

周期的擬似ランダム変調とデュアルレーザが紡ぐ ブリルアン光相関領域反射計の新展開

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

光ファイバを用いた分布計測技術は、通信ネットワークの保守監視に加え、社会インフラや各種構造物の健全性評価を支える手段として重要性を高めている（図1）[1]。とりわけ、光ファイバに沿った反射率分布やブリルアン周波数シフト分布を高い空間分解能で取得できれば、接続不良、断線予兆、ひずみ集中、温度変化といった異常や状態変化を高精度に把握できる。このような要求に対し、光相関領域反射計（OCDR）およびブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）は、光ファイバ中の任意位置を選択的に計測できるランダムアクセス性と、高い空間分解能を両立し得る手法として発展してきた [2-3]。特に BOCDR は、測定ファイバの片端からのアクセスで動作しつつ、ひずみ・温度分布計測を実現できる点で有用であり、実用的な分布型光ファイバセンシング技術として大きな可能性を有している。

従来の OCDR および BOCDR は、高空間分解能かつランダムアクセス性という大きな利点を有する一方で、実用化や高性能化に向けていくつかの課題を抱えていた。まず、標準的な構成では等光路点や相関ピークの位置制御に制約があり、遅延線の挿入や変調周波数の掃引に依存した測定系を必要とする場合が多い。また、OCDR では周波数シフトの導入に起因するゴーストピークが測定精度やダイナミックレンジを損なうことがあり、BOCDR ではブリルアン信号の観測周波数が高周波帯に位置することや、レイリー散乱に起因する雑音の影響が性能を制約してきた。さらに、空間分解能の向上と測定レンジの拡大を同時に達成することは容易ではなく、特に長距離領域で高分解能を維持することは大きな技術課題であった。したがって、光相関領域法を次の段階へ進めるためには、測定系の簡素化、不要信号の抑制、観測周波数の柔軟化、ならびに長距離化と高分解能化の両立を同時に図る新たなアプローチが求められていた。

本報告書では、こうした課題に対して筆者らが進めてきた一連の研究成果として、デュアルレーザ化と周期的擬似ランダム変調という二つの方策に着目し、OCDR および BOCDR の新たな展開を整理する。前者では、入射光と参照光あるいはポンプ光と参照光をそれぞれ独立したレーザで構成することで、相関ピーク位置の制御自由度を高めるとともに、観測周波数の柔軟化や不要信号の抑制を実現した。後者では、光源の変調方式を拡張することで、従来は両立が難しかった高分解能化と長距離化に新たな可能性を与えた。具体的には、デュアルレーザ OCDR、デュアルレーザ BOCDR、周期的擬似ランダム変調 OCDR、ならびに周期的擬似ランダム変調 BOCDR の各成果を順に述べ、それぞれの原理、実験結果、意義、今後の展望を概観する。これにより、光相関領域法の高性能化に向けた設計指針と、将来的な統合発展の方向性を明らかにすることを目的とする。

2 研究成果

2-1 デュアルレーザ OCDR の提案と動作実証

（1）研究の背景

光相関領域反射計（OCDR）は、光ファイバに沿った反射率分布を高い空間分解能で取得できる手法として知られている。特に、光の周波数変調により相関ピークを形成し、その位置を制御することで、測定ファイバ中の特定位置からの反射光を選択的に観測できる点が大きな特長である。この性質により、OCDR は接続部の反射、微小な損失変化、局所的な異常の検出に適しており、通信インフラの診断や光配線の評価に有

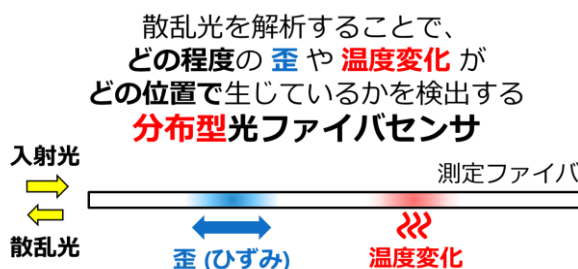


図1. 分布型歪・温度センサの概念。

力な計測法として期待されてきた。

一方で、標準的な OCDR 構成では、単一のレーザ光を入射光と参照光に分岐して用いるため、測定系の自由度にいくつかの制約があった。例えば、等光路点に対応する 0 次の相関ピークの位置を柔軟に移動させることが難しく、測定対象内に不要な相関ピークが現れないようにするために、遅延線を用いた光路長調整が必要となる場合があった。また、低周波雑音を避ける目的で音響光学変調器による周波数シフトを加える構成では、不要な折り返し成分に起因するゴーストピークが発生し、測定結果の解釈やダイナミックレンジの確保を難しくすることがあった。さらに、分布測定のために変調周波数を掃引する方式では、測定位置と時間の対応が非線形になりやすく、条件によっては空間分解能が測定位置に応じて変動する点も課題であった。

このような背景から、OCDR の本来の利点を維持しつつ、測定系を簡素化し、不要信号を抑制し、測定位置制御の柔軟性を高める新しい構成が求められていた。そこで着目したのが、入射光と参照光を独立した二つのレーザで構成するデュアルレーザ方式である。この構成では、両レーザの周波数変調に位相差を与えることで相関ピーク位置を制御できる可能性があり、従来構成で課題となっていた遅延線依存やゴーストピークの問題に対して、新たな解決策を与えることが期待された。

