

ブリルアン光相関領域リフレクトメトリの提案 ～光ファイバ神経網の実現に向けて～

東京大学大学院 工学系研究科
電子工学専攻 博士課程 1年
水野 洋輔

1. はじめに

近年、地震による損傷や経年変化を自己診断できる機能を備えた材料・構造「スマートマテリアル・スマートストラクチャ」の実現が望まれ、損傷などを分布的に検知する神経網として光ファイバを用いた「分布型センシング」が注目を集めている。例えば図1のように、ビル・橋・トンネル内壁・ダム・高速道路などの構造物や、航空機の翼や圧力隔壁、燃料タンクなどに光ファイバを貼り巡らせ、光ファイバに沿った歪や側圧、温度などをセンシングすることで、これらの材料・構造の診断が可能となる。ここで、センサとなる光ファイバを「光ファイバ神経網」と呼ぶ。光ファイバ神経網には、高い空間分解能、速い測定速度、そして光ファイバのどの位置の情報でも得られる、などの諸機能を併せ持つことが求められる[1]。

現在、「ブリルアン散乱」を測定原理とした種々の分布型光ファイバセンサが研究されている。これらのセンサは、図2のように「リフレクトメトリ(反射計)」と「解析システム」に大別される。前者は、測定ファイバの片端からのみ光を入射すれば十分であるのに対し、後者は測定ファイバの両端から光を入射する必要がある。解析システムでは「誘導ブリルアン散乱」を用いることで比較的大きな反射信号を扱うことができ、これまでに「ブリルアン光時間領域解析システム(BOTDA)」[2]や「ブリルアン光相関領域解析システム(BOCDA)」[3]などが提案されてきた。しかし、これらの手法には、測定ファイバ中に一箇所でも断線が生じてしまうだけで測定不能になってしまうという欠点があった。これに対し、リフレクトメトリは「自然ブリルアン散乱」

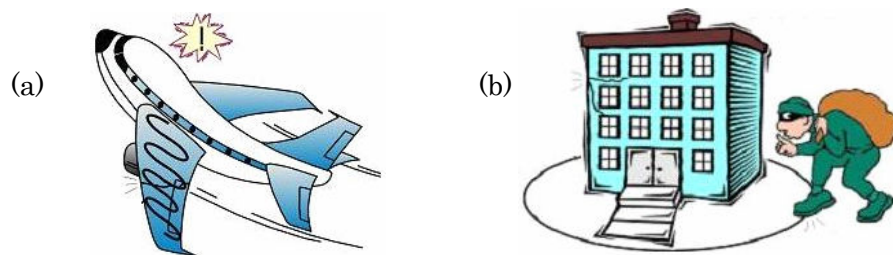
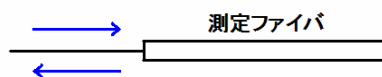


図1. 光ファイバ神経網によるスマートマテリアル・スマートストラクチャの例 (a) 航空機の翼に光ファイバを埋め込む、(b) ビルの内壁や周囲に光ファイバを埋め込む

Reflectometry (リフレクトメトリ) ... 片端入射型



Analysis system (解析システム) ... 両端入射型

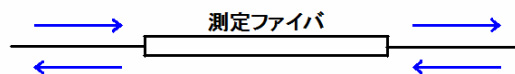


図2. リフレクトメトリと解析システム

を用いるために反射信号が微弱であるという欠点はあるものの、断線が生じてもその箇所までは正しく測定を行うことが可能である。すなわち、実用の観点からは、**リフレクトメトリの方が解析システムよりも好ましい**と言える。

従来、最も精力的に研究されてきたリフレクトメトリ技術は、光パルスを入射して反射光を時間分解する「**ブリルアン光時間領域リフレクトメトリ(BOTDR)**」[4]である。しかし、BOTDRの空間分解能の原理的限界は1 m程度[5]であり、また何万もの光パルスの反射信号を積分する必要があるため10分前後の測定時間を要する。しかしこれでは、構造物のリアルタイムな診断には不十分である。

そこで本論文では、従来のリフレクトメトリの限界を打破すべく、新たに「**ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ(BOCDR)**」を提案する。基本動作の確認後、空間分解能の限界に挑戦する。さらに、時間ゲート法を用いて測定レンジを向上させる。

2. BOCDRの原理[6-9]

光ファイバに光を入射すると、音響フォノンとの相互作用を介して反射光(ストークス光)が生じる。この現象が、**自然ブリルアン散乱**である。図3(a)に示すように、ストークス光のスペクトルは「**ブリルアンゲインスペクトル(BGS)**」と呼ばれ、ローレンツ型の形状を取ることが知られている[10]。また、BGSにおいてパワーが最大となるときの周波数は、入射光の周波数に比べ約11 GHzダウンシフトする。この周波数シフト量 f_B は「**ブリルアン周波数シフト(BFS)**」と呼ばれ、図3(b)のように光ファイバに印加された歪の大きさや温度変化に対し線形に変化(0.002%の歪あるいは1 Kの温度変化が1 MHzのBFS変化に対応)することが知られている。故に、測定ファイバに沿ったBFSの分布を測定すれば、印加された歪や温度変化の分布に読み替えることが出来る。

