラマン散乱光⁽⁴⁾の散乱係数の温度依存性を利用した温度分布センシングは、その応用範囲が広く、最近、研究が活発化している。ただし、一般的に、光ファイバセンサが、従来の点情報しか得られないセンサよりも被測定物理量の測定精度の高いデータを得ることは現状では難しい。光ファイバセンサの役割は、測定精度よりはむしろ、長期・リアルタイム・広範囲・空間分布という、質的に異なるデータを得るためのものであると考える。本論では、主に、光ファイバ中のブリルアン散乱光を用いた歪分布センシング、および、その適用例について報告する。

3. 測定原理・測定方法

3.1 ブリルアン散乱光の歪依存性

ブリルアン散乱は、入射光が光ファイバ媒質中において熱的に励起された超音波と非線形相互作用し、その周波数が媒質固有の周波数だけシフトして入射端側に後方散乱される現象である。この周波数 ν_B は、ブリルアン周波数シフトと呼ばれる。筆者らは、 ν_B が光ファイバに生じた歪 ϵ に比例して変化することを初めて明らかにした⁽⁵⁾。通常の光通信に使用される石英系単一モード光ファイバにおける ν_B の歪依存性を図-1に示す。上記光ファイバにおける無歪状態の ν_B は、12.68GHzである。図-1より、光ファイバの歪に比例して、 ν_B が直線的に増加していることが分かる。また、その係数は、光源波長 $\lambda=1.32\mu\text{m}$ において、 $581\text{MHz}/10^{-2}$ 歪である。 ν_B は λ の逆数に比例する⁽⁶⁾。従って、後述する歪・損失統合型OTDRで使用している $\lambda=1.55\mu\text{m}$ では、歪係数は $493\text{MHz}/10^{-2}$ である⁽⁷⁾。ここで、 ν_B の変化を光源の線幅程度、例えば、1MHzの精度で測定可能であるとする、上記の歪係数より、光ファイバの歪を 2.0×10^{-5} の精度で測定可能であることが分かる。以上のことから、光ファイバの歪は、ブリルアン散乱光の周波数の歪による変化から測定することができる。

光ファイバの光損失は、レイリー散乱光のパワー変化から求めることができる。レイリー散乱光は、光ファイバに本質的に存在する屈折率のゆらぎによる散乱光であり、周波数シフトを伴わない。

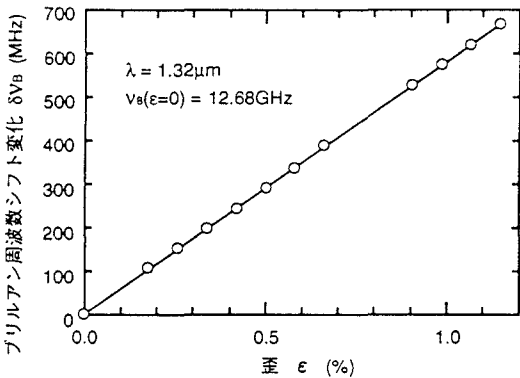


図-1 ブリルアン周波数シフトの歪依存性

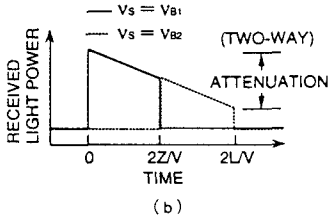
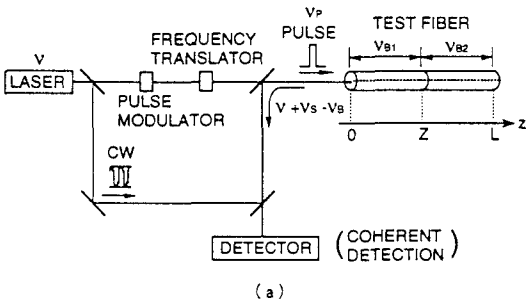


