

# 分布光ファイバー温度センシング

山口 徳郎 小泉 健吾

センシング技術の発達でIoT (Internet of Things) システムの市場が急速に拡大している。特に製造ラインや工場内の温度監視、橋梁(きょうりょう)や道路などの社会インフラ監視では、長距離・広範囲で温度・歪みをリアルタイムに計測することで、製品品質の向上や、安全・安心な社会への貢献に対する期待が高まっている。我々はこれらの期待への解決策の1つとして光ファイバーセンシング技術に着目し、技術開発を進めている。本稿では、OKIが通信市場で長年取り組んできた高速光通信技術を活かした独自の新技术「SDH-BOTDR (Self-delayed Heterodyne Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) 方式」の光ファイバーセンシング技術を解説するとともに、適用事例を紹介する。

## 光ファイバーセンサーの特長と適用例

### (1) 光ファイバーセンサーの特長

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。この光通信技術の進展とともに独自の発展を遂げてきたのが、光ファイバーそのものをセンサーヘッドとして用いる光ファイバーセンシング技術である。光ファイバーセンサーによってモニタリングできる物理量は温度、歪、振動、傾きなど様々である。これらの物理量は、光の強度や性質を測定することで観測できる。もちろん一般的な電気式センサーでも測定できるが、光ファイバーセンサーには次の利点がある<sup>1)</sup>。

- 細径、軽量のため構造物への一体化が容易
- 耐久性、耐腐食性に優れ長寿命
- 電磁両立性、防爆性が高く、過酷環境下(-200~800℃)でも高信頼な計測が可能
- 無給電での遠隔計測、分布計測が可能(~数10km)

この中で、特に注目すべき点は分布計測である。一般的な電気式センサーはポイントセンサーと言われ、設置箇所のみを測定する。これに対して光ファイバーセンサーは、光ファイバーに沿って連続的に計測できる。これは、製造ラインや工場内の温度監視、橋梁や道路などの社会インフラ監視をする上で、非常に優位な特長である。例え

ば、橋梁や道路などを監視する場合、通常はポイントセンサーを複数設置する必要があり、配線も複雑になり、導入コストやメンテナンスコストが大きくなる。一方、光ファイバーセンサーでは、光ファイバー1本を配線するだけで良いため、シンプルかつフレキシブルに構築でき、大型であればあるほど導入コストを小さくできる。

### (2) 分布温度センサーとしての適用例<sup>2)</sup>

図1に、光ファイバーセンサーの活用分野を示す。特に分布温度センサーの適用例には、

- トンネル/共同溝内の火災の早期発見及び消火制御
- 工場内の空調制御による作業効率向上
- パイプラインの常時監視による保全
- 製品ラインでの温度品質のトレーサビリティ確保

などの製造や防災の分野が挙げられる。いずれの適用例もIoT化の需要が高い分野であるが、広範囲をモニタリングする必要があるため、ポイントセンサーで実現することが難しい。

このような理由から光ファイバーセンサーは、スマートファクトリーや社会インフラモニタリングとの親和性が高く、市場の拡大が期待されている。また、近年、ビッグデータ解析を駆使して、膨大なセンシングデータから構造物を適切に状態把握や異常診断する技術も進歩しており、防災、減災への展開も加速している。

## 分布光ファイバー温度センシング

### (1) 分布光ファイバー温度センシングの原理<sup>3), 4)</sup>

光ファイバーに沿った連続的な温度を計測するためには、光が光ファイバー中を伝搬する過程で発生するブリルアン散乱光、またはラマン散乱光と呼ばれるものを検出する。ブリルアン、ラマン散乱光は光ファイバーの温度が変化するとそれぞれ周波数、強度が変化するため、これらを検出することで温度が測定できる。また、ブリルアン散乱光は歪に対しても周波数変化を生じるため、構造物の状態診断など適用用途の拡大が期待できる。