さて、本論文で提案するブリルアン光相関領域リフレクトメトリ(BOCDR)の概念図を図4に示す。まず、レーザからの光をカップラで2つに分け、ポンプ光および参照光とする。次に、ポンプ光は測定ファイバに入射し、自然ブリルアン散乱によるストークス光をバランスフォトダイオードから成るヘテロダイン検波器に入射する。また、参照光は局部発振器として用いる。最後に、ストークス光と参照光のビート信号を電気信号に変換した後、電気スペクトラムアナライザ(ESA)により観測する。なお、ストークス光と参照光の間にはもともと約11 GHzの周波数差があるので、この構成を「**自己ヘテロダイン**」と呼ぶ。

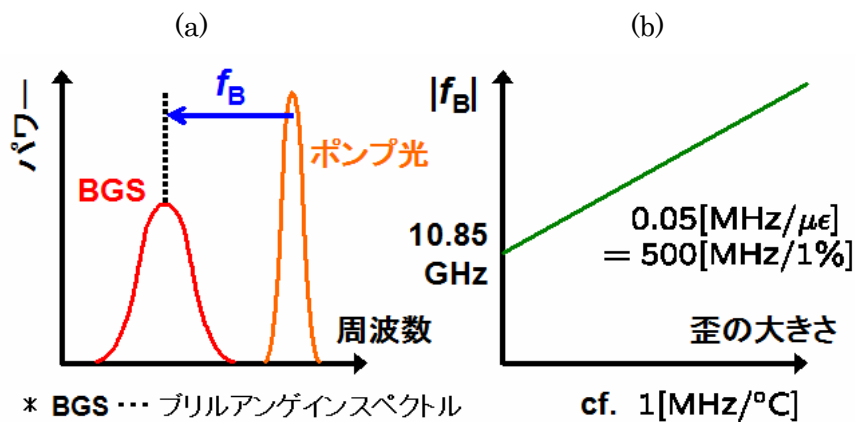


図 3. 自然ブリルアン散乱と、その歪センシングへの応用 (a) ポンプ光および反射光(ストークス光)のスペクトル、(b) ブリルアン周波数シフトが歪の大きさに比例する様子