(2) 原理と実験結果

提案したデュアルレーザ OCDR では、入射光と参照光をそれぞれ独立した二つのレーザから生成する(図 2)。両レーザには同一周波数の正弦波変調を加える一方、その変調位相差を制御できるようにすることで、測定ファイバ中に形成される相関ピークの位置を掃引する。従来の OCDR では、単一レーザの出力を分岐して用いるため、0 次相関ピークの位置は実質的に固定され、分布測定のためには変調周波数の掃引や遅延線による光路長調整が必要であった。これに対し、デュアルレーザ方式では、変調周波数を一定に保ったまま位相差のみを変化させることで相関ピークを移動できるため、測定位置の制御が簡潔になる。また、二つのレーザの発振周波数を独立に設定できるため、参照光と反射光のビート周波数を任意の周波数帯に配置でき、従来のような周波数シフトに依存しない観測が可能となる。

この原理を検証するため、長さ 52 m の被試験光ファイバを用いて反射率分布測定を行った。比較対象として、まず従来型 OCDR により同一の被試験光ファイバを測定したところ、高反射点に対応するピークは確認できたものの、主ピーク近傍に不要なゴーストピークが現れた(図 3)。これらの不要ピークは、折り返し雑音に起因して生じたものと考えられ、実効的な雑音床を押し上げることでダイナミックレンジの低下を招いた。また、比較的弱い反射点については、主ピークや不要ピークとの重なりによって識別が難しくなる様子も見られた。

一方、デュアルレーザ OCDR による測定では、同じ被試験光フ

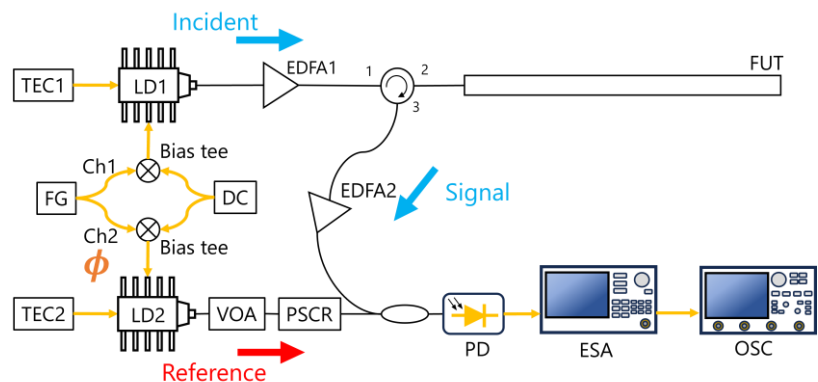


図 2. デュアルレーザ OCDR の実験系。

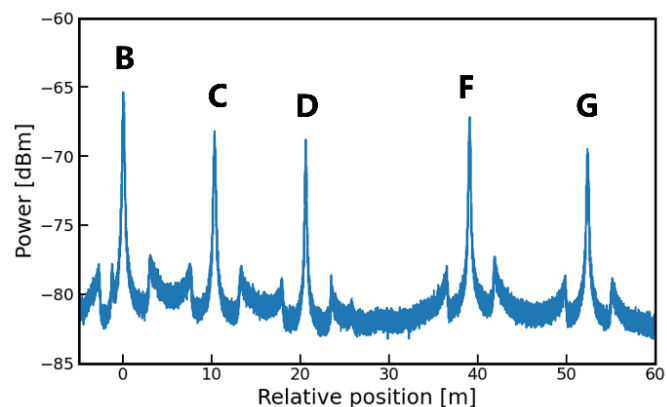


図 3. 従来型 OCDR による反射率分布測定結果。

ファイバに対して高反射点を明瞭に観測できたうえ、従来構成で見られたゴーストピークは大きく抑制された（図4）。その結果、主ピークと雑音床との差は改善し、反射分布の識別性が向上した。とくに、従来構成では不要信号の埋もれやすかった弱い反射点についても、平均化条件を適切に設定することで観測可能性が高まることが示された。すなわち、デュアルレーザ化によって、測定系の構成自由度を高めるだけでなく、反射率分布計測における信号品質の改善にもつながることが確認された。

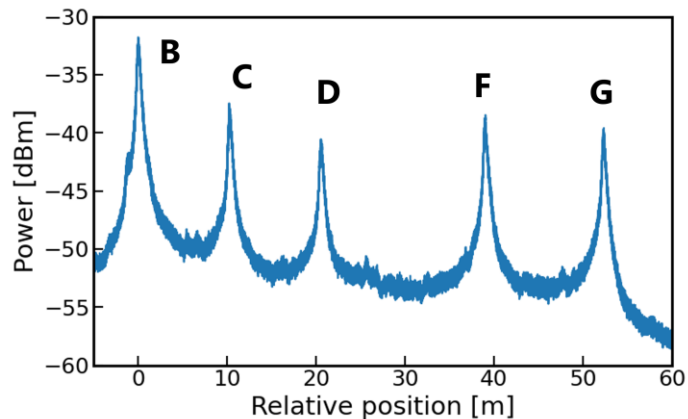


図4. デュアルレーザ OCDR による反射率分布測定結果.

ただし、得られた反射ピークの幅に着目すると、デュアルレーザ OCDR では理論値に比べてピークが広がる傾向が見られた。従来型 OCDR では主反射ピークの半値幅がおおむね 20 cm 以下であったのに対し、デュアルレーザ構成では 40～50 cm 程度まで広がった。変調条件そのものは同程度であったことから、この広がりには相関ピーク形成の原理的限界ではなく、二つのレーザ間の周波数差が測定中に十分安定していなかったことに起因すると考えられる。すなわち、零スパン観測の中心周波数に対してビート信号が時間的に揺らぐことで、観測される反射ピークが空間的に広がって見える結果となった。

（3）考察と今後の展開

本研究で示したデュアルレーザ OCDR の意義は、測定系の自由度を高めながら、従来方式で問題となっていたゴーストピークを抑制できた点にある。入射光と参照光を独立レーザで構成し、変調位相差によって相関ピーク位置を制御することで、遅延線への依存を和らげつつ、観測周波数も柔軟に選べるようになった。これは、OCDR の構成簡素化と信号品質向上の両面で意味が大きい。