そのため、我々はブリルアン散乱光に着目し、独自の

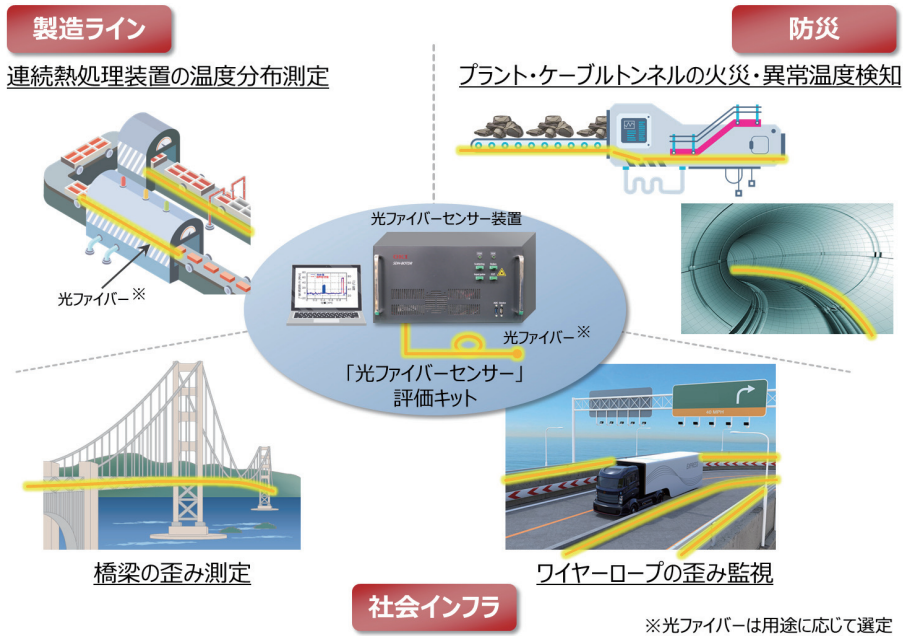


図1 光ファイバーセンサーの活用分野

新技術「SDH-BOTDR方式」を用いた分布光ファイバー温度センシングを開発した。本方式の概略図を 図2(a)に示す。この方式は送信部、光ファイバー計測部、受信部で構成される。送信部は、連続光(Continuous Wave: CW)を出力する半導体レーザー(Distributed FeedBack Laser Diode: DFB-LD)と、電気/光変調器(Electro-optic Modulator: EOM)から構成され、光パルスを生成する。この光パルスは、サーキュレーターを介して光ファイバー計測部(Fiber Under Test: FUT)に入力され、光ファイバー中で生じたブリルアン散乱光の後方伝搬成分が、反射光として入射側へ戻される。また、反射点は、光パルスを入力した時間を基準にして反射光が入力側に戻るまでの時間から算出できるため、各地点の温度と歪を測定することができる。この後方ブリルアン散乱光はサーキュレーターの出カポートから出力され、自己遅延干渉計へ入力される。従来方式であるBOTDR<sup>5)</sup>方式では、ブリルアン散乱光の周波数変化を周波数掃引方式で測定するのに対して、本方式では、自己遅延干渉計を用いた位相検波方式で測定する。本方式では周波数掃引を必要とせず周波数変化を測定することができるため、従来よりも高速に測定できる。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-Optic 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

する正弦波信号が現れ、ブリルアン散乱光の周波数変化が正弦波信号の位相変化として検出されるようになる。この位相シフト情報を持った正弦波信号は、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2(b)にSDH-BOTDRの出力イメージを示す。