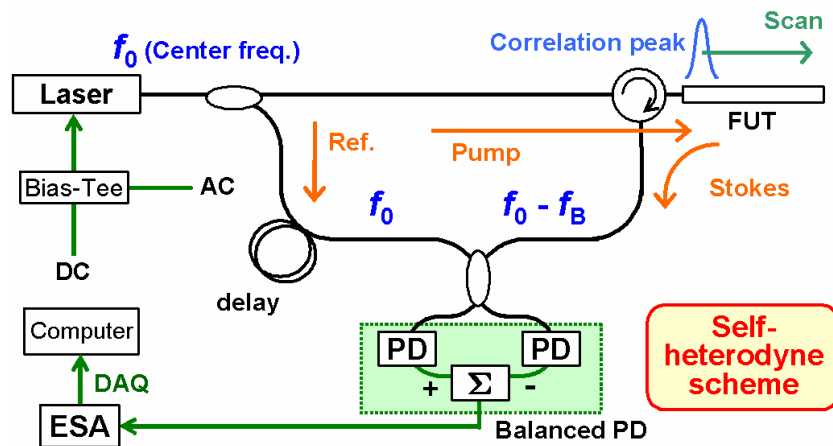


図 4. BOCDR の概念図

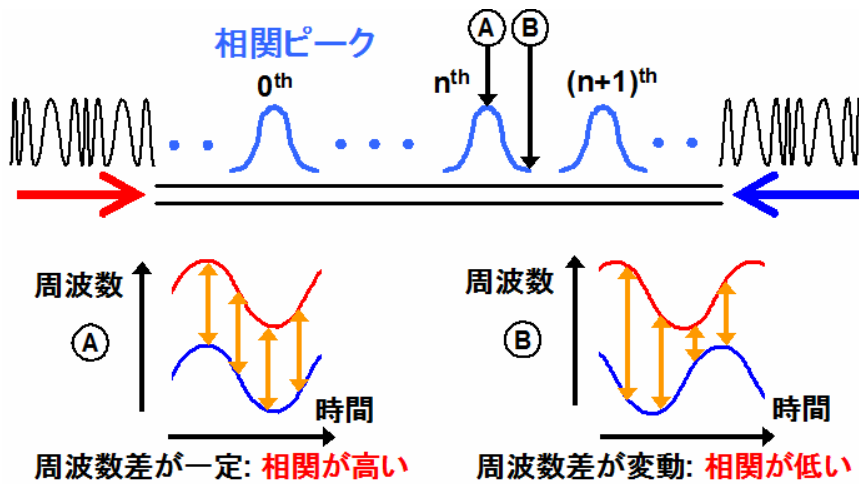


図 5. 歪の位置分解のためのコヒーレンス関数の合成

次に、測定ファイバにおける歪の位置を特定する手法である「コヒーレンス関数の合成」について述べる。図 5 のように、周波数に正弦波変調を施した光を対向伝搬させることを考える。両光の中心周波数には f_B の差があると仮定する。このとき、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)箇所が測定ファイバ中に生じる。しかし、それ以外の箇所では両光の周波数差は時間的に変動してしまう(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」と呼ぶ。いま、周波数は正弦波変調されているので、相関ピークは図 5 のように周期的に現れ、その間隔は変調周波数 f_m に反比例する。これを利用し、測定ファイバ中に唯一つだけ相関ピークが立つように f_m を制御すれば、相関ピークに対応した位置でのブリルアン散乱のみが抽出できる。さらに f_m を掃引することで、相関ピークを測定ファイバに沿ってスキャンし、BGS あるいは BFS の分布情報を得ることができる。以上が BOCDR の動作原理である。

なお、BOCDR の空間分解能 Δz および測定レンジ d_m (相関ピークの間隔)は、BOCDA と同様の式で与えられる：

$$\Delta z = \frac{V_g \Delta v_B}{2\pi f_m \Delta f}, \quad (1)$$

$$d_m = V_g / 2f_m, \quad (2)$$

ここで、 V_g は光ファイバ中の光の群速度、 $\Delta\nu_B$ はブリルアンゲイン幅(約 30 MHz)、 Δf はレーザの正弦波変調の振幅である。

3. 基本動作の確認[6-9]

実際の BOCDR の実験系を図 6 に示す。中心周波数 $f_0=193.15$ THz (波長 1551.92 nm) の分布帰還型レーザを光源として用い、測定ファイバ中に相関ピークを立てるため周波数に正弦波変調を施した。レーザからの光はカップラによりポンプ光と参照光に分けた。参照光は、偏波コントローラ(PC)で偏波状態を調整し、相関ピークの次数を制御するための 2 km の遅延ファイバを通過させ、ヘテロダイン信号を増強するためエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)により 10 dBm まで増幅した。ポンプ光は、PCで偏波状態を調整し、EDFA により 28 dBm まで増幅させ測定ファイバに入射させた。微弱なストークス光をさらに EDFA により増幅し、光フィルタによって不要な周波数成分(レイリー散乱やフレネル反射による信号であり、周波数のダウンシフトが無い)を抑制した後、参照光とビートさせた。この光信号をバランスフォトダイオードにより電気信号に変換し、電気プリアンプで 15 dB の増幅を与えてから、ESA で最終的な BGS を検出した。測定結果はパソコンに取り込んだ。また、相関ピークの掃引は汎用インターフェースバス(GPIB)を介してソフトウェア的に行った。

光源の変調周波数 f_m は、457.4 - 458.4 kHz とした。これは、式(2)から測定レンジ 228 m に対応する。また、変調振幅 Δf は、図 7 に示すように 5.4 GHz とした。これは、式(1)から空間分解能約 40 cm に対応する。測定ファイバとしては、図 8 に示すように、

