

## 分布型光ファイバーセンサーの最新展開と課題

水野 洋輔・中村健太郎

(東京工業大学)

### はじめに

ビルやトンネル内壁、橋梁やダム、パイプライン、さらには飛行機の翼や風車の羽根など、高度経済成長期に建設されたインフラなどの経年劣化や自然災害による損傷が大きな社会問題となっている。そこで、これらの構造物の歪み(ひずみ=伸び)や温度、圧力、振動などの状態を監視するシステムとして、光ファイバーセンサーの重要性が高まっている。

光ファイバーセンサーは、大きく単点型・多点型・分布型の3種類に分類される。単点型は、光ファイバー端面など、光ファイバー上の1か所でのみセンシングができる方式である。多点型は、光ファイバーに沿った複数の箇所でのセンシングができる方式であり、典型例として、複数のファイバーブラッググレーティング(FBG)による計測が挙げられる。これらに対し、分布型は、光ファイバーに沿った任意の位置でセンシングができる方式である。3つの方式はそれぞれ一長一短であり、どの方式が絶対的に優れているというものではないが、本稿では、計測の「死角」がないという意味で大きな利点を有する分布型の光ファイバーセンサーに注目する<sup>1)</sup>。

分布型光ファイバーセンサーの動作原理となりうる光の散乱現象としては、レイリー散乱やラマン散乱、そして、ブリュアン散乱が知られている。レイリー散乱を用いた分布センサーは、人間の指紋のような散乱パターンが歪みや温度に比例して波長シフトすることを利用したものが多い。米国 Luna 社を中心に開発が進んでおり、mm オーダーの空間分解能、かつ、高い歪み・温度分解能での測定が実証されている<sup>2)</sup>。現状では、測定レンジが比較的小さいこと(数 10 m 程度)と、装置がきわめて高価であることが課題である。一方、ラマン散乱を用いた分布センサーは、その反射パワーが温度に依存することを利用するものが多い。多くの国内外の企業が開発を進めており、例えば横河電機は、測定レンジ数 10 km、空間分解能 1 m で、高い温度分解能を有するシステムを製品化している(DTSX3000)<sup>3)</sup>。しかし、ラマン散乱は歪みに対しては顕著

な依存性を示さないため、歪みの分布測定に利用することは困難である。

本稿では、ブリュアン散乱を用いた分布型光ファイバーセンサーについて、その基本から最新の展開や今後の課題までを紹介する。

### 1. ブリュアン散乱とは

物質中には、熱振動によって常に密度のゆらぎが生じており、これは超音波(音響フォノン)となって伝搬する。これを光散乱法によって測定することで、広い周波数帯域にわたる超音波の伝搬を測定することができる。この音響フォノンによる光の散乱現象がブリュアン散乱である<sup>4)</sup>。一般に、ブリュアン散乱測定は、人工的に音波を励振することが困難な高周波領域において特に重要な音波測定手段となる。

ブリュアン散乱光は伝搬するフォノンによって散乱されるためにドップラーシフトを受け、ちょうどフォノン周波数分だけ光の周波数がシフトする。この過程は、量子力学的にはフォノンの吸収・放出に伴う光(フォトン)エネルギーの増加・減少と捉えることもできる。この周波数変化量 $f_B$ をブリュアン周波数シフト(BFS)とよび、光ファイバー中では、 $f_B = 2n v_A / \lambda$ で与えられる。ここで、 $v_A$ は媒質中の音響フォノンの速度、すなわち音速である。光ファイバー中の BFS は一般に GHz オーダー(通信波長帯におけるシリカ光ファイバーの BFS は 10.9 GHz 程度)であり、光の周波数(>100 THz)に対してきわめて低い。周波数が下がる成分をストークス成分、周波数が上がる成分をアンチストークス成分とよぶ。一般には、ストークス成分のほうがアンチストークス成分よりも支配的である。

BFS は、光ファイバーに印加された歪みや温度変化に、ほぼ線形に依存する。例えば、シリカ光ファイバー中の BFS は、歪みに対しては+580 MHz/%<sup>5)</sup>、温度に対しては+1.18 MHz/K<sup>6)</sup>で変化する。これは、音速 $v_A$ を決定するヤング率や密度、屈折率が歪みや温度に依存することに起因する。この性質を用いれば、測定した BFS を光ファイ