その一方で、今回の実験では反射ピーク幅の広がりも確認された。主因は、二つのレーザ間の周波数差が測定中に十分安定していなかったことであり、デュアルレーザ方式の性能を引き出すには周波数安定化が不可欠である。今後は、光源そのものの安定化に加え、周波数差の追従制御や補償法を導入することで、構成上の利点を保ったまま空間分解能を改善していく必要がある。

2-2 デュアルレーザ BOCDR の提案と低周波観測の実証

（1）研究の背景

ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）は、光ファイバ中で生じるブリルアン散乱を利用して、ひずみおよび温度の分布を片端アクセスで計測できる手法である。相関領域法に基づいて測定位置を選択的に決定できるため、高い空間分解能とランダムアクセス性を兼ね備えており、光ファイバセンシングの中でも独自の特徴を有する。とりわけ、測定ファイバの一端からの入射のみで動作する点は、配線自由度や現場適用性の面で大きな利点であり、構造物モニタリングや遠隔計測に向けた応用が期待されてきた。

一方で、従来の BOCDR では、単一レーザの出力をポンプ光と参照光に分岐する構成が一般的であり、その結果として OCDR と同様の構成上の制約を抱えていた。すなわち、0 次相関ピークの位置制御が容易でないために遅延線を必要とする場合があり、また、分布測定のために変調周波数を掃引すると、測定位置に応じて空間分解能や測定条件が変動しやすいという問題があった。さらに、BOCDR では観測対象であるブリルアン利得スペクトルがシリカ光ファイバでは 11 GHz 前後の高周波帯に現れるため、測定には高性能な電気スペクトラムアナライザやダウンコンバージョン系が必要となり、装置構成の複雑化やコスト増大を招いていた。

このような背景のもと、BOCDR においてもデュアルレーザ化を導入することで、測定位置制御の柔軟化と観測周波数の低周波化を同時に実現できる可能性があると考えた。すなわち、ポンプ光と参照光を独立した二つのレーザから生成し、その周波数変調に位相差を与えることで相関ピーク位置を掃引できれば、遅延

線に依存しない分布測定が可能となる。また、両レーザの発振周波数差を適切に設定することで、ブリルアン信号をより低い周波数帯へ変換して観測できるため、従来構成に比べて測定系の自由度が大きく向上することが期待された。

(2) 実験結果

提案したデュアルレーザ BOCDR では、一方のレーザをポンプ光源、もう一方を参照光源として用い、両者に同一周期の正弦波周波数変調を印加する(図 5)。ただし、両レーザの変調位相差は独立に制御可能とし、その位相差を掃引することで測定ファイバ中の相関ピーク位置を移動させる構成とした。この方式により、変調周波数を一定に保ったまま分布測定を行うことが可能となり、従来方式で必要となる遅延線の調整や変調周波数掃引への依存を低減できる。また、二つのレーザの中心周波数差を調整することで、参照光とブリルアン散乱ストークス光のビート信号を任意の周波数帯に配置できるため、従来は 10 GHz 級で観測されていたブリルアン利得スペクトルを、より低い周波数帯で扱える点が大きな特徴である。

まず原理実証として、比較的短尺の被試験光ファイバを対象に分布ひずみ測定を行った。その結果、測定ファイバ中のひずみ印加区間に対応してブリルアン利得スペクトルのピーク周波数が変化する様子が確認され、デュアルレーザ BOCDR によって位置選択的なブリルアン計測が成立することが示された(図 6(a)(b))。さらに、観測されたブリルアン利得スペクトルは、従来の高周波帯ではなく数 GHz 程度のより低い周波数領域で取得されており、本方式が観測周波数の低周波化に有効であることが明確になった。すなわち、デュアルレーザ化は単に相関ピーク位置制御を改善するだけでなく、BOCDR における信号観測系の設計自由度そのものを拡張する結果となった。

一方で、低周波観測の限界を検討する過程では、新たな雑音要因も明らかとなった。変調振幅を大きくし、より高い空間分解能を指向した条件で測定を行うと、ブリルアン信号とは別に 0 Hz 近傍に強い雑音成分が現れ、条件によってはブリルアン利得スペクトルがその雑音に埋もれて観測困難となった。この雑音は、参照光を遮断した場合でも残存したことから、単なる参照光とのビートではなく、測定ファイバ中に分布するレイリー散乱光同士の干渉に起因するものと考えられた。すなわち、デュアルレーザ BOCDR では、観測周波数を低く設定できるという利点の一方で、低周波領域特有のレイリー由来雑音が新たに顕在化することが分かった。

