

社会インフラモニタリング向け 分布光ファイバーセンシング技術

小泉 健吾 村井 仁

高度経済成長期に整備された社会インフラの老朽化が問題となっており、適切なモニタリングシステムの構築が急務となっている。特に、橋梁やトンネル劣化による崩落事故を未然に防ぐために、様々なセンサーを取り付けたヘルスマニタリング試験が行われている¹⁾。また、2011年に発生した東日本大震災を契機に、災害発生予知のためのリアルタイムモニタリング技術も重要視されている。

本稿では、分布型光ファイバーセンシングの概要について解説した後、OKI独自に取り組んでいる社会インフラモニタリング向け分布光ファイバーセンシング技術について述べる。

光ファイバーセンシングの特徴と市場動向

光ファイバーは光通信技術の伝送媒体として広く使用されており、情報インフラで重要な役割を果たしている。一方で、光ファイバーをセンサー媒体として使用するセンシング技術も光ファイバー通信技術と並行して発展してきた。電気式のポイントセンサーと比べて、光ファイバーセンサーには以下の利点がある²⁾。

- ・細径、軽量のため構造物への一体化が容易
- ・耐久性、耐腐食性に優れ長期にわたる測定が可能
- ・無給電計測による耐防爆性のため安全計測が可能
- ・耐電磁誘導性のため電磁雑音下での安定測定が可能
- ・遠隔計測、分布計測が可能(～数十km)

このような理由から光ファイバーセンサーは、高層ビルやトンネル、橋梁などの大型建造物のヘルスマニタリングや、石油プラントなど電気式センサーの不得意とする場面での利用が注目されている。そして、これら多様なセンシングとの通信を提供する光ファイバーセンサーネットワークの実現が期待されている。図1に光ファイバーセンサーネットワークの例を示す。



図1 光ファイバーセンサーネットワークのイメージ図

分布型光ファイバーセンサーの種類と測定技術

(1) 分布型光ファイバーセンサーの計測原理

分布型光ファイバーセンシングは、構造物に取り付けた光ファイバーに沿って、連続的に物理量を計測する技術である。このため、離散的な点測定しかできないポイントセンサーとは異なり、被測定対象全体の物理量を測定することができる。

OKIが開発している光ファイバーセンサーは、光が光ファイバー中を伝搬する過程で発生する後方散乱光(入力光と逆方向に散乱された光)を計測する方式であり、光ファイバーに沿った連続的な分布測定ができる。

光ファイバー中の散乱はレイリー散乱、ブリルアン散乱、ラマン散乱に分類され、各散乱光は光ファイバー中の温度、歪み、圧力などの物理量に対して強度、周波数、位相の挙動が異なるという特性をもつ。そのため、計測目的に合わせて適切な散乱光を測定することで、様々な用途に適用することができる。各散乱光の測定可能な物理量と適用例を表1に示す。社会インフラのヘルスマニタリングには歪みと温度を測定することが重要であるため、表1よりブリルアン散乱を利用することが適切である。本稿で紹介する光ファイバーセンサーで測定するブリルアン散乱光は、入力光の搬送波周波数から約11GHz離れた周波数を持ち、光ファイバー中の歪み、温度に対してそれぞれ0.058 MHz/ $\mu\epsilon$ 、1.18 MHz/ $^{\circ}\text{C}$ の周波数シフト(Brillouin Frequency Shift: BFS)を有することが知られている^{3),4)}。したがって、光ファイバー中の

ブリルアン散乱光の周波数変化に着目すると、光ファイバー方向に沿った歪みと温度測定ができる。しかしながら散乱光は非常に微弱であるため、精度のよい測定に必要なSN比を確保する上で十分な平均化処理が必須となり、測定に時間がかかるという課題があった。

表1 各散乱光の適用用途

散乱光の種類	測定対象	測定可能な項目	適用例
レイリー散乱	強度 (位相)	損失	●土砂崩れ、地滑り ●浸水
ブリルアン散乱	周波数	歪み 温度	●土砂崩れ、地滑り ●トンネル、建造物変形 ●石油プラントの設備損傷 ●パイプライン
ラマン散乱	強度	温度	●石油タンク、パイプライン ●路面凍結 ●建造物火災 ●電カケーブル温度

(2) 分布型光ファイバーセンサーの位置特定技術

分布型光ファイバーセンサーでは、局所的な変化が生じた位置を特定する技術が必要となる。代表的な方法として、時間領域で測定するOTDR (Optical Time Domain Reflectometry)、周波数軸上で測定するOFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry)、光の相関を利用したOCDR (Optical Correlation Domain Reflectometry) が挙げられる。これらの技術は、測定レンジ、測定精度、空間分解能、測定速度等の各性能指標に対してそれぞれ一長一短があるため、測定対象に合わせて適切な方式を選択する必要がある。