図-2 (a) BOTDRの構成、(b) 信号波形

3.2 歪分布測定原理

歪分布測定 (BOTDR) : 「3.1 ブリルアン散乱光の歪依存性」を利用することにより、光ファイバの長さ方向の ν_B が分かれば、歪の分布が求められる。このためには、パルス光を光ファイバに入射し、その後方ブリルアン散乱光を時間分解する測定手法、すなわち、OTDR⁽²⁾の技術を使用すれば良い。本測定法は、OTDRと同様に、光ファイバの片端からブリルアン散乱光を時間領域で解析するため、BOTDR (Brillouin OTDR) と名付けた。BOTDRでは、光ファイバ中で発生する微弱な後方自然ブリルアン散乱光を感度良く測定するために、コヒーレント検波法を利用する。図-2に、BOTDRの基本構成と信号波形を模式的に示す。光源からの出力光 (光周波数: ν) は、光方向性結合器により、プローブ光と参照光に分岐され、その後、プローブ光は、パルス光に変調される。パルス光の周波数 ν_P は、光周波数変換回路で ν_B に近い周波数 $+\nu_S$ だけシフトされ、 $\nu_P=\nu+\nu_S$ となる。光ファイバ中で後方ブリルアン散乱されたパルス光の周波数 ($\nu+\nu_S-\nu_B$) は、入射パルス光に対して $-\nu_B$ だけシフトして光源の周波数 ν に近くなるため、コヒーレント検波器を用いたブリルアン散乱光の

高感度測定が可能となる。ここで、区間 $[Z_1, Z_2]$ のみに歪 ϵ が生じている光ファイバについて考える。入射パルス光の周波数を離散的に変える毎に後方散乱光パワーの時間分解測定を繰り返すことにより、図-3に示すようなBOTDR波形群が得られる。区間 $[0, Z_1], [Z_2, L]$ では、光周波数 $f=f_0$ のとき、散乱光パワーが最大となり、一方、区間 $[Z_1, Z_2]$ では、 $f=f_1$ のとき、散乱光パワーが最大となることが分かる。このようにして、各位置毎に散乱光パワーが最大となる光周波数から $\Delta f=f_1-f_0$ を求め、 V_B の歪係数を用いて、光ファイバ長さ方向の歪分布に変換する。

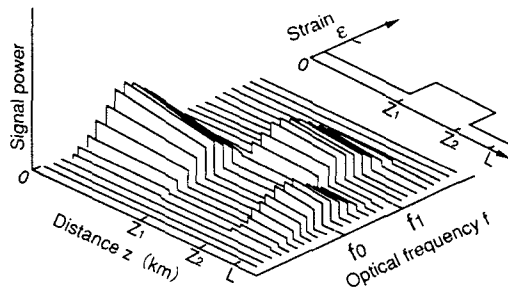


図-3 BOTDR 波形群

光損失分布測定 (COTDRモード)：光周波数変換回路を介せずに光ファイバにパルス光を入射し、そのとき、光ファイバ中で発生するレイリー散乱光を、フォトイン検波器を用いて高感度検出する。レイリー散乱光パワーを時間分解測定することにより、光ファイバ長さ方向の光損失分布を求めることができる。本測定法は、レイリー散乱光をコヒーレント検波法を用いて高感度検出しており、従来の直接検波法を用いたOTDRと区別するために、COTDR (Coherent OTDR) と名付けている。

歪・光損失の発生位置 Z は、従来のOTDRと同様に、パルス光を光ファイバに入射してから後方散乱光を検出するまでの遅延時間差 T を用いて、 $Z=VT/2$ (V は光ファイバ中の光速) から求めることができる。距離分解能 ΔL は、光ファイバに入射する光パルス幅 W に依存し、 $\Delta L=VW/2$ で表される。

4. 測定器の構成と特性

4.1 構成

図-4に、歪・損失統合型OTDRの構成を示す⁽¹⁾。統合型OTDRを効率良く構成するために、光周波数変換回路 (BOTDRモード)・電気フォトイン受信器 (COTDRモード) 以外の光学系・電気系を共有化した。