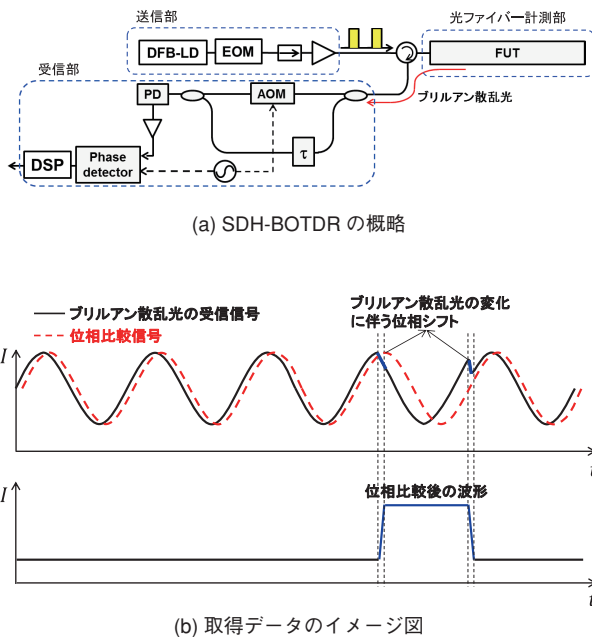


図2 SDH-BOTDRの構成と取得データのイメージ図

## (2) 光ファイバーセンサー評価キット

本方式を用いた光ファイバーセンサー評価キットを開発した。その外観を写真1に、主な仕様を表1に示す。光ファイバー1kmでの測定時間は1秒以下であり、ほぼリアルタイムな測定を実現している。これは上述した位相検波方式を採用しているためであり、従来のBOTDR方式よりも飛躍的に向上している。これにより、火災検知などのようなリアルタイム監視が必要な利用シーンでも適用できる。また、本方式は光通信で使用される汎用的なデバイスで構成でき、メンテナンスコストも低減できる。



写真1 光ファイバーセンサー評価キットの外観

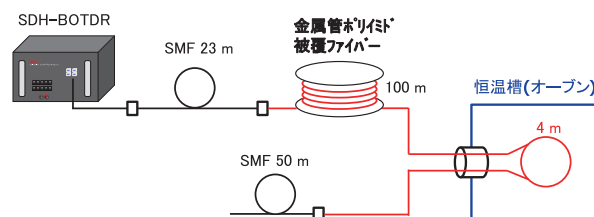
表1 光ファイバーセンサー評価キット仕様

項目	仕様
測定時間	1秒
測定距離	1km(10kmまで延長可)
空間分解能	1m
温度範囲	-65~300℃ (光ファイバー被膜に依存)
温度精度( $\sigma$ )	$\pm 1^\circ\text{C}$

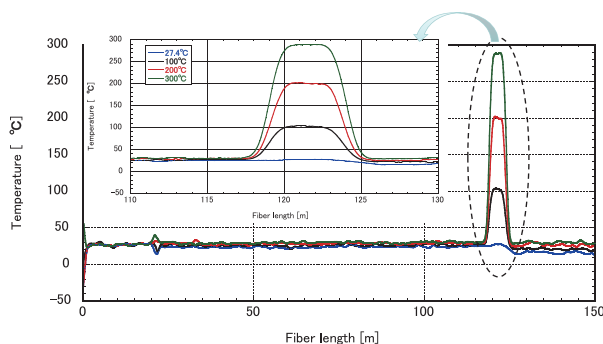
## (3) 温度測定用光ファイバーの種類

光ファイバーの材料である石英ガラスの軟化点は1650℃であり、十分に高温まで耐えられる。しかし、柔軟性を持たせるために被覆することが一般的であり、分布光ファイバー温度センサーとしての耐熱性能は被覆の材質によって制限される。そのため、適用用途に合わせて最適な光ファイバーを選定する必要がある。通信用途で一般的に使用されるシングルモード光ファイバー(Single Mode Fiber:SMF)の被膜は樹脂とPVC(ポリ塩化ビニル)から成り、最も安価ではあるが耐熱は-40~85℃程度である。一方、ポリイミド被覆ファイバーでは300℃までの耐熱を実現できる。また、圧力や歪がさらに加わる厳環境下では光ファイバーが破損する恐れがあるため、金属管などで保護した光ファイバーを使用することも考えられる。

本方式を用いた分布温度センシングの一例として、金属管に挿入したポリイミド被覆光ファイバーによる温度測定結果を紹介する。図3(a)に評価系の構成を示す。測定用の光ファイバーは全長約200mとし、SMFと金属管ポリイミドファイバーを組み合わせた構成である。金属管ポリイミドファイバーの終端4mを恒温槽に挿入し温度を段階的に300℃まで上昇させた時の温度変化を観測した。図3(b)は分布温度測定結果と、恒温槽付近の温度変化の様子である。恒温槽により300℃まで段階的に温度を上昇させたところ、それぞれの温度をリアルタイム測定でき、耐熱性の面でも問題ないことを確認している。