これらの中で最も一般的な方法であるOTDR方式では、光ファイバーに光パルスを入力し、その入射時間と散乱光が受光器で検出されるまでの時間差(遅延時間)から光ファイバーの位置を算出ことができ、光ファイバー中の損失測定と破断検査に広く利用されている。

BOTDRの原理と特徴

本節では、歪み・温度の分布センシング技術としてブリルアンOTDR (Brillouin OTDR : BOTDR) について解説する⁵⁾。前節で述べたように、光ファイバーの歪み・温度変化は、ブリルアン散乱光の周波数変位BFSとして現れるため、光ファイバーに沿って周波数スペクトル測定をするのが一般的である。一般的なBOTDRの模式図を図2(a)に示す。BOTDRは送信部、光ファイバー計測部、受光部で構成される。送信部は連続(Continuous Wave : CW)光

を出力する半導体レーザー(Laser Diode : LD)と、電気/光変調器(Electro-optic Modulator : EOM)から構成され、光パルスが生成される。光ファイバー計測部ではサーキュレーターを介して光パルスが入射されることにより、被測定光ファイバー(Fiber Under Test : FUT)中でブリルアン散乱が発生し、その一部が後方ブリルアン散乱光として入射側へ戻る。この後方ブリルアン散乱光はサーキュレーターの出力ポートから出力され、LDからの参照光とともにバランス検出器(Balanced Photodiode: BPD)へ入力される。受光部では、ブリルアン散乱光の利得スペクトル(Brillouin Gain Spectrum : BGS)を測定するために、ヘテロダイン検波によって光周波数が電気信号で観測可能なGHz帯の中間周波数に変換される。BGSは高速な電気スペクトルアナライザー(Electrical Spectrum Analyzer: ESA)を使用して数ns毎に取得される。図2(b)にBGSの取得データのイメージ図を示す。ESAでは各時間(光ファイバー中の距離に対応)、各周波数毎に強度を測定し、多数のBGSが取得される(図2(b)左図)。この測定された全てのBGSのピーク周波数を求めることでBFSを算出することができる(図2(b)右図)。

一般的には、BOTDRの最小空間分解能は1m、測定精度は $\pm 50 \sim \pm 100 \mu\epsilon$ であるが、これらは変調方式、受光方法の工夫により改善されてきた^{6),7)}。一方、測定には数分~十分程度要するため、歪等の動的な変化をリアルタイムに観測することはできない。測定に要する時間は、SN比確保のための平均化処理とESAの周波数掃引に要する時間が大部分を占めている。さらに、高速なESAを使用するため、従来の電気式歪センサーに比べると装置サイズが大きく高価格といった課題があり、光ファイバーセンサーの普及を妨げる一因となっている。

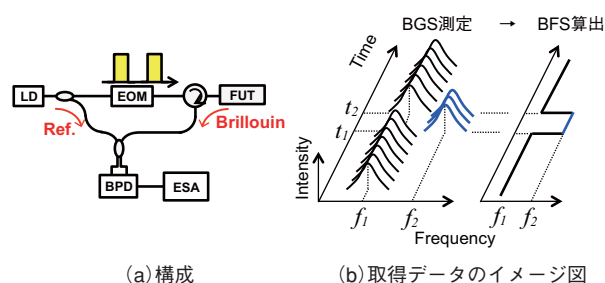


図2 一般的なBOTDRの構成と取得データのイメージ図

自己遅延ヘテロダイン型BOTDRの提案

我々は、BOTDRの高速化、低価格化に向けた取り組みを行っており、その一つとして自己遅延ヘテロダイン型のBOTDR(以下Self-delayed Heterodyne BOTDR : SDH-

BOTDRと呼ぶ)を提案している⁸⁾。SDH-BOTDRはBFSの変化を位相の変化として捉え、電気処理部を光学的処理に置き換えた測定方法である。従来手法とは異なりBGSを測定する過程が不要となるため、測定時間の高速化を実現することができる。本節では、SDH-BOTDRの原理と実証実験結果について述べる。