そこで、参照光パワーとストークス光パワーのバランスに着目し、0 Hz 近傍雑音の抑制を試みた。レ

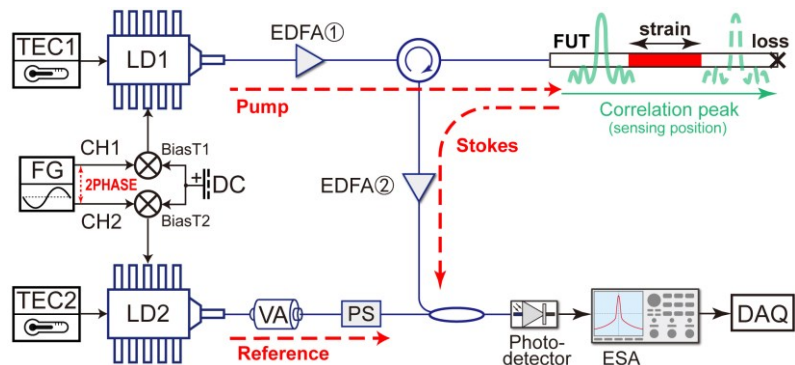


図 5. デュアルレーザ BOCDR の実験系。

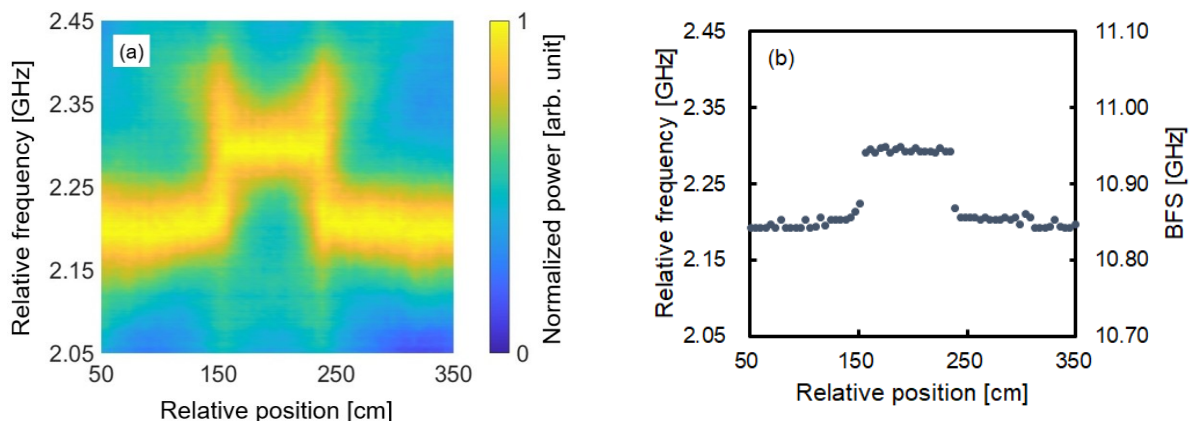


図 6. デュアルレーザ BOCDR によるひずみ分布測定結果. (a) 散乱スペクトル, (b) ブリルアン周波数シフト。

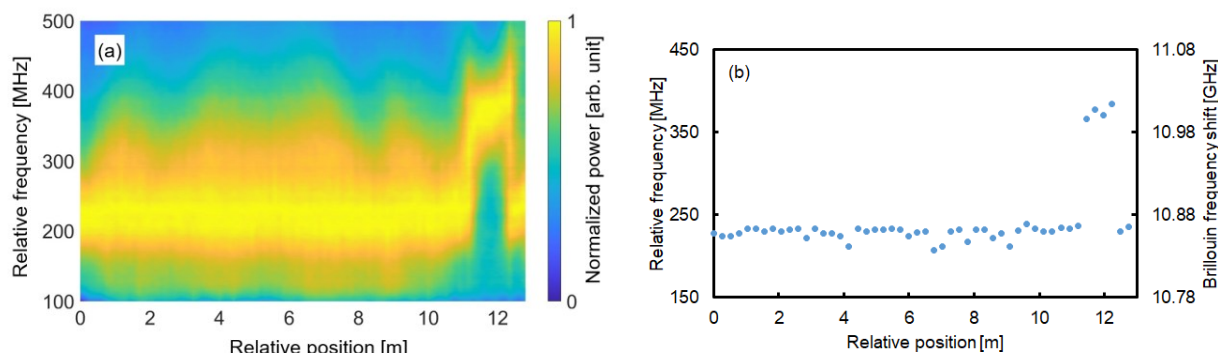


図 7. 雑音抑制を施したデュアルレーザ BOCDR によるひずみ分布測定結果. (a) 散乱スペクトル, (b) ブリルアン周波数シフト.

レイリー雑音の強度は主として測定ファイバ中のレイリー散乱光強度に依存する一方、ブリルアン信号の検出感度は参照光とストークス光の相対関係に依存する。この点を利用して、参照光を強めつつストークス光を適切に抑えた条件で測定したところ、低周波側の雑音の影響を抑えながら、数百 MHz 級の低い周波数帯でブリルアン利得スペクトルを観測できた。さらに、13 m の被試験光ファイバにおける分布ひずみ測定では、ひずみ印加区間に対応したブリルアン周波数シフトの増加が明瞭に捉えられ、本方式が低周波観測下でも有効に分布計測を行えることが示された (図 7(a)(b))。

(3) 考察と今後の展開

デュアルレーザ BOCDR の導入によって、相関ピーク位置の制御自由度が高まり、ブリルアン信号を低い周波数帯で観測できる道筋が開けた。これは、従来の高周波観測に比べて計測系の設計自由度を広げるものであり、BOCDR の実装性を考えるうえでも重要である。

今回の検討では、低周波観測時に 0 Hz 近傍のレイリー雑音が顕在化することも分かった。ただし、この雑音は参照光とストークス光のパワーバランス調整によって抑制可能であり、原理的な障害というより設計上の課題と捉えられる。今後は、観測周波数、変調条件、光パワー条件の最適化を進めることで、より安定で扱いやすいデュアルレーザ BOCDR へ発展させたい。

2-3 周期的擬似ランダム変調 OCDR による長距離・高分解能計測

(1) 研究の背景

光ファイバに沿った反射率分布を高分解能で取得する光反射計は、通信ネットワークの保守や障害診断において重要な役割を担っている。とりわけ、接続部の反射、微小な損失変化、断線や劣化の兆候を精密に把握するためには、長い測定距離にわたって高い空間分解能を維持することが望ましい。しかし一般に、光反射計では測定レンジと空間分解能の間にトレードオフが存在し、長距離化を図ると分解能が低下しやすく、逆に高分解能化を優先すると測定可能距離が制限されやすい。したがって、これら二つの性能を同時に高めることは、反射率分布計測における中心的な課題の一つであった。

