

# 任意波形による周波数変調と動画像処理技術に基づく 分布型光ファイバセンサの性能進化

研究代表者

水野 洋輔

横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授

## 1 はじめに

長い光ファイバに沿った任意の位置で歪（ひずみ）や温度を測定できる「分布型光ファイバセンサ」（図 1）は、社会インフラおよび情報通信網を監視して防災・減災につなげるべく、世界中で精力的に研究がなされている。我々が 10 年以上にわたって培ってきたオリジナル技術「ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）」は、光ファイバの片端からの光入射で動作し、世界最高の空間分解能と動作速度を兼ね揃える唯一の分布測定技術である[1,2]。BOCDR では、光ファイバ中のある特定の位置からのブリルアン散乱信号を選択的に抽出するために、光源の出力光に対して周波数変調を印加する。

従来の全ての BOCDR は、「光周波数変調の波形は正弦波である」という前提で実装および理論構築がなされていた。しかし、これは正弦波変調の実装の容易さによるものに過ぎず、システムの雑音低減や性能向上の観点からは最適な波形とはいえなかった。そこで、本研究の第一の目的は、「BOCDR における光周波数変調の波形を正弦波に限らず任意形状まで拡張することで、各種性能（空間分解能や測定可能距離、測定可能な最大歪の大きさ（歪ダイナミックレンジ）など）を向上させること」である。

また、提案以来 8 年間、BOCDR のサンプリングレートは 19 Hz が最高であり、結果として分布測定に比較的長時間（数 10 秒～数分）がかかるという問題があった。そこで、我々は、ブリルアン散乱スペクトル（BGS）の形状解析に基づく「位相検波 BOCDR」[3]を提案し、世界最速となる 100 kHz を超えるサンプリングレートを達成した。しかし、位相検波 BOCDR では、BGS を疑似的な正弦波と見なす高速信号処理の代償として、測定可能な歪ダイナミックレンジが 0.2%以下に限られていた。そこで、第二の目的は、「BOCDR の歪ダイナミックレンジを保持しながら、高速動作を達成すること」である。BGS からの歪算出プロセスを従来の位相検波から非逐次信号処理に変更し、動画像処理分野で成熟した雑音除去技術を適用することにより、歪ダイナミックレンジを保持しつつ、精度や安定性を向上させるとともに、現在の世界記録を超える高速動作を実現させるべく研究を進めている。

本報告書では、上記の 2 つの目的に向けて推進してきた研究を中心に、最新の成果について述べる。

## 2 研究成果

### 2-1 任意波形変調に基づく BOCDR の提案

#### (1) 研究の背景

BOCDR を含む相関領域法では、光源出力の周波数に変調を印加し、測定ファイバ中に「相関ピーク」を生成する[1,2]。この相関ピークからのブリルアン散乱信号を選択的に抽出することで、分布測定が可能となる。通常、周波数変調の波形としては、実装が容易な正弦波変調が用いられている。光周波数に正弦波変調を印加する手法としては、光源の駆動電流に正弦波変調を印加する「直接変調方式」が主流であった。これは、光源の出力周波数が駆動電流に依存する性質を用いたものであり、低コストでの実装が可能である。しかし、以下の 4 つの欠点も存在する。すなわち、(1) 高速かつ深い変調の印加に適したレーザを選定する必要がある、(2) 周波数と同時に光パワーの変調が不可避であり、性能が劣化する可能性がある、(3) 変調振幅が変調周波数に強く依存し、空間分解能が測定位置に大きく依存する、(4) 光源の特性により、印加可能な変調周波数が低く抑えられてしまう、の 4 点である。

このような直接変調方式の欠点を克服するため、我々は、電気光学変調器を用いて光周波数を変調する「外部変調方式」を提案し、特性評価を行った[4,5]。その結果、少なくとも直接変調方式の欠点のうち(1)(3)(4)

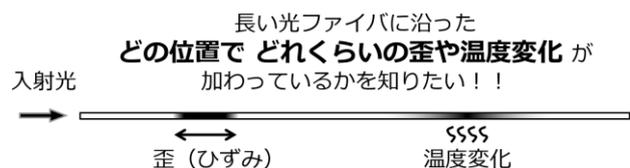


図 1. 分布型歪・温度センサの概念.

を緩和できることが確認された。また、外部変調方式による BOCDR の基本的な動作も確認した。ここで、外部変調方式の特徴を活かすことで、正弦波に限らない任意波形での光周波数変調に基づく相関領域法の実装が可能となる。これまでも、相関ピークのサイドロープの影響を低減するために、アポダイゼーションの原理に基づき正弦波をベースとした変調波形を用いた例は報告されているが、任意波形を視野に入れた周波数変調波形の設計はこれまでに報告がなかった。最適な変調波形を設計することによって、分布測定のパフォーマンスを向上できる可能性がある。しかし、従来の相関領域法における空間分解能の理論値は、正弦波変調を前提として導出されたものであり、任意波形変調における空間分解能は未解明であった。変調波形の最適化のためには、変調波形の「質」を定量化する指標が必須である。

そこで本研究では、任意波形変調に基づく相関領域法における空間分解能の指標をシミュレーションに基づいて解明した。種々の任意波形のうち、今回はチャープ波形を特徴づけるいくつかのパラメータを変化させることで多様な波形を生成した。

## (2) シミュレーション結果

シミュレーションで用いた各用語や記号の定義、各種条件、途中結果などの詳細は、煩雑となるので本報告書では省略するが、最終的に得られた裾野の凸度と空間分解能の関係を図2に示す。また、ほぼすべての任意波形に共通して、凸度が大きいほど空間分解能が劣化しており、その依存性はおおよそ線形であった。この直線を「空間分解能限界線」と呼ぶことにする。以下、特徴的な波形ごとに結果と考察を述べる。

- (1) 正弦波変調 ( $L_{FUT} = 100 \text{ m}, 10 \text{ m}$ ) : 測定ファイバ (FUT) 長が 100 m と 10 m の場合の空間分解能はお互いほぼ一致した (データ A1~A4)。変調周波数 1 MHz、変調振幅 2.0 GHz の正弦波で変調した場合、約 0.5 m の空間分解能が得られたが、これは従来の式による理論分解能 (0.48 m) とよく一致した。
- (2) 正弦波変調 ( $L_{FUT} = 1 \text{ m}$ ) : 一部のデータ (A5) の空間分解能が限界線より劣化した。これらのデータは、従来の理論式による空間分解能が 1 m 程度のときに 1 m の FUT を観測するという、通常の運用では想定しづらい条件である。しかし、シミュレーション上では 0.4 m という従来の理論より高い、無意味ではない空間分解能が得られた。以上の正弦波変調で生成される実効範囲内のビートスペクト