(1) SDH-BOTDR の原理

図3 (a)にSDH-BOTDRの受信部構成を示す。送信部の構成はBOTDRと同じなので省略している。SDH-BOTDRではセンサーであるファイバーからのブリルアン散乱光自身を自己遅延ヘテロダイン干渉計へ入力する構成となる。干渉計内では、2分岐された一方の光に音響光学変調器 (Acousto-optical Modulator : AOM) による周波数シフトを、もう一方には光ファイバー遅延線により適切な遅延時間 τ を与えている。これにより、干渉計出力には周波数シフトに相当するビート信号が現れ、干渉計入力光の周波数変化がビート信号の位相変化として検出されるようになる。つまり、FUT中の歪み・温度変化によってBFSが生じた信号は、ビート信号上では位相シフトとして検出されることになる。これにより、BGSを測定することなく直接BFSを求めることができるため、周波数掃引に要する時間だけ測定時間を短縮することができる。また、BGS測定のためのESAも不要となるため、構成が非常に簡便となり低コスト化にも寄与する。この位相シフト情報を持ったビート信号は、位相比較器 (Phase Detector) で強度信号へ変換された後、周波数シフト量へと換算される。図3 (b)にSDH-BOTDRの出力イメージを示す。

SDH-BOTDRでは位相情報を取り扱うため、その測定周波数範囲は一意に $0 \sim \pi$ に限定される。測定範囲はヘテロダイン干渉計内の遅延距離 (時間 τ) によって任意に変えることができる。図4は遅延距離と周波数変化量の関係を示したグラフである。位相変化の最小検出感度を $2\pi/1000$ 、最大を π とすると、遅延距離と測定範囲の関係は図4の青色で囲まれた範囲になる。図より、遅延距離が長いほど最小検出感度は良いことが分かる。そのため、自己遅延ヘテロダイン干渉計では、観測したい周波数の変化量に応じて柔軟な設計ができる。例えば $\tau = 1\text{ns}$ ($\Delta l = 20\text{cm}$) とした場合、図4よりBFSの測定範囲は1MHzから500MHzと求まる。これは光ファイバーの歪み $0.002 \sim 1\%$ ($20\mu\varepsilon \sim 10\text{m}\varepsilon$) に相当する量であり、従来のBOTDRと同等の感度を有することになる。このように、測定感度を低下させることなく高速化が実現できる。

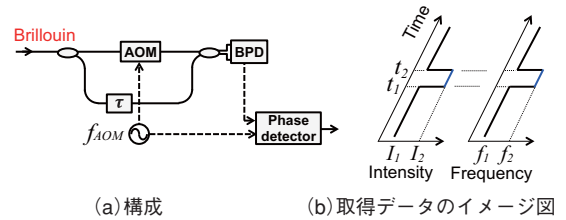


図3 SDH-BOTDR の受信部構成と取得データのイメージ図

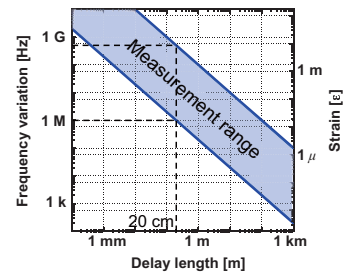
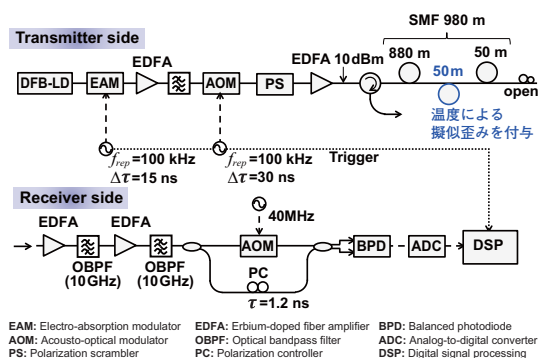