OCDR は高い空間分解能とランダムアクセス性を有する一方で、標準的な正弦波周波数変調方式では、測定レンジと分解能の両立に一定の限界があった。相関ピークの形成原理上、測定レンジは変調周波数に、空間分解能は変調振幅などに依存するため、従来方式では長距離計測と高分解能計測を同時に達成することが容易ではない。また、遠方における微弱反射を高精度に読み分けるには、単に理論上の分解能だけでなく、実際の測定波形におけるピーク分離性能や信号対雑音比の確保も重要となる。このため、従来の正弦波変調とは異なる新たな変調方式を導入し、相関ピークの性質そのものを拡張することが有効であると考えられた。

そこで着目したのが、光源に対して周期的擬似ランダム変調を印加する方式である。この方式では、時間的には周期性を持ちながらも、波形としてはランダム性を含む変調を利用することで、従来の正弦波変調方式とは異なる相関特性を実現できる。これにより、同一条件下でより鋭い相関ピーク形成や高いピーク分離性能が期待され、OCDR の長距離化と高分解能化の両立に新たな可能性を与える。特に、基地局間距離を意識した数十 km 級の測定レンジにおいて cm から十数 cm、さらにはそれ以下の分解能を目指すうえで、周

期的擬似ランダム変調は有力な設計指針となる。

(2) 実験結果

提案した周期的擬似ランダム変調 OADR では、従来の正弦波変調の代わりに、一定周期で繰り返される擬似ランダム波形によってレーザ発振周波数を変調する（図 8）。これにより、測定ファイバ中には周期的に相関ピークが形成されるが、その相関特性は正弦波変調の場合とは異なり、より鋭いピーク形成と高いピーク識別性が期待できる。実験では、この方式の有効性を検証するため、全長 45 km の被試験光ファイバに対して反射率分布測定を行った。測定系には遅延自己ヘテロダイン構成を用い、長距離伝搬に伴う損失を補償するために複数の光増幅器を配置した。さらに、低周波雑音を避けるために参照光路には周波数シフタを導入し、電気スペクトラムアナライザのゼロスパン機能を用いて反射信号を観測した。

被試験光ファイバには、途中および末端付近に複数の反射点を設けた。まず、ファイバ全長にわたる反射率分布を測定したところ、入力端近傍および約 20 km 位置の反射点に対応するピークが明瞭に観測された（図 9(a)）。一方で、約 45 km 付近に配置した二つの反射点については、全長を対象とした粗い掃引条件では単一ピークとして観測され、個別には分離できなかった。これは、測定レンジ全体を一度に見渡す条件では、遠方末端近傍に配置した近接反射点を分離するための十分な実効分解能が得られていないことを示している。

そこで、末端付近に測定範囲を絞り込み、変調条件を精密に設定して拡大測定を行った。その結果、約 45 km 遠方に配置した二つの反射点が明瞭に分離して観測された（図 9(b)）。特に、コネクタ反射とその直後の開放端反射との間隔は 25 cm であったが、この二つのピークを識別できたことから、本方式によって少なくとも 25 cm 級、条件によってはそれ以下の空間分解能が遠方領域で実現可能であることが示された。これは、数十 km 級の長距離領域において高分解能な反射率分布計測が可能であることを実験的に裏付ける重要な結果である。