BOTDRモードでは、半導体レーザDFB-LDの出力光 (光周波数 V_0) は、光方向性結合器を用いてプローブ光と参照光に分波される。プローブ光は音響光学スイッチAO1によりパルス変調 ($V=V_0+V_{AO}$) され、光ファイバ増幅器EDFA1とAO2から構成される光周波数変換回路に入射される。プローブパルス光は回路内で任意回数だけ周回することにより、波長 $1.55\mu\text{m}$ におけるブリルアン周波数シフト $V_B \approx 11\text{GHz}$ に近い周波数シフト (V_s) を受け、電気光学スイッチEOで任意のパルス幅に変調される。パルス光 ($V+V_s$) はEDFA2で光増幅され、AO3でEDFAから発生する自然放光 (ASE: Amplified spontaneous emission) を取り除くための波形整形後 (V_0+V_s)、被測定光ファイバに入射される。コヒーレント受信部の偏波依存性を要因とした受光信号波形のゆらぎを相殺するために、偏波回転素子FCを用いて、パルス光の偏波状態を平均化した。光ファイバ中で発生したブリルアン散乱光は、入射パルス光の周波数 (V_0+V_s) から V_B だけシフトして ($V_0+V_s-V_B$)、参照光の周波数 V_0 に近くなるため、フォトイン検波を用いた高感度検出が可能である。パルス光の周波数を離散的に掃引する毎に、ブリルアン散乱光の時間分解測定を繰り返すことにより、光ファイバ長さ方向の各位置におけるブリルアンベクトルを測定する。ベクトル強度が最大となる光周波数から、各位置の V_B を求めることにより、光ファイバ長さ方向の V_B 分布を得る。従って、 V_B の歪依存性を用いて光ファイバ長さ方向の歪分布を求めることができる。

COTDRモードでは、EOで任意のパルス幅に変調されたプローブ光は、EDFA・AO3で光増幅・整形された後 ($V_1=V_0-V_{AO}$)、光ファイバに入射される。フェジンクノイズ⁽⁸⁾を低減す

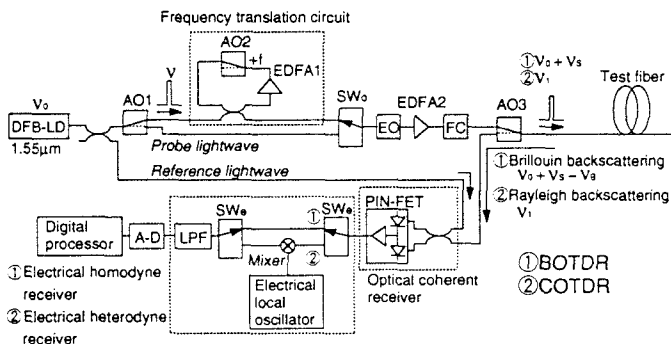


図-4 測定系

るために、FCを用いてパルス光の偏波状態を平均化し、同時に、受光信号の加算平均時にDFB-LDの温度を変化させることにより、光源の光周波数を掃引させた⁽⁹⁾。光ファイバ中で発生したレイリー散乱光は、ヘテロダイン検波を用いて高感度検出される。レイリー散乱光パワーを時間分解測定することにより、光ファイバ長さ方向の光損失分布を求めることができる。

4.2 特性

(a) 高距離分解能歪分布測定

被測定光ファイバは、歪分布を模擬するため、 V_B が $50 \pm 1\text{MHz}$ だけ異なる2種類の光ファイバを接続した。その構成を図-5に示す。 V_B の差は、 V_B の歪係数から換算すると、歪 1×10^{-3} に相当する。

図-6に、光パルス幅を15ns、加算平均化回数を 2^{12} 回としたときの V_B 分布の測定結果を示す。このとき、パルス幅から計算される距離分解能は1.5mである。図-6より、2m以上のファイバAにおける V_B 測定値は、真値($V_B=50 \pm 1\text{MHz}$)と良く一致しているが、1mのファイバAの V_B 測定値は、約40MHzであり真値に比べ小さいことが分かる。距離分解能 ΔL より短い区間Lで変化している V_B をBOTDRで測定したとき、測定されるブリルアンスペクトルは区間Lと区間 ΔL -Lのスペクトルの重ね合わせになる。BOTDRでは、スペクトル強度が最大となる光周波数を V_B とみなしているため、区間Lが短いほど V_B の変化は小さく、すなわち、 V_B 測定値は真値に比べ小さくなる。 V_B の測定誤差は $\pm 5\text{MHz}$ 未満であり、これは歪測定誤差 $\pm 1 \times 10^{-4}$ に相当する。