バーに印加されている歪み・温度の情報に読み替えることができる。これがブリュアン散乱を用いた歪み・温度センシングの基本原則である。散乱光のパワーが温度に依存するラマン散乱に比べ、散乱光の周波数が歪みと温度に依存するブリュアン散乱に基づくセンサーは、予期せぬ光損失の影響を受けにくいという意味で、安定した動作が可能である。

## 2. ブリュアン散乱に基づく分布型センサー

### 2.1 反射計と解析法

光ファイバー中のブリュアン散乱を用いた分布型センサーは、測定ファイバーの片端からのみ光を入射する「反射計」と、両端から光を入射する「解析法」の2種類に大別される。解析法は、対向伝搬する光の相互作用に基づく誘導散乱への遷移により、比較的大きなブリュアン散乱信号が得られるのが利点である。しかし、測定ファイバーが1か所でも破断するだけで、その全体が測定不能になってしまう。これに対し、反射計には、構造物への埋め込みが容易、かつ測定中にある部分が破断してもその箇所までは正しく測定を継続することができるという利点がある。しかし、一般には誘導散乱を用いることは困難であり、微弱なブリュアン散乱信号を用いる必要がある。このように、反射計と解析法は一長一短であり、計測対象に応じて使い分けられる。また、両者ともに、位置分解手法によってさらに細かく分類される。おもな方式は、光時間領域法、光周波数領域法、そして、光相関領域法の3種類である。以下、それぞれの方式について概説する。

### 2.2 光時間領域法

光時間領域法は、光パルス法ともよばれる。一般に、光パルスをファイバーに入射すると、その各位置から異なる時間でブリュアン散乱光が戻ってくる。よって、光パルスを入射してから散乱光が戻ってくるまでの時間情報を距離情報に読み替えることができる。測定ファイバーの片端のみから光を入射する構成をブリュアン光時間領域反射計 (BOTDR)<sup>7)</sup>、両端から光を入射する構成をブリュアン光時間領域解析法 (BOTDA)<sup>8)</sup> とよぶ。

光時間領域法では、空間分解能は入射する光パルスの幅に比例するため、基本的にはパルス幅を短くすることで高い空間分解能を得ることができる。しかし、パルス幅が短すぎるとブリュアン散乱スペクトル (BGS) の線幅が広がり、BFSの検出が困難になる。その結果、温度や歪みの測定精度が劣化するため、基本的な実験系ではパルス幅を10 ns程度以下には短くすることができない。これは、空間分解能1 m程度に相当する。また、散乱光を多数回積分

する必要があるため、測定速度も比較的遅い。しかし、近年のBOTDAの性能向上は著しく、cmオーダーの空間分解能やリアルタイム分布測定が実現されている (次章を参照)。

### 2.3 光周波数領域法

光周波数領域法では、測定ファイバーに入射する連続光の周波数を掃引して周波数応答を計測し、その結果を逆フーリエ変換することで歪みや温度の分布を得る。測定ファイバーの片端のみから光を入射する構成をブリュアン光周波数領域反射計 (BOFDR)<sup>9)</sup>、両端から光を入射する構成をブリュアン光周波数領域解析法 (BOFDA)<sup>10)</sup> とよぶ。

これらのシステムは、ベクトルネットワークアナライザーなどの高価な機器が必要となり、信号処理のため測定時間も長くなる傾向にある。しかし、空間分解能を高くしてもBGSの線幅が広がらないという利点を持ち、比較的高い空間分解能が実現されている。

### 2.4 光相関領域法

光相関領域法では、連続光の相関 (コヒーレンス) を制御して位置分解を実現する。測定ファイバーの片端のみから光を入射する構成をブリュアン光相関領域反射計 (BOCDR)<sup>11)</sup>、両端から光を入射する構成をブリュアン光相関領域解析法 (BOCDA)<sup>12)</sup> とよぶ。