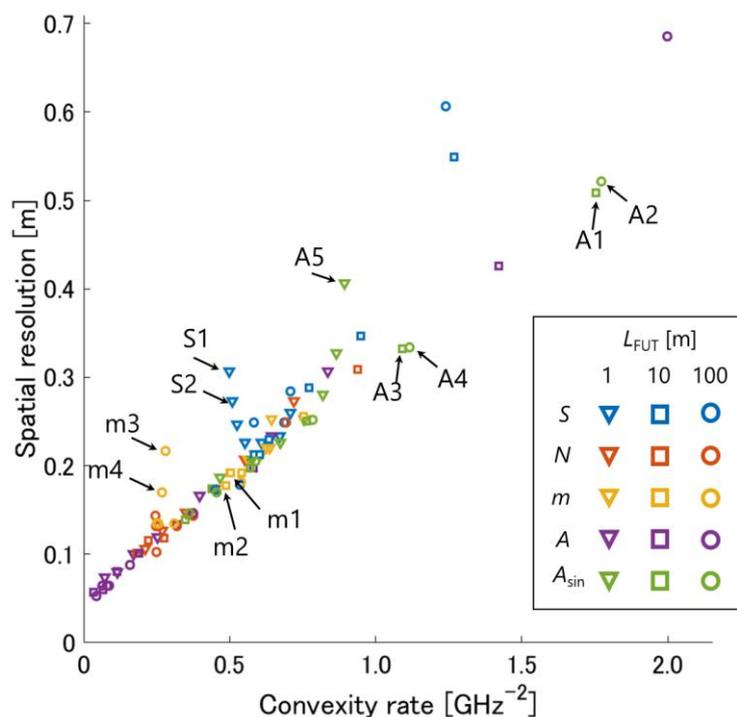


図2. シミュレーションで得られた裾野の凸度に対する空間分解能の依存性。

ルを調査したところ、FUT 長が 1 m の場合は、ビートスペクトルの中心近傍のみが実行範囲の大部分を占めた。そのため、拡散領域を前提として導出された従来の空間分解能の理論値と一致しないと考えられる。一方、FUT 長が 100 m の場合は、両側に隣接するビートスペクトルの中心近傍が観測されたが、実行範囲の端は分布測定への影響は比較的小さいため、従来の理論と合致する結果が得られたと考えられる。

- (3) **S** ( $L_{\text{FUT}} = 1 \text{ m}$ ) : 空間分解能が限界線の 2 倍程度に劣化していることが分かる ( $S_1, S_2$ )。この場合の変調波形と実効範囲内のビートスペクトルを調査したところ、これらの条件下では、スペクトルが十分に拡散されず、0 Hz 付近に大きな山が存在することがわかった。これが原因で、実際の雑音スペクトルのピークは、それを近似した 2 次関数のピークよりも高くなっていると考えられる。したがって、凸性の評価から予想される空間分解能よりも劣化したと考えられる。
- (4) **m** ( $L_{\text{FUT}} = 100 \text{ m}, 10 \text{ m}$ ) : FUT 長が 10 m の場合の空間分解能は限界線に近い値であるが ( $m_1, m_2$ )、100 m の場合は限界線の 2 倍程度に劣化している ( $m_3, m_4$ )。この場合の変調波形と実効範囲内のビートスペクトルを調査したところ、両者のビートスペクトルを比較すると、FUT 長が 10 m の場合に比べ、100 m の場合はスペクトルが十分に拡散されていない領域を含んでいた。このため、2 次関数による近似が適さず、凸性の評価から予想される空間分解能よりも劣化したと考えられる。

### (3) 考察と今後の展開

以上の結果を踏まえ、空間分解能を与える一般的指標について議論した。まず、定性的な議論のため、歪印加区間の中央におけるスペクトルについて考察する。観測される BGS 分布は真の BGS 分布とビートスペクトルの畳み込みで与えられる。いま、真の BGS 分布は、FUT 中央に長さ  $L_{\text{st}}$  の歪印加区間 (歪の大きさ  $\epsilon$ ) と、それ以外の無歪区間が構成する BGS 分布である。無歪区間のブリルアン周波数シフト (BFS) を  $BFS_0$ 、歪区間の BFS を  $BFS_0 + \Delta FS(\epsilon)$  とする。これにビートスペクトルが畳み込まれると、 $\Delta FS(\epsilon)$  を中心とするスペクトル (信号) に加えて、0 を中心とするスペクトル (背景光雑音) が出現する。観測されるのは背景光雑音と信号の合成スペクトルである。空間分解能の定義に照らして、合成スペクトルの最大値を与える周波数が  $\Delta FS(\epsilon)$  であるとき、歪が検知可能であると定義する。背景光雑音が比較的平坦であれば信号の測定に悪影響は少ないが、平坦性が損なわれる (凸度が大きくなる) と信号が検知困難になると考えられる。

最後に、より定量的な議論を行った。詳細は省略するが、空間分解能を与える一般的な指標、すなわち、信号と雑音を合成したスペクトルにおいて信号が雑音に埋もれない条件は、

$$L_{\text{st}} \geq \frac{\Delta F_s(\epsilon)^2 + \Delta v_s^2}{P_s} a \quad (1)$$

と表せることが明らかになった。本式より、空間分解能 ( $L_{\text{st}}$  の最小値) は凸度  $a$  に比例することがわかった。図 2 で、裾野の凸度に対する空間分解能の依存性がおおよそ線形になったのはこのためである。

以上より、BOCDR において、従来の正弦波に代わり、任意形状の波形で周波数変調を施した場合の空間分解能等の各種性能をシミュレーションと理論を通じて明らかにすることができた。最大の成果として、空間分解能が、ビートスペクトルの裾野の凸度に比例することを解明した。この結果は、正弦波変調を前提とした従来の空間分解能の理論とも整合するものであり、より一般的な空間分解能の指標を提示できたといえる。本評価指標はビートスペクトル形状に基づいているため、強度変調を伴うより複雑な変調手法に対しても同様に適用できると考えられる。今後は、これらの評価指標の妥当性を実験的に検証していく予定である。