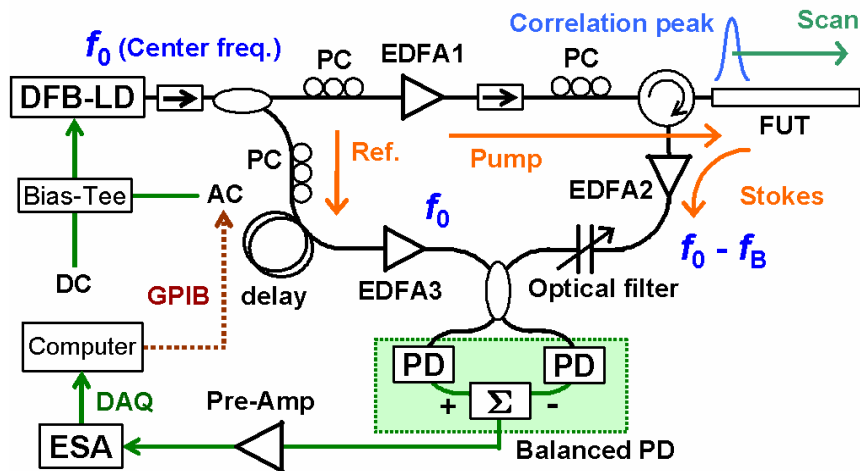


図 6. BOCDR の実験系

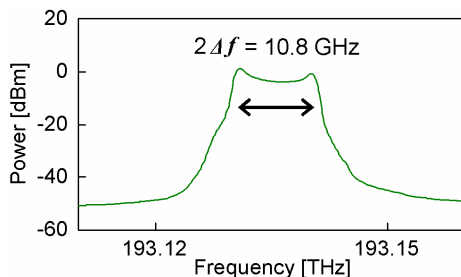


図 7. 振幅 $\Delta f = 5.4$ GHz で正弦波変調したときの光源のスペクトル

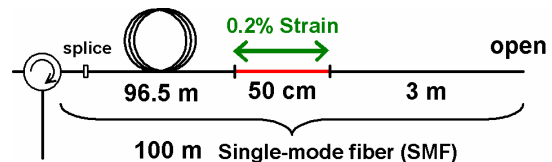


図 8. 空間分解能 40 cm の実験での測定ファイバの構成

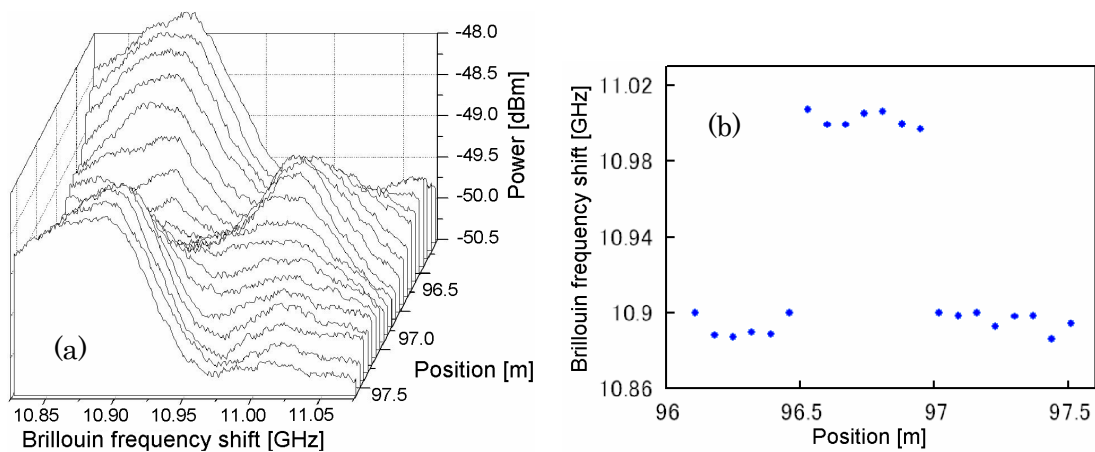


図 9. 空間分解能 40 cm で 50 cm の歪を検出したときの分布測定結果。(a) BGS の分布 (b) BFS の分布。サンプリングレートは 0.02s/point とした。

100 m の一般的なシングルモードファイバ(SMF)を採用し、エポキシ樹脂を用いて可動ステージに固定した 50 cm の区間に 0.2 %の歪を印加した。測定ファイバの一端はサーキュレータと融着接続し、もう一端は開放とした。1 点の BGS を得るサンプリングレートは、電気スペクトラムアナライザの最大掃引速度である 50 Hz とした。

測定ファイバに沿った BGS の分布測定結果を図 9(a)に示す。歪を印加した区間が明瞭に観測されている。また、BGS が最大となるときの周波数、すなわち BFS の分布測定結果を図 9(b)に示す。50 cm の歪を印加した区間が正しく検出できた。また、BFS の変化は 100 MHz 程度であり、これは印加した 0.2 %の歪と良く一致している。また、この測定におけるサンプリング点の数は 21 であり、**測定全体に要した時間は 0.5 秒未満**であった。このような高速測定は、従来の光パルスを用いた手法では実現不可能であった。

4. 空間分解能の限界への挑戦[11-12]

式(1)および(2)より、BOCDR の空間分解能は、変調周波数 f_m を増加させることで、測定レンジを犠牲にしつつも向上させることができる。しかし、空間分解能を向上させるにつれ、測定ファイバの対応する区間からの自然ブリルアン散乱による反射信号は小さくなる。電気領域におけるノイズフロアは一定であるので、これは信号対雑音(S/N)比の劣化につながる。すなわち、**BOCDR の空間分解能には限界が存在する**。そこで、その限界はどの程度なのかを明らかにする実験を行った。

用いた実験系は、前節の基礎実験と同様である。光源の変調周波数 f_m は、13.4624 – 13.4672 MHz まで増加させた。これは、測定レンジ 7.6 m に対応する。また、変調振幅 Δf は、前節同様に 5.4 GHz とした。このときの理論的な空間分解能は、約 13 mm と計算できる。測定ファイバとしては、図 10(a)および(b)に示すように、5 m の SMF を採用し、3 cm の区間に 0.1 %の歪を印加した。測定ファイバの一端はサーキュレータと融着接続し、もう一端はファイバ端面でのフレネル反射を抑制するためマイクロベンディングを施した。サンプリングレートは、前節同様 50 Hz とした。

BGS および BFS の分布測定結果を、図 11(a)および(b)にそれぞれ示す。前節の結果に比べて S/N 比は劣化しているものの、歪を印加した区間が明瞭に観測されている。BFS の変化は 50 MHz 程度であり、これは印加した 0.1 %の歪と良い一致を示してい