光相関領域法では、レーザーの出力光の中心周波数に正弦波変調を施す。BOCDAの場合、レーザーの出力光をポンプ光とプローブ光に分岐させ、両光を測定ファイバー中で対向伝搬させる。プローブ光の中心周波数は、BFS分だけ下げしておく。すると、測定ファイバー中には、両光の周波数差が時間的に変動しない (両光の時間平均的な相関が高い) 箇所が生じる一方、それ以外の領域では両光の周波数差は時間的に変動する (両光の時間平均的な相関が低い)。ここで、相関が高い箇所を「相関ピーク」とよぶ。いま、光周波数は正弦波変調されているので、相関ピークは周期的に立ち並び、その間隔は変調周波数に反比例する。これを利用し、測定ファイバー中にただ1つだけ相関ピークが立つように調整すれば、相関ピークに対応した位置での誘導ブリュアン散乱信号のみが抽出できる。さらに変調周波数を掃引することで、相関ピークを測定ファイバーに沿って移動させ、BGSやBFSの分布情報を得ることができる。BOCDRの場合も同様に、測定ファイバー中の特定の位置の自然ブリュアン散乱信号のみを参照光とのビート信号として抽出することができる。

光相関領域法は、mmオーダーのきわめて高い空間分解能を有する。また、光ファイバーの任意の位置で高速測定が可能であり (ランダムアクセス性)、その他の手法のよ

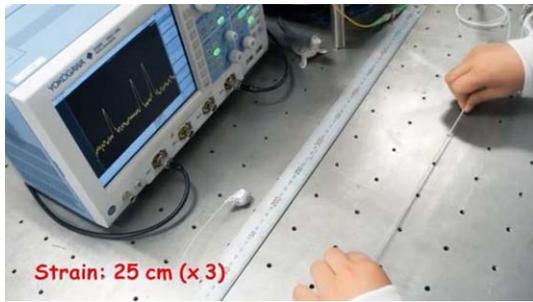


図1 光ファイバーの3か所に同時に印加した歪みをリアルタイムに検出している様子。公開中の動画も参照ください (<https://youtu.be/0TKUivvYbH0>)。

うに、ある特定の箇所の歪みを知りたいときに、時間をかけて全長にわたる歪み分布を取得する必要はない。さらに、BOCDRは高額な光学変調器を必要としないため、比較的 low コストで実装可能である。しかし、光相関領域法の基本的な構成では、測定レンジが隣接する相関ピーク間の距離に制限され、空間分解能と測定レンジがトレードオフの関係にあるという欠点をもつ。そのため、時間ゲート法や二重変調法によって、この制限を緩和する取り組みが進んでいる。光相関領域法も近年の性能向上は著しく、従来大きな欠点とされてきた比較的遅い動作速度も克服され、すでにリアルタイム分布測定が実現されている(次章を参照)。

### 3. 最新の展開

まずは、各種方式のシステム面での進展について紹介する。従来のBOCDRは、各測定位置において周波数を掃引することによりBGSを取得していたため、サンプリングレートが20 Hz未満に制限されていた。Mizunoら<sup>13)</sup>は、BOCDRにおいて、周波数領域の信号であるBGSを時間領域に変換し、位相検波を適用することで、サンプリングレートを100 kHz以上にまで劇的に向上させた。これにより、図1に示すように、片端光入射の構成で初めてリアルタイム分布測定を実証した<sup>\*1</sup>。また、BOCDAは空間分解能と測定レンジがトレードオフの関係にあるのが大きな課題であったが、Denisovら<sup>14)</sup>は、位相変調に基づくBOCDAに時間ゲート法を適用することで、その空間分解能と測定レンジの比を210万まで向上させた。実験では、17.5 kmの光ファイバーの端面付近で8.3 mmの歪み印加区間を検出することに成功した。一方、BOTDAの高速化の研究も進んでおり、2017年に、Kitoら<sup>15)</sup>による周波数掃引プローブ光を用いて時間領域でBGSを取得する方式に

より、10 kHzのサンプリングレートが報告された。その後、Zhouら<sup>16)</sup>は、周波数アジャイル技術により生成した光チャープチェーンプローブ光を用いることで、MHzオーダーのサンプリングレートを達成した。さらに、Sotoら<sup>17)</sup>は、BOTDAによって得られたBGS分布を画像と見なし、画像処理分野で培われた雑音除去技術を適用することで、BFS分布計測の信号対雑音比(SNR)を劇的に向上させた。加えて、BGS分布の時間変化を動画と見なし、動画特有の雑音除去技術を適用する手法も提案した。