## 2-2 歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の提案

### (1) 研究の背景

2008 年の提案以降、BOCDR の動作は電気スペクトラムアナライザ (ESA) における周波数掃引に律速され、実現可能なサンプリングレート (1 点における歪測定速度) は 20 Hz に届かず [1]、結果として分布測定に比較的長時間 (数 10 秒~数分) がかかるという問題があった。そこで、2016 年に、ESA による周波数掃引を撤廃した位相検波方式 [3] および傾斜利用方式 [6] という超高速 BOCDR を提案した。最高で 100 kHz という高いサンプリングレートを達成 [3] したものの、両方式ともに歪ダイナミックレンジ (測定可能な最大歪) が 0.2% 程度に制限されてしまうという問題があった [3, 6]。そこで本研究では、歪ダイナミックレンジの制限を撤廃した高速 BOCDR を提案する。最大 0.7% となる動的な歪を 10 kHz 程度の高いサンプリングレートで

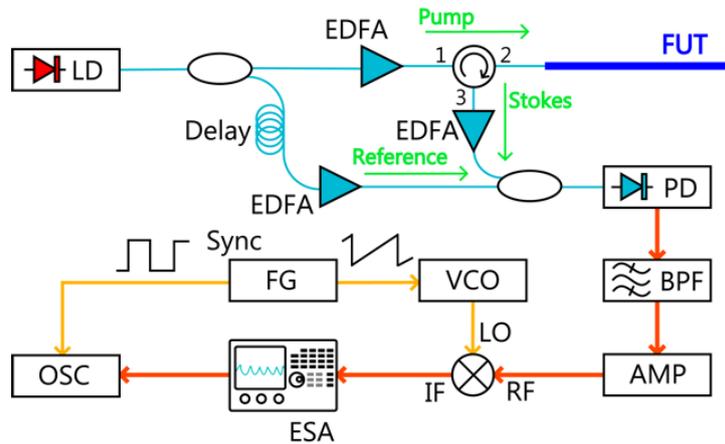


図 3. 歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の実験系。AMP: amplifier, BPF: band-pass filter, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test, IF: intermediate frequency, LO: local oscillator, OSC: oscilloscope, PD: photo diode, RF: radio frequency, VCO: voltage-controlled oscillator.

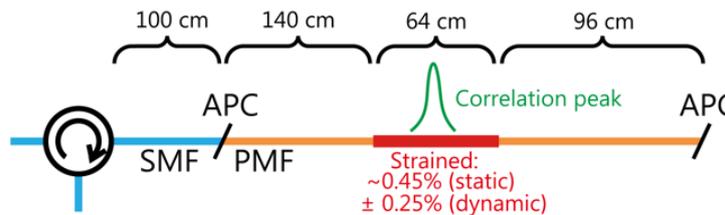


図 4. 振動検出の実験で用いた測定ファイバの構成。

検出することができた。

### (2) 実験系と動作原理

提案する高速 BOCDR の実験系を図 3 に示す。光学系は一般的な BOCDR と共通であり、1550 nm 帯のレーザの駆動電流に直接変調を印加し、光出力に対して周波数変調を施すことで、FUT 中に相関ピーク (=測定位置) を生成する。これを FUT 内で掃引し、BGS および BFS の分布を取得する[1,2]。本実験系の新規性は、BGS を取得するための信号処理系にある。まず、電圧制御発振器 (VCO) を用いて、周波数が高速に繰り返す掃引された電気信号を生成する。次に、これを BGS とミキシングし、ESA で観測、そのゼロスパン出力をオシロスコープで観測する。この一連の処理により、本来周波数領域であった BGS を時間領域に変換することができる。その結果、BGS のサンプリングレートの制限要因が、ESA の周波数掃引速度から VCO に印加する信号発生器の電圧掃引速度に移行され、高速測定が可能となる。

振動検出の実験で用いた FUT の構成を図 4 に示す。振動による偏波変動の影響を抑制するために、偏波維持光ファイバ (PMF; BFS = 10.79 GHz) を用いた。64 cm の区間に 0.45% の静的歪を印加した状態で、さらに  $\pm 0.25\%$  の動的歪 (40 Hz で正弦波振動) を印加した。変調周波数を 429.3 kHz とすることで、歪印加区間の中央に相関ピークを生成した。また、変調振幅は 4.9 GHz とした (理論空間分解能は約 50 cm)。

### (3) 実験結果

まず、FUT に歪を印加しない状態で、サンプリングレート (VCO に印加する電圧掃引信号の繰り返し周波数) を振って、時間領域で観測される BGS の形状の変化を調査した。サンプリングレートが 400 Hz, 2 kHz, 10 kHz, 50 kHz のときの BGS を図 5(a)-(d) にそれぞれ示す。縦軸は正規化した。400 Hz および 2 kHz のときは BGS の形状が明瞭であったが、10 kHz ではノイズが重畳し始め、50 kHz ではピーク検出が困難となった。

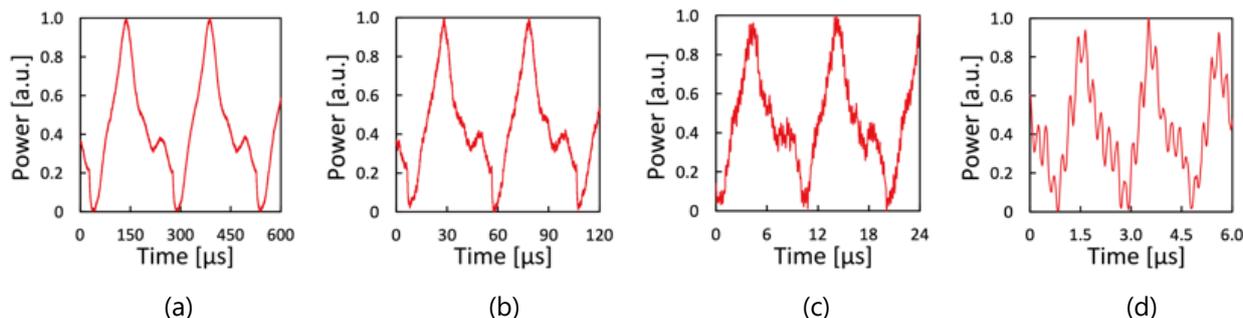


図 5. サンプリングレートが (a) 400 Hz、(b) 2 kHz、(c) 10 kHz、(d) 50 kHz、のときの正規化された時間領域 BGS の測定結果。