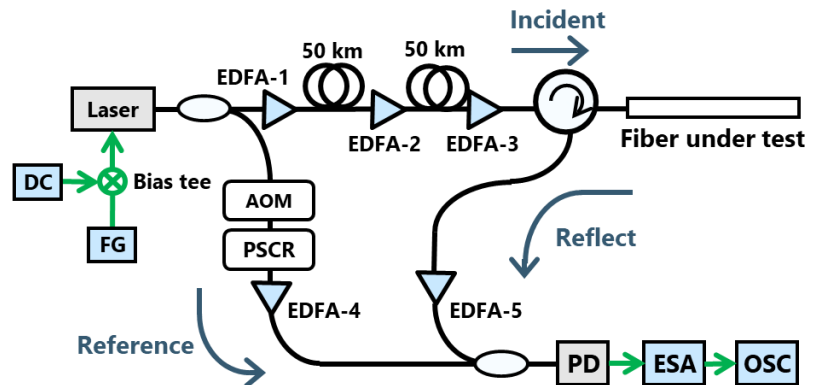


図 8. 擬似ランダム変調 OADR の実験系。

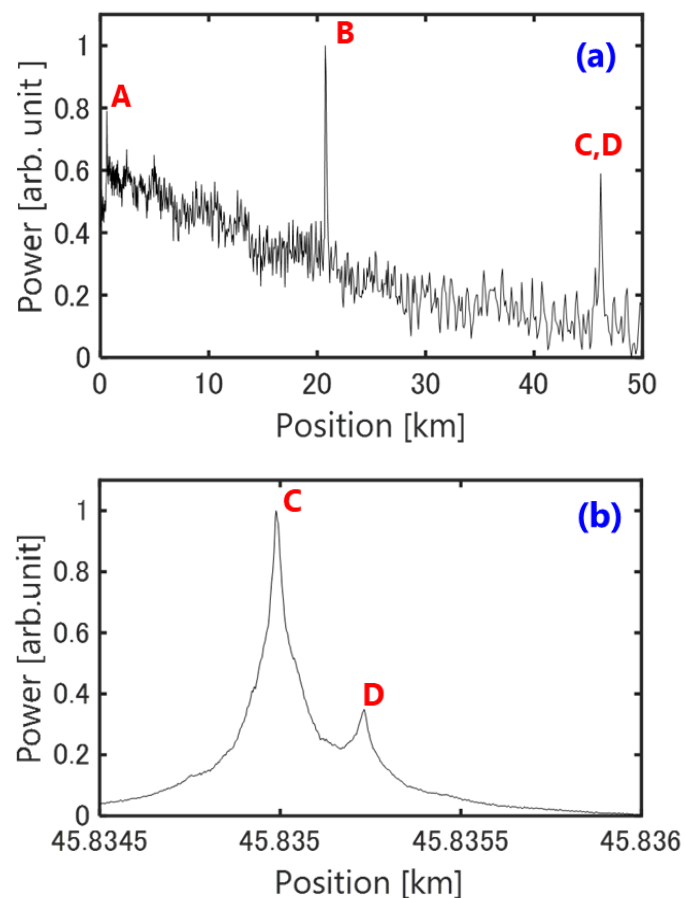


図 9. 擬似ランダム変調 OADR による反射率分布測定結果. (a) 45 km のファイバの全長測定, (b) 先端部の拡大図。

この結果の意義は、単に 45 km 先で反射を検出できたという点にとどまらない。従来、長距離計測では信号減衰や分解能劣化の影響によって、遠方に存在する近接反射点の分離は容易ではなかった。これに対し、周期的擬似ランダム変調 OCDR では、測定レンジを十分に確保しながら、末端近傍においても高いピーク分離性能を示した。このことは、本方式が長距離通信路や広域配線系の診断において、遠方接続部や末端部の詳細な反射状態を把握するための有力な手段となり得ることを示している。

(3) 考察と今後の展開

周期的擬似ランダム変調 OCDR の成果は、45 km の遠方で 25 cm 間隔の反射点を分離できたことに集約される。長距離化と高分解能化は両立が難しい課題であったが、本方式はその壁を越える可能性を具体的に示した。遠方末端近傍の反射状態を詳細に読み分けられる点は、通信路診断への応用を考えるうえで特に重要である。

もっとも、全長を俯瞰する測定と、遠方の微細な構造を詳細に見る測定とでは、最適な条件が必ずしも同じではない。今後は、波形設計と測定条件の関係を整理し、分解能、レンジ、ダイナミックレンジの最適化を進めることが課題となる。そうした検討が進めば、本方式は長距離反射率分布計測の有力な選択肢になると考えられる。

2-4 周期的擬似ランダム変調 BOCDR による低コヒーレンス高分解能計測

(1) 研究の背景

BOCDR およびブリルアン光相関領域解析法 (BOCDA) は、光ファイバに沿ったひずみ・温度分布を高い空間分解能で計測できる手法として広く研究されてきた。とくに相関領域法は、測定位置を任意に選択できるランダムアクセス性を有しており、局所的な状態変化を詳細に観測できる点で優れている。一方で、さらなる高分解能化を目指すうえでは、標準的な狭線幅レーザと正弦波周波数変調に基づく方式だけでは限界があり、光源のコヒーレンス特性そのものに踏み込んだ設計が重要となる。

このような観点から、比較的広い線幅を持つ低コヒーレンス光源を用いる低コヒーレンス BOCDA/BOCDR が注目されてきた。低コヒーレンス化された光では、相関が成立する光路差範囲が短くなるため、空間分解能は光源のコヒーレンス長によって決まり、広帯域な光源を用いるほど高い分解能を実現しやすい。実際、低コヒーレンス化はサブ mm 級を含む極めて高い分解能を志向する手法として有力である。しかしその一方で、従来の低コヒーレンス方式では可変遅延線を用いて測定位置を掃引する構成が多く、測定レンジが可変遅延線の可動範囲に制約されやすいという問題があった。すなわち、高分解能化と引き換えに、測定可能距離や系の簡便性が犠牲になる場合があった。

そこで、本研究では低コヒーレンス BOCDR において、光源へのノイズ変調に周期性を持たせるという考え方に着目した。具体的には、レーザ光に周期的な擬似ランダムないし周期的ノイズ変調を印加することで、比較的広帯域な低コヒーレンス光を生成しつつ、その周期性を利用して測定ファイバ中に相関ピーク列を形成する。この構成では、サンプルレートなどの変調条件を制御することで相関ピーク間隔を変化させ、測定点をファイバに沿って掃引できる可能性がある。すなわち、低コヒーレンス化による高分解能という利点を維持したまま、可変遅延線に依存しない BOCDR を実現できる点に大きな意義がある。周期的擬似ランダム変調を BOCDR に導入することは、高分解能化と測定レンジ制約の緩和を同時に目指す新たな方向性として位置付けられる。

(2) 実験結果

提案した周期的擬似ランダム変調 BOCDR では、狭線幅レーザに対して周期的なノイズ波形を印加し、広い線幅を持つ低コヒーレンス光を生成した。この周期的ノイズ波形は任意波形発生器によって設計され、一定のサンプル数を持つ擬似ランダム波形を所定のサンプルレートで繰り返し出力することで与えられる。このとき、波形の繰り返し周期に対応して測定ファイバ中には周期的な相関ピーク列が形成され、サンプルレートを変化させることでピーク間隔を制御し、測定点をファイバに沿って掃引できる。したがって、本方式では、低コヒーレンス化による高分解能化と、相関領域法に基づく位置選択性とを両立できる構成となっている。

まず、周期的ノイズ変調によって生成された光のスペクトル特性を確認した。遅延自己ホモダイン法によって観測されたスペクトルからは、変調後の光源が GHz 級の広がりを持つことが確認され、ガウス近似に