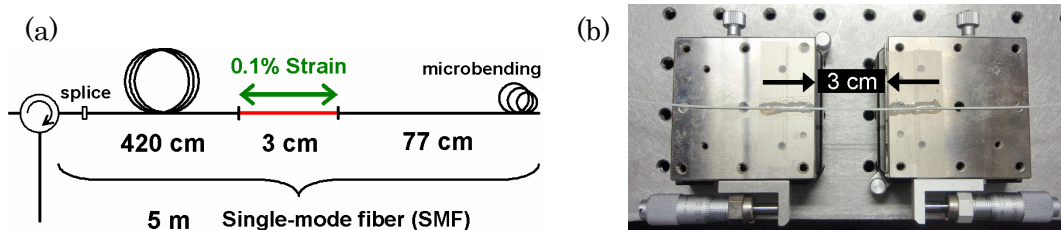


図 10. 空間分解能 13 mm の実験での測定ファイバの構成 (a) 模式図、(b) 実際の写真

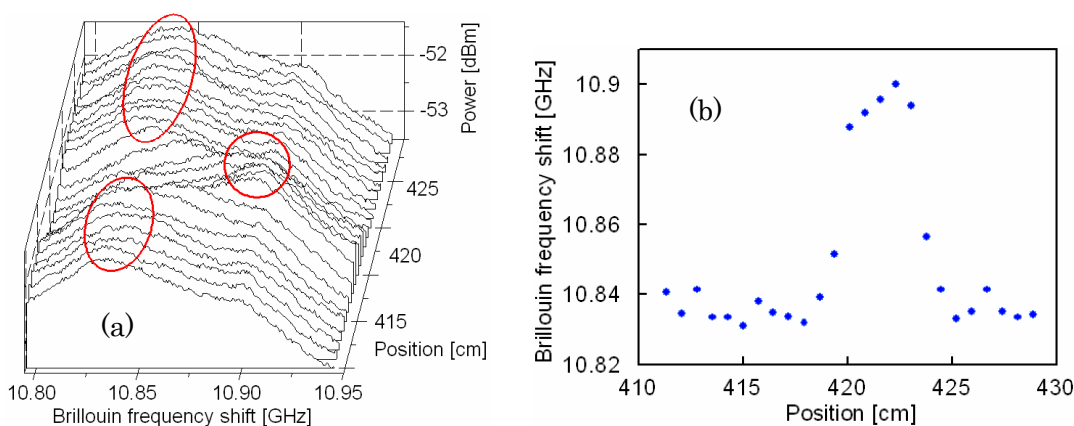


図 11. 空間分解能 13 mm で 3 cm の歪を検出したときの分布測定結果。(a) BGS の分布、(b) BFS の分布。サンプリングレートは 0.02s/point とした。

る。以上から、空間分解能 13 mm での歪分布測定に成功したと言える。

13 mm という高空間分解能は、これまでに報告のあった自然ブリルアン散乱を利用したあらゆるリフレクトメトリはもちろん、誘導ブリルアン散乱を利用したあらゆる時間領域での解析システムよりも優れた値である。

5. BOCDR の雑音に関する考察[7, 8]

BOCDR では、空間分解能と測定レンジの間にトレードオフの関係がある。式(1)および(2)より、両者の比は光源の変調振幅 Δf に依存する。つまり、BOCDR の実質的な性能向上のためには、 Δf を増加させなければならない。しかし、 Δf には上限が存在する。

光源の周波数が変調振幅 Δf で正弦波変調されているときの、ヘテロダイン検波前の参照光とストークス光(反射光)の光スペクトルを図 12(a)に示す。反射光には、周波数が $f_0 - f_B$ にダウンシフトした自然ブリルアン散乱による成分の他に、周波数 f_0 のレイリー散乱(およびフレネル反射)による成分が含まれる。後者の反射は前者よりも強く、光フィルタで完全には抑制できない。 Δf が十分小さいときの、ヘテロダイン検波後の電気スペクトルを図 12(b)に示す。ブリルアン散乱に起因するスペクトルは、周波数 f_B (BFS の大きさ)を中心に左右に $2\Delta f$ だけ広がる。これに対し、レイリー散乱によるスペクトルは、負の周波数は正に折り返されることを考慮すると、0 Hz から $2\Delta f$ まで広がること分かる。図 12(c)に、 $2\Delta f$ が f_B よりもわずかに小さいときの電気スペクトルを示す。レイリー散乱によるスペクトルが検出領域に近づいているが、外側にある