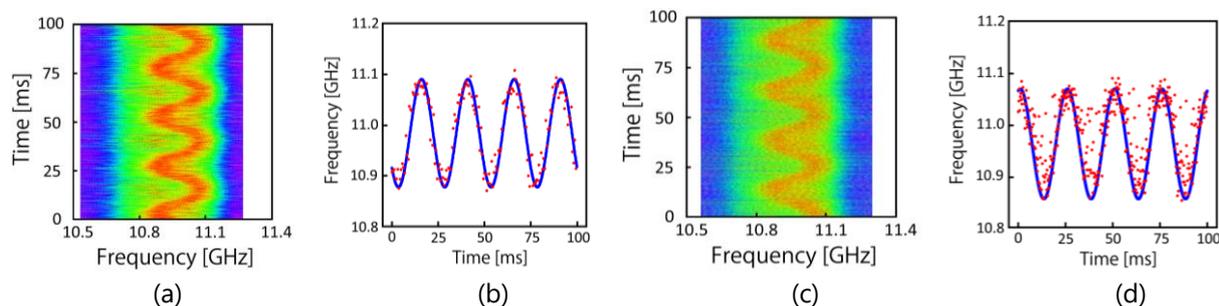


図 6. サンプリングレートが (a,b) 8 kHz、(c,d) 20 kHz、のときの (a,c) BGS、および、(b,d) BFS の時間変化の測定結果。青い実線は理論曲線を示す。

このノイズはサンプリングレートに関わらず一定の周期を有していた。この周期は約 430 kHz であり、変調周波数と一致したことから、レーザ光の周波数変調に伴う意図しない強度変調の影響であると推測される。このノイズは、直接変調方式かつ BGS 全体を取得する高速 BOCDR では本質的といえる。

次に、40 Hz の振動検出を実証した。サンプリングレートは、上記のノイズが十分に小さいと考えられる 8 kHz、および、比較のために 20 kHz に設定した。BGS および BFS の時間変動を図 6(a)–(d) に示す。BGS の最大値を与える周波数を取得し 5 回平均した点を BFS としてプロットした。青線は理論曲線である。振動 1 周期のプロット点数は、8 kHz のとき 40 点、20 kHz では 100 点であることから、確かに設定通りのサンプリングレートが達成できていることが確認できた。8 kHz のときに比べて 20 kHz のときの歪の測定誤差が大きいのは、先述のノイズの影響であると考えられる。

#### (4) ノイズ抑制の試行

最後に、ノッチフィルタ（帯域除去フィルタ）を利用して強度変調に起因するノイズの影響を抑制し、高速 BOCDR による振動測定の信号対雑音比（SNR）の向上可能性を検証した。

従来の実験系に対して、電気信号処理にノッチフィルタ（BEF）を追加した。その際、BEF の中心周波数は、強度変調に起因するノイズの周波数、つまり、光源の変調周波数と一致させた（137.5 kHz）。230 cm の区間に 0.70% の静的歪を印加した状態で、さらに ±0.16% の動的歪（40 Hz で正弦波振動）を印加した。変調振幅は 5.15 GHz とした。また、ノイズ抑制の効果を明瞭に観測するため、変調周波数は従来よりも低い 137.5 kHz とした（このとき歪印加区間の中央に相関ピークが生成されるよう、参照光路中の遅延ファイバの長さを調整した）。その結果、理論空間分解能は約 140 cm となった。

まず、FUT に歪を印加しない状態で、BEF によるノイズ抑制の効果を検証した。サンプリングレートが 10 kHz および 20 kHz のときの時間領域 BGS を 図 7(a),(b) および 図 7(c),(d) にそれぞれ示す ((a),(c) は BEF なし、(b),(d) は BEF あり)。縦軸は、描画範囲内の最大・最小値で正規化した。BEF がない(a),(c)では強度変調に起因する周期的なノイズが重畳した。ノイズの周波数は 137.5 kHz であり、変調周波数と等しいことが確認された。一方が、BEF を適用した (b),(d) では、ノイズが抑制され、BGS の形状が明瞭となった。

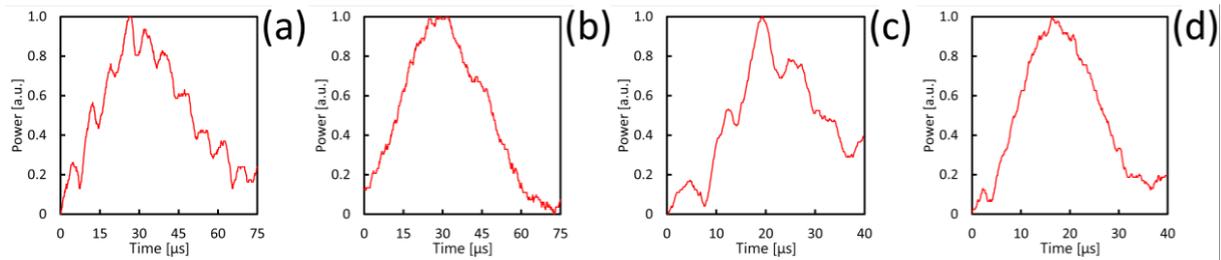


図 7. サンプルングレートが (a,b) 10 kHz、(c,d) 20 kHz、のときの正規化された時間領域 BGS の測定結果。(a,c) BEF 適用なし、(b,d) BEF 適用なし。

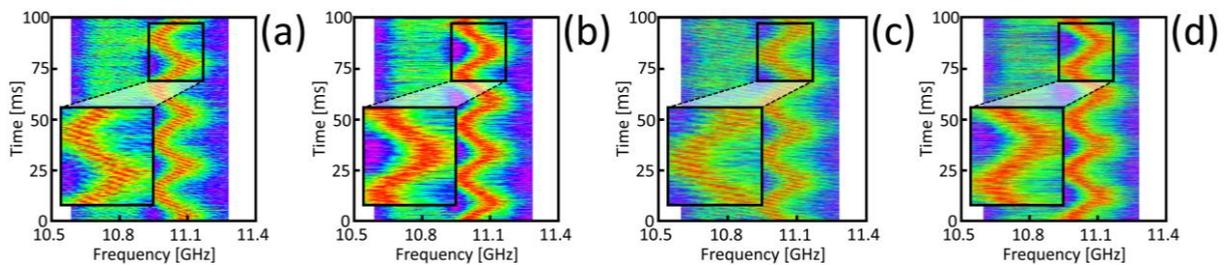


図 8. サンプルングレートが (a,b) 10 kHz、(c,d) 20 kHz、のときの BGS の時間変化の測定結果。(a,c) BEF 適用なし、(b,d) BEF 適用なし。インセットは一部の拡大図を示す。