基づく評価では線幅が約 1.65 GHz と見積もられた。この値から理論的な空間分解能を評価すると、およそ 5.6 cm 程度に相当し、標準的な BOCDR よりも高い空間分解能が期待できる条件であることが分かった。すなわち、周期的ノイズ変調によって、低コヒーレンス光源として十分な広帯域化が達成されていることが示された。

次に、この光源を用いて被試験光ファイバのひずみ分布測定を行った。被試験光ファイバには、先端近傍の 120 cm 区間に約 0.5 % の引張ひずみを印加し、その周囲を含む約 72 m の範囲にわたって相関ピークを掃引した。得られたブリルアン周波数シフト分布を見ると、ひずみ印加区間に対応する位置で周波数シフトが明瞭に変化しており、歪の有無に応じた分布計測が成立していることが確認された。さらに、ひずみ区間の周囲を拡大すると、実際の印加長に対応する区間でブリルアン周波数シフトが遷移している様子が観測され、本方式が高い位置分解能を備えた分布計測を実現できることが示された。

この結果は、低コヒーレンス BOCDR において従来問題となっていた測定レンジ制約を緩和しつつ、高分解能なひずみ分布計測が可能であることを示すものである。すなわち、可変遅延線を用いずに相関ピークを掃引できるため、系の可動範囲に由来する測定距離制限を受けにくく、相関領域法としての柔軟性を保ったまま低コヒーレンス化の利点を活用できる。周期的擬似ランダム変調 BOCDR は、従来の高分解能 BOCDR における構成上の制約を乗り越える方式として、有効に機能することが実験的に示された。

(3) 考察と今後の展開

周期的擬似ランダム変調 BOCDR では、低コヒーレンス化による高分解能化と、可変遅延線に依存しない測定点掃引とを両立できる可能性が示された。広帯域化した光源を用いてひずみ区間に対応するブリルアン周波数シフト分布を取得できたことは、本方式が高分解能分布計測として有効に機能することを裏付けてい

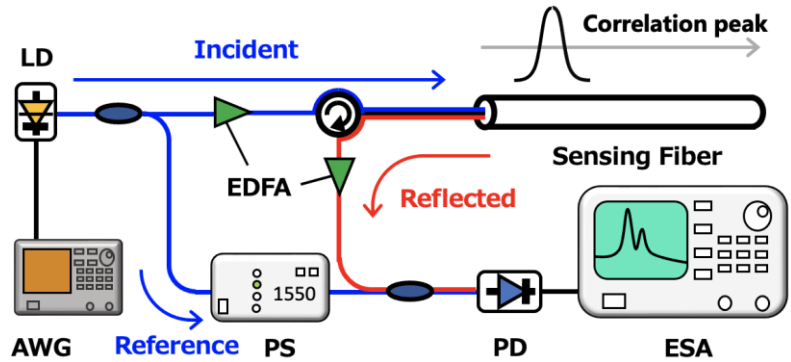


図 10. 擬似ランダム変調 BOCDR の実験系。

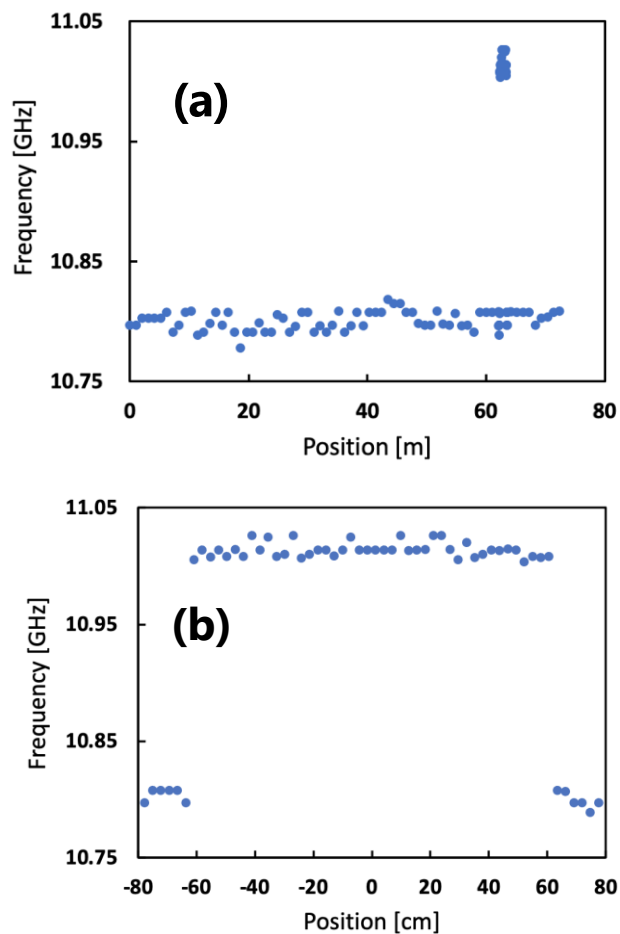


図 11. 擬似ランダム変調 BOCDR によるひずみ分布測定結果. (a) 72 m のファイバの全長測定, (b) ひずみ印加区間付近の拡大図。

る。

今後の鍵となるのは、波形設計と相関ピーク特性の関係をより明確にすることである。光源線幅、サンプルレート、サンプル数の設定は、分解能と測定レンジの双方に影響するため、条件最適化の余地は大きい。デュアルレーザ化との組合せも視野に入れば、より自由度の高い BOCDR 設計へ展開できる可能性がある。

3 まとめ

本報告書では、光相関領域法に基づく分布型光ファイバ計測の高性能化を目指し、デュアルレーザ化および周期的擬似ランダム変調という二つの観点から進めてきた研究成果を整理した。まず、デュアルレーザ OCDR では、入射光と参照光を独立した二つのレーザで構成し、その変調位相差を制御することで相関ピーク位置を掃引できることを示した。これにより、従来方式で課題であった遅延線依存の緩和やゴーストピークの抑制が可能となり、反射率分布計測における構成自由度と信号品質の向上が確認された。一方で、独立レーザ間の周波数安定性が空間分解能に影響することも明らかとなり、今後の重要課題として位置付けられた。