(b) 高ダイナミックレンジ光損失分布測定

図-7に、光パルス幅を100ns、加算平均化回数を 2^{16} 回としたときの光損失分布測定結果を示す。パルス幅から計算される距離分解能は10mである。前述したフェーシングノイズ低減化により、COTDR波形上の振幅変動幅を0.3dB以下に抑えた。図-7より、被測定光ファイバの損失は0.23dB/kmであること、ノイズレベルを基準としたときのダイナミックレンジ(測定可能距離)は、24dB(光ファイバ片道損失値)であることが分かる。

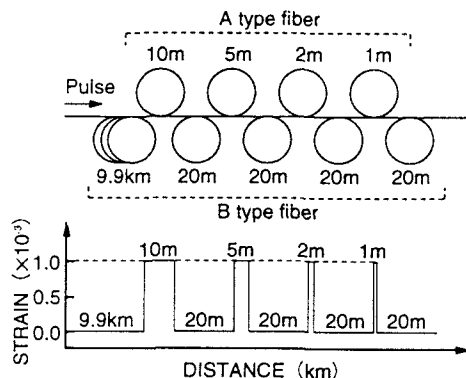


図-5 被測定光ファイバ

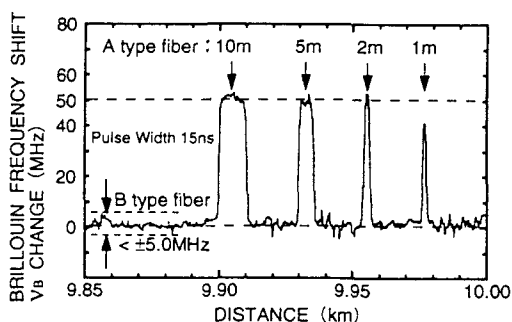


図-6 V_B 分布測定結果

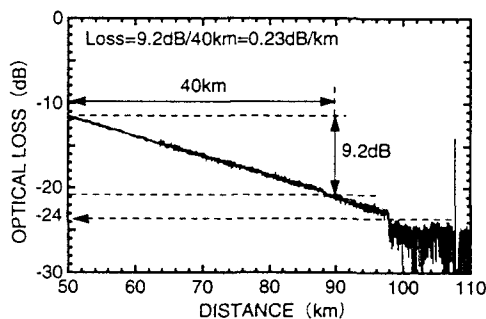


図-7 光損失分布測定結果

5. 歪分布測定例

地盤の変形状態を、光ファイバを用いて測定するための基礎実験について紹介する。

地盤の変形を模擬するために、高さ500mm、幅1000mm、長さ1000mmの鋼製型枠を18個並べ、その中に粘土を充てんし、光ファイバを貼付した塩ビ管(直径30mmφ)、および、歪ゲージを1m毎に貼付したアクリルパイプ(直径30mmφ)を埋設した粘土ブロックを用意した。塩ビ管、および、アクリルパイプの埋設した深さは、型枠上面から、それぞれ、250mm、200mmである。各型枠は、図-8に示すように、型枠の上下を高さ150mm、幅1000mmの鋼製仕切板で仕切られている。実験に使用した光ファイバは、外径0.9mmのナイロ被覆光ファイバである。載荷方法は、図-9に示すように、光ファイバ、および、歪ゲージを貼付した面と反対方向から粘土ブロックを階段状に載荷した。載荷による粘土ブロックの変位量としては、歪分布測定器側から10番目(9~10mの位置)のブロックに、最大40mmの変位を与え、その前後のブロックの変位量を10mmずつ階段状に減少させた状態とした(載荷範囲は、7~13番目のブロック)。粘土ブロックを用

いた変形試験の試験結果の一例を図-10に示す。■印が各ブロックに貼付した歪ゲージによる測定結果であり、○印が各ブロック毎の歪分布測定結果の平均値を表す。図-10から、光ファイバを用いた光ファイバ長さ方向の歪分布測定結果と歪ゲージによる各ブロック毎の歪測定結果が、ほぼ同様な値を示していることが分かった。