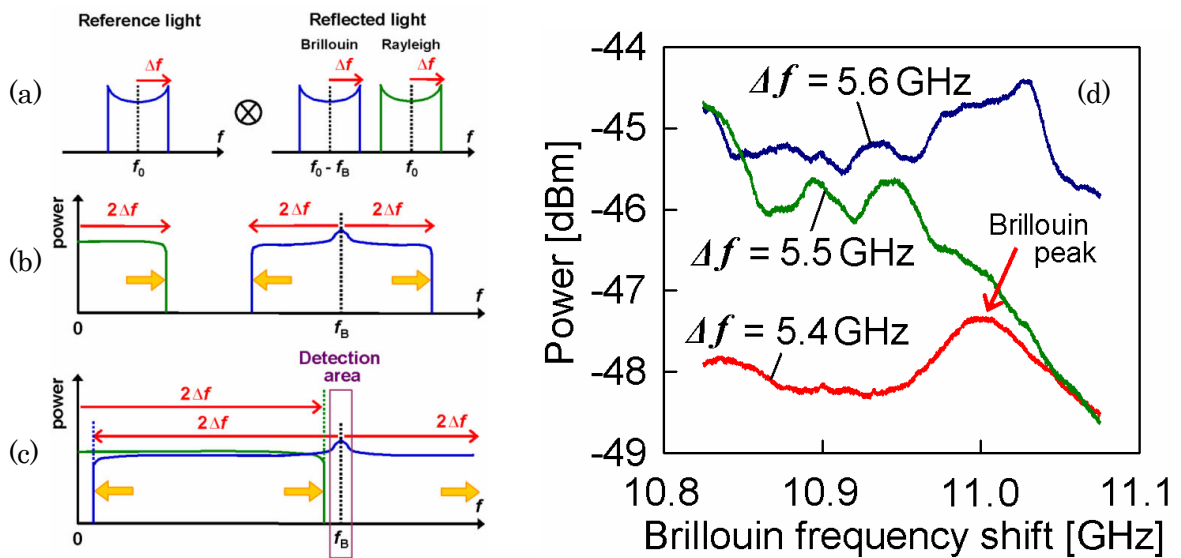


図 12. 光源が振幅 Δf で正弦波変調されているときの (a) 参照光および反射光の光スペクトルの模式図、(b) Δf が十分小さい場合のヘテロダイン検波後の電気スペクトルの模式図、(c) Δf が大きい場合のヘテロダイン検波後の電気スペクトルの模式図、(d) Δf が 5.4 GHz、5.5 GHz、および 5.6 GHz のときの実際の BGS の形状。

限りは測定に影響を及ぼすことは無い。しかし、 $2\Delta f$ が f_B よりもさらに大きくなると、レイリー散乱によるスペクトルが検出領域に重なり、雑音として測定に大きな悪影響を及ぼしてしまう。すなわち、変調振幅 Δf は f_B の半分よりも小さく設定すべきであると言える。前述の実験で、SMF の f_B である 11 GHz の半分よりもわずかに小さい 5.4 GHz という値を Δf として用いたのは、このためである。

実際に Δf を 5.4 GHz よりも次第に大きくした場合の BGS の形状を図 12(d) に示す。 Δf が 5.4 GHz のときはブリルアン散乱によるピークが明瞭に観測されているが、 Δf が 5.5 GHz のときは低周波側からレイリー散乱による雑音が重なり始め、 Δf が 5.6 GHz のときは本来のピークが雑音に埋もれ、大幅に S/N 比が低下することが分かる。

6. 時間ゲート法による測定レンジの拡大[13]

前節で、変調振幅 Δf が一定であれば、BOCDR の空間分解能と測定レンジの比も一定であると述べた。実験では、その比は 580 程度であった(228 m / 40 cm あるいは 7.6 m / 13 mm)。このままでは、大型構造物の診断に必要な km オーダの測定レンジを持たせた場合の BOCDR の空間分解能は 1.7 m 以上となり[14]、従来の BOTDR(分解能 1 m 程度)よりも劣ると言わざるを得ない。そこで本節では、この問題を打破すべく、「時間ゲート法」による km オーダの測定レンジと 1 m 以下の空間分解能の両立について述べる。

従来は測定ファイバ中に複数の相関ピークが立つことは許されなかった。しかし、**複数の相関ピークの中から特定のピークだけを時間領域で選択**することができれば、測定レンジを延伸できる。これを可能にするのが、時間ゲート法である。その概念図を図 13 に示す。まず、ポンプ光を強度変調器によってパルス状にする。そのパルス幅 t_w を相関ピーク間隔に等しく、