また、通常の単一モードシリカ光ファイバー以外の特殊光ファイバーを用いてブリュアンセンサーの性能向上を図る取り組みも進んでいる。例えば、大容量通信分野で多用されているマルチコア光ファイバーは、そのブリュアン散乱が初観測<sup>18)</sup>されて以来、三次元形状計測や歪みと温度の同時分離計測への応用が精力的に研究されている<sup>19)</sup>。また、サファイア光ファイバーは、BFSが温度にほぼ依存せず、温度の補償をしなくても正しい歪み情報が得られることが報告された<sup>20)</sup>。テルライト光ファイバーやカルコゲナイド光ファイバーは、ブリュアン利得係数が高く、センサーのSNR向上に役立つ可能性がある<sup>21)</sup>。また、最近注目を集めているのがプラスチック光ファイバー(POF)である。POFは通信波長帯でのBFSが2.8 GHzと低く<sup>22)</sup>、その歪みや温度に対する依存性は、 $-122 \text{ MHz}/\%$ 、 $-4.09 \text{ MHz}/\text{K}$ であり、温度に対して高感度であると報告されている<sup>23)</sup>。POF中のブリュアン散乱に基づく分布測定は、すでに国内外の3つの研究グループにより実証されている<sup>24-26)</sup>。また、あらかじめ引き延ばして細径化させたPOFは、30%以上もの巨大な歪みに対しても、BFSと歪みが1対1対応することも判明した<sup>27)</sup>。通常のシリカガラス光ファイバーが3%程度の歪みで破断することを考えると、ブリュアンセンサーの歪みダイナミックレンジの向上につながるかと期待される。

最後に、導波音響波型ブリュアン散乱(GAWBS)を用いたセンサーについて紹介したい。これまで言及してきたブリュアン散乱は、すべて後方散乱である。これに対し、GAWBSとは、光ファイバーの径方向に誘起される横波音響波と光波の相互作用により生じる前方散乱であり、前方ブリュアン散乱ともよばれる。GAWBSを用いたセンシングでは、歪みや温度のみならず、通常のブリュアン散乱では検出困難な屈折率や音響インピーダンスなどの光ファイバーの外側の物理量の情報が得られるのが最大の特長である。また、GAWBSによる位相変調周波数は数百 MHz以

\*1 動画を、<https://youtu.be/0TKUivvYbH0>にて公開中。

下の範囲なので、測定に際して高価な高周波装置を必要としないという利点もある。しかし、GAWBSは前方散乱であることから、分布測定は困難であるとされてきた<sup>28)</sup>。しかし、最近、2つのグループからGAWBSスペクトルを間接的ながらも分布的に取得する手法が提案された。すなわち、GAWBSの情報を、Bashanら<sup>29)</sup>はレイリー後方散乱に乗せて、Chowら<sup>30)</sup>はブリュアン後方散乱に乗せて、それぞれ光時間領域法を用いて分布的に測定することに成功した。前者では測定レンジ3 kmと空間分解能100 m、後者では測定レンジ730 mと空間分解能15 mがそれぞれ達成されている。また、光相関領域法によるGAWBS分布センサーの研究も進んでおり<sup>31)</sup>、今後の進展が期待される。