6. まとめ

- (1) 光ファイバ中のブリルアン散乱光を用いた光ファイバ歪センサを紹介した。この中で、本センサが、光ファイバに発生した歪分布を、歪測定誤差 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 、距離分解能1.5mで測定可能であることを示した。
- (2) 歪分布測定例として、粘土ブロックを用いた地盤変形模擬実験について紹介した。この中で、光ファイバ歪センサを用いた測定結果が、歪ゲージの測定結果とほぼ同様な値を示すことが分かった。今後は、光ファイバ歪センサの歪測定精度、および、距離分解能を向上させると共に、構造物の歪を計測するための光ファイバの適用条件について検討していきたい。

参考文献

- 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'96), TuD.3.7, 1996.9.
- 2) M. K. Barnoski and S. M. Jensen : Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics, Appl. Opt., Vol.15, No.9, pp. 2212-2215, 1976.9.
- 3) A. H. Hartog : A distributed temperature sensors based on liquid-core optical fibers, IEEE J. Lightwave Technol., Vol. LT-1, No. 3, pp. 498-509, 1983.9.
- 4) J. P. Dakin and D. J. Pratt : Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector, Electron. Lett., Vol. 21, No. 13, pp. 569-570, 1985.6.
- 5) T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda : Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 1, No. 5, pp. 107-108, 1989.5.
- 6) D. Cotter, J. Opt. Commun. : Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber, Vol. 4, No. 1, pp. 10-19, 1983.3.
- 7) T. Kurashima, T. Horiguchi, M. Tateda, and Y. Koyamada : Large extension of dynamic range in distributed fiber strain measurement using Brillouin spectroscopy, Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO'91), CThN5, pp. 416-417, 1991.5.
- 8) P. Healey : Fading noise in Heterodyne OTDR, Electron. Lett., Vol. 20, No. 1, pp. 30-32, 1984.1.
- 9) H. Izumita, S. Furukawa, Y. Koyamada, and I. Sankawa : Fading noise reduction in coherent OTDR, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 4, No. 2, pp. 201-203, 1992.2.

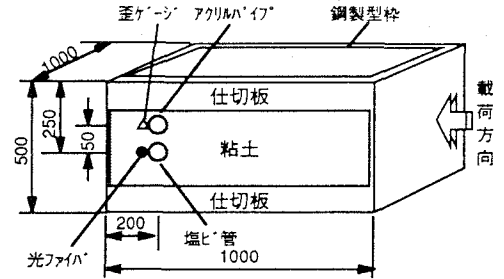


図-8 粘土ブロックの断面図

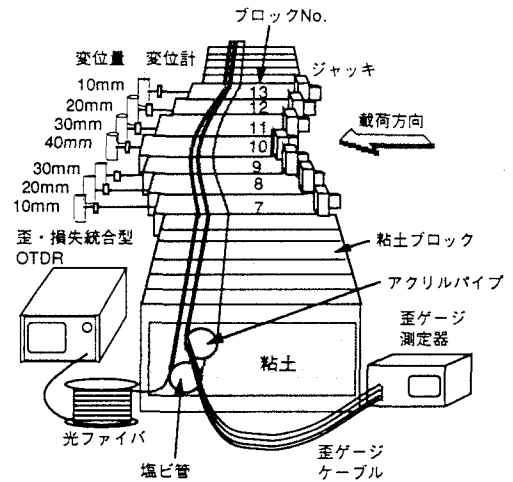


図-9 粘土ブロックを用いた変形試験

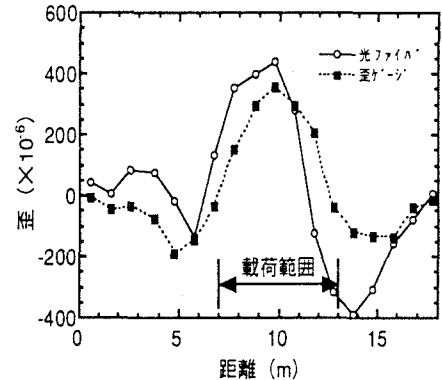


図-10 粘土ブロックを用いた変形試験結果