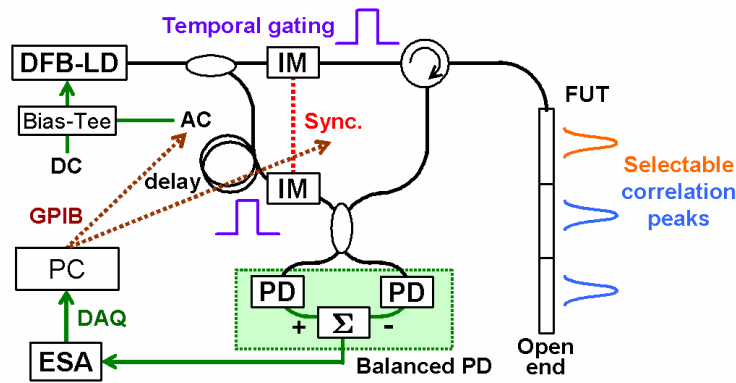


図 13. BOCDR における時間ゲート法 の概念図

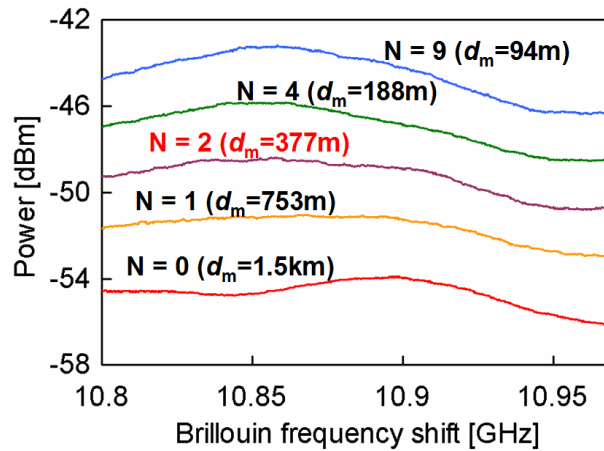


図 14. 時間ゲート法を用いずに複数の相関ピークを測定ファイバ内に立てたときの BGS。測定ファイバの長さは 1 km であり、 d_m は相関ピークの間隔、 N は測定ファイバ中の不要なピークの数を表す。

$$t_w = \frac{1}{2f_m} \quad (3)$$

と設定することで、各相関ピークからの反射光を時間的に分解することができる。また、測定ファイバのある特定部分からの反射情報が他の部分からのそれと重ならないようにするため、パルス間距離は測定ファイバの全長の 2 倍に等しく設定する。さらに、特定の相関ピークからの反射光が戻るタイミングで、同様のパルス変調(t_w)を施した参照光とビートさせることで、複数の相関ピークにおける反射信号から特定のピークにおける信号のみを選択することが可能になる。

まず、時間ゲート法を用いずに測定ファイバ内に複数の相関ピークを立てた際の不具合を確認した。測定ファイバとして全長 1 km の SMF を使い、開放端付近 3 m の領域(990 – 993 m)に歪をかけた。また、光源の変調周波数 f_m および変調振幅 Δf を適宜調整し、常に空間分解能を 2.6 m に保った。測定レンジに相当する相関ピークの間隔は、1.5 km、753 m、377 m、188 m、94 m に設定した。これは、1 km の測定ファイバ内に不要な相関ピークがそれぞれ 0、1、2、4、9 個ある場合に相当する。それぞれの場合における BGS を図 14 に示す。不要な相関ピークが無い場合には、10.9 GHz 付近に印加した歪に対応するピークが現れている。しかし、不要なピークが 1 つあるときは、ゼロ歪に対応する 10.85 GHz 付近のピークと重ね合わさり、歪測定が困難になる。さ

らに不要な相関ピークの数を増加させると、10.85 GHz 付近のピークが更に顕著になり、10.9 GHz 付近のピークが完全に埋もれてしまう。このように、時間ゲート法を用いずに複数の相関ピークを測定ファイバ内に立てることはできないことが確認された。

次に、時間ゲート法の動作の確認実験を行った。比較のため、時間ゲート法を用いない場合の実験で不要な相関ピークが2個あるときと同じ条件を設定した。すなわち、測定ファイバは全長 1 km の SMF とし、同様の領域(990 – 993 m)に歪をかけた。光源の変調周波数 f_m は 276.1 kHz、変調振幅 Δf は 1.4 GHz に設定した。このときの理論分解能は 2.6 m、相関ピーク間隔は 377 m である(測定ファイバ中に3つの相関ピークが存在している)。この条件の下、各相関ピークを選択したときの歪印加前後の BGS の変化を図 15(a)–(c)に示す。(a)および(b)では歪を印加した箇所以外の相関ピークを選択しているため、歪の印加前後で BGS はほとんど変化していない。これに対し(c)では、歪を印加した箇所にある相関ピークを選択しているため、歪印加前後で BGS のピークがシフトしている。以上から、時間ゲート法によって特定のピークが正しく選択できたと言える。

さらに、時間ゲート法を施した状態で、開放端付近 90 cm の領域(990 – 990.9 m)に 0.2% の歪をかけ、空間分解能 66 cm (変調振幅 Δf は 5.4 GHz)での歪分布測定を実際に行ったのが、図 16(a)および(b)である。90cm の歪が正しく検出できている。このように、km オーダの測定レンジと 1 m 以下の空間分解能を両立させることに成功した。

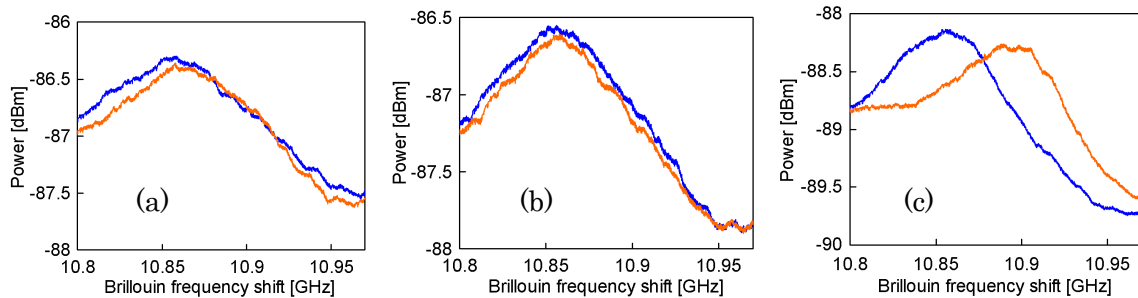


図 15. 各相関ピークを選択したときの、歪印加前(青色)および後(橙色)の BGS。サーキュレータ側から数えて、(a) 1 番目、(b) 2 番目、(c) 3 番目の相関ピーク。歪印加区間は、3 番目の相関ピーク付近に固定した。