また、デュアルレーザ BOCDR では、ポンプ光と参照光を独立レーザで構成することで、相関ピーク位置の制御自由度を高めるとともに、ブリルアン信号の観測周波数を低周波側へ柔軟に変換できることを示した。その結果、従来は高周波帯で扱われていたブリルアン利得スペクトルを、より扱いやすい周波数帯で観測しながら分布ひずみ計測を実現できた。さらに、低周波観測時には 0 Hz 近傍のレイリー雑音が新たな課題として顕在化した。参照光とストークス光のパワーバランスを調整することでその影響を抑制できることを示し、デュアルレーザ BOCDR の実用的な成立性を確認した。

一方、周期的擬似ランダム変調 OCDR では、従来の正弦波変調とは異なる相関特性を活用することで、長距離化と高分解能化の両立に新たな可能性を与えた。実際に、45 km の被試験光ファイバに対して反射率分布測定を行い、遠方末端近傍に配置した 25 cm 間隔の反射点を分離して観測することに成功した。この結果は、数十 km 級の長距離領域においても高いピーク分離性能を維持できることを示しており、通信インフラ診断に向けた実用上の意義が大きい。さらに、周期的擬似ランダム変調 BOCDR では、低コヒーレンス化による高分解能化と、可変遅延線に依存しない測定点掃引の両立を実証した。広帯域化された光源により cm 級の理論空間分解能が期待される条件で、ひずみ印加区間に対応したブリルアン周波数シフト分布を取得できたことは、本方式が高分解能分布センシングの新たな枠組みとなり得ることを示している。

以上のように、本報告書で取り上げた一連の研究は、OCDR および BOCDR における従来課題に対し、デュアルレーザ化による測定系自由度の拡張と、周期的擬似ランダム変調による相関特性の高度化という二つの方向からアプローチしたものである。前者は、相関ピーク位置制御、観測周波数選択、不要信号抑制といった機能面での進展をもたらし、後者は、長距離化、高分解能化、低コヒーレンス化といった性能面での進展をもたらした。今後は、これら二つの概念をさらに融合し、周波数安定化技術、高度な波形設計、雑音抑制法、信号処理技術と組み合わせることで、より高精度かつ高機能な光相関領域計測法へ発展していくことが期待される。デュアルレーザと周期的擬似ランダム変調は、ブリルアン光相関領域反射計の新展開を切り拓く基盤技術であり、将来的な実用計測システムの高度化に向けても重要な役割を果たすと考えられる。

【参考文献】

- [1] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics. Boston, MA, USA : Academic, 1995.
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, K. Y. Song, and K. Nakamura, "Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry," Light: Sci. Appl., vol. 5, e16184 (2016).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Dual-laser Brillouin optical correlation-domain reflectometry	J. Phys. Photon.	2025 年 4 月
Reassessment of spatial resolution in Brillouin optical correlation-domain sensors	J. Opt. Soc. Am. B	2025 年 6 月
Noise-suppressed optical correlation-domain reflectometry using dual lasers	Opt. Fiber Technol.	2025 年 6 月
Selective detection of food-adulterant 4-methylimidazole using synthetic receptor-functionalized reflective heterofiber structure	ACS Appl. Opt. Mater.	2025 年 8 月
Accurate estimation of measurement position in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on Rayleigh noise spectral analysis	Jpn. J. Appl. Phys.	2025 年 8 月
Detection of sleeve-induced strain near fusion splice points using Brillouin optical correlation-domain reflectometry	Jpn. J. Appl. Phys.	2025 年 11 月
Convexity-based Brillouin frequency shift extraction in Brillouin optical correlation-domain reflectometry	Jpn. J. Appl. Phys.	2025 年 12 月
Broad-wavelength-range strain dependence of modal interference spectra in acrylic-based polymer optical fibers	IEICE Trans. Electron.	2026 年 1 月
Direct visualization of Euler's belt theory by Brillouin optical correlation-domain reflectometry	Trans. JSME	2026 年 1 月
Brillouin optical correlation-domain reflectometry with polymer fibers under scrambled polarization enabled by angled connections	Adv. Sens. Res.	2026 年 2 月
Proof-of-concept demonstration of high-speed dual-laser Brillouin optical correlation-domain reflectometry	Jpn. J. Appl. Phys.	2026 年 2 月
Implementation of single-sideband external modulation for Brillouin optical correlation-domain reflectometry	IEICE Trans. Electron.	2026 年 3 月
BOCDR achieving 6-mm spatial resolution at modulation frequencies close to Brillouin bandwidth	J. Lightwave Technol.	2026 年 4 月
Airborne audible sound detection via phase bias-enhanced Sagnac interferometer using 3×3 fiber coupler	J. Lightwave Technol.	2026 年 4 月
Effect of hot-water tapering on acrylic polymer optical fibers	IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.	Accepted
Remote-head optical correlation-domain reflectometry using kilometer-scale fibers	IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.	Accepted
Experimental evaluation of sample-number dependence on spatial resolution in PPRM-OCDR	IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.	Accepted
Ghost-peak-based estimation of modulation amplitude in optical correlation-domain reflectometry	Sci. Rep.	Accepted
Multimode interference-based strain sensing using polarization-maintaining fiber at telecommunication wavelengths	IEICE Trans. Electron.	Accepted
Electrical-domain interference sensing driven by relative modal delay in polymer optical fibers	IEEE Sens. J.	Accepted