次に、40 Hz の振動検出における BEF の有用性を検証した。サンプルングレートが 10 kHz および 20 kHz のときの BGS の時間変動を図 8(a),(b) および図 8(c),(d) にそれぞれ示す ((a),(c) は BEF なし、(b),(d) は BEF あり)。どの条件においても振動が検出されたが、BEF を適用しない(a),(c) では、強度変調に起因するノイズが細かい斜線となって現れた (変調周波数がサンプルングレートの整数倍となっていないために、ノイズの位相が時間的に移動することに起因)。一方で、BEF を適用した (b),(d) では、斜線が消えており、ノイズの抑制が確認された。

このように BEF は高速測定における SNR を向上させるのに有用であることを示した。しかし、サンプルングレートがさらに高くなり変調周波数に近くなった場合、本手法は BGS 自体を抑制してしまうため、有効ではないと考えられる。今後、ノイズ抑制手法としての外部変調法[4,5]の有効性を検証していく。

### 2-3 電気スペクトラムアナライザを撤廃した簡素化 OCDR の提案

#### (1) 研究の背景

近年、光ファイバ通信が急激に広まると同時に、光ファイバ通信ネットワークの健全性を診断する技術が求められている。中でも、光リフレクトメトリは、FUT に沿った反射率の分布を計測する技術であり、ファイバ間の接続不良箇所や破断点の検出に用いられている。広く知られている光リフレクトメトリとして、光時間領域リフレクトメトリ (OTDR) [7] と光周波数領域リフレクトメトリ (OFDR) [8] が挙げられる。それぞれ、測定レンジが長い、空間分解能が高いなどの利点を有する一方、どちらもリアルタイム動作は困難であった。そこで、この欠点を克服するための手法として、光波コヒーレンス関数の合成法 (SOCF) に基づく光相関領域リフレクトメトリ (OCDR) が開発された[9]。OCDR は、ランダムアクセス性 (FUT の任意の位置で高速測定が可能) やリアルタイム動作性などのユニークな特長を有している。

標準的な OCDR では、FUT からの反射光あるいは参照光に対して音響光学変調器 (AOM) を用いて周波数を数 10 MHz シフトさせ、光ヘテロダイン検波を行う。これにより、低周波ノイズの影響を低減していた[9]。一方、システムの簡素化を図るため、有限の線幅を有する FUT からの反射スペクトルの裾野を活用することで、AOM を撤廃した OCDR が開発された[10]。AOM を撤廃した OCDR を含めた従来の OCDR では、電気信号を処理する際に、ESA が使用されていた。しかし、ESA は大型かつ高コストのデバイスであるため、システムの更なる簡素化を阻む要因となっていた。また、ESA のフィルタ性能に限界があるため、高速測定にお

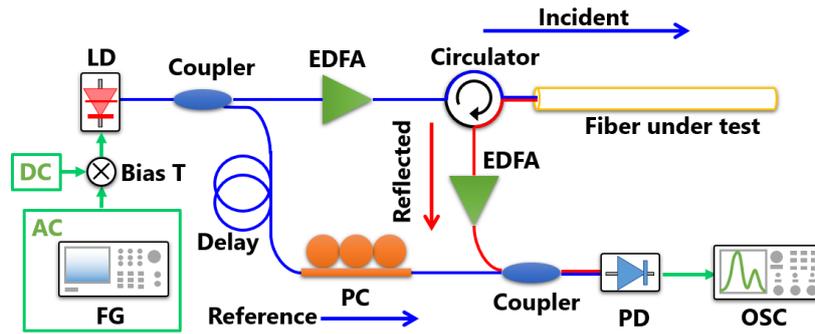


図 9. ESA を撤廃した簡素化 OCDR の実験系。

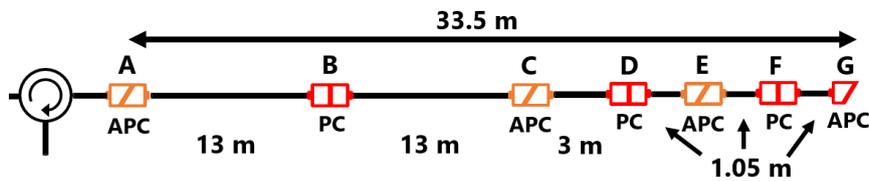


図 10. 測定ファイバの構成。

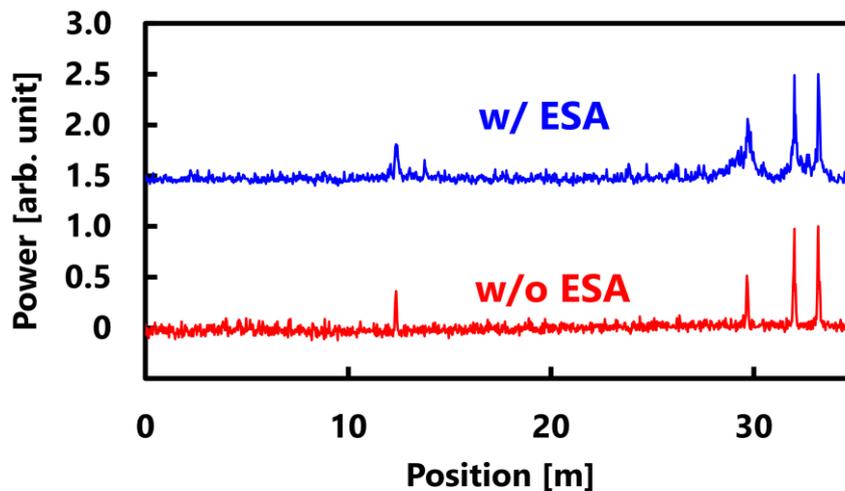


図 11. 従来法（青）と新手法（赤）による反射率分布の測定結果。両者は 1.5 シフトさせて表示した。

ける空間分解能の向上が困難であった。

そこで本研究では、AOMに加えて ESA も撤廃した極めて簡素な OCDR を実装し、更なる小型化・低コスト化を実現した。さらに、繰り返しレート 100 Hz の高速測定の場合に、ESA の撤廃によって、空間分解能が約 3 倍に向上することも実証した。