図4 遅延距離と周波数測定範囲の関係

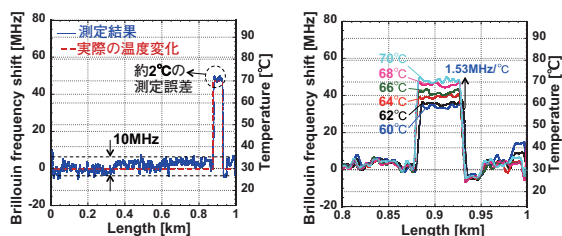
(2) SDH-BOTDR による実証実験

図5 (a)に、SDH-BOTDRの実験系の構成を示す。送信部には、電界吸収型光変調器 (Electro-absorption Modulator : EAM) とAOMの2台のEOMを使用し、パルス幅15 ns (空間分解能1.5 mに相当) の高い消光比を有する光パルスを生成させており、これを2台のエルビウム添加光ファイバー増幅器 (Erbium-doped Fiber Amplifier : EDFA) で10 dBmまで増幅した後、FUTへ入射している。ここで、入射パルスは偏波スクランブラー (Polarization Scrambler : PS) により偏波状態をランダム化することで、BGSの偏波依存性を軽減している。FUTにはシングルモードファイバー (Single Mode Fiber : SMF) を1 km使用し、880~930 mの区間に擬似歪みとして温度変化を与えている。ファイバーからの出力光は、光フィルタ (Optical Bandpass Filter : OBPF) とEDFAでブリルアン散乱光のみを抽出、増幅した後、自己遅延ヘテロダイン干渉計へ入力される。干渉計内ではAOMによって40 MHzの周波数シフトを施すとともに、1.2 nsの遅延時間を与えている。その後、BPDで受光したビート信号はADC (Analog-to-digital Converter) を介してDSP (Digital Signal Processing) により位相比較を行い、BFSが測定される。図5 (b)には擬似歪み区間の温度を70°Cに設定した場合の分布測定結果を示している。測定結果との誤差は約2°Cであり、これは従来のBOTDRと同等の測定精度となっている。また、この時の測定時間は40 msであり、従来よりも3桁程度高速な測定を実証できている。図5 (c)には温度を60~70°Cまで2°Cずつ変化させた際の測定結果を示しており、線形な特性が得られていることが分かる。

以上の実験結果は、SDH-BOTDRが、十分な精度で、従来にない高速な測定を実現できること示しており、我々の提案手法の妥当性を裏づける結果であると考えられる。



(a) SDH-BOTDR の実験系



(b) 1 km 分布測定結果

(c) 温度変化と BFS の関係

図5 SDH-BOTDR による分布歪測定例

まとめと今後の技術開発

社会インフラモニタリング向けのセンシング技術として期待されている分布型光ファイバーセンシング技術、ならびに次世代光ファイバーセンシング方式として新規な高速測定可能な光ファイバーセンサー方式であるSDH-BOTDR方式の概要について述べた。また、SDH-BOTDR方式の妥当性を検証する分布測定実験の結果を紹介し、従来のBOTDR方式と同等の精度を維持しつつ、40msという従来比で3桁程度高速な分布測定ができることを示した。今後は、測定精度の改善を主体とした研究開発を進める予定である。

本稿では分布光ファイバーセンシング技術の一例としてBOTDR方式を取り上げたが、これ以外にも複数の分布型センシング技術の研究開発を進めており、顧客のニーズに合わせて適切なセンシング方式を提供できるように、多様な技術ラインナップを整えていく。◆◆

● 筆者紹介

小泉健吾：Kengo Koizumi. 研究開発センタ ネットワーク・端末技術研究開発部

村井仁：Hitoshi Murai. 研究開発センタ ネットワーク・端末技術研究開発部

■ 参考文献

- 1) 平島寛 他：インフラモニタリング市場・技術に関する市場動向調査、pp.123-153、2014年、日経BP社
- 2) 保立和夫、村山英晶：光ファイバーセンサ入門、初版、pp.18-27、2012年、光防災センシング振興協会
- 3) T. Horiguchi et al., "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in optical silica fibers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 1, no. 5, p. 107 (1989)
- 4) T. Kurashima et al., "Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers," Appl. Opt., Vol. 29, no. 15, p. 2219 (1990)
- 5) T. Kurashima et al., "Brillouin optical-fiber time domain reflectometry," IEICE Trans. Commun., Vol. E76-B, no. 4, p. 382 (1993)
- 6) K. Nishiguchi et al., "Synthetic spectrum approach for Brillouin optical time-domain reflectometry," Sensors, Vol. 14, no. 3, p. 4731 (2014)
- 7) 加藤悠介、小山田弥平：Barker符号を用いたダブルパルスBOTDRに関する基礎検討、電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-13-38 (2009)
- 8) K. Koizumi et al., "High-speed distributed strain measurement using Brillouin optical time-domain reflectometry based-on self-delayed heterodyne detection," ECOC2015, P.1.07 (2015)

TIPS 【基本用語解説】

光ファイバー中の散乱

密度揺らぎによる散乱をレイリー散乱、光と音響波との相互作用による散乱をブリルアン散乱、媒質中の分子の振動・回転に起因する散乱をラマン散乱と呼ぶ。

OTDR

光パルスの入射時間と受光時間の差から光ファイバー中の位置を算出して、ファイバー中の分布測定を行う技術。

OFDR

光の干渉を利用してファイバー中の位相情報を測定する技術。入射光の発振周波数を掃引し、戻り光とのビート周波数から距離を算出する。

OCDR

周波数変調を施した光と戻り光とを干渉させ、その相関ピークの情報を取得する技術。周波数の変調速度から距離を算出する。

IEC

国際電気標準化会議