(a) 分布温度測定の評価系



(b) 分布温度測定結果

図3 SDH-BOTDR方式を用いた分布温度測定例

## 適用事例の紹介

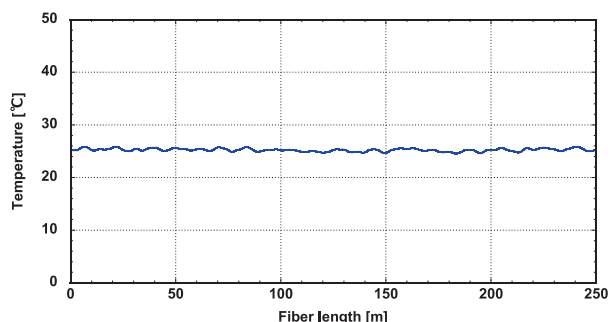
弊社内工場にて取り組んでいる分布光ファイバー温度センサーの適用事例を紹介する。工場内の空調システムは温度センシング点が限られるため細かな区画ごとで空調制御するなどの効率的な運用が難しいという問題がある。工場内の梁(はり)、柱などを利用し、網の目状に光ファイバーを敷設することにより、密度の高い温度分布をリアルタイムに把握し、最も効率の良い空調(バリアゾーンレベル)を実現し、省エネ率をアップすることが期待できる。

図4(a)に工場内での光ファイバーの敷設例を示す。天井からぶら下がる蛍光灯の支持棒にケーブル固定用具を取り付け、光ファイバーが中空に敷設されるように工

夫しながら約250m敷設した。続いて分布温度測定結果を 図4(b)に示す。比較的溫度変化の少ないエリアに敷設したが、工場内の分布温度が計測されていることが確認できる。今後は光ファイバーを2km以上に拡張し、季節変動などによる工場全体の温度ムラの測定を実施していく予定である。



(a) 工場内天井への光ファイバー敷設



(b) 工場内の分布温度測定結果 (一例)

図4 工場内における分布光ファイバー温度センシング事例

## まとめ

OKI独自の新技术「SDH-BOTDR方式」を用いた分布光ファイバー温度センサーについて述べた。光ファイバーセンサーは測定領域を連続的に測定できるため、これまでのポイントセンサーとは異なり、様々な付加価値を提供できると考えられ、また従来にない高速なリアルタイム測定を特長とした付加価値の創出や適用領域の拡大を目指す。今後は、得られたセンシングデータを分析及び見える化し、システムとして構築することが重要である。 ◆◆

## 参考文献

- 1) 保立和夫、村山英晶：光ファイバーセンサー入門、光防災センシング振興協会、pp.18-27、2012
- 2) 佐藤弘之：ソリューションプラント活用が急速に広まる光ファイバー温度センサーとその実践例、計装、Vol. 57、No. 4、pp. 59-64、2014

3) 小泉健吾、村井仁：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、OKIテクニカルレビュー 第226号、Vol. 82、No. 2、2015

4) K. Koizumi et al.: High-speed distributed strain measurement using Brillouin optical time-domain reflectometry based-on self-delayed heterodyne detection, ECOC2015, pp. 1-7, 2015

5) T. Kurashima et al.: Brillouin optical-fiber time domain reflectometry, IEICE Trans. Commun., Vol. E76-B, No. 4, p. 382, 1993

## ● 筆者紹介

山口徳郎：Tokuo Yamaguchi. 情報通信事業本部 基盤技術センター 先端技術開発部

小泉健吾：Kengo Koizumi. 情報通信事業本部 基盤技術センター 先端技術開発部

## TiPO 【基本用語解説】

### 光ファイバー中の散乱

光ファイバー内での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。

### BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)

ブリルアン光時間領域反射測定法は、光ファイバーに光パルスを入射したときに発生する後方散乱光の1つである「ブリルアン散乱光」の周波数が温度や歪みに比例して変化するという特性を利用した光ファイバーセンシング方式。