## (2) 原理と実験系

SOCF-OCDR では、レーザ光に正弦波変調を施し、FUT 中に測定点となる相関ピークを形成する。変調周波数を制御して相関ピークを FUT に沿って掃引することで、反射率の分布測定が可能となる[9]。

今回提案する、AOMに加えて ESA を撤廃した簡素化 OCDR の実験系を図 9 に示す。光学系は、従来の AOM を含まない OCDR と同等である。光信号をバンドパスフィルタ機能付きのフォトダイオード (PD) で電気信

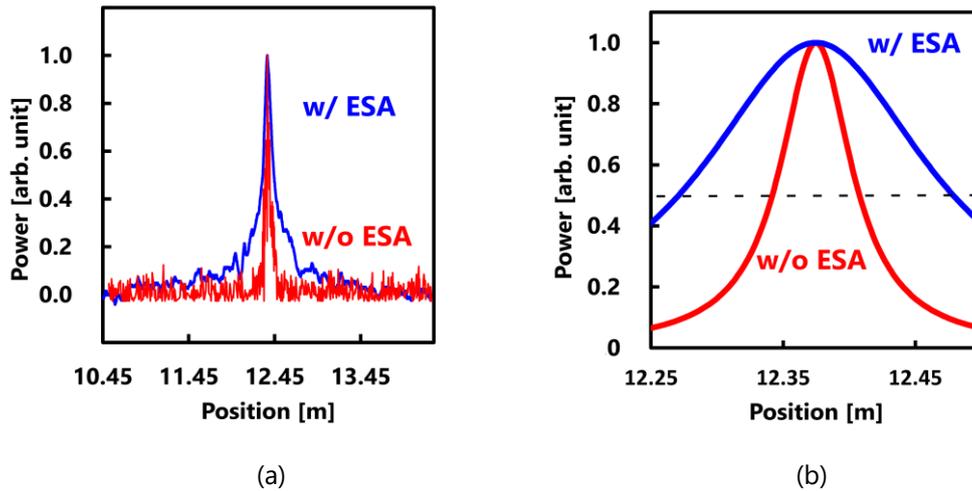


図 12. (a) 従来法（青）と新手法（赤）によって測定した反射率分布のコネクタ B 付近の拡大図。(b) ローレンツフィッティングの結果。点線は半値を示す。

号に変換した後、ESA を介さずに、直接オシロスコープに入力し時間波形を観測した。なお、本手法により OCDR としての正しい動作が期待できることは、詳細な理論検討により解明した（ここでは省略）。

変調周波数は 2.017 MHz から 2.119 MHz まで掃引し、変調振幅は 1.9 GHz とした。このときの理論空間分解能は、25.5 mm であった。実験に用いた FUT の構成を図 10 に示す。本実験では、コネクタ A から開放端に向かって距離が 0-33.5 m の区間の反射率分布測定を行った。繰り返しレート（反射率分布を得る速度）は、ESA を用いた場合に報告されている最高速度[10]と同等の 100 Hz とした。

### (3) 実験結果

まず、ESA を撤廃した OCDR で測定された反射光パワーの分布を図 11 に示す（平均なし）。比較のため、同じ条件下で ESA を使用した場合の結果（平均 16 回）も示した。それぞれのノイズフロアの平均値を 0、最大ピーク値を 1 として規格化した（両者は 1.5 だけ縦にシフトさせて表示）。ESA の有無に関わらず、PC コネクタ B、D、F、および開放端 G での反射による明瞭なピークが観測された。また、ESA を撤廃することによって、各ピークの裾野の広がりや抑制されていることが明らかになった。

次に、コネクタ B 付近における規格化した反射光パワー分布の拡大図を図 12(a)に示す。ESA を使用した場合のみ、16 回平均を行った。ESA を撤廃した場合の方がピークの幅が狭くなっている。最後に、線幅を定量評価するため、両者に対してローレンツ曲線でフィッティングしたグラフを図 12(b)に示す。半値全幅（空間分解能に相当）は ESA を使用した場合が 104 mm、ESA を撤廃した場合が 33 mm であった。よって、ESA を撤廃することで、この条件では空間分解能が 3 倍以上向上した（理論値に近づいた）ことが示された。また、ESA を撤廃した場合は、平均をせずとも従来法で 16 回平均を施した場合と同等の安定性が得られたことから、今後の研究により、SNR や測定速度の向上も期待される。

## 2-4 OCDR 技術を用いた新たな LiDAR の提案

### (1) 研究の背景

LiDAR とは、光を空間に照射し、その反射光（散乱光）を分析することにより、対象物までの距離や対象物の速度、対象物の性質を測定する技術である。横方向の空間分解能が高い計測ができるため、2000 年代初頭から電波レーダの代替として自動運転における有用性が大きく注目されるようになった[11]。

現在の LiDAR の手法は、Time-of-flight (ToF) 法が主流である。これはパルス光を照射し、反射光が返ってくるまでの時間から対象物までの距離を測る技術であり、光ファイバを用いた光時間領域反射計 (OTDR) [7]と同等である。一方、周波数チャープ光を照射する周波数変調連続波 (FMCW) 法も実装され、物体の距離だけでなく、速度をより容易に測定することができるようになった。これは、光ファイバを用いた光周波数領域反射計 (OFDR) [8]と同等の技術である。しかし、測定対象物のダイナミックな状態（振動数など）