#### 4. 今後の課題

前章で述べたように、近年の分布型光ファイバーセンサーの性能進化は著しく、空間分解能や測定レンジ、動作速度、ダイナミックレンジなどが劇的に向上している。しかし、このようなわかりやすい性能指標の陰に隠れ、ともすると軽視されがちなのが精度 (precision) である。しかし、本技術の実用化・製品化を考えると、むしろ精度こそ最重要な性能指標ともいえるのではないだろうか。お金を出して、正確に測れないセンサー、再現性のないセンサーを購入する物好きは少ないだろう。位置精度も重要であるが、ここでは歪みや温度の測定精度に注目したい。一般に、ブリュアン散乱を用いたセンサーの精度は、FBGセンサーよりも1桁以上低いといわれている。しかし、そもそも分布型光ファイバーセンサーにおける精度の定義は確定していない。歪みや温度をどのような条件でどのように測ったときの何の評価値を精度と定義するのか、現状では論文ごとにもまちまちである。また、当然のことながら、精度は平均回数や信号処理の度合い (測定速度に直結) のみならず、空間分解能や測定位置などにも大きく依存する。あるシステムでは、歪み精度が歪みの大きさに依存することも知られている。このように一筋縄ではいかない精度をどのように統一的に扱い、ユーザーから見えるようにしていくかが、大きな課題であるように感じる。また、精度と並んで確度 (accuracy) もよく知られた性能指標であるが、論文中で定量評価されることは少ない (precisionとaccuracyを混同している論文は多い。分野によっては、用語を逆の意味で使うこともあるようだ)。確度は、計測値が真の値に近いことを示す指標である。ただ、確度が低くても精度が高ければ、補償するすべはいくらでもある気がする。やはり重要なのは精度 (再現性) だろう。

また、光ファイバーセンサーの性能がいかに高まろうと

も、加えてそれが小型化され可搬性が格段に向上しようとも、それを本当に現場に適用できるかは別問題である。例えば、光ファイバーセンサーを用いて橋梁の歪みを監視しようと思ったとき、光ファイバーをどのように設置するのが最善なのだろうか。内側に埋め込むのか、外側に貼り付けるのか。どのように固定するのか。光ファイバーの被覆はどうするのか。構造物の変形と光ファイバーの変形は一致しているのか。昼夜や季節による温度変動はどう補償するのか。光ファイバーの敷設コストをどう考えるのか。ほかにも泥臭い問題がたくさんある。これまでに、実構造物に光ファイバーセンサーを適用したという数多くの報告例はあるものの、一部を除いて、「とりあえずこの条件でやってみたらこんな結果になった」というものが多く、どのようにするのが本当に最適なのかを突き詰める状況には達していないといえる。さらに多くの適用例を積み重ね、測定で得られるものを使う側との議論を重ねる必要があるだろう。何をどのくらいの精度で測定すればよいのかあまり明確になっていない分野もある。また、多くの道路、橋梁、河川などは地方自治体が管理しており、コスト面の要求も厳しい。しかし、あらゆる自然災害に見舞われる日本だからこそ、このような減災技術に投資をして育て、世界に供給できるようになるべきではないだろうか。そのためにも、より実質的な産学官連携が必要になっていると考えられる。

#### おわりに

本稿では、ブリュアン散乱を用いた分布型光ファイバーセンサーの基本から最新の展開および今後の課題までを紹介した。本分野は、世界中の研究者間での競争が激しく、今後も優れた新技術が速いペースで登場してくると期待される。また、そのような技術を現場で活用しようとする取り組みについても、ますますの進展が期待される。これからも業界全体を注視していきたい。

最後に、この場をお借りして、光ファイバーセンサー国際会議 (International Conference on Optical Fiber Sensors; OFS) の紹介をさせていただく。OFSは、光ファイバーセンサーおよび関連技術を対象とした世界で最も権威ある国際会議であり、基礎理論から実応用まで幅広い分野に関する最新の研究成果が報告、議論される。1983年に初めてロンドンで開催されて以来、1年半ごとに米大陸、欧州、アジア・オセアニアを巡回して開催されている。本会議の大きな特徴は、参加者全員が全講演の聴講と議論に参加できるように、シングルセッションを踏襲していることである。第26回OFS (OFS-26) は2018年9月24日から28日

にかけての5日間、スイス連邦工科大学ローザンヌ校にて開催された。学生148名を含む600名の参加者があり、371件の論文が発表された。本稿で紹介した最新展開の一部も、本会議で発表されたものである。

ここでOFSの紹介をさせていただいたのは、2021年秋に開催されるOFS-28が日本(横浜)で開催されるためである。著者らを含むOFS日本委員会メンバーが準備を進めており、日本からの参加者を増やすことで会議の活性化と本分野での日本のプレゼンス向上につなげたいと考えている。また、次回OFS-27は2020年6月8日から12日にかけて米国バージニア州のアレクサンドリアで開催される。2021年の日本開催の成功につなげるため、まずはOFS-27へのご参加を検討いただければ幸いである。