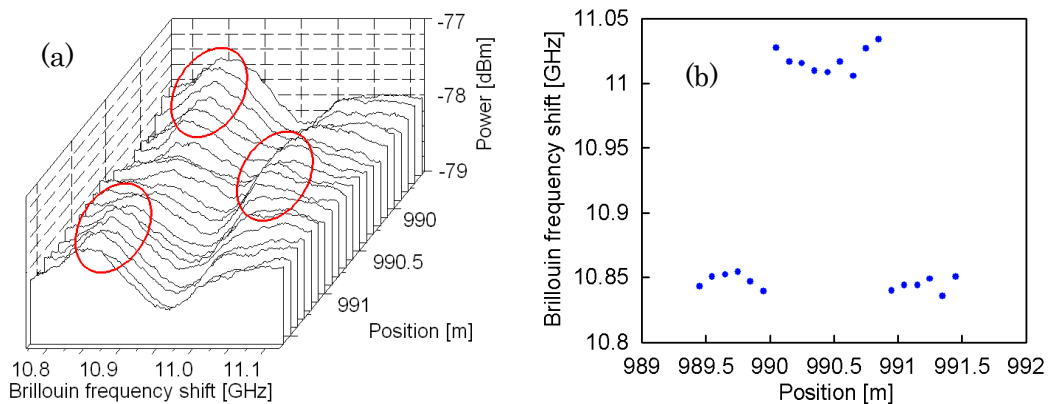


図 16. km オーダの測定レンジ、空間分解能 66 cm で 90 cm の歪を検出したときの分布測定結果。(a) BGS の分布、(b) BFS の分布。サンプリングレートは 0.02s/point とした。

7. 結論

本論文では、連続光の相関制御に基づく片端入射型の新たな歪分布測定技術、ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ(BOCDR)を提案した。まず、基本的な動作の確認実験を行い、40 cm の空間分解能と、従来技術では不可能であった 50 Hz のサンプリングレートを得た。次に、空間分解能の限界に挑戦し、歪測定リフレクトメトリとして世界記録となる 13 mm という値を得た。また、BOCDR 特有の雑音や、空間分解能と測定レンジのトレードオフの問題について考察した。さらに、時間ゲート法を用いてその問題を打破し、km オーダの測定レンジと 66 cm の空間分解能を両立させた。以上のように、BOCDR は、

- ① 片端からの光入射で診断が可能
- ② 測定点へのランダムアクセスが可能
- ③ 数 10 Hz の高いサンプリングレート(リアルタイム測定が可能)
- ④ cm オーダの高い空間分解能
- ⑤ km オーダの長い測定レンジ

という、光ファイバ神経網に要求される種々の特長を併せ持つ。

今後は、BOCDR の更なる性能向上を目指し、光源の変調振幅の上限を撤廃する機構を考案・実装する予定である。また、時間ゲート法以外の手法による測定レンジの延伸や、偏波の影響の抑制、アポダイゼーション技術の導入、kHz オーダのサンプリングレートの実現、さらには、センシング以外の用途への応用までをすでに具体的に検討している。

近い将来、本技術が実用化され、人類の日常生活の安全性向上に貢献できる日が来ることを願っている。

謝辞

本研究を行うに当たり、日々ご指導頂いている東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻の保立和夫教授、何祖源准教授、および、鄒衛文博士に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K. Hotate, *Opt. Fiber Technol.* **3**, 356 (1997).
- [2] T. Horiguchi *et al*, *J. Lightw. Technol.* **7**, 1170 (1989).
- [3] K. Hotate *et al*, *IEICE Trans. Electron.* **E83-C**, 405 (2000).
- [4] T. Kurashima *et al*, *IEICE Trans. Commun.* **E76-B**, 382 (1993).
- [5] A. Fellay *et al*, *Proc. OFS-12*, 324 (1997).
- [6] 水野, 何, 保立, 情報通信学会ソサイエティ大会 **B-13-9**, Sept. 2007.
- [7] Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, *Proc. LST-40*, 141-146, Dec. 2007.
- [8] Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, *OFS-19*, **7004-122**, Apr. 2008, to be presented.
- [9] 保立, 何, 水野, 「光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法」特願 2007-316440.
- [10] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, California, 1995).
- [11] 水野, 何, 保立, 情報通信学会総合大会 **B-13-23**, Mar. 2008.
- [12] Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, *CLEO/QELS 2008*, **CMZ2**, May 2008, to be presented.
- [13] Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, *LST-41*, June 2008, submitted.
- [14] 水野, 何, 保立, '08 春 応物 **27a-ZQ-5**, Mar. 2008.