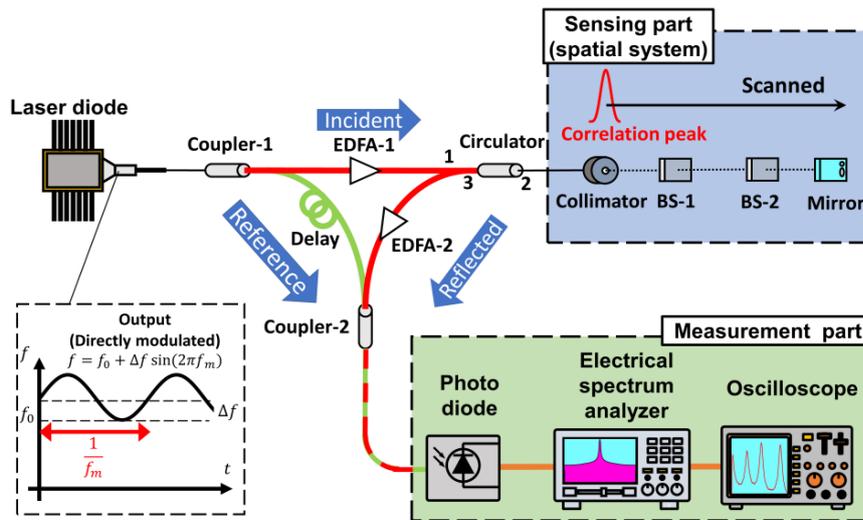


図 13. OCDR に基づく LiDAR の実験系。

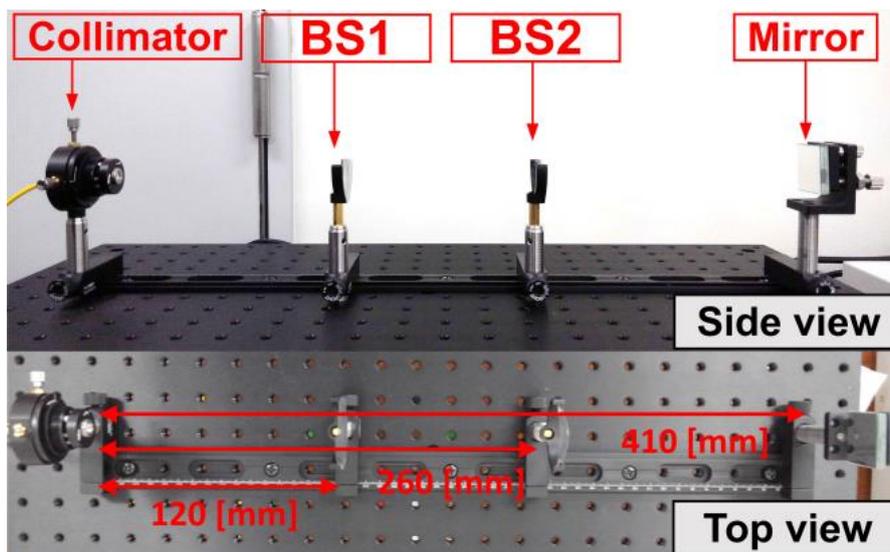


図 14. 測定対象の構成。

を検出しつつ、高速な距離測定を行うことは困難である。レーザドップラ振動計を用いれば対象物の振動を測定可能であるが、奥行き方向の測定位置の掃引は想定されていない。

そこで我々は、OTDR や OFDR と並び、光ファイバに沿った反射率分布を測定する手法である光相関領域反射計 (OCDR) [9]の技術を空間系に拡張して LiDAR を構築することを着想した。OCDR は、ランダムアクセス性 (任意の点における反射率のみを高速でサンプリングできる性質) を有するため、測定物の振動特性を高周波まで検出することができると期待される。ここでは、OCDR 技術に基づく LiDAR の基本動作を実証した。

## (2) 実験系と動作原理

OCDR 技術に基づく LiDAR の実験系を図 13 に示す。光学系は従来の簡素化 OCDR [9]の被測定ファイバ部を空間系に拡張した構成であり、コリメータによって測定物に平行光を照射する。前項でも述べたように、OCDR では、レーザ出力に正弦波による周波数変調を施すことで、被測定部に「相関ピーク」 (=測定位置)

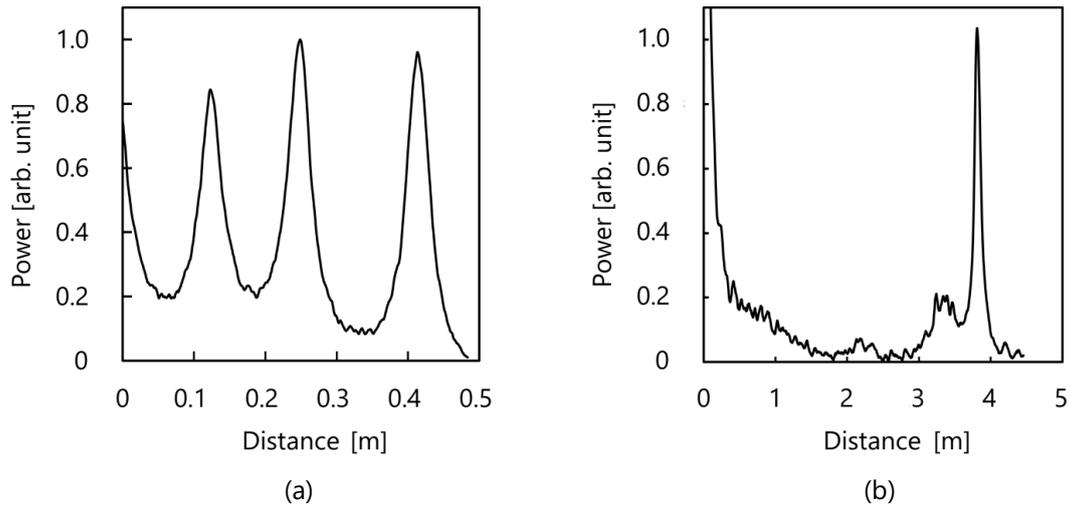


図 15. LiDAR による反射率分布の測定結果。測定対象が、(a) ビームスプリッタ 2 個とミラーの場合、および、(b) 3.8 m 遠方に設置した金属柱の場合。

を形成し、特定位置からの反射光のみを選択的に検出する。ここで、変調周波数を制御し相関ピークを被測定部に沿って掃引することで、反射率の分布測定が実現される[9]。

今回の実験では、網膜に対し比較的安全とされる 1550 nm 帯の半導体レーザを光源として使用した。入射光路と反射光路には出力 10 dBm の光増幅器を挿入した。参照光路には、相関ピークの次数を制御するため、300 m の遅延線ファイバを挿入した。また、ESA のゼロスパン機能を活用し、1 MHz の成分のみの時間変動をオシロスコープで観測した。なお、偏波状態の調整は行わなかった。