## 文 献

- 1) A. H. Hartog: *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors* (CRC Press, Boca Raton, 2017).
- 2) ODiSI at Luna: <https://lunainc.com/product/odisi/>
- 3) Fiber-optic temperature sensors at Yokogawa Electric: <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-platforms/field-instruments/fiber-optic-sensor-j/>
- 4) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed. (Academic Press, San Diego, 1995).
- 5) T. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **1** (1989) 107-108.
- 6) T. Kurashima, T. Horiguchi and M. Tateda: *Appl. Opt.*, **29** (1990) 2219-2222.
- 7) T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Izumita, S. Furukawa and Y. Koyamada: *IEICE Trans. Commun.*, **E76-B** (1993) 382-390.
- 8) T. Horiguchi and M. Tateda: *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 1170-1176.
- 9) A. Minardo, R. Bernini, R. Ruiz-Lombera, J. Mirapeix, J. M. Lopez-Higuera and L. Zeni: *Opt. Express*, **24** (2016) 29994-30001.
- 10) D. Garus, K. Krebber, F. Schliep and T. Gogolla: *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1402-1404.
- 11) Y. Mizuno, W. Zou, Z. He and K. Hotate: *Opt. Express*, **16** (2008) 12148-12153.
- 12) K. Hotate and T. Hasegawa: *IEICE Trans. Electron.*, **E83-C** (2000) 405-412.
- 13) Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, K. Y. Song and K. Nakamura: *Light: Sci. Appl.*, **5** (2016) e16184.
- 14) A. Denisov, M. A. Soto and L. Thévenaz: *Light: Sci. Appl.*, **5** (2016) e16074.
- 15) C. Kito, H. Takahashi, K. Toge and T. Manabe: *J. Lightwave Technol.*, **35** (2017) 1738-1743.
- 16) D. Zhou, Y. Dong, B. Wang, C. Pang, D. Ba, H. Zhang, Z. Lu, H. Li and X. Bao: *Light: Sci. Appl.*, **7** (2018) 32.
- 17) M. A. Soto, J. A. Ramirez and L. Thévenaz: *Nat. Commun.*, **7** (2016) 10870.
- 18) Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, Y. Wada and K. Nakamura: *Sci. Rep.*, **5** (2015) 11388.
- 19) Z. Zhao, M. A. Soto, M. Tang and L. Thévenaz: *Opt. Express*, **24** (2016) 25211-25223.
- 20) P. Dragic, T. Hawkins, P. Foy, S. Morris and J. Ballato: *Nat. Photonics*, **6** (2012) 627-633.
- 21) Y. Mizuno, Z. He and K. Hotate: *Opt. Commun.*, **283** (2010) 2438-2441.
- 22) Y. Mizuno and K. Nakamura: *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 021103.
- 23) Y. Mizuno and K. Nakamura: *Opt. Lett.*, **35** (2010) 3985-3987.
- 24) N. Hayashi, Y. Mizuno and K. Nakamura: *J. Lightwave Technol.*, **32** (2014) 3999-4003.
- 25) Y. Dong, P. Xu, H. Zhang, Z. Lu, L. Chen and X. Bao: *Opt. Express*, **22** (2014) 26510-26516.
- 26) A. Minardo, R. Bernini and L. Zeni: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **26** (2014) 387-390.
- 27) Y. Mizuno, N. Matsutani, N. Hayashi, H. Lee, M. Tahara, H. Hosoda and K. Nakamura: *Opt. Express*, **26** (2018) 28030-28037.
- 28) Y. Tanaka, H. Yoshida and T. Kurokawa: *Meas. Sci. Technol.*, **15** (2004) 1458-1461.
- 29) G. Bashan, H. H. Diamandi, Y. London, E. Preter and A. Zadok: *Nat. Commun.*, **9** (2018) 2991.
- 30) D. M. Chow, Z. Yang, M. A. Soto and L. Thévenaz: *Nat. Commun.*, **9** (2018) 2990.
- 31) N. Hayashi, Y. Mizuno, K. Nakamura, S. Y. Set and S. Yamashita: *Opt. Express*, **25** (2017) 2239-2244.