基本動作を検討するため、2 つの実験を行った。最初の実験で用いた被測定部の構成を図 14 に示す。コリメータのレンズ表面からの同一直線状の 120 mm, 260 mm, 410 mm の地点に、ビームスプリッタ (BS) およびミラーを設置した。コリメータからの距離が 0–480 mm の区間で反射率の分布測定を行った。変調周波数は 776.5–778.5 kHz の範囲を繰り返し周波数 100 Hz (平均 128 回) で掃引した。また、変調振幅は 11.5 GHz とした (理論空間分解能は約 6.3 mm)。

2 つ目の実験では、本実験系での計測可能距離が数 m は超えることを実証するため、コリメータレンズ表面から 3.8 m 先に金属柱を設置して反射率の分布測定を行った。その際、光パワーの減衰への対策として、2 台の EDFA の出力を 12 dBm (最大定格) とした。変調周波数は 774.0–795.2 kHz の範囲で掃引し、0–4.45 m の範囲を測定した。

### (3) 実験結果

最初の実験、すなわち、2 つの BS およびミラー (図 14) による反射率の分布測定結果を図 15(a)に示す。縦軸の値は、最大のピークの反射パワーで正規化した。反射率のピークが 0mm, 125 mm, 263 mm, 414 mm の位置に現れたが、これらはコリメータ、BS およびミラーの設置位置とよい一致を示している。誤差は、BS やミラーを人間の手により設置したためと考えられる。各ピークパワーの値は、BS やミラーの入射光に対する角度により大きく上下した。なお、観測されたピークの半値全幅を単純に算出するとどれも 40 mm 程度となったが、これは ESA のフィルタの影響を受けているためであり、ESA の設定を変更、もしくは、ESA を撤廃することで狭線幅化が可能である (前項を参照)。次に、3.8 m 先に金属柱を設置したときの反射率の分布測定結果を図 15(b)に示す。明瞭なピークが 3.82 m の位置に現れ、正しい距離測定が行われたといえる。

以上より、OCDR 技術に基づく LiDAR により、空間の反射率分布を測定可能であること、および、測定可能距離が数 m 以上あることが実証された。今後は、空間分解能や動作速度の向上、および、対象の振動数の検知などを推進する。

### 3 まとめ

分布型光ファイバセンサ、特に BOCDR の性能向上に関わる研究の進捗状況を報告した。BOCDR は、光ファイバの片端からの光入射で動作し、世界最高の空間分解能と動作速度を兼ね揃えるオリジナルの分布測定技術であるが、実用化・製品化のためにはまだ解決すべき課題が残っていた。まず、BOCDR における光周波数変調の波形を正弦波に限らず、任意形状まで拡張する取り組みについて述べた。基盤となる理論の構築がおおよそ完了し、その有効性が示されたとともに、最近、チャープ変調による測定レンジの延伸実験にも成功した。また、BGS からの歪算出プロセスを従来の位相検波から非逐次信号処理に変更することで、歪ダイナミックレンジの上限を撤廃することに成功した。その際、意図しない強度変調に起因する独特のノイズが生じることを発見するとともに、ノッチフィルタを用いてこのノイズを抑制できることを示した。また、歪分布ではなく反射率分布を測定する OCDR 法についての進捗も著しく、ESA を用いない簡素な構成を提案し、基本動作を実証した。低コスト化・小型化だけではなく、空間分解能が向上することを実験的に示した。さらに、自動運転などの補助技術として脚光を浴びる LiDAR への応用も提案し、その基本動作を実証することができた。将来、これらの研究成果が、社会インフラおよび情報通信網の監視に利用され、防災・減災につながり、人類の安全・安心な生活に寄与することを願いつつ、今後も研究活動に邁進していく所存である。

#### 【参考文献】

- [1] Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, "Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR)," *Opt. Express*, vol. 16, no. 16, pp. 12148-12153 (2008).
- [2] Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, "Operation of Brillouin optical correlation-domain reflectometry: theoretical analysis and experimental validation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 28, no. 22, pp. 3300-3306 (2010).
- [3] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, K. Y. Song, and K. Nakamura, "Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry," *Light: Sci. Appl.*, vol. 5, e16184 (2016).
- [4] K. Noda, G. Han, H. Lee, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Proposal of external modulation scheme for fiber-optic correlation-domain distributed sensing," *Appl. Phys. Express*, vol. 12, no. 2, 022005 (2019).
- [5] K. Noda, H. Lee, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "First demonstration of Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on external modulation scheme," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 6, 068004 (2019).
- [6] H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry: proof of concept," *IEEE Photon. J.*, vol. 8, no. 3, 6802807 (2016).
- [7] M. K. Barnoski and S. M. Jensen, "Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 9, pp. 2112-2115 (1976).
- [8] W. Eickhoff and R. Ulrich, "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, no. 9, pp. 693-695 (1981).
- [9] K. Hotate and Z. He, "Synthesis of optical-coherence function and its applications in distributed and multiplexed optical sensing," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 7, pp. 2541-2557 (2006).
- [10] M. Shizuka, S. Shimada, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Optical correlation-domain reflectometry without optical frequency shifter," *Appl. Phys. Express*, vol. 9, no. 3, 032702 (2016).
- [11] J. Hecht, "Lidar for self-driving cars," *Opt. Photon. News*, vol. 29, no. 1, pp. 26-33 (2018).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Effect of laser temperature control on Brillouin optical correlation-domain reflectometry	Appl. Phys. Express	2020年4月
Strain and temperature dependencies of multimodal interference spectra in hetero-core-fiber structures	Jpn. J. Appl. Phys.	2020年4月
Characterization of cascaded forward Brillouin scattering seeded by backward stimulated Brillouin scattering in optical fibers	IEICE Electron. Express	2020年6月
Pilot demonstration of correlation-domain distributed temperature sensing using forward Brillouin scattering	Jpn. J. Appl. Phys.	2020年7月
Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on chirp modulation scheme	Appl. Phys. Express	2020年7月
Recent progress in slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry	Opt. Fiber Technol.	2020年7月
Potential of mechanically induced cascaded long-period grating structure for reflectometric pressure, strain, and temperature sensing	IEEE Sens. J.	2020年9月
Fiber-optic distributed measurement of polarization beat length using slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry	Opt. Rev.	2020年10月
Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing	Adv. Photon. Res.	2020年11月
Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on arbitrary waveform modulation: a theoretical study	Opt. Express	2021年4月
Error compensation in Brillouin optical correlation-domain reflectometry by combining bidirectionally measured frequency shift distributions	Appl. Phys. Express	2021年5月